

不同下垫面径流小区次降雨对产流产沙的影响

寇馨月^{1,2}, 黄俊^{1,2}, 姜学兵^{1,2}, 向家平^{1,2}, 金平伟^{1,2}, 王思伟^{1,2}

(1. 珠江水利委员会 珠江流域水土保持监测中心站, 广东 广州 510611;

2. 珠江水利委员会 珠江水利科学研究院, 广东 广州 510611)

摘要: [目的] 揭示南方红壤区人工径流小区次降雨对径流泥沙作用规律, 为区域水土保持工程实践与基础理论研究提供参考。[方法] 基于云南摩布小流域 3 种下垫面(林地、农地、裸地)人工径流小区 2013—2015 年自然降雨观测资料, 采用 M-K 趋势检验、灰色相关分析及双累积曲线等方法研究了次降雨量、径流量、泥沙量和入渗率的变化趋势及相关关系, 以及降雨因子对径流泥沙的影响。[结果] (1) 2013—2015 年摩布径流小区月降雨均呈先增加后减少的波动性变化趋势, 3 a 降雨量无显著性变化趋势。(2) 相同降雨量各下垫面径流小区产流差异显著($p < 0.05$), 其中林地最小, 农地次之, 裸地最大; 3 种下垫面次降雨径流深增长速率大小规律与此相同。(3) 次降雨产沙量与降雨量、径流量均存在密切相关关系, 相关系数分别为 0.67~0.82, 0.69~0.85。径流小区产沙能力随雨强增大而增强。相同雨量下, 林地产沙能力最小, 而裸地累积产沙量增速最大。(4) 3 个径流小区的入渗率均随降雨量和雨强增大而增大, 其中林地入渗率最大, 平均入渗率为 94.03%; 裸地入渗率最小, 平均入渗率为 86.28%。[结论] 与农地和裸地相比, 林地不同程度提高了土壤入渗性能, 降低了产流量和产沙量。

关键词: 径流小区; 径流泥沙; 入渗率; 下垫面

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2017)02-0027-05

中图分类号: S157.1, S714.7

文献参数: 寇馨月, 黄俊, 姜学兵, 等. 不同下垫面径流小区次降雨对产流产沙的影响[J]. 水土保持通报, 2017, 37(2): 27-31. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.02.004; Kou Xinyue, Huang Jun, Jiang Xuebing, et al. Effects of Rainfall on Runoff and Sediment Under Different Underlying Surfaces of Runoff Plots[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(2): 27-31. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.02.004

Effects of Rainfall on Runoff and Sediment Under Different Underlying Surfaces of Runoff Plots

KOU Xinyue^{1,2}, HUANG Jun^{1,2}, JIANG Xuebing^{1,2}, XIANG Jiaping^{1,2}, JIN Pingwei^{1,2}, WANG Siwei^{1,2}

(1. *Soil and Water Conservation Monitoring Center of Pearl River Basin,*

Pearl River Water Resources Commission of the Ministry of Water Resources,

Guangzhou, Guangdong 510611, China; 2. Pearl River Hydraulic Research Institute, Pearl River

Water Resources Commission of the Ministry of Water Resources, Guangzhou, Guangdong 510611, China)

Abstract: [Objective] Effects of rainfall on runoff and sediment in red soil region of Southern China were studied in runoff plots, to provide references for soil and water conservation engineering practice and fundamental research. [Methods] Based on three underlying surfaces (forest, agricultural land, bare land) of runoff plots in Mobu watershed of Yunnan Province, chrono-changes of rainfall, runoff, sediment and infiltration rate were observed from 2013 to 2015. Their relationships were analyzed by means of Mann-Kendall, grey correlation analysis and double cumulative curve, and so on. Meanwhile, effects of rainfall amount on runoff and sediment were studied. [Results] (1) The monthly rainfall during a year showed a fluctuated trend; firstly increased, and then decreased. The rainfall had no significant change among the three years. (2) Under same level of rainfall amount, significant difference in runoff among the three underlying surfac-runoff plots($p < 0.05$), they ranked as: forest > agricultural land > bare land. For runoff depth, it had the

收稿日期: 2016-06-21

修回日期: 2016-08-03

资助项目: 水利部黄土高原水土流失过程与控制重点实验室开放基金项目“红壤区小流域水沙输移规律研究”(2016006); 广东省水利科技创新项目(2009-50)

第一作者: 寇馨月(1990—), 女(汉族), 辽宁省沈阳市人, 硕士, 工程师, 主要从事水土保持研究。E-mail: yykou@126.com。

same rank. (3) Sediment yield had a strong correlation with rainfall and runoff. The correlative coefficients were 0.67~0.82 and 0.69~0.85 respectively. The sediment yield increased with the increase of rainfall intensity. Under similar rainfall scenario, forest had the minimum sediment, while bare land had the largest one. (4) The infiltration rate increased with the growth of rainfall and rainfall intensity in all three runoff plots. The infiltration rate was the biggest in forest with an average infiltration rate of 94.03%; the infiltration rate was the smallest in bare land, its infiltration rate was 86.28%. [Conclusion] As compared with agricultural land and bare land, forest plot increased soil infiltration capacity and reduced the runoff and sediment yield to some extent.

Keywords: runoff plots; runoff and sediment; infiltration rate; underlying surface

降雨是坡面水土流失的源动力,是影响流域产流产沙的主要因素^[1-2]。研究降雨变化特征以及其对径流泥沙的影响作用,是水土保持工程实践的重要依据;同时也是应对气候变化对流域水文环境、水文过程、水量平衡以及流域生态系统影响的基础^[3-7]。研究水土保持措施效果可为水土保持规划、水土流失定量预报等提供依据。不同区域采用的水土保持措施不同,探索区域治理效果最优的水土保持措施是学者着重关注的重点。下垫面不同水保措施对降雨产流及产沙具有明显的影响作用,其水土保持效果十分显著^[8-11]。符素华等^[12]在北京官厅水库研究结果表明,下垫面不同水土保持措施具有显著的水土保持效应,显著降低了多年平均径流泥沙量。土地利用方式作为下垫面条件的一种具体表现,其变化对降雨产流产沙量具有重要影响作用^[13]。基于燕沟流域研究结果表明,灌草地保持水土、降低土壤侵蚀效果好于荒草地及裸地^[14],因此水土保持工程实践中要充分考虑不同措施间的搭配。姜娜等^[15]在黄土高原六道沟小流域的研究也得出类似研究结论,认为草灌措施保持水土的效果明显高于坡耕地。但也有研究表明水土保持的耕作措施与工程措施相结合才能达到最好的水土保持效果^[16]。有关西北黄土区及东北黑土区不同下垫面水土保持措施下降雨产流产沙特征研究成果较为丰富^[17-21],一方面丰富了水土保持基础研究理

论,另一方面为水土保持工程实践提供了理论支撑,但涉及到南方红壤区相关研究成果仍相对有限。本研究基于云南省摩布小流域野外径流小区 2013—2015 年观测资料,探讨不同下垫面降雨特征对径流、泥沙影响作用及其相互关系,分析不同下垫面措施水土保持作用效果,以期为该区域水土流失治理提供参考。

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区概况

摩布小流域位于云南省宣威市宝山镇境内,属南温带高原季风气候,多年平均降雨量 988 mm。土壤类型主要为红壤,土壤田间持水量及饱和含水量分别为 26.8%~28.3%和 41.7%~43.1%,凋萎系数为 15%~17%;粉粒(0.002~0.02 mm)含量为 26%~28%,黏粒(<0.002 mm)含量为 23%~27%。小流域植被类型主要是乔灌混交,以云南松(*Pinus yunnanensis*)、冬瓜(*Benincasa hispida*)、马桑(*Coriaria nepalensis*)、火刺木(*Pyracantha koidzumii*)、火绒草(*Leontopodium leontopodiodes*)、锈叶杜鹃(*Rhododendron siderophyllum*)、大车前(*Plantago major*)等为主。摩布径流小区建立于 2003 年,包含了 3 个标准径流小区(20 m×5 m),各小区坡度及土层厚度均为 20°和 200 cm,具体参数详见表 1。

表 1 径流小区参数

径流小区	土地利用	水土保持措施	土壤类型	植被	林下植被	盖度/%	株距×行距
1	林地	人工乔木林	红壤	圆柏	鹧鸪草	30	
2	农地	轮作	红壤	马铃薯、莽		15	30 cm×30 cm
3	裸地		红壤			0	

注:“地表植被盖度”指径流小区植被的枝叶、冠层垂直于地面的投影面积占小区总面积的比例,为观测期内的平均值。圆柏(*Sabina chinensis*),鹧鸪草(*Eriachne pallenscens*),马铃薯(*Solanum tuberosum*),莽(*Fagopyrum esculentum*)。

1.2 材料与方法

依托于水利部发布的《全国水土流失动态监测与公告项目管理暂行办法》(试行)(办水保[2014]257号),基于摩布小流域的 3 个径流小区开展 2013—2015 年的

自然降雨观测试验。采用遥测雨量器观测降雨量及降雨过程数据。地表植被盖度参照《径流小区和小流域水土保持监测手册》,通过照相法和目估法确定。径流量通过集流池和分流池水位计算得到,泥沙量通

过人工取样烘干获得。入渗率通过降雨量和径流量的差值计算得到^[22-24]。观测数据均为自然降雨事件,通过初步筛选,本试验共收集到3 a降雨数据和103组(51次降雨事件×3个径流小区)引起产流的降雨数据,使用Excel软件进行数据处理,Origin 9.0绘图。

引起产流的自然降雨事件是本文的主要研究对象。采用Mann-Kendall趋势性检验法^[25]分析年降雨的趋势性变化特征;通过双累积曲线方法^[26]探讨次降雨对摩布径流小区产流产沙影响作用及其定量关系;基于灰色关联度分析法^[27-28]阐明次降雨产沙量与降雨量和径流量的相关性;利用SPSS软件研究相同雨强下各小区产流产沙能力差异的显著性^[17]及采用T检验方法分析相同径流小区不同雨强下入渗率变化的显著性^[29]。

2 结果与分析

2.1 研究期降雨特征分析

图1是摩布径流小区2013—2015年自然降雨和产流降雨年内分布趋势变化特征。从图1可看出,3 a降雨整体均呈增加—减少的波动变化趋势,其中2013年最大月降雨量出现在8月,为144.5 mm;7月出现2014年最大月降雨量,占全年总雨量的26.11%;2015年最大月降雨量为230.5 mm。同时,Mann-Kendall趋势性检验分析结果表明,摩布小区3 a降雨量变化趋势不显著($p>0.05$)。引起产流的降雨集中在5—10月汛期,占3 a降雨总量的62.15%,其中3 a研究期内6月的产流降雨总量最大为398.50 mm。因此,汛期降雨是引起摩布小区产流产沙的主要原因。

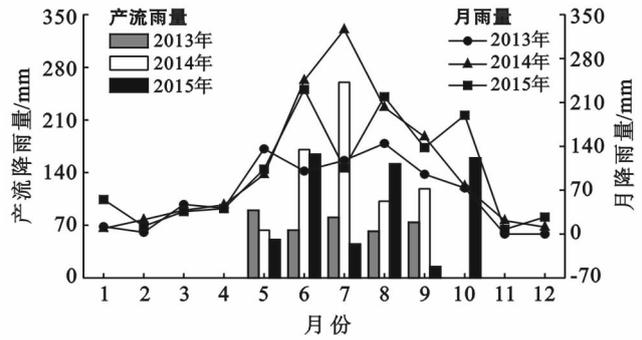


图1 降雨量年内分布

2.2 次降雨与产流量关系

依据气象学中的降雨强度等级划分,将降雨分为4个等级:小雨(<10.00 mm/d)、中雨($10.00\sim24.9$ mm/d)、大雨($25.00\sim49.90$ mm/d)、暴雨(>50.00 mm/d)。分析结果表明该地区引起产流的降雨为中雨、大雨和暴雨,而小雨未能引起研究区坡面产流,这与部分已有研究成果一致^[30-31]。各雨强等级下降雨和径流双累积曲线如图2所示。不论雨强等级如何,相同累积降雨量下林地累积产流量最小,农地次之,裸地最大。使用SPSS软件对各降雨等级下累积曲线进行差异性分析,结果表明相同降雨等级下林地、农地、裸地的产流能力差异性显著($p<0.05$)。坡面径流是引起坡面水土流失的主要动力,受降雨和下垫面等多种因素相互作用的影响。林地种植圆柏,树冠对降雨具有一定的截留和缓冲作用,林下覆盖的杂草也降低雨滴击溅能力,阻碍汇流。农地种植农作物,虽在空间上不能多层缓冲雨滴击溅,但地表覆盖的农作物阻挡降雨对下垫面的直接侵蚀作用,因此林地和农地的径流深低于裸地。

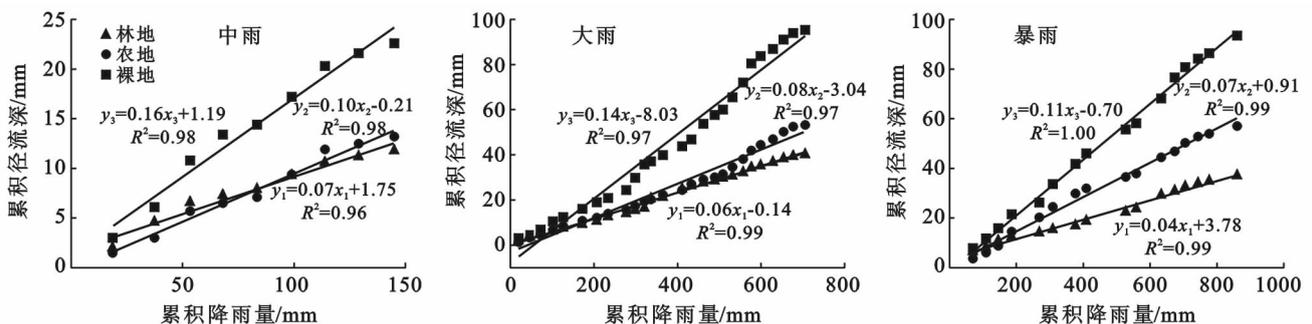


图2 不同雨强下降雨—径流深双累积曲线

由图2中双累积曲线拟合方程可以看出,不同下垫面径流深增长速率依次为:林地 $<$ 农地 $<$ 裸地,说明林地较之农地、裸地具有最好的拦蓄降雨功能。地表植被的覆盖有效的削弱了降雨对地面的直接冲刷,且植被根系的生长一定程度增加了土壤孔隙度,提高

土壤入渗率,降低地表径流。因此,空间多层次的林分结构和地表植被覆盖对减少流域径流的产生具有显著效果。此外,相同下垫面条件下降雨强度越大,径流深增长速率越小。径流深变化除受到降雨影响外,还受到土壤入渗能力的影响。降雨强度的增加,

土壤的入渗率增大(表 3),使得入渗量增加而径流量降低。

2.3 次降雨与产沙量关系

表 2 为不同径流小区各降雨等级下产沙量与降雨量和径流量的灰色关联度系数。暴雨下,林地产沙量与降雨量、径流深的灰色相关系数最高,分别为 0.82,0.85。不同径流小区的产沙量与降雨、径流深均有很好的相关性,相关系数分别为 0.67~0.82,0.69~0.85。3 个径流小区的“产沙量—径流深”灰色相关系数均大于“产沙量—降雨量”的灰色相关系数,表明地表径流是土壤侵蚀的源动力,径流对产沙量的影响作用较降雨更大。

图 3 为不同下垫面径流小区不同雨强下累积降雨量和累积泥沙量双累积曲线及其拟合方程。拟合方程斜率表示径流小区累积降雨量对产沙量的影响,相同降雨条件下,裸地的产沙能力(最大)分别是林地的 26 倍(中雨)、79 倍(大雨)、93 倍(暴雨),是农地的 9.5 倍(中雨)、16 倍(大雨)、7.5 倍(暴雨),林地的产

沙能力最小。对各雨强下不同小区产沙能力显著性分析可知,林地、农地和裸地之间产沙能力差异性显著($p < 0.05$)。由图 3 中双累积曲线可以看出,雨强增加,径流小区产沙能力也随之增大,其中裸地累积产沙量增速最为显著,农地次之,林地最小。如前文所述,林地产流量最小,因此其产沙量也相对最小。此外,林地、农地有植被覆盖,植被根系具有固土作用,从源头上减少了泥沙量的产生,泥沙来源远小于裸地。多年降雨侵蚀破坏了裸地表土物理结构并降低了土壤的抗蚀性,导致其产沙量随径流深增加而迅速增加。

表 2 不同雨强等级下产沙量与降雨量、径流深的灰色相关分析

径流小区	降雨量			径流深		
	中雨	大雨	暴雨	中雨	大雨	暴雨
林地	0.73	0.73	0.82	0.78	0.79	0.85
农地	0.74	0.67	0.80	0.78	0.69	0.83
裸地	0.70	0.68	0.73	0.75	0.70	0.75

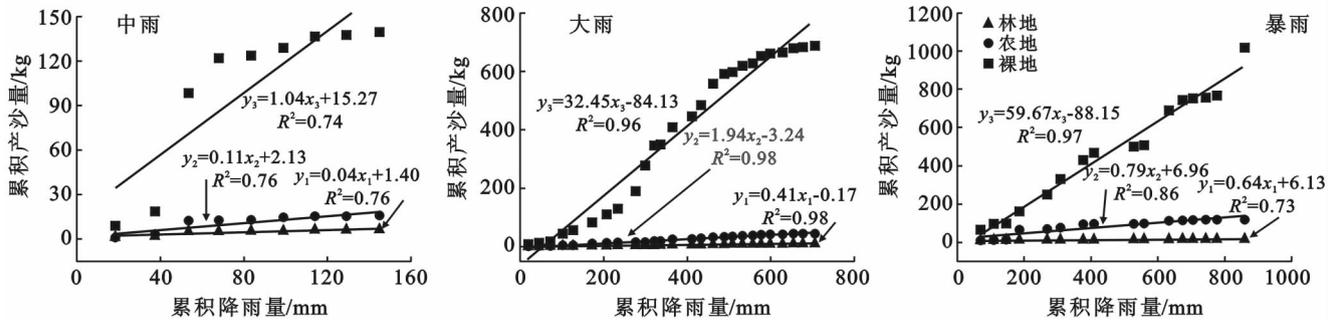


图 3 不同雨强下降雨量—产沙量双累积曲线

2.4 降雨量对入渗率影响

图 4 为不同下垫面土壤入渗率随次降雨量变化散点图。总体而言,随次降雨量增加土壤入渗率呈现先增加而后逐渐趋于稳定的变化趋势;其中林地土壤入渗率最大,其次为农地,裸地入渗率最小。不同下垫面小区入渗率受土壤孔隙度、持水能力、土壤容重等因素影响,其中土壤孔隙是入渗水流的主要通道^[32]。当降雨量增加时,地表水深增加,地表水层静水压力相应增大,一定程度上增加了土壤入渗性能,因此入渗率随降雨量增加而增加。按照降雨等级统计 51 次产流降雨各区间的平均入渗率(表 3),可看出 3 个小区的入渗率均随雨强增大而增加,且增加趋势不显著。这表明降雨强度增加对土壤水分入渗具有促进作用。当降雨强度增大时,雨滴动能随之增大,雨滴打击对入渗水体产生的挤压力增加,这不仅可以加快入渗水流的运动速度,也可以使部分静止的毛管水参与入渗过程。

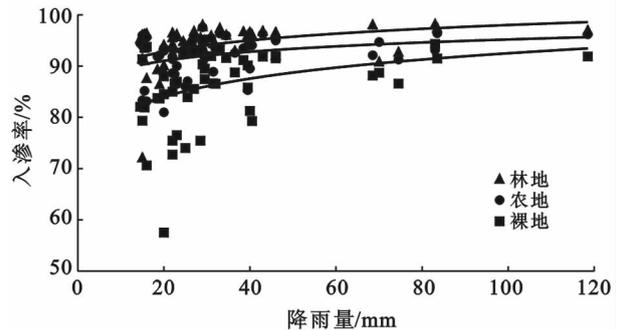


图 4 不同径流小区次降雨入渗率

表 3 不同降雨等级的平均入渗率

降雨等级	平均入渗率/%		
	林地	农地	裸地
中雨(10.00~24.9 mm/d)	92.10	90.87	84.45
大雨(25.00~49.90 mm/d)	93.78	91.97	85.54
暴雨(>50.00 mm/d)	95.53	92.93	88.51

3 结论

(1) 引起摩布小区产流的降雨类型为中雨、大雨和暴雨,集中在5—10月。Mann-Kendall分析表明,2013—2015年摩布小区年降雨量变化趋势不显著,呈先增加后减少的波动性变化。径流小区的入渗率随雨量和雨强的增加呈不显著的增大趋势,其中林地的入渗率最大,入渗率分别为92.10%(中雨),93.78%(大雨),95.53%(暴雨);裸地入渗率最小,各雨强下的入渗率均小于90%。

(2) 与降雨量相比,径流深对产沙量影响作用更大。中雨、大雨、暴雨雨强下,同一累积降雨量引起的累积产流量大小和径流深增长速率均表现为:林地<农地<裸地。相同径流小区径流深增长速率随雨强增大而减少。降雨对不同径流小区产沙量影响有明显不同,相同雨量下,林地小区产沙能力最小,不同小区产沙能力差异性显著($p < 0.05$);累积产沙量增速中裸地最为显著,农地次之,林地最小。

[参 考 文 献]

[1] 李鹏,李占斌,郑良勇,等.坡面径流侵蚀产沙动力机制比较研究[J].水土保持学报,2005,19(3):66-69.

[2] 张晶晶,王力.坡面产流产沙影响因素的灰色关联法分析[J].水土保持通报,2011,31(2):159-162.

[3] Piao Shilong, Ciais Philippe, Huang Yao, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China[J]. Nature, 2010,467(7311):43-51.

[4] 张晓明,余新晓,武思宏,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产沙的影响[J].北京林业大学学报,2008,29(6):115-122.

[5] Fu Bojie, Chen Liding, Ma Keming, et al. The relationships between landuse and soil conditions in the hilly area of the Loess Plateau in northern Shanxi, China[J]. Catena, 2000,39(1):69-78.

[6] Verstraeten G, van Rompaey A, Poeson J. Evaluating the impact of watershed management scenarios on changes in sediment delivery to rivers: The interactions between sediments and water[J]. Hydrobiology, 2003,494(2):153-158.

[7] Rai S C, Sharma E. Comparative assessment of runoff characteristics under different land use patterns within a Himalayan Watershed [J]. Hydrological Processes, 1998,53(2):2235-2248.

[8] 张守红,刘苏峡,莫兴国,等.降雨和水保措施对无定河流域径流和产沙量影响[J].北京林业大学学报,2010,32(4):161-168.

[9] BOOTH D B, KARR J R, Schauman S, et al. Reviving urban streams:Land use, hydrology, biology and hu-

man behavior[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2004,40(5):1351-1364.

[10] 宋晓猛,张建云,占车生,等.气候变化和人类活动对水文循环影响研究进展[J].水利学报,2013,44(7):779-790.

[11] 汪邦稳,肖胜生,张光辉,等.南方红壤区不同利用土地产流产沙特征试验研究[J].农业工程学报,2012,28(2):239-243.

[12] 符素华,刘宝元,路炳军,等.官厅水库上游水土保持措施的减水减沙效益[J].中国水土保持科学,2009,7(2):18-23.

[13] 陈月红,余新晓,谢崇宝.黄土高原吕二沟流域土地利用及降雨强度对径流泥沙影响初探[J].中国水土保持科学,2009,7(1):8-12.

[14] 刘栋,刘普灵,邓瑞芬,等.不同下垫面径流小区次降雨侵蚀特征相关分析[J].水土保持通报,2011,2(2):99-102.

[15] 姜娜,邵明安.黄土高原小流域不同坡地利用方式的水土流失特征[J].农业工程学报,2011,27(6):36-41.

[16] 陈伟,魏永霞,王存国,等.不同水土保持技术模式的坡耕地产流、产沙特征[J].水土保持学报,2011,25(6):27-30.

[17] 寇馨月,王玉杰,张晓明,等.黄土丘陵第Ⅲ副区典型流域水沙演变过程及其驱动因素分析[J].北京林业大学学报,2015,37(7):85-93.

[18] 李洪丽,韩兴,张志丹,等.东北黑土区野外模拟降雨条件下产流产沙研究[J].水土保持学报,2013,27(4):49-52.

[19] 张晓明,余新晓,武思宏,等.黄土丘陵沟壑区典型流域土地利用/土地覆被变化水文动态响应[J].生态学报,2007,27(2):414-423.

[20] 王盛萍,张志强,孙阁,等.黄土高原流域土地利用变化水文动态响应:以甘肃天水吕二沟流域为例[J].北京林业大学学报,2006,28(1):48-54.

[21] 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.

[22] 覃莉,刘凤仙,杨智.喀斯特地区不同坡度径流小区水土流失特征分析[J].中国水土保持,2015,8(08):63-65.

[23] 李月,周运超,白晓永,等.径流小区法监测水土流失的百年历程(1915—2014年)[J].中国水土保持,2014(12):63-66.

[24] 申震洲,刘普灵,谢永生,等.不同下垫面径流小区土壤水蚀特征试验研究[J].水土保持通报,2006,26(3):6-9.

[25] Lacombe G, McCartney M, Forkuor G. Drying climate in Ghana over the period 1960—2005: Evidence from the resampling-based Mann-Kendall test at local and regional levels[J]. Hydrological Sciences Journal, 2012, 57(8):1594-1609.

- mated from streamflow records[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 530: 281-290.
- [23] 顾洋作. 白银市林业发展的思考[J]. *甘肃林业科技*, 2000, 25(3): 61-64.
- [24] 路民生. 甘肃省退耕还林还草调查报告[J]. *甘肃农业*, 2002(9): 14-15.
- [25] 韩承鼎. 甘肃省白银市水土保持可持续发展探讨[J]. *亚热带水土保持*, 2011, 23(1): 39-41.
- [26] 王红霞, 王雪松, 王兵, 等. 甘肃省退耕还林工程生态效益评估[J]. *西北师范大学学报: 自然科学版*, 2015(3): 112-118.
- [27] 路炳军, 温美丽, 路文学. 黄土高原西部雨养农业区集雨水窖的主要类型及其效益分析: 以甘肃会宁为例[J]. *干旱区资源与环境*, 2004, 18(2): 71-75.
- [28] 高伟东. 甘肃会宁硝沟剖面全新世孢粉分析及环境变化[D]. 甘肃 兰州: 兰州大学, 2007.
- [29] 蒲金涌, 冯建英, 姚晓红, 等. 甘肃黄土高原土壤农业水分常数分布特征[J]. *干旱地区农业研究*, 2008, 26(3): 205-209.
- [30] 杨磊, 卫伟, 莫保儒, 等. 半干旱黄土丘陵区不同人工植被恢复土壤水分的相对亏缺[J]. *生态学报*, 2011, 31(11): 3060-3068.
- [31] 王永东, 徐新文, 雷加强, 等. 塔里木沙漠公路防护林带土壤水分动态研究[J]. *科学通报*, 2008(S2): 91-97.
- [32] 李玉山, 韩仕峰, 汪正华. 黄土高原土壤水分性质及其分区[J]. *中国科学院西北水土保持研究所集刊(土壤分水与土壤肥力研究专集)*, 1985(2): 1-17.
- [33] 张社红, 李军, 王学春, 等. 渭北旱塬苹果园地产量和深层土壤水分效应模拟[J]. *生态学报*. 2011, 31(13): 3767-3777.
- [34] Wang Shuai, Fu Bojie, Piao Shilong, et al. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes[J]. *Nature Geoscience*, 2015, 9(1): 38-41.
- [35] 王云强, 张兴昌, 从伟, 等. 黄土区不同土地利用方式坡面土壤含水率的空间变异性研究[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(12): 65-71.
- [36] 陈洪松, 王克林, 邵明安. 黄土区人工林草植被深层土壤干燥化研究进展[J]. *林业科学*, 2005, 41(4): 155-161.
- [37] 李玉山. 苜蓿生产力动态及其水分生态环境效应[J]. *土壤学报*, 2002, 39(3): 404-411.
- [38] 向伟, 林雪青, 张志强, 等. 黄土塬区土地利用变化对深剖面土壤水分的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2016, 34(4): 12-17.
- [39] 林雪青, 向伟, 李志, 等. 黄土塬区土地利用变化对硝态氮累积和淋溶的影响[J]. *环境科学研究*, 2015, 28(12): 1939-1946.
- [40] Huang Tianming, Pang Zhonghe. Groundwater recharge and dynamics in Northern China: Implications for sustainable utilization of groundwater[J]. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2013, 7: 369-372.
- [41] 曹裕, 居玛汗·卡斯木, 范鹏, 等. 陕西洛川旱塬苹果园地深层土壤水分和养分特征[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(2): 388-396.
- [42] Wang Yunqiang, Shao Mingan, Liu Zhipeng, et al. Characteristics of dried soil layers under apple orchards of different ages and their applications in soil water managements on the Loess Plateau of China[J]. *Pedosphere*, 2015, 25(4): 546-554.
- [43] 侯庆春, 韩蕊莲, 李宏平. 关于黄土丘陵典型地区植被建设中有关问题的研究(I): 土壤水分状况及植被建设区划[J]. *水土保持研究*, 2000, 7(2): 102-110.
- [44] 穆兴民, 徐学选, 等. 黄土高原人工林对区域深层土壤水环境的影响[J]. *土壤学报*, 2003, 40(2): 210-217.
- [45] 蒲金涌, 姚小英, 贾海源, 等. 甘肃陇西黄土高原旱作区土壤水分变化规律及有效利用程度研究[J]. *土壤通报*, 2005, 36(4): 483-486.

(上接第 31 页)

- [26] 冉大川, 刘斌. 双累积曲线计算水土保持减水减沙效益方法探讨[J]. *人民黄河*, 1996(6): 24-25.
- [27] 林和平, 刘丁慧, 鲍乃源. 灰色相关分析及其应用研究[J]. *吉林大学学报: 信息科学版*, 2007, 25(1): 84-90.
- [28] 赵阳, 余新晓. 黄土丘陵沟壑区典型流域气候和土地利用变化对径流泥沙产量的影响[J]. *北京林业大学学报*, 2013, 35(3): 39-45.
- [29] 申希平, 丁建生, 李娟生, 等. 在 SPSS 中利用均数和标准差做两独立样本 t 检验[J]. *现代预防医学*, 2007, 34(21): 4066-4067.
- [30] 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, 2(4): 7-13.
- [31] 周佩华, 豆葆璋, 孙清芳, 等. 降雨能量的试验研究初报[J]. *水土保持通报*, 1981, 1(1): 51-61.
- [32] 蔡进军, 李生宝, 蒋齐, 等. 宁南黄土丘陵区典型水保工程措施对土壤入渗性能的影响[J]. *水土保持通报*, 2010, 30(1): 22-26.