

DOI: 10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2017.03.015

# 黄土高原沟壑区典型小流域不同洪水类型的侵蚀输沙特征

崔胜寓<sup>1</sup>, 宋孝玉<sup>1</sup>, 李怀有<sup>2</sup>, 李焱林<sup>2</sup>

(1. 西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 陕西 西安 710048;

2. 黄河水利委员会 西峰水土保持科学试验站, 甘肃 西峰 745000)

**摘要:** 为明确黄土高原沟壑区不同洪水类型及不同水土保持治理时期的径流侵蚀输沙特征, 根据相关标准从 1964—1985 年间的流域径流事件中挑选出 100 场洪水, 利用快速聚类法和判别聚类法将筛选出来的 100 场洪水事件分成 A、B、C 三类, 三种洪水类型表现出各异的径流输沙规律: 累计径流量和累计输沙量所占比例最高的洪水类型为 A 型和 C 型洪水, 所占比例分别为 64% 和 74%; 在流域产流能力上 C 型洪水的产流能力最强, B 型洪水次之; 根据方差分析结果, 洪水类型对流域降雨产流能力、水土流失程度以及流域水沙关系均具有一定的影响, 径流系数和输沙模数的显著减少和洪峰流量的降低表明多年来所进行的各类水保措施起到了拦蓄径流泥沙、削减洪峰的生态效用。

**关键词:** 洪水类型; 快速聚类法; 判别聚类法; 流域水沙关系

**中图分类号:** S157.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-4710(2017)03-0338-07

## The characters of different flood regimes on soil erosion and sediment transport in a typical small watershed in the gully region of the Loess Plateau

CUI Shengyu<sup>1</sup>, SONG Xiaoyu<sup>1</sup>, LI Huaiyou<sup>2</sup>, LI Yaolin<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology,

Xi'an 710048, China; 2. Xifeng Experiment Station of Soil and Water Conservation, Yellow River

Conservancy Committee, Xifeng 745000, China)

**Abstract:** In order to clarify the flood type's characteristic of runoff and erosion in Gully region of Loess Plateau, 100 floods are selected from the flood events which happened during 1964—1985 according to the related standards. And then those floods are classified into A, B and C with the help of the fast clustering method and the discriminant clustering method. Correspondingly they have their own trait with type A and type C possessing the highest accumulative runoff and sediment which are 64% and 74% respectively. Type C has the strongest runoff generation capacity, with the second strongest being type B. According to the variance analysis, flood type has an impact on runoff generation capacity, soil erosion degree and water-sediment relationship, and reduces the runoff coefficient with sediment transport modulus means soil conservation measures coming into effect.

**Key words:** flood type; fast clustering method; discriminant clustering method; water and sediment relationship

土壤侵蚀一直以来威胁着人类的生存与发展, 作为流域及坡面侵蚀的主要方式——水力侵蚀危害

**收稿日期:** 2016-11-01

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51239009, 41171034); 陕西省教育厅重点实验室科研计划资助项目(14JS059); 陕西省水利科技计划资助项目(2016slkj-11)

**作者简介:** 崔胜寓, 男, 硕士生, 研究方向为水土保持。Email: cuishengyu811@163.com

**通讯作者:** 宋孝玉, 女, 教授, 博导, 博士, 研究方向为生态水文学及水资源。Email: songxy@xaut.edu.cn

极大,不仅使水土资源流失,还造成河湖塘库泥沙淤积。降雨是土壤侵蚀的主要影响因素,而诱发水力侵蚀的主要动力来源为雨滴的击溅作用及地表径流的冲刷<sup>[1]</sup>。因此,辨析不同降雨及径流类型条件下的侵蚀输沙关系,有利于深刻阐释区域水土流失规律,并起到促进水土保持措施合理规划的作用<sup>[2-6]</sup>。近年来,基于坡面径流调控的各类水土保持措施优化配置等方面的研究已被广泛关注,且取得了一定的成果<sup>[7-11]</sup>。目前,虽有少量有关洪水过程调控下的径流输沙效益方面的研究<sup>[12]</sup>,但这并不能系统揭示不同洪水类型下的坡面侵蚀输沙关系及其对侵蚀过程的影响,水土保持措施的减水减沙效益与径流调控的响应关系也未能得到确定。根据相关研究成果<sup>[13,14]</sup>,暴雨所引发的洪水事件是引起流域水土流失的核心驱动因素。因此,明确不同洪水事件驱动下的侵蚀输沙规律及其与水土保持措施的相应关系,是合理实施水土保持治理工作的关键,在理论和实践层面均具有非常重要的意义。

本文以黄土高原沟壑区典型小流域南小河沟流域为例,以1964—1985年的水文泥沙测量数据为基础,通过数理统计的方法将流域次洪水进行分类,分析不同洪水类型及其相应的侵蚀产沙效应,在此基础上,结合西峰水土保持实验站对南小河沟流域的治理情况,将1964—1985年分为三个时期,即治理初期、中期和后期,分析不同治理时期的产流和侵蚀情况,以期更全面深入地揭示黄土高原沟壑区次洪水的侵蚀产沙规律,丰富径流调控的内涵,为该地区水土保持工作提供理论指导。

## 1 研究区概况

南小河沟流域地处甘肃省庆阳市西峰区境内,系泾河二级支流,位于东经 $107^{\circ}30'00''$ 至 $107^{\circ}37'00''$ ,北纬 $37^{\circ}41'00''$ 至 $35^{\circ}44'00''$ 之间,总面积 $36.3\text{ km}^2$ 。流域总长度 $13.6\text{ km}$ ,平均宽度 $3.4\text{ km}$ ,形状系数 $0.25$ 。流域内多年平均降水量 $523.4\text{ mm}$ ,历史最大年降水量(2003年)为 $743.1\text{ mm}$ ,最小年降水量(1997年)为 $330.0\text{ mm}$ ,降水量年际变化大,年内分布不均,其中7至9月份三个月的降水量占全年降水量的 $63.0\%$ 。年平均气温 $9.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,年积温 $2\ 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 至 $3\ 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,年均日照时数 $2\ 454.1\text{ h}$ ,无霜期 $155\text{ d}$ ,年蒸发量 $1\ 474.6\text{ mm}$ ,主要自然灾害是干旱,其次是霜冻<sup>[15]</sup>。侵蚀形式以水力侵蚀和重力侵蚀为主,伴有风蚀。据西峰水保站实测资料分析,流域内多年平均输沙模数为 $4\ 350\text{ t}/\text{km}^2\cdot\text{a}$ ,径流模数为 $8\ 994\text{ m}^3/\text{km}^2\cdot\text{a}$ <sup>[16,17]</sup>。

南小河沟流域的水土保持工作是从1951年开始的,总体来说,治理工作可分为以下五个阶段:第一阶段为1951—1959年,此阶段的治理处于探索试验时期;第二阶段为1964—1969年,此阶段在流域的塬面上开始试搞水平条田,不少大队、生产队开始建立山地果园;第三阶段为1970—1979年,在延安水土保持会议的推动下,塬面上大面积兴修水平条田,大量的谷坊和淤地坝也在这一时期建成;第四阶段为1980—2000年,国家开始从计划经济走向商品经济,对水保投资也开始从面上投资逐步转向分项目集中投资。

## 2 数据来源及研究方法

本文所使用的数据来源于南小河沟流域控制站——十八亩台径流站的实测洪水测验成果(1964—1985年)。十八亩台测站作为南小河沟流域控制站,该站所观测的洪水事件,能够反映流域洪水状况。该测验成果详细记录了历年洪水事件的径流输沙特征以及造成洪水事件的降雨特征,包括洪水历时( $T$ )、洪峰流量( $q_p$ )、径流深( $H$ )、径流系数( $R_c$ )、输沙模数( $M_s$ )和降雨量( $P$ )、降雨强度( $I$ )等。

根据水文测站通用测验标准,本文将径流深大于 $0.05\text{ mm}$ ,洪峰流量大于 $0.1\text{ m}^3/\text{s}$ ,历时超过 $150\text{ min}$ 的汛期径流过程定义为一次洪水<sup>[18]</sup>。依据此标准,对1964—1985年(水土保持治理初期、中期、后期)间的流域径流事件进行筛选,结果显示这一阶段共发生100次洪水事件。以挑选出的洪水事件为统计样本,选取洪水历时、洪峰流量、径流深为洪水特征变量<sup>[19,20]</sup>,综合采用快速聚类法和判别聚类法对洪水事件进行分类。在划分洪水类型的基础上,分析不同水土保持治理时期和不同洪水类型对流域产流、产沙的影响。根据西峰水土保持实验站水土保持工作的历史开展情况及历史记载,1964—1969年为水土保持工作开始阶段,即治理初期;1970—1979年为水土保持治理中期;1980—1985年为水土保持治理后期。快速聚类分析和判别聚类分析以及单因素方差分析均在SPSS17.0中完成,图表的制作在Origin8.0中进行。

## 3 结果与讨论

### 3.1 洪水类型

根据张乐涛等<sup>[19]</sup>的研究成果,洪水历时( $T$ )、洪峰流量( $q_p$ )和洪水径流深( $H$ )可作为表征小流域尺度洪水事件的基本特征。快速聚类分析是一种应用广泛的分类分析方法,具有结果简单易懂、对计算机

要求不高等优点,而判别聚类分析通常与快速聚类分析搭配使用,以提高分类精度。因此,以筛选出的 100 场洪水事件为统计样本,以洪水历时  $T$ 、洪峰流量  $q_p$  和径流深  $H$  为特征变量,综合采用快速聚类法和判别聚类法将筛选出来的 100 场洪水分为 A、B、C 三种洪水类型,如图 1 所示。其中,组质心为 SPSS 软件根据样本数据特征对评价对象进行判别分类的一个基准,一个类型对应一个组质心。

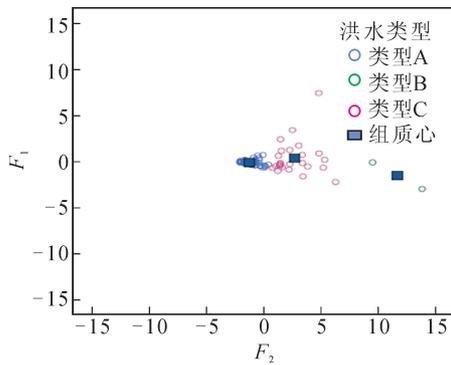


图 1 洪水事件判别分类散点图

Fig. 1 Result of discriminant analysis of flood regimes

从图 1 可知,3 种洪水类型的函数散点分别聚集在 3 个相对集中的区域,表明分类结果较为合理,其中洪水类型 B 和 C 相对分散,洪水类型 A 较为集中;各个洪水类型中,类型 A、C 的边界略临近,类型 B、C 则相距较远,且有清晰的边界。由此可知,类型 B、C 的次洪水特征变化较大,而类型 A 的次洪水

特征较为稳定,且尤以类型 B 与其他两类洪水类型的特征差异明显;A 和 C 型洪水在特征上具有一定的相似性。

判别分析函数采用 Fisher 判别函数:

$$\text{函数 1: } F_1 = 0.014H + 0.380q_p + 0.994T \quad (1)$$

$$\text{函数 2: } F_2 = -0.659H + 1.077q_p - 0.059T \quad (2)$$

洪水类型的分类函数为:

$$D_1 = 0.216H + 11.945q_p + 0.014T - 63.129 \quad (3)$$

$$D_2 = -0.227H + 7.825q_p + 0.007T - 17.863 \quad (4)$$

$$D_3 = -0.413H + 4.364q_p + 0.002T - 3.626 \quad (5)$$

聚类分析过程中三种洪水的最终聚类中心特征值如表 1 所示。

表 1 聚类判别法的三种洪水的最终聚类中心特征值  
Tab. 1 Final clustering center by the clustering discrimination method

特征值	聚类类型		
	A	B	C
径流深/mm	0.27	2.66	1.93
洪峰流量/(m <sup>3</sup> /s)	0.50	0.67	0.81
洪水历时/min	1 275	16 063	5 649

进一步统计 100 次洪水的特征值如表 2 所示。

表 2 不同洪水类型的统计特征  
Tab. 2 Statistical features of different flood regimes

洪水类型	特征值	平均值	标准差	累积量	频次
A	径流深/mm	0.27	0.28	19.54	
	洪峰流量/(m <sup>3</sup> /s)	0.50	0.40	36.63	73
	洪水历时/min	1 274.97	709.13	94 347	
B	径流深/mm	2.66	1.15	5.31	
	洪峰流量/(m <sup>3</sup> /s)	0.67	0.78	1.33	2
	洪水历时/min	16 063	3 757.57	32 126	
C	径流深/mm	1.93	2.05	48.19	
	洪峰流量/(m <sup>3</sup> /s)	0.81	0.59	20.33	25
	洪水历时/min	5 649.12	1 771.23	141 228	

由表 2 可知,在 100 次洪水事件中,A 型洪水共发生 73 次,占全部洪水事件的 73%,在 3 种洪水事件中出现频率最高,其次为 C 型洪水,共出现 25 次,发生频率为 25%,出现频率最低的为 B 型洪水,仅出现 2 次,频率为 2%。洪水特征的均值反映了洪水的一般特征;3 种洪水类型中  $H$  平均值由小到

大依次为 A、C、B; $q_p$  平均值由小到大依次为 A、B、C; $T$  平均值由小到大为 A、C、B。因此,A 型洪水可认为由发生频率最高、径流深最小、洪峰流量最小、洪水历时最短的洪水事件组成;B 型洪水则以发生频率最低、径流深最大、洪峰流量居中、洪水历时最长的洪水事件组成;C 型洪水以发生频率居中、径流

深居中、洪峰流量最大、洪水历时居中为特征的洪水事件组成。

### 3.2 不同洪水类型下的产流和产沙

统计南小河沟流域不同洪水类型的累计降雨量、累计径流量和累计输沙量分别占全部 100 场洪水事件总量的比例,如图 2 所示。由图 2 可知,A 型洪水的累计降雨量占总降雨量的比例最大,为 53%,相应的累计径流量所占比例也明显高于其他两种洪水类型,为 64%,但累计输沙量所占比例仅为 21%;B 型洪水的累计降雨量所占比例最小,仅为 8%,累计径流量和输沙量所占比例也最小,仅为 1%和 4%;C 型洪水累计降雨量所占比例介于 A 型和 B 型之间,为 28%,累计径流量所占比例符合累计降雨量的规律,介于 A 型和 B 型之间,为 35%,但其累计输沙量所占比例高达 74%,远高于 A 型和 B 型。

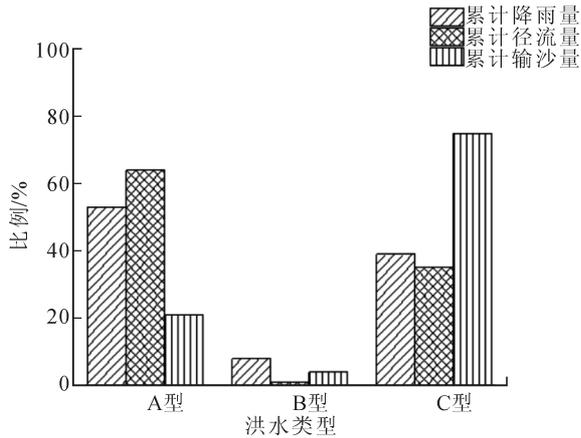


图 2 不同洪水事件的累计降雨量、累计径流量和累计输沙量所占比例

Fig. 2 Percentage of accumulated precipitation, runoff and suspended sediment yield under different flood regimes

南小河沟流域不同类型洪水事件的径流输沙特征如图 3、图 4、图 5 所示,反映各类洪水事件的径流系数(图 3)、输沙模数(图 4)和洪水事件的平均含沙量(图 5)。图中的数字代表统计上的显著性差异情况(单因素方差分析),即不同的数字表示显著性差异,相同则表示差异不显著。

不同的径流系数表征不同的流域降雨产流能力,径流系数越大,表明流域降雨产流能力越强。由图 3 可知,三种洪水类型的径流系数由小到大依次为 A、B、C 型,相应的流域产流能力从小到大依次为 A、B、C 型。A 型洪水的径流系数与 C 型洪水的径流系数存在显著性差异,但是与 B 型洪水的径流系数没有显著性差异,表明洪水类型对流域降雨产流能力有一定的影响。

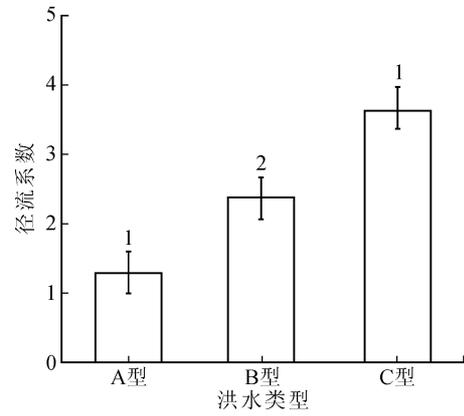


图 3 南小河沟流域不同类型洪水事件的径流系数  
Fig. 3 Runoff coefficient of different flood regimes in Nanxiaohogou Basin

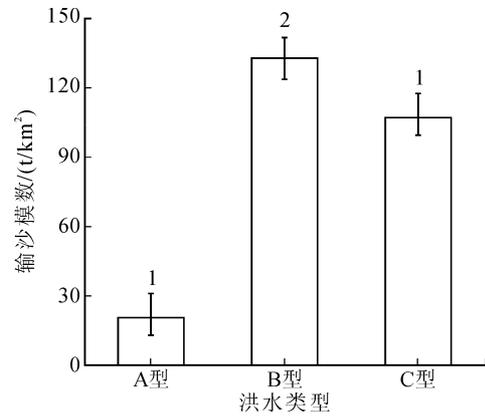


图 4 南小河沟流域不同类型洪水事件的输沙模数  
Fig. 4 Sediment transport modulus of different flood regimes in Nanxiaohogou Basin

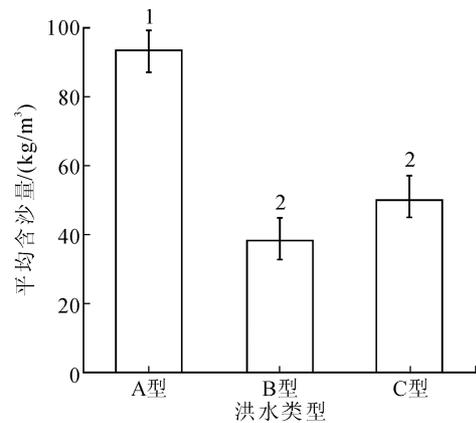


图 5 南小河沟流域不同类型洪水事件的平均含沙量  
Fig. 5 Mean sediment content of different flood regimes in Nanxiaohogou Basin

输沙模数是表征流域水土流失严重程度的一个指标,输沙模数越大,水土流失越严重。由图 4 可知,B 型洪水的流域输沙能力最强,其平均输沙模数最大,达到了 132.39 t/km<sup>2</sup>,而 A 型洪水的输沙模数仅为 20.61 t/km<sup>2</sup>。经方差分析,A 型洪水的输沙模数与 B、C 型洪水的输沙模数有显著性差异。

次洪水事件的平均含沙量表示流域产流量和输沙量之间的关系。由图 5 可知,三种洪水类型中,虽然 A 型洪水的径流系数和输沙模数都最小,但是其次洪水事件的平均含沙量却是最大,这与 A 型洪水多发生在南小河沟流域大面积水土保持治理初期有关,该阶段水土保持措施的生态环境效益尚未明显生效,侵蚀状况仍较严重,但由于样本数较多,在统计分析时,A 型洪水的径流系数和输沙模数整体上会呈现出较小的结果,而次洪水事件的平均含沙量由于是基于次事件的统计分析,样本数虽大,但由于

治理初期的产沙特性,最终呈现出较大的结果。

综合以上对不同洪水类型的累计降雨量、累计径流量、累计输沙量所占比例的分析及对径流系数、输沙模数和平均含沙量的分析,A 型和 C 型洪水的危害性较大,是今后南小河沟流域水土保持和洪水防治工作中需重点治理的洪水类型。

### 3.3 流域水土保持措施对产流产沙的影响

在前面洪水类型划分的基础上,从每种洪水类型中选出两场降雨条件相近的洪水事件,对其径流输沙情况进行对比分析,如表 3 所示。

表 3 不同洪水类型径流输沙对比表  
Tab. 3 Comparison of runoff and sediment discharge under different flood regimes

洪水类型	发生时间	$P/\text{mm}$	$I/(\text{mm}/\text{h})$	$T/\text{h}$	$H/\text{mm}$	$R_c$	$q_p/(\text{m}^3/\text{s})$	$M_s/(\text{t}/\text{km}^2)$	$C/(\text{kg}/\text{m}^3)$	$C_{\max}/(\text{kg}/\text{m}^3)$
A 型	19700928	22.7	1.0	22.23	0.2	0.89	0.12	4.74	3.17	102
	19840525	20.1	1.2	16.71	0.15	0.74	0.22	0.32	1.61	2.21
B 型	19681008	60.70	0.70	90.83	3.47	3.03	1.22	6.27	1.13	4.36
	19810814	68.58	0.60	105.51	1.84	1.70	0.11	2.08	75.80	522.00
C 型	19640819	55.1	2.4	22.50	2.70	4.76	0.38	10.47	9.55	33.3
	19850913	56.6	2.6	21.89	0.66	1.21	0.32	3.34	3.88	18.8

注:此处的  $C$  为平均含沙量, $C_{\max}$  为最大含沙量。

A 型洪水的两次洪水事件分别发生在治理中期及治理后期,比较两次洪水事件的径流输沙特征参数,除洪峰流量  $q_p$  外,其他参数均明显下降,其中径流深从 0.2 mm 下降到了 0.15 mm,减少了 25%,平均含沙量也从 3.17  $\text{kg}/\text{m}^3$  减少到了 1.61  $\text{kg}/\text{m}^3$ ,减水减沙效益显著。

B 型洪水的两次洪水事件分别发生在治理初期及后期,从治理初期到后期经过几十年的治理,径流输沙特征参数都明显下降,径流系数  $R_c$  从 3.03 下降到了 1.70,作为表征流域降雨产流能力的参数,径流系数的下降说明了南小河沟流域产流能力的减弱。

C 型洪水的两次洪水事件发生在水土保持治理初期和后期,与 B 型洪水的情况类似,这一时期各类水土保持措施的作用开始显现,与其他洪水类型相比,两次 C 型洪水事件的  $R_c$  和  $M_s$  下降幅度均较大,分别从 4.76  $\text{t}/\text{km}^2$  和 10.47  $\text{t}/\text{km}^2$  下降到了 1.21  $\text{t}/\text{km}^2$  和 3.34  $\text{t}/\text{km}^2$ 。

综合以上分析,包括工程和植被措施在内的各类水土保持措施在一定程度上改善了南小河沟流域的水土流失状况。1964—1969 年,这一时期诸多生产大队在流域的塬面上开始建立山地果园、植树造

林,各支毛沟的林木因常抚育且严看管而生长良好;在治理中期,即 1970—1979 年,这一时期修建了大量的谷坊和淤地坝工程,谷坊和淤地坝具有拦截径流和削减洪峰的作用,治理后期洪水事件的洪峰流量和径流系数的下降也印证了这一点,滞洪效果开始显现。经多年治理,各类水土保持措施逐渐显现出其生态环境效益,随着径流系数和输沙模数的减少,南小河沟流域水土流失程度得到了缓解,居民生活水平也有所提高。

## 4 结 论

1) 以洪水历时、洪峰流量和洪水径流深三种洪水特征参数为变量,可将南小河沟流域 1964—1985 年的 100 场洪水事件分为三种类型:A 型径流深最小、洪峰流量最小、洪水历时最短、发生频率最高;B 型径流深最大、洪峰流量居中、洪水历时最长、发生频率最低;C 型径流深居中、洪峰流量最大、洪水历时居中、发生频率居中。

2) 经分析,不同类型洪水的产流产沙特征差异性明显。A 型洪水的累计径流量所占比例最高为 64%;虽然 C 型洪水的累计降雨量仅为 28%,但累计输沙量所占比例是最高的,达到了 74%;C 型洪

水的产流能力最强,B型洪水次之。方差分析显示,洪水类型对流域降雨产流能力、水土流失程度以及流域水沙关系均具有一定的影响;因此,A型和C型洪水的危害较大,是造成该流域水土流失的主要洪水类型,应重点防范。

3) 流域尺度上的各类水土保持措施确实起到了相应作用。与治理初期相比,治理后期径流系数和输沙模数均大幅度下降,尤其是输沙模数,各类洪水的输沙模数降幅都大于50%;除A型洪水外,后期B型和C型洪水的洪峰流量下降明显;这些变化表明流域水土流失得到了一定程度的改善。

#### 参考文献:

- [1] 秦伟,左长清,晏清洪,等. 红壤裸露坡地次降雨土壤侵蚀规律[J]. 农业工程学报, 2015, 31(2): 124-132.  
QIN Wei, ZUO Changqing, YAN Qinghong, et al. Regularity of individual rainfall soil erosion in bare slope land of red soil [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(2): 124-132.
- [2] WEI W, CHEN L, FU B, et al. The effect of land uses and rainfall regimes on runoff and soil erosion in the semi-arid loess hilly area, China [J]. Journal of Hydrology, 2007, 335(3/4): 247-258.
- [3] FANG N, SHI Z, LI L, et al. The effects of rainfall regimes and land use changes on runoff and soil loss in a small mountainous watershed [J]. Catena, 2012, 99(1): 1-8.
- [4] 郑粉莉,边锋,卢嘉,等. 雨型对东北典型黑土区顺坡垄作坡面土壤侵蚀的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(2): 90-97.  
ZHENG Fenli, BIAN Feng, LU Jia, et al. Effects of rainfall patterns on hillslope erosion with longitudinal ridge in typical black soil region of northeast China [J]. Transaction of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2016, 47(2): 90-97.
- [5] 温磊磊,郑粉莉,杨青森,等. 雨型对东北黑土区坡耕地土壤侵蚀影响的试验研究[J]. 水利学报, 2012, 43(9): 1084-1091.  
Wen Leilei, ZHENG Fenli, Yang Qingsen, et al. Effects of rainfall patterns on hillslope farmland erosion in black soil region of northeast China [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(9): 1084-1091.
- [6] 晏清洪,原翠萍,雷廷武,等. 降雨类型和水土保持对黄土区小流域水土流失的影响[J]. 农业机械学报, 2014, 45(2): 169-175.  
YAN Qinghong, YUAN Cuiping, LEI Tingwu, et al. Effect of rainstorm patterns and soil erosion control practices on soil and water loss in small watershed on Loess Plateau [J]. Transaction of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 169-175.
- [7] 赵西宁,吴普特,冯浩,等. 降雨径流调控利用与流域保水减沙效应研究[J]. 自然灾害学报, 2014, 23(4): 46-53.  
ZHAO Xining, WU Pute, FENG Hao, et al. Study on rainfall and runoff regulation and regional effects of runoff conservation and sediment reduction [J]. Journal of Natural Disasters, 2014, 23(4): 46-53.
- [8] 陈卫宾,刘生云,董增川. 基于径流调控的水土保持措施优化配置[J]. 人民黄河, 2010, 32(3): 81-82.  
CHEN Weibin, LIU Shengyun, DONG Zengchuan. Optimized arrangement of soil and water conservation measures based on runoff regulation and control [J]. Yellow River, 2010, 32(3): 81-82.
- [9] 赵克荣,陈丽华,肖洋. 黄土区径流调控技术体系[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(4): 94-99.  
ZHAO Kerong, CHEN Lihua, XIAO Yang. Measure system of runoff control in Loess Region [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2008, 6(4): 94-99.
- [10] 吴淑芳,吴普特,宋维秀,等. 坡面调控措施下的水沙输出过程及减流减沙效应研究[J]. 水利学报, 2010, 41(7): 870-875.  
WU Shufang, WU Pute, SONG Weixiu, et al. Study on the outflow processes of slope regulated by works and its effects on overland flow and sediment reduction [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(7): 870-875.
- [11] 吴淑芳,吴普特,原立峰. 坡面径流调控薄层水流水力学特性试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(3): 14-19.  
WU Shufang, WU Pute, YUAN Lifeng. Hydraulic characteristics of sheet flow with slope runoff regulation [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(3): 14-19.
- [12] 张敏,张明武,何桂英,等. 黄河下游不同峰型非漫滩洪水冲刷效率分析[J]. 人民黄河, 2016, 38(1): 1-4.  
ZHANG Min, ZHANG Mingwu, HE Guiying, et al. Analysis of erosion efficiency in different flood wave type on non-floodplain flood in lower Yellow River [J]. Yellow River, 2016, 38(1): 1-4.
- [13] 李占斌. 黄土地区小流域次暴雨侵蚀产沙研究[J]. 西安理工大学学报, 1996, 12(3): 177-183.  
LI Zhanbin. Study on small watershed single storm erosion sediment yield in loess region [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 1996, 12(3): 177-183.
- [14] 李占斌,符素华,解建仓,等. 窟野河流域暴雨侵蚀产沙研究[J]. 水利学报, 1998(增刊1): 19-24.  
LI Zhanbin, FU Suhua, XIE Jiancang, et al. A study

- on storm runoff sediment yield in Kuyehe river watershed [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1998 (S1): 19-24.
- [15] 袁静, 张富, 李怀有, 等. 南小河沟流域不同措施处理下的水土流失规律 [J]. *水土保持通报*, 2014, 34(3): 39-43.  
YUAN Jing, ZHANG Fu, LI Huaiyou, et al. Law of soil and water loss under different measures in South Xiaohegou watershed [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2014, 34(3): 9-43.
- [16] 张绒君, 郭嘉, 于艳丽, 等. 黄土高塬沟壑区水土保持调水保土效益研究 [J]. *人民黄河*, 2015, 37(4): 98-101.  
ZHANG Rongjun, GUO Jia, YU Yanli, et al. Study on benefit of water diversion and soil conservation for water and soil conservation in gullied Loess Plateaus [J]. *Yellow River*, 2015, 37(4): 98-101.
- [17] 朱悦, 姜丽华, 毕华兴, 等. 黄土高塬沟壑区典型小流域水土保持措施蓄水保土效益分析 [J]. *水土保持研究*, 2011, 18(5): 119-123.  
ZHU Yue, JIANG Lihua, BI Huaxing, et al. Benefit analysis of soil and water conservation measures in controlling soil and water loss in small watershed of the loess plateau gully system [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2011, 18(5): 119-123.
- [18] ZHENG M, LI R, HE J. Sediment concentrations in run-off varying with spatial scale in an agricultural sub-watershed of the Chinese Loess Plateau [J]. *Hydrological Processes*, 2015, 29(26): 5414-5423.
- [19] 张乐涛, 李占斌, 肖俊波, 等. 黄土丘陵沟壑区典型小流域不同洪水类型侵蚀输沙效应 [J]. *农业机械学报*, 2016, 47(8): 109-116.  
ZHANG Letao, LI Zhanbin, XIAO Junbo, et al. The influence of different flood regimes on soil erosion and sediment transport in a typical small watershed on the loess hilly-gully region [J]. *Transaction of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2016, 47(8): 109-116.
- [20] 乔雪媛, 石朋, 陈喜, 等. 不同气候区代表性江河径流变化特征分析 [J]. *西安理工大学学报*, 2014, 30(3): 357-365.  
QIAO Xueyuan, SHI Peng, CHEN Xi, et al. Analysis of the change characteristic of river runoff in different climate zones [J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2014, 30(3): 357-365.

(责任编辑 周 蓓)