嘉陵江典型小流域降雨特征对不同土地利用类型产流产沙的影响

黄 卫[1], 况志宇[2], 尹惠妍[1], 张志伟[1]

(1.西藏农牧大学, 西藏 林芝 860100; 2.四川省升钟水土保持监测站, 四川 南部 637388)

摘 要: [目的] 研究嘉陵江典型小流域不同降雨特征与不同土地利用类型对坡面产流产沙的影响特征, 为该区域水土流失的防治和土壤侵蚀控制提供技术支撑和理论依据。[方法] 以嘉陵江流域南部县李子口小流域为研究区, 基于2019—2023年连续5 a的降雨、径流深、土壤流失量等观测数据, 运用*K*-均值聚类法对降雨特征进行分类, 分析侵蚀性降雨特征及类型; 通过皮尔逊相关性分析降雨特征与产流产沙的线性关联强度, 采用多元线性回归分析构建径流深、土壤流失量与降雨特征的预测模型; 并利用地理探测器探测各单因子及交互因子对产流产沙的解释力, 揭示降雨特征对不同土地利用类型产流产沙的影响规律。[结果] ①小流域侵蚀性降雨可分为3类: Ⅰ类降雨(小雨量、短历时、低强度)、Ⅱ类降雨(中雨量、长历时、中强度)、Ⅲ类降雨(大雨量、中历时、高强度), 与Ⅰ, Ⅱ类降雨相比, Ⅲ类降雨发生的频次较低, 但其降雨侵蚀力较强, 在同一土地利用类型下, Ⅲ类降雨造成的坡面径流深和土壤流失量均明显较大。②不同土地利用类型径流小区产流产沙特征差异明显, 径流深和土壤流失量均表现为: 裸地>坡耕地>乔木林地。③各降雨特征指标与不同土地利用类型的坡面径流深和土壤流失量均呈正相关关系, 其中降雨量、降雨侵蚀力对坡面径流深和土壤流失量影响更为显著。④小流域坡面产流产沙单因子解释力最大的是降雨量, 其次是最大30 min雨强(I_{30}), 经因子交互探测后大多表现为双因子增强和非线性增强。[结论] 在川东北低山丘陵区, 降雨量、I_{30}和降雨侵蚀力是影响坡面产流产沙的最主要因素, 坡耕地是造成该区域水土流失的主要原因, 而乔木林地通过多重水文调控机制, 相较于裸地减流效益可达88%, 减沙效益可达99%, 故农地退耕还林还草是减少水土流失的有效措施之一。

关键词: 川东北低山丘陵区; 降雨侵蚀力; 产流产沙; 地理探测器; 退耕还林

文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2025)06-0087-11 **中图分类号:** S157.1

文献参数: 黄卫, 况志宇, 尹惠妍, 等.嘉陵江典型小流域降雨特征对不同土地利用类型产流产沙的影响[J].水土保持通报, 2025, 45(6): 87-97. Huang Wei, Kuang Zhiyu, Yin Huiyan, et al. Effects of rainfall characteristics on runoff and sediment yield under different land use types in typical small watershed of Jialing River[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(6): 87-97.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.06.020 **CSTR:** 32312.14.stbctb.2025.06.020

Effects of rainfall characteristics on runoff and sediment yield under different land use types in typical small watershed of Jialing River

Huang Wei[1], Kuang Zhiyu[2], Yin Huiyan[1], Zhang Zhiwei[1]

(1.*Xizang Agricultural and Animal Husbandry University*, *Linzhi*, *Xizang* 860100, *China*;
2.*Sichuan Province Shengzhong Water and Soil Conservation Monitoring Station*, *Nanbu*, *Sichuan* 637388, *China*)

Abstract: [Objective] The effects of rainfall characteristics and land use types on slope runoff and sediment yield in a typical small watershed of the Jialing River were investigated, in order to provide technical support and a theoretical basis for soil and water conservation and erosion control in this region. [Methods] The Lizikou small watershed in Nanbu County within the Jialing River Basin was selected as the study area. Based on five

收稿日期: 2025-05-05 **修回日期:** 2025-08-11 **采用日期:** 2025-08-18

资助项目: 西藏自治区2025年重点研发计划项目"尼洋河流域水土资源配置与生态安全保障技术研究"(XZ202501ZY0130); 西藏农牧大学"青年拔尖人才"支持项目"雅鲁藏布中游河谷风沙侵蚀量研究"(XZNMXYRCXM-2024-06); 西藏自治区自然科学基金(XZ202501ZR0063); 西藏农牧大学林学博士点资助项目(533325001)

第一作者: 黄卫(1992—), 男(汉族), 四川省南充市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持与荒漠化防治。Email: 291001530@qq.com。

通信作者: 张志伟(1987—), 男(汉族), 陕西省神木市人, 博士, 副教授, 主要从事水土保持及荒漠环境演变方面的研究。Email: aiwoweige@.163.com。

consecutive years of observational data from 2019 to 2023, including rainfall, runoff depth, and soil loss, *K*-means clustering method was used to classify rainfall characteristics, enabling analysis of erosive rainfall characteristics and types. Pearson correlation analysis was applied to evaluate the strength of linear correlation between rainfall characteristics and runoff and sediment yield. Multiple linear regression analysis was used to construct predictive models for runoff depth and soil loss based on rainfall characteristics. Additionally, the geodetector method was employed to explore the explanatory power of single factors and their interactions on runoff and sediment yield, so as to reveal the effect ive patterns of rainfall characteristics on runoff and sediment yield under different land use types. [Results] ① Erosive rainfall in the small watershed was classified into three types: Type Ⅰ (small rainfall amount, short duration, low intensity), Type Ⅱ (moderate rainfall amount, long duration, moderate intensity), and Type Ⅲ (large rainfall amount, medium duration, high intensity). Compared with Types Ⅰ and Ⅱ, Type Ⅲ rainfall occurred less frequently but exhibited higher erosivity. For the same land use type, Type Ⅲ rainfall resulted in significantly greater slope runoff depth and soil loss. ② Significant differences in runoff and sediment yield were observed among plots with different land use types. Runoff depth and soil loss decreased in the order: bare land > slope cropland > arbor forest land. ③ All rainfall characteristic indicators were positively correlated with slope runoff depth and soil loss under different land use types. Among them, rainfall amount and rainfall erosivity had more pronounced effects. ④ Within the small watershed, rainfall amount had the greatest single-factor explanatory power for slope runoff and sediment yield, followed by I_{30} (maximum 30-minute rainfall intensity). After interaction-factor detection, most interactions were characterized by double-factor enhancement or nonlinear enhancement. [Conclusion] In the low mountainous and hilly regions of northeastern Sichuan, rainfall amount, I_{30}, and rainfall erosivity are the most critical factors influencing slope runoff and sediment yield. Slope cropland is the primary cause of soil erosion in this region, while arbor forest land can reduce runoff by up to 88% and sediment yield by up to 99% compared to bare land through multiple hydrological regulation mechanisms. Therefore, returning cropland to forests and grasslands is an effective measure to reduce soil erosion.

Keywords: low mountainous and hilly regions of northeastern Sichuan; rainfall erosivity; runoff and sediment yield; geodetector; returning cropland to forests

川东北低山丘陵区嘉陵江典型小流域位于长江中上游,属于中国重要的农产品生产、加工区,坡耕地分布广泛,人地矛盾突出[1]。耕作方式多样化明显。该区以紫色土、黄壤土为最具代表性的土壤类型,但土层浅薄,固结性差,抗侵蚀能力弱,有机质含量较低[2-3]。由于降雨侵蚀的影响,川东北低山丘陵区土壤侵蚀严重,土壤质量下降,其诱导的各类生态环境问题已使该区成为长江中上游流域生态环境脆弱区,同时也成为制约该区域可持续发展的重要限制因子[4]。

随着降雨特征的不断变化,不同土地利用类型的坡面产流产沙差异显著[5]。目前大多数学者研究聚焦于降雨特征对不同土地利用类型产流产沙的影响,发现降雨侵蚀力、降雨强度和产流降雨量是引起坡面侵蚀的主要因素[6-7],长历时、大雨强对径流与输沙量贡献最大,是直接影响坡面径流深与输沙量主要降雨类型[8]。不同土地利用类型中,植被的覆盖及根系的固土作用,使得乔木林地、灌木林地、天然草地等减流减沙效益较好,而人为扰动大的土地利用类型水土流失相对严重[9-11]。科学配置土地利用方式可显著抑制水土流失的发生[12]。

近年来,四川盆地极端气候发生频率和强度有明显增大的趋势,其中泥石流、滑坡、水库决堤等自然灾害都有不同程度的增加,对经济社会以及人民生命财产安全造成了严重的威胁[13]。由于极端气候的影响,各流域产流产沙出现了不同程度的增加或减少的现象[14]。这种现象在川东北低山丘陵区尤为突出,该区域坡耕地分布较广泛,人为扰动的土地利用类型较多,土壤抗降雨侵蚀能力较弱。另外,该区域年降雨量较大,季节分布不均且多集中于夏季。目前,对该区域土壤侵蚀影响因素的研究虽取得一定进展,但主要以单一因子分析为主,存在多因子交互机制研究不足的局限性,如杨丹[1]发现该区不同土地利用方式对多年平均径流量影响较弱,改变土地利用方式对降低土壤侵蚀强度作用显著;龚钰等[15]指出林地面积和水土保持工程数量的增加能减缓径

流增长幅度,却难以系统分析多因子交互作用下的影响机制,在此背景下“地理探测器”通过单因子探测与多因子交互分析,能够量化单因子及因子交互对坡面产流产沙的解释力,从而揭示区域坡面侵蚀的关键科学问题。因此,本研究以四川省南充市南部县李子口小流域为观测对象,依据该区域2019—2023年降雨及径流小区泥沙数据,采用地理探测器等研究方法,研究不同降雨特征与不同土地利用类型对坡面产流产沙的影响规律,进而为嘉陵江典型小流域川东北低山丘陵区水土流失的防治和土壤侵蚀控制提供技术支撑和理论依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

李子口小流域地处川东北低山丘陵区,位于四川省南充市南部县境内(31°30′—31°33′N,105°39′—105°43′E),小流域属嘉陵江西河流域的一条支流,集水面积19.216 km²(图1)。近5 a平均年降水量1 058.46 mm,多年平均年降水天数为138 d,汛期(4—10月)降水量占全年降水量的93.37%,年平均气温17.5 ℃,年平均蒸发量814.1 mm,无霜期283 d[16]。流域内土壤主要为紫色土和黄壤土,土壤母质主要为紫色页岩和少量石灰岩。林地土层较浅,农耕地土层较厚,一般为60 cm以上[15]。流域内乔木以柏木(*Cupressus funebris*)、桤树(*Aluns cremastogyne*)为主,灌木以黄荆(*Vitex negundo*)、马桑(*Coriaria napalensis*)为主,森林覆盖率55%,农作物以水稻、小麦、油菜、玉米等为主[17]。

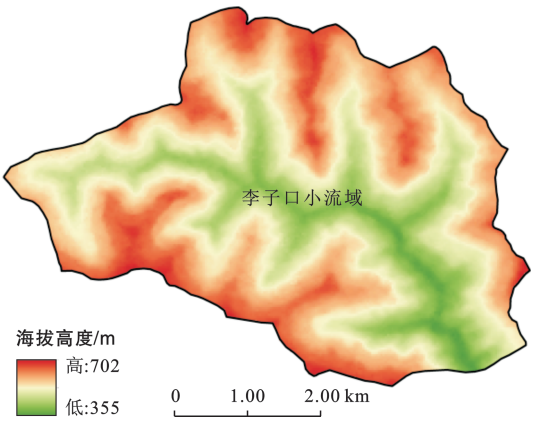


图1　李子口小流域地形图

Fig.1　Topographic map of Lizikou small watershed

李子口小流域建有控制站1座,自然林地径流小区2个,农耕地径流小区3个,裸地小区1个(表1)。2个自然林地小区面积均为200 m²,坡度分别为29.8°和36.6°。小区内植被为桤树、柏树混交林,植被覆盖率80%左右。裸地小区面积100 m²,坡度5°。3个农耕地小区面积均为100 m²,坡度均为5°。在这3个小区分别种植白菜和玉米、小麦套种玉米、蔬菜,除裸地小区外,农耕地小区按当地农事活动安排进行整地、除草等耕作措施。

表1　径流小区基本情况

Table 1　Basic information of runoff plots

小区号	土地利用类型	植物种类	坡长/m	宽度/m	坡向/(°)	盖度
1	坡耕地1	白菜、玉米	20	5	3	34
2	裸地	无	20	5	3	0
3	坡耕地2	小麦、玉米	20	5	3	63
4	坡耕地3	蔬菜	20	5	3	44
5	林地1	桤木、柏树	20	10	25	75
6	林地2	桤木、柏树	20	10	188	80

1.2　研究方法

1.2.1　测定方法

径流小区主要观测内容包括降雨特征、径流泥沙、径流深等指标。

(1)降雨特征。采用翻斗式遥测雨量仪进行观测,雨量计设置采用间隔时间分别为5 min和10 min记录(备用),每15 d下载一次观测数据。降雨指标主要包括降雨量、降雨历时、降雨强度、最大30 min雨强(I_{30})、降雨侵蚀力等。本研究降雨侵蚀力(R)采用Wischmeier等[18]提出的以降雨总动能(E)和降雨时段内最大30 min降雨强度(I_{30})的乘积计算得出。

(2)径流量及泥沙流失量。每次产流后,采用钢尺测量径流池内的水位并记录,然后根据径流池面积计算出小区降雨径流量,再通过总径流量除以小区面积求得径流深(mm)。每次产流后,人工对池内水样进行充分搅拌,使泥沙和水充分混合均匀,搅拌完毕,迅速取出水样,装入取样瓶中[19]。每个径流池重复取样2次,样品带回实验室烘干,测定所取水样中的泥沙含量,含沙量等于烘干泥沙质量除以采样体积,单位为g/L。

1.2.2　分析方法

采用Excel 2016,Origin 2021,SPSS 27,地理探测器等软件进行数据分析制图。先选取降雨特征数据进行K-均值聚类[20],再用皮尔逊相关分析、多元线性回归分析对不同土地利用类型小区径流深、土壤流失量与降雨特征进行相关性分析,建立不同小区径流深、土壤流失量与降雨特征之间的线性拟合关系[21]。同时通过地理探测器定量分析影响坡面产流

产沙的主要驱动因子及不同因子间的交互协调作用对因变量的解释力[22-23]。

2 结果与分析

2.1 侵蚀性降雨特征

2019—2023年，李子口小流域月均降雨量呈现显著季节性特征（图2）。全年降水多集中于5—10月，其中6—9月降雨量最为丰沛，月均降雨量分别为147.14，216.08，200.24，184.70 mm。累积降雨量占全年总量的70.68%。

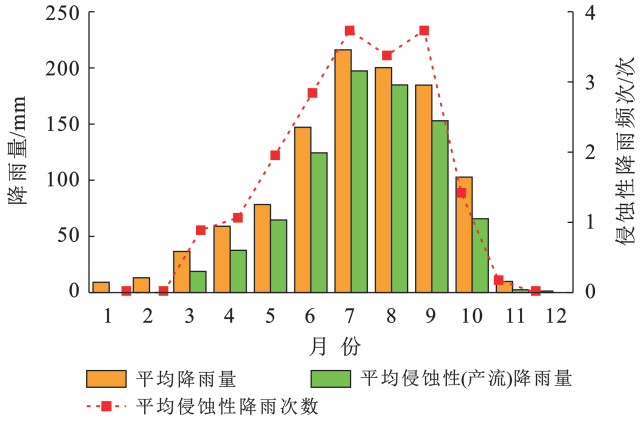


图2 2019—2023年李子口小流域侵蚀性降雨特征

Fig.2 Characteristics of erosive rainfall in Lizikou small watershed (2019—2023)

依据谢云等[24]的研究结果，当降雨量高于12 mm，平均雨强大于0.04 mm/h，最大30 min降雨强度大于0.25 mm/min时，为侵蚀性降雨。2019—2023年李子口小流域坡面径流场共发生降雨628次，其中侵蚀性降雨2019年30次，2020年20次，2021年28次，2022年14次，2023年16次，5 a共计108次。5 a间李子口小流域侵蚀性降雨量占总降雨量的80.18%，且集中于6—9月，占侵蚀性降雨总量的77.70%。从频次分布看，7月和9月为侵蚀性降雨高发期，5 a间累计发生42次，占总次数的38.89%。进一步分析年均值发现，7月侵蚀性降雨量最大，平均降雨量达197.28 mm，占该月总降雨量的91.30%；8月、9月次之，平均降雨量分别为184.82 mm和152.92 mm，分别占该月总降雨量的92.30%和82.79%。从发生频次看，7月与9月年均次数最高（4.2次/月），其次为8月与6月。上述结果表明，该区域侵蚀性降雨呈现明显的夏秋季集中特征，且高强度降雨与高频次发生时段高度一致。

2.2 侵蚀性降雨分型

2019—2023年，李子口小流域共发生侵蚀性降雨108次。本文选取降雨量、降雨历时、平均降雨强度、最大30 min雨强（I_{30}）、降雨侵蚀力为分类变量，采用K-均值聚类法将李子口小流域侵蚀性降雨分为3种类型（表2）。可以看出，Ⅰ类降雨（小雨量、短历时、低强度、微度侵蚀）发生次数为74场，占总降雨次数的68.5%，Ⅱ类降雨（中雨量、长历时、中强度、微度侵蚀）发生次数为31场，占总降雨次数的28.7%，Ⅲ类降雨（大雨量、中历时、高强度、强度侵蚀）发生次数为3场，占总降雨次数的2.8%。由此可以得出，Ⅰ类降雨在该区域出现频率较高，但其单次降雨量、持续时间和强度均低于Ⅱ类与Ⅲ类雨型，对地表土壤的侵蚀强度较低。相比之下，Ⅱ类与Ⅲ类降雨虽发生次数较少，但具有更强的降雨强度和降雨侵蚀力，成为引发该区域坡面侵蚀的主要降雨类型。

2.3 小流域不同雨型下各土地利用类型产流产沙特征

降水是诱发土壤侵蚀的核心驱动因素，而土地利用方式的差异则进一步影响地表径流和泥沙的生成。研究表明，在不同降雨类型特征下，坡面径流形成与泥沙输移的规律存在明显区别[7-8]。

通过对2019—2023年侵蚀性降雨的分析，发现在不同侵蚀性降雨类型下，不同土地利用类型对应的坡面产流产沙机制呈现显著的动态分异规律。由图3可知，Ⅰ，Ⅱ类侵蚀性降雨平均径流深、平均土壤流失量明显低于Ⅲ类侵蚀性降雨，同时Ⅲ类侵蚀性降雨虽然只有3场，径流深却占年均总径流深的40%以上，土壤流失量占年均总土壤流失量的53%以上。由此可见，大雨量、中历时、高强度降雨是造成地表产流产沙的主要原因。另外，在Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ类侵蚀性降雨条件下，不同土地利用类型产流产沙特征中，平均径流深、平均土壤流失量排序为：裸地＞坡耕地＞林地。同时，裸地与坡耕地平均径流深、平均土壤流失量较大，乔木林地平均径流深、平均土壤流失量较小。说明在降雨过程中，植被冠层具有较强的降雨截留作用，能够减缓雨滴下降的速度，从而降低雨滴下降动能[12]。同时，植被枯落物对雨滴直接撞击地面具有缓冲作用，植物根系具有固土的作用，从而通过植被和枯落物的截流增加了雨水入渗进入土壤，减少了地表径流及土壤流失量。

2.4 小流域不同土地利用类型下坡面产流产沙特征

研究结果表明，相同土地利用类型的径流小区产流产沙差异不大，但不同土地类型的径流小区产流产沙存在较大差异。根据降雨特征数据显示，裸地最小侵蚀性产流降雨量为10.8 mm，坡耕地为12.2 mm，林地为12.8 mm。由表3可知，5 a累计总径流深及总土壤流失量以5，6号乔木林地小区最

小,分别为 145.43 mm,0.379 t/hm^2 和 148.15 mm,0.295 t/hm^2;其次为 1,3,4 号坡耕地小区,为分别为 613.01 mm,18.995 t/hm^2,652.57 mm,7.019 t/hm^2,619.38 mm,13.029 t/hm^2。由于 3 号小区为小麦套种玉米,植被盖度较高,植物根系较为发达,故 3 号小区相比 1,4 号蔬菜小区土壤流失量小;2 号裸地小区总径流深及总土壤流失量最大,分别为 1 211.63 mm 和 83.985 t/hm^2。裸地年均径流深(242.33 mm)是坡耕地的 1.8 倍以上,是林地的 8.2 倍以上。年均土壤流失量(16.8 t/hm^2·a)是坡耕地的 4.4 倍以上,是林地的 220.0 倍以上。这种差异进一步验证了植被覆盖对坡面产流产沙的抑制作用。

表 2　李子口小流域降雨聚类结果及降雨特征

Table 2　Rainfall clustering results and rainfall characteristics of Lizikou small watershed

降雨类型	侵蚀降雨频次	参 数	降雨量/mm	降雨历时/min	平均降雨强度/(mm·h^{-1})	最大 30 min 雨强(I_{30})/(mm·h^{-1})	降雨侵蚀力/(MJ·mm·hm^{-2}·h^{-1})
Ⅰ	74	总 和	2 347.90	48 285.00	28 174.80	1 446.00	13 168.89
		平均值	31.73	652.50	380.74	19.54	177.96
		最小值	12.10	50.00	145.20	3.80	6.50
		最大值	106.20	1 335.00	1 274.40	53.20	1 136.40
Ⅱ	31	总 和	1 302.20	63 025.00	15 626.40	325.20	3 514.95
		平均值	42.01	2 033.06	504.08	10.49	113.39
		最小值	12.40	1 395.00	148.80	1.40	1.90
		最大值	115.70	4 230.00	1 388.40	41.80	870.43
Ⅲ	3	总 和	593.30	3 760.00	7 119.60	184.40	8 972.00
		平均值	197.77	1 253.33	2 373.20	61.47	2 990.67
		最小值	139.20	800.00	1 670.40	49.00	1 703.90
		最大值	300.10	1 870.00	3 601.20	72.80	4 646.10

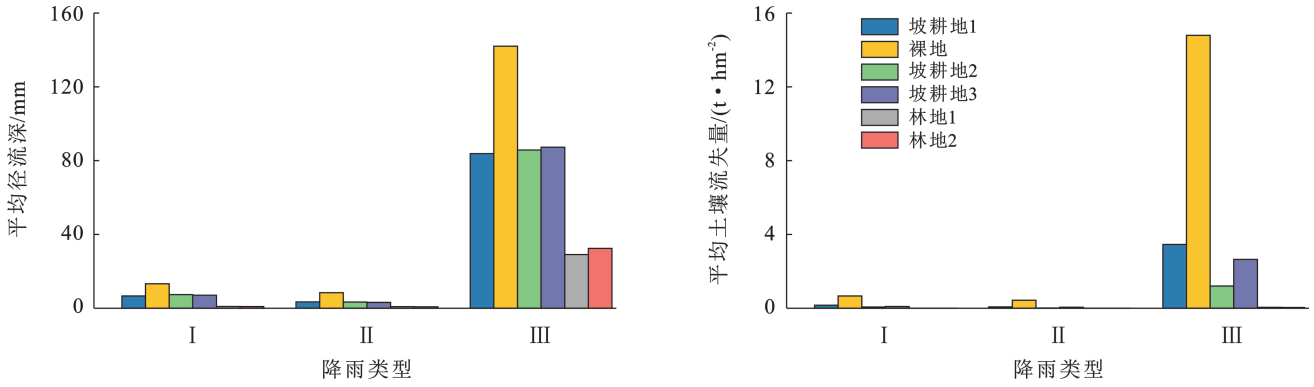


图 3　各类侵蚀性降雨下不同土地利用类型的产流产沙特征

Fig.3　Runoff and sediment yield characteristics of land use types under different types of erosive rainfall

表 3　不同土地利用类型平均径流深、平均土壤流失量及总径流深、总土壤流失量

Table 3　Average runoff depth, average soil loss and total runoff depth and total soil loss of different land use types

小区号	土地利用类型	平均径流深/(mm·a^{-1})	总径流深/mm	平均土壤流失量/(t·hm^{-2}·a^{-1})	总土壤流失量/(t·hm^{-2})
1	坡耕地	122.60	613.01	3.799	18.995
2	裸 地	242.33	1 211.63	16.797	83.985
3	坡耕地	130.51	652.57	1.404	7.019
4	坡耕地	123.88	619.38	2.606	13.029
5	林 地	29.09	145.43	0.076	0.379
6	林 地	29.63	148.15	0.059	0.295

2.5 小流域降雨特征与不同土地利用类型小区产流产沙的相关性

降水作为诱发土壤侵蚀的关键驱动因素[25]，其时空分布特征对区域水土流失过程具有显著影响。本研究以2019—2023年为观测周期，系统探讨了研究区域降雨量、降雨历时、降雨强度、最大30 min雨强(I_{30})、降雨侵蚀力等多个降雨特征对不同土地利用类型坡面径流深和土壤流失量进行相关性研究。

由表4可知，不同土地利用类型小区的径流深和土壤流失量均与降雨量、平均降雨强度、最大30 min雨强(I_{30})及降雨侵蚀力呈显著正相关($p<0.01$)，同时所有小区降雨侵蚀力对土壤流失量的影响均高于降雨量，而降雨历时在所有径流小区中均未达到显著相关。2号裸地小区表现出最强的响应特征，其中径流深与最大30 min雨强(I_{30})和降雨侵蚀力的相关系数分别达到0.631和0.933，凸显短时极端降雨对该区域径流的瞬时驱动效应。5，6号林地小区相关程度相较其他小区均有下降，反映出植被截留对降雨特征影响的消减作用。除林地小区外，其他小区总土壤流失量相关系数平均低于总径流量，说明在植被盖度较低的坡耕地土壤流失量对各降雨特征响应普遍滞后于径流量。

表4 不同土地利用类型小区径流深、土壤流失量与降雨特征的相关性

Table 4 Correlation between runoff depth, soil loss and rainfall characteristics of different land use types

径流小区号	监测指标	降雨量/mm	降雨历时/min	平均降雨强度/($mm \cdot h^{-1}$)	最大30 min雨强(I_{30})/($mm \cdot h^{-1}$)	降雨侵蚀力/($MJ \cdot mm \cdot hm^{-2} \cdot h^{-1}$)
1	径流深	0.832**	0.068	0.423**	0.488**	0.870**
	土壤流失量	0.800**	0.079	0.373**	0.460**	0.862**
2	径流深	0.885**	0.024	0.542**	0.631**	0.933**
	土壤流失量	0.831**	0.065	0.424**	0.524**	0.906**
3	径流深	0.835**	0.032	0.468**	0.508**	0.866**
	土壤流失量	0.786**	0.041	0.438**	0.479**	0.854**
4	径流深	0.830**	0.035	0.470**	0.518**	0.844**
	土壤流失量	0.802**	0.092	0.368**	0.433**	0.849**
5	径流深	0.810**	0.098	0.333**	0.430**	0.838**
	土壤流失量	0.834**	0.096	0.344**	0.450**	0.875**
6	径流深	0.807**	0.122	0.330**	0.417**	0.846**
	土壤流失量	0.857**	0.127	0.365**	0.454**	0.862**

注：**表示在$p<0.01$水平（双尾）相关性显著。

由于降雨历时对产流产沙的影响在所有径流小区中均未达到显著水平，因此选取与径流深和土壤流失量呈显著正相关的降雨特征（降雨量、平均降雨强度、最大30 min雨强(I_{30})、降雨侵蚀力）进行多元线性回归分析（表5）。从表5可以看出，最大30 min雨强(I_{30})和降雨侵蚀力与径流深和土壤流失量呈极显著相关($p<0.01$)，其中最大30 min雨强(I_{30})与径流深和土壤流失量均呈显著负相关，说明降雨量和降雨侵蚀力是影响径流深的主导因子，而最大30 min雨强(I_{30})的负向影响被这两个变量的正向作用所覆盖。在不同的土地利用类型中，降雨量与平均降雨强度对有植被覆盖的小区影响减弱，特别是对林地小区无显著影响。然而裸地小区平均降雨强度对径流深有显著影响($p<0.01$)，说明裸地小区对降雨强度敏感，反映地表覆盖缺失导致径流更易形成。

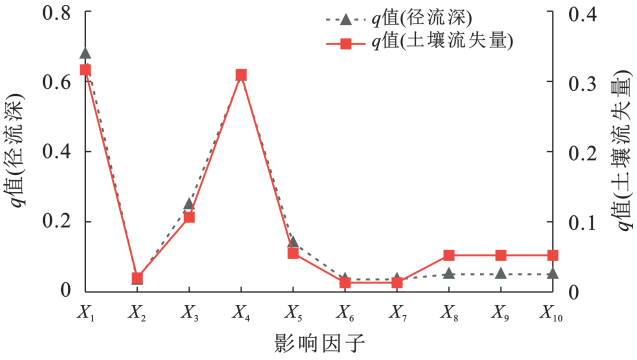
2.6 基于地理探测器对小流域降雨特征与不同土地利用类型产流产沙影响因素分析

2.6.1 坡面产流产沙单因子探测结果

通过对坡面径流小区产流产沙影因子进行探测（图4）可知，降雨因子对坡面产流产沙的解释力高于植被因子、微地形因子及土壤因子，影响力大小排序为：降雨因子＞植被因子＞土壤因子＞微地形因子。降雨因子中，降雨量、最大30 min雨强对径流深的单因子解释力q值高于0.6，且相关性显著($p<0.01$)，表明降雨总量是驱动径流形成的核心因素，同时通过最大30 min雨强反映短时强降雨对地表径流起到了直接促进作用。

植被因子q值为0.14,表明植被可以通过滞留降水,增加地表粗糙度促进雨水下渗[12],延长地表径流形成时间并降低地表径流量。土壤因子、微地形因子q值均小于0.05,表明这些因子对径流深的解释力不强。

研究结果表明,降雨量对土壤流失量的解释力最高q值为0.32,但弱于其对径流深的影响,表明降雨总量需通过径流介入间接驱动土壤侵蚀。同时,最大30 min雨强q值为0.31,反映短时强降雨通过增强地表径流冲刷能力加剧土壤侵蚀。植被盖度q值为0.06,相比于非降雨因子的其他因子解释力为最高,说明植被覆盖增加地表粗糙度及根系固土能力,可以有效减少土壤流失,是水土流失治理的关键因子。



注:X_1为降雨量;X_2为降雨历时;X_3为平均降雨强度;X_4为最大30 min雨强;X_5为植被盖度;X_6为小区坡长;X_7为小区坡度;X_8为土壤密度;X_9为土壤非毛管孔隙度;X_{10}为土壤毛管孔隙度。下同。

图4　地理探测器对小区径流深与土壤流失量的单因子探测结果

Fig.4　Results of single-factor detection by geodetector for runoff depth and soil loss in plots

表5　不同土地利用类型小区径流深、土壤流失量与降雨特征多元线性回归结果

Table 5　Multiple linear regression results of runoff depth, soil loss and rainfall characteristics of different land use types

径流小区号	降雨特征	径流深			土壤流失量		
		t	P	R^2	t	P	R^2
1	降雨量	0.729	0.469	0.825	−0.604	0.548	0.823
	平均降雨强度	1.699	0.094		0.846	0.401	
	最大30 min雨强(I_{30})	−4.944	0.000		−5.344	0.000	
	降雨侵蚀力	7.051	0.000		8.344	0.000	
2	降雨量	1.867	0.066	0.896	−0.644	0.522	0.879
	平均降雨强度	2.946	0.004		1.217	0.228	
	最大30 min雨强(I_{30})	−3.634	0.001		−5.709	0.000	
	降雨侵蚀力	7.955	0.000		10.454	0.000	
3	降雨量	1.338	0.186	0.813	−0.446	0.657	0.797
	平均降雨强度	2.504	0.015		2.146	0.036	
	最大30 min雨强(I_{30})	−4.578	0.000		−5.072	0.000	
	降雨侵蚀力	6.202	0.000		7.561	0.000	
4	降雨量	1.744	0.086	0.761	−0.260	0.796	0.818
	平均降雨强度	2.151	0.036		1.216	0.229	
	最大30 min雨强(I_{30})	−3.079	0.003		−5.693	0.000	
	降雨侵蚀力	4.169	0.000		7.759	0.000	
5	降雨量	0.706	0.483	0.774	0.339	0.736	0.848
	平均降雨强度	−0.015	0.988		−0.138	0.891	
	最大30 min雨强(I_{30})	−3.976	0.000		−5.120	0.000	
	降雨侵蚀力	6.060	0.000		8.189	0.000	
6	降雨量	0.137	0.891	0.804	1.974	0.053	0.821
	平均降雨强度	−0.181	0.857		0.080	0.936	
	最大30 min雨强(I_{30})	−4.653	0.000		−3.894	0.000	
	降雨侵蚀力	7.084	0.000		5.639	0.000	

注:最大30 min雨强单位为mm/h。

2.6.2 坡面产流产沙交互因子探测结果

由图5可知，影响坡面产流产沙的驱动因子呈现双因子增强作用和非线性增强，对径流深影响因子交互探测结果显示降雨量(X_1)与其他影响因子的交互作用解释力最高，q值均在0.71以上，说明降雨总量是形成径流的主要影响因子。其中最大30 min雨强(X_4)与降雨因子X_3—X_1呈双因子增强作用，q值均在0.66以上，与非降雨因子X_5—X_{10}呈现非线性增强作用，q值均在0.77以上，体现了短时强降雨与其他影响因子的非线性增强的特征；对土壤流失量影响因子交互探测结果显示，降雨量与最大30 min雨强与非降雨因子植被盖度(X_5)、土壤密度(X_8)、土壤非毛管孔隙度(X_9)、土壤毛管孔隙度(X_{10})交互作用解释力最高，q值均在0.70以上，说明造成土壤流失的主要原因除降雨因子以外，植被盖度、土壤密度、土壤非毛管孔隙度、土壤毛管孔隙度也可有效的调节土壤流失。

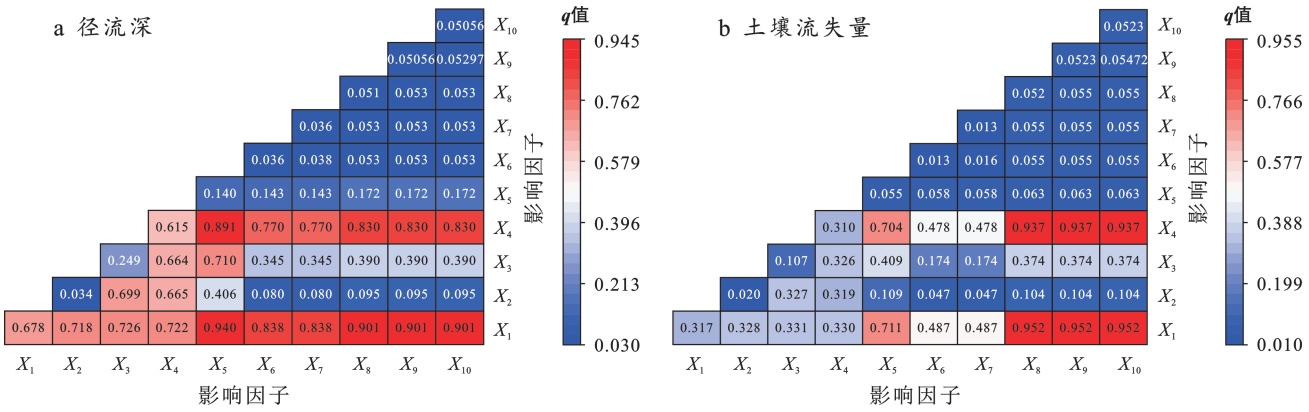


图5 地理探测器对小区径流深与土壤流失量交互因子探测结果

Fig.5 Results of interaction-factor detection by geodetector for runoff depth and soil loss in plots

3 讨 论

3.1 流域降雨特征对产流产沙的影响

研究结果表明，流域内不同降雨类型对坡面产流产沙的影响非常显著[26-27]。本研究选取降雨量、降雨历时、平均降雨强度、最大30 min雨强(I_{30})、降雨侵蚀力将李子口小流域侵蚀降雨分为3类，不同降雨类型对产流产沙的影响大小为：Ⅲ类降雨＞Ⅱ类降雨＞Ⅰ类降雨，因此大雨量、高强度的降雨类型是造成流域水土流失最主要的侵蚀性降雨类型，这与张春霞等[28]研究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研究结论一致。其中，Ⅰ类降雨(小雨量、短历时、低强度)发生次数为74场，占总侵蚀性降雨次数的68.5%，该雨型是研究区最常见的侵蚀性降雨类型[15]，虽然年总径流量较多，但土壤流失量相对于Ⅱ，Ⅲ类雨型较少；Ⅱ类降雨(中雨量、长历时、中强度)发生次数为31场，占总降雨次数的28.7%；Ⅲ类降雨(大雨量、中历时、高强度)发生次数为3场，占总降雨次数的2.8%。根据研究区监测产流产沙结果，Ⅲ类降雨明显高于Ⅰ，Ⅱ类降雨，其径流深和土壤流失量分别达到年均总量的40%和50%以上，中短历时暴雨对径流深和土壤流失量的影响尤为突出[21]，可见造成该区域水土流失的雨型为Ⅲ类降雨类型，此类雨型的侵蚀贡献率显著高于其他降雨类型。在紫色土区不同类型降雨产流产沙规律的研究中，大雨量、高强度降雨产流产沙的贡献率占年均总量的40%以上，这与李建明[7]等研究结论一致。同时本文通过多元线性回归及地理探测器分析，降雨特征中降雨量、最大30 min雨强(I_{30})、降雨侵蚀力与坡面产流产沙呈显著正相关($p<0.01$)。因此，流域应加强植物措施、工程措施、耕作措施的应用，有效减少Ⅲ类侵蚀性降雨及短暂性强降雨所造成的危害[28-29]。

3.2 流域土地利用类型对产流产沙的影响

李子口小流域2019—2023年降雨及径流小区产流产沙量特征表明，不同土地利用类型之间产流产沙量存在显著的区别，表现为：裸地＞坡耕地＞林地，其中裸地和坡耕地的径流深与土壤流失量显著高于林地，与衣强等[9]研究认为林地减流减沙效益相比于裸地和坡耕地要大很多的结论一致。通过对坡面径流小区产流产沙影响因子进行交互探测，降雨量、最大30 min雨强及植被因子与土壤因子交互作用解释力显著增强，q值均在0.70以上，刘亦涵等[30]在研究黄河流域山西段土壤侵蚀变化与驱动因子结果中也证实了这一结论。裸地小区缺乏植被覆盖，地表土壤裸露，降雨直接冲刷地表土壤，地表径流迅速形成，导致产流产沙量增加[11-12]。坡耕地小区虽有一定植被，但耕作扰动频繁，导致土壤结构松散，农

作物植被盖度相对较低,抗蚀能力较弱[10-11]。3号坡耕地小区(小麦-玉米套种)因植被盖度较高,其土壤流失量明显低于其他坡耕地,说明间作模式作为一种有效的农地管理措施,可降低土壤流失[1]。林地小区由于植被冠层在截留降雨、降低雨滴下降动能的同时,植被枯落物及根系也起到了减流减沙的作用[12],这与顾小华等[11]对滇中高原不同土地利用类型产流产沙特征及影响因素研究结果相似。

由于产流前土壤湿度的初始值未检测,降雨强度的时间分布特征未被充分解析,不同土地利用类型的土壤质地、结构、孔隙度等因素会直接影响土壤入渗速率与产流阈值。后续研究中,可进一步提升驱动因子的解释精度,为区域水土流失防治提供更具针对性的理论依据。

4　结　论

(1) 研究区 2019—2023 年降雨分布不均,主要集中于 5—10 月。受大气环流和副热带高压的影响,侵蚀性降雨主要发生于夏季,集中于 7—9 月,降雨量占年总降雨量的 50.5%。侵蚀性降雨主要分为 3 种类型,其中Ⅰ类降雨(小雨量、短历时、低强度)发生次数为 74 场,占总侵蚀性降雨次数的 68.5%;Ⅱ类降雨(中雨量、长历时、中强度)发生次数为 31 场,占总降雨次数的 28.7%;Ⅲ类降雨(大雨量、中历时、高强度)发生次数为 3 场,占总降雨次数的 2.8%。Ⅰ,Ⅱ类降雨虽然发生频次较多,但是雨强、降雨侵蚀力均较小,Ⅲ类雨型虽然发生频次较少,但是雨量、雨强、降雨侵蚀力都很大,对地表土壤侵蚀力较强,径流深和土壤流失量的贡献分别占年均总量的 40% 和 50% 以上。

(2) 在相同雨型下不同土地利用类型间径流深和土壤流失量存在较大差异,同时在相同的土地类型下,不同植物及不同耕作方式的径流深、土壤流失量也存在差异。总径流深、总土壤流失量表现为:裸地>坡耕地>林地。其中裸地总径流深(1 211.62 mm)、总土壤流失量(83.98 t/hm^2)最高,坡耕地次之,林地最小。在坡耕地中,3 号坡耕地(小麦套种玉米)虽然径流量与 1,4 号坡耕地相近,但是土壤流失量相较 1,4 号明显降低,说明间作模式作为一种有效的农地管理措施可有效降低土壤流失量。林地通过降低降雨侵蚀力、增加降雨入渗和植物根系固土三重作用,使径流深和土壤流失量分别减少了 88% 和 99%。

(3) 不同土地利用类型坡面总径流深和总土壤流失量与各降雨特征指标均呈正相关关系,其中降雨量、最大 30 min 雨强(I_{30})、降雨侵蚀力对不同土地利用类型坡面径流深和土壤流失量影响更为显著。经地理探测器量化影响坡面产流产沙的主导因素及交互影响程度,表明降雨总量、降雨强度是驱动坡面产流产沙形成的核心因素,交互探测后产流产沙驱动因子呈现双因子增强和非线性增强,其中降雨量、最大 30 min 雨强及植被因子与土壤因子交互作用解释力显著增强。本研究表明,裸地小区最小侵蚀性产流降雨量为 10.8 mm、坡耕地为 12.2 mm、林地为 12.8 mm。

参考文献(References)

[1] 杨丹.川北丘陵区土地利用方式对地表侵蚀产沙的影响[J].西南林业大学学报(自然科学),2019,39(6):146-151.
Yang Dan. Study on the influence of land utilization type on soil erosion processes in northern Sichuan hilly region [J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences), 2019,39(6):146-151.

[2] Zhu Bo, Wang Zhenhua, Zhang Xinbao. Phosphorus fractions and release potential of ditch sediments from different land uses in a small catchment of the upper Yangtze River [J]. Journal of Soils and Sediments, 2012, 12(2):278-290.

[3] 王齐齐,徐虎,马常宝,等.西部地区紫色土近30年来土壤肥力与生产力演变趋势分析[J].植物营养与肥料学报,2018,24(6):1492-1499.
Wang Qiqi, Xu Hu, Ma Changbao, et al. Change of soil fertility and productivity of purple soil in western China in recent 30 years [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018,24(6):1492-1499.

[4] 肖玖金,马红星,王莉,等.基于物元模型的川东北丘陵区土壤养分综合评价:以平昌县为例[J].江西农业大学学报,2011,33(2):381-387.
Xiao Jiujin, Ma Hongxing, Wang Li, et al. Comprehensive evaluation of nutrients based on matter-element model in the northeastern Sichuan Basin: A case of Pingchang County in Sichuan Province [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2011,33(2):381-387.

[5] Wang Guo zhong, Tian Ying chao, Qu Jian gang, et al. The characteristics of runoff and sediment yield in different land use types in southwest mountains of Henan Province [J]. Advanced Materials Research, 2014, 1065: 3267-3271.

[6] 丁贵惠,任忠政,胡伟,等.侵蚀性降雨对黑土坡耕地土壤侵蚀特征的影响[J].水土保持学报,2024,38(2):47-56.
Ding Guihui, Ren Zhongzheng, Hu Wei, et al. Effects of erosive rainfall on soil erosion characteristics of black sloping farmland [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024,38(2):47-56.

[7] 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.
Li Jianming, Ding Wenfeng, Ran Wenjian, 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.

[8] 孙理阳,李华林,张帆,等.降雨特征及不同水土保持措施对坡面产流、产沙和氮磷流失的影响[J].东北农业大学学报,2024,55(8):111-122.
Sun Liyang, Li Hualin, Zhang Fan, et al. Effects of rainfal characteristics and soil conservation measures on runoff, sediment yield, and nitrogen-phosphorus loss on slopes [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2024,55(8):111-122.

[9] 衣强,李越梅,闫俊飞,等.不同土地利用类型对豫西黄土丘陵区坡面产流产沙的影响[J].水土保持研究,2024,31(4):67-74.
Yi Qiang, Li Yuemei, Yan Junfei, et al. Effects of different land uses on runoff and sediment on sloping land in loess hilly area of western Henan [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024,31(4):67-74.

[10] 顾再柯,黄森,黄金权,等.赤水市大石河小流域不同土地利用类型汛期产流产沙特征[J].中国水土保持,2025(1):68-71.
Gu Zaike, Huang Sen, Huang Jinquan, et al. The characteristics of runoff and sediment production during flood season for different land use types in the Dashihe small watershed of Chishui City [J]. Soil and Water Conservation in China, 2025(1):68-71.

[11] 顾小华,杨智,张兰兰,等.滇中高原不同土地利用类型产流产沙特征及影响因素:以尖山河小流域为例[J].水土保持通报,2024,44(5):75-82.
Gu Xiaohua, Yang Zhi, Zhang Lanlan, et al. Characteristics of runoff and sediment yield under different land uses and its influencing factors in central Yunnan Plateau: A case study at Jianshan River small catchment [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024,44(5):75-82.

[12] 赵一鹤,杨时宇,周祥,等.巨尾桉工业原料林地与不同土地利用类型坡面产流产沙特征对比分析[J].水土保持通报,2012,32(1):77-81.
Zhao Yihe, Yang Shiyu, Zhou Xiang, et al. Comprative analysis of slope runoff and sediment yield from *Eucalytus grandis* × *E. urophylla* industrial plantations and other land use types [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012,32(1):77-81.

[13] 王会军.关于亚洲中高纬区极端气候的研究:国家自然科学基金重大项目内容及阶段进展简介[J].大气科学,2024,48(1):26-33.
Wang Huijun. Research on the extreme climate in middle and high latitudes of Asia: Brief introduction to the content and progress of major projects funded by the national natural science foundation of China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2024,48(1):26-33.

[14] 张小峰,闫昊晨,岳遥,等.近50年金沙江各区段年径流量变化及分析[J].长江流域资源与环境,2018,27(10):2283-2292.
Zhang Xiaofeng, Yan Haochen, Yue Yao, et al. Analysis on the sectional annual runoff change of the Jinsha River basin in the recent 50 years [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018,27(10):2283-2292.

[15] 龚珏,杜洪勋,郑江坤,等.川北典型小流域产流对降雨的多时间尺度响应规律[J].长江流域资源与环境,2020,29(6):1445-1453.
Gong Jue, Du Hongxun, Zheng Jiangkun, et al. Response of runoff to rainfall in multi-time scale of typical small watershed in northern Sichuan Province [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020,29(6):1445-1453.

[16] 唐毅,覃发超,况治宇.降雨对不同作物径流小区产流产沙的影响:以四川北部低山深丘区为例[J].西华师范大学学报(自然科学版),2023,44(3):300-304.
Tang Yi, Qin Fachao, Kuang Zhiyu. Influence of precipitation on runoff and sediment production of runoff plots with different crops: A case study of low deep hilly region in northern Sichuan [J]. Journal of China West Normal University (Natural Sciences), 2023,44(3):300-304.

[17] 袁再健,蔡强国,卜崇峰.嘉陵江李子口小流域侵蚀产沙模型初探[J].水土保持研究,2004,11(4):94-96.
Yuan Zaijian, Cai Qiangguo, Bu Chongfeng. A primary discussion of soil erosion and sediment yield models of small watershed in Lizikou of Jialingjiang River [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2004,11(4):94-96.

[18] Wischmeier W H, Smith D D. Rainfall energy and its relationship to soil loss [J]. Eos, Transactions American Geophysical Union, 1958, 39(2):285-291.

[19] 中华人民共和国水利部.水土保持监测技术规范(SL/T 277—2024)[S]北京.中国水利水电出版社,2024.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Technical Specification for Soil and Water Conservation Monitoring: SL/T 277—2024 [S]. Beijing: China Water & Power Press, 2024.

[20] 贾凡,严妍,张家琪.基于K-means聚类特征消减的网络异常检测[J].清华大学学报(自然科学版),2018,58(2):137-142.
Jia Fan, Yan Yan, Zhang Jiaqi. K-means based feature

reduction for network anomaly detection [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2018, 58(2):137-142.

[21] 王如岩,赵龙,宋庆健,等.大汶河上游小流域降雨类型及其对产流产沙的影响[J].水土保持通报,2024,44(6):194-199.
Wang Ruyan, Zhao Long, Song Qingjian, et al. Rainfall regimes and their influence on runoff and sediment yield at small watershed in upper reaches of Dawen River [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024,44(6):194-199.

[22] 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 Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: principle and prospective [J]. Acta Geographica Sinica, 2017,72(1):116-134.

[23] 欧会迪,张锦豪,李建菲,等.太行山南麓鱼鳞坑坡面产流特征及其影响因素[J].水土保持通报,2024,44(2):110-118.
Ou Huidi, Zhang Jinhao, Li Jianfei, et al. Characteristics of runoff and its influencing factors on fish-scale pit slopes in southern foothills of Taihang Mountains [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024,44(2):110-118.

[24] 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 Yun, Liu Baoyuan, Zhang Wenbo. Study on standard of erosive rainfall [J]. Journal of Soil Water Conservation, 2000,14(4):6-11.

[25] 章文波,付金生.不同类型雨量资料估算降雨侵蚀力[J].资源科学,2003,25(1):35-41.
Zhang Wenbo, Fu Jinsheng. Rainfall erosivity estimation under different rainfall amount [J]. Resources Science, 2003,25(1):35-41.

[26] 张哲,方政,董智,等.鲁中南山区侵蚀性降雨及典型作物对坡面产流产沙影响研究[J].西南大学学报(自然科学版),2024,46(1):69-76.
Zhang Zhe, Fang Zheng, Dong Zhi, et al. Effects of erosive rainfall and typical crops on slope runoff and sediment yield in mountainous area of central-south of Shandong Province [J]. Journal of Southwest University (Natural Science), 2024,46(1):69-76.

[27] 王赫,杨舜成,岳晓峰,等.红壤区裸露坡地不同类型次降雨的产流产沙规律[J].水土保持学报,2023,37(4):61-68.
Wang He, Yang Shuncheng, Yue Xiaofeng, et al. Runoff and sediment of different rainfall types on bare slope in the red soil region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023,37(4):61-68.

[28] 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.
Zhang Chunxia, Dong Zhi, Gao Bo, 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.

[29] 顾朝军,朱永清,黄立文,等.不同土地利用对江西红壤坡地产流产沙的影响[J].中国水土保持科学(中英文),2022,20(4):10-18.
Gu Chaojun, Zhu Yongqing, Huang Liwen, et al. Effects of different land uses on the runoff and sediment yield in red soil slope, Jiangxi [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2022,20(4):10-18.

[30] 刘亦涵,王浩天,甄志磊,等.基于RUSLE模型的黄河流域山西段土壤侵蚀变化与驱动因子[J].土壤,2025,57(2):452-460.
Liu Yihan, Wang Haotian, Zhen Zhilei, et al. Changes of soil erosion based on RUSLE model and driving factors in Shanxi section of Yellow River basin [J]. Soils, 2025,57(2):452-460.

(上接第86页)

[27] 马靖涵,穆艳.城市绿化树种银杏的蒸散特征和土壤水分状况[J].水土保持通报,2023,43(2):69-76.
Ma Jinghan, Mu Yan. Evapotranspiration characteristics and soil moisture conditions of *Ginkgo biloba* in urban gardens [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023,43(2):69-76.

[28] 吴志娟,毕二平.生物炭增强黄绵土对西替利嗪的吸附作用[J].环境科学,2017,38(5):2154-2160.
Wu Zhijuan, Bi Erping. Enhanced sorption of cetirizine to loessial soil amended with biochar [J]. Environmental Science, 2017,38(5):2154-2160.

[29] Ali Akbar Nakhli S, Imhoff P T. Models for predicting water retention in pyrogenic carbon (biochar) and biochar-amended soil at low water contents [J]. Water Resources Research, 2020,56(11):e2020WR027726.

[30] 杨春艳,王小展,史常青,等.不同材料覆盖对高寒矿区扰动界面土壤蒸发特性的影响[J].水土保持研究,2025,32(2):198-206.
Yang Chunyan, Wang Xiaozhan, Shi Changqing, et al. Effect of different mulching materials on soil evaporation characteristics of disturbed interface in alpine mining area [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025,32(2):198-206.