

粤北石漠化地区坡地入渗产流规律试验研究

王明刚¹, 李森^{2,3}, 金昌宁³

(1. 广州科技贸易职业学院, 广州 511442; 2. 西北师范大学 地理与环境科学学院, 兰州 730070;

3. 佛山大学 资源与环境科学研究所, 广东 佛山 528000)

摘要:在粤北山区石漠化地区的裸地、草坡地和耕地等 3 种类型土地的坡面上, 采用 0.3, 0.48, 0.72, 1.08 mm/min 4 种降雨强度进行了 36 场人工降雨模拟试验。结果表明:在岩溶发育的石漠化地区, 受基岩的非均质性因素影响, 出流过程均呈现出具有一定波动性质的较为曲折的峰谷相间的特点; 初期波动性较大, 后渐趋稳定; 达到稳定的坡面径流量与雨强之间具有十分明显的线性正相关关系。3 种土地利用类型的坡面径流量的增幅随雨强增大而显著增加; 增幅最为明显的是裸地。其入渗率虽也随雨强的增加而增加, 却在增幅上明显小于前者, 其中, 裸地的增幅最小, 基本上能保持稳定。在土壤前期含水量影响较小的情况下, 产流时间均随着雨强的增大而迅速缩短, 表现为十分明显的幂函数关系, 3 种土地利用类型均需达到一定降雨量后才能产流。

关键词:降雨模拟; 石漠化; 坡地; 入渗; 产流; 粤北

中图分类号: S152.7+2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2011)06-0057-05

Experimental Study on Process of Rainfall-Infiltration-Runoff Generation on Rocky Desertification Slope in North of Guangdong Province

WANG Ming-gang¹, LI Sen^{2,3}, JIN Chang-ning³

(1. Guangzhou Vocational College of Technology & Business, Guangzhou 511442, China;

2. College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China;

3. Institute of Resources and Environmental Science, Foshan University, Foshan, Guangdong 528000, China)

Abstract: Simulated rain is a valid tool to examine soil erosion on sloping land. Experiments under 36 events of simulated rainfall with intensities of 0.3 mm/min, 0.48 mm/min, 0.72 mm/min and 1.08 mm/min and different duration were carried out on three different types of lands (bare land, grassland and farmland) in typical rocky desertification land slope in northern Guangdong Province. Results show that the runoff processes in different lands have features with the fluctuating nature of the valley and peak due to rock heterogeneity factors. The fluctuation range of initial runoff curve was large. There is a very clear linear relationship between reaching stable surface runoff intensity between the rainfall intensity. Land surface runoff intensities on three kinds of land use types increase with the rise of rainfall intensity. The largest and significant increment of runoff occurs on bare land. Although the infiltration rate also increases with the rise of rainfall intensity, the increment is significantly less than that of runoff; the least increment is observed on bare land, however, the infiltration basically remains stable. Under the case of less initial soil moisture, the time of flow production rapidly shortens with increase of the rainfall intensity; there is an obvious power function relation between initial soil moisture and rainfall intensity. Surface runoff on three types of land produces when the rainfall amount meets a certain level.

Key words: simulated rainfall; rocky desertification; slope; infiltration; runoff; north of Guangdong Province

收稿日期: 2011-04-27

修回日期: 2011-05-18

资助项目: 国家自然科学基金资助项目 (30870469)

作者简介: 王明刚 (1977—), 男, 山东潍坊人, 讲师, 硕士研究生, 主要从事资源环境管理研究。E-mail: wmg040903@163.com

通信作者: 李森 (1948—), 男, 甘肃兰州人, 博士生导师、教授, 主要从事地貌与第四纪地质研究。E-mail: fslisen@163.com

我国的石漠化土地主要分布在长江上游的乌江流域、珠江上游的北盘江流域和粤北的岩溶山区。其特征之一是具有地上、地下双层结构^[1],从而导致山地和丘陵因地表水渗漏损失严重而缺水,地表径流仅出现在溶蚀谷地与洼地中,形成了水土资源很不协调的“土地在山上,水源在山下”的分布格局,严重影响着当地人民生活及社会经济发展。因此,在这一地区进行与降雨入渗及产流规律有关的研究,不仅有重要的理论价值,也更有其现实意义。20 世纪 70—80 年代,有学者提出了“石灰岩渗漏类型”产流模型及“景观产流”的观点^[2],但其所依据的主要是流域的水文资料,尚未满足理论研究和实际应用的需要。近些年来,许多学者的研究从不同的角度涉及到这一问题,但其侧重点却在降雨产流的侵蚀作用及其对水土流失和石漠化过程的影响等方面^[3-9]。此外,在国内,利用野外人工模拟降雨试验进行的研究主要在黄土高原地区及华北石质山区;有关石漠化地区坡地降雨产流规律的研究成果,鲜有报道。本文基于野外人工模拟降雨试验,在石漠化地区,针对不同类型的土地,研究不同雨强对降雨入渗及产流规律的影响,所得结果既有助于理论研究的进一步深化,亦可为石漠化土地的治理提供必要的科学依据。

1 试验区概况

试验区位于广东省阳山县江英镇东南 1 km 处的岩溶坡地(24°30′06″N, 112°50′48″E)上,试验区总面积 300 m²,中心点海拔高度为 445 m,坡向西南,坡面约 22°。本试验区及周边出露碳酸盐岩为石炭系下统大赛坝组(C_{1ds}),石灰岩质地较纯。试验区地貌为岩溶坡地,有漏斗、小型溶洞发育等多种地貌类型,裂隙、节理十分发育。据江英镇自动气象站资料,多年平均气温 17.5℃,多年平均降雨量 1 849.3 mm,降雨分配不均,集中在 5—9 月,最大 24 h 降雨量 290.5 mm,无霜期 310 d,具有南亚热带温暖、多雨、雨季与旱季分明的季风气候特点。坡面上发育红色石灰土,土层厚薄不均,平均厚度 0.30 m,在基岩上仅 0.03 m,在溶蚀沟槽、洼地处稍厚,亦仅 0.5 m,土壤机械组成以中细沙和极细沙为主,在表层土中其含量达 91.58%。由于地形破碎,岩石裂隙发育,谷坡陡峭,地表水渗漏快,地表径流不发育。坡面上有少量常绿落叶阔叶混交林,山地灌丛草坡较为普遍,常见植物主要有草本植物,如大叶仙(*Curculigo latifolia*)、白茅(*Imperata cylindrical* var. *major*)、凤尾蕨(*Pteris ensiformis*)、莲座蕨(*Angiopteris foki-*

ensis)等,藤本植物有龙须藤(*Bauhinia champio-ni*)、流苏子藤(*Coptosapelta diffusa*)、常春藤(*Hedera nepalensis* var. *sinensi*)和金银花(*Lonicera confusa*)等,灌木有齿叶黄皮(*Clausena dunniana*)、竹叶椒(*Zanthoxylum planispinum*)、十大功劳(*Mahonia japonica*)、胡颓子(*Elaeagnus magna*)等。

2 试验仪器与方法

试验地上共布置 3 个试验小区,其中,1 号小区为未扰动的原始草坡地,土壤层平均厚度 0.22 m,基岩裸露率为 18.9%,植被茂盛,覆盖度为 75%。2 号小区为植被砍伐后的裸地,地表出露较多的石芽、基岩,节理、裂隙十分发育。坡面上的节理、裂隙密集,平均为 5.9 条/m²,一般沿 162°方向发育和岩层层面发育;有漏斗、小型溶洞发育等多种地貌类型,溶洞以垂向发育为主,横向发育为辅,一般规模不大,呈椭圆形或长条形,面积在 0.04~34.8 m² 之间,其中上部有一直径 0.7 m 的落水洞,洞口倾斜;土壤层厚 0.19 m,基岩裸露率为 75.8%,植被稀疏,覆盖度仅 15%。3 号小区为坡面植被破坏后开垦的耕地,土壤层厚度 0.38 m,基岩裸露率为 37%,采用横坡耕种方式种植玉米,完全靠雨水灌溉,无自然植被,季节性的人工植被覆盖度为 65%(具体位置见图 1)。

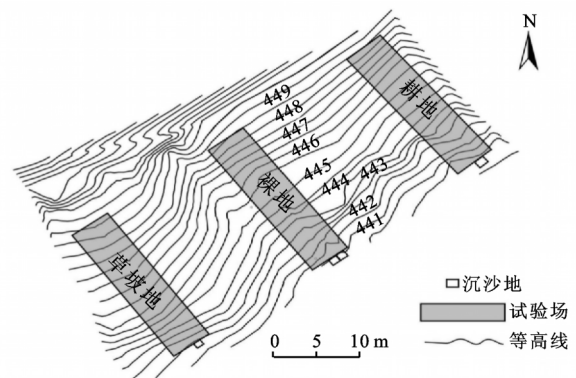


图 1 三种类型的试验样地

分别在三块 5 m×3 m 标准样地上进行降雨模拟试验。在草坡地、耕地坡底各建一个集流池,裸地则因水土流失量大,集流池为两个池顶相连通。径流与泥沙的收集装置由集流渠、集流池、1 000 ml 和 500 ml 量杯、广口加大塑料瓶组成。试验所用仪器为中国科学院水利部水土保持研究所研制的 BX-1 型便携侧喷式模拟降雨机,扬程 13 m,供水能力约为 3.51 t/h。可以模拟雨强为 0.3~3.3 mm/min 的降雨。降雨器共有 3 组,每组两个,分别放置于试验小区上、中、下部的两侧,有较好的降雨均匀性。土壤含水量由 AQUA-TEL-TDR 土壤水分传感器测量。

试验前测定土壤前期含水量。每块样地的模拟雨强为 0.3, 0.48, 0.72, 1.08 mm/min, 在每个模拟雨强下均进行 3 次不同历时的试验, 共进行了 36 场试验。为了能更加精确地控制模拟雨强, 采用了试验前率定雨强、试验中实测雨强的方法。径流量的观测采用体积法, 即在试验过程中每隔 5 min 记录一次集流池水位, 再根据集流池形状换算为相应时段的径流量体积。入渗率很难直接观察, 所以, 本试验利用水量平衡原理, 由监测到的坡面径流量和降雨强度计算得到降雨的入渗率。

3 结果与分析

3.1 雨强与坡面径流量的关系

已有研究表明, 坡地地表径流除了受降雨特征如雨量、雨强、历时、降雨间隔等因素影响外, 还受下垫面条件如土壤特征、地形地质构造和植被条件等因素影响。在不断出现的天然降水导致表层土壤含水量接近饱和的条件下, 以不同雨强为变量, 本试验所得结果如图 2 所示。

(1) 不同试验样地不同雨强条件下的坡面径流量变化曲线基本上相似, 均呈现出具有一定波动性

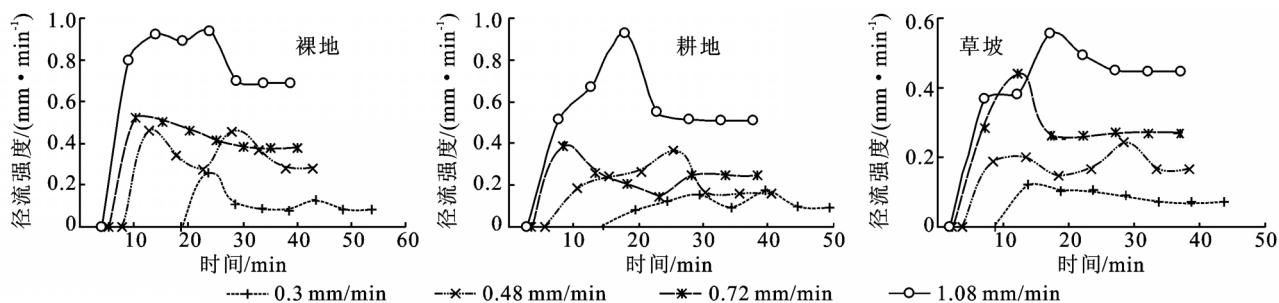


图 2 三种土地利用类型在不同雨强下时间与径流强度的关系

由此可见, 达到稳定的坡面径流量与雨强之间具有十分明显的线性函数关系。

3.2 土地利用类型与坡面径流量的关系

将图 2 的试验结果, 以不同雨强进行归类, 可以看出:

(1) 三种土地利用类型的坡面径流量, 尤其是达到稳定的坡面径流量, 雨强较小时, 相差不大; 但随着雨强增大, 相差越来越大, 越来越明显。前者表明, 在试验区所在的同一块山坡上, 基岩的水理性质相差不大, 且在表层土壤很薄或缺失, 含水量又接近饱和时, 降水的入渗率也相差不大。后者可从入渗水体的受力情况来解释, 土壤孔隙中的水流在其运动过程中主要受 4 种力的作用: 水体自重、土壤水分毛管势产生的吸力、地表水层的压力和雨滴打击地表时对入渗水体产生的挤压力。由于这 4 种力的作用范围和方式的不同, 在入渗达到相对稳定时, 它们的重要性也不

的、较为曲折的峰谷相间的特点; 与华北坡地以及黄土高原较为平滑的渐趋线型曲线相比有显著区别。其主要原因在于: 在岩溶发育的石漠化地区, 基岩的水理性质具有很强的非均质性, 表现为空隙的大小及连通性等均可在很小的范围内变化很大; 尤其是对降水入渗影响显著的较大空隙, 则在空间上分布更加不均。因此, 在有较大坡度且土壤等覆盖层很薄或缺失的情况下, 一方面降水入渗会以较大空隙的渗漏式入渗为主, 受到空隙溶洞、溶隙等的大小、多少、连通性、透气性等多种因素的影响, 具有相当大的不稳定性; 另一方面, 较大的空隙及坡度有利于地表水与地下水之间的迅速转化, 也在一定程度上增加了地表径流的不稳定性。

(2) 不同试验样地不同雨强条件下, 达到相对稳定的坡面径流量与雨强之间有着很好的正相关关系。通过数理分析, 得到的回归方程为:

$$\text{裸地: } R=0.7471I-0.1244 \quad r^2=0.98$$

$$\text{耕地: } R=0.5369I-0.0938 \quad r^2=0.97$$

$$\text{草坡: } R=0.4850I-0.0754 \quad r^2=1.00$$

式中: R ——坡面径流量 (mm/min); I ——降雨强度 (mm/min); r ——相关系数。

同。稳定入渗水流的主要通道是土壤中较大非毛管孔隙和部分毛管孔隙, 一般认为此时的毛管势产生的吸力作用已不明显, 主要是其它 3 种力的作用。其中, 雨滴打击所产生的挤压力对入渗率的变化起着重要的作用, 它不仅加速入渗水流的运动速度, 也可以使部分静止的毛管水加入入渗水流中。这即是入渗率随雨强增大而增大的根本原因所在 (表 1); 同时, 也从另一个侧面表明, 雨滴打击所产生的挤压力对入渗率的提高, 在 3 种类型土地上的表现是不相同的。

(2) 随着雨强增大, 坡面径流量增幅最大且最为明显的是裸地。这也意味着, 在雨滴打击提高入渗率方面, 裸地表现得最不明显且增幅也最小 (表 1)。主要原因是基岩裸露的裸地, 空隙特征以溶洞、溶隙为主; 后者出现在基岩中, 并具有局部性及其非均质性, 故不会像土壤松散堆积物的孔隙那样能在雨滴的打击及水流等因素的作用下入渗率明显增加, 如细粒

物质的淋失导致透水性增大,或在整个层面上都出现入渗率增加的现象等。这样的试验结果表明,在石漠化地区,即使土层厚度不大,也能通过其特殊的渗水作用,以及保水及滞水作用等,大幅度提高降水的入渗率,减少地表径流,在防止水土流失的同时更能够涵养水源。这也从另一个侧面反映出石漠化防治的重要意义。

表 1 与入渗率有关的降水试验成果汇总 mm/min

土地类型	雨强	径流量	入渗率
裸地	0.30	0.08	0.22
	0.48	0.28	0.20
	0.72	0.38	0.34
	1.08	0.69	0.39
耕地	0.30	0.09	0.21
	0.48	0.16	0.32
	0.72	0.24	0.48
	1.08	0.51	0.57
草坡	0.30	0.07	0.23
	0.48	0.16	0.32
	0.72	0.27	0.45
	1.08	0.45	0.63

3.3 雨强、土地利用类型与产流时间的关系

产流时间和雨强、坡度、土壤前期含水量、植被截留、填洼等有着直接关系。但对其函数关系,不同研究者所得结论不尽相同。本次试验未进行单因素分析,而是从综合的角度考虑不同土地利用类型的影响。在土壤前期含水量影响较小的情况下,试验结果如图 3 所示。

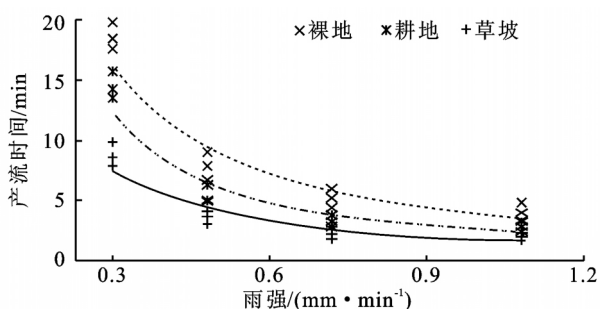


图 3 不同土地利用类型的产流时间随雨强的变化

(1) 3 种土地利用类型均具有超渗产流的特征。无论土地利用类型如何,产流时间均随着雨强的增大而迅速缩小,表现为相关性十分明显的幂函数关系,关系式为:

$$\text{裸地: } T = 3.82I^{-1.20} \quad r^2 = 0.91$$

$$\text{耕地: } T = 2.55I^{-1.29} \quad r^2 = 0.89$$

$$\text{草坡: } T = 1.80I^{-1.17} \quad r^2 = 0.86$$

式中: T ——产流时间 (min); I ——雨强 (mm/min); r ——相关系数。

(2) 随着雨强增大,不同土地利用类型的产流时间差异也随之减小。雨强较小时产流时间较大者,在雨强较大时产流时间仍较大。这一情况表明,3 种土地利用类型也具有蓄满产流的特征,表现为无论何种雨强都得在持续一定时间,并达到了一定的降雨量后才能产流;蓄满降雨量为:裸地是 3.7~5.3 mm,耕地是 2.4~4.0 mm,草坡是 1.6~2.5 mm。对耕地及草坡来说,此值偏小,原因一是土壤层厚度不大;二是不断出现的天然降水导致土壤中的含水量在试验前已接近饱和。

(3) 在天然降水经常出现的情况下,裸地的产流时间明显要比耕地及草地大。原因是在溶洞、溶隙等发育的裸地上,积聚在岩石表面的雨水易于蒸发,故在下次降雨(或进行降水试验)时,产流前需要积聚的水量多,产流时间也长。与之相比,耕地及草坡则因为有土壤及植物的保水及滞水作用,水分损失相对较小,故在下次降雨(或进行降水试验)时,产流前需要积聚的水量少,产流时间也短。这样的试验结果,同样也从另一个侧面反映出石漠化防治的重要意义。

3.4 土地利用类型与入渗率的关系

入渗率很难通过仪器直接测定,故而利用水量平衡原理,由监测到的坡面径流量和降雨强度,计算得到降雨的入渗率,结果见表 1。可以看出,达到稳定的入渗率具有雨强较小时,入渗率也较小;雨强较大时,入渗率也较大的特点。表明入渗率虽然也随雨强的增加而增加,却在增幅上小于后者。通过数理分析,得到不同土地利用类型在达到相对稳定时的入渗率与雨强之间相关方程为:

$$\text{裸地: } f = 0.2529I + 0.1244 \quad r^2 = 0.86$$

$$\text{耕地: } f = 0.4653I + 0.0949 \quad r^2 = 0.95$$

$$\text{草坡: } f = 0.5150I + 0.0754 \quad r^2 = 1.00$$

式中: f ——坡面径流量 (mm/min); I ——坡面入渗率 (mm/min); r ——相关系数。

由此可见,达到稳定的入渗率与雨强之间具有十分明显的线性函数关系。3 种土地利用类型相比,裸地的稳定入渗率随雨强增加而增加的幅度不大,基本上能保持稳定。

4 结论

(1) 在岩溶发育的石漠化地区,受基岩非均质性因素的影响,产流过程均呈现出具有一定波动性质的,较为曲折的,峰谷相间的特点;达到稳定的坡面径流量与雨强之间具有十分明显的线性正相关关系,分别为裸地: $R = 0.7471I - 0.1244$;耕地: $R = 0.5369I - 0.0938$;草坡: $R = 0.4850I - 0.0754$ 。

(2)3 种土地利用类型达到稳定的坡面径流量的增幅差异,随雨强的增强而显著增大;增幅最大且最为明显的是裸地,主要原因在于裸露的基岩难以涵养水源。

(3)在土壤前期含水量影响较小的情况下,产流时间均随雨强的增大而迅速缩小,表现为十分明显的幂函数关系:裸地 $T=3.82I^{-1.20}$;耕地 $T=2.55I^{-1.29}$;草坡 $T=1.80I^{-1.17}$ 。3 种土地利用类型均需达到一定降雨量后才能产流;这样的降雨量,对裸地、耕地、草坡来说,分别是 3.7~5.3 mm、2.4~4.0 mm、1.6~2.5 mm。

(4)无论何种土地利用类型,其入渗率虽然也随雨强的增加而增加,却在增幅上明显小于后者。其中,裸地的增幅最小,小到基本上能保持稳定。

此次试验采用的野外自然坡面,虽受到地形、降雨、风向等自然因素影响,但总的来说,试验得出的规律是较可靠的,并具有一定的理论价值和应用价值,可为粤北岩溶坡地的水土流失防治及石漠化的治理提供基础参考。

参考文献:

- [1] 袁道先. 岩溶地区的地质环境和水文生态问题[J]. 南方国土资源, 2003(1): 22-25.
 - [2] 王玉宽, 王占礼, 周佩华. 黄土高原坡面降雨产流过程的试验分析[J]. 水土保持学报, 1991, 5(2): 25-31.
 - [3] 王世杰. 喀斯特石漠化概念的演绎及其科学内涵探讨[J]. 中国岩溶, 2002, 21(2): 101-104.
 - [4] 龙明忠. 喀斯特峡谷区不同等级石漠化土壤侵蚀对比研究[J]. 贵州师范大学报, 2006, 24(1): 25-30.
 - [5] 王占礼, 黄新会, 张振国, 等. 黄土裸坡降雨产流过程试验研究[J]. 水土保持通报, 2005, 25(4): 1-4.
 - [6] 李阳兵. 花江喀斯特峡谷地区石漠化成因初探[J]. 水文地质工程地质, 2004(6): 37-42.
 - [7] 王德炉, 朱守谦, 黄宝龙, 等. 石漠化的概念及其内涵[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2004, 28(6): 87-90.
 - [8] 苏维词. 中国西南岩溶山区石漠化的现状成因及治理的优化模式[J]. 水土保持通报, 2002, 22(2): 29-32.
 - [9] 彭建, 杨明德. 贵州花江喀斯特峡谷水土流失状态分析[J]. 山地学报, 2001, 19(6): 511-515.
 - [10] 杨聪, 于静洁, 刘昌明, 等. 华北山区坡地产流规律试验研究[J]. 地理学报, 2005, 60(6): 1021-1028.
-
- (上接第 56 页)
- [34] 马克明, 傅伯杰, 周华锋. 北京东灵山地区森林的物种多样性和景观格局多样性研究[J]. 生态学报, 1999, 19(1): 1-7.
 - [35] 岳明, 张林静, 高第, 等. 佛坪自然保护区植物群落物种多样性与海拔梯度的关系[J]. 地理科学, 2002, 22(3): 349-354.
 - [36] Minchin P R. Montane vegetation of the Mt. Field massif, Tasmania: a test of some hypotheses about properties of community patterns[J]. Vegetatio, 1989, 83: 97-110.
 - [37] 魏振荣, 肖云丽, 李锐. 巴山山地退耕地植被自然恢复过程及物种多样性变化[J]. 中国水土保持科学, 2010, 8(2): 99-104.
 - [38] 高贤明, 马克平, 黄建辉, 等. 北京东灵山地区植物群落多样性的研究. XI: 山地草甸 β 多样性[J]. 生态学报, 1998, 18(1): 24-32.
 - [39] 邱波, 任青吉, 罗燕江, 等. 高寒草甸不同生境类型植物群落的 α 及 β 多样性研究[J]. 西北植物学报, 2004, 24(4): 655-661.
 - [40] 白永飞, 邢雪荣, 许志信, 等. 内蒙古高原针茅草原群落 β 多样性研究[J]. 应用生态学报, 2000, 11(3): 408-412.