

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.826>



# 青藏高原冰川冻土微生物如何记录和影响气候变化?

刘勇勤, 计慕侃, 刘军志, 刘鹏飞

兰州大学泛第三极环境中心, 甘肃兰州 730000

青藏高原是亚洲水塔, 拥有 9 万多条冰川和中低纬面积最广的多年冻土区, 是亚洲多条大江大河的源头。冰川和冻土由于其低温特性, 封存了古老微生物及微生物演化的信息, 其中微生物的数量、物种组成与群落结构可反映温度、土地利用方式等历史气候变化及生态系统变迁过程, 是研究全球化良好的生物代用指标(姚檀栋等, 2020)。

冰川生态系统包括冰川表面、内部、底部及其前缘区域, 包含冰、雪、冰尘、沉积物、冰川融水、冰碛物和土壤等多种生境, 孕育了独特的生物群落。青藏高原的冰川中 88% 以上的物种为其他生境未发现过的新种, 蕴藏了超过 1 600 万条不同功能基因, 具有抗生素合成能力的基因近 1 600 条, 是重要的微生物资源库(Liu *et al.*, 2022)。冻土中也蕴藏了数目众多且种类丰富的微生物, 细菌数量可达  $10^5 \sim 10^8$  个细胞  $g^{-1}$ 。目前, 青藏高原多年冻土区土壤细菌种类超过  $10^5$  种, 覆盖 40 个门(Wu *et al.*, 2021, 2022)。北极冻土中也存在丰富的微生物类群, 例如, 在瑞典北部斯托达林沼泽多年冻土中存在跨越 30 个门的微生物类群(Woodcroft *et al.*, 2018), 冻土具有极高的微生物多样性。

青藏高原近 50 年增温速率约为全球同期升温速率的 2 倍(Mu *et al.*, 2020), 作为全球气候变化的“敏感区”(姚檀栋等, 2017), 青藏高原冰川和冻土的快速消融影响区域及广域生态系统。1970—2010 年间, 青藏高原冰川面积缩小 18% (王宁练等, 2019); 冻土活动层底部温度变化率平均为  $0.45\text{ }^\circ\text{C}/10\text{ a}$ , 活动层厚度变化率达到了  $21.7\text{ cm}/10\text{ a}$ (赵林

等, 2019)。青藏高原冰川和冻土碳储量可达 2.0 Tg ( $1\text{ Tg} = 10^{12}\text{ g}$ , 未发表数据)和 50.43 Pg ( $1\text{ Pg} = 10^{15}\text{ g}$ )(Wang *et al.*, 2021), 温度升高将增加微生物活性, 加速有机质降解, 促进  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  等温室气体产生, 释放进入大气圈, 正反馈于气候变暖。

冰川冻土所蕴藏的微生物及大量有机碳氮养分在消融时向下游释放, 影响下游广域生境微生物群落及碳氮循环过程。在此过程中冰川冻土中保存的微生物和病毒可向下游释放, 对下游生态系统造成影响。青藏高原冰川中发现了 27 267 条潜在致病基因, 与已知基因相比相似度较低, 其致病风险不明(Liu *et al.*, 2022)。青藏高原冻土中的微生物致病风险还不清晰, 但西伯利亚多年冻土的融化使得一具感染了炭疽芽孢的鹿尸解冻而引发炭疽热疫情(Wu *et al.*, 2022)。此外, 相关研究自西伯利亚冻土中分离出的 3 万年前的巨病毒, 仍具有感染目标宿主的活性(Legendre *et al.*, 2014)。

综上所述, 微生物作为冰川冻土中主要生命形态, 记录了过去历史上存在的微生物并反映了历史气候变化过程。而在气候变化背景下, 微生物作为生物地球化学循环的“引擎”, 在调控冰川冻土壤碳循环中发挥关键作用(Jansson and Hofmockel, 2020), 反馈气候变化并影响区域生态系统安全。

## 1 核心思想

以地球系统科学的原理和方法论为指导, 交叉地理学、生态学和微生物学研究方法开展多圈层研

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察项目(No. 2019QZKK0503)。

作者简介: 刘勇勤(1969—), 女, 博士, 教授, 从事青藏高原极端环境微生物与气候变化研究。E-mail: yql@lzu.edu.cn

引用格式: 刘勇勤, 计慕侃, 刘军志, 刘鹏飞, 2022. 青藏高原冰川冻土微生物如何记录和影响气候变化? 地球科学, 47(10): 3825—3826.

Citation: Liu Yongqin, Ji Mukan, Liu Junzhi, Liu Pengfei, 2022. How Microbes in Glacier and Permafrost Record and Influence Climate Change? *Earth Science*, 47(10): 3825—3826.

究,明确冰川冻土微生物对气候变化反馈的区域与广域效应.其核心在于明确冰川冻土微生物分布格局与功能及其环境适应机制,揭示其生物地球化学循环过程,建立微生物温室气体通量模型,模拟气候变化背景下冰川冻土微生物对气候变化的反馈,预估冰川冻土消融向下游排放碳氮养分及微生物的生态影响及风险,支撑国家的青藏高原生态文明建设和碳中和目标需求.

## 2 科学价值

冰川冻土生态系统对气候变化极其敏感,其消融加速不仅影响区域生物地球化学循环,还对下游广域生态系统造成影响.阐明冰川冻土微生物分布格局与生物地球化学循环过程,揭示其对低温寡营养环境的适应机制,可为探索星外生命存在的可能及生命起源提供理论依据,助力揭示地球宜居性的科学内涵和规律;明确冰川冻土微生物碳循环过程,建立温室气体通量模型并预估其对气候变化反馈,可为理解青藏高原碳稳定性的机制提供新视角,为未来气候情景的模型预测奠定生物学基础,为国家碳中和的实现提供科学支撑;系统调查青藏高原冰川冻土中病原微生物和病毒,揭示气候变暖与其向下游输送量的关联及其对下游生态系统的影响,是服务青藏高原生态系统保护和构建生态安全屏障国家战略的重要内容.

## 3 发展前景

全球气候变化关系人类的生存和发展,从青藏高原冰川冻土微生物这一独特视角,我们可以解读过去气候变化留下的痕迹,理解我们现在所居住星球的现状,并通过在地球系统模式中定量表达微生物的生态系统功能,预测未来气候变化条件下青藏高原冰川冻土微生物将如何变化以及对气候变化的反馈.随着培养组、病毒组学、基因组、转录组、蛋白组、代谢组、测序(长序列与单细胞测序)技术、及计算机模拟技术的发展,青藏高原冰川冻土微生物研究必将向系统化、精细化及精准化发展,从微生物资源、生物地球化学循环及模型模拟等方面深度刻画极端生境微生物局域与广域生态及气候效应,助力宜居地球研究,支撑国家的生态安全与碳中和目标的实现.

### 参考文献

Jansson, J.K., Hofmockel, K.S., 2020. Soil Microbiomes and

- Climate Change. *Nature Reviews Microbiology*, 18(1): 35–46. <https://doi.org/10.1038/s41579-019-0265-7>
- Legendre, M., Bartoli, J., Shmakova, L., et al., 2014. Thirty-Thousand-Year-Old Distant Relative of Giant Icosahedral DNA Viruses with a Pandoravirus Morphology. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(11): 4274–4279. <https://doi.org/10.1073/pnas.1320670111>
- Liu, Y.Q., Ji, M.K., Yu, T., et al., 2022. A Genome and Gene Catalog of Glacier Microbiomes. *Nature Biotechnology*, 40(9): 1341–1348. <https://doi.org/10.1038/s41587-022-01367-2>
- Mu, C.C., Abbott, B.W., Norris, A.J., et al., 2020. The Status and Stability of Permafrost Carbon on the Tibetan Plateau. *Earth-Science Reviews*, 211: 103433. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103433>
- Wang, T. H., Yang, D. W., Yang, Y. T., et al., 2020. Permafrost Thawing Puts the Frozen Carbon at Risk over the Tibetan Plateau. *Science Advances*, 6(19): eaaz3513. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz3513>
- Woodcroft, B. J., Singleton, C. M., Boyd, J. A., et al., 2018. Genome-Centric View of Carbon Processing in Thawing Permafrost. *Nature*, 560(7716): 49–54. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0338-1>
- Wu, M. H., Chen, S. Y., Chen, J. W., et al., 2021. Reduced Microbial Stability in the Active Layer is Associated with Carbon Loss under Alpine Permafrost Degradation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 118(25): e2025321118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2025321118>
- Wu, M. H., Xue, K., Wei, P. J., et al., 2022. Soil Microbial Distribution and Assembly are Related to Vegetation Biomass in the Alpine Permafrost Regions of the Qinghai-Tibet Plateau. *The Science of the Total Environment*, 834: 155259. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155259>
- Wu, R.N., Trubl, G., Taş, N., et al., 2022. Permafrost as a Potential Pathogen Reservoir. *One Earth*, 5(4): 351–360. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2022.03.010>
- 王宁练, 姚檀栋, 徐柏青, 等, 2019. 全球变暖背景下青藏高原及周边地区冰川变化的时空格局与趋势及影响. *中国科学院院刊*, 34(11): 1220–1232.
- 姚檀栋, 陈发虎, 崔鹏, 等, 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.
- 姚檀栋, 秦大河, 王宁练, 等, 2020. 冰芯气候环境记录研究: 从科学到政策. *中国科学院院刊*, 35(4): 466–474.
- 赵林, 胡国杰, 邹德富, 等, 2019. 青藏高原多年冻土变化对水文过程的影响. *中国科学院院刊*, 34(11): 1233–1246.