

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.01.018

谢晓健, 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.

桑干河流域淤地坝沉积泥沙特征及其来源解析

谢晓健^{1,2}, 苏正安¹, 周涛^{1,2}, 王丽娟^{1,2}, 周铃^{1,2}

(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, 成都 610041;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: [目的] 为查明桑干河流域的泥沙主要策源地和侵蚀产沙变化。[方法] 选取阳原县高墙乡典型淤地坝沉积泥沙为研究对象, 利用复合指纹识别技术, 测定沉积泥沙及其源地的土壤粒径、SOC、TN、¹³⁷Cs、低频质量磁化率等 9 种指纹因子, 研究了不同淤积阶段的泥沙策源地及坝控小流域侵蚀产沙演变规律。[结果] (1) 沉积泥沙中¹³⁷Cs 平均含量较低, 与沟壁土壤无显著差异 ($p > 0.05$), 但极显著小于林草地和耕地的¹³⁷Cs 含量 ($p < 0.01$), 这指示淤地坝沉积泥沙主要来源于沟壁; (2) 由于沟壁中大部分¹³⁷Cs 含量低于检出限, ¹³⁷Cs 较好地指示泥沙主要来源沟谷地中的沟壁, 但难以用于小流域多种策源地的判别, 经 Kruskal-Wallis H 非参数检验和多元逐步判别分析筛选, 确定 $TN + X_{fb} + SOC$ 构成最佳指纹因子组合, 有效地判别小流域 2006—2017 年泥沙源地的平均贡献率为沟壁 ($82.68\% \pm 8.20\%$) > 耕地 ($15.36\% \pm 8.46\%$) > 林草地 ($1.96\% \pm 0.33\%$); (3) 在小流域侵蚀产沙过程中, 沟壁长期是主要的泥沙贡献区, 林草地对侵蚀性降雨的响应较弱, 耕地在极端暴雨发生时其泥沙贡献率显著上升。[结论] ¹³⁷Cs 核素示踪技术有效地适用于该区小流域主要泥沙策源地判别, 复合指纹技术则可以更好地厘定多元泥沙策源地。沟蚀引起的沟壁崩塌是桑干河流域土壤侵蚀严重的主要原因。

关键词: 复合指纹识别技术; 侵蚀变化; 泥沙来源; 淤地坝; 沉积旋回

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)01-0049-11

Sediment Characteristics and Sources Tracing of Warping Dam in Sanggan River Basin

XIE Xiaojian^{1,2}, SU Zheng'an¹, ZHOU Tao^{1,2}, WANG Lijuan^{1,2}, ZHOU Ling^{1,2}

(1. Key Laboratory of Mountain Surface Processes and Ecological Regulation, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: [Objective] This study intends to explore the main source of sediment and the evolution of erosion and sediment yield in Sanggan River Basin. [Methods] A typical warping dam in Gaoqiang Township, Yangyuan County was selected as the research object. The composite fingerprint identification technology was used to determine nine fingerprint factors, including soil particle size, SOC, TN, radionuclide (¹³⁷Cs) and low-frequency magnetic susceptibility, of sediment and its source areas. The evolution patterns of erosion and sediment production in different sedimentation stages of sediment source areas and dam controlled small watersheds were studied. [Results] (1) The average content of ¹³⁷Cs in sediment was relatively low, and it was not significantly different from that of gully wall soil, but it was extremely significantly lower than that of forest-grasslands and croplands soil ($p < 0.01$), which indicated that the sediment was mainly from gully wall. (2) As the majority of ¹³⁷Cs content of gully wall was below the detection limit, ¹³⁷Cs was a good indicator for identifying gully wall as the main sediment source but it was difficult to be used for distinguishing multiple sediment sources in the small basin. Through Kruskal-Wallis H nonparametric test

收稿日期: 2023-07-17

修回日期: 2023-08-17

录用日期: 2023-09-18

网络首发日期 (www.cnki.net): 2023-11-02

资助项目: 国家自然科学基金项目 (42277338); 第二次青藏高原综合科学考察研究项目 (2019QZKK0307); 四川省科技计划项目 (2022YFS0500)

第一作者: 谢晓健 (2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀和水土保持研究。E-mail: xiexiaojian22@mails.ucas.ac.cn

通信作者: 苏正安 (1980—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事土壤侵蚀和水土保持研究。E-mail: suzhengan@imde.ac.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

and multiple stepwise discriminant analysis screening, the optimal combination of fingerprint factors was $TN + X_{fb} + SOC$, which effectively distinguished the average contribution rate of sediment source areas in small watersheds from 2006 to 2017. The contribution rate followed the order of gully wall ($82.68\% \pm 8.20\%$) > croplands ($15.36\% \pm 8.46\%$) > forest—grasslands ($1.96\% \pm 0.33\%$). (3) In the evolution of erosion and sediment yield, gully wall was the main sediment contribution area for a long time, forest—grasslands had weak response to erosive rainfall, and the sediment contribution rate of croplands increased significantly when extreme rainstorm occurred. [Conclusion] Overall, the ^{137}Cs tracing technique was suitable for identifying the main sediment source in the small basin, and the composite fingerprint technique was better at identifying multiple sediment sources. The collapse of gully walls caused by gully erosion was the main cause of severe soil erosion in the Sanggan River Basin.

Keywords: composite fingerprinting technique; erosion changes; sediment sources; warping dam; sedimentary cycle

Received: 2023-07-17

Revised: 2023-08-17

Accepted: 2023-09-18

Online(www.cnki.net): 2023-11-02

土壤侵蚀是全球性的重大生态环境问题之一,侵蚀泥沙的搬运使土壤养分等元素的浓度发生显著变化,进而导致土壤贫瘠和土地生产力降低,同时影响地球化学循环乃至全球气候变化^[1-2]。泥沙来源解析研究有助于揭示流域侵蚀泥沙的横向迁移及演变规律,对于制定针对性的水土保持措施、改善水质与生态环境都具有重要意义。国内外学者针对泥沙来源问题开展了大量研究,相比于径流小区观测、水文资料分析、遥感调查制图等传统方法,指纹识别技术在泥沙策源地判别上具有经济、可靠和快速的优点^[3]。20 世纪 70 年代开始单因子指纹示踪技术得到较多应用,但其受指纹因子判别能力、泥沙输移复杂形式和流域自然环境因素的影响较大,判别结果精度仍有不足,且不适用于多物源地情况^[4]。针对单因子示踪的局限性,多元混合模型^[5]和多元逐步判别分析(discriminant function analysis, DFA)^[6]等统计方法的引入,使复合指纹识别技术成为一种高效、精确的泥沙溯源方法。

复合指纹技术被国内外土壤学者广泛应用于小流域泥沙来源解析的研究,主要的示踪因子有大气沉降核素、微量元素、矿物磁性、有机碳、碳氮稳定同位素、植物孢粉等^[7]。WALLING 等^[5]将放射性核素、矿物磁性、碳、氮组合,判别英国 Jackmoor 河流域、Dart 河流域牧草地、耕地、河岸的泥沙贡献; COLLINS 等^[8]采用蒙特卡洛随机模拟抽样结合遗传算法优化泥沙混合模型,提升估算贡献率的准确性,追踪农场道路等源地侵蚀引起的泥沙流失。国内研究集中在黄土高原、三峡库区、长江上游地区、西南岩溶区等水土流失重点区域^[9-10]。近期,陈飞^[11]将复合指纹技术应用在青藏高原高寒区小流域,结果显示冰碛物颗粒是冻融侵蚀区的主要泥沙来源。这些研

究表明,复合指纹技术具有普遍适用性,但准确获取侵蚀泥沙是复合指纹识别技术的关键问题^[12],而淤地坝在黄土高原地区起到淤地造田、减少入河泥沙等作用,其多年的沉积旋回层提供了完整的侵蚀泥沙资料^[13]。陈鸿等^[14]利用复合指纹技术和坝库淤积泥沙,反演了退耕还林实施以来黄土高原小流域的侵蚀过程和泥沙来源。淤地坝沉积旋回的厚度与分布表征了侵蚀降雨产沙特征,为研究小流域侵蚀产沙和侵蚀环境演变建立了基础^[15-16]。

河流携沙量不断增加导致河床抬升,同时泥沙作为营养物质和污染物质(重金属、病原体、工业有害物等)的重要载体,直接影响侵蚀流域及下游地区的水生环境^[17]。官厅水库是首都的重要供水源地,因此桑干河作为官厅水库的主要入库支流之一,具有重要的水生态保护及修复意义。桑干河上游流经黄土高原,集中的暴雨洪水过程往往导致该区发生严重的水土流失,桑干河年均含沙量 25 kg/m^3 ,最大含沙量达 519 kg/m^3 ,为流域水体质量与水生环境带来了极大隐患^[18]。目前多数桑干河流域的研究侧重于气象要素、土地利用类型和植被覆盖等因子对桑干河流域土壤侵蚀和产流产沙过程的影响^[19-20],较少关注该区小流域泥沙来源及其动态变化。

为探明桑干河流域主要泥沙策源地及侵蚀产沙规律,本研究以桑干河流域典型淤地坝为研究对象,主要工作有:(1)依据大雨对大沙原理,建立淤地坝沉积旋回层的时间序列,揭示淤积时段内的降雨侵蚀产沙特征及指纹因子变化规律;(2)运用复合指纹识别技术,明晰不同土地利用源地对沉积旋回的相对贡献及历史演变规律,探讨侵蚀性降雨和人为活动对小流域沉积泥沙的影响,为桑干河流域的水土流失综合治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于河北省张家口市阳原县高墙乡(40°18′55.95″N,114°43′42.74″E),地处黄土高原、内蒙古高原与华北平原交界的过渡带,沟壑纵横,海拔1 055~1 110 m(图 1a)。气候属温带大陆性季风气候,年平均降水量 364.6 mm,约有 65%的降雨集中发生在夏季(6—8 月),年平均气温 7.7 ℃。土壤类型为栗钙土、草甸土和盐土,土壤质地为砂壤土,黏粒占 2.33%,粉粒占 36.56%,砂粒占 61.11%,结构疏松。桑干河为永定河上游,属于海河流域一级水系,是官厅水库的主要水源区。严重的水土流失是导致桑干河水断流和水质变差的主要原因之一。

研究区小型淤地坝于 2005 年冬季修建完成,库

容 1.2 万 m³,于 2018 年淤满,设有 1 处溢洪道。淤地坝运行期间泥沙均保留在坝中,通过对当地农民的采访,研究区未发生大规模的坝体修复和农耕活动,1999 年退耕还林(草)计划后研究区土地利用类型和面积变化较小。

主要农作物包括玉米(*Zea mays* Linn.)、马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)、向日葵(*Helianthus annuus* L.)、绿豆(*Vigna radiata* (Linn.) Wilczek)等。植被以草本植物为主,白草(*Pennisetum centasiaticum* Tzvel.)和羊草(*Panicum maximum* Jacq.)分布范围广;灌木为柠条(*Caragana korshinskii* Kom.)和紫穗槐(*Amorpha fruticosa* Linn.)等;乔木为新疆杨(*Populus alba* L. var. *pyramidalis* Bge.)、垂柳(*Salix babylonica* L.)等。

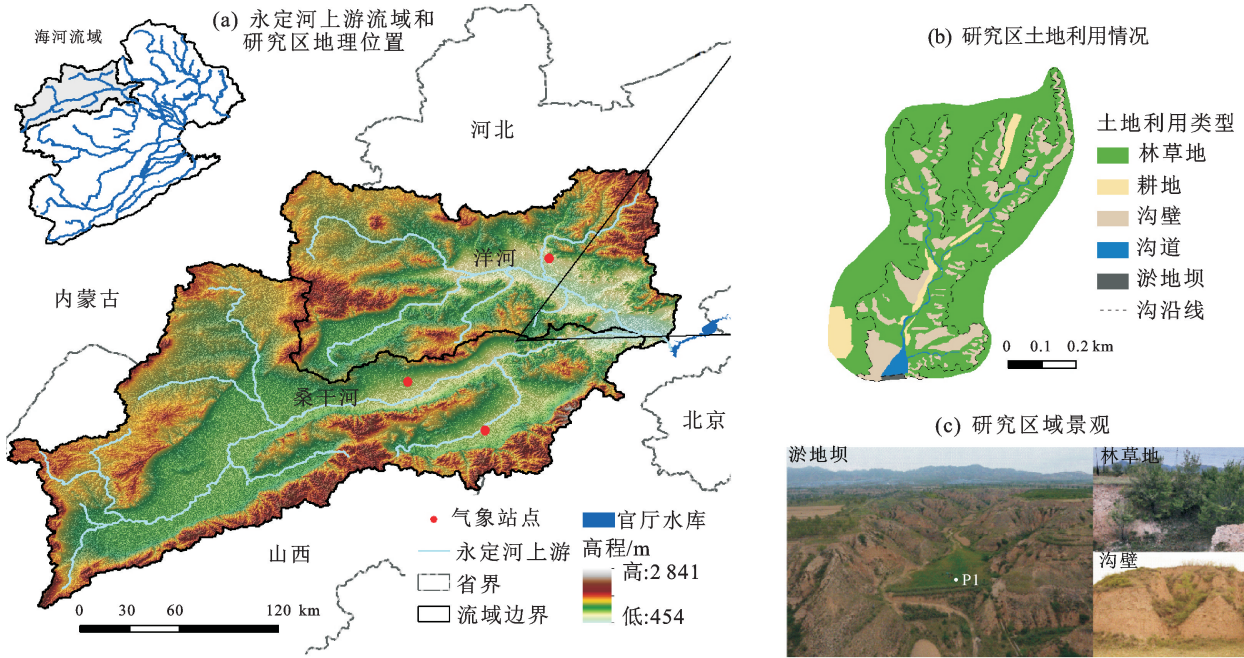


图 1 研究区地理位置与土地利用情况
Fig. 1 Geographical location and land use of the study area

1.2 土壤样品采集与测试

调查采样工作于 2018 年 5 月完成,包括收集代表性的源地物质和淤地坝的沉积泥沙剖面。在淤地坝库区坝前设立沉积泥沙采样点 P1,厚度为 200 cm(图 1c),对其进行沉积旋回层划分。由沉积分选作用,每次旋回粗颗粒泥沙先沉积在下部,细颗粒泥沙处于上部,以此易于区分各旋回层^[21]。通过观察发现,该剖面共有 11 个沉积旋回层(表面 2 层层次不清晰),对应 2006—2017 年的洪水事件。在 P1 沉积剖面中,用土壤采样器取得 35 个沉积物样品,其中第 5 层厚度较大,采集 5 个分层样,其余旋回各采集 3 个分层样。通过野外勘查发现林地、草地、耕地、沟壁为小流域主要的土地利用类型,以沟沿线为界,小流域

可分为沟谷地与沟间地 2 大地貌单元,耕地分布在沟谷中部和沟间地塬面,沟谷地为典型冲沟地貌,其中存在大量的沟壁崩塌物(图 1c)。根据上游流域的主要土地利用类型和地貌特征,将侵蚀产沙源地划分为 3 类(图 1b):林草地、耕地和沟壁,分别占流域面积的 76.84%,4.62%,16.37%。沙源地为 0—5 cm 的表层土壤样品,沟间地中耕地 6 个,林草地 6 个,沟谷地中耕地 6 个,林草地 12 个,沟壁 6 个,共采集源地土壤样品 36 个。

2020 年 9 月对源地土壤样品和淤地坝沉积样品进行分析测试:放射性核素(¹³⁷Cs)、土壤粒径(Clay、Silt、Sand)、土壤有机碳(SOC)、土壤全氮(TN)和磁化率。土样经去除粗料(砂砾、根),风干粉碎后过 2

mm 筛。使用超纯锂漂移锗探测器 (ORTEC, Oak Ridge, Tennessee, USA) 和 Nuclear Data ND-6700 多道伽马射线分光光度计测量 ^{137}Cs 的活性。样品放在检测器上计数 40 000~60 000 s, 相对误差 $<5\%$ 。使用 Bartington MS2 型双频磁化率仪测定不同粒径 (2, 0.063, 0.05 mm) 的低频 (0.47 kHz) 质量磁化率 ($X_{\text{ifa}}, X_{\text{ifb}}, X_{\text{ifc}}$)。土壤理化性质的测定使用常规分析方法^[22], 采用 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 湿式氧化法测定 SOC, 采用微量凯氏定氮消解法测定 TN。使用英国 MasterSizer 2000 激光粒度仪测定土壤机械组成。土壤颗粒的分级采用国际土壤颗粒分类制: 黏粒 Clay (<0.002 mm)、粉粒 Silt (0.002~0.02 mm)、沙粒 Sand (0.02~2 mm)。

1.3 研究方法

1.3.1 降雨量插值计算 基于空间自相关的原理, 反距离权重插值法 (inverse distance weighted, IDW) 通过对邻域内已知点加权平均求得插值点的属性值, 已知点对插值点的空间邻近度越高则其具有的权重越大^[23-24]。本文利用阳原、蔚县和张家口气象站的日降雨量数据对淤地坝控制小流域进行反距离权重插值 (IDW)。

$$\hat{R} = \sum_{i=1}^n (R_i \times d_i^{-\alpha}) / \sum_{i=1}^n d_i^{-\alpha} \quad (1)$$

式中: $\hat{R}$ 为坝控小流域插值点的日降雨量 (mm); n 为气象站的数量; R_i 为气象站 i 的日降雨量 (mm); d_i 为气象站 i 到插值点的距离 (m); α 为权重, 取 2。

1.3.2 降雨侵蚀力计算 张家口地区侵蚀性降雨标准为 12.5 mm^[25]。根据研究区历年降雨, 大雨为 24 h 内降雨量 30~40 mm, 极端暴雨为 24 h 内降雨量 ≥ 40 mm。基于日降雨量数据, 采用章文波等^[26]修正的 Richardson 半月降雨侵蚀力模型计算坝控小流域的降雨侵蚀力。

$$M_i = \alpha \sum_{j=1}^k P_j^\beta \quad (2)$$

$$\beta = 0.8363 + 18.177 / \bar{P}_{\text{d}12.5} + 24.455 / \bar{P}_{\text{y}12.5} \quad (3)$$

$$\alpha = 21.586\beta^{-7.1891} \quad (4)$$

式中: M_i 为第 i 半月时段内的降雨侵蚀力 $[(\text{MJ} \cdot \text{mm}) / (\text{hm}^2 \cdot \text{h})]$; P_j 为第 i 半月时段内第 j 天的日降雨量 (≥ 12.5 mm) (mm); k 为第 i 半月时段内的天数, 半月时段以每月 15 日为界; α 、 β 为模型参数; $\bar{P}_{\text{d}12.5}$ 为日降雨量 ≥ 12.5 mm 的日平均降雨量 (mm); $\bar{P}_{\text{y}12.5}$ 为日降雨量 ≥ 12.5 mm 的年平均降雨量 (mm)。全年共有 24 个时段的降雨侵蚀力, 由此汇总得到年降雨侵蚀力 (M)。

1.3.3 多元混合模型 本研究使用 COLLINS 等^[6]提出的多元混合模型和复合指纹识别方法计算泥沙的相对贡献率, 不使用粒径和有机质因子校正。(1) 通过非参数 Kruskal-Wallis H 检验初筛在各泥沙源地之间表现显著差异的指纹识别因子; (2) 采用多元逐步判别分析 (discriminant function analysis, DFA) 确定最佳指纹因子组合; (3) 利用多元混合模型定量计算坝地沉积泥沙的各源地相对贡献率。混合模型基于最小二乘法的原理, 通过 5 000 次蒙特卡洛迭代求得 Res 最小值, 结果取所有模拟结果的均值, 以得到源地泥沙贡献率的最优解。公式 5 混合模型计算 P_s 时, 需要满足所有源地泥沙贡献率大于 0 且和为 1 的约束条件。采用拟合优度 (goodness of fit, GOF) 检验模型的可靠性^[27]。当 $\text{GOF} > 80\%$ 时, 认为可以采纳混合模型的计算结果。

$$\text{Res} = \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{[C_i - (\sum_{s=1}^m P_s \cdot C_{si})]}{C_i} \right\}^2 \quad (5)$$

$$\text{GOF} = 1 - \left[\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{|C_i - \sum_{s=1}^m P_s \cdot C_{si}|}{C_i} \right] \quad (6)$$

式中: Res 为残差平方和; n 为指纹因子的数量; m 为泥沙源地的数量; C_i 为沉积泥沙中指纹因子 i 的浓度平均值; P_s 为潜在泥沙源地 s 的泥沙贡献率; C_{si} 为泥沙源地 s 中指纹因子 i 的浓度平均值; GOF 为拟合优度。此外, 单位面积泥沙贡献值为泥沙源地 s 的泥沙贡献率 P_s 与其面积百分比的比值。

1.4 数据处理

研究区地理位置和土地利用图使用 ArcGIS 10.8 软件绘制; 数据统计分析使用 SPSS Statistics 26 和 Excel 2021 软件处理; 沉积泥沙源地相对贡献率使用 Matlab 2018b 编程计算; 沉积剖面、泥沙贡献率等图使用 Origin 2021 软件绘制。

2 结果与分析

2.1 小流域土壤理化性质特征

土壤样品共测定 9 种指纹因子, 分别为土壤颗粒 (Clay、Silt、Sand)、SOC、TN、放射性核素 (^{137}Cs) 和低频磁化率 ($X_{\text{ifa}}, X_{\text{ifb}}, X_{\text{ifc}}$)。Shapiro-Wilk 正态检验结果显示绝大部分的土壤因子通过检验, 数据总体满足正态分布^[28], 指纹因子浓度取算术平均值。沉积泥沙及其各源地指纹因子浓度及正态检验结果见表 1。

林草地、耕地、沟壁 3 种泥沙源地中有 88.89% 的指纹因子表现为弱变异及中等变异 ($\text{CV} < 0.5$), 说明泥沙源地土壤的元素性质较为稳定。小流域中 ^{137}Cs

表现为强变异($0.5 \leq CV < 1.0$),说明 ^{137}Cs 随土壤颗粒在流域中移动再分布现象明显,可以较好地揭示泥沙迁移情况^[29]。

经独立样本 t 检验,林草地和耕地的指纹因子浓度无显著差异($p > 0.05$),沟壁的 Sand、SOC、TN、 ^{137}Cs 、 X_{Ifb} 和 X_{Ifc} 的平均浓度极显著低于林草地和耕

地($p < 0.01$),说明沟壁的土壤侵蚀情况显著区别于林草地和耕地。沉积泥沙的 ^{137}Cs 含量与沟壁差异性不显著($p > 0.05$),且两者均极显著低于林草地和耕地的 ^{137}Cs 含量($p < 0.01$),这表明沟壁是沉积泥沙的主要贡献区,该结果与前人^[30-31]在沟蚀发育区的研究结果较为一致。

表 1 流域土壤指纹因子浓度及 Shapiro—Wilk 正态检验结果

Table 1 Concentrations of soil fingerprint factors in the basin and results of the Shapiro—Wilk normality test												
指纹因子	沉积泥沙($n=35$)			林草地($n=18$)			耕地($n=12$)			沟壁($n=6$)		
	Mean	CV	p	Mean	CV	p	Mean	CV	p	Mean	CV	p
Clay/%	2.62	0.20	0.795	2.07	0.16	0.051	1.95	0.12	0.609	2.16	0.06	0.433
Silt/%	41.49	0.30	0.588	30.62	0.10	0.726	30.72	0.09	0.427	37.33	0.09	0.459
Sand/%	55.90	0.23	0.616	67.31	0.05	0.747	67.32	0.04	0.452	60.51	0.06	0.466
SOC/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	2.38	0.55	0.240	10.89	0.44	0.485	9.07	0.48	0.936	0.84	0.34	0.506
TN/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.47	0.39	0.118	1.28	0.32	0.926	1.01	0.29	0.231	0.45	0.37	0.126
$^{137}\text{Cs}/(\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1})$	0.81	0.74	0.793	9.26	0.67	0.577	6.71	0.71	0.342	0.37	0.80	0.086
$X_{\text{Ifa}}/(10^{-8} \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1})$	7.24	0.07	0.613	7.65	0.18	0.280	8.04	0.21	0.137	5.95	0.27	0.097
$X_{\text{Ifb}}/(10^{-8} \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1})$	7.47	0.10	0.117	7.89	0.18	0.878	8.70	0.21	0.001*	5.81	0.21	0.208
$X_{\text{Ifc}}/(10^{-8} \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1})$	8.15	0.12	0.044*	9.67	0.20	0.154	9.96	0.27	0.454	6.31	0.22	0.126

注: n 为土壤样品数量;Mean 为平均值;CV 为变异系数;* 表示在 0.05 水平下显著非正态。

2.2 最佳复合指纹因子筛选

非参数 Kruskal—Wallis H 检验结果见表 2。Clay 和 X_{Ifa} 的 $p > 0.05$,未通过 Kruskal—Wallis H 检验,余下 7 种指纹因子在林草地、耕地和沟壁之间差异极显著($p < 0.01$), H 值范围为 11.060~16.004。

表 2 泥沙源地指纹因子的 Kruskal—Wallis H 检验结果

Table 2 Results of Kruskal—Wallis H —test in sediment sources		
指纹因子	H	p
Clay	2.268	0.322
Silt	12.320	0.002*
Sand	11.060	0.004*
SOC	15.876	0*
TN	16.004	0*
^{137}Cs	14.337	0.001*
X_{Ifa}	5.625	0.060
X_{Ifb}	13.901	0.001*
X_{Ifc}	12.559	0.002*

注:* 表示在 0.05 水平下差异显著($p < 0.05$)。

将 Silt、Sand、SOC、TN、 ^{137}Cs 、 X_{Ifb} 、 X_{Ifc} 7 种指纹因子进行多元逐步判别分析(DFA),沟壁 ^{137}Cs 含量低于检出限,则确定 TN、 X_{Ifb} 、SOC 构成最佳指纹因子组合。3 种指纹因子组合对泥沙源地的累计判别正确率达到 86.1%,高于 80%,其中耕地的判别正确率最高为 91.7%,林草地和沟壁的判别正确率均为 83.3%(表 3),各潜在泥沙源地的错误判别率均低于 20%,判别效果良好。

表 3 最佳复合指纹因子判别结果

Table 3 Discriminant results of the optimum composite fingerprints

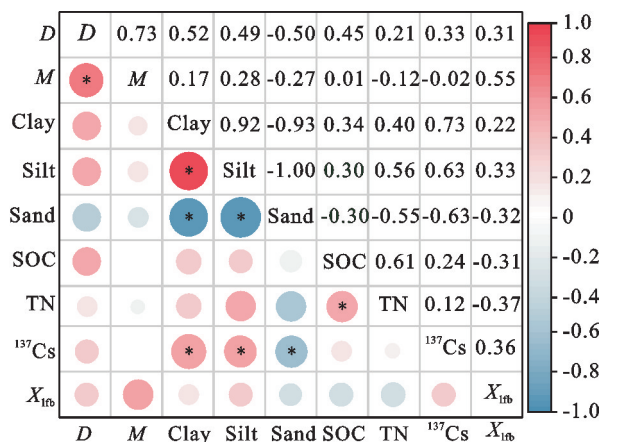
指标	泥沙源地	预测组成员信息			总计
		林草地	耕地	沟壁	
采样点数	林草地	15	3	0	18
	耕地	1	11	0	12
	沟壁	0	1	5	6
判别率/%	林草地	83.3	16.7	0	100
	耕地	8.3	91.7	0	100
	沟壁	0	16.7	83.3	100

注:初始分组案例正确判别率为 86.1%。

2.3 沉积泥沙特征及旋回层次分析

由图 2 沉积剖面各旋回层特征因子的双侧 Pearson 相关分析可知,黏粒含量与粉粒呈显著正相关($p < 0.05$),且两者与砂粒含量呈显著负相关($p < 0.05$),说明洪水输沙具有明显的分选作用。 ^{137}Cs 含量与黏粒和粉粒呈显著正相关($p < 0.05$),这表明 ^{137}Cs 主要吸附于细颗粒泥沙。SOC 含量与 TN 呈显著正相关($p < 0.05$),且两者均与 X_{Ifb} 无统计意义的相关性($p > 0.05$)。

相关分析结果表明,侵蚀性降雨仅与沉积旋回层深度呈显著正相关($p < 0.05$),而对土壤粒径、SOC、TN、放射性核素、低频磁化率浓度在剖面的分布没有显著影响($p > 0.05$)。



注: D 为沉积旋回层厚度; M 为降雨侵蚀力; * 表示在 0.05 的水平下 2 组数据相关性显著。

图 2 沉积特征因子的相关分析

Fig. 2 Correlation analysis of sedimentary characteristic indicators

在 P1 剖面共划分出 11 个沉积旋回层(图 3)。各旋回层的黏粒含量在 1.99%~4.03%, 均值 2.62%; 粉

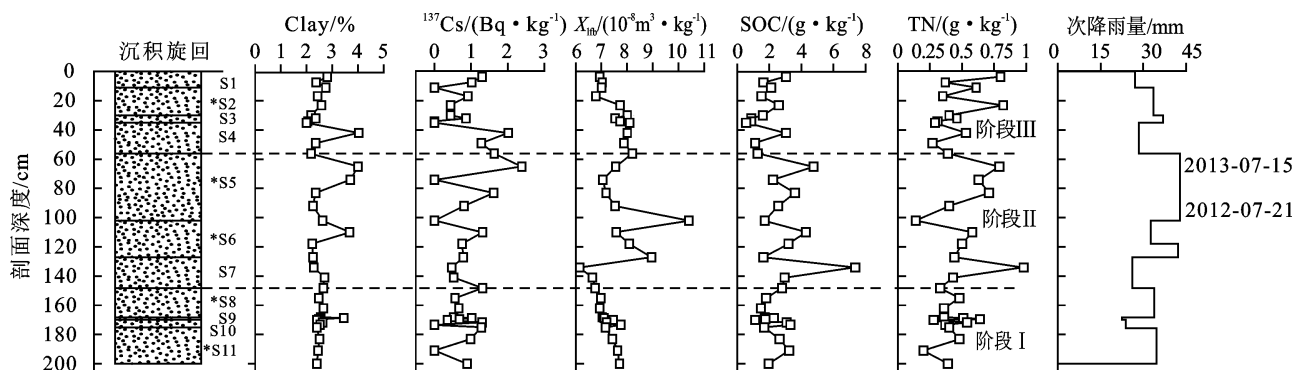


图 3 沉积泥沙剖面特征与产沙时间

Fig. 3 Sedimentary profile characteristics and sequence of sediment production

SOC 和 TN 随着沉积演变呈明显的阶段性变化, S8 和 S4 旋回层是明显的分界点, 故将沉积剖面划分为 3 个阶段。阶段 I (2007—2010 年) 的旋回层厚度 52 cm, SOC 平均浓度为 2.17 g/kg, TN 平均浓度为 0.42 g/kg; 阶段 II (2011—2013 年) 的旋回层厚度 92 cm, SOC 与 TN 平均浓度达到峰值, 分别为 3.36, 0.54 g/kg; 阶段 III (2014—2017 年) 的旋回层厚度 56 cm, SOC 平均浓度下降至 1.68 g/kg, TN 平均浓度下降至 0.47 g/kg。整体来看, SOC 和 TN 浓度在沉积过程中均呈现先升高再降低的趋势。

2.4 沉积泥沙来源及侵蚀产沙演变

淤地坝沉积泥沙的最佳指纹因子组为 TN、X_{lb} 和 SOC, 带入多元混合模型求解得到林草地、耕地、沟壁 3 种潜在源地的泥沙贡献率, 不同泥沙源地的贡献百分比及相应阶段的降雨侵蚀力见图 4。在 3 个阶段中, 林草地贡献率在 1.66%~2.41%, 均值 1.96%±0.33%; 耕地贡献率在 7.15%~27.00%, 均

粒含量在 29.17%~75.65%, 均值 41.49%; 砂粒含量在 20.64%~68.84%, 均值 55.90%; 沉积泥沙以砂粒为主。每个旋回层上部的¹³⁷Cs 含量高, 下部的含量低, ¹³⁷Cs 含量与土壤粒径在各旋回中呈现相同分布情况, 说明野外旋回分层结果可靠^[21]。各旋回层¹³⁷Cs 含量较少, 均值 0.81 Bq/kg, 总体上看¹³⁷Cs 在沉积剖面均匀分布, S5 层¹³⁷Cs 含量较高表明相较于正常侵蚀性降雨产沙, 暴雨事件使来自林草地和耕地的泥沙增多。

研究期间共发生 24 h 累计降雨量≥30 mm 的大雨事件 7 次, 分别为 2007-08-26, 2010-09-18, 2012-07-21, 2012-07-31, 2013-07-15, 2015-07-28, 2016-07-20, 其中 2012-07-21, 2013-07-15 为极端暴雨事件(日降雨量≥40 mm), 分别为 42.2, 42.8 mm。

依据大雨对大沙理论, 将 S2、S5、S6、S8、S11 作为控制层与强降雨事件关联, 沉积旋回厚度很好地与历次降雨事件对应, 以建立沉积旋回的时间序列^[32]。

值 15.36%±8.46%; 沟壁贡献率在 71.34%~90.44%, 均值 82.68%±8.20%, 混合模型的 GOF 值 83.58%~90.43%, 拟合优度均>80%, 这表明模型计算结果可被接受。

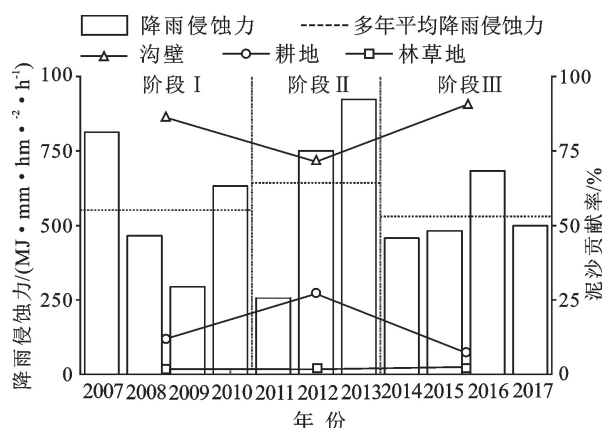


图 4 不同阶段的泥沙贡献率与降雨侵蚀力

Fig. 4 Sediment contribution rate and rainfall erosivity in different stages

采样期的土地利用情况与阶段Ⅲ相似,故计算阶段Ⅲ各泥沙源地的单位面积泥沙贡献比值。林草地、耕地和沟壁的单位面积泥沙贡献比值分别为 0.03、1.55、5.52。耕地的土壤侵蚀情况较为严重,其单位面积泥沙贡献比值 >1 。沟壁的单位面积贡献比值是耕地的 3.56 倍,是林草地的 184 倍,说明沟壁的土壤侵蚀情况最为严重。

阶段Ⅱ发生 2 次极端暴雨事件,平均降雨侵蚀力达到 3 个阶段的峰值。在沉积阶段的发展过程中,沟壁的泥沙贡献率略有增长(4.17%),在阶段Ⅱ出现明显的负波动;耕地的泥沙贡献率略有下降(4.78%),在阶段Ⅱ出现明显的正波动;而林草地的泥沙贡献率在多年沉积中基本保持稳定,维持在 2% 的水平。这一结果表明,耕地对侵蚀性降雨变化的响应敏感,在极端暴雨情况下易发生剧烈的土壤侵蚀,相比之下,林草地对侵蚀性降雨的响应较弱。沟壁一直是坝控小流域中主要的泥沙贡献区,其平均相对泥沙贡献达到 82.68%。

3 讨论

3.1 沉积旋回侵蚀信息存储特征

黄土高原地区淤地坝的沉积旋回由 1 次或多次降雨形成^[12,14,16],基于大雨对大沙的原理,沉积旋回记录了侵蚀性降雨信息。张家口地区日降雨量 ≥ 12.5 mm 会引起侵蚀产沙^[25]。王永吉^[33]研究认为,在年际降雨变化较大的区域,枯水年不会在坝地形成沉积旋回。本研究中,2006 年没有形成明显的沉积旋回,可能原因有:(1)该年为研究区枯水年,侵蚀性降雨共 87.3 mm,且历次降雨均 <20 mm,全年降雨产生的泥沙量小,不能形成完整的沉积旋回,或因沉积旋回层薄而无法区分^[15];(2)该年为淤地坝运行首年,上游来沙主要沉积在沟道中,2007 年小流域沟道的泥沙淤满或淤积达到一定程度,坝地开始淤积侵蚀泥沙^[21]。研究区约有 75% 以上的侵蚀性降雨集中在 6—9 月,较小的雨次输送的泥沙量少,沉积时间短,未能有明显的沉积旋回界线,因此本研究沉积旋回控制层主要对应大雨事件(24 h 累计降雨量 ≥ 30 mm),从而建立沉积旋回时间序列。

放射性核素¹³⁷Cs 来源较为单一,主要通过大气沉降于地表,是常用的土壤侵蚀示踪元素^[22]。¹³⁷Cs 能被土壤胶体颗粒强烈吸附,并不易被淋溶和植物吸收^[34],因此¹³⁷Cs 在泥沙迁移再分布的过程中稳定性较强。张信宝等^[31]通过对比黄河悬浮泥沙和坝库沉积泥沙与沟间地中坡耕地之间的¹³⁷Cs 含量差异发现,沟谷地是河流泥沙的主要来源。在本研究中,小流域沉积泥沙的¹³⁷Cs 含量与沟壁相似,且远小于林

草地和耕地的¹³⁷Cs 含量,这同样表明位于沟谷地的沟壁是沉积泥沙的主要策源地,同时,沉积旋回泥沙赋存的¹³⁷Cs 也较好地指示小流域不同历史时期的侵蚀变化过程。

3.2 指纹因子及泥沙源地判别误差

复合指纹识别技术假设指纹因子从侵蚀区到沉积区质量守恒。周士轩等^[35]研究表明,淤地坝拦截和埋藏侵蚀泥沙,减少 SOC 在泥沙输移过程中的损失,提高 SOC 的稳定性,但仍有 10%~20% 的 SOC 矿化分解;贾松伟等^[36]利用磁性参数示踪结果表明,蒋家沟流域有 97.56% 的泥石流沉积物来源于滑坡体堆积物,但土壤磁化率在迁移过程中受到摩擦和氧化还原等条件影响,其含量会发生改变。以上研究表明土壤有机组分和土壤磁性作为单因子示踪具有一定局限性。本研究利用 SOC、TN、 X_{if} 组合对小流域泥沙源地累积判别正确率达 86.1%,且混合模型结果的拟合优度检验 $GOF > 80\%$,结果表明,该指纹因子组合适用于桑干河流域的泥沙来源解析,同时将 SOC、TN、 X_{if} 组合能有效降低流域连通中因子含量变化的不确定性。

沟壁表土层经常发生崩塌而基本不含¹³⁷Cs^[30],大部分沟壁样品的¹³⁷Cs 含量低于检测限(0.61 Bq/kg),因此¹³⁷Cs 未被纳入最佳符合指纹组合用于多种策源地的判别。但在本研究中,¹³⁷Cs 指示小流域的主要沙源地为沟壁,该结果与复合指纹因子判别一致,说明¹³⁷Cs 核素示踪技术适用于该区小流域主要泥沙策源地判别。¹³⁷Cs 在泥沙输移过程中具有较好的稳定性,是一种较优的泥沙策源地指示因子,在未来泥沙源地示踪研究过程中,应当得到足够重视。

在一定区域内,同类小流域的侵蚀特征具有相似性和一致性^[37],但 ZHANG 等^[38]研究发现,不同土地利用的空间分布差异和不同时段侵蚀模式产生的沉积泥沙差异会影响泥沙来源结果。本研究多年产沙均保留在坝地中,且未受到剧烈扰动,同时侵蚀性降雨是研究区沉积泥沙变化的主导因素,因此沉积泥沙差异带来的不确定性较小。沟壁和耕地多分布在沟道两侧,空间分布差异较小,而林草地在沟谷地、沟间地均广泛分布,且具有不同的植被覆盖程度,造成林草地的空间分布差异误差。判别函数分析(图 5)显示,林草地、耕地组内分布较为分散,且 2 种源地存在着部分重叠,导致 3 个林草地样品和 1 个沟壁样品误判为耕地,1 个耕地样品误判为林草地(表 3)。泥沙源地样品组间的重叠和组内分散影响判别精度^[39]。

通过实地调查,林草地不同的植被覆盖程度和耕地不同的耕作强度是样品组内差异的原因;小流域中

耕地多分布在沟道左右,输移泥沙易与耕地表层土壤混合,使耕地成为主要的误判区;退耕还林还草工程使部分耕地转变为林草地,造成 2 种源地的重叠^[39-40]。在今后研究中,应在更大范围尺度内比对多组沉积泥沙剖面的侵蚀演化规律,以降低判别结果的不确定性。

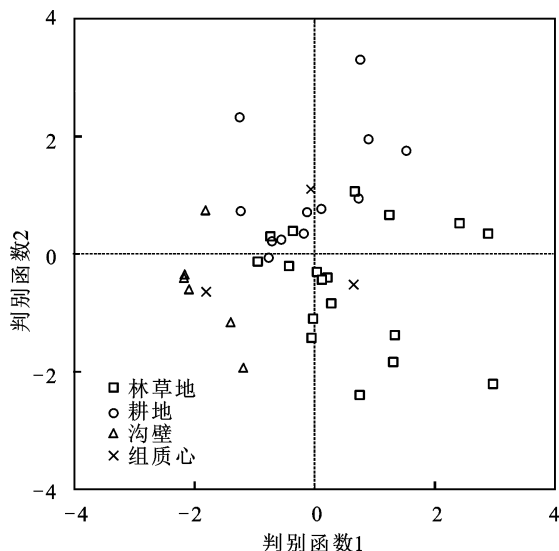


图 5 泥沙源地判别函数

Fig. 5 Discriminant function analysis plot of sediment sources

3.3 小流域侵蚀产沙演变规律

沟壁不仅受到降雨径流和沟间地泄流的冲刷等水力侵蚀影响,并且在土壤浸润后还会发生崩塌、滑塌等重力侵蚀,该区的土壤侵蚀最为剧烈^[41]。本研究结果表明,在小流域侵蚀产沙过程中,沟壁长期是主要的泥沙贡献区,其平均泥沙贡献率 $>80\%$,这是因为沟壁经常发生崩塌,地表裸露面积多,且坡度大,松散的土壤易被径流冲刷搬运。文安邦等^[30]通过比对 4 种不同土地利用类型小流域的沉积泥沙来源,研究表明,在植被覆盖度高的森林小流域,沟谷和裸坡侵蚀产沙量占淤积泥沙的主要部分。

耕地在小流域侵蚀产沙演变中泥沙贡献率变幅较大(7.15%~21.00%),主要原因是在阶段 II 受到极端暴雨事件的影响。ZHANG 等^[42]对黄土高原地区极端暴雨产沙的研究发现,在坝前和坝中区,沟壁是主要的泥沙来源,而在坝后区,耕地对暴雨沉积层的贡献远大于沟壁,这表明极端降雨导致小流域侵蚀模式发生改变,耕地易受到极端暴雨影响产生更多泥沙。研究区耕地位于输移通道附近更容易受到径流冲刷,极端暴雨发生使耕地的泥沙贡献率由阶段 I 的 11.93%显著上升至阶段 II 的 27.00%,说明耕地对侵蚀性降雨变化的响应敏感。

林草地植被覆盖丰富,在拦雨消能和增加入渗等方面起到显著作用,因此改善植被是常用的水土保持措施之一。本研究发现,林草地的泥沙贡献率常年处于最低

水平,对极端暴雨事件的响应较弱。万赐航等^[43]研究表明,植被的存在可以增加地表粗糙度,能有效降低流域的泥沙连通性,从而阻挡和储存泥沙。同时,植被根系可以改良土壤环境,显著增加土壤的孔隙度,形成根土复合体增加土壤水稳性团聚体和有机质含量,提高土壤入渗能力和抗冲性能^[44-45]。在阶段 III,林草地占流域面积 76.84%,却仅贡献 2.14%的泥沙,说明退耕还林还草等生态工程明显提高张家口市的植被覆盖度和水土保持功能^[46],有效减少流域的侵蚀产沙。

4 结论

(1)淤地坝沉积泥沙的¹³⁷Cs 平均含量较低,与沟壁无显著差异($p>0.05$),但极显著小于林草地和耕地的¹³⁷Cs 含量($p<0.01$),这表明沉积泥沙主要来自沟壁。

(2)多元混合模型计算得到泥沙源地的平均贡献率沟壁(82.68%±8.20%)>耕地(15.36%±8.46%)>林草地(1.96%±0.33%),沟壁是小流域主要的产沙区。沟壁的单位面积泥沙贡献比值为 5.52,进一步说明沟壁土壤侵蚀最为严重。未来研究区水土保持工作应着重于沟壁的治理。

(3)当发生极端暴雨时,耕作土地的泥沙贡献率显著上升,这表明处于沟道旁的耕地仍需辅以相应的水土保持措施,避免土壤养分流失。

(4)研究区林草地产沙对侵蚀性降雨的响应较弱,其泥沙贡献率常年稳定在低值,且林草地泥沙贡献率远小于林草地在小流域的面积占比,反映退耕还林还草工程有效减少小流域的侵蚀产沙。

参考文献:

- [1] ZHANG Y, LI P, LIU X J, et al. Tracer elements revealed the soil organic carbon sources in a dam-controlled watershed [J]. Soil and Tillage Research, 2022, 216: e105184.
- [2] 李占斌,朱冰冰,李鹏.土壤侵蚀与水土保持研究进展[J].土壤学报,2008,45(5):802-809.
LI Z B, ZHU B B, LI P. Advancement in study on soil erosion and soil and water conservation [J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 802-809.
- [3] 陈英,魏兴萍,张爱国,等.基于复合指纹法的岩溶洼地小流域泥沙来源解析[J].水土保持学报,2020,34(5): 131-136,144.
CHEN Y, WEI X P, ZHANG A G, et al. Analysis of sediment source in small watershed of Karst depression based on composite fingerprint method [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(5): 131-136, 144.
- [4] 史玮玥,岳荣,方怒放.黄土高原地区泥沙来源复合指纹示踪研究进展[J].水土保持通报,2019,39(3):276-285.

- SHI W Y, YUE R, FANG N F. A review of researches on sediment sources discrimination with composite fingerprinting techniques in loess plateau[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(3): 276-285.
- [5] WALLING D E, WOODWARD J C, NICHOLAS A P. A multi-parameter approach to fingerprinting suspended-sediment sources[J]. IAHS Publication, 1993, 215: 329-338.
- [6] COLLINS A L, WALLING D E, LEEKS G J L. Source type ascription for fluvial suspended sediment based on a quantitative composite fingerprinting technique[J]. Catena, 1997, 29(1): 1-27.
- [7] HADDADCHI A, RYDER D S, EVRARD O, et al. Sediment fingerprinting in fluvial systems: Review of tracers, sediment sources and mixing models[J]. International Journal of Sediment Research, 2013, 28(4): 560-578.
- [8] COLLINS A L, ZHANG Y, WALLING D E, et al. Tracing sediment loss from eroding farm tracks using a geochemical fingerprinting procedure combining local and genetic algorithm optimisation[J]. Science of The Total Environment, 2010, 408(22): 5461-5471.
- [9] 周慧平, 陈玉东, 常维娜. 指纹技术识别泥沙来源: 进展与展望[J]. 水土保持学报, 2018, 32(5): 1-7.
- ZHOU H P, CHEN Y D, CHANG W N. Sediment source fingerprinting: Progresses and prospects [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(5): 1-7.
- [10] 肖成芳, 魏兴萍, 李慧, 等. 西南典型岩溶槽谷小流域地表和地下河悬浮泥沙来源[J]. 农业工程学报, 2022, 38(12): 154-162.
- XIAO C F, WEI X P, LI H, et al. Suspended sediment sources of surface and underground rivers in small watersheds of typical Karst valleys in Southwest China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(12): 154-162.
- [11] 陈飞. 青藏高原纳木错流域融水侵蚀强度评价及产沙特性研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2016.
- CHEN F. Study on evaluation of erosion intensity and sediment characteristics by meltwater flow in the Nam Co Basin on the Tibetan Plateau [D]. Beijing: China Agricultural University, 2016.
- [12] 王晓彤, 张加琼, 杨明义, 等. 榆神府矿区典型小流域侵蚀产沙对退耕还林(草)及煤矿开采的响应[J]. 应用生态学报, 2020, 31(6): 1971-1979.
- WANG X T, ZHANG J Q, YANG M Y, et al. Effects of "Grain for Green" program and coal mining on sediment production in a typical small watershed of Yushenfu Mining Region, Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(6): 1971-1979.
- [13] 张风宝, 薛凯, 杨明义, 等. 坝地沉积旋回泥沙养分变化及其对小流域泥沙来源的解释[J]. 农业工程学报, 2012, 28(20): 143-149.
- ZHANG F B, XUE K, YANG M Y, et al. Variations of sediment nutrient in check dam and its implication for small catchment sediment resources [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(20): 143-149.
- [14] 陈鸿, 刘刚, 刘普灵, 等. 退耕还林背景下的小流域侵蚀产沙研究[J]. 泥沙研究, 2020, 45(2): 52-58.
- CHEN H, LIU G, LIU P L, et al. Processes of erosion and sediment yield in a small watershed under the influence of the grain for green project[J]. Journal of Sediment Research, 2020, 45(2): 52-58.
- [15] 侯建才, 李占斌, 李勉, 等. 基于淤地坝淤积信息的小流域泥沙来源及产沙强度研究[J]. 西安理工大学学报, 2007, 23(2): 118-122.
- HOU J C, LI Z B, LI M, et al. Research on the sediment source and sediment yield intensity in a small watershed based on the alluvium information of soil-saving dam[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2007, 23(2): 118-122.
- [16] ZHAO T Y, YANG M Y, WALLING D E, et al. Using check dam deposits to investigate recent changes in sediment yield in the Loess Plateau, China [J]. Global and Planetary Change, 2017, 152: 88-98.
- [17] KOITER A J, OWENS P N, PETTICREW E L, et al. The behavioural characteristics of sediment properties and their implications for sediment fingerprinting as an approach for identifying sediment sources in river basins [J]. Earth-Science Reviews, 2013, 125: 24-42.
- [18] 毛晓. 桑干河流域生态脆弱性评价[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- MAO X. Evaluation of ecological vulnerability in the Sanggan River [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.
- [19] 余绍文, 孙自永, 马瑞. 基于遥感和 GIS 的桑干河流域土壤侵蚀评价[J]. 安全与环境工程, 2008, 15(2): 8-12.
- YU S W, SUN Z Y, MA R. Using remote sense and GIS techniques to assess soil erosion in sanggan river watershed [J]. Safety and Environmental Engineering, 2008, 15(2): 8-12.
- [20] 张灵. 桑干河上游流域径流泥沙对气候要素与土地利用变化的响应研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2017.
- ZHANG L. Response of runoff and sediment to climatic variabilities and land use change on the upper Sang-kan River Basin [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2017.
- [21] ZHANG X B, WEN Z M, FENG M Y, et al. Application of ¹³⁷Cs 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

- (2):254-260.
- [22] SU Z G, WANG L J, LIU Y H, et al. ^{137}Cs tracing of the spatial patterns in soil redistribution, organic carbon and total nitrogen in the southeastern Tibetan Plateau[J]. International Soil and Water Conservation Research, 2023, 11(1):86-96.
- [23] LLOYD C D. Assessing the effect of integrating elevation data into the estimation of monthly precipitation in Great Britain[J]. Journal of Hydrology, 2005, 308(1/2/3/4):128-150.
- [24] 蒋凯鑫, 于坤霞, 李鹏, 等. 砒砂岩区典型淤地坝沉积泥沙特征及来源分析[J]. 水土保持学报, 2020, 34(1):47-53.
JIANG K X, YU K X, LI P, et al. Sediment characteristics and sources analysis of typical check dam in pisha sandstone area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(1):47-53.
- [25] 谢云, 刘宝元, 章文波. 侵蚀性降雨标准研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(4):6-11.
XIE Y, LIU B Y, ZHANG W B. Study on standard of erosive rainfall[J]. Journal of Soil Water Conservation, 2000, 14(4):6-11.
- [26] 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, 22(6):705-711.
ZHANG W B, XIE Y, LIU B Y. Rainfall erosivity estimation using daily rainfall amounts[J]. Scientia Geographica Sinica, 2002, 22(6):705-711.
- [27] WALLING D E. Tracing suspended sediment sources in catchments and river systems [J]. Science of the Total Environment, 2005, 344(1/3):159-184.
- [28] 陈太丽, 史忠林, 王永艳, 等. 三峡水库典型支流消落带泥沙颗粒态磷复合指纹识别踪研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(20):118-124.
CHEN T L, SHI Z L, WANG Y Y, et al. Fingerprinting particulate phosphorus absorbed by sediments for riparian zone deposits in tributary of Three Gorges Reservoir[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(20):118-124.
- [29] 杨明义, 田均良, 刘普灵. 应用 ^{137}Cs 研究小流域泥沙来源[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 13(3):49-53.
YANG M Y, TIAN J L, LIU P L. Studying sediment sources in small watershed using ^{137}Cs tracing[J]. Journal of Soil Water Conservation, 1999, 13(3):49-53.
- [30] 文安邦, 张信宝, 王玉宽, 等. 长江上游云贵高原区泥沙来源的 ^{137}Cs 法研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(2):25-27, 103.
WEN A B, ZHANG X B, WANG Y K, et al. Study on sedimentation source using caesium 137 technique in Yungui Plateau region of Upper Yangtze River [J]. Journal of Soil Water Conservation, 2000, 14(2):25-27, 103.
- [31] 张信宝, 贺秀斌, 文安邦, 等. 侵蚀泥沙研究的 ^{137}Cs 核示踪技术[J]. 水土保持研究, 2007, 14(2):152-154, 157.
ZHANG X B, HE X B, WEN A B, et al. The ^{137}Cs nuclear tracing technique for soil erosion and sedimentation studies[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007, 14(2):152-154, 157.
- [32] 魏霞, 李占斌, 李鹏, 等. 黄土高原典型淤地坝淤积机理研究[J]. 水土保持通报, 2006, 26(6):10-13, 31.
WEI X, LI Z B, LI P, et al. Study on depositing process of check dam on the loess plateau[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2006, 26(6):10-13, 31.
- [33] 王永吉. 基于淤地坝沉积解译水蚀风蚀交错带小流域侵蚀特征演变[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
WANG Y J. Using the sediment deposits behind a check dam to interpret the evolution of erosion characteristics in a small catchment of the wind-water erosion crisscross region[D]. Yangling Shaanxi: Northwest A&F University, 2017.
- [34] 文安邦, 张信宝, 沃林. 黄土丘陵区小流域泥沙来源及其动态变化的 ^{137}Cs 法研究[J]. 地理学报, 1998, 53(增刊 1):124-133.
WEN A B, ZHANG X B, WO L. A study on soil erosion rates and sediment sources using caesium-137 technique in a small drainage of the loess hills[J]. Acta Geographica Sinica, 1998, 53(S1):124-133.
- [35] 周仕轩, 夏彬, 郝旺林, 等. 黄土高原坝地深层土壤有机碳稳定性研究[J]. 水土保持学报, 2022, 36(4):284-289, 298.
ZHOU S X, XIA B, HAO W L, et al. Stability of deep soil organic carbon of dam land on the loess plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(4):284-289, 298.
- [36] 贾松伟, 韦方强. 利用磁性参数诊断泥石流沟道沉积物来源: 以云南蒋家沟流域为例[J]. 泥沙研究, 2009(1):54-59.
JIA S W, WEI F Q. Tracing sediment sources using magnetic measurements: A case study of Jiangjiagou valley, Yunnan Province[J]. Journal of Sediment Research, 2009(1):54-59.
- [37] 焦菊英, 刘元保, 唐克丽. 小流域沟间与沟谷地径流泥沙来量的探讨[J]. 水土保持学报, 1992, 6(2):24-28.
JIAO J Y, LIU Y B, TANG K L. An approach to runoff and sediment generation of gully and intergully land in small watershed[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1992, 6(2):24-28.
- [38] ZHANG X C, ZHANG G L, LIU B L, et al. Using cesium-137 to quantify sediment source contribution and uncertainty in a small watershed[J]. Catena, 2016, 140:116-124.
- [39] 刘冰, 王友胜, 张磊, 等. 黑龙江省老莱河流域河漫滩沉积泥沙来源研究[J]. 泥沙研究, 2022, 47(6):59-65.

- LIU B, WANG Y S, ZHANG L, et al. Study on the sources of floodplain sediment in Laolai River Basin of Heilongjiang Province[J]. Journal of Sediment Research, 2022,47(6):59-65.
- [40] 郭进,文安邦,严冬春,等.复合指纹识别技术定量示踪流域泥沙来源[J].农业工程学报,2014,30(2):94-104.
- GUO J, WEN A B, YAN D C, et al. Quantifying catchment scale sediment source using composite fingerprinting technique[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014,30(2):94-104.
- [41] 李占斌.黄土地区小流域次暴雨侵蚀产沙研究[J].西安理工大学学报,1996,12(3):177-183.
- LI Z B. Study on small watershed single storm erosion sediment yield in loess region[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 1996,12(3):177-183.
- [42] ZHANG J Q, YANG M Y, ZHANG F B, et al. Fingerprinting sediment sources after an extreme rainstorm event in a small catchment on the loess plateau, PR China[J]. Land Degradation and Development, 2017,28(8):2527-2539.
- [43] 万赐航,周慧平,王强,等.植被覆盖度和降雨侵蚀力变化对小流域泥沙连通性的影响[J].农业工程学报,2022,38(12):127-134.
- WAN C H, ZHOU H P, WANG Q, et al. Effects of vegetation coverage and rainfall erosivity changes on sediment connectivity in small watersheds[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022,38(12):127-134.
- [44] 周涛,苏正安,刘刚才,等.工程堆积体典型生态修复措施对土壤侵蚀水动力过程的影响[J].农业工程学报,2022,38(9):91-100.
- ZHOU T, SU Z A, LIU G, et al. Effects of typical ecological restoration measures for engineering accumulation on sediment yield and hydrodynamic process[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022,38(9):91-100.
- [45] 刘定辉,李勇.植物根系提高土壤抗侵蚀性机理研究[J].水土保持学报,2003,17(3):34-37,117.
- LIU D H, LI Y. Mechanism of plant roots improving resistance of soil to concentrated flow erosion[J]. Journal of Soil Water Conservation, 2003,17(3):34-37,117.
- [46] 刘翊涵,苏正安,潘洪义,等.张家口市土地利用和土壤保持功能的变化特征[J].草业科学,2020,37(7):1281-1292.
- LIU Y H, SU Z A, PAN H Y, et al. Changes in land use and soil retention functions in Zhangjiakou City[J]. Pratacultural Science, 2020,37(7):1281-1292.
- (上接第48页)
- [25] HAYHOE H N, 张宝颖.加拿大融雪径流侵蚀指数的估算[J].水土保持科技情报,1996(2):39-42.
- HAYHOE H N, ZHANG B Y. Estimation of erosion index of snowmelt runoff in Canada[J]. Scientific and Technical Information of Soil and Water Conservation, 1996(2):39-42.
- [26] 张娜.积雪特性与辐射能量对积雪融化过程的影响研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2017.
- ZHANG N. Study on the influence of snow cover characteristics and radiant energy on snow melting process[D]. Shenyang:Shenyang Agricultural University, 2017.
- [27] 周晓宇,赵春雨,李娜,等.东北地区积雪变化及对气候变化的响应[J].高原气象,2021,40(4):875-886.
- ZHOU X Y, ZHAO C Y, LI N, et al. Spatiotemporal variation of snow and its response to climate change in Northeast China[J]. Plateau Meteorology, 2021,40(4):875-886.
- [28] 刘斌辉.东北地区气候变化特征及对林业相关气候指标的影响[D].哈尔滨:东北林业大学,2011.
- LIU B H. Climate change characteristics and impacts on forestry-related climate indicators in Northeast China[D]. Harbin:Northeast Forestry University, 2011.
- [29] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.
- WANG J F, XU C D. Geodetector: Principle and prospect[J]. Acta Geographica Sinica, 2017,72(1):116-134.