



碳酸盐岩风化对亚热带农业可持续性和生态系统稳定性的影响及其分区调控

白晓永^{1,2*}, 熊练^{2,11}, 闫俊华³, 何念鹏⁴, 周金星⁵, 缪驰远⁶, 高扬⁷, 岳超⁸, 魏晓¹, 彭旭东¹, 刘占朋⁹, 邓群群⁹, 魏臻⁹, 蒋羽⁹, 席学斌⁹, 王兴爽⁹, 李俊翰^{2,11}, 田诗琪¹⁰, 杜朝超^{2,11}, 谢元欢^{2,11}

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. 中国科学院华南植物园, 广州 510650
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. 北京林业大学水土保持学院, 云南建水生态站, 北京 100083
6. 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
7. 中国科学院地理科学与资源研究所, 生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101
8. 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
9. 贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵阳 550025
10. 云南大学地球科学学院, 昆明 650500
11. 中国科学院大学, 北京 100049

* 联系人, E-mail: baixiaoyong@vip.skleg.cn

2026-01-05 收稿, 2026-01-21 修回, 2026-04-08 接受, 2026-04-10 网络版发表

国家自然科学基金联合基金(U24A20579, U22A20619, 42401381, 42367008)、贵州大学自然科学专项(国家级领军人才)科研基金(贵大领军合字(2025)03号)、贵州省省级科技计划(黔科合支撑[2024]重大014, 黔科合支撑[2022]重大010, 黔科合支撑[2023]一般219)、贵州省高层次创新型人才(黔科合平台人才-GCC[2022]015-2)、贵州省科技创新人才团队建设专项(黔科合人才CXTD(2025) 057号)和环境地球化学国家重点实验室开放基金(SKLEG2024202)资助

摘要 中国亚热带喀斯特核心区作为全球喀斯特的关键组成, 其碳酸盐岩化学风化过程的特殊性导致区域土壤形成速率低、农业压力大, 深刻影响喀斯特农业可持续性与生态系统稳定性. 然而, 碳酸盐岩化学风化在农业可持续性和生态系统稳定性中的双重效应缺乏系统量化, 限制了风化对区域可持续发展的科学认知与管理应用. 本研究基于2000~2020年多源遥感与地面观测数据, 通过热力学溶蚀模型、阈值分析及空间关联方法, 揭示了风化速率的时空动态及其影响机制. 结果显示: 研究期内区域平均风化速率以年均 0.38 mm ka^{-1} 显著增长, 空间呈东南高、西北低格局; 农业可持续性与生态系统稳定性分别存在 33.1 和 29.55 mm ka^{-1} 的关键阈值, 低于阈值时风化以养分供给和生境改良为主导正效应, 高于阈值则转变为土壤漏失和石漠化等驱动的负效应; 89.6% 的区域呈现风化与农业可持续性正相关, 70% 的区域与生态系统稳定性呈正相关, 而高风化速率区(如广西、湖南中部)形成高风化-低可持续性集聚. 因此, 碳酸盐岩风化对喀斯特农业—生态系统的影响并非单向线性, 而是通过双阈值效应实现资源供给—环境胁迫的动态转换, 这一发现挑战了传统风化有益或有害的单一认知. 本研究为全球喀斯特地区应对气候变化、协调农业发展与生态保护提供了关键科学依据与分区调控方案.

关键词 亚热带农业, 喀斯特, 碳酸盐岩风化, 可持续性, 生态系统稳定性

引用格式: 白晓永, 熊练, 闫俊华, 等. 碳酸盐岩风化对亚热带农业可持续性和生态系统稳定性的影响及其分区调控. 科学通报

Bai X, Xiong L, Yan J, et al. Impacts of carbonate rock weathering on subtropical agricultural sustainability and ecosystem stability and their zonal regulation (in Chinese). Chin Sci Bull, doi: [10.1360/CSB-2026-0019](https://doi.org/10.1360/CSB-2026-0019)

中国亚热带喀斯特区以西南地区为核心,是全球面积最大、连续性最强的裸露型喀斯特分布带之一,覆盖西南8省(区),既是长江和珠江上游的重要生态安全屏障,也是南方关键农业主产区^[1-3]。该区具有典型喀斯特生态地理特征:土层薄、成土速率低(仅 $5\sim 50\text{ t km}^{-2}\text{ a}^{-1}$)、水土流失严重(各土地利用方式的年均土壤侵蚀量介于 $0.40\sim 36.64\text{ t km}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 之间,耕地为其他土地的数十倍),生态系统高度脆弱,却承载着全国约10%的经济规模和近2亿人口的农业生产需求^[3,4]。在“高强度土地利用—弱土壤发育”的结构性约束下,碳酸盐岩化学风化成为维系土壤形成、生态稳定与农业可持续性的关键地质过程。

碳酸盐岩风化通过 CO_2 吸收、 $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ 释放及岩溶地貌演化等过程,深刻影响土壤生成、水文循环与生物地球化学过程^[5-8]。在亚热带喀斯特区,坡陡、漏失强、土壤贫瘠与植被脆弱共同限制农业生产能力^[9],适度的碳酸盐岩风化可持续补充土壤物质和碱性阳离子、改善水文保持能力,从而提升生态恢复和农业生产的基础条件^[10];而风化过强或过弱均可能导致土壤退化、生态脆弱性加剧及农业风险提升,具体而言,风化过强可能导致土壤养分(如碱基离子)过快淋失、水土漏失加剧,加速土壤贫瘠化与石漠化进程;而风化过弱则可能致使土壤物质更新缓慢、碱基离子供应不足,限制土壤肥力提升与作物生长,最终共同表现为土地退化、生态系统服务功能下降及农业生产力波动等系统性风险^[11]。因此,阐明碳酸盐岩风化过程对农业可持续性与生态系统稳定性的作用机制,为揭示“风化—土壤—生态”耦合关系,保障国家生态与粮食安全提供数据支撑。

已有研究为理解碳酸盐岩风化过程的环境控制、养分来源与生态效应奠定了基础。大量地球化学研究从溶蚀动力学、离子迁移与化学风化等角度揭示了水文、温度及土壤对风化速率的主控机制^[12,13]。生态学研究则强调喀斯特区植被恢复和石漠化治理对风化—土壤系统的反馈作用^[14,15]。农业学界则从作物适生性、耕地质量提升与土壤管理探讨风化产物对土壤肥力与农业生产的补给功能,发现碳酸盐岩风化释放的碱性阳离子对土壤结构稳定性和作物生长具有影响^[13,16]。此外,地质与地球化学通过实验、溶蚀管道监测及河流化学法构建了喀斯特风化速率基线,揭示气候变暖与水文变化可能导致风化加速与时空异质性增强^[17,18]。

尽管上述研究从不同学科视角深化了对喀斯特风

化过程的认识,但目前全球及区域喀斯特研究整体上仍呈现出单维度、学科分割明显的问题:目前,生态学、农业学与地质学在碳酸盐岩风化相关研究中各有侧重,分别关注石漠化治理与生态恢复、作物适配与土壤管理、风化速率与地球化学过程,尚未形成统一的过程机制框架,进而无法精准识别风化过程对农业可持续性与生态系统稳定性的正负效应与阈值边界。这一缺口严重制约了喀斯特地区土地资源利用、生态保护及农业发展的协同推进,也阻碍了基于风化过程的空间调控与管理策略的形成。总之,当前仍有两个关键科学问题亟需解决:(1) 风化过程对农业可持续性与生态系统稳定性的正负效应及其阈值机制尚不清晰;(2) 缺乏面向区域治理的风化调控分区框架。

针对上述问题,本研究以中国亚热带喀斯特区为对象,结合机器学习与热力学溶蚀模型,构建高分辨率碳酸盐岩化学风化速率数据集,从理论、方法和应用三个维度贡献如下:(1) 在理论上,系统阐明碳酸盐岩风化在维系与胁迫农业-生态系统中的正负双重作用机制;(2) 在方法上,提出一种识别风化阈值的定量化方法,其核心思路在于整合高分辨率风化速率、多维度生态指标及农业产出数据,构建风化-效应响应关系模型,从而客观识别关键阈值;(3) 在应用上,基于阈值分析结果,形成一套面向区域治理的风化调控分区方案。最终,本研究旨在为喀斯特地区农业可持续管理、生态保护修复与土地利用政策制定,提供具有明确科学依据与空间可操作性的决策支持。

1 研究区概况、数据及方法

1.1 研究区概况

本研究聚焦中国亚热带喀斯特核心区($103^{\circ}\text{E}\sim 112^{\circ}\text{E}$, $22^{\circ}\text{N}\sim 29^{\circ}\text{N}$),范围涵盖贵州全省、广西北部、云南东部、四川南部、重庆东南部、湖北西南部、湖南西部、广东北部地区(图1),总面积约 120万 km^2 ,占全国喀斯特总面积的34.9%^[19]。研究区属亚热带季风气候,年降水量 $800\sim 1600\text{ mm}$,年均气温 $14\sim 22^{\circ}\text{C}$,水热条件充沛且配合良好,为该区域强烈的碳酸盐岩化学风化作用提供了重要驱动力。在地貌上,该区以峰丛、峰林、洼地为主,碳酸盐岩出露广泛,覆盖率超过70%,岩性以石灰岩和白云岩为主。同时,该区域碳酸盐岩化学风化速率较高,尤其是在高温多雨的季节和植被覆盖较好的地段,这一过程深刻影响着喀斯特水文地球化学循

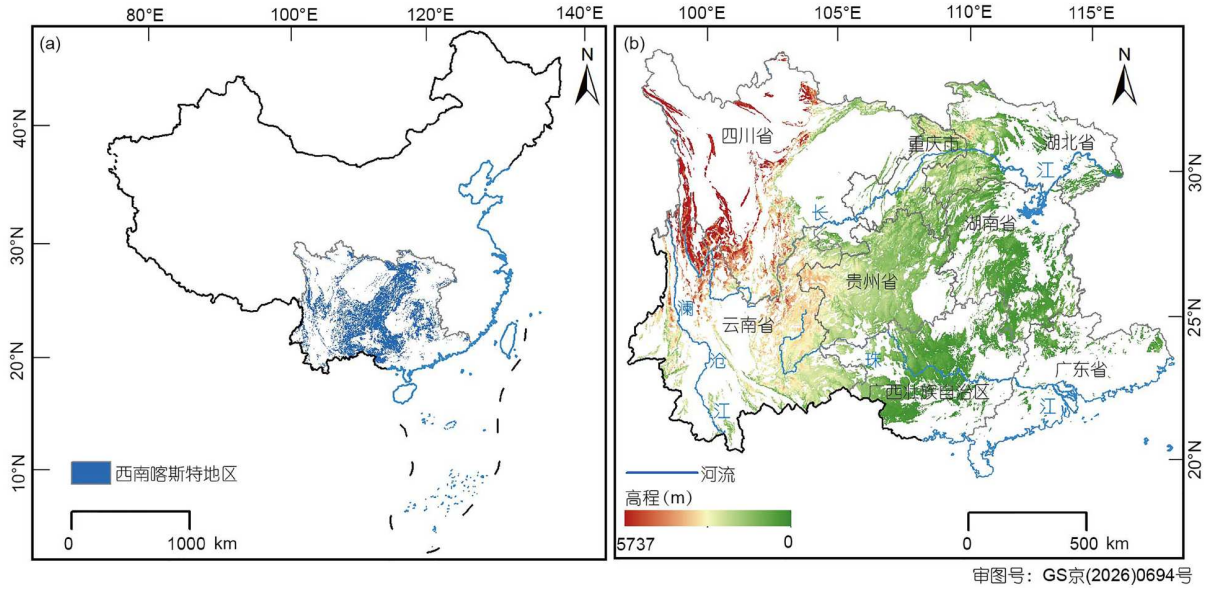


图 1 研究区概况
Figure 1 Study area overview

环与地貌演化。土壤以石灰土为主,受强烈溶蚀和侵蚀作用影响,普遍表现为土层浅薄(10~80 cm)、有机质含量偏低(10~30 g kg⁻¹)、pH呈中性至微碱性(6.5~8.5),保肥保水能力较弱,却是我国南方重要的旱作农业与特色作物产区。然而,脆弱的岩土结构与活跃的风化过程共同导致该地区石漠化与土壤侵蚀问题突出,对农业生产与生态系统稳定性构成持续威胁,是我国南方生态安全与可持续治理的关键区域^[20]。

1.2 数据来源

本研究采用的主要数据及具体数据来源如表1所示。

1.3 研究方法

1.3.1 碳酸盐岩化学风化速率反演

本研究在随机森林算法支持下,基于降雨和实际蒸散等数据,结合流域Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺、K⁺、Cl⁻、HCO₃⁻、SO₄²⁻和NO₃⁻等离子浓度数据^[21,22],采用热力学溶蚀模型对碳酸盐岩化学风化速率进行空间反演^[23,24],其计算公式为:

$$D_{\max} = 10^6 (P - E) (K_s K_1 K_0 / 4 K_2 \gamma(\text{Ca}^{2+}) \gamma(\text{HCO}_3^-)^2)^{1/3} \times (p\text{CO}_2)^{1/3}, \quad (1)$$

式中, $D_{\max}$ 表示碳酸钙矿物与水体达到反应平衡时的

化学风化速率(mm ka⁻¹), P和E分别为年总降雨量(mm)与年总实际蒸散量(mm)。 K_s 表示方解石的溶度积常数, K_1 、 K_2 分别是CO₂水化生成HCO₃⁻和CO₃²⁻的平衡常数, K_0 为CO₂在水中的溶解平衡常数。 $\gamma(\text{Ca}^{2+})$ 和 $\gamma(\text{HCO}_3^-)$ 分别代表含水层中Ca²⁺和HCO₃⁻的离子活度系数, $p\text{CO}_2$ 为土壤或含水层中CO₂的分压。上述各参数的具体计算过程与取值可参照Bai等人^[23]的研究结果。

1.3.2 农业可持续性评价

本研究围绕农业可持续性(agricultural sustainability index, ASI)这一目标,从土壤特性、作物生产力、经济水平、气候条件、人为措施和地形地貌六个维度,遴选了土壤有效磷、土壤有机碳、土壤pH、土层厚度、植被净初级生产力等12项关键指标(表2),构建了适用于西南喀斯特地区的农业可持续性评价指标体系^[25]。该设计旨在确保评价过程的科学性与结论的准确性。同时按照自然断点法将农业可持续性分为了5级,分别为严重不可持续性(0.07~0.12)、较弱不可持续性(0.12~0.16)、临界或基本可持续(0.16~0.22)、初步协调可持续性(0.22~0.30)及良好可持续性(0.30~0.68)。

1.3.3 生态系统稳定性评价

选择生物多样性指数(biodiversity index, BI)、土壤保持能力(soil retention, SR)和NDVI来计算生态系统稳定性,主要由于其分别对应着生态系统稳定性的三个核心支柱。生物多样性是系统结构与复杂性的基础,

表 1 数据源

Table 1 Data source

类别	数据名称	数据来源
气候因子	年平均降水(precipitation, P)	中国科学院资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn/)
	年平均温度(temperature, T)	
	地表温度(land surface temperature, LST)	Terra中MODIS MOD11A1版本6.1产品(https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD11A1.061)
	实际蒸散发(actual evapotranspiration, ET)	Harvard Dataverse (https://doi.org/10.7910/DVN/ZGOUED)
环境因子	土壤湿度(soil moisture, SM)	国家青藏高原数据中心(https://doi.org/10.11888/RemoteSen.tpdc.272760)
	灌溉用水量	https://doi.org/10.6084/m9.figshare.27610524.v2
	灌溉农田	Earth System Science Data (https://essd.copernicus.org/articles/16/5207/2024/essd-16-5207-2024.html)
植被因子	植被净初级生产力(net primary productivity, NPP)	MODIS MOD17A3(https://modis.gsfc.nasa.gov/)
	归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)	MOD13A3数据集(https://www.earthdata.nasa.gov/)
	增强型植被指数(enhanced vegetation index, EVI)	MOD13A1版本6产品
其他因子	土壤磷	国家生态科学数据中心(https://www.nesdc.org.cn/)
	国内生产总值(gross domestic product, GDP)	国家青藏高原数据中心(https://doi.org/10.11888/RemoteSen.tpdc.272760)
	人类足迹	全球人类足迹数据集(https://www.x-mol.com/groups/li_xuecao/news/48145)
	流域Ca ²⁺ 、Mg ²⁺ 、Na ⁺ 、K ⁺ 、Cl ⁻ 、HCO ₃ ⁻ 、SO ₄ ²⁻ 和NO ₃ ⁻ 等离子浓度数据	Hartmann等人 ^[21,22]
	高程(digital elevation model, DEM)	国家地球系统科学数据中心(http://www.geodata.cn/)
	土壤有机碳	
	土壤pH	
	土层厚度	

表 2 西南喀斯特农业可持续性评价指标体系

Table 2 Index system for assessing agricultural sustainability in the southwest karst area

类别	指标	属性 ^{a)}
土壤特性	土壤有效磷	+
	土壤有机碳	+
	土壤pH	-
	土层厚度	+
作物生产力	植被净初级生产力	+
经济指标	国内生产总值	+
气候数据	温度	-
	降水	+
人为措施	灌溉用水量	+
	中国灌溉农田面积占比	+
	人类足迹	-
地形地貌	高层	-

a) “+”或“-”主要表征因子与区域农业可持续性的关联方向: 标注为“+”的指标为正向指标, 其数值提升对可持续性具有促进作用; 标注为“-”的指标为负向指标, 其数值升高则可能对可持续性产生压力

能增强生态系统的抵抗力和恢复力^[26]。土壤保持能力反映了生态系统维持养分循环与基础生产力的关键支撑功能, 是生态系统服务可持续性的根本保障^[27]。而NDVI则直接指示系统的初级生产力和整体活力^[28], 是生态系统能量固定和功能状态最直观的表征。这三者结合, 能够从结构完整性、功能持续性和系统活力三个维度, 提供一个衡量生态系统稳定性和韧性的综合框架。生态系统稳定性指数公式如下^[29]:

$$ES = \sqrt[3]{BI \times SR \times NDVI}, \quad (2)$$

其中, ES 为生态系统稳定性, BI 为生物多样性指数; SR 为土壤保持; $NDVI$ 为归一化植被指数。

(1) 生物多样性. 本研究采用多指标综合评价方法, 即通过整合生境质量指数(habitat quality index, HQI)、NPP、EVI、香农多样性指数(Shannon diversity index, SHDI)、LST和SM6个子指标, 构建生物多样性指数。指标权重参考《区域生物多样性评价标准》及Lou等人^[30]的研究。公式如下:

$$BI = HQI \times 0.25 + NPP \times 0.2 + EVI \times 0.2 + SHDI \times 0.15 + LST \times 0.1 + SM \times 0.1, \quad (3)$$

式中, HQI 为生境质量指数; NPP 为净初级生产力; EVI 为增强型植被指数; $SHDI$ 为Shannon多样性指数; LST 为地表温度; SM 土壤水. BI 取值范围为0~1, 值越大, 生物多样性越好. HQI 通过InVEST模型的Habitat Quality模块评估而得.

Shannon多样性指数计算公式如下:

$$SHDI = -\sum_{i=1}^m [P_i \ln(P_i)], \quad (4)$$

式中: $SHDI$ 为香农多样性指数; m 为景观类型数目; P_i 为景观类型 i 所占面积的比例.

(2) 土壤保持. 土壤保持在防止土地退化和河流沉积等方面具有重要保护作用. 计算公式如下:

$$SR = R \times K \times LS \times (1 - C) \times P, \quad (5)$$

式中: SR 为土壤保持强度($t \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$), R 为降雨侵蚀力($MJ \text{ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ a}^{-1}$); K 为土壤可蚀性因子($t \text{ h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$); LS 为坡度坡长因子; C 为植被覆盖因子; P 为水土保持措施因子.

1.3.4 趋势分析法

采用回归趋势分析对2000~2020年的相关因素的空间演变趋势进行分析. 计算的斜率(θ)反映了变量的演变过程, 其中斜率大于0, 表示该像元在研究时段内增加, 反之则为下降^[31].

$$\theta = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times A_i) - \left(\sum_{i=1}^n i \right) \times \left(\sum_{i=1}^n A_i \right)}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2}, \quad (6)$$

式中, θ 为变化趋势, i 为差分指数值, n 为变化次数, A_i 为第 i 次变化下不同指数之间的相关性. 采用Mann-Kendall(MK)方法来检验时间序列数据变化的显著性^[32].

1.3.5 调节机制分析方法

(1) 相关性分析. 采用皮尔逊相关分析(Pearson)计算并反映两组线性变量之间的相关关系^[33], 采用 t 检验评价其是否显著, 公示如下:

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \times (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \times \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (7)$$

式中, R_{xy} 为变量 x 和 y 之间的相关系数, n_i 为样本数; x_i 和 y_i 分别为第 i 组数据的测量分支 x 和 y , 分别为变量 x 和 y 的均值.

(2) 弹性系数. 本研究采用弹性系数识别农业可持

续性或生态系统稳定性对碳酸盐岩化学风化速率的敏感性响应. 弹性系数通过利用自变量和因变量三次多项式拟合的微分方程, 分析函数在给定区间上的曲率. 因此, 可以确定最大曲率点对应的自变量值或区间作为阈值^[34].

$$EC = \frac{d(D_{\max})}{d(Y_i)}, \quad (8)$$

式中, EC 为弹性系数, $D_{\max}$ 表示碳酸盐岩化学风化速率通量, Y_i 分别表示农业可持续性和生态系统稳定性指数.

(3) 空间自相关分析. 运用全局双变量Moran's I 探索碳酸盐岩化学风化速率与农业可持续性之间的空间关系, 并利用双变量LISA图对局部空间相关性进行可视化, 最终探究出二者之间的空间聚类 and 离散结果, 即空间相关关系^[35]. 计算公式如下:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}}, \quad (9)$$

$$I_i = \frac{(x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_j - \bar{x})}{S^2}, \quad (10)$$

式中, I 和 I_i 分别表示风化速率与农业可持续性的全局双变量Moran's I 和局部双变量Moran's I . n 表示研究区域个数, W_{ij} 为 $n \times n$ 空间权重矩阵, x_i 和 x_j 表示区域的属性值, $\bar{x}$ 表示属性值的平均值, S^2 表示方差.

2 结果与分析

2.1 亚热带喀斯特碳酸盐岩化学风化速率时空动态

2.1.1 时间变化特征

2000~2020年间, 中国亚热带喀斯特区碳酸盐岩化学风化速率在气候变暖背景下总体呈稳步上升趋势, 并伴随显著阶段性波动(图2(a)). 其演变过程可划分为三个阶段: (1) 第一阶段(2000~2010年)为缓慢增长期, 区域平均风化速率从35.1 mm ka^{-1} 升至38.6 mm ka^{-1} , 其间受极端干旱事件影响出现短暂回落; (2) 第二阶段(2011~2015年)进入快速激增期, 风化速率从2011年的16.66 mm ka^{-1} 急剧上升至2015年的44.39 mm ka^{-1} , 增幅达140%, 主要受夏季风增强导致降水增加及土壤 CO_2 释放量提升驱动^[36]; (3) 第三阶段(2015~2020年)转为缓慢回落与调整期, 风化速率从峰值小幅回落至42.8 mm ka^{-1} , 可能与夏季风强度减弱、水热条件趋于

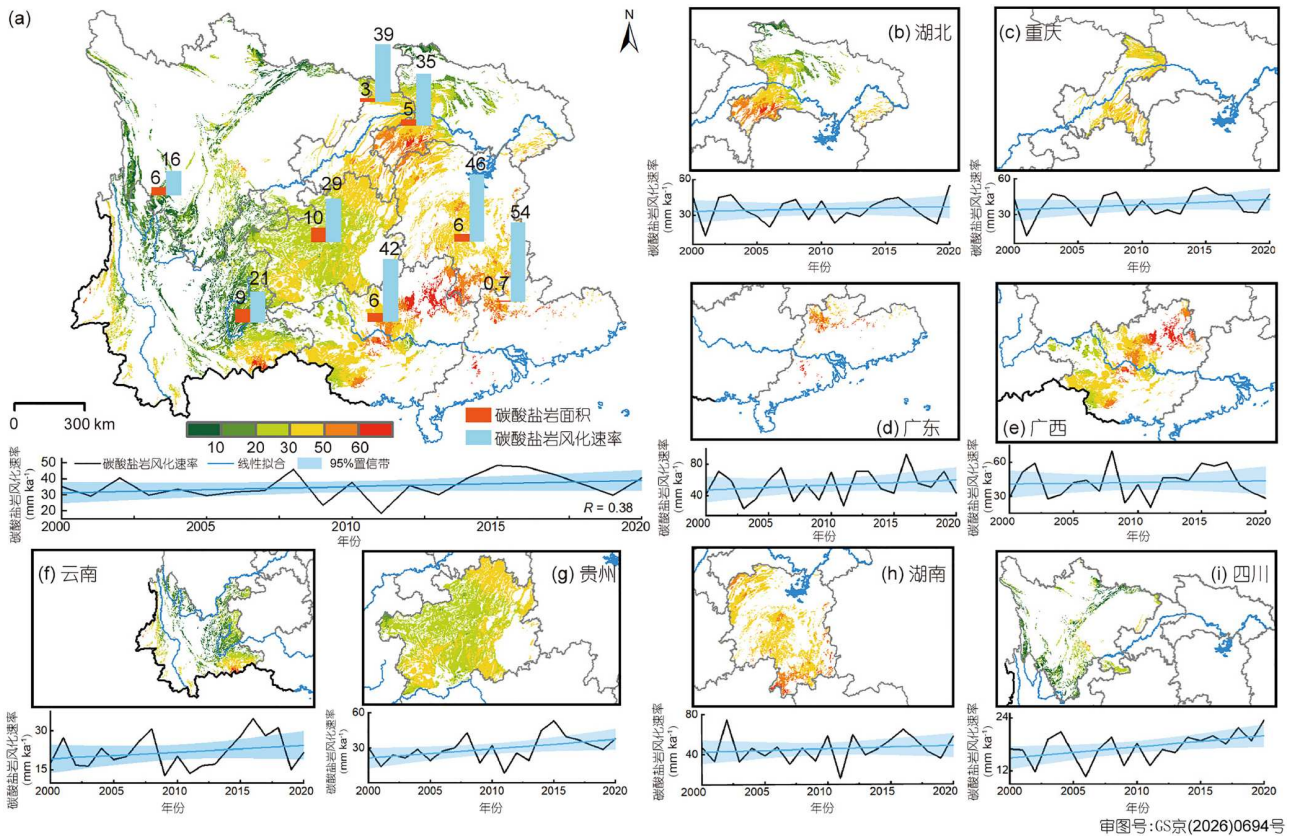


图2 西南亚热带喀斯特地区碳酸盐岩化学风化速率均值及其时空变化

Figure 2 Carbonate rock weathering rate flux and its temporal and spatial variations in the subtropical karst region of Southwest China

常态及土壤 CO_2 释放量趋于稳定有关^[36,37]。总之,研究期内风化速率呈现缓慢增长—快速上升—高位回调的非线性演变特征,其阶段性波动显著响应区域气候变化与碳循环关键因子的协同作用。

2.1.2 空间分布格局

研究区碳酸盐岩化学风化速率空间分异显著,整体呈现“东南高、西北低”的分布格局(图2(a))。

依据风化速率可划分为三类典型区域(图2): (1) 类型Ⅰ: 高值区($>40 \text{ mm ka}^{-1}$)集中分布于水热条件最优越的广东、湖南及广西东南部,该区域高温多雨,岩溶作用强烈; (2) 类型Ⅱ: 中值区($25\sim40 \text{ mm ka}^{-1}$)广泛覆盖贵州中东部、重庆南部及湖北西南部,构成空间主体; (3) 类型Ⅲ: 低值区($<25 \text{ mm ka}^{-1}$)则主要位于贵州西部与云南东北部的云贵高原腹地,受高海拔和相对冷干气候制约。总体上,风化速率的空间格局强烈受水热条件地理梯度控制。

广西、贵州与湖南三省区贡献了研究区63.9%的风化总量,凸显了西南喀斯特区域作为全球碳酸盐岩

风化核心引擎的关键地位^[37]。本研究基于热力学模型的高分辨率区域评估,为宏观约束全球碳酸盐岩风化碳汇提供了关键区域依据。与此同时,西南喀斯特区高强度且高度异质的风化过程,在参与地表物质循环和地貌塑造、支撑农业生态系统的同时,也伴随溶蚀过度导致的土壤漏失与水分短缺风险。上述时空动态表明,风化过程在释放养分、参与成土的同时,也存在因溶蚀过度而导致土壤漏失、水分短缺的风险。因此,厘清风化速率对农业可持续性成土—养源与漏失—损基双重效应的非线性和平衡机制,是协调喀斯特生态保护与农业发展的关键问题。

2.2 碳酸盐岩化学风化速率对农业可持续性的双阈值调控效应

2.2.1 农业可持续性时空演变

本文通过构建评价指标体系揭示了中国西南喀斯特地区农业可持续性在2000~2020年间的时空分异格局(图3)。

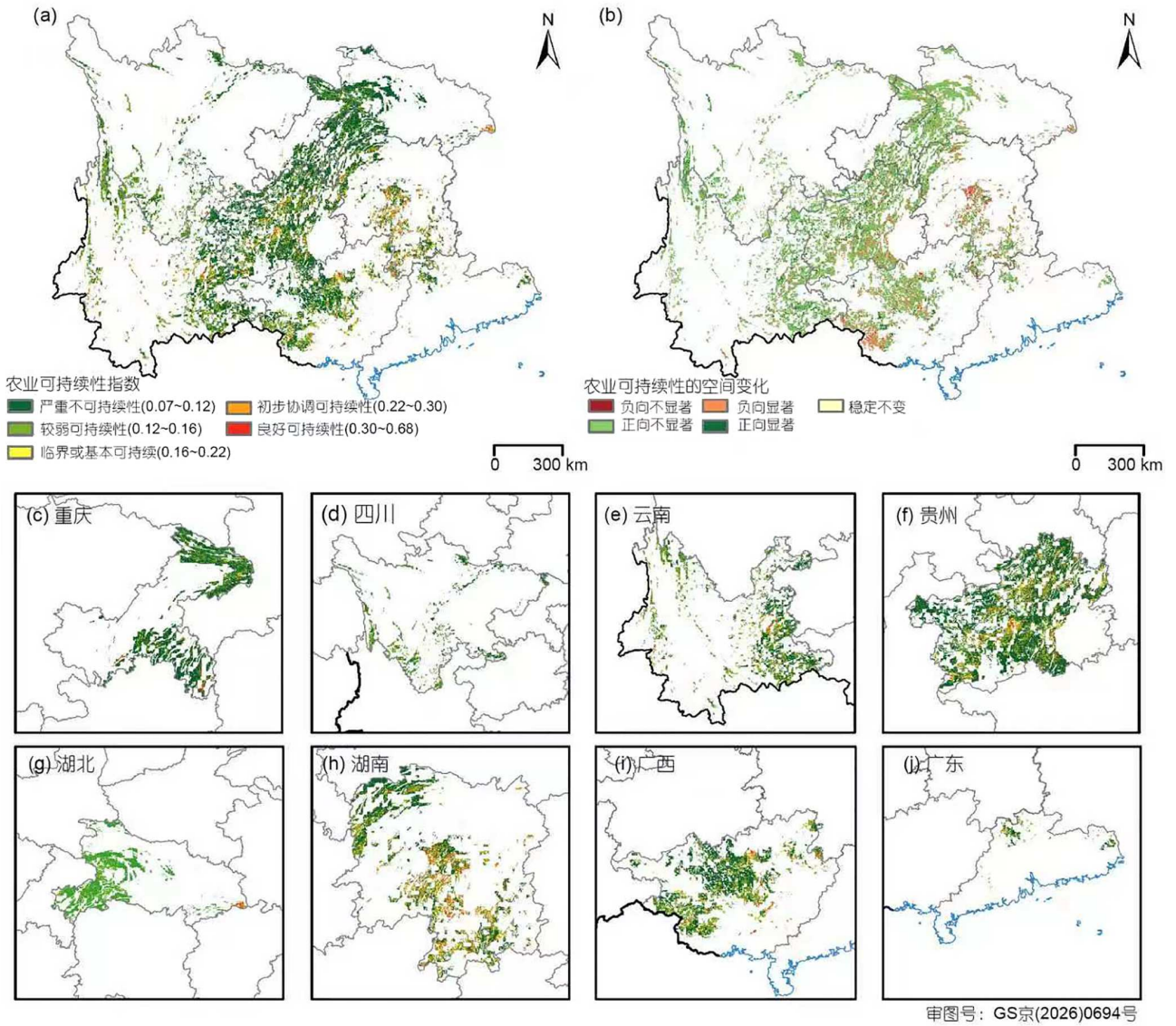


图 3 亚热带喀斯特农业可持续性的空间分布和时空变化。(a) 空间分布; (b) 时空变化; (c~j) 各省农业可持续性指数空间分布
Figure 3 Spatial distribution and spatio-temporal changes of agricultural sustainability in subtropical karst areas. (a) Spatial distribution; (b) spatio-temporal changes; (c~j) the spatial distribution of agricultural sustainability indices in each province

研究期内, 农业可持续性指数从0.099显著提升至0.172, 累计增幅73.7% ($P < 0.01$), 呈现波动徘徊(2000~2008)—稳步提升(2009~2018)—加速跃升(2019~2020)的阶梯式增长特征, 反映了长期生态修复与近期精准扶贫、乡村振兴政策的叠加效应^[38]。空间上呈中部低、东西高格局, 年均ASI为0.13。区域差异显著: 低值区主要分布于鄂西、重庆及贵州石漠化严重山区, 而较高值区集中于贵州、广西中部及湖南中南部。

趋势分析表明, 约80.5%区域农业可持续性呈改善

趋势, 其中8.8%改善显著 ($P < 0.05$), 主要位于贵州中部、四川盆地及重庆大部; 而19.4%的区域出现退化, 并在湖南中部、广西中西部及贵州南部呈现明显空间集聚。改善区多位于生态约束较弱、政策支持集中、产业结构转型较早的区域^[39]; 而退化区普遍受石漠化严重、传统农业依赖和复杂地形制约, 易陷入生态和经济负向循环^[40]。

区域对比分析进一步揭示了格局的驱动因素。省级尺度上, ASI表现为湖南最高(0.16)、广西次之(0.14)、湖北最低(0.11), 反映了石漠化本底、地形条

件、土地利用方式及政策实施强度的综合差异. 纬度梯度上, 在中低纬度带(22.5°N~26.5°N), ASI形成显著高值区(均值0.15); 向南北两侧递减, 且在33°N附近降至最低值(0.11). 这一空间格局印证了自然条件是发展的基础, 而技术与管理投入则决定了潜力实现程度的基本规律^[41].

2.2.2 正负影响机制与空间关联

碳酸盐岩化学风化速率对农业可持续性的影响具有双重性, 其效应随风化强度和空间背景而异(图4). 总体上, 正相关区域占研究区面积的89.6%, 主要分布于风化速率适中或偏低的贵州、重庆和湖北大部地区. 风化过程通过补给成土物质、释放 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 等养分、缓冲土壤酸化并改善地下孔隙结构与水文调蓄能力, 显著促进农业可持续性提升(Pearson相关系数 $r=0.32$, $P<0.05$), 表明在多数喀斯特区, 风化与农业系统以协同作用为主. 相对地, 负相关区域(高风化速率伴随低可持续性)约占10.3%, 集中于高风化速率区, 过快溶蚀导致土壤和养分沿裂隙流失, 土层显著变薄($<30\text{ cm}$)、肥力衰退并加剧石漠化, 同时削弱岩体稳定性, 增加地质灾害风险.

局部空间聚类分析进一步揭示了该关系的显著空间异质性(图4(b)). 各类显著集聚区合计占研究区面积的22%, 其分布具有明确的指示意义. 其中, 高—高集聚区(占8%)主要分布于广西河池—柳州—来宾、桂林局部及崇左—南宁—百色交界区, 代表风化过程与农业可持续性协同增强的典型区域. 而高—低集聚区(占2%)零星分布于黔东南、怀化和衡阳, 体现高风化强度下农业可持续性受抑的空间拮抗关系. 此外, 低—高集聚区(占3%)集中于襄阳、荆门等地, 表明在风化背景较弱区, 农业可持续性可由其他因素有效维系; 低—低集聚区(占9%)主要位于甘孜和阿坝. 上述空间集聚特征表明, 风化速率对农业可持续性的双重效应并非均匀分布, 而是呈现明显的局地聚焦特征, 为揭示其作用机制与空间调控提供了直接证据.

2.2.3 阈值效应识别

基于弹性系数分析, 本研究定量揭示了喀斯特地区碳酸盐岩化学风化速率对农业可持续性的非线性控制规律. 整体上, 二者呈显著倒U型关系, 并存在明确阈值, 标志着风化作用由农业发展的促进因子向限制因子转变的关键阈值(图4).

首先, 阈值的具体数值及其动态特征得以量化. 2000、2010与2020年的阈值分别为33.09、30.83与

32.58 mm ka^{-1} , 其波动区间(30.83~33.09 mm ka^{-1})反映了气候变化与人类活动的协同调节效应. 综合研究期确定的最优阈值为33.1 mm ka^{-1} , 为区域评估提供了稳定的科学基准.

其次, 阈值两侧的主导机制存在本质差异. 在阈值以下($<33.1\text{ mm ka}^{-1}$), 风化过程以成土与养分释放为主, 改善土壤肥力与保水能力, 对农业可持续性产生正向作用. 超过该阈值后, 土壤和养分沿裂隙系统加速流失, 石漠化增强, 风化作用由资源供给转变为环境胁迫.

最后, 空间格局验证了该阈值的环境指示与应用价值. 在贵州、重庆等风化速率接近或低于阈值的区域, 二者普遍呈正相关. 相反, 在局部高值区则形成高风化—低可持续性的胁迫集聚区. 值得注意的是, 广西中部等高值区农业衰退幅度趋缓, 暗示了浅薄土层、低利用强度及生态工程可能产生的缓冲效应.

总体而言, 33.1 mm ka^{-1} 定量界定了喀斯特地区碳酸盐岩化学风化作用由养源效应向损基效应转变的临界点, 为实施分区化土地管理、生态修复与石漠化防治提供了关键的科学依据.

2.3 碳酸盐岩化学风化速率对生态系统稳定性的双阈值调控效应

2.3.1 生态系统稳定性时空演变

本文定量评估了2000~2020年中国西南亚热带喀斯特地区生态系统稳定性的时空分异特征. 结果表明, 研究期内生态系统稳定性整体呈小幅波动上升趋势, 且与碳酸盐岩风化过程存在显著的非线性关联. 生态系统稳定性指数年均增幅为 0.281×10^{-2} , 2015年后政策强化阶段提升尤为明显, 同时区域间差异显著, 中等稳定性等级在空间上占主导地位.

首先, 从整体趋势来看, 2000~2020年生态系统稳定性指数呈现波动上升的特点, 但上升幅度较小, 且存在明显的波动周期. 结果表明, 亚热带喀斯特地区生态系统稳定性指数均值为0.468(图5(a)), 呈西南高、东北低格局. 在2000~2014年稳定性指数在0.44~0.47之间波动, 而在2015~2017年指数显著上升, 从2015年的0.51升至2017年的0.52, 为研究期最高值, 反映生态系统稳定性明显改善. 稳定性等级中, 中等稳定区面积最大($21.859\times 10^4\text{ km}^2$), 空间分布较为均匀; 低稳定区占28.61%($10.567\times 10^4\text{ km}^2$); 生态系统稳定性良好稳定区占11.39%($4.208\times 10^4\text{ km}^2$); 生态系统稳定性为优和差等级的占比相对较小, 分别为4.72%和3.37%.

其次, 纬度梯度分析表明, 各年份生态系统稳定性指数均随海拔升高而降低, 中低纬度带(22.5°N~26.5°N)

形成稳定性高值带(均值0.15), 这可能是由于中高纬度地区常受到更频繁、更强烈的自然干扰, 如风雪、冻

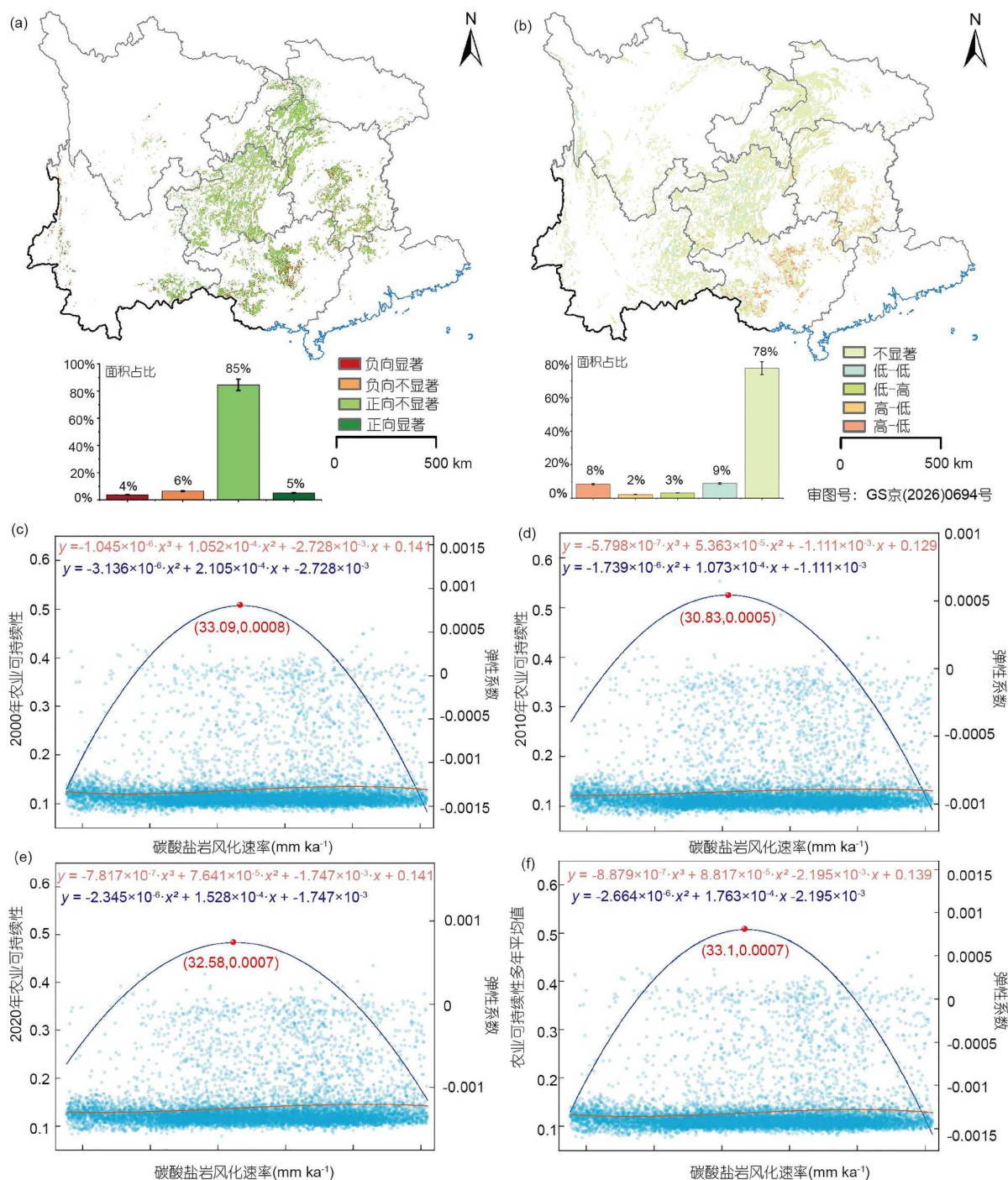


图 4 亚热带碳酸盐岩化学风化速率对农业可持续性的正负影响及阈值效应. (a) 风化速率对农业可持续性的正负影响; (b) 风化速率对农业可持续性的空间集聚类型; (c~f) 2000、2010、2020年风化速率对农业可持续性的阈值效应

Figure 4 Positive and negative impacts of subtropical carbonate rocks weathering rate on agricultural sustainability and threshold effects. (a) Positive and negative impacts of carbonate rocks weathering rate on agricultural sustainability; (b) spatial agglomeration types of the impact of carbonate rocks weathering rate on agricultural sustainability; (c~f) the threshold effects of the weathering rate on agricultural sustainability for the years 2000, 2010, and 2020, and for the entire study period, respectively

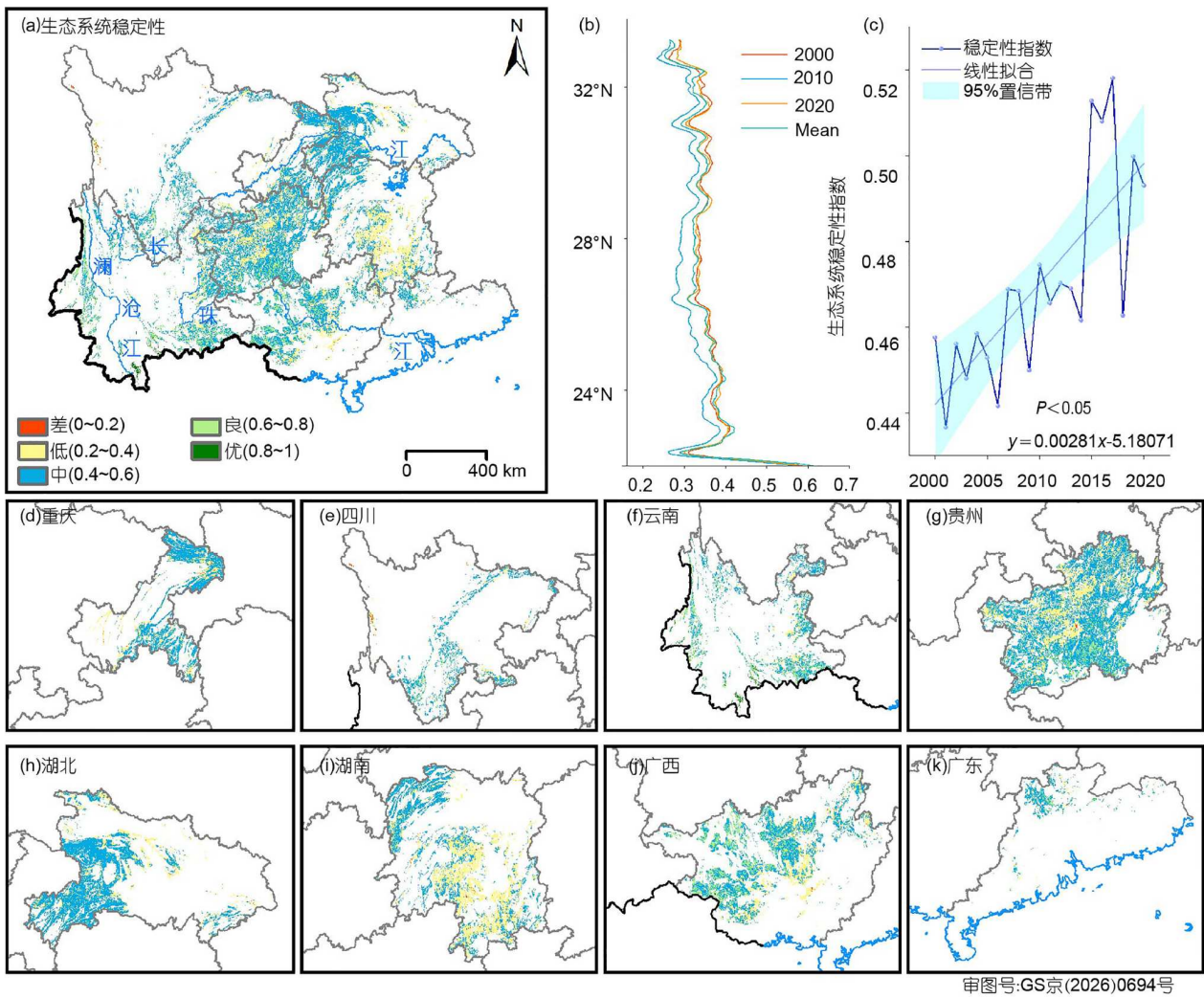


图 5 生态系统稳定性空间和纬度分布格局及演变趋势. (a) 2000~2020 年生态系统稳定性均值; (b) 不同年份生态系统稳定性随纬度变化; (c) 2000~2020 年 ES 时间变化(误差线为标准差); (d~j) 西南地区不同省份生态系统稳定性均值

Figure 5 Spatial and latitudinal distribution patterns and evolution trends of ecosystem stability. (a) Average ecosystem stability from 2000 to 2020; (b) change of ecosystem stability with latitude in different years; (c) ES time change from 2000 to 2020 (error bar is standard deviation); (d~j) average ecosystem stability of different provinces in southwest China

害等, 且低温条件下生态恢复速率缓慢. 为了量化变化速率, 线性回归结果显示, 2000~2020 年稳定性指数年均增加 $0.281 \times 10^{-2} \text{ a}^{-1}$, 累积增幅约 7.75% (MK 检验 $P < 0.05$) (图 5(b)).

总体而言, 2000~2020 年生态系统稳定性的波动上升是气候变化与人类活动共同作用的结果. 一方面, 全球变暖背景下二氧化碳浓度升高在一定程度上促进了植被生长^[42], 而中国自 2000 年后相继实施的退耕还林还草、生态文明建设等一系列重大生态政策, 则通过提升森林覆盖率、改善生物多样性和增强土壤保持能

力, 改善了生态系统稳定性.

2.3.2 碳酸盐岩化学风化速率对生态系统稳定性的正负影响机制与时空关联特征

本研究采用相关分析方法, 对碳酸盐岩化学风化速率与生态系统稳定性之间的关系进行了探讨(图 6(a)). 结果显示, 碳酸盐岩化学风化速率与生态系统稳定性指数的整体相关系数均值为 0.19. 从空间分布来看, 超过 70% 的区域二者呈正相关关系, 表明在大部分地区, 随着碳酸盐岩化学风化速率的增加, 生态系统稳定性有所提升. 其中, 湖北宜昌、贵州毕节、云南昭通等地

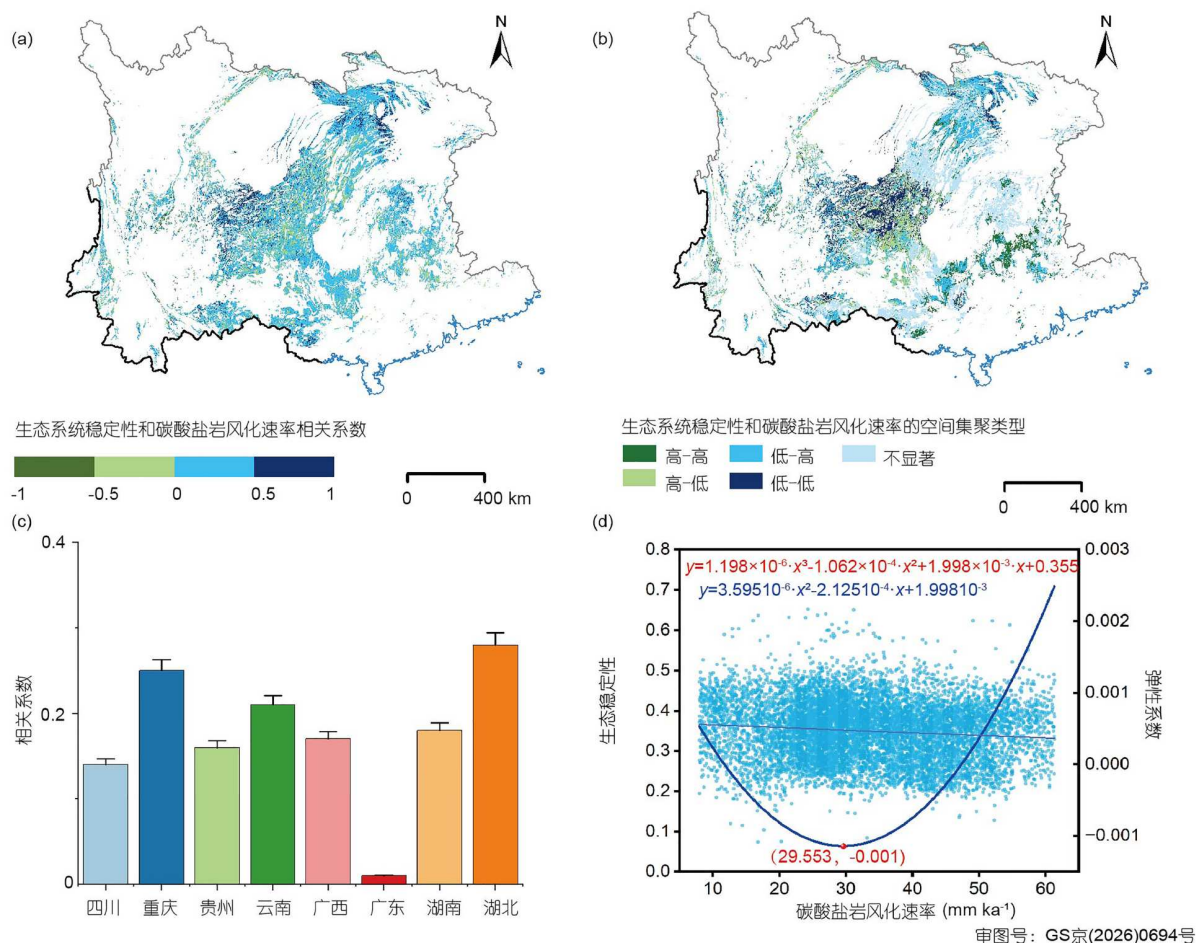


图6 碳酸盐岩化学风化速率对生态系统稳定性的影响。(a) 风化速率对生态系统稳定性的相关性; (b) 为LISA集聚类型划分, 显著性水平 $P < 0.05$; (c) 省级相关系数对比; (d) 风化速率对生态系统稳定性的阈值效应

Figure 6 The impact of carbonate rock weathering rates on ecosystem stability. (a) Correlation between carbonate rock weathering rates and ecosystem stability; (b) LISA aggregation type classification, significance level $P < 0.05$; (c) comparison of provincial correlation coefficients; (d) threshold effect of carbonate rock weathering rates on ecosystem stability

表现出显著正相关, 可能由于区域适度的风化过程有助于土壤发育和营养元素释放^[43], 从而增强了生态系统的抵抗力和恢复力。然而, 仍有约20%的地区呈现负相关关系, 尤其在贵州贵阳、安顺和遵义等地较为显著。该现象可能源于这些地区特殊的地形、水文条件或人类活动干扰, 导致风化过程与生态系统响应脱节, 反而降低了生态系统的稳定性。从省份尺度来看(图6(c)), 湖北省的生态系统稳定性与碳酸盐岩化学风化速率的相关性均值最高($r=0.28$), 这可能得益于其较为均衡的气候条件和植被覆盖, 使风化过程对生态系统产生积极支撑作用^[44]。

为进一步探究碳酸盐岩化学风化速率和生态系统

稳定性之间不同类型空间集聚模式, 构建了多项式Logit模型, 将集聚模式划分为高一高、高一低、低—高和低—低四类(图6(b))。其中高一高集聚区占7%, 代表风化过程与生态系统稳定性协同增强的区域。低—低集聚区占8%, 主要分布于重庆南部和四川宜宾等地。高一低集聚区占10%, 集中于湖南中部以及广西和湖北部分地区, 反映高风化背景下生态系统稳定性受抑的情形。低—高集聚区占13%, 主要位于云南西部、广西百色与河池和贵州黔南州, 表明在低风化条件下生态系统稳定性可由其他因素维持。上述结果表明, 碳酸盐岩风化对生态系统稳定性的影响具有显著的空间分异性与类型依赖性。

2.3.3 碳酸盐岩化学风化速率对生态系统稳定性的阈值效应

本研究利用非线性回归模型定量分析了生态系统稳定性与碳酸盐岩化学风化速率之间的非线性关系,并识别出明确的生态阈值(图6(d)).

结果表明,二者呈显著U型关系,其阈值位于风化速率约 29.55 mm ka^{-1} (95%置信区间 $29.1 \sim 30.0 \text{ mm ka}^{-1}$).具体表征如下:(1) 阈值之前,风化速率每提升1%,稳定性约上升1.7%;(2) 阈值之后,风化速率每提升1%,稳定性约下降4.0%. 该阈值表征了养分供给—生境适配性动态平衡的转折;(3) 低于阈值时,风化作用释放的Ca、Mg等矿质元素有限,制约植被生长与初级生产力,导致生态系统结构简单、抗干扰能力弱^[45,46];同时,岩石向土壤转化速率慢,土层薄、保水保肥能力差,生境承载力不足,进一步削弱生态系统稳定性^[47];(4) 超过阈值后,大量Ca、Mg的持续释放显著改善养分供给,提升植被覆盖度与生产力,强化生产者—消费者—分解者的物质循环;与此同时,高速风化固定的 CO_2 明显增加,通过降低大气 CO_2 的环境胁迫并经过 HCO_3^- 的水文输送促进陆—水系统碳储存,增强系统物质平衡与稳定性^[48].

2.4 风化过程的精准调节分区与策略

2.4.1 喀斯特风化过程的调节分区

本研究基于亚热带喀斯特地区碳酸盐岩化学风化

速率的时空异质性及其对农业可持续性(倒U型效应)与生态系统稳定性(U型效应)的双重阈值响应(农业 33.1 mm ka^{-1} 、生态 29.55 mm ka^{-1}),整合风化速率空间格局、农业可持续性水平及生态系统稳定性状况,通过空间叠置分析方法,将研究区划分为农业优化区、生态保育区、生态—农业协同区及生态修复区四大功能分区^[49](图7(a)).

(1) 农业优化区. 风化速率低于农业适宜与生态安全的风化速率阈值下限,占研究区总面积的7.27%,主要分布于贵州西部、云南东部及湖北中部等水热条件良好但风化微弱的区域(图7(b)). 区内土壤矿质养分释放受限,农业产能受低风化—养分供给不足的显著制约,是农业适配性提升的重点区域^[50].

(2) 生态保育区. 风化速率低于生态安全阈值下限,且多位于坡度较大、土壤侵蚀风险较高的高原与山地地形区,占总面积的27.77%,集中分布于云南东部、贵州大部、湖北西部及湖南中部等地(图7(c)). 该区生态系统稳定性面临弱风化—水土流失—植被退化的连锁风险,属于生态敏感与优先保护区域^[51].

(3) 生态-农业协同区. 风化速率同时处于农业与生态的双重适宜阈值区间内,占总面积的40.38%,是面积最大、系统状态相对均衡的区域,主要分布于广西中部、湖南南部等地(图7(d)). 该区优势在于风化速率适宜,土壤养分释放与植被生长需求匹配度高,农业可持续性 with 生态系统稳定性协调统一,核心任务是维持

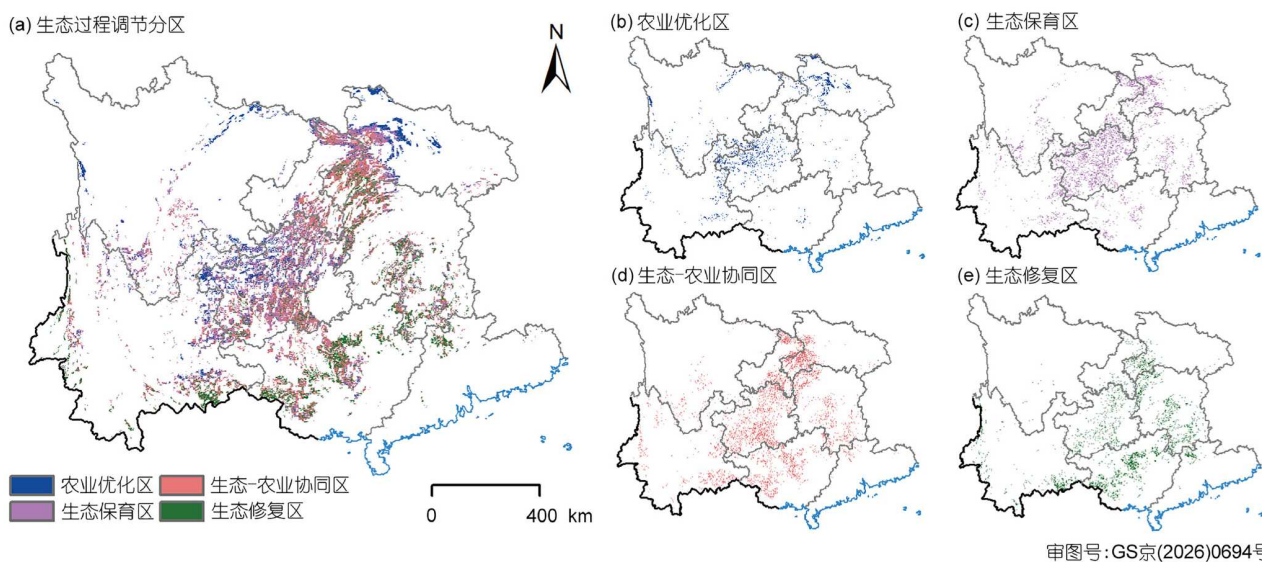


图7 碳酸盐岩风化过程的精准调节分区。(a) 生态过程调节区; (b) 农业优化区; (c) 生态保育区; (d) 生态-农业协同区; (e) 生态修复区
Figure 7 Precise regulation zones for the weathering process of carbonate rocks. (a) Ecological process regulation zones; (b) agricultural optimization zone; (c) ecological conservation area; (d) ecological-agricultural synergy zone; (e) ecological restoration area

适风化—双向适配的稳定格局^[52]。

(4) 生态修复区. 风化速率超过农业与生态安全的风化速率阈值上限, 占总面积的24.58%, 集中于云南东部、重庆东部、广西中西部、湖南大部等风化强烈区域(图7(e)). 该区域过度风化已导致石漠化发育、土壤漏失及植被严重退化, 农业与生态系统功能双双受损, 属于亟需开展系统修复的退化区域。

2.4.2 分区调控策略

基于上述分区结果及各区的核心矛盾, 本研究提出以下针对性强、操作性明确的差异化调控策略体系, 旨在通过分区施策、系统治理, 实现喀斯特地区农业可持续性 with 生态系统稳定性的协同提升^[53~58](表3)。

本研究基于风化速率双阈值效应理论, 整合多源空间数据, 构建了逻辑严谨、边界清晰、问题导向的喀斯特风化过程四类分区体系。针对各分区的主导限制因素与功能定位, 提出养分调控—生态保育—系统平衡—退化修复的差异化综合策略。该体系揭示了喀斯特农业-生态系统的空间分异特征, 形成从识别到调控的完整路径, 对西南喀斯特地区国土空间优化、农业可持续发展与生态安全建设具有指导与支撑作用。

3 讨论

3.1 与国际喀斯特研究的对比与启示

本研究将研究结果与国际喀斯特现有研究进行广泛对比(图8), 发现全球喀斯特地区(如欧洲阿尔卑斯

山、北美阿巴拉契亚山)碳酸盐岩化学风化速率为0~40 mm ka⁻¹。其中, Bai等人^[23]基于热力学溶蚀模型估算2019年贵州喀斯特地区风化速率约为30.3 mm ka⁻¹; 邱冬生等^[59]利用GEM-CO₂模型估算中国1991~2015年平均速率约为28 mm ka⁻¹; Li等人^[60]基于模型得到中国2000~2020年速率约22.3 mm ka⁻¹; 而Du等人^[61]基于热力学溶蚀模型1991~2020年速率约为22.76 mm ka⁻¹, Liu和Zhao^[62]基于水化学径流法估算的中国碳酸盐岩化学风化速率为19.14, 曾思博和刘再华^[63]基于热力学溶蚀模型估算中国2000~2014中国碳酸盐岩化学风化速率为25.41 mm ka⁻¹, Xiong等人^[37]基于Suchet模型Hartmann模型估算的全球碳酸盐岩化学风化速率为19.7 mm ka⁻¹, Gombert^[24]基于最大潜在溶蚀模型估算的全球碳酸盐岩化学风化速率为39.6 mm ka⁻¹。而本研究结果显著高于这一全球背景值, 可归因于中国西南亚热带地区高温多雨的气候条件与强烈的地形切割^[64~66], 二者共同促进了水岩反应速率。

与国际研究相比, 本文的创新在于: (1) 融合遥感数据与机器学习优化参数, 推动热力学模型向高时空分辨率拓展, 突破了传统点状观测与流域积分方法的尺度限制; (2) 首次在区域尺度上系统解析了风化过程对农业生态与生态系统服务的双维度影响机制, 明确了其养分释放—土壤漏失阈值效应, 弥补了国际研究多集中于水文地球化学过程而缺乏生态服务协同分析的不足。因此, 本研究不仅为区域风化碳汇评估提供了可靠的数据与方法支持, 也为全球喀斯特区风光-生态

表 3 喀斯特风化过程分区调控策略

Table 3 Zonal regulation strategy for karst weathering process

分区	范围	方向	特点	措施
农业优化区	农业基础较好、伴生肥力不均的区域	补肥调水 品种适配	以提升土壤肥力和水分利用效率为核心 注重养分循环与作物适应性	有机肥+秸秆还田+生物风化活化土壤矿物质养分 配套蓄水节水灌溉设施, 缓解季节性干旱 耐贫瘠作物+豆科间作固氮增效 补肥调水+品质适配, 维持适宜生产阈值区间
生态保育区	生态敏感区、重要水源地、陡坡地等需严格保护的区域	保护优先 防控结合	以自然恢复与人工保护相结合 强调生态红线管控与动态监测	退耕还林还草, 乡土乔灌草复层 划定严守生态红线, 限制开发 生态动态监测, 植被土壤生物多样性评估 关键阈值管控, 严格保护监测预警维持系统阈值
生态-农业协同区	农业与生态功能交织、需协调发展的区域	维持平衡 动态调控	兼顾农业生产与生态功能 强调系统监测与灵活调整	生态农业+轮作休耕+林下经济 风化-肥力-植被一体化监测评估 动态调管理强度, 秸秆还田培肥 动态平衡阈值, 监测调控稳定在适宜区间
生态修复区	生态退化严重、需进行系统修复的区域	阻退促恢复 系统重建	采用工程与生物措施结合 快速稳定立地条件并逐步恢复生态功能	客土+生态袋+植被混凝土稳坡 乡土速生树种+快速地表覆盖 系统治理降溶蚀, 生态协同恢复 工程生物措施突破退化阈值, 引导向可持续状态恢复

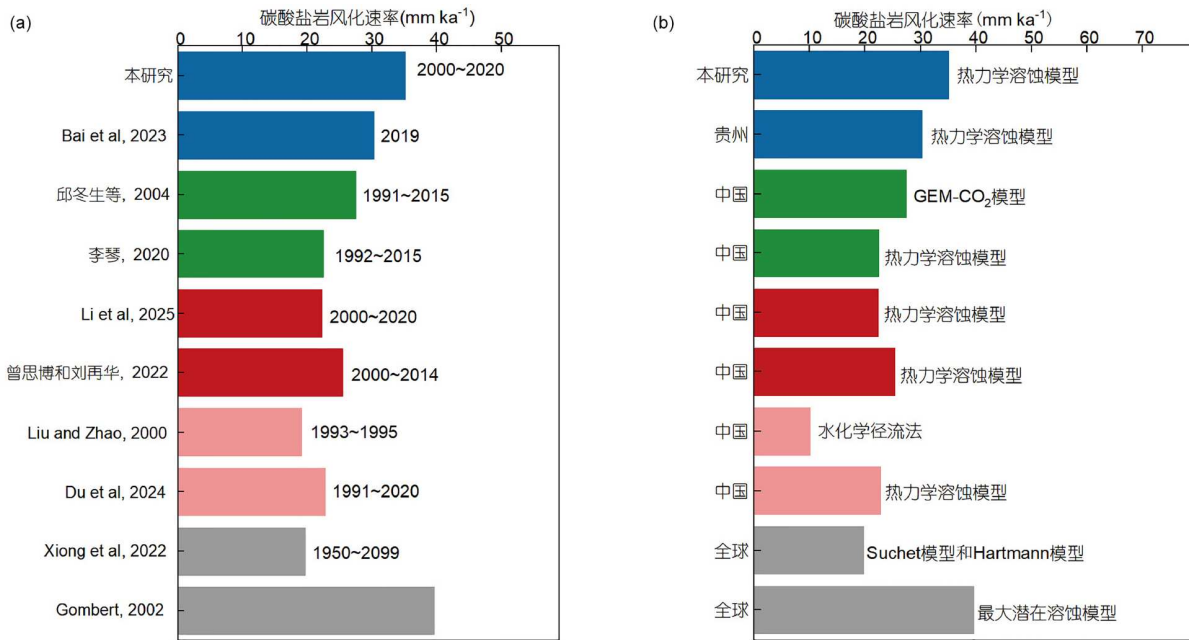


图 8 采用不同方法估算的碳酸盐岩化学风化速率^[3,24,37,59-63,66]
Figure 8 Estimation of carbonate rock weathering rate using different methods^[3,24,37,59-63,66]

耦合研究提供了跨尺度、多过程集成的新视角。

3.2 风化双刃剑效应的核心驱动机制

在亚热带喀斯特地区,碳酸盐岩化学风化通过养分释放、成土过程与水文调节等途径,对农业可持续性和生态系统稳定性产生兼具促进与胁迫的双刃剑效应。本研究表明,当风化速率处于低—中水平时,溶蚀过程可持续供给养分、改善土壤肥力并优化地下水文条件,从而促进农业生产与生态恢复;而风化强度过高则会加剧土层薄化、养分流失与石漠化,导致农业基础与生态功能同步退化。归纳起来,该双刃剑效应主要由以下三方面机制驱动:

(1) 土壤环境与资源供给的耦合作用。在风化强度适中条件下,碳酸盐岩释放的Ca、Mg等离子可提升薄层土壤肥力,改善理化结构并增强保水保肥能力,巩固农业生产基础。当风化速率接近或低于约 33.1 mm ka^{-1} 时,土层养分得到持续补给,作物生产力与土壤健康呈正向提升。然而,一旦风化速率超过该阈值,土壤和养分沿岩溶裂隙大量流失,土层急剧“瘦身”,成土作用减弱,肥力不足加速石漠化和农业退化^[67]。

(2) 气候-水文驱动与地质作用的协同增益或放大。研究区年降水为800~1600 mm,夏季风强度变化在不同阶段呈现出明显的拉升或抑制效应^[68]。2000~2010

年,风化速率由 35.1 mm ka^{-1} 缓慢增至 38.6 mm ka^{-1} ,主要受增温和适度降雨促进;2011~2015年,极端降水事件增多,风化速率跃升至 44.39 mm ka^{-1} ,并显著放大土壤流失。降水与岩溶裂隙共同决定风化产物的下渗与径流输出,在高水热条件下,若土壤与植被管理不足,风化过程易由供肥成土转向损基退化路径^[69]。

(3) 人类活动与生态-农业系统的交互调控。不合理的农业垦殖和水土利用会破坏植被与土体结构,强化侵蚀与渗漏,形成高风化-高退化的负反馈循环^[70]。相反,在实施石漠化治理、优化灌溉和有机培肥等措施的区域,即使风化作用较强,土壤仍可维持较好的养分与水分状况^[71]。表明精细化管理有助于将风化过程约束在农业与生态双受益的动态区间内。值得注意的是,本研究还发现生态系统稳定性在风化速率接近 29.55 mm ka^{-1} 时(即生态阈值),出现由“促进”向“胁迫”的临界转折,提示区域规划需同时兼顾农业与生态的双重约束。

总体而言,碳酸盐岩风化通过改变土壤环境和水文过程,使系统随风化速率增加经历由资源增益向环境损耗的转变,该过程受气候-地质条件与人类活动方式的多重调节。只有在关键阈值附近实现风化过程的精准识别与分区管控,才能在养分供给与石漠化风险之间维持动态平衡,推动喀斯特地区农业可持续性与

生态系统稳定性的协同提升。

3.3 研究的局限性与未来方向

本研究系统集成了多源遥感观测、地面数据与地理空间模型,在区域尺度上量化了亚热带喀斯特碳酸盐岩化学风化的时空动态,并创新性地揭示了其对农业可持续性和生态系统稳定性的双阈值调控效应,进而构建了分区分类的调控框架。

然而,研究仍存在以下不足需要在后续的研究中继续完善。首先,尽管本研究已构建了农业可持续性综合评价体系,研究构建的评价指标涵盖了土壤、气候与经济等维度,但指标选取仍需结合区域独特性进行不断完善。未来需构建水土耦合-人文影响的综合诊断框架,以增强评价的针对性与政策指导性。其次,本研究从生物多样性、土壤保持和植被活力等地表维度综合评价了生态系统稳定性,但评估体系未充分整合表征喀斯特地上-地下双向过程的要素,未来需发展包含地下生物多样性与水文功能的稳定性评价体系。此外,本研究基于历史时段阈值识别提出的四区调控方案,具有明确的科学依据和空间指导性。然而,该策略在应对未来气候变化和剧烈人类活动引发的动态干扰方面,其适应性仍需检验。最后,本研究主要基于历史观测数据(2000~2020年)揭示了规律,尚未构建模型对未来气候及社会经济情景下风化速率的演化趋势进行预测,也未能深入探讨温度、降水、土地利用等多重驱动因子在未来情境下的耦合作用机制,这限制了对长期风险的前瞻性评估。因此,该策略的长期适应性与调控效能仍需通过情景模拟与实证研究加以完善。

4 结论

本文系统解析了亚热带喀斯特碳酸盐岩化学风化对农业可持续性与生态系统稳定性的双刃剑效应及调节机制,得出以下核心结论:

(1) 亚热带喀斯特碳酸盐岩化学风化速率呈西高东低、先升后稳特征,整体具有高强度、强空间异质性特征,增长速率从2000的 35.1 mm ka^{-1} 升至 38.6 mm ka^{-1} ,2011年降至 16.66 mm ka^{-1} 后,2015年峰值达 44.39 mm ka^{-1} ,增幅高达140%,岩性、降水与坡度是主要影响因素;

(2) 2000~2020年中国西南喀斯特地区农业可持续性指数显著提升,呈阶梯式增长与中部低、东西高的空间格局,其时空分异受自然、政策等驱动;碳酸盐岩风化对农业可持续性呈倒U型双重影响,存在 $30.83\sim 33.09 \text{ mm ka}^{-1}$ 的关键阈值,该阈值为区域土地管理与生态保护提供科学依据。

(3) 2000~2020年西南喀斯特生态系统稳定性波动上升且空间分异显著,受气候与政策驱动;碳酸盐岩风化与稳定性呈正相关主导的U型关系, 29.55 mm ka^{-1} 为关键阈值,表征养分供给-生境适配性平衡转折;

(4) 划分了4个精准调节分区,提出维持-优化-保育-修复的差异化策略,为喀斯特地区生态保护与农业发展协同推进提供了技术方案。

本研究不仅丰富了喀斯特地貌与农业和生态系统耦合的理论体系,也为全球脆弱喀斯特地区的可持续发展提供了可借鉴的中国经验。未来需进一步深化遥感-GIS技术与实地观测的结合,提升调节策略的精准性与可操作性。

参考文献

- Wang K L, Yue Y M, Chen H S, et al. Mechanisms and implementation pathways for integrating science-technology poverty alleviation with ecosystem service improvement (in Chinese). *Bull Chin Acad Sci*, 2020, 35: 1264–1272 [王克林, 岳跃民, 陈洪松, 等. 科技扶贫与生态系统服务提升融合的机制与实现途径. *中国科学院院刊*, 2020, 35: 1264–1272]
- Chen H S, Zhang J, Lian J J, et al. Hydrological processes and vegetation interactions in the Karst critical zone of Southwest China (in Chinese). *Chin J Appl Ecol*, 2025, 37: 1–14 [陈洪松, 张君, 连晋姣, 等. 西南喀斯特关键带水文过程与植被的相互作用. *应用生态学报*, 2025, 37: 1–14]
- Bai X Y, Ran C, Chen J A, et al. Methods, advances and prospects for ecosystem health diagnosis in China's karst regions (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]
- Jiang Z C, Li Z W, Luo W Q, et al. Research progress and prospects of soil and water leakage in karst areas of Southwest China (in Chinese). *Sci Soil Water Conserv*, 2024, 22: 1–11 [蒋忠诚, 李振伟, 罗为群, 等. 西南岩溶区水土流失研究进展与展望. *中国水土保持科学*, 2024, 22: 1–11]
- Liu Z H. New progress and prospects in the study of rock-weathering-related carbon sinks (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2012, 57: 95–102 [刘再华. 岩石风化碳汇研究的最新进展和展望. *科学通报*, 2012, 57: 95–102]
- Cao J H, Yang H, Kang Z Q. Preliminary estimation of carbon sink flux of regional carbonate dissolution: a case study of the Pearl River Basin (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2011, 56: 2181–2187 [曹建华, 杨慧, 康志强. 区域碳酸盐岩溶蚀作用碳汇通量估算初探: 以珠江流域为例. *科学通报*,

- 2011, 56: 2181–2187]
- 7 Wu L, Bai X, Li C, et al. Assessment of carbon sinks caused by the chemical weathering of carbonate rocks under the influence of exogenous acids: methods, progress, and prospects. *Sci China Earth Sci*, 2025, 68: 1785–1804 [吴路华, 白晓永, 李朝君, 等. 外源酸作用下碳酸盐岩化学风化碳汇评估: 方法、进展与展望. *中国科学: 地球科学*, 2025, 55: 1837–1855]
 - 8 Zeng S, Liu Z, Kaufmann G. Sensitivity of the global carbonate weathering carbon-sink flux to climate and land-use changes. *Nat Commun*, 2019, 10: 5749
 - 9 Chen H S, Feng T, Li C Z, et al. Research status and prospects of soil erosion characteristics in karst areas of Southwest China (in Chinese). *J Soil Water Conserv*, 2018, 32: 10–16 [陈洪松, 冯腾, 李成志, 等. 西南喀斯特地区土壤侵蚀特征研究现状与展望. *水土保持学报*, 2018, 32: 10–16]
 - 10 Wang S, Ji H, Ouyang Z, et al. Preliminary study on weathering and pedogenesis of carbonate rock. *Sci China Ser D-Earth Sci*, 1999, 42: 572–581 [王世杰, 季宏兵, 欧阳自远, 等. 碳酸盐岩风化成土作用的初步研究. *中国科学: 地球科学*, 1999, 29: 441–449]
 - 11 Veldkamp A, Feijtel T C. Parent material controlled subsoil weathering in a chrono sequence, the Allier terraces, Limagne Rift Valley, France. *CATENA*, 1992, 19: 475–489
 - 12 Taylor L L, Quirk J, Thorley R M S, et al. Enhanced weathering strategies for stabilizing climate and averting ocean acidification. *Nat Clim Change*, 2016, 6: 402–406
 - 13 Beerling D J, Kantzas E P, Lomas M R, et al. Potential for large-scale CO₂ removal via enhanced rock weathering with croplands. *Nature*, 2020, 583: 242–248
 - 14 Wei H, Deng Y, Lin L, et al. Improved soil composition promotes nutrient recovery during vegetation restoration in karst peak-cluster depressions. *CATENA*, 2023, 222: 106769
 - 15 Wang Y, Dungait J A J, Xing K, et al. Persistence of soil microbial function at the rock-soil interface in degraded karst topsoils. *Land Degrad Dev*, 2020, 31: 251–265
 - 16 Amann T, Hartmann J, Struyf E, et al. Enhanced weathering and related element fluxes—a cropland mesocosm approach. *Biogeosciences*, 2020, 17: 103–119
 - 17 Wang S, Yan Y, Zhao Y, et al. Co-evolution among soil thickness, epikarst weathering degree, and runoff characteristics on a subtropical karst hillslope. *J Hydrol*, 2024, 628: 130499
 - 18 Liu X, Fu Z, Zhang W, et al. Soluble carbon loss through multiple runoff components in the shallow subsurface of a karst hillslope: impact of critical zone structure and land use. *CATENA*, 2023, 222: 106868
 - 19 Peng S, Yang D, Dai Q, et al. Escalating hot-dry extremes in Southwest China Karst. *J Hydrol-Regional Studies*, 2024, 53: 101838
 - 20 Zhu D, Xiong K, Xiao H. Multi-time scale variability of rainfall erosivity and erosivity density in the karst region of southern China, 1960–2017. *CATENA*, 2021, 197: 104977
 - 21 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
 - 22 Hartmann J, Moosdorf N. The new global lithological map database GLiM: a representation of rock properties at the Earth surface. *Geochem Geophys Geosyst*, 2012, 13: 2012GC004370
 - 23 Bai X, Zhang S, Li C, et al. A carbon-neutrality-capacity index for evaluating carbon sink contributions. *Environ Sci EcoTech*, 2023, 15: 100237
 - 24 Gombert P. Role of karstic dissolution in global carbon cycle. *Glob Planet Change*, 2002, 33: 177–184
 - 25 Sun Y, Zhong H, Ding Y, et al. Exploring the diverse response of cropland vegetation to climatic factors and irrigation across China. *Agronomy*, 2024, 14: 188
 - 26 Wu L, Chen H, Chen D, et al. Soil biota diversity and plant diversity both contributed to ecosystem stability in grasslands. *Ecol Lett*, 2023, 26: 858–868
 - 27 Ren L, Huo J, Xiang X, et al. Environmental conditions are the dominant factor influencing stability of terrestrial ecosystems on the Tibetan plateau. *Commun Earth Environ*, 2023, 4: 196
 - 28 White H J, Gaul W, Sadykova D, et al. Quantifying large-scale ecosystem stability with remote sensing data. *Remote Sens Ecol Conserv*, 2020, 6: 354–365
 - 29 Zhu Q, Cai Y. Integrating ecological risk, ecosystem health, and ecosystem services for assessing regional ecological security and its driving factors: insights from a large river basin in China. *Ecol Indic*, 2023, 155: 110954
 - 30 Lou Y, Xu M, Chen X, et al. Stratification of soil organic C, N and C:N ratio as affected by conservation tillage in two maize fields of China. *CATENA*, 2012, 95: 124–130
 - 31 Li C, Lu X, Chen J, et al. Silicate chemical weathering disrupts the global patterns of phosphorus limitation. *Nat Commun*, 2025, 16: 10742
 - 32 Pohlert T, Hillebrand G, Breitung V. Trends of persistent organic pollutants in the suspended matter of the River Rhine. *Hydrological Processes*, 2011, 25: 3803–3817
 - 33 Wang J, Peng P, Liu T, et al. Revealing the spatiotemporal changes in land use and landscape patterns and their effects on ecosystem services: a

- case study in the western Sichuan Urban Agglomeration, China. *Land*, 2025, 14: 1012
- 34 He J, Shi X. Detection of social-ecological drivers and impact thresholds of ecological degradation and ecological restoration in the last three decades. *J Environ Manage*, 2022, 318: 115513
- 35 Chen H L, Jiang L S, Wang Z B. Spatial temporal coupling and influencing factors of land-use carbon emissions and ecosystem service value in the Yellow River Basin (in Chinese). *Environ Sci*, 2025, 46: 3536–3545 [陈慧琳, 姜鲁光, 王志宝. 黄河流域土地利用碳排放与生态系统服务价值的时空耦合及影响因素. *环境科学*, 2025, 46: 3536–3545]
- 36 Chai N, Lv G, Xiao J, et al. Seasonal and interannual variations of hydrochemistry in the middle Yellow River. *J Hydrol*, 2025, 662: 133891
- 37 Xiong L, Bai X, Zhao C, et al. High-resolution data sets for global carbonate and silicate rock weathering carbon sinks and their change trends. *Earths Future*, 2022, 10: e2022EF002746
- 38 Zhang D, Wang W, Zhou W, et al. The effect on poverty alleviation and income increase of rural land consolidation in different models: a China study. *Land Use Policy*, 2020, 99: 104989
- 39 Ouyang N, Rui X, Zhang X, et al. Spatiotemporal evolution of ecosystem health and its driving factors in the southwestern karst regions of China. *Ecol Indic*, 2024, 166: 112530
- 40 Wu Z, Zhu D, Xiong K, et al. Dynamics of landscape ecological quality based on benefit evaluation coupled with the rocky desertification control in South China Karst. *Ecol Indic*, 2022, 138: 108870
- 41 Ma S, Wang L J, Jiang J, et al. Land use/land cover change and soil property variation increased flood risk in the black soil region, China, in the last 40 years. *Environ Impact Assessment Rev*, 2024, 104: 107314
- 42 Davis E C, Sohngen B, Lewis D J. The effect of carbon fertilization on naturally regenerated and planted US forests. *Nat Commun*, 2022, 13: 5490
- 43 Zeng S, Liu Z, Jiang Y, et al. A greening Earth has reversed the trend of decreasing carbonate weathering under a warming climate. *Nat Commun*, 2025, 16: 2583
- 44 Ji J, Xu M, Wang S, et al. Analysis of spatial pattern of vegetation resilience and influencing factors in Hubei Province based on long time series remote sensing data. *Environ Sustainability Indicators*, 2025, 27: 100742
- 45 Miller E K, Blum J D, Friedland A J. Determination of soil exchangeable-cation loss and weathering rates using Sr isotopes. *Nature*, 1993, 362: 438–441
- 46 Lawrence G B, David M B, Shortle W C. A new mechanism for calcium loss in forest-floor soils. *Nature*, 1995, 378: 162–165
- 47 Jiang Z, Liu H, Wang H, et al. Bedrock geochemistry influences vegetation growth by regulating the regolith water holding capacity. *Nat Commun*, 2020, 11: 2392
- 48 Zhang Q. The stability of carbon sink effect related to carbonate rock dissolution: a case study of the Caohai Lake geological carbon sink. *Acta Geosci Sin*, 2012, 33: 947–952
- 49 Wu H, Li Z, Deng X, et al. Enhancing agricultural sustainability: optimizing crop planting structures and spatial layouts within the water-land-energy-economy-environment-food nexus. *Geography Sustainability*, 2025, 6: 100258
- 50 Beerling D J, Reinhard C T, James R H, et al. Challenges and opportunities in scaling enhanced weathering for carbon dioxide removal. *Nat Rev Earth Environ*, 2025, 6: 672–686
- 51 Maher K, von Blanckenburg F. The circular nutrient economy of terrestrial ecosystems and the consequences for rock weathering. *Front Environ Sci*, 2023, 10: 1066959
- 52 Beerling D J, Epihov D Z, Kantola I B, et al. Enhanced weathering in the US Corn Belt delivers carbon removal with agronomic benefits. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2024, 121: e2319436121
- 53 Wang K L, Chen H S, Yue Y M. Experiment and demonstration on degraded mechanism and its adaptive restoration of karst ecosystems in Northwest Guangxi (in Chinese). *Sci Technol Dev*, 2015, 5: 1–8 [王克林, 陈洪松, 岳跃民. 桂西北喀斯特生态系统退化机制与适应性修复试验示范研究. *科技促进发展*, 2015, 5: 1–8]
- 54 Zhang P, Chen X, Wei T, et al. Effects of straw incorporation on the soil nutrient contents, enzyme activities, and crop yield in a semiarid region of China. *Soil Till Res*, 2016, 160: 65–72
- 55 Haynes R J. Labile organic matter fractions as central components of the quality of agricultural soils: an overview. *Adv Agron*, 2005, 85: 221–268
- 56 Xu Y Q, Peng J. Effects of simulated land use change on soil erosion in the Maotiao River Watershed of Guizhou Province (in Chinese). *Resour Sci*, 2008, 30: 1218–1225 [许月卿, 彭建. 贵州猫跳河流域土地利用变化及其对土壤侵蚀的影响. *资源科学*, 2008, 30: 1218–1225]
- 57 Liu Y L, Li Y, Qin S, et al. A discussion on land fallow rotation problems in ecologically fragile areas of the southwest karst area: a case study of Guizhou Province (in Chinese). *Chin J Eco-Agric*, 2018, 26: 1117–1124 [刘彦伶, 李渝, 秦松, 等. 西南喀斯特生态脆弱区实行轮作休耕问题探讨-以贵州省为例. *中国生态农业学报*, 2018, 26: 1117–1124]
- 58 Li Y, Liu Z Q. Soil erosion and physicochemical properties of different land types in rocky desertification area (in Chinese). *J For Environ*, 2019, 39: 515–523 [李渊, 刘子琦. 石漠化区不同土地类型土壤侵蚀与理化性质特征. *森林与环境学报*, 2019, 39: 515–523]
- 59 Qiu D S, Zhuang D F, Hu Y F, et al. Estimation of carbon sink capacity caused by rock weathering in China (in Chinese). *Earth Sci*, 2004, 29: 177–

- 182 [邱冬生, 庄大方, 胡云锋, 等. 中国岩石风化作用所致的碳汇能力估算. 地球科学, 2004, 29: 177–182]
- 60 Li M, Tan Q, Luo G, et al. Response of carbonate rock weathering carbon sink to seismic peak ground acceleration in China. *Glob Planet Change*, 2025, 246: 104729
- 61 Du C, Bai X, Li Y, et al. Storage, form, and influencing factors of karst inorganic carbon in a carbonate area in China. *Sci 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]
- 62 Liu Z, Zhao J. Contribution of carbonate rock weathering to the atmospheric CO₂ sink. *Environ Geol*, 2000, 39: 1053–1058
- 63 Zeng S B, Liu Z H. Karst-related carbon sink and the carbon neutral potential by carbonate liming in non-karst areas in China (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2022, 67: 4116–4129 [曾思博, 刘再华. 我国岩溶碳汇和在非岩溶区播撒碳酸盐粉的碳中和潜力. 科学通报, 2022, 67: 4116–4129]
- 64 Li Y. Research on the characteristics of karst tourism geological resources and environmental protection in China Southwest Region. *J Sociol Ethnol*, 2021, 3: 1–10
- 65 Li X, Lu X, Xu Y, et al. Large effects of extreme rainfall event on dissolved carbon in a subtropical karst river in South China. *Environ Res*, 2025, 279: 121906
- 66 Li Q. Soil erosion process and its effect on organic carbon migration in China's carbonate rock areas (in Chinese). Doctor Dissertation. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2020 [李琴. 中国碳酸盐岩地区的土壤侵蚀过程及其对有机碳运移的影响, 博士学位论文. 北京: 中国科学院研究生院, 2020]
- 67 Peng T, Wang S. Effects of land use, land cover and rainfall regimes on the surface runoff and soil loss on karst slopes in southwest China. *CATENA*, 2012, 90: 53–62
- 68 Wei B, Li Z, Duan L, et al. Vegetation types and rainfall regimes impact on surface runoff and soil erosion over 10 years in karst hillslopes. *CATENA*, 2023, 232: 107443
- 69 Dixon J L, Heimsath A M, Kaste J, et al. Climate-driven processes of hillslope weathering. *Geology*, 2009, 37: 975–978
- 70 Zhao L, Hou R. Human causes of soil loss in rural karst environments: a case study of Guizhou, China. *Sci Rep*, 2019, 9: 3225
- 71 Peng X, Dai Q. Drivers of soil erosion and subsurface loss by soil leakage during karst rocky desertification in SW China. *Int Soil Water Conservation Res*, 2022, 10: 217–227

Summary for “碳酸盐岩风化对亚热带农业可持续性和生态系统稳定性的影响及其分区调控”

Impacts of carbonate rock weathering on subtropical agricultural sustainability and ecosystem stability and their zonal regulation

Xiaoyong Bai^{1,2*}, Lian Xiong^{2,11}, Junhua Yan³, Nianpeng He⁴, Jinxing Zhou⁵, Chiyuan Miao⁶, Yang Gao⁷, Chao Yue⁸, Xiao Wei¹, Xudong Peng¹, Zhanpeng Liu⁹, Qunqun Deng⁹, Zhen Wei⁹, Yu Jiang⁹, Xuebin Xi⁹, Xingshuang Wang⁹, Junhan Li^{2,11}, Shiqi Tian¹⁰, Chaochao Du^{2,11} & Yuanhuan Xie^{2,11}

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 South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China

⁴ Institute of Carbon Neutrality/School of Ecology, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

⁵ Yunnan Jianshui Research Station, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

⁶ State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

⁷ Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

⁸ State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on The Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

⁹ School of Geography and Environmental Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China

¹⁰ School of Earth Sciences, Yunnan University, Kunming 650500, China

¹¹ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

* Corresponding author, E-mail: baixiaoyong@vip.skleg.cn

As a key component of global karst systems, the core region of subtropical karst in China has unique characteristics in the chemical weathering process of carbonate rocks. This process results in a low regional soil-forming rate and high agricultural pressure, profoundly affecting the sustainability of agriculture and the stability of ecosystems in karst areas. However, the dual effects of carbonate rock chemical weathering on agricultural sustainability and ecosystem stability have not been systematically quantified, and the nonlinear relationships and spatial heterogeneity involved remain unclear, which limits scientific understanding and the application of weathering in regional sustainable development. Based on multi-source remote sensing and ground observation data from 2000 to 2020, this study employed a thermodynamic dissolution model, threshold analysis, and spatial correlation methods to examine the spatiotemporal dynamics of weathering rates and their underlying mechanisms. High-resolution weathering datasets were established to reveal long-term trends and spatial disparities across the karst region. The results show that during the study period, the regional average weathering rate increased significantly, at an annual rate of 0.38 mm ka^{-1} , with spatial patterns of high rates in the southeast and low rates in the northwest. Critical thresholds of 33.1 mm ka^{-1} and 29.55 mm ka^{-1} exist for agricultural sustainability and ecosystem stability, respectively. Below the thresholds, weathering exerts a dominant positive effect via nutrient supply and habitat improvement; which effectively enhances soil fertility, vegetation productivity, and ecological resilience. while above the thresholds, it shifts to a negative effect driven by soil leakage, rocky desertification, and other adverse processes. 89.6% of the study area showed a positive correlation between weathering and agricultural sustainability, and 70% showed a positive correlation between weathering and ecosystem stability. In contrast, areas with high weathering rates formed agglomerations characterized by high weathering and low sustainability. These spatial clusters further highlight the risk of excessive weathering in ecologically fragile zones. Therefore, the impact of carbonate rock weathering on the karst agroecosystem is not unidirectional or linear; instead, it drives a dynamic transition between resource supply and environmental stress through a dual-threshold effect. This finding challenges the traditional simplistic perception that weathering is either exclusively beneficial or harmful. It also highlights the importance of threshold-based management for karst ecosystems. These results support targeted governance and long-term stability maintenance in vulnerable karst regions across the world. This study provides a critical scientific basis and zoned regulation schemes for global karst regions to address climate change and coordinate agricultural development with ecological conservation.

subtropical agriculture, Karst, carbonate rock weathering, sustainability, ecosystem stability

doi: [10.1360/CSB-2026-0019](https://doi.org/10.1360/CSB-2026-0019)