

黄土丘陵沟壑区治理与非治理对比小流域侵蚀产流比较研究

原翠萍¹ 李淑芹¹ 雷启祥² 曹全意² 何爱东² 苏广旭²

(1. 中国农业大学 水利与土木工程学院, 北京 100083;

2. 水利部黄河水利委员会 黄河水土保持天水治理监督局, 甘肃 天水 741000)

摘要 研究水土保持综合治理对小流域侵蚀产流量和次降雨径流过程的影响。以黄土丘陵沟壑区第Ⅲ副区内治理小流域桥子东沟和未治理小流域桥子西沟为对象,分析水土保持综合治理不同阶段小流域侵蚀产流量年际变化和次降雨径流过程。结果表明:桥子东沟产流次数较桥子西沟减少了42.86%,年径流模数为桥子西沟的5%~63%;桥子东、西沟的多年平均径流系数分别为1.80%和4.03%;桥子东、西沟年径流深比值略有下降,治理后期在0.6以下。桥子东沟在治理后期的次降雨起流和洪峰流量的出现都晚于桥子西沟;桥子东、西沟次降雨洪峰流量、洪水历时比值不断下降,治理后期分别为0.41和0.61。水土保持综合治理的实施有效减少了治理流域的侵蚀产流量,对次降雨径流过程影响很大。

关键词 对比小流域;水土保持综合治理;次降雨;径流过程

中图分类号 S 152.7

文章编号 1007-4333(2010)06-0095-07

文献标志码 A

Study on water erosion from two small watersheds with and without management on Loess Plateau

YUAN Cui-ping¹, LI Shu-qin¹, LEI Qi-xiang², CAO Quan-yi², HE Ai-dong², SU Guang-xu²

(1. College of Hydraulic and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. Tianshui Soil and Water Conservation Management and Monitoring Bureau of Yellow River,

Yellow River Conservation Commission, The Ministry of Water Resource, Tianshui 741000, China)

Abstract In order to study the effect of soil and water conservation management on water erosion and runoff process at small watershed, the Qiaozi-East watershed with management and Qiaozi-West watershed without management at third sub-region of Loess Plateau were selected as studying area. Rainfall and runoff data were collected and the annual change of soil erosion and runoff processes were analyzed at different stages of management. Times of runoff at Qiaozi-East watershed were reduced by 42.86% as compared with that at Qiaozi-West watershed. Annual runoff modulus at Qiaozi-East watershed accounted for 5% - 63% of that at Qiaozi-West watershed. Annual mean runoff coefficients of Qiaozi-East and Qiaozi-West watershed were 1.80% and 4.03% respectively. The ratios of annual runoff depths at Qiaozi-East watershed to that at Qiaozi-West watershed decreased slightly and decreased slightly to less than 0.6 finally. Runoff initiated and peak flow occurred at Qiaozi-East watershed all later than at Qiaozi-West watershed with years of management. The ratios of peak flow and runoff duration at Qiaozi-East watershed to that at Qiaozi-West watershed were decreased to 0.41 and 0.61 respectively finally.

Key words parallel small watershed; soil and water conservation management; event based rainfall; runoff process

黄土高原丘陵沟壑区自然地理条件复杂,地形破碎,土质疏松,植被稀少且年降水量少而集中,极

易产生土壤侵蚀。该区是我国土壤侵蚀最为严重、生态环境最为脆弱的地区之一,土壤侵蚀强度为

收稿日期: 2010-04-28

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(40635027); 黄河水土保持生态工程天水藉河(二期)重点支流治理项目; 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金(10501-245)

第一作者: 原翠萍, 博士研究生, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究, E-mail: pinger86@163.com

2 500~15 000 t/(km²·a),最严重的地区在2万 t/(km²·a)以上^[1]。小流域是黄土高原丘陵沟壑区水土流失的基本单元,其侵蚀产流取决于降雨、地形特征、流域尺度、土壤类型、水土保持治理措施等^[2-5]。20世纪90年代以来,国内外对小流域水土保持治理措施对降雨径流的影响进行了研究^[6-9],主要采用2种方法:选取治理与未治理对比小流域,通过对比分析侵蚀产流说明治理效果^[10-13];选取单一小流域,对流域治理前后的水土流失状况进行比较^[5,8,10]。由于小流域是由不同地形地貌、土壤分布、植被的坡面和沟道组成的复合体,所以不可能在整个流域上采用单一的治理措施,而通常是治理区与非治理区并存、多种治理措施兼有;因此小流域水土保持综合治理对径流的影响不同于坡面单元或单一治理方式的小流域^[6]。小流域水土保持综合治理多年后的年径流系数不断下降^[5],中雨、大雨的产流量明显减少,次降雨径流系数降低^[8]。丁琳霞等对黄土高原丘陵沟壑区6组对比小流域的研究表明,水土保持综合治理减少了年径流量、洪水次数和径流模数,使得流域蓄水量增加了40%~60%^[12]。王瑞芳等分析了黄土丘陵沟壑区桥子东沟(治理)和桥子西沟(未治理)小流域2001年的一次暴雨产流过程,结果表明桥子东沟次降雨洪峰流量模数和径流模数远小于桥子西沟^[13]。目前,水土保持综合治理不同阶段对侵蚀产流的影响以及对次降雨径流过程影响的研究未见报道。

本研究选取2个位置毗邻、面积接近的对比小流域:桥子东沟(水土保持综合治理沟)和桥子西沟(非治理沟),研究实施水土保持综合治理后不同阶段对比小流域侵蚀产流量年际变化和次降雨径流过程,以期水黄土高原丘陵沟壑区小流域治理和水土保持规划提供科学依据。

1 研究流域概况

1.1 流域地形及土壤条件

桥子东、西沟流域位于黄土高原丘陵沟壑区第Ⅲ副区,地理坐标为E105°43',N34°34',是甘肃渭河二级流域罗玉沟内的一对相邻支沟。以罗玉沟流域DEM(digital elevation model)为输入数据,在ARCGIS的水文模块下提取桥子东、西沟流域轮廓并计算流域面积。桥子西沟流域呈羽毛形,面积1.10 km²,桥子东沟流域呈扇形,面积1.27 km²。以桥子东、西沟流域DEM为基础划分流域水系并

提取地形数据。桥子西沟流域长2.22 km,平均比降21.47%;桥子东沟流域长2.13 km,平均比降20.75%。桥子东、西沟各坡度面积占总面积的比例很接近(表1)。2个流域地形条件基本相似(图1)。桥子东、西沟流域土壤组成类似,流域土壤75%以上为黑鸡粪土和黑红土,其余不到25%为黄板土和红胶土。

表1 桥子东、西沟流域不同坡度面积所占比例

Table 1 Slope proportion of Qiaozi-East and Qiaozi-West watersheds %

流域名称	坡度/(°)			
	0~10	10~20	20~30	>30
桥子东沟	19.29	59.88	20.38	0.45
桥子西沟	18.10	59.31	19.62	2.97

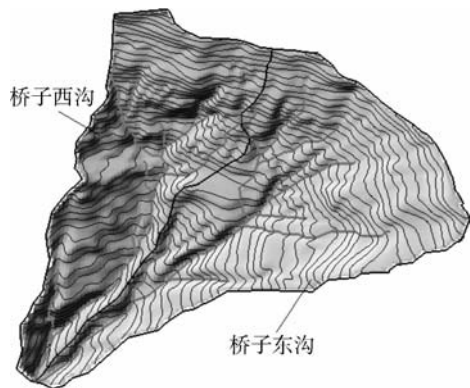


图1 研究流域桥子东、西沟地形图

Fig. 1 Topographic map of Qiaozi-East and Qiaozi-West watersheds

1.2 水文气象条件

桥子东、西沟流域多年平均降水量529.7 mm。降水年际变化大,最大年降水量809 mm,最小年降水量321.8 mm。降水年内分配不均,05—10月份降水量占全年降水量的83.5%。年蒸发量1 293.3 mm,干燥度1.3。年平均气温10.7℃,1月份平均气温-2.3℃,7月份平均气温22.6℃,极端最高气温38.2℃,极端最低气温-19.2℃。汛期降雨多以暴雨形式出现,土壤侵蚀严重。流域内以超渗产流为主,由于暴雨量大、雨量集中、强度大,超渗产流的径流量较大,所形成的洪水一般为尖瘦型,即洪峰高、历时短、洪峰流量大。

1.3 土地利用及水土保持现状

1987年开始在桥子东沟实施水土保持综合治

理,桥子西沟为未治理对比流域。采取的水土保持综合治理措施包括修建梯田、造林、种草、修建谷坊和淤地坝等。到 2004 年,桥子东、西沟植被覆盖度

分别为 39.86% 和 21.79%,桥子东沟均匀分布有 21 座小型谷坊和淤地坝。桥子东、西沟流域土地利用现状见表 2。

表 2 2004 年桥子东、西沟流域土地利用现状

Table 2 Actualities of land utilization at Qiaozi watershed at 2004

流域名称	指标	农地		林地		草地	居民地	道路	未利用土地		合计
		山坡地	梯田	经济林果	人工林				荒坡	难利用地	
桥子东沟	面积/hm ²	5.64	1.34	36.65	74.53	3.68	0.37	2.33	2.16	0	126.70
	比例/%	4.45	1.06	28.93	58.82	2.91	0.29	1.84	1.70	0	100
桥子西沟	面积/hm ²	40.18	0.76	42.20	12.15	0	2.63	1.72	3.85	6.83	110.32
	比例/%	36.42	0.69	38.25	11.01	0	2.39	1.56	3.49	6.19	100

2 降雨径流监测

桥子东、西沟均匀布设 4 个雨量站进行降雨量观测(图 2)。所有雨量站均安装 JDZ-1 型数字雨量计和标准桶径 20 cm 的雨量筒,记录次降雨不同阶段的降雨强度。流域沟口建有把口站,东沟断面为三角形,西沟为梯形。径流观测主要在各把口站量

量过程计算次降雨产流总量,进而计算年产流总量:

$$F_j = \sum_{i=1}^n Q_i t_i \quad (2)$$

$$F_{\text{年}} = \sum_{j=1}^m F_j \quad (3)$$

式中: F_j 为年内第 j 次降雨产流总量, m^3 ; t_i 为 i 时段长, s ; n 为总时段数; Q_i 为 i 时段对应的流量, m^3/s ; $F_{\text{年}}$ 为年产流总量, m^3 ; m 为年产流次数。利用降雨量、产流量、流域面积计算径流系数、径流深、径流模数。

3 分析及讨论

降雨、地形特征、土壤类型、水土保持综合治理是流域侵蚀产流的主要影响因素。桥子东、西沟流域位置毗邻,其降雨、地形特征、土壤类型及分布相近,所以,水土保持综合治理是造成桥子东、西沟产流特征差异的主要原因。

3.1 流域产流特征

1987—2006 年,桥子东、西沟流域的产流次数分别为 20 和 35 场次,桥子东沟的产流次数比桥子西沟减少 42.86%;产流特征显著不同,桥子东沟的产流量远低于桥子西沟。桥子东沟能够将有限的降水蓄集起来,水土流失减少。桥子东沟的年径流模数约为桥子西沟的 5%~63%,且枯水年该值较小。桥子东、西沟多年平均径流模数分别为 11 996 和 26 046 $m^3/(a \cdot km^2)$ 。桥子东沟和桥子西沟的年径流系数分别为 0.04%~7.10% 和 0.48%~12.20%,多年平均径流系数分别为 1.80% 和 4.03%。

采用幂指数方程分别对桥子东、西沟的年降雨



图 2 桥子沟流域雨量站及把口站位置

Fig. 2 Location of rainfall and runoff-sediment monitoring stations of Qiaozi watershed

水堰上进行,通过观测水位、流速推算出流量。水位用测杆测量,流速用浮标法测量,流量计算公式:

$$Q = \alpha A v \quad (1)$$

式中: Q 为流量, m^3/s ; A 为过流段面面积, m^2 ; v 为流速, m/s ; α 为浮标系数。通过测得的次降雨强度计算次降雨总雨量和年降雨量;通过测得的次降雨流

量和年径流深进行拟合(图3),桥子西沟的拟合曲线远在桥子东沟的上方。年降雨量相同的条件下,桥子西沟的年径流深远大于桥子东沟。说明水土保持综合治理对侵蚀产流有显著影响,治理的桥子东沟的侵蚀产流明显低于未治理的桥子西沟。

水土保持综合治理不同阶段流域年径流深的变化见图4(a)。自1987年以来,桥子东、西沟流域的年径流深都呈波动下降趋势,这是由人为破坏减少、流域生态环境改善引起的。水土保持综合治理实施以来,桥子东沟的年径流深都低于桥子西沟。随着治理的不断深入,桥子东、西沟年径流深比值波动下降,治理末期在0.6以下(图4(b))。说明桥子东沟年径流深的下降幅度大于桥子西沟。

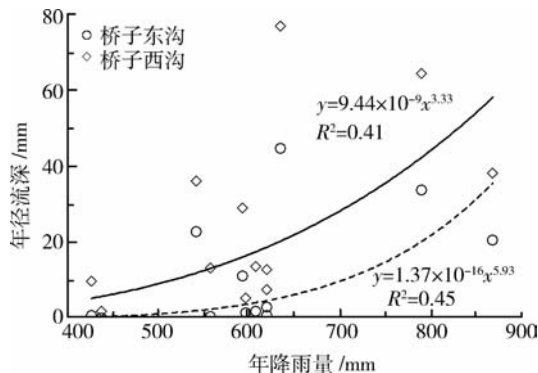


图3 桥子东、西沟流域年降雨量与年径流深关系
Fig. 3 Relationship between annual rainfall and annual runoff depth at Qiaozi-East and Qiaozi-West watersheds

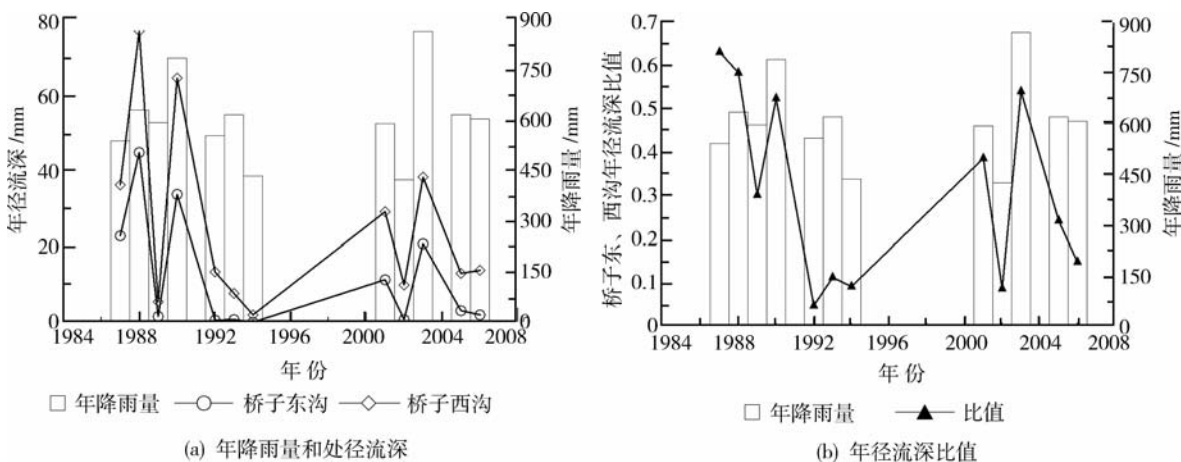


图4 桥子东、西沟流域侵蚀特征值

Fig. 4 Characteristic erosion values of Qiaozi-East and Qiaozi-West watersheds

3.2 不同治理阶段流域次降雨径流过程

不同治理阶段,桥子东、西沟的次降雨径流过程发生了变化(图5)。1987年是水土保持综合治理的第1年。1987-07-27,桥子东沟的次降雨起流比桥子西沟晚10 min,洪峰流量出现早9 min。桥子东沟流域长度(2.13 km)小于桥子西沟流域长度(2.22 km),因此,桥子东沟的汇流时间比桥子西沟短,从而使得桥子东沟洪峰流量出现时间比桥子西沟早。1988和1989年分别是水土保持综合治理的第2年和第3年。1988-08-13,次降雨起流桥子东沟比桥子西沟晚9 min,洪峰流量出现晚5 min。1989-04-20,次降雨起流桥子东沟比桥子西沟早5 min,洪峰流量出现晚21 min。桥子西沟洪峰流量出现都早于桥子东沟,而起流时间有早有晚,说明桥子东沟水土保持综合治理正在逐步发挥作用。并

且,1989-04-20的次降雨强度较小,桥子东沟洪峰滞后21 min,说明水土保持综合治理对小雨强降雨径流的抑制作用更明显。治理初期,在短历时、大雨强降雨下,水土保持综合治理对起流时间、洪峰流量出现时间的作用不明显。

1990年的2场降雨都是短历时强降雨,起流时间早,洪水历时短,洪峰流量大。1990-07-08,桥子东沟的起流和洪峰流量出现时间与桥子西沟基本相同,两流域洪水历时均为20 min。1990-08-11,桥子东沟起流时间比桥子西沟晚7 min,洪峰流量出现时间基本相同,桥子东、西沟的洪水历时分别为23和29 min。

1994-07-18,桥子东沟的起流时间比桥子西沟晚1 min,洪峰流量出现时间相差不大;桥子西沟的流量在较高的水平上持续了10~15 min后逐步下

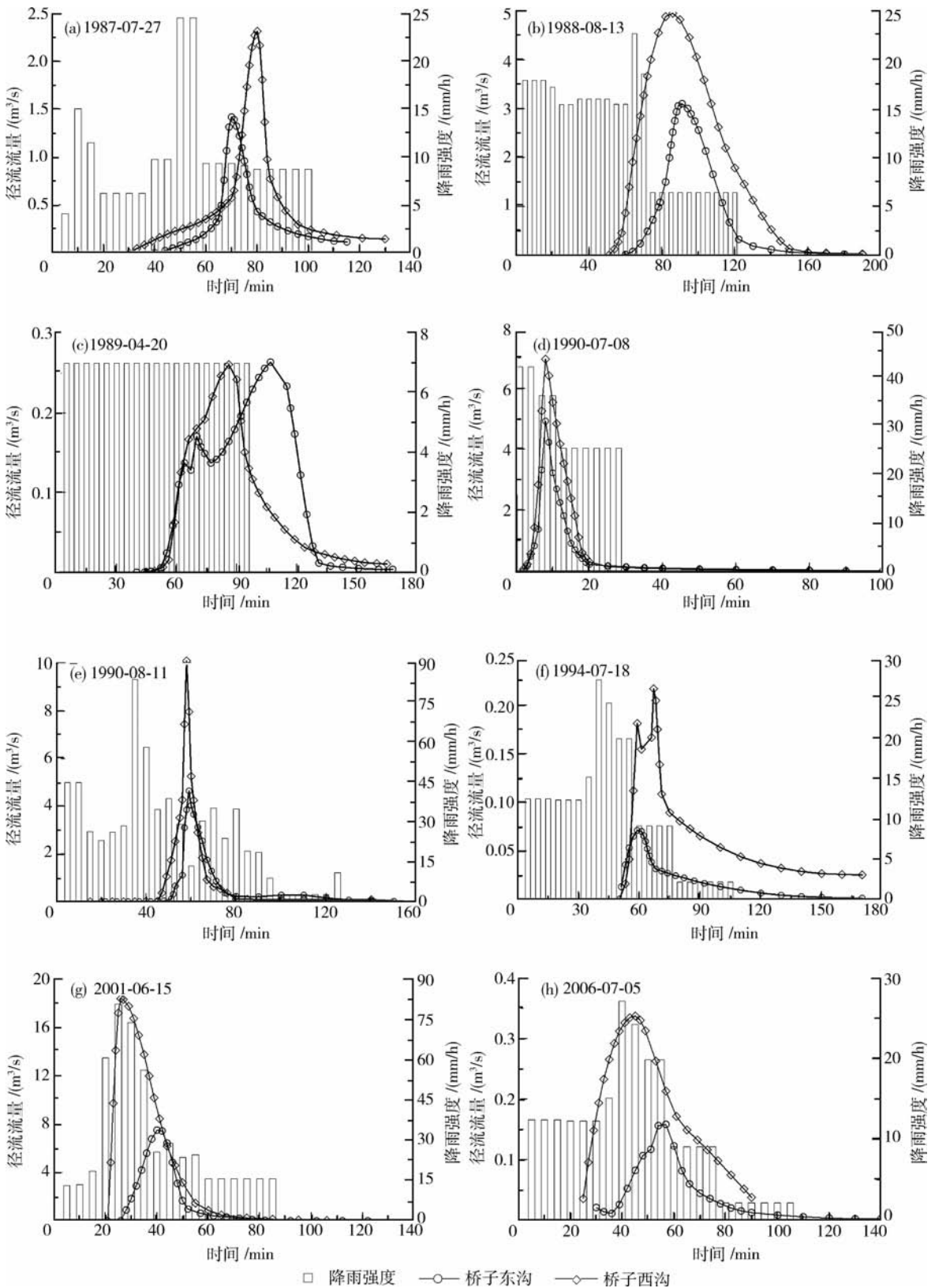


图 5 桥子东、西沟流域不同治理阶段次降雨径流流量过程

Fig. 5 Event-based rainfall and runoff processes of different management stages at Qiaozi-East and Qiaozi-West watersheds

降,而桥子东沟的流量在达到峰值后下降较快,说明水土保持综合治理对桥子东沟的径流有抑制作用。随着年限增长,水土保持综合治理对小流域次降雨径流过程的影响越来越明显^[5],对大雨强降雨的抑制作用也逐渐显现。以2001-06-15的次降雨为例,其降雨强度是1987—2006年最大的,属于大暴雨,桥子东沟的起流时间比桥子西沟晚5 min,洪峰流量出现时间晚14 min。2006-07-09,桥子东沟的起流时间比桥子西沟晚5 min,洪峰出现时间晚12 min。

综合比较水土保持综合治理实施后桥子东、西沟的8场典型次降雨过程发现,水土保持综合治理明显影响次降雨的起流和洪峰流量出现时间。治理初期,桥子东沟洪峰流量出现时间早于桥子西沟,这主要是由于桥子东沟的流域长度较短。治理实施几

年后,除1990年的2次大暴雨洪水过程外,桥子东沟的起流和洪峰流量出现时间都明显滞后于桥子西沟。1994年以后效果更明显,如2001-06-15的典型特大暴雨,桥子东沟起流和洪峰流量出现时间明显滞后于桥子西沟。

在治理不同时期的8场典型次降雨中,桥子东沟的洪水历时均小于或等于桥子西沟,其洪峰流量均小于桥子西沟(表3)。桥子东、西沟的洪峰流量比值呈下降趋势,1990年以前该值平均为0.67,1994年以后为0.41,下降了0.26。说明实施水土保持综合治理后,桥子东沟的洪峰流量比桥子西沟显著下降。桥子东、西沟洪水历时比值也呈下降趋势,1990年以前,平均为0.82,1994年以后为0.61,下降了0.21。说明实施水土保持综合治理后,桥子东沟的次降雨洪水历时相对于桥子西沟显著降低。

表3 桥子东、西沟流域典型次降雨过程洪峰流量及洪水历时

Table 3 Comparison of peaking flow and flood duration at event-based runoff processes between Qiaozi-West and Qiaozi-East watersheds

日期	洪峰流量/(m ³ /s)		桥子东、西沟 洪峰流量比值	洪水历时/min		桥子东、西沟 洪水历时比值
	桥子东沟	桥子西沟		桥子东沟	桥子西沟	
1987-07-27	1.40	2.32	0.60	75	100	0.75
1988-08-11	3.10	4.95	0.63	110	139	0.79
1989-04-20	0.26	0.27	0.96	91	120	0.76
1990-07-08	4.92	6.95	0.71	20	20	1.00
1990-08-11	4.66	10.10	0.46	23	29	0.79
1994-07-18	0.07	0.22	0.32	59	115	0.51
2001-06-15	7.50	18.40	0.41	22	34	0.65
2006-07-09	0.16	0.34	0.47	43	65	0.66

4 结 论

实行水土保持综合治理可有效减少流域侵蚀产流并影响次降雨径流过程。

1) 桥子东沟(治理)产流次数与桥子西沟(未治理)相比减少了42.86%,年径流模数为桥子西沟的5%~63%。桥子东、西沟的多年平均径流系数分别为1.80%和4.03%,年降雨量与年径流深呈幂指数关系。桥子东、西沟年径流深比值略有下降,治理后期在0.6以下。

2) 水土保持综合治理影响次降雨径流过程,随着治理年限的增长,影响逐步深入。水土保持综合

治理对次降雨的起流和洪峰流量出现时间的影响最为明显,经过多年治理,桥子东沟的次降雨起流和洪峰流量出现都晚于桥子西沟。桥子东、西沟次降雨洪峰流量和洪水历时比值呈下降趋势,治理后期分别为0.41和0.61。

小流域水土保持综合治理是减少流域侵蚀产流的有效手段。可进一步对水土保持综合治理后的流域侵蚀产沙特征和水沙关系进行研究。

参 考 文 献

[1] 唐克丽. 中国水土保持[M]. 北京: 科学出版社, 2004:

- 201
- [2] García-Ruiz J M, Lasanta T, Martí C, et al. Changes in runoff and erosion as a consequence of land-use changes in the central Spanish Pyrenees [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 1995, 20(3-4): 301-307
- [3] Merz B, Bardossy A. Effects of spatial variability on the rainfall runoff process in a small loess catchment [J]. *Journal of Hydrology*, 1998, 212-213: 304-317
- [4] 许炯心. 无定河流域侵蚀产沙过程对水土保持措施响应[J]. *地理学报*, 2004, 59(6): 972-981
- [5] 段青松, 吴伯志, 字淑慧. 滇中地区小流域治理前后水土流失变化规律的研究[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(5): 42-46
- [6] Fiener P, Auerswald K. Influence of scale and land use pattern on the efficacy of grassed waterways to control runoff [J]. *Ecological Engineering*, 2006, 27: 208-218
- [7] Mueller E N, Francke T, Batalla R J, et al. Modelling the effects of land-use change on runoff and sediment yield for a meso-scale catchment in the Southern Pyrenees [J]. *Catena*, 2009, 79: 288-296
- [8] 张升堂, 康绍忠, 张楷. 黄土高原水土保持对流域降雨径流的影响分析[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(6): 56-59
- [9] Zheng M G, Cai Q G, Cheng Q J. Modelling the runoff-sediment yield relationship using a proportional function in hilly areas of the Loess Plateau, North China [J]. *Geomorphology*, 2008, 93: 288-301
- [10] Wei W, Chen L D, Fu B J, 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: 247-258
- [11] 穆兴民, 王文龙, 徐学远. 黄土高原丘陵沟壑区水土保持对小流域地表径流的影响[J]. *水利学报*, 1999(2): 71-75
- [12] 丁琳霞, 穆兴民. 水土保持对小流域地表径流时间特征变化的影响[J]. *干旱区资源与环境*, 2004, 18(3): 103-106
- [13] 王瑞芳, 黄成志, 董雨亭. 甘肃天水市对比小流域暴雨洪水侵蚀产沙特性[J]. *中国水土保持科学*, 2006, 4(4): 78-81