

模拟降雨条件下坡地径流泥沙特征研究

刘 泉^{1,3,5}, 李 鹏², 李占斌^{2,3}, 陈 磊⁴, 周 坪⁶

(1. 绵阳师范学院, 四川 绵阳 621000; 2. 西安理工大学, 西安 710048;

3. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 4. 长安大学, 西安 710064;

5. 中国科学院 成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 6. 勉县水利局, 陕西 勉县 724200)

摘 要:基于野外原位模拟降雨试验,研究桥子沟流域裸地、撂荒地、草地、林地 4 种土地利用类型的径流和泥沙流失分别对 90,120 mm/h 两种雨强的响应特征。结果表明:雨强 90,120 mm/h 条件下,4 种土地利用类型中林地径流量最少,撂荒地径流量最大,约为林地径流量的 7 倍;产流量顺序为:撂荒地>裸地>草地>林地;产沙量顺序为:裸地>撂荒地>草地>林地;坡面累积径流量和累积产沙量随产流时间呈线性规律变化趋势,径流(产沙)系数表现为撂荒地>裸地>草地>林地。坡面累积产沙量对累积径流量响应呈现幂函数变化规律,而且随着累积径流量增大,累积产沙量递增速率显著增大。

关键词:模拟降雨;累积径流量;累积产沙量;土地利用类型;响应

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2015)03-0001-05

Study on Characteristics of Losses of Runoff and Sediment in Slope Land Under Simulated Rainfall

LIU Quan^{1,3,5}, LI Peng², LI Zhanbin^{2,3}, CHEN Lei⁴, ZHOU Ping⁶

(1. Mianyang Normal University, Mianyang,

Sichuan 621000, China; 2. Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 3. Institute of Soil and Water

Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China;

4. Chang'an University, Xi'an 710064, China; 5. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of

Sciences, Chengdu 610041, China; 6. Water Resources Bureau of Mianxian County, Mianxian, Shaanxi 724200, China)

Abstract: The response characteristics of runoff and sediment losses in bare land, abandoned land, grassland and wood land in Qiaozigou Watershed were investigated based on two different simulated rainfall intensities which were 90 mm/h and 120 mm/h, respectively. The results were as follows: The amount of cumulative runoff yield was the least in wood land and the maximum amount occurred in bare land which was 7 times of the former. The amount of cumulative sediment yield decreased in the sequence of abandoned land>bare land>grass land>wood land, and the amount of cumulative sediment yield decreased in the order of bare land>abandoned land>grass land>wood land. With the increase of runoff duration in the rainfall process, the amount of cumulative runoff yield and the amount of cumulative sediment yield showed the linear relationship with yield duration of runoff and sediment, respectively. Both runoff coefficient and the sediment coefficient decreased in the order of abandoned land>bare land>grass land>wood land. In four land use types, the response of amount of cumulative sediment yield to cumulative runoff yield could be described by the power function. Moreover, with the increase of amount of cumulative runoff in the rainfall process, the gradient of the cumulative sediment yield increased dramatically.

Keywords: simulated rainfall; amount of cumulative runoff yield; amount of cumulative sediment yield; land use type; response

收稿日期:2014-06-24

修回日期:2014-08-08

资助项目:国家自然科学基金重点项目“黄土高原生态建设的生态—水文过程响应机理研究”(41330858);国家科技支撑计划课题“农田水土保持工程与耕作关键技术研究”(2011BAD31B01);绵阳师范学院青年资助项目“坡耕地水土流失过程中养分输移机理研究”(2013B09);绵阳师范学院博士科研启动项目“嘉陵江中游典型小流域水沙—养分(N,P)淋失机理研究”(QD2014A002)

第一作者:刘泉(1978—),男,江苏丰县人,副教授,博士后,研究方向为土壤侵蚀与水土保持。E-mail:liuquan78@126.com

通信作者:李占斌(1962—),男,河南镇平人,研究员,博士生导师,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:zhanbinli@126.com

水土流失导致的土壤肥力下降、水体污染、江河淤积等问题影响人类生存与社会发展^[1-2]。径流是土壤侵蚀的主要载体和驱动力^[3]。由于野外试验条件限制,目前模拟降雨条件下坡地径流泥沙研究主要集中在室内开展工作^[4-5]。黄土高原地区降雨以短历时大暴雨为主,通过野外模拟降雨试验减少对地表扰动,能较好地反映土壤下垫面对侵蚀产生的影响。

本文通过野外模拟降雨试验,对裸地、撂荒地、草地、林地 4 种典型坡地径流泥沙流失过程分析,探讨不同雨强条件的降雨对坡面产流和侵蚀产沙的影响,揭示土地利用类型与水土流失的关系,为黄土高原地区植被恢复和水土保持提供理论依据。

1 研究区概况

试验区位于天水水土保持科学试验站桥子沟流域(34°34'N,105°43'E),流域面积 72.79 km²。该流域属于黄土高原丘陵沟壑区第三副区,干燥少雨,年均蒸发量大约为 1 293.3 mm,属暖温带半湿润大陆型气候。植被类型主要有暖温带落叶阔叶林、天然灌木和人工果园。流域内降水年际变化幅度大,降水量年内分配不均,多年平均为 526.1 mm,降水主要集中在 5—10 月份^[6]。而且汛期降水多以暴雨形式出

现,该阶段输沙量约占全年输沙总量的 98%^[7]。流域内土壤以黄土质黑褐土为主,年土壤侵蚀模数为 2 310.4~4 270.6 t/km²。

2 材料与试验方法

试验采用针管式模拟降雨系统,喷头有效高度为 6 m,为确保试验结果的准确性,每次降雨试验前均需要检验降雨均匀性,对降雨强度进行率定。通过改变喷头孔径和输水压力达到雨滴降落终速与自然降雨特征值一致。2009 年 6 月在桥子沟流域选取 4 种典型的土地利用类型(裸地、撂荒地、草地和林地)(表 1),采用 90,120 mm/h 雨强开展人工模拟降雨试验,分析黄土区坡地径流和泥沙流失特征。不同土地利用类型径流小区面积均为 10 m×2 m,降雨历时为径流小区初始产流后 30 min,采样频率为 1 次/min。集流桶收集径流量,根据水位计算每分钟径流量;然后将集流桶内水样充分搅匀,采集 200 ml 水样 1 瓶,水样经 0.45 μm 滤膜过滤后,泥沙样品置入 105℃烘箱内烘干至恒重,采用重量法测定径流样品内泥沙含量。每场降雨间隔 48 h,为确保试验准确性,降雨试验在同种条件下进行 3 次重复。数据统计分析采用 SPSS 16.0 和 Excel 2010 完成,图形绘制采用 SigmaPlot 10.0 软件进行。

表 1 不同土地利用类型下土壤和植被状况

土地类型	坡度	容重/ (g·cm ⁻³)	覆盖 度/%	典型植被
裸地	8°~10°	1.29	5	冰草(<i>Agropyron cristatum</i>)、车前草(<i>Plantago asiatica</i>)
林地	20°~25°	1.22	78	刺槐(<i>Robinia pseudoacacia</i>)、冰草、节节草(<i>Equisetum ramosissimum</i>)
草地	18°~21°	1.25	52	冰草、白蒿(<i>Herba Artemisiae Sieversianae</i>)
撂荒地	3°~5°	1.31	31	紫花苜蓿(<i>Medicago sativa</i>)、车前草

3 结果与分析

3.1 不同土地利用方式下的产流过程

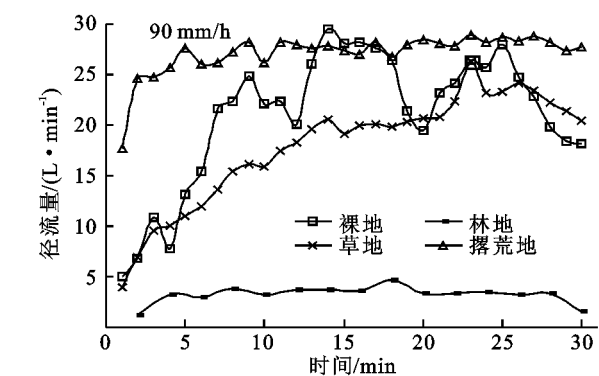
随着降雨历时增加,4 种土地类型的坡面径流量变化差异显著(图 1)。90 mm/h 雨强条件下,林地径流量最少,大约维持 4 L/min 左右;撂荒地在产流 3 min 后趋于稳定,维持在 26~28 L/min,约为林地径流量的 7 倍;裸地在降雨产流 14 min 时,径流量达到峰值 29.52 L/min,随后呈现波动下降的趋势。而草地径流峰值出现时间相对滞后,在产流 23 min 时,达到峰值 26.28 L/min,随后波动降低。120 mm/h 雨强条件下,4 种土地利用类型前半段径流量呈现相似的变化趋势。而林地后半段产流 22 min 时,产流量骤然下降,主要是由于坡地出口处枯枝落叶对水流的阻挡,打破了产流稳定^[8-9]。其他 3 种土地利用类型随着产流时间增加,径流量逐渐趋于稳定,降雨后期阶段,坡面产流量趋于降低。

如图 1 所示,植被覆盖度越小,单位时间内降落到坡面雨滴数量增加,则径流量和径流速度增加,从而导致坡面产流量增大。当植被覆盖度变大时,植被叶冠层能够阻挡大部分的雨滴动能,延长水分入渗时间,降低产流量^[10]。通过试验结果和上述分析,4 种土地利用类型产流量顺序为:撂荒地>裸地>草地>林地。

3.2 不同土地利用方式下的产沙过程

由图 2 可以看出,4 种土地利用类型产沙过程变化差异显著。在 90,120 mm/h 雨强条件下,林地产沙过程较为平稳,裸地产沙波动最大。裸地输沙率为 45.77~252.94 g/min,可能由于裸地植被覆盖度较小(仅 5%),雨滴溅蚀动能对坡面持续打击增强,导致坡面更多的土壤颗粒分散,为后期径流携带、搬运提供充足的物质来源;径流首先选择搬运细颗粒;随着降雨时间增加,产流后期雨滴主要剥离土壤大团聚体,而造成产沙量骤然增加,产沙量波动幅度也增

大^[11]。两种雨强条件下,撂荒地、草地和林地平均输沙率分别为 35.04~42.09,12.65~24.08,0.79~3.58



g/min。通过试验结果测算,4 种土地利用类型产沙量顺序为:裸地>撂荒地>草地>林地。

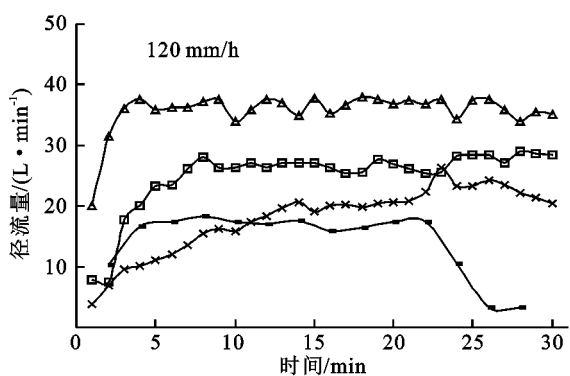
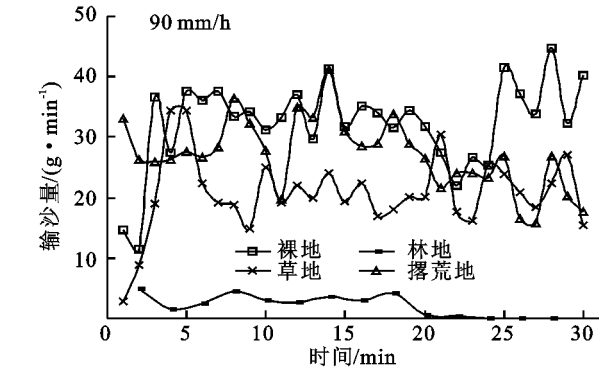


图 1 两种雨强下不同土地利用方式降雨产流过程

两种雨强条件下,不同土地利用类型坡面产沙量随径流过程表现出差异性,原因主要有两个方面:(1) 在产流初期,坡面表层较为松散,土壤抗蚀能力较小,径流比较容易对其进行搬运和侵蚀。在 120 mm/h 雨强条件下,降雨动能对土壤团聚体的击溅能力显著增加,同时为径流携带更多的泥沙颗粒流出坡面提供了可能性。因此,在两种雨强条件,下产流初期泥沙均出现急剧上升现象,且雨强越大,侵蚀泥沙量达到峰值时间越短,峰值泥沙量相应越大^[12];(2) 随着降雨过程的进行,一方面,松散的土壤表层颗粒逐渐减少,在一定程度上阻碍了土壤颗粒随径流流失的速度,径流在坡面流动中粒径和质量相对较大的土壤颗粒出现沉



积^[13],导致后期输沙率出现下降,泥沙迁移量逐渐减少。由图 2 可知,草地和林地表现最为明显,由于草地和林地下枯枝落叶层对泥沙输出具有明显拦截作用^[14]。而撂荒地具有耕作历史,疏松的表层土壤较多,所以产流后半期输沙率呈现波动变化趋势。裸地植被覆盖度较小,溅蚀作用较为剧烈,后期输沙过程仍比较强烈;另一方面,降雨对坡面侵蚀作用逐渐从溅蚀转为薄层水流冲刷,由于水流冲刷可以对坡面土壤颗粒产生迁移和沉积作用,正是由于对泥沙颗粒的再分配,减小了泥沙输出坡面的机会。同时,溅蚀作用破坏了表层土壤颗粒结构,造成了土壤结皮,阻碍坡面土壤侵蚀强度继续发展^[14-15],因而径流含沙量逐渐降低。

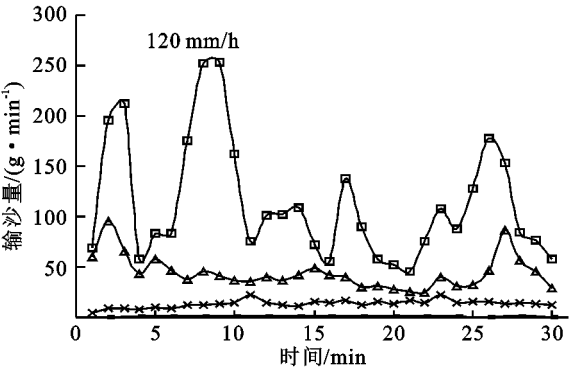


图 2 两种雨强下不同土地利用方式降雨产沙过程

3.3 累计产流量与产沙量变化特征

对裸地、撂荒地、草地、林地 4 种土地利用方式下坡面累积产流量和产沙量进行分析,结果表明:累积径流量和累积产沙量随产流时间呈线性变化趋势,关系为: $Y=ax+b$,式中 a 为径流(产沙)系数,均表现为撂荒地>裸地>草地>林地,而且降雨强度越大, a 越大。

累积产流量和累积产沙量与产流历时均呈线性规律变化($Y=ax+b$),而且雨强越大,模型拟合效果越好。造成该现象可能是雨强较小时,坡面产流、泥沙侵蚀冲刷、雨滴溅蚀作用影响因子较少,产流输出

和泥沙迁移—沉积叠加效果不显著^[16];当雨强为 120 mm/h 时,坡面径流在短时间内来不及进行土壤下渗,另外坡面粗糙度及微地形改变对大径流阻挡不明显,而且径流动能携带侵蚀泥沙迁移。另外,径流沿程含沙变化、土壤临界抗剪强度、降雨与径流分离能力等因素在大雨强条件下表现弱化,因此累积产流量和累积产沙量随产流历时的回归方程拟合度较高。

通过累积产沙量与产流历时拟合(表 2),坡面累积产沙量随产流历时的增加呈线性规律变化,与坡面累积径流量的变化趋势一致,说明径流量对产沙过程有着决定性影响,进一步验证了径流是坡面土

壤颗粒迁移的主要动力^[3-4,17]。草地和林地雨强 90 mm/h 的情况下,累计产流量(Y)、累计产沙量(A)与产流时刻(T)呈现显著相关($p<0.05$),而林地在雨强 120 mm/h 的情况下,累计产流量(Y)、累计产沙量(A)与产流时刻(T)呈现显著相关($p<0.05$),其余土地类型均呈现极显著相关($p<0.01$),随着植被

覆盖度增大,林冠截留作用显著增强,能够显著减弱雨滴动能;而且,林地下层草本植被种类增多,并且地表出现少量的枯枝落叶,这些对降雨和泥沙的存储和拦截起到巨大的作用,今后黄土高原退耕还林(草)过程中应当充分将林地与草地保水拦沙能力强应用到植被建设中。

表 2 坡面累积产沙量和累积产流量与产流时间回归模型

雨强/ (mm · h ⁻¹)	土地利用 类型	累积产流量		累积产沙量	
		回归模型	R^2	回归模型	R^2
90	裸地	$Y=23.324T-66.59$	0.995**	$A=33.053T-30.229$	0.985**
	撂荒地	$Y=27.614T-18.81$	0.984**	$A=28.141T+10.71$	0.989**
	草地	$Y=19.162T-60.52$	0.982*	$A=14.304T-31.348$	0.986*
	林地	$Y=1.767T-2.5778$	0.998*	$A=0.444T-0.145$	0.980*
120	裸地	$Y=28.256T-50.259$	0.998**	$A=109.75T+208.34$	0.988**
	撂荒地	$Y=36.556T-21.656$	0.997**	$A=39.842T+110.65$	0.993**
	草地	$Y=26.804T-117.39$	0.998**	$A=21.201T-58.661$	0.998**
	林地	$Y=7.341T+5.677$	0.985*	$A=1.344T+2.358$	0.982*

注: * 表示在 $p<0.05$ 水平下显著, ** 表示在 $p<0.01$ 水平下显著。

3.4 累积产沙量对累积径流量响应特征

虽然坡面泥沙颗粒的迁移受到径流特性、土壤类型、坡面特征、降雨强度等诸多因素的影响^[3-4,9],但径流仍是坡面土壤颗粒迁移主要的动力因素。对裸地、撂荒地、草地、林地坡面累积径流量和累积产沙量相关性分析发现(图 3),两者呈现幂函数关系: $Y=ax^b$ 。

由图 3 可知,两种雨强条件下,累积产沙量均随累积产流量的增加而增加。随着雨强增大,累积产沙量对累积径流量响应的递增速率显著增大。雨强 90 mm/h 条件下,裸地、撂荒地、草地和林地累积产沙量均与累积产流量呈极显著相关关系, R^2 分别为

0.991 2,0.995 8,0.998 9,0.995 7;雨强 120 mm/h 条件下, R^2 分别为 0.973 4,0.995 2,0.995 1,0.963 5,当降雨强度小(90 mm/h)时,累积产沙量均与累积产流量相关性较高。同一产流时段内,随着雨强变大,累积泥沙量呈现相应增大趋势,主要由于大雨强条件下单位时间内坡面单位面积上雨滴量增多,雨滴击溅总动能增大,坡面土壤颗粒的溅蚀分散量增多^[12];另一方面坡面径流系数变大,坡面土壤侵蚀程度进一步加剧,增强了径流搬运大土壤颗粒的能力^[18],因此随降雨强度增大,土壤侵蚀程度加剧,单位时间内泥沙流失量显著增多,累积产沙量明显变大。

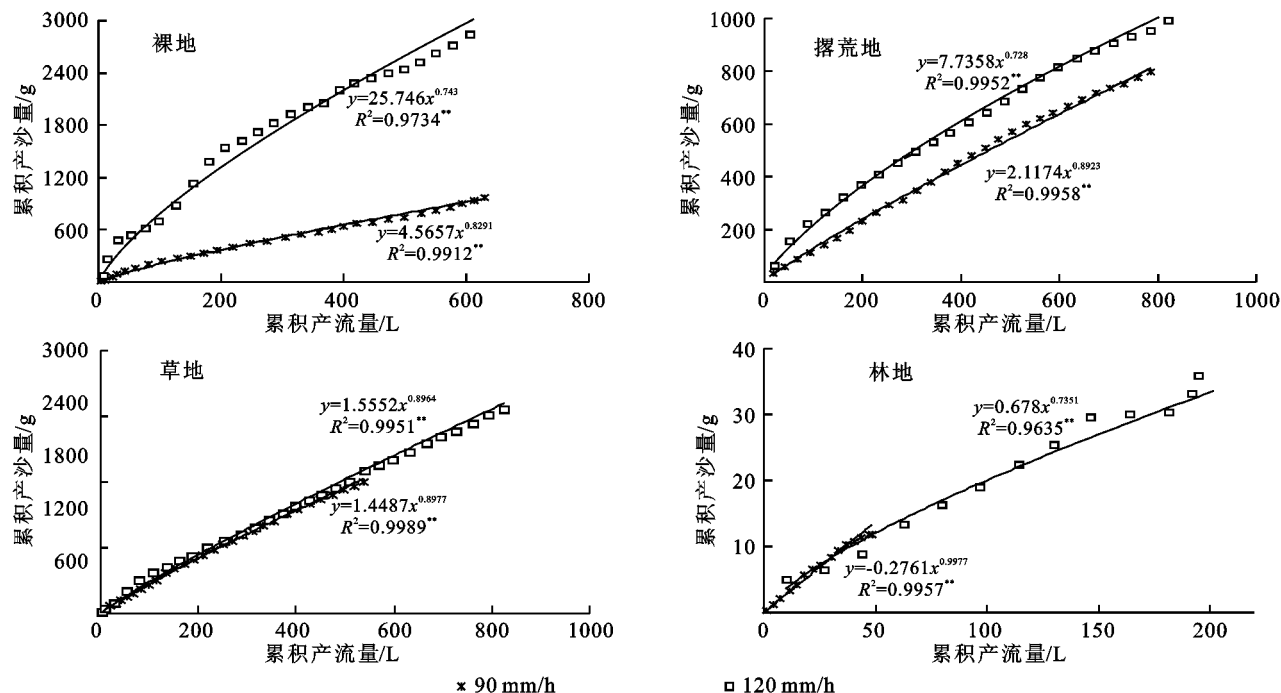


图 3 不同土地利用类型累积产流量和累积产沙量相关性分析

4 结论

(1) 4种土地利用类型在 90, 120 mm/h 雨强条件下, 裸地、撂荒地、草地和林地产流量顺序为: 撂荒地 > 裸地 > 草地 > 林地; 平均输沙率分别为 45.77~252.94, 35.04~42.09, 12.65~24.08, 0.79~3.58 g/min, 产沙量顺序为: 裸地 > 撂荒地 > 草地 > 林地, 说明坡耕地退耕还林(草)是降低土壤侵蚀的有效途径。

(2) 4种土地利用方式下, 累积径流量和累积产沙量随产流时间呈线性增加趋势, 关系为 $Y=ax+b$; 径流(产沙)系数均表现为撂荒地 > 裸地 > 草地 > 林地; 坡面累积径流量和累积产沙量呈现幂函数关系: $Y=ax^b$ 。随着雨强增大, 累积产沙量对累积径流量响应的递增速率显著增大。在相同降雨历时内, 同种土地类型条件下, 小雨强的累积产沙量明显低于大雨强的累积产沙量。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Shen Z, Chen L, Hong Q, et al. Assessment of nitrogen and phosphorus loads and causal factors from different land use and soil types in the Three Gorges Reservoir Area [J]. Science of the Total Environment, 2013, 454: 383-392.
- [3] 傅涛, 倪九派, 魏朝富, 等. 不同雨强和坡度条件下紫色土养分流失规律研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(1): 71-74.
- [4] 李婧, 李占斌, 李鹏, 等. 模拟降雨条件下植被格局对径流总磷流失特征的影响分析[J]. 水土保持学报, 2010, 24(4): 27-30.
- [5] 郭新送, 宋付朋, 高杨, 等. 模拟降雨对3种类型土壤氮、磷素空间分布及其颗粒组成的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(6): 41-45.
- [6] 胡利平, 姚延锋, 裴古娥, 等. 天水地区近50a气温与降水变化特征[J]. 地理科学进展, 2009, 28(4): 651-656.
- [7] 陈磊. 黄土区水土保持治理下水土流失与非点源污染耦合研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2011.
- [8] 高敏, 牛青霞, 王茹, 等. 人工模拟降雨条件下紫色土陡坡地侵蚀泥沙变化特征研究[J]. 水土保持学报, 2011, 25(2): 19-25.
- [9] 张旭昇, 薛天柱, 马灿, 等. 雨强和植被覆盖度对典型坡面产流产沙的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(6): 66-70.
- [10] 余新晓, 张晓明, 武思宏, 等. 黄土区林草植被与降水对坡面径流和侵蚀产沙的影响[J]. 山地学报, 2006, 24(1): 19-26.
- [11] 张光辉. 坡面水蚀过程水动力学研究进展[J]. 水科学进展, 2001, 12(3): 395-402.
- [12] 魏霞, 李勋贵, 李占斌, 等. 黄土高原坡沟系统侵蚀泥沙来源模拟试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 91-96.
- [13] 弥智娟, 穆兴民, 赵广举. 黄土高原水蚀风蚀交错区小流域泥沙粒径的分形分析[J]. 水土保持研究, 2014, 21(1): 12-17.
- [14] 杨春霞, 肖培青, 甄斌, 等. 野外不同被覆坡面产流产沙特征[J]. 水土保持学报, 2012, 26(4): 28-36.
- [15] 高丽倩, 赵允格, 秦宁强, 等. 黄土丘陵区生物结皮对土壤可蚀性的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(1): 105-112.
- [16] 于国强, 李占斌, 李鹏, 等. 不同植被类型的坡面径流侵蚀产沙试验研究[J]. 水科学进展, 2010, 25(5): 593-599.
- [17] 王瑄, 徐璐, 陈雯静, 等. 天然降雨条件下裸坡产沙量的逐步回归分析[J]. 水土保持研究, 2012, 19(1): 117-124.
- [18] 潘成忠, 上官周平. 不同坡度草地含沙水流水力学特性及其拦沙机理[J]. 水科学进展, 2007, 18(4): 490-495.