

黄土丘陵沟壑区小流域治理对侵蚀产沙特征的影响*

原翠萍¹ 雷廷武¹ 张满良² 范云涛³ 胡小军² 徐 峰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, 天水 741000; 3. 中国农业机械化科学研究院土壤植物机器系统技术国家重点实验室, 北京 100083)

【摘要】 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, 分析降雨、径流、泥沙资料, 研究水土保持综合治理对流域侵蚀产沙、水沙关系、次降雨泥沙输移过程的影响。结果表明: 水土保持综合治理的桥子东沟的年降雨侵蚀产沙显著低于未治理的桥子西沟。水土保持综合治理降低了径流平均含沙量、输沙率, 桥子东沟的径流平均含沙量、输沙率比桥子西沟分别减少 40%、80%。水土保持综合治理改变了次降雨径流含沙量和输沙率动态过程。治理初期, 桥子东沟的径流含沙量过程都明显高于桥子西沟, 桥子东、西沟输沙率在不同时间段有高低; 治理后期, 桥子东沟的径流含沙量、输沙率都显著低于桥子西沟。水土保持综合治理影响小流域次降雨水沙关系。

关键词: 水土保持综合治理 对比小流域 侵蚀模数 水沙关系 泥沙输移
中图分类号: S157 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)03-0036-08

Sediment Yields from the Parallel Watersheds in the Hilly-gully Regions of Loess Plateau

Yuan Cuiping¹ Lei Tingwu¹ Zhang Manliang² Fan Yuntao³ Hu Xiaojun² Xu Feng²

(1. College of Water Conservancy & 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 3. State Key Laboratory of Soil-Plant-Machinery System Technology, Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract

The Qiaozi-East watershed with management and Qiaozi-West watershed without management at the third sub-region of Loess Plateau were selected as studying areas. The rainfall, runoff and sediment data were used to study the effects of soil and water conservation management on sediment yields, runoff-sedimentation relations, and sediment delivery processes. The annual sediment yields of Qiaozi-East watershed were considerably lower than those of Qiaozi-West watershed. The mean sediment contents in runoff and mean sediment delivery rates from Qiaozi-East watershed were 40% and 80% less than those from Qiaozi-West watershed respectively. Soil and water conservation management altered the sediment contents and sediment delivery processes. At the early stage of the practice, the sediment contents from Qiaozi-East watershed were higher than those of Qiaozi-West watershed, but the sediment delivery rates were more or less than those of Qiaozi-West watershed. With years of management, the sediment contents and sediment delivery rates from Qiaozi-East watershed were lower than those from Qiaozi-West watershed. Soil and water conservation management altered the runoff and sediment relations.

Key words Soil and water conservation management, Parallel watershed, Erosion modulus, Runoff and sediment relations, Sediment transport

收稿日期: 2010-05-18 修回日期: 2010-08-19

* 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(二期)重点支流治理项目

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

通讯作者: 雷廷武, 教授, 博士生导师, 主要从事农业水土工程、水土保持与荒漠化防治研究, E-mail: ddragon@public3.bta.net.cn

引言

黄土高原丘陵沟壑区自然地理条件复杂,是我国土壤侵蚀最为严重、生态环境最为脆弱的地区之一,土壤侵蚀模数为 2 500 ~ 15 000 t/(km²·年),最严重的地区在 2 万 t/(km²·年)以上^[1]。小流域是水土流失发生和发展的最基本单元。流域的产水、产沙取决于降雨、地形、流域尺度、土壤、水土保持治理措施等因素^[2~8]。小流域水土保持措施对降雨径流、泥沙数量及其时空分布特征的影响是一个需要长期研究的问题^[2,9]。黄土高原丘陵沟壑区在水土保持综合治理过程中的水沙变化特征及水沙关系演变也需要深入研究^[10~13]。

前人的研究主要集中在 2 个方面:一是选取单一小流域,对流域治理前后的水土流失状况进行比较,二是选取治理与未治理对比小流域,通过对比分析说明治理效果。同一小流域治理前后的地形、流域尺度、土壤类型完全一致,有利于突出水土保持治理措施的作用,但受降雨量年际变化的影响。同时,在水土保持治理前后的时间序列上无法重现一次完全相同的天然降雨过程,所以无法精确对比分析次降雨条件下水土保持措施对降雨泥沙输移过程的影响。选择典型对比小流域比较侵蚀产沙差异,虽然对比小流域的流域面积、地形、土壤等近似,但也有一定差别,这些差别也会影响侵蚀产沙。部分对比小流域相隔距离较远,对降雨的一致性产生影响,从而对侵蚀产沙也有影响。

本文选取 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)。研究水土保持综合治理对减少侵蚀产沙的作用;分析水土保持综合治理后流域水沙关系的变化;对比分析水土保持综合治理实施后不同阶段的流域次降雨泥沙输移过程(含沙量、输沙率),以期为水土保持规划、环境治理和评估提供依据。

1 研究区概况

1.1 地形、土壤、水文条件

桥子沟流域位于黄土高原丘陵沟壑区第Ⅲ副区,地理坐标为 N 34°34',E 105°43',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 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状,面积 1.27 km²。以桥子东、西沟流域 DEM 为输入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%。两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,其余为黄板土和红胶土。

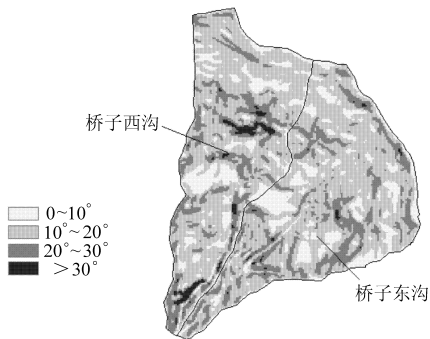


图 1 桥子东、西沟流域坡度分级图
Fig. 1 Slope classification of Qiaozi-East and Qiaozi-West watershed

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,5 ~ 10 月份降水量占全年降水量的 83.5%。年蒸发量 1 293.3 mm,干燥度为 1.3。年平均气温 10.7℃,一月平均气温 -2.3℃,七月平均气温 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。

1.2 土地利用和水土保持现状

1987 年开始在桥子东沟流域实施水土保持综合治理,桥子西沟流域为未治理对比流域。水土保持措施包括修建梯田、造林、种草、修建谷坊和淤地坝等。到 2004 年,桥子东、西沟流域植被覆盖度分别为 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如表 1 所示。

2 数据监测收集和处理

桥子东、西沟流域均匀布设 4 个雨量观测站进行降雨量观测。所有雨量站均安装 JDZ - 1 型数字雨量计和标准筒径 20 cm 的雨量筒,记录次降雨过程。流域沟口建有把口站,桥子东沟断面为三角形,桥子西沟断面为梯形。径流、泥沙观测主要在各把口站量水堰上进行。水位用测杆测量,流速用浮标法测量。泥沙采用人工取样法观测,取样次数与测流次数相同。流量、含沙量、输沙率计算式分别为

$$Q = \alpha A v \tag{1}$$

$$C_s = 1\,000 \frac{W_s}{V} = 1\,000 \frac{\rho_s (W_{ws} - W_w)}{V(\rho_s - \rho_w)} \tag{2}$$

$$T_s = Q C_s \tag{3}$$

式中 Q ——流量, m^3/s
 A ——过流断面面积, m^2
 v ——流速, m/s α ——浮标系数

C_s ——含沙量, kg/m^3
 W_s ——取样瓶中沙重, g
 V ——样品体积, cm^3
 ρ_s, ρ_w ——沙、水的密度, g/cm^3
 W_{ws} ——取样瓶及浑水重, g
 W_w ——与样品同体积的清水重加瓶重, g
 T_s ——输沙率, kg/s

表 1 桥子东、西沟流域土地利用现状 (2004)
Tab.1 Actualities of land utilization at Qiaozi-East and Qiaozi-West watershed (2004)

流域名称		农地		林地		牧草地		居民地	道路	未利用土地		合计
		山坡地	梯田	经济林果	人工林	天然草地	人工草地			荒坡	难利用地	
桥子东沟	面积/ hm^2	5.64	1.34	36.65	74.53	0	3.68	0.37	2.33	2.16	0	126.70
	比例/%	4.45	1.06	28.93	58.82	0	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	0	2.63	1.72	3.85	6.83	110.32
	比例/%	36.42	0.69	38.25	11.01	0	0	2.39	1.56	3.49	6.19	100

3 分析讨论

3.1 流域侵蚀产沙年际变化

桥子东、西沟流域年降雨和年侵蚀模数关系如图 2 所示。采用幂指数方程对年降雨量和侵蚀模数进行拟合,桥子西沟的拟合曲线远在桥子东沟的上方。说明水土保持综合治理对侵蚀产沙有显著影响,经过治理的桥子东沟的侵蚀产沙明显低于未治理的桥子西沟。

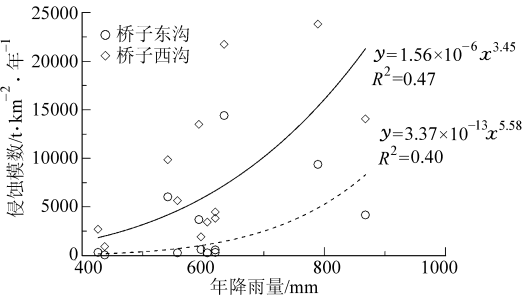


图 2 桥子东、西沟流域年降雨量和侵蚀模数关系
Fig.2 Relationship between annual rainfall and erosion modulus at Qiaozi-East and Qiaozi-West watershed

水土保持综合治理不同年份的侵蚀模数如图 3 所示。自 1987 年以来,桥子东、西沟流域的侵蚀模数都呈波动下降趋势。这主要是由人为破坏减少、流域生态环境改善引起的。水土保持综合治理实施以来,桥子东沟的侵蚀模数都低于桥子西沟。分析桥子东、西沟流域侵蚀模数比值的变化,如图 4 所示。在水土保持综合治理的前 2 年,桥子东沟的年侵蚀模数约为桥子西沟的 0.6~0.7;随着治理的不断深入,该比值波动下降,到 2000 年以后,该值约为

0.2。说明桥子东沟侵蚀模数的下降幅度大于桥子西沟,水土保持综合治理有效减少了治理流域的侵蚀产沙。

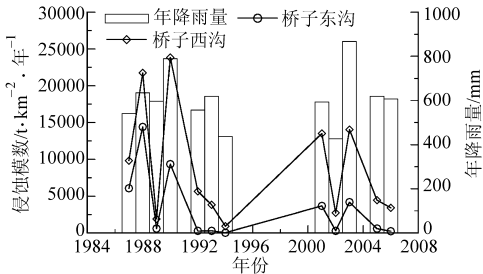


图 3 桥子东、西沟流域年降雨、侵蚀模数
Fig.3 Annual rainfall and erosion modulus of Qiaozi-East and Qiaozi-West watershed

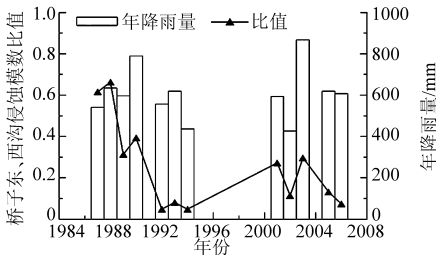


图 4 桥子东、西沟流域侵蚀模数比值
Fig.4 Ratios of erosion modulus of Qiaozi-East to that of Qiaozi-West watershed

3.2 小流域次降雨水沙关系

径流和产沙的关系可以用幂函数或者线性函数表示^[14]。桥子东、西沟流域次降雨径流深和产沙模数关系如图 5 所示,次降雨径流深和产沙模数拟合公式及参数如表 2 所示。幂函数和线性函数均能较好地表达桥子东、西沟流域的水沙关系,且决定系数都很高,大于 0.91。桥子东、

西沟流域幂指数水沙关系的指数分别为 1.02、1.06,都接近 1,系数分别为 350.27、406.66,与线性过原点水沙关系的系数相差较少,该幂指数关系接近于线性过原点关系。桥子东、西沟流域线性水沙关系的系数分别为 334.49、415.39,与

线性过原点关系的系数相差很少,并且线性水沙关系无法解释径流为零时仍有产沙的现象^[14]。因此,桥子东、西沟流域水沙关系是明显的,产沙模数与径流深呈正比,线性过原点关系能正确反映水沙规律。

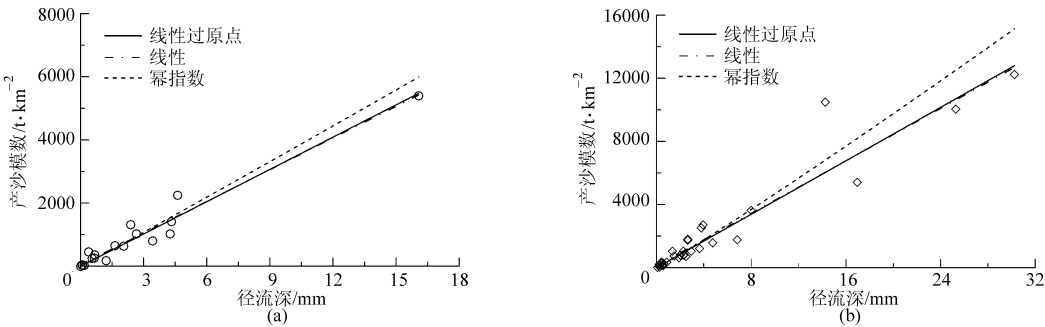


图 5 桥子沟流域水沙关系
Fig. 5 Relationship between runoff and sediment at Qiaozi watershed
(a) 桥子东沟 (b) 桥子西沟

表 2 桥子东、西沟流域次降雨径流深和产沙模数拟合关系

流域名称	线性过原点 $y = ax$		线性 $y = ax + b$			幂指数 $y = ax^b$		
	a	R^2	a	b	R^2	a	b	R^2
桥子东沟	340.79	0.97	334.49	48.64	0.96	350.27	1.02	0.93
桥子西沟	423.18	0.93	415.39	120.84	0.96	406.66	1.06	0.91

桥子西沟线性水沙关系的系数均大于桥子东沟的,说明在相同的径流深下桥子东沟的侵蚀产沙小于桥子西沟,桥子东沟流域水土保持综合治理没有改变水沙关系的形式,只改变了系数^[15],与桥子西沟相比径流含沙量降低。桥子东沟流域水土保持综合治理包含坡面治理措施和沟道工程措施。坡面治理措施一般通过减少径流来减少泥沙,不改变流域水沙关系^[2,14];沟道中的淤地坝、谷坊等工程措施拦截了径流中的泥沙,从而减少了东沟的径流含沙量,降低了水沙关系系数。

3.3 次降雨减沙率

桥子东、西沟流域各年份的次降雨平均含沙量和平均输沙率如图 6、7 所示。1997 ~ 2006 年,桥子东沟的次降雨平均含沙量先是波动随后直线下降,桥子西沟的先是上升然后略有下降。1987 ~ 1989 年的治理初期,桥子东沟的次降雨平均含沙量略大于桥子西沟。随着水土保持综合治理年限的增长,自 1990 年以后,桥子东沟的次降雨平均含沙量都小于桥子西沟的。说明水土保持综合治理实施后显著降低次降雨径流含沙量。1987 ~ 2006 年,桥子西沟的次降雨平均输沙率都大于桥子东沟的。1987 ~ 1989 年的治理初期,桥子东、西沟流域次降雨输沙率的差别较小。随着治理年限的增长,桥子东、西沟

的次降雨输沙率差别变大。说明水土保持综合治理显著降低次降雨平均输沙率。

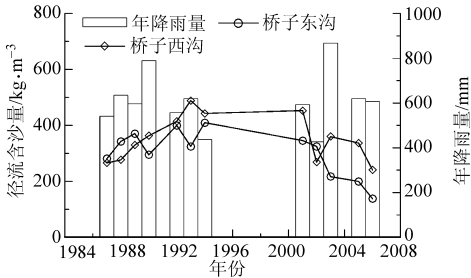


图 6 桥子东、西沟流域各年份的次降雨平均含沙量
Fig. 6 Annual mean sediment content in individual rainfall at Qiaozi-East and Qiaozi-West watershed

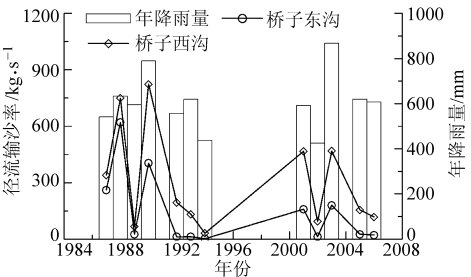


图 7 桥子东、西沟流域各年份的次降雨平均输沙率
Fig. 7 Annual mean sediment delivery rate in individual rainfall at Qiaozi-East and Qiaozi-West watershed

桥子东、西沟流域次降雨平均含沙量比值和平均输沙率比值的年际变化如图 8 所示。1987 ~ 1989

年的治理初期,桥子东、西沟的次降雨平均含沙量比值约为 1.0 ~ 1.2,水土保持综合治理还未发挥作用。1989 年以后,该比值呈不断下降趋势,治理末期约为 0.6。桥子东沟径流含沙量比桥子西沟减少 40% 以上,水土保持综合治理显著减少径流含沙量。桥子东沟实施水土保持综合治理后,径流输沙率比值波动下降,从治理初期的 0.8 下降到末期的小于 0.2。桥子东沟径流输沙率比桥子西沟减少 80% 以上,水土保持综合治理显著降低径流输沙率。次降雨径流输沙率主要受径流含沙量和流量的影响。水土保持综合治理实施后,径流流量大幅减少,径流含沙量下降幅度小于输沙率下降幅度。水土保持综合治理减水也减沙,单纯减沙的效果不大,主要通过减水进而减沙。

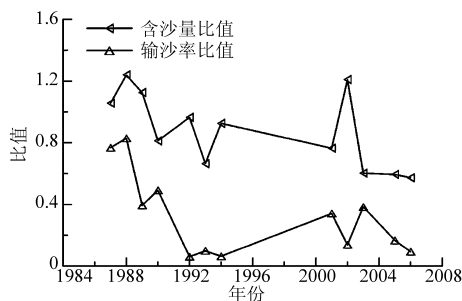


图8 桥子东、西沟流域各年的次降雨平均含沙量、输沙率比值

Fig. 8 Ratios of mean sediment content and mean sediment delivery rate in individual rainfall at Qiaozi-East watershed to those at Qiaozi-West watershed

3.4 次降雨侵蚀产沙动态过程

降雨侵蚀过程中,泥沙输出可集中地反映于径流含沙量和输沙率的变化。次降雨径流输沙过程线对研究水土保持对地表径流输沙影响具有重要意义^[16]。水土保持综合治理是造成不同流域径流和输沙不同的主要原因^[17]。

3.4.1 含沙量动态过程

黄土高原丘陵沟壑区小流域的次降雨洪水过程一般陡涨陡落,含沙量过程则存在陡涨缓落的特征^[14]。从流域出口洪水形成到含沙量达到稳定时间较短,随后,含沙量平稳波动,在洪水后期,含沙量不断下降,下降速度小于洪水初期的上升速度。由于桥子东、西沟流域面积较小,流域汇水过程较快,次降雨洪水过程受降雨特征影响较大。黄土高原丘陵沟壑区次降雨一般为短历时强降雨。因此,桥子东、西沟流域一次洪水过程一般较快,含沙量平稳阶段的历时一般较短(图9)。

分析治理实施后不同历史时期的次降雨含沙量动态过程。1987 年是桥子东沟水土保持综合治理的第一年,1987-07-27 次降雨过程,桥子东、西沟

含沙量变化过程是一致的,但是桥子东沟的径流含沙量明显高于桥子西沟的。1989 ~ 1990 年实测的 3 场次降雨中,桥子东沟的次降雨含沙量显著下降,与桥子西沟相差不大。1989-04-20 的次降雨过程,桥子东沟径流含沙量在汇水期和退水末期高于桥子西沟,中期低于桥子西沟。1990 年的 2 场次降雨过程,桥子东沟的径流含沙量在汇水期和含沙量高峰期都低于桥子西沟,仅在退水期略大于桥子西沟。说明随着治理年限的增长,水土保持综合治理减沙的作用逐步增强。从 1993 年开始,次降雨过程中桥子东沟的径流含沙量基本都低于桥子西沟,并且桥子东、西沟含沙量差距在不断增大。到了 2006 年,在完整的洪水过程中,桥子东沟的径流含沙量都显著低于桥子西沟。桥子东沟水土保持综合治理显著降低径流含沙量,治理效果逐年增强。

3.4.2 输沙率动态过程

黄土高原丘陵沟壑区小流域的次降雨输沙率过程主要受含沙量和流量过程的影响,且受流量过程的影响较大。流量过程一般陡涨陡落,因此输沙率过程一般陡涨陡落(图 10)。从 1987 年以来,桥子西沟的次降雨平均输沙率都大于桥子东沟。水土保持综合治理对输沙过程具有较强的调控作用^[13]。在 1987 ~ 1990 年的治理初期,次降雨过程中桥子东、西沟输沙率在不同时间段有高有低,桥子西沟输沙率总体上高于桥子东沟。自 1993 年以后,桥子西沟的径流输沙率显著高于桥子东沟。水土保持综合治理显著降低径流输沙率。

4 结论

(1) 水土保持综合治理减少流域侵蚀产沙。在水土保持综合治理初期,桥子东沟的年侵蚀模数约为桥子西沟的 60% ~ 70%,到治理后期,该值约为 20%。水土保持综合治理降低了径流平均含沙量、输沙率,桥子东沟径流含沙量、输沙率与桥子西沟相比分别减少 40%、80%。输沙率主要受含沙量和径流量影响,含沙量和径流量都下降,因此输沙率的下降幅度大于含沙量的下降幅度。

(2) 水土保持综合治理影响流域次降雨水沙关系。桥子东、西沟流域径流深和产沙模数关系为线性过原点形式。在相同的径流深下,桥子东沟的侵蚀产沙小于桥子西沟。桥子东沟流域水土保持综合治理没有改变水沙关系的形式,只降低了系数。

(3) 水土保持综合治理改变了次降雨含沙量、输沙率动态过程。在治理初期,桥子东沟的径流含沙量过程都明显高于桥子西沟。从 1993 年开始,次降雨过程中桥子东沟的径流含沙量基本都低于桥子

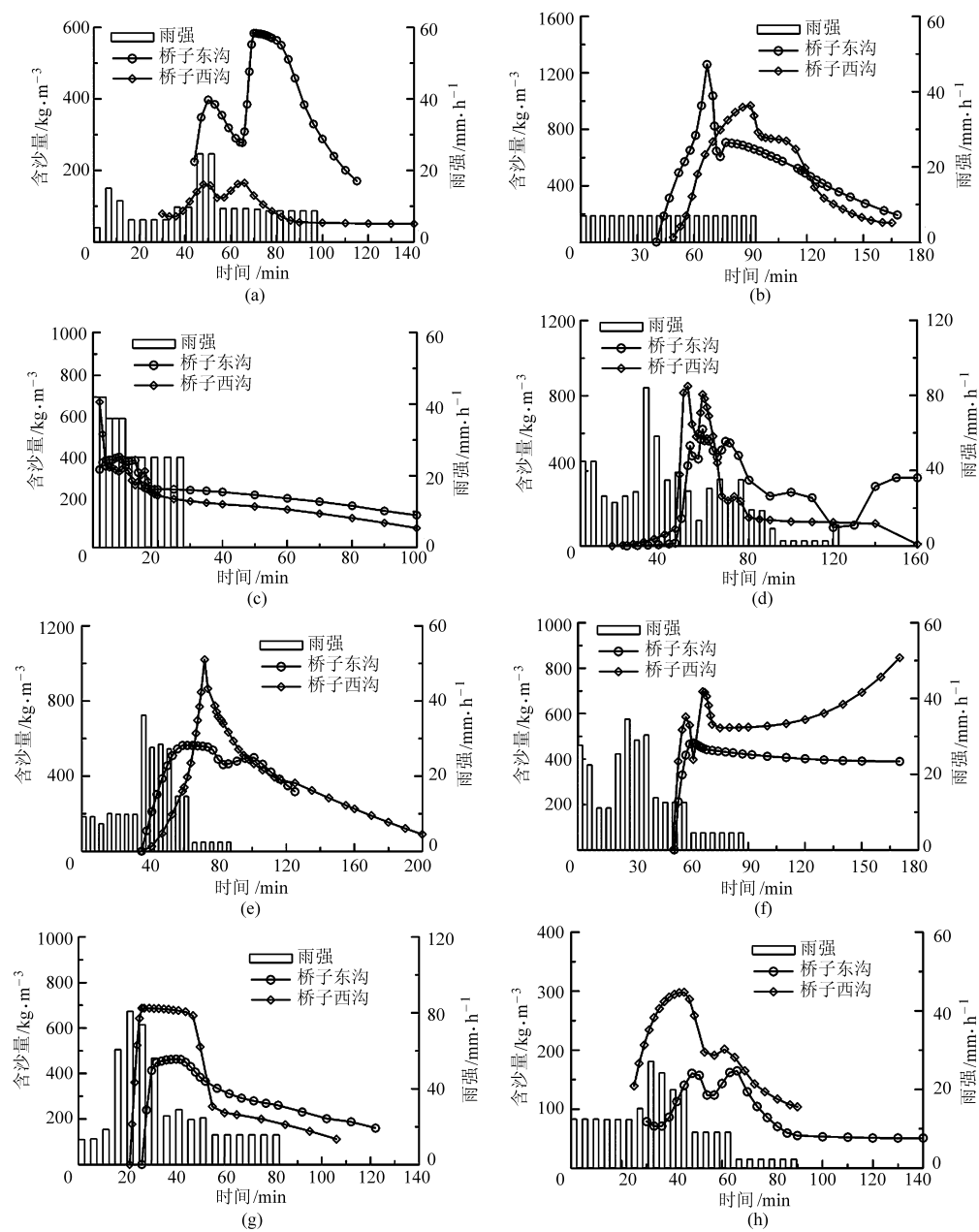


图 9 桥子东、西沟流域次降雨含沙量动态过程

Fig. 9 Processes of sediment content in individual rainfall at Qiaozi-East and Qiaozi-West watershed

(a) 1987-07-27 (b) 1989-04-20 (c) 1990-07-08 (d) 1990-08-11 (e) 1993-06-23
(f) 1994-07-18 (g) 2001-06-15 (h) 2006-07-09

西沟,并且含沙量差距在不断增大。在治理初期,次降雨过程中桥子东、西沟流域输沙率在不同时间段有高低。在治理中后期,次降雨过程中桥子西沟的径流输沙率都显著高于桥子东沟。

参 考 文 献

- 唐克丽. 中国水土保持[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 201.
- 许炯心. 无定河流域侵蚀产沙过程对水土保持措施的响应[J]. 地理学报, 2004, 59(6): 972~981.
Xu Jiongxin. Response of erosion and sediment producing processes to soil and water conservation measures in the Wudinghe river basin [J]. Acta Geographica Sinica, 2004, 59(6): 972~981. (in Chinese)
- 韩建刚, 李占斌. 紫色土区小流域泥沙输出过程对雨型和空间尺度的响应[J]. 水利学报, 2006, 37(1): 58~62.
Han Jiangang, Li Zhanbin. Response of sediment flow behavior to storm type and spatial scale in purple soil watershed [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(1): 58~62. (in Chinese)
- Garcia-Ruiz J M, Lasanta T, Martl C, et al. Changes in runoff and erosion as a consequence of land-use changes in the

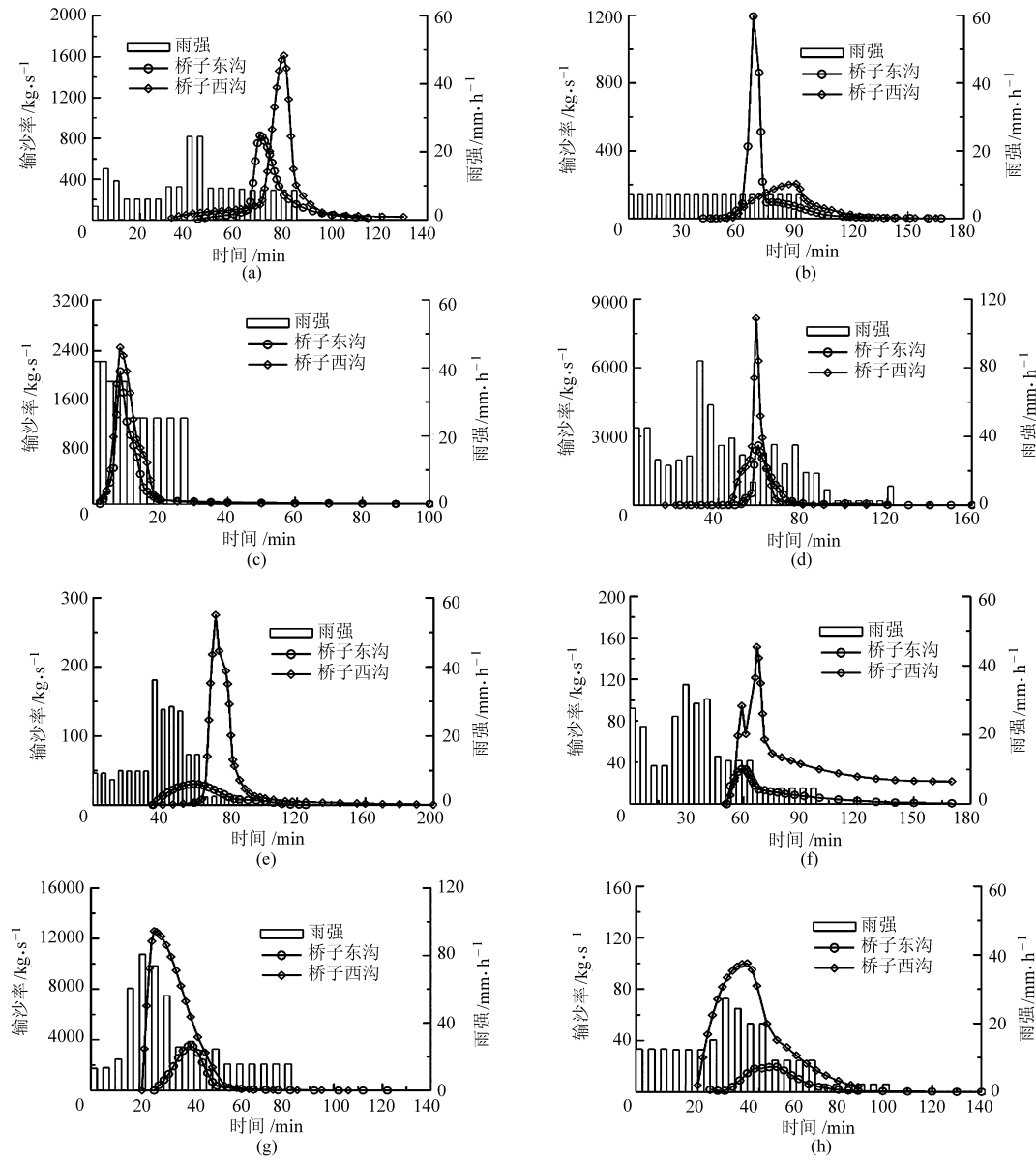


图 10 桥子东、西沟流域次降雨径流输沙率动态过程

Fig. 10 Processes of sediment delivery rate in individual rainfall at Qiaozi-East and Qiaozi-West watershed

(a) 1987-07-27 (b) 1989-04-20 (c) 1990-07-08 (d) 1990-08-11
(e) 1993-06-23 (f) 1994-07-18 (g) 2001-06-15 (h) 2006-07-09

central Spanish Pyrenees [J]. Physics and Chemistry of the Earth, 1995, 20(3~4): 301~307.

5 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.

6 Jordan G, Rompaey A V, Szilassi P, et al. Historical land use changes and their impact on sediment fluxes in the Balaton basin (Hungary) [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2005, 108(2): 119~133.

7 Mao D Z, Cherkauer K A. Impacts of land-use change on hydrologic responses in the Great Lakes region [J]. Journal of Hydrology, 2009, 374(1~2): 71~82.

8 Mohammad A G, Adam M A. The impact of vegetative cover type on runoff and soil erosion under different land uses [J]. CATENA, 2010, 81(2): 97~103.

9 DeFries R, Eshleman K N. Land-use change and hydrologic processes; a major focus for the future [J]. Hydrological Processes, 2004, 18(11): 2 183~2 186.

10 琚彤军, 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)

- 11 Zheng M G, Cai Q G, Cheng Q J. Modeling the runoff-sediment yield relationship using a proportional function in hilly areas of the Loess Plateau, north China [J]. *Geomorphology*, 2008, 93(3~4): 288 ~ 301.
- 12 王国庆, 兰跃东, 张云, 等. 黄土丘陵沟壑区小流域水土保持措施的水文效应[J]. *水土保持学报*, 2002, 16(5): 87 ~ 89.
Wang Guoqing, Lan Yuedong, Zhang Yun, et al. Hydrological effects of water and soil conservation measures of small watershed in loess gully and hilly area [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 16(5): 87 ~ 89. (in Chinese)
- 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征[J]. *中国水土保持科学*, 2006, 4(4): 78 ~ 81.
Wang Ruifang, Huang Chengzhi, Dong Yuting. Comparison of storm runoff and sediment yield between two different managed small watersheds in the Loess Plateau [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2006, 4(4): 78 ~ 81. (in Chinese)
- 14 郑明国, 蔡强国, 王彩峰, 等. 黄土丘陵沟壑区坡面水保措施及植被对流域尺度水沙关系的影响[J]. *水利学报*, 2007, 38(1): 47 ~ 53.
Zheng Mingguo, Cai Qiangguo, Wang Caifeng, et al. Effect of vegetation and other measures for soil and water conservation on runoff-sediment relationship in watershed scale [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 38(1): 47 ~ 53. (in Chinese)
- 15 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.
Duan Qingsong, Wu Bozhi, Zi Shuhui. Change law in runoff and soil erosion from a watershed in the central Yunnan Province after conservation implementation [J]. *Transactions of the CSAE*, 2005, 21(5): 42 ~ 46. (in Chinese)
- 16 张晓明, 余新晓, 武思洪, 等. 黄土丘陵沟壑区典型流域土地利用/土地覆被变化对径流泥沙的影响[J]. *北京林业大学学报*, 2007, 29(6): 115 ~ 122.
Zhang Xiaoming, Yu Xinxiao, Wu Sihong, et al. Effects of land-use/land-cover change on sediment production of runoff in typical watershed in the loess gully-hilly region of China [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2007, 29(6): 115 ~ 122. (in Chinese)
- 17 王兮之, 索安宁, 洪军, 等. 黄土高原泾河流域水沙特征分析[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(2): 22 ~ 25.
Wang Xizhi, Suo Anning, Hong Jun, et al. Analysis of runoff and sediment variation in Jinghe river watershed of Loess Plateau [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(2): 22 ~ 25. (in Chinese)

(上接第 68 页)

- 6 赵匀, 应义斌, 李建平. 农机计算机辅助分析和设计初探[J]. *农业工程学报*, 1996, 12(4): 177 ~ 180.
Zhao Yun, Ying Yibin, Li Jianping. Study on computer aid design and analysis of agricultural machinery[J]. *Transactions of the CSAE*, 1996, 12(4): 177 ~ 180. (in Chinese)
- 7 Zhao Yun, Yu Gaohong, Chen Jianneng, et al. Mechanism dynamics sequence-solution method and its application[J]. *ASME*, 2007, 2: 105 ~ 113.
- 8 Zhao Yun, Chen Jianneng, Yu Yaxin, et al. Quadratic optimization method and its application on optimizing mechanism parameter [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2006, 19(4): 519 ~ 523.
- 9 陈建能, 赵匀. 高速插秧机椭圆齿轮行星系分插机构的参数优化[J]. *农业机械学报*, 2003, 34(5): 48 ~ 51.
Chen Jianneng, Zhao Yun. Parameters optimization of transplanting mechanism with planetary elliptic gears for high-speed transplanter[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2003, 34(5): 48 ~ 51. (in Chinese)
- 10 赵匀. 机构数值分析与综合[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- 11 赵匀. 农业机械计算机辅助分析和设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.
- 12 蒋恩臣, 蒋亦元. 气吸式割前摘脱装置的研究[J]. *农业机械学报*, 2000, 31(3): 46 ~ 48.
Jiang Enchen, Jiang Yiyuan. Studies on the stripping unit with air suction [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2000, 31(3): 46 ~ 48. (in Chinese)
- 13 张兰星, 何月娥. 谷物收割机械理论与计算[M]. 长春: 吉林人民出版社, 1980.
- 14 连政国, 曹崇文. 过热蒸汽干燥特性的试验研究[J]. *农业机械学报*, 2000, 31(1): 66 ~ 68.
Lian Zhengguo, Cao Chongwen. Experimental research on the characteristics of superheated steam drying[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2000, 31(1): 66 ~ 68. (in Chinese)