

植被对含碎石土壤坡面降雨入渗和径流侵蚀的影响

夏振尧^{1,3}, 梁永哲^{1,2}, 牛鹏辉^{1,3}, 许文年^{1,3}, 高家祯³, 李博³

(1. 三峡地区地质灾害与生态环境湖北省协同创新中心, 湖北 宜昌 443002;

2. 三峡大学 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 3. 三峡大学 土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要: [目的] 研究植被对含碎石土壤坡面入渗和径流侵蚀的影响, 为合理配置三峡地区含碎石土壤坡面植被提供科学依据。[方法] 在建立的径流小区内铺设含碎石土壤, 并配置不同种类、不同覆盖度的植被, 进行人工降雨试验。[结果] 各类小区径流量排序为: 裸坡 > 灌木坡面 > 草本坡面 > 草灌混合坡面, 入渗量与径流量排序相反, 有植被覆盖坡面的壤中流大于裸坡; 入渗率服从对数函数规律, 产流强度呈幂函数变化; 草地对水沙的调控机制更多的是直接拦沙; 累计径流量和累计侵蚀量的关系均满足幂函数形式。[结论] 植被措施可有效地减少含碎石土壤坡面的水土流失, 不同的植被措施减少的效益不同。

关键词: 三峡地区; 含碎石土壤; 植被; 人工降雨; 入渗; 径流侵蚀

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)03-0088-06

中图分类号: S157.1

文献参数: 夏振尧, 梁永哲, 牛鹏辉, 等. 植被对含碎石土壤坡面降雨入渗和径流侵蚀的影响[J]. 水土保持通报, 2016, 36(3): 88-93. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.03.016

Effect of Vegetation on Rainfall Infiltration and Runoff Erosion and Sediment Yield in Gravel Soil Slope

XIA Zhenyao^{1,3}, LIANG Yongzhe^{1,2}, NIU Penghui^{1,3}, XU Wennian^{1,3}, GAO Jiazhen³, LI Bo³

(1. Collaborative Innovation Center for Geo-hazards and Eco-environment in Three Gorges Area, Yichang, Hubei 443002, China; 2. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 3. College of Civil Engineering and Architecture, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China)

Abstract: [Objective] Studying the influences of vegetation on rainfall infiltration and runoff erosion and sediment yield in order to provide a scientific basis for rationally allocating the vegetation in gravel soil slope in the Three Gorges area. [Methods] Runoff plots containing gravel soil were set with different types and coverage of vegetation. Artificial rainfall experiments were conducted. [Results] The amount of runoff showed as follows bare slope > shrub slope > herb slope > grass shrub mixed slope, in contrast, infiltration and runoff showed the opposite trend. The interflow in vegetation-covered slope was greater than that in the bare slope. Infiltration rate obeyed the law of logarithmic function, while the runoff yield strength varied as power function. The regulation mechanism of grassland to water and sediment was mostly direct sand blocking. The relationship between cumulative runoff and cumulative sediment yield showed as the power function. [Conclusions] Vegetation measures can effectively reduce soil and water loss in gravel soil slope, and different vegetation measures represent the different reducing benefits.

Keywords: the Three Gorges area; soil containing gravel; vegetation; artificial rainfall; rainfall infiltration; runoff erosion and sediment yield

中国是世界上水土流失最为严重的国家之一, 水土流失也是当前中国最突出的生态环境问题^[1]。三

峡地区降水充沛、降水强度较大^[2], 加上长期不合理的土地利用方式, 导致三峡地区又是中国水土流失最

收稿日期: 2015-06-10

修回日期: 2015-08-02

资助项目: 科学技术部“十二五科技支撑”项目“金沙江梯级水电开发区生态保护与入库泥沙调控关键技术与示范—河岸工程施工区生态系统修复技术与示范”(2012BAC06B02-04); 国家自然科学基金项目“三峡库区紫色土的植物根系加固效应与机制研究”(41202250)

第一作者: 夏振尧(1981—), 男(汉族), 湖北省武汉市人, 博士, 副教授, 主要从事水土保持与生态修复研究。E-mail: zxy_yc@126.com。

通讯作者: 许文年(1960—), 男(汉族), 河北省元氏县人, 教授, 博导, 主要从事边坡防护与生态修复技术研究。E-mail: xun@ctqu.edu.cn。

为严重的地区之一^[3]。合理配置坡面植被是减少坡面水土流失的重要措施^[4],不同类型的植被覆盖能有效降低雨滴动能,增加土壤入渗、减少径流量与泥沙量^[5],同时壤中流是坡地径流的重要组成部分,对养分流失和流域径流产生都有重要的影响^[6]。已有的研究对于草本侵蚀产沙关系的经验性描述或定性研究较多,但对于不同植被类型条件下侵蚀产沙关系^[7],降雨入渗和壤中流的变化过程研究较少。另外,含碎石土壤在世界上有广泛的分布,中国国土面积的18%为碎石土壤^[8]。研究指出^[9],在强烈的物理风化和严重的土壤侵蚀作用下,三峡地区坡耕地土壤浅薄化和砾质化特征明显,根据野外调查结果,三峡地区坡耕地耕层土壤的碎石含量集中分布在5%~30%。目前,国内对于植被作用下对含碎石土壤坡面降雨入渗及径流侵蚀的影响研究更很少。

鉴于此,本文拟通过修建室内径流小区,铺设三峡地区的含碎石土壤,配置不同覆盖度的草本、灌木及草灌混合植被,利用人工模拟降雨试验,定量揭示出草本和灌木对含碎石土壤坡面降雨入渗及径流侵蚀的影响,进一步分析径流水沙关系及累计径流量及累计侵蚀量之间的关系。研究成果将对三峡地区含碎石土壤坡面水土流失治理具有科学的指导意义,同时可为水土流失预报模型的建立提供可靠的理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验装置

人工降雨试验在三峡大学水工厅水土保持试验基地进行。径流小区由砖头和水泥砌成,小区坡度分别为20°和30°,长2 m,宽0.5 m,深0.45 m,装土深度0.4 m,在径流小区径流出口砌一个集水池并预

埋PVC管用于收集坡面径流,垂直于出水口的径流小区底部预埋PVC管用于收集壤中流。试验所用的降雨设备采用南京南林电子科技有限公司生产的NLJY-10-01型便携式人工模拟降雨系统,降雨高度为4 m,降雨均匀度大于0.86。

1.2 试验下垫面设计

试验用土取自湖北省宜昌市丘陵区坡耕地表层红壤,对土壤进行自然风干,然后过孔径为10 mm的筛网,测得沙粒含量8.6%,粉粒含量74.6%,其黏粒含量16.8%,有机质含量1.5%。根据当地碎石含量分布情况,碎石含量初步设计为10%,试验碎石取自宜昌市南津关砂石厂,碎石粒径在5~45 mm之间,碎石过孔径为2 mm的筛网,去除粒径小于2 mm的沙粒,碎石密度为2.8 g/cm³。为了使含碎石土壤铺设均匀,进行每10 cm为一层分层铺设,土的容重控制在1.25 g/cm³,根据碎石含量为10%的质量比,经计算每层所需土和碎石质量分别为121.79和13.53 kg,然后将土和碎石混合均匀实施铺设,总共铺设厚度为40 cm。

1.3 设置立地条件

2014年5月12日在已铺设含碎石土壤的径流小区上面按照相应的草种比例播撒常见护坡草本植物狗牙根,同时育苗一定数量的护坡灌木植物多花木兰。7月中旬采用拔草方式控制狗牙根的覆盖度,同时进行多花木兰的移栽,采用“品”字形排列移栽。7—10月中旬期间采用数码相机垂直于植物对小区进行图像采集,利用ERDAS Imagine 2011分析软件对图像进行监督分类处理测定植物的覆盖度,然后对比所设计的覆盖度进行调整,10月下旬植被基本符合试验所设计的要求(表1)。

表1 不同径流小区的立地条件

| 植被种类 | 20°坡面小区 | | | | | 30°坡面小区 | | | | |
|-------|---------|------|------|------|------|---------|-----|-----|------|------|
| | 裸地 | 草本 | 草本 | 灌木 | 灌木 | 裸地 | 草灌 | 草本 | 灌木 | 灌木 |
| 覆盖度/% | 0 | 61.4 | 79.1 | 58.9 | 79.6 | 0 | 100 | 100 | 60.1 | 81.5 |

1.4 试验方法

根据三峡地区的降雨特征及坡耕地分布状况,试验降雨强度设置为60 mm/h,径流小区坡度为20°和30°。对每个径流小区降1场雨,总共进行10场降雨,利用均匀分布于径流小区的量筒,通过多次测定平均降雨强度对降雨强度实施率定。每次降雨开始前,先将小流域表层湿润,直至接近产生地表径流,以保证每次试验前期土壤含水率基本一致。然后将降雨强度调至设定值,在降雨开始产流后,开始计时,以

3 min为时间间隔通过坡面径流集水口接取全部水沙样以待测试,通过壤中流集水口接取壤中流,同时照相并对试验过程进行记录。产流30 min后关闭降雨器,将所接取的水沙过程样称重后,静置一段时间,倒掉上清液,并将剩余泥沙烘干称重,作为侵蚀量,水沙过程样重量减去相对应的泥沙及容器重量作为径流量。

产流强度为单位时间内产生的径流量,入渗量根据水量平衡原理计算得到,坡面降雨水量转化分为

入渗、蒸发和径流 3 个过程,由于试验在室内进行且时间较短,忽略降雨期蒸发,在试验前期进行了降雨,也可忽略植被截留。则径流量和入渗量之和近似等于坡面降雨量,其中各个时段降雨入渗率利用如下公式计算得出:

$$i = (pt \cos \alpha - 10R/S)/t \quad (1)$$

式中: i ——降雨时间 t 坡面平均入渗率(mm/min);
 p ——降雨强度 (mm/min); α ——地表坡度($^{\circ}$);
 R ——降雨时间 t 内产生的径流量(ml); S ——坡面实际承雨面积(cm^2); t ——降雨时间(min)。

2 结果与分析

2.1 不同坡面的径流量、入渗量和壤中流的特征分析

雨强 60 mm/h 条件下,10 种不同立地条件下的径流量、入渗量和壤中流如表 2 所示。

表 2 不同立地条件坡面的径流入渗参数

| 坡度 | 植被类型 (覆盖度) | 径流量/ kg | 入渗量/ kg | 壤中流/ g | 壤中流占 入渗量/% |
|-----|---------------|------------|------------|-----------|---------------|
| 20° | 草本(79.1%) | 19.295 | 15.542 | 2 527.73 | 16.26 |
| | 草本(61.4%) | 28.572 | 13.900 | 1 839.57 | 13.22 |
| | 灌木(58.9%) | 35.776 | 10.302 | 1 397.05 | 13.56 |
| | 灌木(79.6%) | 49.841 | 3.529 | 219.89 | 6.23 |
| | 裸坡 | 55.751 | 1.135 | 0 | 0 |
| 30° | 草灌(100%) | 16.653 | 17.653 | 5 777.88 | 32.73 |
| | 草本(100%) | 18.053 | 16.953 | 4 341.99 | 25.61 |
| | 灌木(81.5%) | 50.076 | 2.150 | 71.63 | 3.32 |
| | 灌木(60.1%) | 43.997 | 3.981 | 157.72 | 3.96 |
| | 裸坡 | 52.388 | 2.291 | 0 | 0 |

总体显示,裸坡的径流量最高,其次是灌木坡面,有草本覆盖的径流量最小,相应的裸坡的入渗量最少,灌木坡面居中,草本覆盖的坡面入渗量最大。表 2 可以看出草本覆盖度越高坡面径流量越少,入渗量越大,对于地表径流随草本植被盖度增大径流减小的原因是随着草本盖度的增加入渗增加^[10]。入渗增加的原因是草本植被能截留降雨,改变地表径流阻力系数、流速等水力特征^[11],地表径流产生时间得到了延缓,土体入渗水分相应增加。灌木覆盖度无论是 60% 还是 80% 的坡面产流量都大于草本盖度为 60% 的坡面,这主要与 2 种植物的根系特征有关,因为植物根系的密布缠绕可以提高土壤的渗透性^[12],本次试验狗牙根的根系为网状形式,而多花木兰生长初期的根系主要由一根垂直向下的主根及旁边较少的须根组成,因此 60% 覆盖度的狗牙根根系可能比 80% 的多花木兰根系更加庞大,渗透性更强。在相同覆盖度下的草灌混合坡面的径流量小于草本坡面,因为灌

木先对雨滴进行截留,由于地表还有草,因此几乎不存在林内 2 次降雨,增加了入渗,因而径流量最小,入渗量最大。

表 2 显示出,与草本坡面不同的是灌木 60% 坡面的覆盖度反而小于灌木 80% 覆盖度坡面的径流量,这可能与降雨强度及入渗特征有关,因为在一定的降雨强度下,雨滴的打击所产生的冲力对入渗速率的变化起着重要的作用,它不仅可以使入渗水流的运动速度得到加快,也可以使部分静止的毛管水进入到入渗水流中,从而造成入渗量增加^[13],灌木可以减小雨滴能量,并且形成 2 次降雨,覆盖度大的坡面减小雨滴能量的面积大,所以更大面积的雨滴能量减弱后,导致雨滴冲力不足以增加入渗,提高了径流,而没有经过灌木减能的雨滴冲击力刚好有助于入渗,因此产生了此种结果。此结果与张强等^[14]研究土质道路人工降雨试验的结论较相似。

从表 2 分析壤中流可以看出,在整个降雨过程中裸坡没有产生壤中流,有植被覆盖的坡面壤中流大于裸坡,且壤中流与入渗量有紧密的关系,随着入渗量的增大壤中流也增大。在有植被覆盖的坡面上,渗入土体内的水分增加,从而会使侧向流动的壤中流增多^[15]。另外,坡面地表受到雨滴的击打时,表土结皮会增加,表土结皮会破坏土壤孔隙,并使雨水在坡面停留的时间变短,导致入渗量减少,从而引起壤中流减少,而坡面地表植被能有效保护坡面免受雨滴的击打,减少表土结皮^[16]。

2.2 坡面产流和降雨入渗过程分析

土壤渗透性能控制着水分入渗^[17]。分析本次试验结果可知,不同立地条件坡面产流强度在试验开始时随时间有上升,之后流量随时间变化比较平稳,这是因为试验前对坡面进行了降雨处理,试验过程中初损较小,但是试验前并没有使坡面土壤充分饱和,导致降雨计时刚开始后有一定的入渗损失。10 种不同立地条件下径流小区的产流强度都是随降雨历时先增大后趋于平稳,而入渗率随降雨历时先减小后趋于平稳(图 1)。在同一立地条件下,产流强度和入渗率存在负相关的关系,产流强度越大,入渗率越小。裸坡稳定产流强度最大稳定入渗率最小。有植被的立地类型能够有效增加土壤入渗;草地在有植物根系的作用下,可以在一定程度上增加降雨入渗,草本植被覆盖度低,地表结皮较多,因而入渗率小。

对入渗率和坡面产流强度随时间的变化关系进行函数拟合,发现入渗率服从对数函数规律,产流强度呈幂函数变化。

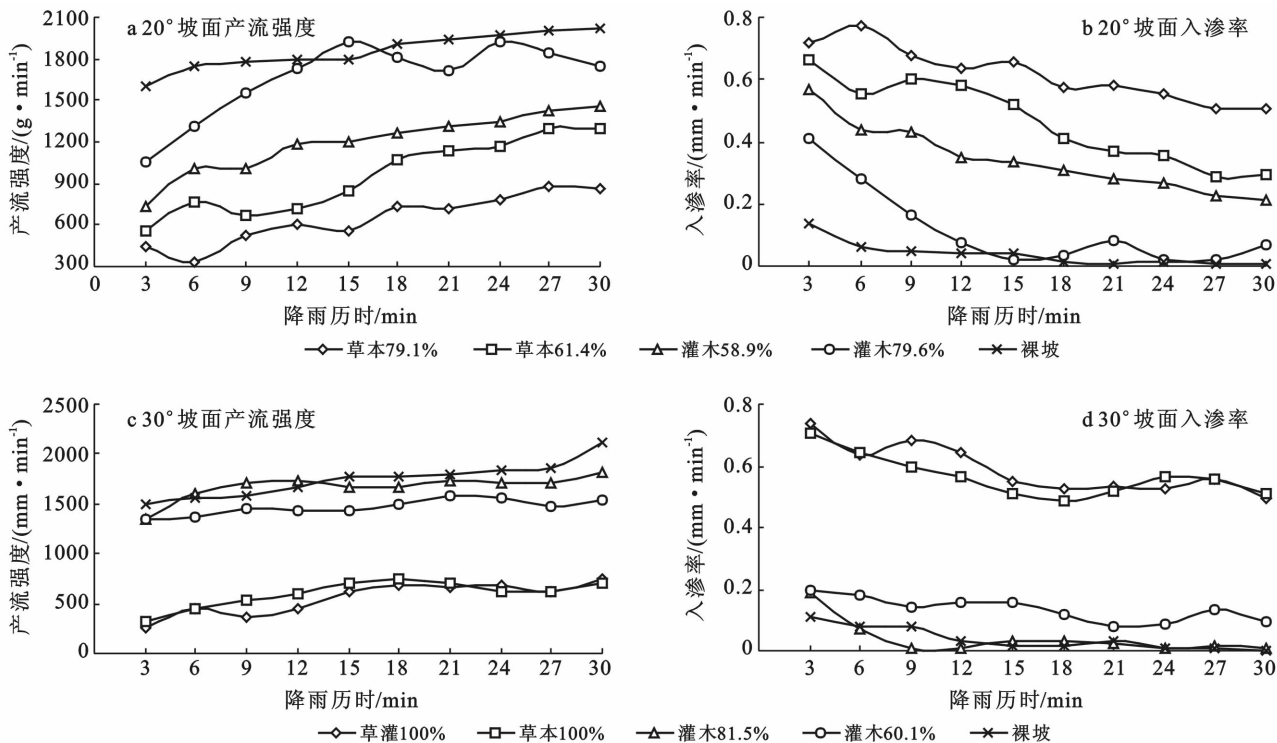


图 1 不同坡面产流强度及入渗率随时间变化过程

2.3 径流水沙关系分析

在坡面尺度上,对于有植被覆盖的人工草灌和自然修复坡面,其坡面径流水沙关系较裸坡坡面有较大不同^[18]。

图 2 为 10 个不同立地条件,在 60 mm/h 的雨强下,含沙量与侵蚀量之间的关系。

由图 2 可以看出,侵蚀量都是随含沙量的增加而逐渐增加。通过拟合,得到的表达式为 $y = ax + b$ (y 为产沙量, x 为含沙量),如表 3 所示,含沙量和侵蚀量之间呈线性函数的规律变化,且所有方程的相关系数均大于 80%,可见含沙量与侵蚀产沙量具有较好的相关性。

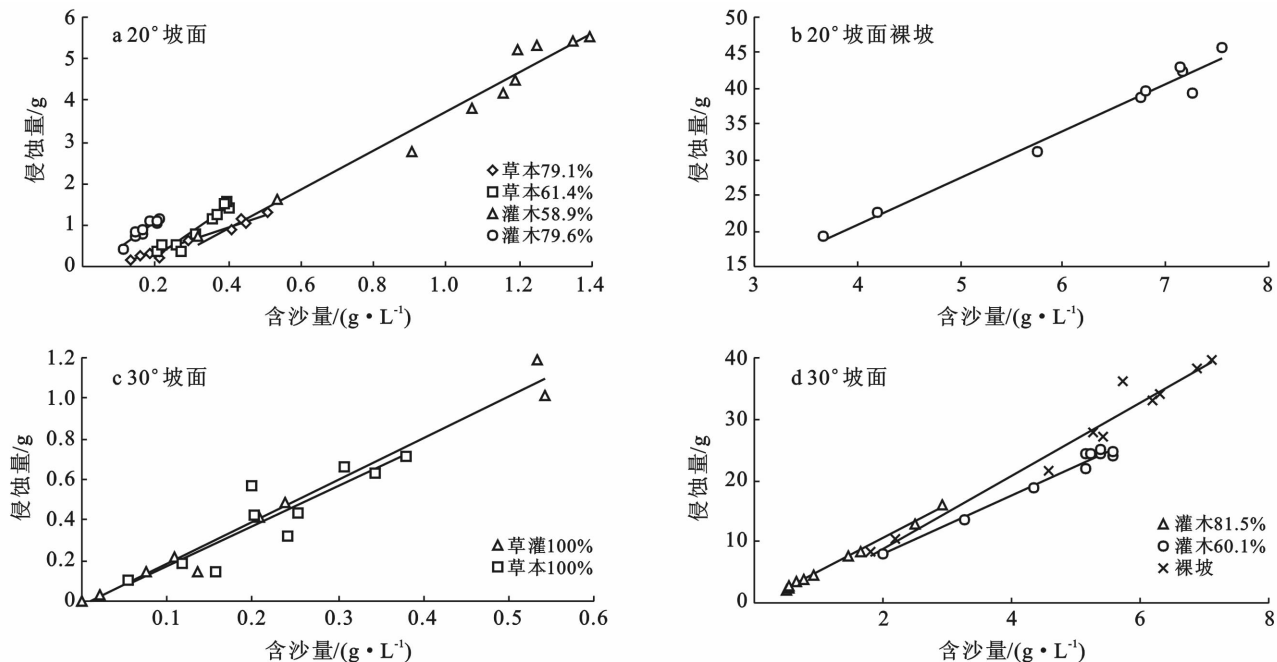


图 2 不同立地条件下侵蚀量和含沙量关系

结合实际物理意义和数学概念分析可知,系数 a 则更多地体现了不同立地条件下的产沙能力。裸坡的系数 a 要大于在草地和灌木地的系数,这主要是因为裸地没有植被覆盖,导致坡面径流输移能力较大,根据泥沙分散与搬运相匹配的原理可知,径流侵

蚀分散率正比于径流输沙能力与径流泥沙含量的差,它们的差值越大,则坡面径流的侵蚀分散率也越大。当对应于相同的含沙量情况时,径流的输移能力与坡面来水含沙量的差值就越大,因此产沙量就大,裸坡的 a 值最大。

表 3 不同立地条件下侵蚀量和含沙量关系及累计径流量和累计侵蚀量关系回归方程

| 坡度 | 植被类型 | 侵蚀量和含沙量 关系回归方程 | R^2 | 累计径流量和累计侵蚀量 关系回归方程 | R^2 |
|-----|----------|----------------------|---------------|------------------------|---------------|
| 20° | 草本 79.1% | $y=3.045 2x-0.275 8$ | $R^2=0.969 1$ | $y=0.112 1x^{1.320 1}$ | $R^2=0.989 3$ |
| | 草本 61.4% | $y=6.149 3x-1.012 4$ | $R^2=0.924 3$ | $y=0.169 0x^{1.194 2}$ | $R^2=0.997 6$ |
| | 灌木 58.9% | $y=4.717 2x-0.989 5$ | $R^2=0.961 5$ | $y=0.222 2x^{1.467 8}$ | $R^2=0.998 3$ |
| | 灌木 79.6% | $y=6.351 5x-0.190 1$ | $R^2=0.902 5$ | $y=0.148 0x^{1.018 7}$ | $R^2=0.998 3$ |
| | 裸坡 | $y=6.554 6x-5.288 7$ | $R^2=0.975 9$ | $y=2.286 3x^{1.236 3}$ | $R^2=0.995 1$ |
| 30° | 草灌 100% | $y=1.969 5x-0.026 5$ | $R^2=0.803 0$ | $y=0.181 3x^{1.152 8}$ | $R^2=0.989 0$ |
| | 草本 100% | $y=2.072 6x-0.021 2$ | $R^2=0.979 6$ | $y=0.009 6x^{2.008 7}$ | $R^2=0.954 9$ |
| | 灌木 81.5% | $y=5.432 4x-0.362 6$ | $R^2=0.997 1$ | $y=0.241 9x^{1.343 4}$ | $R^2=0.969 8$ |
| | 灌木 60.1% | $y=4.819 0x-1.793 6$ | $R^2=0.977 3$ | $y=0.835 8x^{1.373 3}$ | $R^2=0.998 3$ |
| | 裸坡 | $y=5.976 5x-3.177 3$ | $R^2=0.963 3$ | $y=1.207 4x^{1.486 7}$ | $R^2=0.996 6$ |

由表 3 的回归方程可以看出,覆盖度为 60% 的草本坡面与覆盖度为 60% 灌木坡面相比,当它们的产沙量一样时,草本坡面的含沙量要小于灌木坡面,此时草本坡面的径流量要大于灌木坡面,可以看出草地在径流量相对较大的情况下,产沙量却没有增加,这说明草地自身拦截泥沙的效益要强于它增加入渗减少径流的效益,草地对水沙的调控机制更多的是直接拦沙,而灌木的水沙调控机制体现的是蓄水减沙。与于国强等^[19]所研究的草地的水沙调控作用机制结论一致。

2.4 累计径流量与累计侵蚀量关系分析

在分析了不同立地条件下,降雨入渗及径流侵蚀规律的基础上,进一步分析累计径流量与累计产沙量的相关关系。

通过将不同降雨强度的所有试验的累计侵蚀量和累计径流量的相互关系进行函数拟合,发现累计侵蚀量和累计径流量的关系均满足幂函数形式 $y=Ax^B$ (其中 y 为累计侵蚀量, x 为累计径流量),见表 3,且所有方程相关系数均大于 95%,可见相关性比较好。通过对比可以发现系数 A, B 有一定的变化规律,结合数学概念与实际径流产沙的物理意义,最终定义系数 A 为产沙基数系数, A 值越大则产沙越多, A 值完全取决于立地条件;定义系数 B 为产沙速率系数,系数 B 的大小取决于入渗率的大小。与李洪丽^[20]等对东北黑土区的研究结果较相似,其所得的 B 值均大于 1,但与于国强^[19]等所研究的 B 值介于 0.5~1 之间的变化规律有所不同,以上可能是由于立地条件及土

壤的物理性质不同所造成。

从表 3 可以看出,在 60 mm/h 降雨强度下,累计侵蚀量随累计径流量的增加逐渐增加,但对于不同的立地条件,两者增加的幅度和速率是有所不同的。因为坡面各个配置条件下的减流减沙效益并不相同。

3 讨论与结论

(1) 裸坡的径流量最高,其次是灌木坡面,有草灌覆盖的径流量最小,草本盖度为 60% 的坡面的产流量小于灌木覆盖度 60% 和 80% 的坡面,相同覆盖度下草本的根系更发达,更有利于入渗;裸坡的壤中流流量为 0,有植被覆盖的坡面壤中流大于裸坡,随着入渗量的增大壤中流也增大。

(2) 10 种不同立地条件下径流小区的产流强度都是随降雨历时先增大后趋于平稳,而入渗率随降雨历时先减小后趋于平稳;产流强度和入渗率存在负相关的关系;入渗率服从对数函数规律,产流强度呈幂函数变化;草地在有植物根系的作用下,可以在一定程度上增加降雨入渗,草本植被覆盖度低,地表结皮就较多,入渗率小。

(3) 含沙量和侵蚀量之间呈线性函数,表达式为 $y=ax+b$ (y 为产沙量, x 为含沙量);草地对水沙的调控机制更多的是直接拦沙,而灌木的水沙调控机制更多体现的是蓄水减沙。

(4) 累计产沙量和累计径流量的关系均满足幂函数形式 $y=Ax^B$ (其中 y 为累计产沙量, x 为累计径流量),系数 A 值完全取决于立地条件,系数 B 的

大小取决于入渗率的大小;累计侵蚀量随累计径流量的增加逐渐增加,但对于不同的立地条件,两者增加的幅度和速率是有所不同的。

(5) 此次试验设计内容有限,不同坡度对入渗和径流侵蚀的影响缺少分析,后续会进一步考虑不同坡度和不同雨强的影响,进行更加深入的研究。

[参 考 文 献]

- [1] 向道友,滕云成,党修辉. 对我国水土保持现状的研究[J]. 水利科技与经济, 2010, 16(1): 82-83.
- [2] 吴昌广,林德生,肖文发,等. 三峡库区降雨侵蚀力时空分布特征[J]. 应用生态学报, 2011, 22(1): 151-158.
- [3] 王晖,廖炜,陈峰云,等. 长江三峡库区水土流失现状及治理对策探讨[J]. 人民长江, 2007, 38(8): 34-36.
- [4] 游珍,李占斌. 坡面植被对径流的减流减沙作用机理及试验研究[J]. 泥沙研究, 2011(3): 59-62.
- [5] Zhou Zhengchao, Shangguan Zhouping. Effect of ryegrasses on soil runoff and sediment control[J]. Pedosphere, 2008, 18(1): 131-136.
- [6] Anderson M G, Mcdonnell J J. Encyclopedia of hydrological sciences[M]. Chichester: John Wiley and Son, 2005: 1719-1732.
- [7] 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, 21(5): 593-599.
- [8] Ma Donghao, Shao Mingan. Simulating infiltration into stony soils with a dual-porosity model[J]. European Journal of Soil Science, 2008, 59(5): 950-959.
- [9] 王小燕,王天巍,蔡崇法,等. 含碎石紫色土坡面降雨入渗和产流产沙过程[J]. 水科学进展, 2014, 25(2): 189-195.
- [10] 王升,王全九,董文财,等. 黄土坡面不同植被覆盖度下产流产沙与养分流失规律[J]. 水土保持学报, 2012, 26(4): 23-27.
- [11] 李毅,邵明安. 草地覆盖坡面流水动力参数的室内降雨试验[J]. 农业工程学报, 2008, 24(10): 1-5.
- [12] 贾莲莲,李占斌,李鹏,等. 黄土区野外模拟降雨条件下坡面径流—产沙试验研究[J]. 水土保持研究, 2010, 17(1): 1-5.
- [13] Morin J, Winkel J V. The effect of raindrop impact and sheet erosion on infiltration rate and crust formation[J]. Soil Science of America Journal, 1996, 60(4): 1223-1227.
- [14] 张强,郑世清,田风霞,等. 黄土区土质道路人工降雨及放水试验条件下产流产沙特征[J]. 农业工程学报, 2010, 26(5): 83-87.
- [15] 尹忠东,左长清,高国雄,等. 江西红壤缓坡地壤中流特征研究[J]. 西北林学院学报, 2006, 21(4): 47-49.
- [16] 卜崇峰,蔡强国,张兴昌,等. 土壤结皮的发育特征及其生态功能研究述评[J]. 地理科学进展, 2008, 27(2): 26-31.
- [17] 耿晓东,郑粉莉,张会茹. 红壤坡面降雨入渗及产流产沙特征试验研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(4): 39-43.
- [18] 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): 28-31.
- [19] 于国强,李占斌,张霞,等. 野外模拟降雨条件下径流侵蚀产沙试验研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(4): 10-14.
- [20] 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.
- [20] 孙小静,秦伯强,朱广伟,等. 持续水动力作用下湖泊底泥胶体态氮、磷的释放[J]. 环境科学, 2007, 28(6): 1223-1229.
- [21] 李雷. 巢湖湿地沉积物中有机碳、氮、磷分布特征及其相关性研究[D]. 安徽 芜湖: 2010, 安徽师范大学.
- [22] 张倩. 水平潜流人工湿地去除受污染水体中磷的研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
- [23] 师荣光. 城郊土水界面污染流污染特征、空间分布及其生态风险[D]. 天津: 南开大学, 2009.
- [24] 杨丽原,沈吉,刘恩峰,等. 南四湖现代沉积物中营养元素分布特征[J]. 湖泊科学, 2007, 19(4): 390-396.
- [25] 孙顺才,黄漪平. 太湖[M]. 北京: 海洋出版社, 1993: 224-228.
- [26] 单监利. 杭州城市湿地沉积物中碳、氮及重金属时空分布特征和污染评价[D]. 杭州: 杭州师范大学, 2013.

(上接第 87 页)

- [15] 刘方,黄壤旱坡地磷积累、迁移及其环境影响评价[D]. 杭州: 浙江大学, 2002.
- [16] 郭建宁,卢少勇,金相灿,等. 低溶解氧状态下河网区不同类型沉积物的氮释放规律[J]. 环境科学学报, 2010, 30(3): 614-620.
- [17] 乌云,朝伦巴根,李畅游,等. 乌梁素海表层沉积物与上覆水间氮磷迁移规律分析[J]. 中国农村水利水电, 2011, 34(8): 34-38.
- [18] 陈孝杨,严家平,贺勇. 淮河流域安徽段水系沉积物中重金属和有机碳的含量研究[J]. 能源环境保护, 2008, 22(6): 24-32.
- [19] Weeks W F, Lee O S. Observation on the physical properties of sea ice at Hopedale, Labrador[J]. Arctic, 1958, 11(3): 135-155.