

关川河流域 1995—2010 年降雨特征及其水土流失效应

李海防^{1,2}, 卫伟¹, 邓居礼³, 王丽君³

(1. 中国科学院生态环境研究中心 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100086;

2. 桂林理工大学 旅游学院, 广西 桂林 541004; 3. 定西水文水资源勘测局, 甘肃 定西 743000)

摘要: 依据定西关川河流域 1995—2010 年的水文站监测数据, 分析了该地区降雨特征及其水土流失效应。结果表明: (1) 流域降雨事件主要发生在 5—9 月, 7—8 月降雨量达到全年最高值, 而侵蚀性降雨主要发生在 7—8 月; 15 a 间侵蚀性降雨日数占总降雨日数的 9.53%; 侵蚀性降雨量占总降雨量的 39.41%。(2) 15 a 间共观测到 1 123 d 降雨, 降雨总量达 4 866.98 mm; 多年平均降雨量 304.19 mm, 年际变化趋势不明显, 每年约 10% 的侵蚀性降雨事件造成土壤侵蚀。(3) 河川径流量与输沙量呈极显著正相关关系 ($p < 0.001$), 二者均呈波动减少的趋势; 当表层土壤处于缺水状态时, 降雨对土壤侵蚀的影响延迟。(4) 由于影响土壤水蚀的因素错综复杂, 降雨量、侵蚀性降雨量和降雨侵蚀力均不能独立反映流域土壤侵蚀过程。

关键词: 降雨; 水土流失; 黄土高原; 关川河流域

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)06-0084-04

中图分类号: P333.4

Characteristics of Precipitation and Soil Erosion From 1995 to 2010 in Guanchuan River Basin

LI Hai-fang^{1,2}, WEI-Wei¹, DENG Jü-li³, WANG Li-jun³

(1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology and Research Center for Eco-environmental Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100086, China; 2. College of Tourism, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China; 3. Hydrology and Water Resources Survey Bureau, Dingxi, Gansu 743000, China)

Abstract: Based on field hydrological data from 1995 to 2010, the article analyzed the characteristics of precipitation and its effect on soil erosion in Guanchuan River basin, Dingxi County, Gansu Province and concluded that: Firstly, most of the rainfall occurred from May to September, while erosive rainfall concentrated in July and August. Within the 15 years, erosive rainfall days accounted for 9.53% of annual rainy days and erosive precipitation accounted for 39.41% in total amounts. Secondly, about 1 123 rainy days were observed during the 15 years with a total precipitation amount of 4 866.98 mm and mean precipitation of 304.19 mm. No obvious trend was found during the 15 years. The proportion of days with erosive rainfall was about 10% annually. Thirdly, a strong positive relationship were found between river runoff and soil erosion ($p < 0.001$), both of which decreased over time. The precipitation effect on soil erosion delayed when soil was dry. Finally, because water erosion process is quite complex, rainfall amount, erosive rainfall amount, rainfall erosivity can not reflect soil erosion independently.

Keywords: precipitation; soil and water losses; the Loess Plateau; Guanchuan River basin

甘肃省定西市位于黄土高原西部半干旱区, 年平均降水量在 500 mm 以下, 水土流失是当地最为严重的生态环境问题, 严重制约着当地社会经济的可持续发展^[1-3]。降雨是黄土高原土壤侵蚀的主要动力, 降雨的时空变化对土壤侵蚀产生重要的影响, 与流域水

土流失存在着复杂的关系^[4]。前人对黄土高原降雨时空分布^[5-7], 坡面降雨水蚀过程^[8-9]及模拟降雨侵蚀^[10-12]进行了大量研究, 但对特定地区降雨量、降雨侵蚀力及产流产沙过程的系统分析还需要加强^[13]。因而, 本研究以甘肃省定西市关川河流域为研究对

收稿日期: 2013-01-03

修回日期: 2013-03-20

资助项目: 国家杰出青年科学基金项目“景观生态学”(40925003); 国家自然科学基金项目“黄土丘陵区坡面尺度不同整地方式的生态水文效应”(41371123)

作者简介: 李海防(1974—), 男(汉族), 山东省莱阳市人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事生态学及景观生态学教学与科研工作。E-mail: lihaifang@glute.edu.cn。

通信作者: 卫伟(1978—), 男(汉族), 河南省封丘县人, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要研究方向为生态水文学。E-mail: weiwei@rcees.ac.cn。

象,利用1995—2010年的逐日降雨及流域出水口的河川径流量和输沙量观测资料,分析降雨及水土流失的统计特征。研究结果对深入了解关川河流域降雨特征与水土流失的关系,优化黄土高原治理等方面均具有重要的参考价值。

1 研究区概况

关川河流域位于 $35^{\circ}17'—36^{\circ}14'N$, $104^{\circ}11'—105^{\circ}01'E$,属黄土高原丘陵沟壑区。关川河发源于甘肃省定西市境内,在郭城驿汇入祖厉河,全长约100 km,流域面积 $3\,535.45\text{ km}^2$ 。流域海拔在 $1\,420—3\,941\text{ m}$,属中温带半干旱气候,年平均气温为 $7.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,无霜期 $122—160\text{ d}$,年平均降水量 370 mm ,年蒸发量 $1\,400\text{ mm}$ 以上。长期以来,受自然、人为等多种因素的影响,该区沟壑纵横,梁峁起伏,植被稀疏,黄土裸露,水土流失严重,平均年土壤侵蚀模数为 $5\,252.7\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ ^[14]。

2 研究方法

2.1 数据来源

所用数据来源于定西市水文水资源勘测局,包括郭城驿、岷口、红土和内官营等4个雨量站。以1995—2010年每年5—9月的数据代表年度数据,对降雨及流域出水口的河川径流量和输沙量进行统计特征分析,逐日、逐月、逐年地统计不同强度的日降雨量、出现次数及频率,分析日降水量的均值和标准差等统计特征;分析月、年不同尺度降雨量、侵蚀性降雨的变化趋势,计算降雨侵蚀力的月、年值和趋势变化^[15]。

侵蚀性降雨采用以日降雨 $\geq 12\text{ mm}$ 为侵蚀性降

雨的划分方法,降雨量 $<12\text{ mm}$ 的日降雨视为小雨。土壤侵蚀力利用日降雨量参数估计模型对待定系数 α 和 β 进行计算,其公式为^[16-17]:

$$\beta = 0.836\,3 + 18.144P_{d12}^{-1} + 24.455P_{y12}^{-1} \quad (1)$$

$$\alpha = 21.586\beta^{-7.189\,1} \quad (2)$$

$$R = \sum_{i=1}^{24} \sum_{j=1}^m \alpha(P_j)^{\beta} \quad (3)$$

式中: P_{d12} ——日降雨 $\geq 12\text{ mm}$ 的日平均雨量(mm);
 P_{y12} ——日降雨 $\geq 12\text{ mm}$ 的年平均雨量(mm);
 P_j ——第 j 天的侵蚀性日降雨量; m ——侵蚀性降雨日数; R 值——年平均降雨侵蚀力值($\text{MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$)。

2.2 数据处理

应用SPSS 13.0软件对降雨量、河川径流量、侵蚀性降雨量、降雨侵蚀力和输沙量等进行因子分析和相关分析,采用LSD法检验差异的显著性。

3 结果与讨论

3.1 关川河流域5—9月降雨量分布特征

定西地区的降雨事件主要发生在5—9月^[3]。统计关川河流域1995—2010年5—9月降雨量可以看出,6—8月是降雨最为集中的月份。不同月份日降雨平均值、日降雨变幅和降雨日数详见表1。由表1可以看出,最大日降雨量出现的时间和最大月降水量时间并不一致,5和9月的日平均降雨量较少,波动幅度分别在 $0.1—30.4\text{ mm}$ 和 $0.1—20.55\text{ mm}$ 。6月开始降雨量有所增加,到7—8月达到全年的最高值,最高值为8月,日平均降雨量 5.96 mm ,月降雨量达到 89.35 mm ;9月份降雨量又开始逐渐减少。从日降雨变幅来看,降雨量在6—8月波动相对较大,容易造成旱涝灾害。

表1 关川河流域1995—2010年5—9月降雨分布特征

项目	5月	6月	7月	8月	9月
日降雨平均值/mm	3.99(0.35)	4.05(0.39)	5.37(0.42)	5.96(0.48)	3.54(0.25)
日降雨变幅/mm	0.1~30.4	0.1~56.65	0.1~39.75	0.1~39.30	0.1~20.55
降雨日数/d	12.38	13.75	14.69	14.94	14.44
侵蚀性降雨日数/d	0.81	0.94	1.88	2.31	0.69
占总降雨日数的比例/%	6.57	6.82	13.19	15.48	4.76
月降雨量/mm	49.37	55.68	79.23	89.35	51.30
侵蚀性降雨总量/mm	14.84	18.54	36.77	47.19	10.71
占总降雨量的比例/%	30.05	33.30	46.41	52.82	20.88

注:括号内数值为标准误差。

并不是所有的降雨都能引起土壤侵蚀,能导致土壤侵蚀的降雨称为侵蚀性降雨。在本研究中,用侵蚀

性降雨来表征降雨事件中能产生土壤水蚀作用的降雨,一般认为,当日降雨量 $\geq 12\text{ mm}$ 时才能产生降雨

侵蚀^[18-19]。统计结果表明,15 a 间全部降雨中有 107 场次降雨为侵蚀性降雨,占总降雨场次的 9.53%;侵蚀性降雨量总计 2 048.93 mm,占总降雨量的 39.41%。从月份分布上看(表 1),侵蚀性降雨多发生在 7—8 月份,其中 8 月份侵蚀性降雨量最多,雨强最大,且侵蚀性降雨在当月降雨总量所占比例最高,达 52.82%。降雨日数最低在 5 月,仅有 198 d 降雨;9 月份次之,有 231 d 降雨;但 9 月份的侵蚀性降雨明显高于 5 月份。5 和 9 月日降雨量以小于 12 mm 为主,5 月份侵蚀性降雨日数和侵蚀性降雨总量分别仅占该月降雨日数和降雨总量的 6.57%和 30.35%,9 月份侵蚀性降雨日数和侵蚀性降雨总量分别仅占该月降雨日数和降雨总量的 4.76%和 20.88%。这类降水强度小,不易造成水土流失,但往往由于没有足够的水量入渗至土壤深层,且浅层的水分极易蒸发,因而这类降雨对解决地区干旱作用不大。从 6 月份开始, ≥ 12.0 mm 的日降雨量出现频率开始增加,此类强度的降水,往往造成严重的土壤侵蚀,加剧了水土流失。

3.2 关川河流域 1995—2010 年降雨量分布特征

对关川河流域 1995—2010 年降雨特征进行分析,在观测期内(1995—2010 年),共观测到 1 123 d 降雨,降雨总量达到 4 866.98 mm;15 a 年均降雨量 304.19 mm,降水量年际间差异较大,变异系数为 0.167。

由表 2 可以看出,降雨量的峰值出现在 1998、2003 和 2007 年,降雨量分别为 380.07、415.10 和 360.07 mm;最低降雨量出现在 1997 和 2002 年,降雨量分别为 191.17 和 197.07 mm。由表 2 可知,15 a 来的降雨量总体变化趋势不明显,并没有增多或者减少的趋势,全年有降雨的天数也没有明显的变化(表 1)。从侵蚀性降雨来看,每年都有 10% 上下的侵蚀性降雨事件造成土壤侵蚀,其雨量占全年总雨量的 50% 左右。关川河流域多年降雨量在 204.77~413.84 mm,多年侵蚀降雨范围在 63.75~241.93 mm,多年降雨侵蚀力在 212.51~864.67 MJ·mm/(hm²·h·a) 之间波动(表 2)。

表 2 关川河流域 1995—2010 年降雨量分布特征

年份	降雨天数		日降雨量		年降雨量		
	降雨日数/ d	侵蚀性降雨 日数/d	日平均值/ mm	变幅/ mm	降雨量	侵蚀性降雨	降雨侵蚀力/ (MJ·mm·hm ² ·h ⁻¹ ·a ⁻¹)
1995	68	9	5.16	0.1~32.00	357.40	173.47	599.53
1996	62	5	4.29	0.1~39.75	284.23	102.28	438.20
1997	58	4	3.30	0.1~23.88	204.77	68.99	215.74
1998	78	12	4.87	0.1~31.13	413.84	241.93	847.30
1999	81	7	4.16	0.1~28.48	361.21	128.53	443.55
2000	65	7	4.42	0.1~34.05	317.23	136.92	487.86
2001	72	3	4.00	0.1~24.05	287.28	63.75	212.51
2002	69	5	2.86	0.1~20.88	293.41	76.53	218.67
2003	80	7	5.19	0.1~24.20	407.17	126.73	399.51
2004	69	7	4.62	0.1~34.60	307.78	147.13	579.17
2005	78	8	4.27	0.1~18.23	334.97	120.53	329.54
2006	73	8	4.41	0.1~27.90	320.71	141.10	454.17
2007	69	6	5.22	0.1~56.65	382.30	158.53	864.67
2008	71	7	4.75	0.1~37.05	340.85	138.65	531.72
2009	62	6	3.62	0.1~27.15	258.38	113.70	382.89
2010	68	5	3.81	0.1~30.40	327.53	110.18	418.73

3.3 流域出水口产流产沙特征

图 1 为关川河流域 1995—2010 年降雨量与出水口河川径流量及输沙量的变化情况。统计分析结果可知,河川径流量与输沙量趋势一致,呈极显著的线性正相关关系($R^2=0.5830$, $p<0.001$)。1995 年降雨产生的河川径流量和输沙量明显大于其它年份,随后,河川径流量和输沙量呈波动减少的趋势,而降雨峰值出现的时间分别是 1995、1998、200 年和 2007

年,降雨量分别为 351.13、380.07、415.10 和 360.07 mm。河川径流量和输沙量出现峰值的时间基本一致,说明降雨量越大,河川径流量就越大,土壤侵蚀量有增加的趋势。但河川径流除受降雨的影响外,还受到下垫面特征的影响,下垫面特征是由地形、土壤、地表覆盖等多种因素决定的^[20]。因而,土壤侵蚀与降雨量在波动一致性的基础上又具有一定的差异性。另外,尽管最大降雨量出现在 2003 年,但由于 2001

和 2002 年的多年的持续干旱,导致 2003 年并没有出现明显的径流量和输沙量峰值(图 1)。表明当降雨强度到达波峰时,输沙率并未立即到达波峰,而出现延后的状况。这可能是由于当表层土壤处于缺水状态时,降雨对土壤侵蚀的影响延迟,土壤侵蚀受降雨

强度和前期土壤水分状况的共同影响^[21]。从 1995—2010 年总体变化趋势看,降雨量没有明显变化趋势的情况下,河川径流量和输沙量的都呈波动减少的趋势(图 1),说明水资源消耗等其他因素对水土流失的影响,也说明流域水土流失模拟的复杂性。

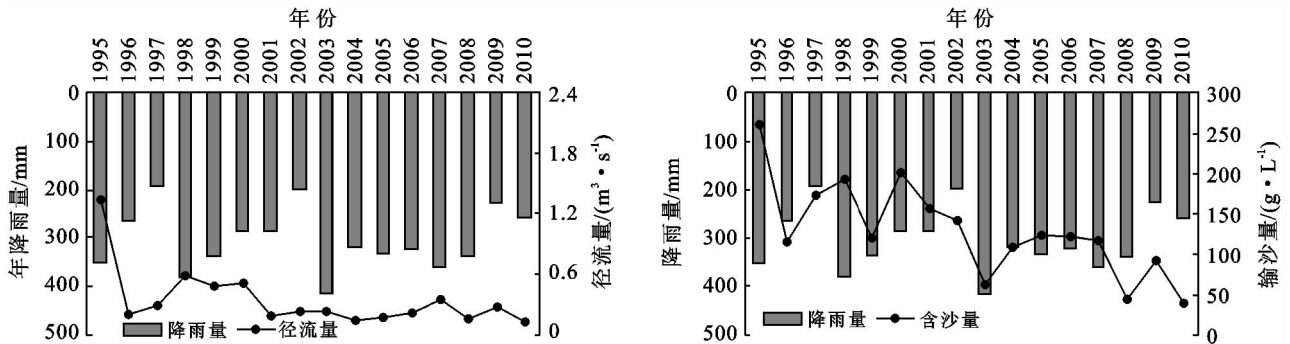


图 1 降雨量与流域出水口河川径流量和输沙量的年际变化

3.4 水土流失影响因子间的关系分析

对关川河流域 1995—2010 年 5—9 月的降雨量、河川径流量、侵蚀性降雨量、降雨侵蚀力和输沙量等因素进行因子分析(表 3)。结果表明,河川径流量与侵蚀性降雨量($p < 0.05$)之间存在显著正相关关系,而与降雨量之间的线性关系不显著($p > 0.05$);输沙量只与河川径流量呈极显著线性关系($p < 0.01$),与其它因子关系都不明显。说明降雨量、侵蚀性降雨量和降雨侵蚀力均不能独立反映流域的土壤侵蚀过程,要准确描述流域水土流失过程,还必须考虑土壤可蚀性,坡度坡长、植被变化、土地利用和土壤保持措施等多种因素的影响^[22]。

2010 年来的降雨量总体变化趋势不明显;每年都有 10%左右的侵蚀性降雨事件造成土壤侵蚀,侵蚀性降雨量约占全年总雨量的 50%。

(3) 河川径流量与输沙量呈极显著正相关关系($p < 0.001$),河川径流量和输沙量呈波动减少的趋势;当表层土壤处于缺水状态时,降雨对土壤侵蚀的影响延迟。

(4) 降雨量、侵蚀性降雨量和降雨侵蚀力均不能独立反映整个流域的土壤侵蚀过程;要准确描述流域水土流失过程,还必须考虑土壤可蚀性,坡度坡长、植被变化、土地利用和土壤保持措施等多种因素的影响。

表 3 降雨与产流产沙相关系数

项目	降雨量	河川径流量	侵蚀性降雨量	降雨侵蚀力	输沙量
降雨量	1.000				
河川径流量	0.276	1.000			
侵蚀性降雨量	0.696**	0.490*	1.000		
降雨侵蚀力	0.632**	0.371	0.892**	1.000	
输沙量	-0.024	0.763**	0.252	0.132	1.000

注: *表示 $p < 0.05$, **表示 $p < 0.01$ 。

4 结论

(1) 定西地区降雨事件主要发生在 5—9 月,7—8 月达到全年的最高值,侵蚀性降雨多发生在 7—8 月份;1995—2010 年间侵蚀性降雨占总降雨场次的 9.53%,侵蚀性降雨量占总降雨雨量的 39.41%。

(2) 在观测期内共观测到 1 123 d 降雨,降雨总量达 4 866.98 mm,年均降雨量 304.19 mm,1995—

[参 考 文 献]

[1] Fu Bojie, Chen Liding. Agricultural landscape spatial pattern analysis in the semi-arid hill area of the Loess Plateau, China [J]. Journal of Arid Environments, 2000, 44(3):291-303.

[2] Chen Liding, Huang Zhilin, Gong Jie, et al. The effect of land cover/vegetation on soil water dynamic in the hilly area of the Loess Plateau, China [J]. Catena, 2007, 70(2): 200-208.

[3] 马海霞. 定西黄土丘陵沟壑区水土流失研究进展[J]. 草原与草坪, 2012, 32(4): 90-92.

[4] 杨占彪,朱波,林立金,等. 川中丘陵区紫色土坡耕地土壤侵蚀特征[J]. 四川农业大学学报, 2010, 28(4): 480-45.

[5] 张少伟,杨勤科,陆广勇. 陕北黄土高原月降雨理论分布的初步研究[J]. 水土保持研究, 2011, 18(3): 1-4.

[6] 张由松,肖自幸,牛健植,等. 基于 GIS 的罗玉沟流域降雨侵蚀力时空分布规律研究[J]. 湖南农业科学, 2011 (15): 87-90.

(下转第 93 页)

个林龄的原因。通过主成份分析结果表明,土壤容重、毛管持水量、毛管孔隙度、有机质、放线菌和真菌可以作为土壤评价的关键指标。

[参 考 文 献]

- [1] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1980: 68-69.
- [2] 南京农业大学. 土壤农化分析[M]. 北京: 农业出版社, 1981: 301-320.
- [3] 陈华癸. 土壤微生物学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1981: 44-45.
- [4] 周礼恺. 土壤酶学[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 116-267.
- [5] 郝艳, 刘君昂, 周国英, 等. 不同抚育措施对油茶林土壤养分、微生物及酶活性的影响[J]. 林业资源管理, 2008, 12(6): 97-101.
- [6] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1986: 296-297, 323-327.
- [7] 代海燕, 张秋良, 魏强, 等. 大青山不同植被土壤物理特征及有效水的研究[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(12): 149-153.
- [8] Aon M A, Colaneri A C. Temporal and spatial evolution of enzyme activities and physio-chemical properties in an agricultural soil [J]. Applied Soil Ecology, 2001, 18(3): 255.
- [9] Rosm, Hernandez T, Carcia C. Soil microbial activity after restoration of a semiarid soil by organic amendents [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2003, 35(3): 463-469.
- [10] 于洋, 王海燕, 丁国栋, 等. 华北落叶松人工林土壤微生物数量特征及其与土壤性质的关系[J]. 东北林业大学学报, 2011, 39(3): 76-80.
- [11] 漆良华, 张旭东, 周金星, 等. 湘西北小流域不同植被恢复区土壤微生物数量、生物量碳氮及其分形特征[J]. 林业科学, 2009, 45(8): 14-20.
- [12] 邓旺秋, 潘超美, 李泰辉, 等. 油页岩废渣场植林修复过程中的土壤微生物生态[J]. 应用与环境生物学报, 2003, 9(5): 522-524.
- [13] 闵红, 和文祥, 李晓明, 等. 黄土丘陵区植被恢复过程中土壤微生物数量演变特征[J]. 西北植物学报, 2007, 27(3): 588-593.
- [14] 李国雷, 刘勇, 李瑞生, 等. 油松人工林土壤质量的演变[J]. 林业科学, 2008, 44(9): 76-81.
- [15] 于海群, 刘勇, 李国雷, 等. 油松幼龄人工林土壤质量对间伐强度的响应[J]. 水土保持通报, 2008, 28(3): 65-70.
- [16] Kosage J. The role of phenolic in plant response to infection[J]. Annual Review of Phytopathology, 1969, 7(4): 195-222.
- [17] 陆梅, 卫捷, 韩智亮. 滇池西岸4种针叶林的土壤微生物与酶活性[J]. 东北林业大学学报, 2011, 39(6): 56-59.
- (上接第87页)
- [7] 马芹, 张晓萍, 万龙, 等. 黄土高原河龙区间最大日雨量(PMP)极值拟合及时空演变特征[J]. 水土保持研究, 2012, 19(2): 71-76.
- [8] 甘卓亭, 叶佳, 周旗, 等. 模拟降雨下草地植被调控坡面土壤侵蚀过程[J]. 生态学报, 2010, 30(9): 2387-2396.
- [9] 黄金柏, 付强, 王斌, 等. 黄土高原北部水蚀风蚀交错带坡面降雨分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(8): 108-113.
- [10] 于国强, 李占斌, 鲁克新, 等. 黄土高原小流域次降雨侵蚀产沙分段预报模型研究[J]. 土壤学报, 2010, 47(4): 604-610.
- [11] 刘李霞, 毕华兴, 许华森, 等. 基于GIS的柳沟流域场降雨产流模拟[J]. 四川农业大学学报, 2011, 29(3): 357-364.
- [12] 鲁克新, 李占斌, 张霞, 等. 室内模拟降雨条件下径流侵蚀产沙试验研究[J]. 水土保持学报, 2011, 25(2): 6-14.
- [13] 吴艳, 白建勤, 张晓萍, 等. 基于日雨量的长武县53年来降雨量及侵蚀力演变趋势分析[J]. 水土保持研究, 2012, 19(4): 38-42.
- [14] 万廷朝. 定西市淤地坝建设成效与经验[J]. 水土保持通报, 2005, 25(6): 89-90.
- [15] 张岩, 朱清科. 黄土高原侵蚀性降雨特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2006, 20(6): 99-103.
- [16] 李学奎, 王志勇, 何建勋. 元谋县小黄瓜园水土保持监测站降雨侵蚀力特征及日降雨侵蚀力模型浅析[J]. 水土保持通报, 2009, 29(2): 43-46.
- [17] 陈利顶, 吕昌河. 黄土丘陵区土地利用与水土流失的尺度效应研究[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [18] 寻瑞, 王克林, 于闽, 等. 基于侵蚀降雨特征的湘江流域R因子修正算法[J]. 中国水土保持科学, 2009, 29(2): 43-46.
- [19] 马良, 左长清, 邱国玉. 赣北红壤坡地侵蚀性降雨的特征分析[J]. 水土保持通报, 2010, 30(1): 74-79.
- [20] 代数, 蒋光毅, 夏清, 等. 坡度和雨强对重庆市黄壤旱坡地产流产沙特征的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(4): 1-5.
- [21] 王金叶, 李海防, 段文军, 等. 漓江上游典型森林群落内外降雨特征研究[J]. 水土保持研究, 2012, 19(1): 56-59.
- [22] Feng Xiaoming, Wang Yafeng, Chen Liding, et al. Modeling soil erosion and its response to land-use change in hilly catchments of the Chinese Loess Plateau [J]. Geomorphology, 2010, 118(3): 239-248.