

西柳沟流域拦沙坝沟道冲刷减蚀能力模拟

封扬帆^{1,2}, 李 鹏^{1,2}, 张 祎^{1,2}, 周世璇^{1,2}, 董亚维³, 李晶晶³

(1.西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室,西安 710048;
2.旱区生态水文与侵蚀灾害防治国家林业和草原局重点实验室,西安 710048;3.黄河水利委员会黄河上中游管理局,西安 710021)

摘要:为探讨风水交错侵蚀区拦沙坝建设对流域沟道侵蚀动力过程及沟道冲刷侵蚀能力的影响,通过分布式水文模型 MIKE SHE 以及一维水动力模型 MIKE 11 耦合模拟了西柳沟流域洪水过程,分析了新建拦沙坝建设前后流域沟道侵蚀动力变化,通过建立流域次暴雨水沙响应模型估算了新建拦沙坝工程运行期内的沟道冲刷减蚀能力。结果表明:(1)拦沙坝建成后,流域出口处洪峰流量减少 40.90%,洪水总量减小 35.85%,显著改变了西柳沟流域洪水过程,洪水过程线明显坦化;(2)流域主沟道平均最大流速、最大径流剪切力和最大径流功率分别减小 21.66%,22.02%和 34.31%,有效降低了沟道侵蚀动力;(3)在多年平均降水情况下,预计流域新建拦沙坝工程在 25 年工程运行期内的冲刷减蚀能力可达到 3 309.49 万 t。研究结果可为风水交错侵蚀区拦沙坝减蚀能力评估提供理论支撑。

关键词: 拦沙坝; 冲刷减蚀; MIKE 模型; 西柳沟

中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2022)05-0024-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2022.05.004

Simulation on the Gully Erosion Reduction Ability of Check Dam in Xiliugou Basin

FENG Yangfan^{1,2}, LI Peng^{1,2}, ZHANG Yi^{1,2}, ZHOU Shixuan^{1,2}, DONG Yawei³, LI Jingjing³

(1.State Key Laboratory of Eco-hydraulic Engineering in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048; 2.State Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Ecological Hydrology and Disaster Prevention in Arid Regions, Xi'an 710048; 3.Upper and Middle Yellow River Bureau, YRCC, Xi'an 710021)

Abstract: In order to scientifically understand the effect of the construction of check dams on the erosion dynamics and the ability to reduce gully erosion in the wind-water cross erosion area, in this study, the Xiliugou Basin, one of the ten tributaries, was taken as the research area, and the differences of flood process, erosion dynamics and energy in gully after the construction of check dams were simulated and quantitatively calculated by coupling the distributed hydrological model MIKE SHE and the one-dimensional hydrodynamic model MIKE 11. The reduction of gully erosion by check dams was also estimated. The results showed that: (1) The check dams decreased the flood peak and flood volume of the outlet section by 40.90% and 35.85%, respectively. (2) The average flow velocity, runoff shear force and runoff power along the main gully of the watershed were dropped by 21.66%, 22.02% and 34.31%, respectively. (3) During the planned operation period of the project, the check dams reduced the amount of gully erosion by 33.094 9 million tons under the condition of multi-year average precipitation. The construction of check dams has significantly changed the flooding process of Xiliugou Basin, which alleviated the erosion dynamics along the main channel as well as provided effective erosion mitigation effects.

Keywords: check dam; gully erosion reduction; MIKE model; Xiliugou Basin

黄土高原地区地形破碎,土壤抗蚀能力弱,严重
的水土流失导致生态环境恶化,人民生命财产安全面
临隐患,社会经济发展受到极大制约^[1]。为治理严重
的水土流失现象,我国在坡面实施了退耕还林(草)等

生态措施,在沟道实施淤地坝、拦沙坝建设等工程措施^[2]。截至2019年底,共建设淤地坝58776座,淤地面积达到927.57 km²^[3]。

作为最主要的沟道治理工程措施,淤地坝建设有效减少入黄泥沙,经推算^[4],黄河潼关以上地区现存淤地坝2007—2014年拦沙量为12526万t/a,占同时期潼关站年均来沙量的66.6%。淤地坝不仅具有直接的蓄水拦沙作用,还有间接减蚀作用^[5]。Yuan等^[6]通过MIKE耦合模型对王茂沟流域坝系进行研究得到,淤地坝建设后次暴雨条件下洪峰流量及洪水总量分别减少65.3%和58.7%,同时输沙量减幅可达到83.9%;Ran等^[7]对淤地坝重度淤积情景下进行模拟发现,即使在淤地坝接近淤满的情况下,大部分降水径流事件的洪峰平均减少率及延迟率仍可达到6.5%和5~8 min,且淤积区尾端回水削弱了局部水力侵蚀,间接减少流域总产沙量^[8],说明淤地坝建设及运行能够有效影响坝址上、下游一定范围内的沟道比降、侵蚀基准面等地形条件及产汇流条件,削弱洪水对沟道的冲刷,从而减少土壤侵蚀量,这部分减蚀作用可定义为沟道冲刷减蚀作用。同时,淤地坝还有重力减蚀作用,通过坝地淤积局部抬高侵蚀基准面,控制沟蚀发育,且增加流域凹形边坡,减少塑性屈服区体积,在一定程度上缓解流域重力侵蚀^[9]。而作为风水交错侵蚀区的主要治沟工程之一,拦沙坝能够发挥与淤地坝相同的拦沙减蚀作用,同时还能够置换出部分黄河输沙用水量,换取黄河用水指标,为缓解当地水资源供需矛盾提供一定保障^[10]。目前对于沟道工程措施的减水减沙作用研究主要集中在丘陵沟壑区,而对于风水交错侵蚀区内拦沙坝对流域侵蚀动力及能量调控作用的研究仍相对较少,且很少有学者论证或量化其间接减蚀能力。

2019年起,鄂尔多斯市以西柳沟为试点流域之一开展拦沙换水试点工程,旨在通过建设一批拦沙坝工程,探索有效缓解当地水土流失、水资源置换及黄河宁蒙段防洪防凌压力的治理措施。因此,本研究基于鄂尔多斯拦沙换水试点工程,以西柳沟流域为研究区域,针对流域内规划新建拦沙坝工程整体的沟道冲刷减蚀作用进行模拟研究。通过耦合分布式水文模型MIKE SHE和一维水动力模型MIKE 11,模拟新建拦沙坝工程建设前后流域洪水过程,分析拦沙坝对沟道侵蚀动力过程的影响,并利用次暴雨水沙响应模型计算拦沙坝工程运行期内的沟道冲刷减蚀能力,该研究旨在为风水交错侵蚀区拦沙坝效益评估提供理论支撑。

1 研究区概况

西柳沟流域为黄河十大孔兑之一,地处内蒙古自治区鄂尔多斯市境内(109°24'—110°00'E,39°47'—

40°30'N)。流域总面积1356.3 km²,龙口拐水文站以上控制面积为1157 km²,总河长106.5 km,平均比降3.6‰。流域属半干旱大陆性气候,四季变化明显,多年平均气温6.4℃,多年平均降水量271.2 mm,平均蒸发量2200 mm。流域上游属于黄土丘陵沟壑区,比降较大,以水力侵蚀方式为主,多年平均侵蚀模数为8500 t/(km²·a)。中游为库布齐沙漠,属于风沙区,以固定和半固定沙丘为主,主导侵蚀力为风力,多年平均侵蚀模数超过10000 t/(km²·a)。下游主要为冲积平原区,比降较小,侵蚀轻微但河床淤积、漫滩严重。

西柳沟流域的主要治沟措施为淤地坝及拦沙坝,二者建设时期不同,且建设目的各有侧重。淤地坝建设始于20世纪90年代,主要为治理当地水土流失问题,截至2019年累计建成淤地坝99座,其中骨干坝37座,中型坝31座,小型坝31座,控制面积235.28 km²,总库容4679.6万m³,淤积库容2388.02万m³,已淤积库容804.65万m³。此外,为减少入黄泥沙及置换黄河下游输沙用水以提高当地供水量等,鄂尔多斯规划在西柳沟新建拦沙坝71座,其中中型坝24座,小型坝47座,工程结构均包含坝体、放水工程和溢洪道,暂定使用年限25年,控制面积131.15 km²,总库容3468.75万m³,淤积库容2234.24万m³。该工程于2019年动工,截至2021年9月,在建(含已建成)拦沙坝57座,待开工拦沙坝14座。

2 材料与方法

2.1 基础数据

西柳沟流域DEM数据来源于地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn/>)所发布的30 m分辨率地形数据。龙头拐水文站的径流、泥沙及降水数据均源自1961—1990年及2007—2012年《黄河流域水文资料》^[11]。土地利用数据来源于中国土地利用现状遥感监测数据库(<http://www.resdc.cn/>),精度为30 m。研究区新建拦沙坝数据源于鄂尔多斯拦沙换水试点工程沟道冲刷减蚀监测项目,其中包括坝型、坝址、库容及坝高等资料。

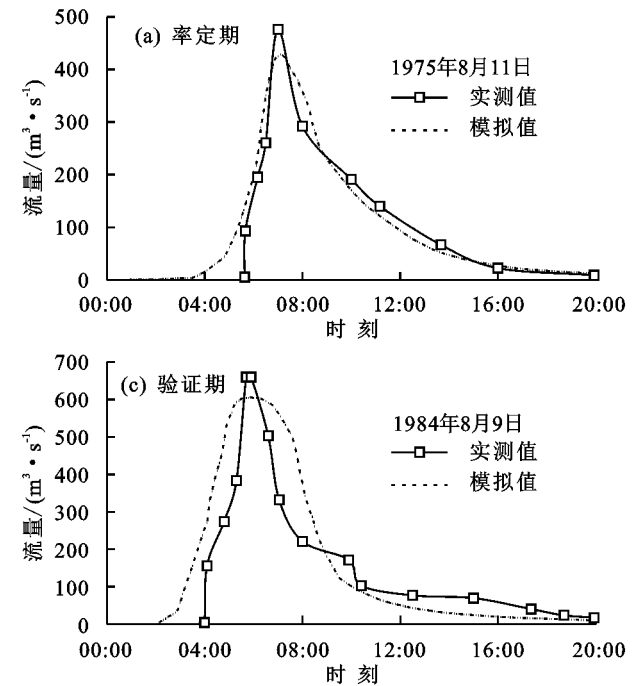
2.2 西柳沟流域水文水动力模型搭建

MIKE SHE作为具有物理意义的分布式水文模型,涵盖了陆相水文循环主要过程,包括蒸散发、坡面流、饱和流、非饱和流、地下水等及其相互作用的过程^[12],已在流域及小区尺度上得到应用^[13-15];MIKE 11模型以水动力模块为核心^[16],此外还包括降雨径流、对流扩散、水质等模块。本研究利用MIKE SHE坡面流模块模拟降雨及坡面产汇流过程,利用MIKE 11对流域内主要沟道水动力特征进行模拟,耦合二者建立西柳沟流域水文水动力模型。

构建研究区 MIKE SHE 模型,以 100 m×100 m 尺度网格对流域进行离散。利用 ArcGIS 10.2 软件将 30 m 分辨率 DEM 数据转为点文件并导入 MIKE SHE 模型,经反距离权重插值得到地形文件。根据研究区实测次降水及洪水数据资料,利用 MIKE 软件转化为相应时间序列文件(.dfs0)并输入模型,用以率定验证及后续模拟,由于流域次降雨过程中蒸发量很小,因此在本研究中忽略不计。根据西柳沟流域地形地貌特点,将土地利用类型划分为耕地、裸地、草地、林地、沙地、河湖库塘、建设用地和交通用地,利用 ArcGIS 10.2 对各地类的曼宁系数进行赋值,导出为矢量点文件(.shp)后输入模型。新建拦沙坝库容以滞蓄洪量概化,即超出滞蓄洪量的水量才会流入下游。利用 30 m 分辨率 DEM 数据通过 ArcGIS 10.2 中的 SWAT 工具提取出西柳沟流域河网文件(.shp)并导入 MIKE 11 模型,研究区共生成 18 条沟道。将 MIKE SHE 模型与 MIKE 11 模型耦合,建立西柳沟流域水文水动力模型。

2.3 率定与验证

模型可信度评估通常以 Nash-Sutcliffe 效率系数 NSE[公式(1)]、决定系数 R^2 [公式(2)]及相对误差 R_e [公式(3)]作为判别参数^[15],Nash-Sutcliffe 效率系数 NSE 用以衡量模型模拟径流水文曲线变化能力,决定系数 R^2 可反映实测径流与模拟过程值的线性相关性,相对误差 R_e 表示实测值与模拟值的偏差。



本研究同样选取上述参数对西柳沟流域水文水动力模型进行率定验证。以流域把口站龙头拐水文站实测径流过程作为率定参考值,选取 4 场不同量级的降雨洪水过程,实测数据齐全精确((观测取样时间间隔短),雨型均属于研究区出现频率较高的前期集中型,且洪水过程较独立,涨退水过程完整。以 1975—1979 年 2 场暴雨洪水过程对模型率定(图 1a、图 1b),1984—1988 年 2 场暴雨洪水过程对模型进行验证(图 1c、图 1d),率定及验证结果见表 1。率定期洪峰流量相对误差 R_e 为 9.91% 和 4.74%,NSE 分别为 0.81 和 0.87, R^2 为 0.86 和 0.88;验证期 R_e 为 8.22% 和 11.03%,NSE 分别为 0.64 和 0.66, R^2 为 0.78 和 0.71。率定期和验证期 NSE 均高于 0.60,说明本研究搭建模型可信度较高。

$$NSE=1-\frac{\sum_{i=1}^n(S_i-O_i)^2}{\sum_{i=1}^n(O_i-\bar{o})^2}\in(-\infty,1] \tag{1}$$

$$R^2=\left[\frac{\sum_{i=1}^n(O_i-\bar{o})(S_i-\bar{s})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n(O_i-\bar{o})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^n(S_i-\bar{s})^2}}\right]^2 \tag{2}$$

$$R_e=\frac{S_i-O_i}{O_i} \tag{3}$$

式中: O_i 为径流实测值 (m^3/s); S_i 为径流模拟值 (m^3/s); $\bar{o}$ 为径流实测值均值 (m^3/s); $\bar{s}$ 为径流模拟值均值 (m^3/s)。

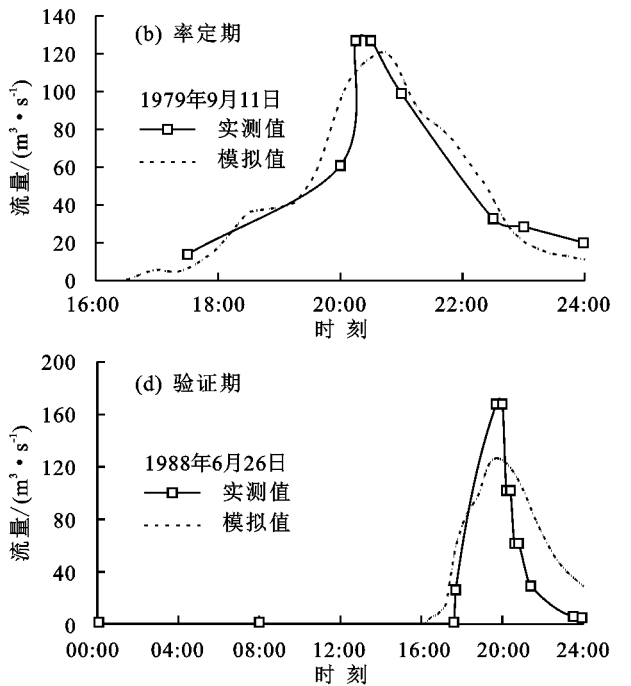


图 1 西柳沟流域模型实测及模拟值对比

2.4 沟道侵蚀动力参数计算方法

MIKE 11 水动力模型通过求解圣维南方程来获得各个时刻的断面径流量,再通过除以该断面过水面积求得断面平均流速[公式(4)],模型可直接输出断

面流速结果^[17]:

$$V=Q/A \tag{4}$$

式中: V 为断面平均流速 (m/s); Q 为断面流量 (m^3/s); A 为过水断面面积 (m^2)。

表 1 西柳沟流域模型率定及验证结果

阶段	洪水编号	洪峰流量实测值/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	洪峰流量模拟值/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	$R_e/\%$	NSE	R^2
率定期	19750811	476	429	-9.91	0.81	0.86
	19790911	127	121	-4.74	0.87	0.88
验证期	19840809	660	606	-8.22	0.64	0.78
	19880626	168	127	-11.03	0.64	0.73

沟道径流剪切力(τ)采用 Foster 等^[18]提出的公式计算:

$$\tau=\gamma RJ \tag{5}$$

式中: τ 为径流剪切力(N/m^2); γ 为水流容重(kg/m^3); R 为水力半径(m); J 为水力能坡。

径流功率(ω)为单位面积上水体势能随时间的变化率,由 Bagnold^[19]于 1966 年提出:

$$\omega=\tau V \tag{6}$$

式中: ω 为径流功率 $[\text{N}/(\text{m} \cdot \text{s})]$; τ 为径流剪切力(N/m^2); V 为平均流速(m/s)。

本研究选取最大流速、最大径流剪切力及最大径流功率 3 种侵蚀动力参数进行分析,其中最大流速、最大径流剪切力均由 MIKE 模型直接输出,而断面各时刻的断面平均流速与径流剪切力相乘可得到对应的径流功率[公式(6)],选取其中最大值得出最大径流功率。

2.5 流域次暴雨水沙响应模型

以基于径流侵蚀功率(P)的次暴雨水沙响应模型来描述流域径流侵蚀产沙特征,其中径流侵蚀功率综合了 2 个重要侵蚀动力因子——径流深(H)、洪峰流量模数(Q'_m),能较好反映水力侵蚀的作用^[20]。本节通过计算西柳沟流域出口控制断面的径流侵蚀功率(P)揭示淤地坝对流域侵蚀能量过程的调控作用,径流侵蚀功率(P)及输沙模数(M_s)计算采用鲁克新^[21]提出的方法:

$$P=Q'_m H \tag{7}$$

$$Q'_m=Q'/A' \tag{8}$$

$$H=W/A' \tag{9}$$

式中: P 为沟道断面控制范围内的径流侵蚀功率 $[\text{m}^4/(\text{s} \cdot \text{km}^2)]$; Q'_m 为洪峰流量模数,表示断面的洪峰流量与断面控制面积的比值 $[\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)]$; H 为径流深(m); W 为场次径流总量(m^3); A' 为断面控制面积(km^2)。

$$M_s=S_{\text{总}}/A' \tag{10}$$

式中: M_s 为断面控制范围内的输沙模数(t/km^2); $S_{\text{总}}$ 为场次输沙总量(t); A' 为断面控制面积(km^2)。

选取龙头拐水文站所在断面作为控制断面,根据该站 1960—1990 年、2007—2012 年实测的洪水水文要素摘录表,以样本场次实测数据详实、完整作为选

择前提,以样本包含不同时期及不同量级最大含沙量作为选择依据来选取典型次暴雨洪水,从而确保所建立的水沙响应模型对于西柳沟流域侵蚀预测研究具备更好的适用性。最终选择了 22 场典型次暴雨洪水的降雨、径流、泥沙资料,计算流域次降雨洪水的径流侵蚀功率及输沙模数(表 2),建立径流侵蚀功率和流域输沙模数之间的响应关系(图 2)。

表 2 典型场次暴雨洪水参数

场次时间 (年-月-日)	最大含沙量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	径流侵蚀功率/ ($\text{m}^4 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$)	输沙模数/ ($\text{t} \cdot \text{km}^{-2}$)
1966-07-14	11.8	5.75×10^{-7}	0.57
1966-08-07	79.7	9.01×10^{-6}	12.98
1971-08-24	298.0	2.84×10^{-5}	52.42
1973-08-24	152.0	1.43×10^{-4}	153.73
1974-07-05	501.0	1.75×10^{-4}	261.72
1974-07-23	339.0	3.68×10^{-4}	464.29
1975-08-25	147.0	2.53×10^{-4}	172.84
1976-07-15	110.0	9.99×10^{-6}	12.05
1976-07-18	77.7	1.35×10^{-5}	31.60
1977-08-30	458.0	2.16×10^{-4}	291.94
1977-08-20	568.0	1.23×10^{-4}	95.60
1981-07-23	267.0	6.94×10^{-5}	76.90
1983-06-23	431.0	2.87×10^{-4}	339.28
1985-08-05	376.0	1.64×10^{-4}	157.90
1987-08-14	155.0	9.61×10^{-5}	65.75
1988-06-26	213.0	1.20×10^{-4}	76.19
1988-06-27	722.0	1.53×10^{-4}	287.72
1990-07-13	72.7	1.42×10^{-6}	10.39
1990-07-22	463.0	1.99×10^{-5}	39.41
2010-07-31	41.2	1.12×10^{-5}	6.10
2012-08-06	8.7	1.25×10^{-5}	3.11
2012-07-21	23.9	7.54×10^{-6}	0.83

经回归分析建立了用于描述研究时段内西柳沟流域次暴雨洪水径流侵蚀功率(P)与输沙模数(M_s)之间相关关系的回归方程:

$$M_s=778026P^{0.9713} \quad R^2=0.88,n=22 \tag{11}$$

式中: n 为次暴雨洪水场次。

研究过程中 MIKE 模型输出数据采用 Excel 2016 软件进行处理,利用 SPSS 22.0 软件进行聚类分析,采用 Origin 2021 软件制图。

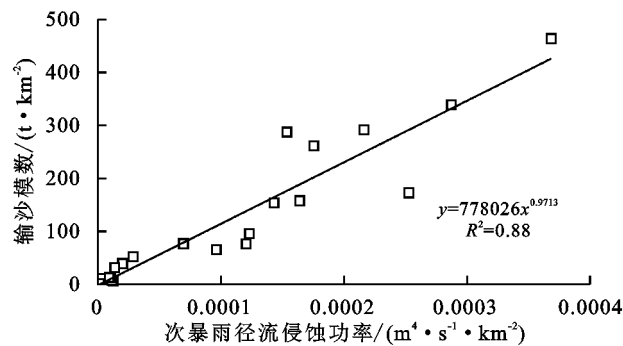


图 2 西柳沟次暴雨径流侵蚀功率与输沙模数关系

3 结果与分析

3.1 拦沙坝对洪水过程的影响

选取 1988 年 6 月 26 日的 1 场洪水作为典型场次模拟拦沙坝对流域洪水过程的影响。选取依据为其雨型属于研究区发生频次较高的前期集中型,且洪峰流量接近流域多年平均值。通过西柳沟流域水文水动力模型模拟研究区产汇流过程,对比拦沙坝建设前后 2 种工况下流域出口断面,即龙头拐水文站所在断面的次暴雨洪水特征。从图 3 可以看出,沟口出流初期,拦沙坝建设前后洪量增长情况一致;自 17:40 开始,拦沙坝建设前工况下洪量迅速增长,洪峰流量可达到 126.61 m³/s,且退水幅度明显,整个洪水过程呈现陡涨陡落的特点,洪水过程线较为“尖瘦”;而建坝后工况下涨水幅度较小,洪峰流量为 74.83 m³/s,较建坝前削减 40.90%,退水速度缓慢,洪水过程线明显坦化。此外,拦沙坝明显减小洪水总量,由于拦沙坝建设前支沟比降较大,洪水基本全部汇入下游,主沟的滞蓄水量接近于 0,洪水总量为 198 万 m³;拦沙坝建设后可拦蓄 71 万 m³洪水,流域输出洪量减少 35.85%。

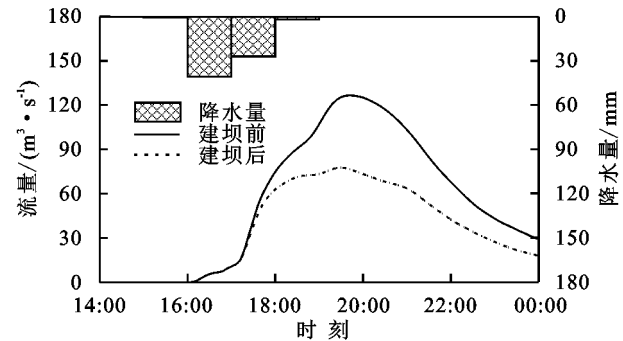


图 3 西柳沟拦沙坝建设前后流域出口洪水过程线

3.2 拦沙坝对沟道侵蚀动力的影响

3.2.1 最大流速 从图 4 可以看出,拦沙坝建设前后主沟沿程最大流速分布情况,2 种工况下流域主沟断面最大流速均呈波动式增长趋势。主沟 0~10 km 里程的流速特征基本吻合,而建设拦沙坝后自 10 km 里程起沿程最大流速低于建设前工况,且二者差异逐渐扩大。拦沙坝建设前的沿程最大流速在 63.92 km

里程处达到峰值,建设后在主沟出口处达到峰值。定量分析主沟沿程最大流速的变化,拦沙坝建设前后沿程最大流速平均值分别为 2.76,2.29 m/s,减小 21.66%;流速峰值分别为 6.06,5.31 m/s,减小 12.38%。

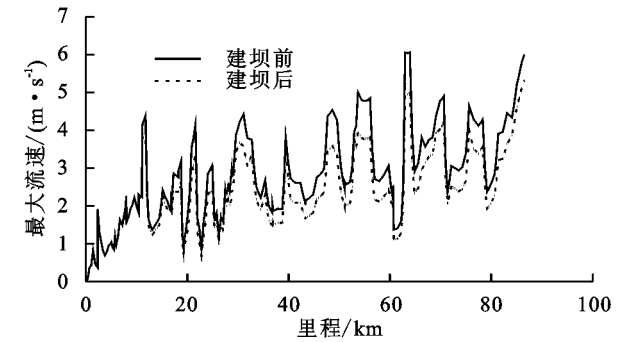


图 4 西柳沟拦沙坝建设前后主沟最大流速沿程分布

3.2.2 最大径流剪切力 拦沙坝建设前后沿程最大径流剪切力同样呈现波动式增长趋势(图 5)。建设拦沙坝后径流剪切力整体降低。在支沟及拦沙坝分布较多的河段内,2 种工况的径流剪切力最大值均位于 63.92 km,最小值均位于 60.75 km。定量分析拦沙坝建设前后最大径流剪切力变化,平均值分别为 18.93,14.76 N/m²,减小 22.02%;最大值分别为 64.94,49.32 N/m²,减小 24.05%。

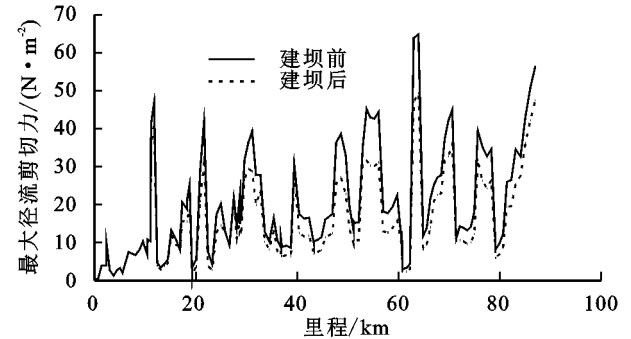


图 5 西柳沟拦沙坝建设前后主沟最大径流剪切力沿程分布

3.2.3 最大径流功率 拦沙坝建设前后沿程最大径流功率变化规律(图 6)与径流剪切力相似。从图 6 可以看出,在支沟坝系分布较多的河段内,2 种工况下径流功率最大值均位于 63.92 km,最小值均位于 60.75 km。拦沙坝建设前后,沿程最大径流功率平均值分别为 74.76,49.11 N/(m · s),最大值分别为 393.29,251.95 N/(m · s),即建设拦沙坝后径流功率平均值及最大值分别减小 34.31%,35.94%。

3.3 拦沙坝冲刷减蚀能力估算

为有效预估西柳沟流域新建拦沙坝工程的沟道冲刷减蚀能力,以西柳沟 30 年共 1 017 场事件的次降水总量和降水历时为变量,采用 K 均值聚类分析法^[22],将流域所有次降水过程划分为 4 种类型,以此作为研究区的未来降水条件,最终选取降水总量>12 mm 的侵蚀性降水量输入模型。降水类型划分结果见表 3。

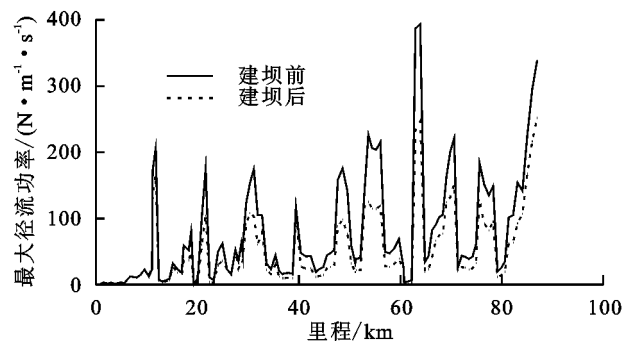


图 6 西柳沟拦沙坝建设前后主沟最大径流功率沿程分布

表 3 西柳沟流域降水类型划分					
类型	平均值		描述	数量/场	年均发生 次数/场
	降水总量/mm	降水历时/h			
1	22.21	2.18	总量小,历时长	132	4.40
2	2.98	1.45	总量小,历时短	864	28.80
3	104.15	1.00	总量大,历时短	2	0.07
4	57.39	1.08	总量大,历时长	19	0.63

由表 3 可知,西柳沟流域以第 2 类降水为主,特征为短历时且总量小,而短历时且总量大的第 3 类暴雨最少。采用 Fisher 判别函数进行验证,西柳沟流域判别函数见公式(12),其聚类结果见图 7。从图 7 可以看出,4 种降水类型的判别函数的散点图都比较聚集,说明分类结果基本合理。

$$\begin{cases} G_1=1.192P+0.207T-14.85 \\ G_2=0.153P+0.211T-1.768 \\ G_3=5.647P-0.481T-295.229 \\ G_4=3.109P-0.181T-0.504 \end{cases} \quad (12)$$

式中: G_k ($k=1,2,3,4$)表示第 k 组的分类得分; P 为降水量(mm); T 为降水历时(h)。

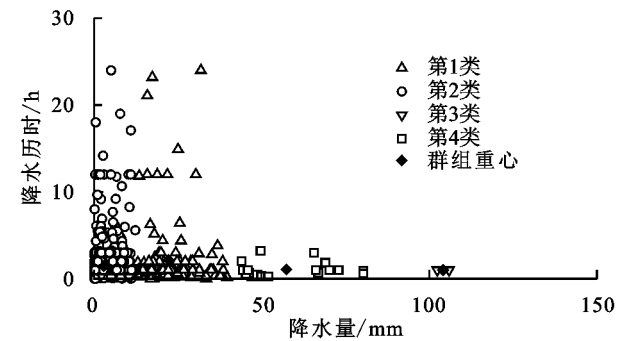


图 7 西柳沟流域降水类型判别分析结果

根据殷水清等^[22]对我国不同地区雨型划分及雨强随历时的变化关系研究可知,黄河区降水主要为前期集中型,推求出西柳沟流域 4 种降水类型的降水过程线(图 8)。

选择大于侵蚀性降水量(12 mm)的第 1 类、第 3 类及第 4 类降水输入西柳沟流域水文水动力模型,模拟拦沙坝建设前后流域出口的洪水过程。根据模型不同工况下输出的流量过程,可计算出径流侵蚀功率

[公式(7)~(9)],再通过次暴雨水沙响应模型[公式(11)]得出对应输沙模数,由此可进一步得到场次输沙量[公式(10)],在相同降水条件下,拦沙坝系建设前后的场次输沙量差值即为场次减蚀量。结合 3 类降水年均分别发生 4.40,0.07,0.63 场(表 3),以及坝系的预计运行期限为 25 年,最终可求出年均减蚀量、工程运行期总减蚀量。在不同降水类型下,研究区拦沙坝系建设前后输沙模数计算结果见表 4,坝系减蚀量计算结果见表 5。

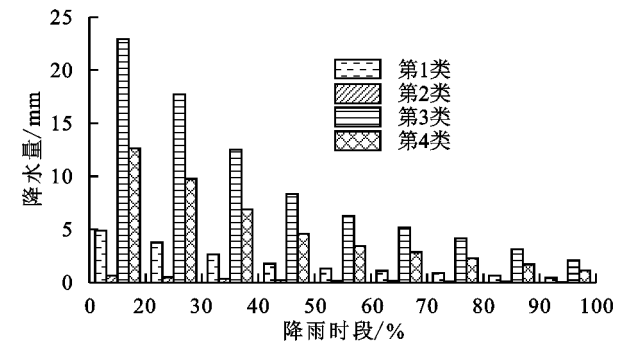


图 8 西柳沟流域 4 类雨型降水过程

在 3 类降水条件下,建坝后流域径流侵蚀功率(P)分别减小 45.71%,70.26%,63.59%,输沙模数(M_s)分别减小 44.90%,69.21%,62.55%。新建坝系场次减蚀量分别为 1.83,1 129.51,71.84 万 t;年均减蚀量分别为 8.05,79.07,45.26 万 t;工程运行期减蚀量分别为 201.36,1 976.64,1 131.49 万 t;预计西柳沟流域新建坝系运行期间总减蚀量为 3 309.49 万 t。

表 4 建坝前后不同降水类型条件下输沙模数差异					
降水类型	工况	径流侵蚀功率/ ($\text{m}^4 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$)	径流侵蚀功率减幅/%	输沙模数/ ($\text{t} \cdot \text{km}^{-2}$)	输沙模数减幅/%
1	建坝前	3.46×10^{-5}		36.10	
	建坝后	1.87×10^{-5}	45.71	19.89	44.90
3	建坝前	1.65×10^{-2}		14451.27	
	建坝后	4.91×10^{-3}	70.26	4450.23	69.21
4	建坝前	1.07×10^{-3}		1016.96	
	建坝后	3.91×10^{-4}	63.59	380.86	62.55

表 5 西柳沟新建坝系沟道冲刷减蚀量						
单位:万 t						
降雨类型	工况	场次总输沙量($S_{\text{总}}$)	场次减蚀量	年均减蚀量	工程运行期减蚀量	总减蚀量
1	建坝前	4.08				
	建坝后	2.25	1.83	8.05	201.36	
3	建坝前	1632.11				
	建坝后	502.60	1129.51	79.07	1976.64	3309.49
4	建坝前	114.85				
	建坝后	43.01	71.84	45.26	1131.49	

4 讨论

本研究中,建坝前后流域沿程沟道侵蚀动力在

0~10 km 里程内基本吻合,10 km 里程以后逐渐出现差异,这是因为主沟上游支沟较少,且未建设拦沙坝,而多数支沟及拦沙坝分布于 10 km 里程下游。其中,40~72 km 里程内支沟及建坝密度较高,结合前文结果,建坝后该河段内沟道侵蚀动力参数的减小幅度同样较大,说明拦沙坝建设能够有效减小西柳沟流域沟道侵蚀动力。拦沙坝建设降低主沟沿程最大流速,这主要是由于拦沙坝通过拦蓄上游洪水,减少汇入主沟的洪量,进而影响沟道流速^[23]。径流剪切力大小取决于水力半径和水力能坡,建坝后流速降低造成沟道泥沙沉降淤积^[24],沟道比降减小,从而降低径流剪切力。由于流速及径流剪切力均降低,径流功率作为二者的乘积,也随之发生更显著的变化。本研究表明,拦沙坝系通过改变沟道水动力过程,进一步调控沟道侵蚀动力过程,从而削弱径流对泥沙的输移能力以及对沟道的冲刷侵蚀能力。同时,研究区拦沙坝系均修建在支沟,但主沟侵蚀动力分布依然受到影响,进一步说明拦沙坝对流域沟道侵蚀动力的调控具有“异地作用”^[25],即支沟径流经拦沙坝消能后,减弱对下游沟道的冲刷侵蚀能力。

目前对于地表径流侵蚀能力的研究主要集中在挟沙力、侵蚀动力以及侵蚀能量方面^[26-29],相比较而言,利用能量参数来表征土壤侵蚀耗散、转移等各环节更为贴切^[30]。其中,作为水流能量因子的径流侵蚀功率综合考虑流域下垫面因素、降水及径流的影响,且与输沙模数之间存在极显著的幂函数相关关系^[21],不同学者基于径流侵蚀功率对流域侵蚀过程进行研究,龚俊夫等^[20]揭示延河流域径流侵蚀功率存在“支流大、干流小”的空间分布特征;王伟等^[31]在无定河流域开展研究同样发现了这一规律。此外,Yuan 等^[6]、孙莉等^[32]利用基于径流侵蚀功率的次暴雨水沙响应模型发现,淤地坝、水库等工程建设有效减小丘陵沟壑区输沙量。因此,本研究通过预测西柳沟流域未来侵蚀性降水条件,进一步利用次暴雨水沙响应模型对拦沙坝的沟道冲刷减蚀能力进行估算。在控制流域土壤、植被及降水等条件不变的情况下,拦沙坝建设前后流域中从坡面至沟道的产沙及输沙过程无明显差异,本研究仅通过设计建坝前后 2 种工况来改变沟道中的下垫面因素,因此导致流域出口处输沙量出现差异的因素主要为沟道水沙输移过程发生变化。由于坡面来沙无明显差异,利用次暴雨水沙响应关系得到的输沙量差值即为沟道冲刷减蚀量。利用基于物理概念的分布式模型模拟次降雨洪水事件时,若率定期及验证期的 NSE 均大于 0.65,可认为

模型模拟效果可靠。例如,Ran 等^[7]运用 InHM 模型在蛇家沟流域达到 0.70 以上的效果;Wang 等^[33]利用 GAST 模型搭建的王茂沟流域模型取得 0.68 的 NSE 值。因此,本研究中的水文水动力模型精度较高,可较为准确地反映研究区洪水过程及侵蚀动力分布特征。此外,本文参照不同学者^[17,34]对流域侵蚀动力及输沙特征的模拟研究,同样对研究结果采取保留 2 位小数的计算精度。

本研究通过建立西柳沟流域水文水动力模型,量化了新建拦沙坝系对主沟道径流侵蚀动力过程的影响,并估算工程运行期内新建坝系的沟道冲刷减蚀量,但由于资料有限,计算过程中忽略未来研究区土地利用变化对径流及产输沙过程的影响。因此,结合土地利用变化、地形变化等因素进一步分析拦沙坝沟道冲刷减蚀能力,可为风水交错侵蚀区拦沙坝效益评估提供更科学的论证依据。

5 结论

(1)新建拦沙坝工程改变流域洪水过程,洪水过程线明显发生坦化。西柳沟流域拦沙坝系建成后,流域出口处洪峰流量减少 40.90%,洪水总量减小 35.85%。

(2)拦沙坝有效影响流域主沟的侵蚀动力过程,对主沟道侵蚀动力具有明显的异地调控作用。建坝后,西柳沟流域主沟道平均最大流速、最大径流剪切力和最大径流功率分别减小 21.66%,22.02%和 34.31%。

(3)拦沙坝具有显著的冲刷减蚀作用,在多年平均降水情况下,西柳沟流域新建坝系在工程运行期内冲刷减蚀量预计可达到 3 309.49 万 t。

参考文献:

- [1] 于国强,李占斌,李鹏,等.坡沟系统水蚀过程调控措施的作用机理研究[M].北京:科学出版社,2017:1-3.
- [2] 水利部.第一次全国水利普查水土保持情况公报[J].中国水土保持,2013(10):2-3,11.
- [3] 陈祖煜,李占斌,王兆印.对黄土高原淤地坝建设战略定位的几点思考[J].中国水土保持,2020(9):32-38.
- [4] 刘晓燕.黄河近年水沙锐减成因[M].北京:科学出版社,2016:121-131.
- [5] 方学敏,万兆惠,匡尚富.黄河中游淤地坝拦沙机理及作用[J].水利学报,1998(10):49-53.
- [6] Yuan S L, Li Z B, Li P, et al. Influence of check dams on flood and erosion dynamic processes of a small watershed in the Loess Plateau [J].Water,2019,11(4):e834.
- [7] Ran Q H, Tang H L, Wang F, et al. Numerical modelling shows an old check-dam still attenuates flooding and sediment transport [J].Earth Surface Processes and Landforms,2021,46(8):1549-1567.

- [8] 唐鸿磊.淤地坝全寿命周期内的流域水沙阻控效率分析[D].杭州:浙江大学,2019.
- [9] 于国强,李占斌,张茂省,等.水土保持措施对黄土高原小流域重力侵蚀的调控机理研究[J].土壤学报,2012,49(增刊1):646-654.
- [10] 惠波,李斌斌,惠露,等.鄂尔多斯水土保持“拦沙换水”生态补偿模式浅析[J].中国水土保持,2019(6):16-18.
- [11] 水利部黄河水利委员会.黄河流域水文资料[M].北京:中华人民共和国水利部水文司,1961—1990,2007—2012.
- [12] Sonnenborg T O, Christiansen J R, Pang B, et al. Analyzing the hydrological impact of afforestation and tree species in two catchments with contrasting soil properties using the spatially distributed model MIKE SHE SWET [J].Agricultural and Forest Meteorology,2017,239:118-133.
- [13] Ma L, He C G, Bian H F, et al. MIKE SHE modeling of ecohydrological processes: Merits, applications, and challenges [J].Ecological Engineering,2016,96:137-149.
- [14] Rujner H, Leonhardt G, Jiri M, et al. High-resolution modelling of the grass swale response to runoff inflows with Mike SHE [J].Journal of Hydrology,2018,562:411-422.
- [15] Wang S H, Zhang Z Q, Sun G, et al. Multi-site calibration, validation, and sensitivity analysis of the MIKE SHE Model for a large watershed in northern China [J]. Hydrology and Earth System Sciences,2012,16:4621-4632.
- [16] Feng Z H, Li Z B, Shi P, et al. Impact of sedimentation by check dam on the hydrodynamics in the channel on the Loess Plateau of China [J].Natural Hazards,2021,107(1):953-969.
- [17] 段金晓.淤地坝不同淤积程度对水动力过程影响模拟研究[D].西安:西安理工大学,2019.
- [18] Foster G R, Meyer L D. Transport of soil particles by shallow flow [J].Transactions of the ASAE,1972,51(5):99-102.
- [19] Bagnold R A. An approach to the sediment transport problem from general physics [D].Washington USGPO,1966:231-291.
- [20] 龚珺夫,李占斌,李鹏,等.基于 SWAT 模型的延河流域径流侵蚀能量空间分布[J].农业工程学报,2017,33(13):120-126.
- [21] 鲁克新.黄土高原流域生态环境修复中的水沙响应模拟研究[D].西安:西安理工大学,2006.
- [22] 殷水清,王杨,谢云,等.中国降雨过程时程分型特征[J].水科学进展,2014,25(5):617-624.
- [23] 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.
- [24] Wang Z Y, Chen Z Y, Yu S, et al. Erosion-control mechanism of sediment check dams on the Loess Plateau [J].International Journal of Sediment Research,2021,36(5):668-667.
- [25] 高海东,贾莲莲,庞国伟,等.淤地坝“淤满”后的水沙效应及防控对策[J].中国水土保持科学,2017,15(2):140-145.
- [26] Ali M, Seeger M, Sterk G, et al. A unit stream power based sediment transport function for overland flow [J].Catena,2013,101(3):197-204.
- [27] 赵录友.基于侵蚀能量的坡面径流挟沙力研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2020.
- [28] 米宏星.黄土细沟侵蚀径流水动力学特性研究[D].重庆:西南大学,2015.
- [29] 魏霞,李勋贵,李占斌.黄土凸型复合坡面径流能量变化特征试验研究[J].水土保持学报,2014,28(6):72-76.
- [30] 张译心,徐国策,李占斌,等.不同时间尺度下流域径流侵蚀功率输沙模型模拟精度[J].水土保持研究,2020,27(3):1-7,22.
- [31] 王伟,李占斌,杨瑞,等.无定河流域径流侵蚀功率时空变化特征[J].水土保持研究,2020,27(1):26-32.
- [32] 孙莉,李占斌,于坤霞,等.变化环境下黄土丘陵沟壑区次暴雨输沙模型参数[J].中国水土保持科学,2016,14(6):1-9.
- [33] Wang T, Hou J M, Li P, et al. Quantitative assessment of check dam system impacts on catchment flood characteristics: A case in hilly and gully area of the Loess Plateau, China [J].Natural Hazards,2021,105:3059-3077.
- [34] 袁水龙,李占斌,李鹏,等.基于 MIKE 模型的不同淤地坝型组合情景对小流域侵蚀动力和输沙量的影响[J].水土保持学报,2019,33(4):30-36.