

DOI: 10.11766/trxb202412220500

CSTR: 32215.14.trxb202412220500

刘芳, 蒋勇军, 田兴, 戴涛, 韩莎. 重庆市酉阳天坑沉积物记录的近百年来岩溶小流域土壤侵蚀历史[J]. 土壤学报, 2025, 62(6): 1611–1623.
LIU Fang, JIANG Yongjun, TIAN Xing, DAI Tao, HAN Sha. A Century-long Soil Erosion History Documented in Tiankeng Sediments from a Small Karst Catchment in Youyang County, Chongqing[J]. Acta Pedologica Sinica, 2025, 62(6): 1611–1623.

重庆市酉阳天坑沉积物记录的近百年来岩溶小流域土壤侵蚀历史*

刘 芳, 蒋勇军[†], 田 兴, 戴 涛, 韩 莎

(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)

摘 要: 岩溶区土壤侵蚀历史研究可为评估区域生态恢复潜力和区域水土保持工作提供参考。针对近 50 年土壤侵蚀研究已有大量成果, 然而, 重庆市岩溶区近百年土壤侵蚀演变机制尚不清楚。本研究以重庆市酉阳天坑为研究对象, 应用 ^{137}Cs 、 ^{210}Pb 定年法确定剖面年代框架, 计算小流域土壤侵蚀模数, 结合区域史志资料、环境代用指标, 对比前人研究资料, 探讨近百年来重庆市岩溶区土壤侵蚀历史和机制。结果表明: 研究区土壤侵蚀历史可分为三个阶段, 1897—1955 年, 1955—1965 年和 1965—2023 年; 研究区小流域近百年沉积速率和平均侵蚀模数变化较大, 1955—1965 年期间的沉积速率和侵蚀模数分别为 $2.30\text{ cm}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $1\,109\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 显著高于其他两阶段的沉积速率和侵蚀模数; 与重庆市巫山常家洼洼地和重庆市中梁山洼地的土壤侵蚀历史研究对比发现, 近百年来重庆市岩溶小流域的沉积速率与侵蚀模数变化基本一致, 均经历了先升高后降低的过程, 其侵蚀模数高值出现在 20 世纪 50 年代末; 小流域侵蚀模数的高值阶段 (1955—1965 年) 与极端干旱及 20 世纪 50 年代末的大面积伐木事件耦合, 史志资料显示该事件导致森林面积显著减少, 此外, 沉积剖面的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值与磁化率的突增, 也指示着极端干旱和强烈的人类活动对环境的共同作用。该时期的极端干旱与大面积伐木事件是加剧重庆市岩溶区土壤侵蚀的重要原因。本研究为重庆岩溶区近百年流域土壤侵蚀过程研究提供了新的资料, 对全面理解该地区近百年来石漠化演变历史和推进该地区水土保持工作有一定意义。

关键词: 天坑沉积物; ^{137}Cs 和 ^{210}Pb ; 侵蚀强度; Plum 模型; 岩溶区

中图分类号: S157.1 **文献标志码:** A

A Century-long Soil Erosion History Documented in Tiankeng Sediments from a Small Karst Catchment in Youyang County, Chongqing

LIU Fang, JIANG Yongjun[†], TIAN Xing, DAI Tao, HAN Sha

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

* 重庆市科技局-院士专项 (2022YSZX-JCX0008CSTB)、科技中央高校基本科研项目 (SWU-KQ25023) 和西南大学创新研究 2035 先导计划项目 (SWU-XDZD22003) 共同资助 Supported by the Chongqing Science and Technology Bureau - Academician Program (No.2022YSZX-JCX0008CSTB), Fundamental Research Funds for the Central Universities (No.SWU-KQ25023) and Southwest University Innovation Research 2035 Pilot Program (No.SWU-XDZD22003)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: jiangyj@swu.edu.cn

作者简介: 刘 芳 (1998—), 女, 湖南湘西人, 硕士研究生, 主要从事岩溶土壤侵蚀与沉积过程研究。E-mail: liufang9827@163.com

收稿日期: 2024-12-22; 收到修改稿日期: 2025-01-23; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2025-05-09

Abstract: 【Objective】Clarifying the historical trajectory of soil erosion in karst regions and investigating the mechanisms of soil and water loss are of great significance for evaluating the ecological restoration potential of regional reforestation and advancing soil and water conservation efforts. While substantial research achievements have been made in soil erosion studies over the past five decades, the evolutionary mechanisms of soil erosion in Chongqing's karst areas over the past century remain unclear. 【Method】This study focused on a mature Tiankeng in Banxi Town, Youyang County, Chongqing Municipality, located in a typical karst region of Southwest China. The research employed the radioactive nuclide dating methods of ^{137}Cs and ^{210}Pb to establish a chronological sequence of the sediment profile within the Tiankeng. By integrating sedimentary environmental indicators with historical records of human activities, the soil erosion history over the past century in the Xiaojiazhai karst sub-catchment (where the Tiankeng resides) was reconstructed. In parallel, the findings were compared with research results from the Zhongliang Mountain karst depression and Changjiawa depression in Chongqing to investigate the impacts of human activities on soil erosion processes in the karst areas of Chongqing Municipality at a centennial scale. 【Result】The results indicated that the soil erosion history in the study area could be divided into three phases: 1897–1955, 1955–1965, and 1965–2023. Over the past century, the sedimentation rate and average erosion modulus in the sub-catchment exhibited significant variations. During 1955–1965, the sedimentation rate and erosion modulus reached $2.30\text{ cm}\cdot\text{a}^{-1}$ and $1109\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, respectively, which were markedly higher than those of the other two phases. Comparative analysis of soil erosion histories from the Changjiawa Depression in Wushan County and the Zhongliang Mountain Depression in Chongqing revealed that sedimentation rates and erosion moduli in karst sub-catchments of Chongqing over the past century followed a consistent pattern of initial increase followed by decline, with peak erosion modulus values occurring in the late 1950s. To further assess the influence of precipitation on erosion modulus, a correlation analysis between precipitation data and erosion modulus in Youyang County was conducted. The results demonstrated no significant correlation ($R^2 = 0.0059$) between precipitation and erosion modulus over the past century, suggesting that precipitation variation likely did not dominate the pronounced changes in soil erosion within the Tiankeng area during this period. Also, the high erosion modulus phase (1955–1965) coincided with extreme drought events and large-scale deforestation in the late 1950s, coinciding with a drastic reduction in forest coverage during this period. Additionally, abrupt increases in $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ values and magnetic susceptibility within the sediment profile provided further evidence of the combined impacts of extreme drought and intensive human activities on environmental degradation. These findings suggest that extreme drought and deforestation during this period were critical drivers of intensified soil erosion in Chongqing's karst regions. 【Conclusion】The study highlights that regional environmental changes caused by intense human activities far exceeded those resulting from natural conditions and thus, provides novel insights into century-scale soil erosion processes in Chongqing's karst catchments. The findings enhance understanding of regional desertification mechanisms and inform targeted strategies for soil-water conservation.

Key words: Tiankeng sediments; ^{137}Cs and ^{210}Pb ; Erosion intensity; Plum model; Karst area

土壤侵蚀作为全球性的生态环境问题,正在威胁 21 世纪的人类气候安全和粮食安全^[1-2]。岩溶区因成土速率低、土层薄、地表地下双重水文地质结构和景观破碎等特点,使得该区域的土壤侵蚀尤为严重。严重的土壤侵蚀是导致岩溶区石漠化的根本原因,同时,还会带来一系列负面影响,包括破坏生物多样性和生态系统的稳定性,加剧粮食供应的脆弱性,制约社会经济发展等^[1-3]。我国西南岩溶区是世界上连片裸露碳酸盐岩面积最大、岩溶发育最强烈的地区之一^[4],碳酸盐岩的酸不溶物含量低,

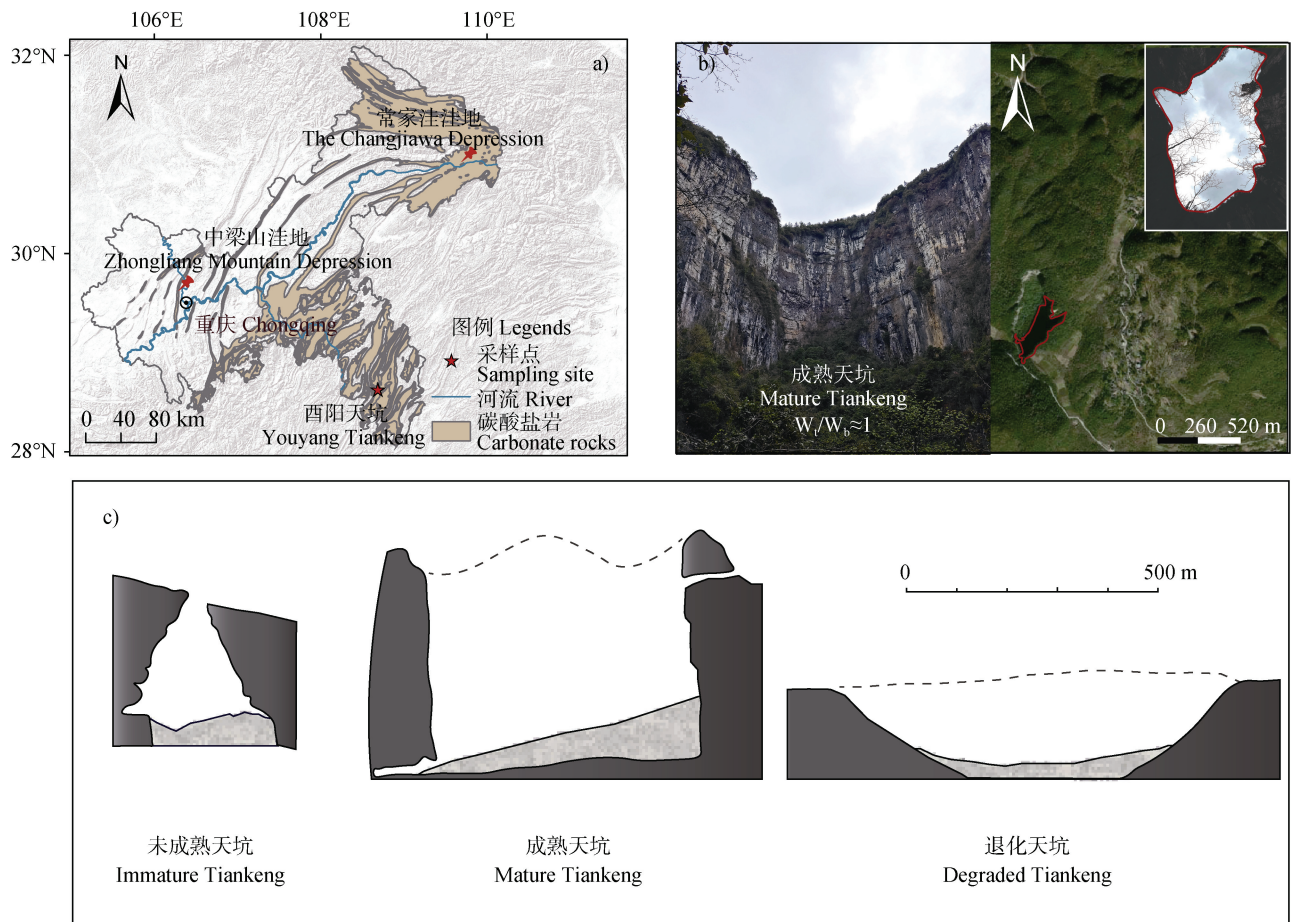
其成土速率极为缓慢,形成 1 cm 厚的土壤需要 $4 \times 10^3 \sim 8.5 \times 10^3\text{ a}$ 时间^[3],一般认为所允许的土壤流失量为 $30 \sim 68\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[5],远低于其他地区(东北黑土区/南方红壤区/黄土高原区)的常规标准 $200/500/1\ 000\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (SL190—1996/2007)^[6],岩溶区土壤一旦流失,将极难恢复。因此,明晰岩溶区土壤侵蚀历史,研究水土流失机制对评估区域再造林的生态恢复潜力和推进水土保持工作具有重要意义。

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,重建不同时间尺度的流域侵蚀模数,以探究小流域的水土流失特征与驱动机制^[7-8]。¹³⁷Cs 和 ²¹⁰Pb 定年技术已很好地用于反演岩溶区小流域较长时间尺度的土壤侵蚀历史及机制。前人将 ¹³⁷Cs 与 ²¹⁰Pb 定年技术用于反演岩溶洼地近百年来的土壤侵蚀历史,并在此基础上,综合生态、环境指标和人类史志资料,重建岩溶区小流域的土壤侵蚀历史和生态演变过程,探讨气候和人类活动对土壤侵蚀的影响^[7-9]。岩溶区地貌类型丰富,峰丛洼地、天坑及落水洞等是主要地貌类型,目前,利用 ¹³⁷Cs 与 ²¹⁰Pb 定年技术反演岩溶小流域侵蚀历史的研究主要集中于岩溶槽谷和峰丛洼地^[8-10]。

天坑作为常见岩溶地貌之一,其演化需要几万年至几十万年的时间^[11],通常会经历地下溶洞不断

扩大、溶洞洞顶崩塌、洞顶口扩大、沉积物填平直至消失,从未成熟天坑、成熟天坑至退化天坑的演变过程(图 1c)^[12-13]。成熟天坑以四周近直立崖壁为特征,顶底直径比约为 1 ($W_t/W_b \approx 1$),是接收流域坡面物质的重要形态^[13-14]。目前对天坑的研究主要集中在天坑形成过程^[12-13]、天坑小生境^[15]、天坑微生物等方面^[16],利用天坑沉积物重建岩溶区小流域的古气候环境还鲜有报道。发育成熟的天坑主要接受周围流域沉积,小流域物质沿着坡面沉积于天坑底部,其理论上可作为恢复小流域人类活动历史和环境演变历史的地质载体^[13]。成熟天坑同洼地一样作为小流域物质的“储存库”,可以记录小流域生态环境演变及人类活动等丰富的信息。此外,其沉积物具有连续性好、代用指标丰富、蕴含信息量大



注: W_t 为天坑顶直径, W_b 为天坑底直径。Note: W_t is the diameter of the Tiankeng top and W_b is the diameter of the Tiankeng bottom.

图 1 重庆市岩溶区分布图 (a); 肖家寨小流域图及天坑横纵剖面野外实景图 (b); 天坑形成三阶段示意图 (c) (改绘自朱学稳和 Waltham^[14])

Fig. 1 Karst area distribution in Chongqing (a); Xiaojiazhai catchment map and Tiankeng transverse and longitudinal section field scene map (b); Three-stage diagram of Tiankeng formation (c) (redrawn from Zhu and Waltham^[14])

和分辨率高等特点,能详细记录小流域土壤侵蚀信息,具有其他载体无法代替的优势^[17]。

本研究以西南典型岩溶区重庆市酉阳县板溪镇成熟天坑为研究对象,运用¹³⁷Cs与²¹⁰Pb放射性核素测年方法,构建该天坑沉积物剖面年代序列,结合沉积物环境指标与人类活动历史,重建近一百年来天坑所在岩溶小流域(肖家寨小流域)的土壤侵蚀历史。同时,对比重庆市中梁山岩溶洼地与常家洼地的研究结果,探究百年尺度下人类活动对重庆市岩溶区土壤侵蚀过程的影响。研究结果揭示了重庆市岩溶区近百年土壤侵蚀强度特征及人类活动影响下石漠化演化过程和规律。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于重庆市酉阳土家族苗族自治县板溪镇(28°43'50"N, 108°46'23"E)(图1a),板溪镇地形复杂,以山地和丘陵为主,多发育岩溶槽谷地貌,海拔高度在450~1584 m之间,属于典型的岩溶槽谷^[18]。酉阳地质构造单元位置属新华夏构造体系第三隆起带的川、黔、湘、鄂褶皱带和大巴山弧形断褶皱带,地层由寒武系到三叠系组成,主要为白云岩和石灰岩岩性。研究区气候为亚热带湿润季风气候,年均降水量为1400 mm,降雨主要集中在春夏两季,3—8月降雨量占全年降雨70%以上^[19],年均气温为15℃左右。植被类型为亚热带常绿针叶林,乔木优势树种有马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)、杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.)、柏木(*Cupressus funebris* Endl.),灌木优势树种为悬钩子(*Rubus* L.)、火棘(*Pyracantha fortuneana* (Maxim.) Li等)。主要农作物为油菜(*Brassica napus* L.)、玉米(*Zea mays* L.)、红薯(*Ipomoea batatas* (L.) Lam.)和水稻(*Oryza sativa* L.)等。研究区小流域四周丘峰环绕,峰顶海拔为920~980 m,集水面积为1.34 km²,出露奥陶统石灰岩地层,流域内南北两侧山坡的平均坡度均大于20°,最陡处坡度大于40°。天坑位于小流域最低处,海拔约720 m,面积为0.0252 km²,横截面近似长方形,其平均长径约225 m,平均短径约110 m(图1b)。天坑四面绝壁,顶底直径比约为1($W_t/W_b \approx 1$),符合天坑演

变过程中的成熟天坑释义^[14](图1c),其崖壁有一小道通往底部,天坑底部堆积厚实土层,地势较为平整,多生长草本、灌木,岩壁侧缘发现几乎被土层掩埋的洞穴。据当地村民介绍,天坑底部在耕地资源紧张时曾被短暂用作农田,但如今已被弃耕多年,当小流域发生强降雨时,坡地的侵蚀泥沙随径流汇入天坑,并在天坑底部形成临时性积水,通常在3~5天后消退。

1.2 样品采集

2023年5月,在重庆酉阳县板溪镇肖家寨小流域的成熟天坑底部中央位置采集了4米多厚的沉积物(TKDD)。在采样之前,清除地表杂草及带有杂质的表层土,在地面铺上一层塑料薄膜以防止污染。采用直径为90 mm的钻孔手动钻取天坑沉积物,采取自下而上的方式对沉积物剖面进行分层采样,每份样品完整装入带有编号的样品袋中密封保存。鉴于¹³⁷Cs和²¹⁰Pb核素测年法的测年范围,本研究只选取0~76 cm深度范围样品进行放射性活度测试。其中,0~40 cm剖面深度以约5 cm厚度分层,40~76 cm剖面深度以3 cm厚度分层,共20份沉积物样品。

1.3 室内样品分析

将采集的样品放在阴凉处风干直到沉积物质量恒定,将完全风干的沉积物用手轻轻碾碎以除去细根及其他杂质,进一步碾磨后过不同孔径的筛。将经过10目、200目筛的沉积物样品分别用于测量磁化率和沉积物有机质 $\delta^{13}\text{C}$ ($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$)。磁化率采用英国Bartington公司生产的MS-2型磁化率仪测定,每个样品重复测量3次,测量精度为 $\pm 0.1\%$ 。

对于沉积物 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 的测定,每份样品称取1~2 g沉积物放入烧杯,加入适量2 mol·L⁻¹的稀盐酸反应24 h彻底去除沉积物样品中无机碳组分后,使用去离子水反复洗涤直至样品溶液pH呈中性,放进60℃恒温烘箱烘干后过200目筛,称取沉积物干重粉末40 mg,将称好的样品用实验室专用锡纸盒打包好,包样时应防止锡纸的破裂以至粉末样品漏洒,将包好的样品编号。采用美国Picarro G2201仪器测定,每20个样品使用标准样品校正一次。磁化率和沉积物有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 测试工作均在西南大学地理科学学院完成。

1.4 定年方法

本研究采用¹³⁷Cs和²¹⁰Pb核素测年方法。¹³⁷Cs

和 ^{210}Pb 放射性活度是在沉积物干重的基础上使用 γ 能谱法和高分辨率、低背景、低能量的 P 型同轴锗探测器测定的, 计数时间 $\geq 28\,800\text{ s}$ 。在 95% 置信水平下, 不确定度通常 $< 10\%$ 。分别使用 662 keV、46.5 keV 及 351.9 keV 伽马射线测定 ^{137}Cs 、总 ^{210}Pb 和 ^{226}Ra 的活性, 试验在中国科学院地球化学研究所完成。

^{137}Cs 是人工放射性元素, 因核试验而产生, 其性质不受外部环境影响, 仅随土壤的移动而迁移^[20]。通常将 1963 年作为北半球核试验产生的 ^{137}Cs 放射性核素的沉积最大年份。 ^{210}Pb 是 ^{238}U 系衰变的一种天然放射性核素, 半衰期约为 22.23 年。沉积物中的 ^{210}Pb 主要由两部分组成, 一部分由 ^{226}Ra 直接衰变成 ^{210}Pb , 成为非过剩 ^{210}Pb , 这一部分与母体 ^{226}Ra 相平衡。另一部分是进入大气后的 ^{222}Rn 衰变为 ^{210}Pb , 通过干湿沉降到达地表, 被表层土壤吸附, 被称为过剩 ^{210}Pb ($^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$)^[21]。

目前, 常用的 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 测年模型 (CFS、CIC、CRS) 已被广泛用于未受干扰的湖泊、水库及河口等沉积物的定年当中^[22]。然而, 岩溶区坡面由于裸露的基岩、不连续的土壤覆盖, 导致坡面土壤有着很强的非均质性^[3], 并不适于直接应用传统测年模型。因此, 本文使用近期开发的贝叶斯模型—Plum 模型^[23], 以确定 ^{210}Pb 年代序列。Plum 模型可以适应数据缺失或未达到平衡深度序列等复杂的沉积物 ^{210}Pb 剖面, 此外, Plum 模型还可以结合多种核素的测年结果建立年代框架^[23]。相较而言, Plum 模型可以为本文提供更加稳定和客观的年代—深度序列, 并更好地评估不确定性, 其已被应用于近期湖泊沉积记录的研究^[24]。本研究的年代—深度模型由 R4.3.3 中的 rplum 软件包构建^[25]。

1.5 沉积速率与侵蚀模数

根据 TKDD 沉积物剖面不同深度对应的年代, 通过确定某一深度的年代进而计算沉积物剖面某一时段内的沉积速率:

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

式中, SR 为沉积速率 ($\text{cm} \cdot \text{a}^{-1}$), d_1 和 d_2 分别对应不同剖面深度至剖面表面的距离, Y_1 和 Y_2 分别对应剖面 d_1 和 d_2 深度 (cm) 的年代 (AD)。

小流域的历史土壤侵蚀模数 (SSY) 则可以通

过式 (2) 计算^[26]:

$$\text{SSY} = \frac{10\,000 \cdot \text{SR} \cdot \gamma \cdot a}{\text{TE} \cdot A} \quad (2)$$

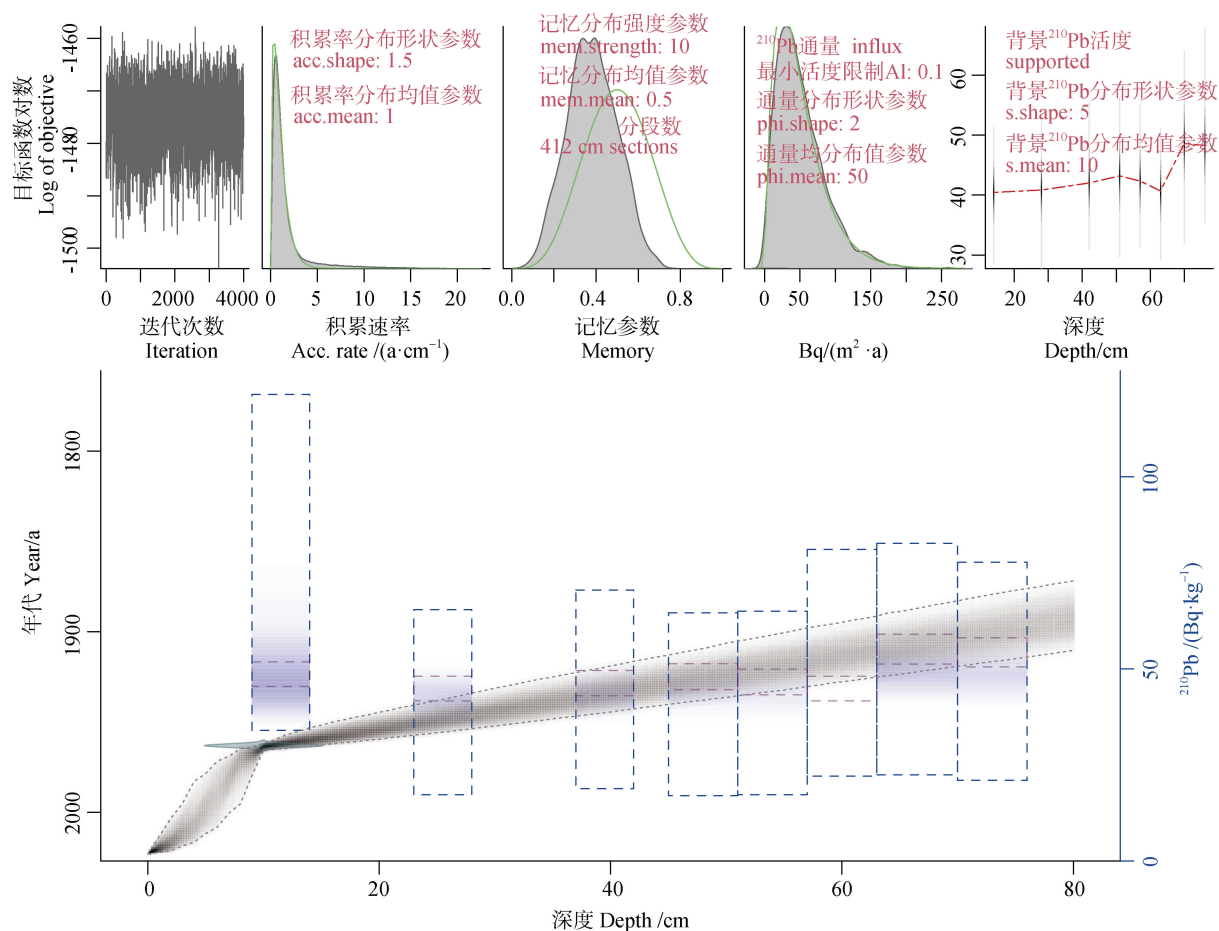
式中, a 为天坑面积 (km^2), γ 为沉积深度的平均容重 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$), A 为整个小流域面积 (km^2), TE 为泥沙拦截效率 (%)。本研究采用了常用于计算洼地小流域历史土壤侵蚀模数的公式, 来计算天坑所在小流域的土壤侵蚀模数。本研究中天坑位于封闭岩溶小流域的最低处, 坡面泥沙随暴雨径流流入天坑之中而后沉积, 泥沙沉积过程与洼地相似, 可被视为深而大的“洼地”, 从理论上其公式适用于此天坑小流域侵蚀模数的计算。对于 TE, 前人已有研究表明积水 2 天的洼地泥沙输移比不低于 0.7, 洼地泥沙拦截率取值介于 70%~90% 之间^[26-27], 因缺乏监测数据及考虑到岩溶区特殊的水土流失方式, 参考已报道的洼地泥沙拦截率, 取值为 0.7。

2 结 果

2.1 天坑沉积物剖面年代框架及流域侵蚀模数

TKDD 剖面 ^{137}Cs 、总 ^{210}Pb 、 ^{226}Ra 放射性活度结果显示, 在约 15 cm 深度, ^{137}Cs 的平均活度为 $7.37\text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$, 为该沉积物剖面峰值, 在 25 cm 深度附近, ^{137}Cs 活度骤减至 $0.25\text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$, 在深度 30 cm 及以下几乎检测不到 ^{137}Cs 活度。根据 ^{137}Cs 放射性年度沉积变化, 可将剖面 ^{137}Cs 活度曲线最大值定为 1963 年。TKDD 剖面的总 ^{210}Pb 放射性活度随深度增加逐渐降低, 在约 15 cm 深度其活度为 $77.70\text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$, ^{226}Ra 放射性活度总体保持稳定。结合 ^{137}Cs 、总 ^{210}Pb 和 ^{226}Ra 的放射性活度, 使用 Plum 模型建立了 TKDD 剖面的年代—深度模型 (图 2)。年代深度模型显示, TKDD 剖面的底部年龄约为 1897 AD, 涵盖了小流域过去约 120 年的沉积历史。

通过式 (1) 和式 (2), 基于年代—深度模型计算出 TKDD 每层的沉积速率 (SR) 与侵蚀模数 (SSY)。肖家寨小流域 1902—2023 年期间平均沉积速率为 $0.60\text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$, 平均侵蚀模数为 $318.5\text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。综合区域史志资料、剖面环境代用指标及流域近年侵蚀模数变化可将侵蚀历史分为三个阶段: 其中, 阶段 1 (1897—1955 年), 侵蚀模数范围为 150~



注：图中单位 $\text{a}\cdot\text{cm}^{-1}$ 含义为每沉积 1 厘米所需的年数。Note: The unit $\text{a}\cdot\text{cm}^{-1}$ in the figure represents the number of years required to deposit 1 centimeter of sediment.

图 2 Plum 模型构建的天坑沉积物年代—深度模型（其中，绿色长点为 ^{137}Cs 时标，蓝色虚线框为总 ^{210}Pb 活度范围，紫色虚线框为 ^{226}Ra 活度范围，红色虚线为年代中值，灰色虚线区间指在 95% 的置信区间年代最小最大值）

Fig. 2 Time-depth model of Tiankeng sediments constructed by Plum model (Where, the green dot is the ^{137}Cs time scale, the blue dotted box is the total ^{210}Pb activity range, the purple dotted box is the ^{226}Ra activity range, the red dotted line is the median year, and the gray dotted line interval refers to the minimum and maximum year in the 95% confidence interval)

$677.8 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ，平均侵蚀模数为 $347.5 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ，为土壤侵蚀较为强烈的阶段；阶段 2（1955—1965 年），侵蚀模数范围为 $747.7\sim 1804 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ，平均侵蚀模数为 $1109 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ，侵蚀模数呈现上升趋势，表明该阶段土壤侵蚀强度增强。阶段 3（1965—2023 年）侵蚀模数范围为 $75.94\sim 222.4 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ，平均侵蚀模数为 $123.2 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ，侵蚀模数总体呈现快速下降趋势（图 3）。

2.2 沉积物环境代用指标

沉积物中有机质特征反映了原始有机物来源的类型和数量，含有反映区域古气候和古环境变化的综合信息^[28]。有机质 $\delta^{13}\text{C}$ ($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$) 保存了沉积物

中有机质的重要特征，其对研究区域古环境、气候变化历史以及人类活动对区域生态系统的影响具有重要意义^[29]。沉积物 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 变化机理复杂，会受到水化学性质、大气 $\delta^{13}\text{C}$ - CO_2 浓度和区域气候变化等环境影响，但一般认为植物来源（植被类型）是控制沉积物 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 的主要因素，因此通常利用沉积物 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 反映流域范围内植被信息^[29]。磁化率是衡量土壤或矿物磁性的一种物理指标，应用在黄土-古土壤、湖泊沉积物、洼地沉积物及海洋沉积物等多个领域，是恢复区域古降水、古环境的常用指标。此外，磁化率也跟土壤侵蚀程度密切相关，通常沉积物中磁性矿物主要来源于流域内被侵蚀的坡面物

质, 流域内的侵蚀作用越强烈, 被搬运进水体中的磁性矿物越多^[30]。研究表明, 在连续的沉积序列中可能夹带磁化率异常的沉积层, 这往往指示了流域

或周边的环境事件, 例如 Dearing 等^[31]学者利用湖泊沉积物的磁化率发现过度放牧导致的土壤流失, 进一步指出了流域土地利用变化历史。

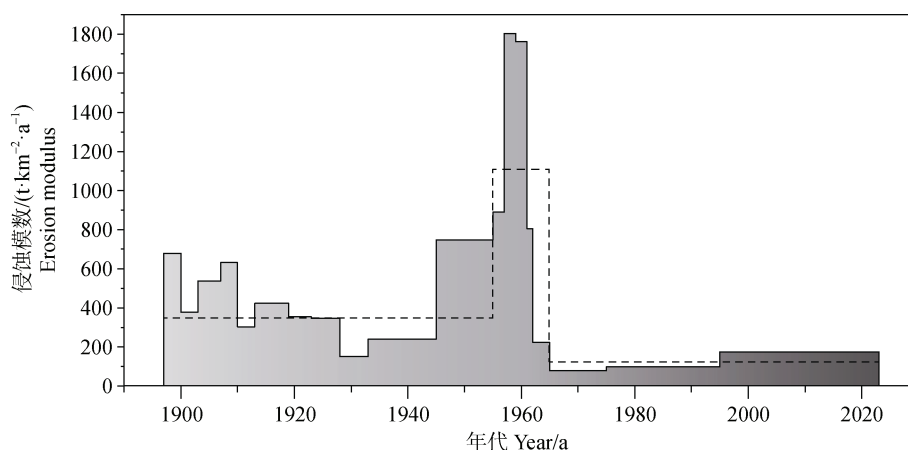


图 3 1897—2023 年期间肖家寨小流域侵蚀模数变化

Fig. 3 Changes of erosion modulus in Xiaojiazhai small catchment during 1897-2023

天坑沉积物剖面 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 和低频磁化率 (χ_{lf}) 随时间和深度波动 (图 4)。剖面 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 在 -25.37‰ ~ -21.22‰ 范围波动, 平均值为 -23.78‰ , 标准偏差为 1.34‰ , 整体变异系数为 5.6% 。剖面 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 由深至浅总体呈现减小 (偏负) 趋势, 但在 $35\sim 43\text{ cm}$ 深度之间, 剖面 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 显著增大 (偏正), 其平均值为 -21.44‰ , 较上下 5 cm 深度范围的沉积物 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值

平均高出 11.9% 。沉积物剖面低频磁化率 (χ_{lf}) 在 $9.61\times 10^{-8}\text{ m}^3\cdot\text{kg}^{-1}\sim 32.55\times 10^{-8}\text{ m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$ 范围波动, 平均低频磁化率为 $14.83\times 10^{-8}\text{ m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$, 标准偏差为 $5.36\times 10^{-8}\text{ m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$, 整体变异系数为 36.2% , 其剖面有两处明显峰值, 分别出现在深度 25 cm ($24.36\times 10^{-8}\text{ m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$) 和深度 70 cm ($32.55\times 10^{-8}\text{ m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$) 处。

2.3 典型岩溶小流域土壤侵蚀对比

对比酉阳天坑、中梁山洼地^[8]和常家洼地^[7]沉积物反演的流域沉积速率和侵蚀模数数据, 可以发现重庆市岩溶区近百年来的流域侵蚀强度经历了相似的变化, 大致可以分为三个阶段 (图 5), 即中度侵蚀 (1900—1940 年)—强度侵蚀 (1940—1970 年)—显著减缓 (1970—2023 年)。在阶段 1 (1900—1940 年), 酉阳天坑的平均侵蚀模数约为 $443.9\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 表明该阶段土壤侵蚀较为强烈, 同时, 该阶段常家洼地的平均侵蚀模数为 $609\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 处于近百年来的最高值, 也指示了较强的土壤侵蚀。在阶段 2 (1940—1970 年), 酉阳天坑的平均侵蚀模数进一步增加, 并达到最高值约 $1041\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 表明流域土壤侵蚀增强, 水土流失严重。同时, 中梁山洼地的平均土壤侵蚀模数在该阶段也呈现增长趋势, 侵蚀模数由 $84.3\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 增长至 $344.1\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 为近百年最高值, 表明该阶段流域内土壤侵蚀剧烈; 常家洼地的侵蚀模数也指示该时期流域土壤侵蚀强烈。

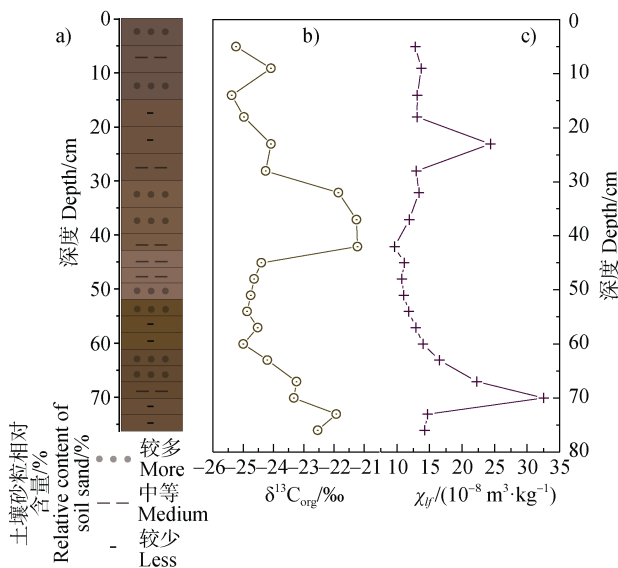


图 4 天坑沉积物剖面示意图 (a); 剖面 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ (b); 剖面 χ_{lf} 曲线 (c)

Fig. 4 Schematic diagram of Tiankeng sediment profile (a); $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ (b); χ_{lf} curve (c)

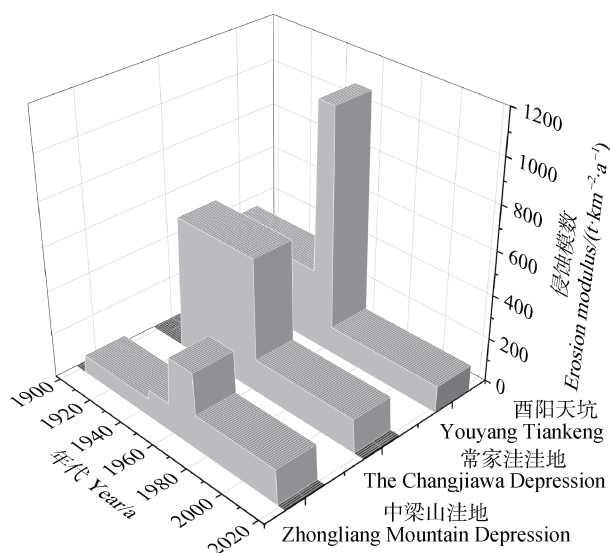


图5 重庆市常家洼洼地^[7]、中梁山洼地^[8]和酉阳天坑沉积物反演的流域近百年侵蚀模数变化

Fig. 5 Variations in erosion modulus over the past century in the catchment areas inferred from sediments of Changjiawa Depression^[7], Zhongliang Mountain Depression^[8], and Youyang Tiankeng in Chongqing Municipality

然而,值得注意的是,这一阶段酉阳天坑所在流域的侵蚀模数在1955年便显著增加,早于中梁山洼地的1958年,这可能与区域差异及当地的极端天气转变相关。据《酉阳县志》记载,从1950年起,酉阳县的森林面积与森林覆盖率便逐步下降。根据《北碚区志》所记载,中梁山洼地所处北碚区的森林覆盖率在1958年前处于较高水平^[32],前人的孢粉研究^[8]表明中梁山洼地森林的大面积减少发生在1960—1970年。常家洼洼地的侵蚀模数在1963年前一直处于较高水平,主要是由于该剖面的年代数据较少导致样品的分辨率较低。在阶段3(1970—2023年),酉阳天坑所在流域的侵蚀模数迅速下降,平均侵蚀模数仅为 $115.3 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,说明这一时期流域内土壤侵蚀显著减小,同时,常家洼洼地和中梁山洼地的土壤侵蚀模数也出现了快速下降,平均侵蚀模数分别降至 $152 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $157.4 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,共同显示这一时期重庆市岩溶区土壤侵蚀得到了有效控制,水土流失量大大减少。常家洼洼地、酉阳天坑和中梁山洼地分别位于重庆东北、东南、西部的典型岩溶区,尽管三者重建的侵蚀模数变化分辨率不一致,但可看出近百年的土壤侵蚀历史表现出相似的变化,尤其在20世纪50年代突增的侵蚀模数。

3 讨 论

3.1 天坑沉积物 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 对土壤侵蚀的指示

肖家寨小流域近百年的土壤侵蚀模数在1900—1910年和1950—1960年两个时期明显增加,与此同时,天坑沉积物记录的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 和低频磁化率也发生了显著变化,可能指示了当地环境的重大变化。沉积物 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 变化机理复杂,受到多种环境影响,但一般认为植物来源(植被类型)是控制沉积物 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 的主要因素,因此沉积物 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 常被用于反演流域范围内的植被信息^[29],自工业革命以来,大量化石燃料燃烧使大气 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 明显负移,从 -6.4‰ 下降至 -7.8‰ ^[33],陆地植物光合作用利用大气 CO_2 合成的有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 也会偏负,沉积物中 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 也随之负移,该过程对 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 产生了重要的影响,也是中国各地大量沉积物 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 在1950年后负移的重要原因之一^[34]。然而,酉阳天坑沉积物 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值近百年来并非逐步偏负,而是呈现偏负-偏正-偏负波动变化,且变幅($-22\text{‰} \sim -26\text{‰}$)大于大气 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 的负移,因此,大气 CO_2 中 $\delta^{13}\text{C}$ 的负移不是影响研究区近百年来 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 变化的主要原因。

区域植被类型的变化是影响沉积物有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 含量的重要原因^[35]。按照植物光合作用的途径,可将陆地高等植物划分为 C_3 植物($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 约 $-29\text{‰} \sim -26\text{‰}$)和 C_4 植物($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 约为 $-13\text{‰} \sim -12\text{‰}$),由于光合途径的不同, C_4 植物相较于 C_3 植物具有更高的水分利用效率,在干旱环境下往往更具竞争力^[36],因此,在较干旱时期, C_4 植被的生长范围往往会扩大,而 C_3 植物的生长范围则会缩小,这种差异性为重建植被群落动态和气候演变提供了宝贵机会^[37]。在20世纪初与20世纪60年代,沉积物中的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值均出现了偏正,指示区域干旱环境下 C_4 草本植物的增多。这一变化在史志资料中也有记载,据《酉阳县志》^[32]和《重庆市志·气象志》^[38]记载,“清朝光绪二十四年(1898年)三月至五月,境内无雨,粮无收”,“二十六年(1900年),酉阳旱灾,寸草不生,俗称‘庚子大灾年’”;而在20世纪60年代因干旱而起的三年困难时期更是面积之广,程度之重^[38]。在这两个时期,研究区土壤侵蚀模数的增加也可能与区域的干旱事件有关。前人的研究表明,在干旱条件下,土壤更易遭受侵蚀^[39-40]。一方

面, 低降水、高蒸发以及高温的干旱条件会加速土壤有机质的分解, 阻碍土壤颗粒的聚集并破坏土壤团聚体, 从而显著降低土壤的抗侵蚀能力^[39]; 此外, 干旱条件还会增加土壤的疏水性, 阻碍降水后地表水分的下渗并加剧地表径流与土壤侵蚀^[40]。另一方面, 干旱条件下土壤水分含量较低, 往往难以维持植被生长, 植被覆盖的减少会削弱植被对地表土壤的保护以及土壤的蓄水能力, 并进一步增强降水后的地表径流与土壤侵蚀^[41]。

3.2 气候与土壤侵蚀的关系

气候变化通过改变降水模式和温度条件及其因

素之间的相互作用, 进而影响土壤侵蚀^[42-43]。在年平均温度波动不大的地区, 降水通常是主导土壤侵蚀的关键气候因素。本研究基于国家气象科学数据中心获取的 1897—2023 年酉阳县降水数据^[19](缺失数据使用重庆主城区降水数据补充) 分析酉阳县年降水量变化(图 6a)。近百年酉阳县降水量大致呈现 3 次先增加后减少的波动变化, 前五十年年平均降水量(1 113 mm)整体低于后五十年年平均降水量(1 358 mm)。其中 1953—1956 年与 1963—1984 年降水最多, 年均降水量超过 1 400 mm, 1923—1950 年降水最多, 年均降水量超过 1 400 mm, 1923—1950 年降水量相对较少, 年均降水量低于 1 100 mm。

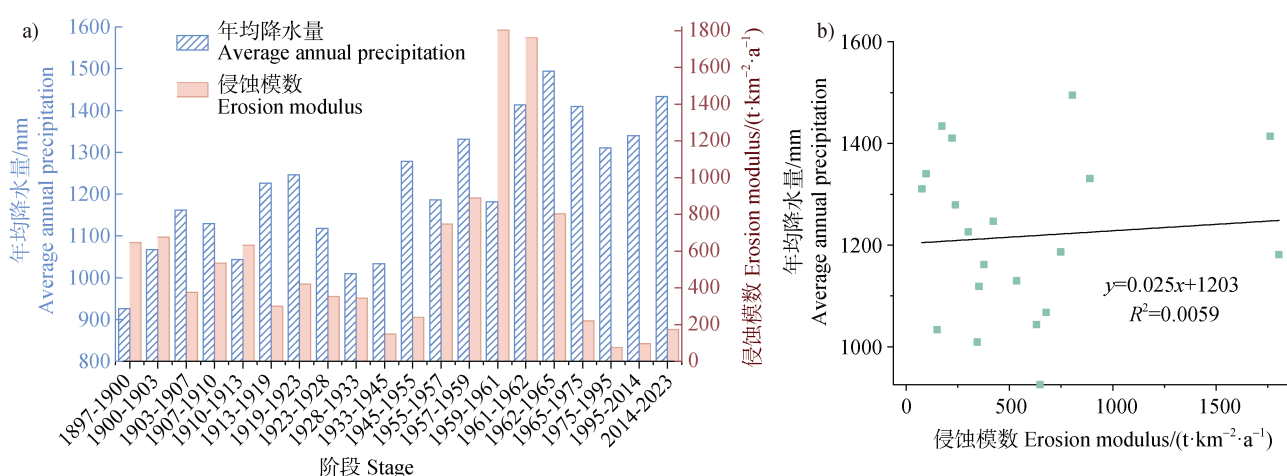


图 6 流域侵蚀模数与酉阳县年均降水量变化^[19] (a) 及两者相关性结果 (b)

Fig. 6 Erosion modulus of a catchment and the change of average annual precipitation of Youyang County^[19] (a) and their correlation (b)

为了进一步理解降水量变化对研究区侵蚀模数的影响, 对酉阳县降水量和侵蚀模数进行相关性分析(图 6b), 结果表明, 酉阳县近百年来降水量与侵蚀模数未表现出明显的相关性($R^2=0.0059$), 这表明降水变化可能不是控制酉阳天坑所在流域近百年来土壤侵蚀显著变化的主导因素, 特别是在 1913—1919 年、1945—1955 年以及 1965—2023 年, 这些时期降水量相对较高, 但是天坑的侵蚀模数却处于近百年的较低值, 降水量变化与侵蚀模数出现了较大的偏离。然而, 在流域侵蚀模数较高的 1959—1961 年以及 1961—1962 年, 降水量也相对较高, 这可能是由于在这些时期流域植被遭到大量破坏后, 植被对地表土壤的保护作用减弱, 大量降水导致地表径流增加, 从而进一步加剧了侵蚀^[8], 这说明降水在侵蚀模数较高的时期一定程度上作为“推手”加剧了土壤侵蚀。一般而言, 在没有气候事件

发生的情况下, 周期性的降水变化难以引起区域土壤侵蚀的变化^[8]。综合研究表明近百年降水量变化不是控制研究区土壤侵蚀显著变化的主控因素。

3.3 人类活动对土壤侵蚀的重要影响

历史时期大规模的森林砍伐可能是导致该流域在 20 世纪 50 年代末侵蚀模数异常升高的重要原因。从人类活动角度来看, 酉阳位于山区, 以当时的生产力水平, 人类主要从事农垦、樵采等活动, 人口快速增长的同时, 对森林的破坏作用也进一步增大。据《酉阳县志》记载^[32], 酉阳森林面积在建国初期为 210 万亩(1 公顷=15 亩), 由于“大跃进”运动(1958 年开始)毁林开垦、大炼钢铁、大办公共食堂等对森林乱砍滥伐, 1975 年森林面积减少至 44.1 万亩, 有 170 多万亩森林植被演变成农耕地和荒山。森林覆盖率由 1956 年的 18.4%锐减至 1982 年的 5.1%, 此时坡面土壤严重侵蚀, 水土流失情况严峻,

生态环境恶化,直至 1971 年飞播造林技术的引入和实施工加快了荒山植被演替的良性循环。该时期流域森林被大面积砍伐,森林覆盖率急剧下降,农耕作用和水蚀作用加强,土壤流失严重,侵蚀模数迅速升高。沉积物 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 在该时期出现持续偏正,其可能是森林植被 (C_3 植物, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}} \leq -27\text{‰}$) 被大面积砍伐后,耕地农作物与撂荒地草地面积 (C_4 植物, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}} \leq -14\text{‰}$) 增加,使得沉积物 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 整体呈现相对偏正状态,李红春等^[44]利用高分辨率洞穴石笋稳定碳同位素发现了北京元大都建立以来对森林

资源的破坏,森林的退化导致 C_3 植物比例大幅度降低,土壤 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 随之升高, $\delta^{13}\text{C}$ 的变化记录了 C_3/C_4 植物比值的分配变化,间接反映了人类活动对其产生的重大影响。磁化率跟土壤侵蚀程度密切相关,沉积物中磁性矿物主要来源于流域内的侵蚀,流域内的侵蚀作用越强烈,被搬运进水体中的磁性矿物就越多,沉积物的磁化率也相应地升高^[30],磁化率的升高与同一时期的侵蚀模数有着较好的对应。这一时期侵蚀模数与环境代用指标的突变揭示了地区环境变化因人类活动而严重脱离自然演变。

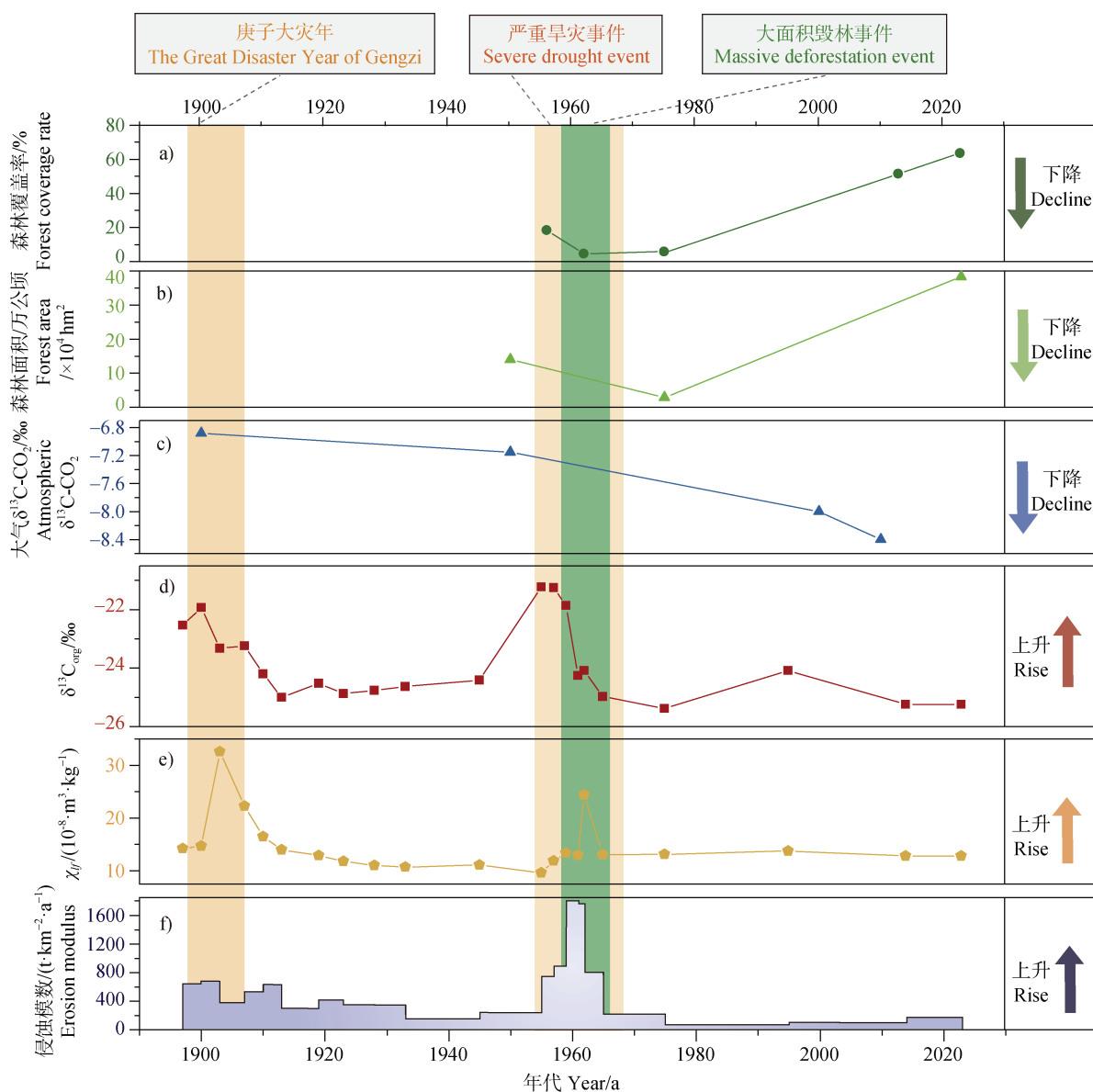


图 7 酉阳森林覆盖率^[32, 45] (a); 酉阳森林面积^[32, 45] (b); 大气 $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$ ^[33] (c); 天坑沉积物 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ (d); 天坑沉积物低频磁化率 (e); 肖家寨小流域侵蚀模数 (f)

Fig. 7 Forest coverage rate in Youyang^[32, 45] (a); Youyang forest area^[32, 45] (b); Atmospheric $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$ ^[33] (c); Tiankeng sediments $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ (d); Low-frequency susceptibility of Tiankeng sediments (e); Erosion modulus of Xiaojiazhai catchment (f)

4 结 论

本研究以重庆市岩溶槽谷区典型成熟天坑—酉阳天坑所在流域(肖家寨小流域)为研究对象,从天坑沉积物入手,使用 ^{137}Cs 和 ^{210}Pb 定年,运用 Plum 模型得到沉积物剖面 ^{210}Pb 年代序列(1897—2023年),构建年代—深度模型,计算每层沉积物沉积速率和侵蚀模数,分析流域土壤侵蚀强度变化特征和原因。综合对比重庆市岩溶区流域近百年的侵蚀模数变化,发现在20世纪中期流域拥有相对较高的侵蚀模数,在1965年后侵蚀模数迅速减小。环境代用指标与历史资料表明,极端干旱与20世纪50年代末大面积伐木事件导致的森林面积显著减少,是加剧肖家寨小流域土壤侵蚀的主要原因。本研究基于 ^{137}Cs 与 ^{210}Pb 定年技术仅探讨了重庆市岩溶区近100年的土壤侵蚀过程及其对人类活动的响应,并未考虑更长时间尺度下(>100年)的重要人类活动,诸如人口迁移、玉米种植等对重庆市石漠化的影响。此外,区域的植被演变与石漠化关系密切,植被破坏往往是导致石漠化的重要原因,依靠历史资料和环境指标虽能粗略了解区域的植被变化,但无法解释具体植被类型的变化。因此,今后可结合 ^{137}Cs 、 ^{210}Pb 与 ^{14}C 等定年技术并采用孢粉等更多生态指标,研究岩溶区更长时间尺度(>100年)下人类活动、植被演变与石漠化的联系,有助于在历史背景下更好地理解人类活动与石漠化的耦合过程。

参考文献 (References)

- [1] Amundson R, Berhe A A, Hopmans J W, et al. Soil and human security in the 21st century[J]. *Science*, 2015, 348 (6235): 1261071.
- [2] Feng T, Chen X Y, Zhu P Z, et al. Differences in soil erosion resistance between different vegetation types of purple soil in the Three Gorges Reservoir Area [J/OL]. *Acta Pedologica Sinica*, 2025, DOI: 10.11766/trxb202407080276. [冯滔, 陈晓燕, 朱平宗, 等. 三峡库区紫色土不同植被类型土壤抗蚀性能差异研究 [J/OL]. *土壤学报*, 2025, DOI: 10.11766/trxb202407080276.]
- [3] Ma Q H, Zhang K L. Progresses and prospects of the research on soil erosion in Karst area of southwest China[J]. *Advances in Earth Science*, 2018, 33 (11): 1130—1141. [马芊红, 张科利. 西南喀斯特地区土壤侵蚀研究进展与展望[J]. *地球科学进展*, 2018, 33 (11): 1130—1141.]
- [4] Yi X S, Dai Q H, Yan Y J, et al. Research progress on the ecological environment effect of farmland abandonment in Karst areas of Southwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43 (3): 925—936. [易兴松, 戴全厚, 严友进, 等. 西南喀斯特地区耕地撂荒生态环境效应研究进展[J]. *生态学报*, 2023, 43 (3): 925—936.]
- [5] Cao J H, Jiang Z C, Yang D S, et al. Grading of soil erosion intensity in Southwest Karst area of China[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2008, 6 (6): 1—7, 20. [曹建华, 蒋忠诚, 杨德生, 等. 我国西南岩溶区土壤侵蚀强度分级标准研究[J]. *中国水土保持科学*, 2008, 6 (6): 1—7, 20.]
- [6] Jiang Z C, Lian Y Q, Qin X Q. Rocky desertification in southwest China: Impacts, causes, and restoration[J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 132: 1—12.
- [7] Pei Z L, Long Y, Zhang Y Q, et al. Deposition rate of Karst depression and sediment yield intensity of the watershed in Karst trough-valley area in the past 100 years[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34 (2): 23—29. [裴曾莉, 龙翼, 张云奇, 等. 近100年喀斯特槽谷区洼地沉积速率与流域产沙强度[J]. *水土保持学报*, 2020, 34 (2): 23—29.]
- [8] Luo S E, Jiang Y J, Tian X, et al. Soil erosion and eco-environmental change in the Karst trough valley of Zhongliang Mountain in Chongqing over the past 100 years[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44 (23): 10782—10793. [罗淑娥, 蒋勇军, 田兴, 等. 重庆中梁山岩溶槽谷近百年土壤侵蚀与生态环境演变[J]. *生态学报*, 2024, 44 (23): 10782—10793.]
- [9] Yuan S, Yue Y M, Zhang X B, et al. Human disturbance exacerbated erosion and deposition in the Karst peak-cluster depressions during the Ming and Qing dynasties[J]. *Scientia Sinica: Terrae*, 2024, 54 (11): 3587—3596. [袁帅, 岳跃民, 张信宝, 等. 明清时期人类干扰加剧喀斯特洼地侵蚀产沙[J]. *中国科学: 地球科学*, 2024, 54 (11): 3587—3596.]
- [10] Bai X Y, Zhang X B, Wang S J, et al. Estimating sediment deposition rates by the Cs-137 technique in Karst depression of Chongtong, Puding County, Guizhou Province[J]. *Earth and Environment*, 2009, 37 (2): 142—146. [白晓永, 张信宝, 王世杰, 等. 普定冲头峰丛洼地泥沙沉积速率的 ^{137}Cs 法测定[J]. *地球与环境*, 2009, 37 (2): 142—146.]
- [11] Shen H T, Sasa K, Meng Q, et al. Exposure age dating of Chinese tiankengs by ^{36}Cl -AMS[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2019, 459: 29—35.
- [12] Waltham T. Collapse processes at the Tiankengs of Xingwen [J]. *Cave and Karst Science*, 2005, 32 (2/3): 107—110.
- [13] Wei Y L, Li C Z, Chen W H, et al. Characteristics and formation and evolution analysis of the Karst landscape

- of Guangxi[J]. *Guangxi Sciences*, 2018, 25(5): 465—504. [韦跃龙, 李成展, 陈伟海, 等. 广西岩溶景观特征及其形成演化分析[J]. *广西科学*, 2018, 25 (5): 465—504.]
- [14] Zhu X W, Waltham T. Tiankeng: Definition and description [J]. *Carsologica Sinica*, 2006, 25 (S1): 35—42. [朱学稳, Waltham Tony. 天坑释义 [J]. *中国岩溶*, 2006, 25 (S1): 35—42.]
- [15] Jiang C, Sun X, Liu Y M, et al. Karst Tiankeng shapes the differential composition and structure of bacterial and fungal communities in Karst land[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2023, 30 (12): 32573—32584.
- [16] Pu G Z, Lv Y N, Dong L N, et al. Profiling the bacterial diversity in a typical Karst Tiankeng of China[J]. *Biomolecules*, 2019, 9 (5): 187.
- [17] Tian X, Long X Y, Luo S E, et al. Paleoclimatic and anthropogenic impacts on the environment of Southwest China since 33 ka based on multiproxy analysis of Karst depression deposits[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2023, 624: 111654.
- [18] Zhang R, Yang X L, Liu X M, et al. Changes of stalagmite grayscale in the last 100 years and significance of climate and environment in the southeast of Chongqing[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39 (16): 6098—6106. [张瑞, 杨勋林, 刘秀明, 等. 渝东南近 100 年石笋灰度变化及气候环境意义[J]. *生态学报*, 2019, 39 (16): 6098—6106.]
- [19] China Meteorological Administration. National Data Center for Meteorological Sciences, 2024. <http://data.cma.cn/data/index/6d1b5efbdcfb9a58.html>. 2024-05-12. [中国气象局. 国家气象科学数据中心, 2024. <http://data.cma.cn/data/index/6d1b5efbdcfb9a58.html>, 2024-05-12.]
- [20] Bai X Y. Assessment of sediment and erosion rates by using the caesium-137 technique in a Chinese polygonal Karst depression[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 64 (8): 2151—2158.
- [21] Zhang X, Qi Y, Walling D E, et al. A preliminary assessment of the potential for using ^{210}Pb measurement to estimate soil redistribution rates on cultivated slopes in the Sichuan Hilly Basin of China[J]. *Catena*, 2006, 68 (1): 1—9.
- [22] Abril J M. Radiometric dating of recent sediments: On the performance of ^{210}Pb -based CRS chronologies under varying rates of supply[J]. *Quaternary Geochronology*, 2019, 51: 1—14.
- [23] Aquino-López M A, Blaauw M, Christen J A, et al. Bayesian analysis of ^{210}Pb dating[J]. *Journal of Agricultural, Biological and Environmental Statistics*, 2018, 23 (3): 317—333.
- [24] Fan J N, Wang Y B, Cui K. Three-century climate variations recovered from Lake Heilongtan in southwest China and potential Anthropogenic evidences[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 912: 169094.
- [25] [25] R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing, <https://www.r-project.org/>. 2024-09-01.
- [26] Zhang Y Q, Long Y, Zhang X B, et al. Using depression deposits to reconstruct human impact on sediment yields from a small Karst catchment over the past 600 years[J]. *Geoderma*, 2020, 363: 114168.
- [27] Zhang X B, Bai X Y, Liu X M. Application of a ^{137}Cs fingerprinting technique for interpreting responses of sediment deposition of a Karst depression to deforestation in the Guizhou Plateau, China[J]. *Science China Earth Sciences*, 2011, 54 (3): 431—437.
- [28] Mohamed Anas M U, Scott K A, Wissel B. Carbon budgets of boreal lakes: State of knowledge, challenges, and implications[J]. *Environmental Reviews*, 2015, 23 (3): 275—287.
- [29] Yang P P. Environmental significance of organic carbon isotope ($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$) in the sediments of Lake Hala[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2021. [杨盼盼. 哈拉湖沉积物有机碳同位素 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$) 的环境指示意义[D]. 兰州: 兰州大学, 2021.]
- [30] Zhang F B, Yang M Y, Zhao X G, et al. The review of using magnetic tracer to study soil erosion [J]. *advances in Earth Science*, 2005, 20 (7): 751—756. [张凤宝, 杨明义, 赵晓光, 等. 磁性示踪在土壤侵蚀研究中的应用进展 [J]. *地球科学进展*, 2005, 20 (7): 751—756.]
- [31] Dearing J A, Elner J K, Haphey-Wood C M. Recent sediment flux and erosional processes in a Welsh upland lake-catchment based on magnetic susceptibility measurements[J]. *Quaternary Research*, 1981, 16 (3): 356—372.
- [32] Youyang County Annals Compilation Committee. Annals of Youyang County [M]. Chongqing: Chongqing Publishing Group, 2002. [《酉阳县志》编纂委员会. 酉阳县志[M]. 重庆: 重庆出版社, 2002.]
- [33] Rubino M, Etheridge D M, Trudinger C M, et al. A revised 1000 year atmospheric $\delta^{13}\text{C}$ -CO₂ record from Law Dome and South Pole, *Antarctica*[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118 (15): 8482—8499.
- [34] Jiang H, Han Y M, Liu W G, et al. Significant increase in human activities since 1850 according to multiple proxies of Sihailongwan maar lake sediment[J]. *Advances in Earth Science*, 2024, 39 (1): 82—95. [江鸿, 韩永明, 刘卫国, 等. 四海龙湾沉积物多指标反映人类活动从 1850 年开始显著增强[J]. *地球科学进展*, 2024, 39 (1): 82—95.]
- [35] Zeng Y Q, Li X S, Liu Y J, et al. Quantification of Holocene temperatures in the eastern Hunshandake Sandy Land using $\delta^{13}\text{C}$ of loess organic matter[J]. *Global*

- and Planetary Change, 2024, 237: 104457.
- [36] Zhang E L, Sun W W, Chang J, et al. Variations of the Indian summer monsoon over the last 30 000 years inferred from a pyrogenic carbon record from south-west China[J]. Journal of Quaternary Science, 2018, 33 (1): 131—138.
- [37] Wu P, Xie Y Y, Chi Y P, et al. Temperature controls on the C4 plants expansion in the mid-latitudes and its ecological implications for dryland paleoclimatic reconstruction: A stable carbon isotope perspective[J]. Earth-Science Reviews, 2024, 249: 104678.
- [38] Meteorological Annals Compilation Committee of Chongqing City. Chongqing City Annals - Meteorological Annals: 1891-2005[M]. Chongqing: Southwest China Normal University Press, 2007. [重庆市气象志编纂委员会. 重庆市志-气象志: 1891—2005[M]. 重庆: 西南师范大学出版社, 2007.]
- [39] Baskan O. Analysis of spatial and temporal changes of RUSLE-K soil erodibility factor in semi-arid areas in two different periods by conditional simulation[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2022, 68 (12): 1698—1710.
- [40] Gazol A, Camarero J J, Jiménez J J, et al. Beneath the canopy: Linking drought-induced forest die off and changes in soil properties[J]. Forest Ecology and Management, 2018, 422: 294—302.
- [41] Ahn S, Doerr S H, Douglas P, et al. Effects of hydrophobicity on splash erosion of model soil particles by a single water drop impact[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2013, 38 (11): 1225—1233.
- [42] Xue H P, Zhou X, Tu L Y, et al. Climate-vegetation-erosion interactions revealed by the sediments of Huguangyan Maar Lake, Southern China[J]. Catena, 2023, 231: 107276.
- [43] Zeng R C, Zhang Y Q, He B H, et al. Hydrodynamic characteristics of concentrated flow under different angles between rock and slope in the Karst trough valley area[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(3): 762—775. [曾荣昌, 张玉启, 何丙辉, 等. 喀斯特槽谷区不同岩石与坡面夹角下集中流侵蚀水动力学特征[J]. 土壤学报, 2023, 60 (3): 762—775.]
- [44] Li H C, Gu D L, Chen W J, et al. Application of high-resolution carbon isotope record of a stalagmite from the Shihua cave, Beijing— $\delta^{13}\text{C}$ record of deforestation after the establishment of the grand capital (Yuan Dadu) in 1272 A. D.[J]. Geological Review, 1998, 44 (5): 456—463. [李红春, 顾德隆, 陈文寄, 等. 高分辨率洞穴石笋中稳定同位素应用——北京元大都建立后对森林资源的破坏— $\delta^{13}\text{C}$ 记录[J]. 地质论评, 1998, 44 (5): 456—463.]
- [45] Youyang Tujia and Miao Autonomous County People's Government. Youyang Data, 2024. <http://youyang.gov.cn/>, 2024-11-23. [酉阳土家族苗族自治县人民政府. 酉阳数据, 2024. <http://youyang.gov.cn/>, 2024-11-23.]

(责任编辑: 檀满枝)