

寒旱环境黄土区植物护坡原位模拟降雨试验研究

李华坦¹, 赵玉娇¹, 李国荣¹, 胡夏嵩^{1,2}, 卢海静¹, 朱海丽¹

(1. 青海大学 地质工程系, 西宁 810016; 2. 中国科学院 青海盐湖研究所, 西宁 810008)

摘 要: 在自建试验区内为研究植物护坡水文效应, 本项研究采用野外模拟降雨试验的方法, 分别对种植柠条锦鸡儿 (*Caragana korshinskii* Kom.)、霸王 (*Zygophyllum xanthoxylon* Bunge Maxim.) 2 种灌木植物边坡和种植垂穗披碱草 (*Elymus nutans* Griseb.)、细茎冰草 (*Agropyron trachycaulum* Linn. Gaertn.) 2 种草本植物边坡, 以及作为对照组未种植植物的裸坡开展相同试验条件的模拟降雨试验。试验结果表明, 在相同试验条件下裸坡的稳定径流量和泥沙量均相对较大其值为 450.0~475.0 ml/min, 8.28~8.36 g/min; 种植霸王、柠条锦鸡儿边坡稳定径流量和泥沙量为 307.0~355.5 ml/min, 3.12~4.07 g/min; 种植细茎冰草边坡、垂穗披碱草边坡稳定径流量和泥沙量为 24.0~41.3 ml/min, 1.52~2.40 g/min, 该试验结果说明了坡面产生的稳定径流量和稳定泥沙量与边坡的覆盖度之间呈负相关关系以外, 还进一步反映出种植草本植物的边坡其坡面产生的稳定径流量、泥沙量则显著小于种植灌木植物边坡, 即种植灌木边坡其坡面产生稳定径流量、泥沙量分别是种植草本边坡的 1.338~1.466 倍、2.054~2.654 倍; 裸坡坡面以下 0—20 cm 处及坡面以下 20—40 cm 处含水率增幅分别为 38.94%, 11.08%; 种植柠条锦鸡儿、霸王边坡坡面以下相同深度处的 a 层、b 层含水率增幅为 42.24%~44.19%, 10.63%~11.76%, 种植垂穗披碱草、细茎冰草边坡坡面以下相同深度处的 a 层、b 层含水率增幅为 47.27%~48.11%, 13.98%~14.74%, 坡面以下 40—60 cm 处的 (c 层) 含水率变化相对不显著, 表明在边坡种植的草本和灌木植物, 在降雨坡面雨水入渗的过程中, 阻止和减少了坡面径流的形成, 同时亦反映出生长草本植物的边坡其阻止和减少坡面径流形成的作用相对显著于灌木植物; 裸坡的径流系数为 63.40%, 种植柠条锦鸡儿和霸王边坡径流系数则分别为 18.00% 和 20.33%, 细茎冰草和垂穗披碱草径流系数分别为 6.57% 和 1.71%, 草本植物边坡径流系数相对最小, 反映出草本植物其阻挡坡面雨水冲刷和侵蚀以及抑制地表径流作用等方面较灌木植物显著。

关键词: 黄土区; 植物边坡; 模拟降雨; 径流; 土壤侵蚀

中图分类号: P642.5

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2014)06-0304-08

Experimental Research on Slope Protection with Vegetation under Situ Rainfall Simulation in Cold and Arid Environment of Loess Area

LI Hua-tan¹, ZHAO Yu-jiao¹, LI Guo-rong¹, HU Xia-song^{1,2}, LU Hai-jing¹, ZHU Hai-li¹

(1. Department of Geological Engineering, Qinghai University, Xi'ning 810016, China;

2. Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xi'ning 810008, China)

Abstract: To study the hydrological effects of slope protection with vegetation, we carried out the method of situ rainfall simulation on the slopes covered by two shrubs *Caragana korshinskii* Kom., *Zygophyllum xanthoxylon* (Bunge) Maxim and on the slopes planted with 2 herbs *Elymus nutans* Griseb., *Agropyron trachycaulum* (Linn.) Gaertn., as well as on the control slopes without vegetation under the same test conditions. The results show that the stable runoff and sediment flux of the bare slope under the same test conditions are relatively bigger, the values are 450.0~475.0 ml/min and 8.28~8.36 g/min, respectively; the stable runoff and sediment fluxes of the slopes planted with *Zygophyllum xanthoxylon*, *Caragana korshinskii* are 307.0~355.5 ml/min and 3.12~4.07 g/min, respectively; the stable runoff and sediment fluxes of the slopes plan-

收稿日期: 2014-05-29

修回日期: 2014-07-06

资助项目: 国家自然科学基金资助项目(41162010); 教育部长江学者和创新团队发展计划资助(IRT13074); 青海省重点科研攻关资助项目(2003-N-134)

作者简介: 李华坦(1989—), 男, 河南太康人, 硕士研究生, 主要从事环境岩土工程与岩土体工程稳定数值模拟等方面的工作。E-mail: huatan2008@126.com

通信作者: 胡夏嵩(1965—), 男, 河南开封人, 教授, 博士, 主要从事地质工程与环境地质等领域的教学和研究工作。E-mail: huxiasong@tsinghua.org.cn

ted with *Agropyron trachycaulum*, *Elymus nutans* are 24.0~41.3 ml/min and 1.52~2.40 g/min, respectively. The data show that stable runoff and sediment flux are negatively related with slope vegetation coverage. Further studies show that the stable runoff and sediment flux of the slopes planted with herbs are significantly less than the slopes planted with shrubs, and the stable runoff and sediment flux of the slopes planted with shrubs is 1.338~1.466 times, 2.054~2.654 times of the slopes planted with herbs. The the increment rates of soil moisture contents in the layer(0—20 cm) and the layer(20—40 cm) are 38.94% and 11.08%, respectively; at the same depth, the increment rates of soil moisture contents of the slopes covered with *Caragana korshinskii*, *Zygophyllum xanthonylon* are 42.24%~44.19% and 10.63%~11.76%, respectively; and those of the slopes planted with *Elymus nutans*, *Agropyron trachycaulum* of at the same depth are 47.27%~48.11% and 13.98%~14.74%, respectively; the soil moisture content change in the layer (40—60 cm) is not significant. The data show that planting vegetation in the slopes can effectively prevent and reduce the slope runoff generation during the process of rainfall infiltration, and the effect of herb is more significant than that of the shrub in terms of reducing the runoff yield. The runoff coefficient of bare slope is 63.40%, for slopes planted with *Caragana korshinskii* and *Zygophyllum xanthonylon* the runoff coefficients are 18.00% and 20.33%, respectively and for slopes planted with *Agropyron trachycaulum* and *Elymus nutans* are 6.57% and 1.71%, respectively. The runoff coefficient of the slopes with herbs is relatively less than that of the slopes with shrubs, which indicates that the inhibitory role of herbs in resisting rain erosion and soil erosion and surface runoff is more significant than shrubs.

Key words: loess area; vegetation slope; rainfall simulation; runoff; soil erosion

植物生长的黄土边坡径流、产沙、入渗等规律的研究涉及到边坡稳定、生态环境建设和水土保持等多方面研究内容,植物有效拦蓄边坡径流、促进降雨入渗是生态环境建设和农业可持续发展的关键^[1-4]。我国黄土高原地处内陆腹地是世界上最大的黄土沉积区^[5],但由于该区植物稀疏夏季降雨集中且雨量大,雨水冲蚀作用相对较强,造成大量的水土流失现象^[6-7]。由黄土高原土壤侵蚀的统计数据表明,黄土高原多年平均输入黄河泥沙量多达 16 亿 t,成为黄河泥沙的主要来源^[8],故开展黄土区植物边坡降雨产流、产沙和茎叶降雨截流水文效应研究,对促进该区生态环境建设和农业可持续发展有着重要的意义。近年来关于黄土区植物边坡水文效应研究取得了大量成果,诸多学者研究认为植物因子是影响土质边坡的关键因素,且植物具有从根本上治理水土流失的能力^[9-10]。这种作用主要是通过植物茎叶冠层、地表枯落物层等来实现水土保持、涵养水源等水文功能,具体表现在降雨截留、削减溅蚀、控制地表径流等方面^[11-12]。植物茎叶的降雨截留作用能降低到达坡面的有效雨量,减少雨水对坡面土体侵蚀作用;削减溅蚀作用主要是通过地上茎叶的缓冲作用,消耗掉雨滴大量的动能,且能使大雨滴分散为小雨滴,从而实现将雨滴的动能大大降低;抑制地表径流作用主要表现在降低地表径流的冲刷,从而削弱雨水对边坡表层土体的冲蚀作用^[13-15]。

本研究以位于青藏高原与黄土高原交接地带的西宁盆地及其周边地区作为试验区,区内黄土较为发育即呈厚层状的黄土层位于其下伏的第三系红色泥岩层之上,黄土层的厚度为 50~100 m^[16]。本研究筛选出适应于当地气候条件下生长的 2 种草本植物和 2 种灌木植物作为研究对象,以未种植植物的裸坡作为对照试验,利用人工模拟降雨试验研究 2 种草本和 2 种灌木植物边坡的产流、产沙和茎叶降雨截流过程,分析种植霸王、柠条锦鸡儿等 2 种灌木和细茎冰草、垂穗披碱草等 2 种草本等不同植物类型边坡植物的茎叶水文效应及其有效防治坡面土壤侵蚀现象。

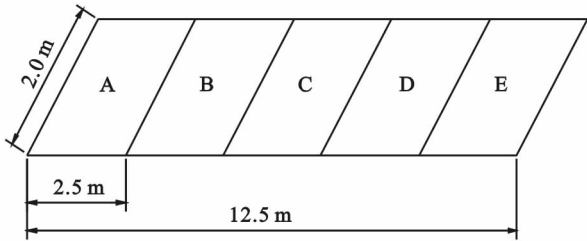
1 研究方法

1.1 试验区概况

本项研究的试验区位于西宁城北青海大学,地理坐标为东经 101°44′、北纬 36°43′,平均海拔为 2 261 m,年平均降水量为 380 mm,蒸发量为 1 363.6 mm,年平均日照为 1 939.7 h,区内年平均气温为 7.6℃,其中年平均最高气温为 34.6℃,最低气温为-18.9℃,属高原高山寒温性气候^[17]。区内发育有厚层状的黄土覆盖层,黄土自然边坡坡度较陡,坡面植物覆盖相对较差,研究区周边居民活动集中,区内每逢夏季暴雨频繁,水土流失、泥石流、滑坡等灾害相对发育。

该试验区边坡坡向为半阴半阳,坡度为 30°,属

于人工堆积土质边坡,土体类型以粉土为主。根据研究区气候条件和生长植物类型,本研究筛选出了2种优势草本和2种优势灌木植物,其中草本为细茎冰草(*Agropyron trachycaulum* Linn. Gaertn.)和垂穗披碱草(*Elymus nutans* Griseb.),灌木为柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii* Kom.)和霸王(*Zygophyllum xanthoxylon* Bunge Maxim.),以未种植植物的裸坡作为对照组。试验区划分为5个试验小区,每个试验小区的面积为 $2.0\text{ m}\times 2.5\text{ m}$ 。试验小区草本植物采用条播方式种植,行距为5 cm,灌木植物采用穴播方式种植,株距为5 cm。试验区种植方案如图1所示。



图中:A小区为种植柠条锦鸡儿,B小区为种植细茎冰草,C小区为种植霸王,D小区为种植垂穗披碱草,E小区为对照组即作为未种植植物的裸坡。

图1 试验区草本和灌木植物种植方案

1.2 试验设计与研究内容

本研究试验采用课题组自行设计的野外模拟降雨试验装置,按照恒压控制单位时间降雨量,人工控制模拟降雨过程中的降雨强度。依据试验区气候特点以及近50 a来的降雨量变化规律,故本项模拟降雨试验设定的降雨强度为 35.0 mm/h ^[18]。模拟降雨试验选取每个试验小区的部分区域,即面积为长2.0 m和宽1.0 m的坡面进行。为测定模拟降雨试验前未种植植物的裸坡,种植柠条锦鸡儿、霸王、细茎冰草、垂穗披碱草等4种植物边坡土体的含水率和天然密度,在模拟降雨试验前开挖边坡,分层取得不同深度位置处的分别用于测定土体含水率和天然密度的取土盒试样和环刀试样,取样深度为自边坡表面往坡体内部依次分为a层、b层、c层等3层,即a层为坡面以下0—20 cm,b层为坡面以下20—40 cm,c层为坡面以下40—60 cm;a层、b层、c层等3层土体含水率采用烘干法测得,a层、b层、c层等3层土体天然密度采用环刀法测得。现场原位模拟降雨试验过程中,按试验方案观测坡面地表径流过程、植物茎叶截流过程和表层土壤受侵蚀过程,并分别记录裸坡和种植霸王、柠条锦鸡儿、细茎冰草、垂穗披碱草等4种植物边坡的产流时间和单位时间地表径流量。对于降雨试验过程中地表径流的收集,本研究采用在坡

底放置长为100 cm、直径为50 cm的PVC管集流(将PVC管沿管口断面从中间截开将其中的一半放置坡体下方坡脚位置收集地表径流),待产流后每5 min取一次水沙样,测定一次径流量,水样中的泥沙量测定采用烘干法。在模拟降雨试验结束后采用和降雨前相同的方法测定相应土层的含水率和天然密度。最后根据试验数据绘制试验区坡面地表径流和泥沙形成的过程曲线;依据试验前后相应土层含水率变化情况,计算降雨试验过程中入渗量、植物茎叶截流量和径流系数。

上述的坡面入渗量、植物茎叶截流量、径流系数等3个指标,它们各自的计算方法如下。

(1) 坡面入渗量反映的是不同类型边坡保持水土的能力,其计算公式为:

$$L = [\rho_a d_a s \cdot (w_{a2} - w_{a1}) + \rho_b d_b s \cdot (w_{b2} - w_{b1}) + \rho_c d_c s \cdot (w_{c2} - w_{c1})] / (\rho s) \quad (1)$$

式中: L ——总入渗量(mm); s ——野外模拟降雨试验面积(m^2); ρ_a, ρ_b, ρ_c ——a层、b层、c层的干密度(g/cm^3); ρ ——水的密度(1.0 g/cm^3); w_{a1}, w_{a2} ——a层降雨前后含水率(%); w_{b1}, w_{b2} ——b层降雨前后含水率(%); w_{c1}, w_{c2} ——c层降雨前后含水率(%); d_a, d_b, d_c ——a层、b层、c层3层的每层入渗深度(cm)。

(2) 茎叶截流量反映植物地表茎叶吸收以及拦截雨水的程度,其公式为^[19]:

$$S = Y - L \quad (2)$$

式中: S ——植物茎叶截流量(mm); Y ——总降雨量(mm); L ——总入渗量(mm)。

(3) 径流系数 $A(\%)$ 指的是任意时段内的径流总量 $X(\text{mm})$ 与同时段内的降雨总量 $Y(\text{mm})$ 的比值,径流系数 A 综合反映模拟降雨过程中雨水转化为地表径流的百分比,综合反映流域内自然地理要素对径流的影响,其计算公式为^[20]:

$$A = X/Y \times 100\% \quad (3)$$

式中: A ——径流系数(%); Y ——总降雨量(mm); X ——总径流量(mm)。

(4) 含水率增幅指降雨前后含水率差的绝对值比降雨前的含水率,其计算公式为:

$$B = |w_2 - w_1| / w_1 \quad (4)$$

式中: B ——土体含水率增幅(%); w_1 ——模拟降雨前土体含水率(%); w_2 ——模拟降雨后土体含水率(%)。

(5) 为探讨试验区不同植物的降雨截流、削弱溅蚀、抑制地表径流等水文效应与边坡植物覆盖度之间的关系,本研究在模拟降雨试验前分别在柠条锦鸡

儿、霸王、细茎冰草、垂穗披碱草等 5 种植物边坡坡面上随机选定 5 个面积为 20 cm×20 cm 的样方,分别统计生长 150 d 的 2 种草本和 2 种灌木植物每个样方内植物的株数、株高、地径等生长量指标,试验区 4 种植物生长量指标统计结果如表 1 所示。试验区 2

表 1 试验区裸坡以及种植 4 种植物边坡植物生长量指标统计结果

边坡类型	平均植株数/	平均株高/	平均地径/	平均分蘖/	平均冠幅/	覆盖度/
	个	cm	mm	个	cm×cm	%
柠条锦鸡儿边坡	9	23.2	3.04	—	4.2×5.7	53.90
霸王边坡	8	17.5	2.84	—	4.7×5.0	47.00
细茎冰草边坡	16	36.7	—	6.8	—	100.00
垂穗披碱草边坡	15	34.8	—	6.2	—	100.00
未种植植物裸坡	—	—	—	—	—	0

注:1) 草本和灌木植物生长期均为 150 d;2) 裸坡未种植植物故其覆盖度为 0;3) “—”表示该项指标未进行统计,即草本统计的生长量指标为株高和分蘖数,灌木统计的生长量指标为株高、地径和冠幅;4) 细茎冰草和垂穗披碱草等 2 草本其边坡覆盖度采用目测法确定。

2 结果与分析

2.1 模拟降雨产流过程和土壤侵蚀过程分析

本项研究中分别对未种植植物的裸坡和种植植物的边坡,研究模拟降雨坡面产流形成过程和边坡土壤侵蚀过程。其中试验区裸坡径流量与降雨历时的关系如图 2 所示。由该图可知,在降雨历时为 0~10 min 内坡面地表径流量由 0 增大至 392.0 ml/min,之后地表径流量趋于稳定状态且其值为 450.0~475.0 ml/min。在种植柠条锦鸡儿和霸王边坡模拟降雨过程中随着降雨历时增加,地表径流量在降雨历时为 35 min 内存在有缓慢增大的趋势,且种植 2 种灌木植物边坡在径流量的增幅上变化相对不显著,最终径流量分别趋于稳定,其中柠条锦鸡儿边坡稳定径流量为 307.0~316.5 ml/min、霸王边坡稳定径流量为 350.0~355.5 ml/min,由上述径流量大小反映了在降雨历时持续 35 min 后,植物茎叶截流量达到饱和状态并使得边坡表面土体中的雨水开始达到稳定下渗。在种植垂穗披碱草和细茎冰草的边坡上地表径流产生的时间在降雨历时为 25~30 min 时,地表径流量随降雨历时变化相对不大,边坡产生地表径流后种植垂穗披碱草边坡的稳定径流量为 24.0 ml/min、种植细茎冰草边坡的稳定径流量为 41.3 ml/min。

形成不同植物类型边坡产流时间的差异和稳定径流量差异的主要原因,归因于未种植植物的裸坡和种植植物边坡的地表覆盖度大小不同,进而产生上述产流时间和稳定径流量的不同。由表 1 可知,试验区生长期为 150 d 的柠条锦鸡儿和霸王的边坡覆盖度分别为 47.0%和 53.9%,生长期为 150 d 的垂穗披碱草和细茎冰草的边坡覆盖度均为 100%,且每株草本植物的平均分蘖数为 6 个,茎叶多且草本植物平均株高

种灌木植物其边坡覆盖度的计算方法为^[21]:
$$C=N\times S_1/S \tag{5}$$
式中:C——边坡覆盖度(%);N——样方内平均株数(个);S₁——单株灌木平均冠幅(cm²);S——样方面积 400 cm²。

为 34.8~36.7 cm,而灌木植物平均株高为 17.5~23.2 cm,相对草本植物株高较低,且灌木植物冠幅为 23 cm²,故草本植物其相对繁茂的茎叶在坡面形成相对于灌木密集的截流层。由图 2 所示的径流量与降雨历时关系曲线可知,裸坡开始产生径流时间为 2 min,种植霸王和柠条锦鸡儿边坡产生径流的时间为 7~8 min,种植垂穗披碱草和细茎冰草边坡径流产生的时间为 25~30 min。由上述试验数据表明,降雨初期草本植物较灌木植物相对较好地阻止了雨滴直接击打坡面,从而使坡面地表产流时间相对滞后,种植植物边坡开始产流时间均较裸坡开始产流时间相对滞后,说明植物能较好抑制坡面地表径流,从而起到削弱雨水对坡面的冲刷作用。

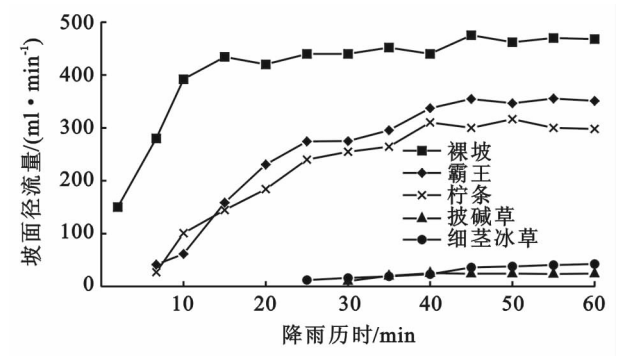


图 2 试验区裸坡和 4 种植物边坡径流量与降雨历时关系曲线

本项研究中,试验区未种植植物的裸坡与种植草本、灌木植物边坡的坡面土壤侵蚀作用过程及其结果如图 3 所示。由该图可知,裸坡的泥沙量明显较种植 4 种植物覆盖的边坡泥沙量要大,即在相同模拟降雨条件下裸坡受到雨水的冲蚀作用较种植植物边坡大,其中降雨过程中裸坡产生的泥沙量在降雨历时为 15 min 时到达峰值为 11.8 g/min,之后泥沙量趋于平稳

其值为 8.28~8.36 g/min;种植柠条锦鸡儿和霸王边坡泥沙量分别在降雨后 25 min 和 30 min 时到达最大值,其泥沙量峰值分别为 5.2 g/min 和 5.82 g/min,2 种灌木边坡在降雨历时为 45 min 左右至稳定状态,霸王边坡产流量稳定值为 4.07 g/min,柠条锦鸡儿边坡泥沙量稳定值为 3.12 g/min,故种植 2 种灌木植物边坡的泥沙量之间的差异相对较小,且种植霸王的边坡出现泥沙量峰值时间较种植柠条锦鸡儿边坡的泥沙量峰值稍早,但种植霸王边坡其最后形成的稳定泥沙量相对较小;而分别种植垂穗披碱草和细茎冰草边坡泥沙量未出现明显的峰值,泥沙量均处于平稳状态,种植细茎冰草和垂穗披碱草的泥沙量稳定值变化为 1.5~2.4 g/min,故种植细茎冰草和垂穗披碱草等 2 种草本植物的边坡泥沙量变化相对不显著,即在任意相同时间段内种植灌木植物边坡的泥沙量均大于草本植物边坡的泥沙量,说明草本植物防治坡面土壤侵蚀作用相对显著于灌木植物。产生上述坡面泥沙量差异的主要原因归因于边坡坡面覆盖度不同,未种植植物的裸坡和覆盖度相对较低的 2 种灌木边坡,其降雨的雨滴部分可直接降落至坡面并对其表层土体产生较强的冲击作用进而形成坡面径流。在模拟降雨初期阶段可被坡面径流搬运的土颗粒相对较多,故在图 3 所示的泥沙量与时间关系曲线中形成一上升趋势,且经过一段时间至峰值,之后因为雨水对坡面土体冲击所产生的夯实作用和水分入渗使相对细小的土颗粒充填土壤空隙,使土壤出现结皮现象,坡面土壤抗侵蚀能力增大故产沙量下降^[22]。此时坡面地表径流趋于稳定,坡体表面雨水冲刷能力亦趋于稳定,开始进入边坡表层细沟发育阶段,最终泥沙量达到稳定。试验区种植柠条锦鸡儿和霸王等 2 种灌木植物边坡由于其地上部分茎叶未完全覆盖整个边坡表层,边坡表层其泥沙量变化规律和裸坡泥沙量变化规律基本相一致,而种植垂穗披碱草和细茎冰草等 2 种草本植物边坡表面相对完全覆盖边坡,起到有效阻止雨滴直接冲击坡面表层土壤作用,反映了植物茎叶部分起到较好地防治坡面土壤侵蚀作用,故在研究区所筛选的 2 种草本植物覆盖边坡程度较灌木植物相对完全,且在模拟降雨过程中形成的泥沙量亦相对较小,反映出其有效防治坡面土壤侵蚀作用较试验区所选 2 种灌木相对显著。

2.2 模拟降雨径流累积量和泥沙累积量特征分析

试验区未种植植物的裸坡及种植 2 种草本和 2 种灌木植物边坡累积径流量、累积泥沙量与降雨历时关系曲线如图 4、图 5 所示。由图 4、图 5 可知,试验区种植 5 种植物的不同类型边坡的累积径流量和累

积泥沙量的特征曲线表现出相对较一致的规律,即表现在裸坡的累积径流量和累积泥沙量的增长趋势相对较显著,灌木植物边坡次之,草本边坡相对最小。由图 4 可知,裸坡的 1 h 最大累积径流量为 26.8 L,其值均大于种植植物边坡的累积径流量;柠条锦鸡儿和霸王边坡 1 h 最大累积径流量分别为 13.7 L 和 14.7 L,即灌木植物边坡的累积径流量由大至小依次为霸王边坡、柠条锦鸡儿边坡;种植垂穗披碱草和细茎冰草边坡 1 h 最大累积径流量分别为 0.65 L 和 1.10 L,即草本植物边坡的累积径流量表现在细茎冰草边坡较垂穗披碱草边坡累积径流量大,而种植灌木植物的累积径流量均大于种植草本植物边坡的累积径流量。由图 5 表明裸坡的累积泥沙量为 545.9 g,均大于种植植物边坡的累积泥沙量;种植柠条锦鸡儿和霸王边坡最大累积泥沙量分别为 189.6 g 和 227.3 g,即种植霸王边坡的累积泥沙量大于种植柠条锦鸡儿边坡的累积泥沙量;种植垂穗披碱草和细茎冰草边坡最大累积径流量分别为 18.0 g 和 23.6 g,2 种草本植物边坡的累积泥沙量由大至小依次为细茎冰草边坡、垂穗披碱草边坡,而种植灌木植物的累积泥沙量均大于种植草本植物边坡。通过对比边坡累积径流量和累积泥沙量大小可知,种植植物的边坡均能显著提高边坡表层的抗雨水冲蚀能力,植物覆盖度愈大则其累积径流量和累积泥沙量相对愈小。这主要是由于坡面种植植物能有效阻延坡面地表径流形成和有效减少边坡表层土壤流失,且植物浅表层根系能阻延边坡细沟的形成,从而提高了边坡表层土体整体的抗侵蚀能力^[23]。试验区种植生长期为 150 d 的细茎冰草、垂穗披碱草等 2 种草本植物具有生长快和分蘖多的优势,因此能在相对较短时间增加边坡表层覆盖度,而生长期为 150 d 的柠条锦鸡儿、霸王等 2 种灌木植物生长相对较慢且冠幅较小,亦能在一定程度上遮蔽边坡土体,故试验区种植 2 种草本植物的边坡,植物在防治其坡面水土流失等灾害现象表现出相对显著的优势。

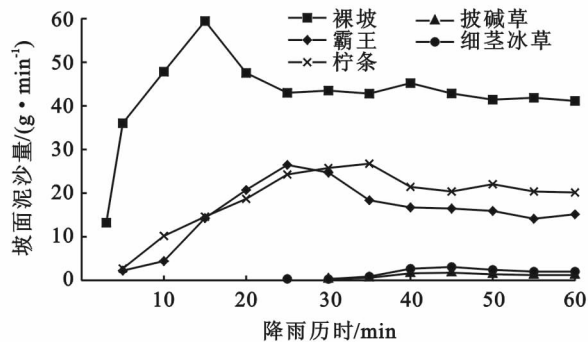


图3 试验区裸坡和4种植物边坡坡面泥沙量与降雨历时关系曲线

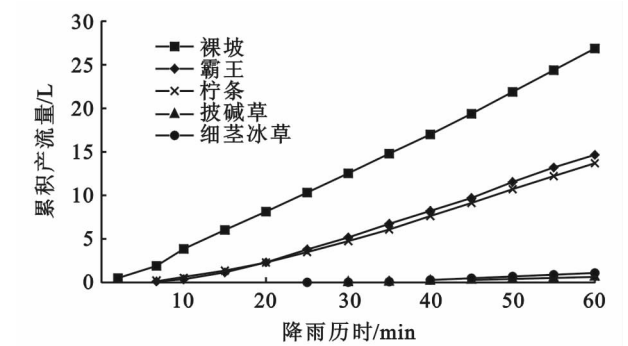


图 4 试验区 5 种边坡坡面累积径流量与降雨历时关系曲线

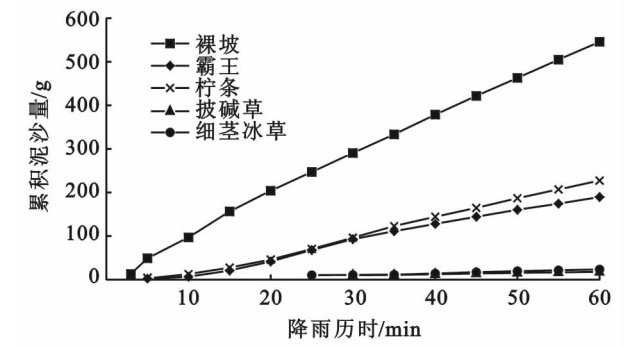


图 5 试验区坡 5 种边坡坡面累积泥沙量与降雨历时关系曲线

2.3 模拟降雨前后裸坡与种植 4 种植物边坡不同深度土体含水率分析

由表 2 可知,降雨前裸坡 a 层含水率为 18.33% 其值较种植植物边坡含水率要小,其主要原因在于裸坡在自然环境下受到光照、温度等外界因素影响增大其坡体表面蒸发量,但植物边坡能遮挡光照而减少坡面蒸发量,且植物存在能使坡面表层径流转化为入渗,致使在降雨试验前边坡表层含水率存在一定差异。降雨试验结束后开挖相应边坡测得边坡不同深度位置处的含水率,即裸坡 a 层土体含水率为 27.30%,种植柠条锦鸡儿和霸王边坡 a 层土体含水率分别为 27.18%和 26.58%,种植垂穗披碱草和细

茎冰草边坡 a 层土体含水率分别为 30.17%和 29.97%;降雨试验后裸坡 b 层土体含水率为 18.05%,种植柠条锦鸡儿、霸王边坡 b 层土体含水率分别为 18.75%,18.00%,种植垂穗披碱草、细茎冰草等 2 种植物边坡 b 层土体含水率均为 20.71%;降雨试验后 c 层土体在含水率变化相对不大。图 6 反映的是试验区 5 种类型边坡模拟降雨前后,坡体不同深度位置土体含水率变化关系,由图可知,裸坡模拟降雨后 a 层土体含水率增幅为 38.94%,种植柠条锦鸡儿、霸王等 2 种灌木植物边坡的 a 层土体含水率增幅分别为 44.19%,42.24%,种植垂穗披碱草、细茎冰草边坡等 2 种草本植物边坡 a 层土体含水率增幅分别为 48.11%,47.27%;裸坡模拟降雨前后 b 层土体含水率增幅 11.76%,种植柠条锦鸡儿和霸王等 2 种灌木植物边坡 b 层土体含水率增幅分别为 11.08%,10.63%,种植垂穗披碱草、细茎冰草等 2 种草本植物边坡 b 层土体含水率增幅分别为 14.74%,13.98%;5 种边坡地表以下 c 层土体含水率变化相对不大。由以上含水率幅度变化数据表明,试验区种植 2 种灌木边坡 a 层土体含水率和裸坡 a 层土体含水率之间差别相对不大,但种植 2 种草本植物边坡 a 层土体含水率则显著大于裸坡和种植灌木植物边坡,这是由于草本植物根系为须状根系且多集中分布在坡面以下的 a 层土体,故坡体浅表层土质相对松软、孔隙相对较多,有利于坡体表层雨水下渗;灌木植物根系主要为直根型,故在坡面以下 a 层其土体含水率和裸坡含水率变化相对不显著;对于坡面下的 b 层土体,由于模拟降雨试验中雨强相对较小且降雨历时有限,故降雨入渗相对 a 层少且土体含水率变化幅度相对不显著;坡面以下的 c 层土体含水率相对变化不大,说明模拟降雨过程中降雨未入渗至该深度位置。

表 2 试验区 5 种边坡坡体模拟降雨前后坡面不同深度位置土体含水率及增幅计算结果

边坡类型	试验条件	每层土体平均含水率/%			土体含水率增幅/%		
		a 层	b 层	c 层	a 层	b 层	c 层
裸坡	降雨前	18.33	17.15	16.86	38.94	11.76	0.83
	降雨后	27.30	18.05	17.00			
柠条锦鸡儿边坡	降雨前	19.25	16.18	16.85	44.19	11.08	0.36
	降雨后	27.18	18.75	16.91			
细茎冰草边坡	降雨前	20.35	18.05	16.00	47.27	13.98	1.60
	降雨后	29.97	20.71	16.46			
霸王边坡	降雨前	17.81	16.27	15.38	42.24	10.63	0.96
	降雨后	26.58	18.00	15.73			
垂穗披碱草边坡	降雨前	20.37	18.83	17.42	48.11	14.74	2.59
	降雨后	30.17	20.71	17.06			

注:1) 试验条件指的是模拟降雨前后分别开挖边坡取样,每层中取 4 个含水率试样并求其平均值测得平均含水率;2) 土体含水率增幅指的是模拟降雨前后土体含水率差的绝对值与降雨前的土体含水率之比,其计算公式为文中公式(3);3) a 层指的是坡面以下 0—20 cm 位置,b 层指的是坡面以下 20—40 cm 位置,c 层指的是坡面以下 40—60 cm 位置。

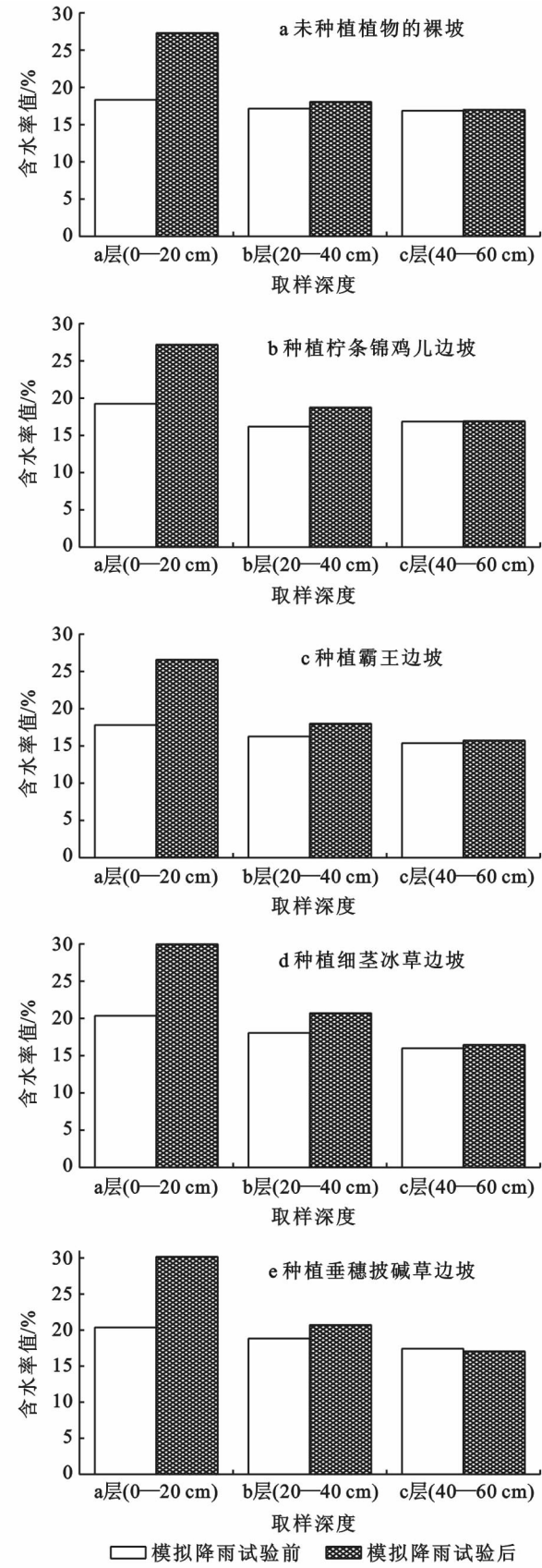


图 6 试验区裸坡与植物边坡模拟降雨前后含水率变化关系

2.4 模拟降雨边坡入渗总量、茎叶截流量和径流系数分析

植物茎叶截流量和雨水入渗量是反映植物保持

水土、涵养水源和土壤抗侵蚀能力的重要参数,径流系数是指在降水量中有多少降水形成了径流,它综合反映了流域内自然地理要素对径流的影响^[24]。由入渗量计算公式(1)和表 2 所示的坡体不同深度含水率数据,计算得到试验区 5 种类型边坡的入渗量,计算结果如表 3 所示。由表 3 可知,细茎冰草和垂穗披碱草 2 种草本植物边坡茎叶的截流量分别为 12.8 mm 和 13.3 mm,均大于柠条锦鸡儿和霸王 2 种灌木植物的茎叶截流量,即分别为 10.3 mm 和 8.6 mm;裸坡的径流系数为 63.4%,柠条锦鸡儿和霸王边坡径流系数分别为 18.00%和 20.33%,种植草本植物边坡径流系数相对较小,细茎冰草和垂穗披碱草边坡径流系数分别为 6.57%和 1.71%。由上述反映边坡种植植物的茎叶截流量、径流系数等相关试验数据可知,试验区 2 种草本植物边坡坡面覆盖度相对最大其径流系数相对最小,种植垂穗披碱草边坡表层形成的径流其径流系数小于种植细茎冰草边坡的径流系数;2 种灌木植物边坡坡面覆盖度相对较 2 种草本植物覆盖度小,故灌木植物其边坡径流系数相对较大,其中种植柠条锦鸡儿边坡径流系数小于种植霸王边坡的径流系数;未种植植物的裸坡径流系数相对最大,反映出其坡面土壤侵蚀作用相对显著于种植植物的边坡。综上所述,试验区种植 2 种草本植物边坡在其坡面茎叶覆盖作用下,能有效减少坡面地表径流增加雨水入渗,且浅层根系一定程度上具有增加土壤孔隙度、增加雨水入渗作用和减少雨水对坡面冲刷作用;试验区 2 种灌木植物坡面覆盖度相对较小,但亦能在一定程度上抑制坡面地表径流产生;裸坡则受到雨水的直接冲刷,坡面结皮现象明显,故其径流系数相对最大。

表 3 试验区裸坡和 4 种植物边坡坡面径流系数计算结果

边坡类型	入渗量/ mm	累积径流 量/mm	茎叶截流 量/mm	径流 系数/%
裸坡	12.8	22.2	0	63.42
柠条锦鸡儿边坡	18.4	6.3	10.3	18.00
细茎冰草边坡	19.9	2.3	12.8	6.57
霸王边坡	19.3	7.1	8.6	20.33
垂穗披碱草边坡	21.1	0.6	13.3	1.71

注:表中入渗量、茎叶截流量和径流系数计算方法分别按文中所述公式(1),(2),(3)计算,计算过程中分别将 a 层土体、b 层土体、c 层等 3 层土体的实测含水率值代入公式计算。

3 结论

(1) 本项研究在试验区所种植生长期为 150 d 的 4 种植物,其地上茎叶部分对边坡坡面的覆盖度由大至小依次为垂穗披碱草、细茎冰草、柠条锦鸡儿、霸王;裸坡和种植 4 种植物的边坡其坡面稳定径流量和

稳定土壤侵蚀量由大至小依次为裸坡、霸王、柠条锦鸡儿、细茎冰草、垂穗披碱草,故在相同降雨强度条件下坡面形成稳定径流量、稳定土壤侵蚀量与植物覆盖度之间呈负相关关系。

(2) 通过分析裸坡和种植4种生长期为150 d的植物边坡的累积径流量和累积泥沙量可知,相同降雨强度下裸坡受到雨水冲蚀作用相对最大,其值分别为26.8 L和545.9 g,植物边坡累积径流量和累积泥沙量表现出大小一致的规律,反映出试验区2种草本植物在防治坡面土壤侵蚀等方面具有相对显著的优势,同时对于生长期大于150 d的灌木和草本植物之间的对比有待于进一步研究。

(3) 模拟降雨试验前后对比边坡不同深度含水率增幅可知,种植草本植物边坡a层、b层含水率变化相对较大,种植灌木植物边坡次之,裸坡相对最小,c层土体相对其上的a层和b层则其土体含水率变化相对较小,说明在模拟降雨过程中有一部分降水入渗至b层深度,而降水未入渗至c层深度位置。反映了降雨过程中边坡植物茎叶在发挥其降雨截流作用的同时,部分截流的雨水向边坡土体深层入渗,且种植草本边坡坡面以下a层、b层、c层等3层土体含水率变化相对显著于种植灌木植物边坡。

(4) 种植垂穗披碱草边坡的径流系数相对较小为1.71%,2种灌木中种植柠条锦鸡儿坡面覆盖度相对较大,其径流系数为18.00%,显著地小于裸坡产生的径流系数为63.42%,以上数据表明了坡面种植植物能有效防治坡面表层径流形成,从而有效地减少雨水对坡面冲刷作用,并促使部分地表径流转化为入渗,而有助于有效防治坡面表层土壤侵蚀和水土流失等灾害现象的发生。本项研究中所筛选出的4种植物,其坡面降雨截流、抑制地表径流和减少雨水溅蚀等水文效应贡献,由大至小依次为垂穗披碱草、细茎冰草、柠条锦鸡儿、霸王。

参考文献:

- [1] 陈洪松,邵明安.黄土区坡地土壤水分运动与转化机理研究进展[J].水科学进展,2003,14(4):513-520.
- [2] 彭辉.黄土高原流域生态水文模拟和植被生态用水计算[D].北京:中国水利水电科学研究院,2013.
- [3] 包含,侯立柱,刘江涛,等.室内模拟降雨条件下土壤水分入渗及再分布试验[J].农业工程学报,2011,27(7):70-75.
- [4] 周佩华,王占礼.黄土高原土壤侵蚀暴雨的研究[J].水土保持学报,1992,6(3):1-5.
- [5] 孙建中,赵景波.黄土高原第四纪[M].北京:科学出版社,1991.
- [6] 黄土高原区域治理与评价[M].北京:科学出版社,1992.
- [7] Fu B, Chen L, Ma K, et al. The relationships between land use and soil conditions in the hilly area of the Loess Plateau in northern Shaanxi, China[J]. Catena, 2000,39(1):69-78.
- [8] 卢金发,黄秀花.黄河中游土地利用变化对输沙的影响[J].地理研究,2003,22(5):571-578.
- [9] 朱冰冰,李占斌,李鹏,等.草本植物覆盖对坡面降雨径流侵蚀影响的试验研究[J].土壤学报,2010,43(3):401-407.
- [10] 周德培,张俊云.植被护坡工程技术[M].北京:人民交通出版社,2003.
- [11] 骆汉,赵廷宁,彭贤锋,等.公路边坡绿化覆盖物水土保持效果试验研究[J].农业工程学报,2013,29(5):63-70.
- [12] 韦红波,李锐,杨勤科.我国植被水土保持功能研究进展[J].植物生态学报,2002,26(4):489-496.
- [13] Kusumandari A, Mitchell B. Soil erosion and sediment yield in forest and agroforestry areas in west Java, Indonesia[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1997,52(5):376-380.
- [14] 罗伟祥,白立强,宋西德,等.不同覆盖度林地和草地的径流量与冲刷量[J].水土保持学报,1990,4(1):30-35.
- [15] 余新晓,张晓明,武思宏,等.黄土区林草植物与降水对坡面径流和侵蚀产沙的影响[J].山地学报,2006,24(1):19-26.
- [16] 张启龙,杨刚.西宁盆地第三系地层对工程的影响[J].铁道勘察,2010(1):31-33.
- [17] 杨东,王慧,程军奇,等.近50年青海省气候变化特征及其与ENSO的关系[J].生态环境学报,2013,22(4):547-553.
- [18] 马汝忠.近50年西宁地区雷暴日气候变化特征分析[J].青海气象,2009(2):15-18.
- [19] 杨占凤,乔娜,李臻,等.西宁盆地周边灌木植物护坡水文效应影响要素研究[J].工程地质学报,2010,18(S):463-467.
- [20] 卢龙彬,付强,黄金柏.黄土高原北部水蚀风蚀交错区产流条件及径流系数[J].水土保持研究,2013,20(4):17-23.
- [21] 张光辉,梁一民.植被盖度对水土保持功效影响的研究综述[J].水土保持研究,1996,3(2):104-110.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 武晟,汪志荣,张建丰,等.不同下垫面径流系数与雨强及历时关系的实验研究[J].中国农业大学学报,2006,11(5):55-59.