

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.04.039.

冯娟龙, 吴川东, 于洋, 等. 极端降雨对晋西黄土区农地流域泥沙连通性的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(4): 228-235.

FENG Juanlong, WU Chuandong, YU Yang, et al. Effects of Extreme Rainfall on Sediment Connectivity in a Farmland Watershed of the Gully Region in the Western Shanxi Province of the Loess Plateau [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(4): 228-235.

极端降雨对晋西黄土区农地流域泥沙连通性的影响

冯娟龙¹, 吴川东³, 于洋^{1,2}, 刘鹤³, 王百群⁴, 韦宝婧⁵, 赵炯昌¹

(1.北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2.山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站, 北京 100083; 3.中国科学院 西北生态环境资源研究院/中国生态系统研究网络临泽内陆河流域研究站, 兰州 730000; 4.中国科学院 水利部 水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 5.中南林业科技大学 生命科学与技术学院, 长沙 410004)

摘要:[目的]研究极端降雨事件对小流域坡沟系统泥沙连通性的影响,进而为流域综合治理与灾后重建提供理论依据。[方法]以地处黄土残塬区的晋西吉县蔡家川农地小流域为研究区,采用无人机与遥感影像对2021年10月山西极端降雨事件前后坡沟系统进行航测与实地调查,分析极端降雨前后的景观格局变化,量化坡沟系统泥沙连通性,识别滑坡点位空间分布与地形特征,评价流域内典型工程措施对极端降雨的响应。[结果]农地流域此次降雨历时84 h,累计降雨量160.4 mm,降雨强度1.9 mm/h,降雨频率0.16%,为百年一遇的极端暴雨。暴雨后流域斑块数量增加,景观形状指数增大,蔓延度指数减小,香农多样性指数减小。暴雨前流域内泥沙连通性分布不均,暴雨后泥沙连通性增大。暴雨后滑坡点位泥沙连通性减小,滑坡多发生在0°~10°和40°~50°的条件下,所占比例分别为29.11%和17.74%。[结论]极端暴雨事件诱发的滑坡影响了泥沙连通性,根据泥沙连通性空间变化可识别水土流失位点,能够用于评估典型水土保持工程措施对极端降雨的响应,研究结果可为流域综合治理及极端降雨事件发生后开展生态恢复提供支撑。

关键词:极端暴雨;淤地坝;泥沙连通性;流域综合治理

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2023)04-0228-08

Effects of Extreme Rainfall on Sediment Connectivity in a Farmland Watershed of the Gully Region in the Western Shanxi Province of the Loess Plateau

FENG Juanlong¹, WU Chuandong³, YU Yang^{1,2}, LIU Hu³,
WANG Baiqun⁴, WEI Baojing⁵, ZHAO Jiongchang¹

(1.School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2.Jixian National Forest Ecosystem Observation and Research Station, CNERN, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 3.Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences/Linze Inland River Basin Research Station, Chinese Ecosystem Research Network, Lanzhou, Gansu 730000, China; 4.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 5.College of Life Sciences & Technology, Central South University of Forestry & Technology, Changsha 410004, China)

Abstract:[Objective] The aims of this study focus on the influence of extreme rainfall events on sediment connectivity of slope-gully system in small watershed, and further provide theoretical basis for comprehensive watershed management. [Methods] The farmland watershed in Caijiachuan watershed in Ji County of the

收稿日期:2022-11-26

修回日期:2022-12-06

资助项目:国家自然科学基金项目:“黄土残塬沟壑区植被和工程措施对流域水文连通性的作用机理”(42177310)

第一作者:冯娟龙(1998—),女,甘肃会宁人,硕士研究生,主要从事水土保持与流域治理研究。E-mail: juanlongfeng@bjfu.edu.cn

通信作者:于洋(1985—),男,河北承德人,博士,副教授,主要从事植被恢复与流域治理研究。E-mail: theodoreyy@gmail.com

<http://stbcj.paperonce.org>

Loess Plateau was taken as the research area. UAV and remote sensing images were used to carry out aerial survey and field survey on slope and gully system before and after the extreme rainfall event in Shanxi in October 2021. The landscape pattern changes before and after extreme rainstorm were analyzed, the sediment connectivity of slope-gully system was quantified, and the spatial distribution and topographic features of landslide points were identified, the responses of typical engineering measures to extreme rainfall were evaluated. [Results] The rainfall event lasted for 84 hours, with a cumulative rainfall of 160.4 mm, a rainfall intensity of 1.9 mm/h and a rainfall frequency of 0.16%. It was an extreme rainstorm that occurred once in a hundred years. After the rainstorm, the number of patches increased, the landscape shape index increased, the Contag index decreased, and the Shannon diversity index decreased. Sediment connectivity unevenly distributed in the watershed before the rainstorm, but it increased after the rainstorm. After the rainstorm, the sediment connectivity of landslide site decreased, and the landslide mainly occurred on the slopes with $0^{\circ}\sim 10^{\circ}$ and $40^{\circ}\sim 50^{\circ}$, accounting for 29.11% and 17.74%, respectively. [Conclusion] Landslides induced by extreme rainfall events affect sediment connectivity, and the sediment connectivity index can be used to identify landslides sites thus can be used to assess the response of typical soil and water conservation engineering measures to extreme rainfall. The results of this study can provide support for integrated watershed management and ecological restoration after extreme precipitation events.

Keywords: extreme precipitation; check dam; sediment connectivity; integrated watershed management

黄土高原地区土壤疏松,植被稀疏,生态环境脆弱,水土流失严重。植被和工程措施是防治水土流失的有效手段,工程措施具有水土保持、生态恢复以及农业增收增产等多重效益,降低了洪水、干旱、滑坡等自然灾害的发生风险,有效保持了土壤中的水分和养分。淤地坝是指在沟道中以拦沙、缓洪、淤地造田、发展生产为目的而修建的水土保持工程措施。作为黄土高原开展生态治理、防治水土流失的典型工程措施,淤地坝在控制沟道侵蚀、拦蓄径流泥沙、变荒沟为良田、调峰消能、减少入黄泥沙、合理利用水沙资源等方面发挥了积极作用^[1]。作为小流域水土流失综合治理的最后一道防线,对于增加粮食产量、改善当地交通以及农民群众的生产生活条件十分重要。

自20世纪80年代起,黄土高原开展了以小流域为单元的综合治理^[2],形成了以小流域为单元的系统建设。经过五十多年的生态恢复,区域环境明显好转,梯田、淤地坝等工程措施被广泛用于流域综合治理。然而淤地坝由于工程范围广、数量大、设计标准偏低,以及早期淤地坝多是群众自发修建,故工程质量较差,随着运行时间的延长,黄土高原地区部分淤地坝经过多年淤积已丧失了继续拦泥防洪的能力,伴随极端气候事件多发,淤地坝溃决常有发生。诸多研究人员对溃坝的原因以及过程都进行了大量的研究,通过分析淤地坝损毁原因,认为造成淤地坝溃坝的原因有外因和内因,外因指洪水、地震等不可抗拒的自然灾害及人为失误等原因导致的溃坝,内因指的是淤

地坝本身在设计或修建过程中存在的问题^[3]。还有报道指出短时间集中暴雨是淤地坝溃决的最根本原因^[4]。此外,近年来气候变化导致的极端降雨事件多发,严重影响区域生态环境^[5]。因此,详细开展极端降雨事件对小流域结构和功能的影响,对于开展灾后重建、风险评价与流域综合治理具有重要实际意义。

连通性能够表征水循环过程中物质、能量和生物体在景观单元中的传输过程,从而更好地理解流域对气候变化影响的敏感性^[6]。泥沙连通性可以衡量侵蚀产生的泥沙在地貌单元之间的传输情况,预测泥沙运动的潜能,同时将流域内各部分联系起来,能够刻画流域侵蚀产沙与泥沙输移过程,使侵蚀、输移过程表达得更准确,进而识别水土流失的易发点位,确定管理干预的位置^[7]。因此,基于连通性视角开展极端降雨对流域结构和功能的影响,是有针对性地开展灾后流域治理的有效途径^[8]。虽然人们已经对坝地建设对土壤养分、水分等方面的影响进行了详细报道,但对于极端降雨事件发生后坝地连通性的影响相关报道较少。吉县地处黄河中游东岸,水土流失严重,是黄土高原水土保持重点区。多年来,淤地坝应用于当地的生态建设和流域治理,有效优化了资源配置,重塑了沟道景观,改变了坡沟系统水动力特征^[9]。但是随着坝地运行的年限增加以及近年来黄土高原地区极端气候频发,极端降雨事件导致吉县淤地坝的溃坝风险日益增加,影响着当地的工农业生产以及人民群众的生命财产安全。然而当前围绕典型工程措

施对极端暴雨事件的影响相关报道较少。基于此,本研究以2021年10月山西省极端降雨事件为背景,以吉县蔡家川农地小流域为研究对象,采用无人机航测与实地调查等方式获取极端暴雨前后高分辨率影像与数字高程信息,分析景观格局变化,量化暴雨前后的泥沙连通性,识别发生水土流失的关键点位,以期为极端暴雨事件后生态恢复与流域综合治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于山西省西南部的吉县蔡家川流域东南侧的农地小流域(图1)。地理坐标 $110^{\circ}46'40''$ — $110^{\circ}47'07''$ E, $36^{\circ}15'40''$ — $36^{\circ}16'23''$ N, 海拔904~1592 m。小流域面积0.71 km², 流域长1.38 km, 河网密度1.81 km/km², 沟道比降8.70%, 形状系数2.54^[10]。

农地小流域内以农地、草地为主, 森林覆盖度仅为15.2%, 其中农地占35.9%, 草地占52.4%, 人工林占9.9%, 建筑用地占0.9%。农地主要种植玉米(*Zea mays*)、高粱(*Sorghum vulgare*)、土豆(*Solanum tuberosum*), 草地主要为以黄刺玫(*Rosa xanthina*)、白刺花(*Sophora davidii*)、虎榛子(*Ostryopsis davidiana*)、杠柳(*Periploca sepium*)等植物组成的灌丛, 以及以细裂叶莲蒿(*Artemisia gmelinii*)、藁草(*Carex spp*)、早熟禾(*Poa annua*)等为主的草本植物。

农地小流域属于典型的黄土梁状丘陵沟壑地貌, 流域内土壤以褐土为主, 微碱性, 抗蚀性差, 易造成严重水土流失。黄土母质, 土层厚度几十至百米, 土质较均匀。小流域位于暖温带半湿润区, 属于暖温带大

陆性季风气候。流域年日照时数为2564.1 h, 年均蒸发量1724 mm, 年平均气温为7~10℃, 相对湿度为62.0%。流域平均降雨量575.9 mm, 降雨年内分布差异较大, 主要集中在7—9月。

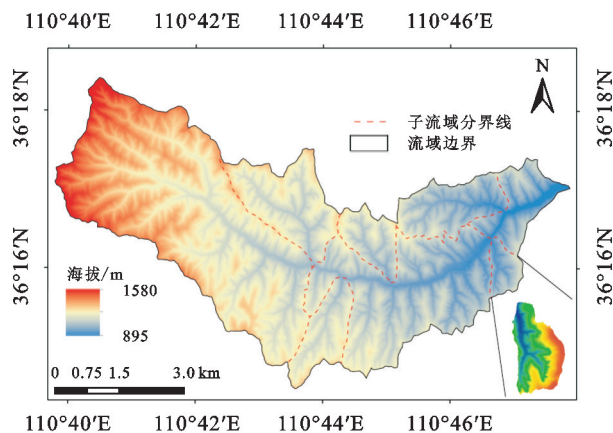


图1 蔡家川农地小流域

1.2 降雨数据的采集与景观格局分析

本次调查的降雨过程数据源自山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站在流域内布设的翻斗式自计雨量计, 精度为0.2 mm。

景观指数通过刻画格局信息, 定量表征景观结构组成和空间配置特征。本文在类型水平上选择斑块个数(NP, Number of patch)、斑块密度(PD, Patch density)和最大斑块指数(LPI, Largest patch index)、在景观水平上选取景观形状指数(LSI, Landscape shape index)、蔓延度(CONTAG, Contagion index)、景观分离度(DIVISION, Landscape division index)和香农多样性指数(SHDI, Shannon's diversity index)6个指标, 利用Fragstats 4.2景观格局分析软件对暴雨前后植被景观格局的变化进行分析。各景观指数及生态意义如表1所示。

表1 植被景观格局指数及生态意义

景观格局指数	生态学意义
斑块密度 PD	单位面积内的斑块数量, 斑块密度大小直接反映景观破碎程度
最大斑块指数 LPI	反映景观类型优势度, 值越大表明景观优势度大, 可用于识别评价范围内占优势度的斑块
景观形状指数 LSI	反映景观之间的分散或聚集程度
蔓延度 CONTAG	反映景观中不同类型的团聚程度或延展趋势。蔓延度较小, 反映景观的破碎度较高
分离度 DIVISION	度量不同斑块个体分布的离散程度
香农多样性指数 SHDI	表征景观异质性, 值越大, 景观类型越丰富或各景观类型破碎化程度越高

1.3 泥沙连通性分析

使用无人机(DJI Phantom 4 Pro)开展野外航测, 分别获取高分辨率暴雨前后遥感影像。通过野外选点、相控点布设、航线规划、摄影测量作业、影像建模等步骤, 生成数字正射影像(Digital Orthophoto Model)和数字表面模型(Digital Surface Model), 基

于正射影像和实地调查勾绘出水文网络。

泥沙连通性指数IC主要用于评估流域内坡沟系统泥沙输移的潜在联系, Borselli等^[11]提出了泥沙连通性的计算方法, 该方法考虑了汇流区上游的基本情况和下游泥沙输移路径的基本特征, 其中上坡模块 D_{up} 考虑了侵蚀源区坡度、面积和土地利用计算泥沙

向下游流动的可能性,下坡模块 D_{dn} 表示泥沙沿着径流路线到达指定沟道的可能性,如图 2 所示,计算公式如下:

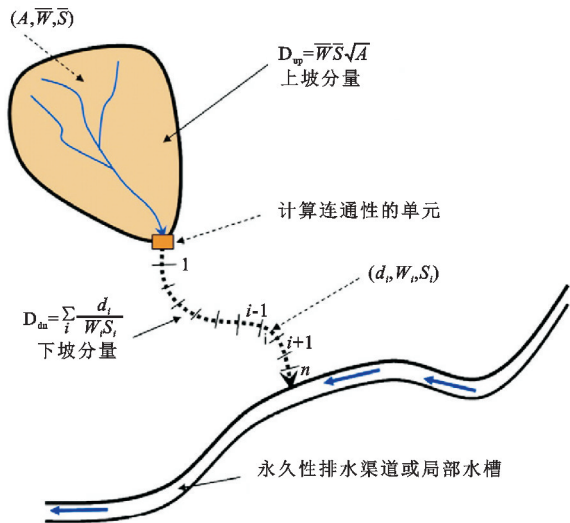


图 2 泥沙连通性指数表征示意图(Cavalli 等^[12])

$$IC = \lg\left(\frac{D_{up}}{D_{dn}}\right) = \lg\left(\frac{\overline{W} \overline{S} \sqrt{A}}{\sum_i \frac{d_i}{W_i S_i}}\right) \quad (1)$$

式中: D_{up} 和 D_{dn} 分别为连通性的上 d 坡分量和下坡分量; \overline{W} 为上坡贡献面积的平均加权因子; \overline{S} 为上坡贡献面积 (m/m) 的平均坡度; A 为上坡贡献面积 (m^2); d_i 为第 i 个单元沿最陡下坡方向的流路长度 (m); W_i 和 S_i 分别为第 i 个单元的权重因子和斜率梯度。IC 定义在 $[-\infty, +\infty]$ 范围内,IC 值越大,连通性越大。

权重因子 W 通过 MATLAB R2018b 进行计算,Cavalli 等^[12] 考虑到土地利用和土壤表面特征对径流和泥沙通量的影响,基于高分辨率数字高程模型,改进了连通性指数,使用地形表面粗糙度的局部度量,即粗糙度指数(RI)作为权重因子 W 。粗糙度指数计算为残差地形在几米尺度下的标准差。残差地形计

算为原始 DTM(2.5 m 分辨率)与平滑版本之间的差值,在残差地形网格的 5×5 单元移动窗口中计算残差地形值的标准差。计算公式如下:

$$RI = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{25} (x_i - x_m)^2}{25}} \quad (2)$$

式中:25 为 5×5 单元移动窗口内的处理单元数; x_i 为移动窗口内剩余地形的一个特定单元的值; x_m 为 25 个单元值的平均值。

权重因子计算如下:

$$W = 1 - \left(\frac{RI}{RI_{max}}\right) \quad (3)$$

式中: RI_{max} 为研究区 RI 的最大值。

1.4 统计分析与制图

利用 SedInConnect 2.3 软件计算研究区域暴雨前后的泥沙连通性指数。采用 ArcGIS 10.2 对逐像元泥沙连通性指数进行统计,并进行空间分析与制图,应用 ENVI 5.3 进行地形信息提取与可视化。采用 MATLAB R2018b 绘制泥沙连通性频率分布图。

2 结果与分析

2.1 蔡家川流域极端暴雨特征

流域内 2021 年 10 月 1 日至 10 月 7 日降雨分布情况如图 3 所示,研究时段内,蔡家川农地流域降雨历时为 84 h,累计降雨量 160.4 mm,降雨强度 1.9 mm/h,最大 10 min 降雨强度为 23.4 mm/h,最大 30 min 降雨强度为 17.6 mm/h。本次极端降雨事件从 10 月 3 日凌晨 0 时起至 10 月 6 日 16 时结束,期间出现了 4 个峰值,分别出现在 10 月 3 日上午,10 月 4 日上午、10 月 4 日下午以及 10 月 5 日夜间至 10 月 6 日凌晨。根据吉县森林生态系统国家野外观测站近 60 年降雨记录进行频率计算得出,本次国庆期间降雨的频率 0.16%,为百年一遇的极端暴雨。

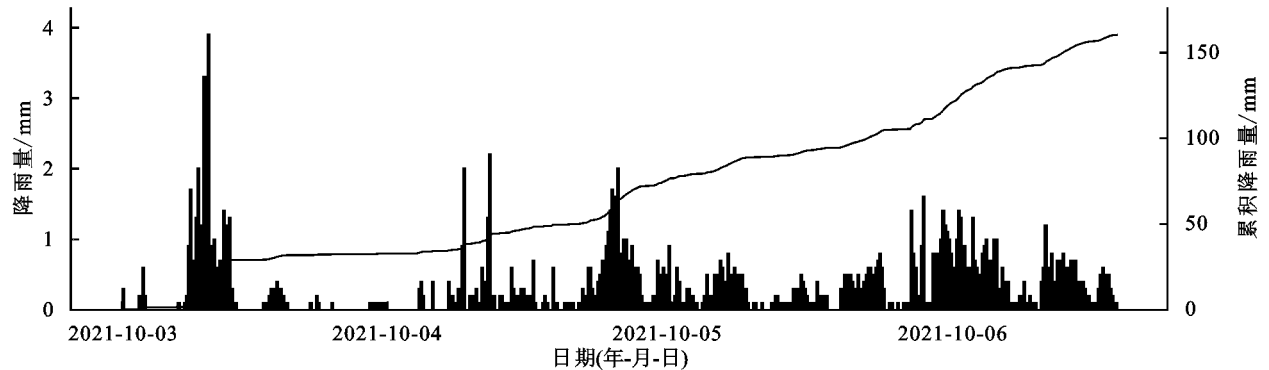


图 3 研究时段内降雨特征

2.2 暴雨前后景观格局分析

图 4 所示暴雨前后流域景观格局特征,通过无人 机航拍影像可发现,极端暴雨事件前后(图 4A,B)坝

地景观格局发生改变。暴雨前后景观格局指数计算结果如表2所示,由表可知较之暴雨前,暴雨后斑块

密度、景观形状指数和分离度指数增加,最大斑块指数、蔓延度指数和香浓多样性指数降低。

表2 暴雨前后景观格局指数变化

时段	斑块密度 PD	最大斑块指数 LPI	景观形状指数 LSI	蔓延度 CONTAG	分离度 DIVISION	香浓多样性指数 SHDI
暴雨前	4032.11	76.73	8.21	47.62	0.40	0.64
暴雨后	4068.31	58.23	9.95	37.89	0.59	0.54

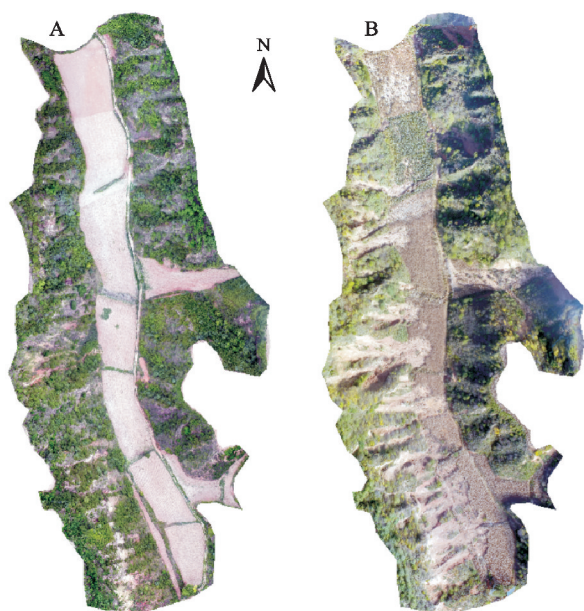
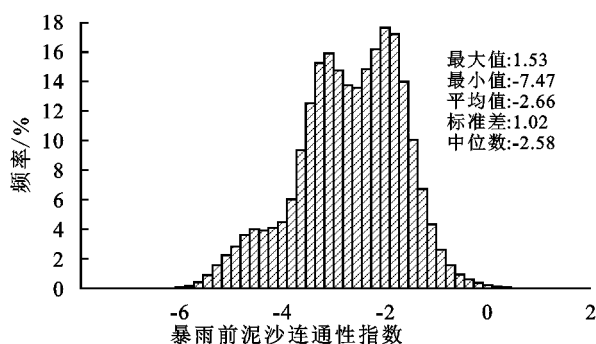


图4 暴雨前后坝控流域景观格局(A为暴雨前,B为暴雨后)

2.3 暴雨前后泥沙连通性

暴雨前后坡沟系统泥沙连通性指数时空变化特征如图5所示,由图可知,暴雨前后坡面至沟道泥沙连通性变化显著。沟道是泥沙连通性变化的显著区



域。暴雨前流域内泥沙连通性呈显著的空间异质性,主要集中于 $(-5, -1)$ 之间,其中最大值为1.53,最小值为-7.47,而暴雨后流域内泥沙连通性分布较为均匀,主要集中于 $(-3, -1)$ 之间,最大值为1.60,最小值为-8.55。对比暴雨前后频率分布图可知(图6),暴雨后泥沙连通性增大,且高泥沙连通性指数占比较暴雨前增加。

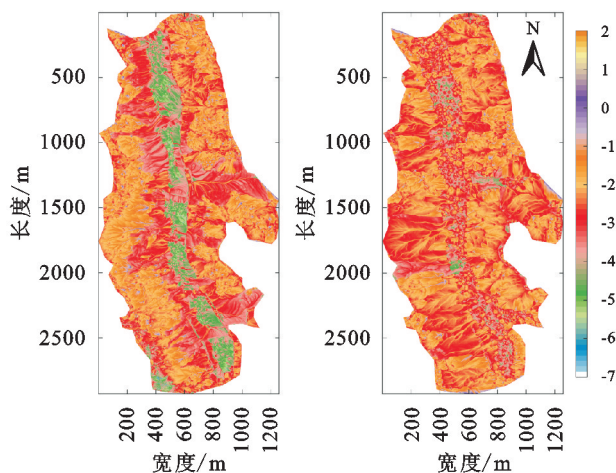


图5 暴雨前后流域泥沙连通指数空间分布

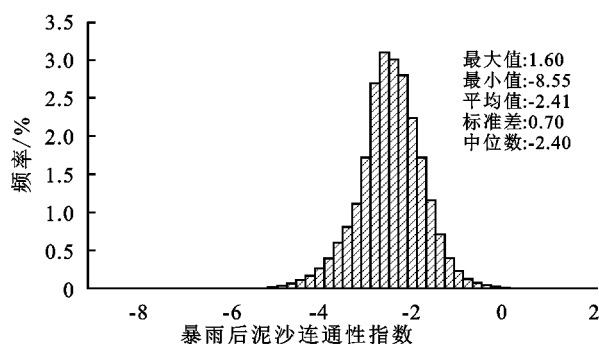


图6 泥沙连通性指数频率分布

2.4 浅层滑坡发生的地形特征

对暴雨后浅层滑坡点位识别并对滑坡点位地理信息进行提取,结果如图7所示。将沟道部分滑坡导致的泥沙淤积剔除后,进行了坡面滑坡位点处暴雨前后泥沙连通性指数的对比,如图8所示。由图可知,暴雨前后发生滑坡处的泥沙连通性指数总体范围变化不大,在 $(-5, -1)$ 之间,暴雨前最大值为0.76,最小值为-5.33,暴雨后最大值为0.83,最小值为-5.68。较

之暴雨前,暴雨后发生滑坡的位置泥沙连通性减小。结合滑坡点位坡度频率分布和坡度占比可知,流域内滑坡多发生在坡度 $0^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 和 $40^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 的条件下,所占比例分别为29.11%,17.74%。

3 讨论

植被和工程措施是开展生态治理的主要途径,小流域是实施生态恢复的基本单元,鉴于水文过程对气候—

植被—地貌综合效应的高度非线性,基于连通性视角解析坡沟系统对极端气候变化的响应,不仅是残塬沟壑区,还是脆弱生态系统开展流域综合治理的关键。

人们基于“源—汇”理论,将坡面裸地和植被斑块分别作为径流泥沙的“源”与“汇”,构建了不同的景观格局指数,用于表征植被对功能连通性的影响。地表格局的空间结构影响景观单元“源”和“汇”关系,改变了径流和泥沙的输移路径,所以泥沙连通性的变化在很长一段时间内是高度动态的。本文研究结果表明,极端降雨发生显著影响坡沟系统景观格局。暴雨后流域斑块数量增加,且最大斑块指数减小,表明极端暴雨发生使坡沟系统景观格局破碎化。暴雨前后景观形状指数增加,暴雨前 LSI 值为 8.21,暴雨后为 9.95。蔓延度指数 CONTAG 与 LSI 指数的变化特征相反,暴雨前蔓延度指数为 47.62,暴雨后为 37.89,蔓延度指数降低说明景观格局的破碎度较高,而景观形状指数的增加说明不同景观类型聚集的程度增加,此外,香农多样性指数 SHDI 在暴雨前为 0.64,暴雨后降低至 0.54,说明暴雨事件降低了坡沟系统景观丰富度。

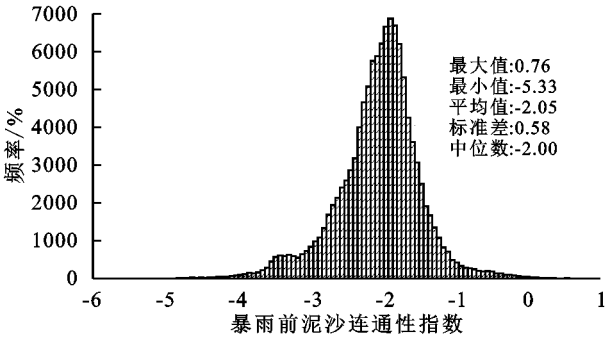


图 8 暴雨前后滑坡点泥沙连通性指数频率分布

在小流域生态建设中,工程措施的应用形成多样的微地形,重塑原有下垫面结构,改变地表粗糙度、强化降雨拦蓄功能,沟道作为径流对地表冲刷、搬运形成的线性排水渠道。一般降雨条件下,淤地坝的修建可拦截沟道中的径流泥沙,使泥沙停留在沟道内,降低了沟道的泥沙连通性^[13-14]。卫伟等^[15]对黄土丘陵区极端暴雨条件下径流和泥沙对暴雨的响应研究得到,在极端暴雨条件下,径流更易发生,危害性也更强。魏霞等^[16]对黄土高原坡沟系统径流泥沙的研究结果表明,降雨量越大、降雨强度越强,产流和产沙量也越多。在本文的研究结果中,当极端暴雨发生后,淤地坝的泥沙连通性较暴雨前增大。这与张意奉等^[17]以及唐柄哲^[18]的研究结果一致。这也表明极端暴雨会提高淤地坝的泥沙连通性,流域内泥沙从“源”到“汇”的连通性明显增强,流域内发生水土流失的可能性增加,淤地坝的拦沙效益降低。

坡度会影响岩土应力分布^[19],坡度不同抵抗

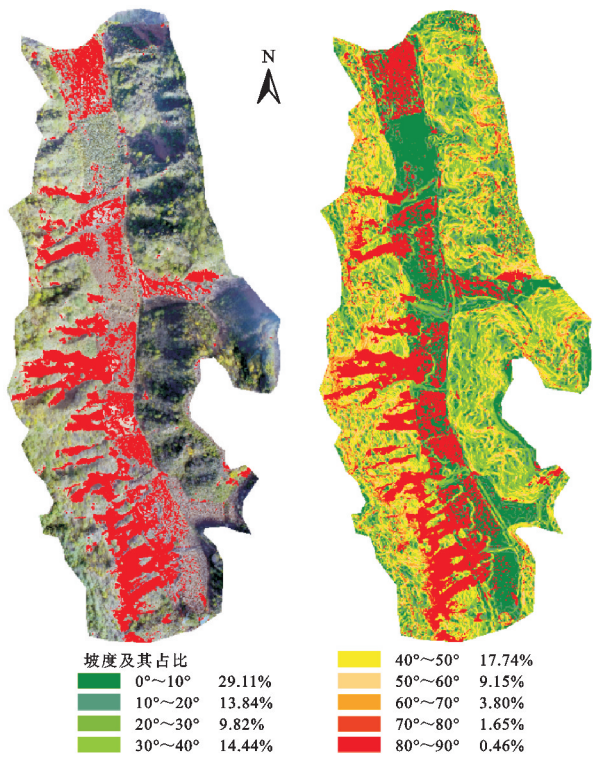
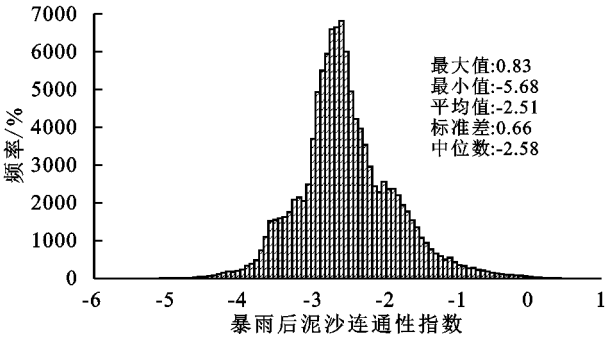


图 7 暴雨后滑坡点识别与坡度频率分布



土壤侵蚀的能力不同。Fang 等^[20]的研究结果表明,随着坡度的增加,径流和泥沙的输移能力增加使土壤流失速率增加。Caviedes-Voullième 等^[21]的研究结果表明,坡度越大,径流深越深,侵蚀的可能性越大,泥沙源区与汇区连通的可能性越大,泥沙连通性就越大,即坡度与泥沙连通性具有一致性。结合泥沙连通性的计算公式,上坡分量 D_{up} 主要考虑侵蚀源区坡度、面积和土地利用,下坡分量 D_{dn} 主要考虑水流到达水文出口的路径长度,也表明坡度越陡泥沙连通性越大。本文对暴雨前泥沙连通性指数的计算结果表明,陡峭的坡面比平坦的沟道泥沙连通性大。这也与唐柄哲^[18]关于坡沟系统泥沙连通性易受坡度影响的结果以及 Duvert 等^[22]的研究结果一致。许阳光等^[23]的研究结果表明极端暴雨条件下坡面水分更容易饱和,水土流失易发生。极端降雨发生时,研究区域内坡面部分土壤迅速饱和,产生的径流在沿坡面沟壑向沟道部分输移的过程中携带着地表被剥离的物

质以泥沙形式输移,到达沟道。由于沟道内部为农田,长期耕作使得该部分土壤表层疏松,下层密实,水分入渗率低,土壤抵抗侵蚀的能力降低^[24],加之沟道部分平坦的地形条件,坡面径流泥沙沉积于沟道,导致沟道泥沙连通性明显增大。

本文采用目视解译的方法进行监督分类对暴雨后研究区滑坡位点进行了识别,滑坡位点与暴雨后实地勘测基本相符合,滑坡位点多集中于坡面与沟道的连接部分,对比暴雨前流域内泥沙连通性指数空间分布(图5)可知,该区域也是泥沙连通性由大到小的变化区域,这与唐柄哲^[18]运用泥沙连通性指数进行水土流失热点识别时得到的泥沙连通性指数变化的节点一致。对水土流失热点区域的坡度因子进行提取,发现滑坡多发生在坡度 $0^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 和 $40^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 的地形条件下。其中, $40^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 是坡面部分发生滑坡的主要位置,这与李阳等^[25]对同场暴雨条件下的浅层滑坡研究结果一致,即 $40^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 是研究区域内滑坡发生的峰值。而 $0^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 则是坡面部分泥沙输移到沟道内部沉积在平坦农田的区域。沟道两侧地形条件的不对称影响泥沙输移,迎风坡比背风坡接受更多的降雨,进而产生更多的径流和泥沙^[26]以及较高的侵蚀率,因此滑坡位点主要集中于沟道右侧。水土流失热点区域的准确识别能够为开展水土流失预防以及暴雨后的灾后管理提供理论依据。通过对暴雨前后泥沙连通性进行对比,可知滑坡位置的泥沙连通性在暴雨后有一定的减小,结合暴雨前后泥沙连通性指数的空间分布特征,发现在暴雨发生后,该部分滑坡产生的泥沙沿着坡面输移到沟道内沉积,致使暴雨后该部分泥沙连通性减小,沟道内农田泥沙连通性明显增大,所以采用泥沙连通性指数可以很好地表征暴雨过程泥沙输移的源汇关系,这也与宁怡楠^[27]、Bracken等^[28]的研究结果一致。

4 结论

(1) 极端暴雨事件发生显著影响坡沟系统景观格局。极端暴雨发生使坡沟系统景观格局破碎化且破碎度较高、坡沟系统景观丰富度降低。

(2) 暴雨前流域内泥沙连通性分布不均匀,暴雨后分布较为均匀整体增大,且高泥沙连通性指数占比较暴雨前增加,坡度越大泥沙连通性越大,沟道泥沙连通性显著增大。极端暴雨提高了淤地坝的泥沙连通性,降低了淤地坝的拦沙效益。

(3) 暴雨后滑坡位点泥沙连通性减小,滑坡多发生在 $0^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 和 $40^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 坡度条件,所占比例分别为29.11%,17.74%。结合地形条件泥沙连通性指数可

以用于识别水土流失位点,还可以表征极端暴雨下滑坡的发生过程,即可以更好地理解事件对极端暴雨的响应。

参考文献:

- [1] 曾茂林,朱小勇,康玲玲,等.水土流失区淤地坝的拦泥减蚀作用及发展前景[J].水土保持研究,1999,6(2):127-134.
- [2] 朱显谟.再论黄土高原国土整治“28字方略”[J].科技导报,1996(03):44-48.
- [3] 袁水龙,张卫华,王湛.黄土丘陵区小流域淤地坝系安全评价体系研究[J].西部大开发(土地开发工程研究),2018,3(5):40-45,50.
- [4] 杭朋磊.黄土高原淤地坝系洪灾溃决风险评价[D].西安:西安理工大学,2020.
- [5] 王彬.极端降雨敲响气候变化警钟[J].科学新闻,2021,23(4):47-49.
- [6] 于洋,刘尧,华廷,等.基于文献计量的水文连通性研究热点与趋势[J].水资源与水工程学报,2021,32(02):1-9.
- [7] Thompson C J, Fryirs K, Croke J. The disconnected sediment conveyor belt: patterns of longitudinal and lateral erosion and deposition during a catastrophic flood in the Lockyer Valley, South East Queensland, Australia [J]. River Research and Applications, 2016,32(4):540-551.
- [8] Marchi L, Comiti F, Crema S, et al. Channel control works and sediment connectivity in the European Alps [J]. Science of the Total Environment, 2019,668:389-399.
- [9] 支再兴.淤地坝对沟道水流的调控作用研究[D].西安:西安理工大学,2018.
- [10] 赵宇辉,张建军,于洋,等.晋西黄土区蔡家川小流域切沟的空间分布及形态特征[J].农业工程学报,2022,38(4):151-158.
- [11] Borselli L, Cassi P, Torri D. Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment [J]. Catena, 2008,75(3):268-277.
- [12] Cavalli M, Trevisani S, Comiti F, et al. Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments [J]. Geomorphology, 2013,188:31-41.
- [13] Shi P, Zhang Y, Ren Z P, et al. Land-use changes and check dams reducing runoff and sediment yield on the Loess Plateau of China [J]. Science of the Total Environment, 2019,664:984-994.
- [14] Alfonso-Torreño A, Schnabel S, Gómez-Gutiérrez Á, et al. Effects of gully control measures on sediment yield and connectivity in wooded rangelands [J]. Catena, 2022,214:106259.
- [15] 卫伟,陈利顶,傅伯杰,等.黄土丘陵沟壑区极端降雨事件及其对径流泥沙的影响[J].干旱区地理,2007,116

- (06):896-901.
- [16] 魏霞,李勋贵,李占斌.黄土高原坡沟系统径流泥沙过程[J].兰州大学学报:自然科学版,2010,46(5):7-10,18.
- [17] 张意奉,焦菊英,唐柄哲,等.特大暴雨条件下小流域沟道的泥沙连通性及其影响因素:以陕西省子洲县为例[J].水土保持通报,2019,39(1):302-309.
- [18] 唐柄哲.黄土丘陵沟壑区坡沟系统侵蚀产沙特征及泥沙连通性研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2021.
- [19] 胡胜,邱海军,王宁练,等.地形对黄土高原滑坡的影响[J].地理学报,2021,76(11):2697-2709.
- [20] Fang H Y. Effect of soil conservation measures and slope on runoff, soil, TN, and TP losses from cultivated lands in northern China [J]. *Ecological Indicators*, 2021,126:107677.
- [21] Caviedes-Voullième D, Ahmadienia E, Hinz C. Interactions of microtopography, slope and infiltration cause complex rainfall-runoff behavior at the hillslope scale for single rainfall events [J]. *Water Resources Research*, 2021,57(7):1-20.
- [22] Duvert C, Gratiot N, Anguiano-Valencia R, et al. Baseflow control on sediment flux connectivity: Insights from a nested catchment study in Central Mexico [J]. *Catena*, 2011,87(1):129-140.
- [23] 许阳光,郭文召,王文龙,等.极端降雨下黄土高原草被沟坡浅层滑坡特征及其对产流产沙的影响[J].生态学报,2022,42(19):7898-7909.
- [24] Bogunovic I, Pereira P, Kisic I, et al. Tillage management impacts on soil compaction, erosion and crop yield in Stagnosols (Croatia) [J]. *Catena*, 2018,160:376-384.
- [25] 李阳,张建军,魏广阔,等.晋西黄土区极端降雨后浅层滑坡调查及影响因素分析[J].水土保持学报,2022,36(5):44-50.
- [26] Paik K, Kim W. Simulating the evolution of the topography-climate coupled system [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2021,25(5):2459-2474.
- [27] 宁怡楠.黄土高原典型小流域水文连通性变化及其与径流泥沙量的响应关系[D].北京:中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心),2021.
- [28] Bracken L J, Turnbull L, Wainwright J, et al. Sediment connectivity: a framework for understanding sediment transfer at multiple scales [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2015,40(2):177-188.

(上接第227页)

- [13] 马茜茜,肖建华,姚正毅,等.1960—2017年阿拉善高原风蚀气候侵蚀力时空演变[J].地理科学,2021,41(6):1096-1104.
- [14] 璩向宁.宁夏沙区生态环境建设的基本理论问题[J].水土保持研究,2002,9(3):155-157.
- [15] 崔文斌.宁夏某铜尾矿风蚀特征及潜力评价[D].银川:宁夏大学,2021.
- [16] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements-FAO Irrigation and Drainage Paper 56 [M].Rome: FAO,1998.
- [17] 贾路,于坤霞,邓铭江,等.西北地区降雨集中度时空演变及其影响因素[J].农业工程学报,2021,37(16):80-89.
- [18] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].2版.北京:气象出版社,2007.
- [19] 邵骏.基于交叉小波变换的水文多尺度相关分析[J].水力发电学报,2013,32(2):22-26,42.
- [20] Breiman L. Random forests [J]. *Machine Learning*, 2001,45(1):5-32.
- [21] 雷杨娜,雷田旺,程路.陕西省风蚀气候侵蚀力时空演变特征[J].陕西气象,2022(1):28-34.
- [22] 刘旭东,左合君,闫敏.锡林郭勒地区风蚀气候侵蚀力时空变化规律研究[J].内蒙古师范大学学报:自然科学汉文版,2019,48(2):142-147,153.
- [23] 梁会,田美荣,钱金平,等.基于风蚀模型的宁夏土壤风蚀特征及影响因素[J].水土保持研究,2019,26(1):34-40.
- [24] 杨修群,王国民,张向东,等.大气环流与灾害性天气气候研究:黄土松先生学术成就和贡献回顾[J].气象科学,2020,40(5):569-584.
- [25] Meijers A J S, Cerovečki I, King B A, et al. A see-saw in Pacific subantarctic mode water formation driven by atmospheric modes [J]. *Geophysical Research Letters*, 2019,46(22):13152-13160.
- [26] 董海霞.变化环境下降水-气温相依结构的非一致性诊断及驱动力探究[D].西安:西安理工大学,2021.
- [27] 祁栋林,李晓东,苏文将,等.近50年青海省风蚀气候侵蚀力时空演变趋势[J].水土保持研究,2015,22(6):234-239.
- [28] 任景全,郭春明,李建平,等.气候变化背景下吉林省风蚀气候侵蚀力时空特征[J].水土保持研究,2017,24(6):233-237.