

鲁中南山丘区坡面产流产沙与降雨关系

程甜甜, 张兴刚, 李亦然, 李小倩, 张永涛

(山东农业大学林学院, 山东省土壤侵蚀与生态修复重点实验室, 泰山森林生态系统定位研究站, 山东 泰安 271018)

摘要: 为探求鲁中南山丘区坡面侵蚀规律, 选取山东省泰安市药乡小流域, 以4个坡面径流小区的降雨、径流、泥沙实测资料为基础, 探究不同措施下各小区产流产沙的差异性和导致产流的降雨量临界值, 并利用相关分析方法探究径流泥沙与降雨的相关关系。结果表明: (1) 导致径流产生的降雨量临界值表现为裸地<农地<草地, 草地临界降雨量分别比梯田种植、横坡种植、裸地高0.2、2.8、3.8 mm; (2) 在相同的降雨条件下, 各小区产流产沙均为裸地最大, 其中产流量约为农地的1.3~4.3倍, 约为草地的2.8倍; 产沙量约为农地的3.1~10.4倍, 约为草地的77.6倍; 产流开始时间以裸地最早, 草地最晚, 二者之间相差37 min, 结束时间正好相反; (3) 通过对不同降雨因子与产流产沙进行皮尔逊相关分析, 除降雨历时(D)外, 其它降雨因子均与产流、产沙量有较好相关性, 其中与降雨量(P)相关性最强。

关键词: 鲁中南山丘区; 径流小区; 产流临界雨量; 径流量; 产沙量

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)01-0012-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2017.01.003

The Relationship between Runoff and Sediment and Rainfall in the Hilly Area of Center Southern of Shandong Province

CHENG Tiantian, ZHANG Xinggang, LI Yiran, LI Xiaoqian, ZHANG Yongtao

(Forestry College of Shandong Agricultural University, Shandong Provincial Key Laboratory of Soil Erosion and Ecological Restoration, Taishan Forest Eco-station of State Forestry Administration, Tai'an, Shandong 271018)

Abstract: To master the law of slope erosion in the hilly area of center southern of Shandong province, this study took Yaoxiang small watershed in Tai'an as the research object, and explored the difference of runoff and sediment between different runoff plots with different measures and critical rainfall to cause runoff based on rainfall, runoff and sediment data of 4 runoff plots. The study also explored the relationship between runoff and sediment and rainfall using the correlation analysis method. The results were as follows: (1) The critical rainfall to cause runoff showed that bare land<farmland<grassland. The critical rainfall of grassland was 0.2 mm higher than that of the terrace, and 2.8 mm higher than that of the straight-plowing plots, and 3.8 mm higher than that of the bare land. (2) In the same rainfall condition, the bare land had the most runoff and sediment, which was about 1.3~4.3 times of the farmland, and about 2.8 times of the grassland. The sediment yield was about 3.1~10.4 times of the farmland, and about 77.6 times of the grassland. The start time of runoff of bare land was the earliest, the grassland was the latest, and the interval between them was 37 minutes, but the end time was just the opposite. (3) According to the Pearson correlation analysis between different rainfall factors and runoff and sediment, all factors had a good correlation with rainfall and runoff except D factor, and had the strongest correlation with P factor.

Keywords: hilly area of center southern Shandong Province; runoff plot; critical rainfall; runoff; sediment

中国作为世界上水土流失最为严重的国家之一^[1-2], 水蚀是其最主要的水土流失类型^[3]。在众多影响水蚀的因素中, 降雨径流是导致水蚀发生的必要条件, 而坡面尺度是径流产生与发展的基础地理单元^[4]。因此, 坡面尺度径流泥沙产生的规律及其影响因素成为众多学者研究的热点和重点, 其研究结果对研究区域水土流失的防治和水土保持措施的布设具

有一定的指导意义。

目前, 很多学者对我国不同地理区域坡面的产流产沙规律进行了研究, 并对其形成机制和影响因素进行了探讨。方海燕等^[5]在黄土丘陵沟壑区团山沟流域分析了不同坡面、降雨特征对产流的影响以及径流系数随坡面的变化, 得出了引起产流的主要雨型。张旭昇等^[6]在黄土高原祖厉河流域探究雨强和植被覆

盖度对典型坡面产流产沙的影响,发现产流量、产沙量与 15 min 雨强有着相同的增减趋势,植被自然恢复的撂荒地水土保持效益显著。彭娜等^[7]在中科院桃源农业生态试验站定位观测试验场研究不同土地利用类型下降雨的入渗、产流及对土壤水分分布的影响,得出红壤坡地的产流能力随着开垦年限延长逐步降低并达到稳定,降雨量是影响径流量的唯一主导因素,降雨对土壤水分的分布的影响受土壤初始含水量和下垫面的影响。总体来说,众学者的研究区域主要在黄土丘陵区 and 南方红壤地区,研究方向主要集中在降雨和下垫面条件对坡面产流产沙的影响,但是不同的降雨、下垫面条件使得径流泥沙产生的机制不同,而且不同区域坡面产流规律也不一样,因此,要想探究某一特定区域的产流特征必须针对其具体情况具体分析,不能单纯借鉴其他区域的规律。

北方土石山区石多土少,土层薄,汛期降雨集中且降雨量大,这使得该区极易发生水土流失和其它地质灾害^[8],鲁中南山丘区作为山东省水土流失最严重的地区,研究其水土流失规律迫在眉睫。但目前对于该区坡面产流产沙的研究还较少,因此本研究以北方土石山区鲁中南典型山丘区药乡小流域的坡面径流泥沙实测资料为基础,计算不同土地利用条件下产流的临界降雨量,对该区径流泥沙与降雨的相关性进行研究,以探求该区的坡面水土流失规律,为该区水土流失防治提供理论依据。

1 研究区概况

研究区位于山东省泰安市药乡小流域,地处北方土石山区鲁中南山丘区西北部,东经 117°09′26″,北纬 36°18′55″,所属一级流域为黄河流域。该区属暖温带大陆性亚湿润季风气候,多年平均气温为 18.5℃,≥10℃的活动积温 3 821℃,无霜期 196 d,多年平均降水量 727.9 mm,实测最大年降水量 1 303 mm(1964 年),最小年降水量 334.4 mm(1989 年),多年平均日照时数 2 648 h。土壤类型主要是棕壤、砂壤、部分为粘土,土层厚度变化较大,在主河道两岸的农业用地平均在 1 m 以上,山腰中部 30~50 cm,山坡上部不足 20 cm。主要植被类型包括落叶阔叶林、针叶林、经济林、农田植被以及次生灌丛和草丛植被。主要树种有板栗(*Castanea mollissima* BL.)、核桃(*Juglans regia* L.)、山楂(*Crataegus pinnatifida* Bge.)等;主要农作物有小麦(*Triticum aestivum* L.)、玉米(*Zea mays* L.)、地瓜(*Ipomoea batatas* (L.) Lam.)、花生(*Arachis hypogaea* Linn.)等;灌草植物主要有胡枝子(*Lespedeza bicolor* Turcz.)、绣线菊(*Spiraea salicifolia* L.)、狗尾草(*Setaria viridis* (L.) Beauv.)等。为达到蓄水保土的效果,常采用梯田、横坡起垄等工程措施。

2 研究方法

2.1 径流小区布设

在研究区布设有 4 个长 20 m,宽 5 m,面积为 100 m² 的标准径流小区,于 2010 年建设完成,各径流小区的基本概况如表 1 所示。

表 1 径流小区基本概况

小区 编号	小区特征					小区处理	
	坡度/(°)	水平坡长/m	小区宽度/m	面积/m ²	土壤类型	工程措施	生物措施
1	10	20	5	100	棕壤	横坡起垄	种植花生
2	15	20	5	100	棕壤	梯田	种植花生
3	15	20	5	100	棕壤	无	无
4	25	20	5	100	棕壤	无	人工牧草

2.2 降雨观测

在研究区配置有 3554WD 翻斗式自记雨量计,用于监测区域的降水过程,设置采样时间间隔为 5 min,每 15 d 采集一次降雨数据,计算次降雨、降雨过程、日降雨等。

2.3 径流泥沙观测

每次降雨产流后量取分流池和集流池中的径流深,并做记录,根据其底面积计算产生的径流量;然后采用人工搅拌法对池内水样进行搅拌,使泥沙和水充分混合均匀,搅拌完毕迅速用取样瓶进行取样,每个集流池和分流池分别取 3 个重复样品。野外采集的浑水样过滤后烘干,测定泥沙含量。本研究采用的降雨、径流、泥沙数据为 2013—2014 年间的监测数据。

2.4 产流临界降雨量

降雨量临界值对于衡量不同地表类型的差异

状况意义重大,采用周国逸等^[9]计算产流临界降雨量的方法:(1)将所有降雨按是否发生地表径流分开;(2)将发生产流的最小降雨量作为下限 r_1 (mm);(3)将未发生产流的最大降水量作为上限 r_2 (mm);(4)分别按发生和未发生产流两种情况,对处于(r_1, r_2)区域内的所有降水以降水的时间次序为自变量,以降雨量为因变量绘制图像;(5)分别按发生和未发生产流两种情况,求得降水量随降雨时间次序变化的回归方程,取这 2 个方程的平均值,即为发生产流的降水量临界值。

3 结果与分析

3.1 降雨特征

2013—2014 年降雨特征如表 2 所示。研究区 2013—2014 年累计降雨 138 场,2013 年降雨量为 1 099.9 mm,以 7 月份降雨最多,为 601.6 mm,占全

年降雨量的 54.7%，最大次降雨量为 102.5 mm；2014 年降雨量为 797.7 mm，降雨主要集中在 6—9 月，9 月份降雨最多，为 259.5 mm，占全年降雨量的 32.5%，7 月份次之，占全年降雨量的 28.2%，最大次降雨量为 99 mm。然而只有部分降雨会导致地表径流的产生，这部分降雨叫做侵蚀性降雨。根据 Wis-

chmeier^[10] 拟定的侵蚀性降雨标准，2013 年侵蚀性降雨共 21 场，降雨量为 982.2 mm，47.6% 的侵蚀性降雨发生在 7 月份，8 月份次之，占全部侵蚀性降雨的 19%。2014 年侵蚀性降雨共 18 场，降雨量 646.2 mm，1/3 的侵蚀性降雨发生在 9 月份，7 月份次之，占全部侵蚀性降雨的 27.8%。

表 2 2013—2014 年降雨特征

单位: mm

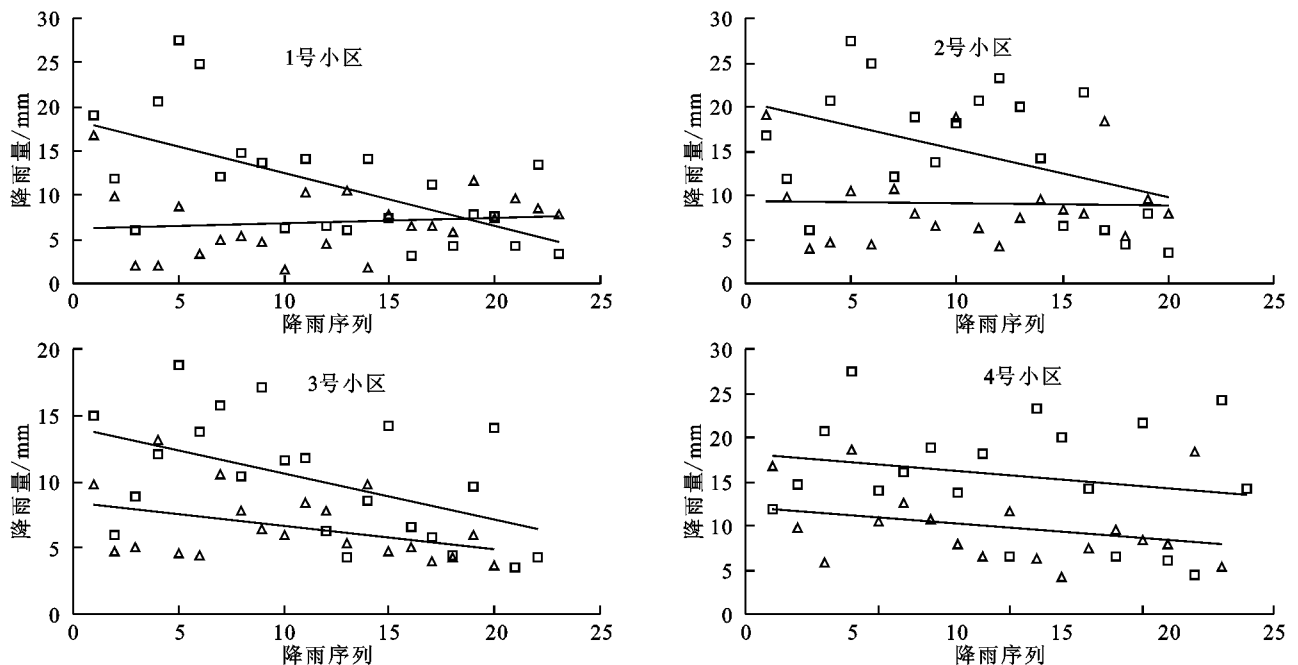
年份	年降雨量	最大月降雨量		最大次降雨量		侵蚀性降雨	
		降雨量	出现月份	降雨量	出现日期	场次	合计降雨
2013	1099.9	601.6	7	102.5	7-18—7-19	21	982.2
2014	797.7	259.5	9	99	9-2	18	646.2

3.2 产流的降雨量临界值

每次降雨后对集流池和分流池中是否有产流进行观察，据此将每场降雨按照是否产生地表径流分开。将 2013—2014 年所有降雨分开后，计算降雨量临界值，结果如图 1 所示。

由图 1 可知，1 号径流小区（横坡起垄种植花生）地表产流的降雨量临界值约为 12.3 mm，2 号径流小区（梯田种植花生）产流的降雨量临界值约为 14.9 mm，3 号径流小区（裸地）产流的降雨量临界值约为 11.3 mm，4 号径流小区（草地）产流的降雨量临界值约为 15.1 mm。草地地表产流的临界降雨值最大，裸地地

表产流的临界降雨值最小。随着降雨的进行，裸地最先产生地表径流，其次为耕地，最后为草地。在相同的降雨条件下，不同坡面径流小区产流的临界降雨量不同，这反映了不同利用方式下的土地对土壤侵蚀的抵抗能力及其减少径流的作用。草地产生地表径流的临界降雨量最大，说明草地蓄水保土的能力最强，因为草地的植被覆盖度大，当降雨产生时对降雨有较好的拦蓄作用，而且土壤结构良好，入渗速率较大，发达的根系很好地固结了土壤，降低了产流产沙量。而耕地虽然有一定的植被覆盖，但是会经过整地、松土除草等一系列的田间管理措施，使得表土疏松，土壤抗冲性差。



注：□发生产流的最小雨量；△未发生产流的最大雨量。

图 1 各小区观测期间发生产流的降雨临界值

该方法运用发生产流的最小雨量和未发生产流的最大雨量两个系列，能够通过较多的散点，获得一个较为清晰的产流临界降雨区间，比较客观地反映不同地面类型下的临界降雨量。以 1 号小区为例，2013—2014 年该小区未产流的最大降雨量为 18.1 mm，明显大于其产流降雨临界值，这主要是受到前

期降雨的影响。若前期无降雨，土壤越干燥，则导致径流产生的降雨量越大。前期降雨通过对土壤含水量的影响改变了土壤的入渗能力^[11]，进而影响径流产生的速率，使得不同地表类型的产流降雨临界值不同。也就是说，该方法综合考虑了前期降雨量和下垫面等因素，具有一定的实际意义。

3.3 不同措施小区的产流产沙特征

各径流小区 2013—2014 年产流产沙情况见表 3。2013 年裸地的产流量侵蚀量最大,其中产流量约为农地的 1.5~3.6 倍,约为草地的 3.6 倍;产沙量约为农地的 4.5~9 倍,约为草地的 57 倍。2014 年最大侵蚀量也出现在裸地,约为梯田的 48 倍,约为草地的 31 倍,其次为 1 号小区。综合 2 年的产流产沙,各小区产流产沙均为裸地最大,其中产流量约为农地的 1.3~4.3 倍,约为草地的 2.8 倍;产沙量约为农地的 3.1~10.4 倍,约为草地的 77.6 倍。

与 2013 年相比,2014 年的径流量和产沙量都大幅减小,这与降雨偏小有密切关系。通过表 3 可以看出,在相同的降雨条件下,3 号裸地小区的产流量和产沙量均为最大,远超过了耕地和草地的产沙量,这是因为裸地没有植被覆盖,而且与 1,2 小区同时进行中耕松土、除草等一系列田间管理措施,疏松了表土,使得径流更容易产生。但是在 2014 年,草地的产流量和产沙量均高于梯田,这是因为草地形成良好的生物结皮,降低了土壤入渗速率,发生超渗产流,延长了产流时间,使得产流量增加,草地小区的下部侵蚀严重,导致产沙量较高。

表 3 各径流小区产流产沙情况

小区	2013 年		2014 年	
	产流/m ³	产沙/kg	产流/m ³	产沙/kg
1	6.22	24.66	4.65	18.81
2	2.67	12.39	0.73	0.47
3	9.48	110.16	5.01	24.14
4	2.67	0.95	2.46	0.78
合计	21.04	148.16	12.85	44.20

3.4 单次降雨条件下各小区产流产沙情况

为了更清晰地对比相同降雨条件下各小区的产流产沙情况,选择发生在 2013 年 7 月 23 日的一次典型降雨进行分析。降雨开始于 2:39,结束于 12:18,历时 579 min,期间降雨量为 101.8 mm。1 号径流小区产流开始时间为 3:34,历时 141 min 后结束;2 号小区产流于 3:55,105 min 后结束;3 号径流小区于 3:28 开始产流,于 157 min 后结束;4 号小区产流开始时间为 4:05,100 min 后结束。为便于分析,将降雨开始时间作为 0,把各小区的累积降雨量和累积产流量绘制于图 2。降雨结束后计算总产流量和产沙量。1 号小区产流为 0.8 m³,产沙为 4.512 kg;2 号小区产流 0.58 m³,产沙 2.802 kg;3 号小区产流 0.9 m³,产沙 9.107 kg;4 号小区产流 0.54 m³,产沙 0.163 kg。

从图 2 可以看出,虽然各小区降雨条件相同,但是产流情况却存在较大的差异。产流开始时间以 3 号小区(裸地)最早,比 1 号小区(横坡起垄种植花生)早 6 min,比 2 号小区(梯田种植花生)早 27 min,比 4 号小区(草地)早约 37 min,而结束时间却正好相反。

在相同的降雨条件下,产流产沙最多的是裸地,其次为无工程措施的农地,最少的是草地。因此,梯田和较高的植被覆盖度可以降低径流泥沙的产生,修筑梯田可以改变地形坡度,拦蓄雨水,增加土壤水分,防治水土流失。

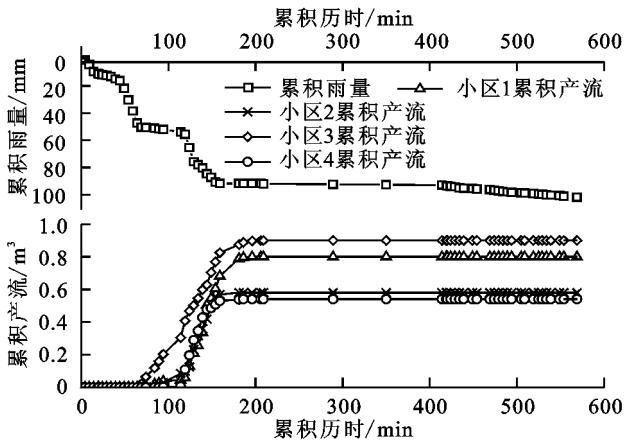


图 2 各径流小区累积降雨量和产流量

3.5 降雨与径流泥沙的相关性分析

降雨作为土壤侵蚀的原动力,是导致产流产沙的直接原因。各降雨特征如降雨强度、降雨历时、降雨量等都会对水土流失产生一定的影响。本研究选取次降雨因子与各小区次径流量(m³)、次产沙量(kg)进行皮尔逊相关分析。降雨因子选降雨量 P (mm)、降雨历时 D (min)、平均降雨强度 I_a (mm/h)、最大 30 min 雨强 I_{30} (mm/h)、降雨侵蚀力 R (MJ·mm/(hm²·h)),结果见表 4。

降雨因子与产流产沙相关系数越大,则该因子与次径流量或次产沙量的相关性越强。从表 4 中可以看出,各小区次径流量与 P 因子、 R 因子均呈显著正相关,其中与 P 相关性最强,均在 0.01 水平上达到了显著正相关。总体来说,除 D 因子外,其他降雨因子均与小区产流量有着一定的相关性。降雨因子与小区产沙量之间也有类似的规律,对于 4 号草地小区来说,因为其较高的植被覆盖度和草种的特性,产沙量只与 P 因子在 0.05 水平上达到了显著相关,所以在相同的降雨条件下 4 号小区的产流产沙最少。

4 讨论

4.1 不同植被条件下各小区产流产沙情况

植物措施对于减少径流泥沙具有一定的作用,且不同的植物措施减流减蚀的效果不同^[12-14]。通过分析不同植被类型对径流泥沙的削减作用,对于确定当地水土保持植物措施的类型起到一定的指导作用。在本研究中,采用种植花生和草本与裸地小区进行对比,可以看出有植被小区明显降低了小区的产流和产沙量。在相同降雨情况下,裸地的产流产沙量最多,农地的产流量为裸地的 23%~75%,产沙量为裸地

的 9%~32%;草地的产流量为裸地的 35%,产沙量为裸地的 1%。这与于国强等^[15]在罗玉沟流域的研究结果一致,其结果表明相同降雨条件下产流产沙量依次为荒地>坡耕地>草地>林地。

表 4 径流小区降雨因子与产流产沙相关分析

小区	次径流量				次产沙量			
	1	2	3	4	1	2	3	4
<i>P</i>	0.788**	0.728**	0.873**	0.695**	0.768**	0.673**	0.802**	0.600*
<i>D</i>	0.084	0.136	0.009	−0.152	−0.09	−0.063	0.236	−0.071
<i>Ia</i>	0.302	0.391	0.717**	0.506*	0.703**	0.337	0.264	0.25
<i>I₃₀</i>	0.572*	0.439	0.507*	0.599*	0.512*	0.539*	0.578*	0.431
<i>R</i>	0.598*	0.527*	0.657**	0.680**	0.533*	0.554*	0.599*	0.440

注: * 表示在 0.05 水平上显著相关; ** 表示在 0.01 水平上显著相关。

4.2 不同种植方式下各小区产流产沙情况

坡耕地是鲁中南山丘区主要的土地利用方式,也是水土流失的主要来源。因此采用适当的种植方式才能减少土壤侵蚀,提高土地生产力^[16-18]。在本研究中,采用横坡种植、梯田种植 2 种耕作方式,对其产流产沙进行监测和对比。可以看出,梯田种植明显降低了小区的产流产沙量,在相同的作物和降雨条件下,梯田的产流量约为横坡种植的 31%,产沙量约为横坡起垄种植的 30%。在山丘区种植花生等作物时,难免会进行播种、翻耕等人为活动,导致地表疏松,加剧水土流失的产生。因此,有必要把横坡种植方式改为土坎梯田种植,改变地形坡度,拦蓄雨水,防止水土流失,达到保水、保土、保肥的目的。

5 结论

(1)导致径流产生的降雨量临界值表现为裸地<农地<草地,草地临界降雨量分别比梯田种植、横坡起垄种植、裸地高 0.2,2.8,3.8 mm。说明草地蓄水保土的能力最强,土壤抗冲性好。

(2)在相同的降雨条件下,不同措施小区产流、产沙量变化表现为裸地最多,产流量约为农地的 1.3~4.3 倍,约为草地的 2.8 倍;产沙量约为农地的 3.1~10.4 倍,约为草地的 77.6 倍;产流开始时间以裸地最早,草地最晚,二者之间相差 37 min,而结束时间正好相反。植被覆盖有效地减少了水土流失的发生。

(3)通过对降雨和径流泥沙进行皮尔逊相关分析,除 *D* 因子外,其他降雨因子均与小区产流量有着不同水平的相关性,其中与 *P* 因子在 0.01 水平呈显著正相关。降雨因子与小区产沙量之间也有类似的规律。

参考文献:

[1] 郑粉莉,王占礼,杨勤科.我国土壤侵蚀科学研究回顾和展望[J].自然杂志,2008,30(1):12-16.

[2] 李占斌,朱冰冰,李鹏.土壤侵蚀与水土保持研究进展[J].土壤学报,2008,45(5):802-809.

[3] 李智广,曹炜,刘秉正,等.我国水土流失状况与发展趋

势研究[J].中国水土保持科学,2008,6(1):57-62.

[4] 李子君,于兴修.冀北土石山区坡面尺度径流特征及其影响因素[J].农业工程学报,2012,28(17):109-116.

[5] 方海燕,蔡强国,李秋艳.黄土丘陵沟壑区坡面产流能力及影响因素研究[J].地理研究,2009,28(3):583-591.

[6] 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.

[7] 彭娜,谢小立,王开峰,等.红壤坡地降雨入渗、产流及土壤水分分配规律研究[J].水土保持学报,2006,20(3):17-20,69.

[8] 和继军,蔡强国,王学强.北方土石山区坡耕地水土保持措施的空间有效配置[J].地理研究,2010,29(6):1017-1026.

[9] 周国逸,闫俊华,申卫军,等.马占相思人工林和果园地表径流规律的对比研究[J].植物生态学报,2000,24(4):451-458.

[10] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning [M]. Washington D C: Agricultural Research Service—US Department of Agriculture,1978.

[11] 孔刚,王全九,樊军,等.前期含水量对坡面降雨产流和土壤化学物质流失影响研究[J].土壤通报,2008,39(6):1395-1399.

[12] 谢颂华,郑海金,杨洁,等.南方丘陵区水土保持植物措施减流效应研究[J].水土保持学报,2010,24(3):35-38.

[13] 李宁.不同水土保持措施对土壤水分及地表径流的影响[D].南昌:南昌大学,2014.

[14] 王晓南,孟广涛,姜培曦,等.浅谈植物措施在水土保持中的作用机理[J].水土保持应用技术,2008,3(4):25-27.

[15] 于国强,李占斌,裴亮,等.不同植被类型下坡面径流侵蚀产沙差异性[J].水土保持学报,2012,26(1):1-5,11.

[16] 辛艳,王瑄,邱野,等.辽宁省不同耕作方式对坡耕地水土及氮磷养分流失的影响效果[J].水土保持学报,2013,27(1):27-30.

[17] 万丹.紫色土不同利用方式下土壤侵蚀及氮磷流失研究[D].重庆:西南大学,2007.

[18] 林超文,罗春燕,庞良玉,等.不同耕作和覆盖方式对紫色丘陵区坡耕地水土及养分流失的影响[J].生态学报,2010,30(22):6091-6101.