

青藏高原研究经典文献目录

(第一版)

说明: 为了长远培养从事青藏高原地球科学领域研究的青年人才队伍, 拓宽研究生的学术视野和科学眼界, 针对青藏高原研究所自然地理学、地图学与地理信息系统、构造地质学、矿物学-岩石学-矿床学、第四纪地质学、大气物理学与大气环境、生态学、固体地球物理学、考古学等 9 个博士学位授予学科点的研究生培养, 青藏所组织研究所和国内相关专家, 经过 1 年半时间对青藏高原相关研究领域研究进展文献做了梳理, 形成研究所的“青藏高原研究经典文献目录”, 并请学术带头人对遴选的文献做了注解, 方便研究生快速阅读和掌握相关(特别是非主攻专业)的研究进展。经过院士专家通讯评审和现场咨询, 最后遴选出 115 篇“青藏高原研究经典文献目录”, 并遴选出延伸阅读文献。现正式发布, 供国内相关单位从事青藏高原研究的学者和研究生参考。

一、特提斯演化及大陆碰撞^[1-12]

1. 朱日祥, 赵盼, 赵亮, **2021**. 新特提斯洋演化与动力过程. *中国科学: 地球科学*, 52(1): 1-25. 吴福元, 万博, 赵亮, 肖文交, 朱日祥, **2020**. 特提斯地球动力学. *岩石学报*, 36: 1627-1674; 注解: 论述了原、古、新特提斯洋南北纵向上演化历史、资环效应, 以及在地球演化中的意义; 瞄准新特提斯洋东西横向上的差异性, 提出地中海多洋盆扩张-俯冲, 形成线性阿尔卑斯山, 中东简单的北向俯冲-碰撞, 形成伊朗高原, 西藏高原多块体复杂碰撞, 形成青藏高原; 提出俯冲板片拖拽力是大洋俯冲和板块漂移的主驱动力。
2. Kapp, P., DeCelles, P.G., **2019**. Mesozoic-Cenozoic geological evolution of the Himalayan-Tibetan orogen and working tectonic hypotheses. *American Journal of Science*, 319: 159-254. 注解: 通过综合分析, 将三叠纪以来古—中—新特提斯洋演化纳入统一的动力学模型内, 提出北向俯冲诱导多期南向海沟后撤, 造成上盘大陆边缘伸展, 因此提出晚白垩世日喀则大陆边缘弧向南裂解形成弧后盆地, 并最终造成印度-亚洲多阶段碰撞的格局。45Ma 后的演化是印度岩石圈俯冲及亚洲岩石圈拆沉共同作用的结果。
3. Meng, J., Gilder, S.A., Wang, C., Coe, R.S., Tan, X., Zhao, X., He, K., **2019**. Defining the limits of Greater India. *Geophysical Research Letters*, 46: 4182-4191. 注解: 利用古地磁学定量重建了白垩纪 2000-2700 km 宽的大印度岩石圈。通过经线大圆弧与白垩纪古纬度交汇的新方法重建大印度岩石圈, 避免了传统方法的多解性, 并证明了印度板块存在大规模逆时针旋转。定量恢复的大印度北缘形态决定了现今印度-亚洲板块边界形态, 5×10^6 km² 的大印度岩石圈俯冲至亚洲大陆之下。
4. van Hinsbergen, D. J. J., Lippert, P. C., Dupont-Nivet, G., McQuarrie, N., Doubrovine, P. V., Spakman, W., Torsvik, T.H., **2012**. Greater India Basin hypothesis and a two-stage Cenozoic collision between India and Asia. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(20): 7659-7664. 注解: 系统总结了印度-亚洲大陆板块汇聚量、地壳缩短量、古地磁数据三者之间的“矛盾”。对大印度北缘和亚洲南缘 2012 年之前的古地磁结果进行了完整的综述和评价, 获得大印度早白垩世裂解以来古纬度演化曲线, 基于此提出了“大印度洋盆”的假说。随后, 学术界围绕大印度大小、岩石圈性质等科学问题开展了大量的研究和激烈的争论。
5. Ali, J.R., Aitchison, J.C., **2005**. Greater India. *Earth Science Reviews*, 72(3-4): 169-188. 注解: 系统总结了大印度原型概念的提出, 以及 30 余种重建模式的争论。通过对澳大利亚西缘深海地形分析, 将 Wallaby-Zenith 断裂带作为大印度的转换断层型板块边界, 认为大印度中-东部范围~950 km。
6. Ding, L., Kapp, P., Wan, X., **2005**. Paleocene-Eocene record of ophiolite obduction and initial India-

- Asia collision, south-central Tibet. **Tectonics**, 24(3): TC3001. 注解: 印度与欧亚板块早期碰撞的新模式。建立了雅鲁藏布江前陆盆地系统, 揭示了印度—欧亚大陆首先于~65 Ma 在中部碰撞, 随后向两侧穿时关闭, 这一新模式挑战了 55 Ma 开始自西向东穿时碰撞的传统观点, 为认识高原隆升提供了重要初始条件。
7. Yin, A., Harrison, T.M., 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**, 28: 211-280. 注解: 系统总结了喜马拉雅—青藏高原造山带古生代—新生代的全时间尺度演化历史, 详细描述了各块体从冈瓦纳分离到拼贴在亚洲南缘的聚合过程, 强调古生代-中生代的先存构造强烈影响新生代造山带的变形。印度—亚洲板块碰撞后, 从特提斯喜马拉雅到昆仑山-祁连山南北方向的地壳缩短形成了青藏高原。
 8. 钟大赉等著, 1998. 滇川西部古特提斯造山带. 北京: 科学出版社. 注解: 运用地质、地球化学、地球物理综合方法, 提出我国西南及邻区的古特提斯是由多洋盆、多陆块、多岛弧组成的多岛洋格局, 建立了东古特提斯构造格架和演化模型, 提出新生代正向和斜向碰撞构造三维调节模式; 新生代变形和隆升是一个近同时、多阶段、非均变过程。
 9. Rowley, D.B., 1996. Age of initiation of collision between India and Asia: A review of stratigraphic data. **Earth and Planetary Science Letters**, 145: 1-13. 注解: 根据西部 Zaskar, 中部岗巴-定日以及东部印缅山脉的前陆盆地沉积特征, 结合高压变质岩等数据, 提出~52Ma 时印度—欧亚板块在西部发生碰撞, 随后向东穿时性碰撞。这是西方学者在印度—欧亚板块碰撞时间方面的代表性观点。
 10. Powell, C.M., Roots, S.R., Veevers, J.J., 1988. Pre-breakup continental extension in eastern Gondwanaland and the early opening of the eastern Indian Ocean. **Tectonophysics**, 155: 261-283. 注解: 利用测深学、地震学与古地磁学数据, 系统地重建了东冈瓦纳大陆及其裂解过程, 恢复了印度板块逆时针旋转和大印度 Cape Range Fracture Zone 东部板块边界, 被学术界广泛接受。
 11. Chang, C.F., Chen, N.S., Coward, M.P., Deng, W.M., Dewey, J.F., Gansser, A., Harris, N.B.W., Jin, C.W., Kidd, W.S.F., Leeder, M.R., Li, H.A., Lin, J.L., Liu, C.J., Mei, H.J., Molnar, P., Pan, Y., Pan, Y.S., Pearce, J.A., Shackleton, R.M., Smith, A.B., Sun, Y.Y., Ward, M., Watts, D.R., Xu, J.T., Xu, R.H., Yin, J.X., Zhang, Y.Q., 1986. Preliminary conclusions of the Royal-Society and Academia-Sinica 1985 geotraverse of Tibet. **Nature**, 323(6088): 501-507. 注解: 常先生第一个将板块构造引入青藏高原, 于 1973 年建立了高原由多块体组成的构造框架。这篇 Nature 论文是 73 年文章的延续, 在中英合作基础上, 系统提出了裂解自冈瓦纳的多个微陆块依次拼贴在昆仑地体南部; 提出 38Ma 以来印度板块持续向北运动, 导致高原内部强烈变形, 形成巨厚地壳。
 12. Şengör, A.M.C., 1984. The Cimmeride Orogenic System and the Tectonics of Eurasia. **Geological Society of American Special Papers**, 195: 1-74. Şengör, A.M.C., 1979. Mid-Mesozoic closure of Permo-Triassic Tethys and its implications. **Nature**, 279:590-593. 注解: 通过梳理复杂纷乱的特提斯概念和证据, 提出晚古生代以来存在两个大洋: 古特提斯洋和新特提斯洋, 将古、新特提斯洋之间一系列来自冈瓦纳大陆的微陆块命名为基梅里陆块, 建立了当时鲜为人知的古特提斯洋闭合历史, 确立了特提斯域演化的基本框架。

扩展文献^[1-25]

1. Hu, X., Garzanti, E., Wang, J., An, W., Webb, A., 2016. The timing of India-Asia collision onset-Facts, theories, controversies. **Earth-Science Reviews**, 160: 264-299. 注解: 通过系统的年代学和物源分析, 将萨嘎地区 59Ma 时印度到亚洲的源区转变解释为印度-欧亚大陆初始碰撞。
2. Hu, X., Garzanti, E., Morre, T., Raffi, T., 2015. Direct stratigraphic dating of India-Asia collision onset at the Selandian (middle Paleocene, 59±1 Ma). **Geology**, 43 (10): 859-862. 注解: 系统回顾了用于限定大陆碰撞时限的研究方法。

3. Jagoutz, O., Royden, L., Holt, A., Becker, T., **2015**. Anomalously fast convergence of India and Eurasia caused by double subduction. **Nature Geoscience**, 8: 475-478. 注解: 提出新特提斯洋内存在两条平行的俯冲带, 他们产生的拉力导致了印度和欧亚大陆之间异常快速的汇聚速率。
4. DeCelles, P.G., Kapp, P., Gehrels, G., Ding, L. **2014**. Paleocene-Eocene foreland basin evolution in the Himalaya of southern Tibet and Nepal: Implications for the age of initial India-Asia collision. **Tectonics**, 33: 824-849. 注解: 通过系统的沉积学、年代学和物源分析, 将萨嘎地区 60-59 Ma 时印度到亚洲的源区转变解释为印度-欧亚大陆初始碰撞。并结合岗巴-定日, 低喜马拉雅以及希瓦里克的前陆盆地数据, 提出了前陆盆地迁移规律。
5. Zhang, Y.C., Shi, G., Shen, S.Z., **2013**. A review of Permian stratigraphy, palaeobiogeography and palaeogeography of the Qinghai-Tibet Plateau. **Gondwana Research**, 24 (1): 55-76. 注解: 通过岩石地层以及古生物地层的对比, 系统分析了二叠纪青藏高原的古生物地理和古地理。
6. Cai, F.L., Ding, L., Leary, L., Wang, H.Q., Xu, Q., Zhang, L.Y., Yue, Y.H., **2012**. Tectonostratigraphy and provenance of an accretionary complex within the Yarlung-Zangpo suture zone, southern Tibet: Insights into subduction-accretion processes in the Neo-Tethys. **Tectonophysics**, 574: 181-192. 注解: 国际上较早地将碎屑锆石方法应用到缝合带研究中, 通过系统填图, 提出雅鲁藏布江缝合带代表一期沿着拉萨地体南缘的俯冲, 未发现洋内俯冲证据。
7. Wang, E., Kirby, E., van Soest, M., Xu, G., Shi, X., Kamp, P., Hodges, K., **2012**. Two-phase growth of high topography in eastern Tibet during the Cenozoic. **Nature Geoscience**, 5: 640-645. 注解: 对藏东龙门山地区的低温热年代学研究表明, 新生代经历了两次快速隆升, 30-25Ma 以及 15-10Ma, 暗示沿着断层发生的地壳增厚要明显老于下地壳流所预测的地壳增厚时间。
8. Cai, F.L., Ding, L., Yue, Y.H., **2011**. Provenance analysis of upper Cretaceous strata in the Tethys Himalaya, southern Tibet: implications for timing of India-Asia collision. **Earth and Planetary Science Letters**, 305: 195-206. 注解: 在高原内部运用物源区转换的方法揭示印度-欧亚大陆碰撞发生在白垩纪/古新世之交。
9. Gehrels, G., Kapp, P., DeCelles, P.G., Pullen, A., Blakey, R., Weislogel, A., Ding, L., Guynn, J., Martin, A., McQuarrie, N., Yin, A., **2011**. Detrital zircon geochronology of pre-Tertiary strata in the Tibetan-Himalayan orogen. **Tectonics**, 30. 注解: 通过对喜马拉雅地体、拉萨地体、羌塘地体、松潘-甘孜地体、以及南山-祁连山-阿尔金山等地体的碎屑锆石分析, 揭示了 540 Ma 以来的青藏高原的构造演化历史。
10. Zhu, D.C., Zhao, Z.D., Niu, Y., Mo, X., Chung, S., Hou, Z.Q., Wang, L.Q., Wu, F., **2011**. The Lhasa Terrane: Record of a microcontinent and its histories of drift and growth. **Earth and Planetary Science Letters**, 301 (1-2): 241-255. 注解: 对拉萨地体进行了锆石年代学和 Hf 同位素研究, 提出拉萨地体中部具有古老的基底, 而南北两侧发育的新生地壳则是南侧新特提斯洋向北俯冲以及北侧班公-怒江洋向南俯冲的结果。
11. Najman, Y., Appel, E., Boudagher-Fadel, M., Bown, P., Carter, A., **2010**. Timing of India-Asia collision: Geological, biostratigraphic, and palaeomagnetic constraints. **Journal of Geophysical Research- Solid Earth**, 115 (B12). 注解: 对比了最高海相层、物源转变以及古地磁等方法, 提出印度-欧亚大陆在始新世早期开始碰撞, 认为洋内俯冲模型所提出的 35Ma 大陆碰撞是不合理的。
12. Pullen, A., Kapp, P., Gehrels, G., Vervoort, J., Ding, L., **2008**. Triassic continental subduction in central Tibet and Mediterranean-style closure of the Paleo-Tethys Ocean. **Geology**, 36: 351-354. 注解: 通过对羌塘变质带的榴辉岩和蓝片岩研究, 认为与秦岭-大别超高压变质时代一致, 并将高压变质归因于羌塘和古特提斯弧地体之间的碰撞。这次碰撞减缓了劳亚大陆和冈瓦纳大陆之间的汇聚, 并在残余的古特提斯洋中开始了地中海式的俯冲带后撤和弧后盆地发展。
13. Aitchison, J.C., Ali, J.R., Davis, A., **2007**. When and where did India and Asia collide? **Journal of**

- Geophysical Research- Solid Earth**, 112: B05423. 注解: 洋内俯冲的代表性模型, 提出 55Ma 的事件是洋内岛弧与大陆碰撞的结果, 真正的印度-欧亚大陆碰撞发生在 34Ma。
14. DeCelles, P.G., Quade, J., Kapp, P., Fan, M., Dettman, D., Ding, L., 2007. High and dry in central Tibet during the Late Oligocene. **Earth and Planetary Science Letters**, 253: 389-401. 注解: 对西藏中部尼玛盆地的现代和精确年代的古土壤碳酸盐进行的稳定同位素分析表明, 26Ma 时, 气候干旱, 古海拔高 (4.5-5km) 已经接近现今海拔。
 15. Kapp, P., DeCelles, P.G., Gehrels, G., Heizler, M., Ding, L., 2007. Geological records of the Lhasa-Qiangtang and Indo-Asian collisions in the Nima area of central Tibet. **Geological Society of America Bulletin**, 119: 917-933. 注解: 对西藏中部班公-怒江缝合带尼玛地区的地质和年代学调查, 揭示了中白垩纪-第三纪中期的挤压变形历史以及沉积记录, 并将其归结于早期的拉萨-羌塘碰撞以及晚期的印度-亚洲碰撞。
 16. Najman, Y. 2006. The detrital record of orogenesis: A review of approaches and techniques used in the Himalayan sedimentary basins. **Earth-Science Reviews**, 74 (1-2): 1-72. 注解: 本文以喜马拉雅造山相关的缝合带盆地、前陆盆地, 残留海盆地以及深海扇沉积为例, 综述了多种不同的物源分析技术, 以及如何利用沉积记录确定造山运动, 约束大陆变形机制、剥蚀速率以及古排水系统。
 17. Guynn, J., Kapp, P., Pullen, A., Heizler, M., Gehrels, G., Ding, L., 2006. Tibetan basement rocks near Amdo reveal “missing” Mesozoic tectonism along the Bangong suture, central Tibet. **Geology**, 34 (6): 505-508. 注解: 通过对安多微陆块岩浆岩和变质岩的年代学研究, 发现了一个“消失的”的与办公怒江洋俯冲相关的中生代大陆弧。
 18. Yin, A., 2006. Cenozoic tectonic evolution of the Himalayan orogen as constrained by along-strike variation of structural geometry, exhumation history, and foreland sedimentation. **Earth-Science Reviews**, 76: 1-131. 注解: 强调了沿走向变化的喜马拉雅地质格架在喜马拉雅剥露、变质和前陆沉积方面所起的作用。文章的主要目的是阐明占据造山带核部的大喜马拉雅结晶岩带 (GHC) 的侵位历史。
 19. Kapp, P., Yin, A., Harrison, T.M., Ding, L., 2005. Cretaceous-Tertiary shortening, basin development, and volcanism in central Tibet. **Geological Society of America Bulletin**, 117: 865-878. 注解: 通过羌塘西部中央隆起以及班公-怒江缝合带的构造填图, 表明西藏中部白垩纪中期已经开始了重要的地壳增厚作用。
 20. DeCelles, P.G., Gehrels, G., Najman, Y., Martin, A., Carter, A., Garzanti, E., 2004. Detrital geochronology and geochemistry of Cretaceous- Early Miocene strata of Nepal: implications for timing and diachroneity of initial Himalayan orogenesis. **Earth and Planetary Science Letters**, 227 (3-4): 313-330. 注解: 本文报道了尼泊尔中部低喜马拉雅白垩纪-中新世地层的碎屑锆石和 Nd 同位素等物源分析, 揭示了喜马拉雅早期造山作用的时间和穿时性。
 21. Zhang P.Z., Shen, Z.K., Wang, M., Gan, W.J., Burgmann, R., Molnar, P., Wang, Q., Niu, Z., Sun, J., Wu, J., Sun, H., You, X., 2004. Continuous deformation of the Tibetan Plateau from global positioning system data. **Geology**, 32 (9): 809-812. 注解: GPS 观测表明, 高原现今的构造可以用连续变形来描述, 而用刚性块体的运动来描述与其之间的断层滑动有关的弹性应变, 不能与速度场相匹配。
 22. Kapp, P., Yin, A., Manning, C.E., Murphy, M., Harrison, T.M., Spurlin, M., Ding, L., Deng, X., Wu, C., 2000. Blueschist-bearing metamorphic core complexes in the Qiangtang block reveal deep crustal structure of northern Tibet. **Geology**, 28: 19-22. 注解: 通过对羌塘中部蓝片岩的研究发现, 金沙江含蓝片岩混杂岩在随着古特提洋向南俯冲过程中底垫到羌塘地体之下, 随后在拆离断层作用下剥露到地表, 该模型预测藏北大部分地壳由混杂岩组成。
 23. Murphy, M., Yin, A., Harrison, T.M., Durr, S.B., Ryerson, F.J., Kidd, W.S.F., 1997. Did the Indo-Asian collision alone create the Tibetan plateau? . **Geology**, 25: 719-722. 注解: 通过对拉萨地体构造填图

和年代学研究,发现拉萨地体的主要缩短发生在早白垩世,据此提出在印度-欧亚大陆碰撞前,西藏南部可能已经被抬升到 3-4km 的海拔。

24. Tapponnier, P., Peltzer, G., Dain, A., Armijo, R., Cobbold, P., **1982**. Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticine. **Geology**, 10: 611-616. 注解: 通过物理模拟,提出了著名的侧向挤出模型来解释亚洲的主要走滑变形系统。
25. Molnar, P., Tapponnier, P., **1975**. Cenozoic Tectonics of Asia: Effects of a Continental Collision: Features of recent continental tectonics in Asia can be interpreted as results of the India-Eurasia collision. **Science**, 189: 419-426. 注解: 系统论述了亚洲,特别是青藏高原地区的构造、地震、海底扩张速率等证据,提出亚洲大部分大尺度的构造均是印度-欧亚大陆碰撞的结果,它不仅创造了喜马拉雅山,而且激活了缝合带以北 1000km 的古老造山带,引起了走滑构造。

二、高原深部结构与浅部响应^[1-10]

1. Zilio, L.D., Hetenyi, G., Hubbard, J., Bollinger, L., **2021**. Building the Himalaya from tectonic to earthquake scales. **Nature Reviews Earth and Environment**, 2: 251-268. 注解: 以综述形式报道了前人关于喜马拉雅山脉长期构造运动过程和短期地震活动之间相互作用的研究结果,喜马拉雅山脉的地形起伏主要取决于主喜马拉雅逆冲断裂的滑动特征,在短期(数十年)时间尺度上弹性应变通过主喜马拉雅逆冲断裂上发生大地震得到周期性释放;百万年尺度上的构造运动控制应力积累、构造分段、地震破裂程度和位置,并进而影响山脉的形成过程。
2. Bai, L., Klemperer, S.L., Mori, J., Karplus, M.S., Ding, L., Liu, H., Li, G., Song, B., Dhakal, S., **2019**. Lateral variation of the Main Himalayan Thrust controls the rupture length of the 2015 Gorkha earthquake in Nepal. **Science Advances**, 5: 1-7. 注解: 报道了 2015 年尼泊尔廓尔喀 7.8 级地震的震源参数和主喜马拉雅逆冲断裂几何形态的研究成果,使用近场观测波形数据确定的地震序列空间位置、断层面几何形态和震源区速度结构表明,印度大陆在喜马拉雅山中部沿着 5 度的平均倾角同时向北和向东俯冲加深;在加德满都盆地以西沿着俯冲方向存在低喜马拉雅斜坡构造,在余震区以东存在与印度板块基底隆起有关的障碍物;主喜马拉雅逆冲断裂的三维结构变化控制了尼泊尔大地震的破裂长度。
3. Gao, R., Lu, Z.W., Klemperer, S.L., Wang, H.Y., Dong, S.W., Li, W.H., Li, H.Q., **2016**. Crustal-scale duplexing beneath the Yarlung Zangbo suture in the western Himalaya. **Nature Geoscience**, 9(7): 555-560. 注解: 报道了印度大陆的俯冲方式和青藏高原地壳增厚模式的研究成果,喜马拉雅造山带西部横跨雅鲁藏布江缝合带(沿东经 81.5° 展布)的高分辨率深地震反射剖面探测结果表明,随着印度板块的北向俯冲,上地壳物质从主喜马拉雅逆冲断裂底部向上覆的喜马拉雅构造体转移,导致印度地壳减薄、喜马拉雅地壳增厚,并在上覆喜马拉雅地壳内形成多重构造叠置,是喜马拉雅地壳增厚的主要机制。
4. 滕吉文, 司芾, 王谦身, 张永谦, 杨辉, **2015**. 青藏高原地球科学研究中的核心问题与理念的厘定. **地球物理学报**, 58(1): 103-124. 注解: 针对科技界曾提出的青藏高原地球科学研究的六大论点,在不断理解和深化研究的基点上提出了质疑,并基于新的认识提出了新的论点与论据,且在科学理念上对重力均衡、双倍地壳厚度等问题给予了重新厘定。
5. Zhao, J.M., Yuan, X.H., Liu, H.B., Kumar, P., Pei, S.P., Kind, R., Zhang, Z.J., Teng, J.W., Ding, L., Gao, X., Xu, Q., Wang, W., **2010**. The boundary between the Indian and Asian tectonic plates below Tibet. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, 107(25): 11229-11233. 注解: 报道了印度和欧亚板块在青藏高原之下俯冲边界的研究成果,三条高质量的南北向地震剖面观测表明,印度-亚洲板块的碰撞模型在东西方向上发生变化;在印度与亚洲板块之间存在特殊的岩石圈区域,具有高温、低速、和较强的地震各向异性;青藏高原的地壳缩短在高原南部通过印度地壳向亚洲地壳之下俯冲实现调节,在高原北部被均匀的地壳增厚所吸收。

6. Nabelek, J., Hetenyi, G., Vergne, J., Sapkota, S., Kafle, B., Jiang, M., Su, H.P., Chen, J., Huang, B.S., Hi-CLIMB Team, **2009**. Underplating in the Himalaya-Tibet collision zone revealed by the Hi-CLIMB experiment. *Science*, 325: 1371-1374. 注解: 报道了青藏高原中南部岩石圈结构和喜马拉雅山脉的形成模式, 对 800 公里宽频带密集地震台阵波形进行接收函数分析, 获得了从尼泊尔到藏南 31°N 附近的南北方向主喜马拉雅逆冲断裂的俯冲结构; 壳幔界面存在各向异性, 在界面形成过程中发生了剪切作用, 导致壳幔发生解耦, 是西藏岩石圈地壳增厚的主要机制。
7. Tilmann, F., Ni, J., INDEPTH III Seismic Team., **2003**. Seismic imaging of the downwelling Indian lithosphere beneath central Tibet. *Science*, 300(5624): 1424-1427. 注解: 西藏中部剖面的上地幔地震层析成像结果显示, 班公-怒江缝合带以南 100 到 400 公里深度存在一个近垂直的高速异常区, 代表向下俯冲的印度地幔岩石圈, 长度相当于喜马拉雅山脉和西藏地区岩石圈缩短的总量, 同时该地区以北存在软流圈上涌, 是西藏中北部地幔高温异常的主要成因。
8. Wang, Q., Zhang, P.Z., Freymueller, J.T., Bilham, R., Larson, K.M., Lai, X.A., You, X.Z., Niu, Z.J., Wu, J.C., Li, Y.X., Liu, J.N., Yang, Z.Q., and Chen, Q.Z., **2001**. Present-day crustal deformation in continental China constrained by Global Positioning System measurements. *Science*, 294: 574-577. 注解: 全球卫星定位系统观测结果表明, 地壳缩短吸收了印度对欧亚大陆的大部分挤压变形。青藏高原及其边缘的变形吸收了印度和欧亚板块之间 90% 以上的相对运动。相对于印度和欧亚大陆, 青藏高原主体正在不断向东挤出, 围绕东喜马拉雅构造结发生顺时针旋转。
9. Nelson, K. D., Zhao, W., Brown, L. D., Kuo, J., Che, J.K., Liu, X., Klemperer, S. L., Makovsky, Y., Meissner, R., Mechie, J., Kind, R., Wenzel, F., Ni, J., Nabelek, J., Chen, L.S., Tan, H.D., Wei, W., Jones, A. G., Booker, J., Unsworth, M., Kidd, W. S. F., Hauck, M., Alsdorf, D., Ross, A., Cogan, M., Wu, C., Sandvol, E., Edwards, M., **1996**. Partially molten middle crust beneath southern Tibet: Synthesis of Project INDEPTH results. *Science*, 274: 1684-1688. 注解: 地震、大地电磁等地球物理观测表明, 在西藏南部存在一个部分熔融的中地壳, 揭示了印度板块正在俯冲的地壳像活塞一样, 往北推挤取代了这个部分熔融的中地壳。喜马拉雅山晚第三纪的演化本质上是这个部分熔融的中地壳往南挤出的结果。
10. Zhao, W.J., Nelson, K.D., Project INDEPTH Team, **1993**. Deep seismic-reflection evidence for continental underthrusting beneath southern Tibet. *Nature*, 366(6455): 557-559. 注解: 使用深地震反射剖面成像首次获得了青藏高原地区的地壳精细结构, 特提雅喜马拉雅地区 100 公里长的地震剖面揭示了明显的中地壳反射界面, 代表印度板块在藏南下方北向俯冲的边界断裂-主喜马拉雅逆冲断裂, 表明西藏南部的地壳增厚是印度板块在特提雅喜马拉雅山脉底部大范围北向俯冲的结果。

扩展文献^[1-35]

1. Klemperer, S.L., Zhao, P., Whyte, C.J., Darrach, T.H., Crossey, L.J., Karlstrom, K.E., Liu, T., Winn, C., Hilton, D.R., Ding, L., **2022**. Limited underthrusting of India below Tibet: $^3\text{He}/^4\text{He}$ analysis of thermal springs locates the mantle suture in continental collision. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 119(12), e2113877119. 注解: 报道了采用氦同位素揭示印度板块在青藏高原下方俯冲模式的研究结果, 利用高原南部温泉采样获得的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 同位素比值分析了流体的壳幔来源, 限定了印度-欧亚板块之间地幔缝合线的位置和印度板块俯冲的北边界, 认为印度板块平俯冲至欧亚板块地壳之下 80km 深度, 在地幔缝合线处向深部发生高角度俯冲, 自西向东俯冲倾角逐渐增大, 推测印度冷的岩石圈地幔俯冲到高原之下地幔深部, 并与热的软流圈地幔在高原下方发生叠置。
2. Bai, L., Jiang, Y., Mori, J., **2022**. Source processes associated with the 2021 glacier collapse in the Yarlung Tsangpo Grand Canyon, southeastern Tibetan Plateau. *Landslides*, doi: 10.1007/s10346-022-

- 02002-6. 注释：2021年3月22日西藏自治区林芝市加拉村色东普沟发生冰崩，导致雅鲁藏布江下游水位上涨十余米。该研究通过在堵江点附近架设宽频带地震台站，对地震信号进行能量计算和受力过程反演等分析，发现冰崩堵江事件的发生过程包括三个阶段：冰川上部海拔高度约为6公里的冰川物质发生整体崩塌，冰崩体强烈铲刮侵蚀色东普沟的冰碛物发生加速、减速和稳速滑移，碎屑物冲出沟口堆积形成堵江坝。
3. Shi, Z.X., Gao, R., Lu, Z.W., Li, W.H., Li, H.Q., Huang, X.F., Liang, H.D., 2022. Bidirectional subduction of the Bangong-Nujiang ocean revealed by deep-crustal seismic reflection profile. *Tectonophysics*, 837. 注解：利用深地震反射剖面探测技术，揭示横过班公湖-怒江洋缝合带的深部地壳精细结构（沿 88.5°E 展布），发现拉萨地体内部存在被新生代构造事件错断的中生代大洋向北俯冲痕迹，羌塘地体南缘存在大洋向北俯冲引发的壳内变形遗迹，从而判定班公湖怒江洋在中生代以双向俯冲形式消亡。
 4. Cook, K.L., Rekapalli, R., Dietze, M., Pilz, M., Cesca, S., Rao, N.P., Srinagesh, D., Paul, H., Metz, M., Mandal, P., Suresh, G., Cotton, F., Tiwari, V.M., Hovius, N., 2021. Detection and potential early warning of catastrophic flow events with regional seismic networks. *Science*, 374: 87-92. 注解：使用印度密集地震台网的数据，检测和跟踪了2021年2月7日在喜马拉雅山脉地区发生岩石滑坡导致洪水灾害的过程，提出了通过区域地震台站为极端碎屑流事件提供预警的可能性。认为地震监测系统对地质灾害的探测能力取决于事件发生的性质和台站的噪声水平，利用现有网络可以检测到100公里以内事件发生的不同阶段，并在事件开始后几分钟内发出下游洪水警报。
 5. Kufner, S.K., Kakar, N., Bezada, M., Bloch, W., Metzger, S., Yuan, X., Mechie, J., Ratschbacher, L., Murodkulov, S., Deng, Z., Schurr, B., 2021. The Hindu Kush slab break-off as revealed by deep structure and crustal deformation. *Nature Communications*, 12: 1685. 注解：报道了喜马拉雅西构造结大陆板块深俯冲结构的研究成果，近震和远震联合观测的有限频层析成像反演结果表明，在兴都库什地区印度板块岩石圈地壳发生深俯冲，俯冲地壳自西向东逐渐变薄变陡，沿着构造走向方向板块发生拆离；在印度地壳发生尖灭的位置岩石圈的拉伸速率达到最大，板块拆离过程主要取决于壳幔之间不同的耦合程度。
 6. Li, H.Q., Gao, R., Li, W.H., Carbonell, R., Yeliseti, S., Huang, X.F., Shi, Z.X., Lu, Z.W., 2021. The Mabja Dome Structure in Southern Tibet Revealed by Deep Seismic Reflection Data and Its Tectonic Implications. *Journal of Geophysical Research- Solid Earth*, 126(4). 注解：通过深地震反射剖面揭露了特提斯喜马拉雅带 Mabja 穹隆浅层地壳精细结构。研究表明，Mabja 穹隆下存在 10-15 千米深的剪切带和两个高速体，可能为榴辉岩相岩石或基性侵入岩。推测穹隆的形成可能是由碰撞引起的南北缩短所控制，中地壳岩石的逆冲堆积，导致了上地壳岩石的穹隆。
 7. Coudurier-Curveur, A., Tapponnier, P., Okal, E., Van der Woerd, J., Kali, E., Choudhury, S., Baruah, S., Etchebes, M. and Karakaş, Ç., 2020. A composite rupture model for the great 1950 Assam earthquake across the cusp of the East Himalayan Syntaxis. *Earth and Planetary Science Letters*, 531: 115928. 注释：1950年阿萨姆邦的 Mw=8.7 地震是有史以来最大的大陆地震，但其确切的震源和机制仍然存在争议。本文重新评价了余震和滑坡的空间分布，发现米什米山和阿博尔山地区有很多未知的地表破裂，是两个低倾角断层面同时发生破裂的结果。和尼泊尔地区类似，东喜马拉雅地区特大地震释放了大部分累积的震间缩短形变。
 8. Maurer, J.M., Schaefer, J.M., Russell, J.B., Rupper, S., Wangdi, N., Putnam, A.E., Young, N., 2020. Seismic observations, numerical modeling, and geomorphic analysis of a glacier lake outburst flood in the Himalayas. *Science Advances*, 6(38) :1-11. 注解：本文应用地震波形互相关方法远程跟踪了1994年喜马拉雅山脉东部地区冰湖溃决的演变过程，结合目击者报告、遥感卫星图像和下游水位观测数据进一步约束了冰湖溃决数值模型，表明实时地震监测系统可以有效提高冰湖溃决预警系统监测能力。

9. Shi, D.N., Klemperer, S.L., Shi, J.Y., Wu, Z.H., Zhao, W.J., 2020. Localized foundering of Indian lower crust in the India-Tibet collision zone. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, 117(40): 24742-24747. 注解: 报道了印度板块俯冲结构沿着构造走向方向的横向变化, 西藏南部东西向宽频带地震剖面观测表明, 在藏南两个地表裂谷带(桑日裂谷和申扎裂谷)下面印度板块发生撕裂和拆沉, 导致软流圈地幔物质上涌, 触发深源地震, 在碰撞带内同时发生“底垫(underplating)”和“拆沉(foundering)”两种不同的深部地质过程。
10. Zheng, T.Y., He Y.M., Ding, L., Jiang, M.M, Ai, Y.S., Mon, C.T., Hou. G.B., Sein, K., Thant, M., 2020. Direct structural evidence of Indian continental subduction beneath Myanmar. **Nature Communications**, 11: 1944. 注解: 报道了印度大陆在缅甸下方俯冲结构的研究结果, 密集的东西向地震剖面观测表明, 在上覆缅甸板块之下存在低角度东向倾斜的低速构造, 根据剪切波速度结构和低速层平均厚度可以判断其为印度大陆地壳, 东构造结地区的大规模旋转和走滑变形减弱了大陆俯冲的阻力, 印度大陆板块平缓俯冲到缅甸下方约 100 公里, 是大陆正向碰撞和侧向挤出共同作用的结果。
11. Mendoza, M.M., Ghosh, A., Karplus, M.S., Klemperer, S.L., Sapkota, S.N., Adhikari, L.B., Velasco, A., 2019. Duplex in the Main Himalayan Thrust illuminated by aftershocks of the 2015 Mw 7.8 Gorkha earthquake. **Nature Geoscience**, 12: 1018–1022. 注解: 根据 2015 年 Mw7.8 廓尔喀地震余震序列的空间分布, 揭示主喜马拉雅逆冲断裂系统的几何形态, 发现断裂由两个北倾的断层面组成, 与主喜马拉雅逆冲断裂一起构成叠瓦状双重构造。这种复式俯冲阻碍着板块的汇聚, 调节了断层的构造应力, 且与地表地质观测研究结果基本一致。
12. Pei, S.P., Niu, F.L., Ben-Zion, Y., Sun, Q., Liu, Y., Xue, X.T., Su, J.R., Shao, Z.G., 2019. Seismic velocity reduction and accelerated recovery due to earthquakes on the Longmenshan fault. **Nature Geoscience**, 12: 387-392. 注解: 报道了龙门山断裂带愈合和结构变化过程的研究成果, 时移地震层析成像从地震波走时数据获得的介质变化分析表明, 2008 年汶川大地震时同震波速降低, 震后地震波速度逐渐升高, 2013 年芦山地震的发生加速了汶川地震破裂段的恢复; 大地震之间的相互作用不仅是触发, 也能够促进前一个地震的愈合。
13. Huangfu P.P., Li Z.-H., Gerya T., Fan W.M., Zhang K.-J., Zhang H., Shi Y.L., 2018. Multi-terrane structure controls the contrasting lithospheric evolution beneath the western and central-eastern Tibetan plateau. **Nature Communications**, 9, 3780. 注解: 通过系统的数值模拟, 探讨多个地体的宽度、密度和流变特性在青藏高原岩石圈演化中的作用, 揭示两种不同的碰撞模式: 西藏板块中强弱地体的岩石圈地幔完全分离导致整个高原下方的印度岩石圈俯冲; 弱地体完全脱离但在碰撞期间强地体部分残留。这两种对比模式分别与青藏高原西部和中东部的岩石圈结构大致一致, 拉萨-羌塘地体宽度沿走向的变化是碰撞模式的关键影响因素。
14. Li, J.T., Song, X.D., 2018. Tearing of Indian mantle lithosphere from high-resolution seismic images: Implications for lithosphere deformation in southern Tibet. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, 115(33): 8296-8300. 注解: 高分辨率 P 波和 S 波层析成像结果显示, 俯冲的印度板块岩石圈地幔在俯冲角度和北部界限方面存在差异, 在东西两侧延伸得更远更浅, 而在中间则更陡。下地壳和地幔中的中等深度地震几乎主要位于印度岩石圈的高速异常区, 印度板块岩石圈地幔的撕裂影响晚中新世和第四纪裂谷的形成、现今地壳的变形和中深度地震的发生。
15. Shi, F., Wang, Y.B., Yu, T., Zhu, L.P., Zhang, J.F., Wen, J.G., Gasc, J., Ince, S., Schubne, A., Li, Z.Y., Chen, T., Liu, W.L., Prakapenka, V., Jin, Z.M., 2018. Lower-crustal earthquakes in southern Tibet are linked to eclogitization of dry metastable granulite. **Nature communications**, 9, 3483. 注解: 干燥的麻粒岩是俯冲印度地壳的主要组成部分, 与榴辉岩稳定场相对应的条件下发生变形时脆性增强, 微裂缝动态扩展产生声发射(实验室模拟地震), 在脆性颗粒内断裂的辅助下, 发生自组织形成宏

观的剪切带。这些分析为西藏南部莫霍面附近地震活动提出了可能的触发机制，并对造山过程提供了进一步的约束。

16. Bai, L., Li, G.H., Khan, N.G. Zhao, J.M., Ding, L., 2017. Focal depths and mechanisms of shallow earthquakes in the Himalayan-Tibetan region. **Gondwana Research**, 41: 390-399. 注解：通过模拟远震P波和pP、sP波的波形，得到喜马拉雅-青藏高原地区浅源地震的震源深度和震源机制解，进一步分析印度-欧亚大陆板块碰撞背景下岩石圈变形的复杂性。西藏中部地区地震主要发生在上地壳，以走滑断层为主；西藏南部大部分地区发育正断层型地震；在西藏北部和喜马拉雅地区，地震以逆冲型为主，上下地壳均有地震发生；结合前人研究结果获得了研究区域的有效弹性厚度。
17. Chen, M., Niu, F.L., Tromp, J., Lenardic, A., Lee, C.-T., Cao, W.R., Ribeiro, J., 2017. Lithospheric foundering and underthrusting imaged beneath Tibet. **Nature Communications**, 8, 15659. 注解：报道了青藏高原中南部的地震层析成像结果，剖面中 T 形的高速结构代表早期岩石圈沉降的上地幔遗迹，岩石圈的沉降导致高原中部岩石圈的缩短和增厚，并受到软流圈上涌和加厚岩石圈热侵蚀的影响，与钾质火山作用和上地幔低速带的成像结果在空间上有较好的一致性。
18. Elliott, J.R., Jolivet, R., González, P.J., Avouac, J.-P., Hollingsworth, J., Searle, M.P., Stevens, V.L., 2016. Himalayan megathrust geometry and relation to topography revealed by the Gorkha earthquake. **Nature Geoscience**, 9: 174-180. 注解：报道了喜马拉雅山脉中部尼泊尔地区主喜马拉雅逆冲断层几何形态的研究成果，根据 2015 年 Mw7.8 廓尔喀地震的大地测量观测资料，结合地质学、地貌学和其他地球物理观测资料，发现主喜马拉雅逆冲断裂在加德满都地区深度为 5-15km 之间，俯冲倾角较小，在北部高喜马拉雅地区倾角增大，板块汇聚作用主要发生在主喜马拉雅逆冲断裂上，上覆高角度断层系统的影响不大，推测喜马拉雅地区的地形增长主要发生在震后应力调整阶段。
19. Mencin, D., Bendick, R., Upreti, B.N., et al, 2016. Himalayan strain reservoir inferred from limited afterslip following the Gorkha earthquake. **Nature geoscience**, 9(7): 533-537. 注解：2015 年 Mw7.8 廓尔喀地震在喜马拉雅山脉附近产生 150 公里长的破裂带，地表形变观测资料表明，地震发生后 6 个月断层面上没有发生明显无震滑移，在破裂区北部发生 70 mm 的震后余滑，但在破裂区南部浅表震后余滑小于 25 mm；历史多次大地震均未发生显著地表破裂，喜马拉雅大地震的同震破裂可能是喜马拉雅逆冲断裂在浅部的残余应变逐步累积的结果。
20. Whipple, K.X., Shirzaei, M., Hodges, K.V., Arrowsmith, J.R., 2016. Active shortening within the Himalayan orogenic wedge implied by the 2015 Gorkha earthquake. **Nature Geoscience**, 9(9): 711-716. 注解：报道了主喜马拉雅逆冲断裂和上覆高角度逆冲断层系统的研究成果，根据 2015 年 Mw7.8 廓尔喀地震序列地表形变反演的结果表明，低倾角的主喜马拉雅逆冲断层至少延伸到了高喜马拉雅以北 20-30km 处，喜马拉雅山脉的增长是主喜马拉雅逆冲断裂和喜马拉雅地壳内部缩短共同作用的结果。
21. Avouac, J.P., Meng, L.S., Wei, S.J., Wang, T., Ampuero, J.-P., 2015. Lower edge of locked Main Himalayan Thrust unzipped by the 2015 Gorkha earthquake. **Nature Geoscience**, 8: 708-711. 注解：使用远震记录和合成孔径雷达图像分析，获得了 2015 年 Mw7.8 廓尔喀地震孕育发生过程，发现地震发生在主喜马拉雅逆冲断裂闭锁区北侧底部，断裂向东传播约 140km，Mw7.3 余震发生在破裂区东部，震后在周边地区的应力转移与主喜马拉雅逆冲断裂未来的地震风险值得关注。
22. Liu, Q.Y., van der Hilst, R.D., Li, Y., Yao, H.J., Chen, J.H., Guo, B., Qi, S.H., Wang, J., Huang, H., Li, S.C., 2014. Eastward expansion of the Tibetan Plateau by crustal flow and strain partitioning across faults. **Nature Geoscience**, 7(5): 361-365. 注解：青藏高原东南部的横向扩张引发了毁灭性的地震，如2008年汶川地震。该研究使用了中国四川西部约300台地震仪记录的地震数据，对青藏高原东

部的结构进行成像, 结合大地测量资料, 推断高原的扩张是由局部地壳流动和深部断裂的应变共同作用的结果。

23. Wang, Q., Qiao, X.J., Lan, Q.G., Freymueller, J., Yang, S.M., Xu, C.J., Yang, Y.L., You, X.Z., Tan, K., Chen, G., **2011**. Rupture of deep faults in the 2008 Wenchuan earthquake and uplift of the Longmen Shan. **Nature Geoscience**, 4: 634-640. 注解: 使用高分辨率大地测量数据揭示龙门山断裂几何形状和2008年汶川地震的应变积累与释放模式, 发现大部分同震破裂发生在地壳浅部两个高角度的断层面上, 过去发生的地震没有破裂至地表导致地壳浅层应力累积; 龙门山断裂底部同震破裂为2-6米, 延伸至地下60公里深, 表明青藏高原东部已被大范围推挤到四川盆地底部; 推测大地震可以造成地壳缩短, 不支持下地壳流主导龙门山隆升的假说。
24. Bai, D.H., Unsworth, M.J., Meju, M.A., Ma, X.B., Teng, J.W., Kong, X.R., Sun, Y., Sun, J., Wang, L.F., Jiang, C.S., Zhao, C., Xiao, C.P., Xiao, P.F., Liu, M., **2010**. Crustal deformation of the eastern Tibetan plateau revealed by magnetotelluric image. **Nature Geoscience**, 3(5): 358-362. 注解: 采用大地电磁观测对高原东南缘地下20-40公里深度的高导体区域和通道进行成像, 研究区域从青藏高原水平延伸800多公里进入中国西南部地区。高导体意味着地壳流体含量升高, 允许在地质时间尺度上发生流动, 发现地壳流可能在造山带广泛发育, 有助于高原隆升。
25. He, J., Peltzer, G., **2010**. Poroelastic triggering in the January 9-22, 2008 Nima-Gaize (Tibet) earthquake sequence. **Geology**, 38(10): 907-910. 注解: 2008年在西藏中南部连续发生三次 $M_s=6.4$ 、 5.9 和 5.4 的地震。干涉卫星孔径雷达 (InSAR) 观测表明, 最大的两次事件发生在两个相距约 9.5 公里的东北走向、西北倾向正断层上, 断层滑移分别为 1.2 米和 0.75 米, 本研究通过开发三维有限元模型计算第一次事件后地壳中多孔弹性形变引起的库仑应力变化。发现第一次地震引发了第二次地震破裂, 库仑应力变化控制了第二次地震破裂的程度。
26. Hubbard, J., Shaw, J.H., **2009**. Uplift of the Longmen Shan and Tibetan plateau, and the 2008 Wenchuan ($M=7.9$) earthquake. **Nature**, 458: 194-197. 注释: 2008年5月12日汶川大地震发生在青藏高原东部边缘龙门山地区, 但是在大地震之前龙门山断裂带的地壳缩短量很小, 本文使用平衡地质剖面图来表征地壳缩短、结构变化和地形起伏的相关性。表明地壳缩短是龙门山地表隆起主要驱动力, 汶川地震沿龙门山前缘的一个大型逆冲断裂发生, 造成数万人死亡和大面积地表破坏。
27. Shen, Z.-K., Sun, J.B., Zhang, P.Z., Wan, Y.G., Wang, M., Burgmann, R., Zeng, Y.H., Gan, W.J., Liao, H., Wang, Q.L., **2009**. Slip maxima at fault junctions and rupturing of barriers during the 2008 Wenchuan earthquake. **Nature Geoscience**, 2: 718-724. 注解: 运用空间大地测量 (GPS 以及合成孔径雷达相干成像即 InSAR) 资料, 研究 2008 年汶川大震机理, 以及破裂断层几何结构与错动空间分布。结果显示, 汶川地震破裂沿龙门山断裂由西南向东北方向发展, 模式由逆冲逐渐转为走滑, 断层由倾向西北逐渐转为直立。发震断层涉及多个地质断层单元, 而映秀、北川和南坝三地附近为不同断层单元的连接、交汇部; 其接近地表处为地震破裂极大区, 表明汶川地震在此三地产生级联型破裂, 造成当地人民生命财产极大损失。综合分析表明汶川地区再次发生这样大震的周期约为 4000 年。
28. Zhang, Y., Feng, W., Xu, L., Zhou, C., Chen, Y., **2009**. Spatio-temporal rupture process of the 2008 great Wenchuan earthquake. **Science in China Series D: Earth Sciences**, 52: 145-154. 注释: 利用全球地震台网(GSN)长周期地震资料反演得到了 2008 年汶川大地震的震源机制和动态破裂过程, 并根据反演结果定量分析了断层附近同震位移场特征, 探讨了其致灾机制。震源机制走向 225° /倾角 39° /前倾角 120° , 表明此次地震以逆冲为主, 具有右旋走滑成分, 矩震级为 $M_w7.9-8.1$, 发生在 300 多公里长的断层上, 断裂过程复杂, 持续时间约 90 秒。滑移分布极不均匀, 同震位移场特征与近断裂区的烈度分布特征基本一致, 表明近断裂区大范围、大振幅、表面破碎的逆冲位错是造成严重灾害的主要原因。

29. Li, C., Van der Hilst, R.D., Meltzer, A.S. and Engdahl, E.R., **2008**. Subduction of the Indian lithosphere beneath the Tibetan Plateau and Burma. **Earth and Planetary Science Letters**, 274: 157-168. 注释: 印度岩石圈在欧亚大陆下的俯冲作用对青藏高原及周边地区的构造演化起着重要作用, 层析成像图像揭示了沿碰撞带地幔结构的空变化。结果表明, 印度岩石圈位于高原的西南部, 而中部和东北部则有俯冲的亚洲岩石圈, 在高原下方俯冲的印度板块(大陆)部分通常与更早以前俯冲的(海洋)板块碎片分离, 这些碎片在地幔深处呈现高速异常的成像结果。
30. 王卫民, 赵连锋, 李娟, 姚振兴, **2008**. 四川汶川 8.0 级地震震源过程. **地球物理学报**, 51(5): 1403-1410. 注解: 利用远场体波波记录结合近场同震位移数据, 根据地质资料和地震形成的地表破裂轨迹, 对 2008 年 Ms8.0 汶川地震构造了一个双“铲状”有限地震断层模型, 利用反演技术重建地震的破裂过程。发现汶川大地震是沿龙门山构造带的映秀—北川断裂和灌县—江油断裂发生的逆冲兼右旋走滑破裂事件, 两个高滑动区先后发生在地震破坏最为严重的映秀和北川地区, 最大滑动量高达 12 米, 且破裂过程也显示一定的复杂性。地震破裂的平均走滑量略大于平均倾滑量, 与多种观测资料获得的震前龙门山断裂带构造变形相一致, 推断是由于长期区域应力场作用和龙门山地区特殊的物质组成和结构孕育了这次千年尺度的强烈地震。
31. Gan, W.J., Zhang, P.Z., Shen, Z.-K., Niu, Z.J., Wang, M., Wan, Y., Wan, Y.G., Zhou, D.M., Cheng, J., **2007**. Present-day crustal motion within the Tibetan Plateau inferred from GPS measurements. **Journal of Geophysical Research- Solid Earth**, 112(B8), B08416. 注释: 利用青藏高原周边 726 个全球卫星定位系统站点的测量数据, 确定了整个高原在欧亚固定参考系中的刚性旋转。高原内部变形呈现显著的“冰川流”带, 该带从高原中西部开始, 顺时针绕喜马拉雅东构造结, 结束于高原东南角, 呈扇形分布。在高原南部在横向压缩和重力浮力作用下, 下地壳黏性通道流驱动上地壳高塑性物质向东逃逸。在高原东部, 虽然 GPS 数据显示高原东部边缘与四川盆地之间没有明显的收敛性, 但在东部边缘附近一个相对狭窄的区域内存在一个显著的挤压应变率分量。
32. Schulte-Pelkum, V., Monsalve, G., Sheehan, A., Pandey, M.R., Sapkota, S., Bilham, R., Wu, F., **2005**. Imaging the Indian Subcontinent beneath the Himalaya. **Nature**, 435: 1222-1225. 注解: 文章报道了主喜马拉雅逆冲断裂和俯冲印度板块莫霍面的地震图像结果。发现主喜马拉雅逆冲断裂顶部存在显著的各向异性, 其形成过程与大地震的发生有关。在喜马拉雅北部下地壳存在高速异常区, 与印度下地壳榴辉岩化过程有关, 进一步影响了青藏高原的动力学演化。
33. Zhang, P.-Z., Shen, Z.K., Wang, M., Gan, W.J., Bürgmann, R., Molnar, P., Wang, Q., Niu, Z.J., Sun, J.B., Wu, J.C., Hanrong, S., You, Z., **2004**. Continuous deformation of the Tibetan Plateau from global positioning system data. **Geology**, 32(9): 809-812. 注释: 全球卫星定位系统从青藏高原及其边缘的 553 个观测点测得的速度结果表明, 青藏高原目前的构造可以被描述为连续介质的变形, 高原内部的变形主要表现为东西向拉伸和略慢的北东向南西向缩短, 相对于欧亚大陆, 高原内部的物质大致向东移动, 速度向东增加, 围绕喜马拉雅东端向南流动; 高原东北部和东部边缘的地壳增厚, 发生在一个 400 公里宽的条带上, 是包括逆冲断层在内多种形变作用的弹性应变的结果。
34. Kind, R., Yuan, X., Saul, J., Nelson, D., Sobolev, S.V., Mechie, J., Zhao, W., Kosarev, G., Ni, J., Achauer, U. and Jiang, M., **2002**. Seismic images of crust and upper mantle beneath Tibet: Evidence for Eurasian plate subduction. **Science**, 298: 1219-1221. 注解: 对青藏高原中部地震台站记录的地震波形进行接收函数分析获得了印度与欧亚大陆碰撞的演化过程。地幔过渡带 410 公里和 660 公里间断面清晰可见, 表明俯冲板块没有穿透地幔过渡带; 高原北部地幔过渡带比南部略深, 表明上地幔的平均温度在高原北部比在南部高约 300 度。高原北部地幔顶部存在一个显著的南倾界面, 表明欧亚大陆地幔岩石圈向南俯冲到高原北缘。
35. Molnar, P., and H el ene, L.-C., **1989**. Fault plane solutions of earthquakes and active tectonics of the Tibetan Plateau and its margins. **Geophysical Journal International**, 99: 123-153. 注释: 青藏高原

内部和边缘地震的震源机制解表现出不同的类型，高原边缘方主要是逆冲断裂和地壳缩短，高原内部由正断裂和走滑断裂引起的地壳大致东西向伸展。海拔超过 5000 米的地区以正断层为主，到海拔更低的东部以走滑断裂为主，海拔低于 3000 米的高原边缘地区以逆冲断层为主。

三、高原隆升过程与动力学模型^[1-7]

1. Ding, L., Xu, Q., Yue, Y.H., Wang, H.Q., Cai, F.L., Li, S., 2014. The Andean-type Gangdese Mountains: Paleoelevation record from the Paleocene-Eocene Linzhou Basin. **Earth and Planetary Science Letters**, 392: 250-264. 注解：揭示青藏高原最古老山脉的隆升过程。提出介形虫原位氧同位素检验成岩作用新方法，基于氧同位素古高度计研究，揭示冈底斯山在早始新世前已达到 4500 米，提出高原呈现“两山夹一盆”地貌特征，代表高原最古老山脉，此时有“山”无“原”。
2. Wang, C.S., Zhao, X.X., Liu, Z.F., Lippert, P.C., Graham, S.A., Coe, R.S., Yi, H.S., Zhu, L.D., Liu, S., Li, Y.L., 2008. Constraints on the early uplift history of the Tibetan Plateau. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, 105(13): 4987-4992. 注解：通过西藏北部可可西里盆地沉积岩、低温热年代以及火山岩数据的分析，提出高原中部在 40Ma 前隆升形成“原高原”，而其南、北部地区的隆升明显较晚。在始新世时期，“原高原”北界位于唐古拉山，南界位于雅江缝合带。新近纪，原高原开始向南部喜马拉雅山和北部祁连山扩展。
3. Tapponnier, P., Xu, Z.Q., Roger, F., Meyer, B., Arnaud, N., Wittlinger, G., Yang, J.S., 2001. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau. **Science**, 294(5547): 1671-1677. 注解：针对连续变形与构造挤出两个端元模型，做了系统性的辩论，提出大陆地壳和大陆岩石圈地幔解耦，岩石圈地幔发生了类似于板块构造一样的斜向俯冲，这种俯冲在印度向北汇聚的作用下，由南向北依次沿着先存的缝合带发生，导致高原自南向北阶段性生长，高原沿这些缝合带的生长大多具有走滑分量，以协调高原向东的侧向运动。
4. Royden, L.H., Burchfiel, B.C., King, R.W., Wang, E., Chen, Z.L., Shen, F., Liu, Y.P., 1997. Surface deformation and lower crustal flow in Eastern Tibet. **Science**, 276(5313): 788-790. 注解：高原形成机制中两个著名端元模型之一的“软西藏-连续变形”模型。4 Ma 后青藏高原东南缘几乎没有发生明显上地壳缩短，那么现今的高地形是如何生长的呢？通过数值模拟，提出了“下地壳是软的，可以流动的”模式，上下地壳解耦，因此在流动过程中，下地壳加厚而不需要上地壳发生缩短变形。
5. Molnar, P., England, P., Martinod, J., 1993. Mantle dynamics, uplift of the Tibetan Plateau, and the India monsoon. **Reviews of Geophysics**, 31: 357-396. 注解：创造性地把地幔动力学、高原隆升以及印度季风联系在一起。提出“山根”对流去除引起反弹，导致高原迅速隆升，高原隆升加强了印度季风，季风加强导致硅酸盐岩侵蚀和风化，消耗二氧化碳。因此，地幔动力学不仅深刻影响造山过程，而且还可能在改变区域和全球气候方面发挥重要作用。
6. Harrison, T.M., Copeland, P., Kidd, W.S.F., Yin, A., 1992. Raising Tibet. **Science**, 255(5052): 1663-1670. 注解：系统回顾了低温热年代学、沉积学、海洋学以及古气候学等多学科研究进展，特别是根据曲水岩体 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 冷却历史提出藏南在~20Ma 发生了迅速抬升，而青藏高原大部分于 8Ma 前达到目前高度。提出了一个涉及到大陆挤出、地壳尺度逆冲断层以及岩石圈拆沉的模型来解释隆升。
7. 李吉均, 文世宣, 张青松, 王富葆, 郑本兴, 李炳元, 1979. 青藏高原隆起的时代、幅度和形式的探讨. **中国科学**, 6: 608- 616. 注解：第一次青藏科考的代表性观点—高原更新世以来发生整体快速隆升。青藏地区在晚始新世全部结束海相成陆以后，曾两度夷平或接近夷平。上新世末，地面高度仅 1000 米左右。更新世早中晚三个时期对应三个剧烈上升阶段，并且有明显的全新世加速趋势。上新世末以来，青藏高原累计上升约 3500—4000 米。

扩展文献^[1-33]

1. Liu, X.H., Gao, R., Guo, X.Y., Ding, L., **2023**. Detrital zircon U-Pb geochronology of the Lunpola basin strata constrains the Cenozoic tectonic evolution of central Tibet. **Gondwana Research**, 113: 179-193. 注解: 高原隆升过程与动力学模型。注解: 通过青藏高原中部伦坡拉盆地新生代沉积物源分析和锆石微量元素数据, 讨论伦坡拉盆地新生代以来的混合物源, 重建盆地地壳厚度变化历史, 进而提出了青藏高原中部新生代地壳增厚及地表隆升可能是岩石圈地幔对流拆沉与岩浆底侵共同作用的结果。
2. Ding, L., Kapp, P., Cai, F., Garzzone, C., Xiong, Z., Wang, H., Wang, C., **2022**. Timing and mechanisms of Tibetan Plateau uplift. **Nature Reviews Earth & Environment**, 3: 652- 657. 注解: 通过整合青藏高原已有的地表和深部圈层地质证据, 系统阐述青藏高原的差异性隆升过程和机制。青藏高原的差异性的隆升过程表现为, 在 100-65 Ma, 印度-欧亚板块碰撞前, 由于新特提斯洋的俯冲消减, 使得冈底斯山和分水岭山隆升到一定高度, 形成了高原雏形; 在 55-40 Ma, 新特提斯洋俯冲板片的断离导致冈底斯山隆升到 4.5 km, 继而拉萨岩石圈地幔和亚洲岩石圈地幔发生陆内俯冲使分水岭山隆升到 5.0 km; 此时二者之间的中央谷地、南部的喜马拉雅山以及高原北部处于小于 2 km 低海拔, 高原整体为“两山夹一盆”地貌特征, 在 40-30 Ma, 拉萨岩石圈地幔在中央谷地下方拆沉, 中央谷地抬升到 4.5 km, 标志着青藏高原由造山带转变为统一高原。25-15 Ma, 由于俯冲的印度及欧亚大陆岩石圈拆沉, 喜马拉雅山与昆仑山隆升到现代高度, 现代意义的高原形成。
3. He, S.L., Ding, L., Xiong, Z.Y., Spicer, R.A., Farnsworth, A., Valdes, P.J., Wang, C., Cai, F., Wang H.Q., Sun, Y., Zeng, D., Xie, J., Yue, Y.H., Zhao, C.Y., Song, P.P., Wu, C., **2022**. A distinctive Eocene Asian monsoon and modern biodiversity resulted from the rise of eastern Tibet. **Science Bulletin**, 67(21): 2245-2258. 注解: 基于发现的 6 套火山灰, 建立起热鲁盆地的绝对年代学框架。之后利用古土壤钙结核的团簇同位素温度计与植物化石的叶相多变量分析函数重建了热鲁盆地详细的古高度变化历史: 从 5000~4500 万年前的低海拔 0.6 km, 迅速上升至 4500~4200 万年前的中等海拔 2.0 km, 再到 4200~4000 万年前的中高海拔 2.9 km, 在始新世晚期 (3900~3400 万年前), 盆地进一步上升到 3.5 km, 接近现今平均海拔 3.7 km。盆地中发育以桉树、豫鼠、先炭兽、犀牛等为代表的高等动植物群, 萌生了始新世横断山生物多样性热点。
4. Xiong, Z.Y., Liu, X.H., Ding, L., Farnsworth, A., Spicer, R. A., Xu, Q., Valdes, P., He, S. L., Zeng D., Wang, C., Li, Z.Y., Guo, X.D., Su, T., Zhao C.Y., Wang, H.Q., Yue, Y.H., **2022**. The rise and demise of the Paleogene Central Tibetan Valley. **Science Advance**, 8: eabj0944. 注解: 通过在伦坡拉盆地发现了 9 套火山灰, 建立了伦坡拉盆地的绝对年代框架。在此年代框架的基础上, 依托气候模拟得到局部的地表气温直减率, 定量恢复了伦坡拉盆地古高度变化历史。结果表明, 以伦坡拉盆地为代表的青藏高原中央谷地, 在 5000-3800 万年前处于 1700 米的相对低海拔位置; 在 3800-2900 万年前, 中央谷地快速隆升到海拔超过 4000 米的高原。
5. Lu, Z.W., Guo, X.Y., Gao, R., Murphy, M.A., Huang, X.F., Xu, X., Li, S.Z., Li, W.H., Zhao, J.M., Li, C.S., Xiang, B., **2022**. Active construction of southernmost Tibet revealed by deep seismic imaging. **Nature Communications**, 13(1). 注解: 利用高分辨率深地震反射剖面“切开”雅鲁藏布江缝合带两侧地壳, 揭示其内部的精细结构, 追踪地壳演化。研究表明: 以冈底斯岩基为代表的南拉萨地体发育全地壳尺度的新生地壳, 而中拉萨地体主要为古老结晶基底; 新生地壳物质源于俯冲板片的构造回撤以及软流圈物质上涌填充, 新生地壳岩浆弧的形成与幕式岩浆作用密切相关; 为研究新生代全球大陆地壳净生长过程和陆陆碰撞条件下大规模成矿作用研究提供了范例。
6. Qi, R., Liao, J., Liu, X.H., Gao, R., **2022**. Numerical Investigation on the Dynamic Evolution of Intra-Crustal Continental Delamination. **Frontiers in Earth Science**, 10. 注解: 穿越青藏高原南缘雅鲁藏布缝合带的深地震反射剖面揭示了印度地壳的拆离俯冲, 即印度下地壳随岩石圈地幔发生俯冲,

而上地壳不俯冲。该文献利用二维地球动力学数值模拟的方法，模拟了大陆俯冲过程中的地壳拆离俯冲的现象，模型很好的验证了从大洋俯冲到大陆碰撞、深俯冲这一连续过程中大陆发生拆离俯冲的可能性，并认为大陆地壳解耦-拆离俯冲的发生主要决定于俯冲大陆岩石圈流变结构，增厚的大陆上地壳及流变强度较强的下地壳是两个主要条件。

7. 高锐, 周卉, 卢占武, 郭晓玉, 李文辉, 王海燕, 李洪强, 熊小松, 黄兴富, 徐啸, **2022**. 深地震反射剖面揭露青藏高原陆-陆碰撞与地壳生长的深部过程. **地学前缘**. 29(2): 14-27. 注解: 在深地震反射剖面探测研究成果基础上, 从青藏高原南北-东西对比, 再到高原腹地, 系统地综述了青藏高原之下印度板块与亚洲板块碰撞-俯冲的深部过程。印度地壳向高原南缘拆离俯冲, 亚洲板块的阿拉善地块岩石圈在北缘向祁连山下俯冲, 祁连山地壳向外扩展, 塔里木地块与高原西缘的西昆仑发生面对面的碰撞, 在高原东缘发现龙日坝断裂而不是龙门山断裂是扬子板块的西缘边界。高原腹地 Moho 薄而平坦, 岩石圈伸展垮塌。多条深反射剖面揭露了在雅鲁藏布江缝合带下印度板块与亚洲板块碰撞和深俯冲行为, 在缝合带中部, 显示印度地壳上地壳与下地壳拆离向北俯冲, 并在俯冲过程发生构造多重叠置, 减薄俯冲的印度地壳, 加厚喜马拉雅地壳。冈底斯地壳近乎透明的弱反射和局部出现亮点反射, 以及拉萨地体近于平的 Moho 都反映出伸展构造环境。
8. Spicer, R.A., Su, T., Valdes, P. J., Farnsworth, A., Wu, F. X., Shi, G.L., Spicer, T.E.V., Zhou, Z.K., **2021**. Why 'the uplift of the Tibetan Plateau' is a myth. **National Science Review**, 8(1): 10.1093/nsr/nwaa091. 注解: 系统综述了高原生长模式的不同观点, 并详细介绍了青藏高原已有的利用稳定同位素和古生物证据重建青藏高原高度的最新研究进展。肯定了植物化石证据所提出的高原中部存在东西向的谷地的观点。并建议在今后的研究中, 需要重视具有可靠地质年代的化石证据, 结合地球系统模型, 多学科交叉来深入研究青藏高原对亚洲季风气候和生物多样性演变的重要影响。
9. Su, T., Spicer, R.A., Wu, F.X., Farnsworth, A., Huang, J., Del Rio, C., Deng, T., Ding, L., Deng, W.Y.D., Huang, Y.J., Jia, L.B., Jin, J.K., Li, S.F., Liang, S.Q., Liu, J., Liu, X.Y., Sherlock, S., Spicer, T., Srivastava, G., Tang, H., Valdes, P., Wang, T.X., Widdowson, M., Wu, M.X., Xing, Y.W., Xu, C.L., Yang, J., Zhang, C., Zhang, S.T., Zhang, X.W., Zhao, F., Zhou, Z.K., **2020**. A Middle Eocene lowland humid subtropical "Shangri-La" ecosystem in central Tibet. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, 117(52): 32989- 32995. 注解: 本文在伦坡拉盆地的始新世 47 Ma 的牛堡组中发现多达 70 形态类型的植物群, 这是迄今青藏高原发现的物种最丰富的新生代植物群, 揭示青藏高原中部存在亚热带森林。研究利用植物化石的叶相多变量分析函数重建了该植物群的古海拔, 表明当时青藏高原中部存在一个海拔不超过 1500 米的中央谷地, 南北两侧分别是冈底斯山和羌塘山脉, 结合前期发表的棕榈化石证据, 该研究为认识青藏高原主体在形成初期时的生物多样性面貌打开了一扇窗口, 也为探讨高原的形成过程提供了重要的古生物学依据。
10. Xiong, Z., Ding, L., Spicer, R., Farnsworth, A., Wang, X., Valdes, P.J., Yue, Y., **2020**. The early Eocene rise of the Gonjo Basin, SE Tibet: From low desert to high forest. **Earth and Planetary Science Letters**, 543: 116312. 注解: 利用藏东南地区贡觉盆地的古土壤碳酸盐岩和泥灰岩团簇同位素和氧同位素研究盆地的古高度和古气候变化。研究结果表明, 贡觉盆地始新世早期海拔在~0.7 km, 年均温在 24°C, 始新世中期海拔抬升到~3.8 km, 气温降低到 7°C, 区域气候变化将藏东南地区地表景观也从低地沙漠变为高山森林。
11. Botsyun, S., Sepulchre, P., Donnadiou, Y., Risi, C., Licht, A., Rugenstein, J.K.C., **2019**. Revised paleoaltimetry data show low Tibetan Plateau elevation during the Eocene. **Science**, 363(6430): 946. 注解: 利用青藏高原已有氧同位素古高度数据点作为限制因子, 运行加载氧同位素的大气环流模式, 得到青藏高原在始新世海拔为低到中等海拔高度。这一观点随即引发同英国学者的论战。
12. Su, T., Farnsworth, A., Spicer, R. A., Huang, J., Wu, F.X., Liu, J., Li, S.F., Xing, Y.W., Huang, Y.J.,

- Deng, W.Y.D., Tang, H., Xu, C.L., Zhao, F., Srivastava, G., Valdes, P. J., Deng, T., Zhou, Z.K., **2019**. No high Tibetan Plateau until the Neogene. **Science Advance**, 5: aav2189. 注解：以伦坡拉盆地发现的大型棕榈化石叶片为基石材料,以棕榈化石对最冷温度的依赖性和结合古气候模型 HadCM3L,重建了青藏高原中部的古高程和古地貌,认为在 25.5Ma 前的棕榈生活于在高原中部近东西向海拔约 2300 米的峡谷中,其南北两侧分别为海拔超过 4000 米的冈底斯山脉和羌塘山脉。25Ma 之后,由于沉积充填和挤压构造作用的共同作用使地表高程升高,形成了现今的高原。
13. Ding, L., Spicer, R. A., Yang, J., Xu, Q., Cai, F., Li, S., Lai Q., Wang H., Spicer, T.E.V., Yue, Y., Shukla, A., Srivastava, G., Khan, M. A., Bera, S., Mehrotra, R., **2017**. Quantifying the rise of the Himalaya orogen and implications for the South Asian monsoon. **Geology**, 45(3): 215-218. 注解：利用植物化石多变量分析函数,计算盆地湿哈,首次定量重建了喜马拉雅山脉柳区和恰布林盆地的古高度,恢复了喜马拉雅山脉的隆升历史。研究发现两个新的植物化石群:柳曲植物群和恰不林植物群。柳曲植物群是以棕榈为代表的热带-亚热带植物群落,恰不林植物群落则显示相对温凉的气候特征。同位素定年将柳曲植物群限定在古新世晚期 (~56 Ma),而恰不林植物群属于 21-19Ma。CLAMP 重建柳曲植物群的高度是 0.9km,恰不林植物群的高度是 2.3km,结合喜马拉雅已有的古高度数据表明,喜马拉雅山脉至中新世时期一直保持相对低的海拔高度 (<2.3km),大约在 15Ma 以后发生快速隆升,海拔高度超过 5km。
 14. Zhu, D.C., Wang, Q., Cawood, P.A., Zhao, Z.D., Mo, X.X., **2017**, Raising the Gangdese Mountains in southern Tibet. **Journal of Geophysical Research- Solid Earth**, 122: 214-223. 注释：通过冈底斯弧中侵入岩的全岩 La/Yb 比值来确定高原地壳厚度的空间和时间变化。结果表明,在 70 Ma 时,高原地壳厚度正常 (~37km); 70-60 Ma 地壳开始增厚; 55-45 Ma, 由于俯冲的新特提斯板块的后退和断裂导致的岩浆底侵,地壳厚度达到 58-50 km,弧向延伸 400 km 以上; 20-10 Ma 地壳厚度达到 68 km,是印度俯冲和相关逆冲作用的结果。作者认为藏南冈底斯山脉 55-45 Ma 隆升到超过 4000 m 高度,20-10 Ma 隆升到现在高度。
 15. Deng, T., Ding, L., **2015**. Paleoaltimetry reconstructions of the Tibetan Plateau: progress and contradictions. **National Science Review**, 2(4): 417- 437. 注解：针对青藏高原是中新世隆升还是古近纪隆升这一争议点,梳理了所有代表性的古高度研究数据,包括喜马拉雅山脉、拉萨地块、中央分水岭山脉、可可西里以及昆仑山脉,并提出多学科的综合方法和交叉检验将是得到更加可信的青藏高原古高度数据的重要途径。
 16. Huntington, K.W., Saylor, J., Quade, J., Hudson, A.M., **2015**. High late Miocene- Pliocene elevation of the Zhada Basin, southwestern Tibetan Plateau, from carbonate clumped isotope thermometry. **GSA Bulletin**, 127(1-2): 181-199. 注释：该研究利用碳酸盐岩团簇同位素对高原中部尼玛盆地和高原西南的扎达盆地的古高度进行研究。结果表明尼玛盆地样品团簇同位素温度超过 40°C,指示发生了成岩改造。扎达盆地的中新世-上新世文石腹足类贝壳记录了原始环境温度,结合氧同位素计算得到扎达盆地古高度为 5.4 ± 0.5 km,比现今高出 1.0-1.5 km,扎达盆地在中新世晚期由于藏南地区发生了东西向伸展垮塌造成盆地地表高度的降低。
 17. Hoke, G. D., Liu-Zeng, J., Hren, M.T., Wissink, G.K., Garzzone, C.N., **2014**. Stable isotopes reveal high southeast Tibetan Plateau margin since the Paleogene. **Earth and Planetary Science Letters**, 394: 270-278. 注解：通过使用青藏高原东南缘新生代盆地中保存的古土壤碳酸盐岩稳定同位素古高度计,研究了整个新生代青藏高原东南缘的古高度变化历史。结果表明,青藏高原东南缘在始新世期间就抬升到了高海拔;否定了中新世下地壳流动造成藏东南缘地表隆升的假说。
 18. Wang, C.S., Dai, J.G., Zhao, X.X., Li, Y.L., Graham, S.A., He, D.F., Ran, B., Meng, J., **2014**. Outward-growth of the Tibetan Plateau during the Cenozoic: A review. **Tectonophysics**, 621: 1- 43. 注解：综述了来自沉积学和地层学、构造地质学、岩浆作用、抬升和古高度研究的成果来重建高原生长历史,提出了青藏高原在始新世存在以拉萨和羌塘地体组成的高海拔地区,即“原青藏高原”,而

北部的可可西里盆地地区和南部的喜马拉雅地区中新世以后发生隆升。认为青藏高原的增长模式是由内而外的阶段性生长，否定前期流行的由南向北生长模式。

19. Gébelin, A., Mulch, A., Teyssier, C., Jessup, M.J., Law, R.W., Brune, M., **2013**. The miocene elevation of Mount Everest. **Geology**, 41(7): 799-802. 注解：利用氢同位素重建珠峰的古高度。早中新世时期，含水矿物中的氢同位素比值与大气降水同位素比值近似，因此提出了喜马拉雅山脉自中新世以来保持了约 5000m 的海拔高度。
20. Deng, T., Q. Li, Z. J. Tseng, G. T. Takeuchi, Y. Wang, G. Xie, S. Wang, S. Hou and X. Wang, **2012**. Locomotive implication of a Pliocene three-toed horse skeleton from Tibet and its paleo-altimetry significance. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, 109(19): 7374-7378. 注解：该研究利用动物大化石分析方法恢复期生态环境。研究区位于西藏西南部扎达盆地，其中发现保存完好的 4.6 Ma 前的三趾马化石，化石特征表明三趾马栖息在高原山地环境。通过对比上新世古气温，并与现代植被垂直带进行比较，恢复扎达盆地在 4.6 Ma 的海拔约为海拔 4000 m。
21. Quade, J., Breecker, D.O., Daëron M., Eiler, J., **2011**. The paleoaltimetry of Tibet: An isotopic perspective. **American Journal of Science**, 311(2): 77. 注释：用现代地表水和土壤碳酸盐建立青藏高原地表海拔与氧同位素的变化模型，并用团簇同位素校正土壤温度，重新计算古海拔。地表水和土壤碳酸盐都显示氧 18 值向北变负，下降梯度在喜马拉雅山顶以北约 1.5‰，最北部高原水的同位素高度梯度降低至 1 至 2‰/km。重建的古高度表明西藏大部分地区在始新世中期达到了现代的高度。
22. Saylor, J.E., Quade, J., Dettman, D.L., DeCelles, P. G., Kapp P. A., Ding, L., **2009**. The late Miocene through present paleoelevation history of southwestern Tibet. **American Journal of Science**, 309(1): 1. 注释：运用稳定同位素古高度计恢复喜马拉雅山脉西南端扎达盆地古高度和古气候。西藏西南部扎达盆地年龄为~9.2 Ma，盆地内软体动物和植物化石氧同位素结果低于盆地现代水，表明扎达盆地自 9 Ma 以来气候干燥寒冷，海拔等于或高于现代海拔 1.5 km。盆地植物 13C_p 含量从 -23.4~-26.8‰增加到-8.4‰，表明 7 Ma 时，扎达盆地流域 C4 生物量的增加。
23. Clift, P.D., Hodges, K.V., Heslop, D., Hannigan, R., Van Long, H., Calves, G., **2008**. Correlation of Himalayan exhumation rates and Asian monsoon intensity. **Nature Geoscience**, 1(12): 875-880. 注解：该研究探讨了喜马拉雅山脉的隆升剥露和南亚季风之间的协同演化作用。喜马拉雅造山带的构造主要由新近纪 (<23 Ma) 的变形构造所控制，地表侵蚀作用随着该构造阶段的开始而加剧，并在 15 Ma 前达到峰值，直到 10.5 Ma。随后地表侵蚀作用逐渐放缓至约 3.5 Ma。但在上新世晚期和更新世又开始增加。根据已发表的热年代学数据推断的喜马拉雅山剥露速率与过去 2300 万年的季风强度之间存在相关性，作者将其解释为喜马拉雅地区新近纪气候与侵蚀和变形之间的动态耦合。
24. Rowley D.B., Currie, B.S., **2006**. Palaeo-altimetry of the late Eocene to Miocene Lunpola basin, central Tibet. **Nature**, 439(7077): 677-681. 注解：利用氧同位素古高度计的理论模型计算得到的公式，首次定量重建青藏高原中部伦坡拉盆地的古高度。重建结果显示，伦坡拉盆地在晚始新世时期古高度为 4850m，丁青湖组沉积时期海拔高度为 4260m，因此提出青藏高原自 35Ma 以来保持着 4km 以上的海拔高度。这项研究引起后续对青藏高原中部，特别是伦坡拉盆地展开多种古高度定量重建研究的热潮。
25. Currie, B.S., Rowley, D.B., Tabor, N.J., **2005**. Middle Miocene paleoaltimetry of southern Tibet: Implications for the role of mantle thickening and delamination in the Himalayan orogen. **Geology**, 33(3): 181-184. 注解：利用古土壤碳酸盐中的氧同位素信息，重建了南木林盆地中中新世时期的古高度，其结果表明藏南在 15 Ma 就达到 5.2 km 的高度，该结果与 Spicer 教授利用植物化石重建的古高度结果一致。提出岩石圈地幔的俯冲加厚和拆沉断离是驱动藏南古海拔变化的动力学

因素。

26. Spicer, R.A., Harris, N.B.W., Widdowson, M., Herman, A.B., Guo, S.X., Valdes, P.J., Wolfe, J.A., Kelley, S.M., **2003**. Constant elevation of southern Tibet over the past 15 million years. **Nature**, 421(6923): 622-624. 注解: 率先运用自行开发研究的气候多变量分析程序 (CLAMP) 对藏南中新世以来的古高度进行了研究。在南木林盆地发现一个以杨属、柳属为代表的植物化石群, ^{40}Ar - ^{39}Ar 定年将其精准限定在 15Ma。通过 CLAMP 计算得到的化石湿热焓值重建了南木林盆地在 15Ma 已经达到接近现今的海拔高度 (~4.6km)。
27. Rowley, D.B., Pierrehumbert, R.T., Currie, B.S., **2001**. A new approach to stable isotope-based paleoaltimetry: implications for paleoaltimetry and paleohypsometry of the High Himalaya since the Late Miocene. **Earth and planetary science letters**, 188(1-2): 253-268. 注解: 首次进行了喜马拉雅山脉南坡大气降水氧同位素与海拔高度之间的定量拟合, 为利用氢氧同位素进行古高度重建提供理论依据, 评估了该方法运用过程中的不确定度。并将该方法应用于喜马拉雅地区, 表明喜马拉雅山脉在晚中新世时期抬升至现今高度。
28. Garzzone, C.N., Quade, J., DeCelles, P.G., English N.B., **2000**. Predicting paleoelevation of Tibet and the Himalaya from $\delta^{18}\text{O}$ vs. altitude gradients in meteoric water across the Nepal Himalaya. **Earth and Planetary Science Letters**, 183(1-2): 215-229. 注解: 该研究拟合了喜马拉雅山脉南侧尼泊尔地区现今河流水的氧同位素值 ($\delta^{18}\text{O}$) 随海拔抬升的经验性公式, 并应用于塔口拉盆地的古高度重建。重建结果表明, 青藏高原南部自 11Ma 以来就达到现今的海拔高度。
29. Clark, M.K., Royden, L.H., **2000**. Topographic ooze: Building the eastern margin of Tibet by lower crustal flow. **Geology**, 28: 703-706. 注解: 从青藏高原边界的陡立和缓长的两种端元形式出发, 由于高原东部边缘的大部分地区缺乏明显的上地壳缩短, 这意味着地壳增厚主要发生在地壳深部。通过下地壳韧性流动模型比较, 结果表明, 东部高原呈现下地壳流动特点。这一创造性的下地壳流模型提出为之后在藏东南构造研究提供了许多支持。
30. Chung, S.L., Ching, H.L., Lee, T.Y., Zhang, Y.Q., Xie, Y.W., Li, X.H., Wang, K.L., Wang, P.L., **1998**. Diachronous uplift of the Tibetan plateau starting 40 Myr ago. **Nature**, 394(6695): 769-773. 注解: 从青藏高原东部和西部地区钾质岩浆岩时空分布的角度提出青藏高原存在东-西相差异性生长模式, 该模式认为深部岩石圈拆沉驱动高原东部在 40 Ma 先抬升, 西部则在 20 Ma 发生抬升。
31. Murphy, M. A., Yin, A., Harrison, T.M., Dürr, S.B., Chen, Z., Ryerson, F.J., Kidd, W.S.F., Zhou, X., **1997**. Did the Indo-Asian collision alone create the Tibetan plateau? **Geology**, 25(8): 719-722. 注释: 该研究强调青藏高原中生代期间板块碰撞和俯冲导致的地壳增厚, 可能是青藏高原增长的原因之一。野外填图和年代学结果表明拉萨地体新生代几乎没有南北缩短, 早白垩时期地壳缩短了约 60%, 指示藏南地区在印度-欧亚大陆碰撞前已经被抬升到 3-4 km。
32. Molnar, P., England, P., **1990**. Late Cenozoic uplift of mountain ranges and global climate change: chicken or egg? **Nature**, 346(6279): 29-34. 注解: 针对晚新生代以来山脉隆升影响气候变化, 亦或气候变化影响山脉隆升这个难以解决的科学问题, 回顾了新生代以来的气候记录、对山脉隆升的定义、用于解释山脉隆升的地质证据以及山脉隆升对全球大气环流的扰动影响。提出山体隆升与气候变化是一个相互作用, 互为反馈的过程。新生代以来的以青藏高原为代表的山脉隆升增强了风化剥蚀作用, 消耗大量二氧化碳, 使得全球温度逐步降低。扰乱大气环流的山体将发生地壳均衡回弹作用, 促进山脉进一步隆升。
33. 徐仁, 陶君容, 孙湘君, **1973**. 希夏邦马峰高山栎化石层的发现及其在植物学和地质学上的意义. **植物学报**, 15(1): 102-114. 注解: 青藏高原第一次科考期间, 中国希夏邦马峰登山考察队在希夏邦马峰地区发现一个全新的植物化石群, 以高山栎、似黄背栎、灰背栎、常绿乔木、莎草科为代表。结合孢粉研究显示当时植被以常绿栎林和雪松林为主, 指示当时希夏邦马峰气候温和而多雨, 海拔高度不超过 2500 m。而现今化石产地气候十分严寒, 海拔 5700-5900 m, 因此提出喜

马拉雅山脉自上新世以来隆升了大约 3000 m 的高度。由此开创青藏高原隆升历史研究之先河。

四、矿床、岩石及地球化学^[1-11]

1. Wu, F.Y., Liu, X.C., Liu, Z.C., Wang, R.C., Xie, L., Wang, J.M., Ji, W.D., Yang, L., Liu, C., Khanal, G.p., He, S.X., 2020. Highly fractionated Himalayan leucogranites and associated rare-metal mineralization. *Lithos*, 352: 105319. 注解：提出藏南喜马拉雅带花岗岩具有高分异的特征，具有稀有金属成矿潜力；深入认识和发展青藏高原锂等稀有金属成矿理论以及指导找矿具有重要意义。
2. Guo, Z., Wilson, M., Zhang, M., Cheng, Z., Zhang, L., 2015. Post-collisional ultrapotassic mafic magmatism in South Tibet: Products of partial melting of pyroxenite in the mantle wedge induced by roll-back and delamination of the subducted Indian continental lithosphere slab. *Journal of Petrology*, 56: 1365-1406. 注解：在总结前人研究结果的基础上，本文对整个高原超钾质岩浆展开了系统的研究，提出俯冲的印度板片在 45 Ma 发生了向南回撤，导致软流圈上涌，促使先前被新特提斯洋岩石圈上覆的俯冲沉积物熔体或流体、或者印度大陆岩石圈表面的碳酸盐岩台地熔体交代的富集地幔发生部分熔融，形成超钾质岩浆作用。
3. Hou, Z.Q., Yang, Z.M., Lu, Y.J., Kemp, A., Zheng, Y.C., Li, Q.Y., Tang, J.X., Yang, Z.S., Duan, L.F., 2015. A genetic linkage between subduction-and collision-related porphyry Cu deposits in continental collision zones. *Geology*, 43(3): 247-250. 注解：青藏高原冈底斯带后碰撞斑岩型矿床的岩浆物质来源及成因机制是重要的科学问题之一。论文系统对比俯冲期和碰撞期的岩浆及成矿特征等，提出后碰撞斑岩型矿床的岩浆物质来源于特提斯洋俯冲阶段形成的含硫化物下地壳，对于理解后碰撞的斑岩成矿系统具有重要意义。
4. Deng, J., Wang, Q.F., Li, G.J., Li, C.S., Wang, C.M., 2014. Tethys tectonic evolution and its bearing on the distribution of important mineral deposits in the Sanjiang region, SW China. *Gondwana Research*, 26(2): 419-437. 注解：青藏高原三江成矿带发育多期次且叠加的铜-钼-锡-钨-金等多金属成矿作用。在系统研究三江成矿带构造演化、岩石成因、矿床时空分布及成因机制等的基础上，提出复合造山成矿理论，对深化认识和发展矿床成矿理论及指导找矿都具有重要的意义。
5. Richards, J.P., 2009. Postsubduction porphyry Cu-Au and epithermal Au deposits: products of remelting of subduction-modified lithosphere. *Geology* 37: 247-250. 注解：特提斯成矿域发育洋壳俯冲闭合之后的众多中新世斑岩型铜钼矿床，作者结合构造演化、岩石成因、成矿机制等，提出后俯冲或者后碰撞斑岩型矿床的成矿模式，其不同于安第斯型洋壳俯冲阶段的斑岩成矿系统；为研究和发展碰撞型斑岩型成矿理论建立了基本框架。
6. Yang, J.S., Dobrzynetska, L., Bai, W.J., Fang, Q.S., Robinson, P.T., Zhang, J., Green, H.W., 2007. Diamond-and coesite-bearing chromitites from the Luobusa ophiolite, Tibet. *Geology*, 35(10): 875-878. 注解：青藏高原豆荚状铬铁矿是关键金属铬的重要矿床类型之一。在铬铁矿床中发现金刚石、柯石英等超高压矿物，提出豆荚状铬铁矿深部地幔成因的新模式，挑战了传统浅部地幔成因的观点，对深化认识青藏高原乃至全球俯冲带的豆荚状铬铁矿矿床的成因机制提供了新的视角。
7. Hou, Z.Q., Gao, Y.F., Qu, X.M., and Mo, X.X., 2004. Origin of adakitic intrusives generated during mid-Miocene east-west extension in southern Tibet. *Earth and Planetary Science Letters*, 220(1-2): 139-155. 注解：本文观察到这些埃达克岩赋存于中新世含铜斑岩带中，沿平行雅鲁藏布江缝合带的冈底斯弧发育，局部受北东向正断层系统控制，认为印度大陆板块在~25 Ma 开始出现了板块断离，导致中新世超钾质岩浆发育，在其向上运移和底侵的过程中，诱发了下地壳的部分熔融，产生了埃达克质岩岩浆。由于埃达克质岩岩浆源区富水，并有超钾质基性岩浆混入，使得岩浆热液系统中大量的含矿流体充分的分离而成矿。
8. Chung, S. L., Liu, D., Ji, J., Chu, M. F., Lee, H. Y., Wen, D. J., Lo, C. H., Lee, T. Y., Qian, Q., Zhang, Q., 2003. Adakites from continental collision zones: melting of thickened lower crust beneath southern Tibet.

- Geology**, 31(11): 1021-1024. 注解: 埃达克岩是一种低 K、高 Al、Na 和 Sr, 亏损 Y 和 HREE 的中英质岩石, 通常发生在与大洋板块俯冲有关的弧环境中。但是, 在藏南分布着 26-10 Ma 的大陆碰撞环境下的埃达克质岩, 本文通过温度压力计算认为其来源是增厚的西藏地壳下部(50 km)榴辉岩和/或石榴石角闪岩的熔融, 形成于渐新世晚期构造增厚的岩石圈地幔的拆沉。
9. Miller, C., Schuster, R., Klötzli, U., Frank, W., Purtscheller, F., 1999. Post-collisional potassic and ultrapotassic magmatism in SW Tibet: geochemical and Sr-Nd-Pb-O isotopic constraints for mantle source characteristics and petrogenesis. **Journal of Petrology**, 40(9): 1399-1424. 注解: 本文对拉萨地块雄巴地区的早中新世 (~23 Ma) 后碰撞火山岩进行了细致研究, 明确提出幔源超钾质火山岩与钾质中酸性火山岩 (英安岩和流纹岩) 在岩浆源区和岩石成因上存在明显差异, 认为后者起源于拉萨地块地壳的部分熔融。
 10. Turner, S., Arnaud, N., Liu, J., Rogers, N., Hawkesworth, C., Harris, N., Kelly, S., Calsteren, P.V., Deng, W., 1996. Post-collision, shoshonitic volcanism on the Tibetan Plateau: Implications for convective thinning of the lithosphere and the source of ocean island basalts. **Journal of Petrology**, 7(1): 45-71. 注解: 本文通过对藏南拉萨地块和藏北羌塘与可可西里地区中新世富钾火山岩进行系统的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 定年同位素地球化学分析, 将这些超钾质岩石的 Sr-Nd-Pb 同位素组成和不相容元素特征与地幔源区的交代富集作用联系起来, 并且主张后碰撞超钾质岩石的形成与藏南加厚岩石圈地幔的对流减薄有关。
 11. Coulon, C., Maluski, H., Bollinger, C., Wang, S., 1986. Mesozoic and Cenozoic volcanic rocks from central and southern Tibet: ^{39}Ar - ^{40}Ar dating, petrological characteristics and geodynamical significance. **Earth and Planetary Science Letters**, 79(3-4): 281-302. 注解: 本文对西藏林周、羊八井、纳木错/那曲和安多等广大地区出露的岩浆岩进行了单矿物 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代学和地球化学研究, 不仅识别出了大量 110-49 Ma 的岩浆岩, 还确认了麻江地区 15-10 Ma 富钾火山岩的存在。认为这种钾含量较高并且富集不相容元素的中新世火山岩与其他同碰撞岩浆活动记录之间存在约 25 Ma 的间歇期, 属于典型的后碰撞岩浆岩, 反映了一种伸展的构造环境。

拓展文献^[1-14]

1. Yan, Q.H., Wang, H., Chi, G.X., Wang, Q., Hu, H., Zhou, K.L., Zhang, X.Y., 2022. Recognition of a 600-km-long late triassic rare metal (Li-Rb-Be-Nb-Ta) pegmatite belt in the western Kunlun orogenic belt, western China. **Economic Geology**, 117: 213-236. Xu, Z.Q., Fu, X.F., Wang, R.C., Li, G.W., Zheng, Y.L., Zhao, Z.B., Lian, D., 2020. Generation of lithium-bearing pegmatite deposits within the Songpan-Ganze orogenic belt, East Tibet. **Lithos**, 354: 105281. 注解: 青藏高原可可西里-松潘甘孜带花岗伟晶岩型锂矿已经成为我国最重要的矿产地之一。研究提出该锂矿带形成与变质穹隆存在密切的关系, 该认识对于深入理解该巨型稀有金属成矿带的形成机制以及指导找矿都具有重要意义。
2. Yang, J.S., Wu, W.W., Lian, D.Y., Rui, H.C., 2021. Peridotites, chromitites and diamonds in ophiolites. **Nature Reviews Earth & Environment**, 2(3): 198-212. 注解: 系统总结了铬铁矿床中金刚石、柯石英等超高压矿物, 完善和发展了豆荚状铬铁矿深部地幔成因的模式, 对深化认识青藏高原乃至全球俯冲带的豆荚状铬铁矿矿床的成因都具有重要的理论意义。
3. Zheng, Y.C., Liu, S.A., Wu, C.D., Griffin, W.L., Li, Z.Q., Xu, B., Yang, Z.M., Hou, Z.Q., O'Reilly, S.Y., 2019. Cu isotopes reveal initial Cu enrichment in sources of giant porphyry deposits in a collisional setting. **Geology**, 47: 135-138. Hou, Z.Q., Zhou, Y., Wang, R., Zheng, Y.C., He, W.Y., Zhao, M., Evans, N.J., Weinberg, R.F., 2017. Recycling of metal-fertilized lower continental crust: Origin of non-arc Au-rich porphyry deposits at cratonic edges. **Geology**, 45: 563-566. 注解: 后碰撞背景下斑岩铜矿的金属来源一致是成矿机制的难题之一。基于发育富硫化物的下地壳包体, 以及成矿斑岩的铜同位素研究, 提出含硫化物石榴石角闪岩的新生下地壳是后碰撞背景铜的主要源区, 为建立大陆碰撞理论提供关键证据。
4. Song, X.Y., Yi, J.N., Chen, L.M., She, Y.W., Liu, C.Z., Dang, X.Y., Yang, Q.A., Wu, S.K., 2016. The Giant

- Xiarhamu Ni-Co Sulfide Deposit in the East Kunlun Orogenic Belt, Northern Tibet Plateau, China. **Economic Geology**, 111: 29-55. 注解：夏日哈木是古特提斯带最具代表性的超大型岩浆型铜镍矿，形成于古特提斯洋俯冲背景，由于玄武质岩浆演化过程中硫化物的不混溶形成的。该矿床的发现和成矿特征、机制的研究，挑战了俯冲阶段不发育岩浆型铜镍矿的国际观点，亦对于深化认识俯冲背景的成矿理论具有重要的意义。
5. Hou, Z.Q., Duan, L.F., Lu, Y.J., Zheng, Y.C., Zhu, D.C., Yang, Z.M., Wang, B.D., Pei, Y.G., Zhao, Z.D., McCuaig, T.C. **2015**. Lithospheric architecture of the Lhasa terrane and its control on ore deposits in the Himalayan-Tibetan orogen. **Economic Geology**, 110(6): 1541-1575. Yang, Z.M., Lu, Y.J., Hou, Z.Q., Chang, Z.S., **2015**. High-Mg Diorite from Qulong in Southern Tibet: Implications for the Genesis of Adakite-like Intrusions and Associated Porphyry Cu Deposits in Collisional Orogens. **Journal of Petrology**, 56: 227-254. 注解：青藏高原冈底斯带发育全球最典型的与印度-欧亚大陆碰撞相关的铜-钼-铅-锌等多金属矿床。基于多年系统研究，查明了碰撞以来各阶段的成矿特色及时空分布，解决了碰撞背景下成矿物质来源、岩石成因及诱发机制等难题，提出大陆碰撞成矿的新理论。
 6. Maffione, M., van Hinsbergen, D.J.J., Koornneef, L.M.T., Guilmette, C., Hodges, K., Borneman, N., **2015**. Forearc hyperextension dismembered the south Tibetan ophiolites. **Geology**, 43: 475-478. 注解：本文强调巨量的拆离伸展作用，认为其代表了新特提斯洋弧前或者弧后盆地岩石圈的残片。
 7. Richards, J.P., **2015**. Tectonic, magmatic, and metallogenic evolution of the Tethyan orogen: From subduction to collision. **Ore Geology Reviews**, 70: 323-345. 注解：本文系统总结了特提斯洋从俯冲到碰撞阶段的构造演化、岩石特征、及成矿机制，建立俯冲和碰撞阶段不同的成矿动力学背景，对于特提斯成矿域的成矿特征及成因机制的认识具有促进作用。
 8. 吴福元, 刘志超, 刘小驰, 纪伟强, **2015**. 喜马拉雅淡色花岗岩. **岩石学报**, 31(1): 1-36. 注解：本文总结了前人研究成果，提出淡色花岗岩属于高分异花岗岩，属于异地深成侵入体，并在上升侵位中经历了大规模地壳物质的混染和高度分离结晶作用。
 9. Deng, J., Wang, Q.F., Li, G.J., Santosh, M., **2014**. Cenozoic tectono-magmatic and metallogenic processes in the Sanjiang region, southwestern China. **Earth-Science Reviews**, 138: 268-299. 注解：系统总结青藏高原三江成矿带新生代的构造演化、岩石成因、矿床时空分布及成因机制等，完善和发展了复合造山成矿理论，对深化理解三江成矿带铜-钼-锡-钨-金等多金属成矿特征和机制具有重要的意义。
 10. 吴福元, 刘传周, 张亮亮, 张畅, 王建刚, 纪伟强, 刘小驰, **2014**. 雅鲁藏布蛇绿岩—事实与臆想. **岩石学报**, 30(2): 293-325. 注解：本文总结了前人研究成果，提出雅江蛇绿岩形成于一个超慢速的扩张脊环境。
 11. Yang, J.S., Dobrzhinetskaya, L., Bai, W.J., Fang, Q.S., Rolinson, P.T., Zhang, J.F., Green H.W., **2007**. Diamond- and coesite-bearing chromitites from the Luobusa ophiolite, Tibet. **Geology**, 35(10): 875-878. 注解：本文提出雅江蛇绿岩初始形成于新特提斯洋洋中脊环境，随后在洋内俯冲过程中被圈补在俯冲带上盘，并被俯冲带熔/流体改造。
 12. Beaumont, C., Jamieson, R.A., Nguyen, M.H., and Lee, B., **2001**. Himalayan tectonics explained by extrusion of a low-viscosity crustal channel coupled to focused surface denudation. **Nature**, 414 (6865): 738-742. 注解：本文认为印度-亚洲汇聚使岩石圈显著加厚后，青藏高原下部的中下地壳由于升温而发生部分熔融，并使其强度、特别是粘性发生显著降低，进而在高原的压力下向四周发生横向流动，形成了这些岩石。
 13. Le Fort, P., Cuney, M., Deniel, C., France-Lanord, C., Sheppard, S.M.F., Upreti, B.N., Vidal, P., **1987**. Crustal generation of the Himalayan leucogranites. **Tectonophysics**, 134(1-3): 39-57. 注解：喜马拉雅造山带的显著特征之一是其山脊上分布的两条东西向近似平行的花岗岩带：高喜马拉雅淡色花岗岩带和北喜马拉雅淡色花岗岩带。本文的喜马拉雅淡色花岗岩是原地-近原地侵位的纯地壳来源的低熔花岗岩。

14. Nicolas, A., Girardeau, J., Marcoux, J., Dupre, B., Wang, X.B., Cao, Y.L., Zheng, H.X. Xiao, X.C., **1981**. The Xigaze ophiolite (Tibet): A peculiar oceanic lithosphere. **Nature**, 294(5840): 414-417. 注解: 本文在第一次中法考察中对日喀则蛇绿岩的岩石组合进行了详细描述, 认为其岩石组合为地幔橄榄岩以二辉橄榄岩或含单斜辉石的方辉橄榄岩为主, 贫单斜辉石的方辉橄榄岩和纯橄岩相对有限; 因而形成于一个慢速的扩张脊环境。

五、高原隆升的环境影响^[1-14]

1. Feijo, A., Ge, D.Y., Wen, Z.X., Cheng, J.L., Xia, L., Patterson, B.D., Yang, Q.S., **2022**. Mammalian diversification bursts and biotic turnovers are synchronous with Cenozoic geoclimatic events in Asia. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, 119(49): e2207845119. 注解: 通过对亚洲哺乳动物多样性重建, 提出南亚一直是亚洲哺乳动物多样性的形成“摇篮”, 现今其它地区的物种丰富度格局主要由拓殖过程驱动; 中新世, 原位物种形成的重要性明显增加。亚洲哺乳动物多样化爆发和转变与构造事件(造山、大陆碰撞)和剧烈的气候重组(亚洲内陆干旱化、亚洲季风增强、海洋退缩)在时间上密切相关。
2. Wu, F.L., Fang, X.M., Yang, Y., Dupont-Nivet, G., Nie, J.S., Fluteau, F., Zhang, T., Han, W. X., **2022**. Reorganization of Asian climate in relation to Tibetan Plateau uplift. **Nature Review Earth & Environment**, 3: 684-700. 注解: 综合集成揭示亚洲季风两次北进演化过程及青藏高原不同部位隆升的驱动作用。从时空变化上提出了以距今 4100 万年和 2600 万年为界, 亚洲季风北进存在两个时间节点和三个阶段的演化。
3. Ding, W.N., Ree, R.H., Spicer, R.A., Xing, Y.W., **2020**. Ancient orogenic and monsoon-driven assembly of the world's richest temperate alpine flora. **Science**, 369(6503): 578. 注解: 选取西藏-喜马拉雅-横断山高寒生物区 18 个被子植物类群和 3798 种植物, 建立生物地理模型, 揭示高寒植物多样性起源于早渐新世, 在 23-15 Ma 和 10-7 Ma 演化速率最快, 是全球降温、造山运动与季风演化共同作用的结果, 且横断山是其起源和分化的摇篮。
4. Fang, X.M., Galy, A., Yang, Y.B., Zhang, W.L., Ye, C.C., Song, C.H., .., **2019**. Paleogene global cooling-induced temperature feedback on chemical weathering, as recorded in the northern Tibetan Plateau. **Geology**, 47(10): 992-996. 注解: 建立了古近纪全球变冷主控构造不活跃区风化强度的地质记录, 揭示温度-风化负反馈的事实存在。
5. Zheng, H., Clift, P., Wang, P., Tada, R., Jia, J., He, M., Jourdan, F., **2013**. Pre-Miocene birth of the Yangtze River. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, 110(19): 7556-7561. 注解: 关于长江的形成年龄及演化历史。利用沉积物物源示踪方法, 揭示长江贯通东流时间发生在渐新世与中新世之交前(距今约 2300 万年前), 而此前学术界普遍认为长江形成于距今 100 万至 200 万年的更新世。
6. Deng, T., Wang, X.M., Fortelius, M., Li, Q., Wang, Y., Tseng, Z.J., Takeuchi, G.T., Saylor, J.E., Salla, L.K., Xie, G.P., **2011**. Out of Tibet: Pliocene woolly rhino suggests High-Plateau origin of Ice Age megaherbivores. **Science**, 333(6047): 1285-1288. 注解: 提出冬季严寒的高海拔青藏高原成为冰期动物群的“训练基地”, 使它们形成对冰期气候的预适应, 此后成功地扩展到欧亚大陆北部的干冷草原地带。由此推翻了冰期动物起源于北极圈的假说, 证明了青藏高原是它们最初的演化中心。
7. Sun, X.J., Wang, P.X., **2005**. How old is the Asian monsoon system?—Palaeobotanical records from China. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, 222: 181-222. 注解: 综合国内新生代不同时期的植物、岩性记录, 揭示出亚洲气候在晚渐世/早中新世之交, 由此前东西向干旱延伸转变成西北干旱的格局, 季风气候系统建立, 此后干旱和季风在距今 15-13 Ma、8 Ma 和 3 Ma 增强。

8. Clark, M.K., Schoenbohm, L.M., Royden, L.H., Whipple, K.X., Burchfiel, B.C., Zhang, X., Tang, W., Wang, E., Chen, L, **2004**. Surface uplift, tectonics, and erosion of eastern Tibet from large-scale drainage patterns. **Tectonics**, 23: TC1006. 注解：中新世之前青藏高原东南缘发育连接青藏高原与南海的单一水系，流域面积包括青藏高原与扬子块体西部，此后高原东部在中新世开始隆升，河流发生袭夺和倒流，该水系先后被扬子江中段、湄公河和扬子江上段及布拉马普特拉河等袭夺，最终形成现代河道。（高原变暖及西风、季风影响已体现）
9. Guo, Z. T., Ruddiman, W. F., Hao, Q. Z., Wu, H. B., Qiao, Y. S., Zhu, R. X., Peng, S. Z., Wei, J. J., Yuan, B.Y., Liu, T. S., **2002**. Onset of Asian desertification by 22 Myr ago inferred from loess deposit in China. **Nature**, 416: 159–163. 注解：厘定了亚洲季风环境和内陆荒漠的起源时代，提出青藏高原在 2200 多万年前开始的隆升导致大气环流发生明显重组，东亚冬季风开始出现，内陆干旱化显著增强。
10. An, Z.S., Kutzbach, J.E., Prell, W.L., Porter, S.C., **2001**. Evolution of Asian monsoons and phased uplift of the Himalayan Tibetan plateau since Late Miocene times. **Nature**, 411(6833): 62-66. 注解：提出东亚季风 8 Ma 开始观点，揭示晚中新世以来高原隆升与亚洲季风气候存在着阶段性的耦合关系，并从机制上模拟证实了青藏高原阶段性生长隆升可导致东亚冬、夏季风同步增强。
11. Molnar, P., England, P., Martinrod, J., **1993**. Mantle dynamics, uplift of the Tibetan Plateau, and the Indian monsoon. **Reviews of Geophysics**, 31: 357–396. 注解：根据青藏高原已发现的褶皱变形和断层活动的年代学数据，从地球动力学角度评述了印度季风在 8Ma 开始出现的证据和高原隆升驱动的贡献。
12. Raymo, M. E., Ruddiman, W. F., **1992**. Tectonic forcing of late Cenozoic climate. **Nature**, 359(6391): 117-122. 注解：综合多方面证据和正负反馈机理，全面提出青藏高原隆升加速硅酸盐风化，驱动 40Ma 以来的大气 CO₂ 降低。
13. Li, J.J., **1991**. The Environmental effects of the uplift of the Qinghai-Xizang Plateau. **Quaternary Science Reviews**, 10: 479- 483. 注解：提出青藏高原上新世以来阶段性隆升，黄河上游于 170 万年前诞生的观点。
14. Ruddiman, W.F., Kutzbach, J.E., **1989**. Forcing of late Cenozoic Northern Hemisphere climate by plateau uplift in southern Asia and the American West. **Journal of Geophysical Research**, 94(D15): 18409-18427. 注解：通过数值模拟方法，揭示了山地隆升对亚洲季风系统的形成以及亚洲和北美大陆气候格局的影响。结果显示，随着科罗拉多高原和青藏高原的逐步抬升，北美、北欧、亚洲北部的冬季变冷；美国太平洋沿岸、欧亚大陆腹地和地中海地区的夏季变干；亚洲和美国东南海岸更加温暖潮湿。模拟结果还表明地形抬升是影响中新世晚期至上新世早期北半球气候变化的主要原因。

扩展文献^[1-29]

1. Miao, Y., Fang, X., Sun, J., Xiao, W., Yang, Y., Wang, X., Farnsworth, A., Huang, K., Ren, Y., Wu, F., Qiao, Q., Zhang, W., Meng, Q., Yan, X., Zheng, Z., Song, C., Utescher, T., **2022**. A new biologic paleoaltimetry indicating Late Miocene rapid uplift of northern Tibet Plateau. **Science**, 378(6624): 1074-1079. 注解：从孢粉植被角度提出了一种新的重建古高度的方法，揭示青藏高原东北部在 1100-70 万年前发生快速隆升，这一隆升增强了西北内陆干旱，喜山及横断山区的湿润，对区域气候和生物演化产生了重要影响。
2. Li, S. F., Valdes, P. J., Farnsworth, A., Davies-Barnard, T., Su, T., Lunt, D. J., Spicer, R. A., Liu, J., Deng, W. Y. D., Huang, J., Tang, H., Ridgwell, A., Chen, L. L., Zhou, Z. K. **2021**. Orographic evolution of northern Tibet shaped vegetation and plant diversity in eastern Asia. **Science Advances**, 7(5): eabc7741. 注解：利用一种新的植物多样性模型 (Jedi-DGVM) 对地质历史时期的植物多样性进行模拟，揭示青藏高原北部从古近纪到新近纪的隆升增强了东亚季风气候系统，驱动了东亚植

被从以落叶阔叶林为主的干旱、半干旱植被类型转变为以常绿阔叶林为主的湿润、半湿润植被类型，并促进了植物多样性的增加。

3. Deng, T., Wu, F., Su, T., Zhou, Z. 2020. Tibetan Plateau: An evolutionary junction for the history of modern biodiversity. **Science China Earth Sciences**, 63(2): 172-187. 注解：新生代青藏高原经历了从“热带动植物乐土”到“冰期动物群的摇篮”的转变，通过综合新生代高原古生物重要类群的演化历史，总结了在高原生长影响下的三种生物演化模式：(1) 土著物种本地起源，(2) 本地起源并“走出西藏”，(3) 途经西藏地区的洲际扩散，突出了青藏高原在现代生物多样性形成过程中的“演化枢纽”地位。
4. Fang, X.M., Dupont-Nivet, G., Wang, C.S., Song, C.H., Meng, Q.Q., Zhang, W.L., Clift, J.S., Zhang, T., Mao, Z.Q., Chen, Y., 2020. Revised chronology of central Tibet uplift (Lunpola Basin). **Science Advances**, 6: eaba7298. 注解：修订了伦坡拉新生代地层年代序列，并揭示高原隆升与印度季风演化的联系。利用古地磁和火山灰精确测定和建立了伦坡拉盆地约 4100 万至 2150 万年期间的新生代地层年代序列，修正了该区域的古高度，40 Ma 前小于 2300 米，26-21 Ma 才可能达到 3500-4500 米。
5. Zhang, P., Najman, Y., Mei, L.F., Millar, I., Sobel, E.R., Carter, A., Barfod, D., Dhuime, B., Garzanti, E., Govin, G., Vezzoli, G., Hu, X.L., 2019. Palaeodrainage evolution of the large rivers of East Asia, and Himalayan-Tibet tectonics. **Earth-Science Reviews**, 192: 601-630. 注解：综合评估雅江、伊洛瓦底江与古红河关系，认为目前沉积证据不足以支持大陆尺度南流古红河的存在。
6. Nie, J.S., Ruetenik, G., Gallagher, K., Hoke, G., Garzzone, C.N., Wang, W., Stockli, D., Hu, X.F., Wang, Z., Wang, Y., Stevens, T., Danišik, M., Liu, S.P., 2018. Rapid Incision of the Mekong River in the Middle Miocene Linked to Monsoonal Precipitation. **Nature Geoscience**, 11: 944-948. 注解：热年代分析揭示澜沧江上、中、下段河谷均在 17 百万年左右发生了大幅度的快速下切，时代与东亚季风增强时代一致，通过模拟实验，提出气候变化(东亚季风增强造成降水增加)是造成澜沧江快速下切和形成的一个重要原因。
7. Chen Y., Yan, M.D., Fang, X.M., Song, C.H., Zhang, W.L., Zan, J.B., Zhang, Z.G., Li, B.S., Yang, Y.P., Zhang, D.W., 2017. Detrital zircon U-Pb geochronological and sedimentological study of the Simao Basin, Yunnan: Implications for the Early Cenozoic evolution of the Red River. **Earth and Planetary Science Letters**, 476: 22-33. 注解：利用碎屑锆石年龄谱物源对比分析及沉积相时空演化分析，提出高原东北部在早新生代存在一条从高原东部南流入南海的古红河水系，至晚始新世（距今约 3500 万年前），由于藏东南东南向逃逸和旋转该水系丢失上游大部分截水面积，现代红河开始形成。
8. Licht, A., van Cappelle, M., Abels, H. A., Ladant, J.B., Trabucho-Alexandre, J., France-Lanord, C., Donnadieu, Y., Vandenberghe, J., Rigaudier, T., Lecuyer, C., Terry, D., Adriaens, R., Boura, A., Guo, Z., Soe, A.N., Quade, J., Dupont-Nivet, G., Jaeger, J. J., 2014. Asian monsoons in a late Eocene greenhouse world. **Nature**, 513(7519): 501. 注解：通过缅甸和西宁的证据指出晚始新世时存在类似季风的气候，是对温室气候的响应。
9. Torres, M. A., West, A. J., Li, G., 2014. Sulphide oxidation and carbonate dissolution as a source of CO₂ over geological timescales. **Nature**, 507(7492): 346-349. 注解：提出了高原隆升快速消耗大气 CO₂ 的同时也会加强硫化物氧化从而溶解碳酸盐释放 CO₂，从而维持碳循环平衡。
10. Molnar, P., Boos, W. R., Battisti, D.S., 2010. Orographic controls on climate and paleoclimate of Asia: thermal and mechanical roles for the Tibetan Plateau. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**, 38: 77-102. 注解：评述了印度季风于~10 Ma 显著增强的观点，并指出相较于青藏高原的大气加热作用，高原大地形对南下的干冷气流的动力阻挡作用对印度夏季风的形成演化更为关键。
11. Clift, P.D., Hodges, K.V., Heslop, D., Hannigan, R., Long, H.V., Calves, G., 2008. Correlation of

- Himalayan exhumation rates and Asian monsoon intensity. *Nature Geoscience*, 1: 875–880. 注解：重建了喜马拉雅山侵蚀速率变化，并揭示出印度季风中新世以来演化历史。地层记录以及热年代学数据表明，喜马拉雅山侵蚀速率在 15Ma 达到峰值，10.5 Ma 之后开始显著降低，晚上新世以来则表现为再次增加的趋势。
12. Liu-Zeng, J., Tapponnier, P., Gaudemer, Y., Ding, L., 2008. Quantifying landscape differences across the Tibetan plateau: Implications for topographic relief evolution. *Journal of Geophysical Research-Earth Surface*, 113: F04018. 注解：青藏高原地貌特征量化研究。高原北部和中部为“正地形”，海拔与坡度呈正相关；中部内流区向东部外流区过渡时正地形变为“负地形”，海拔与坡度呈负相关。内流区的盆地充填过程平滑了构造成因的坡度，而外流区河流的溯源侵蚀打断了这种平滑过程，使近河地段（低海拔地区）变陡。
 13. Clift, P.D., Blusztajn, J., Nguyen, A.D., 2006. Large-scale drainage capture and surface uplift in eastern Tibet-SW China before 24 Ma inferred from sediments of the Hanoi Basin, Vietnam. *Geophysical Research Letters*, 33: L19403. 注解：河流水系演变模型及侵蚀和沉积岩体积质量平衡分析，揭示大河水系的存在；通过汇区越南河内盆地物源变化，提出高原东部在 24 Ma 前东南向隆起倾斜，导致水系发生重组。
 14. Wang, P.X., Clemens, S., Beaufort, L., Braconnot, P., Ganssen, G., Jian, Z.M., Kershaw, P., Sarnthein, M., 2005. Evolution and variability of the Asian monsoon system: state of the art and outstanding issues. *Quaternary Science Reviews*, 24: 595–629. 注解：对亚洲季风系统的演化历史和驱动机制及存在问题进行了系统性评述，同时对未来工作需要重点关注的两个研究领域进行了阐释。
 15. Fortelius, M., Eronen, J., Jernvall, J., Liu, L.P., Pushkina, D., Rinne, J., Teaskov, A., Vislobokova, I., Zhang, Z.Q., Zhou, L.P., 2002. Fossil mammals resolve regional patterns of Eurasian climate change over 20 million years. *Evolutionary Ecology Research*, 1005-1016. 注解：指出植食性哺乳动物齿冠高度平均值可作为降水代用指标，重建了 24-2 Ma 的亚洲大陆气候格局，发现 24-15 Ma 亚欧气候都较湿润，7-5 Ma 东亚湿润而欧洲经历了短暂的干旱。
 16. Liu, T. S., Ding, Z. L., 1998. Chinese Loess and the Paleo-monsoon. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 26(1): 111-145. 注解：评述了中国风成黄土沉积记录的亚洲季风演化信息。概括出过去 260 万年以来，中国黄土记录了 166 个轨道尺度的气候变化事件，并指出全球冰量变化是控制第四纪亚洲季风时空演化的主要驱动力。
 17. 刘东生, 郑绵平, 郭正堂, 1998. 亚洲季风系统的起源和发展及其与两极冰盖和区域构造运动的时代耦合性. *第四纪研究*, 3: 194-204. 注解：系统概括提出了东亚季风于渐新世末-中新世初形成的观点。基于环境记录的分析，揭示出早新生代我国气候带大致呈行星风系控制下的东西走向格局。东南部地区在渐新世开始湿润化，显示了东南季风的雏形。中新世中期东南和西南部显著湿润化，标志着东南和西南季风的形成。
 18. Berner, R.A., Caldeira, K., 1997. The need for mass balance and feedback in the geochemical carbon cycle. *Geology*, 25(10): 955-956. 注解：提出了负反馈维持碳循环稳定性的重要性，否则高原隆升会快速消耗光大气 CO₂。
 19. France-Lanord, C., Derry, L.A., 1997. Organic carbon burial forcing of the carbon cycle from Himalayan erosion. *Nature*, 390(6655): 65-67. 注解：定量计算了孟加拉扇的硅酸盐风化和有机碳埋藏分别导致的大气 CO₂ 消耗通量，提出有机碳埋藏而不是硅酸盐风化驱动了晚新生代全球变冷。
 20. Kump, L.R., Arthur, M. A., 1997. Global chemical erosion during the Cenozoic: Weatherability balances the budgets. In *Tectonic uplift and climate change*. (pp. 399-426). **Springer**, Boston, MA. 注解：提出了高原隆升快速消耗大气 CO₂ 会导致全球降温从而降低世界其他地区的风化速率和 CO₂ 消耗，从而维持碳循环平衡。

21. Clemens, S., Murray, D., Prell, W., **1996**. Nonstationary phase of the Plio-Pleistocene Asian monsoon. **Science**, 274: 943–948. 注解：对上新世以来印度季风的周期性演化及驱动机制进行了详细研究。
22. Fielding, E., Isacks, B., Barazangi, M., Duncan, C., **1994**. How flat is Tibet. **Geology**, 22: 163-167. Shackleton, R.M., Chang, C., **1988**. Cenozoic uplift and deformation of the Tibetan Plateau: the geomorphological evidence. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 327: 365-377. 注解：青藏高原存在一个横跨高原的侵蚀面（夷平面），由于断层和翘曲，其现代高程残存约 4500-6000 m。侵蚀面发生年代为中新世中期至晚期。地壳变形增厚主要发生在夷平之前，之后地壳缩短很小。
23. Prell, W.L., Kutzbach, J.E., **1992**. Sensitivity of the Indian monsoon to forcing parameters and implications for its evolution. **Nature**, 360: 647–653. 注解：从数值模拟角度证实夏季太阳辐射的增多以及青藏高原海拔的增加是导致印度季风增强的关键因素，并揭示出青藏高原 8 Ma 左右快速隆升对印度季风的增强有显著影响。
24. Manabe, S., Broccoli, A. J., **1990**. Mountains and arid climates of middle latitudes. **Science**, 247: 192-195. 注解：通过数值模拟方法揭示青藏高原的隆升阻挡了海洋水汽深入大陆内部，并促使亚洲内陆地区盛行下沉气流，从而对北半球中纬度地区大气降水空间格局和中亚内陆干旱区的扩展产生显著影响。
25. Kutzbach, J.E., Guetter, P.J., Ruddiman, W.F., Prell, W.L., **1989**. Sensitivity of climate to late Cenozoic uplift in Southern Asia and the American West-Numerical experiments. **Journal of Geophysical Research**, 94(D15): 18393-18407. 注解：通过数值模拟方法揭示了科罗拉多高原和青藏高原隆升产生的阻挡作用使原本的行星风带发生了绕流和翻转，并使得阿留申低压增强并向西移动-亚洲东海岸产生较强的槽，冰岛低压减弱向西南移动-在北美东海岸产生较强的槽。
26. Quade, J., Cerling, T.E., Bowman, J.R., **1989**. Development of Asian monsoon revealed by marked ecological shift during the latest Miocene in northern Pakistan. **Nature**, 342: 163–166. 注解：首次提出印度季风于 8-7 Ma 开始出现的观点。西瓦里克群晚新生代地层序列土壤碳酸盐碳同位素记录在 8-7 Ma 左右显著增加，可能主要指示印度季风于此时开始出现，并导致 C4 植物明显增加。
27. Raymo, M. E., Ruddiman, W. F., Froelich, P. N., **1988**. Influence of late Cenozoic mountain building on ocean geochemical cycles. **Geology**, 16(7): 649-653. 注解：率先提出晚新生代以青藏高原和安第斯山为代表的造山带隆升加速化学风化，快速消耗大气 CO₂ 导致全球变冷。
28. Ye, D.Z., **1981**. Some Characteristics of the Summer Circulation Over the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau and Its Neighborhood. **Bulletin of the American Meteorological Society**, 62(1): 14-19. 注解：阐释了夏季青藏高原水平以及垂直方向上的大气环流形式，并对其作为巨大的高海拔热源的显著环流特征进行了论述。
29. Manabe, S., Terpstra, T. B., **1974**. The effects of mountains on the general circulation of the atmosphere as identified by numerical experiments. **Journal of Atmospheric Sciences**, 31: 3-42. 注解：通过数值模拟方法揭示了山地隆升对欧亚大陆大气环流格局的影响，并对青藏高原及其周边地区大气流场分布以及山地抬升的影响进行了阐释。

六、冰期-间冰期气候环境^[1-9]

1. Zhao, Y., Tzedakis, P.C., Li, Q., Qin, F., Cui, Q.Y., Liang, C., Birks, H.J.B., Liu, Y.L., Zhang, Z.Y., Ge, J., Zhao, H., Felde, V.A., Deng, C.L., Cai, M.T., Li, H., Ren, W.H., Wei, H.C., Yang, H.F., Zhang, J.W., Yu, Z.C., Guo, Z.T., **2020**. Evolution of vegetation and climate variability on the Tibetan Plateau over the past 1.74 million years. **Science Advances**, 6(19): DOI: 10.1126/sciadv.aay6193. 注解：研究了青藏高原东部若尔盖地区 1.74 Ma BP 以来的植被与气候变化历史，结果表明气候经历了长期的变冷趋势，植被由针阔混交林退化为草原植被；1.74-1.54 Ma BP 气候与植被受低纬太阳辐射驱动，

具有 20 ka 的岁差周期, 1.54-0.62 Ma BP 受低纬太阳辐射和高纬冰盖共同驱动, 具有 20 ka 和 40 ka 周期且叠加千年尺度振荡, 0.62 Ma BP 以来受高纬冰盖驱动, 具有 100 ka 周期, 青藏高原地区气候变化受低纬太阳辐射和高纬冰盖共同驱动。

2. Chen, F.H., Zhang, J.F., Liu, J.B., Cao, X.Y., Hou, J.Z., Zhu, L.P., Xu, X.K., Liu, X.J., Wang, M.D., Wu, D., Huang, L.X., Zeng, T., Zhang, S., Huang, W., Zhang, X., Yang, K., **2020**. Climate change, vegetation history, and landscape responses on the Tibetan Plateau during the Holocene: A comprehensive review. **Quaternary Science Reviews**, 243: 106444. 注解: 该文章通过系统梳理文献, 结合多种古气候及古环境变化记录, 初步厘清了青藏高原全新世气候与生态环境时空变化格局。主要结论如下: 青藏高原全新世年均温变化依然存在较大争议, 但不同指标重建的夏季气温变化趋势较一致, 具体表现为早中全新世高温; 古湖泊水位记录揭示高原全新世“南北”降水变化存在“反相位或异相位”的特征, 这主要与不同气候系统(季风、西风)的影响有关; 孢粉记录揭示中全新世森林范围最大, 早全新世以来高寒草原不断萎缩, 高寒草甸和高寒荒漠范围不断扩张; 区域气候变化是控制植被及其它陆表景观变化的主要因素。问题: 不同古气候代用指标之间存在争议。
3. Owen, L.A., Dortch, J.M., **2014**. Nature and timing of Quaternary glaciation in the Himalayan-Tibetan orogen. **Quaternary Science Reviews**, 88: 14-54. 注解: 该文献系统总结了青藏高原第四纪冰川数值年代学方面的研究成果, 认为整个高原不同部位的冰期发生时间和规模存在很强的差异性。以末次冰期为例, 在以西风影响为主的高原西北干旱区, 冰川在末次冰期早期时达到最大规模, 全球末次冰盛期时, 由于高原西北部干旱加剧, 冰川规模十分有限; 而在以季风影响为主的喜马拉雅山区, 冰川在末次冰期晚阶段(全球末次冰盛期)达到最大规模。另外, 该文献总结了青藏高原全新世冰川演化特征, 强调全新世早期冰川的大范围扩张, 全新世中期至晚期, 冰川在波动中处于退缩趋势。另外, 文献总结的高原西北干旱-半干旱区冰期阶段(19)和季风影响区的冰期阶段(29个)可以作为研究高原晚第四纪冰期演化的对比框架。
4. An, Z.S., Colman, S.M., Zhou, W.J., Li, X.Q., Brown, E.T., Jull, A.J.T., Cai, Y.J., Huang, Y.S., Lu, X.F., Chang, H., Song, Y.G., Sun, Y.B., Xu, H., Liu, W.G., Jin, Z.D., Liu, X.D., Cheng, P., Liu, Y., Ai, L., Li, X.Z., Liu, X.J., Yan, L.B., Shi, Z.G., Wang, X.L., Wu, F., Qiang, X.K., Dong, J.B., Lu, F.Y., Xu, X.W., **2012**. Interplay between the Westerlies and Asian monsoon recorded in Lake Qinghai sediments since 32 ka. **Scientific Reports**, 2: 1-7. 注解: 该研究基于国际大陆环境钻探项目在青藏高原东北缘的青海湖所获取的湖泊沉积岩心, 通过多种古气候代用指标(粒度、碳酸盐含量、TOC等)的分析, 首次提出了青海湖沉积物中粒径大于 25 μm 组分的沉积通量可作为西风气候代用指标; 重建了青藏高原东北部 32 ka 以来连续的、高分辨率季风和西风气候的演化序列, 讨论了西风气候和亚洲夏季风气候相互作用的历史。研究发现, 在冰期-间冰期和冰期千年时间尺度上, 西风气候和亚洲夏季风表现为反相位关系, 冰期西风气候占主导, 全新世亚洲夏季风占主导。青海湖记录的全新世千年尺度季风气候减弱和西风气候增强的突变事件, 揭示了它们与高纬冰盖、北大西洋和低纬大洋气候的联系。问题: 粒度指标受控因素较多, 比如湖泊水位、降雨强度、粉尘输入等, 因此用粒度指标指示西风强度具有一定不确定性。
5. Shi, Y.F., Yu, G., Liu, X.D., Li, B.Y., Yao, T.D., **2001**. Reconstruction of the 30-40 ka BP enhanced Indian monsoon climate based on geological records from the Tibetan Plateau. **Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology**, 169(1-2): 69-83. 注解: 利用冰芯、湖泊和孢粉多指标重建 30-40ka 的青藏高原古气候。当时中国西部整体湖面高; 孢粉和冰芯氧同位素均指示当时气候温暖湿润, 较今天气候更好。指示当时存在超强的夏季风, 热带海洋强蒸发也有重要贡献。机制是 20ka 周期的岁差。MIS3 阶段大湖期证据是错误的。
6. 姚檀栋, 段克勤, 田立德, 孙维贞, **2000**. 达索普冰芯积累量记录和过去 400a 来印度夏季风降水变化. **中国科学 (D 辑)**, 30(6): 619-627. 注解: 气温和降水是气候的两个重要要素。本论文明确了喜马拉雅山达索普冰芯中积累量是印度季风降水的良好指标, 并揭示了近 400a 来印度季风

- 降水的变化过程,同时发现陆海热力对比加大和减弱是达索普冰芯积累量变化的一个直接原因。
7. Thompson, L. G., Yao, T., Mosley-Thompson, E., Davis, M. E., Henderson, K. A., Lin, P.N., **2000**. A high-resolution millennial record of the South Asian Monsoon from Himalayan ice cores. **Science**, 289: 1916-1919. 注解: 喜马拉雅达索普冰芯是在青藏高原地区钻取的海拔高度最高、时间分辨率也最高的透底冰芯。基于该冰芯记录,揭示出过去 1000 年来存在多次干旱事件,其中 1790-1796 年时期的干旱最为严重,20 世纪的变暖趋势在高海拔地区具有放大效应。
 8. Thompson, L. G., Yao, T., Davis, M. E., Henderson, K. A., Mosley-Thompson, E., Lin, P. N., Beer, J., Synal, H.A., Cole-Dai, J., Bolzan, J. F., **1997**. Tropical climate instability: The last glacial cycle from a Qinghai-Tibetan ice core. **Science**, 276: 1821-1825. 注解: 西昆仑古里雅冰芯是在青藏高原地区钻取的长度最长、时间跨距最大的透底冰芯。文章基于该冰芯记录,揭示出在末次冰消期时期内冰芯中 $\delta^{18}\text{O}$ 变化达到 $\sim 5.4\%$,与热带以及极地冰芯中的变化幅度一致。氧同位素 3 阶段、5a 阶段和 5c 阶段的 $\delta^{18}\text{O}$ 以其显著的高值为特征,并与全新世和 5e 阶段的 $\delta^{18}\text{O}$ 值相当,即在这些时段气候以温暖为特征。在末次冰期的多个阶段,气候环境变化存在 200 年左右的振荡周期。
 9. Yao, T., Thompson, L. G., Mosley-Thompson, E., Yang, Z., Zhang, X., Lin, P-N, **1996**. Climatological significance of $\delta^{18}\text{O}$ in north Tibetan ice cores. **Journal of Geophysical Research- Atmospheres**, 101(D23): 29531-29537. 注解: 降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的气候意义研究,是冰芯记录解释的重要基础。本论文基于青藏高原相关气象站点降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的分析与研究,明确了在青藏高原北部地区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与气温之间存在密切关系,这意味着该区域冰芯中 $\delta^{18}\text{O}$ 是气温的良好指标。

扩展文献^[1-9]

1. Yu, S. Y., Colman, S. M., Lai, Z. P., **2019**. Late-Quaternary history of ‘great lakes’ on the Tibetan Plateau and palaeoclimatic implications—A review. **Boreas**, 48(1): 1-19. 注解: 集成了青藏高原已发表的 48 个湖泊的湖岸地貌的年代数据,发现湖面至少从 MIS 5 以来逐渐下降,驳斥了过去传统认识的 MIS 3“大湖期”假说。提出 MIS 5 暖湿气候造成了高湖面的发育, MIS 5 以来总体干旱化的趋势可能是湖面下降的原因。
2. Hou, J., D'Andrea, W.J., Wang, M., He, Y., Liang, J., **2017**. Influence of the Indian monsoon and the subtropical jet on climate change on the Tibetan Plateau since the late Pleistocene. **Quaternary Science Reviews**, 163: 84-94. 注解: 青藏高原的降水受到印度夏季风、亚洲夏季风和西风的影响,过去百年尺度的季风西风相互作用的机制尚不十分清晰。本文利用了青藏高原班公错、青海湖和令戈错沉积物中具有降水指示意义的叶蜡氢同位素记录,分析了晚更新世以来百年尺度夏季季风和西风对青藏高原降水的影响,构建了青藏高原全新世西风-季风变化框架。结果表明青藏高原晚更新世夏季季风减弱,青藏高原西部和东北部在全新世受到夏季季风的影响,而青藏高原中部在早中全新世受到夏季季风的影响,在中晚全新世受到西风的影响,全新世中晚期千年的波动受到北大西洋海温降低的影响。
3. Zhu, L., Lü, X., Wang, J., P, P., Kasper, T., Daut, G., Haberzettl, Torsten., Frenzel, P., Li, Q., Yang, R., Schwalb, A., Mäusbacher, R., **2015**. Climate change on the Tibetan Plateau in response to shifting atmospheric circulation since the LGM. **Scientific Reports**, 5:13318. 注解: 纳木错是青藏高原中部最大的湖泊之一,本文中的纳木错湖泊沉积物岩芯涵盖了过去 24 ka。文章利用现代孢粉数据,建立了孢粉判别指数,随后用于沉积物岩芯中,区分西风和季风的影响。同时结合总有机碳、总氮、碳氮比、元素钙、铁、锰等多种古气候代用指标,综合分析了孢粉判别指数重建的大气环流变化。结果表明从末次冰期冰盛期至 16.5 ka,青藏高原主要受到西风影响,原因为纬向西风带向南移动增强,16.5 ka 之后,青藏高原主要受到印度季风的控制,原因为低纬度太阳辐射的增加增强了印度季风。
4. An, Z.S., Clemens, S.C., Shen, J., Qiang, X.K., Jin, Z.D., Sun, Y.B., Prell, W.L., Luo, J.J., Wang, S.M.,

- Xu, H., Cai, Y.J., Zhou, W.J., Liu, X.D., Liu, W.G., Shi, Z.G., Yan, L.B., Xiao, X.Y., Chang, H., Wu, F., Ai, L.L., F.Y., **2011**. Glacial-interglacial Indian summer monsoon dynamics. **Science**, 333(6043): 719-723. 注解: 利用鹤庆盆地岩芯构建冰期-间冰期印度季风变化, 发现间冰期强季风与印度低压和全球冰量低值一致, 而冰期季风较弱则提前于全球冰量极大值。
5. Cai, Y., Cheng, H., An, Z., Edwards, R. L., Wang, X., Tan, L., Wang, J., **2010**. Large variations of oxygen isotopes in precipitation over south-central Tibet during Marine Isotope Stage 5. **Geology**, 38(3): 243-246. 注解: 青藏高原中南部天门洞的石笋氧同位素记录是青藏高原第一个洞穴记录。本文主要涵盖了 MIS5 阶段的石笋氧同位素记录, 提供了亚洲季风系统主要响应北半球夏季太阳辐射变化的证据, 表明了降水是控制青藏高原中南部轨道时间尺度降水氧同位素变化的主要因素, 而不是温度。该记录有助于解释区域冰芯氧同位素记录。
 6. Herzschuh, U., **2006**. Palaeo-moisture evolution in monsoonal Central Asia during the last 50,000 years. **Quaternary Science Reviews**, 25(1-2): 163-178. 注解: 本文集成了亚洲中部 75 个第四纪末期的古气候记录, 综合分析了过去 50 ka 的湿度变化。在 MIS 3 阶段的中期和晚期, 该地区气候湿润, 末次冰盛期时气候干旱, 末次冰盛期后气候逐步改善。在全新世早期, 印度季风主导的青藏高原地区有效湿度较高, 表明这一时期是青藏高原气候条件最佳的时期。而在东南亚季风和西风主导的地区, 气候条件最佳的时期出现在全新世中期。可能机制为全新世早期太阳辐射的增强导致青藏高原上空的低层辐合增强, 从而导致夏季季风的增强。强烈的空气抬升导致青藏高原上层对流层的降水和空气分流增强。同时, 北方相邻的地区气团下沉增强, 导致了干旱程度增加。
 7. Zheng, M.P., Yuan, H.R., Zhao, X.T., Liu, X.F., **2005**. The Quaternary pan-lake (overflow) period and paleoclimate on the Qinghai-Tibet Plateau. **Acta Geologica Sinica-English Edition**, 79(6): 821-834. 注解: 对高原 17 个湖区地质调查, 此文报道了色林错、扎布耶、柴达木和南昆仑、郭扎错-甜水海、鲁玛江东错-班公错、纳木错, 结合遥感图像和地形图, 研究高原泛湖期的时期和范围。划分出南青海泛湖、南昆仑泛湖、北羌塘泛湖、南羌塘泛湖、藏南泛湖五个泛湖系统。机制方面, 除了 40-30 ka 泛湖期的解释与施雅风等一致, 未解释更早的泛湖期。测年数据待进一步确认。
 8. Gasse, F., Arnold, M., Fontes, J. C., Fort, M., Gibert, E., Huc, A., Li, B., Li, Y., Liu, Q., Mélières, F., Van Campo, E., Wang, F., Zhang, Q., **1991**. A 13,000-year climate record from western Tibet. **Nature**, 353: 742-745. 注解: 青藏高原西部最早的湖泊沉积记录。本文基于青藏高原西部松西错长达 13000 年的湖泊沉积物岩芯, 结合湖岸和湖芯中矿物、自生碳酸盐碳氧同位素、总有机碳、孢粉、介型、硅藻等指标, 表明全新世早期和中期比现在更为温暖潮湿, 主要是由于轨道引起的夏季太阳辐射的增加, 同时 YD 等气候事件发生与中国其他地区一致。
 9. Thompson, L. G., Mosley-Thompson, E., Davis, M. E., Bolzan, J. F., Dai, J., Yao, T., Gundestrup, N., Wu, X., Klein, L., Xie, Z., **1989**. Holocene-Late Pleistocene climatic ice core records from Qinghai-Tibetan Plateau. **Science**, 246(4929): 474-477. 注解: 祁连山敦德冰芯是在青藏高原地区钻取的第一支透底冰芯。文章基于该冰芯记录重建了末次冰期以来的气候变化, 揭示出末次冰期时尘埃含量明显高于全新世, 20 世纪后半叶是该冰芯整个记录时段内最暖的时期之一, 其温暖程度与全新世大暖期 (6-8 ka BP) 气候状况相当。(说明: 由于定年错误, 本文关于气候变化的论述是错误的, 但敦德冰芯是青藏高原首支透底冰芯, 其冰芯稳定同位素及粉尘、离子含量的分析研究方法与思路至今仍具有重要的参考意义)

七、高原变暖及西风、季风影响^[1-11]

1. Guo, D., Pepin, N., Yang, K., Sun, J., Li, D., **2021**. Local changes in snow depth dominate the evolving pattern of elevation-dependent warming on the Tibetan Plateau. **Science Bulletin**, 66(11): 1146-1150. 注解: 该文解决了 TP 增温是否存在海拔依赖性这一问题。研究发现当研究时段内高海拔积雪减

少时, 增温随海拔增加; 反之, 当研究时段内积雪变化没有明显的海拔梯度时, 增温没有明显的海拔依赖性。这一结论预示着随着区域进一步增温, 高海拔积雪减少, 未来增温的海拔依赖性会加强。

2. Liu, Y., Li, Y., Huang, J., Zhu, Q., Wang, S. **2020**. Attribution of the Tibetan Plateau to northern drought. *National Science Review*, 7(3): 489-492. 注解: 关于青藏高原对下游降水的影响, 以往研究较少关注高原与华北干旱的关系, 而且也没有考虑青藏高原受气溶胶污染的云东移对下游的影响。论文提出全球变暖下副热带西风急流北移, 中高层西风变弱, 使得自高原输送至北方地区的水汽、云、沙尘等减少, 是华北地区降水减少、干旱频发的原因之一。
3. Pepin, N., Bradley, R.S., Diaz, H.F., Baraer, M., Caceres, E.B., Forsythe, N., Fowler, H., Greenwood, G., Hashmi, M.Z., Liu, X.D., Miller, J.R., Ning, L., Ohmura, A., Palazzi, E., Rangwala, I., Schoener, W., Severskiy, I., Shahgedanova, M., Wang, M.B., Williamson, S.N., Yang, D.Q., Mt Res Initiative, E.D.W.W.G., **2015**. Elevation-dependent warming in mountain regions of the world. *Nature Climate Change*, 5(5): 424-430. 注解: 综述了全球高山地区海拔依赖性变暖的特征和相关机理。越来越多的证据表明, 升温速率随着海拔的升高而增大, 即海拔依赖性变暖 (EDW)。论文回顾了 EDW 的重要机制: 雪反照率、水汽比湿变化、云抬升凝结、温室气体辐射强迫的响应差异以及气溶胶的辐射效应。所有这些都会导致海拔升高 (或临界海拔升高时) 加剧变暖。讨论了未来需要通过改进观测、卫星遥感和模型模拟来增加对山区温度趋势及其控制机制的了解。问题: 在更高海拔地区观测资料的缺乏导致该区域 EDW 未知。
4. Wu, G., Duan, A., Liu, Y., Mao, J., Ren, R., Bao, Q., He, B., Liu, B., Hu, W., **2015**. Tibetan Plateau climate dynamics: recent research progress and outlook. *National Science Review*, 2: 100-116. 注解: 提出了青藏高原感热气泵和热力适应理论, 证明青藏-伊朗高原感热加热影响东亚和南亚夏季风形成的途径, 指出了青藏高原热力强迫和机械强迫在不同季节中的作用, 揭示了青藏高原影响亚洲季风爆发的物理机制、青藏高原热力强迫的次季节影响、以及在全球变暖背景下青藏高原感热通量的变化趋势及其与中国东部降水分布型的物理联系。
5. Maussion, F., Scherer, D., Mölg, T., Collier, E., Curio, J., Finkelnburg, R., **2014**. Precipitation seasonality and variability over the Tibetan Plateau as resolved by the High Asia Reanalysis. *Journal of Climate*, 27(5): 1910-1927. 注解: 依靠大气模拟研究 TP 降水在月份-年尺度上的特征, 是研究方法尝试的经典文献。依靠高分辨率大气模拟, 发展了青藏高原 10km 分辨率的降水数据 (High Asia Refinement), 为分析缺资料地区 (例如高原西部、高山区) 降水量、降水类型类型、降水季节性和年际变化提供了数据。作为对 HAR 数据的应用实例, 根据冰川的积累模式, 对 TP 的冰川提出新的分类方式, 体现了降水季节性强的空间差异。
6. Yang, K., Wu, H., Qin, J., Lin, C., Tang, W., Chen, Y., **2014**. Recent climate changes over the Tibetan Plateau and their impacts on energy and water cycle: A review. *Global and Planetary Change*, 112: 79-91. 注解: TP 近年来气候变化研究进展综述, 探讨气候变化对 TP 能量和水循环的影响, 并提出 TP 气候变化概念模型。自 1980s 以来, TP 总体经历了变湿变暖, 太阳辐照变弱和风速下降。为此提出了高原水循环变化的概念模型: 一方面, 地表暖湿化导致高原大气不稳定性增强, 触发更多对流云和降水, 加强内部水循环。另一方面, 地表暖湿化促使地表感热源弱化, 削弱了亚洲季风区和 TP 之间的环流和水汽交换, 从而造成受季风强烈影响的高原南部和东部边缘区域降水减少。
7. Wang, B., Bao, Q., Hoskins, B., Wu, G., Liu, Y., **2008**. Tibetan Plateau warming and precipitation changes in East Asia. *Geophysical Research Letters*, 35(14): L14702-1-L14702-5. 注解: 过去 50 年 TP 温度变化和东亚降水变化呈现类似趋势, 模型模拟表明 TP 增温引起的大气增温可加强东亚亚热带锋面降水, 即 TP 升温和东亚降水变化是有关联的。
8. Ramanathan, V., Ramana, M.V., Roberts, G., Kim, D., Corrigan, C., Chung, C., Winker, D., **2007**.

- Warming trends in Asia amplified by brown cloud solar absorption. **Nature**, 448(7153): 575-578. 注解：变暖机理与大气棕色云的相互影响。报道了棕色云对太阳辐射的吸收放大了亚洲变暖的趋势。形成大气棕色云的气溶胶主要来源于生物质燃烧和化石燃料消耗。结果发现，大气棕色云使较低层大气的太阳加热增强了约 50%。利用大气环流模式加入观测到的印度洋和亚洲上空广泛存在垂直延伸的大气棕色云，结果表明大气棕色云对区域较低层的大气变暖趋势的贡献与人为温室气体增温相当，这足以解释观测到的喜马拉雅冰川退缩。问题：无人机测大气辐射加热率具有局地特征，故棕色云对更小区域的变暖贡献有待研究，其对高原的气候变暖的影响值得深入研究。
9. Wu, G., Liu, Y., Zhang, Q., Wwang, T., Wan, R., Liu, X., Li, P., Wang, Z., Zhang, Q., Duan, A., Liang, X., 2007. The influence of mechanical and thermal forcing by the Tibetan Plateau on Asian climate. **Journal of Hydrometeorology**, 8(4): 770-789. 注解：对青藏高原 (TP) 对亚洲环流和气候的机械和热效应提供了新见解。在夏季，青藏高原的坡面感热加热是高原近地表低压和高空高压的主要驱动，强化了东亚的季风和亚洲中部的干燥气候。在冬季，TP 对气流的阻止和偏转作用产生了一个不对称的偏差环流（北部反气旋，南部气旋），增强了东亚上空来自北方的寒流爆发，导致亚洲南部的干燥气候和印度支那半岛和中国南部的湿润气候。
 10. Tian, L., Masson-Delmotte, V., Stievenard, M., Yao, T., Jouzel, J., 2001. Tibetan Plateau summer monsoon northward extent revealed by measurements of water stable isotopes. **Journal of Geophysical Research- Atmospheres**, 106(D22): 28081-28088. 注解：TP 季风界线和降水水汽源经典文献。降水和河水氧同位素研究揭示了 TP 不同区域水汽源地：喜马拉雅南部地区水汽由印度季风提供并在印度半岛循环；喜马拉雅山脉和唐古拉山之间水汽来自于孟加拉湾；唐古拉山北部水汽不再由季风提供，而由内陆水循环提供。
 11. Liu, X., Chen, B., 2000. Climatic warming in the Tibetan Plateau during recent decades. **International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society**, 20(14): 1729-1742. 注解：TP 增温和增温的海拔依赖性经典文献。1950s 以来 TP 整体急剧变暖，尤其是冬季气温。与北半球和全球平均相比，TP 增温发生的更早，增温幅度更大。增温趋势随海拔增加而增强。

扩展文献^[1-17]

1. Huang J., G. Wu, X. Zhou, et al. 2022. Global Climate Impacts of Land-surface and Atmospheric Processes over the Tibetan Plateau. *Reviews of Geophysics*, Accepted and to be published soon. 注解：从青藏高原地表过程、边界层-对流层-平流层多圈层相互作用的角度，揭示青藏高原陆-气相互作用过程对全球气候变化的影响。总结青藏高原气候变化研究和陆-气相互作用过程观测的最新进展；阐明青藏高原陆-气过程对全球气候的影响，包括陆地表面、对流层-平流层大气成分输送、环流和海-气相互作用，厘清青藏高原对全球气候影响的概念模型；综合青藏高原未来气候变化的预估，评估青藏高原对全球气候影响的未来研究。
2. Liu Y., Huang, J., T. Wang, J. Li, H. Yan, Y. He., 2022. Aerosol-cloud interactions over the Tibetan Plateau: An overview. *Earth-Science Reviews*, 234: 104216. 注解：系统综述了团队在青藏高原气溶胶-云相互作用研究方面取得的重要进展，提出青藏高原是沙尘等气溶胶输送的转运站，阐明了气溶胶对高原热泵效应有重要调节作用，证实云对青藏高原气候增暖的贡献机制，发现青藏高原气溶胶-云相互作用对局地和下游天气气候有重要影响。
3. Sun, C., Xu, X.D., Zhao, T.L., Yao, T.D., Zhang, D.Q., Wang, N.L., Ma, Y.M., Ma, W.Q., Chen, B., Zhang, S.J., Cai, W.Y., 2022. Distinct impacts of vapor transport from the tropical oceans on the regional glacier retreat over the Qinghai-Tibet Plateau. **Science of the Total Environment**, 823: 153545. 注解：研究发现随气温持续上升青藏高原冰川区冰川呈同步退缩变化趋势，但南、北冰川区冰川退缩程度呈显著差异，其与冰川水储量大气降水补给变化区域特征显著相关，并阐明了南亚、东亚

季风变化对南、北冰川区退缩程度显著差异特征的调制。

4. Sun, C., Xu, X.D., Wang, P.J., Yang, D., Zhang, S.J., Wang, C.Z., Cai, W.Y., 2022. The Warming and Wetting Ecological Environment Changes over the Qinghai-Tibetan Plateau and the Driving Effect of the Asian Summer Monsoon. **Journal of Tropical Meteorology**, 28(1): 95-108. 注解：研究表明近二十年, 由于源自跨赤道气流经印度洋以及阿拉伯海的南亚季风呈加强趋势, 导致青藏高原中部、北部区域降水偏多, 该区域叶面积指数亦呈上升趋势, 即暖湿化趋势影响明显, 生态系统呈趋好特征; 另外, 近二十年, 高原南部、藏东南区域东亚季风中低层水汽输送显著减弱, 东亚季风则呈显著减弱特征, 某种程度抑制了高原南部生态环境“暖湿化”影响进程。
5. Fu, Y., Ma, Y., Zhong, L., Yang, Y., Guo, X., Wang, C., Xu, X., Yang, K., Xu, X., Liu, L., Fan, G., Li, Y., Wang, D. 2020. Land-surface processes and summer-cloud-precipitation characteristics in the Tibetan Plateau and their effects on downstream weather: a review and perspective. **National Science Review**, 7(3): 500-515. 注解：对近年来国内外科学家在青藏高原地气相互作用过程、云和降水特征及其对下游天气影响方面的研究进展进行了梳理、总结和展望。文章指出围绕青藏高原典型天气过程的地气系统能量和水分交换特征、云模式和天气模式的云降水模拟、云降水潜热廓线反演与验证、青藏高原降水云团东移过程云热动力结构变化及其天气影响、气溶胶在该地区的间接效应等。
6. Sun, J., Yang, K., Guo, W., Wang, Y., He, J., Lu, H., 2020. Why has the inner Tibetan Plateau become wetter since the mid-1990s?. **Journal of Climate**, 33(19): 8507-8522. 注解：指出 1990 年代中期以来出现的高原西部的湿润化与青藏高原上空减弱的西风相对应, 后者在年代际尺度上又受北大西洋多年代际振荡 (AMO) 的调控, 后者诱发了高原西侧的气旋, 有利于阿拉伯海水汽进入高原西部, 同时又发了贝加尔湖的反气旋, 抑制了高原水汽从中东部流出, 从而导致青藏高原内流区 (羌塘高原) 普遍变湿而青藏高原东部变湿不明显。
7. You, Q.L., Chen, D.L., Wu, F.Y., Pepin, N., Cai, Z.Y., Ahrens, B., Jiang, Z.H., Wu, Z.W., Kang, S.C., AghaKouchak, A., 2020. Elevation dependent warming over the Tibetan Plateau: Patterns, mechanisms and perspectives. **Earth-Science Reviews**, 210: 103349. 注解：通过多源数据揭示了青藏高原海拔依赖型变暖特征的空间模态; 指出了青藏高原海拔依赖性变暖的空间模态和物理机制仍然存在不确定性; 讨论了冻土退化、过度放牧、平流层臭氧亏损和植被变绿等的影响。
8. Huang, J.P., Chen, W., Wen, Z.P., Zhang, G.J., Li, Z.X., Zuo, Z.Y., Zhao, Q.Y., 2019. Review of Chinese atmospheric science research over the past 70 years: Climate and climate change. **Science China Earth Sciences**, 62(10): 1514-1550. 注解：回顾 70 年以来中国在气候和气候变化研究领域的发展概况, 中国科学家对国际大气科学和全球气候变化研究所做的贡献, 总结了青藏高原对中国气候的影响, 季风对中国气候的影响, 大气活动中心与西风带对中国气候的影响, 梳理了气候动力学与气候模式的发展, 分析气候与气候变化研究领域的发展趋势, 在此基础上提出前瞻性的科学问题。
9. Yao, T., Xue, Y., Chen, D., Chen, F., Thompson, L., Cui, P., Koike, T., Lau, W.K.M., Lettenmaier, D., Mosbrugger, V., Zhang, R., Xu, B., Dozier, J., Gillespie, T., Gu, Y., Kang, S., Piao, S., Sugimoto, S., Ueno, K., Wang, L., Wang, W., Zhang, F., Sheng, Y., Guo, W., Ailikun, W., Yang, X., Ma, Y., Shen, S., Su, Z., Chen, F., Liang, S., Liu, Y., Singh, V., Yang, K., Yang, D., Zhao, X., Qian, Y., Zhang, Y., Li, Q., 2019. Recent third pole's rapid warming accompanies cryospheric melt and water cycle intensification and interactions between monsoon and environment: Multidisciplinary approach with observations, modeling, and analysis. **Bulletin of the American Meteorological Society**, 100(3): 423-444. 注解：第三极增暖相关的多学科交叉研究经典综述。增温使得冰川消融、湖泊扩张、水循环加剧、降水增加; 与此同时, 高原变绿、物候提前。大气和陆地热力和动力过程在不同尺度上影响亚洲季风, 研究揭示, 中尺度环流系统在高原降水中扮演着重要的角色, 同时, 土壤湿度异常与印度季风也有相关性。此外, 近年来的气候变化引发一系列的地质灾害, 如冰湖溃决和山体滑坡

等，泥石流的频率和空间尺度在增加。新的地质灾害，如冰崩开始出现。强调应采取一些适应性和缓和性措施，以让人们为未来环境挑战做好应对准备。

10. Turner, A. G., Annamalai, H., **2012**. Climate change and the South Asian summer monsoon. **Nature Climate Change**, 2(8): 587-595. 注解：指出仅有部分模型能够模拟南亚季风期降水的平均态、年际变率以及对 ENSO 等极端信号的响应，模型预估未来降水将增加，并提出气溶胶可能抑制了南亚季风降水，使得降水增加的信号目前并不明显。
11. Wu, G., Liu, Y., He, B., Bao, Q., Duan, A., Jin, F.F., **2012**. Thermal controls on the Asian summer monsoon. **Scientific Reports**, 2(1): 1-7. 注解：吴国雄等针对 Boos and Kuang (2010) 发表在 Nature 期刊的文章评论，南亚季风南支受海陆热力差异控制，北部受伊朗高原-青藏高原坡面加热的控制，东亚季风主要受青藏高原热力调控。
12. Qian, Y., Flanner, M. G., Leung, L. R., Wang, W., **2011**. Sensitivity studies on the impacts of Tibetan Plateau snowpack pollution on the Asian hydrological cycle and monsoon climate. **Atmospheric Chemistry and Physics**, 11(5): 1929-1948. 注解：在模拟研究中，利用全球气候模式设计了一系列数值实验，模拟了黑碳(BC)和雪中尘埃的辐射效应，评估了人为二氧化碳和大气中碳质颗粒与雪对青藏高原积雪的相对影响，以及随后对亚洲季风气候和水文循环的影响。
13. Zhong, L., Su, Z., Ma, Y., Salama, M.S., Sobrino, J.A., **2011**. Accelerated Changes of Environmental Conditions on the Tibetan Plateau Caused by Climate Change. **Journal of Climate**, 24(24): 6540–6550. 注解：利用卫星遥感产品和气象再分析资料相结合，分析了1982至2000年TP气候环境变化，指出地表温度和气温分别以0.26 K和0.29 K每十年的速率上升，均高于北半球平均增温速率，同时TP平均的降水增加、10米风速减弱，由于地气温差和风速的减弱，共同导致了TP地表感热的减弱。
14. Boos, W. R., Kuang, Z., **2010**. Dominant control of the South Asian monsoon by orographic insulation versus plateau heating. **Nature**, 463(7278): 218-222. 注解：驱动印度季风的不是TP自身热力效应，而是喜马拉雅山脉高大山体地貌的阻隔效应。模拟发现去掉TP后，只要保留喜马拉雅山脉高大的地形，印度季风环流不会受影响。提出喜马拉雅山脉狭窄高大的地貌通过将印度大陆上暖湿的水汽与副高的干冷气团分隔，从而产生印度季风。这一观点颠覆了长期以来对青藏高原热源的认识 (Wu, G. et al. **2012**. Thermal controls on the Asian summer monsoon. **Scientific Reports** 对此进行了反驳)。
15. Qin, J., Yang, K., Liang, S., Guo, X., **2009**. The altitudinal dependence of recent rapid warming over the Tibetan Plateau. **Climatic Change**, 97(1): 321-327. 注解：长期以来人们用中国气象局的气象数据分析升温的海拔依赖性，但是站数量相当有限，特别在西部和极高海拔地区尤其缺乏空间代表性。这项研究首次使用MODIS的月平均地表温度数据来检测整个青藏高原上变暖趋势，发现在海拔5000-6000m的区域升温比较稳定，在超过6000m的区域，升温率甚至随海拔升高而下降。这一发现对TP冰川水资源和环境变化具有重要意义，收到广泛关注。
16. Lau, K.M., Kim, M.K., Kim, K. M., **2006**. Asian summer monsoon anomalies induced by aerosol direct forcing: the role of the Tibetan Plateau. **Climate Dynamics**, 26(7): 855-864. 注解：使用NASA的GCM开展的数值研究，首次走出气溶胶影响亚洲夏季季风以及青藏高原物理过程的相互作用的可能机制。研究表明，春季早些时候，印度北部地区沙尘负荷增加，加上当地来源的黑碳排放，可能导致雨季提前，随后印度夏季风加剧。印度降水增强与气溶胶引起的大尺度海平面气压异常型发展有关，这导致东亚(梅雨)雨带向西北方向移动，抑制了东亚及邻近海区的降水。
17. Ma, Y., Zhong, L., Su, Z., Ishikawa, H., Menenti, M., Koike, T., **2006**. Determination of regional distributions and seasonal variations of land surface heat fluxes from Landsat-7 Enhanced Thematic Mapper data over the central Tibetan Plateau area. **Journal of Geophysical Research-Atmospheres**, 4(1): 144-152. 注解：利用Landsat-7 ETM卫星遥感数据和CAMP/Tibet试验观测数据，估算了

TP 地表特征参数（反照率、地表温度、NDVI、土壤调整植被指数、LAI 等）和地表能量通量（净辐射、感热、潜热和土壤热通量）。估算结果与站点观测进行了对比，误差小于 10%。

八、青藏高原冰冻圈变化及水文效应^[1-10]

1. Shean, D.E., Bhushan, S., Montesano, P., Rounce, D.R., Arendt, A., Osmanoglu, B., 2020. A Systematic, Regional Assessment of High Mountain Asia Glacier Mass Balance. **Frontiers in Earth Science**, 7: doi: 10.3389/feart.2019.00363. 注解：遥感与大数据是系统开展空间大范围冰川变化的基础。本论文基于亚米级商业立体像对生成了 5797 个高分辨率 DEM 数据，同时还处理了亚洲高山冰川作用地区 28278 景 ASTER DEM 数据，最终系统地获得了 2000-2018 年亚洲高山区冰川的物质平衡变化。
2. Zhang, G.Q., Yao, T.D., Xie, H.J., Yang, K., Zhu, L.P., Shum, C.K., Bolch, T., Yi, S., Allen, S., Jiang, L.G., Chen, W.F., Ke, C.Q., 2020. Response of Tibetan Plateau lakes to climate change: Trends, patterns, and mechanisms. **Earth-Science Reviews**, 208: 103269. 注解：综述了全球变暖背景下青藏高原湖泊对气候变化的响应：时间演变规律、空间格局和驱动机制。明确了高原湖泊呈快速但非线性增长趋势；揭示了高原湖泊变化的南北差异特征；量化了高原湖泊变化原因。
3. Immerzeel, W.W., Lutz, A.F., Andrade, M., Bahl, A., Biemans, H., Bolch, T., Hyde, S., Brumby, S., Davies, B.J., Elmore, A.C., Emmer, A., Feng, M., Fernandez, A., Haritashya, U., Kargel, J.S., Koppes, M., Kraaijenbrink, P.D.A., Kulkarni, A.V., Mayewski, P.A., Nepal, S., Pacheco, P., Painter, T.H., Pellicciotti, F., Rajaram, H., Rupper, S., Sinisalo, A., Shrestha, A.B., Viviroli, D., Wada, Y., Xiao, C., Yao, T., Baillie, J.E.M., 2020. Importance and vulnerability of the world's water towers. **Nature**, 577(7790): 364-369. 注解：世界水塔经典文献。提出水塔指数，根据水塔水源供给情况和下游生态系统和社会的需求情况，将水塔分级。并评估了每个水塔的脆弱性。结果表明越重要的水塔脆弱性越强，气候和社会变化对它们将产生深刻影响，这将对 19 亿人口产生负面影响，亟需采取行动保护水塔。其中 TP 的印度河上游的水塔指数最高。
4. Yao, T.D., Xue, Y.K., Chen, D.L., Chen, F.H., Thompson, L., Cui, P., Koike, T., Lau, W.K.M., Lettenmaier, D., Mosbrugger, V., Zhang, R.H., Xu, B.Q., Dozier, J., Gillespie, T., Gu, Y., Kang, S.C., Piao, S., Sugimoto, S., Ueno, K., Wang, L., Wang, W.C., Zhang, F., Sheng, Y.W., Guo, W.D., Ailikun, Yang, X.X., Ma, Y.M., Shen, S.S.P., Su, Z.B., Chen, F., Liang, S.L., Liu, Y.M., Singh, V.P., Yang, K., Yang, D.Q., Zhao, X.Q., Qian, Y., Zhang, Y., Li, Q., 2019. Recent Third Pole's rapid warming accompanies cryospheric melt and water cycle intensification and interactions between monsoon and environment: Multidisciplinary approach with observations, modeling, and analysis. **Bulletin of the American Meteorological Society**, 100(3): 423-444. 注解：第三极增暖相关的多学科交叉研究经典综述。增温使得冰川消融、湖泊扩张、水循环加剧、降水增加；与此同时，高原变绿、物候提前。大气和陆地热力和动力过程在不同尺度上影响亚洲季风，研究揭示，中尺度环流系统在高原降水中扮演着重要的角色，同时，土壤湿度异常与印度季风也有相关性。此外，近年来的气候变化引发一系列的地质灾害，如冰湖溃决和山体滑坡等，泥石流的频率和空间尺度在增加。新的地质灾害，如冰崩开始出现。强调应采取一些适应性和缓和性措施，以让人们为未来环境挑战做好应对准备。
5. Pritchard, H.D., 2019. Asia's shrinking glaciers protect large populations from drought stress. **Nature**, 569(7758): 649-654. 注解：冰川融水对缓解干旱的重要作用。亚洲高山区夏季的冰川融水是周围易受干旱影响地区的重要水源补给，尤其是在上游地区冰川广布且夏季受季风影响较弱而干旱频发的印度河流域和咸海流域。来自夏季冰川消融延时补给的水量（高达 37 ± 10 亿方）可以满足该地区巴基斯坦、阿富汗等很多国家每年市政、工业部门的大部分用水需求，可以满足该地区 2.21 ± 0.29 亿人的最低生产生活需水量，从而减少了很多由于缺水引发的问题。冰川的持续

退缩将增加该地区融水径流，但是这种“增加”在冰川完全消退后将不可持续，从而将加剧未来该地区由干旱导致的水资源压力。

6. 程国栋, 赵林, 李韧, 吴晓东, 盛煜 胡国杰 邹德富 金会军 李新 吴青柏, **2019**. 青藏高原多年冻土特征, 变化及影响. *科学通报*, 64(27): 2783-2795. 注解: 解释了青藏高原多年冻土特征、变化和影响。系统总结了青藏高原多年冻土分布、温度、活动层厚度、多年冻土厚度以及地下冰储量、土壤有机碳储量等特征的空间分布和过去 40 年来的变化, 发现多年冻土退化加速了高原水循环过程、引发了草地生态系统类型转变, 促进了土壤有机碳分解和释放。
7. Lutz, A.F., Immerzeel, W.W., Shrestha, A.B., Bierkens, M.F.P., **2014**. Consistent increase in High Asia's runoff due to increasing glacier melt and precipitation. *Nature Climate Change*, 4(7): 587-592. 注解: TP 主要径流未来变化预测。到 2050 年, 各主要河流的径流均将增加。
8. Yao, T., Thompson, L., Yang, W., Yu, W., Gao, Y., Guo, X., Yang, X., Duan, K., Zhao, H., Xu, B., Pu, J., Lu, A., Xiang, Y., Kattel, D.B., Joswiak, D., **2012**. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings. *Nature Climate Change*, 2: 663-667. 注解: 该论文通过对 20 世纪 70 年代到 21 世纪初青藏高原及其毗邻地区冰川变化的研究, 揭示了第三极地区冰川变化的空间格局特征, 即冰川的退缩幅度从喜马拉雅山向内陆方向呈减少趋势, 东帕米尔地区最小。冰川变化的这种空间格局与不同区域的气温、降水变化以及大气环流状况有关。
9. Che, T., Li, X., Jin, R., Armstrong, R., Zhang, T.J., **2008**. Snow depth derived from passive microwave remote-sensing data in China. *Annals of Glaciology*, 49: 145-154. 注解: 我国积雪密度小、粒径大, 与欧美等高纬度地区不同, 国际遥感算法在我国并不适用于。建立适用于我国积雪特性的雪深遥感算法。制备了我国(包括青藏高原)第一个逐日长时间序列雪深遥感产品, 被国内外学者认可并广泛应用在气候变化、水文水资源和灾害等领域。
10. Hewitt, K., **2005**. The Karakoram Anomaly? Glacier Expansion and the 'Elevation Effect,' Karakoram Himalaya. *Mountain Research and Development*, 25(4): 332-340. 注解: 在全球变暖导致全球大多数地区冰川处于消融萎缩的大背景下, 本论文通过对 20 世纪 90 年代末期喀喇昆仑中部冰川变化的研究, 发现那里冰川普遍处于扩张状态, 从而提出“喀喇昆仑异常”的现象。同时, 该论文还注意到, 存在扩张的冰川主要是那些发源于高海拔的冰川, 而其他冰川是处于持续退缩的状态。

拓展文献^[1-12]

1. Li, D., Lu, X., Walling, D.E., Zhang, T., Steiner, J. F., Wasson, R.J., Harrison, S., Nepal, S., Nie, Y., Immerzeel, W.W., Shugar, D.H., Koppes, M., Lane, S., Zeng, Z., Sun, X., Yegorov, A., & Bolch, T., **2022**. High Mountain Asia hydropower systems threatened by climate-driven landscape instability. *Nature Geoscience*, 15: 520-530. 注解: 气候变暖背景下, 第三极地区冰冻圈发生明显的热力与动力改变, 导致冰川退缩、冰崩灾害、冻土退化、泥石流、冰湖溃决等灾害的发生, 从而对于亚洲高山区水利水电开发利用造成潜在风险。本文对青藏高原及周边冰冻圈各类灾害对于水利水电开发利用的影响进行了评述。
2. Azam, M.F., Kargel, J.S., Shea, J.M., Nepal, S., Haritashya, U.K., Srivastava, S., Maussion, F., Qazi, N., Chevallier, P., Dimri, A., **2021**. Glaciology of the Himalaya-Karakoram. *Science*, 373(6557): eabf3668. 注解: 该文系统梳理了喜马拉雅-喀喇昆仑地区气候、冰川及水文过程研究进展与面临的挑战, 认为这一地区受不同气候的影响, 整体水热气候条件、冰川消融变化等存有明显的差异。冰川水文过程中关于冰川变化、降水分布、冻土、升华、表碛覆盖、冰川动力过程等相关研究中的问题进行了讨论。该文有助于了解冰川水文研究中的进展、问题、挑战与未来的可能重点研究方向。
3. Ran, Y., Li, X., Cheng, G., **2018**. Climate warming over the past half century has led to thermal degradation of permafrost on the Qinghai-Tibet Plateau. *The Cryosphere*, 12(2): 595-608. 注解: 报

道了青藏高原 1960s 以来多年冻土热稳定性变化的研究成果,综合多源遥感与地面观测发现,1960-2010 年间青藏高原约 88%的多年冻土区都退化到了更低的稳定性水平,极稳定型、稳定型、亚稳定型、过渡型、不稳定型和极不稳定型多年冻土分布的平均海拔分别升高了 88 米、97 米、155 米、185 米、161 米和 250 米。

4. Kraaijenbrink, P.D.A., Bierkens, M.F.P., Lutz, A.F., Immerzeel, W.W., 2017. Impact of a global temperature rise of 1.5 degrees Celsius on Asia's glaciers. *Nature*, 549(7671): 257-260. 注解: 利用模型进行了未来第三极地区冰川变化预估。模型结果显示: 相对于 2000 年, 2050 年冰川的面积将缩减约 22~35%。在本世纪末, 即使在全球温度相对于工业革命前升高 1.5°C 的情景下, 冰川储量相对于 2000 年将减少约 36%。而在中等排放情景下, 到本世纪末冰储量将大致减少约 49%; 在高排放情景下, 冰储量将减少约 65%。即使在未来情景下模拟结果表明降水将有一定程度的增加, 但远不足以抵消温度升高导致的强烈消融, 冰川仍继续呈退缩状态。
5. Cheng, G.D, Jin, H.J, 2013. Permafrost and groundwater on the Qinghai-Tibet Plateau and in northeast China. *Hydrogeology Journal*. 21(1): 5-23. 注解: 该文概述了中国西部和东北地区的多年冻土退化与水文、生态和环境之间的关系。指出在气候干旱、植被稀疏且低土壤含水量的青藏高原和中国西北山区, 多年冻土区水文地质环境脆弱; 在气候潮湿、土壤有机质丰富的中国东北部地区, 较高的植被覆盖度缓解了多年冻土退化。指出在气候变暖背景下冻土水文学和水文地质学值得重点关注的三个问题: 1) 高温多年冻土的水力性质, 尤其是冻土的渗透系数和电导率; 2) 多年冻土区部分地下冰转化为地下水资源机制的模拟和预测; 3) 人类活动如何改变地下水动态和多年冻土区的状态, 以及它们之间的关系。
6. Li, X., Cheng, G., Jin, H., Kang, E., Che, T., Jin, R., Wu, L., Nan, Z., Wang, J., Shen, Y., 2008. Cryospheric change in China. *Global and Planetary Change*, 62(3-4): 210-218. 注解: 本文概述了中国冰冻圈冰川、冻土和积雪的现状及其变化。过去 45 年中: 中国的冰川面积减少了约 2-10%、冰川总面积已减少约 5.5%; 雪量略有增加; 多年冻土的面积缩小, 活性层深度增加, 多年冻土下限的增加以及季节性霜冻深度的变薄表明, 多年冻土显然在退化。并根据模型预测, 表明: 到 2050 年, 冰川面积收缩率可能高达 26.7%, 冰川径流会一直增加, 直到 2030 年左右达到最大值; 尽管中国西部的积雪呈增加趋势, 但在中国东部, 积雪呈减少趋势, 随着年际波动的增加; 多年冻土的退化很可能会继续, 到 2100 年, 青藏高原的永久冻土有三分之一到一半会退化。到那时, 大多数高温永久冻土将消失。中国东北的多年冻土将向北退缩。
7. Cheng, G., Wu, T., 2007. Responses of permafrost to climate change and their environmental significance, Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Geophysical Research-Earth Surface*, 112(F02S03): doi:10.1029/2006JF000631. 注解: 基于青藏高原长期的地温观测资料分析, 结果表明: 气候变暖使多年冻土在不同的冻土类型分布区发生了不同程度的退化。在不稳定型多年冻土区, 多年冻土的退化在平面上的变化主要表现为分布范围的萎缩, 在垂直分布上的变化主要表现为多年冻土厚度的减小和温度的升高, 多年冻土升温率一般为 0.011-0.041 °C/yr; 在过渡型至稳定型多年冻土区, 多年冻土的退化主要表现为不同深度地温的升高, 年变化深度以上的部分升温尤其明显, 这种类型冻土区内多年冻土升温率一般为 0.016-0.098 °C/yr; 低温稳定型多年冻土升温率一般为 0.042-0.065 °C/yr。青藏高原地面的冻融循环加剧了地气之间的热量交换, 土壤湿度越大, 其对冻融循环过程热交换的影响也越大。高原土壤冻融过程中地面与大气的交换也对东亚气候有着深刻的影响。青藏高原多年冻土退化是引起长江源和黄河源地下水下降的主要原因之一, 也导致了高原湖水位的下降, 沼泽地的干旱化和草地的退化。
8. Cheng, G.D, Lai, Y.M, Sun, Z.Z, Jiang, F., 2007. The "thermal semi-conductor" effect of crushed rocks. *Permafrost and Periglac. Process*. 18(2): 151-160. 注解: 该文基于广泛存在于冰缘环境的粗糙碎石堆的冷却现象, 通过数值模拟、实验室模型和油田实体模型实验证明了粗糙碎石的冷却特性。作者认为: 水平碎石层中的大孔隙使其可产生瑞利-贝纳德对流, 当碎石层倾斜后转变为单环流

模式（烟囱效应），外界风的强迫可以加速碎石层内部暖空气排出。该冷却机制被广泛应用于冻土区道路工程建设，不仅经济环保，还能有效缓解路基下伏的多年冻土融化。

9. Cheng, G.D., 2004. Influences of local factors on permafrost occurrence and their implications for Qinghai-Xizang Railway design. *Science in China Ser. D Earth Science*, 47: 704-709. 该文通过列举冻土分布异常情况，从辐射、热对流和热传导三个角度分析了有利于多年冻土发育的局地因素。基于此提出青藏铁路建设中应“师法自然”，摒弃过去国外常用的被动冷却路基方法，转而采取更为有效的主动冷却的思路，可通过改变路基材料和铺设方式来达到与自然界类似的冷却冻土的效果。该文为后续青藏高铁的成功建设奠定了理论基础。
10. Hock, R., 2003. Temperature index melt modelling in mountain areas. *Journal of Hydrology*, 282(1): 104-115. 注解：本文系统介绍了度日因子冰川消融模型在冰川消融及水文过程中的应用与局限。虽然文献较老，但引用率达到 1000 多次，是开展冰川消融估算的入门级经典文献，同时也是大尺度冰川水文模型中经常用到的模型手段。
11. 施雅风，程国栋，1991. 冰冻圈与全球变化. *中国科学院院刊*. (4): 287-291. 注解：系统总结了冰冻圈的定义与分布，并详细讨论了冰冻圈与地球系统其他圈层（大气圈、水圈、岩石圈和生物圈等）的相互作用。该文还从学科发展角度，对冰冻圈今后的主要研究内容提出了五条建议：1) 发展冰芯研究，建立冰芯实验室；2) 加强冰冻圈监测，建立冰冻圈各要素相应的冰-气关系模式，提高预报能力；3) 关注海平面的变化；4) 查明亚洲高山区冰川分布与规模，并阐明冰川变化与高原隆升的关系；5) 与国际冰冻圈同行建立合作。
12. Cheng, G.D., 1991. Distribution of Mountain Permafrost and Climate. *Permafrost and Periglacial Processes*. (3): 83-91. 注解：该文概述了山地多年冻土（mountain permafrost）的起源、分类和范围。指出山地多年冻土的范围可以大致通过地带性（包括纬度与大陆度）和气候要素（如气温、雪底温度，辐射）确定。同时提出山地冻土研究的 4 个优先项为：1) 加强冻土与地带性和气候要素关系的研究，尤其是进一步研究山区地表能量的影响；2) 在全球范围建立山地多年冻土观测网；3) 建立统一、规范的山地多年冻土学术术语；4) 尽快启动山地多年冻土制图工作。

九、生态系统及气候响应^[1-9]

1. Wang, T., Wang, X.Y., Liu, D., Lv, G.T., Ren, S., Ding, J.Z., Chen, B.Z., Qu, J.S., Wang, Y.F., Piao, S.L., Chen, F.H., 2023. The current and future of terrestrial carbon balance over the Tibetan Plateau. *Science China Earth Sciences*. Accepted. 注解：本文系统梳理了青藏高原陆地生态系统碳汇现状与未来潜力估算。主要结果如下：基于清查法、生态系统模型模拟和大气反演三种方法，当前碳汇大小为每年 33.12–37.84 百万吨碳，占全国陆地生态系统碳汇的 10–16%；未来气候暖湿化以及生态恢复与管理措施加强情景下，到 2060 年碳汇有望实现倍增，达到每年 57.78–70.52 百万吨碳。该结果将为青藏高原碳中和贡献先行示范区和生态文明高地建设提供参考与支撑。
2. Wang, X.Y., Wang, T., Xu, J.F., Shen, Z.H., Yang, Y.P., Chen, A.P., Wang, S.P., Liang, E.Y., Piao, S.L., 2022. Enhanced habitat loss of the Himalayan endemic flora driven by warming-forced upslope tree expansion. *Nature Ecology & Evolution*, 6(7): 890–899. 注解：高山树线是树木分布的海拔上限，树木为何无法分布在更高海拔地区是科学家普遍关注的问题。本文克服了传统样方数据的时空局限性，基于遥感大数据（30 m 分辨率卫星遥感数据和 70 万个亚米-米级目视解译样点）研发了大尺度高山树线自动提取方法，全景展现了喜马拉雅山脉高山树线分布图，并发现干旱和人类活动是导致喜马拉雅树线分布呈东高西低的关键机制。该研究发展与丰富了高山树线分布理论，是应用遥感大数据解决关键科学问题的典范。
3. Miede, G., Schleuss, P. M., Seeber, E., Babel, W., Biermann T., Braendle, M., Chen, F. H., Coners H., Foken, T., Gerken, T., Graf, H. F., Guggenberger, G., Hafner, S., Holzappel, M., Ingrisich, J., Kuzyakov, Y., Lai, Z. P., Lehnert, L., Leuschner, C., Li, X. G., Liu, J. Q., Liu, S. B., Ma, Y. M., Miede, S.,

- Mosbrugger, V., Noltie, H. J., Schmidt, J., Spielvogel, S., Unteregelsbacher, S., Wang, Y., Willinghöfer, S., Xu, X. L., Yang, Y. P., Zhang, S. R., Opgenoorth, L., Wesche, K., **2019**. The Kobresia pygmaea ecosystem of the Tibetan highlands — origin, functioning and degradation of the world's largest pastoral alpine ecosystem: Kobresia pastures of Tibet. **Science of Total Environment**. 648: 754–771. 注解: 嵩草草甸(包括高山嵩草草甸、矮嵩草草甸和线叶嵩草草甸等)广泛分布于青藏高原地区,是青藏高原地区畜牧业赖以生存的牧草资源。然而,关于嵩草草甸形成原因存在较大争议。一般认为,嵩草草甸是自然植被,是在地质历史时期气候演变下形成,比如,青藏高原极端低温和降水变化从而形成了以嵩草为建群种的高寒草甸,土壤腐殖质增加。但是,也有研究发现,中全新世以来,由于人类活动(主要是火烧),使得有利于森林生长的时期森林在青藏高原面积急剧减少,并被嵩草草甸取代。自1970年代以来过度放牧和气候变化导致的嵩草草甸破坏现象愈加强烈,甚至出现表土层退化。本文的研究重点是气候驱动演变以及放牧作用交互影响下高山草甸系统的动态过程,该文章系统的阐明了嵩草的起源、演替、功能作用以及退化的原因,为嵩草草甸是气候顶级还是放牧顶级、以及退化草甸的恢复目标等理论问题提供有益的探索。
4. Liang, E.Y., Wang, Y.F., Piao, S.L., Lu, X.M., Camarero, J.J., Zhu, H.F., Zhu, L.P., Ellison, A.M., Ciais, P., Penuelas, J., **2016**. Species interactions slow warming-induced upward shifts of treelines on the Tibetan Plateau. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, 113(16): 4380–4385. 注解: 高山树线对气候变化十分敏感性,是气候变化对高寒森林生态系统影响的早期预警信号。研究沿祁连山-横断山构建了高原树线监测网络,并基于树轮年代学重建了过去百年尺度高山树线动态变化,结果表明过去100年树线总体向上爬升,但爬升滞后于气候变暖,且呈现显著的区域分异。进一步分析表明树线以上植被厚度指数(植被高度×盖度)可以较好解释树线爬升差异,表明种间关系是解释树线爬升呈区域差异的关键机制,为理解气候变化背景下高山树线变化提供了新思路。
 5. Schuur, E., McGuire, A., Schaedel, C., Grosse, G., Harden, J., Hayes, D., Hugelius, G., Koven, C., Kuhry, P., Lawrence, D., Natali, S., Olefeldt, D., Romanovsky, V., Schaefer, K., Turetsky, M., Treat, C., Vonk, J., **2015**. Climate change and the permafrost carbon feedback. **Nature**, 520(7546): 171–179. 注解: 北半球高纬度和高海拔地区多年冻土中存储着大量土壤有机碳。气候变暖导致冻土融化,使得原本被封存的土壤有机碳被微生物分解,向大气释放二氧化碳、甲烷等温室气体,加速气候变化。目前学界对多年冻土区温室气体排放的潜力有多大,将在何时排放(长期缓慢排放还是短时大量排放),以及冻土碳排放如何反馈气候变化等核心科学问题尚未得出一致结论。本文综述了冻土碳循环的研究进展,指出现有的证据表明随着气候持续变暖,冻土区更可能产生逐步而持久的温室气体排放,而非骤然的大规模温室气体排放。作者进一步梳理了目前研究的薄弱环节,指出未来需加强对热融喀斯特等极端融化事件、海底多年冻土碳排放等方面的研究,并加强冻土碳循环模型研发与模型-数据融合研究。
 6. Shen, M.G., Piao, S.L., Jeong, S.J., Zhou, L.M., Zeng, Z.Z., Ciais, P., Chen, D.L., Huang, M.T., Jin, C.S., Li, L.Z.X., Li, Y., Myneni, R.B., Yang, K., Zhang, G.X., Zhang, Y.J., Yao, T.D., **2015**. Evaporative cooling over the Tibetan Plateau induced by vegetation growth. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, 112(30): 9299–9304. 注解: 该文结合地面气象观测资料和遥感信息发现,不同于高纬地区植被对气候变暖形成的“正反馈”作用,1980年以来青藏高原草地植被生长增加对局地气候变化产生了“负反馈”效应。植被覆盖度的增加显著降低植被生长季白天的地表温度,而对夜间温度的影响并不显著,因此表现为部分抵消了生长季平均温度的升高。青藏高原植被增强的局地降温效应主要源于蒸散发的降温机制,即植被覆盖度增加显著促进蒸腾作用,使得净辐射通量用于地表向大气的感热通量显著减少。高原植被对气候的这种“负反馈”作用,表明中国政府在青藏高原实施的“退牧还草”等植被恢复措施有助于减缓当地气候变暖。

7. Lenoir, J., Gégout, J.-C., Marquet, P.A., de Ruffray, P., Brisse, H., 2008. A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century. *Science*, 320(5884): 1768–1771. 注解：气候变暖导致物种向更冷的高海拔或高纬度地区移动，以往的研究大多关注树木极限分布即树线的变化，气候变化是否导致物种整体迁移仍有待研究。研究整合了 1905-1985 和 1986-2005 两个时期 171 个森林物种分布调查数据，系统评估了物种分布变化，发现气候变暖导致物种分布最适海拔整体上移，上移速率为 29m/10 年。其中，高山物种和种群更替快的物种爬升速率更大。该研究表明气候变暖正在重塑山区物种分布及生物多样性。
8. He, J. S., Wang, Z.H., Wang, X., Schmid, B., Zuo, W., Zhou, M., Zheng, C.Y., Wang, M.F., Fang, J.Y., 2006. A test of the generality of leaf trait relationships on the Tibetan Plateau. *New Phytologist*, 170(4): 835-848. 注解：植物叶属性包括比叶面积、叶寿命、氮磷含量、光合速率等，是植物在长期适应环境过程中形成的具有进化意义的重要参数。研究基于 49 个站点共 79 种植物野外观测数据，探讨了高原极端环境条件下植物叶功能属性特征及环境的修饰作用。结果表明高原植物叶氮含量和光合速率显著高于全球平均水平，但青藏高原种间叶片性状关系与全球其他地区表现出一致的趋势，该结果支持植物功能趋同进化的理论，并为该理论提供了高原极端环境下的证据。
9. 张新时. 1978. 西藏植被的高原地带性. *植物学报*, 20(2): 140-149. 注解：提出“高原地带”植被。由于青藏高原的植被是水平地带性与垂直地带性相结合的结果，是具有平面形式的植被垂直带，它是属于“准平原式”的垂直植被，因此称为“高原地带”植被。指出西藏植被的成带现象自东南向西北变化如下：森林-草甸-草原-荒漠，形成主要取决于高原巨大幅度的隆升及其所引起的特殊的大气环流状况。

拓展文献^[1-27]

1. Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Gregor, L., Hauck, J., Le Quéré, C., Luijkx, I. T., Olsen, A., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Schwingshackl, C., Sitch, S., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S. R., Alkama, R., Arneeth, A., Arora, V. K., Bates, N. R., Becker, M., Bellouin, N., Bittig, H. C., Bopp, L., Chevallier, F., Chini, L. P., Cronin, M., Evans, W., Falk, S., Feely, R. A., Gasser, T., Gehlen, M., Gkritzalis, T., Gloege, L., Grassi, G., Gruber, N., Gürses, Ö., Harris, I., Hefner, M., Houghton, R. A., Hurtt, G. C., Iida, Y., Ilyina, T., Jain, A. K., Jersild, A., Kadono, K., Kato, E., Kennedy, D., Klein Goldewijk, K., Knauer, J., Korsbakken, J. I., Landschützer, P., Lefèvre, N., Lindsay, K., Liu, J., Liu, Z., Marland, G., Mayot, N., McGrath, M. J., Metzl, N., Monacci, N. M., Munro, D. R., Nakaoka, S. I., Niwa, Y., O'Brien, K., Ono, T., Palmer, P. I., Pan, N., Pierrot, D., Pöcöck, K., Poulter, B., Resplandy, L., Robertson, E., Rödenbeck, C., Rodriguez, C., Rosan, T. M., Schwinger, J., Séférian, R., Shutler, J. D., Skjelvan, I., Steinhoff, T., Sun, Q., Sutton, A. J., Sweeney, C., Takao, S., Tanhua, T., Tans, P. P., Tian, X., Tian, H., Tilbrook, B., Tsujino, H., Tubiello, F., van der Werf, G. R., Walker, A. P., Wanninkhof, R., Whitehead, C., Willstrand Wranne, A., Wright, R., Yuan, W., Yue, C., Yue, X., Zaehle, S., Zeng, J., Zheng, B., 2022. Global Carbon Budget. 2022. *Earth System Science Data*, 14(11): 4811-4900. 注解：全球碳计划 (Global Carbon Project) 每年对全球碳收支情况进行系统评估，为科研人员、决策部门和公众提供碳循环研究的新数据和新认识。该研究评估了截至 2021 年的全球碳收支情况，指出 2021 年全球化石燃料排放总量为 $10.1 \pm 0.5 \text{ GtC yr}^{-1}$ ，较 2020 年增加了 5.1%；陆地和海洋碳汇分别为 $3.5 \pm 0.9 \text{ GtC yr}^{-1}$ 和 $2.9 \pm 0.4 \text{ GtC yr}^{-1}$ ，分别抵消了 29% 和 26% 的人为碳排放；另有 48% 的人为碳排放 ($5.2 \pm 0.2 \text{ GtC yr}^{-1}$) 仍残留在大气中。研究指出目前碳收支评估最大的不确定性仍来自于陆地碳汇，土地利用变化导致的碳排放估算也存在非常大的不确定性。
2. Guo, Y., Zhang, L., Yang, L., Shen, W., Pan, Y., Wright, I.J., Luo, Y., Luo, T., 2022. Enhanced leaf turnover and nitrogen recycling sustain CO₂ fertilization effect on tree-ring growth. *Nature Ecology &*

- Evolution**, 6: 1271–1278. 注解：大气 CO₂ 增加所产生的施肥效应在早期被认为普遍存在，但经历了半个多世纪的持续性影响后，高寒树木生长对其增加的响应是否已经饱和？本文基于藏东南冷杉和方枝柏两林线森林凋落物和树木径向生长的长期监测数据，发现凋落物量和径向生长主要受 CO₂ 控制，而与温度、水分以及辐射关系不明显，进一步基于青藏高原 13 个林线样点树轮年表，发现类似规律，说明湿润地区 CO₂ 对森林的施肥效应仍旧存在。
3. Gao, S., Liang, E.Y., Liu, R.S., Babst, F., Camarero, J.J., Fu, Y.H., Piao, S.L., Rossi, S., Shen, M.G., Wang, T., Penuelas, J., 2022. An earlier start of the thermal growing season enhances tree growth in cold humid areas but not in dry areas. **Nature Ecology & Evolution**, 6: 397–404. 注解：气候变暖导致植被物候改变，目前大空间尺度上普遍关注叶物候变化与生态系统碳吸收过程，然而变暖也会引起木质部形成层物候变化，这是否会影响到树木生长，从而改变植被碳储存功能，目前仍不清楚。基于北半球非热带地区树轮大数据分析发现，变暖导致的生长季提前促进了北半球冷湿地区的树木生长，促进生长的原因在高纬度地区主要是减少了积温限制，而中纬度湿润地区主要通过延长生长季时间；但生长季延长限制了较干燥地区的树木生长，可能是由于生长季延长增强了干旱胁迫。
 4. Sun, J., Liang, E., Barrio, I.C., Chen, J., Wang, J., Fu, B., 2021. Fences undermine biodiversity targets. **Science**, 374(6565): 269. 注解：生物多样性对于全球可持续发展、粮食安全、栖息地保障、和遏制病毒蔓延和传播至关重要。遏制并防止生物多样性丧失是联合国《2030 年可持续发展议程》可持续发展目标第 15（陆地生命）的焦点。因此，重新审视和评估遍布世界各地的围栏工程迫在眉睫，需采取预防调整措施，降低其潜在风险。提倡鼓励重新开放跨国界的野生动物迁徙通道，并根据具体情况，对计划建设和正在建设的围栏做出必要的科学评估。在不可避免的情况下，临时性围栏或可穿透围栏或许是一种有用工具，可能所有类型围栏的建设都需要，也应该考虑将其对生物多样性的长期影响作为先决条件。
 5. Hu, A., Wang, J.J., Sun, H., Niu, B., Si, G.C., Wang, J., Yeh, C.F., Zhu, X.X., Lu, X.C., Zhou, J.Z., Yang, Y.P., Ren, M.L., Hu, Y.L., Dong, H.L., Zhang, G.X., 2020. Mountain biodiversity and ecosystem functions: interplay between geology and contemporary environments. **The International Society for Microbial Ecology Journal**, 14: 931- 944. 注解：生物多样性和生态系统功能是生态学的核心问题。生物多样性和生态系统功能由气候、生物和非生物属性等当下环境因子驱动，也可能通过地质过程等长期驱动因素塑造。研究量化了地质过程对植物和微生物群落多样性和生态系统功能的相对贡献，表明植物和微生物多样性和生态系统功能受到地质过程和当下环境共同驱动。因此，综合分析地质过程对生态系统的影响，可以认识历史过程对生物多样性和维持生态系统功能的影响。问题：1.本研究的地质过程缺少时间标尺，有待进一步深化；2.鼓励未来将不同地质事件考虑进来以获得全面的结论。
 6. Piao, S.L., Wang, X.H., Park, T., Chen, C., Lian, X., He, Y., Bjerke, J.W., Chen, A.P., Ciais, P., Tommervik, H., Nemani, R.R. & Myneni, R.B., 2020. Characteristics, drivers and feedbacks of global greening. **Nature Reviews Earth & Environment**, 1: 14–27. 注解：文章系统梳理与综述了当代气候变化背景下全球植被生长增加即植被变绿的观测证据、驱动机制，及其对气候系统的反馈作用。研究指出上世纪 80 年代以来的植被变绿一直持续至今，二氧化碳施肥效应是植被变绿的主要驱动因子，并梳理了植被变化引起的碳循环和生物地球物理过程的气候效应，提出陆地植被变绿显著减缓了全球气候变暖，加剧了全球水循环。
 7. Hagedorn, F., Gavazov, K., Alexander, J.M., 2019. Above- and belowground linkages shape responses of mountain vegetation to climate change. **Science**, 365: 1119–1123. 注解：高山植被变化对气候变暖的滞后性一定程度上与地下生态过程有关。本文基于短期模拟实验和沿海拔梯度调查数据，解析地上-地下关联过程。土壤可能会在早期演替系统中获得碳，随着森林向上扩展而失去碳，而高海拔土壤发育缓慢，无疑又将限制变暖引起的植被爬升。现有方法目前尚无法预测这些变

化的发生速率。因此，将山地土壤及其生物群纳入监测计划，结合创新的比较和实验方法，对于克服地下数据的缺乏以及更好地了解山地生态系统动态及其对气候的反馈至关重要。目前的大多数研究没有考虑地下生态过程的影响，导致对植被分布范围的预测存在不确定性。

8. Anderegg, W.R.L., Konings, A.G., Trugman, A.T., Yu, K.I., Bowling, D.R., Gabbitas, R., Karp, D.S., Pacala, S., Sperry, J.S., Sulman, B.N., Zenes, N., **2018**. Hydraulic diversity of forests regulates ecosystem resilience during drought. *Nature*, 561: 538–541. 注解：通过整合温带和北方森林 40 个样点的 352 个涡度观测数据、植物水分遥感观测和功能性状数据，发现较高的水力多样性缓冲了干旱期内生态系统通量变化。即，水力性状是干旱响应中的主要预测因子。相比之下，标准的叶片和木材特性，如比叶面积和木材密度，几乎没有解释力。研究结果表明，树木水力特性的多样性调节了生态系统对干旱的恢复力，并且可能在未来气候变化中的生态系统-大气反馈效应中发挥重要作用。问题：缺乏对根系性状的分析。
9. Bjorkman, A.D., Myers-Smith, I.H., Elmendorf, S.C., Normand, S., Rüger, Nadja., Beck, P.S.A., Blach-Overgaard, A., Blok, D., Cornelissen, J.H.C., Forbes, B.C., et al., **2018**. Plant functional trait change across a warming tundra biome. *Nature*, 562: 57–62. 注解：环北极地区的变暖速率高于全球平均水平，这将对环北极苔原植被的结构和功能产生深远影响。了解环境要素如何塑造环北极植被的结构功能对于预测气候变化对苔原生态系统的功能的影响至关重要。学者通过分析 117 个研究样点上温度、水分与 7 种植物性状的关系，发现温度与性状之间关系通常都较强，但土壤水分对这些关系的方向和强度的影响十分明显，表明水分对苔原植物功能的塑造至关重要。此外，在过去 30 年，群落高度随着变暖显著增加，但其他性状的变化显著滞后于气候变化。研究结果表明未来变暖下与植物高度密切相关的功能将经历最快速的变化。问题：木材性状以及根系性状没有考虑。
10. Delgado-Baquerizo, M., Oliverio, A.M., Brewer, T.E., Benavent-Gonzalez, Alberto, Bardgett, R.D., Maestre, F.T., Singh, B.K., Fierer, N., **2018**. A global atlas of the dominant bacteria found in soil. *Science*, 359: 320–325. 注解：分析了来自六大洲 237 个地点的土壤，发现只有 2% 的细菌系统类型(约 500 种系统类型)始终占全球土壤细菌群落的近一半。尽管全球土壤中细菌群落多样性极高，但丰富的细菌类群却相对较少。将这些优势类群聚为生态类群，构建了第一个全球土壤细菌类群图谱。将大量的细菌类群缩小到一个最想要的名单，这将是卓有成效的目标，以基因组和培养为基础的努力，可以提高对土壤微生物及其对生态系统功能贡献的理解。问题：选取的地点生态类型有限，缺少荒漠、湿地等生态系统类型的样品。
11. Ma, Z., Guo, D., Xu, X., Lu, M., Bardgett, R., Eissenstat, D., McCormack, M., Hedin, L., **2018**. Evolutionary history resolves global organization of root functional traits. *Nature*, 555: 94–97. 注解：长期以来植物进化理论框架主要基于对叶片、花等地上部分的认识，而对地下根系结构、功能及进化方式的认识却甚少。该研究基于全球 7 个生物群系的 369 个物种建立了一套根系性状数据库，主要包含 10 种一级根性状，系统揭示了植物吸收根功能属性的大尺度生物地理格局，首次阐明了植物根系进化的组织方式。研究表明，从热带雨林到荒漠，植物吸收根直径整体在变细，根系形态多样性减少，对共生真菌依赖性降低，通过该方式，植物单位碳投资的养分获取效率得以优化，植物对环境的适应与存活能力得以增强。问题：尚不清楚为何相同根直径的草本植物菌根定植量小于木本植物。
12. Wright, I.J., Dong, N., Maire, V., Prentice, I.C., Wilf, P., **2017**. Global climatic drivers of leaf size. *Science*, 357: 917–921. 注解：文章收集了全球 682 个样点 7670 个物种的叶片大小数据，发现叶片大小呈现从低纬到高纬减小的地理分布格局，通过叶片能量收支平衡模型分析得出，叶片尺寸是由白天和晚上叶表面的温差所决定。根据这一理论模型，模拟了全球植被最大叶分布格局，这一发现有助于完善基于叶温度和水分的光和作用植被模型。问题：理论模型相对较粗糙，有待进一步细化。

13. Lehmann, J., Kleber, M., **2015**. The contentious nature of soil organic matter. **Nature**, 528: 60–68. 注解：土壤有机质、土壤环境、水生系统以及大气之间的养分、能量和碳交换对农业生产力、水质和气候十分重要。通常认为土壤有机质是由本质上稳定且化学性质独特的化合物组成。但现有证据很少能支持土壤是由大分子和持久性的“腐殖质”所形成这一观点。相反，土壤有机质是逐渐分解的有机化合物的连续体。这一观点对水生生态系统健康、土壤碳-气候相互作用以及土地管理都具有重要意义。
14. McIntyre, P.J., Thorne, J.H., Dolanc, C.R., Flint A.L., Flint, L.E., Kelly, M., Ackerly, D.D., **2015**. Twentieth-century shifts in forest structure in California: Denser forests, smaller trees, and increased dominance of oaks. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, 112: 1458–1463. 注解：通过对比加利福尼亚森林在历史上不同时期（1930s 和 2000s）的结构、功能和碳储量等的变化，发现高达 50% 的成年树木消失了。与此同时，橡树的优势度超过了松树。过去 70 年的干旱胁迫很可能是导致森林结构和功能改变的主要原因。问题：因遥感数据可利用性以及区域问题，在其他地区开展相关研究存在局限性。
15. Schuur, E.A.G., McGuire, A.D., Schaedel, C., Grosse, G., Harden, J.W., Hayes, D.J., Hugelius, G., Koven, C.D., Kuhry, P., Lawrence, D.M., Natali, S.M., Olefeldt, D., Romanovsky, V.E., Schaefer, K., Turetsky, M.R., Treat, C.C., Vonk, J.E., **2015**. Climate change and the permafrost carbon feedback. **Nature**, 520(7546): 171-179. 注解：气候变暖使北半球冻土融化，加速了该地区大量储存的土壤有机碳的微生物分解，导致了温室气体二氧化碳和甲烷的释放。这种反馈效应可以加速气候变化，但其规模和时间尚不清楚。作者通过综述冻土碳循环最新的研究进展，指出北半球冻土区土壤是一个巨大的碳库(1330~1580 PgC)；随后基于土壤长期室内培养实验，阐明了当前人们对于冻土碳循环认识中薄弱的一面：在变暖的气候下，冻土区土壤温室气体的释放更有可能是持续渐进地，而不是骤然、大量地排放。
16. McLauchlan, K.K., Williams, J.J., Craine, J.M., Jeffers, E.S., **2013**. Changes in global nitrogen cycling during the Holocene epoch. **Nature**, 495(7441): 352-355. 注解：与工业革命前相比，人类活动向地球投入的活性氮持续增加。现有的土壤沉积物 $\delta^{15}\text{N}$ 记录表明，陆地生态系统可能在持续吸收人类活动释放的活性氮。然而，人类关于生物圈对于氮的承载能力所知甚少。更新世末期冰川的消融带来的环境变化有助于我们理解氮循环对于陆地碳循环的响应机制。过去氮循环的变化可以叶片、树木、土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 的变化来估计。要了解陆地生物圈的氮状况，必须同时考虑氮供应和氮需求，特别是千年尺度上陆地生态系统对氮的吸收，可以通过在碳氮循环模型中耦合 $\delta^{15}\text{N}$ 机理模型来研究。问题：当前缺乏 $\delta^{15}\text{N}$ 循环机理模型。
17. Körner, C., **2012**. Alpine treelines. Basel, **Springer: Springer Science & Business Media**. 注解：高山树线是一种全球性的生态现象，本书的任务就是解释高山树线的形成过程及机制。该书详细的从树线的定义、类型，树线微气候，树线上树木的结构和形态，生长和发育，进化，繁殖，冻害胁迫等方面对全球高山树线形成原因进行了综合的分析。该书核心观点认为植物普遍受到低温限制，而关键在于低温导致光合产生的碳无法正常分配，进而导致树木生长受限。问题：影响树线形成原因很多，单个原因不太可能具有普适性。
18. Harsch, M.A., Hulme, P.E., McGlone, M.S., Duncan, R.P., **2009**. Are treelines advancing? A global meta-analysis of treeline response to climate warming. **Ecology Letters**, 12: 1040–1049. 注解：一直以来，学界认为树线位置对温度变化非常敏感。然而，并不是所有树线都随着变暖而上升。基于全球 166 个树线位置在 20 世纪以来的定性变化研究发现：仅有 52% 的树线处于上升状态，47% 的树线位置保持不变，1% 下降。通常冬季的强烈升温有利于树线位置的上升。此外，与急变型和矮曲林型树线相比，渐变型树线对气候变化更敏感。问题：因数据有限，研究停留在定性层面，如何量化树线爬升速率与相关影响因子的关系将是未来关注的焦点。
19. Piao, S.L., Fang, J.Y., Ciais, P., Peylin, P., Huang, Y., Sitch, S., Wang, T., **2009**. The carbon balance of

- terrestrial ecosystems in China. *Nature*, 458(7241): 1009-1014. 注解: 该研究首次综合利用“自下而上”(地面清查、遥感、陆面过程模型)与“自上而下”(大气反演)方法,系统地评估了上世纪 80 年代至 90 年代中国陆地生态系统碳汇。研究指出中国陆地生态系统碳汇为 $0.19\text{-}26\text{GtC yr}^{-1}$, 抵消了中国同期 28~37% 的化石燃料排放,中国的生态系统碳汇强度低于美国,但与欧洲的生态系统碳汇强度相当。
20. Hector, A., Bagchi, R. 2007. Biodiversity and ecosystem multifunctionality. *Nature*, 448(7150): 188–190. 注解: 生态系统多功能性是近 20 年来的研究热点,主要涉及到生态系统多功能性的定义,计算方法和生态系统多功能性的驱动要素,以及当前部分科学家试图突破生态系统多功能性,而提出生态系统多服务性(这个思路目前尚存在很大的争议)。就计算方法而言,主流算法有三种,均值法,主成分法和阈值法。目前生态系统多功能性研究方向尚处在初级发展阶段,应该有更多和更深入的研究去完善。该文系统的论述了生物多样对于维持生态系统多功能性的重要意义,指出单一的生态功能会随着物种多样性的增加而呈现渐行线趋势,而不是持续上升,本质上表明物种开始出现冗余,换句话说,冗余物种潜在地具备其他生态系统功能。此外,不同的物种往往影响不同的功能,孤立地关注单一的生态过程会低估维持生态系统多功能所需的生物多样性。那么,对于生态系统管理而言,想获得更多的生态系统功能,就要有更为丰富的物种多样性。问题: 1、2007 年生态系统多功能性研究刚刚起步,计算方法等尚不完善; 2 本研究仅限于欧洲几个点的实验,没有上升到全球尺度; 3、我们需要学习的是作者对多功能性的创新理解和数据分析。
21. Davidson, E.A., Janssens, I.A., 2006. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*, 440(7081): 165-173. 注解: 土壤碳循环方面的经典综述文献。增温一方面使得植被碳输入增加,另一方面又会加快土壤碳的分解; 如果后者变化的幅度大于前者,那么就会形成正反馈效应,进一步加剧气候变暖,反之亦然。文章综述了以往的研究,发现目前我们对土壤碳分解的温度敏感性的认识还存在很多的不确定性。作者认为解开这种反馈效应尤为困难: 因为各种土壤有机化合物表现出广泛的动力学特性,这决定了它们分解的内在温度敏感性。此外,一些环境制约因素掩盖了基质分解的内在温度敏感性,导致表观温度敏感性降低,而这些制约因素本身可能对气候也比较敏感。
22. Ciais, P., Reichstein, M., Viovy, N., Granier, A., Ogee, J., Allard, V., Aubinet, M., Buchmann, N., Bernhofer, C., Carrara, A., Chevallier, F., De Noblet, N., Friend, A.D., Friedlingstein, P., Grunwald, T., Heinesch, B., Keronen, P., Knohl, A., Krinner, G., Loustau, D., Manca, G., Matteucci, G., Miglietta, F., Ourcival, J.M., Papale, D., Pilegaard, K., Rambal, S., Seufert, G., Soussana, J.F., Sanz, M.J., Schulze, E.D., Vesala, T., Valentini, R., 2005. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature*, 437(7058): 529-533. 注解: 该研究阐明了欧洲 2003 年的高温热浪事件对陆地生态系统碳循环的影响。研究指出欧洲 2003 年大规模热浪干旱事件导致陆地生态系统生产力下降 30%, 使得该年生态系统表现为一个 0.5Pg Cyr^{-1} 的强碳源。研究强调欧洲一次极端气候事件导致的碳排放抵消了过去 4 年的碳汇积累,首次揭示极端气候对生态系统功能及其稳定性的重要影响。
23. Koch, G.W., Sillett, S. C., Jennings, G. M., Davis, S.D., 2004. The limits to tree height. *Nature*, 428 (6985): 851–854. 注解: 文章以位于美国洪堡红杉州公园的世界最高树 (112.7m) 红杉 *Sequoia sempervirens* 为研究对象,发现随树高增加,木质部水势压力降低,叶碳同位素比值增大,比叶重增加,最大光合速率减小。分析得出树木最大高度的形成主要与水力限制有关,因为随树高增加,叶片会因为重力作用受到水分胁迫。问题: 水力限制的相关机制如不同植物导管分子的适应机制等仍有待进一步研究。
24. Wright, I.J., Reich, P.B., Westoby, M., Ackerly, D., Baruch, Z., Bongers, F., Cavender-Bares, J., Chapin, T., Cornelissen, J.H.C., Diemer, M., Flexas, J., Garnier, E., Groom, P.K., Gulias, J., Hikosaka, K.,

- Lamont, B.B., Lee, T., Lee, W., Lusk, C., Midgley, J., Navas, M.L., Niinemets, Ü., Oleksyn, J., Osada, N., Poorter, H., Poot, P., Prior, L., Pyankov, V.I., Roumet, C., Thomas, S.C., Tjoelker, M.G., Veneklaas, E.J., Villar, R., **2004**. The worldwide leaf economics spectrum. *Nature*, 428: 821–827. 注解：文章收集了全球 175 个样点 2548 种植物的 6 个涉及叶片化学、结构和生理的叶性状数据（比叶重、最大光合速率、叶氮含量、叶磷含量、暗呼吸速率、叶寿命），建立了叶性状之间的相互关系，发现来自不同生活型、功能型和植物群落的叶片均遵循相似的叶经济学谱系，进而实现叶片的建成投资与碳捕获间的平衡，即在叶经济学谱系中，在快速投资的一端，叶片通常具有高氮含量、高光合速率、高呼吸速率、短叶寿命以及更少的干重。这是首次在全球尺度揭示植物叶片经济学谱系。问题：重点关注了群落及以上水平的性状变化，在更小尺度上这一经济学原理不一定能得到验证。
25. Hungate, B.A., Dukes, J.S., Shaw, M.R., Luo, Y., Field, C.B., **2003**. Nitrogen and climate change. *Science*, 302(5650): 1512. 注解：人类活动特别是工业排放使大气中的 CO₂ 浓度富集引发气候变化。碳循环模型表明陆地生态系统可能正在扮演着吸收大气 CO₂ 的功能，但这些模型可能夸大了陆地的碳富集功能。大气氮沉降和生物固氮带来的氮素可能不足以维持这些模型计算所需的氮。问题：生物地球化学循环模型如果仅考虑碳循环会夸大陆地的固碳功能，碳和氮以及其它营养要素的相互作用模拟尚存在很大的不确定性。
26. Myneni, R.B., Keeling, C.D., Tucker, C.J., Asrar, G., Nemani, R. R., **1997**. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature*, 386 (6626): 698-702. 注解：该论文首次利用大尺度植被遥感观测揭示北半球普遍的植被变绿现象，指出春季物候期提前和生长季延长对植被生长的促进作用，并探讨了植被变绿对全球碳循环的影响。该研究是将遥感观测引入大尺度碳循环研究的经典范例，开启了植被遥感碳循环研究的先河。
27. Keeling, C.D., Chin, J.F.S., Whorf, T.P. **1996**. Increased activity of northern vegetation inferred from atmospheric CO₂ measurements. *Nature*, 382: 146-149. 注解：该研究通过解析北极巴罗站和热带夏威夷站观测的大气 CO₂ 浓度季节波动的振幅变化，揭示植被变化对全球碳循环的影响，首次指出植被快速生长驱动了大气 CO₂ 浓度振幅增强，明确了植被变化对全球碳循环的重要影响。

十、高寒地区人类适应^[1-11]

1. 陈发虎, 夏欢, 高玉, 张东菊, 杨晓燕, 董广辉, **2022**. 史前人类探索、适应和定居青藏高原的历程及其阶段性讨论. *地理科学*, 42(1): 1-14. 注解：较为全面地总结了近年来青藏高原的考古发现与相关研究成果，将人类开始向高原扩散至定居的过程划分为五个阶段：1) 古老型智人自中更新世晚期就开始了高原的适应；2) 现代智人于 40~30 ka 开始探索高原腹地；3) 末次冰消期以来气候转暖细石器人群向高原大范围扩散，并在全新世早中期更为频繁地活动；4) 粟作农业人群至少在 5.2 ka 进入高原东部低海拔的河谷地带，在 4.8 ka 以后开始定居在高原东部 3000 m 以上区域；5) 3.5 ka 以来麦作的传入和牧业经济的发展助力人群大规模定居高海拔区域。
2. Zhang, P. Q., Zhang, X. J., Zhang, X. L., Gao, X., Huerta-Sanchez, E., Zwyns, N., **2022**. Denisovans and Homo sapiens on the Tibetan Plateau: dispersals and adaptations. *Trends in Ecology & Evolution*, 37(3): 257-267. 注解：对近年青藏高原史前人类活动的考古学和遗传学最新研究进展进行了综述，基于已发表研究成果，重点讨论了青藏高原人群的来源、演替和文化演变等问题，提出了青藏高原人类演变历史的两个假说。
3. Zhang, D.J., Xia, H., Chen, F., Li, B., Slon, V., Cheng, T., Yang, R.W., Jacobs, Z., Dai, Q.Y., Massilani, D., Shen, X.K., Wang, J., Feng, X.T., Cao, P., Yang, M.A., Yao, J.T., Yang, J.S., Madsen, D.B., Han, Y.Y., Ping, W.J., Liu, F., Perreault, C., Chen, X.S., Meyer, M., Kelso, J., Paeabo, S., Fu, Q., **2020**. Denisovan DNA in Late Pleistocene sediments from Baishiya Karst Cave on the Tibetan Plateau. *Science*, 370(6516): 584-587. 注解：通过对白石崖溶洞 2018 年发掘出土材料的年代学、沉积学、

考古学以及沉积物古 DNA 等分析, 构建了距今约 19 万年以来的地层年代框架, 并在距今 10 万及 6 万年、甚至可能晚至距今 4.5 万年的文化层中获得丹尼索瓦人线粒体 DNA, 揭示丹尼索瓦人曾在青藏高原长期生活。

4. Guedes, J.D., Aldenderfer, M., 2020. The Archaeology of the Early Tibetan Plateau: New research on the Initial Peopling through the Early Bronze Age. *Journal of Archaeological Research*, 28(3): 339-392. 注解: 青藏高原考古综述, 回顾了自 2004 年来高原考古研究发展, 针对人类何时常年生活在高原、藏族人何时以及如何采用了当今高原的农业和畜牧系统、最早的藏族人是谁、他们如何在基因和文化上适应高海拔环境等问题, 详细阐述了近二十年不断更新和重塑的认识。
5. Chen, F.H., Welker, F., Shen, C.C., Bailey, S.E., Bergmann, I., Davis, S., Xia, H., Wang, H., Fischer, R., Freidline, S.E., Yu, T.L., Skinner, M.M., Stelzer, S., Dong, G.R., Fu, Q.M., Dong, G.H., Wang, J., Zhang, D.J., Hublin, J.J., 2019. A late Middle Pleistocene Denisovan mandible from the Tibetan Plateau. *Nature*, 569: 409-412. 注解: 报道了早年在青藏高原东北部夏河县甘加盆地白石崖溶洞 (3280 masl) 发现的一件人类下颌骨化石, 古蛋白研究显示其为丹尼索瓦人。化石上附着的碳酸盐结核的铀系测年结果显示, 该下颌骨的最小年龄为距今 16 万年。这是目前在西伯利亚以外发现的首例丹尼索瓦人化石, 也是青藏高原最早的古人类化石。问题: 只有化石, 缺少原生层位和伴生文化遗存信息。
6. Zhang, X.L., Ha, B.B., Wang, S.J., Chen, Z.J., Ge, J.Y., Long, H., He, W., Da, W., Nian, X.M., Yi, M.J., Zhou, X.Y., Zhang, P.Q., Jin, Y.S., Bar-Yosef, O., Olsen, J.W., Gao, X., 2018. The earliest human occupation of the high-altitude Tibetan Plateau 40 thousand to 30 thousand years ago. *Science*, 362(6418): 1049-1051. 注解: 报道了藏北羌塘高原色林错湖盆流域的尼阿底遗址 (4600 masl) 的研究成果, 该遗址文化层的系统光释光测年结果显示, 古人类于距今 4-3 万年前在此活动; 地表和地层出土大量石叶技术产品指示古人群为现代智人, 是现代智人在青藏高原的最早活动的记录, 也是目前发现的世界范围内史前人类在高海拔地区生活的最高记录。
7. Meyer M. C., Aldenderfer M. S., Wang Z., Hoffmann D. L., Dahl J. A., Degering D., Haas W. R., Schlutz F., 2017. Permanent human occupation of the central Tibetan Plateau in the early Holocene. *Science*, 355: 64-67. 注解: 对邱桑遗址 (4200 masl) 沉积物进行了光释光、铀系、碳十四测年, 更正了该遗址的年代, 测年结果表明, 该遗址形成年代不晚于 7400 ± 100 (铀系), 最老年龄尚不确定, 可能是距今 8510-8200 年 (碳十四), 或者大约 12700 年前 (光释光)。并基于迁移成本模型指出该遗址并非季节性、短期的活动地点, 而是长时间占据了青藏高原中部地区, 提出得益于更加潮湿的区域气候 (持续时间为距今 11500-4200 年), 史前人类至少在 7400 年前已经永久占据青藏高原。问题: 遗址年代存在争议, 没有任何考古遗存证据, 迁移成本模型的假设前提存在问题, 从而导致人类永久占据高原的结论有争议。
8. Chen, F.H., Dong, G.H., Zhang, D.J., Liu, X.Y., Jia, X., An, C.-B., Ma, M.M., Xie, Y.W., Barton, L., Ren, X.Y., Zhao, Z.J., Wu, X.H., Jones, M.K., 2015. Agriculture facilitated permanent human occupation of the Tibetan Plateau after 3600 BP. *Science*, 347: 248-250. 注解: 基于青藏高原东北部的考古调查工作, 对新石器—青铜时代的 53 处遗址开展了动植物遗存分析和直接测年, 结合中晚全新世以来的气候背景, 提出史前人类向青藏高原扩散的三步走模式: 第一阶段 (距今 5200 年以前), 狩猎采集人群季节性活动在青藏高原; 第二阶段 (距今 5200-3600 年间), 黄土高原西部的农业人群沿黄河及其支流河谷扩散并定居至青藏高原东北部海拔 2500 米以下的河谷地带; 第三阶段 (距今 3600 年以来), 得益于麦作和牧羊的发展, 人类大规模向高海拔地区扩张, 永久占据了海拔 3000 米以上的区域。本文提出东西文化交流带来的农业技术革新促进人类大规模永久成功占据青藏高原高海拔地区。问题: 基于青藏高原东北部材料提出的模式是否反映了整个高原的情况, 有待进一步研究证实。

9. Huerta-Sánchez E., Jin, X., Asan, Bianba, Z., Vinckenbosch, N., Peter, B. M., Liang, Y., Yi, X., He, M., Somel, M., Ni, P. X., Wang, B., Ou, X. H., Luosang, J. B., Zha Xi Ping Cuo, Gao, G. Y., Yin, Y., Wang, W., Zhang, X. P., Xu, X., Yang, H., Li, Y. G., Wang, J., Wang, J., Nielsen, R., **2014**. Altitude adaptation in Tibetans caused by introgression of Denisovan-like DNA. *Nature*, 512(7513): 194-197. 注解：基于现代人基因研究发现，发现藏族人所携带的 EPAS1 基因（HIF 通路,低氧诱导调节通路）与其他现存人种差异非常大，是基因突变在藏族世系中积累的可能性非常小，其基因序列与已知人种基因组序列对比后，发现其与丹尼索瓦人的 EPAS1 基因几乎一模一样，表明藏族人适应高原环境基因可能来源于其他人种——丹尼索瓦人。该文章基于完整的丹人基因组序列和现代藏族人群基因组对比，对 2 号染色体上 EPAS1 基因的核心片段和上下游片段序列细致对比后，列出了 32 个最具代表性的差异位点。
10. Yi, X., Liang, Y., Huerta-Sanchez, E., Jin, X., Cuo, Z.X.P., Pool, J.E., Xu, X., Jiang, H., Vinckenbosch, N., Korneliussen, T.S., Zheng, H.C., Liu, T., He, W.M., Li, K., Luo, R.B., Nie, X.F., Wu, H.L., Zhao, M.R., Cao, H.Z., Zou, J., Shan, Y., Li, S.Z., Yang, Q., Asan, Ni, P.X., Tian, G., Xu, J.M., Liu, X.A., Jiang, T., Wu, R.H., Zhou, G.Y., Tang, M.F., Qin, J.J., Wang, T., Feng, S.J., Li, G.H., Huasang, Luosang, J.B., Wang, W., Chen, F., Wang, Y.D., Zheng, X.G., Li, Z., Bianba, Z.M., Yang, G., Wang, X.P., Tang, S.H., Gao, G.Y., Chen, Y., Luo, Z., Gusang, L., Cao, Z., Zhang, Q.H., Ouyang, W.H., Ren, X.L., Liang, H.Q., Zheng, H.S., Huang, Y.B., Li, J.X., Bolund, L., Kristiansen, K., Li, Y.R., Zhang, Y., Zhang, X.Q., Li, R.Q., Li, S.G., Yang, H.M., Nielsen, R., Wang, J., Wang, J.A., **2010**. Sequencing of 50 Human Exomes Reveals Adaptation to High Altitude. *Science*, 329: 75-78. 注解：通过对比汉藏人群之间不同基因频率差异，发现自然选择信号最强烈的是 EPAS1 基因，它是和缺氧的反应有关的转录因子（HIF-2）。EPAS1 中的一个单核苷酸多态性（SNP）显示藏族和汉族样本之间的频率相差 78%，这是迄今为止在所有人类基因上等位基因频率变化最快的。
11. Brantingham, P. J., Gao, X., Olsen, J. W., Ma, H., Rhode, D., Zhang, H., Madsen, D. B., **2007**. A short chronology for the peopling of the Tibetan Plateau. *Developments in Quaternary Science*, 9: 129-150. 注解：通过对青藏高原上已知晚更新世和早中全新世考古遗址的年龄、空间分布和文化遗存分析，重建了早期人类向青藏高原扩散的时间框架，并分析了几次扩散事件发生的机制：古人类最早到达青藏高原的时间为 30000 年前，随后在 15000 年前有较大规模人群向青藏高原扩散，这两次扩散可以解释为“适应辐射”，即中国北方旧石器晚期人群成功的生存适应策略引起人口增加，使持相同适应策略的人群扩散至青藏高原，此时的人群均为季节性迁移的狩猎采集人群；居所相对稳定的人群在青藏高原出现的时间不早于距今 8200 年前，依然为狩猎采集人群，此次人群扩散的发生是受低海拔农业人群的快速发展和排斥而发生的，因此被解释为“竞争排斥”；距今 8200 年之后特化的石叶和细石叶技术在高原的出现被解释为“定向选择”的结果；距今 6000 年之后，青藏高原上出现的呈现农业面貌的定居人群，应是低海拔农业扩散的结果，即“适应辐射”。

拓展文献^[1-31]

1. Liu, C.C., Witonsky, D., Gosling, A., Lee, J.H., Ringbauer, H., Hagan, R., Patel, N., Stahl, R., Novembre, J., Aldenderfer, M., Warinner, C., Di Rienzo, A., Jeong, C., **2022**. Ancient genomes from the Himalayas illuminate the genetic history of Tibetans and their Tibeto-Burman speaking neighbors. *Nature Communications*, 13: e1203. 注解：在 2016 年文章古 DNA 证据（显示该喜马拉雅高海拔地区的古代人群(3150 - 1250 BP)为东亚起源，并且存在长期遗传稳定性）的结论基础上，进一步对 1420 BCE~500 CE 的古代尼泊尔穆斯塘地区喜马拉雅南麓的古 DNA 研究，主要发现该古代高原人群大部分血统来自和高原东北缘晚全新世人群相关的人群；含有独特高原相关的旧石器古老欧亚人群成分；藏缅人群向喜马拉雅迁徙的两条路线；对 EPAS1 和 EGLN1 基因长期的正向选择。

2. Liu, F., Zhang, S., Zhang, H., Dong, G., 2022. Detecting anthropogenic impact on forest succession from the perspective of wood exploitation on the northeast Tibetan Plateau during the late prehistoric period. *Science China Earth Sciences*, (11): 2068-2082. 注解: 本文以青藏高原东北部这一生态脆弱区为研究区, 以 24 个史前考古遗址出土的木炭遗存为研究指标, 通过系统的种属鉴定, 发现新石器时代晚期至青铜时代 (5200-2300 cal BP), 青藏高原东北部先民采集木材资源的方式为“就近取材”, 且采集利用的木本植物组合存在明显的空间差异。受当地人类活动影响下的森林演替影响, 高原东北部史前逐渐从以采集针叶树种为多转向以采集阔叶树种为主。
3. Liu, L., Chen, J., Wang, J., Zhao, Y., Chen, X., 2022. Archaeological evidence for initial migration of Neolithic Proto Sino-Tibetan speakers from Yellow River valley to Tibetan Plateau. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 119(51): e2212006119. 注解: 语言学、基因学和考古学证据表明, 原始汉藏语系人群在 6.0-5.5 ka 开始沿着青藏高原东缘向南扩张。通过对渭河上游 (甘肃秦安大地湾遗址) 和川西高原 (茂县波西、马尔康哈休遗址) 仰韶中晚期陶器残留物进行淀粉粒、植硅体和微生物分析, 发现两地有着相近的酿酒和饮酒活动。结合聚落形态和考古图像学分析, 仰韶文化这种饮酒和跳舞的仪式性传统是仰韶文化维系集体利益的传统, 也是仰韶移民强化文化认同、社会价值和与故土联系的重要方式。
4. 吕红亮, 2022. 青藏高原粟作本地化与永久定居. *中国科学: 地球科学*, 53: doi: 10.1360/SSTe-2022-0111. 注解: 早前的研究认为, 距今 3600 年前麦作农业的传入使得青藏高原人群有了稳定食物资源, 推动了古代人群在青藏高原高海拔地区永久定居。这一论断对粟作农业的贡献有所忽视。西藏昌都卡若遗址和青海同德宗日遗址出土的粟黍有可能是本地种植的产物。最迟在距今 4800 年前, 青藏高原东部以卡若遗址为代表的人群就已经定居在海拔 3000 米以上区域。问题: 没有区分中文语境下的 permanent occupation 和 sedentism, 类似 cultivation 和 domestication。应该统一中文翻译, 以免造成混乱。
5. Tang, L., Lu, H., Chen, X., Xu, H., Boivin, N., Storozum, M., Yang, F., Li, S., Liu, X.Y., Spengler, R.N., 2022. Prehistoric agricultural decision making in the western Himalayas: ecological and social variables. *Antiquity*, 96(389): 1214-1231. 注解: 文章报道了阿里高原几处海拔 4000-4500 米遗址的植物考古工作, 提出喜马拉雅山脉西部不同海拔高度地区不同温度和降水条件形成了不同的适应性策略, 并指出西藏西部小型遗址为了牧业经济从而种植单一作物的特殊策略; 而大型遗址则通过更为灵活的种植策略和贸易联系获得更多样的作物。
6. Zhang, P., Zhang, X., Li, L., He, W., Dawa, Jin, Y., Ge, J., Zwyns, N., Wang, S., Gao, X., 2022. The peopling of the hinterland of the Tibetan Plateau during the late MIS 3. *Science Bulletin*, 67: 2411-2415. 注解: 现代人扩散至青藏高原腹地的时间可追溯至深海氧同位素 3 阶段晚期, 以西藏申扎尼阿底遗址典型的旧石器时代晚期石叶技术为代表。通过石器技术与文化对比发现尼阿底与中国宁夏水洞沟和亚洲北部的考古遗址具有密切联系。GIS 最低成本路径分析提示, 高原腹地与平原地区石叶技术人群的交流存在两条可能性较大的路线: 一是西伯利亚和蒙古国北部横穿戈壁, 经水洞沟连接高原腹地; 二是北亚地区绕戈壁边缘经中国东北连通水洞沟及青藏高原。
7. Zhang, Y., Gao, Y., Yang, J., Wang, Y., Wang, Y., Sun, Q., Chen, S., Wang, Q., Ran, J., He, W., Hou, J., Yang, X., 2022. Patterns in pottery use reveal different adaptive strategies between lower and higher altitude regions on the Tibetan Plateau: Chemical evidence from pottery residues. *Journal of Archaeological Science*, 138: 105544. 注解: 本文对青藏高原南部的西藏林芝立定遗址 (2900 mals) 和拉孜廓雄遗址 (3900 mals) 的陶器脂类残留物进行分析, 发现陶器容器主要用于加工动物脂肪。在立定遗址, 猪类脂肪贡献了大部分的脂质残留物, 并且多叶植物被用作日常饮食的补充物; 而廓雄遗址则以反刍动物为主, 或许指示狩猎野生有蹄类动物或者季节性游牧活动。
8. Cheng, T., Zhang, D., Smith, G.M., Jöris, O., Wang, J., Yang, S., Xia, H., Shen, X., Li, Q., Chen, X., Lin, D., Han, Y., Liu, Y., Qiang, M., Li, B., Chen, F., 2021. Hominin occupation of the Tibetan Plateau

- during the Last Interglacial Complex. **Quaternary Science Reviews**, 265: 107047. 注解: 对甘肃永登奖俊埠遗址开展年代学、古环境和考古学分析, 发现在温暖湿润的末次间冰期(距今 12-9 万年), 古人类在位于祁连山东段的奖俊埠遗址生活, 揭示古人类在距今晚更新世早期频繁活动在青藏高原东北部。
9. 侯光良, 兰措卓玛, 朱燕, 庞龙辉, 2021. 青藏高原史前时期交流路线及其演变. **地理学报**, 76(05): 1294-1313. 注解: 本文基于自然地理因子和不同时期遗址点, 在最低成本的控制下实现节点间累积联结的方法, 使用 GIS (R 语言) 工具进行空间数值计算, 将其结果作为新石器—青铜时代的交流路线。
 10. Song, J., Gao, Y., Tang, L., Zhang, Z., Tang, M.H., Xu, H., Wangyal, T., Yuan, H., Li, L., Li, Y., Wangdue, S., Liu, X., Lu, H., 2021. Farming and multi-resource subsistence in the third and second millennium BC: archaeobotanical evidence from Karuo. **Archaeological and Anthropological Sciences**, 13: 10.1007/s12520-021-01281-9. 注解: 本文介绍了昌都卡若遗址 2012 和 2018 年的浮选结果, 提出卡若遗址早期 (2700-2100 BC) 是一种集粟作农业、采集和渔猎于一体的混合经济。植物组合中的农田杂草和有别于低地的小粒径粟, 均指向存在本地粟作农业的可能性。到了晚期麦类作物传入后粟作农业的重要性有所降低。
 11. Zhang, D.D., Bennett, M.R., Cheng, H., Wang, L., Zhang, H., Reynolds, S.C., Zhang, S., Wang, X., Li, T., Urban, T., Pei, Q., Wu, Z., Zhang, P., Liu, C., Wang, Y., Wang, C., Zhang, D.J., Lawrence Edwards, R., 2021. Earliest parietal art: Hominin hand and foot traces from the middle Pleistocene of Tibet. **Science Bulletin**, 66: 2506-2515. 注解: 通过对邱桑遗址新发现的手脚印进行形态学、年代学和形成机制分析, 发现这组手脚印为古人类手脚印, 形成于距今 22.6-16.9 万年, 并且是古人类有目的的艺术创作。揭示古人类在距今 20 万年左右已经到达青藏高原腹地活动, 并且进行了有意识的艺术创作。问题: 缺乏考古遗存, 脚印形成过程、机制及其所反映的人类活动, 即是否为艺术创作等问题, 在考古学界有较大争议 (汤惠生, 夏格旺堆, 吕红亮, 2022. 西藏邱桑手脚印遗迹及相关问题. 河北师范大学学报(哲学社会科学版), 45(5): 77-85. 从手脚印的年代和能否作为艺术两方面对上文提出质疑)。
 12. Zhang, X.J., Witt, K.E., Banuelos, M.M., Ko, A., Yuan, K., Xu, S.H., Nielsen, R., Huerta-Sanchez, E., 2021. The history and evolution of the Denisovan-EPAS1 haplotype in Tibetans. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, 118: e2020803118 注解: 依靠高质量的现代藏族人群新数据和古人类基因数据, 结合生物信息学数据发掘, 厘清藏族 EPAS1 单倍型来自丹尼索瓦人向东亚人群的基因渗入事件, 在正向选择发生之前长期保持选择性中性, EPAS1 基因受到强烈自然选择可能与末次盛冰期后青藏高原的永久居住有关 (LGM), 推测该高原适应性 EPAS1 基因由丹人渗入现代人的时间约为 48,700 (16,000–59,500) 年, 而该基因反映的呈现受到强烈自然选择开始的时间为 9,000 (2,500–42,000) 年前。
 13. Nakatsuka, N., Lazaridis, I., Barbieri, C., Skoglund, P., Rohland, N., Mallick, S., Posth, C., Harkins-Kinkaid, K., Ferry, M., Harney, E., Michel, M., Stewardson, K., Novak-Forst, J., Capriles, J.M., Durruty, M.A., Alvarez, K.A., Beresford-Jones, D., Burger, R., Cadwallader, L., Fujita, R., Isla, J., Lau, G., Aguirre, C.L., LeBlanc, S., Maldonado, S.C., Meddens, F., Messineo, P.G., Culleton, B.J., Harper, T.K., Quilter, J., Politis, G., Rademaker, K., Reindel, M., Rivera, M., Salazar, L., Sandoval, J.R., Santoro, C.M., Scheifler, N., Standen, V., Barreto, M.I., Espinoza, I.F., Tomasto-Cagigao, E., Valverde, G., Kennett, D.J., Cooper, A., Krause, J., Haak, W., Llamas, B., Reich, D., Fehren-Schmitz, L., 2020. A Paleogenomic Reconstruction of the Deep Population History of the Andes. **Cell**, 181: 1131-1145. 注解: 来自 89 个古人类的全基因组数据揭示了安第斯山脉中部 9000 年来人群基因结构变化, 发现在 5800 年前安第斯高原存在从南到北的遗传亚结构, 而距今 5800 年以后高海拔人群和邻近海岸人群存在遗传混合, 而距今 2000 年以来, 伴随主要文化的兴衰, 遗传保持显著的连续性,

作者还发现在蒂瓦纳库 Tiwanaku 和印加 Inca 政体的中心, 不同祖先血统的人群肩并肩地生活在一起, 提出了当时社会显现的世界大同主义 (cosmopolitanism)。

14. Altamura, F., Bennett, M.R., Marchetti, L., Melis, R.T., Reynolds, S.C., Mussi, M., 2020. Ichnological and archaeological evidence from Gombore II OAM, Melka Kunture, Ethiopia: An integrated approach to reconstruct local environments and biological presences between 1.2 and 0.85 Ma. **Quaternary Science Reviews**, 244: 106506. 注解: 文章介绍了来自埃塞俄比亚高原 Awash 河谷上游 Melka Kunture 遗址 (2000 ~ 2200 masl) 的新发现。通过对 Gombore II OAM 厚达 3.2 米的火山灰和河湖相序列 (1.2 ~ 0.85 Ma) 开展考古学、岩层学、遗迹化石学研究, 发现该序列记录了各类动物及其相关行为和相互作用; 各种大小的哺乳动物 (主要为牛科动物)、鸟类、软体动物以及人类在整个序列中都留下了足迹, 其中 1.2~0.78 Ma 的系列人类足迹表明了古人类与河湖岸之间的密切联系。
15. Gao, Y., Yang, J., Ma, Z., Tong, Y., Yang, X., 2020. New evidence from the Qugong site in the central Tibetan Plateau for the prehistoric Highland Silk Road. **The Holocene**, 31(2): 230-239. 注解: 本文介绍了在西藏拉萨曲贡遗址调查的年代学和植物遗存结果, 发现曲贡遗址既有起源于东亚的粟、黍, 又有起源于西亚的大麦、小麦和青稞, 还有可能起源于中国西南的荞麦生产。结合青藏高原及其周边的植物遗存数据, 初步勾勒了史前麦粟农业在这一区域传播的路线。
16. Han, F., He, Y., Du, W., Cai, L., Lu, H., 2020. Technological strategy and mobility of Middle Holocene hunter-gatherers in the high-altitude Qinghai-Tibetan Plateau: a case study from Tshem gzhung kha thog. **Archaeological and Anthropological Sciences**, 12: 242, <https://doi.org/10.1007/s12520-020-01188-x>. 注解: 本文介绍了位于青藏高原东北部通天河流域青海治多参雄尕朔遗址 (海拔 4016 m) 的石制品组合。作者通过操作链分析方法重建了剥片序列, 并且从技术组织学视角探索了技术对于这一区域狩猎采集人群移动性的影响。结合石制品组合和年代序列研究, 作者推断参雄尕朔是狩猎采集人群利用周边优质硅质石料来生产细石叶制品的石器制造场。这批人群居住的地方可能就在附近。
17. Ren, L., Dong, G., Liu, F., d'Alpoim-Guedes, J., Flad, R.K., Ma, M., Li, H., Yang, Y., Liu, Y., Zhang, D., Li, G., Li, J., Chen, F., 2020. Foraging and farming: archaeobotanical and zooarchaeological evidence for neolithic exchange on the tibetan plateau. **Antiquity**, 94(375): 1-16. 注解: 2015 年青海同德宗日遗址发掘发现的动物遗存经鉴定除了少量狗均为野生动物, 而植物组合中粟、黍作物的比例超高, 结合当地海拔超出了现代粟、黍种植的上限, 提出宗日人群是狩猎采集者, 通过交换获得低地的农产品。
18. Tang, L., Lu, H., Song, J., Wangdue, S., Chen, X., Zhang, Z., Liu, X., Boivin, N., Spengler, R.N., 2020. The transition to a barley-dominant cultivation system in tibet: first millennium bc archaeobotanical evidence from bangga. **Journal of Anthropological Archaeology**, 61: doi.org/10.1016/j.jaa.2020.101242. 注解: 介绍了西藏琼结邦嘎遗址 (1055-211 cal BC) 2017 年度的浮选材料, 指出邦嘎遗址正好处于青藏高原从麦粟混合农业转向大麦主导农业和牧业经济的过渡阶段, 并指出这个发展过程中饮食传统和社会经济转变的影响因素。
19. Wang, J., Xia, H., Yao, J., Shen, X., Cheng T., Wang, Q., Zhang., D., 2020. Subsistence strategies of prehistoric hunter-gatherers on the Tibetan Plateau during the Last Deglaciation. **Science China Earth Sciences**, (03): 395-404. 注解: 本文对位于青海湖盆地南岸的 151 遗址下文化层 (距今 15400~13100 年间) 出土的动物骨骼遗存进行埋藏学和动物考古学分析, 显示当时古人类主要狩猎野牛和野马/野驴等大型有蹄类动物。除了消费肉类资源外, 也很注重对骨髓甚至骨骼油脂的利用, 以适应高海拔环境中对高能量消耗的需求。
20. Ossendorf, G., Groos, A.R., Bromm, T., Tekelemariam, M.G., Glaser, B., Lesur, J., Schmidt, J., Akçar, N., Bekele, T., Beldados, A. and Demissew, S., Kahsay, T.H., Nash, B.P., Nauss, T., Negash, A.,

- Nemomissa, S., Veit, H., Vogelsang, R., Woldu, Z., Zech, W., Opgenoorth, L., Mieke, G., **2019**. Middle Stone Age foragers resided in high elevations of the glaciated Bale Mountains, Ethiopia. **Science**, 365: 583-587. 注解: 通过对埃塞俄比亚高原 Fincha Habera 岩厦遗址 (3469 masl) 的考古学、土壤生物地球化学、冰川年代学和动物地理学的综合分析, 揭示了距今 4.7-3.1 万年前, 人类在相对温暖潮湿的环境下利用本地石料制作石器, 捕猎全年存在并且数量众多的大东非鼯鼠作为主要食物来源, 从而在高海拔地区长时间居住。该遗址是目前年代最早的史前高海拔居址。
21. Zhang, Z., Chen, Z., Marshall, F., Lu, H., Lemoine, X., Wangyal, T., Dorje, T., Liu, X., **2019**. The importance of localized hunting of diverse animals to early inhabitants of the eastern tibetan plateau at the neolithic site of xiaoenda. **Quaternary International**, 529: 38-46. 注解: 本文介绍了西藏昌都小恩达遗址 (距今 5000-4000 年前, 系卡若文化遗址) 2012 年发掘系统采集的动物遗存。经鉴定, 出土的动物骨骼均为野生动物, 先民采取的是多样化的狩猎策略。狩猎野生动物而非家畜饲养在支撑 5000 年前青藏高原东部永久定居活动中发挥了重要作用。
22. Arciero, E., Kraaijenbrink, T., Asan, Haber, M., Mezzavilla, M., Ayub, Q., Wei, W., Zhaxi, P.C., Yang, H.M., Jian, W., Jobling, M.A., van Driem, G., Xue, Y.L., de Knijff, P., Tyler-Smith, C., **2018**. Demographic History and Genetic Adaptation in the Himalayan Region Inferred from Genome-Wide SNP Genotypes of 49 Populations. **Molecular Biology and Evolution**, 35: 1916-1933. 注解: 根据包括了西藏、尼泊尔、不丹和印度的更广泛的喜马拉雅地区人群数据, 重建的人群历史结果发现, 喜马拉雅地区人群与东亚和南亚人群都有普遍联系: 尼泊尔人群和印度人群更接近, 不丹和中国西藏的人群和东亚人群更接近。根据这些人群间的基因频率的差异, 发现了几个和海拔高原有较强关联的位点, 其中也包括 7 个新发现的可能高原适应基因有关位点。
23. Lindo, J., Haas, R., Hofman, C., Apata, M., Moraga, M., Verdugo, R. A., Watson, J. T., Viviano Llave, C., Witonsky, D., Beall, C., Warinner, C., Novembre, J., Aldenderfer, M., Di Rienzo, A., **2018**. The genetic prehistory of the Andean highlands 7000 years BP though European contact. **Science advances**, 4(11): eaau4921. 注解: 作者展示了距今 7000 年以来秘鲁安第斯山脉的古全基因组序列, 将来自高地和低地人群的 42 个新个体的全基因组数据进行比较分析, 推断出三个重要特征: 9200 - 8200 BP 之间低海拔人群和高海拔人群之间存在显著差异; 在与欧洲人群接触后, 南美洲低地人群出现崩溃明显严重于高原人群; 在与欧洲人接触后, 与淀粉消化和可能病原体抗性相关的遗传位点上存在正向选择的证据。
24. Yang, J., Jin, Z.B., Chen, J., Huang, X.F., Li, X.M., Liang, Y.B., Mao, J.Y., Chen, X., Zheng, Z., Bakshi, A., Zheng, D.D., Zheng, M.Q., Wray, N.R., Visscher, P.M., Lu, F., Qu, J., **2017**. Genetic signatures of high-altitude adaptation in Tibetans. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, 114(16): 4189-4194. 注解: 通过分析大规模的藏族人群基因组样本, 发现: (1) 通过对比 3000 多个藏族个体和 2000 多个汉族个体的基因组后, 除了发现 EPAS1 (来自丹尼索瓦人) 和 ELGN1 基因外, 还发现了 7 个藏族人群独有的基因。这些独有的基因能够帮助藏族人调整并适应高海拔地区。(2) 发现藏族与彝族、纳西族和土族的遗传关系最为接近, 而这些民族的人群大部分分布在青藏高原的东侧, 因此支持了藏族人是从青藏高原东部向西迁移的假说。(3) 通过借助大规模全基因组单核苷酸多态性数据, 推测藏族与汉族祖先是在距今 4725 年分离, 比 Yi 等 (2010) 文中的结论早了 2000 年。
25. Lu, H., **2016**. Colonization of the Tibetan Plateau, permanent settlement, and the spread of agriculture: Reflection on current debates on the prehistoric archeology of the Tibetan Plateau. **Archaeological Research in Asia**, 5: 12-15. 注解: 这是一篇评论性文章, 围绕着人类何时拓殖高原、人类何时永久定居高原和青藏高原最早的农业证据三个焦点问题, 从考古学视角出发, 提倡谨慎地使用“青藏高原”这个地理概念。并提出在研究时应重视考古遗存的背景, 指出雅江中游的宽谷地带在未来工作中的潜力。

26. d'Alpoim Guedes, J. A., Lu, H., Hein, A. M., Schmidt, A. H., **2015**. Early evidence for the use of wheat and barley as staple crops on the margins of the Tibetan Plateau. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, 112(18): 5625-5630. 注解: 文章介绍了四川九寨沟阿梢埡遗址的植物考古研究结果, 表明 3400 aBP 小麦、大麦和亚麻在青藏高原边缘区成为主要粮食作物。利用生态位模型对粟、黍和小麦、大麦在青藏高原周边地区的现代空间分布进行了模拟, 提出大麦小麦耐寒的特性帮助其扩散至中国西部地区, 并迅速替代了粟黍成为主要粮食作物。而在这个模型中, 卡若遗址无法种植小米。
27. Foerster, V., Vogelsang, R., Junginger, A., Asrat, A., Lamb, H.F., Schaebitz, F., Trauth, M.H., **2015**. Environmental change and human occupation of southern Ethiopia and northern Kenya during the last 20,000 years. **Quaternary Science Reviews**, 129: 333-340. 注解: 该研究获取了埃塞尔比亚西南部 Chew Bahir 盆地中的一条 2 万年以来的连续湖芯古气候记录和该区域考古遗址(可能的避难所)的碳十四年代的频率指示人类定居和迁移历史。湖芯古气候记录与轨道驱动的太阳辐射变化之间的对比表明环境对气候驱动具有复杂的非线性响应, 表现在多个长期和短期的干湿转换, 造成适宜和不适宜人类生活的环境的快速转换。考古记录与该研究的古气候记录的对比揭示了过去 2 万年人与环境的复杂相互作用过程, 气候干旱事件与人口移居进入避难所的时间有显著相关性, 长期气候恶化可能导致了大规模人口迁移; 但并非所有气候干旱时间都会造成人类向避难所迁移。该研究有助于理解东非地区动态环境变化如何影响早期人类的定居和扩散。
28. Rademaker, K., Hodgins, G., Moore, K., Zarrillo, S., Miller, C., Bromley, G. R., Leach, P., Reid, D. A., Álvarez, W. Y., Sandweiss, D. H., **2014**. Paleoindian settlement of the high-altitude Peruvian Andes. **Science**, 346(6208): 466-469. 注解: 该文章报道了秘鲁安第斯山脉世界上海拔最高的晚更新世考古遗址: Pucuncho 石器加工遗址 (~12.8~11.5 ka, 4355 masl) 仅出土了两个 fishtail projectile points; Cuncaicha 岩厦遗址 (12.4~5.1 ka, 4480 masl) 年代序列完整, 出土了较多的遗存。
29. Bigham, A., Bauchet, M., Pinto, D., Mao, X., Akey, J.M., Mei, R., Scherer, S.W., Julian, C.G., Wilson, M.J., Opez Herraes, D., Brutsaert, T., Parra, E.J., Moore, L.G., Shriver, M.D., **2010**. Identifying signatures of natural selection in Tibetan and Andean populations using dense genome scan data. **PLoS Genetics**, 6: e1001116. 注解: 永久定居于高原的三个人群(安第斯高原上的安第斯人, 喜马拉雅高原上的藏族人, Semian 高原的埃塞俄比亚人)对于高海拔适应所共有的基因区域位于 11 号染色体 HIF 通路基因的球蛋白簇和一些染色体区域。关键的 HIF 调控和靶向基因和海拔适应有关。安第斯人和藏族人中虽然确定的候选基因和基因区域是彼此不同的, 但 HIF 通路基因的 EGLN1, 共存于两个人群中, 显示高海拔人群定向选择的证据。
30. 李永宪, **2007**. 卡若遗址动物遗存与生业模式分析——横断山区史前农业观察之一. **四川文物**, (5): 50-56. 注解: 本文介绍了 2002 年西藏昌都卡若遗址再次发掘出土的动物遗存材料(距今 4000 年前)。经鉴定出土动物骨骼均为野生动物, 不存在上个世纪七十年代发掘时认为的家猪饲养, 指出卡若遗址晚期渔猎与种植业构成了具有时间调节性的综合型生业方式, 即春夏季以种植、收获粟类作物为主, 秋冬季则以渔猎获取动物为主。
31. Craig, N., **2005**. The Formation of Early Settled Villages and the Emergence of Leadership: A Test of Three Theoretical Models in the Rio Ilave, Lake Titicaca Basin, Southern Peru. Doctoral dissertation, **University of California, Santa Barbara**. 注解: 本文主要介绍了秘鲁南部 Jiskairumoko 遗址 (~3400-1600 BC, 3890 masl) 发现的柱洞、研磨工具、储藏设施、非本地的黄金等昂贵文物、驯化的植物和动物、贵族墓葬, 以及在象征意义上使用赭石等遗迹遗物现象。表明安第斯山脉高海拔地区在 3000 BC 之前居民流动性减少、社会分化增加。

十一、环境质量与可持续发展^[1-6]

1. Yi, J.W., Du, Y.Y., Liang, F.Y., Tu, W.N., Qi, W., Ge, Y., **2020**. Mapping human's digital footprints on

- the Tibetan Plateau from multi-source geospatial big data. **Science of the Total Environment**, 711:13540. 注解: [方法探索]多源地理大数据的准确、客观地绘制青藏高原动态人类数字足迹的方法。结果表明,青海和西藏的平均人类足迹值较低(分别为 0.12 和 0.04,满分为 1)。人类足迹值为正的面积仅占青藏高原的 5.99%,主要分布在城市和交通网络沿线。人类足迹值与土地利用密切相关,正值主要分布在建成区和农业用地,而其他土地利用类别的人类足迹值往往接近于零。作者指出当前人类活动总体上对青藏高原的影响非常有限。问题:缺乏对与人类活动关联的牲畜等指标的考虑。
2. Li, S.C., Zhang, Y.L., Wang, Z.F., Li, L.H., 2018. Mapping human influence intensity in the Tibetan Plateau for conservation of ecological service functions. **Ecosystem Services**, 30: 276-286. 注解: 报道了 1990-2010 年青藏高原人类活动强度变化及其对生态系统服务的影响。基于优化的人类活动强度模型和精细数据,结果表明青藏高原人类活动强度整体较小,人类活动强度较大的区域主要分布在高原东部、东南部和“一江两河”地区。1990-2010 年,高原的人类活动强度增加了 28.43%--31.45%,主要发生在高原的东北部;高原生物多样性保护区的人类活动强度绝对值大于高原平均水平,水源涵养区人类活动强度增加的幅度(37.42%)明显高于高原的平均增幅。高原人类活动强度平均增幅为全球同期(9%)的 3 倍以上。问题:牲畜数量等数据的空间表达不足。
 3. Chen, B.X., Zhang, X.Z., Tao, J., Wu, J.S., Wang, J.S., Shi, P.L., Zhang, Y.J., Yu, C.Q., 2014. The impact of climate change and anthropogenic activities on alpine grassland over the Qinghai-Tibet Plateau. **Agricultural and Forest Meteorology**, 189: 11-18. 注解: 提出了基于净初级生产力(NPP)的残差趋势分析模型,并运用于量化 1982-2011 年气候变化和人类活动对青藏高原草地变化的影响。模拟结果表明,气候变化和人类活动主要分别主导前 20 年和后 10 年草地实际 NPP 的增加:气候变化引起的草地 NPP 变化的面积百分比从前 20 年的 79.62%下降到后 10 年的 56.59%;同期,人类活动导致的百分比变化从 20.16%增加到 42.98%。文章指出新世纪以来高原气候变化对生态系统的负面影响相对缓和或被人类活动的积极影响抵消。问题:模型的可靠性仍需认证。
 4. Sheng, J.J., Wang, X.P., Gong, P., Joswiak, D.R., Tian, L.D., Yao, T.D., Jones, K.C., 2013. Monsoon-driven transport of organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls to the Tibetan Plateau: Three year atmospheric monitoring study. **Environmental Science & Technology**, 47: 3199-3208. 注释: 基于多年连续高分辨观测,发现高原南部大气持久性有机污染物(POPs)的季节波动与印度季风的强弱同步,即 POPs 浓度每年均升高于季风始发期,鼎盛于季风最盛期,衰减于季风撤离时。模型模拟显示 POPs 的季风传输路径为自印度东海岸经孟加拉湾北上输入高原南部。该研究充分证实,印度季风对 POPs 的输送并非偶然,而是年复一年重复发生。通过上述研究,率先系统地回答了青藏高原 POPs “哪里来、如何来”的科学问题。
 5. Fendorf, S., Michael, H.A., van Geen, A., 2010. Spatial and temporal variations of groundwater arsenic in South and Southeast Asia. **Science**, 328 (5982): 1123-1127. 注释: 该文系统综述了喜马拉雅山脉内 As 的来源(含有硫化物矿物的岩石),发现从恒河-雅鲁藏布江-梅克纳河、湄公河和红河流域的数百个沉积物样本中提取的 As 和 Fe 确实存在正相关关系。在地下普遍存在的缺氧条件下,砷从铁氧化物释放到地下水中。微生物对 Fe(III)氧化物的还原将 As 释放到溶解相,还将 As(V)还原为更不稳定的 As(III),形成高致癌的高砷水。此外,作者还阐释了促使砷向地下水中释放的原因?砷在哪里向地下水释放?地下水流量如何影响砷的分布,以及南亚低砷区有多脆弱?等科学问题。
 6. Xu, B.Q., Cao, J.J., Hansen, J., Yao, T.D., Joswia, D.R., Wang, N.L., Wu, G.J., Wang, M., Zhao, H.B., Yang, W., Liu, X.Q., He, J.Q., 2009. Black soot and the survival of Tibetan glaciers. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, 106 (52): 22114-22118. 注释: 通过对青藏高原大范围冰芯的提取分析,揭示了 1950 年代以来青藏高原雪冰中黑碳含量的时空变

化。结果显示 1950-60 年代欧洲黑碳高排放对青藏高原西部、北部的冰川融化有重要贡献；1980 年代中期以来青藏高原东南部与南部雪冰黑碳含量的持续增长则显示南亚地区的黑碳排在青藏高原冰川中的积累占主导作用。模拟显示南亚大气棕色云将黑碳物质带至青藏高原东南部，加剧冰川融化且随着冰川表面积雪的融化，黑碳在冰川表面的聚集得到进一步加强；升温 and 输入黑碳的共同作用导致藏东南冰川在 7-8 月间剧烈消融。

拓展文献^[1-25]

1. Gu, B.J., Zhang, X.M., Lam, S.K., Yu, Y.L., van Grinsven, H., Zhang, S.H., Wang, X.X., Bodirsky, B.L., Wang, S.T., Duan, J.K., Ren, C.C., Bouwman, L., de Vries, W., Xu, J.M., Sutton, M.A., Chen, D.L., **2023**. Cost-effective mitigation of nitrogen pollution from global croplands. *Nature*. 613:77-84. 注解：通过将田间实验结果与多模型进行耦合，系统量化了全球农田氮素减排的可行路径。针对农田氮素污染治理问题，利用全球 1500 多个田间实验数据、IMAGE、MAgPIE、CHANS 和 GAINS 等模型，分析全球农田氮素减排的潜力及其成本收益，发现这些措施能有效减少总氮损失 30-70%，同时分别提高作物产量 10-30% 和氮素利用效率 10-80%。发现减排成本错配是氮素管理的难点，提倡建立氮素信用系统，从社会收益中拿出一部分去超额补贴农民，推动这些措施的落地实施，最终达到农民收益和社会收益都增加的双赢局面，破解农业面源污染控制的全球难题，保障全球粮食安全、环境和健康收益可以真正实现。
2. Wang, L.W., Wu, W.M., Bolan, N.S., Tsang, D.C.W., Li, Y, Qin, M.H., Hou, D.Y., **2021**. Environmental fate, toxicity and risk management strategies of nanoplastics in the environment: Current status and future perspectives. *Journal of Hazardous Materials*, 2020:123415. 注解：这篇综述总结了纳米塑料的当前研究现状，在陆地系统中的迁移、风化和老化过程、植物积累(淡水或陆地生态系统中)，以及提出了纳米塑料与重金属、有机分子和人类病原体(如细菌和病毒)共同转运迁移的可能机制。此外，还重点讨论了潜在的风险缓解策略。考虑到自然风化的塑料碎片可能具有明显的物理化学特征，未来的研究应探索自然老化的纳米颗粒而非合成聚苯乙烯纳米颗粒的环境行为。
3. 朱日祥, 侯增谦, 郭正堂, 万博, **2021**. 宜居地球的未来, 现在与未来——地球科学发展战略概要. *科学通报*. 第 66 卷, 第 35 期, 4485-4490. 针对地球宜居性的科学内涵和演化规律, 提出了新兴的交叉研究领域, 包括行星间以及地球各圈层的相互作用; 探索地球周期性冷暖变化规律, 理解重大地质事件及其与地球热量波动之间的内在联系, 量化自然驱动及人类活动对地球环境和气候系统变化的影响等。为实现地球宜居的需求, 列举了可能的变革性技术支撑, 如观测技术和数据分析的提升等, 对实现途径进行了展望。
4. Sun, Y.X., Liu, S.L., Shi, F.N., Liu, Y., **2020**. Spatio-temporal variations and coupling of human activity intensity and ecosystem services based on the four-quadrant model on the Qinghai-Tibet Plateau. *Science of The Total Environment*, 743(140721): 140721. 注解：报道了新世纪以来青藏高原人类活动与生态系统服务的耦合关系。基于改进的人类活动强度指标体系, 结果表明青藏高原人类活动强度总体较低, 在 2000-2015 年增加了 4%, 其中, 13% 地区的人类活动强度呈上升趋势; 高人类活动强度的地区主要分布在中东部; 低人类活动强度的地区占据了研究区的大部分, 且趋于下降。将人类活动强度动态与生态系统服务的耦合结果表明, 高原生态质量总体较好, 人类活动强度的变化特别是生态保护工程的实施, 可能是造成生态环境改善的主要原因。问题: 人类活动强度指标权重的可靠性需进一步论证。
5. Shi, L.D., Guo, T., Lv, P.L., Niu, Z.F., Zhou, Y.J., Tang, X.J., Zheng, P., Zhu, L.Z., Zhu, Y.G., Kappler, A. and Zhao, H.P., **2020**. Coupled anaerobic methane oxidation and reductive arsenic mobilization in

- wetland soils. **Nature Geoscience**, 13(12), 799-805. 注释：文章从中国七个省份砷污染湿地中采集土壤样品，并开展微宇宙培养实验。通过添加同位素标记甲烷，研究证实厌氧甲烷氧化过程与砷还原过程相关，且砷还原速率接近于砷/甲烷化学计量数。土壤释放的砷中有 26—49% 归因于厌氧甲烷氧化和砷还原耦合过程，且释放的砷形态是溶解性更大、毒性更强的三价砷 (As(III))。实时定量 PCR 和宏基因测序结果表明，该耦合过程受厌氧甲烷氧化菌独立调控，或与砷还原菌协同作用调控，其微生物调控机理为逆向产甲烷作用和砷还原性呼吸作用。文章在全球范围内搜集了环境样品，结果表明逆向产甲烷基因和砷还原呼吸基因在自然界中广泛共存，这一结果揭示前人忽视了厌氧甲烷氧化和砷还原耦合作用这一全球性过程。该成果对环境砷固定和修复有指导性意义。
6. Wallis, I., Prommer, H., Berg, M., Siade, A.J., Sun, J. and Kipfer, R., 2020. The river-groundwater interface as a hotspot for arsenic release. **Nature Geoscience**, 13(4), 288-295. 注释：论文针对地下水开采是否会导致高砷地下水向低砷地下水迁移这一科学问题，在越南红河开展研究，通过耦合水力条件、环境示踪、水文化学、气象数据建立数值模型模拟，构建了地下水流场和生物地球化学过程集成模型。该模型成功重构了人为因素导致的地下水流场时空变异性 and 生物地球化学动力学，并在几十年时间尺度上揭示了地下水砷迁移速率和物料平衡。河床—含水层界面是生物地球化学反应的热点区域，是砷浓度升高的主要原因。砷持续性释放需要规律性补充活性有机质和活性铁氧化物含量高的河泥。抽水导致的地下水流场异动可能会牵引砷迁移数公里距离，并进入临近含水层。
 7. Brahney, J., Hallerud, M., Heim, E., Hahnenberger, M., Sukumaran, S., 2020. Plastic rain in protected areas of the United States. **Science**, 368(6496):1257-1260. 注解：研究人员通过分别收集大气干湿沉降样品对美国西部国家公园保护区的微塑料沉降进行了分析。结果表明，大部分微塑料颗粒 (>70%) 位于远距离甚至全球传输的粒径范围 (<25 μm)。湿沉降中微塑料尺寸更大，数量更少，且和灰尘沉降和人口指标正相关，表明暴风雨通常经过城市中心和侵蚀土壤上空，和微塑料的冲刷作用有关；而干沉降和更广范围空气模式指标相关，说明干沉降微塑料更趋向于大范围的全球扩散。作者首次对大气沉降量进行了评估，得到每年由大气沉降输入美国西部自然保护区的微塑料超过 1000 吨，这相当于 1.2~3 亿个矿泉水瓶的质量。
 8. Zhang, Y., Kang, S., Allen, S., Allen, D., Gao, T., Sillanpää, M., 2020. Atmospheric microplastics: A review on current status and perspectives. **Earth-Science Reviews**, 203:103118. 注解：该文综述了全球范围内城市、郊区以及偏远地区的大气微塑料研究情况，比较了不同研究中采样和分析方法的异同，并推荐了大气微塑料采样和测定的优选方法。通过总结不同研究大气微塑料的浓度、尺寸、形态、颜色和聚合物类型，得到从城市到偏远地区微塑料浓度横跨 1~3 个数量级，大气中微塑料以纤维和碎片为主。最后得出结论需要对大气微塑料进行深入研究以判断其全球分布和对人类健康的潜在影响。
 9. 康世昌, 丛志远, 王小萍, 张强弓, 吉振明, 张玉兰, 徐柏青, 2019. 大气污染物跨境传输及其对青藏高原环境影响, **科学通报**, 第 64 卷, 第 27 期, 2876-2884. 注解：全面综述了青藏高原大气污染物时空分布、传输过程和机理, 以及污染物对气候和生态系统影响方面的新认识。指出未来研究中, 亟待精确量化跨境污染物的输送量和影响范围, 预测未来情景下污染物排放与环境健康风险的变化趋势。
 10. Li, L.H., Zhang, Y.L., Liu, L.S., Wu, J.S., Li, S.C., Zhang, H.Y., Zhang, B.H., Ding, M.J., Wang, Z.F., Paudel, B., 2018. Current challenges in distinguishing climatic and anthropogenic contributions to alpine grassland variation on the Tibetan Plateau. **Ecology and Evolution**, 8(11): 5949-5963. 注解：评述了气候变化和人类活动对青藏高原高寒草地影响方面的研究争议。控制性实验和传统统计分析表明, 气候变暖促使高寒草甸生物量增加而高寒草原生物量减少, 而高寒草原和草甸均受益于降水或土壤水分的增加; 在人类活动强度较高的区域, 过度放牧是高寒草地退化的主要因

素。然而，在整个高原及其子区域，当前争议可概括为四类：高寒草地变化主要是由于气候变化主导、非气候变化主导、人为和气候变化的结合以及人为和气候变化的交替主导。争议背后的成因包括数据产品的来源和质量差异、模型结构和参数的差异，以及忽视人类活动强度的时空异质性。

11. 邵全琴, 樊江文, 刘纪远, 黄麟, 黄巍, 2016. 三江源生态保护和建设一期工程生态成效评估. **地理学报**, 71(01):3-20. 注解: 基于一期工程的生态保护与建设工程预期目标, 构建了生态成效评估指标体系和技术体系, 评估了三江源生态保护和建设一期工程的生态成效。评估结果显示: 一期工程期间, 三江源区宏观生态状况趋好但尚未达到 1970s 比较好的生态状况, 草地持续退化趋势得到初步遏制, 水体与湿地生态系统整体有所恢复, 区域水源涵养量达到了增加 13.20 亿 m³ 目标。重点工程区内生态恢复程度好于非工程区, 工程的实施对促进植被恢复具有明显而积极的作用, 但草地退化局面未获得根本性扭转。一期工程局部性和初步性特点突显出三江源区生态保护任务的长期性和艰巨性。
12. Venter, O., Sanderson, E.W., Magrath, A., Allan, J.R., Beher, J., Jones, K.R., Possingham, H.P., Laurance, W.F., Wood, P., Fekete, B.M., Levy, M.A., Watson, J.E.M., 2016. Sixteen years of change in the global terrestrial human footprint and implications for biodiversity conservation. **Nat. Commun.** 7. 注解: 作者将建设用地、人口密度、电力基础设施(夜间灯光数据)、耕地、牧场、公路、铁路、水路等 8 个人类活动因子对自然生态系统的扰动程度量化、赋分、综合, 绘制了 1993 和 2009 年两期 1 km² 分辨率累加性的全球人类足迹图, 并重点分析了生物多样性热点区域人类足迹值的变化, 以及人类足迹与国家经济发展水平之间的关系。研究发现: 1993-2009 年, 全球人类足迹值仅增加了 9%, 而同期全球人口增加 23%, 世界经济提升 153%; 全球生物多样性热点区域广泛分布有人类活动, 强度较大, 且呈快速增加趋势, 需要引起重视; 中低收入的国家人类足迹值呈上升趋势, 而全球最富有的 24 个国家, 人类足迹值呈下降趋势。
13. Li, C.L., Bosch, C., Kang, S.C., Andersson, A., Chen, P.F., Zhang, Q.G., Cong Z.Y., Chen B., Qin D.H., Gustafsson, Ö. 2016. Sources of black carbon to the Himalayan-Tibetan Plateau glaciers. **Nature communications**, 7: 1-7. 注解: 使用双碳同位素指纹分析技术, 确定了喜马拉雅山脉和青藏高原地区的大气和冰雪表面的黑碳的化学特性。该技术得以区分黑碳源于生物燃料还是化石燃料, 以及它们的来源区域。结果表明, 导致喜马拉雅山脉和西藏冰川加速融化原因的黑碳, 主要来自印度次大陆北部和中国的化石燃料燃烧。从青藏高原北部提取的样本的特性表明, 黑碳主要来自中国的化石燃料(约占样本的 66%)。与此相对, 从喜马拉雅山脉提取的黑碳样本由生物燃料和化石燃料均等构成, 它们来自印度次大陆北部的印度河-恒河平原。发现这些黑碳的来源有助于进一步采取有效的缓解污染措施。
14. Lelieveld, J., Evans, J. S., Fnais, M., Giannadaki, D., Pozzer, A., 2015. The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. **Nature**, 525: 367-371. 注解: 结合了全球大气化学模型和人口与健康数据来估算不同类型室外空气污染(主要是细颗粒物)对于过早死亡人口的相对责任。研究结果显示, 盛行于印度和中国的住宅能源排放, 例如供暖和做饭, 对于过早死亡在全球范围内的影响最大。在美国的大多数地方和一些其他国家, 来自交通和发电的空气污染排放的作用较大, 而在美国东部, 欧洲, 俄罗斯和东亚, 农业排放是细颗粒物相对最大的来源。
15. Teng, Y.G., Wu, J., Lu, S.J., Wang, Y.Y., Jiao, X.D., Song, L.T., 2014. Soil and soil environmental quality monitoring in China: a review. **Environment International**, 69: 177-199. 注解: 本文总结了我国土壤中元素背景浓度以及土壤环境标准。采用浓度和污染指数比较了城市土壤、农业土壤以及采

- 矿和冶炼区土壤的污染水平。该综述指出,除了土壤调查和土壤监测对于研究数据和了解土壤中污染物的影响至关重要。然而,目前的土壤质量监测系统不足以准确明晰中国各地土壤的质量状况。为了在中国进行准确的土壤监测,需要在各种尺度(国家、省和地方地方)上建立常规监测系统,同时考虑监测指标和质量保证,这是目前中国环境保护部门的一个重要优先事项。
16. Burton, E.D., Johnston, S.G., Kocar, B.D., 2014, Arsenic Mobility during Flooding of Contaminated Soil: The Effect of Microbial Sulfate Reduction. **Environmental Science & Technology**, 48(23), 13660-13667. 注释: 文章在缺氧条件下开展一系列水—土微宇宙实验,探讨低、中、高硫酸盐浓度条件下生物和非生物过程对砷循环的影响。研究发现,在微生物硫酸盐还原条件不明显的情况下,淹水条件显著增加二价铁(Fe(II))和三价砷(As(III))浓度,且与微生物三价铁(Fe(III))还原和五价砷(As(V))还原过程一致。在硫酸盐还原条件下,As(V)还原为As(III),并形成硫化亚铁(FeS)沉淀,不仅降低了孔隙水中Fe(II)浓度,也吸附了大量的砷。在黑烟硫铁矿的作用下,砷通过形成类似于As₂S₃复合体的形式被固定。论文证实在长期淹水状态下,洪泛区土壤可形成黑烟硫铁矿,并降低砷的迁移能力。
 17. 孙鸿烈, 郑度, 姚檀栋, 张懿锂. 2012. 青藏高原国家生态安全屏障保护与建设. **地理学报**, 2012,67(01):3-12. 注解: 评述了青藏高原生态系统稳定性降低、资源环境压力增大等问题, 主要涉及冰川退缩显著、土地退化形势严峻、水土流失加剧、生物多样性威胁加大与珍稀生物资源减少、自然灾害增多等。这些问题严重影响了青藏高原区域生态安全屏障功能的发挥。针对当前高原生态安全状况, 提出了加强青藏高原国家生态安全屏障保护与建设的若干对策建议。
 18. Wania, F., Westgate, J.N., 2008. On the mechanism of mountain cold-trapping of organic chemicals. **Environmental Science & Technology**, 42(24): 9092-9098. 注解: 本文从机制上探讨了高海拔降水对 POPs 大气清除的作用, 发现降雪对大气 POPs 具有更高的吸收能力和清除效率, 可以加速 POPs 从大气向地表的富集。鉴于此, 作者提出低温驱动的降水清除是 POPs 高山冷捕集效应的主要机制。同时, 由于中纬度高海拔地区的降水更为丰沛, 高山冷捕集对于大气 POPs 的清除能力强于低温引发的 POPs 在极地地区的沉降。因此, 高山冷捕集作用对 POPs 的全球蒸馏效应进行了有益的补充。
 19. Law, K.S., Stohl, A., 2007. Arctic air pollution: origins and impacts. **Science**, 315(5818):1537-1540. 注释: 该文是较早系统综述北极地区大气环境和跨境污染传输的综述论文, 针对黑碳和臭氧等大气污染物在北极地区的分布和变化给出了综述性认识和讨论, 对偏远地区和第三极地区大气污染物跨境传输都具有重要的科学先导和启示意义。
 20. Daly, G.L., Wania, F. 2005. Organic contaminants in mountains. **Environmental Science & Technology**, 39(2): 385-398. 注解: 本文总结了山区各介质中 POPs 观测的结果, 发现同全球蒸馏效应类似, 高海拔地区也存在挥发性强的 POPs 占比增高的现象。同时, 部分山区存在 POPs 浓度随海拔增高的现象。降水可能是 POPs 的高山冷捕集 (mountain cold trapping) 有别于极地冷捕集的主要原因。
 21. 张懿锂, 阎建忠, 刘林山, 摆万奇, 李双成, 郑度, 2002. 青藏公路对区域土地利用和景观格局的影响——以格尔木至唐古拉山段为例. **地理学报**, 57(3):253-266. 注解: 修订了土地利用类型动态度计算公式, 修订后的公式 ($K=(U_a+U_b-2U_c)U_a^{-1}T^{-1} \times 100\%$) 可更准确地反映单一土地利用类型变化特点; 重点阐述了青藏公路沿线格尔木、曲麻莱、治多 3 个县(市)以及沿线缓冲带的土地利用变化和景观格局变化特征。结果表明研究区建设用地增加迅速, 林地、水域、未利用土地增加, 草地退化严重; 景观破碎化程度加剧, 分维数、多样性指数和景观破碎度均增加; 与其它交通干线对沿线的“轴向”影响不同, 该段青藏公路以“点”型的辐射效应为标志, 且仅仅影响建设用地周围的区域, 格尔木市的影响范围约为 3km, 五道梁的影响范围约为 1km。

22. Wania, F., Mackay, D., **1996**. Tracking the distribution of persistent organic pollutants. **Environmental Science & Technology**, 30(9): 390A-396A. 注解: 持久性有机污染物 (POPs) 具有半挥发性, 能够在进行传播。本文梳理了 POPs 全球传输过程中的分布分馏模式和主要环境过程, 率先系统阐释了 POPs 全球蒸馏效应假说和“蚱蚂跳”效应的理论模式, 较好地解释了 POPs 的全球分布特征。目前这一理论模式已成为解释 POPs 环境传输与归趋特征的主流框架。该文目前被引 1108 次, 是 POPs 领域被引次数最多的文章之一。
23. Wedepohl, K.H., **1995**. The composition of the continental-crust. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, 59(7): 1217-1232. 注释: 该文系统给出了上地壳常量和微量元素本底含量, 阐明了其在地壳中的矿物来源和过程, 是进行地表环境元素含量比对和污染富集分析的基准数据集和经典论文, 是从事地球化学和环境科学等领域研究人员的资料。
24. Dewailly, E., Nantel, A., Weber, J.-P., Meyer, F. **1989**. High levels of PCBs in breast milk of Inuit women from Arctic Quebec. **Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology**, 43: 641-646. 注解: 本文是较早报道北极因纽特人体内高浓度 POPs 的文章。文章发现因纽特人母乳中的多氯联苯 (PCBs) 含量达到 111 微克/升, 是全球报道的最高浓度。其原因可归咎于 PCBs 在北极生态系统中的富集和沿食物链放大。这一结果有力地证实了 POPs 可以在极地等偏远地区富集并威胁当地生态系统和人体健康。
25. Hu, M.H., Stallard, R.F., Edmond, J.M., **1982**. Major ion chemistry of some large Chinese rivers. **Nature**, 298, 550-553. 注释: 该文针对国内大江大河 (包括长江、黄河、雅鲁藏布江、钱塘江、汉水等) 进行了水化学特别是可溶性离子的分析, 是国内最早系统阐释中国江河水化学且发表在 *Nature* 的研究论文。

十二、青藏高原自然地域特征^[1-7]

(一) 青藏高原范围和第三极概念

1. 张锺铨, 李炳元, 刘林山, 郑度, **2021**. 再论青藏高原范围. **地理研究**, 40(6): 1543-1553. 注解: 研讨了青藏高原范围界定原则, 并依据原则应用现代数据和技术定量界定了青藏高原矢量范围。具体体现在: 细化了“高原面的海拔高度及其分布、山体完整性等地貌特征作为确定青藏高原范围的基本原则”, 完成了高原范围的矢量边界; 进一步明确了青藏高原自然范围为: 北起西昆仑山-祁连山山脉北麓, 南抵喜马拉雅山等山脉南麓, 西自兴都库什山脉和帕米尔高原西缘, 东抵横断山等山脉东缘, 308.34 万 km², 平均海拔约 4320m; 行政区域上, 青藏高原分布于中国、印度、巴基斯坦等 9 个国家; 中国境内约 258.13 万 km² (占全高原的 83.7%), 平均海拔约 4400m; 西藏和青海两省区约占高原总面积的 60.6%。
2. 姚檀栋, 陈发虎, 崔鹏, 马耀明, 徐柏青, 朱立平, 张凡, 王伟财, 艾丽坤, 杨晓新, **2017**. 从青藏高原到第三极和泛第三极. **中国科学院院刊**, 32(9): 924-931. 注解: 系统阐述了青藏高原、第三极、泛第三极研究的重要性及其在区域生态文明建设中的价值。主要包括: 系统论述了从青藏高原到第三极再到泛第三级的演进过程; 明确了以青藏高原为核心的第三极以及受其影响的东亚、南亚、中亚、西亚、中东欧等泛第三极地区, 面积约 2000 多万 km², 涵盖 20 多个国家的 30 多亿人口, 是“一带一路”的核心地带和全球人口分布最密集区; 实施“泛第三极环境变化与绿色丝绸之路建设”专项, 将从区域甚至全球尺度深入研究这一地区的资源环境科学问题, 科学地提出区域可持续发展协同应对战略, 为“守护好世界上最后一方净土”和“一带一路”建设服务。
3. 李吉均, **1983**. 青藏高原的地貌轮廓及形成机制. **山地研究**, 1(1): 7-14. 注释: 该文刻画了青藏高原的二级地貌: 高山深谷区, 高原山脉盆地区, 平行岭谷山原区; 论证了高原内部处于地面发

育的婴年期阶段,横断山脉为壮年期和幼年期并存,西部达到壮年期早期或幼年期晚期阶段;提出了板块南北向的挤压,东西向的拉伸使得青藏高原地壳总体抬升,并形成特异地貌轮廓。

(二) 青藏高原自然地带性

5. 郑度,赵东升,王秀红,申元村,2015. 青藏高寒区. 见:中国自然地理系列专著. 郑度主编. **中国自然地理总论**. 第5篇. 北京:科学出版社. 695-767. 注释:该文系统总结了青藏高原的自然地理特征,高原垂直地带与水平地带的自然地域分异与区域划分;详细阐明了青藏高原亚寒带和温带自然地区的自然地理综合特征,并系统阐述了10个自然区的地貌、气候、水文、植被、土壤等自然特征,以及生态环境的主要问题和建设对策。
6. Zheng, D., 1996. The system of physico-geographical regions of the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau. **Science in China Series D-Earth Sciences**, 39(4): 410-417. 注解:青藏高原地域的空间分化主要由地形配置和大气环流决定。地域体系是根据生物气候原则或三维区带性原则来划分。主要结论:根据温度条件、水分状况和地形差异,以日均温 $>10^{\circ}\text{C}$ 日数为主要指标,以最暖月均温为辅助指标,划分出高原亚寒带和高原温带两个温度带;以年干燥度为主要指标,年降水量为辅助指标,划分湿润、半湿润、半干旱和干旱四种地域类型;构建了2个温度带、10个自然带和28个自然区的自然地域系统。
7. 郑度,李炳元,1990. 青藏高原自然环境的演化与分异. **地理研究**, 2: 1-10. 注释:阐明了上新世以来青藏地区由低海拔亚热带环境向高寒环境的演化以及因全球气候冷暖波动所引起的变化;通过对山地垂直自然带结构类型的划分和比较研究,揭示了与山体效应密切相关的分布模式;在自然地域分异规律的背景下,探讨了水汽通道、干旱河谷和寒旱核心等高原山地独特的地生态现象。

延伸阅读 (专著)

1. 李炳元,2013. 青藏高原大区. 见:中国自然地理系列专著,尤联元,杨景春主编,中国地貌,第13章第7节. 北京:科学出版社,660-685. 注解:该文系统论述了青藏高原地势特征与地貌分区。重点阐述了青藏高原地势特征与地貌类型,阐明了高原夷平面、冰川地貌、水系演化、湖泊地貌,阐述了高原地貌发育过程,基于高原地貌区域分异特征进行了地貌分区,对各地貌分区的概况、地貌组合、地质构造、地貌景观、地貌类型等进行了系统介绍。
2. 郑度,姚檀栋等,2004. **青藏高原隆升与环境效应**. 北京:科学出版社,1-564. 注释:[概述了1998-2003年青藏高原多学科综合研究成果]该书是国家首批973项目——“青藏高原形成演化及其环境、资源效应”(1998-2003)的研究成果,系统地阐述了该项目的突出研究进展和创新成果。
3. Zheng, D., Zhang, Q., Wu, S., 2000. Mountain Geo-ecology and Sustainable Development of the Tibetan Plateau. **GeoJournal Library**, Vol.57. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1-393. 《青藏高原山地地生态学与可持续发展》(英文版)。注释:该书基于1970年以来我国学者对青藏高原综合科学考察研究的成果编写的,系统地对外阐述我国学者在青藏高原地理学与区域可持续发展研究进展和认识。
4. 孙鸿烈,郑度,1998. **青藏高原形成演化与发展**. 广州:广东科技出版社,1-357. 注释:[概述了1993-1998年青藏高原多学科综合研究成果]该书以国家攀登计划及中国科学院重大基础研究项目“青藏高原形成演化、环境变迁与生态系统研究”的成果为基础,结合几十年来对高原的研究工作,系统地阐述了青藏高原地学和生物学领域的重要成果和最新进展。该书为《**青藏高原研究丛书**》的第一部。
5. 《青藏高原研究丛书》编辑委员会,1998. **青藏高原研究丛书 (一套5部)**. 广州:广东科技出版社. 注释:[1993-1998年青藏高原多学科综合研究成果]该书以国家攀登计划及中国科学院重大基础研究项目“青藏高原形成演化、环境变迁与生态系统研究”的系统研究成果,包括:青

藏高原形成演化与发展、青藏高原岩石圈结构演化和动力学、青藏高原晚新生代隆升与环境变化、青藏高原近代气候变化及对环境的影响、青藏高原生态系统及优化模式等五部。)

6. 孙鸿烈, 郑度, 1996. **青藏高原的形成演化**. 上海: 上海科学技术出版社, 1-383. 注释: 该书是对 1950 年 (尤其是 1973 年) 以来我国学者对青藏高原综合科学考察研究的总结, 系统地阐述了青藏高原地学、生物学等若干综合研究领域的重要成果和最新进展。
7. 中国科学院青藏高原综合科学考察队, 1980-1992. **青藏高原科学考察丛书** (一套 43 部). 北京: 科学出版社. 注释: 该丛书是 1973 年以来中国科学院青藏高原综合科学考察队的科学家对青藏高原综合科学考察研究成果的系统呈现, 包括西藏地层、西藏古生物、西藏第四纪地质、西藏自然地理、西藏气候、西藏冰川、西藏河流与湖泊、西藏盐湖、西藏土壤、西藏植被、西藏植物志、西藏哺乳类等 43 部。