

---

# 硫化物氧化产酸强烈调节青藏高原岩石风化碳效应

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/34032.html>

**本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！**

硫化物氧化产酸强烈调节青藏高原岩石风化碳效应。大陆硅酸盐岩风化是全球一级碳汇过程，在地质时间尺度上调节大气二氧化碳含量，对地球气候演化起关键作用。新生代以来，大气二氧化碳水平整体下降，全球气候逐渐变冷，其驱动机制是碳循环与气候变化领域的世界性难题。Raymo等人提出著名的高原隆升-驱动气候变化假说，认为青藏高原隆升一方面改变了大气-海洋环流格局进而影响气候变化；另一方面通过物理侵蚀作用的增强，促使地表硅酸盐风化和二氧化碳消耗速率增大，最终导致大气二氧化碳含量降低和气候变冷（Raymo et al., 1988; Raymo and Ruddiman, 1992）。这一假说成功打通了新生代青藏高原隆升和全球变冷两大地质环境事件。然而，后续研究工作对高原隆升和大陆风化以及大气二氧化碳水平响应之间的关系提出了质疑（Quade et al., 1997; Berner and Caldeira, 1997; Caves Rugenstein et al., 2019）。以青藏高原隆升为代表的造山运动对大陆风化碳源汇效应的影响成为碳循环和气候变化领域的前沿热点。随着研究的深入，学者们发现，大陆风化除了通过硅酸盐矿物风化消耗大气二氧化碳外，还通过以黄铁矿为代表的硫化物氧化产生的硫酸溶蚀碳酸盐矿物，向大气中释放二氧化碳，后者可能是在地质时间尺度上与硅酸盐风化耗碳相抗衡的重要二氧化碳源（Torres et al., 2014）。尤其是在地表侵蚀作用加剧时，硫化物氧化产酸与碳酸盐矿物风化的放碳作用被大大增强，可能在一定程度上导致大陆风化作用的碳源汇效应发生重大转变（Torres et al., 2017; Bufe et al., 2021, 2024）。在造山带区域，高物理侵蚀速率会同时促进二氧化碳的消耗（硅酸盐风化耗碳）和释放（硫酸溶解碳酸盐放碳）过程，使得岩石风化净二氧化碳消耗通量的准确估算更为困难。

在活跃的构造运动和最广泛的低纬冰川分布共同控制下，青藏高原及其周边区域成为世界上风化最活跃和硫化物氧化产酸最强烈的热点区域之一。目前，高原隆升对大陆硅酸盐岩和碳酸盐岩风化作用的影响，以及青藏高原风化碳效应受到硫化物氧化产酸的干扰程度尚未量化，主控因素尚未明确，制约了我们对造山运动与全球碳循环，乃至气候变化之间关系的认识和理解。针对这一问题，中国科学院地质与地球物理研究所徐志方研究员团队，在青藏高原不同气候背景的单一岩性小流域和大型江河流域设计了系统的河水样品采集和分析工作，应用河流元素和同位素（碳同位素、硫酸根硫氧同位素、锶同位素等）地球化学手段，开展了河水溶质、无机碳、硫酸根等水化学物质的定量溯源，取得了硅酸盐岩和碳酸盐岩在不同酸性侵蚀剂作用路径下的风化物质贡献量，以及不同背景流域岩石风化速率和净碳源汇通量的估算工作。研究发现，硫化物氧化是高原大河流域硫酸根的重要来源，占比范围在25%~92%。高原原生态大河怒江流域，河水90%以上的硫酸根来自硫化物氧化（Liu et al.

2023a），即便在蒸发盐广布的高原北部流域，其平均贡献也达到了~38%（Xu et al., 2024），表明硫化物氧化产酸广泛参与了高原岩石风化过程。

前人研究多从侵蚀速率对硫化物暴露产酸角度阐述造山作用对硫酸参与风化的影响，研究团队在高原东缘四十余个花岗岩和变质沉积岩小流域的计算结果显示，变质沉积岩流域硫酸参与风化导

致的二氧化碳释放速率，约为花岗岩流域的3倍（图1a），它们在长时间尺度上主要表现为碳源，而大多数花岗岩流域表现为碳汇，阐明了岩性对硫化物氧化产酸和碳效应的作用（Liu et al., 2023b）。在这些高原东部小流域，超过80%硅酸盐岩风化消耗的二氧化碳，被硫酸风化碳酸盐释放的二氧化碳所抵消（图1b）；即使在气候干冷的高原北部，硫酸作用也使得多数流域在长时间尺度上表现为碳源。为高原隆升在导致风化耗碳增强的同时，也提高了硫化物产酸与放碳量，提供了直接证据（Liu et al. 2023a, b; Xu et al., 2024）。青藏高原因其复杂的岩性与活跃的水循环共同导致硫化物氧化产酸强烈参与其岩石风化和碳循环过程（图2）。

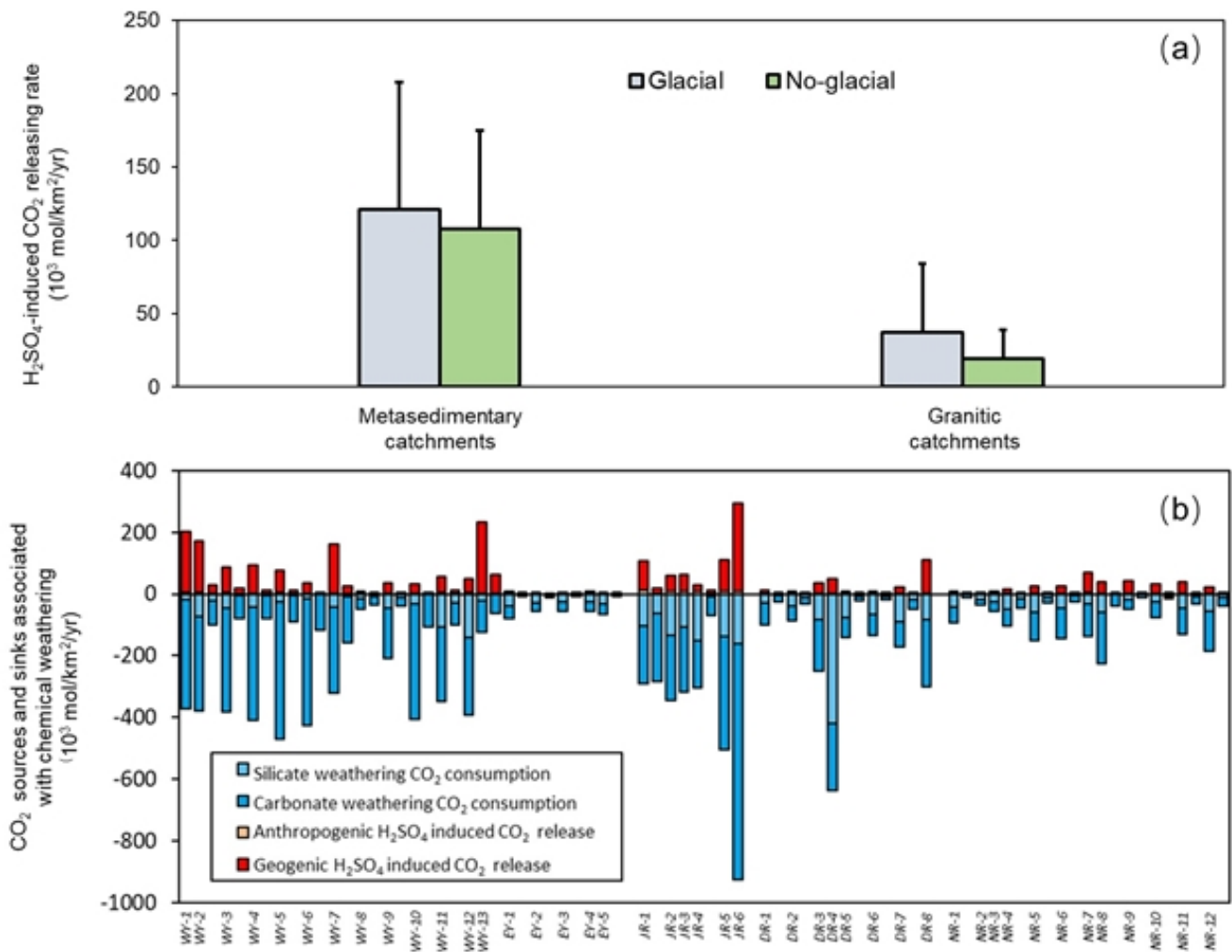


图1 不同岩性背景小流域硫化物氧化与参与风化导致的放碳速率 (a) 与碳源汇效应 (b)

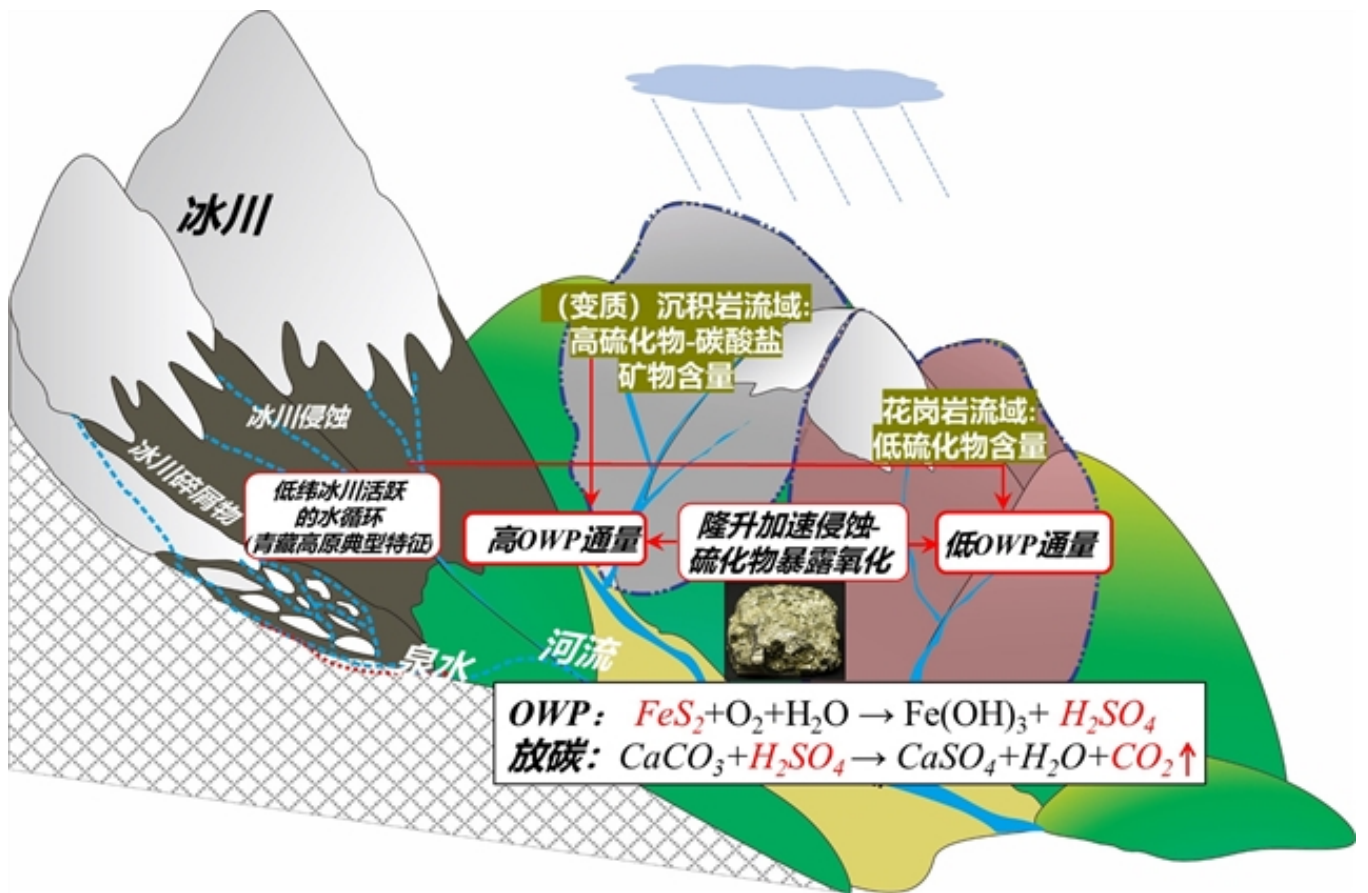


图2 岩性和活跃水循环共同控制下的硫化物氧化产酸强烈参与青藏高原风化和碳循环

在以上认识的基础上，考虑到青藏高原岩性和侵蚀作用高度的空间异质性，以及强烈的地形和气候变化梯度，研究团队进一步对整个高原区河流流域的风化反应溶质来源以及碳酸和硫酸作用下碳源汇通量进行了精细估算，并进行了系统对比（图3）。发现，归一化后的青藏高原硅酸盐岩风化通量与全球相比并无明显升高。发源于高原的大河流域，其高原段与下游平原段相比，硅酸盐岩风化速率仅为下游的21%~55%。高原隆升对于硅酸盐风化的作用主要在于提供大量新鲜硅酸盐矿物（factory of fresh silicate materials），在高原区域，硅酸盐矿物在高物理剥蚀和较短的水岩作用时间场景下，主要经历了初始风化阶段，硅酸盐矿物风化的主要场所可能是在下游平原区。另外，在高原区域，超过80%由硫化物氧化产生的硫酸被碳酸盐矿物风化所消耗，这抵消了约58%的硅酸盐岩风化所消耗大气二氧化碳通量。以上研究工作显示，造山作用对大陆风化及其碳源汇效应的影响和模型研究，不仅要考虑岩性、气候、剥蚀、水文条件等要素，还需关注不同酸性侵蚀剂（如碳酸、硫酸）对硅酸盐-碳酸盐矿物风化碳源汇效应的不同作用；另外，造山作用对风化碳效应的影响，需要从高原区物源贡献和季风气候影响两方面做进一步深入探讨；最后，需要综合流域现代风化，海陆联合钻探记录的指标和通量对比，在不同时间尺度上系统评估造山运动对全球碳循环不同环节和气候变化的影响。对青藏高原区风化作用二氧化碳收支的精细定量工作，为造山带硫化物氧化对地表风化和大气二氧化碳浓度的影响、全球碳循环模型发展，以及地球构造运动-气候互馈作用的演化机制提供了量化证据（Liu et al. 2025）。

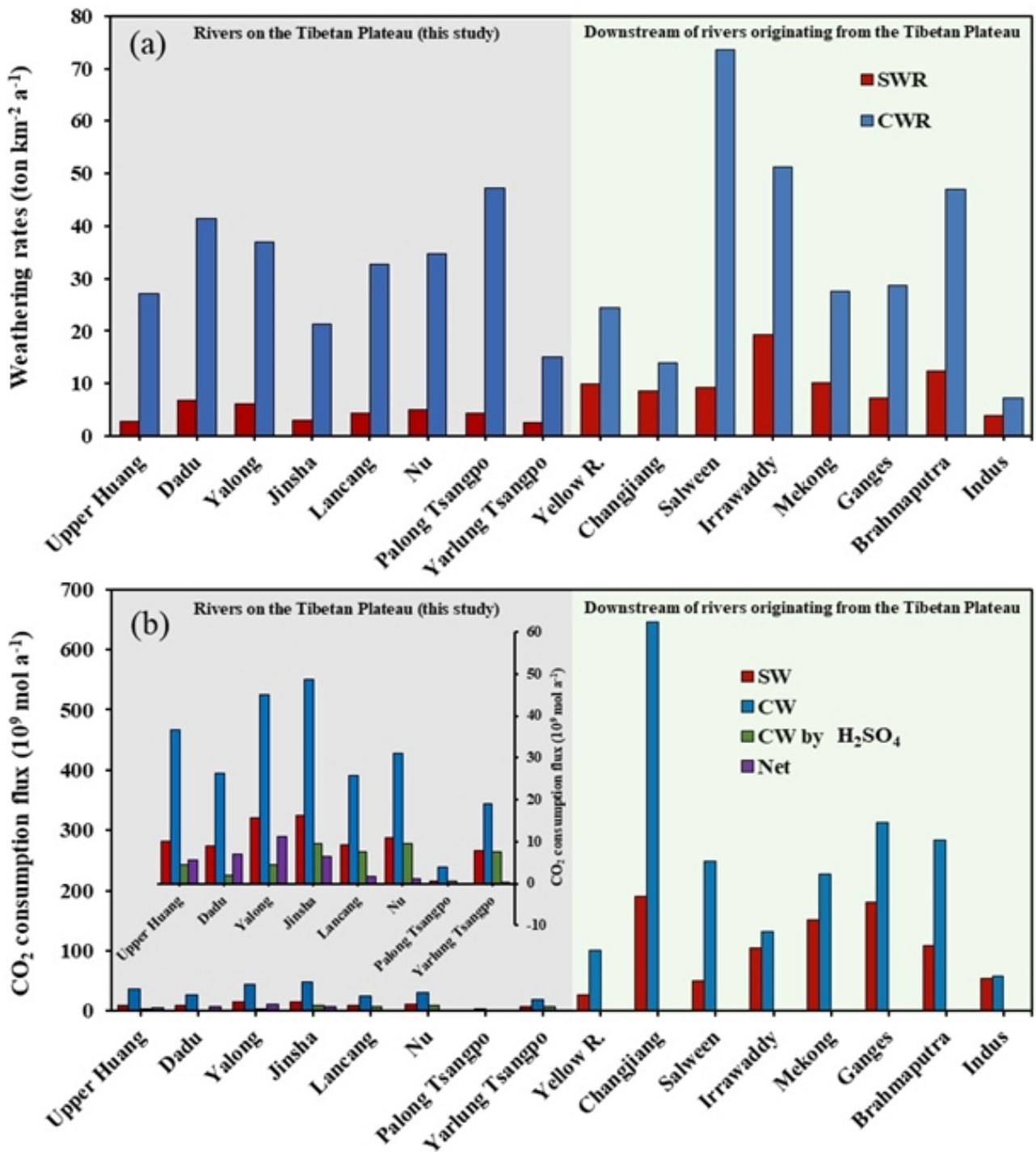


图3 发源于青藏高原主要河流流域风化速率与二氧化碳消耗通量的上下游对比（下游河流数据参考文献见Liu et al. 2025）

相关成果发表于国际学术期刊NC和GCA。研究工作得到国家重点研发计划（2020YFA0607700），自然科学基金（42422303、42488201和41730857），中国科学院地质与地球物理研究所重点部署项目（202204和202201）和中国科学院青促会优秀会员（Y2023014）等项目共同资助。（来源：中国科学院地质与地球物理研究所）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1016/j.gca.2022.12.015>

---

<https://doi.org/10.1038/s41467-025-58046-4>

特别声明：本文转载仅仅是出于传播信息的需要，并不意味着代表本网站观点或证实其内容的真实性；如其他媒体、网站或个人从本网站转载使用，须保留本网站注明的“来源”，并自负版权等法律责任；作者如果不希望被转载或者联系转载稿费事宜，请与我们联系。

作者：徐志方等 来源：《自然—通讯》

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发