科学通报 2026 年 第 71 卷 第 12 期: 2763 ~ 2776
评 述
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

风化地理学: 破解地球关键带生物地球化学循环的新兴交叉学科

白晓永[1,2*], 杜朝超[2,10], 岳超[3], 何念鹏[4], 缪驰远[5], 周金星[6], 田诗琪[1], 罗光杰[7], 吴路华[8], 王金凤[9], 蒋羽[1], 邓群群[1], 魏臻[1], 王兴爽[1], 刘占朋[1], 席学斌[1]

1. 贵州大学林学院/资源与环境工程学院, 贵阳 550025
2. 中国科学院地球化学研究所, 环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081
3. 西北农林科技大学, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100
4. 东北林业大学碳中和技术创新研究院/生态学院, 哈尔滨 150040
5. 北京师范大学地理科学学部, 地表过程与水土风沙灾害风险防控全国重点实验室, 北京 100875
6. 北京林业大学水土保持学院, 云南建水生态站, 北京 100083
7. 贵州师范学院, 流域地理状态监测省级重点实验室, 贵阳 550018
8. 铜仁学院经济管理学院, 铜仁 554300
9. 六盘水师范学院经济管理学院, 六盘水 553004
10. 中国科学院大学, 北京 100049
* 联系人, E-mail: xybai@gzu.edu.cn

2025-11-04 收稿, 2025-12-16 修回, 2026-01-05 接受, 2026-01-09 网络版发表
国家自然科学基金(U24A20579, U22A20619, 42401381, 42367008)、贵州省科技计划(黔科合成果[2024]重大014, 黔科合成果[2022]重点010, 黔科合成果[2023]一般219)、贵州省高层次人才团队项目(黔科合平台人才-GCC[2022]015-2)、贵州省科技创新人才团队建设项目(黔科合人才CXTD(2025)057)和环境地球化学国家重点实验室开放基金(SKLEG2024202)资助

摘要 地球风化作用通过改变“水-岩-土-气-生-人”等圈层之间的相互关系, 正重塑生态系统的韧性阈值. 为此, 建立“风化地理学”学科, 已成为破解地球关键带复杂性、维持生态系统稳定性的迫切需要. 本文对风化地理学的概念进行了详细讨论和辨析, 研究认为, 风化地理学属于地质学和地理学交叉形成的新兴边缘学科, 是以岩石圈、土壤圈、生物圈、大气圈、水圈、人类圈为研究对象, 系统解析物理、化学与生物风化作用对生态系统的演变过程和健康状况的影响, 揭示不同环境梯度下生态系统各组分关系和生态过程的普适性规律及其成因. 同时, 强调了建立“原位观测-模型反演-应用验证”多尺度耦合方法体系, 实现从元素循环到大陆风化格局的全链条解析, 弥补了传统地理学从深部地质过程到地表生态响应的认知缺陷, 为解决生态系统复杂性危机提供了全新范式.

关键词 风化地理学, 多圈层耦合, 生物地球化学循环, 地球关键带, 全球变化

1 风化地理学的学科定义及其研究范畴

1.1 学科提出的背景

地质学中把风化界定为地表岩石和矿物通过物理破碎和化学分解作用形成松散堆积物或土壤的过程, 不仅在地貌形成、土壤发育以及地球表面物质循环中扮演重要角色[1~3], 也在全球碳循环及元素供给方面发挥着关键调控作用[4]. 然而, 地理学作为研究地球表层自然要素和人文要素相互作用及其形成的重要学科, 并没有单独开展风化作用研究, 未能充分认识其作为

引用格式: 白晓永, 杜朝超, 岳超, 等. 风化地理学: 破解地球关键带生物地球化学循环的新兴交叉学科. 科学通报, 2026, 71: 2763–2776
Bai X, Du C, Yue C, et al. Weathering geography: a new interdisciplinary subject to interpret biogeochemical cycles in critical regions of the Earth (in Chinese). Chin Sci Bull, 2026, 71: 2763–2776, doi: 10.1360/CSB-2025-5745

© 2026《中国科学》杂志社

“生命-环境”交互枢纽的生态功能价值，导致存在三个方面的认知短板:

首先, 地质时间尺度与生态过程研究的脱节, 使得气候突变事件的生态响应机制解析不够深入[5]; 其次, 生物地球化学循环模型对生物驱动的风化作用强度被显著低估[6]; 再者, 针对人类活动对风化物质通量的干扰影响, 尚未建立有效的量化指标[7].

为此，通过跨越传统学科边界将地理学从个体、种群、群落至生态系统的层级化研究模式与地质学的矿物地球化学分析方法深度融合, 构建了“岩石风化-物质迁移-生物响应”的风化地理学学科体系. 不仅揭示了地球表层系统能量流动与物质循环的耦合作用机理, 而且为极端环境生态模拟提供了全新理论工具.

1.2 学科定义

风化地理学属于地质学和地理学交叉形成的新兴边缘学科，是以岩石圈、土壤圈、生物圈、大气圈、水圈、人类圈为研究对象，通过解析物理、化学、生物风化作用对生态系统和生态过程的影响，整合岩石圈物质分解、生物圈元素利用、人类圈干预调控的三维动态过程，揭示不同环境梯度背景中生态系统各组分关系和生态过程的普适性规律及其成因，构建“水-岩-土-气-生-人”多圈层互馈理论体系.

1.3 风化地理学的重要性

风化地理学为应对气候变化、生态修复、土地治理等全球性挑战提供了多尺度的科学框架与技术支撑, 例如, 通过研究离子释放调节水圈化学平衡[8]; 通过改变地貌结构与矿物组成，研究微生物群落的定殖与演替环境[1,9]; 通过模拟岩溶过程对大气和土壤CO_2的吸收[10~12]，研究大气温度和土壤发育等，其重要性主要体现在以下几个方面(图1).

(1) 风化调控水圈溶质通量与元素循环. 风化过程作为地球表层物质循环的关键环节[13]，其水解作用释放的K^+、Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、HCO_3^-、SO_4^{2-}等化学物质，在调控河流水体基础化学参数的同时，通过影响水生生物的生理代谢过程，对水质安全以及生态系统功能产生深刻影响[14]. 例如，研究发现中国西南喀斯特地区碳酸盐岩风化每年向地表水体输送约0.8~1.2 mmol L^{-1}的Ca^{2+}, 导致区域水体的硬度与pH呈现上升趋势[15]. 另外, 风化作用通过影响地表水循环路径与地下水补给过程，成为影响区域水文循环的关键驱动力[16]，例如，在岩溶区风化作用致使岩石结构遭到破坏, 导致岩石表面微孔隙与裂隙增多, 地表水入渗效率提高了15%~20%，明显改变了“降水-径流-下渗”比例[17], 造成岩溶区地表水与地下水转换频繁.

(2) 风化驱动岩石圈地表重构与地球化学分异. 风

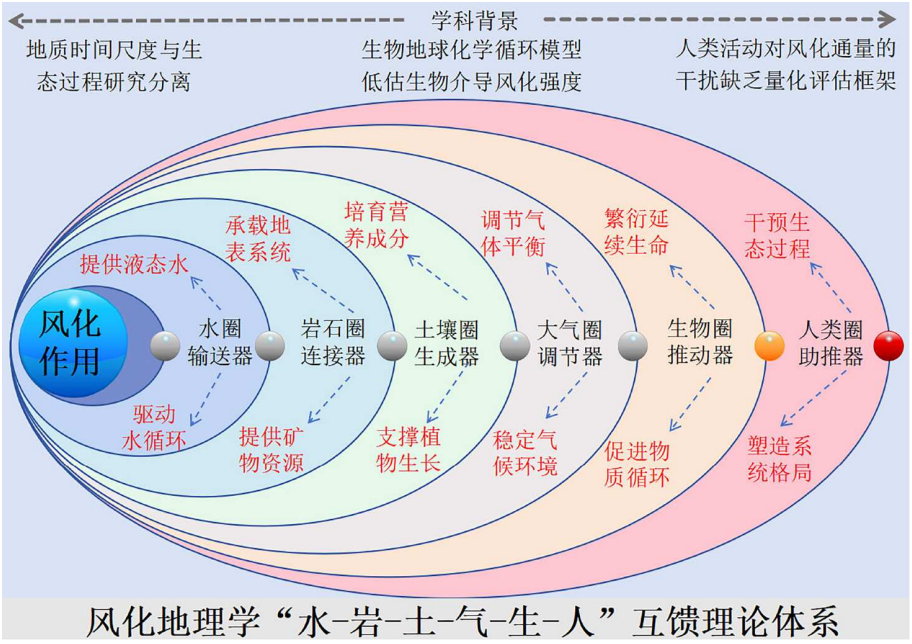


图 1 风化地理学建立的学科背景及重要性

Figure 1 The background and significance of weathering geography

化作用是由岩石圈的矿物组成与结构特征，在构造抬升、气候作用和生物活动等多重因子协同驱动下形成的跨圈层交互过程，其通过溶解–沉淀–吸附–生物吸收等机制，实现岩石–土壤–生态系统的跨圈层物质循环[18,19]. 首先，溶解作用使矿物在水、CO_2及有机酸的作用下发生离解和化学反应，释放出可溶性离子(如Ca^{2+}、Mg^{2+}等)和溶质，为岩石圈向生物圈输送元素与能量提供物质基础[20]; 随后, 沉淀作用在溶液过饱和或化学条件改变时促使离子重新结合，形成碳酸盐、黏土或氧化物等次生矿物，实现元素的再固定与碳汇的部分封存[21]; 在此过程中, 吸附作用通过黏土矿物与氧化物表面对离子和有机分子的静电吸附与络合，调控元素在土壤–水界面的迁移、转化与生物有效性[22,23]; 最终, 生物通过植物根系与微生物的代谢活动, 将风化释放的养分吸收、转化并输送入生态系统，实现无机元素向有机生命系统的跨界流动[24,25].

(3) 风化连接土壤圈成土过程与养分再循环. 土壤圈形成依赖于成土母质、气候、生物、地形和时间五大自然因素的长期耦合作用[26]，其中物理风化作用和化学风化作用将岩石破碎为碎屑颗粒并通过矿物的溶解、水解、氧化还原等反应释放出Ca^{2+}、Mg^{2+}、K^+、Fe^{3+}、$Si(OH)_4$等养分元素，这些离子和化合物与风化残余矿物共同构成了成土母质[26,27]. 与此同时, 风化作用通过特殊地形地貌对区域温度和水分条件的调控, 影响土壤形成速率与土壤发育深度[28,29]，而生物过程则通过根系分泌物、微生物代谢及有机酸作用进一步加速矿物分解与次生矿物形成[19,30]. 随着时间的积累, 风化产物在重力、渗滤和生物扰动作用下重组、演化, 逐步形成具有层次化结构和化学异质性的土壤[31,32]. 因此, 风化作用不仅为土壤形成提供了成土母质, 更通过气候、生物及时间和地形的持续协同，在地球表层形成了不同的土壤分布类型.

(4) 风化作用调节气候与维持地球化学稳态. 风化作用是物理、化学和生物作用通过改变岩石和矿物的结构和化学物质组成过程的统称，作为生态环境的“调节器”，在不同气候类型中其风化速率存在显著差异(表1)，不仅塑造了地表形态特征，还深刻影响着全球气候稳定和地球化学稳态. 例如, 碳酸盐岩风化对大气CO_2波动高度敏感[33,34]，通过$CaCO_3$/$MgCO_3$与碳酸反应生成Ca^{2+}、Mg^{2+}和HCO_3^-, 进入河流后影响其碳酸盐体系碱度及无机碳形态[35~37]; 硅酸盐矿物与CO_2、水反应生成溶解性硅、碱金属离子及黏土矿物，是消耗大气CO_2并维持百万年尺度气候稳定的关键[38,39]. 同时，风化产生的Ca^{2+}、Mg^{2+}、Na^+和K^+等离子与胶体颗粒通过调节溶液离子强度与pH，并与有机酸形成络合物促进矿物溶解，为植物生长提供基本养分[40,41]; 例如，HCO_3^-进入水体成为地表碳跨介质迁移的主要无机载体; H_4SiO_4为植物硅体沉积提供溶解硅源; 而Al、Fe胶体通过吸附养分和金属离子在水化–脱水循环中发生再分散，进一步强化物理与化学过程的耦合，形成高迁移性纳米团簇[12]，有效调节了土壤肥力、河流化学组分以及关键营养元素组成. 生物过程则

表 1　全球不同气候带风化速率范围统计表

Table 1　Statistical range of weathering rates in different climatic zones in the world

气候类型	物理风化速率范围(mm a^{-1})	化学风化速率范围(mm a^{-1})	生物风化速率范围(mm a^{-1})	典型区域
亚寒带大陆性气候	0.65~1.20	0.30~1.10	0.25~0.60	西伯利亚中部
亚寒带季风性气候	0.80~1.50	0.80~1.80	0.50~1.10	中国大兴安岭
冬干温暖气候	1.00~2.00	1.50~2.80	0.90~1.70	中国四川盆地
冰原气候	0.05~0.20	0.02~0.15	0.01~0.04	南极冰盖边缘
夏干温暖气候	0.85~1.60	1.20~2.50	1.00~1.80	地中海沿岸
常湿冷温气候	1.30~2.20	1.90~3.20	0.40~0.90	阿尔卑斯山区
常湿温暖气候	1.10~1.90	2.40~3.80	1.30~2.40	北欧温带森林
沙漠气候	0.20~0.70	0.10~0.40	0.05~0.30	撒哈拉中部
热带季风气候	0.50~1.20	3.80~5.20	2.50~4.00	印度恒河平原
热带疏林气候	0.40~1.00	3.00~4.60	2.00~3.50	非洲萨赫勒地区
热带雨林气候	0.30~0.90	5.00~6.50	3.30~5.00	亚马逊盆地
苔原气候	0.50~1.00	0.35~0.80	0.60~1.30	西伯利亚苔原
草原气候	0.70~1.40	0.60~1.40	0.70~1.50	蒙古高原
全球平均值	0.05~2.20	0.02~6.50	0.01~5.00	–

通过植被和菌根分泌的有机酸、根系呼吸和微生物代谢改变土壤CO_2分压及溶液化学性质、菌丝的穿晶作用加速晶格破碎、枯落物分解释放的有机配体与腐殖质促进离子的再吸附和胶体颗粒的形成等多路径促进矿物风化[42,43]. 总之, 风化作用通过一系列耦合的物理–化学–生物过程调节陆地–海洋物质通量, 为维持地球长期气候调节与地球化学稳态提供了关键机制.

(5) 风化作用维系生物圈养分供给与生态演化. 风化作用通过释放维持生命的关键营养物质如氮、磷等, 为生物圈的起源与演化提供了持续的能量来源与化学驱动力, 并维持光合作用[44~46]. 随着生物活动的增强, 风化与生物过程之间形成了紧密耦合, 如微生物代谢产物与植物根系分泌物 促进矿物溶解与养分释放, 进而强化了自反馈型的生物地球化学循环[47,48]. 另外, 在地质时间尺度上, 岩石风化通过持续消耗大气CO_2并调节全球气候, 为复杂生命的出现与繁盛创造了有利的能量与环境[49,50]. 与此同时, 风化产物形成的土壤为陆生植物定居提供了基质, 而植被的出现加速了矿物风化与养分循环, 推动了生态系统演替与陆地生物圈的扩展[46,51]. 总体而言, 风化作用通过能量释放、养分供给与气候调节等多重机制, 为地球生命与环境协同演化提供了充足的能量和稳定的环境.

(6) 风化支撑人类圈可持续性与碳中和治理. 风化作用既是地球系统自我调节的重要机制, 也是人类文明赖以延续的地质基础[18,26]. 例如, 矿物风化速率及释放的钙、镁、钾、磷等元素影响了形成土壤的肥力和类型, 为农业发展提供了丰富的养分[46,52]; 风化作用影响地表矿产资源的形成与再分布, 许多重要金属矿(如铝土矿、铁锰结壳)直接源于强烈风化过程, 为工业发展和能源转化提供了原料基础[53]. 在人类活动加剧的当代, 土地利用变化、酸沉降和气候变暖正在显著改变全球风化格局, 从而影响农业可持续性、碳循环和水化学平衡[54]. 理解风化过程的演化机制与人类活动的耦合反馈, 是实现资源可持续利用与地球系统安全的关键科学命题[55].

2 风化地理学的研究对象

风化地理学以解析物理/化学/生物三类风化过程的生态学效应为核心, 以岩石圈、土壤圈、生物圈、大气圈、水圈、人类圈为研究对象, 系统解析物理风化驱动的地表重构、化学风化驱动的元素循环、生物风化驱动的生态协同演化等作用在不同环境梯度下对生态系统各组分间关系的影响(图2).

2.1 风化作用驱动的地表重构

物理风化作为风化地理学的第一层驱动力, 主要关注物理机械作用如何改变岩体、坡面与流域的几何形态[56,57]. 研究对象包括: (1) 冻结–融化、热胀冷缩、风力侵蚀、盐分结晶撑裂作用与生物机械作用对岩石崩解和碎屑产生的影响; (2) 岩体崩解破碎以后产生的粒径大小如何影响渗透、侵蚀和坡面稳定性; (3) 断裂与膨胀引发的地表形变过程及其在不同气候–地形梯度上的时空异质性.

2.2 风化作用促进的元素循环

化学风化通过调控岩石中碳、硅、磷等的释放与固定过程, 重塑河流的化学组成并影响水体营养供给, 从而改变地球系统中的碳、氮、磷等关键元素的转化和迁移过程[54,58]. 其研究对象涵盖溶解风化过程的速率、反应路径与产物固相演化等范畴, 重点在于: 不同矿物组分(如长石、碳酸盐矿物、黑云母等)在酸碱与氧化还原条件下的反应差异; 水文传输、停留时间与反应通量对离子产出的控制等.

2.3 风化驱动的生态系统协同演化

生物风化强调生物体(植物根系、地衣、真菌、微生物)通过物理撬动、酸性分泌、酶促反应与有机质累积等直接或间接作用, 影响矿物分解与土壤形成[54,58]. 研究对象包括: (1) 植物群落结构与根系分布如何调控水文–化学微环境, 从而改变风化速率与营养盐释放; (2) 微生物与真菌在微观尺度孢子–生物膜中介导的矿物溶出与胶结过程, 以及由生物风化引起的土壤稳定性与生物多样性演替过程; (3) 生物行为如何通过改变风化通量反过来影响植被演替、生态位构建与生态系统碳氮循环.

3 风化地理学的研究内容

风化地理学与传统地理学相比, 在研究问题、目标、尺度、关注系统等方面存在明显差异(表2). 风化地理学主要基于多尺度、多过程耦合视角揭示风化的形成机制与演化规律, 其研究内容涵盖风化机制解析、系统模型构建与预测、风化地理分异与时空格局演变以及指导社会应用四个核心方向.



图 2 风化地理学的研究对象
Figure 2 Research object of weathering geography

表 2 风化地理学与传统地理学在研究内容上的差异性
Table 2 Differences between weathering geography and traditional geography

对比维度	传统地理学	风化地理学
研究问题	地表形态、气候分布、水文循环、生态格局及其空间规律	风化速率、风化类型、风化对碳循环和土壤形成的调控
研究目标	揭示与预测地理现象的空间格局与变化趋势	阐明风化作用的机制、类型、速率, 及其对岩石圈、土壤圈物质循环和地貌发育的影响
研究尺度	尺度灵活, 可研究全球气候带分布、国家人文经济格局, 也可研究局部区域的地理特征	以微观-中观尺度为主, 如岩石表层的矿物变化、小区域内不同岩石的风化差异
关注系统	自然系统与社会系统交互	六大圈层(岩石圈、水圈、土壤圈、大气圈、生物圈、人类圈)中的风化作用及其耦合

3.1 风化作用的机制解析

风化作用的影响机制是风化地理学的研究基础, 其主要研究内容包括: (1) 温度、水分等因素对风化速率与类型的调控机制; (2) 不同矿物稳定性和岩石结构(孔隙度、裂隙度)对风化过程的反应界面与水气扩散面的影响; (3) 植被通过根系渗透、机械破碎和根系呼吸等生物过程对岩石风化的调控作用; (4) 槽谷、丘陵、高原、峡谷、峰丛洼地、断陷盆地等不同地貌类型与构造运动对风化格局的塑造作用; (5) 大气CO_2浓度、酸沉降、污染气体对水体酸度与风化反应动力学的影响机制; (6) 土地利用变化(森林砍伐、农业活动、城市化等)对地表水热环境与化学通量的影响机制; (7) 气候–岩性–生物–构造–人类活动等多因子之间的耦合与反馈机制及其对风化作用的影响等.

3.2 风化地理系统建模与预测

风化地理系统的建模与预测是一个涉及地球科学、环境科学、水文地理学、地质学、大气科学以及数学等多学科交叉的重要研究方向, 主要研究内容涵盖了: (1) 风化基本过程及机制解析, 例如, 构建物理风化过程模型、化学风化过程模型、生物风化过程模型对其进行量化; (2) 不同时间尺度和空间尺度的风化作用对地表形态和地球系统变化的影响, 例如, 开展地貌形态演变的预测以及滑坡、泥石流等自然灾害发生概率的预判; (3) 模拟预测风化作用对区域水文、气候及生态系统的长期演化影响等多个方面.

3.3 风化过程的地理分异与时空格局

风化过程在地表形态、土壤形成、生态系统营养物质循环以及全球气候调节等方面都具有关键作用, 其发生与演变并非均一性, 而是表现出显著的地理分异和时空异质性. 为此, 风化过程的地理分异与时空格局的研究内容包括: (1) 不同气候带、地貌类型以及构造活动引起的风化过程的地理分异; (2) 风化过程从站点-流域-区域-全球等微观尺度到宏观尺度的空间异质性; (3) 太古宙-元古宙-古生代-中生代-新生代等地质时期风化过程的规律探索等.

3.4 风化地理学与社会关联

风化地理学作为地球系统科学的重要分支, 不仅关注岩石风化的自然机制与地理格局, 更强调其在社会经济与环境可持续发展中的应用价值. 其研究内容主要包括: (1) 在自然资源管理与可持续开发方面, 风化作用对土壤形成、矿物养分释放、地下水化学组成、水资源利用和矿产勘查的影响; (2) 风化过程在碳、氮、磷等元素循环中的关键作用, 评估其在调节气候、维持土壤肥力与支持生物多样性方面的生态功能; (3) 岩体崩塌、滑坡与地面塌陷等灾害风险评估与管理; (4) 风化过程对石质文物、古建筑和岩画的危害评估与防护材料研发; (5) 风化对城市地基稳定性、地下工程安全与地表水污染扩散路径的影响; (6) 提升公众对地球系统演化与环境保护的科学认知.

4 风化地理学的研究方法

风化地理学的研究方法以跨学科集成为特征, 涵盖野外观测、实验模拟、同位素示踪、遥感反演与地理信息分析、地球系统建模及大数据分析等多种手段(图3), 旨在揭示风化作用在不同时空尺度上的驱动机制及其地理分异规律, 总体而言, 可分为五类核心方法体系.

4.1 风化地质与生态要素调查

风化地质与生态要素调查法主要包括野外实地采样观测与实验室模拟两个方面, 首先, 野外实地采样与观测主要是通过设置样地的形式, 运用X射线衍射(XRD)、偏光显微镜等检测岩石露头或钻孔提取埋藏型岩石样品, 分析矿物组成及风化程度, 探究矿物-岩石风化特征[59,60]. 同时, 开挖土壤剖面, 测定风化沉积土壤中As、Co、Mn、Zn、Li、Mg、Sr等元素含量, 结合土壤酶活性分析(如酸性磷酸酶)揭示土壤与沉积物的生物化学特征[61]. 实验室模拟主要是通过排除野外环境的复杂干扰, 专注于单一或少数几个因素(如精确控制温度、湿度、酸碱性等)对风化作用的机理进行深入探究[62], 从而揭示风化作用的基本原理.

4.2 风化沉积物的同位素示踪

利用Li、Mg、Ca、Sr等元素半衰期不同的特征, 根据同位素比值鉴别风化作用的物质来源和矿物蚀变迁移路径, 并根据稳定同位素或放射性同位素的比值, 推断风化过程中水岩相互作用的强度和持续时间. 同时, 通过测定土壤中各元素的同位素比例, 推断其在土壤中的丰度和循环速率, 了解风化过程中的元素释放对土壤养分循环的影响[63,64].

4.3 遥感监测与地理信息分析

根据岩石在不同风化阶段对电磁波的反射、吸收特性差异, 利用遥感技术分析地物的光谱特征、纹理特征以及空间结构特征. 借助多源数据融合与智能算法, 识别岩石类型与地质构造在空间上的分布特征, 绘制具有地表构造类型和岩性特征的风化信息图谱[65]. 同时, 结合地理信息系统的空间分析和时序分析功能, 研究风化作用与生态环境变化的时空关联性, 为风化地理学研究提供宏观、动态且精准的数据支持[66].

4.4 微生物组学与分子生物学方法

利用微生物组学技术中的高通量测序和宏基因组分析方法, 分析岩石风化表面及土壤中的微生物群落组成, 识别和解析岩石风化过程对微生物群落的结构

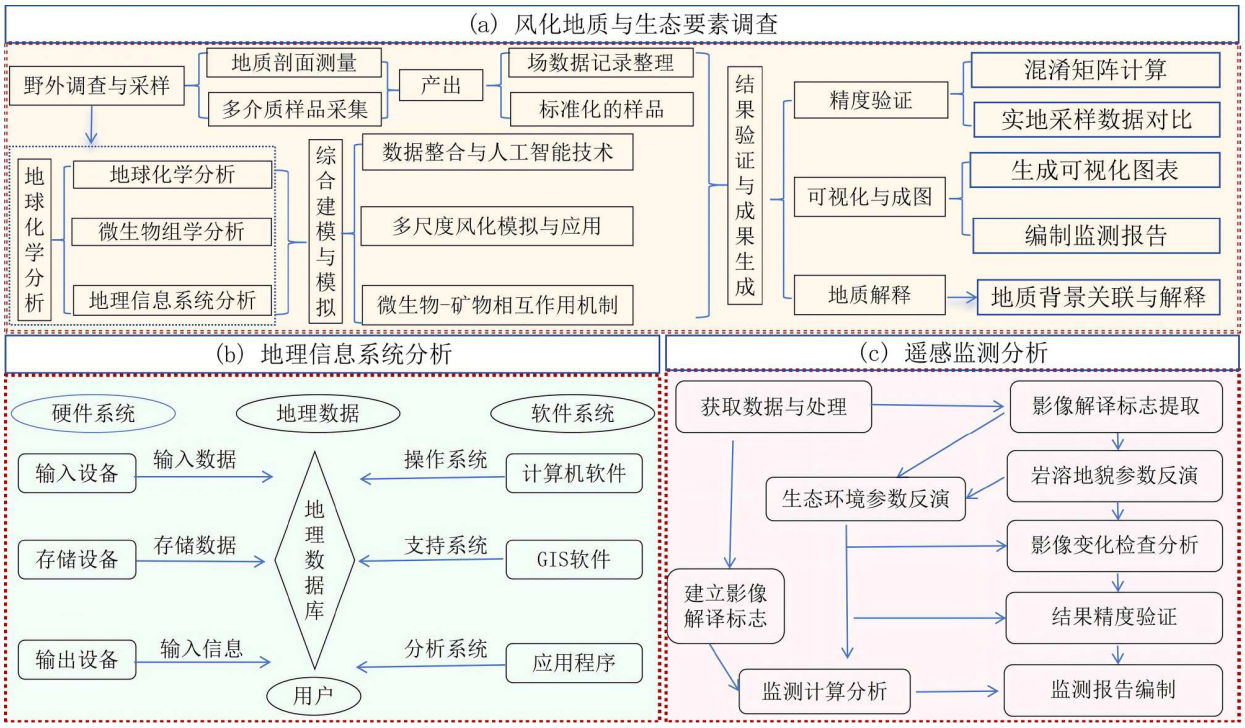


图 3 风化地理学的研究方法技术路线. (a) 风化地质与生态要素调查流程; (b) 地理信息系统分析流程图; (c) 遥感监测分析流程图
Figure 3 Research methods and technical routes of weathering geography. (a) Survey process of weathering geology and ecological elements; (b) flowchart of GIS analysis; (c) flowchart of remote sensing monitoring analysis

和多样性变化规律的影响[67]，从而揭示不同环境条件下微生物的分布规律及其与岩石类型和风化阶段的关系. 同时，利用分子生物学方法，进一步探究微生物在岩石风化中的代谢活动和功能基因表达方式. 此外，结合稳定同位素示踪技术追踪微生物在风化过程中的物质和能量流动途径，解析微生物活动与岩石、植被之间的相互作用[68].

4.5 数值模拟与人工智能技术

利用数值模拟方法，模拟风化过程中复杂的物理化学变化，以及温度、降水、风力等环境因素对风化作用的影响[69]，并预测长时间尺度风化速率、物质迁移和能量转换过程，深入理解风化与生态环境各要素之间的相互作用机制. 同时，结合数值模拟与人工智能技术，对风化区域的生态系统进行动态监测和精准化管理[70].

5 风化地理学的应用情景

风化地理学重点关注风化作用对地表各圈层的影响，其应用情景横跨自然与社会两个系统，从“岩石风化–土壤形成–生态恢复–碳循环调控–地球系统治理”构成了一条贯通地表过程与可持续发展的科学链条(图4).

5.1 风化水文循环与流域生态安全

风化作用通过改变地表结构和水文特征，直接影响地表水和地下水的转换. 风化地理学可以借助岩石风化和水体营养盐输入之间的耦合机制，研发“岩性-水质-生物”系统模型，为流域水资源管理以及水体健康提供全新的地球化学调控途径. 具体的应用方向涵盖以下几个方面: (1) 风化驱动背景下的营养盐调控. 根据不同流域风化所释放的元素特征，对关键元素的输入比例予以优化，调配相应水体营养盐中和剂. 例如，在贫营养湖泊当中通过播撒磷灰石或硫磷铝锶石粉末，促进湖泊初级生产力恢复，从而达到改善水质恢复生态的效果[71]; (2) 增强地下水补给. 在碳酸盐岩分布集中区域利用人工裂隙、加大岩石孔隙度等渗透改造技术，提升地下水补给量，缓解干旱区水资源短缺的问题，增强水资源的可持续性利用[72].

5.2 风化地质灾害与地貌演化

风化作用对岩石以及土体结构造成破坏，引发诸



图 4 风化地理学的应用情景
Figure 4 Application scenarios of weathered geology

如山体滑坡、泥石流之类的自然灾害，严重威胁人类生命财产安全. 针对目前自然灾害研究仅关注现象而缺乏内驱动力研究的问题，风化地理学通过揭示风化层渗透性演变过程当中的力学与化学耦合机制，精确把握地质结构与地壳运动规律, 提前预防与预测, 提高防灾减灾效率，推动地质灾害防治由现象观察逐步向过程模型化转变, 有望提高自然灾害预防精度. 同时利用矿物胶结技术对风化层的渗透性加以改造，增强土壤的抗剪切强度[73], 提升区域地质结构的稳定性, 降低灾害发生率. 例如，在云南红壤区应用此项技术之后, 滑坡的发生率降低了大约60%[74].

5.3 风化成土与土地资源管理

矿山开采以及不合理的土地利用，在很大程度上对生态系统的稳定性以及人类所生存的环境造成了严重威胁[75]. 结合“微生物-矿物-有机质”协同风化加速成土的研究, 在碳酸盐岩分布区, 人为干预加速岩石风化, 缩短土壤重构周期[76]，例如，在矿区废弃地生态修复中, 人为干预加速岩石风化, 可以使土壤重构周期缩短3~5年, 植被覆盖度从10%提升到85%[77], 极大程度地推动矿区生态系统的重建. 另外，在酸性土壤中，通过施加碱性矿物粉末能够有效降低土壤酸性，改善土壤的理化性质, 进而提升土壤肥力[78]，例如，相关研究表明在种植碳四谷物甜高粱的土地中播撒玄武岩粉末120天后，与对照植物相比，成熟高粱产量(以单株种子干质量衡量)显著增加了21%±9.4%, 有效提升了农作物产量.

5.4 风化碳汇与全球碳循环

风化地理学基于多元尺度碳汇通量空间分布格局数据，以开源大数据处理分析平台、地理信息系统等平台为依托，通过对岩石风化碳汇空间格局分布、时空演变规律研究，构建不同时空尺度岩石风化碳汇计

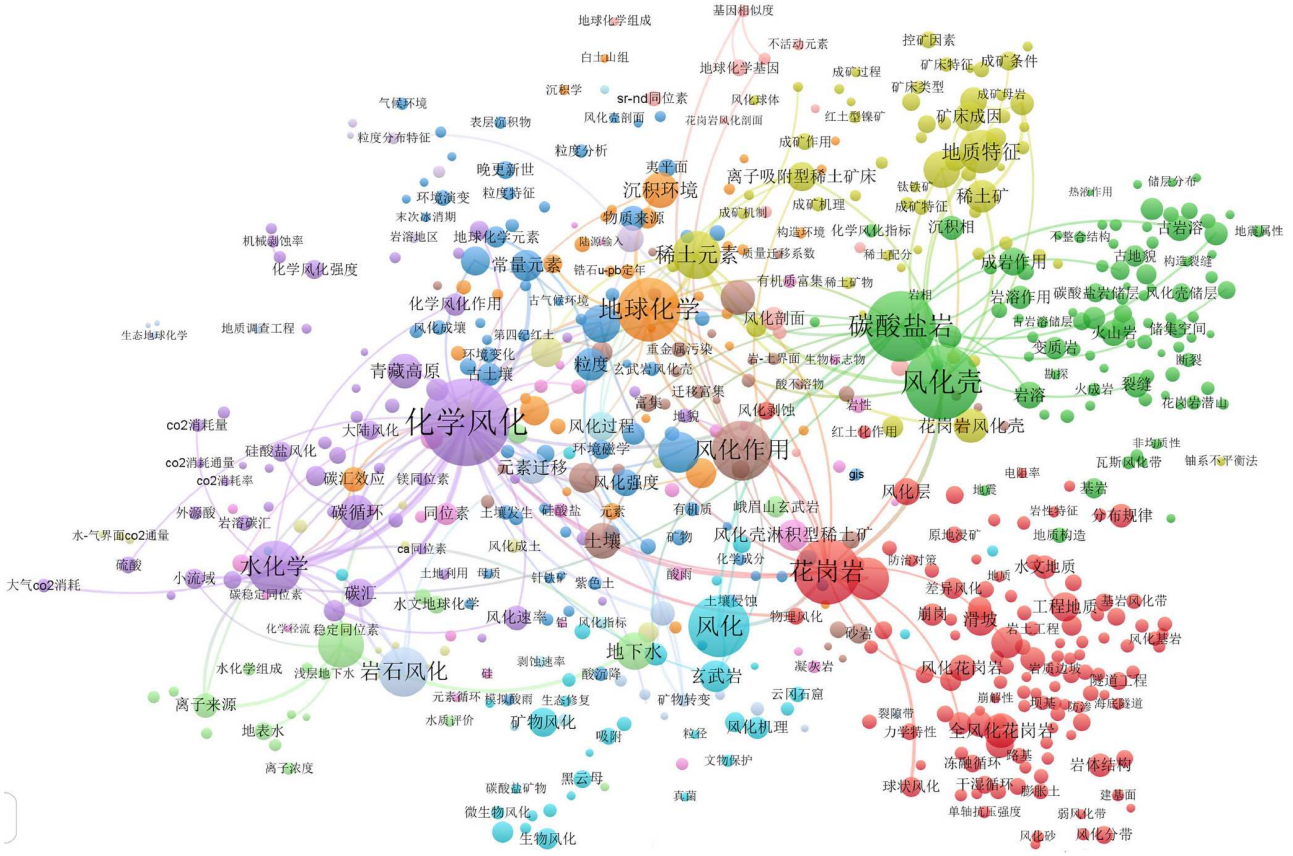
量数据库. 同时基于马尔可夫模型(CA-Markov)、土地利用变化模拟的空间-时间信息聚类模型(CLUE-S)、非线性回归预测、趋势外推等方法模拟岩石风化碳汇的未来情景, 并构建地球系统模型(ESM-W), 从而对地质时期气候与碳循环之间的关系进行模拟, 提升对未来气候变化的预测. 另外, 通过生态系统服务和权衡的综合评估模型(InVEST)、生态系统服务社会价值模型(SolVES)等量化岩石风化碳汇的生态价值, 建立多目标、多因素耦合的生态系统服务补偿支持系统, 为实现全球碳中和目标提供科技支撑.

5.5 风化元素释放与生物地球化学循环

风化地理学通过研究风化过程中Ca^{2+}、Mg^{2+}等关键离子的释放和生态系统物质循环之间的关联性, 提出基于岩性匹配的生态廊道构建理论, 拓展了风化作用在生态系统物种栖息地形成与配置研究中的应用维度. 其主要表现为: 一是通过岩性匹配的方式来恢复森林钙通量[79]. 例如, 在喀斯特地区由于成土母质主要以富含碳酸钙和碳酸镁的石灰岩和白云岩为主, 因此拥有丰富的植物区系和特有物种[80]. 有研究指出, 仅中国西南干热河谷地区就拥有约1707种植物, 其中特有种占比高达37.42%[81], 并且岩石风化过程中形成的岩溶洞穴为岩溶生物提供了安全的栖息地, 据相关研究介绍仅中国西南岩溶区就孕育了超过170种洞穴鱼类[82], 有效维护了岩溶区的生物多样性. 二是利用人工风化的产物去模拟天然土壤的孔隙结构, 为濒危植物提供适宜的生境[83]. 这种具有多孔结构的基质能够满足植物根系对于氧气、水分以及养分的需求, 促进濒危植物的生长和繁殖, 对于生物多样性保护具有重要意义.

6 风化地理学学科未来发展方向

基于中国知网数据库, 以“风化作用、风化壳、风化层、风化带”等为主题绘制1980~2025年以来关于风化的关键词共现网络分析图(图5), 图谱中“化学风化、地球化学、风化壳、岩石风化”等核心节点构成多个紧密耦合的知识集群, 说明风化过程研究已从单一环


化学风化
地球化学
碳酸盐岩
风化壳
花岗岩
风化作用
水化学
岩石风化
土壤
风化
地下水
稀土元素
常量元素
元素迁移
风化过程
风化强度
碳循环
碳汇
碳汇效应
青藏高原
古土壤
粒度
沉积环境
物质来源
稀土矿
稀土矿床
离子吸附型稀土矿床
地质特征
矿床成因
成矿作用
成矿条件
风化剖面
风化壳淋积型稀土矿
风化层
风化花岗岩
全风化花岗岩
球状风化
岩溶
岩溶作用
火山岩
变质岩
裂缝
断裂
工程地质
基岩风化带
滑坡
崩塌
水文地质
差异风化
玄武岩
凝灰岩
黑云母
生物风化
微生物风化
碳酸盐矿物
矿物风化
水化学组成
离子来源
地表水
离子浓度
大气co2消耗
硫酸
碳酸
硅酸盐风化
大陆风化
co2消耗通量
co2消耗率
外源酸
岩溶碳汇
水-气界面co2通量
小流域
碳稳定同位素
化学径流
稳定同位素
水文地球化学
风化速率
风化指标
风化成土
土壤发生
土壤利用
母质
针铁矿
紫色土
土壤侵蚀
物理风化
化学成分
酸雨
酸沉降
剥蚀速率
元素循环
模拟酸雨
生态修复
水质评价
吸附
粒径
风化机理
云冈石窟
裂隙带
力学特性
冻融循环
干湿循环
膨胀土
建基面
单轴抗压强度
弱风化带
风化砂
风化分带
岩体结构
风化基岩
隧道工程
岩质边坡
岩土工程
崩塌性
现场
海底隧道
物种保护
真菌
碳酸盐岩储层
风化壳储层
岩溶作用碳酸盐岩储层
储集空间
构造裂缝
古地貌
古岩溶
地质属性
热液作用
储层分布
构造环境
化学风化指标
质量迁移系数
稀土配分
有机质富集
稀土矿物
岩相
古气候环境
风化剖面
重金属污染
岩-土界面
生物标志物
酸和溶物
迁移富集
高集
地貌
风化剥蚀
岩性
红土化作用
花岗岩风化壳
环境磁学
镁同位素
同位素
有机质
峨眉山玄武岩
矿物
元素
硅酸盐
ca同位素
化学成分
防治对策
原地裂矿
地质构造
岩性特征
分布规律
枣岩
电阻率
瓦斯风化带
非均质性
轴系不平衡法
gis
地震
地质
水文地质
工程地质
基岩风化带
风化基岩
岩土工程
砂岩
凝灰岩
崩塌
滑坡
裂隙带
力学特性
冻融循环
膨胀土
建基面
弱风化带
风化砂
风化分带
岩体结构
隧道工程
岩质边坡
现场
海底隧道
全风化花岗岩
风化花岗岩
差异风化
水文地质

境因子拓展至涵盖矿物反应动力学、溶质迁移、水文过程、生物地球化学循环及环境变化响应等内容的多维结构体系. 总体来看, 未来风化地理学的发展将呈现以下几个趋势.

(1) 从单剖面表层风化向临界带整体风化研究深化. 图中“风化壳、地下水循环、沉积环境、地貌演化”等关键词显著集中, 说明未来研究将从浅表层风化现象转向控制临界带结构的深部风化前沿、裂隙网络与水–岩作用界面的集成研究, 实现风化动力学在空间上的系统化表达.

(2) 生物–水文–地球化学过程的耦合研究. 大量“微生物作用、土壤性质、水化学特征、生物地球化学循环、碳循环、植物作用”等关键词形成交织网络, 说明生物风化及其对元素迁移和次生矿物形成的调控将成为未来的研究核心.

(3) 风化地球化学的定量化、模型化研究中. “化学风化强度、化学风化指数、元素迁移”等关键词构成指标类簇, 反映量化评价需求的增加. 未来风化地理学将向地球化学模型、风化速率参数化等方向发展, 推动从“定性认识”向“可预测风化”转型.

(4) 跨学科集成与多源观测体系发展. “元素迁移、地球化学特征、岩石性质、沉积记录”等多主题的耦合表明未来风化研究更加注重矿物界面到大流域多尺度的观测和跨领域交叉.

综上, 风化地理学的未来发展方向将围绕“地球深部临界带结构–生物地球化学过程–数值模拟与预测–全球变化反馈”等深化发展, 逐步构建支撑地球系统研究的风化科学理论体系.

参考文献

1 Nikiforoff C C. Weathering and soil evolution. Soil Sci, 1949, 67: 219–230
2 Ma Y J, Liu C Q. Trace element Geochemistry in chemical weathering: a case study of biotite granite crust in Longnan, Jiangxi Province (in Chinese). Chin Sci Bull, 1999, 44: 2433–2437 [马英军, 刘丛强. 化学风化作用中的微量元素地球化学——以江西龙南黑云母花岗岩风化壳为例. 科学通报, 1999, 44: 2433–2437]
3 Zhu Y G, Duan G L, Chen B D, et al. Mineral weathering and element cycling in soil-microorganism-plant system. Sci China Earth Sci, 2014, 57: 888–896
4 Hao J, Knoll A H, Huang F, et al. Cycling phosphorus on the Archean Earth: part I. Continental weathering and riverine transport of phosphorus. Geochim Cosmochim Acta, 2020, 273: 70–84
5 Filippelli G M. The global phosphorus cycle: past, present, and future. Elements, 2008, 4: 89–95
6 Banwart S A, Berg A, Beerling D J. Process-based modeling of silicate mineral weathering responses to increasing atmospheric CO_2 and climate change. Glob Biogeochem Cycle, 2009, 23: GB4013
7 Wei W, Guo Z, Zhou L, et al. Assessing environmental interference in northern China using a spatial distance model: from the perspective of geographic detection. Sci Total Environ, 2020, 709: 136170
8 Hochella M, Banfield J, White A, et al. Chemical weathering of silicates in nature: a microscopic perspective with theoretical considerations. Rev Mineral, 1995, 31: 353–406
9 Brandt L, Poll C, Ballauff J, et al. Mineral type versus environmental filters: what shapes the composition and functions of fungal communities in the mineralosphere of forest soils? Soil Biol Biochem, 2024, 190: 109288
10 Hartmann J, Moosdorf N, Lauerwald R, et al. Global chemical weathering and associated P-release – the role of lithology, temperature and soil properties. Chem Geol, 2014, 363: 145–163
11 Uroz S, Picard L, Turpault M P. Recent progress in understanding the ecology and molecular genetics of soil mineral weathering bacteria. Trends Microbiol, 2022, 30: 882–897
12 Zhang W, Wan Q, Zhu G, et al. Distribution of soil organic carbon and carbon sequestration potential of different geomorphic units in Shiyang River basin, China. Environ Geochem Health, 2023, 45: 4071–4086
13 White A F, Brantley S L. Chemical weathering rates of silicate minerals: an overview. Chem Weathering Rates Silicate Miner, 1995, 31: 1–22
14 Zhong J, Wang L, Caracausi A, et al. Assessing the deep carbon release in an active volcanic field using hydrochemistry, $\delta^{13}C_{DIC}$ and $\Delta^{14}C_{DIC}$. J Geophys Res BioGeoscis, 2023, 128: e2023JG007435
15 Liu C Q, Jiang Y K, Tao F X. et al. Chemical weathering of carbonaterocks by sulfuric acid and the carbon cycling in Southwest China (in Chinese). Geochimica, 2008, 37: 404–414 [刘丛强, 蒋颖魁, 陶发祥, 等. 西南喀斯特流域碳酸盐岩的硫酸侵蚀与碳循环. 地球化学, 2008, 37: 404–414]
16 Song Y, Liu L, Yan P, et al. A review of soil erodibility in water and wind erosion research. J Geogr Sci, 2005, 15: 167–176

17 Ye T, Chen A, Yang H, et al. Tectonism and fracture-related dissolution induced the formation of the large-scale metamorphic granite reservoir: implications from Bozhong 26–6 Precambrian bedrock trap, offshore Bohai Bay basin, Northern China. Mar Pet Geol, 2024, 160: 106593

18 Velbel M A. Weathering and soil-forming processes. In: Canadell J G, Heldmaier G, Levia D F, et al., eds. Ecological Studies. New York: Springer, 1988. 93–102

19 Mei H, Jian X, Zhang W, et al. Behavioral differences between weathering and pedogenesis in a subtropical humid granitic terrain: implications for chemical weathering intensity evaluation. CATENA, 2021, 203: 105368

20 Christie D M, Ildefonse B, Abe N, et al. Mission Moho: formation and evolution of oceanic lithosphere. EoS Trans, 2006, 87: 539

21 Lin J Y, Garcia E A, Ballesteros Jr. F C, et al. A review on chemical precipitation in carbon capture, utilization and storage. Sustain Environ Res, 2022, 32: 45

22 Bradl H B. Adsorption of heavy metal ions on soils and soils constituents. J Colloid Interface Sci, 2004, 277: 1–18

23 Strawn D G. Sorption mechanisms of chemicals in soils. Soil Syst, 2021, 5: 13

24 Seto M, Iwasa Y. Microbial material cycling, energetic constraints and ecosystem expansion in subsurface ecosystems. Proc R Soc B, 2020, 287: 20200610

25 Waheed A, Qiao X, Muhammad M, et al. Plant root-mediated carbon sequestration and nutrient cycling in grassland ecosystems under land use and climate change. Agr Ecosyst Environ, 2025, 393: 109865

26 Mamo M, Kettler T, Ippolito J, et al. Soil genesis and development, lesson 2: weathering processes of rocks and minerals. J Nat Resour Life Sci Edu, 2009, 38: 238

27 Lal R, Stewart B A. Soil parent material, weathering, and primary particles. In: Bell J M, Turner W F, Milton D L, eds. Soils in Natural Landscapes. Boca Raton: CRC Press, 2013. 25–46

28 Román-Sánchez A, Vanwalleghem T, Laguna A, et al. Modelling soil water and climate dynamics to understand soil formation in Mediterranean landscapes. EGU Gen Assem Conf Abstr, 2023: eGU23-15029

29 Mousavi S R, Sarmadian F, Angelini M E, et al. Cause-effect relationships using structural equation modeling for soil properties in arid and semi-arid regions. CATENA, 2023, 232: 107392

30 Keiluweit M, Bougoure J J, Nico P S, et al. Mineral protection of soil carbon counteracted by root exudates. Nat Clim Change, 2015, 5: 588–595

31 Hunt A, Egli M, Faybishenko B. Pedogenesis through chemical weathering, hydrologic fluxes, and bioturbation. In: Hunt A, Egli M, Faybishenko B, eds. Geophysical Monograph Series. Hoboken, NJ: Wiley, 2021. 253–269

32 Huggett R. Regolith or soil? An ongoing debate. Geoderma, 2023, 432: 116387

33 Bai X, Zhang S, Smith P, et al. Resolving controversies surrounding carbon sinks from carbonate weathering. Sci China Earth Sci, 2024, 67: 2705–2717 [白晓永, 张思蕊, Smith P, 等. 解决围绕碳酸盐岩风化碳汇的争议. 中国科学: 地球科学, 2024, 54: 2747–2761]

34 Li M, Tan Q, Luo G, et al. Responses of karst ecosystem carbon sinks to climate change and human activities in China (in Chinese). Chin Sci Bull, 2025, 70: 5196–5212 [李明会, 谭秋, 罗光杰, 等. 中国喀斯特生态系统碳汇对气候变化和人类活动的响应. 科学通报, 2025, 70: 5196–5212]

35 Xu S Y, Jiang Z C. Preliminary estimation of the relationship between karst process and the source sink of atmospheric greenhouse gas CO_2 in China (in Chinese). Chin Sci Bull, 1997, 42: 953–956 [徐胜友, 蒋忠诚. 我国岩溶作用与大气温室气体CO_2源汇关系的初步估算. 科学通报, 1997, 42: 953–956]

36 Jiang Z C, Qin X Q, Cao J H, et al. Calculation of atmospheric CO_2 sink formed in karst progresses of the karst divided regions in China. Carsol Sin, 2011, 30: 363–367

37 Du C C, Bai X Y, Li Y B, et al. Storage, form, and influencing factors of karst inorganic carbon in a carbonate area in China. Science China Earth Sci, 2024, 67: 725–739 [杜朝超, 白晓永, 李阳兵, 等. 中国碳酸盐岩地区岩溶无机碳汇格局及影响因素. 中国科学: 地球科学, 2024, 54: 745–759]

38 Hilley G E, Porder S. A framework for predicting global silicate weathering and CO_2 drawdown rates over geologic time-scales. Proc Natl Acad Sci USA, 2008, 105: 16855–16859

39 Li C, Lu X, Chen J, et al. Silicate chemical weathering disrupts the global patterns of phosphorus limitation. Nat Commun, 2025, 16: 10742

40 Balogh–Brunstad Z, Keller C K, Bormann B T, et al. Chemical weathering and chemical denudation dynamics through ecosystem development and disturbance. Glob Biogeochem Cycle, 2008, 22: 2007GB002957

41 Xu W, Zhu J M, Johnson T M, et al. Selenium isotope fractionation during adsorption by Fe, Mn and Al oxides. Geochim Cosmochim Acta, 2020, 272: 121–136

42 Liang G, Stark J, Waring B G. Mineral reactivity determines root effects on soil organic carbon. Nat Commun, 2023, 14: 4962

43 Xu T, Yuan Z, Vicca S, et al. Enhanced silicate weathering accelerates forest carbon sequestration by stimulating the soil mineral carbon pump. Glob Change Biol, 2024, 30: e17464

44 Oschmann W, Grasshof M, Gudo M. The early evolution of the planet Earth and the origin of life. Senckenbergiana Lethaea, 2002, 82: 284–294

45 Dobretsov N L, Kolchanov N A, Suslov V V. On the early stages of the evolution of the geosphere and biosphere. Paleontol J, 2006, 40: S407–

S424
46 Zaharescu D G, Burghelea C I, Dontsova K, et al. Biological weathering in the terrestrial system. In: Dontsova K, Balogh-Brunstad Z, Le Roux G, eds. Geophysical Monograph Series. Hoboken, NJ: Wiley, 2020. 1–32
47 Koshila Ravi R, Anusuya S, Balachandar M, et al. Microbial interactions in soil formation and nutrient cycling. In: Muthukumar T, Balachandar M, eds. Mycorrhizosphere and Pedogenesis. Singapore: Springer, 2019. 363–382
48 Khan A L. Silicon: a valuable soil element for improving plant growth and CO_2 sequestration. J Adv Res, 2025, 71: 43–54
49 Sproson A, Strandmann P V, Selby D, et al. Orbitally paced Silurian glaciations invoke negative weathering feedbacks that reverse global cooling. Jpn Geosci Union Abstr, 2018, https://api.semanticscholar.org/CorpusID:228286848
50 Penman D E, Caves Rugenstein J K, Ibarra D E, et al. Silicate weathering as a feedback and forcing in Earth's climate and carbon cycle. Earth-Sci Rev, 2020, 209: 103298
51 Vanacker V, Molina A, Zhiminaicela S, et al. High Andean soil landscapes shaped by interactions between geomorphology, vegetation, and hydrology. EGU, 2020, 2020: 17996
52 Brantley S, White A, Derry L, et al. The Critical Zone Exploration Network: a tool for understanding Earth's weathering engine. AGU Fall Meet Abstr, 2005, 2005: h33H-04
53 Liu B, Chen P, Wang T, et al. Genesis of Danping bauxite (Northern Guizhou, China) and associated lithium: evidence from LA-ICP-MS analysis of Al-bearing minerals. J GeoChem Explor, 2024, 262: 107464
54 Hartmann J, West A J, Renforth P, et al. Enhanced chemical weathering as a geoengineering strategy to reduce atmospheric carbon dioxide, supply nutrients, and mitigate ocean acidification. Rev Geophys, 2013, 51: 113–149
55 Bai X Y, Ran C, Chen J A, et al. Methods, progress and prospect for diagnosis of karst ecosystem health in China: an overview (in Chinese). Chin Sci Bull, 2023, 68: 2550–2568 [白晓永, 冉晨, 陈敬安, 等. 中国喀斯特生态系统健康诊断的方法、进展与展望. 科学通报, 2023, 68: 2550–2568]
56 Anderson S P. Breaking it down: mechanical processes in the weathering engine. Elements, 2019, 15: 247–252
57 Frings P J, Buss H L. The central role of weathering in the geosciences. Elements, 2019, 15: 229–234
58 Yang C, Yang S, Su N. Stable hydrogen and oxygen isotopes in mineral-bound water and the indication for chemical weathering intensity. Chem Geol, 2016, 441: 14–23
59 Brantley S L, Lebedeva M. Learning to read the chemistry of regolith to understand the critical zone. Annu Rev Earth Planet Sci, 2011, 39: 387–416
60 Samuels T, Bryce C, Landenmark H, et al. Microbial weathering of minerals and rocks in natural environments. Biogeochem Cycles, 2020, 251: 59–79
61 Carrillo-González R, Šimůnek J, Sauvé S, et al. Mechanisms and pathways of trace element mobility in soils. Adv Agron, 2006, 91: 111–178
62 Ardau C, Blowes D W, Ptacek C J. Comparison of laboratory testing protocols to field observations of the weathering of sulfide-bearing mine tailings. J GeoChem Explor, 2009, 100: 182–191
63 Trumbore S. Radiocarbon and soil carbon dynamics. Annu Rev Earth Planet Sci, 2009, 37: 47–66
64 Chen X Y, Li B, Li C. Chemical weathering during the Neoproterozoic snowball Earth events (in Chinese). Earth Sci, 2025, 50: 1048–1065 [陈欣阳, 李彪, 李超. 新元古代成冰纪雪球地球与化学风化作用. 地球科学, 2025, 50: 1048–1065]
65 van der Meer F D, van der Werff H M A, van Ruitenbeek F J A, et al. Multi-and hyperspectral geologic remote sensing: a review. Int J Appl Earth Observation GeoInf, 2012, 14: 112–128
66 Hansen M C, Potapov P V, Moore R, et al. High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. Science, 2013, 342: 850–853
67 Uroz S, Calvaruso C, Turpault M P, et al. Mineral weathering by bacteria: ecology, actors and mechanisms. Trends Microbiol, 2009, 17: 378–387
68 Radajewski S, Ineson P, Parekh N R, et al. Stable-isotope probing as a tool in microbial ecology. Nature, 2000, 403: 646–649
69 Navarre-Sitchler A, Steefel C I, Sak P B, et al. A reactive-transport model for weathering rind formation on basalt. Geochim Cosmochim Acta, 2011, 75: 7644–7667
70 Reichstein M, Camps-Valls G, Stevens B, et al. Deep learning and process understanding for data-driven Earth system science. Nature, 2019, 566: 195–204
71 Maher K, von Blanckenburg F. The circular nutrient economy of terrestrial ecosystems and the consequences for rock weathering. Front Environ Sci, 2023, 10: 1066959
72 Karunanidhi D, Aravinthasamy P, Subramani T, et al. Risk of fluoride-rich groundwater on human health: remediation through managed aquifer recharge in a Hard Rock Terrain, South India. Nat Resour Res, 2020, 29: 2369–2395
73 Davis J M, Roy N D, Mozley P S, et al. The effect of carbonate cementation on permeability heterogeneity in fluvial aquifers: an outcrop analog study. Sediment Geol, 2006, 184: 267–280
74 Zhang S, Cox S F. Enhancement of fluid permeability during shear deformation of a synthetic mud. J Struct Geol, 2000, 22: 1385–1393

75 Scheidegger A E. Geodynamics: Structural Geology and Tectonics. Berlin: Springer, 1987. 282–287
76 Fang Q, Lu A, Hong H, et al. Mineral weathering is linked to microbial priming in the critical zone. Nat Commun, 2023, 14: 345
77 Fujii K, Hartono A, Funakawa S, et al. Acidification of tropical forest soils derived from serpentine and sedimentary rocks in East Kalimantan, Indonesia. Geoderma, 2011, 160: 311–323
78 Neina D. The role of soil ph in plant nutrition and soil remediation. Appl Environ Soil Sci, 2019, 2019: 1–9
79 Blum J D, Klaue A, Nezat C A, et al. Mycorrhizal weathering of apatite as an important calcium source in base-poor forest ecosystems. Nature, 2002, 417: 729–731
80 Zhu H. The karst ecosystem of Southern China and its biodiversity (in Chinese). Tropical Forestry, 2007, 35: 44–47 [朱华. 中国南方石灰岩(喀斯特)生态系统及生物多样性特征. 热带林业, 2007, 35: 44–47]
81 Zhao Y J, Gong X. Diversity and conservation of plant species in dry valleys, southwest China. Biodivers Conserv, 2015, 24: 2611–2623
82 Lei H T, He L, Huang J H, et al. Description of a new cave-dwelling species of Claea (Teleostei, Cypriniformes, Nemacheilidae) from the Yangtze River basin in Sichuan, southern China. ZSE, 2025, 101: 681–695
83 Yang H, Li S, Sun H, et al. Effects of substrate material on plant growth and nutrient loss. Pol J Environ Stud, 2018, 27: 2821–2832

Summary for “风化地理学: 破解地球关键带生物地球化学循环的新兴交叉学科”

Weathering geography: a new interdisciplinary subject to interpret biogeochemical cycles in critical regions of the Earth

Xiaoyong Bai[1,2*], Chaochao Du[2,10], Chao Yue[3], Nianpeng He[4], Chiyuan Miao[5], Jinxing Zhou[6], Shiqi Tian[1], Guangjie Luo[7], Luhua Wu[8], Jinfeng Wang[9], Yu Jiang[1], Qunqun Deng[1], Zhen Wei[1], Xingshuang Wang[1], Zhanpeng Liu[1] & Xuebin Xi[1]

[1] *College of Forestry/College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China*
[2] *State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China*
[3] *State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling 712100, China*
[4] *Institute of Carbon Neutrality/School of Ecology, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China*
[5] *State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Disaster Risk Reduction, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*
[6] *Yunnan Jianshui Research Station, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China*
[7] *Guizhou Provincial Key Laboratory of Geographic State Monitoring of Watershed, Guizhou Education University, Guiyang 550018, China*
[8] *School of Economics and Management, Tongren University, Tongren 554300, China*
[9] *School of Economics and Management, Liupanshui Normal University, Liupanshui 553004, China*
[10] *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*
* Corresponding author, E-mail: xybai@gzu.edu.cn

Weathering is a crucial geological process where surface rocks and minerals are gradually transformed into loose deposits or soil through both physical crushing and chemical decomposition in the natural environment. This dynamic process is intrinsically linked to the entire evolution of the Earth’s surface system. Weathering is a fundamental driver of surface topography, leading to the erosion and eventual flattening of steep mountains and promoting the accumulation of nutrient-rich soil in plain areas. It also directly supports the development and maturity of the pedosphere, provides a basic carrier for terrestrial ecosystems, and plays an indispensable role in global material circulation. Crucially, the continuous weathering processes of the Earth fundamentally influence the resilience and recovery capacity of ecosystems by precisely regulating material and energy exchange across the six fields. In the field of global carbon cycle, the chemical weathering of silicate minerals is a fundamental, long-term geological process that acts as a major carbon sink, removing atmospheric carbon dioxide by converting it into dissolved bicarbonate and carbonate ions, thus acting as a crucial natural mechanism to slow global warming. In the aspect of element supply, nitrogen, phosphorus, potassium, and other nutrients released into the biosphere through the natural process of weathering are fundamental for the stability and operation of ecosystems. Traditional geography, while studying the interaction and formation of natural and human elements on the Earth’s surface, has not fully recognized the ecological significance and functional value of weathering as a crucial interface connecting life and the environment. This leads to the following three shortcomings in understanding weathering. (1) The disconnection between geological time scales and ecological process research limits the thorough analysis of ecological response mechanisms of climate change events. (2) Biogeochemical cycle models generally face challenges in accurately quantifying biologically driven weathering. (3) An effective quantitative index for the influence of human activities on the flux of weathered materials has not been established. Therefore, the establishment of the “weathering geography” discipline is essential for managing critical environmental challenges and preserving ecological balance. In this paper, the hierarchical research model of geography (from individual organisms to ecosystems) is combined with the mineral geochemical analysis methods of geology to bridge traditional disciplinary boundaries, and the disciplinary system of “rock weathering-material migration-biological response” in weathering geography is constructed. Weathering geography is a new interdisciplinary subject formed by the intersection of ecological geology and geography. It mainly takes the lithosphere, pedosphere, biosphere, atmosphere, hydrosphere, and human sphere as the research objects. By analyzing the influence of physical, chemical, and biological weathering processes on ecosystems and ecological processes, weathering geography integrates the three-dimensional dynamic processes of lithospheric material decomposition, biosphere element utilization, and human sphere intervention and adjustment. This paper reveals the general laws and causes of the relationships between various components of ecosystems and ecological processes in different environmental gradients. Furthermore, a multi-sphere interactive feedback theoretical system of “water-rock-soil-gas-life-people” is constructed. At the same time, it is emphasized that establishing a multi-scale coupling system of “in situ observation-model inversion-application verification” is crucial for realizing a comprehensive, whole-chain analysis from element cycles to continental weathering patterns. This system will reveal the coupling mechanism of energy flow and material circulation in the Earth’s surface system, provide a new theoretical tool for ecological simulation in extreme environments, address the cognitive deficiency of traditional geography by linking the complex interactions between deep geological processes and surface ecological responses, and offer a new paradigm for solving the complexity crisis in ecosystem modeling.

weathering geography, multi-layer coupling, biogeochemical cycles, Earth key zones, global change

doi: 10.1360/CSB-2025-5745