



青藏高原持续变湿是否会加速多年冻土的退化进程?

王玉阳¹, 丁金枝^{2*}, 朴世龙^{1,2}

1. 北京大学城市与环境学院, 中法地球系统模拟联合研究中心, 北京 100871;

2. 中国科学院青藏高原研究所, 青藏高原地球系统与资源环境国家重点实验室, 北京 100101

* 通讯作者, E-mail: jzding@itpcas.ac.cn

收稿日期: 2023-11-27; 收修改稿日期: 2024-03-21; 接受日期: 2024-03-27; 网络版发表日期: 2024-04-08

第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2022QZKK0101)、中国科学院“西部之光”项目(xbzg-zdsys-202202)和西藏自治区科技重大专项项目(XZ202201ZD0005G04)资助

在全球变暖的背景下, 青藏高原多年冻土呈现持续的退化趋势, 具体表现为地温升高、活动层增厚、多年冻土层变薄等方面(Ran等, 2018; Wang等, 2020). 冻土退化不仅会深刻改变高原生态系统碳循环过程进而反馈于区域气候系统, 还会影响景观水文连通性, 改变局部地貌形态, 威胁高原基础设施安全(程国栋等, 2019; Ran等, 2022; Smith等, 2022). 变湿, 是青藏高原除了快速变暖以外的另一显著的气候变化特征. 近几十年来高原降水总体呈上升趋势, 特别是夏季降雨总量和极端降雨事件增势明显, 由此导致的土壤可获得水分的增加会在很大程度上改变多年冻土局部的热传导和热存储特性, 进而可能加速多年冻土的退化进程(Yao等, 2022). 相比气候变暖之于多年冻土退化所获得的广泛关注, 降水增加对冻土热动力学影响的研究极为薄弱. 在已发表的关于高原多年冻土的研究中, 仅有约10篇文章初步评估了降水增加对多年冻土热状态影响的潜在机制, 相关的区域模型模拟研究几近空白(Wu和Zhang, 2008; Zhu等, 2017; Li等, 2019; Luo等, 2020; Zhang G F等, 2021; Zhang M L等, 2021; Zhou等, 2021; Fang等, 2023; Hao等, 2023; Yang等, 2023). 有研究表明, 如果忽略降水驱动的土壤热状态的变化, 多

年冻土区地温和活动层变化的速率将被严重低估(Hamm等, 2023). 青藏高原冻土区暖湿过程共存并且存在强烈的水热交互, 该区域持续变湿特别是日趋频繁的强降雨事件的发生如何影响多年冻土的退化进程, 这一问题的回答对于准确认识未来多年冻土与气候变化之间的反馈关系至关重要, 但目前还不得而知.

降水对多年冻土退化进程的影响主要是通过调控冻土区土壤剖面的热量传递而间接发挥作用(Magnússon等, 2022). 一方面, 降水增加会促进多年冻土热量传输, 增加导入地下的总体能量, 进而正向影响多年冻土退化. 相对温暖的雨水通过土壤孔隙向较冷的深层土层渗透, 而土壤含水量上升会提高土壤导热率, 促使来自近地表土壤热量被更多地传递至深层多年冻土. 另一方面, 土壤热容量随着土壤含水量的增加而同步增加, 导致土壤温度变化以及冻土冻融相变发生的热需求增大, 进而在一定程度上减缓冻土的融化. 此外, 温湿度增加伴随发生的蒸散发增加也会在一定程度上消耗热能, 减小热量向深层传递. 理论上讲, 降水对冻土热状态的正向调控(增温效应)和负向调控(降温效应)同时存在, 二者共同决定了降水对冻土热状态影响的净效应. 尤其值得注意的是, 冻土区持续变暖伴

中文引用格式: 王玉阳, 丁金枝, 朴世龙. 2024. 青藏高原持续变湿是否会加速多年冻土的退化进程? 中国科学: 地球科学, 54(5): 1740–1744, doi: [10.1360/SSTe-2023-0297](https://doi.org/10.1360/SSTe-2023-0297)

英文引用格式: Wang Y, Ding J, Piao S. 2024. Does the continuous wetting of the Tibetan Plateau contribute to the accelerated degradation of permafrost? Science China Earth Sciences, 67(5): 1714–1718, <https://doi.org/10.1007/s11430-023-1308-7>

随夏季极端降水增加, 二者的叠加作用会加剧冰体融化, 导致地表塌陷沉降, 形成了密布的低洼地区和广泛的水流连通通道(Yao等, 2019; McCrystall等, 2021). 降水以及冰体融水会在低洼区域淤积并沿着水流通道向土壤深处移动, 进而可能诱发暖季极端降水与冻土退化之间的正反馈效应, 并且这种冻土崩塌退化过程是不可逆的, 并且可能存在遗留效应, 持续影响多年(Douglas等, 2020; Magnússon等, 2022).

降水增加对冻土退化的影响涉及复杂的地表多圈层水热耦合过程, 其程度可能还取决于区域地形地貌、冻土特性、植被特征以及这些因素之间的相互作用. 冻胀丘、多边形泥沼、冻融冰裂隙、热融喀斯特等典型的冻土地貌会显著影响降水和土壤水分的再分配(王一博等, 2014). 富冰冻土与少冰冻土对降水热量输送的差异响应受到冰含量的控制, 含冰量越高冻土相变的潜热效应越大. 植被和土壤有机层作为多年冻土重要的隔热层或缓冲层, 其区域差异也会显著影响水热的传导过程. 在有机土层较浅和土壤质地较粗的地区, 热量的缓冲作用较弱, 降雨对冻土融化的影响可能更大. 多年冻土区降水的增加还会通过植物根系和微生物活动等加剧冻土的融化. 多年冻土解冻导致冻土中的土壤养分得到释放, 并一定程度上补充活动层的水分, 因而刺激冻土区植物根系的生长和微生物分解, 由此产生的能量可能进一步加剧深层冻土的融化(Jansson和Taş, 2014; Hollesen等, 2015; Wang等, 2017).

学术界已经逐渐意识到降水在多年冻土退化中的调控作用, 并有少数陆面过程模式在冻土退化模拟时做了积极的尝试(Mekonnen等, 2021; Zhang等, 2021; Hamm等, 2023). 例如, Mekonnen等(2021)利用模型分析发现降水和气温的变化对阿拉斯加多年冻土活动层动态具有同等重要的影响, 降水通过增加冻土内部的热量传递以及土壤导热率, 从而加速该区域多年冻土的退化. 最近一项全球综合分析整合了现有为数不多的观测实验结果, 发现近一半(12/22)观测站点显示强降水事件会增加多年冻土温度 and 活动层厚度, 表现为增温效应, 但也有不少观测发现(7/22)强降水事件起着降温的效应, 作者认为造成这种区域差异的主要原因在于气候背景的不同(Hamm等, 2023).

青藏高原地域辽阔, 其多年冻土分布地跨湿润、半湿润区和半干旱、干旱区, 年降水量由超过500mm

递减到不足50mm, 与此紧密相关的植被覆盖度沿东南向西北逐渐减小, 由高寒草甸过渡到高寒草原、高寒荒漠, 这种地带性变异均可能导致多年冻土对降水变化的响应存在区域差异(Yao等, 2019). 我们由此推测高原持续变湿对该区域多年冻土热动态的影响可能存在区域性差异, 具体表现为降水增加可能会在一定程度上缓解高原干旱半干旱地区多年冻土的退化, 但在湿润半湿润地区其效应则可能相反(图1). 具体而言, 干旱半干旱地区的太阳辐射强、饱和水汽压差大, 因而其潜在蒸散发较高. 一次强降雨事件发生后, 伴随发生的地表蒸散发的显著增加会消耗土壤热能; 与此同时, 土壤含水量短时快速上升也会增加土壤热容量进而迅速消耗来自地表和周围的热量, 并削弱热量向深层的输送. 虽然降水增加的同时土壤导热率增加会提高土壤的垂直热传导, 但是考虑到干旱半干旱地区较深的活动层和相对较低的降水总量, 其增温效应应该相对较弱. 并且这种增温效应可能仅仅局限在活动层内部, 对永冻层影响微弱. 已有少数研究表明, 半干旱区多年冻土的地表热通量会随降水的增加而减小, 从而有利于多年冻土的保存(Zhang G F等, 2021; Zhou等, 2021). 相比之下, 湿润半湿润区主要分布非连续性冻土、零星冻土和岛状冻土, 处于青藏高原冻土的边缘地带, 具有地温较高、稳定性较差等特点. 该区域暖季降水的显著增加特别是夏季的强降雨事件会增加土壤热传导率和垂直热通量, 从而促进多年冻土退化. 考虑到湿润区较高的土壤含水量和较低的大气干燥度, 因而降水的降温效应(通过热容量和蒸散发)相对较弱. 此外, 湿润半湿润区短时的、大量的强降雨常常伴随着较强的土壤侵蚀, 降水对多年冻土裂隙的冲刷击打会加速多年冻土的崩塌退化, 并且这种崩塌的过程往往是不可逆的. 已有少数研究表明, 强降雨会导致地表向下输送的热量增多从而加速半湿润区多年冻土的退化(Zhu等, 2017). 考虑到青藏高原的多年冻土主要分布于腹地的干旱半干旱地区, 所以高原降水增多总体可能有利于该区域多年冻土的存续, 且不存在明显的“减缓-加剧”气候区分界, 但目前尚无青藏高原上降水变化和冻土退化关系的直接观测证据.

青藏高原地区极为复杂的地形和多样的景观类型很可能通过改变各种陆面过程进而影响多年冻土热状态, 增加多年冻土变化与降水增多之间关系的复杂性和不确定性. 高原多年冻土区大小湖泊星罗棋布, 湖

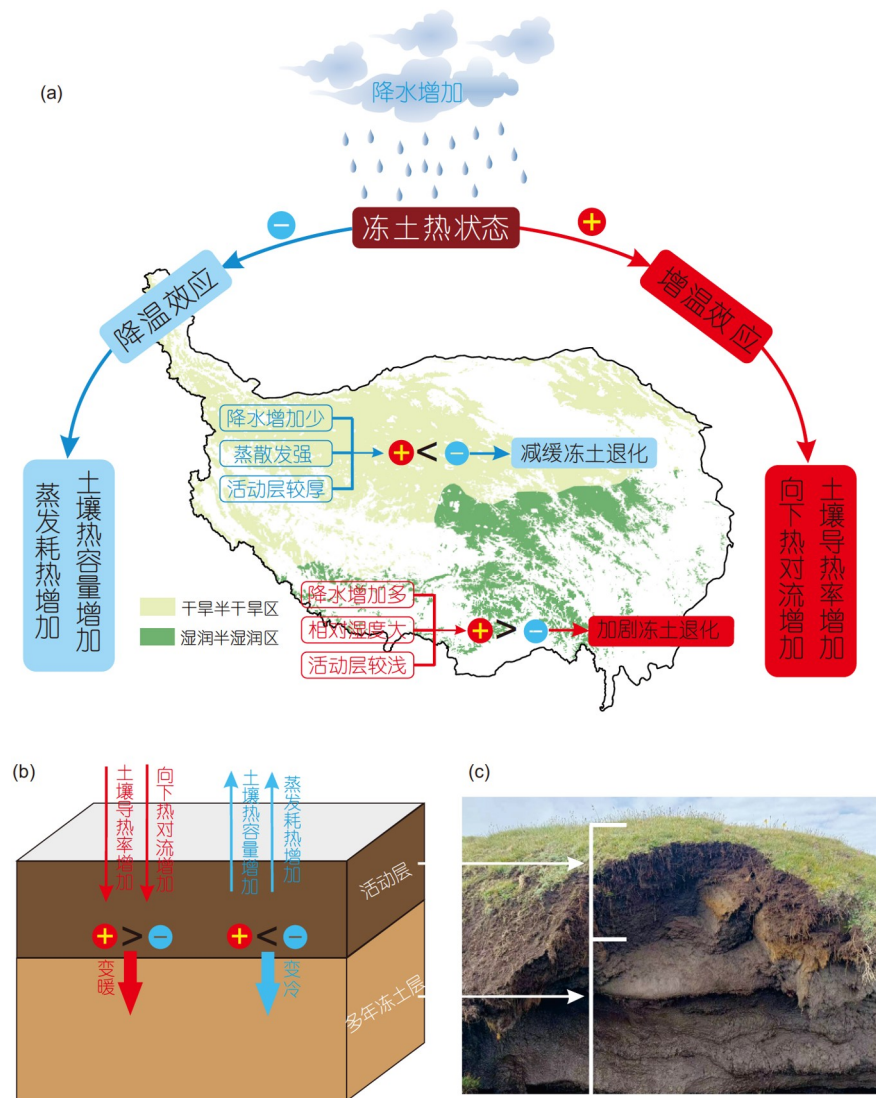


图 1 青藏高原多年冻土对降水增加的可能响应机理

(a) 降水增加一方面通过增加土壤热容量和蒸发耗热进而对多年冻土可能产生降温效应, 另外也可能通过增加土壤导热率和向下热对流进而对多年冻土产生增温效应, 青藏高原多年冻土分布底图来自于Zou等(2017); (b) 冻土剖面中简化的热传导过程; (c) 青藏高原典型多年冻土剖面照片

泊面积和水深的显著变化可能部分源于多年冻土的融化, 同时也会反过来加速湖底和湖周多年冻土的退化 (Zhang等, 2020; Webb等, 2022). 高原湿润半湿润区多年冻土多与湿地相伴而生并多呈斑块状分布于山前低地, 这一区域的多年冻土长期处于土壤水饱和状态, 这一缓冲层的存在一定程度上减小了近地表热量对多年冻土层的影响. 此外, 多年冻土区植被覆盖的增加和长期累积的有机层作为隔热层, 也会影响热量在土层中的纵向传递. 总之, 降水作为青藏高原显著变化的气

候因子, 其对高原冻土热状态的影响必然耦合该区域复杂的地表要素和陆面过程, 从而在多年冻土退化进程中呈现多样化的效应.

虽然学术界普遍认同降水增加特别是强降雨事件在冻土退化过程中具有显著的调控作用, 但是现有研究结论不一, 既存在强降水事件促进冻土增温的案例, 也有降水增加减缓冻土融化的报道. 未来青藏高原暖湿化趋势大概率将进一步增强, 对未来多年冻土变化的预估如果仅考虑气温的影响, 可能会大大简化或者

低估多年冻土退化对暖湿气候的响应。但当前我们对降水增加如何影响多年冻土的热响应过程的理论和机理认知还不完善, 相关的观测实验和模型研究极为匮乏, 因而当前关于未来多年冻土变化的结论还存在极大不确定性。考虑到冻土退化的不可逆性以及对于区域气候变化的重要性, 未来应深化多年冻土对降水增加响应的机理研究, 加强长期定位观测, 建立不同多年冻土区和不同气候区的观测网。并特别关注不同气候区的对比实验研究, 在此基础上发展适应于青藏高原的多年冻土区的地球系统模式, 提升这一区域多年冻土与暖湿气候之间反馈认知的可靠性。

参考文献

- 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: 2783–2795
- 王一博, 高泽永, 文晶, 刘国华, 耿迪, 李小兵. 2014. 青藏高原多年冻土区热融湖塘对土壤物理特性及入渗过程的影响. *中国科学: 地球科学*, 44: 2285–2293
- Douglas T A, Turetsky M R, Koven C D. 2020. Increased rainfall stimulates permafrost thaw across a variety of Interior Alaskan boreal ecosystems. *NPJ Clim Atmos Sci*, 3: 28
- Fang X W, Li Z, Chen C, Fraedrich K, Wang A Q, Chen Y H, Xu Y Q, Lyu S H. 2023. Response of freezing/thawing indexes to the wetting trend under warming climate conditions over the Qinghai-Tibetan Plateau during 1961–2010: A numerical simulation. *Adv Atmos Sci*, 40: 211–222
- Hamm A, Magnússon R Í, Khattak A J, Frampton A. 2023. Continentality determines warming or cooling impact of heavy rainfall events on permafrost. *Nat Commun*, 14: 3578
- Hao J M, Jia P Q, Wu T H, Li W P, Chen J, Yang X H, Wu X D, Hu G J, Cui K, Zhang M L. 2023. Numerical analysis of the impacts of rainfall on permafrost-related slope stability on the Qinghai-Tibet Plateau. *J Hydrol-Reg Stud*, 47: 101439
- Hollesen J, Matthiesen H, Møller A B, Elberling B. 2015. Permafrost thawing in organic Arctic soils accelerated by ground heat production. *Nat Clim Change*, 5: 574–578
- Jansson J K, Taş N. 2014. The microbial ecology of permafrost. *Nat Rev Microbiol*, 12: 414–425
- Li D S, Wen Z, Cheng Q G, Xing A G, Zhang M L, Li A Y. 2019. Thermal dynamics of the permafrost active layer under increased precipitation at the Qinghai-Tibet Plateau. *J Mt Sci*, 16: 309–322
- Luo D L, Jin H J, Bense V F, Jin X Y, Li X Y. 2020. Hydrothermal processes of near-surface warm permafrost in response to strong precipitation events in the Headwater Area of the Yellow River, Tibetan Plateau. *Geoderma*, 376: 114531
- Mekonnen Z A, Riley W J, Grant R F, Romanovsky V E. 2021. Changes in precipitation and air temperature contribute comparably to permafrost degradation in a warmer climate. *Environ Res Lett*, 16: 024008
- Magnússon R Í, Hamm A, Karsanaev S V, Limpens J, Kleijn D, Frampton A, Maximov T C, Heijmans M M P D. 2022. Extremely wet summer events enhance permafrost thaw for multiple years in Siberian tundra. *Nat Commun*, 13: 1556
- McCrystall M R, Stroeve J, Serreze M, Forbes B C, Screen J A. 2021. New climate models reveal faster and larger increases in Arctic precipitation than previously projected. *Nat Commun*, 12: 6765
- Ran Y H, Li X, Cheng G D. 2018. Climate warming over the past half century has led to thermal degradation of permafrost on the Qinghai-Tibet Plateau. *Cryosphere*, 12: 595–608
- Ran Y H, Cheng G D, Dong Y H, Hjort J, Lovecraft A L, Kang S C, Tan M B, Li X. 2022. Permafrost degradation increases risk and large future costs of infrastructure on the Third Pole. *Commun Earth Environ*, 3: 238
- Smith S L, O'Neill H B, Isaksen K, Noetzli J, Romanovsky V E. 2022. The changing thermal state of permafrost. *Nat Rev Earth Environ*, 3: 10–23
- Wang P, Limpens J, Mommer L, van Ruijven J, Nauta A L, Berendse F, Schaepman-Strub G, Blok D, Maximov T C, Heijmans M M P D. 2017. Above- and below-ground responses of four tundra plant functional types to deep soil heating and surface soil fertilization. *J Ecol*, 105: 947–957
- Wang T H, Yang D W, Yang Y T, Piao S L, Li X, Cheng G D, Fu B J. 2020. Permafrost thawing puts the frozen carbon at risk over the Tibetan Plateau. *Sci Adv*, 6: eaaz3513
- Webb E E, Liljedahl A K, Cordeiro J A, Loranty M M, Witharana C, Lichstein J W. 2022. Permafrost thaw drives surface water decline across lake-rich regions of the Arctic. *Nat Clim Chang*, 12: 841–846
- Wu Q B, Zhang T J. 2008. Recent permafrost warming on the Qinghai-Tibetan Plateau. *J Geophys Res*, 113: 2007JD009539
- Yao T D, Bolch T, Chen D L, Gao J, Immerzeel W, Piao S, Su F G, Thompson L, Wada Y, Wang L, Wang T, Wu G J, Xu B Q, Yang W, Zhang G Q, Zhao P. 2022. The imbalance of the Asian water tower. *Nat Rev Earth Environ*, 3: 618–632
- 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 L, Sugimoto S, Ueno K, Wang L, Wang W C, Zhang F, Sheng Y W, Guo W D, 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. *Bull Am Meteorol Soc*, 100: 423–444
- Yang J J, Wang T H, Yang D W. 2023. Divergent responses of permafrost degradation to precipitation increases at different seasons on the eastern Qinghai-Tibet Plateau based on modeling approach. *Environ Res Lett*, 18: 094038
- Zhang G F, Nan Z T, Zhao L, Liang Y J, Cheng G D. 2021. Qinghai-Tibet Plateau wetting reduces permafrost thermal responses to climate warming. *Earth Planet Sci Lett*, 562: 116858
- 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-Sci Rev*, 208: 103269
- Zhang M L, Wen Z, Li D S, Chou Y L, Zhou Z X, Zhou F X, Lei B B. 2021. Impact process and mechanism of summertime rainfall on thermal-moisture regime of active layer in permafrost regions of central Qinghai-Tibet Plateau. *Sci Total Environ*, 796: 148970
- Zhou Z X, Zhou F X, Zhang M L, Lei B B, Ma Z. 2021. Effect of increasing rainfall on the thermal—Moisture dynamics of permafrost active layer in the central Qinghai-Tibet Plateau. *J Mt Sci*, 18: 2929–2945
- Zhu X F, Wu T H, Li R, Xie C W, Hu G J, Qin Y H, Wang W H, Hao J M, Yang S H, Ni J, Yang C. 2017. Impacts of summer extreme precipitation events on the hydrothermal dynamics of the active layer in the tanggula permafrost region on the Qinghai-Tibetan Plateau. *J Geophys Res-Atmos*, 122: 11,549–11,567
- Zou D F, Zhao L, Sheng Y, Chen J, Hu G J, Wu T H, Wang W H, Wu J C, Xie C W, Wu X D, Pang Q Q, Wang W, Du E J, Li W P, Liu G Y, Li J, Qin Y H, Qiao Y P, Wang Z W, Shi J Z, Cheng G D. 2017. A new map of permafrost distribution on the Tibetan Plateau. *Cryosphere*, 11: 2527–2542

(责任编辑: 施建成)