

极端降水条件下大理河流域水沙特征对比分析

韩丹丹^{1,2} 穆兴民^{1,3} 高鹏^{1,3†} 赵广举^{1,3} 孙文义^{1,3} 田鹏^{1,3}

(1. 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, 712100 陕西杨凌;
2. 中国科学院大学, 100049 北京; 3. 西北农林科技大学 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 712100 陕西杨凌)

摘要: 为了研究极端降雨条件下流域径流泥沙对不同水土保持措施的反应, 揭示水土保持对暴雨洪沙的作用, 为极端降雨引发的洪灾和防治土壤侵蚀提供理论支撑。采用 Mann-Kendall 和线性回归方法对大理河流域绥德水文站 1964—2017 年实测水沙数据进行趋势分析, 并采用时间对比分析法, 对比分析 1964 年 7 月、1977 年 8 月和 2017 年 7 月 3 个月份暴雨的水沙变化特征。结果表明: 大理河流域在区域降水量未出现明显变化趋势的条件下, 流域控制站绥德水文站 1964—2017 年径流量和输沙量呈显著减少趋势。3 个月份暴雨场次降雨量基本相同, 2017 年 7 月和 1977 年 8 月径流相较于 1964 年 7 月, 分别高 308% 和 120%; 输沙量分别高 66% 和 131%。但与 1977 年 8 月暴雨相比, 2017 年 7 月径流高 85% 输沙低 39%。2017 年 7 月洪峰流量、洪量显著增大, 输沙量随径流的增大而明显减少。1964 年 7 月和 1977 年 8 月洪水表现为陡涨陡落、洪水历时短; 2017 年 7 月洪水表现为陡涨缓落, 洪峰历时明显延长。大理河流域水土保持措施有效地改变了下垫面情况, 减流减沙作用明显; 但遭遇极端降雨情况, 水土保持工程措施难以发挥良好的水土保持效益, 未来若发生大范围强降雨, 仍可能产生大水大沙的现象。

关键词: 极端降雨; 水土保持; 水沙特征; 大理河流域

中图分类号: S157.1 文献标志码: A 文章编号: 2096-2673(2019)06-0061-08

DOI: 10.16843/j.sswc.2019.06.008

Comparative study on characteristics of runoff and sediment under extreme precipitation conditions in Dali River Basin

HAN Dandan^{1,2}, MU Xingmin^{1,3}, GAO Peng^{1,3}, ZHAO Guangju^{1,3}, SUN Wenyi^{1,3}, TIAN Peng^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Agriculture on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, 712100, Yangling, Shaanxi, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, 100049, Beijing, China; 3. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Agriculture on Loess Plateau, Northwest A&F University, 712100, Yangling, Shaanxi, China)

Abstract [Background] This paper is to study the responses of runoff and sediment characteristics under extreme precipitation conditions in different soil and water conservation measures in the Dali River Basin as an example. To reveal the role of soil and water conservation would provide a reliable theoretical support for floods caused by extreme rainstorm and for prevention of water loss and soil erosion. **[Methods]** Based on the precipitation data, runoff data, and sediment yield data of Suide station of the Dali River Basin from 1964 to 2017, we used Mann-Kendall trend test and linear regression method to analyze the changes in trends. In addition, we used statistical methods to analyze runoff and sediment

收稿日期: 2018-12-20 修回日期: 2019-11-25

项目名称: 科技基础性工作专项“生态工程与水沙变化调查”(2014FY210120); 国家重点研发计划“黄土高原水土流失治理与生态产业协同发展技术集成与模式”(2016YFC0501707)

第一作者简介: 韩丹丹(1993—)女, 硕士研究生。主要研究方向: 生态水文及水土保持。E-mail: handandan17@mails.ucas.ac.cn

† 通信作者简介: 高鹏(1976—)男, 博士, 研究员, 博士生导师。主要研究方向: 生态水文及水土保持。E-mail: gaopeng@ms.iswc.ac.cn

characteristics in rainstorm floods of July 1964, August 1977 and July 2017 with different periods of soil and water conservation. [Results] Under the condition of no obvious change trend of precipitation, the runoff amount and sediment yield of the basin observed from the Suide station in 1964–2017 showed a declining trend. However, different effects were shown on the characteristics of runoff and sediment yield under extreme rainstorm conditions. Under the three extreme rainstorm conditions, the precipitation was basically the same. Compared with July 1964, the runoff in July 2017 and August 1977 was greater than 308% and 120%, respectively, and the sediment yield was greater than 66% and 131%, respectively. However, the runoff in July 2017 compared with the rainstorm in August 1977 was higher than 85% and the sediment yield was lower than 39%. In July 2017, the flood peak flow and flood amount increased significantly, while the sediment yield decreased significantly with the increase of runoff. Flooding in July 1964 and August 1977 were characterized by steep rise and fall of water and a very short duration. In July 2017, the flood showed a steep rise and slow fall of water, and the duration of flood peak significantly prolonged. [Conclusions] Soil and water conservation measures in the Dali River Basin have effectively changed the underlying surface conditions and played an obvious role in reducing runoff and sediment yield. However, for soil and water conservation engineering measures, it is difficult to play good benefits of soil and water conservation. These findings indicate that soil and water conservation engineering measures may exert good soil and water conservation benefits within a certain range; while encountering heavy rainfall and flood, soil and water conservation has a limited effect. If a large scale extreme rainfall occurs in the future, the runoff and sediment yield would be also big.

Keywords: extreme rainfall; soil and water conservation; characteristics of runoff and sediment; Dali River Basin

黄土高原是水土流失最严重的地区之一,水土流失面积占黄土高原总面积的74%^[1]。为了治理水土流失,改善自然环境,我国政府在20世纪50年代后相继实施修筑梯田、淤地坝、植树种草等水土保持工程;20世纪90年代又开始实行以植被恢复为主的退耕还林(草)工程^[2]。随着各类水土保持措施的实施,黄土高原植被覆盖度显著增加,水土流失现象明显改善^[3-6]。穆兴民等^[7]分析黄河流域河口至龙门区间1952—2000年径流和输沙量表明径流量和输沙量发生趋势性减少,这一变化与水土保持措施有关。张守红等^[8]比较了无定河流域基准期(1956—1972年)和措施期(1973—1996年)的径流和产沙量指出,水土保持措施是流域径流和侵蚀产沙减少的主要原因。诸如此类的研究已在黄土高原广泛开展,然而针对某几次极端降雨条件下流域水土保持措施对水沙的影响研究较为缺乏。暴雨是引起黄土高原土壤侵蚀的主要营力,1年中1场或几场暴雨产生的土壤侵蚀量可达全年的90%以上^[9]。因此,探讨不同水土流失治理时期极端降雨条件下的流域产流产沙特征尤为重要。

位于黄河中游地区的无定河流域水土流失严重,而大理河是无定河最大的一级支流,也是无定河

支流中水土流失最严重的一条支流^[10]。有完整水文气象记录以来,绥德地区发生了3次典型的强降雨事件,分别在1964年7月、1977年8月和2017年7月。1964年7月的暴雨为有雨量记载以来的特大暴雨,造成严重损失^[11]。1977年8月绥德县全部公社遭遇山洪灾害,受灾面积6670多 hm^2 ,冲毁土坝2600多座。2017年7月暴雨,大理河最大流量达3160 m^3/s ,其中,积水最深处达4m,淤泥堆积最高厚度达2m,受灾共计17万人次,直接经济损失达42.32亿元^[12]。由于下垫面变化,大理河流域发生不同时期的暴雨导致的灾害、河流洪水情景不同。笔者通过对比分析大理河流域1964年7月、1977年8月和2017年7月3个月份暴雨的水沙特征,讨论不同时期洪水水沙特征对暴雨的响应,为该区域水土保持措施布设及暴雨洪水灾害防治提供科学参考。

1 研究区概况

大理河流域位于陕西省北部(E 109°14′~110°13′, N 37°30′~37°56′),是无定河流域最大的支流,其发源于靖边县南边的白于山东侧,自西向东流经陕西省靖边、横山、子洲3县,至绥德县城附近注入无

定河。干流全长 170 km,流域面积 3 906 km²,河床比降为 3.16%,流域共设有 4 个水文站,为青阳岔水文站、李家河水文站、曹坪水文站和绥德水文站,其中绥德站为流域出口,集水面积为 3 893 km²,占

全流域面积 99.7%。该流域梁峁起伏,沟壑纵横(图 1) 植被稀疏,水土流失严重,多年平均降雨量为 478.0 mm,年径流量为 1.82 亿 m³,年输沙量为 0.65 亿 t,是典型的多沙粗沙区间。

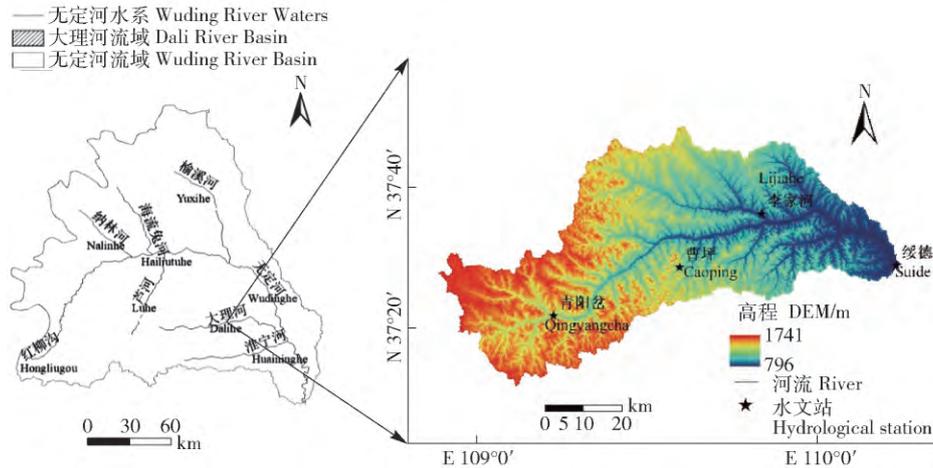


图 1 大理河流域地理位置及水文站分布

Fig. 1 Distribution of the hydrological stations in the Dali River Basin

2 研究资料与方法

2.1 数据来源

降雨量数据选用大理河流域绥德气象站和青阳岔、曹坪、李家河 3 个雨量站 1964—2017 年的逐年降雨量以及 1964 年 7 月、1977 年 8 月和 2017 年 7 月逐日降水。径流、输沙量数据选用大理河流域控制站绥德水文站的 1964—2017 年的逐年径流、输沙以及 1964 年 7 月、1977 年 8 月和 2017 年 7 月水文要素实测值。以上资料均来源于水利部黄河水利委员会《黄河流域水文资料年鉴》。

2.2 研究方法

笔者采用 Mann-Kendall 和线性回归方法分析大理河流域控制站绥德水文站 1964—2017 年实测水沙数据的变化趋势^[13],并运用统计学方法对大理河流域控制站绥德站 1964 年、1977 年和 2017 年降水、径流和输沙资料进行统计并对特征值做简单比较^[14-15]。分别从长时间序列、月内过程分配以及洪水过程对比分析降雨量以及对应的水沙特征变化,结合流域的不同时期水土保持措施情况,讨论暴雨条件下洪水水沙特征对植被恢复的响应特征。

3 结果与分析

3.1 年降水量、径流量和输沙量变化趋势

大理河流域不同年代 3 个水文要素特征值见表 1。多年平均降水量为 444.6 mm,年均径流量为

1.34 亿 m³,年均输沙量为 0.27 亿 t。代际间,降水量没有明显的变化,径流量和输沙量呈减少趋势。在减少的过程中,20 世纪 90 年代有小幅增加,2010—2017 年径流量和输沙量减少显著,相对于多年平均分别减少 19% 和 66%。

大理河流域 1964—2017 年实测降水量、径流量和输沙量见图 2。可以看出降水量波动幅度较小,径流量和输沙量波动较大,且输沙值波动幅度大于径流量。径流量和输沙量下降趋势达到 0.01 的显著性水平,年径流量和输沙量分别以每年 -129 万 m³ 和 -72 万 t 的速率下降,而降水量没有显著的变化趋势(表 2)。3 个所选暴雨年,1964 年降雨量、径流量和输沙量分别高于多年平均值的 54%、89% 和 220%,1977 年高于多年平均值的 14%、69% 和 195%,2017 年高于多年平均值的 21%、68% 和 30%。

3.2 月内降水过程及水沙特征比较

大理河流域 1964 年 7 月暴雨主要有 2 次降雨过程,分别为 5 日和 20 日,面最大降雨量为 5 日的 79.6 mm。1977 年 8 月暴雨主要出现在 5 日,面降雨量为 76.4 mm,与 1964 年基本相当。2017 年 7 月暴雨发生在 26 日,面最大降雨量为 139 mm,比 1964 年高 75%,比 1977 年高 82%。

1964 年 7 月最大径流出现在 6 日,与最大降雨量延迟 1 日,为 309 m³/s,其次为 21 日 231 m³/s,其他时间径流介于 1.48 ~ 32.2 m³/s 之间。1977 年 8

表1 大理河流域不同年代水文要素特征值

Tab.1 Characteristic values of hydrological elements in Dali River Basin in different years

年份 Year	降水量 Precipitation			径流量 Runoff amount			输沙量 Sediment yield		
	平均值 Mean/ (mm·a ⁻¹)	极值比 Ratio of maximum to minimum	变异系数 Variable coefficient	平均值 Mean/ (10 ⁸ m ³ ·a ⁻¹)	极值比 Ratio of maximum to minimum	变异系数 Variable coefficient	平均值 Mean/ (10 ⁸ t·a ⁻¹)	极值比 Ratio of maximum to minimum	变异系数 Variable coefficient
1964—1969	484.90	2.10	0.31	1.92	2.78	0.28	0.57	14.00	0.75
1970—1979	417.09	1.93	0.24	1.47	2.61	0.36	0.39	9.20	0.81
1980—1989	414.41	1.53	0.16	1.23	1.58	0.18	0.20	4.63	0.48
1990—1999	412.68	2.00	0.21	1.38	2.01	0.40	0.37	8.33	0.71
2000—2009	457.96	1.91	0.21	1.16	2.14	0.27	0.22	25.5	0.78
2010—2017	509.93	1.77	0.18	1.08	3.04	0.46	0.10	19.00	1.14
多年平均 Multi-year average	444.60	2.98	0.24	1.34	3.53	0.37	0.29	50	0.92

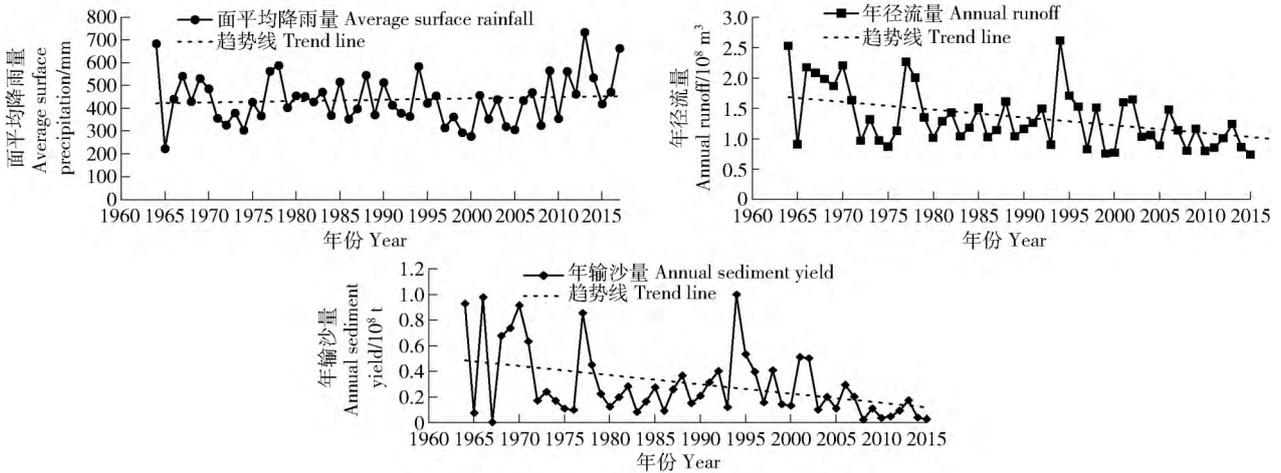


图2 大理河流域 1964—2017 年面平均降水量、年径流量、年输沙量过程线

Fig.2 Variation of average surface precipitation, annual runoff and annual sediment yield in Dali River Basin from 1964 to 2017

表2 大理河流域水文3要素年际变化的趋势分析

Tab.2 Trend analysis on interannual variation of three hydrological elements in Dali River Basin

类别 Categories	Mann-Kendall 检验 (M-K test)		线性回归 (Linear regression)	
	Z-检验统计量 Z value	显著性水平 Significance level	相关系数 Correlation coefficient	显著性水平 Significance level
降水量 Precipitation	0.23	不显著 (Insignificant)	0.089	不显著 (Insignificant)
径流量 Runoff	-3.10	0.01	-0.409	0.01
输沙量 Sediment yield	-2.81	0.01	-0.418	0.01

月最大径流出现在5日,与最大降雨量同步,为680 m³/s,高于1964年120%。2017年7月最大径流出现在26日,最大降雨同步,为1260 m³/s,均大于1964年和1977年,分别高308%和85%。

1964年和2017年7月输沙变化过程与径流量基本同步,1964年输沙呈“双峰型”,1977年和2017年呈“单峰型”。1964年7月,最大输沙出现在6日,为1944万t,1977年8月最大输沙在8月5日,

为4484万t,高于1964年最大输沙的131%。2017年最大输沙在7月26日,为3231.3万t,高于1964年66%,低于1977年39%(图3)。

3.3 洪水特征对比分析

3.3.1 降雨量对比分析 1964年7月、1977年8月和2017年7月大理流域绥德站降雨情况统计分析见表3。2017年7月绥德站降雨历时和一次降水量均小于1964年7月,但其最大4h降雨量大于

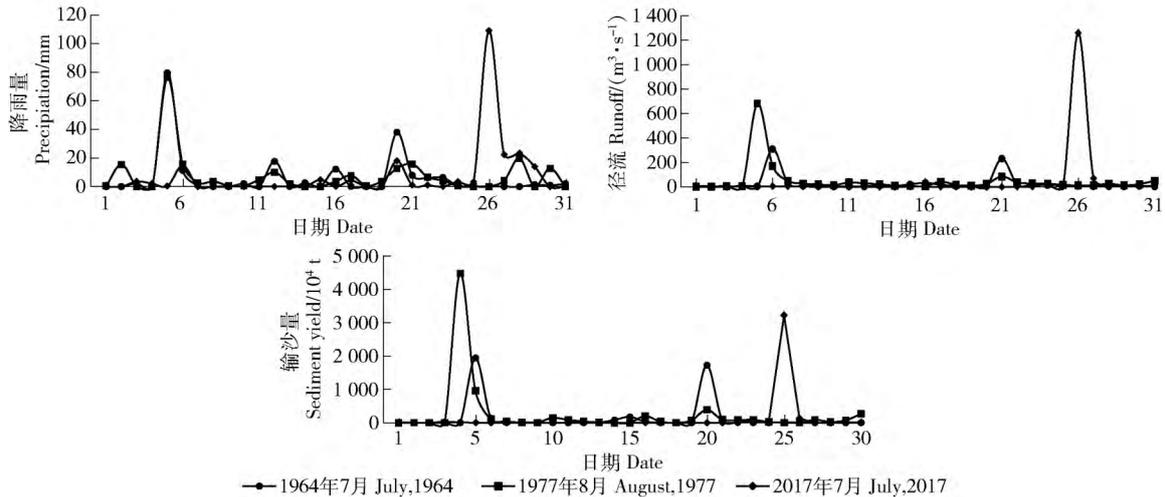


图 3 大理河流域 1964 年 7 月、1977 年 8 月和 2017 年 7 月面降雨及水沙要素变化过程

Fig. 3 Variation of precipitation, runoff and sediment concentration in July 1964, August 1977 and July 2017

表 3 大理河绥德站降雨特征分析

Tab. 3 Analysis of rainfall characteristics in Suide station of Dali River Basin

日期 Date	一次降水量 Individual rainfall/mm	历时 Duration/h	最大 1 h 降雨量 Maximum 1-hour rainfall/mm	最大 4 h 降雨量 Maximum 4-hour rainfall/mm
1964-07	114.9	17	28	62
1977-08	108.5	9	33.2	78
2017-07	109.2	5		87

1964 年。与 1977 年 8 月相比, 2017 年月降水历时短, 1 次降水量基本相当, 且其最大 4 h 降雨量大于 1977 年 8 月。

3.3.2 洪峰流量对比分析 1964 年 7 月 6 日的洪水青阳岔出现了特大洪峰, 流量高达 $1\ 140\ \text{m}^3/\text{s}$, 为 2017 年前的历史最大值, 绥德站出现大洪峰, 流量

为 $1\ 740\ \text{m}^3/\text{s}$, 李家河和曹坪站均无大洪峰出现。1977 年 8 月 5 日绥德站出现了特大洪峰, 流量高达 $2\ 450\ \text{m}^3/\text{s}$, 为 2017 年前的历史最大值, 其余站点均表现为无峰。2017 年 7 月 26 日青阳岔、绥德站出现特大洪峰, 流量分别为 $1\ 840$ 和 $3\ 160\ \text{m}^3/\text{s}$, 均突破了 2017 年前的历史最大值。

表 4 1964 年、1977 年和 2017 年洪水洪峰流量与历史大洪水比较

Tab. 4 Flood peak flow of 1964, 1977 and 2017 compared with historical flood m^3/s

站点 Sites	1964 年洪峰流量	1977 年洪峰流量	2017 年洪峰流量	历史纪录最大洪水流量	
	Flood peak in 1964	Flood peak in 1977	Flood peak in 2017	Peak flow in historical records	
	7 月 5 日 July 5	8 月 5 日 August 5	7 月 26 日 July 26	洪峰流量 Peak flow	年份 Year
青阳岔站 Qingyangcha Station	1 140	未明显涨水(No significant flooding)	1 840	1 140	1964
李家河站 Lijiahe Station	386	未明显涨水(No significant flooding)	997	1 350	1994
绥德站 Suide Station	1 740	2 450	3 160	2 450	1977
曹坪站 Caoping Station		903	307	1 520	1966

3.3.3 洪水过程线对比分析 1964 年 7 月和 1977 年 8 月绥德站洪水陡涨陡落、洪水历时短的特点, 2017 年 7 月洪水表现为陡涨缓落, 洪峰历时长的特点。1964 年 7 月暴雨过程线呈双峰型, 前后峰值分别为 $1\ 740$ 和 $852\ \text{m}^3/\text{s}$ 。与 1964 年 7 月相比, 1977 年 7

月洪水历时长, 洪峰大, 持续时间长, 约 4 h。而 2017 年 7 月洪水强度大, 历时短, 洪水流量从 0 到 $3\ 160\ \text{m}^3/\text{s}$ 仅用了 5 h, 而流量在 $2\ 700\ \text{m}^3/\text{s}$ 以上持续了 6 h 左右, 洪峰流量明显高于 1964 年和 2017 年。

3 次暴雨最大含沙量基本相当, 但与 1964 年 7

月和1977年8月相比,2017年7月高含沙量历时短。1964年7月最大含沙量为 873 kg/m^3 ,1977年8月为 893 kg/m^3 ,2017年7月为 839 kg/m^3 。1964年7月含沙量随降雨增加而迅速增加,在6日03:00

左右基本维持在 600 kg/m^3 以上,持续约15 h。1977年8月实测含沙量基本与1964年相当,同样在维持 600 kg/m^3 以上持续15 h。而2017年7月含沙量增长速度较缓,为13 h左右(图4)。

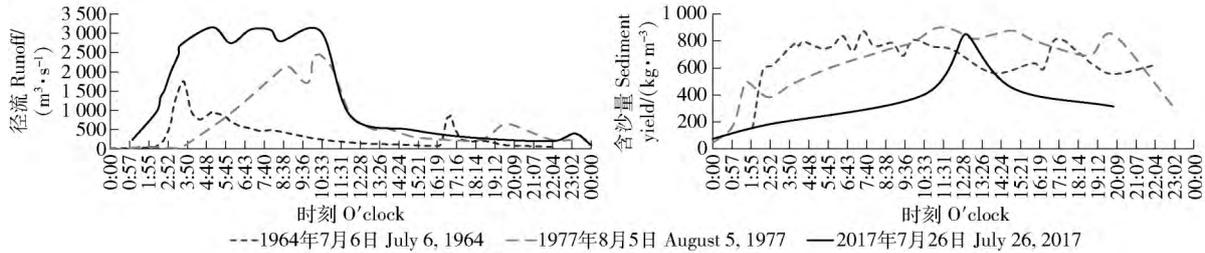


图4 绥德站1964年、2017年7月和1977年8月洪水输沙过程线

Fig. 4 Flood sediment process on July in 1964 and 2017, August in 1977 of Suide Station

4 讨论

河道径流泥沙主要受气候因子、地质地貌、人类活动的影响^[16-17]。各因素中,地质地貌条件短时期不变,气候因子主要为降雨,人类活动则包括水利水保工程,工农业耗水等。短降雨产流产沙周期内,工农业耗水可以忽略,因此径流输沙量主要受降雨和水利水保工程控制。

4.1 水土保持工程措施对大理河流域径流量的影响

在1972—1996年流域内进行大规模水土保持活动的实施,主要以修建梯田、淤地坝等水土保持工程措施为主。梯田面积由1956年的 430 hm^2 持续增长到2002年的 $2\text{万}1\text{793}\text{ hm}^2$,增加约50倍(表5)。梯田工程具有蓄水保土,减轻土壤侵蚀,增强降雨入渗的特点,坝库工程具有减流减沙的作用^[12]。但遭遇连续的强降雨时,因坡面植被措施面积小,无拦截作用,遇暴雨迅速产流,在流域形成特大洪峰使部分淤地坝损毁,河流水沙陡增,且1977年8月为强降雨,致使洪水泥沙极度增多。说明水土保持工程措施在一定范围内可以滞流减沙,但超过其承载力,难以发挥良好的水土保持效益。

4.2 退耕还林(草)对大理河流域水沙特征的影响

流域在1999年以后进行大规模的以退耕还林(草)为主的植被恢复工程,林草面积迅速增加,1956年林地和草地的面积分别为 3521 和 451 hm^2 ,截至在2002年林地、草地分别达到 $7\text{万}8\text{872}$ 和 $5\text{012}\text{ hm}^2$,林地和草地面积分别增加21倍和10倍(表5)。植被及枯枝落叶层具有截留作用,能够减少地表径流。大理河流域年间年径流深径流系数呈下降趋势,其原因是植被恢复措施使得下垫面情况改善,植被覆盖率增加,从而引起径流系数的减

少^[18]。1964—2017年,大理河绥德站降水量没有明显变化,径流量和输沙量明显减少,说明经过几十年的水土保持措施,流域下垫面情况已得到改善。

在极端降雨条件下,径流系数和侵蚀模数要比对应的多年平均值高^[19]。植被主要是通过截留、入渗来减少径流,而高强度降雨已经超过植被的承载力以及入渗能力。抵御极端降雨最弱的是坡耕地,在遭遇高强度、大范围降雨时,直接形成地表径流携带大量泥沙汇入河道,因此极易产生大沙的情况。

1964年7月和2017年7月均为短历时强降雨,降雨强度极大,造成严重侵蚀。1964年7月大理河流域为无水土保持措施时期,坡面无拦截作用,沟道、河道无拦蓄泥沙作用;所以在降雨初始,土壤含水量逐渐增加,随着降水持续,土壤达到饱和,雨滴的击溅侵蚀加强,土壤颗粒分离,携带水沙迅速形成坡面流。然而,2017年径流、输沙量却大于1964年,其径流大于1977年,输沙量却小于1977年,表明植被恢复的减沙作用高于减流作用。綦俊谕、徐佳和蔺鹏飞等研究亦表明,黄土高原由于多沙粗沙沟深坡陡,地形破碎的原因,导致植被恢复的减沙效益大于减流效益^[20-22]。

表5 大理河流域水土保持措施累计治理面积^[23]

Tab. 5 Cumulative control areas by soil and water conservation measures in the Dali River Basin hm^2

年份	梯田	林地	草地	合计
Year	Terraced filed	Forest field	Grassland	Total
1956	430	3 521	451	4 402
1964	1 087	10 390	1 051	12 528
1974	4 313	20 209	2 740	27 262
1984	7 047	43 270	4 614	54 931
1994	13 899	86 020	6 792	106 711
2002	21 793	78 872	5 012	105 677

5 结论

1964—2017年大理河流域年径流量和输沙量呈显著减少趋势,而降水量并未表现出明显的变化趋势,表明水土保持与生态环境建设等人类活动显著影响了流域水沙变化。

3个月暴雨中,场次雨量基本相同,但2017年7月和1977年8月径流相较于1964年7月,分别高308%和120%;输沙量分别高66%和131%。但与1977年8月暴雨相比,2017年7月径流高85%,输沙量低39%。2017年7月洪峰流量、洪量显著增大,输沙量随径流的增大而明显减少。1964年7月和1977年8月洪水表现为陡涨陡落、洪水历时短;2017年7月洪水表现为陡涨缓落,洪峰历时明显延长。

综合研究结果表明:水土保持措施有效的改变了下垫面情况,对流域水沙产生重大影响;然而,遭遇极端降雨情况,坝库、梯田等工程措施难以发挥良好的水土保持效益。植被恢复措施虽能积极抵御暴雨产沙,但其减流效果有限;因此,在黄土高原进行生态建设时,应根据区域气候、地形、地貌特征优化配置水土保持措施,以预防因极端降雨导致垮坝、毁田、滑坡等灾害。

6 参考文献

- [1] 栾勇. 退耕还林对黄土高原小流域土壤侵蚀控制效果研究:以陕西省延安市羊圈沟小流域为例[D]. 北京:北京林业大学,2008:8.
LUAN Yong. Study on the soil erosion control benefit of converting cropland to forest for the small watershed in the Loess Plateau: A case study of the Yangjuangou small watershed, Yan'an city, Shaanxi province [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2008: 8.
- [2] 穆兴民. 黄土高原水土保持对河川径流及土壤水文的影响[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2002:12.
MU Xingmin. Impacts of soil and water conservation on river flow and soil-hydrology on the Loess Plateau [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest Agriculture & Forestry University, 2002: 12.
- [3] JIA Xiaoqing, FU Bojie, FENG Xiaoming, et al. The tradeoff and synergy between ecosystem services in the Grain-for-Green areas in northern Shaanxi, China [J]. *Ecological Indicators*, 2014, 43: 103.
- [4] MU Xingmin, ZHANG Xiuqin, SHAO Hongbo, et al. Dynamic changes of sediment discharge and the influencing factors in the Yellow River, China, for the recent 90 years [J]. *Clean Soil Air Water*, 2012, 40(3): 303.
- [5] GAO Peng, JIANG Guantao, WEI Yongping, et al. Streamflow regimes of the Yanhe River under climate and land use change, Loess Plateau, China [J]. *Hydrological Processes*, 2015, 29(10): 2402.
- [6] 许炯心. 黄河中游多沙粗沙区1997—2007年的水沙变化趋势及其成因[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(1): 7.
XU Jiongxin. Trend of sediment yield in the coarser sediment producing area in the middle Yellow River Basin in the period 1997 - 2007 and the formative cause [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(1): 7.
- [7] 穆兴民, 巴桑赤烈, ZHANG Lu, 等. 黄河河口镇至龙门区间来水来沙变化及其对水利水保措施的影响[J]. *泥沙研究*, 2007(2): 36.
MU Xingmin, BASANG Chille, ZHANG Lu, et al. Impact of soil conservation measures on runoff and sediment in Hekou-Longmen region of the Yellow River [J]. *Journal of Sediment Research*, 2007(2): 36.
- [8] 张守红, 刘苏峡, 莫兴国, 等. 降雨和水保措施对无定河流域径流和产沙量影响[J]. *北京林业大学学报*, 2010, 32(4): 168.
ZHANG Shouhong, LIU Suxia, MO Xingguo, et al. Impact of precipitation variation and soil and water conservation measures on runoff and sediment yield in the Wuding River Basin, middle reaches of the Yellow River [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2010, 32(4): 168.
- [9] 王占礼, 邵明安, 常庆瑞. 黄土高原降雨因素对土壤侵蚀的影响[J]. *西北农业大学学报(自然科学版)*, 1998, 26(4): 102.
WANG Zhanli, SHAO Ming'an, CHANG Qingrui. Effects of rainfall factors on soil erosion in Loess Plateau [J]. *Journal of Northwestern Agricultural University*, 1998, 26(4): 102.
- [10] 魏霞, 李占斌, 李勋贵, 等. 大理河流域水土保持减沙趋势分析及其成因[J]. *水土保持学报*, 2007, 21(4): 67.
WEI Xia, LI Zhanbin, LI Xungui, et al. Tendency of water and sediment reduction through soil and water conservation and its cause of formation in Dalihe River Basin [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(4): 67.
- [11] 魏秉钰, 马振源, 周国平. 从1964年7月5日特大暴雨看绥德韭园沟大样板治理效益[J]. *黄河建设*, 1965(6): 28.
WEI Bingyu, MA Zhenyuan, ZHOU Guoping. The benefit of large model management of Suide Jiuyuangou from

- the rainstorm on July 5, 1964 [J]. Construction of the Yellow River, 1965 (6): 28.
- [12] 张金良, 刘继祥, 万占伟, 等. 黄河2017年第1号洪水雨洪泥沙特性分析[J]. 人民黄河, 2017, 39(12): 17.
ZHANG Jinliang, LIU Jiwei, WAN Zhanwei, et al. Analysis of rainfall-flood-sediment characteristics of the No. 1 flood in 2017 in the Yellow River [J]. Yellow River, 2017, 39(12): 17.
- [13] 陈中平, 徐强. Mann-Kendall 检验法分析降水量时程变化特征[J]. 科技通报, 2016, 32(6): 47.
CHEN Zhongping, XU Qiang. Analysis of precipitation characteristics by Mann-Kendall test method [J]. Bulletin of Science and Technology, 2016, 32(6): 47.
- [14] 陈瑞东, 温永福, 高鹏, 等. 极端降水条件下延河水沙特征对比分析及其影响因素研究[J]. 生态学报, 2018, 38(6): 1922.
CHEN Ruidong, WEN Yongfu, GAO Peng, et al. Comparative analysis of flow and sediment characteristics of the Yanhe River under extreme rainfall conditions and research on influence factors [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(6): 1922.
- [15] 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): 1757.
GU Chaojun, MU Xingmin, SUN Wenyi, et al. Comparative analysis of the responses of rainstorm flood and sediment yield to vegetation rehabilitation in the Yanhe River Basin [J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(10): 1757.
- [16] 王光谦, 张长春, 刘家宏, 等. 黄河流域多沙粗沙区植被覆盖变化与减水减沙效益分析[J]. 泥沙研究, 2006(2): 11.
WANG Guangqian, ZHANG Changchun, LIU Jiahong, et al. Analysis on the variation of vegetation coverage and water/sediment reduction in the rich and coarse sediment area of the Yellow River Basin [J]. Journal of Sediment Research, 2006(2): 11.
- [17] RUSTOMJI P, ZHANG X P, HAIRSINE P B, et al. River sediment load and concentration responses to changes in hydrology and catchment management in the Loess Plateau region of China [J]. Water Resources Research, 2008, 44(W00A04): 14.
- [18] 尹秋龙, 焦菊英, 寇萌. 极端强降雨条件下黄土丘陵沟壑区不同植被类型土壤水分特征[J]. 自然资源学报, 2015, 30(3): 460.
YIN Qiulong, JIAO Juying, KOU Meng. The soil moisture characteristics under different vegetation types after extremely heavy rainfall on the hilly-gullied Loess Plateau [J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(3): 460.
- [19] 卫伟, 陈利顶, 傅博杰, 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, 30(6): 898.
WEI Wei, CHEN Liding, FU Bojie, et al. Extreme rainfall events and their effects on runoff and sediment yield in the loess hilly area [J]. Arid Land Geography, 2007, 30(6): 898.
- [20] 綦俊谕, 蔡强国, 蔡乐, 等. 岔巴沟、大理河与无定河水土保持减水减沙作用的尺度效应[J]. 地理科学进展, 2011, 30(1): 101.
QI Junyu, CAI Qiangguo, CAI Le, et al. Scale effect of runoff and sediment reduction effects of soil and water conservation measures in Chabagou, Dalihe and Wudinghe Basins [J]. Progress in Geography, 2011, 30(1): 101.
- [21] 徐佳, 刘普灵, 邓瑞芬, 等. 黄土坡面不同植被恢复阶段的减流减沙效益研究[J]. 地理科学, 2012, 32(11): 1391.
XU Jia, LIU Puling, DENG Ruifen, et al. Runoff and sediment reductions in the different stages of vegetation restoration on a loess slope [J]. Scientia Geographica Sinica, 2012, 32(11): 1391.
- [22] 蔺鹏飞. 北洛河上游次洪水沙过程对生态恢复的响应研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015: 23.
LIN Pengfei. The responses of the flood runoff and sediment load to vegetation restoration in the upper reaches of Beiluo River [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015: 23.
- [23] 亢伟. 大理河流域坡面水土保持措施减沙作用及其变化过程研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2008: 43.
KANG Wei. Analysis on the sediment reduction effects and its change process of the soil and water conservation measures on slopes in Dali River watershed [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2008: 43.