

# 西南地区几种典型边坡植被的护坡效益分析

孙 华<sup>1</sup>, 赵雪峰<sup>2</sup>, 何茂萍<sup>2</sup>

(1. 重庆水利电力职业技术学院 市政工程系, 重庆 永川 402160; 2. 成都大学 城乡建设学院, 成都 610106)

**摘 要:** 植被对边坡防护有着非常重要的作用,但其防护效果易受配置模式及建植年限的影响。以西南地区 5 种典型边坡植被配置模式为对象,比较了不同配置模式的护坡性能及建植年限等因素所致的年际间差异。坡上设景观过渡带(株行距分别为  $0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ ,  $0.05\text{ m} \times 0.1\text{ m}$  的小乔木、地被植物),坡下为不同配置的坡面防护带(喷播密度为  $10\text{ g/m}^2$  的灌木、草本植物):  $M_1$  为慈竹—野牛草,  $M_2$  为小冠花—紫羊茅,  $M_3$  为苜蓿—狗牙根,  $M_4$  为小冠花—黑麦草,  $M_5$  为黄荆—狗尾草。测定了成渝高速永川段 2012—2014 年各植被配置模式在自然降雨条件下的产流、产沙特征。结果表明: (1) 建坪初期,狗尾草所在群落( $M_5$ )生长快、成坪早,在 2012 年汛期即呈现较强的护坡性能;蓄水、保土能力分别达到 59.14%, 96.22%, 产流量、产沙量( $61.2\text{ mm}$ ,  $52.0\text{ g/m}^2$ )也明显低于其他小区( $p < 0.05$ );狗牙根、黑麦草等多年生草本所在群落成坪迟、生长慢,护坡性能普遍较差。(2) 2013 年汛期,  $M_1$ — $M_4$  的护坡性能较 2012 年明显提高,以  $M_3$ ,  $M_4$  最为显著。(3) 2014 年汛期,具有发达根系的狗牙根所在群落护坡性能最强;蓄水、保土能力分别达到 80.03%, 98.49%;  $M_5$  的护坡性能最差,其产流量、产沙量( $62.1\text{ mm}$ ,  $150.33\text{ g/m}^2$ )也明显高于其他观测区。相同降雨条件下,边坡植被的护坡性能与群落结构有关,即建坪初期与地上生物量大小正相关,之后与根系重量正相关。

**关键词:** 边坡; 植被类型; 水土保持; 生态护坡

中图分类号: S157.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2015)04-0006-06

## Analysis of Ecological Benefits of Side Slope Protection by Typical Vegetation Along the Highway in Southwest Areas

SUN Hua<sup>1</sup>, ZHAO Xuefeng<sup>2</sup>, HE Maoping<sup>2</sup>

(1. Chongqing Water Resources and Electric Engineering College, Yongchuan,

Chongqing 402160, China; 2. Faculty of Urban and Rural Construction, Chengdu University, Chengdu 610106, China)

**Abstract:** Using localization shrubs to reconstruct plant communities plays a very important role in superhighway side slope ecological protection, but its protection effect is easily affected by the configuration mode and reconstructing years. In this case, five typical vegetation modes composed by landscape transitional zone (ornamental arbors with  $0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$  of spacing + ground-cover plants with  $0.05\text{ m} \times 0.1\text{ m}$  of spacing in the rows) and slope protection zone (shrubs + herbages with  $10\text{ g/m}^2$  of planting density), including *Neosino calamus affinis*—*Buchloe dactyloides* ( $M_1$ ), *Coronilla varia*—*Festuca rubra* ( $M_2$ ), *Medicago falcate*—*Cynodon dactylon* ( $M_3$ ), *Coronilla varia*—*Lolium perenne* ( $M_4$ ) and *Vitex negundo*—*Setaria viridis* ( $M_5$ ), reconstructed. Chengyu expressway in Yongchuan were taken as the example and foundation, their characteristics of runoff and erosion sediment in rainy seasons in the years from 2012 to 2014 were investigated, and the annual fluctuation of their ecological slope protection capacity was analyzed. Results showed that: (1) the annual herbaceous plants in the grass-shrub community, i. e., *Vitex negundo* + *Setaria viridis* grew rapidly, which turf-establishment stage (65 d) was transitory, its capacity of soil and water conservation (80.03% and 98.49%, respectively) were higher than other modes in the first growing season after turf-establishment (2012), and among five vegetation modes, its runoff and sediment yield ( $61.2\text{ mm}$  and  $52.0\text{ g/m}^2$ , respectively) were the lowest ( $p < 0.05$ ). However, the perennial herbs (e. g., *Cynodon dactylon*, *Lolium perenne* and so on) in the grass-shrub communities grew tardily with more laggardly turf-establish-

收稿日期: 2014-11-10

修回日期: 2015-01-08

资助项目: 重庆市水利局重大科研专项“重庆市水利工程水资源涵养及水生态修复植物应用研究与推广”(渝水科 201306 号)

第一作者: 孙华(1983—), 女, 重庆江津人, 硕士, 主要从事环境生态, 园林生态研究。E-mail: 5927282@qq.com

通信作者: 何茂萍(1971—), 女, 四川成都人, 硕士, 高级工程师, 主要从事水土保持与荒漠化治理研究。E-mail: hemp1971@cdu.edu.cn

ment stages, and their outstanding capacities of soil and water conservation only showed in the second or third growing season after turf-establishment; (2) in the rainy seasons in 2013, ecological protection benefits of the grass-shrub communities ( $M_1-M_4$ ) including perennial herbs improved apparently, which were especially outstanding in *Coronilla varia* + *Lolium perenne* ( $M_4$ ) and *Medicago falcate* + *Cynodon dactylon* ( $M_3$ ); (3) in the third growing season (2014), performance of artificial vegetations *Medicago falcate* + *Cynodon dactylon* ( $M_3$ ) was the most excellent in slope protection by means of developed root system of Bermuda grass, its capacity of soil and water conservation were 80.03% and 98.49%, respectively, its runoff and sediment yield were no more than 32.40 mm and 17.67 g/m<sup>2</sup>, respectively, and in contrast, that of  $M_4$  was the worst in the slope plot experiments where artificial vegetations were planted. Therefore, it can be seen that ecological protection benefit of artificial vegetation was closely related to their community characteristics, there was a positive correlation between the aboveground biomass of vegetation and their capacity of soil and water conservation in initial succession with determination coefficient ( $R^2$ ) more than 0.987, and did so between root biomass and these capacity in latter succession ( $R^2 \geq 0.998$ ) when there were the same side slope conditions, seed quantity and planting measures.

**Keywords:** side slope; vegetation type; soil and water conservation; ecological slope protection

公路建设势必对路域环境产生负面影响。在我国,因高速公路建设每年形成的边坡面积高达 30 万 km<sup>2</sup>,地表裸露、土质松软,是水土流失最严重、持续时间最长的路域部位之一<sup>[1-3]</sup>。借助“先驱植物”的生态优势,在裸露边坡上建立稳定的植物群落、优化群落结构,对营造路域景观、减少水土流失尤为重要<sup>[4-5]</sup>。近年来,以乡土植物为基础,以灌木为主体、乔木或草本为辅助构建护坡植被的“乡土植物灌木化”护坡技术因工程快捷、实用、安全、持久等特征而倍受关注<sup>[6-7]</sup>。但多数研究尚局限于恒定雨强(人工降雨)下不同植被配置模式、种植配比试验小区内产流、产沙特征的比较<sup>[7-8]</sup>,对自然条件下边坡群落的生态稳定性、护坡性能尚缺乏长期的系统研究。为此,本研究拟以成渝高速(永川段)为例,以景观过渡带(小乔木或灌木+地被植物)+坡面防护带(小灌木、草本植物)的群落结构为基础,探讨西南地区几种典型的护坡植被在自然降雨条件下的产流、产沙特征及年际间差异,为高速公路边坡防护提供借鉴。

## 1 研究区概况

研究区位于川东、渝西接壤处的丘陵地带(105°38′—106°05′E, 28°56′—29°34′N)。西起巴岳山、东至云雾山,面积约 12.76 万 km<sup>2</sup>。丘陵广布、溪沟纵横,平均海拔 250~350 m,丘谷高差 50~100 m,地势北高南低,南部多浅丘、北部多深丘。年均降雨量 1 165.2 mm,多集中在 5—9 月。土壤主要由白垩纪夹关组砖红色长石、块状钙质岩屑砂岩、钙质粉砂岩等风化残积物、冲积物发育而成,黄棕壤、黄壤为主要类型,

土层厚度多为 10~70 cm,多呈微酸性至酸性;粒级分布(湿筛法,回收率 98.74%,  $n=3$ ): > 4.76 mm, 45.81%; 2~4.76 mm, 29.78%; 1~2 mm, 5.18%; 0.25~1 mm, 4.64%; 0.053~0.25 mm, 7.96%; < 0.053 mm, 5.37%。透水性好、保水保肥性能较差,初渗速率为 14.2~42.4 mm/min,稳渗速率为 0.8~5.7 mm/min,贮水力为 681.4~1 244.1 t/hm<sup>2</sup>。

区内植被具有典型的亚热带常绿阔叶林特征,以松、柏和蕨类为主,包括杉科、松科、樟科、桦木科、壳斗科等 49 科 150 余种。主要乔木树种有马尾松(*Pinus massoniana*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、柏木(*Cupressus funebris*)、石栎(*Lithocarpus glaber*)、麻栎(*Quercus acutissima* Carruth)、木荷(*Schima superba*)、香樟(*Cinnamomum camphora*)、枫香(*Liquidambar formosana*)等;灌木有紫花杜鹃(*Rhododendron backii*)、芒(*Miscanthus sinensis*)、蜀桧(*Sabina komarovii*)、紫穗槐(*Amorpha fruticosa*)、紫薇(*Lagerstroemia indica*)、木槿(*Hibiscus syriacus*)、杜茎山(*Maesa ponicia*)、野蔷薇(*Rosa mltiflora thunb*)、小冠花(*Coronilla varia*)等;竹类 20 余种,以楠竹(*Phyllostachys pubescens*)、慈竹(*Neosino calamus affinis*)为主。植被稀疏、森林覆被率低(< 7.5%),丘坡较陡,雨季集中、易造成水土流失,是地质灾害多发区。

## 2 研究方法

### 2.1 试验设计

供试边坡位于成渝高速永川段 K450+155—

K450+380处。路基边坡全长225 m,坡向NE25°;填方最大高程14.9 m,修整为二级边坡,坡高8 m、坡比为1:1。选择立地条件一致区域,划分出24个矩形小区(长8 m、宽2 m),设立流观测小区。小区长边与等高线垂直,短边与等高线平行,用石棉瓦围埂,塑料薄膜密封,四周埂高20 cm,埋入地下30 cm,小区上方及两侧开排水沟拦截小区外坡面径流,下方修截流沟、集水池。

小区布设好后(2011年4月)即进行苗木栽植、种子喷播。边坡上部0~1.8 m处:以适应性强、景观效果好的常绿、观花、观叶灌木或小乔木,辅以麦冬(*Ophiopogon japonicus*)、琼花(*Iris japonica*)等地

被植物作为路域景观过渡带;坡面2~8 m处(径流观测区):以狗尾草(*Setaria viridis*)、野牛草(*Buchloe dactyloides*)、狗牙根(*Cynodon dactylon*)、黄荆(*Vitex negundo*)等路域优势种或黑麦草(*Lolium perenne*)、紫羊茅(*Festuca rubra*)、苜蓿(*Medicago falcate*)等速生耐瘠草种构建坡面防护带,对景观过渡带、坡面防护带间围埂、密封后,按照表1规格将5种典型边坡植被随机分布于各小区、4次重复,以剩余4个裸地小区作对照(CK)。将各处理(5种配置+CK)的4个重复分别编号后,随机分成4组:两组用于2012—2014年各生长季末边坡植被的生物量测定;两组用于产流、产沙量测定。

表1 5种典型边坡植被的配置模式及规格

项目	生活型	植被配置模式					坡位	整地	株行距/ m	种苗规格/ 种子用量	抚育 管理
		M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>3</sub>	M <sub>4</sub>	M <sub>5</sub>					
景观过渡带	小乔木	蜀桧	柏木	紫薇	紫穗槐	木槿	0~1.8 m	坑穴	0.5×0.5	2年生苗	秋季修剪
	地被植物	麦冬	琼花	麦冬	琼花	麦冬		水平沟	0.05×0.1	多年生苗	去除杂草
坡面防护带	灌木、草本	慈竹—野牛草	小冠花—紫羊茅	苜蓿—狗牙根	小冠花—黑麦草	黄荆—狗尾草	2~8 m	机械平整	喷播	各10 g/m <sup>2</sup>	除草防虫

## 2.2 测定项目与方法

(1) 群落特征。试验初期及时除草,记录各样地内发芽率、成坪时间。盖度测定:2012—2014年每年5月中旬,采用30 cm×30 cm网格法测定各个样地群落盖度;生物量测定:生长季节末期,在坡面防护带(1.5~7.5 m处)上、中、下位置各设置一个50 cm×50 cm采样区,2次重复(分布在不同小区);根系采样、处理方法:植物生长季末期,收获各小区地上生物量,同时用根钻在每个径流小区分别取0—10 cm,10—20 cm,20—30 cm土层内土壤,3次重复;用Delta-T公司生产的RWC型洗根系统洗根,烘干称重、计算地下生物量<sup>[9]</sup>。

(2) 产流量、产沙量。在径流小区旁边安装自动气象站,定时监测气象资料,自动记录每次的降雨量、雨强和降雨历程。每次降雨后及时观测、登记各个径流小区集水池的集流深度,计算径流量、测定其泥沙含量;根据某一时段内径流量、降雨量计算径流系数;将1 a内各小区土壤侵蚀量换算成每1 km<sup>2</sup>的吨数,即为侵蚀模数。

(3) 蓄水能力、保土能力。根据各小区内的径流系数、侵蚀模数值进行换算:

$$\text{蓄水能力} = (\text{裸坡区径流系数} - \text{植被区径流系数}) / \text{裸坡区径流系数}$$

$$\text{保土能力} = (\text{裸坡区土壤侵蚀模数} - \text{植被区土壤侵蚀模数}) / \text{裸坡区土壤侵蚀模数}$$

降雨量、径流量和泥沙量观测时段为2012—

2014年汛期(5—9月);铝盒法测定土壤初始含水量。

## 2.3 数据处理

经Excel 2003基础处理后,借助SPSS 13.0进行Duncan's多重比较(Duncan's multiple range test, DMRT)。

## 3 结果与分析

### 3.1 护坡植被的生长状况

表2为护坡植被在2012—2014年的生长状况。建植初期,景观过渡带内的乔木、地被植物都表现出较高的成活率(乔木:99%;地被植物:94.3%(91%~96%)),不同植被间无明显差异( $n=5, p>0.05$ );坡面防护带内,灌木类出芽率(64%,61%~66%)普遍低于草本植物(75.8%,73%~78%),但不同配置的灌木、草本植物间无明显差异( $n=5, p>0.05$ )。成坪时间方面,不同群落间差异较大,其中,以苜蓿—狗牙根(M<sub>3</sub>)成坪时间最长( $d=73$ )、黄荆—狗尾草(M<sub>5</sub>)最短( $d=64$ ),差异显著( $n=5, p<0.05$ )。1个生长季节后(2012年5月),所有植被的群落盖度均达到73%以上,黄荆—狗尾草(M<sub>5</sub>)最高(85%);地上生物量(2012年9月)也表现出类似统计趋势,可能与一年生草本植物狗尾草生长快、成坪早的生长习性有关<sup>[10-11]</sup>。

随后的2个生长季节,除黄荆—狗尾草外,所有植被的群落盖度、地上生物量、根系生物量均呈现递增趋势;黄荆—狗尾草则相反:2012—2014年,地上生物量

分别为 264.9,234.4,207.3 g/m<sup>2</sup>;根系生物量分别为 96.2,87.9,81.3 g/m<sup>2</sup>。其原因可能与不同植被中先驱植物的生态型有关:野牛草、狗牙根、紫羊茅、黑麦草均为多年生草本,常年持续生长;狗尾草为一年生草本,生长季节结束后植株枯死,需借助种子越冬休眠、

萌发、生长。种子萌发前,位置较高的植株或种子多数被吹落、冲蚀至别处,进而出现边坡植被分布不均、基部密集而中上部表土裸露黄荆—狗尾草(M<sub>5</sub>)的盖度波动也印证了这一现象:2012 年为 85%,2013 年,2014 年分别递减为 76%,68%,趋势明显。

表 2 5 种边坡植被配置在不同生长季节的群落特征

配置方式	成活率/%		出芽率/%		成坪时间/d	总盖度/%			地上生物量/(g·m <sup>-2</sup> )			上、下土层根系生物量/(g·m <sup>-2</sup> )		
	乔木	地被	灌木	草本		2012 年	2013 年	2014 年	2012 年	2013 年	2014 年	2012 年	2013 年	2014 年
M <sub>1</sub>	99	96	61	76	67	74	78	81	236.2	246.1	273.8	86.6/49.5	90.8/57.6	95.6/72.0
M <sub>2</sub>	100	91	65	73	69	84	88	90	202.6	236.3	263.8	68.7/37.9	80.6/50.8	86.4/64.5
M <sub>3</sub>	99	95	66	78	73	73	81	90	169.1	212.4	245.7	66.8/38.7	104.9/72.5	142.8/108.8
M <sub>4</sub>	99	94	65	74	67	82	86	92	224.8	257.2	281.9	82.2/46.2	97.1/62.6	115.8/87.7
M <sub>5</sub>	99	96	63	77	64	85	76	68	264.9	234.4	207.3	62.4/31.6	54.4/33.5	47.2/34.1

注:上、下层根系生物量分别代表 0—10 cm,10—25 cm 土层中单位面积根系干重。

3.2 裸地产流、产沙特征

2012—2014 年汛期,试验区内自然降雨量及裸露边坡的产流、产沙特征(土壤质量含水量为 13.6%)如表 3 所示。可以看出,试验区汛期雨季集中(占年

均降雨量 71.36%)、产流量大(年均降雨量:829.2 mm;年均产流量:149.83 mm),水土流失严重(年均产沙量:1 223.51 g/m<sup>2</sup>,最大侵蚀模数:1 376.57 t/km<sup>2</sup>·a),是典型的生态环境脆弱区。

表 3 2012—2014 年汛期的降雨及裸地产流、产沙特征

年份	降雨次数	产流降雨次数	降雨量/mm	产流量/mm	产沙量/kg	产流系数/%	侵蚀模数/(t·km <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )
2012	29	6	820.6	149.8	16.52	18.25	1376.67
2013	31	5	799.2	137.4	13.45	17.19	1120.83
2014	27	7	867.7	162.3	14.08	18.70	1173.33

3.3 不同护坡植被区的产流、产沙特征

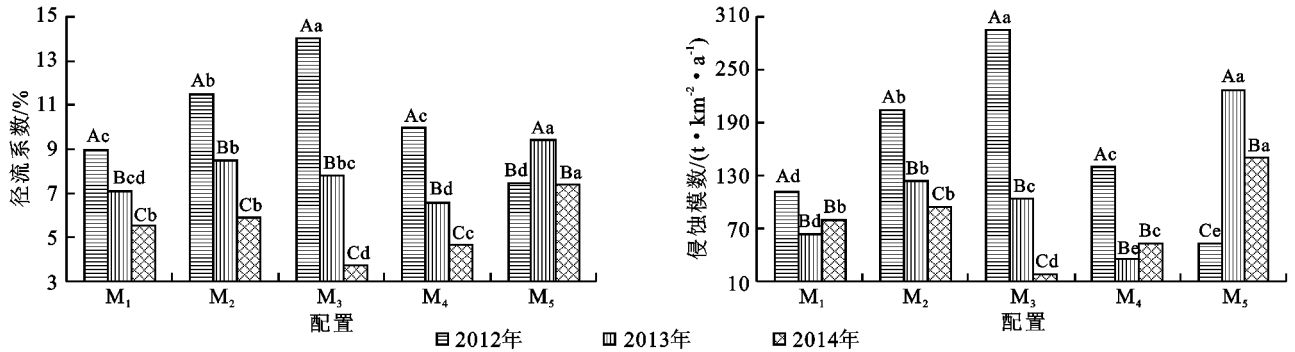
产流系数、土壤侵蚀模数是衡量植被涵养水分、防沙护坡性能的重要生态指标。试验期间,各径流小区内产流、产沙特征如图 1 所示。可以看出,不同配置边坡植被的护坡性能也不一样( $n=5, p<0.05$ )、年际差异明显( $n=3, p<0.05$ )。2012 年汛期,黄荆—狗尾草(M<sub>5</sub>)表现出较强的护坡性能:蓄水能力、保土能力分别达到 59.14%,96.22%,产流量(61.2 mm)、产沙量(52.0 g/m<sup>2</sup>)明显低于其他小区( $n=5, p<0.05$ );苜蓿—狗牙根(M<sub>3</sub>)的护坡性能较差,产流量、产沙量(94.4 mm,203.33 g/m<sup>2</sup>)较高( $n=5, p<0.05$ )。整个汛期内,不同小区在产流系数、侵蚀模数等方面的变化趋势高度一致,即黄荆—狗尾草(M<sub>5</sub>)<慈竹—野牛草(M<sub>1</sub>)<小冠花—黑麦草(M<sub>4</sub>)<小冠花—紫羊茅(M<sub>2</sub>)<苜蓿—狗牙根(M<sub>3</sub>)。2013 年汛期,小冠花—黑麦草(M<sub>4</sub>)表现出较强的护坡性能:蓄水、保土能力分别为 61.64%,96.86%,产流量、产沙量(52.7 mm,35.17 g/m<sup>2</sup>)也低于其他小区( $n=5, p<0.05$ );黄荆—狗尾草(M<sub>5</sub>)的护坡性能较差,产流量、产沙量(75.3 mm,226.67 g/m<sup>2</sup>)较高( $n=5, p<0.05$ );汛期内,不同处理间产流系数、侵蚀模数呈现

小冠花—黑麦草(M<sub>4</sub>)<慈竹—野牛草(M<sub>1</sub>)<苜蓿—狗牙根(M<sub>3</sub>)<小冠花—紫羊茅(M<sub>2</sub>)<黄荆—狗尾草(M<sub>5</sub>)的波动趋势。2014 年汛期,苜蓿—狗牙根(M<sub>3</sub>)的护坡性能较强:蓄水、保土能力分别为 80.03%,98.49%,产流量、产沙量(32.40 mm,17.67 g/m<sup>2</sup>)也低于其他小区( $n=5, p<0.05$ );黄荆—狗尾草(M<sub>5</sub>)的护坡性能较差,产流量、产沙量(62.1 mm,150.33 g/m<sup>2</sup>)较高( $n=5, p<0.05$ )。汛期内,不同处理间产流系数、侵蚀模数呈现苜蓿—狗牙根(M<sub>3</sub>)<小冠花—黑麦草(M<sub>4</sub>)<慈竹—野牛草(M<sub>1</sub>)<小冠花—紫羊茅(M<sub>2</sub>)<黄荆—狗尾草(M<sub>5</sub>)的变化规律。

试验期内,同一植被在不同汛期内的产流、产沙特征也不一样:除黄荆—狗尾草(M<sub>5</sub>)外,所有植被的护坡性能均随群落发育程度的提高而增强,发育程度越高(即坪龄越长),小区内的产流系数、侵蚀模数越小。其原因可能与坪龄越长,M<sub>1</sub>—M<sub>4</sub>的群落盖度、地下生物量则越大,护坡性能也随之增强有关。相比之下,黄荆—狗尾草(M<sub>5</sub>)的产流、产沙量波动较大,其护坡性能表现为:2012 年汛期>2014 年汛期>2013 年汛期,其原因可能与黄荆—狗尾草(M<sub>5</sub>)的先驱植物(狗尾草)为一年生草本植物,生

长季节结束、植株枯死后,再生植被的均匀性较差,保水、防沙性能随之下降;2014 年汛期内,黄荆—狗尾草( $M_5$ )的产流系数、侵蚀模数呈下降趋势,可能

与随着时间的推移,群落中灌木的长势逐渐增强,其群落盖度、地下生物量逐渐增大,护坡性能也随之增强有关。



注:同一配置模式上方不同的大写字母表示年际间差异显著,同一年份不同配置上方不同的小写字母表示配置间差异显著( $\alpha=0.05$ )。

图 1 不同配置模式的产流、产沙特征

### 3.4 植被的护坡性能与群落特征间的关联性

在立地条件、降雨量相同的情况下,植被的群落结构、特征是影响地表径流和泥沙流失量的主要因素:茎叶对雨滴的分层拦截、缓冲作用,有利于减少地表径流、阻延土壤溅蚀;根系对土壤的加筋、锚固作用,有利于延缓坡面侵蚀、增强稳定性<sup>[10]</sup>。图 2 为植被的群落特征与保水防沙性能的内在联系。可以看出,建坪初期(2012 年汛期),植被的护坡性能与地

上生物量密切相关:地上生物量越大,产流量、产沙量越小。整个汛期内,小区内产流系数、侵蚀模数与地上生物量间有十分显著的线性关系,其显著水平  $P(1,4)$  均大于  $F_{0.01}(1,4)$  时检测值(34.1)(图 2a, 2b);建坪后期(2014 年汛期),护坡性能与根系生物量密切相关:根系生物量越大,产流量、产沙量越小。整个汛期内,小区内的产流系数、侵蚀模数与根系生物量间也呈现十分显著的线性关系(图 2c, 2d)。

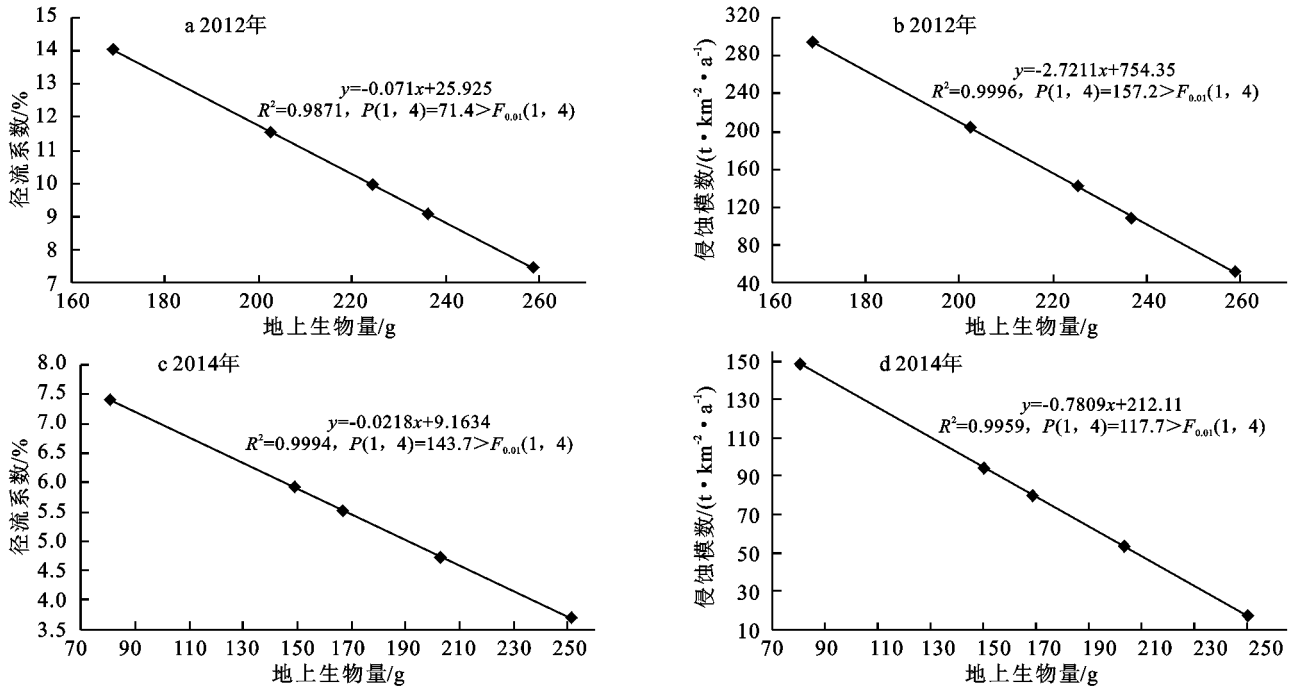


图 2 植被的群落特征与其护坡性能的相关性

分析其他时段的群落特征与其护坡性能的相关性时则发现:2012 年汛期的根系生物量、2013 年汛期的地上、根系生物量以及 2014 年汛期的地上生物量与植被护坡性能间的相关性并不显著。可能的原因是:2012 年汛期,植株根系尚不发达,根冠比小(表 2),植被的护坡性能主要是源于茎叶对雨滴的分层拦

截和缓冲作用,茎叶越茂盛、盖度越大(如狗牙根),护坡性能就越强;2013 年汛期,群落盖度尚未饱和、根系发育尚未成熟,植被的护坡性能由茎叶的分层拦截和根系对土壤的加筋、锚固作用共同决定<sup>[11]</sup>,可见,撇开茎叶的分层拦截、缓冲作用或孤立根系的加筋、锚固作用都是片面的<sup>[12]</sup>;2014 年汛期,植被的群落盖

度接近饱和,不同群落间茎叶对雨滴的分层拦截、缓冲作用无明显差异。此时,植被的护坡性能主要取决于根系对土壤加筋、锚固作用,根系生物量越大,保水、防沙性能则越强。

## 4 结论与讨论

(1) 相同边坡条件下,一年生草本植物(狗尾草)所在的草灌混合群落(黄荆—狗尾草)成坪时间( $d=65$ )明显短于其他多年生草本( $p<0.05$ );成坪初期(2012年汛期),黄荆—狗尾草( $M_5$ )的群落盖度、地上生物量也高于其他配置模式( $p<0.05$ )。2012—2014年, $M_1$ — $M_4$ 的群落盖度、地上生物量、地下生物量逐年递增,黄荆—狗尾草( $M_5$ )却逐年递减。

(2) 相同降雨条件下,不同植被的护坡性能也不一样,年际差异明显。2012年汛期,黄荆—狗尾草( $M_5$ )表现出较强的护坡性能:蓄水、保土能力分别达到59.14%,96.22%,产流量、产沙量(61.2 mm, 52.0 g/m<sup>2</sup>)也明显低于其他小区( $p<0.05$ );整个汛期内,不同处理在产流系数、侵蚀模数等方面的变化趋势高度一致,即黄荆—狗尾草( $M_5$ )<慈竹—野牛草( $M_1$ )<小冠花—黑麦草( $M_4$ )<小冠花—紫羊茅( $M_2$ )<苜蓿—狗牙根( $M_3$ );2013年汛期, $M_4$ 的蓄水、保土能力分别为61.64%,96.86%,产流系数、侵蚀模数呈现小冠花—黑麦草( $M_4$ )<慈竹—野牛草( $M_1$ )<苜蓿—狗牙根( $M_3$ )<小冠花—紫羊茅( $M_2$ )<黄荆—狗尾草( $M_5$ )波动;2014年汛期, $M_3$ 的蓄水、保土能力分别达到80.03%,98.49%,产流系数、侵蚀模数呈现苜蓿—狗牙根( $M_3$ )<小冠花—黑麦草( $M_4$ )<慈竹—野牛草( $M_1$ )<小冠花—紫羊茅( $M_2$ )<黄荆—狗尾草( $M_5$ )的变化规律。

(3) 试验期间,护坡植被在不同汛期内的产流、产沙特征也不一样:除黄荆—狗尾草( $M_5$ )外,所有草灌混合群落的护坡性能均随着坪龄的增加而增强,坪龄越长,小区内产流系数、侵蚀模数越小。

(4) 植被的护坡性能与其群落特征密切相关。建坪初期,护坡性能主要与茎叶发育状况有关,地上

生物量越大,护坡性能越强;建坪中期,护坡性能主要由茎叶对雨滴的分层拦截作用及根系对土壤的加筋、锚固作用共同决定;建坪后期,护坡性能主要与根系发育状况有关,根系生物量越大,护坡性能则越强。

### 参考文献:

- [1] Luarcet R. Plant species diversity and polyploidy in islands of natural vegetation isolated in extensive cultivated lands [J]. Biodiversity and Conservation, 1997, 6(4): 591-613.
- [2] 邓洪亮, 孙丽霞, 廖丹, 等. 复杂地质条件下岩石边坡的稳定性分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2008, 6(1): 45-48.
- [3] Cary R F, Slaback R D. Plant materials and establishment techniques for vegetation of California desert highways [J]. Transportation Research Record, 1983, 969: 24-26.
- [4] 肖蓉, 高照良, 宋晓强, 等. 高速公路边坡植被特征分析及护坡模式优化研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(2): 90-94.
- [5] Cary R H, Sotir R B. Biotechnical stabilization of highway cut slope [J]. Journal of Geotechnical Engineer, ASCE, 1992, 118(9): 1395-1409.
- [6] 徐洪亮, 满秀玲, 盛后财. 大兴安岭不同类型落叶松天然林水源涵养功能研究[J]. 水土保持研究, 2011, 18(4): 92-96.
- [7] 李妮, 陈其兵, 谭昌明. 高速公路边坡乡土灌木建植模式水土保持效益[J]. 水土保持学报, 2012, 26(1): 67-71.
- [8] 王青杵, 王改玲, 石生新, 等. 晋北黄土丘陵区不同人工植被对水土流失和土壤水分含量的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(2): 71-75.
- [9] 王川, 孙铁军, 金洪, 等. 人工植被建植对坡地水土流失的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(3): 29-33.
- [10] 李佳, 张小咏, 杨艳昭. 基于 SWAT 模型的长江源土地利用/土地覆被情景变化对径流影响研究[J]. 水土保持研究, 2012, 19(3): 119-126.
- [11] Zhou Z C, Shangguan Z P, Zhao D. Modeling vegetation coverage and soil erosion in the loess plateau area of China [J]. Ecological Modelling, 2006, 198: 263-268.
- [12] 潘声旺, 何茂萍, 杨丽娟, 等. 先锋植物丰富度对公路边坡植物群落生长发育及护坡效益的影响[J]. 林业科学, 2013, 49(11): 24-31.