干热河谷区典型小流域1977—2024年的侵蚀产沙特征

周 铃[1,2], 苏正安[1], 张信宝[1],
周 涛[1,2], 谢骁健[1,3], 吴清华[1,2], 易 聪[1,2], 曹浈榛[1,4]
(1.中国科学院 水利部成都山地灾害与环境研究所/中国科学院山地表生过程与生态调控重点实验室, 四川 成都 610041; 2.中国科学院大学, 北京 100049;
3.西南大学 资源环境学院, 重庆 400716; 4.福州大学 环境与安全工程学院, 福建 福州 350108)

摘 要: [目的]探究干热河谷区小流域尺度侵蚀产沙变化特征,为该区沟壑治理及生态恢复提供科学依据。[方法]选取小雷宰水库沉积泥沙为研究对象,基于水库历史运行资料,研究区降雨特征及沉积泥沙机械组成、低频磁化率、土壤有机碳(SOC)和全氮(TN)等理化指标,分析小雷宰小流域1977—2024年的侵蚀产沙演变特征。[结果]①确定了剖面183 cm以下,86—183 cm和0—86 cm分别代表1977—2000年(植被恢复前),2001—2015年(植被恢复后至平沟建园前)和2016—2024年(平沟建园后)的侵蚀产沙过程。②剖面泥沙低频磁化率在植被恢复后升高,在平沟建园后下降,而SOC和TN在植被恢复和平沟建园后持续增加,表明植被恢复和平沟建园均改变了沉积泥沙来源,并促进了土壤养分积累。③小雷宰小流域累计淤积泥沙约1.07×10^5 t,年平均侵蚀产沙模数约为1 224.79 t/(km^2·a),变化范围约为422.73~2 111.70 t/(km^2·a)。不同时段的侵蚀产沙模数表现为:1977—2000年[1 552.91 t/(km^2·a)]>2016—2024年[1 169.63 t/(km^2·a)]>2001—2015年[732.91 t/(km^2·a)],表明植被恢复和平沟建园可以有效缓解水土流失。④土壤侵蚀产沙模数与降雨量和降雨侵蚀力呈正相关关系,但相关性未达到显著水平($p>0.05$),表明降雨不是驱动该区域土壤侵蚀产沙阶段性变化的关键因素。[结论]干热河谷区近几十年的人类活动显著改变了土壤侵蚀产沙特征,植被恢复工程和平沟建园工程的实施可以有效缓解水土流失,但仍需重点关注工程实施初期的侵蚀风险。

关键词: 侵蚀产沙模数; 人类活动; 降雨; 沉积泥沙; 干热河谷
文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2026)05-0010-11 **中图分类号:** S157.1

文献参数: 周铃, 苏正安, 张信宝, 等.干热河谷区典型小流域1977—2024年的侵蚀产沙特征[J].水土保持通报,2026,46(5):10-20. Zhou Ling, Su Zhengan, Zhang Xinbao, et al. Characteristics of erosion-induced sediment yield in a typical small watershed of dry-hot valley region during 1977—2024 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2026,46(5):10-20.
DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2026.05.031 **CSTR:32312.14.stbctb.2026.05.031**

Characteristics of erosion-induced sediment yield in a typical small watershed of dry-hot valley region during 1977—2024

Zhou Ling[1,2], Su Zhengan[1], Zhang Xinbao[1],
Zhou Tao[1,2], Xie Xiaojian[1,3], Wu Qinghua[1,2], Yi Cong[1,2], Cao Zhenzhen[1,4]
(1.*Key Laboratory of Mountain Surface Processes and Ecological Regulation/Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan* 610041, *China*; 2.*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*; 3.*College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing* 400716, *China*; 4.*College of Environment & Safety Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian* 350108, *China*)

Abstract: [Objective] The variation characteristics of erosion and sediment yield at the small-watershed scale in a dry-hot valley region were investigated in order to provide a scientific basis for gully management and ecological

收稿日期:2026-03-29 **修回日期:**2026-05-05 **采用日期:**2026-05-06
资助项目:国家重点研发计划项目"干热河谷区多水源库容协同提升与优化配置关键技术"(2023YFD1901203); 国家自然科学基金项目"退耕减蚀对紫色土坡地土壤有机碳(SOC)库储量与稳定性的长效影响机制"(42277338)
第一作者:周铃(2001—),女(汉族),四川省乐山市人,硕士研究生,研究方向为水土保持与生态修复。Email:zhouling@imde.ac.cn。
通信作者:苏正安(1980—),男(汉族),四川省江油市人,博士,研究员,主要从事土壤侵蚀和水土保持方面的研究。Email:suzhengan@imde.ac.cn。

restoration in the region. [Methods] Deposited sediment from Xiaoleizai reservoir was selected as the study object. Based on the reservoir's historical operation records, rainfall characteristics of the study area, and the physicochemical properties of the deposited sediment, including mechanical composition, low-frequency magnetic susceptibility, soil organic carbon (SOC), and total nitrogen (TN), the evolution characteristics of erosion and sediment yield in the Xiaoleizai small watershed during 1977—2024 were analyzed. [Results] ① The sediment layers below 183 cm, 86—183 cm, and 0—86 cm represented erosion and sediment yield processes during 1977—2000 (before vegetation restoration), 2001—2015 (after vegetation restoration but before the gully reclamation project), and 2016—2024 (after the gully reclamation project), respectively. ② The low-frequency magnetic susceptibility of the sediment profile increased after vegetation restoration and decreased after the gully reclamation project, whereas SOC and TN continued to increase after both interventions, indicating that vegetation restoration and the gully reclamation project altered sediment sources and promoted soil nutrient accumulation. ③ The cumulative sediment deposition in the Xiaoleizai small watershed was approximately 1.07×10^5 t, with an annual average erosion-induced sediment yield modulus of about 1 224.79 t/(km²·a), ranging approximately from 422.73 to 2 111.70 t/(km²·a). The erosion-induced sediment yield modulus during different periods followed the order 1977—2000 [1 552.91 t/(km²·a)] > 2016—2024 [1 169.63 t/(km²·a)] > 2001—2015 [732.91 t/(km²·a)], indicating that vegetation restoration and the gully reclamation project could effectively mitigate soil erosion and water loss. ④ The erosion-induced sediment yield modulus showed a positive correlation with rainfall amount and rainfall erosivity, but the correlation was not statistically significant ($p>0.05$), indicating that rainfall was not a key driver of soil erosion-induced sediment yield variations in this region. [Conclusion] Human activities in the dry-hot valley region over recent decades have significantly altered the characteristics of soil erosion-induced sediment yield. The implementation of vegetation restoration projects and the gully reclamation project in the dry-hot valley region can effectively reduce soil erosion, but particular attention should be paid to erosion risks during the initial stages of these projects.

Keywords: erosion-induced sediment yield modulus; human activities; rainfall; deposited sediment; dry-hot valley region

干热河谷区作为中国横断山区最重要的少数民族人口聚居区,区域水热资源丰富,并以盛产冬早蔬菜和热带水果而闻名全国,是中国西南地区重要的农业生产区[1]。但是,该区受焚风效应与深切峡谷地形影响,具有炎热干燥,降水偏少,蒸发强烈的气候特点。受植被覆盖度低,土壤抗蚀性弱以及坡度陡峭等因素叠加影响,该区侵蚀响应敏感,沟蚀发育,沟谷密度可达7.4 km/km²,侵蚀模数高达8 000~20 000 t/(km²·a),是世界上土壤侵蚀最严重的区域,被普遍认为是生态脆弱区[2-3]。因此,厘清该区域的侵蚀特征对于区域生态恢复具有显著意义。

塘库或淤地坝作为侵蚀泥沙的储存区,拦截的大量泥沙赋存了来自源区的重要信息,为重建流域的历史土壤侵蚀过程提供了基础[4]。Wei等[4]通过在拦沙坝前钻孔获取沉积岩芯,将沉积层厚度、粒度分布与历史侵蚀性降雨事件进行关联判识沉积层年代,从而重建恢复农业流域的长期产沙演变过程。Zeng等[5]进一步将淤地坝测量、无人机摄影测量与水文监测结合,分阶段量化侵蚀、输移与沉积过程,并通过泥沙输移比(SDR)等指标揭示了水土保持措施对泥沙输移过程的调控效应。Zhang等[6]基于沉积区分层样品重建了西南喀斯特典型小流域约600 a前的产沙变化,并将其与历史土地利用和人类活动及岩溶石漠化演变联系,为理解岩溶区长期侵蚀-沉积过程提供了关键证据。张信宝等[7]基于洼地沉积泥沙^{137}Cs定年技术重建了喀斯特小流域1979年以后的侵蚀产沙速率。

目前,许多学者在该区开展了土壤侵蚀相关研究。Su等[8]基于原位观测试验探究了不同流量不同冲刷时间下沟头形态特征及趋势速率的变化。Zhang等[9]基于形态测量探究了沟蚀过程中上游面积、沟头形态和土壤性质对沟壁冲刷孔形态的影响。庄永在等[10]基于RUSLE模型评估了2018—2022年元谋县的土壤侵蚀面积及侵蚀量。Wang等[11]探究了该地区退耕还林措施对区域生态恢复及土壤质量的影响。文孝丽等[12]揭示了冲沟恢复区不同植被恢复时段下的土壤碳氮特征。综上所述,现有关于干热河谷区土壤侵蚀的研究多集中于干热河谷区沟蚀机理、侵蚀强度估算及生态恢复效益方面的研究,而针对小流域尺度、长时间序列条件下产沙变化及其驱

动机制的研究仍相对不足。为此,本文以干热河谷区元谋县小雷宰村的小雷宰小流域为研究区,选取流域出口的自然蓄水水库进行沉积剖面采样,基于水库历史资料、研究区历史降雨资料和沉积泥沙理化特征,确定沉积剖面时间坐标,重建小流域近50 a来的侵蚀产沙变化过程,探究人类活动和降雨对流域侵蚀产沙过程的影响,以期为干热河谷区沟壑治理及生态恢复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于云南省元谋县黄瓜园镇小雷宰村的小雷宰小流域,地理坐标为101°50′15″—101°51′36″E,25°51′57″—25°52′48″N。海拔1 027.01~1 224.55 m,流域面积1.82 km^2。研究区气候属南亚热带季风气候,旱季和雨季界限分明。年平均气温21.9 ℃,年均潜在蒸发量3 911 mm,年日照时数2 670.4 h,日照率在60%以上。降水时空分布不均,年平均降雨616.33 mm,雨季集中在6—10月,占全年降雨量的92.3%以上。流域内土壤以燥红土为主,pH值介于5.21~7.70,土壤质地偏砂,砂粒含量为12.54%~83.08%,粉粒含量为16.64%~60.11%,黏粒含量为0.28%~41.85%;土壤受干热气候条件和稀疏植被环境影响,有机质分解作用强烈,腐殖质矿化快,土壤有机质含量低。燥红土下伏早更新世元谋组半成岩砂泥岩。研究区的主要土地利用类型有林草地、退耕还林地、沟壁、耕地和平沟建园地等,植被类型主要由农作物、经果林、乔灌木和草本植被组成。自2000年以来,研究区土地利用发生显著变化。2001—2003年研究区开展大规模的退耕还林工程和荒山造林工程,流域内植被覆盖度增加。2016年开始,研究区持续开展了大规模的平沟建园工程,将侵蚀劣地改造为耕地。

小雷宰水库位于小雷宰小流域出口处,1977年竣工投入使用,用于农田灌溉。土坝坝高15.90 m,坝长52.00 m,总库容3.32×10^5 m^3,属于小(二)型水库。防洪标准采用20 a一遇设计,200 a一遇校核。水库未配备水情及工程监测、交通等管理设施和专业技术人员,无历史水位记录。水库溢洪道位于顺流左岸,全长67 m,断面尺寸为2.0 m×3.5 m,进口底板高程为1 033.75 m。由于溢洪道未衬砌,两岸边坡坍塌物阻塞槽身,底板高程高于坝顶高程。因此,推断该溢洪道从未过水。同时,根据访问当地农民,该水库无大规模坝体修复,无洪水泥沙外泄。因此,可将小雷宰小流域视为一个封闭的系统。

1.2 样品采集与处理

2025年4月,在小雷宰水库中部开挖1个246 cm深的沉积剖面。根据沉积分选作用进行沉积旋回分层,粗颗粒泥沙先沉降,细颗粒泥沙后沉降,从而在单个沉积旋回层中形成下部为粗颗粒、上部为细颗粒的分层结构[13]。但在本次调查中,泥沙质地并不总能被完全区分。一个完整的沉积旋回层可能代表几次侵蚀性降雨的结果。本研究通过野外观测共发现10个砂层,这代表10次大洪水事件。因此,通过在沉积剖面利用不锈钢铲以3—5 cm厚度采集分层样品,并在砂层处小心采集样品为剖面定年提供依据。同时,利用环刀按照一定间隔分层采集6个容重样品。

泥沙样品带回室内风干,去除砾石和植物残体后研磨过筛,分别测试泥沙样品机械组成、低频磁化率、全氮和有机碳。其中,机械组成采用马尔文激光粒度仪(英国Mastersizer 2000激光粒度仪)进行测定,依据国际制划分标准分为黏粒(<2 μm)、粉粒(2~20 μm)和砂粒(20~2 000 μm)3类,每个样品测试3次取平均值作为最终测量值。泥沙低频磁化率采用英国Bartington MS2型双频磁化率仪进行测定,每个样品测试3次取平均值作为最终测量值。土壤有机碳和全氮采用德国元素分析仪(Vario MACRO cube)进行测定,每个样品测试1次并设置平行样,以确保测试结果的准确性;平行样相对标准偏差(RSD)均小于5%。此外,容重样品带回实验室后采用烘干法测定泥沙容重。

1.3 研究方法

1.3.1 水库库容曲线拟合与淤积量估算

根据小雷宰水库坝顶高程1 034.0 m,坝高15.9 m,可知坝底高程略高于1 018.1 m。因此,将该高程假设为库底沉积起始位置,设置对应库底沉积面积为0。结合小雷宰水库2013年实测的水位-面积数据,拟合水库淤积泥沙高程-面积曲线($y=0.182x^3-2.101x^2+8.534x+1\ 018.698$),拟合优度较高($R^2=0.960$)。当面积为0时,对应的高程为1 018.698 m,由于水库库底高度一般略高于坝基高度,因此,结果基本合理。

基于高程-面积曲线,结合沉积剖面不同土层的高程数据,利用台体公式计算水库不同沉积层淤积泥沙体积,获取水库淤积泥沙高程-库容曲线(图1)。其中,不同淤积层淤积泥沙体积计算公式为

$$V_i=(S_i+S_{i+1}+\sqrt{S_i\cdot S_{i+1}})h_i/3 \quad (1)$$

式中:V_i为剖面第i层的体积(m^3);S_i为剖面第i层的

下表面面积(m²);S_{i+1}为剖面第i层的上表面面积(m²);h_i为剖面第i层的厚度(m)。

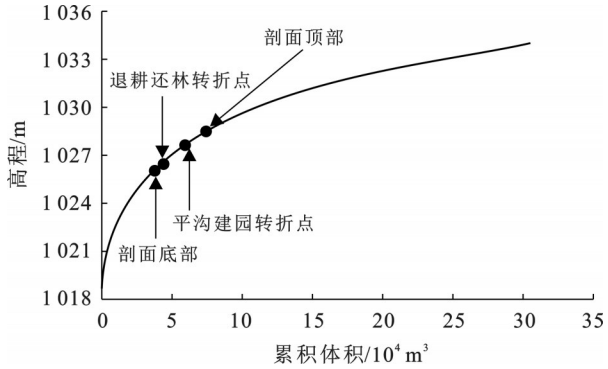


图1　小雷宰水库淤积泥沙高程-库容曲线

Fig.1　Elevation-reservoir capacity curve of deposited sediment in Xiaoleizai reservoir

基于不同沉积层厚度、容重计算水库不同沉积层的泥沙淤积量与淤积总量:

$$M=\sum_{i=1}^{n}M_i \tag{2}$$

式中:M为水库泥沙淤积总量(t);M_i为剖面第i层的沉积量(t)。

$$M_i=V_i\rho_i \tag{3}$$

式中:V_i为剖面第i层的体积(m³);ρ_i为剖面第i层的容重(g/cm³)。其中,不同沉积层的容重通过对不同深度的实测容重取均值获取(表1),由于剖面下部的压实作用,其容重高于上层。但下部土壤孔隙不可能无限被压缩,当达到一定值之后将趋于稳定。本研究结果显示剖面150—240 cm泥沙容重为1.46~1.53 g/cm³,极值为0.07 g/cm³,变异系数为2.55%,离散程度较低,表明该深度下的泥沙容重基本处于稳定特征,因此,246 cm以下的泥沙容重由150—240 cm深度的容重平均值进行近似估算,具有一定置信度。

表1　小雷宰水库沉积剖面不同采样深度实测容重

Table 1　Measured bulk density of sediment profiles at different sampling depths in Xiaoleizai reservoir

采样深度/cm	5	80	130	150	204	240
容重/(g·cm⁻³)	1.30	1.30	1.31	1.47	1.53	1.46

1.3.2　小流域侵蚀产沙模数估算

由于小雷宰水库无洪水和泥沙外泄,单次侵蚀性降雨事件下,小流域上游侵蚀的泥沙经过输移将沉积至水库中。当泥沙输移比为1时,水库淤积泥沙量即为侵蚀产沙量。而泥沙输移比与流域面积成反比,当流域面积极小时,泥沙输移比可能接近1[14],水库泥沙淤积量在一定程度上可以表征流域侵蚀产沙量[5]。因此,结合本研究区流域面积较小(1.82 km²),水库位于出口等特征,本文假设该区域的泥沙输移比为1[15],通过结合水库不同沉积层的淤积泥沙量和淤积年限与流域面积近似反演小流域的历史侵蚀产沙过程并估算其侵蚀产沙模数。

1.3.3　降雨侵蚀力的计算

基于元谋气象站和元谋干热河谷沟蚀崩塌观测研究站获取研究区1977—1997年的逐年降雨数据,1998—2024年的逐日降雨数据,并利用章文波等[16]的日雨量估算侵蚀力模型计算流域1998—2024年的降雨侵蚀力,计算公式为

$$M=\alpha\sum_{j=1}^{k}(P_j)^{\beta} \tag{4}$$

式中:M为半月降雨侵蚀力值〔(MJ·mm)/(hm²·h)〕;k为半月时间段内的天数(d),将每月前15 d(包含第15 d)作为一个半月时间段,剩下天数作为另一个半月时间段,一年共计分为24个半月时间段;P_j为半月时间段内第j天的侵蚀性降雨量(mm),当$P_j<12$时,将其记为0;α,β为模型待定参数。

$$\alpha=21.586\beta^{-7.1891} \tag{5}$$

$$\beta=0.8363+\frac{18.177}{P_{d12}}+\frac{24.455}{P_{y12}} \tag{6}$$

式中:P_{d12}为日降雨量大于等于12 mm的日平均降雨量(mm);P_{y12}为日降雨量大于等于12 mm的年平均降雨量(mm)。

1.3.4　数据处理

采用Excel 2019和SPSS 19.0进行数据统计分析,利用Python 3.10的scipy.stats和matplotlib包进行Pearson相关分析并绘图,利用Origin 2021软件绘制其余图件。

2　结果与分析

2.1　沉积剖面定年

通过将极端降雨事件与剖面砂层对应,初步确定沉积剖面形成时间。如图2所示,在整个沉积剖面中,野外共划分10个沉积旋回层,每个沉积旋回层下部砂层必定对应一次强降雨事件。其中S_3处砂层(80—83 cm)和S_{10}处砂层(230—246 cm)的厚度显著大于其他部位,结合1977—2024年小流域的降雨数据,以及历史时期的新闻报道,研究区在1998年和2016年分别发生了一次极端洪水事件。因此,本研究推断,剖面80—83 cm处砂层对应2016年9月16日的暴雨事件,降雨量高达96.1 mm,且2016年9月15日发生降雨量44.4 mm的大雨事件,两次降雨事件接近,累积降雨140.5 mm,因此该砂层较厚,具有极高可信度。剖面底部230—246 cm处巨厚砂层对应

1998年6月19日和21日的两场强降雨事件，两次降雨事件降雨量分别为93.6和100.8 mm，具有极高可信度。在准确确定两处强控制层的时间坐标后，综合1998—2024年间的强降雨事件及剖面测定的机械组成特征，将其余沉积旋回砂层与降雨事件逐一对应，构建完整的剖面时间序列。结果显示，沉积旋回层S_1和S_2的极薄砂层（分别位于30 cm，65 cm处）对应2022年6月5日（降雨量67.8 mm）和2017年7月7日（67.9 mm）；沉积旋回层S_4，S_5，S_6，S_7，S_8，S_9的极薄砂层（分别位于112，136，144，177，189和204 cm处）分别对应2010年7月28日（降雨量83 mm），2008年6月18日（降雨量98.6 mm），2006年7月18日（83 mm），2001年8月20日（77.3 mm），2000年10月5日（60.4 mm）和1998年6月25—26日（降雨量77.2 mm），具有较高可信度。最后，在以上结果的基础上，通过筛选1998—2024年的日降雨数据，根据“大雨对大沙原则”对沉积旋回层内部的分层样品建立时间序列，具有较高可信度。

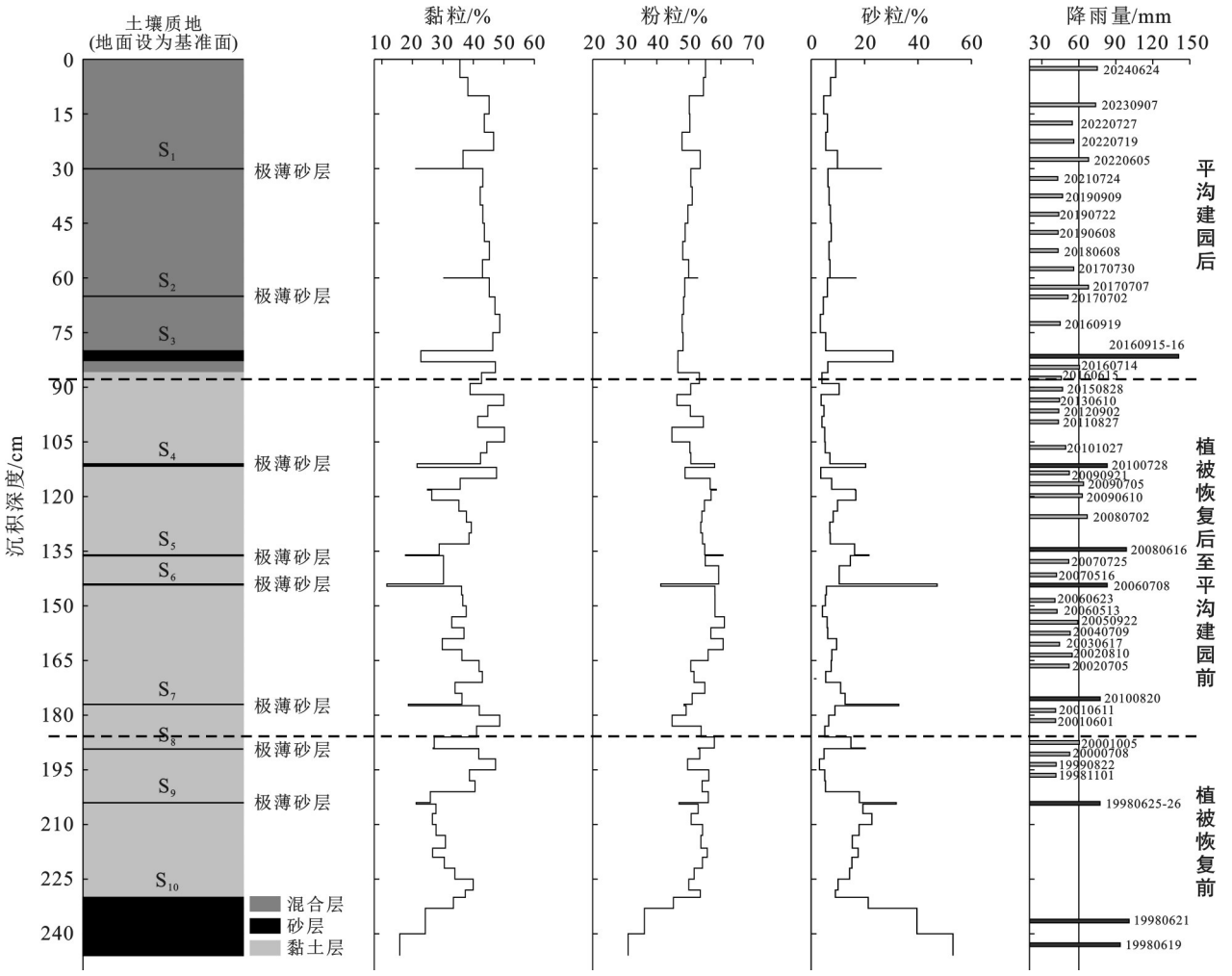


图2 小雷宰水库沉积剖面时间坐标

Fig.2 Time scale of sediment profile of Xiaoleizai reservoir

同时，本研究根据研究区历史资料和降雨数据进一步对沉积剖面年代划分进行验证。通过访问当地农民，并结合Google Earth历史高分辨率遥感影像，了解到自2015年末以来，小雷宰水库冬春季处于干旱状态。结合剖面0—86 cm处的土壤特征，无明显沉积旋回特征，土壤结构混乱，且86 cm以下出现裂缝，裂缝中出现混合层土壤。这表明水库泥沙淤积至该层后可能受干旱影响，地表龟裂，后淤积泥沙进入裂缝；同时，水库干涸后，动物践踏破坏沉积旋回层，混合层上部难以划分出沉积旋回层（图3）。研究区自1998年以来，年降雨量呈现逐渐下降的趋势，表明该地区的气候正趋于干旱化。因此，本研究推断剖面86 cm处对应的年份是2015年末，这与80—83 cm处砂层的形成时间基本对应，进一步增强了小雷宰水库沉积剖面时间坐标结果的置信度。因此，沉积剖面0—246 cm代表了小流域1998—2024年的侵蚀产沙过程，结果具有较高可信度（图2）。同时，结合当前小雷宰水库淤积面高程（1 028.49 m）和估算坝

底高程(1 018.698 m),小雷宰水库累计淤积泥沙深度约为 980 cm,可推算出 246—980 cm 代表 1977—1997 年的侵蚀产沙过程,但该阶段时间坐标基于间接估算获得,因此,结果具有一定可信度。

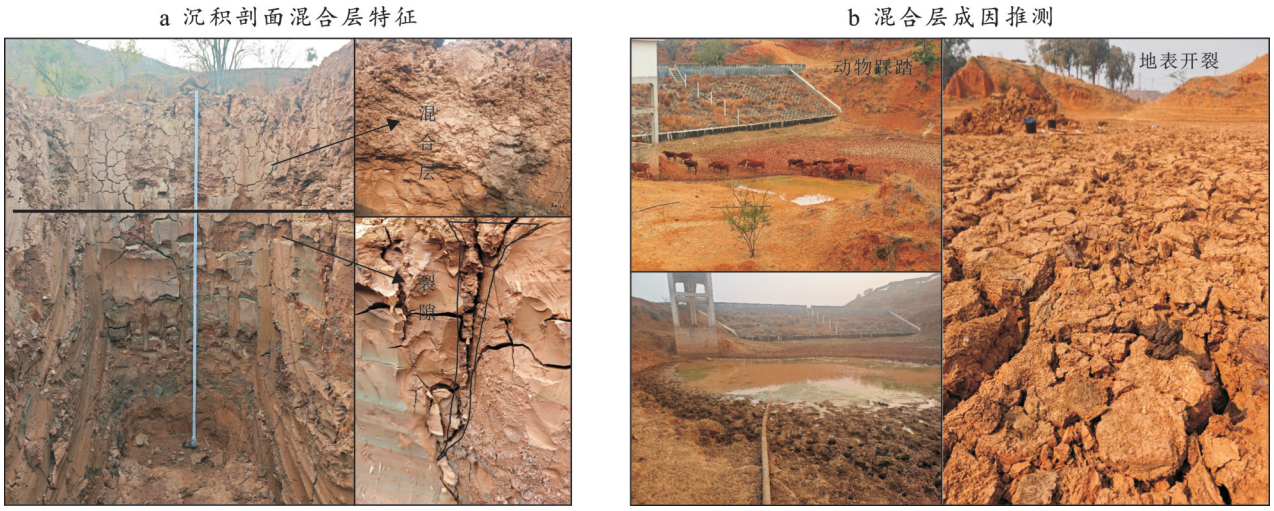


图 3　小雷宰水库淤积泥沙特征

Fig.3　Characteristics of deposited sediment in Xiaoleizai reservoir

2.2　沉积剖面泥沙理化性质垂直分异特征

土壤磁化率是评价土壤风化程度、人类活动强度变化的重要指标,在沉积学研究中具有重要指示意义[17-18]。土壤有机碳和全氮作为评价土壤肥力的重要指标,也可以反映人类活动变化[6]。

图 4 为水库沉积剖面泥沙的理化性质随深度的分布图。由图 4 可以看出,沉积剖面的泥沙低频磁化率为 1.16×10^{-5}～5.78×10^{-5},平均值为 3.54×10^{-5},其中最小值在 0 cm 和 243 cm 附近,指示该时期的侵蚀来源以低磁性物质为主。随着深度的增加,泥沙低频磁化率波动明显,86—183 cm(2001—2015 年)的低频磁化率最高(3.75×10^{-5}),0—86 cm(2016—2024 年)和 183—246 cm(1998—2000 年)的低频磁化率较低(分别为 3.41×10^{-5},3.34×10^{-5}),表明植被恢复后高磁性物质来源增加,而平沟建园后高磁性物质来源减少。沉积剖面泥沙 SOC 和 TN 呈现一致变化趋势,总体范围分别为 1.37～8.23 g/kg,0.25～0.86 g/kg,均值分别为 3.96,0.61 g/kg。随剖面深度的增加,SOC 和 TN 呈现逐渐下降的趋势。其中,0—86 cm(2016—2024 年)的 SOC 和 TN 最大,分别为 5.42,0.69 g/kg;86—183 cm(2001—2015 年)的 SOC 和 TN 次之,分别为 3.63,0.61 g/kg;183—246 cm(1998—2000 年)的 SOC 和 TN 最小,分别为 3.18,0.56 g/kg。

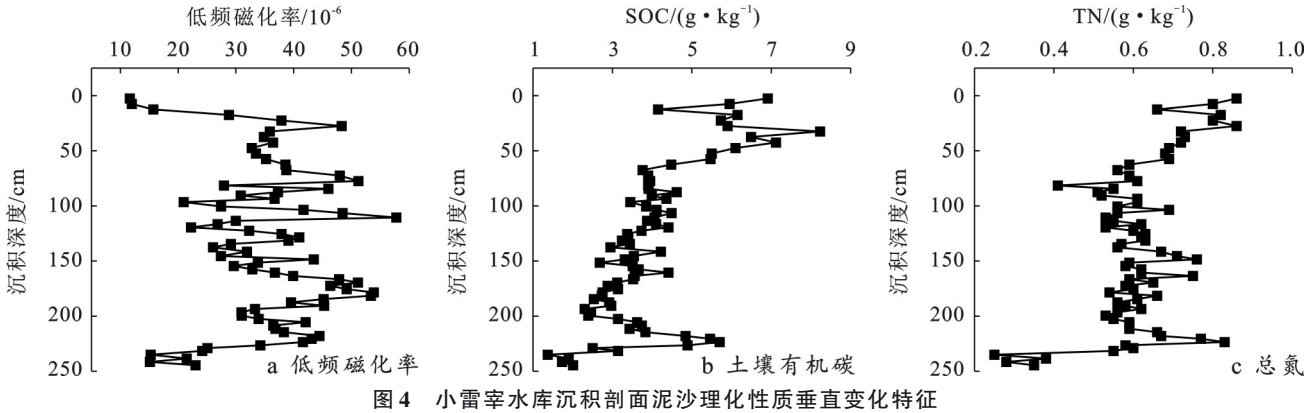


图 4　小雷宰水库沉积剖面泥沙理化性质垂直变化特征

Fig.4　Vertical variation characteristics of physicochemical properties in sediment profile of Xiaoleizai reservoir

2.3　小流域泥沙淤积量与侵蚀产沙模数时序变化

基于沉积剖面定年结果,结合水库的高程库容曲线和剖面不同土层的容重数据,估算小雷宰水库历史时期的淤积泥沙量和侵蚀产沙模数。结果显示,自 1977 年水库运行以来,小雷宰水库淤积泥沙深度约 980 cm,累计淤积体积约 7.41×10^{4} m^3,淤积泥沙量约 1.07×10^{5} t,年平均侵蚀产沙模数约 1 224.79 t/(km²·a),其范围约为 422.73～

2 111.70 t/(km²·a)(表2)。1977—2000年(植被恢复前24 a)共淤积泥沙约6.78×10⁴ t,年平均侵蚀产沙模数约为1 552.91 t/(km²·a)。其中,1977—1997年共淤积泥沙约5.63×10⁴ t,年平均侵蚀产沙模数估算值为1 473.08 t/(km²·a)。1998—2000年共淤积泥沙1.15×10⁴ t,年平均侵蚀产沙模数为2 111.70 t/(km²·a),该时期的侵蚀产沙模数极高,可能与洪水年频发的暴雨、大暴雨事件有关。2001—2015年(植被恢复后至平沟建园前15 a),小雷宰水库共淤积泥沙2.00×10⁴ t,年平均侵蚀产沙模数为732.91 t/(km²·a),较1977—2000年(植被恢复前24 a)降低52.80%。其中,2001—2005年小雷宰水库共淤积泥沙6 500 t,年平均侵蚀产沙模数为719.05 t/(km²·a);2006—2010年小雷宰水库共淤积泥沙9 600 t,年平均侵蚀产沙模数为1 056.95 t/(km²·a);2011—2015年小雷宰水库共淤积泥沙0.39万t,年平均侵蚀产沙模数为422.73 t/(km²·a),该阶段侵蚀产沙模数显著低于其他时期,表明植被恢复后期可以有效降低侵蚀强度。2016—2024年(平沟建园后9 a内),小雷宰水库共淤积泥沙1.92×10⁴ t,年平均侵蚀产沙模数为1 169.63 t/(km²·a),相比2001—2015略有升高,但相比1977—2000年减少了24.68%。其中,2016—2021年小雷宰水库共淤积泥沙1.21×10⁴ t,年平均侵蚀产沙模数为1 107.96 t/(km²·a);2022—2024年小雷宰水库共淤积泥沙7 100 t,年平均侵蚀产沙模数为1 292.99 t/(km²·a)。

表2 小雷宰水库不同时段的泥沙淤积量与侵蚀产沙模数

Table 2 Sediment deposition mass and erosion-induced sediment yield modulus across different periods in Xiaoleizai reservoir

不同阶段	时段	沉积深度/cm	淤积体积/10^4 m³	容重/(g·cm^{-3})	淤积量/10^4 t	侵蚀产沙模数/(t·km^{-2}·a^{-1})
植被恢复前	1977—1997年	246—980	3.77	1.49	5.63	1 473.08
	1998—2000年	183—246	0.77	1.49	1.15	2 111.70
	小计	183—980	4.54	—	6.78	1 552.91
植被恢复后至平沟建园前	2001—2005年	150—183	0.44	1.47	0.65	719.05
	2006—2010年	105—150	0.65	1.47	0.96	1 056.95
	2011—2015年	86—105	0.29	1.31	0.39	422.73
	小计	86—183	1.38	—	2.00	732.91
平沟建园后	2016—2021年	30—86	0.93	1.30	1.21	1 107.96
	2022—2024年	0—30	0.54	1.30	0.71	1 292.99
	小计	0—86	1.47	—	1.92	1 169.63
合计	1977—2024年	0—980	7.41	—	10.70	1 224.79

3 讨论

3.1 沉积剖面定年及侵蚀产沙模数的不确定性

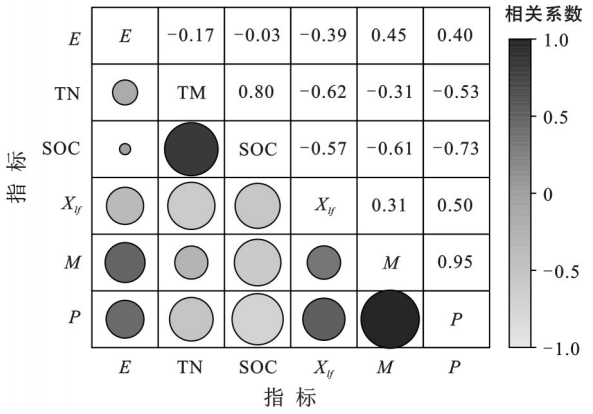
利用沉积泥沙信息反演流域侵蚀产沙模数的方法具有可靠性和准确性。塘库或淤地坝作为泥沙的汇集区,越来越多学者开始采用该方法反演流域的侵蚀产沙模数。其中,对剖面构建正确的时间坐标是确保计算结果可靠性和准确性的关键前提。齐永青等[19]结合剖面^{137}Cs含量和实地调研结果对塘库剖面进行定年,正确估算了不同时期的侵蚀产沙模数。袁帅等[20]、裴曾莉等[21]结合^{137}Cs和^{210}Pb双核素对西南喀斯特洼地区剖面进行定年,分析喀斯特地区长期尺度下的侵蚀产沙变化。除采用放射性核素定年外,基于沉积旋回层和降雨事件的对应关系也可以合理构建沉积剖面时间坐标[22]。张信宝等[23]结合塘坝历史资料,利用剖面^{137}Cs和黏粒含量与次降雨事件的对应关系为44个沉积旋回层建立时间坐标,计算了次暴雨洪水产沙模数。本研究根据降雨事件与砂层的一一对应关系建立了剖面时间坐标,确定近30年以来(1998—2024年)干热河谷区的土壤侵蚀产沙模数范围为422.73~2 111.70 t/(km²·a)。何敏怡等[3]在元谋干热河谷综述了干热河谷区不同土地利用的侵蚀速率,范围为405.34~1 827.47 t/(km²·a)。Zhang等[15]基于淤地坝信息反演了干热河谷区流域的侵蚀产沙模数,结果显示2006—2011年的总侵蚀产沙模数为469.01 t/a。本研究结果与该地区相关研究计算的侵蚀产沙模数接近,证明了研究结果的准确性。以上研究表明采用沉积剖面反演法估算流域侵蚀产沙模数在干热河谷区同样适用,体现了该方法的区域可靠性和准确性。

然而,本研究在沉积剖面定年和侵蚀产沙模数计算中仍然存在不确定性。由于剖面246—980 cm

沉积层未进行采样,其时间坐标构建仅基于水库建成年代、坝体高程及水位-面积关系反推获得,属于间接估算结果。其中,坝底高程由坝顶高程、坝体高度和淤积泥沙-面积曲线估算,可能引入一定误差;同时,尽管拟合的淤积泥沙高程-面积函数的拟合优度较高(R^2=0.960),但由于在剖面下部缺乏实测数据支撑,相关结果仍具有一定的不确定性。因此,1977—1997年估算的侵蚀产沙模数具有一定不确定性。同时,本研究在计算小流域的侵蚀产沙模数时,假设水库泥沙淤积量可近似代表流域侵蚀产沙量,该假设在黄土高原区的淤地坝研究中已被接受和证明[5,14],然而干热河谷区地形破碎、沟道连通性较强,泥沙输移比可能不严格等于1,因此,该假设条件下可能导致土壤侵蚀产沙模数被高估。但以上不确定性主要影响侵蚀产沙模数的绝对值估算,而对流域阶段性的侵蚀产沙变化趋势的影响相对较小。同时,本研究的估算结果与区域已有研究结果[3,15]在数量级上保持一致,进一步表明其具有一定合理性。因此,本研究结果对于评估分析流域侵蚀产沙变化的阶段性特征仍具有一定的参考意义。

3.2　降雨和人类活动对侵蚀产沙过程的影响

本研究结果发现,侵蚀产沙模数对降雨量和降雨侵蚀力的响应不敏感,表明降雨不是影响区域侵蚀产沙的主控因子。以往研究表明,降雨是影响土壤侵蚀产沙过程的关键指标。Zhang等[24]的研究表明,在不同植被条件下,随着降雨量的增加,坡面的径流量和土壤流失量均呈现增加的趋势,其中,暴雨及以上等级降雨事件对土壤侵蚀的影响显著,暴雨导致的土壤流失量分别为小雨和中雨降雨事件的12.06和11.16倍,证明了土壤侵蚀过程对强降雨事件的强烈响应。本研究显示1998—2000年的侵蚀产沙模数最高,其降雨侵蚀力也最高,侵蚀产沙模数与降雨量和降雨侵蚀力呈现正相关关系(图5—6)。这与以往结论基本一致。但相关性分析结果显示侵蚀产沙模数与降雨量和降雨侵蚀力无显著相关关系(p>0.05),表明降雨不是影响该区域侵蚀产沙的主控因子。罗淑娥等[17]在重庆中梁山岩溶槽谷的研究也发现降雨与土壤侵蚀产沙模数之间无显著相关关系,裴曾莉等[21]认为,在中国水蚀区,产沙强度的历史变化主要受人类活动的影响。尤其在2001—2005年期间,尽管区域的降雨侵蚀力数值较高,但土壤侵蚀产沙模数相对较低。以上结果表明,尽管降雨是影响流域侵蚀产沙的重要因素,但在不同时段下其对土壤侵蚀程度的影响存在差异,人类活动可能是驱动流域侵蚀产沙阶段性变化的关键因素。



注:①E,TN,SOC,X_{lf},M和P分别代表侵蚀产沙模数、全氮、土壤有机碳、低频磁化率、年平均降雨侵蚀力和年平均降雨量。②*表示两个指标因子之间具有显著相关性(p<0.05);**表示两个指标因子之间具有极显著相关性(p<0.01)。

图5　侵蚀产沙模数与沉积泥沙理化指标和降雨指标的相关关系

Fig.5　Correlation of erosion-induced sediment yield modulus with physicochemical indicators of deposited sediment and rainfall

植被恢复等生态修复活动显著缓解了干热河谷区水土流失风险。植被恢复通过改变土地利用,一方面,直接增加地表覆盖度影响径流和土壤侵蚀[22]。植被冠层部分可以直接通过拦截降雨减少地表径流和侵蚀速率[25]。同时,植被的茎干和枯枝落叶通过改变径流路径,降低径流流速、剪切应力,增加阻力,进而减少土壤流失[26-27]。另一方面,植被恢复通过改善土壤结构间接提高了土壤的抗侵蚀能力[11,25]。文孝丽等[12]在干热河谷冲沟发育区域的研究表明,SOC,TN含量与植被覆盖度具有显著正相关,表明植被恢复可以通过多种生物地球化学过程直接或间接提高土壤养分含量。SOC含量的增加进一步促进了土壤团聚体的形成,增加了团聚体的稳定性,从而提高了土壤的抗侵蚀性能[28]。本研究结果显示,自2001年实施退耕还林和荒山造林工程后,沉积剖面泥沙SOC和TN含量随着实施年限的增加逐渐增加,而侵蚀产沙模数则呈现下降趋势(图6)。且相关干热河谷区研究表明退耕还林等人工恢复过程相比自然恢复更有利于提高土壤质量[11],进一步表明在干热河谷区实施退耕还林和荒山造林有利于改善土壤质量,缓解土壤侵蚀。此外,本研究结果还发现2001—2005年(植被恢复初期)的土壤低频磁化率显著增加。土壤磁化率作为反映土壤风化强度的重要指标,随着土壤风化程度的增加,土壤磁性增强[18]。植被恢复初期耕地的扰动加强,地表覆盖度的降低,可能加剧了表层高度风化的土壤的流失,导致侵蚀强度增加[29]。相关性分析结果显示,土壤侵蚀产沙模数

与SOC,TN和低频磁化率未达到显著水平(图5),这是因为沉积泥沙理化性质的差异本质上是流域源地土壤特征空间异质性在沉积记录中的综合体现[17],植被恢复和平沟建园等人类活动通过改变不同侵蚀区的土地利用方式和地表覆盖,影响源地土壤的理化性质及其可蚀性,进而导致沉积区泥沙理化指标的阶段性变化。因此,沉积泥沙理化指标更多地反映了流域人类活动扰动下的土地利用演变过程,而非直接响应于侵蚀产沙模数的变化。总体上,植被恢复显著改变了流域的侵蚀产沙过程,植被恢复后较植被恢复前减少了约52.80%的土壤流失量。

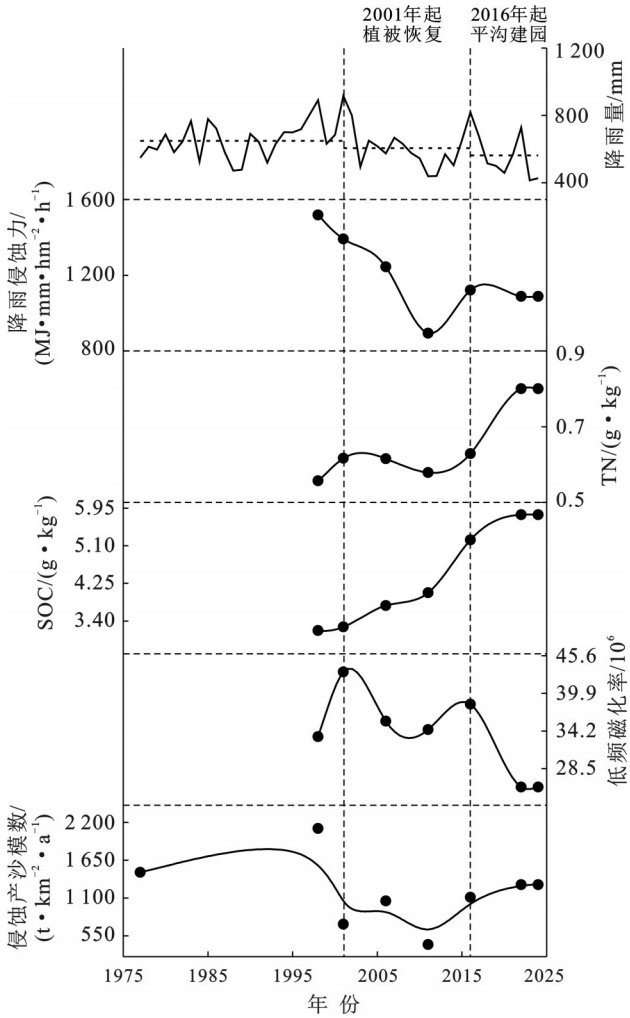


图6 小雷宰小流域侵蚀产沙模数与沉积泥沙理化特征及降雨特征的变化

Fig.6 Variations in erosion-induced sediment yield modulus, physicochemical properties of deposited sediment, and rainfall characteristics in Xiaoleizai small watershed

平沟建园工程初期的侵蚀产沙模数略有提升,但在长期尺度下,该项工程可能具有良好的生态效益和经济效益。目前,平沟建园工程在元谋大规模推广,通过一系列的填沟、整地方式将侵蚀劣地转变为具有高经济效益的果蔬基地,推动了区域经济发展。然而,刘琳等[1]的研究指出,平沟建园初期耕地边坡由于无植被覆盖,土壤可蚀性较高,普遍存在细沟、浅沟发育问题。本研究结果显示,2016—2024年的年平均侵蚀产沙模数较2001—2015年略有上升,这与干热河谷区已有研究结论具有一致性。一方面,这可能与区域降雨侵蚀力的增加有关(图6);另一方面,可能与整地初期的扰动增加了土壤可蚀性有关。张斌艳等[30]的研究发现,平沟建园初期,土体的容重较小,总孔隙度和毛管孔隙度较大。因此,工程扰动可能通过改变土壤性质,导致侵蚀产沙模数上升。且沉积环境中的低频磁化率持续降低,表明区域侵蚀以低风化土壤为主,这可能与沟蚀过程深层母质的侵蚀有关,进一步表明平沟建园初期的边坡可能是主要泥沙来源。但是,该时期的侵蚀产沙模数仍旧低于生态恢复前,较植被恢复前降低了24.68%,表明生态恢复措施总体上有效控制了区域土壤侵蚀。同时,沉积环境中的SOC和TN含量持续增加,进一步反映了流域生态恢复和农业开发的特征(图6)。这表明,平沟建园工程尽管初期具有侵蚀风险,但随着实施年限的增加、耕地地力的提升,将具有显著的抗侵蚀能力和经济效益。

综上所述,干热河谷区近几十年实施的植被恢复和平沟建园工程显著改变了流域的侵蚀产沙过程,对区域生态恢复和经济发展具有积极意义。但其初期仍然具有一定的生态风险,尤其是平沟建园工程初期的侵蚀风险不可忽视。因此,有必要采取系统性的水土保持措施降低工程扰动带来的侵蚀风险。①建议施工作业安排在旱季,减少降雨对坡面侵蚀的可能性;②建议在边坡顶部设置截水沟减轻径流对坡面的冲刷作用,同时在坡面采取工程措施或植被措施以固定边坡,防治边坡沟蚀;③在田块内部推行少耕、秸秆覆盖、秸秆填埋等措施以降低土壤可蚀性。

4 结 论

(1)依据沉积剖面机械组成变化和降雨变化,确定剖面183 cm以下,86—183 cm和0—86 cm分别代表1977—2000年(植被恢复前),2001—2015年(植被恢复后至平沟建园前)和2016—2024年(平沟建园后)的侵蚀产沙过程。

(2)人类活动是导致不同时期沉积泥沙理化性质发生变化的主要因素。植被恢复后(2001—2015年),沉积区的低频磁化率、SOC和TN高于植被恢复前,表明植被恢复后促进了有机质和氮素积累,增加了

高磁性物质的侵蚀;平沟建园后(2016—2024年),沉积区的SOC和TN进一步增加,而低频磁化率明显下降,表明植被恢复和耕地管理促进了养分积累,但工程整地改变了侵蚀泥沙来源地,导致边坡等低风化土壤的侵蚀风险增加。

(3)植被恢复和平沟建园工程有效缓解了干热河谷区的水土流失。小雷宰小流域累计淤积泥沙约1.07×10^5 t,年平均侵蚀产沙模数约为1 224.79 t/(km^2·a),其范围约为422.73～2 111.70 t/(km^2·a)。其中,植被恢复后至平沟建园前和平沟建园后的侵蚀产沙模数均低于植被恢复前,较植被恢复前分别降低了52.80%和24.68%。且降雨特征与侵蚀产沙模数无显著正相关关系($p>0.05$),进一步表明该区域侵蚀产沙过程的阶段性变化主要受人类活动影响,植被恢复和平沟建园具有积极的生态效益。但平沟建园初期的局部侵蚀风险不可忽视,未来有必要加强这些工程措施初期的侵蚀治理。

参考文献(References)

[1] 刘琳,熊东红,张闻多,等.元谋干热河谷平沟建园土地治理工程效益及生态风险[J].农业工程学报,2020,36(4):251-258.
Liu Lin, Xiong Donghong, Zhang Wenduo, et al. Benefits and ecological risks of gully reclamation project in Yuanmou dry-hot valley region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(4):251-258.

[2] Dong Yifan, Xiong Donghong, Su Zheng'an, et al. The distribution of and factors influencing the vegetation in a gully in the dry-hot valley of southwest China[J]. Catena,2014,116:60-67.

[3] 何敏怡,钟荣华,郭乾坤,等.基于径流小区实测的干热河谷土壤侵蚀荟萃分析[J].水土保持学报,2023,37(5):291-297,304.
He Minyi, Zhong Ronghua, Guo Qiankun, et al. A Meta-analysis on soil erosion in the dry-hot valleys based on runoff-plot data[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023,37(5):291-297,304.

[4] Wei Yanhong, Jiao Juying, Li Yujin. Evolution of historical sediment yield using check-dam systems as carriers: A case study in a restored agricultural catchment on the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2022,210:105877.

[5] Zeng Yi, Meng Xiangdong, Wang Bing, et al. Effects of soil and water conservation measures on sediment delivery processes in a hilly and gully watershed[J]. Journal of Hydrology, 2023,616:128804.

[6] Zhang Yunqi, Guo Bangrun, Li Wei, et al. Reduction in sediment yields from karst terrain in SW China over the past 600+years[J]. Global and Planetary Change, 2025,246:104724.

[7] 张信宝,白晓永,刘秀明.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[J].中国科学:地球科学,2011,41(2):265-271.
Zhang Xinbao, Bai Xiaoyong, Liu Xiuming. Determination of soil loss in Karst small watershed after deforestation by ^{137}Cs dating method of depression deposition[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2011,41(2):265-271.

[8] Su Zhengan, Xiong Donghong, Dong Yifan, et al. Simulated headward erosion of bank gullies in the dry-hot valley region of southwest China[J]. Geomorphology, 2014,204:532-541.

[9] Zhang Baojun, Zhao Xin, Dong Yifan, et al. Morphological characteristics and influencing factors of gully headwall scour holes in Yuanmou dry-hot valley region, southwestern China[J]. Catena, 2025,249:108721.

[10] 庄永在,何光熊,喜文飞,等.基于RUSLE模型与多源数据的耕地土壤侵蚀时空演变评估:以金沙江干热河谷元谋县为例[J].中国水土保持科学,2025,23(6):42-53.
Zhuang Yongzai, He Guangxiong, Xi Wenfei, et al. Spatiotemporal dynamics of cultivated land soil erosion in dry-hot valley ecosystems: An integrated assessment using RUSLE model and multi-source data[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2025,23(6):42-53.

[11] Wang Guanghai, Dong Yifan, Rong Li, et al. The influence of vegetation restoration on soil quality in abandoned farmlands in the Yuanjiang dry-hot valley[J]. Catena, 2024,242:108109.

[12] 文孝丽,董一帆,杨己,等.元谋干热河谷冲沟发育区植被恢复对土壤碳氮的影响[J].水土保持学报,2021,35(4):282-288.
Wen Xiaoli, Dong Yifan, Yang Ji, et al. Effects of vegetation restoration on soil carbon and nitrogen in gully development area of Yuanmou dry-hot valley[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35(4):282-288.

[13] 谢骁健,苏正安,周涛,等.桑干河流域淤地坝沉积泥沙特征及其来源解析[J].水土保持学报,2024,38(1):49-59.
Xie Xiaojian, Su Zheng'an, Zhou Tao, et al. Sediment characteristics and sources tracing of warping dam in Sanggan River basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024,38(1):49-59.

[14] Walling D E. The sediment delivery problem[J]. Journal of Hydrology, 1983,65(1/2/3):209-237.

[15] Zhang Xiyu, Fan Jianrong, Liu Qing, et al. The contribution of gully erosion to total sediment production in a small watershed in southwest China[J]. Physical Geography, 2018,39(3):246-263.

[16] 章文波,谢云,刘宝元.利用日雨量计算降雨侵蚀力的

方法研究[J].地理科学,2002(6):705-711.
Zhang Wenbo, Xie Yun, Liu Baoyuan. Rainfall erosivity estimation using daily rainfall amounts[J]. Scientia Geographica Sinica, 2002,22(6):705-711.

[17] 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.
Luo Shu'e, Jiang Yongjun, Tian Xing, 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.

[18] 王美辰,李海侠,张小凌,等.森林和农田表土磁性特征及其与环境因子的关系对比分析[J].土壤,2025,57(3):716-724.
Wang Meichen, Li Haixia, Zhang Xiaoling, et al. Comparation of magnetic characteristics of forest and farmland topsoils and their relationship with environmental factors[J]. Soils, 2025,57(3):716-724.

[19] 齐永青,张信宝,贺秀斌,等.川中丘陵区和三峡地区小流域侵蚀产沙的塘库沉积^{137}Cs断代[J].地理研究,2006,25(4):641-648.
Qi Yongqing, Zhang Xinbao, He Xiubin, et al. A study on soil erosion induced sediment yield by reservoir and pond deposits dating with ^{137}Cs in small catchments of the hilly Sichuan basin and the Three Gorges region[J]. Geographical Research, 2006,25(4):641-648.

[20] 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.
Yuan Shuai, Yue Yuemin, Zhang Xinbao, 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.

[21] 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.
Pei Zengli, Long Yi, Zhang Yunqi, 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.

[22] Wang Kai, Liu Gang, Wang Xiaokang, et al. Dynamic change of watershed sediment sources during implementation of the"grain for green"project in the coarse sandy areas of the Chinese Loess Plateau[J]. International Soil and Water Conservation Research, 2025,13(3):564-575.

[23] 张信宝,温仲明,冯明义,等.应用^{137}Cs示踪技术破译黄土丘陵区小流域坝库沉积赋存的产沙记录[J].中国科学(D辑:地球科学),2007,50(3):405-410.
Zhang Xinbao, Wen Zhongming, Feng Mingyi, et al. Application of ^{137}Cs fingerprinting technique to interpreting sediment production records from reservoir deposits in a small catchment of the hilly Loess Plateau, China[J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2007,50(3):405-410.

[24] Zhang Xinyu, Zhang Shouhong, Zhang Fan, et al. Rainfall amount shapes the soil erosion and vegetation protection effectiveness in soil conservation[J]. Journal of Hydrology, 2025,663:134219.

[25] Lin Yongming, Cui Peng, Ge Yonggang, et al. The succession characteristics of soil erosion during different vegetation succession stages in dry-hot river valley of Jinsha River, upper reaches of Yangtze River[J]. Ecological Engineering, 2014,62:13-26.

[26] Liu Lin, Xiong Donghong, Zhang Binyan, et al. Effects of shrub stem and litter on promoting concentrated flow branching, increasing flow resistance, and reducing sediment during gully bed erosion[J]. Catena, 2025,254:108989.

[27] Liu Lin, Xiong Donghong, Zhang Baojun, et al. How does shrub stem coverage affect the hydraulic properties of concentrated flow and sediment yield during gully bed erosion[J]. International Soil and Water Conservation Research, 2025,13(2):334-347.

[28] 李珠宇,李志成,徐贵迁,等.干热河谷冲沟系统土壤团聚体对优先路径的影响[J].水土保持学报,2024,38(2):304-315.
Li Zhuyu, Li Zhicheng, Xu Guiqian, et al. Effect of soil aggregate on preferential path in gully system of dry-hot valley[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024,38(2):304-315.

[29] Wei Wei, Chen Liding, Fu Bojie, et al. The effect of land uses and rainfall regimes on runoff and soil erosion in the semi-arid loess hilly area, China[J]. Journal of Hydrology, 2007,335(3/4):247-258.

[30] 张斌艳,熊东红,李小英,等.元谋干热河谷区不同年限平沟建园地土壤水分物理性质研究[J].西南农业学报,2022,35(8):1870-1877.
Zhang Binyan, Xiong Donghong, Li Xiaoying, et al. Physical properties of soil moisture of gully reclamation project with different implementation year in Yuanmou dry-hot valley area[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2022,35(8):1870-1877.