



明清时期人类干扰加剧喀斯特洼地侵蚀产沙

袁帅^{1,2,3}, 岳跃民^{1,2*}, 张信宝^{4,5}, 王璐^{1,2}, 翟璐^{1,2,3}, 王克林^{1,2}

- 中国科学院亚热带农业生态研究所广西喀斯特生态过程与服务重点实验室, 长沙 410125;
- 中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站, 环江 547100;
- 中国科学院大学, 北京 100049;
- 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041;
- 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 550002

* 通讯作者, E-mail: ymyue@isa.ac.cn

收稿日期: 2023-12-15; 收修改稿日期: 2024-07-19; 接受日期: 2024-08-06; 网络版发表日期: 2024-09-14
国家自然科学基金项目(U20A2048、41930652)和国家重点研发计划项目(2022YFF1300700)资助

摘要 大规模生态修复背景下, 中国西南喀斯特地区成为近20年来全球植被覆盖“变绿”的热点区, 但地质条件制约下部分地区森林景观恢复困难, 亟须了解历史时期的人类扰动事件对当前西南喀斯特地区难成林区石漠化的影响, 以指导未来喀斯特地区精准还林还草. 本研究利用喀斯特洼地沉积物¹³⁷Cs、²¹⁰Pb和炭屑¹⁴C定年方法, 量化了典型喀斯特峰丛洼地近500年来产沙变化, 结合历史资料识别了历史侵蚀产沙相关的主要人类扰动事件. 结果表明: 三个洼地1921~1963年期间的侵蚀产沙均显著高于1963~2021年, 明清时期(1504~1812年)的沉积速率(0.64~1.33 cm a⁻¹)与产沙模数(2.51~13.11 t ha⁻¹ a⁻¹)均高于近百年(1921~2021年)的沉积速率(0.26~0.95 cm a⁻¹)与产沙模数(0.95~6.99 t ha⁻¹ a⁻¹). 明清时期的重建数据与文献资料表明, 1500~2000年人口、耕地、粮食及森林面积等变化与同期毁林事件存在经验联系, 17世纪瑶族迁徙和玉米引种后, 广西地区的人口与耕地增加了3倍以上, 森林面积显著减少, 可能是加剧洼地侵蚀产沙的主要原因. 本研究对于理解该地区石漠化演变历史、预测造林潜力有重要意义.

关键词 喀斯特地区, ¹⁴C定年, 峰丛洼地, 少数民族迁徙, 产沙模数

1 引言

中国西南喀斯特地区是世界上面积最大的喀斯特集中连片分布区, 该区位于长江和珠江流域的上游, 承载了2.29亿人口, 是“两江”流域重要的水资源和生态安全屏障. 受可溶性碳酸盐岩地质背景影响, 地上-地下二元水文地质结构发育, 降水渗漏迅速, 成土缓慢,

土层浅薄, 植被石生旱生, 耕地资源稀缺, 对人类活动响应极为敏感(Jiang等, 2014; Peng等, 2023). 大规模生态保护与修复下, 西南喀斯特地区实现了石漠化面积净减少与石漠化程度显著改善的阶段性成果, 已成为近20年来全球“变绿”的热点区之一(Brandt等, 2018; Chen等, 2019; 王克林等, 2020).

然而, 受碳酸盐岩地质背景制约, 部分区域成林困

中文引用格式: 袁帅, 岳跃民, 张信宝, 王璐, 翟璐, 王克林. 2024. 明清时期人类干扰加剧喀斯特洼地侵蚀产沙. 中国科学: 地球科学, 54(11): 3587-3596, doi: 10.1360/SSTe-2023-0317

英文引用格式: Yuan S, Yue Y, Zhang X, Wang L, Zhai L, Wang K. 2024. Human disturbance exacerbated erosion and deposition in the karst peak-cluster depressions during the Ming and Qing dynasties. Science China Earth Sciences, 67(11): 3550-3561, <https://doi.org/10.1007/s11430-023-1406-y>

难,影响喀斯特地区“变绿”的可持续性.对自然恢复而言,由于碳酸盐岩成土慢、土壤总量少且土层薄,持水能力差,植被易干旱缺水,加上碳酸盐岩石质山地土壤-植被系统中矿质养分不足,抑制植被恢复生长,人为破坏后自然恢复的植被正向演替极为缓慢.白云岩地区植被自然恢复以草丛为主,石灰岩地区常常形成相对稳定的低矮灌丛,几十年内难以自然恢复成林(郭柯等, 2011).

了解石漠化演变和人类活动影响有助于从历史视角判断当下喀斯特地区造林潜力.史料记载表明,人为毁林是造成石漠化的重要原因之一.在交通不便的喀斯特山区,明代以前,人类活动对自然生态系统的干扰作用小,只开垦了部分洼地、谷地为农田,森林植被尚保持着较为原始的状态(郑维宽, 2007).随着明清时期瑶族移民的大规模迁入,近500年来西南生态环境发生巨大变迁,特别是在改土归流、汉族移民迁入、高产高适应作物引种等驱动下,广泛分布的原生态森林景观演变为农业生态景观,历史时期已发生了一定规模的人为干扰毁林(蓝勇, 1992).如《富川县志》载:“山主招人力耕火种,烈泽焚林,雨下荡然流去,雨止即干,无渗润入土,以致土燥石枯,水源短促.”然而,历史文献记载较为零散且可能有一定的主观性,难以连续且定量衡量一个地区石漠化演变进程.喀斯特地区广泛分布峰丛洼地面积约12.5万km²,约占西南喀斯

特区域总面积的1/4.洼地多被陡峻的丘峰环抱,面积从不足1ha到几百公顷不等,暴雨洪水在洼地内有足够停留时间,坡面侵蚀产沙随径流在洼地内停滞(图1a),形成逐年沉积层,为反演流域地表过程提供可靠记录(图1c).原始植被未遭受破坏时喀斯特坡地的土壤流失轻微;但在森林植被破坏后的短期内,土壤大量流失,产沙加剧,使得洼地沉积物增多;当易于流失的表层土壤流失殆尽后,土壤侵蚀速率重新变得轻微(图1b)(王世杰等, 2020).人类干扰下洼地沉积物的充填过程及沉积物赋存的历史环境信息,使利用洼地沉积物来剖析历史时期的流域地表过程及人类干扰成因成为可能(张信宝等, 2011; Mabit等, 2014).

人工核素¹³⁷Cs、自然核素²¹⁰Pb_{ex}和宇宙成因¹⁴C定年是沉积断代的常用手段,广泛应用于湖泊、水库及海湾沉积环境的沉积物定年.其中,¹³⁷Cs定年可确定自1963年以来的沉积,²¹⁰Pb_{ex}定年和¹⁴C定年可分别用于建立近100年和大于100年的沉积时间序列(张信宝等, 2011; Zhang等, 2020),从而计算沉积速率(Zhang等, 2023)、重建沉积历史(Benmansour等, 2013)、分析历史时期气候变化(Duan等, 2023)、溯源石漠化演变(Cao等, 2020)、反映人类活动强度(Atahan等, 2008)、重建历史植被(Ren等, 2022)及其他社会-生态过程.已有研究表明,在喀斯特地下漏失和农耕地的人为扰动双重影响下同位素定年仍能提供可靠的时标,为重建

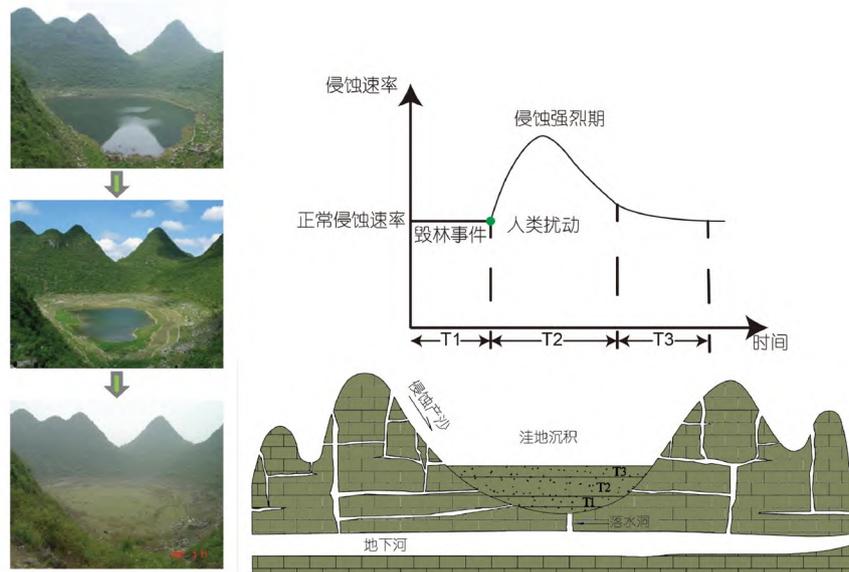


图1 喀斯特洼地人类扰动与侵蚀产沙沉积

历史时期峰丛洼地侵蚀沉积过程提供技术(Tian等, 2023).

本研究结合历史记载及文献资料, 以明清时期人为干扰显著的桂西北典型喀斯特洼地为研究对象, 解析人类活动干扰下洼地沉积物的侵蚀产沙沉积过程变化; 利用洼地沉积物 ^{137}Cs 、 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 和炭屑 ^{14}C 定年技术, 确定沉积物年代; 量化洼地沉积物的沉积速率及产沙模数变化, 并结合相应历史时期人类干扰的数据重建与史料文献记载及古气候记录, 探讨历史时期人口、耕地、粮食及森林变化与同期人类干扰的关联, 解释历史时期地表侵蚀演变的驱动因素, 为理解石漠化演替历史、助力喀斯特地区生态恢复提供科学依据.

2 数据与方法

2.1 研究区域与钻孔采样

桂西北地区($103^{\circ}24'\sim 109^{\circ}46'\text{E}$, $21^{\circ}36'\sim 26^{\circ}10'\text{N}$)位

于贵州高原向广西盆地过渡的斜坡地带, 岩溶作用强烈, 自然地域差异显著, 峰丛、谷地、洼地等地貌景观交错分布(Gao和Wang, 2019; Li和Xiong, 2021). 该区处于西南季风区与东亚季风区的交汇地带, 降水充沛, 雨热同期, 年均降水量为900~1600mm, 年均气温为 $14.5\sim 20^{\circ}\text{C}$, 气候分异特征明显. 由于成土速率缓慢, 耕地资源十分匮乏, 山麓和山坡耕地多为石旮旯地, 洼地底部耕地土壤较厚但易涝.

依据已有的峰丛洼地分类研究, 本研究在桂西北峰丛洼地集中分区的环江毛南族自治县、都安瑶族自治县选取三个洼地(图2)(张雪梅等, 2020; 罗旭玲等, 2021). 洼地选择条件包括: (1) 洼地封闭且相对高差均大于150m, 坡面土壤侵蚀能较完整地沉积在洼地内部; (2) 山坝比(即洼地面积与集水面积的比值) >10 , 保证沉积剖面能反映坡上侵蚀; (3) 洼地内不存在长期水塘, 因为炭屑密度比水低, 容易流失; (4) 根据入户调查、地方志等历史资料确定存在历史时期人类干扰

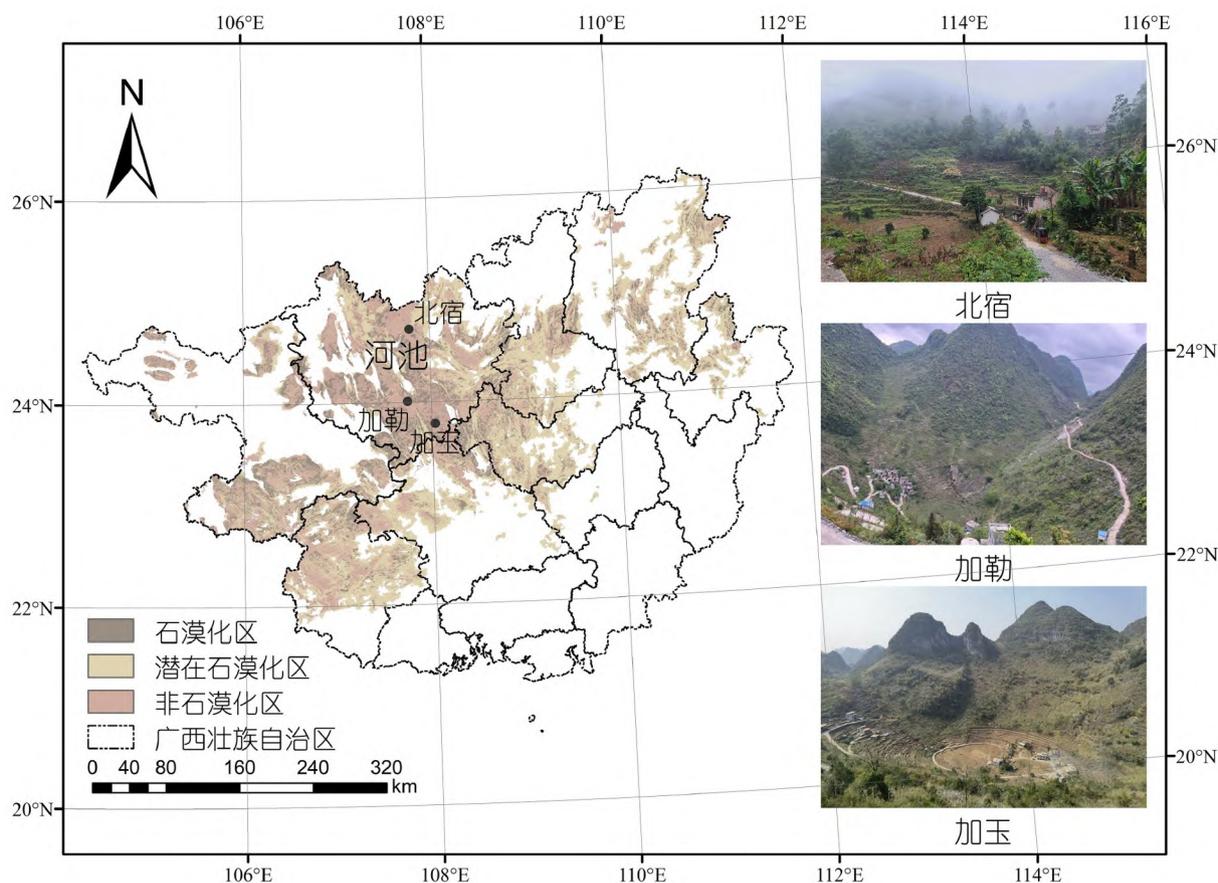


图2 研究区域和喀斯特洼地采样点地理位置

事件.

北宿屯洼地(107°57'47"E, 24°55'49"N)位于环江毛南族自治县, 面积约0.01km², 集水区面积约0.39km², 洼地高程为609m, 丘峰的海拔范围为660~725m, 落水洞位于洼地东北方, 处于洼地最低点, 洼地南北两侧丘峰坡度均大于35°. 地质构造属于上泥盆统融县组, 岩性为白云岩夹碎屑岩, 受岩溶作用的影响, 本区主要发育黄壤、黄棕壤. 坡上土层浅薄, 厚度在10~100cm, 侵蚀严重, 为典型的石漠化区. 该地年平均降水量1750mm, 降雨多集中于4~9月, 占全年降水量的70%. 洼地周围坡耕地较少, 山坡上仍存在低矮乔木, 植被覆盖率较高. 北宿屯距离毛南族发祥地南昌屯以西3km, 其先祖迁入时间为16世纪中叶, 耕种方式主要以烧山垦种农业为主, “至地力耗尽, 便迁徙他处, 烧荒垦种, 生活极为艰难”, 历史记载当地耕作面积不大, 旱地农业多种玉米, 亩产约为170斤, 农具以脚踏犁为主, 这种犁入土约5~6寸(1寸=2.54cm), 可以确定长期耕作深度约为20cm(广西壮族自治区编辑组, 2009b).

加勒屯洼地(107°55'31"E, 24°13'16"N)位于都安瑶族自治县菁盛乡, 洼地面积约0.01km², 集水区面积约0.32km², 洼地高程为475m, 丘峰海拔范围为640~740m, 主要由石灰岩组成. 都安地区雨量比较充沛, 一年内的降水量平均为1738mm. 5~8月为丰水期, 降水量占全年的65%~70%, 在这期间常出现暴雨月, 月降水量高达705mm. 落水洞位于洼地中心最低点. 目前洼地周围坡耕地中夹杂大量裸露岩石, 山坡上被灌丛及松木覆盖. 蓝姓瑶族从东兰县迁入至今已繁衍26代. 这里蕴藏着多种矿藏, 有铁、锡、铜、金、锰、铝和石油等, 早在清道光年间即有湖南汉人在耀南村开采铁矿(玉时阶, 2007).

加玉屯洼地(108°12'52"E, 23°59'46"N)位于都安瑶族自治县下坳镇西部, 洼地面积约0.01km², 集水区面积约0.6km², 洼地高程为430m, 丘峰海拔范围为620~671m, 主要由石灰岩组成. 该地的气候条件与上述加勒屯相似. 洼地落水洞位于洼地中心最低点, 周围坡耕地中夹杂大量裸露岩石, 山坡上被灌丛及松木覆盖. 当地罗姓瑶族自宜山龙头镇迁到都安定居至今已有25代, 该地历史上长期处于安定潘家土司的压迫剥削下, 生活贫苦, 种植方式为原始的“刀耕火种”, 主要种植玉米(广西壮族自治区编辑组, 2009a). 历史遗迹“灭瑶关”位于该洼地东16km.

借助手动土钻(内径10cm)在北宿屯、加勒屯和加玉屯洼地的质心各采集一根土壤样芯, 深度分别为330、405和355cm. 北宿屯土样采集于2021年11月, 0~20cm耕作层10cm一层, 20~50cm以5cm一层, 50cm以下10cm一层; 加勒屯与加玉屯土壤样芯均采于2022年4月, 0~20cm耕作层为一层, 20~100cm以5cm一层, 100cm以下10cm一层. 所有土样经过自然阴干、分解、过2mm筛网, 并在分析前称重.

2.2 定年方法

百年尺度定年主要依据¹³⁷Cs和²¹⁰Pb_{ex}定年, 分别用于确定1963、1921年两个时标. ¹³⁷Cs是1950~1970年人工大气层核爆实验产生的人工核素, 随降水沉降至地表, 被土壤颗粒紧密吸附. 1963年《禁止在大气层、宇宙空间和水下核试验条约》签订, ¹³⁷Cs的大气含量逐渐下降, 在沉积物中产生对应的¹³⁷Cs蓄积峰层位即为1963年层位. 但由于峰丛洼地通常受长期耕作影响, ¹³⁷Cs在耕作过的沉积物中被扰动和混合. 假设耕作深度(d_0 , cm)随时间不变, 随着新沉积物的加入, 耕作层(0~ d_0)每年都会升高. ¹³⁷Cs峰在1963年的耕作深度内和1963年之后的沉积物混合, 导致¹³⁷Cs在该深度范围内的活动几乎没有变化. 在这个深度范围内¹³⁷Cs活性高于下层, 因此¹³⁷Cs比活度较高的层位底部可识别为1963年最大¹³⁷Cs沉降的层位(图3a)(Bai等, 2010; Zhang等, 2014).

²¹⁰Pb_{ex}定年方法一般用于测定过去100年来连续沉积物的年代, ²¹⁰Pb_{ex}是持续沉降的大气天然核素, 每年大气沉降通量基本稳定, 其运移过程与¹³⁷Cs相似(图3b). 如前所述, 峰丛洼地的²¹⁰Pb_{ex}也被长期耕作的干扰混合, 导致已有的年代测定模型不能直接应用(Ni等, 2017). 耕作层(0~ d_0)会因每年新的沉积物沉积而上升, 下层沉积物被掩埋在耕作层之下不再受到扰动. 埋藏于100年前的沉积物中($5 \times ^{210}\text{Pb}$ 半衰期), 总²¹⁰Pb和补给²²⁶Ra之间可以建立放射性平衡, ²¹⁰Pb_{ex}比活度几乎为零. 因此, 此深度可以被认为是采样年之前约100年的时间标记(Mabit等, 2014; Cabrera等, 2023). 将0~100cm的土样送往成都山地灾害与环境研究所山地灾害与地表过程重点实验室测定¹³⁷Cs和²¹⁰Pb_{ex}比活度. ¹³⁷Cs和²¹⁰Pb_{ex}活性以干重为基础, 使用高分辨率、低背景、低能p型同轴锗探测器(GMX40P4, ORTEC)进行伽马光谱测定, 样品测重>200g, 计数次数>80000s,

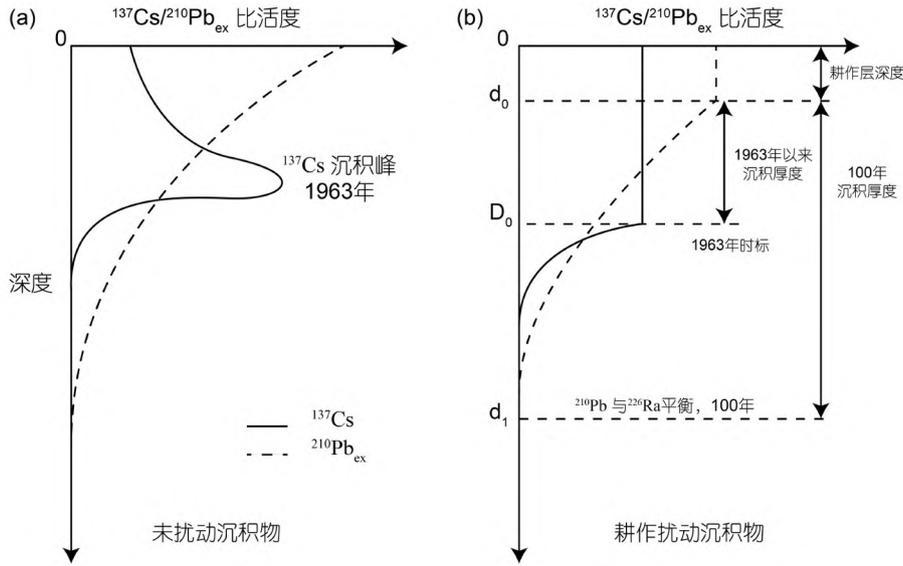


图3 未扰动沉积物(a)与耕作扰动沉积物(b)的¹³⁷Cs、²¹⁰Pb_{ex}定年对比示意图

测试误差小于10%。¹³⁷Cs比活度用662keV伽马射线测定；²¹⁰Pb总活度根据46.5keV伽马射线测算；²²²Rn(²²⁶Ra衰变产物)比活度根据其子体²¹⁴Pb的谱峰面积(351.9keV)测算。²¹⁰Pb_{ex}活性以²¹⁰Pb和²²⁶Ra比活度的差值计算。

历史时期定年主要依据¹⁴C定年。¹⁴C形成于平流层中的¹⁴N与宇宙射线相互作用，所有活着的陆生动植物都与大气中的¹⁴C处于平衡的状态，当这些动植物死亡之后得不到¹⁴C补充，剩余的¹⁴C会随着放射性衰变减少，基于半衰期即可确定炭屑所在沉积层位年代(Hajdas等, 2021; Heaton等, 2021)。森林火灾和烧荒开垦、秸秆焚烧回田等传统农耕习惯产生火烧炭屑，留存于当年沉积层，为¹⁴C定年提供了来源清晰的介质。这些炭屑通过耕作混合，埋在不断增加的耕作层下，不会受到进一步的干扰，并且加速器质谱仪的开发和应用为¹⁴C年代测定提供更高的灵敏度和精确度。将1m以下深度的土样倒入碳酸氢钠溶液，浮选出炭屑样品，北宿、加勒和加玉沉积物各送测3个炭屑样品，均在美国迈阿密BETA实验室检测(<https://www.radiocarbon.cn/>)。

2.3 洼地沉积物沉积速率与产沙模数计算

根据已确定年代(Y)的土层深度(d)，可以推算出两层间的沉积速率：

$$SR = \frac{d_2 - d_1}{Y_2 - Y_1}, \quad (1)$$

其中，SR为 $d_1 \sim d_2$ 的沉积速率(cm a^{-1})， d_1 和 d_2 是该层离地表的深度(cm)， Y_1 和 Y_2 是该层对应的沉积年代(a)。

得到沉积速率(SR)后可计算出洼地流域面积的历史平均产沙模数：

$$SSY = \frac{100 \cdot SR \cdot \gamma \cdot a}{TE \cdot A}, \quad (2)$$

其中，SSY为产沙模数($\text{t ha}^{-1} \text{a}^{-1}$)， γ 为干容重(g cm^{-3})， a 是洼地沉积面积(ha)；TE为泥沙拦截率，根据前人研究与研究区域相似的雨水滞留时间，设为0.7(张信宝等, 2011)； A 为分水岭所围成的面积(ha)。

2.4 历史数据重建

研究涉及的历史数据包括史料记载和历史数据重建两部分。史料记载数据是指历史时期发生的影响范围较大的人类活动事件，包括历史移民开发、改土归流、新作物引种及新技术的推行等，相关资料主要来源于《广西通史》、广西地方县志、《中国少数民族社会历史调查资料丛刊》、《广西瑶族社会历史调查》以及部分历史地理研究相关文献(韩昭庆, 2006; 郑维宽, 2007)。历史数据重建主要包括历史时期广西地区的人口、耕地、森林、粮食、气候等变化。其中，人口重建数据来源于《中国人口史》和近代统计年鉴

(曹树基, 2001), 耕地重建数据主要来源于《中国历代户口、田地、田赋统计》和部分参考文献(Li等, 2016; 何凡能等, 2022), 森林重建数据主要来源于统计年鉴和部分参考文献(何凡能等, 2007; Yang等, 2018), 粮食数据基于历史时期亩产数据和广西耕地面积得出, 来源于《中国历代粮食亩产研究》和中国农业年鉴(吴慧, 1985), 历史气候变化重建数据主要来源于《中国近五百年旱涝分布图集》和部分参考文献(中央气象局气象科学研究院, 1981; Dykoski等, 2005).

3 结果分析

3.1 近百年沉积物定年和产沙模数变化

利用¹³⁷Cs和²¹⁰Pb_{ex}确定时标如图4a所示, 北宿、加玉与加勒的¹³⁷Cs与²¹⁰Pb_{ex}的标记深度有明显差异, 北宿沉积物的¹³⁷Cs比活度较高的层位底部位于40~45cm(4.33Bq kg⁻¹), 即¹³⁷Cs时标1963年, 而加玉和加勒则分别出现在20~25cm(4.46Bq kg⁻¹)和30~35cm(1.05Bq kg⁻¹). 三个沉积物的²¹⁰Pb_{ex}比活度均随深度增加而降低, 分别在85、60、75cm以下均接近于0, 即距今100年的层位. 根据两个时标计算, 发现加玉和加勒1921~1963年的沉积速率和产沙模数均远高于1963~2021年(表1). 实地调查中发现, 加勒和加玉两个洼地坡面植被以草本为主, 坡上岩石裸露度较高, 土壤厚度较薄, 可侵蚀土量很少; 而北宿洼地坡面仍有乔木植被覆盖, 坡度也较缓, 土壤厚度相较其他洼地更厚, 可侵蚀的土壤较多, 现代沉积较厚.

表 1 历史沉积速率和产沙模数

洼地	沉积厚度 (cm)	年份	沉积速率 (cm a ⁻¹)	产沙模数 (t ha ⁻¹ a ⁻¹)
北宿	25(20~45)	1963~2021	0.43	2.1
	40(45~85)	1921~1963	0.95	4.42
	150(140~290)	1484~1596	1.33	6.58
加玉	5(20~25)	1963~2021	0.09	1.04
	35(25~60)	1921~1963	0.83	6.99
	110(240~350)	1724~1812	1.25	13.11
加勒	15(20~35)	1963~2021	0.26	0.95
	40(35~75)	1921~1963	0.95	2.86
	60(280~340)	1722~1815	0.64	2.51
	60(340~400)	1652~1722	0.86	3.14

3.2 明清以来沉积物定年和产沙模数变化

明清时期以来的沉积速率和产沙模数如表1所示, 加玉三个¹⁴C定年结果几乎一致; 可以认定240~350cm在误差范围内是同一时期产生的沉积, 同理, 北宿的140~290cm和加勒的280~340cm为同一时期, 加勒位于4m的¹⁴C定年明显老于280~340cm. 因此计算沉积速率时, 将沉积的年代区间定位下层的老年代与上层的新年代之间. 三个洼地的最高沉积速率和产沙模数均发生在1500~1800年的明清时期, 特别是显著高于1963~2021年(3倍以上), 三个洼地的历史产沙模数也均高于西南喀斯特地区水土流失量容许范围(0.5t ha⁻¹ a⁻¹), 说明在明清时期均发生了强烈的土壤侵蚀产沙沉积过程(Peng和Wang, 2012).

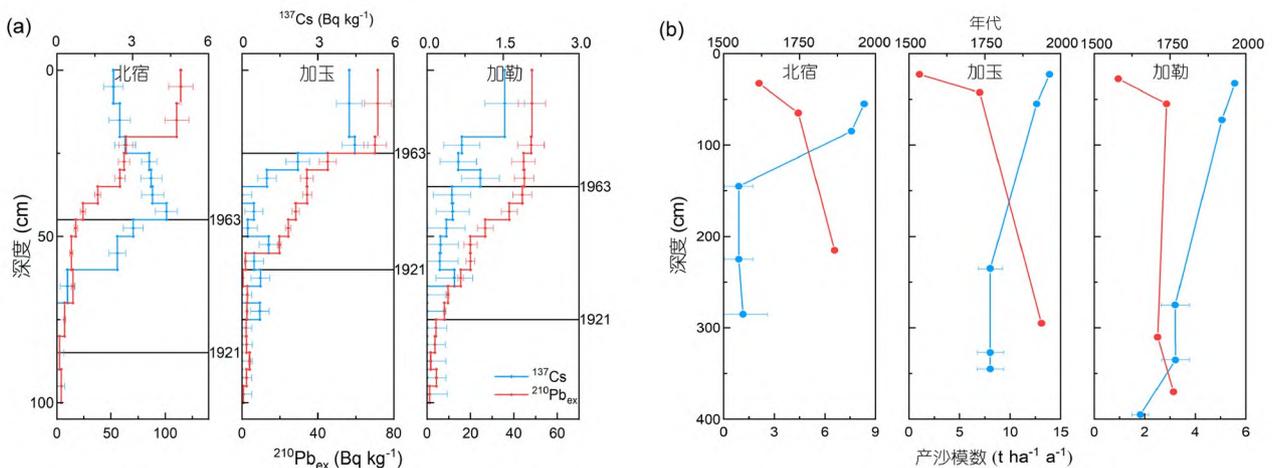


图 4 三个剖面的¹³⁷Cs和²¹⁰Pb_{ex}比活度变化和时标确定(a)及综合年表 and 对应时期的产沙模数(b)

3.3 明清时期以来历史数据重建

研究区所在的广西地区1500~1800年期间的人口、粮食、耕地及森林面积变化如图5所示。明清时期人口与粮食增加了3倍以上,其中,广西人口从万历六年(1578年)的118万增加到乾隆十四年(1749年)的368万,耕地从 $1.32 \times 10^4 \text{ km}^2$ (1583年)增加到 $2.33 \times 10^4 \text{ km}^2$ (1724年),1500~1800年间粮食亩产基本稳定在 $27.52 \times 10^4 \text{ kg km}^{-2}$,由于耕地面积增加,粮食产量从 $12.93 \times 10^6 \text{ kg}$ (1393年)增加到 $31.43 \times 10^6 \text{ kg}$ (1820年)。而广西森林面积从1661年($9.24 \times 10^4 \text{ km}^2$)开始不断降低,至1949年($3.79 \times 10^4 \text{ km}^2$)才有所回升,到2000年后才快速增加。

4 讨论

4.1 喀斯特洼地沉积物定年结果的可靠性

对人类扰动过的沉积物进行定年是一个巨大的挑战,本研究定年存在的不确定性主要在于 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 和 ^{14}C 定年, ^{137}Cs 定年不确定性较小。北宿和加玉的 ^{137}Cs 峰值较为明显,加勒的犁耕层深度内 ^{137}Cs 比活度(1.5 Bq kg^{-1})显著低于北宿和加玉,犁耕层深度以下的 ^{137}Cs 比活度也低于犁耕层深度。其原因可能是该洼地取样剖面处发生过较强的土壤侵蚀(流水或犁耕运移)。后来附近 ^{137}Cs 比活度高的土壤迁移到剖面处,现犁耕层深度内 ^{137}Cs 比活度分布均匀。 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 定年的不确定性与总 ^{210}Pb 和 ^{214}Pb 的测量误差有关,表土和深层土壤泥沙来源的不同也会影响 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 比活度(Gaspar等, 2013; Cabrera等, 2023)。持续耕作且土壤侵蚀发生百年以上的土壤中的 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 含量100年以后几乎接近稳定态值,本文中三个洼地的耕作均有百年以上的历史,由于地处偏远,耕作方式和耕作工具较落后,耕作的影 响深度和方式均恒定,样芯的 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 均呈指数递减,该深度以下保持较低水平,可以提供清晰的时标(张信宝等, 2010; 孙威等, 2013)。

^{14}C 定年的不确定性主要归因于两个方面:炭屑沉积时间早于沉积物形成时间或者耕作扰动导致炭屑上下层移动。炭屑的来源主要是山坡上毁林开荒和洼地内焚烧秸秆。山坡上产生的炭屑可能并未随当年产生的土壤侵蚀流入洼地,但广西峰丛洼地区平均降水量高达1300mm,能在短期内将炭屑冲刷至洼地,相较于

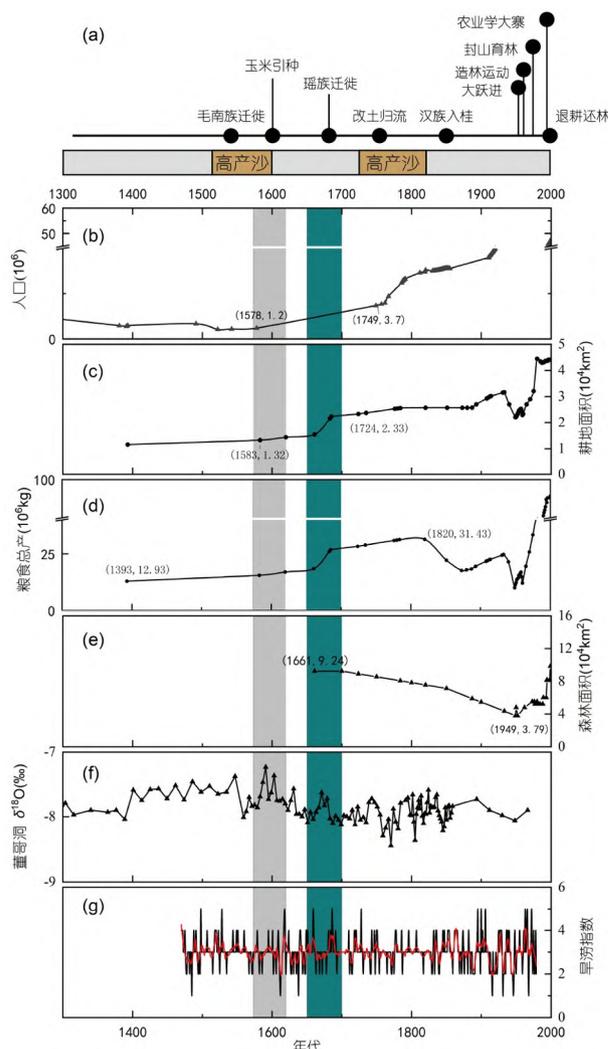


图5 广西地区1500~1800年期间的人口、粮食、耕地及森林面积变化

(a) 历史人类扰动事件; (b) 广西历史人口数据(曹树基, 2001); (c) 广西历史耕地面积(何凡能等, 2022); (d) 广西历史粮食总产(吴慧, 1985); (e) 广西历史森林面积(何凡能等, 2007); (f) 董哥洞重建的 $\delta^{18}\text{O}$ (何尧启等, 2005); (g) 旱涝指数(中央气象局气象科学研究院, 1981)

于 ^{14}C 定年本身的误差范围,其时间可以忽略不计,而洼地内焚烧秸秆产生的炭屑随当年的沉积物保存下来,所以前者的影响较小。耕作扰动是定年误差的主要原因,而本研究中大规模的土壤侵蚀短期内产生大量的沉积物,耕作影响范围只限于顶部20cm,对沉积物整体的影响十分有限,并且后续在加勒屯进行了一次更密的炭屑定年,同层位的炭屑定年与本研究数据一致,表明炭屑定年的可靠性较高。

4.2 明清时期人类干扰与喀斯特洼地侵蚀产沙的关联

历史时期可能导致森林砍伐的大规模人类活动主要是瑶族迁徙和玉米引种。根据广西少数民族社会历史调查资料,明末清初(1628~1700年)迁入本研究区所在的都阳、安定土司境内的瑶民在此地“刀耕火种”,在大片石山之中开荒种植小米、穆子、豆类、旱稻等杂粮,其“居山游耕”的生活习惯“吃了一山又一山”,“秋收后烧山以除百毒,焚草渍灰以肥土”(郑维宽, 2009),初步的迁入和耕作砍伐了部分森林,将洼地开发成耕地。入清以后,当地瑶民逐渐由流动的“刀耕火种”向固定的“力事耕种”转变,对洼地的耕种开发进一步加强(郑维宽, 2012)。除了农业的垦殖,随着定居瑶族人口的增加,对用材林、柴薪的需求日益增加,与汉民的木材交易也越来越多,对森林的砍伐也日益增加(陈业新, 2012; 胡列箭, 2014)。

此后,清代玉米、番薯等高产旱地作物的引种改变了广西瑶族杂粮作物种植结构,极大地推动了广西瑶民的山地垦殖活动。《广西通史》记载,1573~1620年广西引种玉米并迅速推广。玉米的扩散在乾隆年间(1735~1796年)开始加速,并在道光年底(1820~1850年)达到顶峰(韩茂莉, 2007)。桂西地区山多田少,坡度大、土层薄,玉米作为高产和高适应性,使人们能向原本不适宜种植的山地毁林开荒,广泛种植玉米,改变了山区农作物的种植结构,促进区域粮食、人口增加,但也导致山区环境逆转,特别是森林的减少(韩昭庆, 2015; Chen和Kung, 2016)。

除了瑶族迁徙,汉族入桂也促进广西地区的开发。广西通志记载,清朝前期(1720年前后)在桂西土司地区实施的改土归流(废除土司制度,改由中央政府委派流官直接进行统治),使封建土地所有制渗入桂西传统的土司地区,从制度上为汉族移民开发喀斯特山地创造条件,清朝中期进一步放宽了移民土司地区的限制,使桂西喀斯特山地垦殖的进程加快(玉时阶, 1988; 谭滢莎, 2008),也使汉族移民大量迁入桂西地区,特别乾隆中期(1760年)以后,大量汉族移民促进了桂西的山地垦殖,对林产品和薪炭需求的剧增使得滥伐森林的现象普遍存在(苏建灵, 1991)。

除了人类活动,气候变化也是影响地表侵蚀的重要因素,1000年以来中国西南地区水文气候表现为中世纪暖期(1000~1400年)相对干、小冰期(1400~1800

年)相对湿润以及现代暖期显著干的特征,受小冰期和亚洲季风较弱的影响,明清时期降水量高于现代(Zhao等, 2015; 刘斌等, 2022)。董哥洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录显示最近500年来西南地区夏季风强度 $\delta^{18}\text{O}$ 值呈现明显负偏趋势,西南季风增强,气候变湿(图5f)(Dykoski等, 2005; 何尧启等, 2005)。喀斯特地区土壤侵蚀主要与短时强烈降雨有关,涝灾频率较低,水力侵蚀相对近代较弱,历史时期的降水和极端气候对喀斯特区侵蚀产沙的影响有限(Li等, 2019; 焦锡桦等, 2023)。

4.3 近100年来人类活动侵蚀产沙差异

北宿、加玉和加勒三地的1963~2021年的沉积速率和产沙模数与1921~1962年相比较低。究其原因,主要有以下四个方面:(1) 1964~1966年,实行“以封为主,封造结合,国造林和集体林并举,造管并重,采育结合,综合利用,粮林结合,多种经营”的方针,三年共造林20.99万亩(1亩=666.667 m^2);(2) 1973年农业学大寨提出“向山要地,向天要水”,在石山区砌墙保土造梯田,砌成水平梯田3000多亩;(3) 1990年以来大规模的农田保护政策,以及山区的退耕还林、还草政策;(4) 最重要的是,历史时期人类活动引发了强烈土壤侵蚀,大大减少了山坡上可蚀土壤量,导致近代侵蚀速率降低(Li等, 2019),历史时期人类干扰是喀斯特洼地侵蚀产沙的主要成因。

目前本研究只在小流域实验,缺少植硅体、孢粉等指标分析,无法反映整个峰丛洼地地区的植被种群变化。在 ^{14}C 和 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 定年结果之间存在上百年的间隔,无法准确合理地表述其变化过程,需要更多更密的时标确定其变化过程。

5 结论

本研究基于喀斯特洼地侵蚀产沙沉积过程及可靠定年结果,证实了明清时期(1500~1800年)人类干扰是喀斯特森林破坏、洼地沉积加快的主要原因,揭示了明清时期人口、耕地、粮食及森林面积等变化与人类扰动的经验联系,改土归流与移民开发、瑶族迁徙和玉米引种等措施使同期喀斯特地区的人口与耕地增加到了3倍以上,也使同期的森林面积显著减少、洼地堆积加速。未来应进一步加强喀斯特古生态研究,系统地认识过去喀斯特森林演变规律、理解当前植被恢复、

评估和预测未来喀斯特植被恢复趋势, 指导喀斯特地区生态建设空间优化与国家生态工程布局。

致谢 感谢复旦大学杨煜达教授、广西民族大学郑维宽教授对历史求证的帮助。

参考文献

- 曹树基. 2001. 中国人口史(第五卷, 清时期). 上海: 复旦大学出版社. 690-722
- 陈业新. 2012. 中国历史时期的环境变迁及其原因初探. 江汉论坛, 412: 62-68
- 广西壮族自治区编辑组. 2009a. 广西瑶族社会历史调查. 北京: 民族出版社. 244-330
- 广西壮族自治区编辑组. 2009b. 广西仫佬族毛南族社会历史调查. 北京: 民族出版社. 227
- 郭柯, 刘长成, 董鸣. 2011. 我国西南喀斯特植物生态适应性与石漠化治理. 植物生态学报, 35: 991-999
- 韩茂莉. 2007. 近五百年来玉米在中国境内的传播. 中国文化研究, (1): 44-56
- 韩昭庆. 2006. 雍正王朝在贵州的开发对贵州石漠化的影响. 复旦学报(社会科学版), (2): 120-127, 140
- 韩昭庆. 2015. 清中叶至民国玉米种植与贵州石漠化变迁的关系. 复旦学报(社会科学版), 57: 91-99
- 何凡能, 葛全胜, 戴君虎, 林珊珊. 2007. 近300年来中国森林的变迁. 地理学报, 62: 30-40
- 何凡能, 杨帆, 赵彩杉, 李士成, 李美娇. 2022. 过去千年中国耕地网格化重建与时空特征分析. 中国科学: 地球科学, 53: 115-131
- 何尧启, 汪永进, 孔兴功, 程海. 2005. 贵州董哥洞近1000a来高分辨率洞穴石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录. 科学通报, 50: 1114-1118
- 胡列箭. 2014. 清后期广西瑶人分布的“山地化”(1820—1912). 清史研究, (2): 125-135
- 焦锡桦, 彭韬, 李社红, 张林, 顾再柯, 张信宝, 王世杰. 2023. 喀斯特坡地侵蚀性降雨阈值初探. 水土保持学报, 37: 57-63
- 蓝勇. 1992. 历史时期三峡地区经济开发与生态变迁. 中国历史地理论丛, (1): 153-169, 112
- 刘斌, 盛恩国, 郁科科, 周慷恩, 蓝江湖. 2022. 过去1500年中国西南地区季风降水变化及其驱动因素. 中国科学: 地球科学, 52: 1310-1327
- 罗旭玲, 王世杰, 白晓永, 谭秋, 冉晨, 陈欢, 习慧鹏, 陈飞, 操玥, 吴路华, 李汇文, 钟昕. 2021. 西南喀斯特地区石漠化时空演变过程分析. 生态学报, 41: 680-693
- 苏建灵. 1991. 明、清时期汉族人口向壮族地区的迁移. 广西民族研究, Z1: 69-76, 31
- 孙威, 杨浩, 赵其国, 张明礼, 徐良将. 2013. 非耕作土 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 含量对侵蚀速率变化的响应模型. 科学通报, 58: 1379-1384
- 谭滢莎. 2008. 试析历代汉族移民与广西壮族地区的社会变迁. 西北人口, 29: 106-110
- 王克林, 岳跃民, 陈洪松, 曾馥平. 2020. 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, 35: 1264-1272
- 王世杰, 彭韬, 刘再华, 倪健, 陈喜, 张信宝, 刘长成. 2020. 加强喀斯特关键带长期观测研究, 支撑西南石漠化区生态恢复与民生改善. 中国科学: 地球科学, 35: 925-933
- 吴慧. 1985. 中国历代粮食亩产研究. 北京: 农业出版社. 213-217
- 玉时阶. 1988. 清代广西的改土归流. 广西民族研究, (2): 88-92
- 玉时阶. 2007. 明清时期瑶族向西南边疆及越南、老挝的迁徙. 中国边疆史地研究, 17: 61-68
- 张信宝, 张云奇, 贺秀斌, 龙翼, 李豪. 2010. 农耕地土壤 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 含量对侵蚀速率变化的响应模型. 土壤学报, 47: 593-597
- 张信宝, 白晓永, 刘秀明. 2011. 洼地沉积的 ^{137}Cs 法断代测定森林砍伐后的喀斯特小流域土壤流失量. 中国科学: 地球科学, 41: 265-271
- 张雪梅, 祁向坤, 岳跃民, 王克林, 张信宝, 刘大元. 2020. 喀斯特峰丛洼地石漠化治理自然地域分区. 生态学报, 40: 5490-5501
- 郑维宽. 2007. 试论明清时期广西经济开发与森林植被地变迁. 广西地方志, (1): 35-40
- 郑维宽. 2009. 历史时期广西旱稻的种植变迁. 农业考古, (1): 60-67, 73
- 郑维宽. 2012. 论宋代以来广西瑶族的山地开发及其对生态环境的影响. 农业考古, (1): 346-351
- 中央气象学气象科学研究院. 1981. 中国近五百年旱涝分布图集. 北京: 地图出版社. 6-260
- Atahan P, Itzstein-Davey F, Taylor D, Dodson J, Qin J, Zheng H, Brooks A. 2008. Holocene-aged sedimentary records of environmental changes and early agriculture in the lower Yangtze, China. *Quat Sci Rev*, 27: 556-570
- Bai X Y, Zhang X B, Chen H, He Y B. 2010. Using Cs-137 fingerprinting technique to estimate sediment deposition and erosion rates from Yongkang depression in the Karst region of Southwest China. *Land Degrad Dev*, 21: 474-479
- Benmansour M, Mabit L, Nouira A, Moussadek R, Bouksirate H, Duchemin M, Benkdad A. 2013. Assessment of soil erosion and deposition rates in a Moroccan agricultural field using fallout ^{137}Cs and $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$. *J Environ Radioact*, 115: 97-106
- Brandt M, Yue Y M, Wigneron J P, Tong X W, Tian F, Jepsen M R, Xiao X M, Verger A, Mialon A, Al-Yaari A, Wang K L, Fensholt R. 2018. Satellite-observed major greening and biomass increase in South China Karst during recent decade. *Earths Future*, 6: 1017-1028
- Cabrera M, Sanabria R, González J, Cabral P, Tejada S, Zarazua G, Melgar-Paniagua E, Tassano M. 2023. Using ^{137}Cs and $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ to assess soil redistribution at different temporal scales along with

- lithogenic radionuclides to evaluate contrasted watersheds in the Uruguayan Pampa grassland. *Geoderma*, 435: 116502
- Cao Z H, Zhang Z D, Zhang K L, Wei X, Xiao S Z, Yang Z C. 2020. Identifying and estimating soil erosion and sedimentation in small karst watersheds using a composite fingerprint technique. *Agr Ecosyst Environ*, 294: 106881
- Chen C, Park T, Wang X H, Piao S L, Xu B B, Chaturvedi R K, Fuchs R, Brovkin V, Ciais P, Fensholt R, Tømmervik H, Bala G, Zhu Z C, Nemani R R, Myneni R B. 2019. China and India lead in greening of the world through land-use management. *Nat Sust*, 2: 122–129
- Chen S, Kung J K. 2016. Of maize and men: The effect of a New World crop on population and economic growth in China. *J Econ Growth*, 21: 71–99
- Duan R, Li T Y, Li J Y, Spötl C, Li H C, Wang H B, Cheng H, Ning Y F, Shen C C, Zhou J L, Chen C J, Yu T L, Edwards R L, Liu Z Q. 2023. Karst-ecological changes during the middle and late Holocene in Southwest China revealed by $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ records in a stalagmite. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 615: 111437
- Dykoski C A, Edwards R L, Cheng H, Yuan D X, Cai Y J, Zhang M L, Lin Y S, Qing J M, An Z S, Revenaugh J. 2005. A high-resolution, absolute-dated Holocene and deglacial Asian monsoon record from Dongge Cave, China. *Earth Planet Sci Lett*, 233: 71–86
- Gao J B, Wang H. 2019. Temporal analysis on quantitative attribution of karst soil erosion: A case study of a peak-cluster depression basin in Southwest China. *Catena*, 172: 369–377
- Gaspar L, Navas A, Machín J, Walling D E. 2013. Using $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ measurements to quantify soil redistribution along two complex toposequences in Mediterranean agroecosystems, northern Spain. *Soil Tillage Res*, 130: 81–90
- Hajdas I, Ascough P, Garnett M H, Fallon S J, Pearson C L, Quarta G, Spalding K L, Yamaguchi H, Yoneda M. 2021. Radiocarbon dating. *Nat Rev Methods Primers*, 1: 62
- Heaton T J, Bard E, Bronk Ramsey C B, Butzin M, Köhler P, Muscheler R, Reimer P J, Wacker L. 2021. Radiocarbon: A key tracer for studying Earth's dynamo, climate system, carbon cycle, and Sun. *Science*, 374: eabd7096
- Jiang Z C, Lian Y Q, Qin X Q. 2014. Rocky desertification in Southwest China: Impacts, causes, and restoration. *Earth-Sci Rev*, 132: 1–12
- Li L, Xiong K N. 2021. Study on peak cluster-depression rocky desertification landscape evolution and human activity-influence in South of China. *Eur J Remote Sens*, 54: 309–317
- Li S C, He F N, Zhang X Z. 2016. A spatially explicit reconstruction of cropland cover in China from 1661 to 1996. *Reg Environ Change*, 16: 417–428
- Li Z W, Xu X L, Zhang Y H, Wang K L, Zeng P. 2019. Reconstructing recent changes in sediment yields from a typical karst watershed in southwest China. *Agr Ecosyst Environ*, 269: 62–70
- Mabit L, Benmansour M, Abril J M, Walling D E, Meusburger K, Iurian A R, Bernard C, Tarján S, Owens P N, Blake W H, Alewell C. 2014. Fallout ^{210}Pb as a soil and sediment tracer in catchment sediment budget investigations: A review. *Earth-Sci Rev*, 138: 335–351
- Ni L S, Fang N F, Shi Z H, Chen F X, Wang L. 2017. Validating a basic assumption of using Cesium-137 method to assess soil loss in a small agricultural catchment. *Land Degrad Dev*, 28: 1772–1778
- Peng J, Hu T, Qiu S J, Hu Y N, Dong J Q, Lin Y F. 2023. Balancing the effects of forest conservation and restoration on South China Karst greening. *Earths Future*, 11: e2023EF003487
- Peng T, Wang S J. 2012. Effects of land use, land cover and rainfall regimes on the surface runoff and soil loss on karst slopes in southwest China. *Catena*, 90: 53–62
- Ren X X, Huang X Z, Huang C, Wang T, Shen Z W, Zhang X S, Ding G Q, Ayyamperumal R, Zhang J, Chen X M. 2022. Effects of human activities on mountain forest in northern China during the middle Holocene. *Quat Sci Rev*, 288: 107580
- Tian X, Long X Y, Luo S, Cao M, Li J, Sun Y C, Zeng S B, Wu Z, Liu C, Lei L D, Algeo T J, Jiang Y J. 2023. Paleoclimatic and anthropogenic impacts on the environment of Southwest China since 33 ka based on multiproxy analysis of karst depression deposits. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 624: 111654
- Yang X H, Jin X B, Xiang X M, Fan Y T, Shan W, Zhou Y K. 2018. Reconstructing the spatial pattern of historical forest land in China in the past 300 years. *Glob Planet Change*, 165: 173–185
- Zhang Y Q, Long Y, Yu X X, An J. 2014. A comparison of measured ^{137}Cs and excess ^{210}Pb levels in the cultivated brown and cinnamon soils of the Yimeng Mountain area. *Chin J Geochem*, 33: 155–162
- Zhang Y Q, Long Y, Zhang X B, Pei Z L, Lu X, Wu Z H, Xu M Y, Yang H Q, Cheng P. 2020. Using depression deposits to reconstruct human impact on sediment yields from a small karst catchment over the past 600 years. *Geoderma*, 363: 114168
- Zhang Y Q, Li Z R, Wu T, Chen F X, Xu M Y, Wang Y, He S Q, Tan B, Hou G R, Luo Z T, Zheng J K, Hu X. 2023. Soil erosion rates on sloping cropland fragment underlain by contrasting lithologies. *Catena*, 220: 106622
- Zhao K, Wang Y J, Edwards R L, Cheng H, Liu D B, Kong X G. 2015. A high-resolved record of the Asian Summer Monsoon from Dongge Cave, China for the past 1200 years. *Quat Sci Rev*, 122: 250–257

(责任编辑: 鹿化煜)