

DOI: 10.5846/stxb201308102055

方文, 潘声旺, 何平, 刘杨, 马立辉, 李军, 孙益. 先锋种丰富度对边坡植被群落特征及其护坡效益的影响. 生态学报, 2015, 35(11): 3653-3662.
Fang W, Pan S W, He P, Liu Y, Ma L H, Li J, Sun Y. Effects of pioneer plants richness on community characteristics of vegetation and their soil and water conservation benefit for highway side slope. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(11): 3653-3662.

先锋种丰富度对边坡植被群落特征及其护坡效益的影响

方 文^{1,3}, 潘声旺^{2,4,*}, 何 平¹, 刘 杨³, 马立辉³, 李 军⁴, 孙 益⁴

1 西南大学生命科学学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715

2 成都大学城乡建设学院, 成都 610106

3 重庆市林业科学研究院, 重庆 400036

4 四川大学生命科学学院, 成都 610064

摘要:乡土植物灌木化建植是高速公路边坡防护的重要途径。以成渝高速(G85)永川段为例,以西南地区两种典型的边坡绿化初始配置“慈竹(*Neosino calamus affinis*)+野牛草(*Buchloe dactyloides*)”、“棉槐(*Amorpha fruticosa*)+紫羊茅(*Festuca rubra*)”为基础,分别与马棘(*Indigofera pseudotinctoria* Mats.)、黄荆(*Vitex negundo*)、狗牙根(*Cynodon dactylon*)、芒(*Miscanthus sinensis*)等路域优势种以不同方式组合,研究一定立地条件下初始绿化植物(先驱植物)的丰富度对边坡植被群落生长发育、早期演替行为及护坡性能的影响。结果表明:1)先驱植物丰富度可直接影响边坡植被的成坪时间、生物量积累;相同建植条件(边坡条件、播种密度等)下,先锋种种类越多,成坪时间就越短,被积累的生物量也越多;2)先锋种数量与群落的生物多样性水平有关($R^2 > 0.954$);相同演替阶段内,先锋种越多,群落的多样性水平(如物种丰富度、Shannon-Wiener 指数、Pielou 指数)则越高;3)群落中物种多样性水平与植被的护坡性能密切相关($R^2 > 0.998$):多样性水平越高,植被的蓄水、保土能力越强,边坡内径流系数、土壤侵蚀模数越小。可见,在边坡条件、播种密度等建植条件与建植措施一致的情形下,提高初始绿化植物的物种数可有效改善边坡植被的护坡性能。

关键词:先驱植物; 植物多样性; 水土保持; 生态护坡

Effects of pioneer plants richness on community characteristics of vegetation and their soil and water conservation benefit for highway side slope

FANG Wen^{1,3}, PAN Shengwang^{2,4,*}, HE Ping¹, LIU Yang³, MA Lihui³, LI Jun⁴, SUN Yi⁴

1 Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region (Ministry of Education), Faculty of Life Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China

2 Faculty of Urban and Rural Construction, Chengdu University, Chengdu 610106, China

3 Chongqing Academy of Forestry, Chongqing 400036, China

4 Faculty of Life Sciences, Sichuan University, Chongqing 610064, China

Abstract: It is an important ecological principle and a representative mode of bioengineering techniques for side slope protection in superhighway those using localization shrubs to reconstruct plant communities. These native plant species have higher ecological adaptations, and their foliage can cover the whole slope in a rather transitory growth period. Although vegetation interception, power reduction, controlling of slope runoff, root anchorage and reinforcement are fundamental pathway to control effectively the development of soil erosion for bioengineering techniques, the species of pioneer plants, richness and their community characteristics are closely related to the benefit of soil and water conservation of artificial vegetations. In this case, taking Chengyu expressway (G85) in Yongchuan region and two typical vegetation modes, i.e.

基金项目:国家林业局公益性行业科研专项课题(201004064)

收稿日期:2013-08-10; **网络出版日期:**2014-06-12

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: panwang@swu.edu.cn

Neosino calamus affinis + *Buchloe dactyloides* and *Amorpha fruticosa* + *Festuca rubra*, which always used to be a feasibility of the establishment for slope protection in hilly areas in southwest China as the example and foundation, two localization shrubs, i.e. *Indigofera pseudotinctoria* Mats. and *Vitex negundo*, and two herbs, i.e. *Cynodon dactylon* and *Miscanthus sinensis*, were chose to plant in given modes and growth proportion in the beginning of reconstructing slope vegetation, their characteristics of slope runoff and erosion sediment in rainy seasons during years ranging from 2010 to 2012 were investigated in the slope plot experiments, and the difference among the slope rainfall-induced processes of infiltration, runoff generation, erosion and sedimentation was analyzed. Results that showed: 1) the pioneer plants richness could affect accumulation of vegetation biomass and period of the turf-establishment evidently, and the more abundant the pioneer plant species are in the beginning of reconstructing plant communities, the shorter their period of the turf-establishment would be. And the more the vegetation biomass accumulated in the slope plot would be; 2) the richness of pioneer plants closely related to the diversity of plant species in communities with determination coefficient in excess of 0.954. Under the same succession level, the more abundant pioneer species is, the higher the diversity of plant species including the plant species richness, Shannon-wiener index and Pielou index in communities would be; 3) there was a positive correlation between the capacity of soil and water conservation of vegetations and the diversity of plant species in communities with determination coefficient in excess of 0.995 ($P < 0.05$), and the higher the diversity of plant species is, the stronger the capacity of soil and water conservation would be, then the smaller their runoff coefficient occurred in slope plots, and the lower the soil erosion modulus originated from the given slopes, too. These results suggested a feasible way for the establishment of high efficiency for ecological slope protection by means of increasing the pioneer plant species richness in the beginning of reconstructing slope vegetation; especially when there were the same side slope conditions, seed quantity and planting measures.

Key Words: pioneer plant; plant species diversity; soil and water conservation; ecological slope protection

在铁路、公路工程建设过程中,因大量开挖、填方所形成的裸露边坡一直是路域生态系统中产沙量最大、水土流失持续时间最长的部位^[1-2],也是路域生态建设过程中亟需解决的重要问题。借助当地自然植物群落的结构和“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,改善群落的多层次结构和多样性水平,有利于形成较稳定的植物群落,提高边坡稳定性、减少水土流失^[3-4]。

近年来,借助生态工程技术,以工程建设地段的乡土植物为基础,以灌木为主体,乔木或草本为辅佐恢复边坡植被的生态护坡技术已成为控制侵蚀和稳定边坡的重要措施^[5-6]。但迄今,相关研究多局限典型植被配置模式下护坡效益的比较^[7-9],在边坡植被的群落结构、多样性水平及其生态性能等方面尚缺乏系统研究。事实上,植物群落多样性水平是生态系统稳定性和抗干扰能力的重要指标,而初始绿化植物(先驱植物)的种类、数量及其组合方式则可直接影响边坡植被的群落结构、演替行为和多样性水平,进而影响其生态性能^[10-12]。为此,本研究拟以西南地区两种典型的边坡绿化模式“慈竹(*Neosino calamus affinis*) + 野牛草(*Buchloe dactyloides*)”、“棉槐(*Amorpha fruticosa*) + 紫羊茅(*Festuca rubra*)”为基础,分别与马棘(*Indigofera pseudotinctoria* Mats.)、黄荆(*Vitex negundo*)、狗牙根(*Cynodon dactylon*)、芒(*Miscanthus sinensis*)等路域优势种以不同方式组合,探讨先锋种丰富度对边坡植被的群落结构、早期演替行为、护坡性能的影响及其年际间差异,为边坡防护提供参考。

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1.276×10⁵ km²;亚热带湿润季风气候,年均降雨量1165.2 mm,多集中在5—9月。区内丘陵广布、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(图1)。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,土层厚度多在10—70 cm,多呈微酸性至酸性;区内植被具有典型的亚热带常绿阔叶林特征,以松、柏、蕨类为主,包括杉科、松科、桦木科、壳斗科等49科150余种。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

供试边坡为成渝高速(G85)永川段中的路基边坡(K309+145—K309+370), 路基全长 225 m、路面高程 305—307 m, 坡高 5—6 m(填方最大高程为 14.7 m), 修整为二级边坡, 坡比 1:1.5, 坡向 NE25°(图 2)。域内年均气温 16—18℃, 1 月均温 5—7.5℃, 7 月均温 25—27.5℃, 10℃以上活动积温 5600—5800℃, 无霜期 310—340 d; 年均降水量 1100—1200 mm, 干燥度 1.0 左右。边坡为黄壤区沙泥岩互层高边坡, 表土(0—20 cm)微酸性(pH 值: 6.5—6.9), 有机质 18.6 g/kg, 阳离子交换量 CEC = 24.19 cmol/kg, 速效 N、P、K 分别为 114.6、24.7、94.8 mg/kg。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—1244.1 t/hm²。选择边坡比、坡向及其它立地条件基本一致地段, 整理成 62 个矩形小区(长 8 m、宽 2 m), 试验小区的长边与公路边坡的等高线垂直、短边与等高线平行, 四周用石棉瓦围埂(埂高 25 cm)、塑料薄膜密封(埋入地下 30 cm), 小区上方及两侧开排水沟拦截小区外径流, 下方修截流沟、集水池。



图 1 研究区域地理位置示意图

Fig.1 Experimental side slope location in superhighway

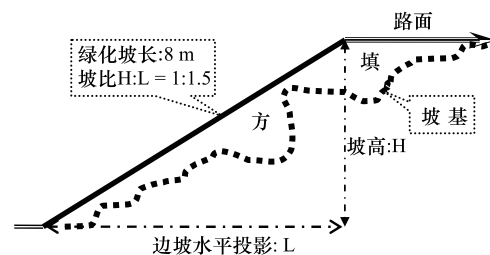


图 2 试验边坡剖面示意图

Fig.2 Sketch section of the experimental side slope

2009 年 4 月在布设好的试验小区内自然撒播。将 14 种配置模式(即 M_{A1-7} 、 M_{B1-7} , 物种组合如表 1)随机分布于 56 个小区内(每种模式重复出现 4 次)。归类编号后, 按照同一播种密度(20 g/m²)将“先驱植物”的种子均匀撒播于相应小区。其中, 同一小区内不同生活型(灌木、草本)间的播种密度相等(10 g/m²)、相同生活型的不同物种间的播种密度也相等($\frac{10}{m}$ 、 $\frac{10}{n}$ g/m², m 、 n 分别为小区内灌木、草本类先锋种数目)。将各个配置模式所在的 4 个小区随机分成 4 组: 两组用于边坡植被在不同年份(2010—2012 年)群落特征的测定, 两组用于护坡性能的测定。剩余 6 个为对照区(CK): 2 个定期除草、保持无植被状态(CK₀), 用于观测试验期间裸地边坡的产沙、产流特征; 其余 4 个用于次生裸地(CK₁)的自然演替研究(分组同上)。

实验初期, 及时遮阴、保湿以提高种子的出芽率、幼苗的成活率, 及时记录各配置模式发芽率、成坪时间; 实时监控坪情, 确保无重大虫害、鼠害、畜害及其它意外事故发生。

2.2 测定项目与方法

(1) 群落结构

播种后, 记录各样地内成坪时间(此处指建坪至边坡植被总盖度达 70%所经历的时间)。2010 年 8 月下旬, 分别各个初始绿化配置模式(M_{A1-7} 、 M_{B1-7})、次生裸地(CK₁)所在坡面上(2 m 处)、中(4.5 m 处)、下(7 m 处)位置各设置一组由规格为 120 cm×120 cm、50 cm×50 cm(测定植物生物量)的 2 个样方构成的观测区,

所有配置模式(M_{A1-7} 、 M_{B1-7})、 CK_1 内各布设 2 小区,累计 90 组($14\times6+6$)。累计 90 组($14\times6+6$)。针刺法^[13]调查样方内植物种类、株高、株数、总盖度及分盖度后,收获各采样区地上生物量,烘干、称重;用根钻在各采样区分别取 0—10 cm、10—20 cm 和 20—30 cm 土层内土壤(钻头内直径 80 mm、高 100 mm),随即用 Del2ta-T 公司生产的 RWC 型(Root Washer Consolidated, RWC)洗根系统洗根,烘干、称重,计算地下生物量^[4]。

表 1 边坡植被的配置模式
Table 1 Pioneer plant species of the highway side slope vegetation tested

模式 Mode	先锋种配置 Pioneer plant species	生活型 Life form of pioneer plants	
		灌木 Shrub	草本 Herb
M_{A1}	(1, 1) *	慈竹 <i>N.affinis</i>	野牛草 <i>B.dactyloides</i>
M_{A2}	M_{A1} + (1, 0)	慈竹+马棘 <i>N.affinis</i> + <i>I. pseudotinctoria</i> M.	野牛草 <i>B.dactyloides</i>
M_{A3}	M_{A1} + (0, 1)	慈竹 <i>N.affinis</i>	野牛草+狗牙根 <i>B.dactyloides</i> + <i>S.viridis</i>
M_{A4}	M_{A1} + (1, 1)	慈竹+马棘 <i>N.affinis</i> + <i>I. pseudotinctoria</i> M.	野牛草+狗牙根 <i>B.dactyloides</i> + <i>S.viridis</i>
M_{A5}	M_{A1} + (1, 2)	慈竹+马棘 <i>N.affinis</i> + <i>I. pseudotinctoria</i> M.	野牛草+狗牙根+芒 <i>B.dactyloides</i> + <i>S.viridis</i> + <i>M.sinensis</i>
M_{A6}	M_{A1} + (2, 1)	慈竹+马棘+黄荆 <i>N.affinis</i> + <i>I. pseudotinctoria</i> M.+ <i>V.negundo</i>	野牛草+狗牙根 <i>B.dactyloides</i> + <i>S.viridis</i>
M_{A7}	M_{A1} + (2, 2)	慈竹+马棘+黄荆 <i>N.affinis</i> + <i>I. pseudotinctoria</i> M.+ <i>V.negundo</i>	野牛草+狗牙根+芒 <i>B.dactyloides</i> + <i>S.viridis</i> + <i>M.sinensis</i>
M_{B1}	(1, 1)	棉槐 <i>A. fruticosa</i>	紫羊茅 <i>F. rubra</i>
M_{B2}	M_{B1} + (1, 0)	棉槐+马棘 <i>A. fruticosa</i> + <i>I. pseudotinctoria</i> M.	紫羊茅 <i>F. rubra</i>
M_{B3}	M_{B1} + (0, 1)	棉槐 <i>A. fruticosa</i>	紫羊茅+狗牙根 <i>F. rubra</i> + <i>S.viridis</i>
M_{B4}	M_{B1} + (1, 1)	棉槐+马棘 <i>A. fruticosa</i> + <i>I. pseudotinctoria</i> M.	紫羊茅+狗牙根 <i>F. Rubra</i> + <i>S.viridis</i>
M_{B5}	M_{B1} + (1, 2)	棉槐+马棘 <i>A. fruticosa</i> + <i>I. pseudotinctoria</i> M.	紫羊茅+狗牙根+芒 <i>F. rubra</i> + <i>S.viridis</i> + <i>M.sinensis</i>
M_{B6}	M_{B1} + (2, 1)	棉槐+马棘+黄荆 <i>A. fruticosa</i> + <i>I. pseudotinctoria</i> M.+ <i>V.negundo</i>	紫羊茅+狗牙根 <i>F. rubra</i> + <i>S.viridis</i>
M_{B7}	M_{B1} + (2, 2)	棉槐+马棘+黄荆 <i>A. fruticosa</i> + <i>I. pseudotinctoria</i> M.+ <i>V.negundo</i>	紫羊茅+狗牙根+芒 <i>F. rubra</i> + <i>S.viridis</i> + <i>M.sinensis</i>

* 括号中数据为边坡植被中初始配置的灌木、草本种数

2011、2012 年 8 月下旬,按照上述方法重复 2010 年度的调查,确保同一小区内不同年份布设的样方间隔大于 50 cm,以排除上次采用的影响。

(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。监测期内,指定专人管理、操作,监测产流产沙情况。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,计算各小区地表径流量;根据某一时段内径流总量及同时段内的降雨总量计算径流系数:径流系数=径流量/降雨量。泥沙量观测采用过滤、烘干法:将集水池中的泥水充分搅拌 30 min,立即取中层径流泥沙样品 500 mL,置于烘箱内 105 ℃烘干后称重,通过计算含沙量得出每次降雨各小区土壤流失量;将 1a 内各小区土壤侵蚀量相加,然后换算成每 1 km²的吨数,即为侵蚀模数。

(3) 蓄水、保土能力

根据各试验小区的径流系数、土壤侵蚀模数值分别推算不同植被配置模式的蓄水能力、保土能力^[4]:

蓄水能力=(裸坡区径流系数-植被区径流系数)×100%/裸坡区径流系数

保土能力=(裸坡区侵蚀模数-植被区侵蚀模数)×100%/裸坡区侵蚀模数

降雨量、径流量和泥沙量观测时段为 2009—2012 年汛期(5—9 月);铝盒法测定土壤初始含水量。

3 结果与分析

3.1 边坡植被的生长状况及其群落特征

表 2 为 14 种边坡绿化配置模式(M_{A1-7} 、 M_{B1-7})、次生裸地(CK_1)试验区内植被的生长状况及其结构特征。

表 2 2010—2012 年间不同配置模式边坡植被的生长状况及所在群落的主要结构特征
Table 2 Growth of slope vegetation and their community characteristics during years ranging from 2010 to 2012

模式 Mode	成坪期/d Mature stage	物种数 Richness		总盖度/% Coverage		入侵种的优劣势 GDI of invasive species		Shannon-wiener 指数 Shannon-wiener index		Pielou 指数 Pielou index		总生物量/(g/m ²)/根冠比 Biomass and its root-shoot ratio	
		2010	2011	2010	2011	2010	2011	2010	2011	2010	2011	2010	2011
CK ₁	--	3	5	12	16	21	100	100	0.27	0.36	0.42	39.8/0.402	71.2/0.453
M _{A1}	68	8	9.5	72	76	80	10	14	0.44	0.52	0.58	370.3/0.575	392.8/0.602
M _{A2}	66	9.6	12	73.5	79	84	11.5	17.5	0.49	0.57	0.63	386.7/0.577	441.7/0.634
M _{A3}	67	10.6	12.6	73	78	83	12.5	19	0.52	0.60	0.66	390.8/0.581	454.8/0.646
M _{A4}	63	12	14.5	75	80	87	14	23	0.58	0.65	0.73	410.2/0.592	519.3/0.675
M _{A5}	60	13.6	17	77	82	90.5	15.5	25.5	0.62	0.71	0.79	428.4/0.623	579.8/0.694
M _{A6}	61	14.3	17.6	76	84	92	16	28	0.65	0.73	0.82	433.7/0.642	590.3/0.713
M _{A7}	58	16	19.3	78	86	95	17.5	31	0.77	0.80	0.87	448.3/0.651	658.4/0.736
M _{B1}	68	9	12	74	79	87	11	15.5	0.46	0.54	0.61	363.3/0.572	417.2/0.625
M _{B2}	66	11	14.3	76.5	81	90.5	13	19	0.52	0.59	0.67	383.6/0.575	471.7/0.636
M _{B3}	67	11.6	15	75	82.5	89	14.5	20.5	0.55	0.63	0.71	389.8/0.576	496.4/0.647
M _{B4}	63	13.3	17.6	78	85	92.5	16	24	0.62	0.71	0.78	413.4/0.593	553.6/0.680
M _{B5}	60	15	19	79.5	88	96	18	26	0.68	0.77	0.85	423.3/0.618	610.3/0.715
M _{B6}	61	15.3	20	79	87	94.6	19.5	28.5	0.71	0.81	0.89	438.8/0.636	627.1/0.720
M _{B7}	59	17.6	22	81.5	91	98	21.5	31	0.78	0.88	0.95	455.7/0.648	698.4/0.744

优势度 (General dominance index, GDI) = (相对多度+相对盖度+相对频度)/3

3.1.1 边坡植被的生长状况分析

由表 2 可以看出:相同的播种密度、建植条件下,由马棘、黄荆、狗牙根、芒等路域优势种与典型的边坡绿化配置模式“慈竹+野牛草”、“棉槐+紫羊茅”所构成的组合 M_A 系列(M_{A1-7})、 M_B 系列(M_{B1-7})间的平均成坪时间($M_A=63.3$ d, $M_B=63.4$ d)无明显差异,但同一系列内不同配置小区间差异显著($M_A:58-68$ d, $P<0.05$; $M_B:59-68$ d, $P<0.05$);初始绿化植物的种数(亦即先锋种丰富度)越多,成坪时间越短。

不同配置小区内的植物种类、数目的变化幅度也不一样:初始绿化植物的种类越多,小区内植物种类、数目的增长幅度就越大,入侵种在群落内的优势度也越显著。综合各个试验区(M_{A1-7} 、 M_{B1-7} 、 CK_1)内物种组成变化情况,结果显示,试验期间,试验区内入侵植物共涉及 26 种,隶属于 9 科 11 属。其中灌木 4 科 5 属 8 种,占总种数的 30.77%;草本 6 科 9 属 18 种,占总种数的 69.23%。菊科、禾本科、豆科、蔷薇科是种类最多的 4 科,占种数的 56.4%,表明这 4 种植物在西南地区道路植被的自然恢复演替过程中所起的作用最大,在该地区的植物区系中占据着重要地位。灌木种类较多的科为:豆科、蔷薇科、桑科;草本种类较多的科为:菊科、禾本科、蔷薇科、豆科;种数较多的属为悬钩子属(*Rubus*)、蒲公英属(*Taraxacums*)。其中,艾蒿(*Artemisia argyi*)、白茅(*Imperata cylindrica*)、三叶鬼针草(*Bidens pilosa*)、野菊花(*Dendranthema insicum*)、酢浆草(*Oxalis corniculata*)、飞蓬(*Erigeron acer*)、苦苣菜(*Ixeris polycephala*)、牡蒿(*Artemisia japonica*)、地果(*Ficus tikoua*)、构树(*Broussonetia papyrifera*)、马桑(*Broussonetia papyrifera*)、铁仔(*Myrsine africana*)调查的样方中出现频率较高的入侵者,也是西南地区边坡植被自然恢复过程中主要的建群种或共建种,对边坡自然恢复和生态修复有重要参考价值;生态修复过程中,这些建群种或共建种的存在能最大程度上恢复本地植被多样性。

尽管试验区内边坡植被的生物量与先锋种丰富度显著正相关(表 3),但表 2 却显示,不同生长季节内因先锋种丰富度不同所引起的生物量变化幅度却存在很大差异:同一系列内,先锋种数量相近小区间的生物量差异在第 1 个生长季节内(2010 年)并不明显($P>0.05$),在 2011、2012 年间却达到显著水平($P<0.05$)。

表 3 不同配置模式试验小区中植物生物量(y)与先锋种丰富度(x)的关系

Table 3 Relation between richness of pioneer plants and their biomass

年份 Year	M_{A1-7}		M_{B1-7}	
	关系式 Relationship	决定系数 Determination coefficient (R^2)	关系式 Relationship	决定系数 Determination coefficient (R^2)
2010	$y = 20.05x + 329.57$	0.9937	$y = 22.783x + 318.55$	0.9902
2011	$y = 67.067x + 251.32$	0.9952	$y = 69.308x + 276.31$	0.9913
2012	$y = 84.475x + 246.83$	0.9903	$y = 83.625x + 322.59$	0.9901

3.1.2 边坡植被的群落特征分析

对于特定区域的次生裸地(如裸露边坡)而言,所在生境间种子库或种子雨的时空异质相对较小,先驱植物所营造的局域环境是决定其他物种入侵潜力和能否成功定居的主导因素;先驱植物的配置模式不同,接纳入侵种的种类、数量也不一样(表 2);相同生长季节内,初始绿化植物的种类越多,接纳新物种的潜力则愈强,群落内物种丰度也就越大,二者呈显著正相关(表 4);建坪年限越长,入侵种的优势度越明显。

表 2 显示,不同绿化配置模式试验区内群落盖度的变化幅度也不一样。2010 年间,除 CK_1 外,所有植被的群落盖度均达到 72% 以上;同一系列内,群落盖度随先锋种数目的增多而增大,以 M_{A7} (78%)、 M_{B7} (81.5%) 最高,但先锋种数相近的群落间无明显差异($P>0.05$);2011、2012 年间,同一系列内不同配置小区内的群落盖度也表现出与 2010 年类似的变化趋势。建坪年限越长,群落盖度越高,且与初始绿化植物的物种数目密切相关(决定系数 $R^2=0.954-0.989$,表 4)。

Shannon-wiener 指数是综合反映群落中物种丰富度和均匀度信息的重要参数,它与反映物种分布均匀程度的 Pielou 指数一起,表征着群落的物种多样性;多样性水平越高,系统的结构越稳定,对外界干扰的抵抗和缓冲能力则越强^[11]。表 2 显示,试验区内初始绿化植物的物种数目、配置模式不同,所在小区植物群落的

Shannon-wiener 指数、Pielou 指数也不一样,初始绿化时的先锋种越多,所在群落的多样性水平就越高,所对应的 Shannon-wiener 指数、Pielou 指数也越大,二者呈显著正相关($R^2=0.949\text{—}0.988$,表 4)。

表 4 边坡植被的主要群落特征(y_i)与先锋种数量(x)的关系

Table 4 Relation between number of pioneer plant species of slope vegetation and their primary community characteristics								
指标 Factors	配置模式 Modes	2010		2011		2012		R^2
		关系式 Relationship	R^2	关系式 Relationship	R^2	关系式 Relationship	R^2	
物种丰富度	M_{A1-7}	$y=1.975x+4.1143$	0.9840	$y=2.4667x+4.7762$	0.9918	$y=3.2667x+3.619$	0.9627	
Richness	M_{B1-7}	$y=2.075x+4.9571$	0.9929	$y=2.475x+7.2286$	0.9862	$y=3.2333x+6.9524$	0.9752	
群落盖度	M_{A1-7}	$y=1.5417x+68.762$	0.9763	$y=2.4167x+71.048$	0.9544	$y=3.7917x+72.192$	0.9895	
Community coverage	M_{B1-7}	$y=1.8333x+70.311$	0.9636	$y=2.9583x+72.952$	0.9822	$y=2.7583x+81.481$	0.9774	
入侵种优势度	M_{A1-7}	$y=1.875x+6.3571$	0.9844	$y=3.8333x+5.1667$	0.9851	$y=6.9583x+6.0952$	0.9853	
GDI of invasive species	M_{B1-7}	$y=2.5833x+5.881$	0.9715	$y=3.8333x+8.1667$	0.9742	$y=7.625x+6.1429$	0.9955	
Shannon-wiener 指数	M_{A1-7}	$y=0.0667x+0.3062$	0.9814	$y=0.0692x+0.3776$	0.9869	$y=0.075x+0.4257$	0.9844	
Shannon-wiener index	M_{B1-7}	$y=0.0801x+0.2971$	0.9879	$y=0.0867x+0.3576$	0.9799	$y=0.0867x+0.4333$	0.9818	
Pielou 指数	M_{A1-7}	$y=0.0492x+0.5219$	0.9772	$y=0.0517x+0.5405$	0.9493	$y=0.0475x+0.5843$	0.9543	
Pielou index	M_{B1-7}	$y=0.0492x+0.5319$	0.9772	$y=0.0517x+0.5470$	0.9717	$y=0.055x+0.5602$	0.9758	

3.2 护坡效益分析

3.2.1 裸地产流、产沙特征

2010—2012 年汛期,试验区内自然降雨量及裸地边坡的产流、产沙特征如表 5。可以看出,试验区汛期雨季集中(占年降雨量 71.36%)、产流量大(年均降雨量 829.2 mm;年均产流量 149.8 mm),水土流失严重(裸地年均产沙量 1223.5 g/m²)、生态环境脆弱,是典型的地质灾害多发区。

表 5 2010—2012 年汛期降雨情况及裸地产流、产沙特征

Table 5 Runoff and sediment yield in rare slope and its rainfalls during rainy seasons ranging from 2010 to 2012											
年份 Year	降雨次数 Rainfall times	降雨量 Rainfalls/mm	产流降雨次数 Runoff times	产流量 Runoff yield/mm		产沙量 Sediment yield per plot/kg		径流系数 Runoff coefficient		侵蚀模数 Erosion modulus/(t km ⁻² a ⁻¹)	
				CK ₀	CK ₁	CK ₀	CK ₁	CK ₀	CK ₁	CK ₀	CK ₁
2010	29	820.6	6	149.8	128.6	21.227	15.787	18.25	15.67	1376.67	986.67
2011	31	799.2	5	137.4	108.2	17.933	12.525	17.19	13.54	1120.83	782.83
2012	27	867.7	7	162.3	102.4	18.773	11.876	18.70	11.80	1173.33	742.26

CK₀: 无植被裸地,CK₁: 自然演替的次生裸地

3.2.2 不同护坡植被试验区的产流、产沙特征

产流次数、径流系数、土壤侵蚀模数是衡量植被涵养水源、防沙护坡性能的主要指标,也是表征边坡生态系统抗干扰性能的重要尺度。试验期间,不同试验区内的产流次数以及产沙、产流特征如图 3 所示。可以看出,相同环境条件下,不同初始绿化配置边坡植被的护坡性能也不一样,年际间差异明显。

(1) 产流次数

图 3 显示,边坡产流次数与初始绿化植物的配置模式有关:先锋种数目越多,产流次数越少;建坪年龄越长,产流次数减少的趋势越明显。2010 年,CK、 M_{A1-6} 、 M_{B1-6} 内先锋种相对较少(0—5 种),Shannon-wiener 指数较低(分别为 0.27,0.44—0.65 和 0.46—0.71),边坡植被的抗干扰(雨水冲蚀)能力弱,汛期产流次数与裸地相同(6 次); M_{A7} 、 M_{B7} 内先锋植物较多(6 种),Shannon-wiener 指数较高(0.77,0.78),抗干扰能力增强,产流次数(5 次)减少。2011 年, M_{A1-4} 、 M_{B1-4} 内先锋种相对较少(2—4 种),其 Shannon-wiener 指数(0.52—0.65,0.54—0.71)与 CK₁(0.36)无明显差异,汛期产流次数均为 5 次; M_{A5-6} 、 M_{B5-6} 和 M_{A7} 、 M_{B7} 的先锋种较多,Shannon-wiener 指数较高,抗雨水冲蚀能力增强,产流次数(3—4 次)相应减少。2012 年汛期,群落演化程度

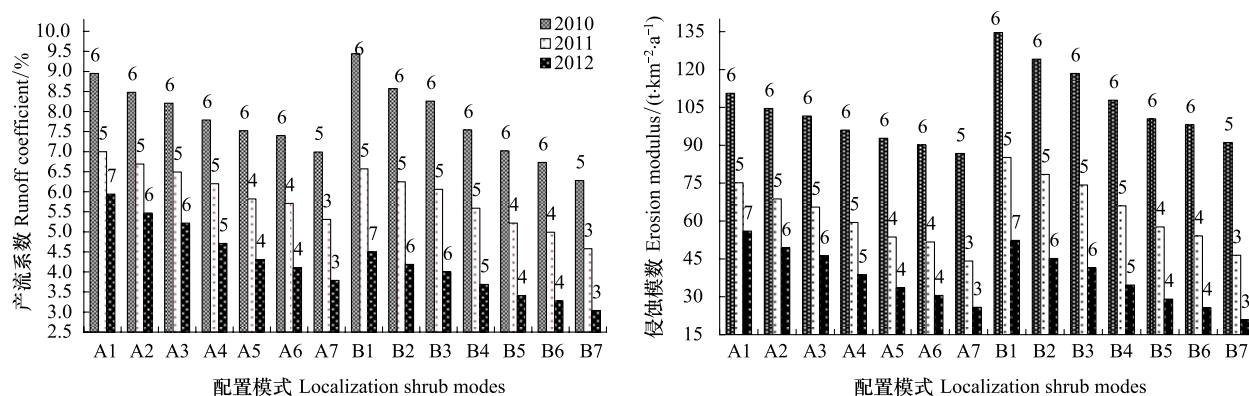


图3 不同配置模式产流、产沙特征的动态变化

Fig.3 Characteristic of runoff and sediment yield of tested localization shrub modes during rainy seasons ranging from 2010 to 2012

矩形图上方的数字表示所在小区在汛期内的产流次数

较高,边坡植被的涵水截流效应更加显著;与CK₁相比,植被覆盖区内的汛期产流次数明显减少,产流次数与先锋种丰度呈显著负相关($R^2=1.000$);先锋种越多,产流次数越少。

(2) 径流系数、侵蚀模数

试验期间,边坡观测区内的径流系数、土壤侵蚀模数与初始绿化植物种数密切相关。2010年汛期,先锋种所在小区(M_{A1-7} 、 M_{B1-7})的护坡性能均明显优于自然恢复状态的裸露边坡CK₁(蓄水能力:14.13%;保土能力:25.53%;产流量:128.60 mm;产沙量:186.67 g/m²),其中, M_{A7} 、 M_{B7} 的护坡性能较强:蓄水、保土能力分别达到61.67%、65.59%和93.46%、93.29%,产流量(57.40、51.53 mm)、产沙量(86.76、89.05 g/m²)也明显低于其它小区($n=4$, $P<0.05$); M_{A1} 、 M_{B1} 的保水(50.97%、48.25%)、保土(90.05%、89.85%)性能相对较差,产流量(73.42、77.44 mm)、产沙量(110.56、134.62 g/m²)较高($n=4$, $P<0.05$)。整个汛期内,观测区内的径流系数、侵蚀模数呈现一致的变化趋势,即 $M_{A7}<M_{A6}<M_{A5}<M_{A4}<M_{A3}<M_{A2}<M_{A1}$, $M_{B7}<M_{B6}<M_{B5}<M_{B4}<M_{B3}<M_{B2}<M_{B1}$ 。2011、2012年汛期, M_{A1-7} 、 M_{B1-7} 所在小区内的产流、产沙情况与2010年汛期相似; M_{A1} 、 M_{B1} 的产流、产沙量较高,护坡性能较差; M_{A7} 、 M_{B7} 的产流、产沙量较低,护坡性能较强;汛期内,不同小区间的径流系数、侵蚀模数波动趋势也与2010年汛期类似:初始绿化植物的种类越多,所在小区内径流系数、侵蚀模数就越小,边坡的护坡性能则越强。

3.3 先锋物种数、群落特征与护坡性能的相关性

相同环境条件下,边坡植被的群落结构、组成特征和发育水平是影响地表径流量、水土流失量的主要因素:地上茎叶对雨滴分层拦截,有利于减少地表径流、阻延土壤溅蚀;地下根系对土壤的加筋、锚固作用,有利于延缓坡面侵蚀、增强其稳定性^[14-15]。

3.3.1 先锋种丰富度与护坡性能的相关性

表6为2010—2012年间 M_{A1-7} 、 M_{B1-7} 所在群落中先锋种丰富度(x)与边坡植被蓄水能力(y)、保土能力(y')关系式。可以看出,护坡植被的蓄水、保土能力与所在群落的先锋种丰富度显著正相关($R^2>0.971$):2010年汛期,群落中初始绿化植物的物种数量与所在边坡的护坡性能呈幂函数关系;2011年汛期,呈线性变量关系;2012年汛期,呈对数函数关系。先锋种越多,所在边坡的蓄水、保土能力则越强。

3.3.2 群落特征与护坡性能的相关性

表7为2010—2012年间不同配置边坡植被所在群落的Shannon-wiener指数(x)与观测区内径流系数(y)、土壤侵蚀模数(y')间拟合关系式。可以看出,群落的Shannon-wiener指数与植被的护坡性能(径流系数、侵蚀模数)密切相关:2010年汛期,Shannon-wiener指数与护坡性能间呈幂函数关系,其拟合方程的 $R^2=0.998-0.999$;2011年汛期,Shannon-wiener指数与护坡性能更趋近线性变量关系,拟合方程的 $R^2=0.998-$

0.999;2012 年汛期,Shannon-wiener 指数与护坡性能则更趋近对数函数关系,拟合方程的 $R^2>0.999$ 。说明群落的多样性水平(Shannon-wiener 指数)越高,其系统稳定性则越高、抗干扰(雨水冲蚀)能力也越强。

表 6 边坡植被的蓄水能力(y)、保土能力(y')与先锋种丰富度(x)的关系

Table 6 Relation between richness of pioneer plants and their capacity of soil and water conservation									
年份 Year	蓄水能力 Water-holding capacity (y)				保土能力 Capacity of soil conservation (y')				
	M_{A1-7}		M_{B1-7}		M_{A1-7}		M_{B1-7}		
	关系式 Relationship	R^2	关系式 Relationship	R^2	关系式 Relationship	R^2	关系式 Relationship	R^2	R^2
2010	$y = 45.133x^{0.1703}$	0.9786	$y = 39.686x^{0.2804}$	0.9865	$y' = 90.49x^{0.0178}$	0.9778	$y' = 87.696x^{0.0333}$		0.9828
2011	$y = 2.4409x + 54.323$	0.9976	$y = 2.9408x + 55.616$	0.9946	$y' = 0.6762x + 91.962$	0.9986	$y' = 0.8798x + 90.589$		0.9964
2012	$y = 10.729\ln(x) + 60.137$	0.9753	$y = 7.2067\ln(x) + 70.499$	0.9713	$y' = 2.3977\ln(x) + 93.406$	0.9749	$y' = 2.4745\ln(x) + 93.683$		0.9734

表 7 观测区内的产流系数(y)、土壤侵蚀模数(y')与所在群落 Shannon-wiener 指数(x)的关系

Table 7 Relation between Shannon-wiener index in communities and their capacity of soil and water conservation									
年份 Year	产流系数 Runoff coefficient (y)				侵蚀模数 Erosion modulus (y')				
	M_{A1-7}		M_{B1-7}		M_{A1-7}		M_{B1-7}		
	关系式 Relationship	R^2	关系式 Relationship	R^2	关系式 Relationship	R^2	关系式 Relationship	R^2	R^2
2010	$y = 5.9123x^{-0.505}$	0.9984	$y = 5.1932x^{-0.7711}$	0.9994	$y' = 72.589x^{-0.5123}$	0.9994	$y' = 75.642x^{-0.7474}$		0.9991
2011	$y = -6.0626x + 10.14$	0.9995	$y = -5.8216x + 9.7076$	0.9997	$y' = -109.38x + 131.34$	0.9981	$y' = -113.32x + 145.84$		0.9984
2012	$y = -5.2273\ln(x) + 3.067$	0.9997	$y = -3.2651\ln(x) + 2.8816$	0.9998	$y' = -73.303\ln(x) + 15.853$	0.9994	$y' = -70.266\ln(x) + 17.365$		0.9996

进一步分析各观测区内植被生物量变化(表 2)与其护坡性能(产流系数、土壤侵蚀模数)的相关性时则发现:2010 年汛期,植被的护坡性能与其地上生物量间呈线性关系($R^2 = 0.996—0.999$);2012 年汛期,其护坡性能与根系生物量间呈线性关系($R^2>0.999$);2011 年汛期,植被的护坡性能趋向模糊,并随群落地上、地下结构的变化而波动。可能的原因是:建坡初期(2010 年汛期),植物根系尚不发达,根冠比小(表 2),植被的护坡性能主要取决于茎叶层对雨滴的分层拦截作用;2012 年汛期,群落演化程度较高,边坡植被的群落盖度较建坪初期普遍提高,部分小区甚至接近饱和水平,其护坡性能主要取决于植物根系的结构特征:根冠比越大,对土壤加筋、锚固作用越强,防沙护坡性能则越优。该结论与李妮^[6]、方文^[16]等人的研究结果一致。生态护坡过程中,边坡植被茎叶片层对雨滴的截流、缓蚀效应以及地下根系对土壤加筋、锚固效应的年际间差异在陈波^[17]、王青杓^[18]等人的研究中也得到证实。

可见,在边坡条件、播种密度等建植条件与建植措施一致的条件下,提高先锋种丰富度(如 M_{A7} 、 M_{B7})是改善边坡植被的护坡性能的有效手段。

4 结论

(1) 建坪初期,初始绿化植物的物种数量(先锋种丰富度)可直接影响护坡植被的成坪时间、生物量积累。先锋种越多(如 M_{A7} 、 M_{B7}),成坪时间越短,被积累的生物量则越多,二者呈显著正相关($R^2>0.990$, $P<0.05$);随后的生长季节(2011、2012 年),观测区内的植物生物量也遵守类似的积累规律。

(2) 先锋种丰富度与群落的结构特征中物种多样性水平密切相关。相同生长季节内,先锋种越多,所在生境接纳新物种的潜力愈强,群落中物种数目越多,群落盖度也越大;先锋植物种类越多,所在群落的植物多样性水平(Shannon-wiener 指数、Pielou 指数等)也越高,二者呈显著正相关($R^2>0.954$, $P<0.05$)。

(3) 边坡植被所在群落中物种多样性水平与植被的护坡性能密切相关($R^2>0.998$, $P<0.05$);建坪初期的先锋种越多,所在群落中植物多样性水平越高(如 M_{A7} 、 M_{B7}),抗干扰(雨水冲蚀)能力、蓄水保土能力也越强,观测区内的产流次数、产流系数、土壤侵蚀模数则越小。建坪时间越久,趋势越明显。

(4) 总体上看,群落中植物多样性水平越高,所在生态系统越稳定、抗干扰能力就越强。可见,在边坡条件、播种密度及相关建植措施一致的条件下,提高先锋种丰富度可有效改善边坡植被的护坡性能。

参考文献 (References):

- [1] Lumaret R, Guillermin J L, Maillet J, Verlaque R. Plant species diversity and polyploidy in islands of natural vegetation isolated in extensive cultivated lands. *Biodiversity and Conservation*, 1997, 6(4): 591-613.
- [2] 肖蓉, 高照良, 宋晓强, 张兴昌, 杨永峰. 高速公路边坡植被特征分析及护坡模式优化研究. *水土保持学报*, 2009, 23(2): 90-94.
- [3] Cary R H, Sotir R B. Biotechnical stabilization of highway cut slope. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1992, 118(9): 1395-1409.
- [4] 王川, 孙铁军, 金洪, 武菊英. 人工植被建植对坡地水土流失的影响. *水土保持学报*, 2009, 23(3): 29-33.
- [5] 李国荣, 毛小青, 倪三川, 朱海丽, 张莹, 胡夏嵩. 浅析灌木与草本植物护坡效应. *草业科学*, 2007, 24(6): 86-89.
- [6] 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. *水土保持学报*, 2012, 26(1): 67-71.
- [7] Cary R F Jr, Slaback R D. Plant materials and establishment techniques for revegetation of California desert highways. *Transportation Research Record*, 1983, 969: 24-26.
- [8] 邓洪亮, 孙丽霞, 廖丹, 王正念. 复杂地质条件下岩石边坡的稳定性分析. *水利与建筑工程学报*, 2008, 6(1): 45-48.
- [9] 刘窑军, 王天巍, 李朝霞, 蔡崇法. 不同植被防护措施对三峡库区土质道路边坡侵蚀的影响. *应用生态学报*, 2012, 23(4): 896-902.
- [10] 王震洪, 段昌群, 侯永平, 杨建松. 植物多样性与生态系统土壤保持功能关系及其生态学意义. *植物生态学报*, 2006, 30(3): 392-403.
- [11] 王倩, 艾应伟, 裴娟, 刘浩, 李伟, 答竹君, 郭培俊. 遂渝铁路边坡草本植物多样性季节动态和空间分布特征. *生态学报*, 2010, 30(24): 6892-6900.
- [12] 陈敬贤. 延庆山区公路边坡植物群落物种多样性特征. *中国水土保持*, 2010, (2): 3-5.
- [13] 张法伟, 李跃清, 李英年, 李以康, 林丽, 曹广民, 杜明远, 王勤学. 高寒草甸不同功能群植被盖度对模拟气候变化的短期响应. *草业科学*, 2010, 19(6): 72-78.
- [14] Zhou Z C, Shanguan Z P, Zhao D. Modeling vegetation coverage and soil erosion in the loess plateau area of China. *Ecological Modelling*, 2006, 198(1/2): 263-268.
- [15] 李建兴, 何丙辉, 湛芸. 不同护坡草本植物的根系特征及对土壤渗透性的影响. *生态学报*, 2013, 33(5): 1535-1544.
- [16] 方文, 刘杨, 马立辉, 潘声旺. 西南丘陵地区几种典型边坡植被的护坡效益分析. *水土保持学报*, 2013, 27(1): 215-219.
- [17] 陈波, 杨新兵, 赵心苗, 王永明, 田超, 刘阳, 刘鹏. 冀北山地 6 种天然纯林枯落物及土壤水文效应. *水土保持学报*, 2012, 26(2): 196-202.
- [18] 王青杵, 王改玲, 石生新, 庄丽, 孙泰森. 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. *水土保持学报*, 2012, 26(2): 71-74, 79-79.