人工模拟降雨条件下不同雨强、坡度对紫色土坡面产流的影响

车明轩，宫渊波，穆罕默德·纳伊姆·汉，刘 莲，吕 宸，匡昆林
（四川农业大学 林学院，四川 成都 611130）

摘 要：[目的] 研究不同降雨强度和坡度对紫色土坡面产流过程的影响，为紫色土区域的水土流失防治提供科学依据。[方法] 基于室内人工模拟降雨试验开展研究。[结果] 不同雨强和坡度下的产流过程可大致分为“下凹”型和“上凸”型，且分别可以用指数函数和对数函数描述。随着雨强和坡度的增大，产流时间逐渐减小，产流过程逐渐趋于一致，坡面径流量逐渐增加。坡度和雨强对径流总量的贡献率有着对比消长的关系，小雨强下（雨强为 33 和 54 mm/h），坡度是坡面径流总量的主要贡献因子，随着雨强增大（雨强为 94 和 125 mm/h），雨强为坡面径流总量的主要贡献因子。[结论] 坡度和雨强均为坡面侵蚀的主要影响因子，随着坡度和雨强的增加，坡面侵蚀更加剧烈，主要侵蚀因子也由坡度转变为雨强。

关键词：人工模拟降雨；紫色土；降雨强度；坡度；产流过程
文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2016)04-0164-05 **中图分类号**：S157.1

文献参数：车明轩，宫渊波，穆罕默德·纳伊姆·汉，等. 人工模拟降雨条件下不同雨强、坡度对紫色土坡面产流的影响[J]. 水土保持通报，2016，36(4)：164-168. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2016.04.030

Impacts of Rainfall Intensity, Slope Gradient on Overland Flow of Purple Soil Under Simulated Rainfall

CHE Mingxuan, GONG Yuanbo, Muhammad Naeem Khan, LIU Lian, LÜ Chen, KUANG Kunlin
(*College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu, Sichuan* 611130, *China*)

Abstract: [Objective] The effects of rainfall intensity and slope gradient on runoff process were studied to provide scientific basis for soil and water conservation control on purple soil areas. [Methods] Researches were studied based on indoor artificial rainfall simulation experiments. [Results] Runoff courses could be generally divided into concave and convex type, and can be described by exponential function and log function, respectively. With the increases of rainfall intensity and slope, the runoff initiation time decreased, the runoff amount increased, and the runoff course became similar. At low rainfall intensity, the effect of slope gradient was obvious in runoff generation, while at high intensity, the effect decreased. In this case, slope gradient was the main factor at low rainfall intensities(33, 54 mm/h), while rainfall intensity became the main factor at high rainfall intensity(94, 125 mm/h). [Conclusion] Both rainfall intensity and slope gradients were the main factors of hillslope erosion. With the increase in rainfall intensity, the hillslope erosion became more sharply. And the main erosion factor transferred from slope to rainfall intensity.

Keywords: **simulated rainfall; purple soil; rainfall intensity; slope; runoff course**

紫色土是我国特有土壤之一，广泛分布于我国长江中下游地区[1]，其矿质养分充足，肥力高，是当地重要的农业生产资源。然而由于紫色土土壤发育程度低，土壤抗蚀性差，导致该地区的水土流失情况十分严重，仅次于黄土地区[2]，严重阻碍了当地的农业及经济发展[3]。侵蚀产流是评估水土流失的重要指标之一，其不仅是泥沙输移的动力与载体[4]，使表层土壤大量流失；而且溶解并流失土壤中植物生长不可或

收稿日期：2015-09-18 **修回日期**：2015-12-03
资助项目：国家“十二五”科技支撑计划重大项目“长江上游低山丘陵区生态综合整治技术与示范”(2011BAC09B05)；四川省高校水土保持与荒漠化防治重点实验室建设项目；四川农业大学研究生社会实践和科技服务团
第一作者：车明轩(1992—)，男(汉族)，甘肃省兰州市人，硕士研究生，研究方向为土壤侵蚀。E-mail：CMXSTBC@163.com。
通讯作者：宫渊波(1957—)，男(汉族)，辽宁省昌图县人，博士，教授，博士生导师，主要从事水土保持和生态恢复的教学和科研工作。E-mail：mailto:gyb@sicau.edu.cn。

缺的速效养分[5],降低土壤肥力。紫色土分布区域降水充沛,降雨产生的径流携带大量土壤,是坡面土壤侵蚀的主要动力之一;加之该地区土地利用以坡耕地为主,大于 10°的坡耕地占全区面积的 70%以上[6],大面积的坡耕地为土壤侵蚀提供有利的侵蚀场所,导致该地区水土严重流失。由此可见,降雨和坡度是紫色土区影响侵蚀产流的重要因素。国内学者针对紫色土坡面侵蚀产流进行了很多研究。高美荣等[7]通过对径流小区的观测实验,对川中丘陵区旱坡地 3 种典型的耕作制在 4 次降雨过程中的产流过程结果表明,3 种不同耕作制随降雨历时的产流量大小顺序为:聚土免耕<平板种植<顺坡种植;Liu 等[8]设计了一种壤中流观测系统,在不同雨强条件下对比坡面产流和壤中流的产流过程进行研究,认为在暴雨和大暴雨时,表面径流和壤中流都有发生,且壤中流滞后更明显;王玉宽等[9]利用人工模拟降雨装置对紫色土坡面侵蚀过程研究表明,紫色土坡面降雨侵蚀率与降雨强度呈线性相关,与坡度符合二次抛物线关系。本研究以坡耕地紫色土为研究对象,采用室内人工模拟降雨的方法,通过准确控制降雨强度、坡度两个主要因子变量,研究不同雨强、坡度对紫色土坡面产流过程影响、产流随时间变化的规律及坡度与雨强耦合作用对紫色土坡面产流的影响,旨在加深降雨对紫色土水土流失规律的认识,为紫色土区域的土壤侵蚀防治提供科学依据,促进紫色土区域水土保持研究。

1　材料与方法

1.1　试验材料

模拟降雨装置采用日本制造的 DIK-6000 人工降雨机,有效降雨高度为 2 m,有效降雨面积为 1.040 4 m^2,该装置可以调节降雨强度及雨滴大小。试验土壤为四川盆地西部边缘的雅安市(东经 101°51′10″—103°23′28″,北纬 28°51′10″—30°56′40″)坡耕地土壤,土壤质地分类参考国际土壤质地分类标准[10],为砂质黏壤土(砂粒、粉粒、黏粒含量分别为 59.12%,24.39%和 16.49%)。试验前将土样自然风干并通过 10 mm 孔径的筛,除去石砾、枯落物等杂质并充分混匀以备使用。试验所用坡面实体模型土槽为移动式可变坡度钢槽,长 1 m,宽 0.3 m,深 0.5 m,土槽上部有向外延伸的 V 形出水口,下部有排水孔。实验前先在土槽下部填 5 cm 细沙,以保持实验用土的透水状况接近天然坡面。采用分层填装的方法,边填充、边压实,使土层的土壤紧实度由下至上依次降低,使实验土壤剖面接近自然土壤剖面。并在压实过程中使用 SL-TSA 型土壤水分紧实度速测仪随机取样测定土壤水分及紧实度,通过调整确保同一土层土壤水分和紧实度值接近。

1.2　试验方法

试验采用 33,54,94,125 mm/h 共 4 种设计雨强,5°,10°,25°共 3 种设计坡度,共计 12 场降雨。雨强由人工降雨机准确设置,坡度以人工调节土槽角度准确设置。室内模拟降雨试验每场试验历时60 min,每场实验重复 3 次,分析计算采用三次试验数据的平均值。实验开始前堵塞土槽下部排水孔,以排除壤中流对试验的影响,并在土槽出水口部放置水桶,收集产流样品。确定雨强大小和降雨均匀度后开始试验。从雨滴下落至土壤表面时开始计时,每隔 10 min 收集一次土槽出口的径流样并更换水桶。当土槽出水口水流开始流至水桶内时,记录时间,为该场次降雨的产流时间。降雨结束后立即用量筒测量各阶段的产流量。

2　结果与分析

2.1　雨强、坡度对产流时间的影响

降雨初期,雨水主要消耗于土壤孔隙的填充,所以从降雨开始至径流产生有一个明显的滞后时间,即初始产流时间[11]。由图 1 可知,相同降雨强度条件下,产流时间随坡度的增加而呈现减小趋势,而产流时间的减小幅度随坡度的增加而呈现降低趋势(坡度由 5°增加至 15°时,4 种雨强产流时间约减小 51.82%,而由 15°增加至 25°时,产流时间约减小 19.85%)。这可能由于坡度在 15°时,入渗率较小,降雨后坡面形成超渗产流的时间更快,初始产流时间越短,其变化幅度也更剧烈;而当坡度大于 18°时,坡度对入渗率的影响不再显著,导致初始产流时间延迟[12],其变化幅度也就相对较小。在相同坡度条件下,产流时间随雨强增大而呈现先急剧减少,后逐渐趋于稳定并有小幅增加的趋势。产流时间随雨强的增大而减短,这一结论与陈洪松等在野外模拟降雨条件下的结论一致[13]。而在大雨强下(雨强为 125 mm/h)产流时间出现小幅增加,可能由于大雨强下雨滴过于密集,溅蚀十分剧烈。雨滴连续打击坡面而使坡面产生凹凸不平且分布不均匀的土坑,增加了坡面糙度。坡面糙度增加坡面径流动阻力[14],延缓局部径流流速,导致产流时间略有延迟。

2.2　雨强、坡度对产流过程的影响

地表径流产流机制主要分为超渗产流和蓄满产流两种类型,但这两种类型并不是截然分开的。一场降雨中,当净降雨强度超过入渗强度时,会形成超渗产流,而当入渗量不断累积至田间持水量时,又会转化成蓄满产流[15]。由于实验时堵塞土槽下部出水口

以排除壤中流对产流的影响，所以随着降雨历时的不断增加，雨水充分下渗，土壤水最终趋于饱和，最终产流量会趋于稳定(33 和 54 mm/h 两种降雨强度在降雨结束后产流量仍有明显差异，可能是由于降雨强度较小且降雨时间不足，土壤中仍有孔隙，未能达到最终状态所致)。由图 2 可以看出，室内人工模拟降雨有着不同的产流过程，大致可以分为“下凹”型产流过程(如降雨强度为 33 mm/h，坡度为 25°的降雨类型)和“上凸”型产流过程(如降雨雨强为 124 mm/h，坡度为 5°，15°，25°的 3 次降雨类型)。对“下凹”型和“上凸”型的产流数据分析表明，“下凹”型产流过程可以用指数函数描述，而“上凸”型产流过程可以用对数函数描述(表 1)。国内关于坡面产流过程的研究大多为“上凸”型产流[3,16]，可能因为其在正式降雨前进行过预降雨处理，增加了土壤初始含水率，趋于稳定入渗速率的时间变短，导致产流进程加快[17]，未体现出土壤初始含水率较低时存在的“下凹”型产流过程。

分析两种产流过程，“下凹”型产流过程在降雨初期，雨水主要以下渗为主。随着产流历时的增长，土壤表层部分逐渐被雨水填充。由于土壤剖面由上至下紧实度逐渐增高，土壤孔隙的大小和数量由上至下也逐渐减小，土壤入渗率也由上至下递减；所以当土层上部水分趋于饱和而下渗能力较弱时，随降雨的持续会出现超渗产流。由于雨强相对较小，坡度也相对较为缓和，并且土层上部分水分持续下渗，以至于产流量的增加比较缓和，而这个产流量的增加很可能与下渗量的递减有关。随着时间的推移，雨水下渗至土槽底部，下渗速度不再减小，雨水开始由下至上逐渐填满土壤中所有孔隙，此时产流速度会有显著的提升，而这个时间节点很可能为“下凹”型产流过程的第一个拐点。当雨水持续填充土壤内孔隙，最终填满土壤内所有孔隙时，产流量会趋于一个定值，此时产流由超渗产流转化为蓄满产流，而这个时间节点则可能是“下凹”型产流过程的第二个节点。而“上凸”型产流过程形成的原因是由于降雨强度相对较大，降雨量远大于土壤入渗量，初始即形成超渗产流，产流增加量较大且变化不大，直至雨水充满土壤孔隙时，产流量趋于定值，此时也是“上凸”型产流过程的唯一拐点。

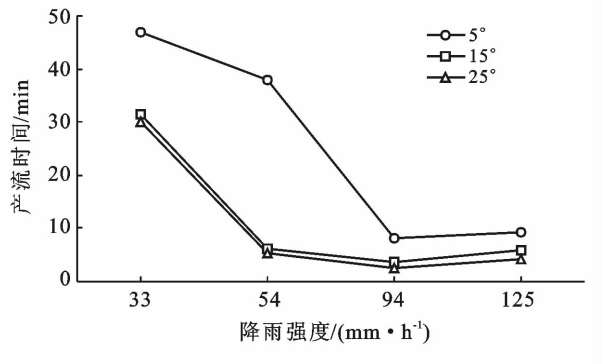


图 1 不同降雨强度和坡度条件下产流时间的变化

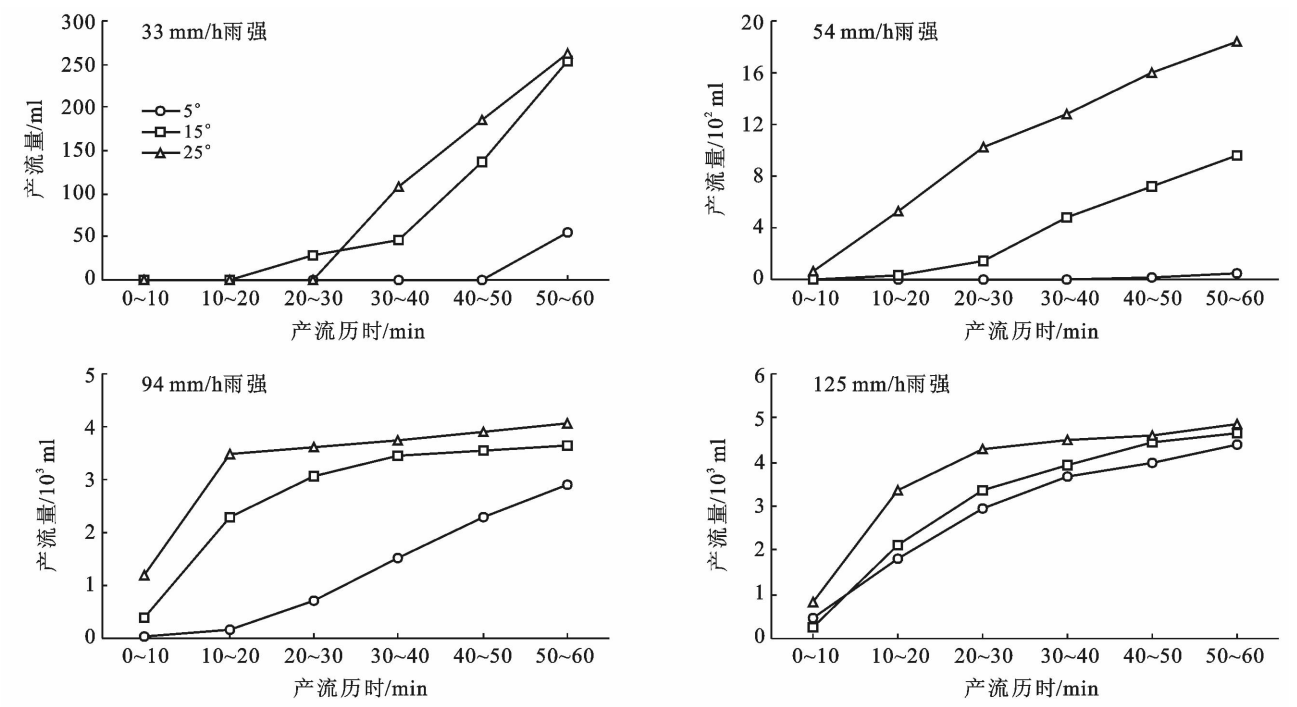


图 2 不同降雨强度和坡度条件下产流量随降雨历时的变化

"下凹"产流过程与"上凸"产流过程相比,"下凹"的初始产流时间较长,且产流增长速度较为缓慢,累积产流量也明显低于"上凸"的产流过程。由图 2 可知,在雨强为 33 和 54 mm/h 时,25°坡面产流过程为"上凸"型产流,而其余坡度产流过程为"下凹"型,而当雨强增大到 125 mm/h 时,所有坡度产流均为"上凸"产流过程。这说明坡度和降雨强度共同影响着坡面径流的产流过程。当雨强较小时,坡度是影响产流过程的主要因子,其对产流过程的类型、产流时间、产流量的增长速度以及累积产流量均有较大贡献。而随着雨强的增加,坡度对产流过程的影响逐渐减弱,当雨强为 125 mm/h 时,坡度仅对累积产流量由一定影响,说明此时坡度不再对坡面产流过程起主导作用,相反,雨强因子对坡面产流过程的影响随着雨强的增加而越来越重要。随着雨强的不断增大,不同坡度产流过程的曲线趋于一致,在降雨强度为 94 和 125 mm/h 的 60 min 时,3 种坡度在 60 min 时的产流量逐渐趋于一个定值,达到试验的产流最终状态,说明雨强的增大缩短了产流趋于稳定的时间,加快了产流进程。

2.3　雨强、坡度对产流总量的影响

图 3 为不同降雨强度和坡度条件下径流总量的变化规律。由图 3 可知,随着降雨强度和坡度的增大,其径流总量也不断增加,这一规律与国内外大多数研究结论一致[3,18-19]。通过分析其径流总量随坡度和雨强的增加而增长的规律(即斜率),可以发现,当雨强在 33～54 mm/h 之间变化时,不同坡度增长幅度差异较大。随雨强增长,不同坡度下径流总量的增长幅度随坡度的增加而增加,具体表现为:25°>15°>5°。说明当雨强在 33～54 mm/h 之间变化时,坡度的变化对坡面径流总量有很大影响,坡度越大,其产流量越大。而当降雨强度由 54 mm/h 增长至 125 mm/h 时,15°坡和 25°坡的增长幅度一致,说明当雨强在 54～125 mm/h 范围内,坡度在 15°～25°范围内时,影响径流总量的主要因子是雨强,坡度不再对产流量有明显作用。而 5°坡在雨强由 54 mm/h 增加至 125 mm/h 时,径流总量的变化与其余两种坡度相比较有明显差异,说明当雨强大于 54 mm/h 时,坡度在 5°～15°的变化仍对径流总量由很大影响。这与靳长兴[12]入渗率随坡度的减小在坡度小于 15°时比较显著,而当坡度超过 15°后不再明显的研究结论相似。

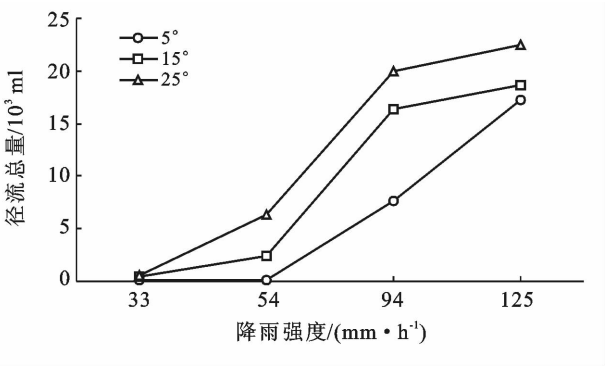


图 3　不同降雨强度和坡度下径流总量的变化

上述分析表明径流总量与坡度和雨强的变化有关。随着雨强的增长,不同坡度对坡面径流总量的影响有一定的差异性。为了具体分析其差别,采用计算贡献率的方法来对不同坡度范围和雨强两个因子对产流量的贡献进行简单量化。以 5°和 15°坡面以及 15°和 25°坡面之间降雨强度和坡度变化对径流总量的贡献率进行分析,降雨强度以 33 mm/h 为基准。具体计算方法引用耿晓东[20]50 和 75 mm/h 降雨强度下坡度、降雨强度贡献率的计算和对比。

由表 1—2 可以看出,坡度和降雨强度对产流量的贡献存在对比消长的关系,坡度在小雨强下对产流量有着重要贡献,随雨强的不断增加,坡度的贡献率逐渐减少。当坡度变化范围在 15°～25°时,雨强超过 54 mm/h 后,坡度的主要贡献因子地位就被雨强所取代(坡度贡献率小于 50%);而当坡度的变化范围在 5°～15°时,直至雨强超过 94 mm/h 后,雨强的主要贡献地位才渐渐体现。这说明虽然坡度因子对径流总量的贡献随着雨强的增加而逐渐减少,主要贡献因子会由坡度因子转变为雨强因子,但是缓坡地(坡度<15°)相比陡坡地(坡度>15°)而言,这种转变需要更大的降雨强度。

表 1　5°和 15°坡度下降雨强度、坡度贡献率计算和对比

雨强/(mm·h⁻¹)	5°产流量/ml	15°产流量/ml	综合增量/ml	雨强贡献率/%	坡度贡献率/%
33	55	465	410	0.00	100
54	55	2 348	2 293	0.00	100
94	7 608	16 370	16 315	46.29	53.71
125	17 297	18 693	18 638	92.51	7.49

表2 15°和25°坡度下降雨强度、坡度贡献率计算和对比

雨强/(mm·h^{-1})	15°产流量/ml	25°产流量/ml	综合增量/ml	雨强贡献率/%	坡度贡献率/%
33	465	557	92	0	100
54	2 348	6 334	5 869	32.08	67.92
94	16 370	19 977	19 512	81.51	18.49
125	18 693	22 470	22 006	82.84	17.16

3 结论

(1) 在相同雨强条件下,初始产流时间随坡度的增加而减小,而产流时间的减小幅度随坡度的增加呈降低趋势。在相同坡度条件下,产流时间随雨强增大而呈现先急剧减少,然后逐渐呈稳定并有小幅增加的趋势。

(2) 坡度和雨强共同影响着坡面的产流过程。在坡度、雨强相对较小的条件下,坡面产流主要以"下凹"型产流过程为主,在坡度、雨强相对较大的条件下,坡面产流主要以"上凸"型产流过程为主。

(3) 在小雨强下,坡度是影响产流过程的主要因子。随着雨强的增加,坡度因子对产流过程的影响逐渐减弱。当雨强增加到一定量时,产流过程基本趋于一致,且最终产流量也趋近一个定值。雨强的增大缩短了产流趋于稳定的时间,加快了产流进程。

(4) 坡度和雨强对径流总量的贡献有着对比消长的关系。小雨强下,坡度对径流总量有着主要影响,随着雨强的不断增大,坡度因子对径流总量的贡献逐渐减小,雨强因子对径流总量的贡献逐渐增大。

(5) 虽然坡度因子对径流总量的贡献随着雨强的增加而逐渐减少,主要贡献因子会由坡度因子转化为雨强因子,但是缓坡地(坡度小于15°)相比陡坡地(坡度大于15°)而言,这种转变需要更大的降雨强度。

[参 考 文 献]

[1] 李世锋,朱晓莹,朱春波.浙江省华光潭梯级水电站水土保持监测实践[J].中国水土保持,2008(9):48-50.

[2] 刘力,郑粉莉.紫色土土壤侵蚀研究进展[J].安徽农业科学,2006,34(12):2804-2805.

[3] 钟壬琳,张平仓.紫色土坡面产流产沙模拟试验研究[J].浙江水利科技,2011(2):6-9.

[4] 王政.侵蚀产沙的影响因素研究[J].中国科技信息,2008(6):27-29.

[5] 张海涛.人工模拟降雨条件下紫色土可溶性C,N流失特征[D].四川 成都:四川农业大学,2013.

[6] 中国科学院成都分院土壤研究室.中国紫色土(上篇)[M].北京:北京科学出版社,1994.

[7] 高美荣,刘刚才,朱波.四川紫色土丘陵区不同耕作制的产流过程初步分析[J].水土保持学报,2000,14(5):118-121.

[8] Liu Gangcai, Tian Guanglong, Shu Dongcai, et al. Characteristics of surface runoff and through flow in a purple soil of Southwestern China under various rainfall events [J]. Hydrological Processes, 2005, 19(9): 1883-1891.

[9] 王玉宽,王勇强,傅斌,等.紫色土坡面降雨侵蚀试验研究[J].山地学报,2006,24(5):597-600.

[10] 孙向阳.土壤学[M].北京:中国林业出版社,2004.

[11] 吴发启,赵西宁,佘雕.坡耕地土壤水分入渗影响因素分析[J].水土保持通报,2003,23(1):16-18.

[12] 靳长兴.坡度在坡面侵蚀中的作用[J].地理研究,1996,18(3):57-63.

[13] 陈洪松,邵明安,张兴昌,等.野外模拟降雨条件下坡面降雨入渗、产流试验研究[J].水土保持学报,2005,19(2):5-8.

[14] 吴发启,贾锐鱼.地表糙度的量测方法及对坡面径流和侵蚀的影响[J].西北林学院学报,1998,13(2):15-19.

[15] 吴伟,王雄宾,武会,等.坡面产流机制研究刍议[J].水土保持研究,2006,13(4):84-86.

[16] 张会茹,郑粉莉,耿晓东.地面坡度对红壤坡面土壤侵蚀过程的影响研究[J].水土保持研究,2009,16(4):52-54.

[17] 刘贤兆,康绍忠.降雨入渗和产流问题研究的若干进展及评述[J].水土保持通报,1999,19(2):57-62.

[18] Catherine B, Marcel S, Dirk R Z, et al. Rill development and soil erosion: A laboratory study of slope and rainfall intensity [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2010,35(12):1456-1467.

[19] 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):6-9.

[20] 耿晓东,郑粉莉,刘力.降雨强度和坡度双因子对紫色土坡面侵蚀产沙的影响[J].泥沙研究,2010(6):48-53.