



青藏高原湖泊的持续扩张与其潜在影响

许凤林^{1,2}, 张国庆^{1*}

1. 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重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049

* 联系人, E-mail: guoqing.zhang@itpcas.ac.cn

Continuous expansion of lakes on the Qinghai-Xizang Plateau and potential impacts

Fenglin Xu^{1,2} & Guoqing Zhang^{1*}

¹ State Key Laboratory of Tibetan Plateau Earth System, Environment and Resources (TPESER), Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

* Corresponding author, E-mail: guoqing.zhang@itpcas.ac.cn

doi: [10.1360/TB-2024-0600](https://doi.org/10.1360/TB-2024-0600)

青藏高原被誉为“亚洲水塔”, 是全球气候变化的敏感区和指示区。这里分布着地球海拔最高数量最多的高原湖泊群, 面积约占全国的50%, 对区域水循环、生态环境和气候调节具有重要意义^[1,2]。1990s中期以来, 由于降水和冰川融水增加, 青藏高原湖泊面积急剧扩张, 水位显著上升, 其中大于1平方公里的湖泊数量增加至1400个(增加约400个), 总面积增加至5万平方公里(扩张约1万平方公里)。湖泊的显著扩张对青藏高原生态环境的可持续发展带来了潜在威胁, 亟需开展湖泊未来变化的模拟与评估研究。

目前, 青藏高原湖泊未来变化预估研究受到以下因素的限制: 存在针对特定区域的方法, 但由于空间异质性, 这些方法对具体湖泊的适用性仍不确定; 由于缺乏入湖径流观测数据(仅色林错和纳木错等少数湖泊有入湖径流观测), 陆面和水文模型的大尺度应用受到限制; 未考虑地形对湖泊未来变化的约束以及湖泊之间的水文连通性; 机器学习方法缺乏可解释性。总的来说, 现有研究主要侧重于青藏高原内流区或特定湖泊, 未能全面反应青藏高原湖泊的未来变化及其相应的影响^[3-6]。

1970s~2020年, 青藏高原内流湖的水量变化占全部湖泊变化的 95%以上(161.9±14 Gt), 而外流湖则保持相对稳定(7.8±5.8 Gt)^[7]。因此, 预估内流湖的未来变化是关键。考虑了影响湖泊变化的主要因素, 包括降水、冰川融水、陆面蒸散发和湖面蒸发, 针对内流湖构建了一个基于数据驱动的通用模拟框架, 以模拟其未来的面积、水位和水量变化^[8]。该框架包括两个主要步骤: (1) 对每个湖泊定义了稳定期和变化期, 并基于

历史湖泊水量变化确定模型参数, 进而预估湖泊水量在未来3种共享社会经济情景(SSP1-2.6、SSP2-4.5和SSP5-8.5)下对气候变化的响应; (2) 综合淹没模型和数字高程模型, 考虑未来变化过程中的湖泊连通性, 估算实际面积、水位和水量变化。

青藏高原湖泊未来呈持续扩张趋势, 即使在低排放情景下(SSP1-2.6), 内流湖面积相对于2020年预计增加52%, 水位上升约10.21±4.14 m^[8]。在中等(SSP2-4.5)和高排放(SSP5-8.5)情景下, 内流湖面积将增加约54%和67%, 水位分别上升约10.64±4.33 m和13.99±5.18 m。相比于2000~2020年的湖泊面积变化(增加约11400 km²)和水位变化(上升约5.25 m), 未来面积和水位增速减慢。从湖泊水量变化的角度, 未来80年低、中、高排放情景下水量增量分别约为652.97±211、665.32±220和908.44±282 Gt, 是2000~2020年水量变化的~3.9、~3.9和~5.4倍。此外, 未来湖泊变化具有明显的空间异质性, 北部湖泊扩张最为显著, 在高排放情景下面积扩张将翻倍; 中部的湖泊面积扩张将超过50%。

未来湖泊扩张将导致湖水溢出和湖泊合并, 引发流域重组(图1)。在未来SSPs情景下, 约有70~79个(23%~31%)流域重组为28~31个, 主要发生在青藏高原内流区的北部、东部和南部。同时约有20个湖泊合并为10个^[8]。随着湖泊的扩张, 湖泊流域重组的发生将会更加普遍, 其中因级联型溢出导致的重组最为广泛。

气候变暖会导致大气中水汽含量增加、水汽输送增强, 从而使得青藏高原降水增加^[9-11]。过去冻土地下冰消融对湖泊扩张的贡献为约12%^[12,13]。由于较小的贡献比例和对冻土



图 1 (网络版彩色)青藏高原湖泊持续扩张的潜在影响和未来研究与展望

Figure 1 (Color online) Potential impacts of the continuous expansion of lakes on the Qinghai-Xizang Plateau and future research and prospects

消融物理过程有限的理解,目前在青藏高原湖泊未来预估方面,未考虑冻土地下冰消融对湖泊变化的影响。虽然湖面扩大会增加蒸发量,但湖泊的面积仅占内流区总面积的约7%。所以降水增加导致的陆地径流是主要因素。然而,在湖泊分布密集的内流区,陆地蒸散发受降水主导^[14]。总的来说,湖泊扩张的主因是未来情景下预估的降水增加。

湖泊扩张将对周边的基础设施和生态系统带来潜在威胁(图1)。到21世纪末,一些道路和居民点可能会被湖水淹没,主要位于内流区的南部,这将对区域交通和居民生活带来巨大挑战。值得注意的是,色林错作为西藏最大的湖泊,在2023年9月,由于持续扩张发生溃堤,冲毁附近S208公路部分路段。此外,湖泊的扩张会对周边的生态系统(包括草地、湿地和农田等)产生深远影响。

青藏高原湖泊的持续扩张可能还会带来其他气候与环境问题。例如湖泊扩大导致水面与大气气体交换增强,可能会导致更多的温室气体排放至大气中,形成正反馈效应。随着湖面扩大,下风向引发的极端降雨或降雪事件也可能加

剧^[15]。湖泊的盐度会因未来水量的增加而降低,进一步改变湖泊生态系统的物种丰富度和营养结构^[16]。此外,流域重组会以漫溢的形式发生,漫溢会引起冲沟的发育、侵蚀决口使其不断扩大,最终导致溃堤,洪水进而对下游造成严重的社会和生态影响。例如,2011年9月的卓乃湖和2023年色林错溃堤事件。因湖泊流域重组而新形成的河道也会扰乱生态迁徙^[17]。青藏高原湖泊未来持续扩张预计将引发更多的溃堤事件,急需加强溃堤洪水预警建设和周围道路等基础设施的防护措施。全面了解青藏高原未来湖泊变化对于水资源的有效管理、灾害减缓和生态系统保护等都具有重要的意义。

为有效应对这些挑战,提高青藏高原气候预测能力是精确预估湖泊未来变化和预防灾害的基础(图1)。通过增加气象观测站点,并结合卫星遥感覆盖范围广的优势,可以获取更加全面和详细的气象数据,为预测提供数据支持。同时,开发高分辨率区域气候模式,有助于更精确地模拟和预测青藏高原的气候变化趋势。此外,结合大数据和人工智能技术,可以提高气候模式的预测效率和精度。在湖泊变化模拟方面,需

加强对湖泊水文要素的观测,例如入湖径流、辐射和风速等。湖泊水量平衡不同流域存在差异,需进一步厘清,尤其是地下水变化对湖泊变化的影响极为缺乏。提升陆面模型与水文模型在湖泊流域内的模拟精度和大尺度应用,提高湖泊变化过程的认识,以更准确预估未来变化。

另外,需综合水文、地质和气候多方面因素对现有湖泊进行详细的灾害评估。例如,加强湖泊变化幅度的监测,结合湖盆地形,确定湖泊水位极限阈值。分析湖泊扩张与溃决之间的关系和模拟湖泊溃决概率,有助于评估湖泊可能发生的

灾害风险。此外,调查湖泊周边基础设施和社区等的暴露度,分析潜在的影响程度,为防灾减灾提供科学依据。内陆湖泊灾害预警能力较为薄弱,可建立高分辨率监测网络和预警系统,对高风险湖泊潜在溃堤处进行实时监测,以提高社区的快速应对能力。完善跨部门合作与应急联防机制,加强气象、水利、环保等部门的协同合作,形成有效的联动应对体系,可提升灾害预警和防控能力。通过综合多方措施,既要防范湖泊扩张带来的灾害风险,也要保护好更多可利用水资源这一优势,为青藏高原的可持续发展提供有力保障。

致谢 第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0201)和国家自然科学基金(BSCTPES, 41988101-03)等项目的资助。

推荐阅读文献

- 1 Zhang G, Yao T, Xie H, et al. Response of Tibetan Plateau lakes to climate change: Trends, patterns, and mechanisms. *Earth-Sci Rev*, 2020, 208: 103269
- 2 Zhang Y, Qin B, Zhu G, et al. Importance and main ecological and environmental problems of lakes in China (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2022, 67: 3503–3519 [张运林, 秦伯强, 朱广伟, 等. 论湖泊重要性及我国湖泊面临的主要生态环境问题. 科学通报, 2022, 67: 3503–3519]
- 3 Yang K, Lu H, Yue S, et al. Quantifying recent precipitation change and predicting lake expansion in the Inner Tibetan Plateau. *Clim Change*, 2018, 147: 149–163
- 4 Liu Y, Chen H. Future warming accelerates lake variations in the Tibetan Plateau. *Intl J Climatol*, 2022, 42: 8687–8700
- 5 Jia B, Wang L, Xie Z. Increasing lake water storage on the Inner Tibetan Plateau under climate change. *Sci Bull*, 2023, 68: 489–493
- 6 Adnan M, Kang S, Saifullah M, et al. Prediction of changes in water balance of Nam Co Lake under projected climate change scenarios. *Hydrol Sci J*, 2021, 66: 1712–1727
- 7 Zhang G, Bolch T, Chen W, et al. Comprehensive estimation of lake volume changes on the Tibetan Plateau during 1976–2019 and basin-wide glacier contribution. *Sci Total Environ*, 2021, 772: 145463
- 8 Xu F, Zhang G, Woolway R I, et al. Widespread societal and ecological impacts from projected Tibetan Plateau lake expansion. *Nat Geosci*, 2024, 17: 516–523
- 9 Zhou T J, Zhang W X, Chen X L, et al. The near-term, mid-term and long-term projections of temperature and precipitation changes over the Tibetan Plateau and the sources of uncertainties (in Chinese). *J Meteorol Sci*, 2020, 40: 697–710 [周天军, 张文霞, 陈晓龙, 等. 青藏高原气温和降水近期、中期与长期变化的预估及其不确定性来源. 气象科学, 2020, 40: 697–710]
- 10 Chen D L, Xu B Q, Yao T D, et al. Assessment of past, present and future environmental changes on the Tibetan Plateau (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2015, 60: 3025–3035 [陈德亮, 徐柏青, 姚檀栋, 等. 青藏高原环境变化科学评估: 过去、现在与未来. 科学通报, 2015, 60: 3025–3035]
- 11 Huang J, Zhou X, Wu G, et al. Global climate impacts of land-surface and atmospheric processes over the Tibetan Plateau. *Rev Geophys*, 2023, 61: e2022RG000771
- 12 Zhang G, Yao T, Shum C K, et al. Lake volume and groundwater storage variations in Tibetan Plateau's endorheic basin. *Geophys Res Lett*, 2017, 44: 5550–5560
- 13 Wang L, Zhao L, Zhou H, et al. Contribution of ground ice melting to the expansion of Selin Co (lake) on the Tibetan Plateau. *Cryosphere*, 2022, 16: 2745–2767
- 14 Ma N, Zhang Y. Increasing Tibetan Plateau terrestrial evapotranspiration primarily driven by precipitation. *Agric For Meteorol*, 2022, 317: 108887
- 15 Yao X, Yang K, Zhou X, et al. Surface friction contrast between water body and land enhances precipitation downwind of a large lake in Xizang. *Clim Dyn*, 2021, 56: 2113–2126
- 16 Lin Q, Xu L, Hou J, et al. Responses of trophic structure and zooplankton community to salinity and temperature in Tibetan lakes: Implication for the effect of climate warming. *Water Res*, 2017, 124: 618–629
- 17 Sills J, Pei J, Wang L, et al. Recovered Tibetan antelope at risk again. *Science*, 2019, 366: 194