

李建明, 张长伟, 丁文峰, 童晓霞, 孙宝洋, 冉文建, 任洪玉. 三峡库区自然全坡面产流产沙特征对土地利用类型及雨型的响应[J]. 土壤学报, 2026,

LI Jianming, ZHANG Changwei, DING Wenfeng, TONG Xiaoxia, SUN Baoyang, RAN Wenjian, REN Hongyu. Impacts of Land Use and Rainfall Regimes on Runoff-Sediment Dynamics Across Full Hillslopes in the Three Gorges Reservoir Area[J]. Acta Pedologica Sinica, 2026,

三峡库区自然全坡面产流产沙特征对土地利用类型及雨型的响应*

李建明^{1,2,3}, 张长伟^{1,2,3}, 丁文峰^{1,2,3†}, 童晓霞^{1,2,3}, 孙宝洋^{1,2,3}, 冉文建⁴, 任洪玉^{1,2,3}

(1. 长江水利委员会长江科学院, 武汉 430010; 2. 水利部山洪地质灾害防治工程技术研究中心, 武汉 430010; 3. 水利部西南山区中小河流与山洪灾害野外科学观测研究站, 武汉 430010; 4. 万州区水土保持监测中心, 重庆 404199)

摘要: 以重庆万州付沟小流域 8 个自然全坡面和 1 个标准径流裸坡小区 3 年观测期内 108 场降雨和产流产沙数据为基础, 基于聚类和相关性分析方法开展坡面产流产沙及水沙效益对雨型和土地利用类型的响应研究。结果表明: (1) 观测期内降雨主要分为 A 雨型(低频率、长历时、大雨量、中雨强)、B 雨型(中频率、短历时、中雨量、大雨强)和 C 雨型(高频率、中历时、小雨量、小雨强), 其中 C 雨型是研究区发生频率最大的类型, 但 A 雨型是导致坡面产流产沙的主要雨型, 裸坡发生侵蚀的临界降雨强度和最大 30min 降雨强度分别是其他土地利用类型小区的 3.60 倍和 1.41 倍; (2) 裸坡多年平均产流量和产沙量分别是其他土地利用类型小区的 2.63 倍~4.03 倍和 5.71 倍~9.84 倍, 作物小区和乔木林地产沙对 A 雨型最敏感, 草地产沙对 C 雨型最敏感, 而裸坡和灌木林地产沙对 B 雨型最敏感; (3) 雨型对裸坡和其他土地利用类型小区产流产沙的贡献受措施类型影响, 雨型对裸坡产流影响小于其他土地利用类型小区, 但对产沙影响大于其他土地利用类型小区。其他土地利用类型小区的平均减流效益和减沙效益分别是 72.13% 和 98.72%, 草地减沙效益最大, 且不同土地利用类型在 B 雨型下取得最大的减流减沙效益。方差贡献率分析表明, 对坡面产流产沙的影响呈现出土地利用类型>雨型×土地利用类型>雨型。结果表明, 三峡库区开展水土流失治理时需要综合考虑降雨特征开展土地利用规划, 成果可为研究区水土流失综合治理提供科学依据和实践指导。

关键词: 自然全坡面; 土地利用类型; 雨型; 产流产沙; 三峡库区

中图分类号: S157.1

文献标志码: A

Impacts of Land Use and Rainfall Regimes on Runoff-Sediment Dynamics Across Full Hillslopes in the Three Gorges Reservoir Area

LI Jianming^{1,2,3}, ZHANG Changwei^{1,2,3}, DING Wenfeng^{1,2,3†}, TONG Xiaoxia^{1,2,3}, SUN Baoyang^{1,2,3}, RAN Wenjian⁴, REN Hongyu^{1,2,3}

(1. Changjiang River Scientific Research Institute of Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China; 2. Research Center on Mountain Torrent & Geologic Disaster Prevention of the Ministry of Water Resources, Wuhan 430010, China; 3. Observation and Research Station for Small and Medium-Sized Rivers and Flash Flood Disasters in Mountains of Southwest China, Ministry of Water Resources, Wuhan 430010, China; 4. Soil and Water Conservation Monitoring Center of Wanzhou District, Chongqing 404199, China)

Abstract: 【Objective】The Three Gorges Reservoir area, as a typical key region for soil erosion in the Yangtze River Basin, has received widespread attention. However, the differential responses of surface runoff and sediment production to rainfall typologies in the Three Gorges Reservoir Area remain underexplored. 【Method】This study systematically analyzed runoff-sediment dynamics in relation to land use and rainfall characteristics using a comprehensive 3-year dataset (2021-2023) from the Fugou experimental watershed in Wanzhou District, Chongqing, which includes 108 rainfall-runoff events monitored from 8 natural full-slope and 1

* 国家自然科学基金长江水科学研究联合基金项目(U2340215)和国家自然科学基金项目(41701316, 42107352)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of Joint Fund for Changjiang River Water Science Research (No.U2340215) and the National Natural Science Foundation of China (Nos.41701316, 42107352)

†通信作者 Corresponding author, E-mail: wenfengding@163.com

作者简介: 李建明(1989-), 男, 福建三明人, 博士, 高级工程师, 主要从事生产建设项目土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:hahaliujianming@126.com

收稿日期: 2025-08-05; 收到修改稿日期: 2026-03-17; 网络首发日期(www.cnki.net):

standard bare slope plot (as control), representing typical landforms in the Three Gorges Reservoir area. The area of the full-slope plots in this study ranges from 407 to 1539 m², with slopes between 14° and 25°. The standard runoff plot has an area of 100 m² and a slope of 15°. All plots were characterized by purple soil, while the surface coverage of other land-use plots ranged from 73% to 85%.

【Result】 The results showed that: (1) During the observation period, rainfall was primarily classified into three types: Type A (low frequency, long duration, heavy rainfall amount, moderate rainfall intensity), Type B (medium frequency, short duration, moderate rainfall amount, heavy rainfall intensity), and Type C (high frequency, medium duration, light rainfall amount, light rainfall intensity). Among these, Type C exhibited the highest frequency in the study area, while Type A was identified as the principal rainfall type inducing slope runoff and sediment yield. The critical rainfall intensity and maximum 30-min rainfall intensity triggering erosion on bare slopes were 3.60 times and 1.41 times those of the other land use plots, respectively. (2) The multi-year average runoff and sediment yield from bare slopes were 2.63 to 4.03 times and 5.71 to 9.84 times those of the other land use plots, respectively. Sediment production in cropland and arboreal woodland showed the highest sensitivity to Type A rainfall events, whereas grassland sediment yield was most sensitive to Type C rainfall. Bare slopes and shrubland sediment yields demonstrated peak sensitivity to Type B rainfall. (3) The contribution of rainfall types to runoff and sediment yield from bare slopes and the other land use plots was influenced by the land use types. The impact of rainfall types on runoff generation from bare slopes was weaker than that on the other land use plots, but their influence on sediment production exceeded that of the other land use plots. Also, the average runoff reduction efficiency and sediment reduction efficiency of the other land use reached 72.13% and 98.72%, respectively. Grasslands demonstrated higher sediment reduction efficiency than other measures, and the maximum runoff-sediment reduction benefits of conservation measures occurred during Type B rainfall events. Analysis of variance contribution rates revealed the following order of influence on slope runoff and sediment yield: land use (50.30%~70.37%)> rainfall type with land use (0.30%~5.70%) > rainfall type (23.93%~49.40%) in descending order. In addition, the impact of rainfall patterns on slope runoff and sediment yield was significantly influenced by land use. **【Conclusion】** The results indicate that implementing soil erosion control in the Three Gorges Reservoir Area requires comprehensive consideration of rainfall characteristics to deploy targeted measures. Simultaneously, it is proposed that when implementing comprehensive soil and water conservation management in the study area, appropriate measures should be identified under the premise of considering the regional climate. These findings provide a scientific basis and practical guidance for soil erosion prevention and control in the study area.

Key words: Full hillslopes; Land use types; Rainfall types; Runoff-sediment dynamics; Three Gorges Reservoir Area

三峡库区不仅是中国淡水资源战略储备库,同时也是长江上游重要的生态安全屏障^[1]。由于水土流失形势严峻,该地区在历年发布的《中国水土保持公报》中,均被列入重点关注区域,同时也被列入国家级水土流失重点治理区^[2]。截至 2024 年底,库区水土流失面积仍达到区域总面积的 32.13%,超过全国平均水土流失率 27.17%。坡耕地作为三峡库区主要的土地利用类型,长期受人为活动影响,成为水土流失及面源污染的主要策源地^[3]。该区坡耕地年侵蚀量可达 9450 万 t,占库区年总侵蚀量的 60%以上^[4]。开展三峡库区水土流失规律及防治,尤其是坡耕地综合治理研究,不仅是落实国家对于耕地保护、长江经济带高质量发展等重要政策的具体落实^[5],同时也可后续开展三峡库区水土流失治理及生态修复思路及政策制定等提供重要的科学依据^[6-7]。

坡耕地作为粮食安全保障的基础,其水土流失问题已引起全世界广泛关注^[8-9]。目前针对坡耕地水土流失研究主要包括:一是探索导致坡耕地水土流失的主要因素及其影响机制,包括降雨、地形、地表覆盖等,其中降雨特征包括降雨历时、雨型、强度以及空间分布等^[10],地形包括坡度、坡长和坡型等^[11],地表覆盖包括秸秆、地膜及覆被等^[12]。二是针对不同区域坡耕地提出针对性防治措施,包括工程措施(梯田、水平沟、鱼鳞坑等)^[13]、耕作措施(轮作、间作套种、免耕等)^[14]、生物措施(乔灌木、封育等)^[15]。三是开展坡耕地侵蚀预测模型研发及水土保持效益分析,现有针对坡耕地侵蚀预测的模型主要包括 CSLE、USLE、RUSLE 等^[16]。四是针对坡耕地水土流失研究及监测方法进行研发,主要包括模拟试验、自然观测以及遥感监测等,其中模拟试验具有较高的重复性,可以针对单个因素开展微观研究,但其降雨特性与自然条件存在差异,所得出的结论是否可以直接用于指导实践仍有存疑^[17];自然观测可以真实反映不同土地利用类型实际水土流失情况,但受外界因素影响较大,所研究的是多种自然因素的综合效应,无法反映单因素的影

响^[18]；遥感监测可以实现区域范围内的整体趋势监测，反映区域在一定时序内的总体情况，但无法针对局部情况进行直观反馈^[19]。但总体看，开展自然观测仍是研究区域在一定时空范围内水土流失状况最有效的手段^[20]。

在水土保持研究中，尺度效应是影响坡面侵蚀研究的关键环节，现有针对坡面及小流域的研究已较成熟，坡面侵蚀研究中较常用到标准径流小区^[21]，但坡面到小流域之间跨度大，尺度效应显著，因此，研究者们提出了自然全坡面概念，自然全坡面是介于坡面和小流域之间的尺度范畴。开展土壤侵蚀研究的重要节点^[22]。尺度效应对径流侵蚀过程的影响被认为是认识生态系统功能及其退化过程的关键，同时研究也认为受尺度效应影响，流域泥沙输移比呈现出分异性，针对尺度效应的研究多集中在泥沙时空变化、水沙耦合关系以及主要控制因素等方面^[23-24]。针对陇东黄土塬区近 60 年的自然观测表明，草地降雨阈值在尺度效应方面表现为坡面>全坡面>小流域，即随空间尺度增大降雨阈值减小^[25]。针对全坡面的侵蚀观测研究在黄土高原较为集中，由于该区域显著的垂直节理以及深厚的土层，形成大量的自然全坡面，有利于开展科学观测研究，同时在红壤丘陵区针对自然全坡面的水沙观测也有相关研究^[26]。然而，受地域气候、地形以及研究方法和目标差异的影响，目前针对该方面的研究仍较薄弱。已有研究指出自然全坡面是介于传统坡面和流域尺度之间，是开展水土流失多尺度观测与转换的基本单元，其坡面径流产沙受坡度、坡位、坡长等多因素影响，开展自然全坡面水土流失观测研究，是揭示坡面径流携沙能力、地表阻控泥沙搬运等机制的重要手段，亟需开展相关研究^[26]。

综上所述，开展三峡库区不同土地利用类型水土流失研究是后续水土流失防治的重要理论基础，尤其是通过自然观测研究不同自然全坡面的水沙规律，不仅可为三峡库区水土流失治理提供科学依据，同时也能弥补侵蚀尺度研究方面的不足，具有重要的理论意义。因此，本研究以三峡库区万州区付沟小流域 8 种不同土地利用自然全坡面小区和 1 个标准径流小区（裸坡，对照）为对象，对比分析不同土地利用类型（作物小区、灌木林地、乔木林地和其他草地，原均为坡耕地，后期开展不同土地利用类型研究）在不同自然雨型下的水沙特征，是揭示坡面水沙规律及水沙效益对不同土地利用响应机制的重要手段。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于三峡库区中心区域的重庆市万州区天城镇付沟村，土地利用以紫色土坡耕地为典型代表。付沟小流域属亚热带季风湿润区，多年平均气温 17.7℃，多年平均降水量 1 243mm，多年平均日照时数 1 484h，多年平均无霜期 240 d。研究区小流域地势呈西北向东南倾斜，地面高程在 350~1 280 m 之间，相对高差 930 m，流域纵向切割深，落差大，由中山区、低山区和丘陵区构成。该区不仅位于三峡库区腹地，也是重庆市一级水源涵养区，距离长江干流最近的直线距离不到 10 km^[2]。土壤类型以紫色土、石灰土和黄壤为主，植被以马尾松、杉树和人工林为主，植被覆盖度在 70%以上。该流域土地利用类型以林地、灌木林地、经果林、草地、坡耕地为主。水土流失面积占土地总面积的 95%，其中轻度侵蚀占 94%，水土流失形式以面蚀和沟蚀为主。

1.2 试验设计与方法

本研究针对 8 个自然全坡面小区共 4 种土地利用类型开展分析研究（13#、14#、15#、16#、17#、18#、19#、20#），其中 13#、15#和 18#为作物小区，14#和 16#为其他草地，17#和 19#为灌木林地，20#为乔木林地。为分析不同土地利用类型的水沙效益，以 8#（裸坡）标准径流小区作为对照，各试验小区影像见图 1。所有试验小区均于 2018 年建成，2019 年试运行，2020 年正式运行，土壤为紫色土和粉质砂土，基岩类型为页岩，小区位于坡中部位。试验小区基本信息见表 1。

表 1 试验小区基本信息表

Table 1 Basic information of the experimental plots

小区 Plots	小区特征 Characteristics of the plots							地表覆盖度 Surface coverage/%
	投影坡长 Projection length/m	投影宽度 Projection width/m	坡度 Degree/°	坡向 Slope direction/°	土壤类型 Soil type	土层厚度 Soil thickness/cm	土地利用类型 Land use types	
8#	20	5	15	180	紫色土	50	裸坡	0
13#	48	31	20	200	紫色土	50	经果林	85
14#	54	8	14	218	紫色土	20	杂草	78
15#	33	22	23	227	紫色土	29	玉米+甘薯+柑橘	82
16#	43	22	20	168	紫色土	15	杂草	79
17#	28	22	25	168	粉质砂土	27	灌木林	80
18#	37	11	23	219	紫色土	19	枇杷+油菜套种	75
19#	57	27	24	90	紫色土	14	灌木林	73
20#	22	21	20	135	粉质砂土	17	乔木林	82

其中：13#小区经果林种植柑橘树（高 1.5m、米径 2cm、200 株），17#小区灌木林种植的是竹子，18#枇杷树（高 1.6m、冠幅 1.5m、米径 3cm、25 株），20#乔木林种植的是松树（高 7m、米径 10cm、300 株）。Note: In the 13th residential area, citrus trees (1.5 m in height, 2 cm in diameter at breast height, 200 plants) were planted in the orchard. In the 17th residential area, bamboo was planted in the shrub forest. In the 18th residential area, loquat trees (1.6 m in height, 1.5 m in crown width, 3 cm in diameter at breast height, 25 plants) were planted. In the 20th residential area, pine trees (7 m in height, 10 cm in diameter at breast height, 300 plants) were planted in the tree forest.

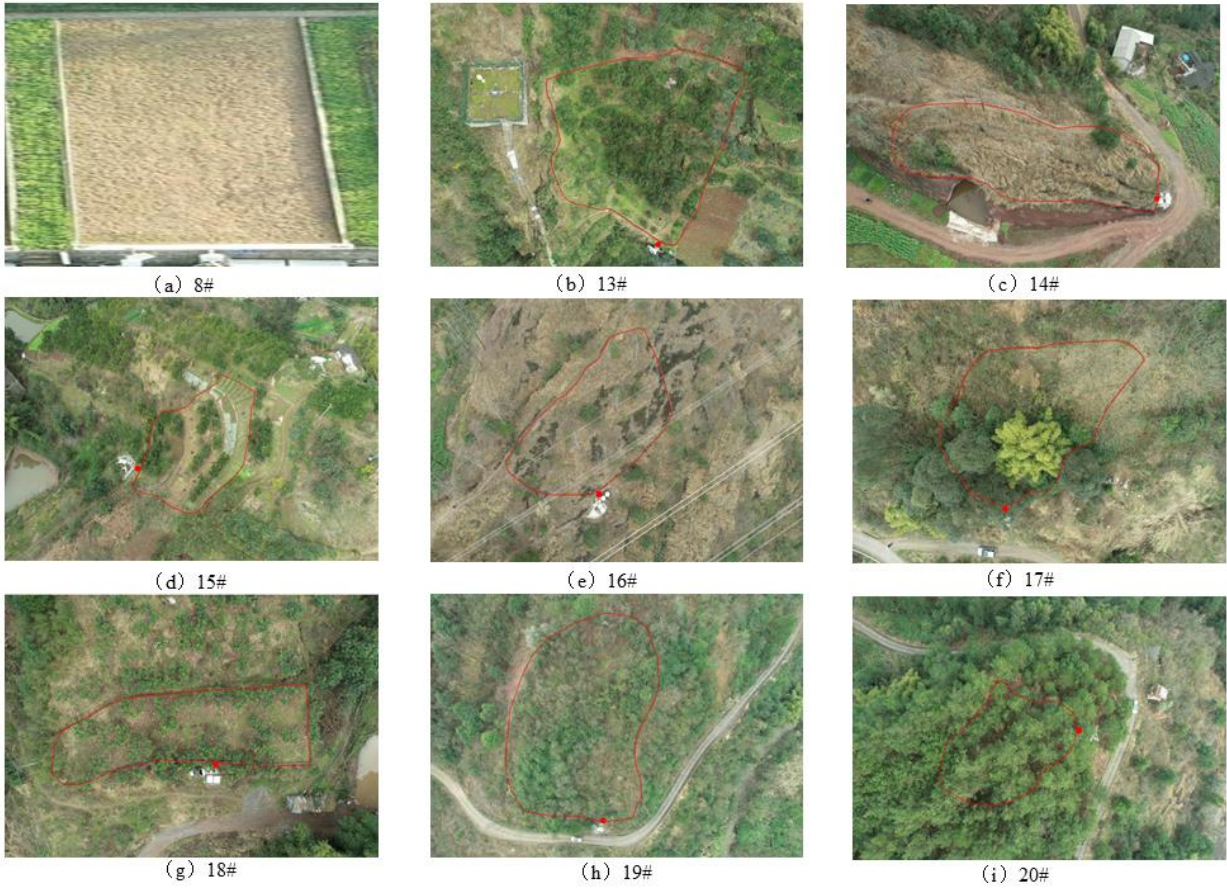


图 1 试验小区布设

Fig. 1 Image of the experiment plots

在 8#裸坡标准小区北侧左上方 100 m 处设置 1 个小型气象站, 规格为 16 m×20 m, 由传感器、数据采集器、控制处理器、GPRS 无线传输等构成, 可以观测降雨量、气温、气压、湿度、风速、风向等气象因子。其中降雨观测采用精度 0.50 mm 的遥测雨量计(EL-RS), 同时采用集雨桶率定。其中产流量采用仪器+人工集流桶方式同时测定, 产生径流时, 先进入仪器, 再全部进入集流桶, 后续数据分析采用人工集流桶数据, 并以仪器数据进行校验。人工集流桶均为 1 级 9 孔分流。当小区产流后, 人工采样时通过读取人工集流桶 3 个水位尺刻度, 综合计算当次每个小区径流量。产沙量采取人工采样多次, 先搅拌, 再边搅拌边分层取样, 采 500mL 的样品 3 个以上, 取均值, 后续将样品进行烘干称质量, 进而计算产沙量。

1.3 数据处理

根据试验区 2021 年 1 月至 2023 年 12 月共计 36 个月实测的 108 场降雨和各小区产流产沙数据进行分析。其中降雨数据根据逐日降雨量综合计算出降雨量、降雨历时、降雨强度和最大 30min 降雨强度 4 个指标。各小区 3 年的产流量和产沙量是根据各次降雨采集到的产流量和产沙量计算得出的累计值。

(1) 次降雨划分及降雨特征指标。根据遥测雨量计(EL-RS)记录的降雨起止时间、累积降雨量、累积降雨历时等确定降雨间隔, 作为次降雨划分的依据。次降雨定义为某场次降雨事件中, 降雨间歇时间在 6h 以上或者连续 6 h 降雨量不足 1.2 mm 则视为 2 次降雨事件, 否则视为 1 次降雨事件^[27]。该雨量计数据采集时间间隔为 5 min, 采集指标包括逐日降水量、降水过程、最大 30min 降雨强度等监测指标。

(2) 侵蚀性降雨比例。侵蚀性降雨指引起土壤侵蚀, 发生真正意义上的土壤流失的降雨, 是区分发生侵蚀和不发生侵蚀的临界降雨阈值^[28]。侵蚀性降雨比例是指发生侵蚀性降雨次数占总降雨次数的百分比。本研究中裸坡和 6 个不同土地利用类型小区的侵蚀性降雨是根据每场次降雨是否发生产流和产沙进行判定。

(3) 降雨类型划分。采用 K-Means 聚类法进行雨型划分, 并使用轮廓系数(Silhouette Coefficient, SC)和误差平方和法(Sum of the Squared Errors, SSE)确定聚类数 K 的最优取值^[29]。

轮廓系数(SC)是描述各数量类别的轮廓清晰度的指标, 包括内聚度和分离度。内聚度反映一个样本点与类内元素的紧密程度, 而分离度则是反映一个样本点与类外元素的紧密程度。依据其原理, 绘制 SC- K 函数曲线, 取 SC 最大值处对应 K 值为最优聚类数。

误差平方和(SSE)是所有样本的聚类误差, 其核心思想是簇内误差总和会随着聚类数 K 的增大而减小, 当 K 的取值小于其真实值时, SSE 的递减率会很大, 而当 K 的取值大于其真实值时, SSE 的下降幅度会骤减, 最终随 K 的继续增大而趋于平缓, 依据其原理, 绘制 SSE- K 函数曲线, 取斜率拐点处的 K 值作为最优聚类数。

参考以往研究^[30-31], 选取降雨量、降雨历时、平均降雨强度和最大 30 分钟降雨强度作为雨型划分的四个基础指标, 其中降雨量作为产流产沙的驱动因子, 直接影响径流总量和侵蚀能量, 从空间方面反映了降雨的总能量; 降雨历时决定土壤饱和过程, 短历时强降雨易引发坡面侵蚀, 从时间方面反映降雨特征; 平均降雨强度反映单位时间能量输入, 与侵蚀效应具有显著相关性, 反映的是一场降雨的均值强度; 最大 30min 强度对应土壤入渗临界点, 是诱发细沟侵蚀的关键阈值, 同时也是反映瞬时降雨强度的重要指标。依据指标计算出不同 K 值对应的 SSE 和 SC, 并绘制函数曲线, 确定 K 的最优取值, 最后采用 K-Means 聚类法进行最终的雨型计算和划分。

(4) 指标常规变化范围分位数确定及临界降雨特征。统计分析本研究 3 年观测的降雨和径流小区产流产沙数据特征, 表明观测数据不呈现正态分布。因此, 在计算临界降雨特征时采用基于非参数统计的方法, 直接基于数据的排序位置, 采用剔除最大两个极值作为变化范围的依据, 在进行不同雨型水沙关系分析时剔除了各雨型下的最大产沙量和产流量, 既符合非参数统计的原则, 也适用于描述和解释观测数据的分布特征^[30]。该方法在数据代表性、方法适配性和稳健性方面也较为常见^[32]。

由于自然全坡面小区的规格均不一致, 为使数据具有可比性, 在分析产流产沙量时统一进行标准化处理, 按照每平方米的产流产沙量进行统计分析。

2 结 果

2.1 降雨特征

2.1.1 雨型划分 根据气象观测站采集到的降雨特征资料,经分析,2021-2023 年共计发生 108 场次有效降雨,总降雨量为 3 773 mm,3 年平均降雨量为 1 258 mm。其中 2021 年、2022 年和 2023 年的降雨场次分别为 41 场、31 场、36 场,年降雨量分别为 1 388 mm、1 006 mm 和 1 378 mm。以降雨量、降雨历时、平均降雨强度和最大 30 min 降雨强度 (I_{30}) 作为主要特征指标,利用 SPSS 对 108 场降雨数据进行主成分聚类分析,直观反映研究区自然降雨特征,不同雨型特征见表 2。结果表明,研究区雨型主要分为 3 个相对独立的聚类类别,即研究区降雨可以划分为 3 类,并对各不同指标的 95%置信区间、均值最大值及最小值进行分析,各雨型的主要特征归纳为:(1) A 雨型,低频率(13.89%)、长历时(990.56~1521.30 min)、大雨量(72.65~96.01 mm)、中平均降雨强度(8.29~13.66 mm·h⁻¹)、大最大 30 min 降雨强度(22.88~40.12 mm·h⁻¹);(2) B 雨型,中频率(26.85%)、短历时(305.74~492.20 min)、中雨量(26.27~38.93 mm)、大雨强(11.69~14.97 mm·h⁻¹)、中最大 30 min 降雨强度(23.41~31.41mm·h⁻¹);(3) C 雨型,高频率(59.26%)、中历时(763.46~1014.54 min)、小雨量(21.13~27.70 mm)、小雨强(3.68~4.62 mm·h⁻¹)、小最大 30 min 降雨强度(7.64~10.24 mm·h⁻¹)。

从均值来看,B 雨型的平均降雨强度分别为 A 雨型和 C 雨型的 1.22 倍和 3.21 倍;A 雨型的最大 30 min 降雨强度为 B 雨型和 C 雨型的 1.15 倍和 3.52 倍;但从降雨量分析,A 雨型的降雨量分别为 B 雨型和 C 雨型的 2.59 倍和 3.45 倍。总体上看,C 雨型是研究区发生频率最高的类型,但 A 雨型的降雨量和最大 30 min 降雨强度最大。

表 2 不同雨型特征指标

Table 2 Statistics of the characteristic index of different rainfall types

雨型	样本数	比例	指标	降雨量	降雨历时	平均降雨强度	最大 30 min 降雨强度
Rainfall type	Number	Proportion/%	Index	Precipitation	Rainfall	Average rainfall	Maximum 30 minute rainfall
				/mm	duration/min	intensity/(mm·h ⁻¹)	intensity I_{30} /(mm·h ⁻¹)
A 雨型	15	13.89	平均值	84.33	1255.93	10.97	31.50
			标准差	21.09	479.20	4.85	15.57
			标准误差	5.45	123.73	1.25	4.02
			95%置信区间	下限	72.65	990.56	8.29
				上限	96.01	1521.30	13.66
			最小值	56.00	610.00	4.30	13.00
			最大值	127.50	2184.00	22.30	57.00
			平均值	32.60	398.97	13.33	27.41
B 雨型	29	26.85	标准差	16.64	245.10	4.31	10.51
			标准误差	3.09	45.51	0.80	1.95
			95%置信区间	下限	26.27	305.74	11.69
				上限	38.93	492.20	14.97
			最小值	8.00	35.00	6.10	9.00
			最大值	63.00	890.00	22.00	51.00
			平均值	24.41	889.00	4.15	8.94
			标准差	13.15	502.56	1.88	5.21
C 雨型	64	59.26	标准误差	1.64	62.82	0.23	0.65
			95%置信区间	下限	21.13	763.46	3.68
				上限	27.70	1014.54	4.62
			最小值	5.00	175.00	1.20	2.00

2.1.2 坡面产流产沙临界降雨特征 受土地利用特性影响,相同降雨条件下不同土地利用自然全坡面产流产沙情况有差异,即不同土地利用小区发生产流产沙的临界降雨特征有差别。从侵蚀性降雨比例分析(图2a),裸坡(8#)发生侵蚀性降雨比例最高,全年观测到的有效降雨中71.30%都会引发侵蚀;其次是乔木林地(20#),其侵蚀性降雨比例也达到62.04%;发生侵蚀概率最低的是18#作物小区仅为38.89%。从均值看,灌木林地(17#、19#)、其他草地(14#、16#)和作物小区(13#、15#、18#)发生侵蚀性降雨的比例相近,分别为51.85%、50.46%和48.77%,即有效降雨中近1/2的降雨均会导致坡面发生侵蚀。由于裸坡和其他土地利用类型小区在产沙量方面存在较大差异,在拟合产沙量与临界降雨特征(降雨量、平均降雨强度和 I_{30})时分别剔除最大的两个产沙量极值。拟合结果表明,裸坡和其他土地利用类型小区的侵蚀量与降雨量、平均降雨强度和 I_{30} 均可用线性拟合,由于数据量大且绝对值差异较大,导致拟合方程的决定系数较低(裸坡和其他土地利用类型小区的 R^2 分别在0.2651~0.2939和0.0339~0.0805),但方程经检验均有效。因此,将拟合方程与X轴的交点作为临界降雨特征值,其中裸坡和其他土地利用类型小区的临界降雨量分别为11.01、10.24 mm,临界平均降雨强度分别为2.14、0.59 mm·h⁻¹,临界 I_{30} 分别为3.90、2.77 mm·h⁻¹。从产流产沙临界降雨特征来看,其他土地利用类型小区相较于裸坡更加容易发生侵蚀,其中临界降雨量差异较小仅为7.57%,但裸坡发生侵蚀的临界平均降雨强度和 I_{30} 分别可达到其他土地利用类型小区的3.60倍和1.41倍,有地表覆被坡面在相同降雨条件下更易产生径流,进而造成流失。

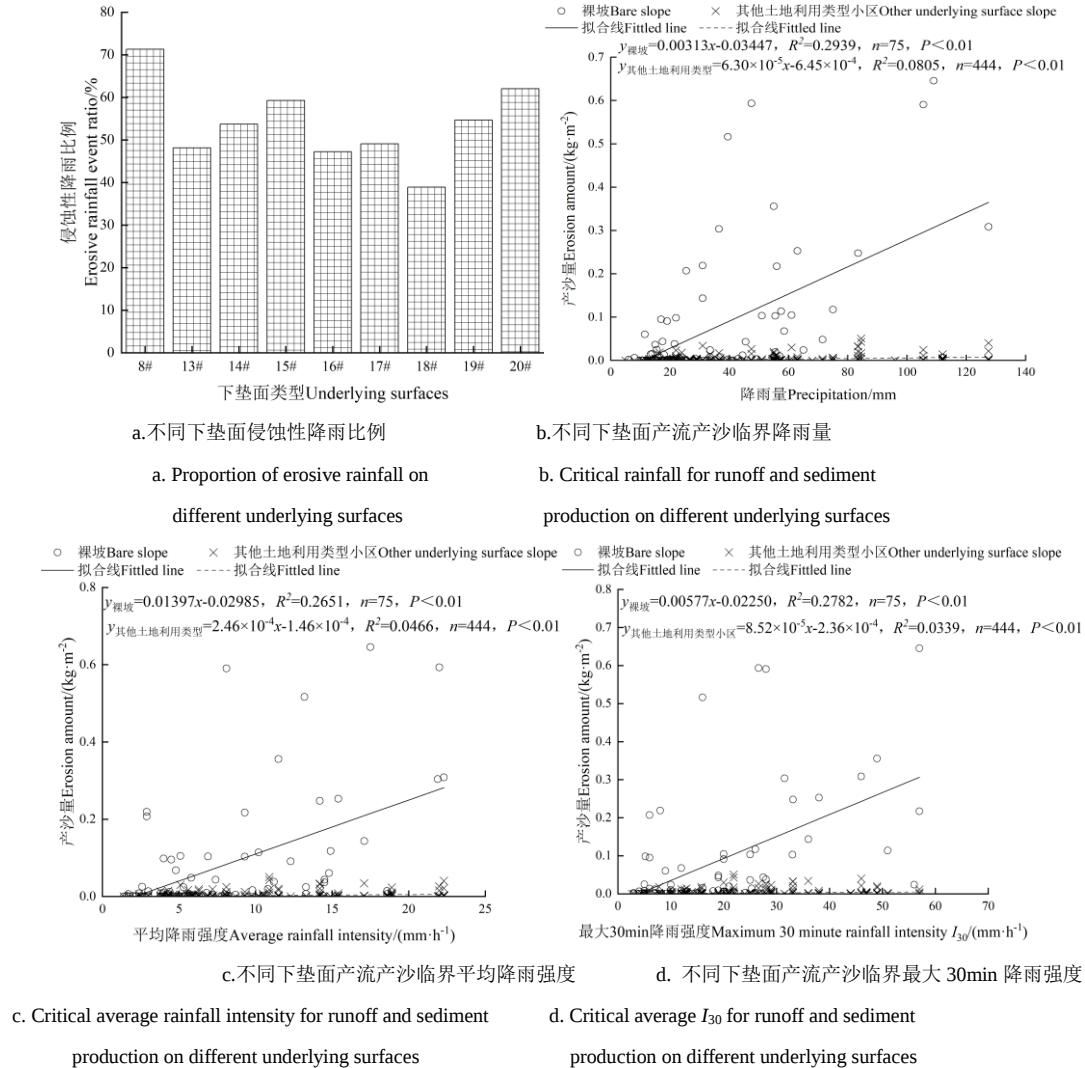


图2 不同下垫面产流产沙临界降雨特征

Fig. 2 Characteristics of critical rainfall for runoff and sediment production on different underlying surfaces

2.2 产流产沙特征

2.2.1 观测期内多年平均产流产沙特征 各小区多年平均产流量呈现为 8#>15#>20#>19#>16#>14#>18#>17#>13#, 按照土地利用类型划分为裸坡(253.36 L·m⁻²)>乔木林地(96.44 L·m⁻²)>其他草地(69.60 L·m⁻²)>作物小区(67.80 L·m⁻²)>灌木林地(62.90 L·m⁻²) (图 3)。从绝对值分析, 裸坡的多年平均产流量显著大于其他土地利用小区, 可达 2.63 倍~4.03 倍, 而在其他土地利用小区中其他草地、作物小区和灌木林地的多年平均产流量差异较小(7.78%~10.64%), 但也均显著小于乔木林地。从多年平均产沙量分析表明, 各小区呈现为 8#>15#>18#>17#>13#>16#>20#>19#>14#, 总体裸坡(5.0594 kg·m⁻²)>作物小区(0.1408 kg·m⁻²)>灌木林地(0.0247 kg·m⁻²)>乔木林地(0.0178 kg·m⁻²)>其他草地(0.0143 kg·m⁻²), 研究表明不同土地利用小区多年平均产沙量存在较大差异, 且均显著小于裸坡, 作物小区的多年平均产沙量是植物措施的 5.71 倍~9.84 倍, 其中植草措施对坡面减沙效果最明显。

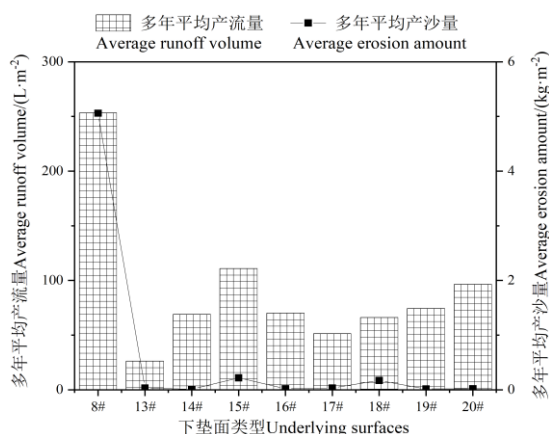


图 3 不同土地利用小区多年平均产流产沙特征

Fig. 3 Characteristics of average annual runoff and sediment yield in different land use plots

2.2.2 水沙关系 不同雨型的降雨特性差异导致其对坡面产流产沙影响发生改变, 分析雨型对不同土地利用小区坡面产流产沙影响可更直观反映降雨特征与土地利用类型产流产沙的相互关系。为避免极端降雨影响整体拟合结果, 分析各试验小区水沙关系时剔除了 3 种雨型的极值 (图 4)。从统计显著性综合分析, 除 13#在 A 雨型下的水沙关系拟合方程的显著性 $P<0.05$ 外, 其他小区在 3 种雨型下的水沙关系拟合方程的显著性 $P<0.01$, 即在不同雨型下的水沙关系均呈显著的线性关系。除了 17#、18#、19#和 20#小区在 C 雨型, 以及 19#小区在 A 雨型下的水沙关系拟合方程 $R^2<0.5$ 外, 其他试验小区在不同雨型下的拟合方程 $R^2>0.5$, 研究表明产流仍是坡面产沙的主要因素。8#、17#和 19#小区相同产流条件下的产沙表现为 $B>A>C$, B 雨型产沙是 A 雨型的 1.39 倍、1.26 倍和 11.19 倍, 是 C 雨型的 2.75 倍、26.03 倍和 15.32 倍; 14#和 16#小区相同产流条件下的产沙呈现为 $C>B>A$, C 雨型产沙是 B 雨型的 1.90 倍和 1.19 倍, 是 A 雨型的 2.23 倍和 1.48 倍; 其他小区 13#、15#、18#和 20#相同产流条件下的产沙均呈现为 $A>B>C$, A 雨型产沙是 B 雨型的 2.53 倍、1.02 倍、1.29 倍和 1.23 倍, 是 C 雨型的 5.31 倍、1.41 倍、4.81 倍和 9.17 倍。研究结果表明, 不同土地利用类型对雨型的产沙响应存在较明显差异: 其中作物小区和乔木林地产沙对 A 雨型最敏感, 而其他草地产沙对 C 雨型最敏感, 裸坡以及灌木林地产沙对 B 雨型最敏感。由此可以根据不同研究区的气候特征有针对性地对不同土地利用类型坡面实施防护措施。研究表明, 无论裸坡还是其他土地利用类型小区, 在不同雨型条件下均呈现显著的“水大沙多”特点。

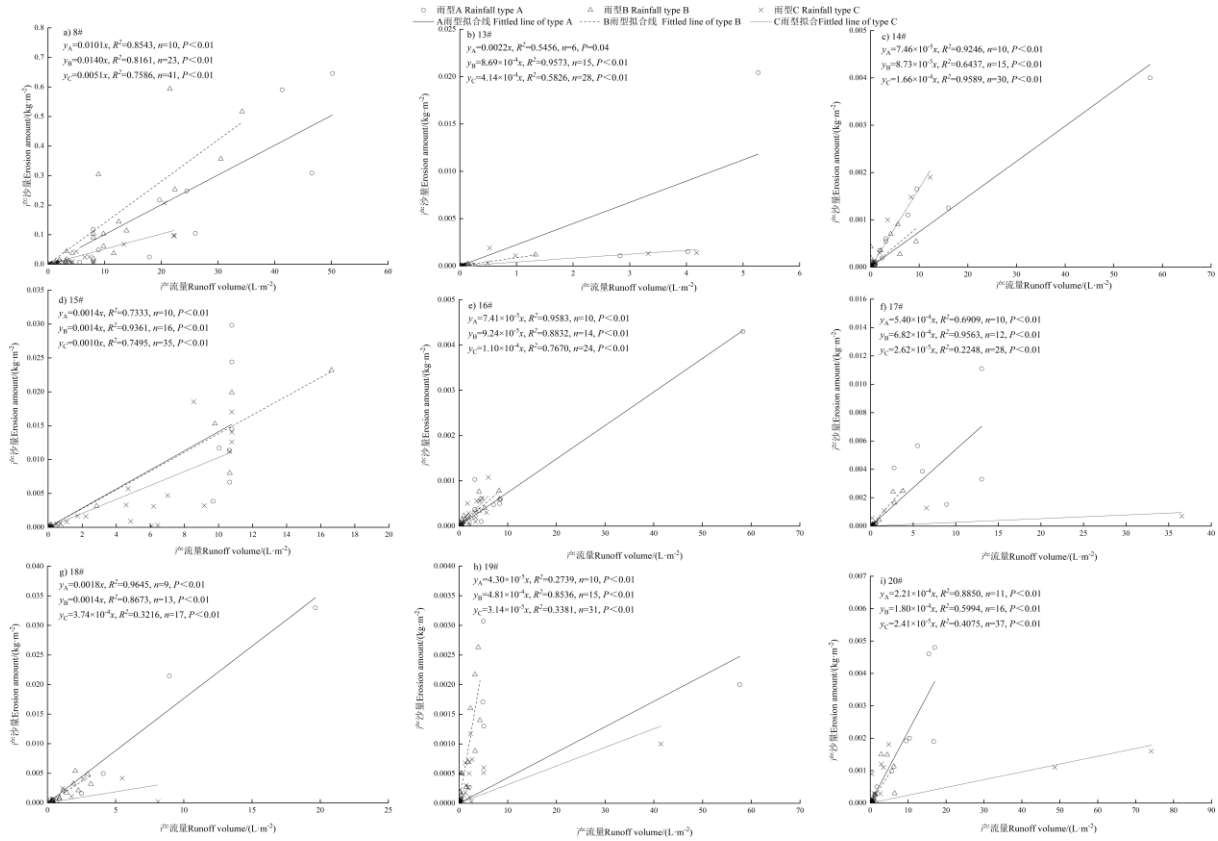


图 4 不同土地利用小区坡面水沙关系特征

Fig. 4 Relationship between runoff and sediment yield in different land use plots

2.3 雨型对产流产沙贡献及土地利用类型水沙效益影响

2.3.1 雨型对产流产沙贡献 雨型对不同土地利用类型产流贡献表明（图 5a），裸坡 3 种雨型对产流量贡献为 A>B>C，15#和 20#呈现为 C>A>B，13#、14#、16#、17#、18#和 19#均呈现为 A>C>B。研究表明，对于裸坡，A 雨型是导致坡面产流的主要雨型，雨型 A、B、C 对产流贡献比值为 1.68:1.38:1.00；乔木林地和 15#作物小区 C 雨型是导致产流的主要雨型，雨型 A、B、C 对产流贡献比值分别为 2.55:1.00:4.60 和 1.41:1.00:3.09；其他土地利用小区，同样 A 雨型是导致坡面产流的主要类型，但与裸坡有差异，C 雨型对产流的贡献高于 B 雨型。13#、14#、16#、17#、18#和 19#小区的雨型 A、B、C 对产流贡献比值在 2.13~8.36:1.00:1.08~3.12，均值为 4.41:1.00:1.99。结果表明，雨型对其他土地利用类型小区产流的影响大于对裸坡的影响。按照不同类型分析表明，作物小区、其他草地和灌木林地雨型 A、B、C 对产流贡献比值分别为 4.28:1.00:2.47、2.27:1.00:1.16、3.85:1.00:2.81，其他草地产流对不同雨型的响应小于作物小区和灌木林地，同时也小于乔木林地，但均大于裸坡。

不同试验小区 3 种雨型对产沙量的贡献存在 3 种变化趋势（图 5b）：14#和 20#呈现为 A>C>B，15#为 C>A>B，其他小区 8#、13#、16#、17#、18#、19#均表现为 A>B>C，雨型对不同试验小区产沙量的贡献与对产流量的贡献存在显著差异。研究表明，15#小区中 C 雨型对产沙量的贡献占主导，达到 62.30%，分别为 A 雨型和 B 雨型的 2.86 倍和 3.91 倍；其他小区均为 A 雨型对产沙量的贡献占主导，其中 19#小区 A 雨型对产沙量的贡献为 40.07%，低于 50%，分别为 B 雨型和 C 雨型的 1.28 倍和 1.40 倍；8#、13#、14#、16#、17#、18#和 20#小区 A 雨型对产沙量的贡献均超过 50%，其中 18#小区 A 雨型贡献最大达到 83.81%，14#小区 A 雨型贡献最小为 53.72%，8#裸坡 A 雨型对产沙量贡献也达到 59.55%。仅有 14#、15#和 20#试验小区 B 雨型对产沙量贡献小于 C 雨型，其他小区均表现为 B 雨型贡献高于 C 雨型。裸坡 A、B、C 雨型对产沙量的贡献比值为 10.19:5.92:1.00，作物小区、其他草地、灌木林地和乔木林地 A、B、C 雨型对产沙量的贡献比值均值分别为 7.70:1.15:1.00、4.03:1.16:1.00、6.30:2.38:1.00 和 2.82:0.57:1.00，研究表明雨型对裸

坡产沙量贡献的影响大于对其他土地利用类型小区。

上述分析表明雨型对坡面产流产沙具有显著影响，且对产流和产沙的影响有差异。因此，在分析坡面产流产沙特征以及不同土地利用类型的水土保持效益时需要考虑雨型的影响。

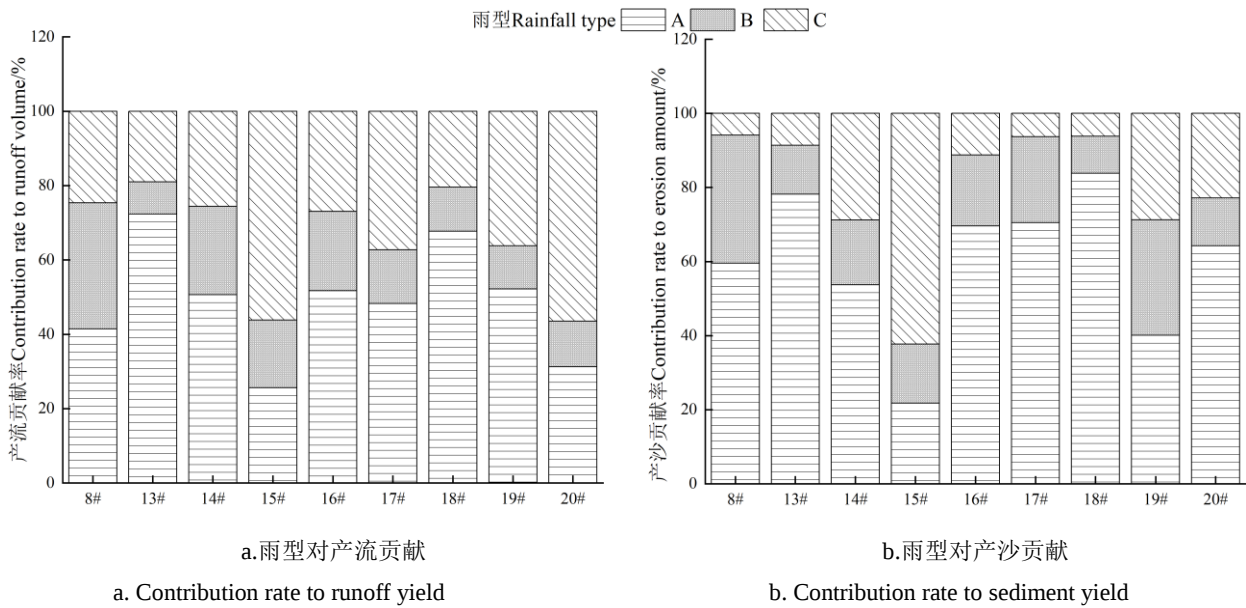


图 5 不同土地利用小区雨型对产流产沙贡献

Fig. 5 Contribution rate of different rainfall types to runoff and sediment yield in different land use plots

2.3.2 不同土地利用类型小区水沙效益 为了避免由于某一年的极端降雨导致坡面产流产沙极端情况，分析多年总量可以更加客观地反映坡面水沙实际情况，同时还需要考虑不同降雨类型导致的差异，与前述水沙关系剔除极值形成互补。表 3 为不同土地利用类型小区 3 种雨型总产流产沙量及减水减沙效益。

从总产流量看，表现为 $8\# > 15\# > 20\# > 19\# > 16\# > 14\# > 18\# > 17\# > 13\#$ ，裸坡总产流量达到其他土地利用类型小区的 2.28 倍~9.66 倍；各土地利用类型中 15#作物小区的总产流量最大，13#作物小区的总产流量最小，前者是后者的 4.23 倍；按照单个小区不同类型分析，总产流量变化规律不显著，但从均值看，表现为裸坡>乔木林地>其他草地>作物小区>灌木林地。从不同雨型看，也呈现为裸坡总产流量最大，其次是 15#或 18#作物小区，13#作物小区最小。从减流效益分析，不同土地利用类型的减流效益在 56.20%~89.64%，均值为 72.13%。按照类型划分，作物小区、其他草地、灌木林地和乔木林地的平均减流效益分别为 73.24%、72.53%、75.17%和 61.94%。乔木林地的减流效益低于其他，作物小区、其他草地和灌木林地的平均减流效益相近（差异为 0.98%~3.64%）。从雨型看，不同小区的减流效益有差异，但都表现为 13#作物小区减流效益最大，B 雨型下甚至达到 97.35%；但最低减流效益的土地利用类型有差异，A 雨型下 19#灌木林地 57.35%，B 雨型下 18#作物小区最小（76.53%），C 雨型下 18#作物小区的减流效益仅 0.05%，且 C 雨型下 15#作物小区的减流效益也只有 12.71%；综合分析表明，A、B、C 雨型不同土地利用类型平均减流效益分别是 69.37%、86.97%和 56.33%，即在不同雨型下的减流效益呈现为 $B > A > C$ 。

从总产沙量看，不同小区也存在一定差异，大小表现为 $8\# > 15\# > 18\# > 17\# > 13\# > 16\# > 20\# > 19\# > 14\#$ 。裸坡总产沙量达到其他小区的 23.12 倍~538.23 倍，不同土地利用类型小区中 15#作物小区总产沙量最大，14#其他草地的总产沙量最小，前者是后者的 23.28 倍。从不同类型看，单个小区总体呈现出作物小区（13#、15#、18#）总产沙量大于其他土地利用类型，乔木林地、灌木林地和草地的大小规律不显著。从均值分析看，裸坡 ($15.18 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) > 作物小区 ($0.42 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) > 灌木林地 ($0.07 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) > 乔木林地 ($0.05 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) > 其他草地 ($0.04 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$)，其中灌木林地、乔木林地和其他草地的总产沙量差异为 24.71%~72.49%，均小于与作物小区的差异（470.59%~884.23%）。总体上看，草地仍是防治坡面侵蚀的最有效措施，且实施植物措施（乔、灌、草）比作物小区能取得更显著的减少坡面侵蚀的效果。从减沙效益分析，除了 15#和 18#作物小区的减沙效益为 95.67%和 96.60%外，其他土地利用类型小区的减沙效益均超过 99%，具有显著的减少

坡面侵蚀的效果。按照不同类型分析，减沙效益均值为其他草地（99.72%）>乔木林地（99.65%）>灌木（99.51%）>作物小区（97.22%），均值为 98.72%。三种植被措施的减沙效益差异仅为 0.07%~0.21%，植被措施与作物小区的减沙效益差异也仅为 2.36%~2.57%。因此，总体上看，其他土地利用类型均能够起到显著的减少坡面侵蚀效果，即使作物小区受人为干扰较大，但其减沙效益仍超过 97%。从不同雨型分析，A 雨型条件下，仅有 15#和 18#作物小区的减沙效益<99%，B 雨型中仅 15#作物小区减沙效益<99%；C 雨型下 15#作物小区减沙效益仅有 53.88%，18#、19#和 20#小区的减沙效益也<99%。均值分析表明，不同土地利用类型小区在 A、B、C 雨型下的减沙效益均值分别为 98.85%、99.45%和 93.02%，即不同土地利用类型对 B 雨型下的坡面侵蚀具有最显著的防护效果。

对比分析表明，不同土地利用类型小区的总产流量和总产沙量呈现较大差异，灌木林地的总产流量最小，其他草地的总产沙量最小。从均值分析，不同土地利用类型的减沙效益高于减流效益。不同雨型下的减流减沙效益均表现为 B 雨型下效益最高，其次是 A 雨型，C 雨型下的效益最小。研究结果表明，不同土地利用类型的减流减沙效益有差异，同时不同雨型也会对水沙效益产生影响。

主效应分析表明，土地利用类型、雨型和土地利用类型×雨型的耦合效应对坡面产流量的贡献率分别为 70.37%、5.70%和 23.93%，对坡面产沙量的贡献率分别为 50.30%、0.30%和 49.40%。研究结果表明，土地利用类型仍是控制坡面产流产沙的主导因素，尤其是对坡面产流，其贡献超过 70%，对于坡面产沙的贡献也超过 50%，但相比而言，雨型对于坡面产流产沙的影响被土地利用类型所掩盖，体现在土地利用类型与雨型的耦合作用对坡面产流产沙的贡献更显著。

表 3 不同土地利用小区产流产沙特征及水沙效益

Table 3 Characteristics of runoff and sediment yield in different land use plots and benefits of runoff and sediment reduction																
小区 Plots	不同雨型产流量				不同雨型产沙量				减流效益				减沙效益			
	Runoff yield in different rainfall types/(L·m ⁻²)				Sediment yield in different rainfall types/(kg·m ⁻²)				Benefit of runoff reduction/%				Benefit of sediment reduction/%			
	A	B	C	小计	A	B	C	小计	A	B	C	小计	A	B	C	小计
				Subtotal				Subtotal				Subtotal				Subtotal
8#	315.1500	257.8627	187.0633	760.0760	9.0385	5.2529	0.8868	15.1781	/	/	/	/	/	/	/	/
13#	56.9610	6.8150	14.9353	78.7113	0.0737	0.0125	0.0081	0.0943	-81.93	-97.36	-92.02	-89.64	-99.18	-99.76	-99.09	-99.38
14#	104.9350	49.2190	52.9133	207.0673	0.0151	0.0049	0.0081	0.0282	-66.70	-80.91	-71.71	-72.76	-99.83	-99.91	-99.09	-99.81
15#	85.4080	60.5160	186.9776	332.9016	0.1428	0.1047	0.4090	0.6565	-72.90	-76.53	-0.05	-56.20	-98.42	-98.01	-53.88	-95.67
16#	108.9300	44.9060	56.6981	210.5341	0.0401	0.0110	0.0065	0.0576	-65.44	-82.59	-69.69	-72.30	-99.56	-99.79	-99.27	-99.62
17#	74.4020	22.3410	57.3876	154.1306	0.0728	0.0239	0.0065	0.1032	-76.39	-91.34	-69.32	-79.72	-99.19	-99.55	-99.27	-99.32
18#	134.4260	23.6570	40.4982	198.5812	0.4324	0.0518	0.0317	0.5159	-57.35	-90.83	-78.35	-73.87	-95.22	-99.01	-96.43	-96.60
19#	116.5810	25.8970	80.8192	223.2972	0.0180	0.0140	0.0129	0.0448	-63.01	-89.96	-56.80	-70.62	-99.80	-99.73	-98.55	-99.70
20#	90.5130	35.4990	163.2970	289.3090	0.0344	0.0069	0.0122	0.0535	-71.28	-86.23	-12.70	-61.94	-99.62	-99.87	-98.62	-99.65

3 讨论

本研究通过对重庆万州付沟小流域 8 个自然全坡面不同土地利用小区和 1 个标准径流裸坡小区 3 年观测期内 108 场自然降雨和产流产沙数据的系统分析，揭示了不同土地利用类型（作物小区、其他草地、灌木林地和乔木林地）的减流减沙效益及其作用机理，以及不同土地利用坡面产流产沙在不同雨型下的响应。从减流效益来看，所有土地利用类型均表现出显著效果，多年平均产流量较裸坡减少了 56.20%~89.64%，与冯滔等^[6]在三峡库区紫色土区的研究发现相吻合，研究指出植被覆盖能显著降低地表径流。已有研究表明，全坡面下种草、封禁、低效乔木林施肥、乔灌草混交、人工补植乔木林年均减流率和减沙率分别在 63.42%~86.19%和 81.54%~94.13%，其中乔灌草混交的减流减沙效益最高，低效乔木林施肥最低^[33]。武英杰等^[32]基于 Mate 分析结果表明，生物措施、工程措施和耕作措施对东北黑土坡耕地径流和泥沙的阻控效率分别是 63.1%和 73.2%，低于本研究的 72.13%和 98.72%。以上研究结果与本文结果。在减流效益上差异较小，

但减沙效益差异大。导致减流减沙效益有差异的原因，一方面是研究对象土壤在物质组成、抗蚀抗冲性、入渗等方面差异较大，另一方面也可能是由于气候、地形条件差异导致。具体而言，草地和乔木林地的减流效益最为突出，这可能与多重作用机制有关：首先，植被冠层能有效截留降雨，减少直接到达地面的雨量，也是实现水土保持和碳汇的重要手段^[34]；其次，植被增加了地表粗糙度，延长了径流路径，降低了径流速度^[35]；再者，植被根系改善了土壤结构，提高了土壤入渗能力^[36]。从减沙效益来看，多年平均产沙量较裸坡减少了 95.67%~99.81%。这一结果显著高于张春霞等^[10]在棕壤坡面的研究，可能反映了紫色土区更易受侵蚀的特性。特别值得注意的是，草地的减沙效益最为显著，这与黄凯等^[15]在黔南地区的观测结果一致。草地的高效减沙作用可能源于密集根系网络有效固持土壤，枯落物层减轻雨滴打击，改善土壤生物活性，促进团聚体形成。不同土地利用类型的水沙效益差异反映了其作用机制的独特性。作物小区主要通过耕作措施改变地表微地形，增加地表储水能力^[14]；灌木林地则依靠地上部分的阻挡作用和地下根系的锚固效应^[37]；乔木林地则兼具冠层截留、枯落物保护和深层根系固持等多重功能^[38]。这些发现为因地制宜选择土地利用类型提供了重要依据。本研究在自然全坡面条件下观测的水土保持效益与标准径流小区的对比揭示了重要的尺度效应。自然全坡面措施小区的减流减沙效益显著高于标准径流小区，这一发现对水土保持实践具有重要启示意义。从空间尺度来看，自然全坡面更能反映实际地形条件下的水文过程。孙嘉等^[4]的研究也指出，坡面尺度增大后，径流的汇集路径延长，使得措施的作用得以充分展现。而标准径流小区由于面积有限（通常为 20m×5m），难以完全模拟自然全坡面的水文连通性，可能导致效益评估偏低。从措施配置来看，自然全坡面通常采用综合治理模式。已有研究也表明三峡库区成功的水土流失治理多采用“工程措施+植物措施”的综合配置^[5]。本研究中的自然全坡面小区模拟综合配置的协同作用，而标准径流小区往往只测试单一措施。从过程机制来看，自然全坡面更能体现径流的非线性特征。本研究观测到裸坡发生侵蚀的临界降雨强度是其他土地利用类型的 3.60 倍，最大 30 min 降雨强度是 1.41 倍，这些参数在标准径流小区中可能被低估。本研究中临界降雨特征是指发生侵蚀的最低临界降雨条件，裸坡由于地表无覆盖，长期受到冷热交替影响，导致渗透性及地表硬度等发生变化，而其他土地利用类型，包括植物措施（乔灌木）或作物覆盖小区，由于地被覆盖，改变了地表的入渗特性，同时由于地表覆盖形成类似结皮的结构，使得相同降雨条件下可能更快发生地表径流，地表泥沙随着径流流出小区形成侵蚀，与黄土高原发生浅层滑坡以及在堆积体中强降雨条件下植被小区发生较裸坡更严重侵蚀的原理相似^[39]。针对黄土塬区坡面小区自然观测表明，林地和草地的降雨阈值均值（21.0 mm）高于裸地（8.7 mm）和农地（9.7 mm），并提出针对治理后的下垫面，建议采用降雨量作为侵蚀预报标准，与本研究结果相近^[25]。这些发现提示在评估措施效益时，需要考虑尺度效应，避免将小尺度观测结果简单外推。同时，也说明实际治理中应该重视综合治理，而非依赖单一措施^[40]。

从降雨特征来看，研究区观测期内降雨可分为三类：A 雨型（低频率、长历时、大雨量、中雨强）、B 雨型（中频率、短历时、中雨量、大雨强）和 C 雨型（高频率、中历时、小雨量、小雨强）。值得注意的是，虽然 C 雨型发生频率最高（占总降雨次数的 47.2%），但 A 雨型贡献了超过 50% 的总产沙量，这一结果与张春霞等^[10]在北方棕壤区的研究形成对比，后者发现短历时高强度降雨的侵蚀贡献更大，反映了两地气候差异；但与陈琦涛^[31]等针对三峡库区紫色土基于 43 场降雨得出的结果一致，认为发生频率低、降雨历时长、降雨量大、降雨强度低的 A 降雨类型是导致三峡库区紫色土侵蚀最强的类型。从响应来看，不同类型表现出独特的敏感模式：作物小区和乔木林地对 A 雨型最敏感，这与黄凯等^[15]的发现一致。可能是长时间降雨导致土壤含水量饱和，降低了抗剪强度，而乔木林冠层截留能力在长时间降雨中趋于饱和。草地对 C 雨型最敏感，这可能是由于高频小雨利于浅根系草地土壤的渐进性流失。裸坡和灌木林地对 B 雨型最敏感，反映了短历时高强度降雨对缺乏保护或保护不充分地面的冲击效应。从交互作用来看，方差贡献率分析显示土地利用类型>雨型×土地利用类型>雨型的影响顺序，表明土地利用类型是决定产流产沙的基础因素，雨型通过与土地利用的交互作用产生影响，纯降雨特征的影响相对较小。这一发现深化了对三峡库区侵蚀动力学机制的理解，提示防治措施应该考虑土地利用-降雨的组合特征，而非单一因素。在实际治理中推行“因地制宜、因雨施策”的精准防治策略，加强多尺度观测网络的建设和数据共享，开展跨学科协作研究，深化机理认识，将研究成果转化为决策支持工具，服务库区生态安全。本研究将有力促进三峡库区水土保持

工作从经验型向科学型转变,为长江经济带生态保护提供支撑。同时,本研究受研究期限、试验方法等方面的限制,未能量化土壤初始含水量对产流产沙的影响,实际降雨入渗过程可能受前期土壤墒情影响。从地形考虑,本研究地形起伏度未纳入分析,而坡面微地形会通过改变汇流路径影响水沙分布;另一方面,临界降雨强度阈值仅基于线性拟合,其判定系数较低,后续研究应结合机器学习方法进行多模型验证。这些因素可能对雨型-土地利用交互效应的解释精度产生影响,需在后续研究中通过控制实验和长期观测进一步验证。

4 结 论

基于重庆万州区付沟小流域 3 年自然观测降雨和不同土地利用类型下坡面产流产沙特征,量化了雨型和土地利用类型对坡面水沙效益的贡献。结果表明,研究区降雨主要分为三类,其中 C 雨型(高频率、中历时、小雨量、小雨强)在研究区发生频率最高,但 A 雨型(低频率、长历时、大雨量、中雨强)是研究区主要的侵蚀降雨。研究区临界降雨量、降雨强度和最大 30 min 降雨强度分别为 10.24~11.01 mm、0.59~2.14 mm·h⁻¹、2.77~3.90 mm·h⁻¹;裸坡的多年平均产流量和产沙量达到其他土地利用小区的 2.63 倍~4.03 倍和 5.71 倍~9.84 倍,不同土地利用类型下的产流产沙对雨型有差异,但产流仍是产沙的主要驱动力,水沙呈现显著的线性关系;从不同土地利用类型看,灌木林地的减流效益最高为 75.17%,但草地的减沙效益最大为 99.72%,且乔灌草的减流减沙效益差异较小,差异分别为 0.98%~3.64%和 24.71%~72.49%,但均显著高于作物小区;不同土地利用类型在不同雨型下的减流减沙效益呈现为 B>A>C,研究区在开展水土流失综合治理时,需在考虑研究区域气候前提下提出适宜的措施类型;方差贡献率分析表明,土地利用类型仍是导致坡面产流产沙差异的主要因素(贡献率分别为 70.37%和 50.30%),雨型对坡面产流产沙的影响受土地利用影响显著。

参考文献(References)

- [1] Cui P, Ge Y G, Lin Y M. Soil erosion and sediment control effects in the Three Gorges Reservoir region, China[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2011, 2(4): 289-297.
- [2] Jiang G Y, Huang S, Guo H Z. Present situation and prospect of integrated control of soil and water loss in the Three Gorges Reservoir area[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2021(8): 27-29. [蒋光毅, 黄嵩, 郭宏忠. 三峡库区水土流失综合治理现状与展望[J]. *中国水土保持*, 2021(8): 27-29.]
- [3] Zheng H L, Wei J, Chen G J, et al. Review of soil erosion on purple-soil sloping croplands in Three Gorges Reservoir area[J]. *Journal of Chongqing Normal University (Natural Science)*, 2014, 31(3): 42-48. [郑红丽, 韦杰, 陈国建, 等. 三峡库区紫色土坡耕地土壤侵蚀研究: 进展与方向[J]. *重庆师范大学学报(自然科学版)*, 2014, 31(3): 42-48.]
- [4] Sun J, Kang M C, Liu D X, et al. Evaluation of the effectiveness of slope farmland management in the Three Gorges Reservoir area[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2023(8): 68-72. [孙嘉, 康满春, 刘定湘, 等. 三峡库区坡耕地治理成效评价研究[J]. *中国水土保持*, 2023(8): 68-72.]
- [5] Yin Y H, Li G H, Xia Y, et al. How to effectively reduce sloping farmland nutrient loss and soil erosions in the Three Gorges Reservoir area[J]. *Agricultural Water Management*, 2024, 304:109084
- [6] 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]. *Acta Pedologica Sinica*, 2025, 62(5): 1259-1270. [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]. *土壤学报*, 2025, 62(5): 1259-1270.]
- [7] Xia R, Shi D M, Ni S H, et al. Effects of soil erosion and soil amendment on soil aggregate stability in the cultivated-layer of sloping farmland in the Three Gorges Reservoir area[J]. *Soil & Tillage Research*, 2022, 223: 105447.
- [8] Smith P, Poch R M, Lobb D A, et al. Status of the world's soils[J]. *Annual Review of Environment and Resources*, 2024, 49: 73-104.
- [9] Wang Y B, Hu X D, Yu S X, et al. Soil conservation of sloping farmland in China: History, present, and future[J]. *Earth-Science Reviews*, 2024, 249: 104655.
- [10] Zhang C X, Dong Z, Gao B, et al. Effects of erosive rainfall patterns and different vegetation types on soil erosion in slope with

brown soil[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(2): 36-41, 49. [张春霞, 董智, 高波, 等. 侵蚀性雨型分类及不同植被类型对棕壤坡面土壤侵蚀的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(2): 36-41, 49.]

[11] Han F F, Li Y B. The typical watershed of the Three Gorges Reservoir area soil erosion diversity change on different slope gradients taking the Meixi river watershed as an example[J]. Agricultural Science & Technology, 2013, 14(3): 420-424, 465.

[12] Ni K, Wang X Y, Yang L, et al. Response of dissolved nutrient transport to “source” and “sink” landscape pattern in typical agricultural small watersheds in the Three Gorges Reservoir area[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024, 61(2): 408-423. [倪珂, 王小燕, 杨澜, 等. 三峡库区典型农业小流域溶解态养分输移对 “源—汇” 景观格局的响应[J]. 土壤学报, 2024, 61(2): 408-423.]

[13] Guo H L, Sun L Q, Wu S F, et al. Erosion evolution processes and hydraulic characteristics analysis of fishscale pit slop on Loess Plateau Region[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(5): 1125-1135. [郭慧莉, 孙立全, 吴淑芳, 等. 黄土高原地区鱼鳞坑坡面侵蚀演化过程及水力学特征[J]. 土壤学报, 2017, 54(5): 1125-1135.]

[14] Xu L, Zhang D, Xiang Y G, et al. Runoff and sediment yield of sloping farmland in purple soil area of the lower Jinsha River under different tillage measures[J]. Mountain Research, 2020, 38(6): 851-860. [徐露, 张丹, 向宇国, 等. 不同耕作措施下金沙江下游紫色土区坡耕地产流产沙特征[J]. 山地学报, 2020, 38(6): 851-860.]

[15] Huang K, Li R, Li Y, et al. Response of runoff and sediment yield to biological measures on slopes under different erosive rain patterns in southern Guizhou[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(6): 14-21. [黄凯, 李瑞, 李勇, 等. 贵州省黔南区不同侵蚀性雨型条件下生物措施对坡面产流产沙的响应[J]. 水土保持学报, 2020, 34(6): 14-21.]

[16] Zhu A X, Wang P, Zhu T X, et al. Modeling runoff and soil erosion in the Three-Gorge Reservoir drainage area of China using limited plot data[J]. Journal of Hydrology, 2013, 492: 163-175.

[17] Zhang T X, Yang D Y, Jiang T, et al. A review of research on artificial rainfall simulation devices[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2025, 23(1): 1-9. [张天雪, 杨东烨, 蒋涛, 等. 人工模拟降雨装置及其功能应用综述[J]. 中国水土保持科学, 2025, 23(1): 1-9.]

[18] Li J M, Ding W F, Ran W J, et al. Effects of natural rainfall characteristics and crop coverage on runoff and sediment yield in purple soil slope cultivated land in the Three Gorges Reservoir areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2025, 41(8): 137-146. [李建明, 丁文峰, 冉文建, 等. 自然降雨特征和作物覆盖对三峡库区紫色土坡耕地产流产沙影响[J]. 农业工程学报, 2025, 41(8): 137-146.]

[19] Deng Y L, Meng Z X, Wang Y K, et al. Study on soil erosion changes and controlling strategy in the Minjiang River valley[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(5): 56-60. [邓玉林, 孟兆鑫, 王玉宽, 等. 岷江流域土壤侵蚀变化与治理对策研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(5): 56-60.]

[20] Ke Q H, Zhang K L. A review on the erosion-related researches by simulated rainfall experiments in China[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2018, 16(2): 134-143. [柯奇画, 张科利. 我国人工降雨侵蚀相关试验的研究进展回顾[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(2): 134-143.]

[21] Zheng F L, Tang K L, Bai H Y. Analysis of monitoring methods of runoff and sediment in standard plot and large sloping runoff field[J]. Yellow River, 1994, 16(7): 19-22. [郑粉莉, 唐克丽, 白红英. 标准小区和大型坡面径流场径流泥沙监测方法分析[J]. 人民黄河, 1994, 16(7): 19-22.]

[22] Zhang G H. Several ideas related to soil erosion research[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(4): 21-30. [张光辉. 对土壤侵蚀研究的几点思考[J]. 水土保持学报, 2020, 34(4): 21-30.]

[23] Moreno-de las Heras M, Nicolau J M, Merino-Martín L, et al. Plot-scale effects on runoff and erosion along a slope degradation gradient[J]. Water Resources Research, 2010, 46(4): 2009WR007875.

[24] Zhang X M, Cao W H, Zhou L J. Progress review and discussion on sediment delivery ratio and its dependence on scale[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(24): 7475-7485. [张晓明, 曹文洪, 周利军. 泥沙输移比及其尺度依存研究进展[J]. 生态学报, 2014, 34(24): 7475-7485.]

[25] Xia L, Song X Y, Fu N, et al. Threshold standard of erosive rainfall under different underlying surface conditions in the Loess Plateau Gully Region of East Gansu, China[J]. Advances in Water Science, 2018, 29(6): 828-838. [夏露, 宋孝玉, 符娜, 等. 陇东黄土塬区不同下垫面条件下侵蚀产沙的降雨阈值[J]. 水科学进展, 2018, 29(6): 828-838.]

- [26] Xu W S, Gu J Y, Sun B Y, et al. Research progress on spatial-temporal variation of and measurement technologies for soil and water loss on whole hillslope[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2023, 40(6): 77-85. [许文盛, 谷金钰, 孙宝洋, 等. 全坡面水土流失时空分异规律及观测技术研究进展[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(6): 77-85.]
- [27] Xie Y, Zhang W B, Liu B Y. Rainfall erosivity estimation using daily rainfall amount and intensity[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2001, 21(6): 53-56. [谢云, 章文波, 刘宝元. 用日雨量和雨强计算降雨侵蚀力[J]. 水土保持通报, 2001, 21(6): 53-56.]
- [28] Long X J, Weng X R, Ye Y, et al. Characteristics of erosive rainfalls in Chongqing City based on cluster analysis[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2021, 32(6): 19-26. [龙训建, 翁薛柔, 叶琰, 等. 基于聚类分析的重庆市侵蚀性降雨特征研究[J]. 水资源与水工程学报, 2021, 32(6): 19-26.]
- [29] Zhu L J, Ma B X, Zhao X Q. Clustering validity analysis based on silhouette coefficient[J]. Journal of Computer Applications, 2010(S2): 139-141, 198. [朱连江, 马炳先, 赵学泉. 基于轮廓系数的聚类有效性分析[J]. 计算机应用, 2010(S2): 139-141, 198.]
- [30] Wu L L, Wang Y Q, Wang C F, et al. Effect of rainfall patterns on hillslope soil erosion in rocky mountain area of North China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(24): 157-164. [郭铃莉, 王云琦, 王晨沣, 等. 降雨类型对北方土石山区坡面土壤侵蚀的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(24): 157-164.]
- [31] Chen Q T, Wang T, Li Z B, et al. Research on water and sand prediction model of purple soil slope based on machine learning[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024, 61(2): 424-433. [陈琦涛, 王添, 李占斌, 等. 基于机器学习的紫色土坡面水沙预测模型研究[J]. 土壤学报, 2024, 61(2): 424-433.]
- [32] Wu Y J, Wang M Y, Xu J B, et al. Meta-analysis study on the effectiveness of soil and water conservation measures on sloping black soil farmlands in Northeast China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2025, 62(6): 1665-1679. [武英杰, 王美艳, 徐江兵, 等. 基于 Meta 分析的东北黑土坡耕地水土保持措施效益研究[J]. 土壤学报, 2025, 62(6): 1665-1679.]
- [33] Zhang Q Q, Chen Z Q, Chen Z B, et al. Characteristics of slope runoff and sediment yield and REEs migrations under different soil and water conservation measures in a typical red soil region of Southern China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(1): 46-53, 58. [张青青, 陈志强, 陈志彪, 等. 南方典型红壤区不同水土保持措施下坡面产流产沙及稀土迁移特征[J]. 水土保持学报, 2018, 32(1): 46-53, 58.]
- [34] Pu C Y. Promoting carbon sink of soil and water conservation to further enhance the supply capacity of ecological products[J]. Water Resources Development Research, 2024, 24(3): 53-57. [蒲朝勇. 深入推进水土保持碳汇工作提升水土保持生态产品供给能力[J]. 水利发展研究, 2024, 24(3): 53-57.]
- [35] Wang L J, Zhang Y L, Jia J C, et al. Effect of vegetation on the flow pathways of steep hillslopes: Overland flow plot-scale experiments and their implications[J]. Catena, 2021, 204: 105438.
- [36] Zhao C H, Gao J E, Xu Z. Mechanisms of grass in slope erosion control in loess sandy soil region of Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(1): 113-121. [赵春红, 高建恩, 徐震. 牧草调控绵沙土坡面侵蚀机理[J]. 应用生态学报, 2013, 24(1): 113-121.]
- [37] Shi Q H, Wang W L, Liu R S, et al. Effect of vegetation recovery measures on rill erosion of dump side slope in coal mine with different casting time[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(17): 226-232. [史倩华, 王文龙, 刘瑞顺, 等. 植被恢复措施对不同排土年限煤矿排土场边坡细沟侵蚀的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(17): 226-232.]
- [38] Wei T X. Forest coverage of small watershed and stand density in the gullied-hilly region on Loess Plateau[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2010, 24(2): 170-176. [魏天兴. 小流域防护林适宜覆盖率与植被盖度的理论分析[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(2): 170-176.]
- [39] Guo W Z, Chen Z X, Wang W L, et al. Telling a different story: The promote role of vegetation in the initiation of shallow landslides during rainfall on the Chinese Loess Plateau[J]. Geomorphology, 2020, 350: 106879.
- [40] Li K J, Chen J C, Nie S A. Research on the strategic pattern and development concept of the Three Gorges Follow up Work Plan[J]. Water Resources Development Research, 2025, 25(3): 21-25. [李侃家, 陈佳川, 聂少安. 实施三峡后续工作体现的战略格局和发展理念研究[J]. 水利发展研究, 2025, 25(3): 21-25.]

(责任编辑: 檀满枝)