

DOI: 10.20103/j.stxb.202310092173

罗淑娥, 蒋勇军, 田兴, 乔依娜, 曹敏, 张彩云, 汪啟容, 张弦鸣, 吴虹余. 重庆中梁山岩溶槽谷近百年土壤侵蚀与生态环境演变. 生态学报, 2024, 44(23): 10782-10793.

Luo S E, Jiang Y J, Tian X, Qiao Y N, Cao M, Zhang C Y, Wang Q R, Zhang X M, Wu H Y. Soil erosion and eco-environmental change in the karst trough valley of Zhongliang Mountain in Chongqing over the past 100 years. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(23): 10782-10793.

重庆中梁山岩溶槽谷近百年土壤侵蚀与生态环境演变

罗淑娥¹, 蒋勇军^{1,*}, 田兴¹, 乔依娜¹, 曹敏², 张彩云¹, 汪啟容¹, 张弦鸣¹, 吴虹余¹

¹ 西南大学地理科学学院, 岩溶环境重庆市重点实验室, 重庆 400715

² 云南大学地球科学学院, 昆明 650500

摘要: 西南岩溶区是我国生态环境脆弱区之一, 探究该区域土壤侵蚀历史与生态环境演变可为生态保护提供科学依据。以重庆市中梁山岩溶槽谷区洼地沉积物为研究对象, 运用¹³⁷Cs 和²¹⁰Pb 放射性定年技术建立沉积物剖面年代序列, 并结合剖面生态、环境指标及人类史志资料, 分析小流域近 100 年土壤侵蚀变化与生态环境演变。结果显示: (1) 1904—1945 年流域侵蚀模数为 84 t km⁻² a⁻¹, 植被以松属为主, 北碚人口偏少, 人类活动对生态环境改造较弱, 生态环境相对稳定; (2) 1945—1958 年流域土壤侵蚀强度逐渐增加, 植被覆盖度下降, 伴人植物花粉上升, 可能与北碚区人口的增多有关; (3) 1958—1973 年流域侵蚀模数高达 344.1 t km⁻² a⁻¹, 伴人植物花粉显著增加, 松属花粉急剧下降, 生态退化与历史事件的耦合说明人类活动可能是此阶段生态环境变化的主因; (4) 1973—2018 年流域的土壤流失量逐步下降, 植被覆盖率显著增加, 表明经多年生态重建, 流域生态环境逐步改善。研究反映了近百年人类活动对中梁山岩溶槽谷区生态环境演变的主导作用, 对缺乏较长时间监测数据的类似岩溶区土壤侵蚀研究也具有一定的借鉴意义。

关键词: 中梁山; 岩溶槽谷; 侵蚀模数; 人类活动; 生态演变

Soil erosion and eco-environmental change in the karst trough valley of Zhongliang Mountain in Chongqing over the past 100 years

LUO Shue¹, JIANG Yongjun^{1,*}, TIAN Xing¹, QIAO Yina¹, CAO Min², ZHANG Caiyun¹, WANG Qirong¹, ZHANG Xianming¹, WU Hongyu¹

¹ Chongqing Key Laboratory of Karst Environment & School of Geographical Sciences of Southwest University, Chongqing 400715, China

² School of Earth Sciences of Yunnan University, Kunming 650500, China

Abstract: The karst region in southwest China is known for its vulnerable ecological environment. Investigating the historical patterns of soil erosion and the ecological evolution within this area can offer valuable scientific insights for effective ecological conservation. This study takes the depression deposits in the Zhongliang mountain karst trough valley of Chongqing as the research object, establishes a depth-time model of the sediment profiles using nuclear tracer dating technology, and reconstructs the soil erosion history and ecological change within the small watershed over the past 100 years. The results show that: (1) From 1904 to 1945, the watershed exhibited an erosion modulus of 84 t km⁻² a⁻¹, characterized by dominant pine forest vegetation and a small population in Beibei, suggesting relatively stable ecological conditions with minimal human-induced transformations. (2) From 1945 to 1958, gradual increases in soil erosion intensity and decreases in vegetation coverage, accompanied by shifts in plant composition towards companion species, likely

基金项目: 西南大学创新研究 2035 先导计划 (SWU-XDZD22003); 重庆市自然科学基金项目 (cstc2021yszx-jcyjX0005, 2022yszx-jcx0008cstb); 岩溶环境重庆市重点实验室开放课题 (Cqk202102)

收稿日期: 2023-10-09; **网络出版日期:** 2024-11-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jiangyj@swu.edu.cn

correlated with population growth in the Beibei area. (3) From 1958 to 1973, the erosion modulus peaked at $344.1 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$, with significant increases in companion pollen and sharp declines in *Pinus* pollen, indicating substantial ecological changes attributed to human activities. (4) From 1973 to 2018, soil loss in the watershed gradually decreased, and vegetation coverage increased significantly, indicating that the ecological environment of the karst small watershed had been significantly improved after years of ecological reconstruction. This study indicates that human activities have been the primary factor impacting the ecological environment of the Zhongliang mountain karst trough valley in the past century. This article also provides some reference for soil erosion research in similar karst areas where long-term monitoring data are not available.

Key Words: Zhongliang Mountain; karst trough valley; erosion modulus; human activity; ecological change

中国西南岩溶区是世界上碳酸盐岩连片分布面积最大的区域之一,占地面积约为 $54 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[1-2]。裸岩与薄层土壤交错分布的破碎景观,独特的地上地下双层空间结构,使土壤侵蚀成为该区域最为突出的生态地质问题^[3-4]。高度密集的人口与集约化农业的发展,加剧了岩溶区土壤侵蚀与石漠化,严重威胁岩溶生态系统的稳定性^[5-6]。因此,准确获取土壤侵蚀量对正确认识岩溶区水土流失机制,评估岩溶区土壤侵蚀程度至关重要。此外,了解岩溶系统土壤侵蚀历史、生态环境演变及其对人类活动的响应,对促进生态安全建设与可持续发展具有重要意义。

由于岩溶区土壤侵蚀的复杂性,利用传统方法,如降雨模拟法^[7]、径流小区法^[8]等可能难以通过地表或地下系统长时间(>50 年)监测土壤流失量,且基于不连续时间的研究可能无法准确反映土壤侵蚀的演变特征^[9]。相较而言,以沉积物为对象,利用核示踪定年技术(如:¹³⁷Cs、²¹⁰Pb)研究土壤侵蚀具有记录时间较长、高效且经济实惠的优势。放射性沉降物可用作沉积物的计时器,识别侵蚀与沉积过程,并在此基础上重建不同时间尺度的流域侵蚀模数^[9-11],了解小流域的土壤流失特征以及生态演变^[12-16]。例如,吕明辉等^[14]基于¹³⁷Cs 定年结果解译出红枫湖流域 1960—2003 年间的土壤侵蚀过程。徐经意等^[15]利用¹³⁷Cs 时标与²¹⁰Pb 计年法计算出云南泸沽湖与洱海的沉积物堆积速率,揭示了湖区近百年历史的土壤侵蚀历史。但由于特殊的水文地质结构,岩溶区湖泊分布有限。相对而言,岩溶洼地是西南地区最典型地貌景观,类似盆地的地形特征决定了洼地可在流域中充当汇区,是输移泥沙的主要聚集地^[2,9]。因此,洼地沉积物也可较完整记录流域人类活动和生态环境演变信息^[10,12]。

目前,以洼地沉积物为研究载体,反演流域侵蚀历史与机制,探讨土壤侵蚀驱动因素的潜力巨大^[9-10,12]。例如 Bai 等^[16]利用¹³⁷Cs 和²¹⁰Pb 测年技术建立了石人寨流域洼地剖面年代序列,并据此重建了流域侵蚀模数对土地利用变化的响应,尤其是 1979 年森林砍伐对流域土壤流失的影响。Li 等^[11]在利用¹³⁷Cs 和²¹⁰Pb 测年技术建立的古周流域洼地沉积物剖面年代信息基础上,分析了该流域 1949—2015 年沉积物产量的变化,并结合历史资料确定影响近 60 年水土流失格局的因素。裴曾莉等^[10]基于¹³⁷Cs 和²¹⁰Pb 测年技术建立了常家洼洼地沉积剖面的精确年表,量化了该岩溶槽谷区近 100 年洼地沉积速率与流域产沙强度。因此,前人的这些研究均证明了利用¹³⁷Cs 和²¹⁰Pb 测年技术可有效揭示岩溶小流域较长时间历史(>50 年)的土壤侵蚀及其机制。然而,前人的研究多限制于利用年代数据和史志资料进行土壤侵蚀研究,同时结合多指标进行土壤侵蚀的研究也多集中于湖泊沉积物的研究,在岩溶洼地沉积物研究中的应用相对较少。

本文以重庆市中梁山岩溶槽谷区洼地沉积物为研究对象,运用¹³⁷Cs 与²¹⁰Pb 放射性定年技术,构建该洼地沉积剖面年代序列,综合沉积物生态、环境指标以及人类活动历史,探究近百年来中梁山岩溶小流域的土壤侵蚀与生态环境演变。本研究旨在为进一步认识近百年岩溶洼地土壤侵蚀特征与规律提供理论依据,同时为控制岩溶区水土流失和促进生态恢复工程提供科学依据。

1 研究区概况

研究区(图 1)位于重庆市北碚区中梁山龙凤槽谷,地理坐标为 $106^{\circ}25'—106^{\circ}29'9'' \text{ E}$, $29^{\circ}45'—29^{\circ}50' \text{ N}$,

海拔范围为 495—707 m。地质构造为南北走向的隔挡式岩溶槽谷,背斜核部向两翼分别为下三叠统飞仙关组地层(T_{1f}),下三叠统嘉陵江组(T_{1j})、中三叠统雷口坡组(T_{2l})及上三叠统须家河组(T_{3xj}),槽谷整体上呈“一山三岭二槽”笔架式地貌格局。气候属于典型的亚热带湿润季风气候,夏季炎热,冬季温和,多年平均气温为 16.5℃,雨量丰沛但季节分配不均,流域多年平均降水量为 1200—1300 mm,降雨主要集中在 4—10 月。研究区以地带性黄壤和非地带性石灰土为主,位于三叠纪嘉陵江组角砾岩与白云质灰岩之上,土层浅薄不一,厚度通常小于 50 cm。研究区流域汇水面积为 0.54 km²,洼地面积为 0.014 km²。区域人类活动以传统的农业生产活动为主,耕作区集中分布于槽谷底部与坡脚地区,耕作层一般不会超过 15 cm,而洼地原为荒草地,多年未耕种。

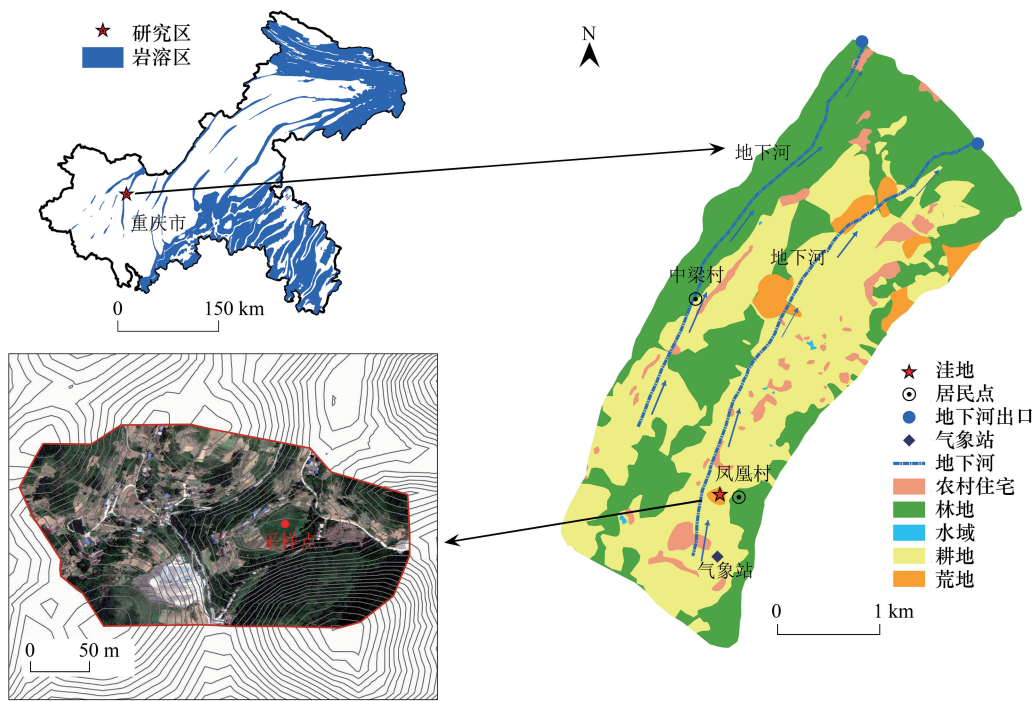


图 1 研究区与采样点位置图
Fig.1 Location of the study area and sampling site

2 材料与方法

2.1 样品采集与测试

本研究于 2018 年 12 月获取了 1 个 55 cm 深的沉积物剖面,采样位置如图 1 所示,沉积物剖面按 5 cm 厚度分层采集,共获取 11 份沉积物样品,所有样品经室内自然风干,去除沙石及动植物残体,研磨过筛后用于分析测试。粒径使用沉降法进行测定,每个样品重复测试三次,取其平均值作为测试结果,粒径测试工作在西南大学资源与环境学院完成。磁化率使用英国 Bartington 公司生产的 MS-2 型磁化率仪进行测定,每个样品重复测量 3 次,取其均值作为结果,测量精度为±0.1%。磁化率测试工作在西南大学地理科学学院完成。样品孢粉采用氢氟酸法进行提取,预处理后在 Zeiss 显微镜 400 倍目镜下进行鉴定与统计,孢粉鉴定遵循多数到属少数到科原则,每个样品统计 3 玻片以上,花粉统计数不低于 350 粒。孢粉鉴定工作在西南大学地理科学学院完成。

2.2 年代框架的建立

将 11 份样品进行放射性同位素测定,¹³⁷Cs 和²¹⁰Pb_{ex} 比活度使用配备 P 型高纯锗探头 (GMX40P4,

ORTEC)的低能量、低本底 γ 能谱仪测定。 ^{137}Cs 和 ^{210}Pb 测试工作均在中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所完成。鉴于沉积环境变化与人类干扰对洼地沉积物产量的潜在影响,沉积物初始 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的活度和沉积速率可能为不恒定的,因此,本文选用恒定补给速率模型即 CRS 模型来确定剖面的年龄,同时运用两个 ^{137}Cs 活度峰值沉降年份(1963 年、1986 年)来标记运算,以建立沉积剖面准确的时间序列^[17]。基于 CRS 模型可推算出不同深度处沉积物的 ^{210}Pb 年代,计算公式为:

$$t = 1/\lambda \ln \left(\frac{I_0}{I_m} \right) \quad (1)$$

$$P = \frac{\lambda \Delta I_{(x_1-x_2)}}{e^{-\lambda t_1} - e^{-\lambda t_2}} \quad (2)$$

$$t = -\frac{1}{\lambda} \ln \left(e^{-\lambda t_1} + \Delta I_{(x_1-x)} \frac{\lambda}{P} \right) \quad (3)$$

式中, λ 为 ^{210}Pb 衰变系数 (0.03114 a^{-1}), I_0 为总 ^{210}Pb 活度 (Bq/m^2), I_m 深度 m 以下总 ^{210}Pb 活度 (Bq/m^2), $\Delta I_{(x_1-x)}$ 与 $\Delta I_{(x_1-x_2)}$ 为 x_1 与 x_2 之间 ^{210}Pb 活度和 (Bq/m^2), x_1 与 x_2 是已知时间点 t_1 与 t_2 对应深度。

2.3 沉积速率与产沙模数

根据中梁山洼地沉积物剖面不同深度的年代学,通过确定某一深度所对应的年龄,运用公式(4)进而计算剖面某一时段的沉积速率,结合各时段土层所处深度范围的土壤容重的平均值,应用公式(5),计算得到产沙模数。

$$SR = \frac{d_2 - d_1}{Y_1 - Y_2} \quad (4)$$

式中, d_1 和 d_2 是剖面距表面的深度 (cm); Y_1 和 Y_2 分别是深度 d_1 和 d_2 处沉积物的年龄 (year)。

$$SSY = \frac{100000 \times SR \times \gamma \times a}{TE \times A} \quad (5)$$

式中,SSY 为洼地小流域产沙模数 ($\text{t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$), SR 为某时段剖面沉积速率 (cm/a), γ 为沉积物的容重 (g/cm^3); a 为洼地面积 (0.014 km^2), A 为洼地小流域面积 (0.54 km^2), TE 为泥沙拦截率 (%)。因 TE 缺乏监测数据,本文参考重庆常家洼洼地与龙洞槽洼地等的取值^[10,13],即 0.7。

3 结果与分析

3.1 剖面年代序列

中梁山沉积剖面记录了 1904 年以来的沉积历史,年龄-深度曲线如图 2 所示。在沉积剖面中, $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 比活度的变化范围为 3.31—40.90 Bq/kg , 呈现随深度增加而指数下降的趋势,并在 55 cm 深度以下达到平衡,与其他研究区的趋势类似^[16],表明 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 可用于研究区沉积物剖面的年代计算。剖面的 ^{137}Cs 比活度曲线呈单峰形态,与经典的全球大气 ^{137}Cs 沉降模式相似^[15,18]。 ^{137}Cs 比活度从表面开始增加,在 10—15 cm 达到一个小的 ^{137}Cs 蓄积峰值,可能对应 1986 年切尔诺贝利核泄漏事件。在此峰值之后, ^{137}Cs 比活度的另一个峰值出现在 20—25 cm 处。依据 ^{210}Pb 分布计算此深度年代为 1977 年,这与我国在 1976 年进行大量核试验的时间基本相符。30—40 cm 处出现 ^{137}Cs 的最大峰值则对应 1963 年的核武器试验高峰年,此深度以下 ^{137}Cs 比活度趋于下降。如上所述,沉积剖面 ^{210}Pb 年龄计算结果与人工放射性核素 ^{137}Cs 时标之间具有很好的一致性,表明采用 CRS 模型可较好地确定研究区沉积物剖面年龄。

3.2 沉积速率和产沙模数

中梁山洼地流域 1904 至 2018 年的平均沉积速率为 0.53 cm/a , 产沙模数为 165.5 $\text{t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 这与重庆常家洼洼地 1917 年以来的沉积速率 (0.47 cm/a) 和侵蚀模数 (152 $\text{t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$), 以及重庆劳动村洼地 1963—2019 年的平均产沙模数 (156.9 $\text{t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$) 接近^[10,13], 流域土壤侵蚀经历了轻度侵蚀-强度侵蚀-显著减缓的变化过

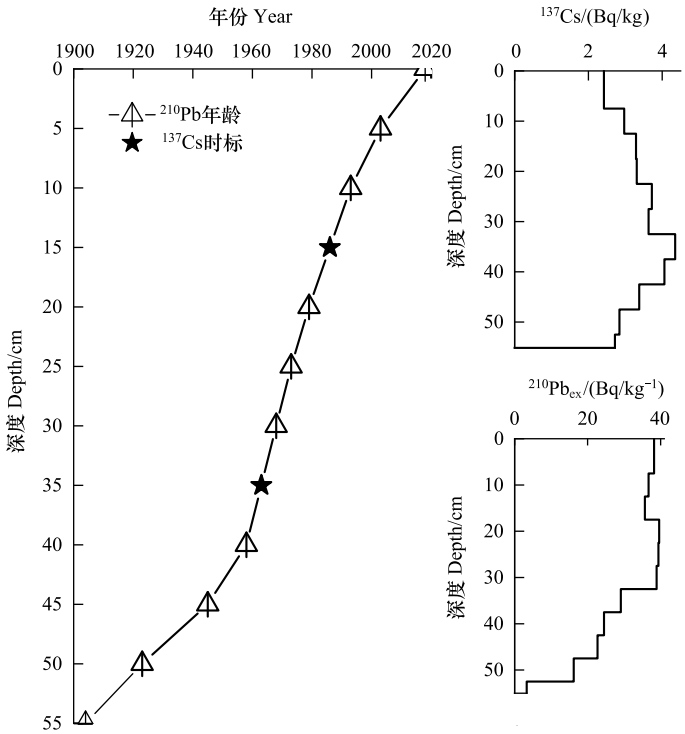


图 2 ¹³⁷Cs、²¹⁰Pb_{ex} 深度剖面及年代-深度模型
Fig.2 ¹³⁷Cs and ²¹⁰Pb_{ex} depth profile and the age-depth model

程。其中,阶段 1(1904—1945 年)侵蚀模数范围为 79.1—89.5 t km⁻² a⁻¹,土壤侵蚀处于轻度侵蚀阶段;阶段 2 (1945—1958 年)侵蚀模数为 128.9 t km⁻² a⁻¹,侵蚀模数呈现上升趋势,表明此阶段土壤侵蚀增强;阶段 3 (1958—1973 年)产沙模数为 344.1 t km⁻² a⁻¹,较上一阶段增长了 167%,表明此阶段土壤侵蚀剧烈;阶段 4 (1973—2008 年)侵蚀模数范围为 83.4—242.2 t km⁻² a⁻¹,产沙模数总体呈现三阶段逐步下降趋势,表明土壤侵蚀逐步减弱(表 1)。

表 1 不同阶段沉积速率与产沙模数

Table 1 Sedimentation rate and specific sediment yield in different stages

阶段 Stage	年份 Year	沉积厚度 Depth/cm	沉积速率/(cm/a) Sedimentation rate	产沙模数/(t km ² a ⁻¹) Specific sediment yield
1	1904—1923	5	0.26	89.5
	1923—1945	5	0.23	79.1
2	1945—1958	5	0.38	128.9
3	1958—1973	15	1.00	344.1
4	1973—1986	10	0.78	242.2
	1986—2003	5	0.75	146.7
	2003—2018	5	0.33	83.4

3.3 环境与生态指标

粒度是反映沉积物机械组成的重要指标,广泛用于解译环境演变^[19]。沉积物组分粗细变化在一定程度上指示沉积物物质源区、动力条件以及人类活动强度的变化^[20—21]。磁化率是研究环境变化的灵敏指标,能够反映流域磁性矿物输入含量,已被广泛用作评估小流域土壤侵蚀和人类活动的影响^[22—23]。表 2 显示了沉积剖面粒径与低频磁化率的分布特征,沉积物粒度根据美国农业部制定的标准分为黏粒(<0.002 mm)、粉粒

(0.002—0.05 mm)和砂粒(0.05—2 mm)三个级别。沉积剖面中,黏粒含量变化范围为33%—40%,粉粒含量变化范围为45%—49%,砂粒含量变化范围为14%—18%,黏粒:粉粒:砂粒的平均含量比例为37:47:16,粒度组分含量总体呈现粉粒>黏粒>砂粒的特征。剖面低频磁化率最低值为 $17.80 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$,最高值为 $41.59 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$,平均值为 $24.24 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$;垂直深度上看,0—10 cm为低频磁化率低值段,15—40 cm为低频磁化率高值段,呈现出随深度低-高-低的变化趋势。

表2 中梁山剖面粒径组成与磁化率分布特征

Table 2 Sectional particle size composition and magnetic susceptibility distribution characteristics of Zhongliang Mountain

指标 Index		黏粒 Clay/%	粉粒 Silt/%	砂粒 Sand/%	低频磁化率 Low frequency magnetic susceptibility(X_f)/ ($10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$)
深度	5	38	46	16	19.78
Depth/cm	10	36	48	16	28.13
	15	35	47	18	24.07
	20	33	49	18	22.55
	25	34	49	17	41.59
	30	35	47	18	22.55
	35	38	45	17	25.73
	40	38	46	16	18.07
	45	39	45	16	28.50
	50	40	46	14	17.80
	55	40	46	14	17.87
最大值 Max		40	49	18	41.59
最小值 Min		33	45	14	17.80
均值 Average		36.91	46.72	16.36	24.24
标准偏差 Standard deviation		2.31	1.35	1.36	6.62
变异系数 Coefficient of variation		0.063	0.029	0.083	0.27

孢粉是植物的直接产物,可用于反映研究区生态环境演变历史。中梁山剖面沉积物中共鉴定出孢粉类型75种,包括46个树栖类群(乔木和灌木)和29个非树栖类群(草本和蕨类植物)。本研究仅选取含量较为显著的针叶类、陆生草本、松属(*Pinus*)、伴人植物、禾本科(*Poaceae*)以及炭屑浓度进行分析。结果如表3所示:松属花粉含量范围为31.09%—61.47%,平均值为48.46%;禾本科花粉含量范围为18.93%—36.45%,平均值为25.65%;伴人植物含量范围为24.50%—44.57%,平均值为32.57%;草本植物花粉含量范围为28.95%—52.13%,平均值为38.26%;针叶类树种花粉含量范围为31.91%—63.70%,平均值为49.86%;炭屑浓度范围为1521—28479粒/g,均值为6935粒/g。

4 讨论

4.1 岩溶小流域土壤侵蚀驱动因素

4.1.1 气候变化与土壤侵蚀

气候变化可通过降水和温度的变化及其相互作用来影响土壤侵蚀^[25]。在年均气温变化较小的地区,温度对土壤侵蚀的影响可能较小,因此,降水可能在一定程度控制了研究区土壤侵蚀过程。本研究基于重庆市气象局获取的1904—2018年北碚区降雨数据(部分缺失数据由重庆主城区降雨数据补充)进行北碚区降雨趋势分析。结果如图3所示,近百年北碚区降雨量呈现减少-增加-减少的变化趋势,具有明显的阶段性变化特征,总体上与重庆武隆芙蓉洞 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素数据所表征气候变化趋势一致^[26]。相较而言,1958—1973年、1973—1986年及2003—2018年的降雨量较多(>1100 mm),其余阶段降雨量相对较少。

表 3 中梁山剖面孢粉及炭屑分布特征^[24]

Table 3 Pollen and charcoal distribution characteristics in Zhongliang Mountain core^[24]

深度 Depth/cm	松属 <i>Pinus</i> /%	禾本科 <i>Poaceae</i> /%	伴人植物 <i>Androphile</i> /%	草本 <i>Herbs</i> /%	针叶类 <i>Conifers taxa</i> /%	炭屑浓度 Charcoal/(粒/g)
5	61.47	18.93	24.50	28.95	63.70	2953
10	52.00	23.09	27.64	34.36	54.55	2901
15	48.34	29.07	35.88	40.20	49.00	2362
20	44.26	29.94	34.46	43.88	45.39	3556
25	53.20	25.80	34.02	37.67	55.02	3518
30	31.09	36.45	44.57	52.13	31.91	28479
35	42.12	29.85	39.74	45.05	43.22	18373
40	43.90	22.05	31.30	40.16	45.67	3675
45	53.42	20.66	28.77	31.77	54.42	1521
50	48.71	22.14	27.68	32.84	50.18	5512
55	54.66	24.17	29.70	33.81	55.45	3445
最大值 Max	61.47	36.45	44.57	52.13	63.70	28479
最小值 Min	31.09	18.93	24.50	28.95	31.91	1521
均值 Average	48.46	25.65	32.57	38.26	49.86	6935

为更好理解降水变化对中梁山流域侵蚀模数的影响,将降雨量与中梁山流域侵蚀模数进行相关关系分析,结果表明,近百年北碚区降雨量与中梁山侵蚀模数之间呈现良好的正相关关系($R^2 = 0.70$),这表明降水变化是影响中梁山流域的土壤侵蚀重要气候因子,特别是在 1958—1973 年期间,降雨量和土壤侵蚀量均呈现高值,进一步佐证了降雨量对土壤侵蚀的驱动作用。大量降雨导致地表径流增加,进而加剧土壤侵蚀,这与前人关于降雨强度与地表土壤侵蚀之间关系的研究结果相符^[23,27—28]。然而,在某些阶段降雨量与土壤侵蚀之间的相关性并不显著,在 2003—2018 年期间,尽管区域降水量处于较高水平,洼地剖面记录的土壤侵蚀水平相对较低。因此,降雨与侵蚀的相关性在不同的阶段表现出较大的差异,并且当土壤侵蚀模数较低时,降雨与侵蚀的相关性也较差(图 3),说明部分阶段的气候(降雨)变化可能不是该区土壤侵蚀的主控因素。此外,气候变化通常具有周期性^[29],在没有气候事件发生的背景下,周期性的降雨也难以引起研究区土壤侵蚀的突然变化。

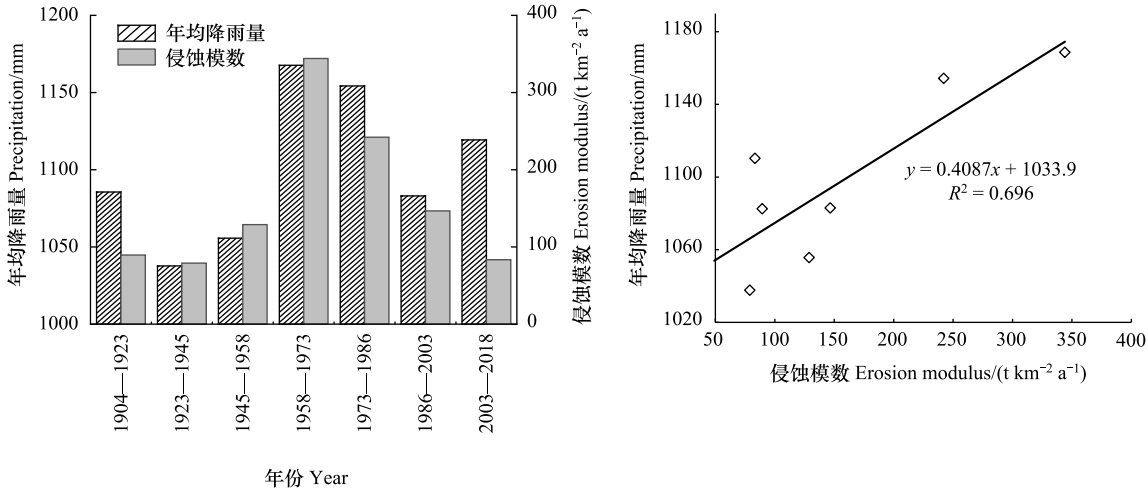


图 3 流域侵蚀模数与北碚区年均降雨量分布及相关分析

Fig.3 The distribution and correlation analysis of erosion modulus and annual average rainfall in Beibei district

4.1.2 人类活动与土壤侵蚀

将产沙量特征与人类活动记录相结合,可揭示流域人类活动对土壤侵蚀的影响^[9-14]。为此,本文将剖面的环境指标(粒度与磁化率)、北碚区人口数据、人类活动事件与产沙量进行对比分析。1950年后北碚人口大幅增长,期间伴随着大规模的森林砍伐活动及以粮食生产为中心的农业发展策略的实施,导致区域植被破坏严重,土壤流失加剧^[30]。研究区1958—1973年期间流域产沙模数高达 $344.1 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$,达到近百年土壤侵蚀的峰值(图4),很可能与期间社会经济的快速发展直接相关。在此期间,大量植被遭受人为破坏后,使得土壤裸露,流域土壤侵蚀强烈,最终导致研究区沉积物产量剧增。类似的现象在其它地区也有所报道,如1979年贵州石人寨流域森林的严重采伐导致该流域1979—1990年土壤侵蚀量($52.58 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$)显著高于1990—2008年阶段($2.56 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$)^[16]。此外,此时段沉积剖面中磁化率也达到最高值($41.6 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$),同时黏粒含量呈现持续下降,砂粒含量持续增多的趋势,进一步证实了人类活动对土壤侵蚀的加剧作用(图4)。大规模垦荒破坏了原本水土物质平稳,导致大量铁磁性物质与粗颗粒物输入洼地中,最终造成洼地沉积物的

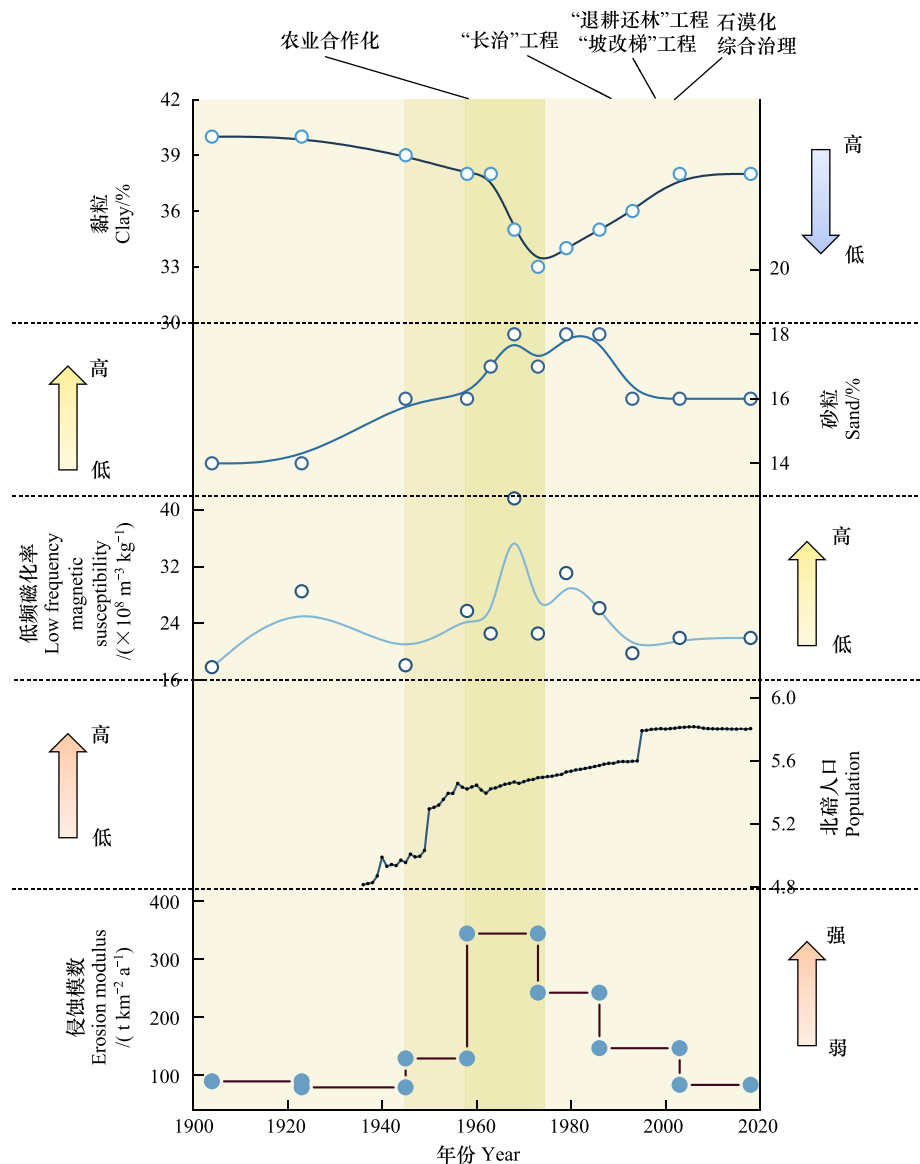


图4 黏粒含量、砂粒含量、低频磁化率、北碚人口(对数(以10为底))^[30]与侵蚀模数分布图

Fig.4 Clay content, sand content, low frequency magnetic susceptibility (χ_f), population of Beibei (logarithmic (base 10))^[30] and erosion modulus

粗颗粒成分的增加,磁化率含量偏高^[20,23,31]。类似现象在其它研究中也有所体现,且均发生在人类活动强烈的高能事件期间^[12-13]。因此,本文的多种指标验证了定年得出的土壤侵蚀数据的可靠性,同时与史志资料的对比,也表明了此阶段人类活动可能是土壤侵蚀急剧加快的主要因素。

1980 年以后流域环境指标趋于稳定,沉积物产量逐渐下降,可能是岩溶区人为生态环境改善的结果。首先槽谷内裸露碳酸盐岩与薄土层交替出现的碎片化景观限制了农业种植扩张^[1,3-4],为生态恢复创造了有利条件。其次 1989 年我国在长江上游实施了水土保持重点防治工程,有效改善该地区的生态环境,实现水土流失面积由增到减的转变^[32]。1999 年启动的“退耕还林”工程显著促进西南地区植被面积的增长,截至 2018 年,累计造林面积已超过 $35 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[33],森林植被恢复有效限制地表径流,拦截坡面上的侵蚀沉积物。此外,自 20 世纪 90 年代末以来,各地经济高速增长以及快速城市化提供更多就业机会,积极引导农村劳动力输入城市,从而减轻该地区的人类活动。进入 21 世纪西南地区生态恢复工程的实施,有效巩固退耕还林成果,进一步降低侵蚀产沙强度(图 4)。前人^[11,16]研究结果也表明,90 年代后沉积物产量趋于下降,主要原因为该地区此前遭受严重的水土流失,残存可侵蚀的土壤大幅度减少,沉积物物源条件受到限制,剩余土壤则通过生态恢复工程而保存。

4.2 岩溶区土壤侵蚀与生态演变

岩溶洼地沉积物是反映流域土壤侵蚀与生态演变之间耦合关系的重要记录^[16,34]。沉积物中的孢粉记录是揭示区域植被覆盖的常用指标之一,承载着丰富的植被信息,可为过去流域生态变化与人类活动历史提供最直接的证据^[35-36]。例如,Guo^[37]通过研究长沙铜官窑剖面孢粉记录,发现瓷器生产的蓬勃发展以及农业开垦种植的集约化破坏了当地森林,进而导致水土流失,并引发生态系统失衡。汪啟容等^[34]利用重庆岩溶槽谷区沉积物中的孢粉记录揭示了近 700 年来的植被演替和喀斯特石漠化的历史与变化,发现当地农业扩张以及人口增长可能是引起土地退化与石漠化现象加剧的主导因素。

本研究中,中梁山沉积剖面记录显示,1950 年代末之前草本植物含量较低(32.8%),指示人类活动相关的炭屑浓度及伴人植物禾本科花粉含量较低(21.4%)且变化幅度较小,而以松属为主导的针叶类花粉含量维持在较高水平(>45%)。这种孢粉类型组合暗示当地农耕活动范围有限,植被破坏程度较小,森林植被覆盖相对完好,这与《北碚区志》中所记载的 1958 年之前全区森林覆盖率较高的史实相符^[30]。根据本研究沉积剖面的记录,该段时期的平均土壤侵蚀模数较低($<100 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$),验证了当地人类活动强度较低,生态环境处于相对稳定状态。

而在 1960—1970 年代,剖面的禾本科花粉含量处于较高水平(25.3%—36.5%),松属花粉浓度下降且出现剖面最低值(31.09%)。这可能反映了该时段内中梁山流域的松树林面积锐减,而农作物种植范围的增加。这一推测得到 Xu 等^[38]研究的支持,其研究发现现代花粉组合与植被状况存在定量关系,例如,松属花粉含量低于 30%时,当地松树林可能遭到极度破坏或于采样点周围不存在,而地层中禾本科花粉的大量出现通常指示区域农业的扩张^[35,39],这与此时段内川渝地区耕地面积增加的记录相吻合^[40](图 5)。此外,炭屑浓度的数据进一步验证了 1960—1970 年代生态环境恶化的推测,该阶段内剖面炭屑浓度急剧上升且至最高值(28479 粒/g),意味着出现大规模清理森林植被,焚烧杂草的地面过程。结合该时段内土壤侵蚀模数来看,流域产沙量达到百年来的峰值($344.1 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$),表明不可持续的土地管理(包括森林砍伐)通过降低植被覆盖率(15.3%)加剧流域的土壤侵蚀。

在之后的时段中(1973—2018 年),沉积剖面中草本植物花粉逐渐下降(43.9%降至 28.9%),以松属为主导的针叶类花粉含量逐渐上升(45.3%升到 63.7%),研究区植被景观较此前阶段发生显著变化。此阶段松树花粉的增加(44.2%升到 61.5%)可能与该地区植树造林活跃相关^[39,42],政府在西南地区积极开展飞播造林、封山育林等一系列植被恢复措施,区域植被恢复主要为松树等针叶类树种,这直接促进了近 50 年岩溶地区森林面积的扩张与松树比重的增加^[43]。特别是自 1999 年退耕还林还草工程实施以来,西南岩溶区成为全球植被生长的热点区域之一,我国植树造林面积约有 45%分布于此^[44]。近 40 年西南岩溶区的归一化植被指数

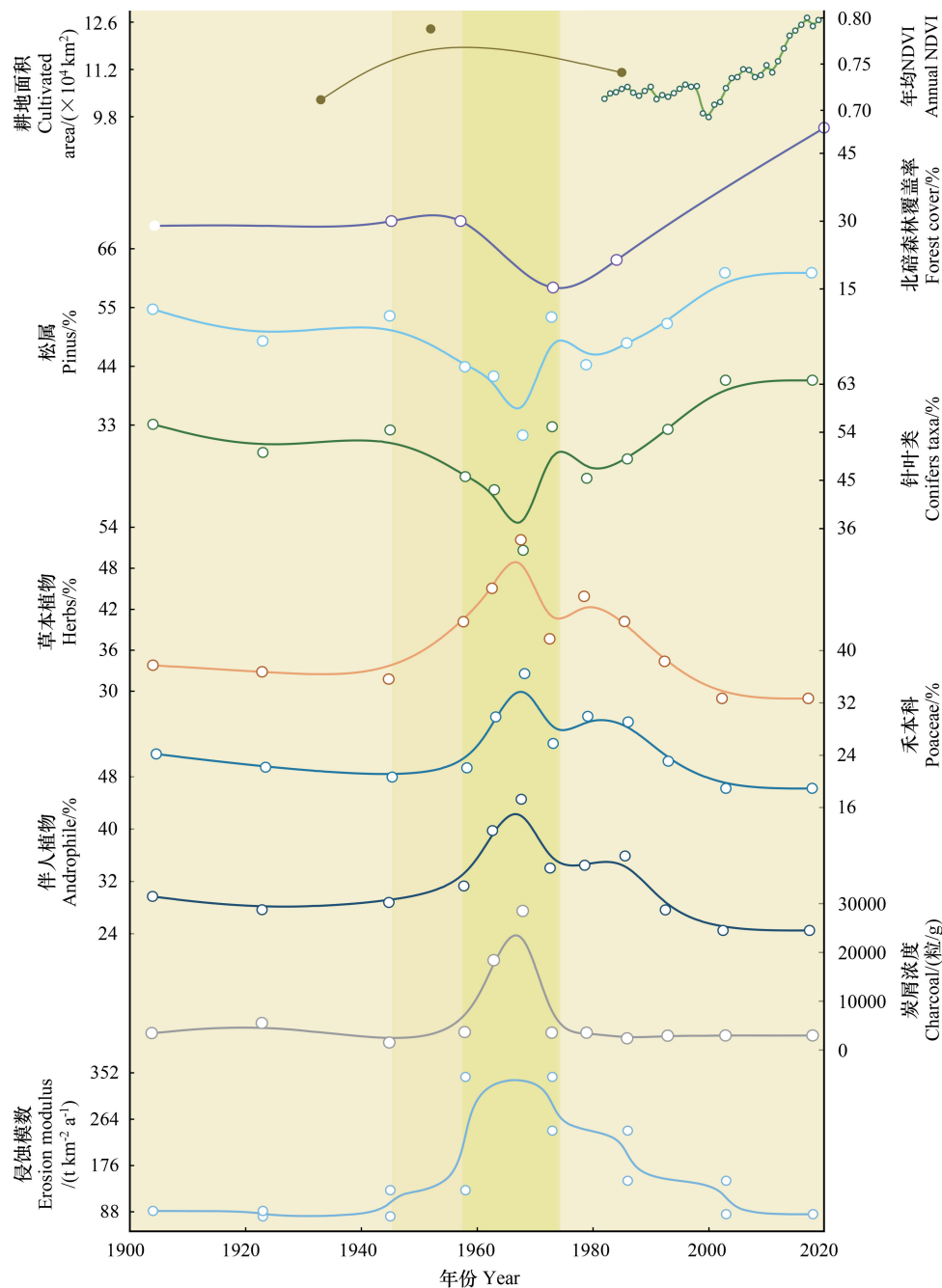


图5 中梁山剖面指示人类活动的孢粉含量及侵蚀模数与川渝耕地面积^[40]、西南地区近40年归一化植被指数^[41]及北碚区森林覆盖率^[30]对比

Fig.5 The Zhongliang Mountain profile indicates the pollen content and erosion modulus evolution of human activities compared with cultivated area^[40], the NDVI in Southwest China in the recent 40 years^[41], and forest cover in Beibei area^[30]

(1982—2019年NDVI)更直观地说明在人为补偿下区域植被覆盖度的不断提高^[41,45]。理论上,植被恢复可通过地下根系固土促渗及地表覆盖阻缓径流等方式有效地抑制水土流失^[46]。沉积剖面记录显示1986年之后(1986—2018年)土壤侵蚀模数明显下降(图5),表明土壤侵蚀强度减弱。其中,2003—2018年($83.4 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$)相较于1986—2003年($146.7 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$)土壤侵蚀模数下降了43%,这与2018年石漠化状况公报公布的监测结果相吻合,其结果指出1999至2016年期间岩溶区水土流失量减少了20%以上,因土壤流失造成

的岩溶石漠化年均扩张率由 1.86% 下降至 -3.45%^[47]。综上,通过多年对岩溶区生态的重建,经植被恢复工程、石漠化专项治理等一系列生态工程的实施,植被覆盖率显著提高,土壤侵蚀强度下降,进而遏制“人增-耕进-林退-土地石化”的恶性循环^[47—48]。

5 结论

本文以中梁山岩溶槽谷区洼地沉积物为研究对象,运用¹³⁷Cs、²¹⁰Pb 放射性核示踪技术建立了沉积剖面年代框架,并通过多指标分析重建了洼地小流域过去百年间土壤侵蚀历史与生态环境演变过程,揭示了岩溶背景下人类活动对流域生态环境的复杂影响。研究区土壤侵蚀和生态环境演变呈现出四个明显的阶段:第一阶段(1904—1945 年)土壤侵蚀强度较低,植被覆盖率较高,生态环境相对稳定;第二阶段(1945—1958 年)人口增长和土地利用变化导致土壤侵蚀强度增加,植被覆盖渐少;第三阶段(1958—1973 年)大规模砍伐森林和开垦种植导致土壤侵蚀强度达到峰值,生态环境严重退化;第四阶段(1973—2018 年)植被恢复和生态工程实施后,生态环境明显改善,景观格局不断优化。

参考文献 (References):

- [1] Wang S J, Liu Q M, Zhang D F. Karst rocky desertification in southwestern China: geomorphology, landuse, impact and rehabilitation. *Land Degradation & Development*, 2004, 15(2): 115-121.
- [2] 袁道光, 蔡桂鸿. 岩溶环境学. 重庆: 重庆出版社, 1988.
- [3] Dai Q H, Peng X D, Zhao L S, Shao H B, Yang Z. Effects of Underground pore Fissures on Soil erosion and Sediment Yield on Karst slopes. *Land Degradation & Development*, 2017, 28(7): 1922-1932.
- [4] Jiang Z C, Lian Y Q, Qin X Q. Rocky desertification in Southwest China: impacts, causes, and restoration. *Earth-Science Reviews*, 2014, 132: 1-12.
- [5] Lan X, Ding G J, Dai Q H, Yan Y J. Assessing the degree of soil erosion in karst mountainous areas by extenics. *CATENA*, 2022, 209: 105800.
- [6] 戴全厚, 严友进. 西南喀斯特石漠化与水土流失研究进展. *水土保持学报*, 2018, 32(2): 1-10.
- [7] Dai Q H, Peng X D, Yang Z, Zhao L S. Runoff and erosion processes on bare slopes in the Karst Rocky Desertification Area. *CATENA*, 2017, 152: 218-226.
- [8] 吴泽, 蒋勇军, 姜光辉, 王正雄, 贺秋芳, 白莹. 中梁山岩溶槽谷区不同土地利用方式坡地产生流规律. *生态学报*, 2019, 39(16): 6072-6082.
- [9] Cao Z H, Zhang Z D, Zhang K L, Wei X, Xiao S Z, Yang Z C. Identifying and estimating soil erosion and sedimentation in small karst watersheds using a composite fingerprint technique. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 294: 106881.
- [10] 裴曾莉, 龙翼, 张云奇, 卢雪, 吴喆虹, 徐明阳. 近 100 年喀斯特槽谷区洼地沉积速率与流域产沙强度. *水土保持学报*, 2020, 34(2): 23-29.
- [11] Li Z W, Xu X L, Zhang Y H, Wang K L, Zeng P. Reconstructing recent changes in sediment yields from a typical karst watershed in southwest China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2019, 269: 62-70.
- [12] Zhang Y Q, Long Y, Zhang X B, Pei Z L, Lu X, Wu Z H, Xu M Y, Yang H Q, Cheng P. Using depression deposits to reconstruct human impact on sediment yields from a small karst catchment over the past 600 years. *Geoderma*, 2020, 363: 114168.
- [13] 陈英, 魏兴萍, 肖成芳, 熊诗意. ¹³⁷Cs、HCHs 测定岩溶洼地沉积物年代及流域产沙强度. *水土保持学报*, 2021, 35(3): 30-37, 45.
- [14] 吕明辉, 王红亚, 蔡运龙, 王文博, 徐琳. 贵州红枫湖 HF1-2 孔沉积物的磁性特征及其土壤侵蚀意义. *湖泊科学*, 2008, 20(3): 298-305.
- [15] 徐经意, 万国江, 王长生, 黄荣贵, 陈敬安. 云南省泸沽湖、洱海现代沉积物中²¹⁰Pb、¹³⁷Cs 的垂直分布及其计年. *湖泊科学*, 1999, 11(2): 110-116.
- [16] Bai X Y, Zhang X B, Long Y, Liu X M, Zhang S Y. Use of ¹³⁷Cs and ²¹⁰Pb_{ex} measurements on deposits in a Karst depression to study the erosional response of a small karst catchment in Southwest China to land-use change. *Hydrological Processes*, 2013, 27(6): 822-829.
- [17] Chen X, Qiao Q L, McGowan S, Zeng L H, Stevenson M A, Xu L, Huang C L, Liang J, Cao Y M. Determination of geochronology and sedimentation rates of shallow lakes in the middle Yangtze reaches using ²¹⁰Pb, ¹³⁷Cs and spheroidal carbonaceous particles. *CATENA*, 2019, 174: 546-556.
- [18] Bai X Y, Zhang X B, Chen H, He Y B. Using Cs-137 fingerprinting technique to estimate sediment deposition and erosion rates from Yongkang depression in the karst region of Southwest China. *Land Degradation & Development*, 2010, 21(5): 474-479.
- [19] Eriksson M G, Sandgren P. Mineral magnetic analyses of sediment cores recording recent soil erosion history in central Tanzania. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1999, 152(3/4): 365-383.
- [20] Chen J A, Wan G J, Zhang D D, Zhang F, Huang R G. Environmental records of lacustrine sediments in different time scales: sediment grain size as an example. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2004, 47(10): 954-960.

- [21] 张振克, 潘红玺, 吴瑞金, 沈吉, 吴艳宏, 朱育新. 近 1800 年来云南洱河流域气候变化与人类活动的湖泊沉积记录. 湖泊科学, 2000, 12(4): 297-302.
- [22] Cao Z H, Zhang K L, He J G, Yang Z C, Zhou Z L. Linking rocky desertification to soil erosion by investigating changes in soil magnetic susceptibility profiles on karst slopes. *Geoderma*, 2021, 389: 114949.
- [23] Wu D, Zhou A F, Liu J B, Chen X M, Wei H T, Sun H L, Yu J Q, Bloemendal J, Chen F H. Changing intensity of human activity over the last 2, 000 years recorded by the magnetic characteristics of sediments from Xingyun Lake, Yunnan, China. *Journal of Paleolimnology*, 2015, 53(1): 47-60.
- [24] 汪啟容. 重庆中梁山岩溶洼地孢粉记录近 700 年来的植被演替及石漠化演变过程[D]. 重庆: 西南大学, 2021.
- [25] Xue H P, Zhou X, Tu L Y, Ma L, Jiang S W, Cui S K, Xu L Q, Chen Y Y, Liu X Y, Qiu Z H, Zhang X L, Kong D M, Zeng F M, Huang C. Climate-vegetation-erosion interactions revealed by the sediments of Huguangyan Maar Lake, southern China. *CATENA*, 2023, 231: 107276.
- [26] Li H C, Lee Z H, Wan N J, Shen C C, Li T Y, Yuan D X, Chen Y H. The $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ records in an aragonite stalagmite from Furong Cave, Chongqing, China: a-2000-year record of monsoonal climate. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 40(6): 1121-1130.
- [27] Cao L, Wang S J, Peng T, Cheng Q Y, Zhang L, Zhang Z C, Yue F J, Fryer A E. Monitoring of suspended sediment load and transport in an agroforestry watershed on a karst plateau, Southwest China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 299: 106976.
- [28] Wei B, Li Z W, Duan L X, Gu Z K, Liu X M. Vegetation types and rainfall regimes impact on surface runoff and soil erosion over 10 years in karst hillslopes. *CATENA*, 2023, 232: 107443.
- [29] Tian X, Long X Y, Luo S E, Cao M, Li J, Sun Y C, Zeng S B, Wu Z, Liu C, Lei L D, Algeo T J, Jiang Y J. Paleoclimatic and anthropogenic impacts on the environment of Southwest China since 33 ka based on multiproxy analysis of karst depression deposits. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2023, 624: 111654.
- [30] 周顺之. 重庆市北碚区志. 重庆: 科学技术文献出版社, 1989.
- [31] 王红亚, 霍豫英, 吴秀芹, 蔡运龙. 贵州石板桥水库沉积物的矿物磁性特征及其土壤侵蚀意义. 地理研究, 2006, 25(5): 865-876.
- [32] Peng J, Xu Y Q, Cai Y L, Xiao H L. The role of policies in land use/cover change since the 1970s in ecologically fragile karst areas of Southwest China: a case study on the Maotiaohe watershed. *Environmental Science & Policy*, 2011, 14(4): 408-418.
- [33] 茆杨, 蒋勇军, 张彩云, 乔伊娜, 吕同汝, 邱菊. 近 20 年来西南地区植被净初级生产力时空变化与影响因素及其对生态工程响应. 生态学报, 2022, 42(7): 2878-2890.
- [34] 汪啟容, 蒋勇军, 郝秀东, 乔伊娜, 张彩云, 马丽娜, 茆杨, 吕同汝, 邱菊. 孢粉记录的重庆岩溶槽谷区 700 年来植被演替与喀斯特石漠化. 生态学报, 2021, 41(9): 3634-3644.
- [35] 李宜垠, 周力平, 崔海亭. 人类活动的孢粉指示体. 科学通报, 2008, 53(9): 991-1002.
- [36] 丁伟, 庞瑞滔, 许清海, 李月丛, 曹现勇. 中国东部暖温带低山丘陵区表土花粉对人类活动的指示意义. 科学通报, 2011, 56(11): 839-847.
- [37] Guo Y Y, Mao L J, Mo D W, Shu J W, Guo A P. Vegetation dynamics and human activities over the past 1300 years revealed by pollen record at the Tongguan kilns, lower Xiangjiang River, China. *Quaternary International*, 2021, 577: 139-146.
- [38] Xu Q H, Li Y C, Yang X L, Zheng Z H. Quantitative relationship between pollen and vegetation in northern China. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2007, 50(4): 582-599.
- [39] 庞有智, 杨明生, 张虎才, 邓财, 唐领余. 鄱阳湖地区过去 2160 年孢粉记录的植被变化及影响因素. 第四纪研究, 2023, 43(5): 1225-1240.
- [40] 曹雪, 金晓斌, 王金朔, 缪丽娟, 周寅康. 近 300 年中国耕地数据集重建与耕地变化分析. 地理学报, 2014, 69(7): 896-906.
- [41] 马炳鑫, 和彩霞, 靖娟利, 王永锋, 刘兵, 何宏昌. 1982—2019 年中国西南地区植被变化归因研究. 地理学报, 2023, 78(3): 714-728.
- [42] Zhang K X, Qin W, Tian F, Cao X Y, Li Y C, Xiao J L, Ding W, Herzschuh U, Xu Q H. Influence of plant coverage and environmental variables on pollen productivities: evidence from northern China. *Frontiers of Earth Science*, 2020, 14(4): 789-802.
- [43] 郝秀东, 欧阳绪红, 谢世友, 魏兴萍, 罗伦德. 喀斯特山地典型植被恢复过程中表土孢粉与植被的关系. 生态学报, 2011, 31(10): 2678-2686.
- [44] Tong X W, Brandt M, Yue Y M, Horion S, Wang K L, De Keersmaecker W, Tian F, Schurgers G, Xiao X M, Luo Y Q, Chen C, Myneni R, Shi Z, Chen H S, Fensholt R. Increased vegetation growth and carbon stock in China Karst via ecological engineering. *Nature Sustainability*, 2018, 1: 44-50.
- [45] Cai H Y, Yang X H, Wang K J, Xiao L L. Is Forest Restoration in the Southwest China Karst promoted Mainly by Climate Change or Human-Induced factors? *Remote Sensing*, 2014, 6(10): 9895-9910.
- [46] 秦伟, 曹文洪, 郭乾坤, 于洋, 殷哲. 植被格局对侵蚀产沙影响的研究评述. 生态学报, 2017, 37(14): 4905-4912.
- [47] 我国岩溶地区石漠化状况公报. 中国自然资源报, 2019-01-09.
- [48] Zhou L G, Wang X D, Wang Z Y, Zhang X M, Chen C, Liu H F. The challenge of soil loss control and vegetation restoration in the karst area of southwestern China. *International Soil and Water Conservation Research*, 2020, 8(1): 26-34.