

降雨类型和水土保持对黄土区小流域水土流失的影响*

晏清洪¹ 原翠萍² 雷廷武¹ 雷启祥³ 张满良³ 苏广旭³

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 北京国泰天平行土地规划设计有限公司, 北京 100873;
3. 黄河水利委员会天水水土保持科学试验站, 天水 741000)

摘要:对黄土区桥子东沟流域的143场次洪水事件水文泥沙数据进行统计分析,并利用K均值分类法划分降雨类型,比较不同降雨类型条件下流域水土流失特征,探讨水土保持治理对不同降雨类型下流域产流输沙的影响。结果表明,次降雨量和最大30 min雨强是影响流域产流输沙的主要降雨特征。降雨事件划分为4种类型:I型(小雨量、小雨强)、II型(大雨量、大雨强)、III型(大雨量、小雨强)和IV型(小雨量、大雨强)。4种降雨类型下次洪水事件的产流能力和洪峰流量由大到小依次为II型、IV型、III型和I型。频次最少的II型降雨次洪水事件的输沙量最多,I型、III型和IV型降雨条件下次洪水事件输沙量的差异不显著,输沙量均较少。水土保持综合治理显著减少了流域径流量和输沙量,其中II型降雨次洪水事件减水量和减沙量最多,I型最少。

关键词:黄土区 小流域 水土流失 降雨类型 水土保持

中图分类号:TV122; S157 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-1298(2014)02-0169-07

引言

降雨是引起黄土地区水土流失的一个最重要的因素^[1]。降雨量、降雨强度及降雨历时等降雨特征对降雨径流输沙的形成有重要影响^[2-3]。降雨类型与水土流失的程度、分布规律、发生频率等特征都存在着极为密切的关系^[4-9]。研究黄土地区降雨类型与水土流失的关系是水土保持科学研究工作中的一个重要内容,可为流域水土保持治理方案制定提供科学依据。

小流域是我国生态环境恢复重建与水土流失综合治理的基本单元,其降雨产流输沙规律及水土流失预报一直为土壤侵蚀与水土保持科学研究的重点。黄土高原是我国生态环境建设的重点地区,近年来,随着该地区水土保持生态建设的大力推进,改变了土地利用方式和流域下垫面,使流域产流产沙机制发生变化,取得了显著的水土保持治理效益^[10-16]。黄土高原流域水土流失综合治理效益评价已为多方所关注^[17-19],但目前水土保持效益评价中很少考虑降雨类型对水土保持治理效益的影响。而已有研究显示在不同降雨条件下,不同土地利用类型产生的径流泥沙差别显著^[3,8]。因此,认识降雨类型和水土保持对流域水土流失的影响对正确评

价流域水土保持治理效益具有重要科学意义。

本文通过对黄土高原典型小流域24年实测的共计143场次降雨事件进行统计分析,筛选影响流域产流产沙的降雨特征,并根据降雨特征将所有降雨事件划分类型;对不同类型降雨条件下次洪水事件的产流输沙特征进行比较分析,探讨水土保持治理对不同降雨类型次洪水事件径流输沙变化的影响。

1 研究区概况

1.1 土壤、地形和水文条件

桥子东沟流域位于甘肃省天水市北郊(N34°36'23",E105°42'28"),属于黄土丘陵沟壑区第三副区,是渭河二级流域罗玉沟内的一级支沟。桥子东沟流域面积1.36 km²,主沟长2.00 km,平均比降20.75%,沟壑密度5.13 km/km²。流域土壤以黄土质黑褐土分布最广,占流域面积60%左右,其次为红色黄土质黑褐土型粗骨土。桥子沟流域降水年际变化大,多年平均、最大及最小年降水量分别为542.5、933.7及366.8 mm。降水年内分配不均,汛期降水量占全年降水量的72%。年蒸发量1 293.3 mm,干燥度为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

收稿日期:2013-02-21 修回日期:2013-03-24

* 国家自然科学基金资助项目(40635027)和黄河水土保持生态工程天水藉河重点支流治理(二期)项目

作者简介:晏清洪,博士生,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究,E-mail: yqh19@126.com

通讯作者:雷廷武,教授,博士生导师,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究,E-mail: leitingwu@cau.edu.cn

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。

1.2 土地利用和水土保持现状

桥子东沟流域在1987年开始实施水土保持综合治理,治理措施主要包括植被措施和沟道工程措施。治理前期以坡面治理措施为主,包括坡改梯、种树和种草等,2006年在流域内建设了19座淤地坝,如图1所示。由表1可知^[12],桥子东沟流域通过多年的水土保持综合治理,流域土地利用情况发生显著变化:与1986年相比,桥子东沟流域2004年坡耕地和裸地面积分别减少了45.89%和4.26%,而梯田和林地面积分别增加了35.25%和15.19%,其他土地利用类型无显著变化。

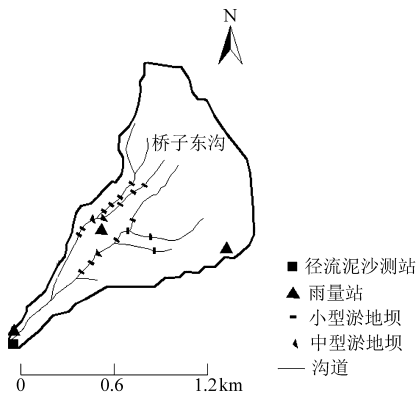


图1 桥子东沟雨量站和淤地坝分布图

Fig.1 Raingauges and check dams of Qiaozi East watershed

表1 研究区土地利用类型占流域面积比例
Tab.1 Percentage acreage of different land use types in Qiaozi East watershed %

年份	林地	草地	梯田	坡耕地	裸地	其他
1986	29.23	3.04	7.87	54.20	5.43	0.23
1995	40.05	2.96	30.10	25.69	1.17	0.03
2004	44.42	2.96	43.12	8.31	1.17	0.02

2 数据来源与研究方法

桥子东沟流域1987—2010年水文泥沙数据来源于黄河水利委员会天水水土保持科学试验站。桥子东沟流域内布设了3个雨量站,以泰森多边形法计算流域平均降雨量。在桥子东沟流域出口设立了径流泥沙测站(图1),测流建筑物为三角形测流槽,径流测定在小水时用接流筒按体积法测定,洪水时用率定水位流量关系曲线和浮标法测速计算流量,2种方法同步进行,对照检查。沙样采用置换法处理。

为了研究降雨特征对产流和输沙的影响,选取降雨、径流和输沙的相关变量进行皮尔逊相关分析:次降雨量(P),降雨历时(D),平均雨强(I),最大30 min雨强($I_{30\max}$),前1 d降雨量(P_{1d}),前3 d降雨

量(P_{3d}),前5 d降雨量(P_{5d}),前7 d降雨量(P_{7d}),径流深(H),径流系数(R_c),洪峰流量($Q_{\max}$),输沙模数(M_s),平均含沙量(C),最大含沙量($C_{\max}$)。并利用K均值分类法,根据降雨的特征对其进行分类^[6-8]。Perruchet于1983年提出了分类标准,据此决定降雨分类的个数^[20]。分类必须满足方差分析上具有显著性差异($p < 0.05$)才认为分类合理^[8]。

3 结果与讨论

3.1 流域水沙变化特征

对桥子东沟流域143场次洪水事件的降雨、径流和泥沙变量进行了描述统计分析(表2),主要降雨、径流和输沙特征如下:

流域最小降雨量3.0 mm,发生在2008年6月29日,最大降雨量达到97.0 mm,发生在2006年8月27日,次降雨量超过50 mm的洪水事件共17次,占有所有事件的11.9%,超过平均值38.8 mm的洪水事件占有所有事件的35.7%。次洪水事件的降雨历时变化范围为43~2 399 min,平均降雨历时为628 min,降雨历时超过1 000 min的洪水事件有21场,占14.7%,降雨历时小于480 min的洪水事件有59场,占41.3%。次降雨平均雨强的最小值为0.5 mm/h,发生在1987年6月26日,降雨量为12.3 mm,但降雨历时较长,达到1 570 min;平均雨强的最大值达到32.7 mm/h,发生在2001年6月23日,降雨量为23.4 mm,但降雨历时最短,只有43 min。平均雨强超过10 mm/h的洪水事件仅有10场,占7.0%,小于5 mm/h的洪水事件113场,占79.0%。前期降雨量的变化范围较大,前1 d、3 d、5 d和7 d降雨量序列的变异系数分别为2.18、1.35、1.14和1.05。

次洪水事件径流深变化范围为0.001~23.0 mm,平均值为0.8 mm,径流深超过5 mm的洪水事件仅4场,占2.8%,小于0.1 mm的洪水事件65场,占45.5%。径流系数的变化范围为0.000 1~0.24,径流系数大于0.1的洪水事件仅10场,占7.0%,小于0.01的洪水事件达到90场,占62.9%。最小输沙模数为0.02 t/km²,发生在2010年8月18日,最大输沙模数为9 991.9 t/km²,发生在1988年8月7日,输沙模数超过500 t/km²的洪水事件为17场,占11.9%,输沙模数小于50 t/km²的洪水事件为82场,占57.3%。洪水事件平均含沙量的变化范围为19.4~612.0 kg/m³,平均值为242.0 kg/m³,变异系数为0.56,表明桥子东沟流域次洪水事件平均含沙量的变异程度较小。

表 2 桥子东沟流域次洪水事件描述统计特征

Qiaozi East watershed				
参数	最小值	最大值	平均值	标准差
P/mm	3.0	97.0	27.4	18.9
D/min	43	2 399	628	471
$I/(\text{mm}\cdot\text{h}^{-1})$	0.5	32.7	4.0	4.1
$I_{30\text{max}}/(\text{mm}\cdot\text{h}^{-1})$	1.0	62.4	12.7	12.3
$P_{1\text{d}}/\text{mm}$	0	34.5	3.4	7.4
$P_{3\text{d}}/\text{mm}$	0	73.3	10.3	13.9
$P_{5\text{d}}/\text{mm}$	0	108.0	18.1	20.7
$P_{7\text{d}}/\text{mm}$	0	148.5	26.0	27.2
H/mm	0.001	23.0	0.8	2.6
$M_s/(\text{t}\cdot\text{km}^{-2})$	0.02	9 991.9	274.3	984.6
R_c	0.000 1	0.24	0.024	0.043
$C/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	19.4	612.0	242.0	136.6
$Q_{\text{max}}/(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$	0.000 52	26.3	0.6	2.4
$C_{\text{max}}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	19.4	847.0	329.9	189.3

3.2 降雨-径流-输沙关系

构建了降雨、径流和输沙变量的皮尔逊相关矩

表 3 桥子东沟流域降雨、径流和输沙变量皮尔逊相关系数矩阵

Pearson correlation matrix among rainfall,runoff and suspended sediment transport related variables														
	P	D	I	$I_{30\text{max}}$	$P_{1\text{d}}$	$P_{3\text{d}}$	$P_{5\text{d}}$	$P_{7\text{d}}$	H	M_s	R_c	C	Q_{max}	C_{max}
P	1													
D	0.561 ^a	1												
I	0.035	-0.459 ^a	1											
$I_{30\text{max}}$	0.290 ^a	-0.252 ^a	0.614 ^a	1										
$P_{1\text{d}}$	-0.134	0.068	-0.159	-0.202	1									
$P_{3\text{d}}$	-0.139	0.034	-0.100	-0.131	0.632 ^a	1								
$P_{5\text{d}}$	-0.147	0.025	-0.094	-0.079	0.428 ^a	0.767 ^a	1							
$P_{7\text{d}}$	-0.089	0.096	-0.151	-0.124	0.366 ^a	0.655 ^a	0.821 ^a	1						
H	0.479 ^a	0.065	0.152	0.484 ^a	-0.059	0.006	0.022	0.062	1					
M_s	0.451 ^a	0.071	0.123	0.488 ^a	-0.064	-0.015	-0.008	0.024	0.980 ^a	1				
R_c	0.206	-0.086	0.221 ^a	0.431 ^a	0.006	0.176	0.241 ^a	0.319 ^a	0.791 ^a	0.746 ^a	1			
C	0.116	-0.081	0.125	0.261 ^a	-0.100	-0.062	-0.027	0.069	0.212 ^b	0.238 ^a	0.282 ^a	1		
Q_{max}	0.359 ^a	0.042	0.145	0.528 ^a	-0.076	-0.024	-0.033	-0.014	0.878 ^a	0.941 ^a	0.682 ^a	0.222 ^a	1	
C_{max}	0.192 ^b	-0.105	0.198 ^b	0.312 ^a	-0.088	-0.025	-0.015	0.064	0.287 ^a	0.308 ^a	0.323 ^a	0.898 ^a	0.289 ^a	1

注：a 和 b 分别表示在 $p < 0.01$ 水平和 $p < 0.05$ 水平显著相关。

3.3 降雨类型

根据上述降雨-径流-输沙关系分析,可知 P 和 $I_{30\text{max}}$ 是显著影响桥子东沟流域产流输沙的降雨特征。因此,利用 K 均值聚类法,根据 P 和 $I_{30\text{max}}$ 这两个降雨特征值,将记录的 143 次降雨事件分为 4 组,即 I 型、II 型、III 型和 IV 型降雨(表 4)。在 143 场次洪水事件中, I 型降雨共有 112 次,占总场次的 78.3%,累计降雨量为 2 365.2 mm; II 型降雨仅发生 4 次,占降雨总次数的 2.8%,累计降雨量为 334.3 mm; III 型和 IV 型降雨分别发生了 13 次和 14 次,累计降雨量分别为 848.8 mm 和 372.8 mm。

降雨特征均值反映了降雨的一般特征。4 种类

阵(表 3)。由表 3 可知, P 与 H 、 M_s 、 Q_{max} 在 $p < 0.01$ 水平显著相关,与 R_c 和 C_{max} 在 $p < 0.05$ 水平显著相关。 D 与径流和输沙都不具有显著相关。 I 仅与 R_c 在 $p < 0.01$ 水平显著相关,与 C_{max} 在 $p < 0.05$ 水平上具有显著相关性。 $I_{30\text{max}}$ 对流域次洪水事件的径流和输沙具有显著影响,与 H 、 M_s 、 R_c 、 C 和 C_{max} 都具有显著相关性($p < 0.01$),表明 $I_{30\text{max}}$ 是桥子东沟流域产流输沙的重要影响因素。表 3 表明前期降雨量与流域的产流量和输沙量不具有显著相关性,但 $P_{3\text{d}}$ 与 R_c 在 $p < 0.05$ 水平显著相关、 $P_{5\text{d}}$ 和 $P_{7\text{d}}$ 与 R_c 在 $p < 0.01$ 水平显著相关,这表明前期降雨量对黄土丘陵沟壑区降雨产流能力具有显著影响。

表 3 中显示 H 与 M_s 之间的皮尔逊相关性系数最大,为 0.98,表明桥子东沟流域具有较好的水沙关系。 Q_{max} 与 H 、 R_c 、 M_s 、 C 和 C_{max} 都具有显著相关性($p < 0.01$),表明 Q_{max} 是流域产流输沙的重要影响因素。

型降雨中, P 平均值由小到大依次为 I、IV、III、II, $I_{30\text{max}}$ 平均值由小到大依次为 I、III、IV、II。因而, I 型降雨特征可以认为由降雨量小、降雨强度小、发生频率高的降雨事件组成; II 型降雨则为降雨量大、降雨强度大、发生频率低的降雨事件所组成; III 型降雨和 IV 型降雨的发生频率较少,分别发生了 13 次和 14 次,但它们的降雨特征相反, III 型降雨为降雨量大和降雨强度小的降雨事件所组成,而 IV 型降雨为降雨量小和降雨强度大的降雨事件所组成。

3.4 不同降雨类型下径流和输沙

桥子东沟流域在不同降雨类型下的累计降雨量、累计径流量和累计输沙量占 143 场次洪水总量

表 4 降雨类型统计特征

Tab.4 Statistical features of different rainfall regimes						
降雨类型	特征值	平均值	标准差	变异系数	累计降雨量/mm	频次
I	P/mm	21.1	9.0	0.43	2 365.2	112
	$I_{30\text{max}}/(\text{mm}\cdot\text{h}^{-1})$	8.5	5.0	0.59		
II	P/mm	83.6	12.2	0.15	334.3	4
	$I_{30\text{max}}/(\text{mm}\cdot\text{h}^{-1})$	46.4	9.1	0.20		
III	P/mm	65.3	15.8	0.24	848.8	13
	$I_{30\text{max}}/(\text{mm}\cdot\text{h}^{-1})$	10.2	6.6	0.64		
IV	P/mm	26.6	13.1	0.49	372.8	14
	$I_{30\text{max}}/(\text{mm}\cdot\text{h}^{-1})$	38.9	11.2	0.29		

的比例如图 2 所示。图 2 显示 I 型累计降雨量占总降雨量的比例最大,达到了 60.32%,但是累计径流量和累计输沙量所占比例仅分别为 37.80% 和 33.05%; II 型累计降雨量占总降雨量的比例最小,仅为 8.53%,但是累计径流量和累计输沙量的比例相比其他降雨类型都大,分别达到了 39.93% 和 43.46%; III 型累计降雨量占总降雨量的比例达到 21.65%,显著高于 II 型和 IV 型降雨,但其累计径流量和累计输沙量所占比例仅为 8.70% 和 7.98%。

由于黄土区的降雨产流方式多为超渗产流,降雨强度对流域降雨产流能力和产流过程具有显著影响。皮尔逊相关分析显示 $I_{30\text{max}}$ 与桥子东沟流域的 R_c 和 Q_{max} 显著相关, II 型降雨的 $I_{30\text{max}}$ 最大, IV 型降雨次之, I 型和 III 型降雨的 $I_{30\text{max}}$ 最小。不同降雨类型下桥子东沟流域次洪水事件的径流输沙特征发生

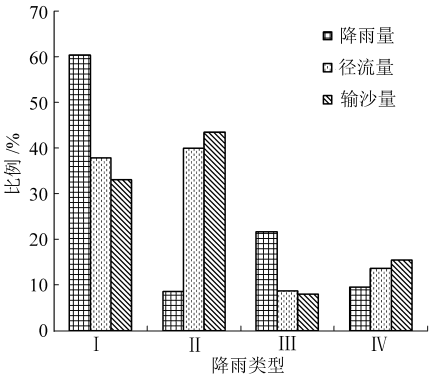


图 2 不同降雨类型累计降雨量、累计径流量和累计输沙量所占比例

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

变化如图 3 所示,图中字母不同表明降雨类型之间在统计上差异性显著($p < 0.05$, ANOVA)。图 3a 表明 4 种类型降雨条件下平均径流系数由小到大依次为 III、I、IV、II, I 型降雨洪水事件的径流系数与 III 型在统计上没有显著性差异,但是与 II 型和 IV 型之间都具有显著性差异($p < 0.05$)。径流系数表征了流域降雨产流能力,因此图 3a 表明在不同降雨类型下,桥子东沟流域的产流能力不同,其中 II 型降雨条件下流域产流能力最大,平均径流系数达到 0.13; IV 型降雨条件下次之,为 0.042; I 型和 III 型降雨条件下流域产流能力相近,平均径流系数分别为 0.019 和 0.013。不同降雨类型下径流过程也发生了变化,由图 3b 可知, I 型和 III 型降雨条件下次洪水事件的洪峰流量都很小,分别只有 9 场(占 I 型

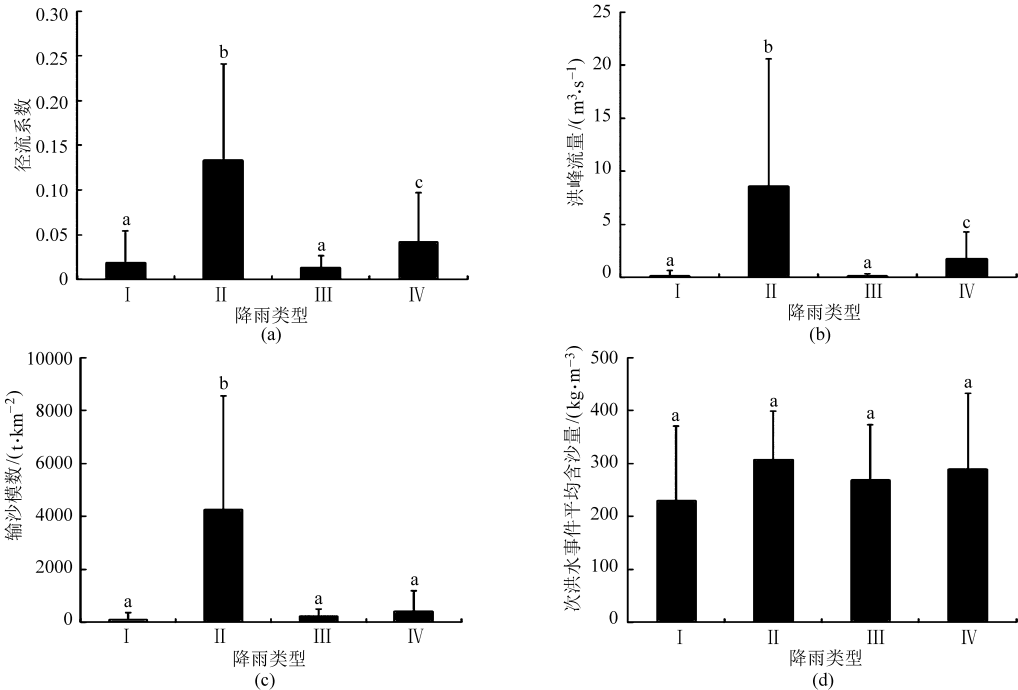


图 3 不同降雨类型下次洪水事件产流输沙特征

Fig.3 Main characteristics of flood events under different rainfall regimes

降雨洪水事件场次的 8.0%) 和 1 场(占Ⅲ型降雨洪水事件场次的 7.7%) 洪水事件的洪峰流量超过 $0.5\text{ m}^3/\text{s}$ 。Ⅱ型和Ⅳ型降雨条件下洪峰流量超过 $0.5\text{ m}^3/\text{s}$ 的洪水事件分别为 3 场(占Ⅱ型降雨洪水事件场次的 75.0%) 和 6 场(占Ⅳ型降雨洪水事件场次的 42.9%)。

Ⅱ型降雨洪水事件的输沙模数与Ⅰ型、Ⅲ型和Ⅳ型在统计上具有显著性差异($p < 0.05$),但是Ⅰ型、Ⅲ型和Ⅳ型之间不具有显著性差异(图 3c)。在Ⅱ型降雨条件下,桥子东沟流域输沙能力最强,平均输沙模数达到 $4\,261.23\text{ t}/\text{km}^2$;Ⅰ型、Ⅲ型和Ⅳ型降雨条件下流域输沙能力都比较小且差异不显著,平均输沙模数都没有超过 $500\text{ t}/\text{km}^2$ 。次洪水事件平均含沙量表征了流域产流量和输沙量之间的关系,图 3d 表明 4 种类型降雨条件下次洪水事件平均含沙量的差异不显著,表明降雨类型对流域水沙关系并没有显著影响。

3.5 水土保持对径流和输沙的影响

从每种降雨类型中各选取了 2 场降雨条件相近的洪水事件进行对比分析(表 5)。4 种降雨类型下典型洪水事件的降雨、径流和输沙特征如下:

Ⅰ型降雨条件下的 2 场次洪水事件分别发生在流域治理前期(1990-08-27)和治理后期(2007-07-04)。2007-07-04 洪水事件的 P 和 $I_{30\text{max}}$ 与 1990-08-27 洪水事件相比差异不显著,而且 $P_{7\text{d}}$ 要大于 1990-8-27 洪水事件。但是相比较 1990-08-27 洪水事件,2007-07-04 洪水事件的 H 和 M_s 分别减小了 0.425 mm 和 $92.4\text{ t}/\text{km}^2$, R_c 从 0.026 降低到 $0.000\,86$, 而且 Q_{max} 和 C_{max} 仅为 $0.004\,4\text{ m}^3/\text{s}$

和 $61\text{ kg}/\text{m}^3$ 。

Ⅱ型降雨条件下的 2 场次洪水事件分别发生在流域治理前期(1990-06-29)和治理后期(2007-08-08)。2007-08-08 洪水事件的 P 和 $I_{30\text{max}}$ 都要大于 1990-6-29 洪水事件,而且 $P_{7\text{d}}$ 差异不显著。但是相比较 1990-06-29 洪水事件,2007-08-08 洪水事件的 H 和 M_s 分别减小了 9.30 mm 和 $2\,809.2\text{ t}/\text{km}^2$, R_c 从 0.21 降低到 0.082 , Q_{max} 也从 $5.19\text{ m}^3/\text{s}$ 降低到 $2.68\text{ m}^3/\text{s}$, 但是 C 变化不显著, C_{max} 大于 1990-06-29 洪水事件,达到 $539\text{ kg}/\text{m}^3$ 。

Ⅲ型降雨条件下的 2 场次洪水事件分别发生在流域治理中期(2000-10-10)和治理后期(2006-08-27)。2006-08-27 洪水事件的 P 、 $I_{30\text{max}}$ 和 $P_{7\text{d}}$ 与 2000-10-10 洪水事件相比差异不显著,2006-08-27 洪水事件的 H 和 M_s 分别减小了 1.74 mm 和 $759.9\text{ t}/\text{km}^2$, R_c 从 0.036 降低到 0.004 , Q_{max} 也从 $0.33\text{ m}^3/\text{s}$ 降低到 $0.03\text{ m}^3/\text{s}$, C 和 C_{max} 都要显著小于 2000-10-10 洪水事件。

Ⅳ型降雨条件下的 2 场次洪水事件分别发生在流域治理中期(2001-07-24)和治理后期(2006-05-04)。2006-05-04 洪水事件的 P 和 $I_{30\text{max}}$ 都要大于 2001-07-24 洪水事件,而且 $P_{7\text{d}}$ 都为 0, 但是 H 、 M_s 、 R_c 和 Q_{max} 都显著小于 2001-07-24 洪水事件。相比较 2001-07-24 洪水事件,2006-05-04 洪水事件的 H 和 M_s 分别减小了 2.69 mm 和 $618.6\text{ t}/\text{km}^2$, R_c 从 0.11 降低到 0.005 , Q_{max} 也从 $4.51\text{ m}^3/\text{s}$ 降低到 $0.061\text{ m}^3/\text{s}$, 但是 C 和 C_{max} 都要大于 2001-07-24 洪水事件。

表 5 不同降雨类型下典型洪水事件对比分析

Tab. 5 Comparison of typical flood events under different rainfall regimes

降雨类型	降雨场次	$P/$ mm	$I/$ ($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$)	$I_{30\text{max}}/$ ($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$)	$P_{7\text{d}}/$ mm	$H/$ mm	$M_s/$ ($\text{t}\cdot\text{km}^{-2}$)	R_c	$C/$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	$Q_{\text{max}}/$ ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	$C_{\text{max}}/$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
Ⅰ	1990-08-27	16.7	1.9	6.7	33.0	0.44	93.2	0.026	214	0.038	274
	2007-07-04	17.3	1.5	5.9	45.0	0.015	0.8	0.000 86	51	0.004	61
Ⅱ	1990-06-29	80.4	10.0	37.1	19.7	16.61	4 882.1	0.21	294	5.19	429
	2007-08-08	88.7	15.2	43.2	17.8	7.31	2 072.9	0.082	284	2.68	539
Ⅲ	2000-10-10	54.6	3.9	6.2	24.3	1.97	789.7	0.036	401	0.33	474
	2006-08-27	58.7	3.8	7.5	18.8	0.23	29.8	0.004	127	0.03	200
Ⅳ	2001-07-24	26.8	10.3	29.7	0	2.83	656.2	0.11	232	4.51	415
	2006-05-04	28.7	9.5	35.6	0	0.14	37.6	0.005	262	0.061	576

注:将 1987—2010 年划分为 3 个时期:治理前期(1987—1994 年)、治理中期(1995—2002 年)和治理后期(2003—2010 年)。

综上所述,水土保持综合治理对桥子东沟流域的产流输沙产生了显著影响,治理后期桥子东沟流域的产流量和输沙量显著减少,其中Ⅱ型降雨条件下次洪水事件的减水量和减沙量最多。治理前期和

治理中期的植被措施增加了流域的植被覆盖面积,表 1 中显示桥子东沟流域在 1985—2006 年期间的林地面积比例呈显著增长趋势。植被能够改善流域表层土壤结构、物理化学和水文性质以及微地形,这

些性质的改变会进一步影响水土流失^[21-22],如降低土壤可蚀性、增加土壤入渗能力。而且植被覆盖度的增加会拦截降雨,降低降雨能量,进而减少降雨侵蚀力^[23]。桥子东沟流域在 2006 年又布设了 19 座淤地坝,淤地坝拦蓄径流泥沙并能减轻对下游沟道的侵蚀^[24]。治理后期次洪水事件径流系数和洪峰流量显著降低,表明桥子东沟流域的产流能力显著降低,流域植被措施和沟道工程措施消减洪峰的能力逐渐增强,改变了次降雨径流过程。治理后期,Ⅰ型和Ⅲ型降雨条件下次洪水事件的 C 显著减小,表明Ⅰ型和Ⅲ型降雨条件下次洪水事件的减沙效益要大于减水效益,径流没有充足的泥沙来源;Ⅱ型和Ⅳ型降雨条件下次洪水事件 C 没有发生显著变化,表明Ⅰ型和Ⅲ型降雨条件下次洪水事件的减沙效益和减水效益相同,径流有充足的泥沙来源。

4 结 论

(1) P 和 I_{30max} 是影响桥子东沟流域产流输沙的

主要降雨特征,流域降雨事件可划分为 4 种类型降雨:Ⅰ型,小雨量、小雨强、频次最多;Ⅱ型,大雨量、大雨强、频次最少;Ⅲ型,大雨量、小雨强;Ⅳ型,小雨量、大雨强。

(2) 不同降雨类型条件下桥子东沟的产流输沙特征不同。Ⅱ型降雨下次洪水事件的产流能力和洪峰流量最大,Ⅳ型次之,Ⅰ型和Ⅲ型最小;Ⅱ型降雨下次洪水事件的输沙量最多,Ⅰ型、Ⅲ型和Ⅳ型降雨条件下次洪水事件的输沙量差异不显著。Ⅱ型降雨的产流量和输沙量占流域产流输沙总量的比例最大,分别达到了 39.93% 和 43.46%。

(3) 水土保持综合治理显著降低了桥子东沟流域的降雨产流能力和洪峰流量,输沙量显著减少,其中Ⅱ型降雨下次洪水事件的减水量和减沙量最多。Ⅰ型和Ⅲ型降雨条件下次洪水事件的减沙效益大于减水效益,导致次洪水事件的平均含沙量显著减小。Ⅱ型和Ⅳ型降雨条件下次洪水事件平均含沙量没有发生显著变化。

参 考 文 献

1 王万忠. 黄土地区降雨特性与土壤流失关系的研究 [J]. 水土保持通报,1983,3(4):7-13.
Wang Wanzhong. Study on the relations between rainfall characteristics and loss of soil in loess region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1983,3(4):7-13. (in Chinese)

2 Bi H X, Liu B, Wu J, et al. Effects of precipitation and landuse on runoff during the past 50 years in a typical watershed in the loess plateau, China [J]. International Journal of Sediment Research, 2009, 24(3):352-364.

3 李广,黄高宝. 雨强和土地利用方式对黄土丘陵区水土流失的影响 [J]. 农业工程学报,2009,25(11):85-90.
Li Guang, Huang Gaobao. Effects of rainfall intensity and land use on soil and water loss in loess hilly region [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(11):85-90. (in Chinese)

4 de Lima J L M P, Singh V P. The influence of the pattern of moving rainstorms on overland flow [J]. Advances in Water Resources, 2002, 25(7):817-828.

5 Morin E, Goodrich D C, Maddox R A. Spatial patterns in thunderstorm rainfall events and their coupling with watershed hydrological response [J]. Advances in Water Resources, 2006, 29(6):843-860.

6 Fang H Y, Cai Q G, Chen H, et al. Effect of rainfall regime and slope on runoff in a gullied loess region on the loess plateau in China [J]. Environmental Management, 2008, 42(3):402-411.

7 Fang N F, Shi Z H, 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):1-8.

8 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(3-4):247-258.

9 Nadal-Romero E, Regüés D, Latron J. Relationships among rainfall, runoff, and suspended sediment in a small catchment with badlands [J]. Catena, 2008, 74(2):127-136.

10 Li Z, Liu W Z, Zhang X C, et al. Impacts of land use change and climate variability on hydrology in an agricultural catchment on the loess plateau of China [J]. Journal of Hydrology, 2009, 377(1-2):35-42.

11 Xu J X. Variation in annual runoff of the Wudinghe River as influenced by climate change and human activity [J]. Quaternary International, 2011, 244(2):230-237.

12 Zhang X M, Cao W H, Guo Q C, et al. Effect of landuse change on surface runoff and sediment yield at different watershed scales on the loess plateau [J]. International Journal of Sediment Research, 2010, 25(3):283-293.

13 据彤军,刘普灵,郑世清,等. 黄土丘陵区生态恢复重建过程中流域降雨及其水沙变化特征研究 [J]. 水土保持学报, 2005,19(2):57-60.
Ju Tongjun, Liu Puling, Zheng Shiqing, et al. Study on changing characters of rainfall and runoff-sediment in process of eco-environment reconstruction in watershed of loess hilly region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(2):57-60. (in Chinese)

14 原翠萍,李淑琴,雷启祥,等. 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 [J]. 中国农业大学学报, 2010,15(6):95-101.

Yuan Cuiping, Li Shuqin, Lei Qixiang, et al. Study on water erosion from two small watersheds with and without management on loess plateau [J]. Journal of China Agricultural University, 2010, 15(6):95 – 101. (in Chinese)

15 原翠萍,雷廷武,张满良,等. 黄土丘陵沟壑区小流域治理对侵蚀产沙特征的影响 [J]. 农业机械学报,2011,42(3):36 – 43. Yuan Cuiping, Lei Tingwu, Zhang Manliang, et al. Sediment yields from the parallel watersheds in the hilly-gully regions of loess plateau[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(3):36 – 43. (in Chinese)

16 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. Zhang Shengtang, Kang Shaozhong, Zhang Kai. Effect of soil and water conservation on the runoff on the loess plateau [J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(6):56 – 59. (in Chinese)

17 周毅,魏天兴,解建强,等. 黄土高原不同林地类型水土保持效益分析 [J]. 水土保持学报,2011,25(3):12 – 16. Zhou Yi, Wei Tianxing, Xie Jianqiang, et al. Different types of vegetation cover and water conservation benefits [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(3):12 – 16. (in Chinese)

18 袁希平,雷廷武. 水土保持措施及其减水减沙效益分析 [J]. 农业工程学报,2004,20(2):296 – 300. Yuan Xiping, Lei Tingwu. Soil and water conservation measures and their benefits in runoff and sediment reductions [J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(2):296 – 300. (in Chinese)

19 聂碧娟,林敬兰,赵会贞. 水土保持综合治理效益评价研究进展[J]. 亚热带水土保持,2009,21(3):39 – 41. Nie Bijuan, Lin Jinglan, Zhao Huizhen. Advances in researches on the benefit evaluation for soil and water conservation [J]. Subtropical Soil and Water Conservation, 2009, 21(3):39 – 41. (in Chinese)

20 Perruchet C. Constrained agglomerative hierarchical classification [J]. Pattern Recognition, 1983, 16(2): 213 – 217.

21 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):3 137 – 3 143. Xu Xianli, Ma Keming, Fu Bojie, et al. Research review of the relationship between vegetation and soil loss [J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(9):3 137 – 3 143. (in Chinese)

22 查轩,唐克丽,张科利,等. 植被对土壤特性及土壤侵蚀的影响研究 [J]. 水土保持学报,1992, 6(2):52 – 59. Zha Xuan, Tang Keli, Zhang Keli, et al. The impact of vegetation on soil characteristics and soil erosion [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1992,6(2):52 – 59. (in Chinese)

23 朱冰冰,李占斌,李鹏,等. 草本植被覆盖对坡面降雨径流侵蚀影响的试验研究 [J]. 土壤学报,2010,47(3):401 – 407. Zhu Bingbing, Li Zhanbin, Li Peng, et al. Effect of grass coverage on sediment yield of rain on slope [J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, 47(3):401 – 407. (in Chinese)

24 Xu X Z, Zhou H W, Zhang O Y. Development of check-dam systems in gullies on the loess plateau, China[J]. Environmental Science & Policy, 2004, 7(2):79 – 86.

Effect of Rainstorm Patterns and Soil Erosion Control Practices on Soil and Water Loss in Small Watershed on Loess Plateau

Yan Qinghong¹ Yuan Cuiping² Lei Tingwu¹ Lei Qixiang³ Zhang Manliang³ Su Guangxu³
(1. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China
2. Beijing Grandtoppeak Tianpinghang Land Plan and Design Co. , Ltd. , Beijing 100873, China
3. Tianshui Soil and Water Conservation Station, Yellow River Conservation Commission, Tianshui 741000, China)

Abstract: Runoff and sediment data from 1987 to 2010, 143 flood events of Qiaozhi East watershed (QE) on the loess plateau were used to investigate the relationships among rainfall, runoff and suspended sediments. K-means clustering of different rainstorm patterns was used to differentiate watershed runoff and sedimentation features and to quantify the impacts of erosion control practices on runoff and sediment production. The results indicated that the precipitation (P) and the maximal 30 minutes rainfall intensity ($I_{30\max}$) were the most relevant factors to runoff and sediment responses. The rainfall events were divided into four rainstorm patterns, as Pattern I (low P and low $I_{30\max}$), Pattern II (high P and high $I_{30\max}$), Pattern III (high P and low $I_{30\max}$) and Pattern IV (low P and high $I_{30\max}$). The runoff generated by the storms, in term of peak discharges from low to high were in the order of Pattern II storms, Pattern IV, Pattern III and Pattern I. Pattern II, though the fewest in occurrences, produced the most sediments while Pattern IV, Pattern III and Pattern I storms produced limited sediments with no significant differences. The soil and water conservation practices significantly reduced runoff and sediment of the watershed, especially for the highest sediment production events of Pattern II.

Key words: Loess plateau Small watershed Soil and water loss Rainstorm pattern Soil and water conservation