

基于植被恢复的黄土高原典型流域次洪水沙特征分析

韩 勇^{1,2}, 杨倩楠², 高海东², 许 浩¹

(1.安康学院旅游与资源环境学院,陕西 安康 725000;

2.西安理工大学旱区生态水文与灾害防治国家林业和草原局重点实验室,西安 710048)

摘要: 研究大规模植被恢复条件下岔巴沟流域次洪水沙变化,对揭示黄土高原土壤侵蚀演变规律和黄河水沙调控具有重要作用。基于 101 场洪水事件,结合 NDVI 和降雨数据,通过分析不同生态建设时期岔巴沟流域次洪水沙变化特征,选取 2 场典型洪水事件进行对比,揭示次洪输沙与径流侵蚀能量的关系。结果表明:时期 II 的次洪平均径流量是时期 I 的 1.86 倍,但平均输沙量仅为 0.52 倍。在 4 个洪峰流量分级中,时期 I 的次洪平均输沙模数明显高于时期 II。与 NO.2 洪水事件相比,NO.100 洪水事件的径流过程和输沙过程具有良好的同步性,洪水历时更长,洪峰流量、输沙峰值明显较低。时期 I 和 II 的次洪输沙模数均随径流侵蚀功率的增加而增加,但时期 II 的输沙模数整体低于时期 I。研究结果表明大规模植被恢复对黄土高原典型流域次洪输沙的调控作用较径流更为显著。

关键词: 次洪水; 水沙变化; NDVI; 径流侵蚀功率; 岔巴沟流域

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)04-0278-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.04.034

Runoff and Sediment Characteristics of Flood Event in Typical Watershed on the Loess Plateau Based on Vegetation Restoration

HAN Yong^{1,2}, YANG Qiannan², GAO Haidong², XU Hao¹

(1.School of Tourism and Environment, Ankang University, Ankang, Shaanxi 725000; 2.State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048)

Abstract: To analyze runoff and sediment change of flood event in the Chabagou watershed under the condition of large-scale vegetation restoration plays an important role in revealing the evolution law of soil erosion on the Loess Plateau and the regulation of runoff and sediment in the Yellow River. Based on 101 flood events, combined with NDVI and rainfall data, the paper analyzed runoff and sediment characteristics of flood event in Chabagou watershed during different ecological construction periods, and selected two typical flood events for comparison to reveal the relationship between sediment transport and runoff erosion energy. The results showed that the average runoff amount of flood event in Period II was 1.86 times that of Period I, but the average sediment yield was only 0.52 times. In the four peak discharge classifications, the average sediment transport modulus of flood event in Period I was significantly higher than that in Period II. Compared with the flood event NO.2, the runoff and sediment transport process of NO.100 in Period II showed good synchronization, and the flood duration was longer. In addition, the peak flow and peak sediment transport were significantly lower. The sediment transport modulus of flood event in both periods I and II increased with the increase of runoff erosion power, but the sediment transport modulus in Period II was lower than that in Period I. The results showed that large-scale vegetation restoration played a more significant role in regulating sediment transport of flood event than runoff in typical watershed on the Loess Plateau.

Keywords: flood event; runoff and sediment changes; NDVI; runoff erosion power; Chabagou watershed

作为陆地生态系统的重要组成部分,植被对流域水文循环具有重要的调节作用^[1]。但由于植被、地

形、土壤等诸多因素的影响,关于植被能否削减洪峰的争论始终存在^[2-3]。主流观点认为,植被能促进降

收稿日期:2023-01-15

资助项目:陕西省教育厅专项科研计划项目(21JK0464);陕西省科技厅自然科学基金基础研究计划青年项目(2021JQ-835);安康学院创新团队引导计划项目(2019AYQJ14);国家自然科学基金项目(42177336)

第一作者:韩勇(1987—),男,博士,讲师,主要从事土壤侵蚀及其环境演变研究。E-mail:hanyong2006@163.com

雨径流再分配,进而减少洪量、削减洪峰,延长洪水历时^[4-6]。但也有学者^[7-8]认为,植被对洪水的调控作用较为有限,尤其是多峰洪水。该观点认为,当流域首个洪峰形成后,植被对降雨径流的拦蓄作用已基本消失,从而对后续洪峰丧失调控作用。甚至有观点^[9]认为,在遭遇连续强降水时,流域因为植被的拦蓄作用而出现洪水叠加现象,导致洪峰流量进一步增大,进而引发洪水灾害。

有关黄土高原植被变化对流域洪水径流影响的研究自20世纪90年代开始就受到广泛重视^[10-11]。但同样,学界关于植被对黄土高原流域水沙过程的调控效应亦存在不同观点^[12]。刘昌明等^[10]通过对比黄土高原多条流域认为,植被条件向好会明显减少径流量;而黄明斌等^[13]则认为,黄土高原植被具有很好的调洪补枯作用。针对这种情况,有研究^[14]通过分析近几十年来黄土高原不同时期的主导水土保持措施,得出流域产水产沙特征呈阶段性变化的结论,且这种阶段性变化以退耕还林(草)工程开展以来最为明显。自1999年黄土高原实施大规模生态恢复以来,黄河中游地区植被不断向好,流域径流量和输沙量显著减少,洪水发生频率有所降低^[15],洪水过程特征也发生明显改变^[16-17]。但其实在植被条件较差的早期,黄土高原流域的洪水过程总体呈现峰高、量小、历时短、洪峰陡涨陡落的特征^[18]。随着黄土高原植被条件改善,流域次洪水沙特征也逐渐改变。顾朝军等^[5]通过对比延河流域1977年和2013年的2次洪水事件发现,相比1977年,2013年的洪水过程呈现缓升缓降的变化特征,且径流量和产沙量都显著减少,并认为洪水过程中水沙变化主要受植被恢复影响;莫淑红等^[19]对岔巴沟流域不同级别洪水事件的分析结果表明,以植被恢复为主的下垫面条件变化,不仅能明显消减大洪水和中小洪水的洪峰流量,还能使小洪水的过程曲线变得更加平缓。即使像“7·26”这样的暴雨(2017年7月26日),无定河流域的长期生态工程建设也对洪峰流量表现出一定的调控能力^[20]。此外,植被恢复还改变整个流域的侵蚀动力,尤其是对径流侵蚀能量产生影响^[21-22]。

岔巴沟流域作为黄河中游重要支流,是黄河干流洪水和泥沙的重要来源。研究植被恢复对岔巴沟流域次洪水沙的影响,不仅有利于揭示黄土高原土壤侵蚀演变规律,也能为黄河水沙调控提供科学依据。因此,本研究基于101场洪水事件的降水、径流和泥沙数据,试图分析不同生态建设时期岔巴沟流域次洪水沙特征,对比不同时期流域次洪水文特性变化,并探讨植被恢复条件下次洪输沙与径流侵蚀能量的关系。研究结果以期为黄土高原生态建设科学推进以及黄

河流域生态保护和可持续发展提供理论支持。

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区概况

岔巴沟流域(37°43'N, 109°55'E)位于黄河中游地区,为无定河流域二级支流,属于黄土丘陵沟壑第一副区。流域面积为205 km²,形状基本沿主沟道对称(图1),平均海拔1 080 m,沟道密度1.05 km/km²。流域气候属于干旱半干旱大陆性季风气候,多年平均降雨量450 mm,降雨年内分布不均,主要集中在7—9月,且多为短历时强降雨。流域内沟道发育,地形破碎复杂,土壤结构松散,水土流失严重。

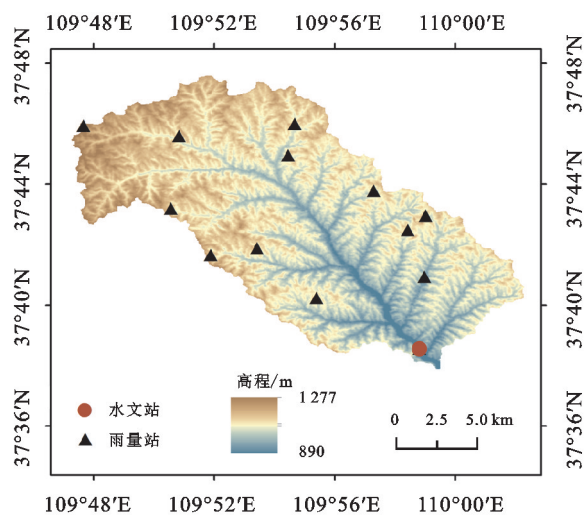


图1 岔巴沟流域位置、雨量站和水文站分布

1.2 数据来源

NDVI(归一化植被指数)摘录自GIMMS NDVI和MODIS NDVI数据集。其中,GIMMS NDVI数据集的时间序列为1981—2015年,空间分辨率为8 km,时间分辨率为15天;MODIS NDVI数据集时间序列为2000—2020年,空间分辨率为250 m,时间分辨率为16天。为保证NDVI数据序列长度,需对GIMMS NDVI数据集和MODIS NDVI数据集进行合成,具体方法^[23]为:(1)将SRTM 90 m分辨率DEM利用GIMMS NDVI数据和MODIS NDVI数据重新采样成8 km,并分别计算坐标及地形参数;(2)分别利用GIMMS NDVI栅格和MODIS NDVI栅格对90 m DEM做区域统计运算,提取各自的高程信息;(3)用GIMMS NDVI对MODIS NDVI数据做区域统计运算,提取GIMMS NDVI栅格内的NDVI均值;(4)将GIMMS NDVI栅格转化成点,用点提取坐标、地形因子(高程、坡度、坡向等)及NDVI均值,用这些因子进行多元线性回归,并保留残差;(5)将残差做克里金插值得到残差插值曲面,导出为250 m分辨率栅格数据;(6)利用最大合成法将时间分辨率为15/16天的GIMMS NDVI数据和MODIS NDVI数据分别合成月NDVI,后用max函数分别获

取其最大值,作为年 $NDVI_{max}$; (7) 将 2 个数据集 2000—2015 年的年 $NDVI_{max}$ 进行相关分析及一致性检验,且满足要求($R=0.957\ 3, p<0.001$)。通过上述方式处理,最终得到研究区 1981—2020 年的 $NDVI$ 数据。

次洪水事件是指从径流量增加至超过基流量开始,到径流量减少至基流量为止的整个过程^[24]。次洪水事件的降雨量、径流和泥沙数据均摘录自《黄河流域水文手册》(1970—1990 年、2006—2018 年)^[25],其中,降雨量为小时数据,径流、泥沙浓度数据为小时过程线。因此,需先利用数字滤波法^[26]将每个径流过程线的基流量去除掉,进而获得真实的洪水过程以及径流量和洪峰流量。接着从这些洪水过程中筛选洪峰流量大于 $5\ m^3/s$,且有对应泥沙数据的事件。最终,从 34 年的数据中筛选出 101 场次洪水事件,并根据发生时间顺序命名为 NO.1, NO.2, ..., NO.101。

1.3 计算方法

1.3.1 输沙量(sediment discharge, SY) 根据泥沙数据特征,本文定义单次洪水输沙量计算公式:

$$SY = \sum_{n=2}^m \frac{1}{2} (q_{n-1} \cdot s_{n-1} + q_n \cdot s_n) \cdot (t_n - t_{n-1})$$

$$(n=2, 3, \dots, m-1, m) \quad (1)$$

式中:SY 为单次洪水输沙量(kg); q 为单次洪水某段时间内的径流量(m^3/s); s 为单次洪水某段时间的泥沙量(kg/m^3)。

1.3.2 降雨侵蚀力(rainfall erosivity, RE) 计算降雨侵蚀力时,须先对次降雨进行筛选(次降雨的划分标准为降雨量超过 5 mm 或降雨间歇超过 6 h^[27])。对照所筛选的次降雨,从《黄河流域水文手册》^[25]的次降雨记录表中摘录出时段雨量。降雨侵蚀力计算采用章文波等^[28]提出的公式:

$$RE = \sum_{r=1}^l (e_r \Delta V_r) \quad (2)$$

$$e_r = 0.29 [1 - 0.72 \exp(-0.05 i_r)] \quad (3)$$

式中: i_r 为时段雨强(mm/h); e_r 为单位降雨动能 [$MJ/(hm^2 \cdot mm)$]; ΔV_r 为时段雨量(mm); l 为时段数目。

1.3.3 径流侵蚀功率(runoff erosion power, REP) 单次洪水事件的径流侵蚀功率计算参考鲁克新等^[21]提出的公式:

$$REP = Q_m H \quad (4)$$

式中: H 为径流深度(m); Q_m 为洪峰流量模数 [$m^3/(s \cdot km^2)$]; REP 为径流侵蚀功率 [$m^4/(s \cdot km^2)$]。

2 结果与分析

2.1 NDVI 变化特征

近几十年,尤其自 1999 年退耕还林还草工程启动以来,黄土高原植被覆盖度不断提高。与 2000 年

前相比,黄土高原植被覆盖度提高 25%^[29]。从图 2 可以看出,岔巴沟流域 1981 年到 2000 年间 $NDVI$ 增速极其缓慢;虽然 1988 年 $NDVI$ 一度达到 0.40,但在 1997 年又降至历年最低值,不足 0.32。自 2001 年起, $NDVI$ 值迅速增大;2018 年 $NDVI$ 值最大,达 0.65。结合黄土高原植被建设,本文将研究期内的岔巴沟流域植被建设划分成 2 个时期:1981—2000 年为时期 I, 2001—2020 年为时期 II。

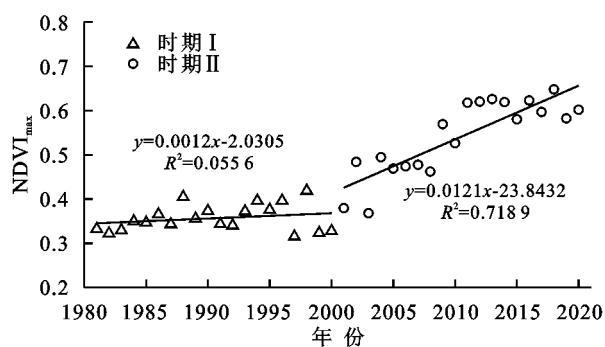


图 2 1981—2020 年黄土高原 $NDVI_{max}$ 变化

通过对比 $NDVI$ 多年平均值,时期 I 为 0.35,时期 II 为 0.54。而当 $NDVI$ 超过 0.36 时,植被对泥沙输移的调控作用开始显现,并随植被覆盖度增加而不断增强^[30]。也正是自 2001 年起,岔巴沟流域的 $NDVI$ 值就超过 0.36 并逐年升高。从此时起,该流域内植被的水土保持功能显著增强。

2.2 不同时期次洪径流泥沙特征

经查证,目前适用于黄土高原区域的各种 $NDVI$ 数据能追溯到的最早年份为 1981 年,出现 $NDVI$ 数据序列长度与水沙数据不完全一致的情况。但本文未对二者进行数理统计,且 $NDVI$ 数据序列长度不会对水沙数据的统计学结果产生影响。因此,本文参考 $NDVI$ 阶段性变化特征,将水沙数据也划分成 2 个时期:时期 I 为 1970—1990 年、时期 II 为 2006—2018 年。经统计,时期 I 共包含 79 场洪水事件(NO.1~NO.79),年均发生 4 次;时期 II 共包含 22 场(NO.80~NO.101),年均发生 1.7 次。从表 1 可以看出,时期 I 的次洪水平均径流量为 $52.07 \times 10^4 m^3$,平均输沙量是 $28.02 \times 10^4 t$ 。相比之下,时期 II 的次洪水平均径流量是时期 I 的 1.86 倍,而平均输沙量仅为 0.52 倍。

表 1 2 个时期次洪径流泥沙特征

统计 指标	径流量/ $10^4 m^3$		泥沙量/ $10^4 t$	
	平均值	最大值	平均值	最大值
I	52.07	323.47	28.02	253.62
II	96.89	837.37	14.50	101.23
变化量	44.82	513.90	-13.52	-152.39
变化率/%	86.10	158.90	-48.30	-60.10

对时期 II 而言,次洪最大径流量为 $837.37 \times 10^4 m^3$,变率为 158.9%;次洪最大输沙量为 $101.23 \times 10^4 t$,变率为 -60.1%。输沙量并未随径流量增加而增加,未

出现“大水对大沙”的现象。这也可证明植被条件持续向好对输沙的调控作用比径流更为显著^[31-32]。

2.3 不同时期洪峰流量特征

对洪峰流量的统计结果表明,随洪峰流量增加,时期 I 和 II 的次洪发生频率均不断降低,但输沙量占比和平均输沙模数增加(表 2)。当洪峰流量 < 50 m³/s 时,时期 I 和 II 的次洪发生频率在 4 个分级中均为最高,但输沙量占比和平均输沙模数反而均最

低。当洪峰流量 > 200 m³/s,时期 I 和 II 的次洪水发生频率在 4 个分级中均最低,但平均输沙模数则均最高。当洪峰流量在 50~100,100~200 m³/s 时,时期 I 的次洪水发生频率和输沙量占比均低于时期 II。对比表 2 中不同洪峰流量发现,时期 I 的次洪水平均输沙模数明显高于时期 II。在相同洪峰流量分级下,时期 I 的次洪水输移的泥沙比时期 II 更多,说明时期 I 的次洪水侵蚀能力要远高于时期 II。

表 2 2 个时期洪峰流量分级特征

洪峰流量分级	时期 I			时期 II		
	次洪发生频率 / %	输沙量占比 / %	平均输沙模数 / (t · km ⁻²)	次洪发生频率 / %	输沙量占比 / %	平均输沙模数 / (t · km ⁻²)
5≤PF<50	60.8	16.5	400	45.5	10.7	50
50≤PF<100	16.5	16.9	1400	30.4	28.1	600
100≤PF<200	13.9	27.9	2700	17.4	34.8	1400
PF≥200	8.9	38.8	6000	4.4	30.8	5000

从图 3 可以看出,当洪峰流量较低(<100 m³/s)时,时期 I 的输沙量整体高于时期 II。当洪峰流量 < 50 m³/s 时,时期 I 和 II 的输沙量均低于 30.00 × 10⁴ t。当洪峰流量在 50~100 m³/s 时,时期 I 和 II 的输沙量均低于 50 × 10⁴ t;输沙量最大值在时期 I 为 47.23 × 10⁴ t,在时期 II 为 26.34 × 10⁴ t。当洪峰流量在 100~200 m³/s 时,时期 I 和 II 的输沙量均低于 100.00 × 10⁴ t;输沙量最大值在时期 I 为 90.10 × 10⁴ t,在时期 II 为 65.56 × 10⁴ t。当洪峰流量 > 200 m³/s 时,时期 II 仅发生 1 场次洪水;时期 II 的洪峰流量最大值(339 m³/s)是时期 I 洪峰流量最大值(640 m³/s)的 0.53 倍,而输沙量最大值则仅为时期 I 的 0.4 倍。随洪峰流量增加,时期 I 和 II 的平均输沙模数的差异逐渐减小。

峰流量 > 200 m³/s,这与 Fu 等^[20]的研究结果一致。

2.4 典型洪水事件水沙过程

为更好地揭示植被条件变化对洪水过程的影响,本研究分别在时期 I 和 II 选取各自洪峰流量最大的次洪水(NO.2 和 NO.100)进行对比。NO.2 洪水事件发生于 1970 年 7 月 31 日 23 点 18 分,结束于 8 月 1 日 20 点;NO.100 洪水事件发生于 2017 年 7 月 25 日 20 点,结束于 7 月 28 日 20 点。从图 4a 可以看出,NO.2 洪水径流形成 42 min 后,第 1 个沙峰开始出现,但此刻径流并没有显著增加。距第 1 个沙峰出现 2 h 后,泥沙浓度才明显升高,并保持高泥沙浓度水平 6.5 h;在洪峰出现 3.5 h 后,泥沙浓度才开始逐渐降低。整个洪水过程中,径流变化呈现“陡涨陡落”的形状。此次洪水的洪峰流量达到 640 m³/s,含沙量峰值达到 898 kg/m³,输沙总量为 253.62 × 10⁴ t。

与 NO.2 不同,NO.100 洪水事件分别出现 2 个洪峰和沙峰(图 4b),且输沙过程和径流过程存在较好的同步性。NO.100 洪水的洪峰流量为 339 m³/s,含沙量峰值仅为 235 kg/m³。NO.100 的洪峰值和沙峰值均明显低于 NO.2,且洪水历时也明显更长。

从降雨特性角度来看,与 NO.2 相比,引起 NO.100 洪水的次降雨的降雨量、降雨强度及降雨侵蚀力均明显较高,但洪峰流量、输沙峰值却明显较低(表 3)。大雨没有形成大水,亦未产生大沙。这归功于岔巴沟流域植被条件不断改善。植被条件向好不仅减弱径流侵蚀能力,还缩短高含沙水流的持续时间,最终有效降低次洪输沙量^[33-34]。

3 讨论

随植被不断改善,流域洪水的径流侵蚀能量也发

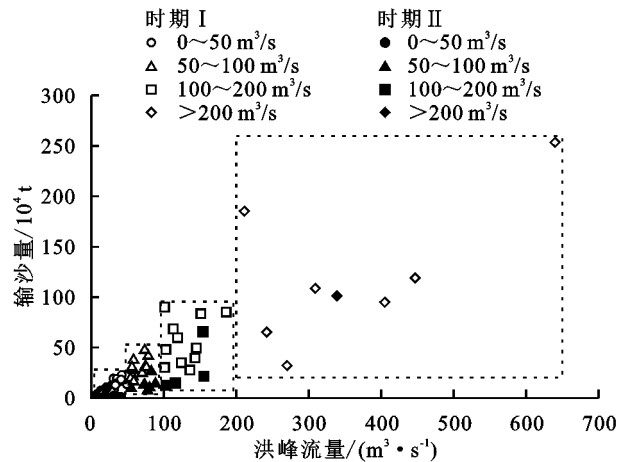


图 3 2 个时期不同洪峰流量等级输沙量对比

总体来看,岔巴沟流域次洪水的径流和输沙依然遵循“水多沙多、水少沙少”的变化规律。同时,整个时期 II 的洪峰流量和输沙量均低于时期 I,尤其是洪

生变化^[20]。因此,分析次洪水径流侵蚀能量与泥沙输移之间的关系,可以有效佐证植被对流域次洪水侵蚀能量的调控作用。基于此,本文选取径流侵蚀功率这一侵蚀动力学指标,从径流侵蚀能量角度揭示植被对流域次洪水输沙的影响。

图 5 为岔巴沟流域次洪径流侵蚀功率和输沙模数的回归分析结果,可以看出,时期 I 和 II 的次洪输沙模数随径流侵蚀能量的增加而增加。与时期 II 相

比,时期 I 的次洪输沙模数分布更为密集。此外,当径流侵蚀功率大于 $8 \times 10^{-3} [\text{m}^4 / (\text{s} \cdot \text{km}^2)]$ 时,次洪输沙模数在时期 I 和 II 的分布向拟合曲线靠近的趋势更为明显。同时,输沙模数在时期 I 和 II 表现出“高值集中、低值分散”的分布特征。同时,时期 II 的次洪输沙模数和径流侵蚀功率回归方程斜率要高于时期 I,说明在时期 II,次洪径流侵蚀功率对输沙模数的影响更大。

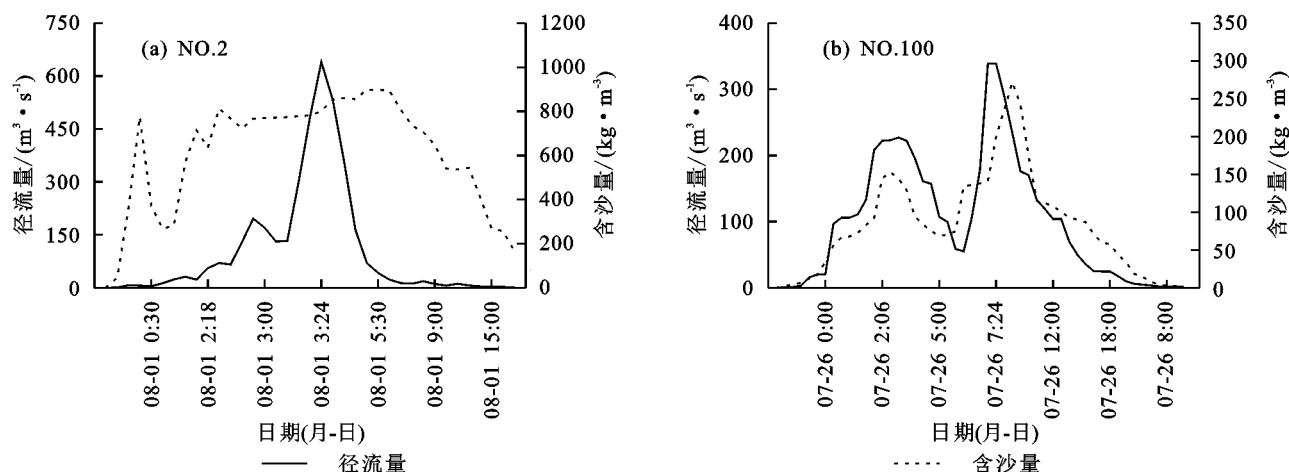


图 4 2 场典型洪水事件径流泥沙过程

表 3 2 场典型洪水事件水文特性

洪水事件	降雨量/ mm	降雨强度/ (mm · h ⁻¹)	降雨侵蚀力/ (MJ · mm · hm ⁻² · h ⁻¹)	洪峰流量/ (m ³ · s ⁻¹)	洪水历时/ h	输沙峰值/ (kg · m ⁻³)
NO.2	62.88	4.71	260.42	640	20.7	898
NO.100	187.37	14.77	1366.93	339	72.0	272

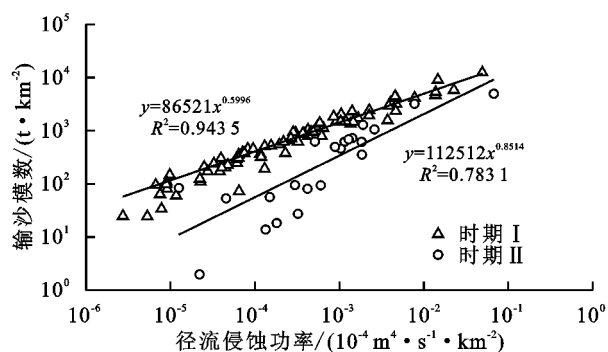


图 5 2 个时期径流侵蚀能量与输沙模数关系

岔巴沟流域自 20 世纪 60 年代中后期大力兴建淤地坝等水土保持工程措施,70 年代后期修建速度明显放缓,至 90 年代后再未修建骨干坝^[19]。流域内留存至今的水土保持工程设施多为 20 世纪 70 年代修建,因运行时间较长,大部分工程措施的水土保持功能显著降低^[35]。而 2000 年后,随退耕还林还草工程推进,子洲县政府不断加大岔巴沟流域水土流失治理力度,通过改变农业结构、进行封山育林,使得岔巴沟流域内植被覆盖度显著升高^[36]。因此,岔巴沟流域水沙输移特征在 2001 年前后表现出较为明显的差

异^[37]。在时期 I,流域内水土保持措施建设以工程措施为主,植被措施相对较少。这一时期,流域水沙输移变化主要是由各类工程措施建设引起的^[38]。而在时期 II,退耕还林(草)工程已经持续推进 8 年之久,流域内植被状况稳步改善。由于植被条件向好,洪水径流在流动过程中,径流侵蚀能量不仅要用于搬运泥沙,还因克服植被对径流的阻力而迅速消耗^[39-40]。同时,在植被拦蓄作用下,部分径流入渗转化为地下径流,用以补充枯水季的流量^[41-42]。通过上述方式,植被从根本上改变岔巴沟流域的次洪水沙特征。

4 结论

(1)相较于时期 I,岔巴沟流域在时期 II 的次洪平均径流量明显增加,次洪平均输沙量却减少近 1/2;且时期 I 的次洪平均输沙模数都明显高于时期 II。说明植被对流域次洪输沙存在明显的抑制作用。

(2)就典型洪水而言,良好的植被条件不仅能使流域次洪水的径流过程和输沙过程同步性更好,还能拉长洪水历时,消减洪峰流量,降低输沙峰值。植被条件向好对流域次洪水过程调控具有积极意义。

(3) 岔巴沟流域次洪水沙特征,尤其是泥沙输移在时期 I 和 II 差异明显,是流域植被条件改善所引起的次洪水径流侵蚀能量减弱的外在表现。

参考文献:

- [1] 杨大文,雷慧闽,丛振涛.流域水文过程与植被相互作用研究现状评述[J].水利学报,2010,41(10):1142-1149.
- [2] Scott D F, Lesch W. Stream flow responses to afforestation with eucalytus grandis and pinus patula and to felling in the Mokobulaan experiments on annual and dry Africa[J].Journal of Hydrology,1997,199:360-377.
- [3] 徐宪立,马克明,傅伯杰,等.植被与水土流失关系研究进展[J].生态学报,2006,26(9):3137-3143.
- [4] 张炳勋,冯国章.林地拦洪作用及产流特点的分析[J].水文,1985(2):37-44.
- [5] 顾朝军,穆兴民,孙文义,等.极端暴雨洪水及侵蚀产沙对延河流域植被恢复响应的比较研究[J].自然资源学报,2017,32(10):1755-1767.
- [6] 刘元昊,韩剑桥,焦菊英,等.极端暴雨下小流域洪峰对植被和梯田的响应:以山东临朐台风“利奇马”暴雨为例[J].水土保持学报,2020,34(5):20-25.
- [7] Hewlett J D, Bosch J M. The dependence of storm flows on rainfall intensity and vegetal cover in South Africa[J].Journal of Hydrology,1984,75(1/4):365-381.
- [8] Calder I. Land use impacts on water resources[J].Land Use and Water Resources Research,2000,2:1-14.
- [9] 孙惠南.近 20 年来关于森林作用研究的进展[J].自然资源学报,2001,16(5):407-412.
- [10] 刘昌明,钟骏襄.黄土高原森林对年径流影响的初步分析[J].地理学报,1978,32(2):112-127.
- [11] 李玉山.黄土高原森林植被对陆地水循环影响的研究[J].自然资源学报,2001,16(5):427-432.
- [12] 陈军锋,李秀彬.森林植被变化对流域水文影响的争论[J].自然资源学报,2001,16(5):474-480.
- [13] 黄明斌,康绍忠,李玉山.黄土高原沟壑区森林和草地小流域水文行为的比较研究[J].自然资源学报,1999,14(3):226-231.
- [14] Hu J F, Zhao G J, Mu X M, et al. Effect of soil and water conservation measures on regime-based suspended sediment load during floods[J].Sustainable Cities and Society,2020,55:e102044.
- [15] Ran Q H, Zong X Y, Ye S, et al. Dominant mechanism for annual maximum flood and sediment events generation in the Yellow River Basin[J].Catena,2020,187:e104376.
- [16] Hornbeck J W, Adams M B, Corbett E S, et al. Long-term impacts of forest treatments on water yield: A summary for northeastern USA[J].Journal of Hydrology,1993,150:323-344.
- [17] Borga M, Stoffel M, Marchi L, et al. Hydrogeomorphic response to extreme rainfall in headwater systems: Flash floods and debris flows[J].Journal of Hydrology,2014,518:194-205.
- [18] 王万忠,焦菊英.黄土高原沟道降雨产流产沙过程变化的统计分析[J].水土保持通报,1996,16(6):12-18.
- [19] 莫淑红,巩瑶,李洁,等.人类活动对岔巴沟流域洪水过程影响研究[J].应用基础与工程科学学报,2019,27(3):492-508.
- [20] Fu S H, Yang Y F, Liu B Y, et al. Flow rate response to vegetation and terraces under extreme rainstorms[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment,2020,288:e106714.
- [21] 鲁克新,李占斌,李鹏,等.基于径流侵蚀功率的流域次暴雨输沙模型研究:以岔巴沟流域为例[J].长江科学院院报,2008,25(3):31-34.
- [22] Zhang L T, Li Z B, Wang H, et al. Influence of intra-event-based flood regime on sediment flow behavior from a typical agro-catchment of the Chinese Loess Plateau[J].Journal of Hydrology,2016,538:71-81.
- [23] Jia S F, Zhu W, Lv A, et al. A statistical downscaling algorithm of TRMM precipitation based on NDVI and DEM in the Qaidam Basin of China[J].Remote Sensing of Environment,2011,115(12):3069-3079.
- [24] Hu J F, Gao P, Mu X M, et al. Runoff-sediment dynamics under different flood patterns in a Loess Plateau catchment, China[J].Catena,2019,173:234-245.
- [25] 水利部黄河水利委员会.中华人民共和国水文年鉴.第4卷.黄河流域水文资料第3册黄河中游区上段(河口镇至龙门)[Z].郑州:水利部黄河水利委员会,1970—1990,2006—2018.
- [26] 杨倩楠,李占斌,鲁克新,等.干旱区河流基流变化特征及归因分析:以无定河流域为例[J].台湾水利,2019,66(4):67-75.
- [27] 王文婷,殷水清,袁莹莹.场次降水与日降水差异对比[J].北京师范大学学报,2018,54(2):224-231.
- [28] 章文波,谢云,刘宝元.用雨量和雨强计算次降雨侵蚀力[J].地理研究,2002,21(3):384-390.
- [29] Shi P, Feng Z H, Gao H D, et al. Has “Grain for Green” threaten food security on the Loess Plateau of China? [J]. Ecosystem Health and Sustainability,2020,6:e1709560.
- [30] Ye S, Ran Q H, Fu X D, et al. Emergent stationarity in Yellow River sediment transport and the underlying shift of dominance: From streamflow to vegetation[J].Hydrology and Earth System Sciences,2019,23:549-556.
- [31] Huang M B, Zhang L, Gallichand J. Runoff responses to afforestation in a watershed of the Loess Plateau, China[J].Hydrological Processes,2003,17:2599-2609.

(下转第 293 页)

- transpiration to wind velocity in a mixed broadleaved deciduous forest[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, 187: 62-71.
- [37] 朱雅娟, 卢琦, 吴波, 等. 增雨对巴丹吉林沙漠东南缘白刺水分利用的影响[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(1): 41-48.
- [38] 卢森堡, 陈云明, 唐亚坤, 等. 黄土丘陵区混交林中油松和沙棘树干液流对降雨脉冲的响应[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(11): 3469-3478.
- [39] Wang D, Gao G, Li J, et al. Sap flow dynamics of xerophytic shrubs differ significantly among rainfall categories in the Loess Plateau of China[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 585(10): e124815.
- [40] Morgan H D, Barton C V M. Forest-scale sap flux responses to rainfall in a dryland eucalyptus plantation[J]. *Plant and Soil*, 2008, 305(1): 131-144.
- [41] Bosveld F C, Bouten W. Evaluating a model of evaporation and transpiration with observations in a partially wet Douglas-fir forest[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2003, 108(3): 365-396.
- [42] Yue G Y, Zhao H L, Zhang T H, et al. Evaluation of water use of *Caragana microphylla* with the stem heat-balance method in Horqin Sandy Land, Inner Mongolia, China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(11): 1668-1678.
- [43] Klein T, Shpringer I, Fikler B, et al. Relationships between stomatal regulation, water-use, and water-use efficiency of two coexisting key Mediterranean tree species[J]. *Forest Ecology and Management*, 2013, 302: 34-42.
- [44] 李宝, 常顺利, 孙雪娇, 等. 天山北坡雪岭云杉森林的蒸腾耗水规律[J]. *西部林业科学*, 2022, 51(5): 106-112.
- [45] 罗超, 查同刚, 朱梦洵, 等. 浅层地下水对华北地区河岸杨树林树干液流的影响[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(5): 1401-1407.
- (上接第 283 页)
- [32] Li C J, Pan C Z. The relative importance of different grass components in controlling runoff and erosion on a hillslope under simulated rainfall[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 558: 90-103.
- [33] Zhang J J, Gao G Y, Fu B J, et al. Formulating an elasticity approach to quantify the effects of climate variability and ecological restoration on sediment discharge change in the Loess Plateau, China [J]. *Water Resources Research*, 2019, 55: 9604-9622.
- [34] Buendia C, Bussi G, Tuset J, et al. Effects of afforestation on runoff and sediment load in an upland Mediterranean catchment[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 540: 144-157.
- [35] 余魏兢, 丁文峰, 刘宇轩, 等. 基于典型次洪泥沙动力学过程的岔巴沟流域水沙关系分析[J]. *长江科学院院报*, 2020, 37(11): 20-26.
- [36] 王振飞. 子洲县退耕还林(草)之我见[J]. *陕西水利*, 2002(2): 25.
- [37] 翟婷婷, 赵广举, 穆兴民, 等. 黄河中游典型流域极端降雨条件的水沙过程变化[J]. *泥沙研究*, 2021, 46(1): 57-63, 41.
- [38] 姜泓旭, 田鹏, 穆兴民, 等. 不同时间尺度孤山川流域水沙关系变化及驱动因素[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(2): 86-92, 215.
- [39] 雷孝章, 杨玉坡, 赵文谦. 森林对坡面流的影响研究[J]. *四川水力发电*, 2001, 20(增刊 1): 51-53.
- [40] 王健, 吴发启, 蒋学玮. 作物覆盖与径流能量的关系[J]. *人民黄河*, 2005, 27(8): 34-36, 64.
- [41] 蒋忙舟. 黄土高原典型退耕草地植被特征对土壤入渗过程的影响[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(4): 99-104, 111.
- [42] 谭学进, 穆兴民, 高鹏, 等. 黄土区植被恢复对土壤物理性质的影响[J]. *中国环境科学*, 2019, 39(2): 713-722.