

引用格式:熊丹伟,陈芳清,谭向前,李双洋,黄永文. 实验条件下紫羊茅种群植被混凝土的固土护坡性能[J]. 山地学报,2021,39(2):207-217.
XIONG Danwei, CHEN Fangqing, TAN Xiangqian, LI Shuangyang, HUANG Yongwen. Performance of *Festuca rubra* L. population vegetation concrete in soil conservation and slope reinforcement under experimental conditions [J]. Mountain Research, 2021, 39(2):207-217.

实验条件下紫羊茅种群植被混凝土的固土护坡性能

熊丹伟¹,陈芳清^{1*},谭向前¹,李双洋¹,黄永文²

(1. 三峡大学 湖北省三峡地区生态保护与治理国际联合研究中心,湖北 宜昌 443002;

2. 湖北正江环保科技有限公司,湖北 宜昌 443002)

摘要: 植被混凝土是一种近年来在工程边坡治理中广泛应用的生态防护新技术。植物在植被混凝土不同生长时间固土护坡性能的变化还不清楚。本研究以紫羊茅为对象构建了植被混凝土,通过模拟边坡生长条件,测定紫羊茅植被混凝土在不同生长时间植物地上部与地下部生长特征、茎叶截留效应、以及根土复合体抗剪切强度、抗侵蚀性和根系抗拉强度,揭示了紫羊茅植被混凝土的固土护坡特性及其时间动态,以促进紫羊茅植被混凝土技术的应用。结果表明,紫羊茅的生长状况在成熟期(135~180 d)达到最佳。随着生长时间的延长,紫羊茅茎叶最大截留量逐渐增加,而茎叶最大截留率则呈先增加后减少的变化趋势。茎叶最大截留率在植被生长成熟期(180 d)达到最大值(72.27%),比生长初期(45 d)高33.24%。紫羊茅根系的存在能显著增强植被混凝土基材的固土性能,其抗剪性能和抗侵蚀性能与对照相比分别增加了74.17%和155.23%。植被混凝土的固土性能随着生长时间的延长而不断增加,在临近衰亡期(225 d)达到最大值,与生长初期相比则分别增加了152.55%和86.59%。本研究可为紫羊茅植被混凝土技术在山区工程边坡生态治理中提供参考。

关键词: 植被混凝土;紫羊茅;截留效应;抗剪性能;抗侵蚀性能

中图分类号: Q948.11

文献标志码: A

公路和水电工程建设对山体开挖常产生大量的工程边坡,导致坡面植被的破坏和植物多样性下降,并因此引起坡地稳定性的下降和滑坡等地质灾害的发生^[1-4]。边坡生态治理是提高边坡稳定性的有力手段,可减少地质灾害的发生和改善区域的生态环境质量^[5-6]。植被混凝土生态防护技术(Concrete Biotechnical Slope, CBS)是近年兴起的用于工程边坡治理的绿色新技术,具有施工工艺简单、预制时间短、生态效益好的特点^[7]。混凝土基材中的植被除了有保育生物多样性和改善生态环境质量的作用外,还具有固土护坡的性能。植被地上部的茎叶可

有效截留和存储一部分降雨量,减少雨水对边坡土壤表面的冲刷^[8]。植被地下部的根系则能与土壤形成根土复合体,通过浅根加筋、深根锚固作用对土体进行加固^[9-10],提高其抗剪切和抗侵蚀强度,增强边坡稳定性^[11-12]。植被混凝土的固土护坡性能常因植物种类和植被生长发育时间的不同而显著变化^[13],采用适宜的植物种类及时恢复边坡植被可有效增加边坡的稳定性,防止边坡形成初期因稳定性下降而垮塌^[14]。草本植物生长迅速且在短期内能覆盖边坡以增强边坡的稳定性,是工程边坡初期生态恢复中的优选物种。研究不同草本植物种类所构

收稿日期(Received date):2020-09-12;改回日期(Accepted date):2021-03-05

基金项目(Foundation item):国家重点研发计划项目(2017YFC0504904-02)。^[National Key Research and Development Program of China (2017YFC0504904-02)]

作者简介(Biography):熊丹伟(1996-),男,海南海口人,硕士研究生,主要研究方向:恢复生态学。^[XIONG Danwei (1996-), male, born in Haikou, Hainan province, M. Sc. candidate, research on restoration ecology] E-mail: 503398215@qq.com

* 通讯作者(Corresponding author):陈芳清(1963-),男,博士,教授,主要研究方向:库区和工程扰动区的生态恢复。^[CHEN Fangqing (1963-), male, Ph. D., professor, research on ecological restoration of reservoir area and engineering disturbance area] E-mail: fqchen@ctgu.edu.cn

建植被混凝土的固土护坡特性及其随时间的变化特征有利于植被混凝土生态防护技术的推广与应用。

紫羊茅 (*Festuca rubra* L.) 属于禾本科羊茅属的多年生草本, 分布于中国西南、东北、西北等地区。植株丛生, 株高 30 ~ 60 cm, 叶细长, 根系发达, 具有抗逆性强、生长速度快、适应能力强的特性。该物种通常在 3 月初返青, 11 月下旬枯黄, 生长期约 220 d。在中国西南地区边坡生态恢复实践中, 紫羊茅多被用作先锋物种^[15-16], 但在植被混凝土上的应用研究未见报道。目前对植物固土护坡性能的研究多集中在植物根系与一般基质土壤的单一力学特性及其护坡机理的理论探讨^[17-18], 关于植被混凝土的研究也多侧重于基质营养成分变化和植物生理生化特征^[19-20], 而对植被混凝土固土护坡性能的时间动态及其与植物生长关系的研究比较少见。本研究以紫羊茅为对象构建了植被混凝土, 通过测定不同生长期植被混凝土植物的生长状况、地上部截留性能以及根土复合体抗剪与抗侵蚀性能, 揭示了紫羊茅植被混凝土的固土护坡性能及其随时间的变化, 以求为紫羊茅植被混凝土技术在山区工程边坡生态治理中提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料与设计

紫羊茅种子购于相关种业公司, 种子千粒重为 0.7 ~ 1.0 g。参考《NB/T 35082 - 2016 水电工程陡边坡植被混凝土生态修复技术规范》, 按砂壤土、水泥、绿化添加剂、有机质相对质量比为 100:8:4:7 的比例构建混凝土基材。将黄棕壤研磨过 2 mm 孔径筛网后掺入全新河砂置于容器中, 再加入相应质量的 42.5 号水泥、绿化添加剂 - A 类 (中和 PH 的活性物质)、松木木屑 (有机质) 搅拌均匀后用作混凝土基材构建的用料。将上述用料分五层平铺到固定大小的种植盆 (23 cm × 16 cm × 10 cm), 每层厚约 2 cm, 喷水压实。在铺第五层时, 先将一定数量的植物种子与少量用料充分混合, 均匀撒播到种植盆上, 然后再将剩下的基材铺上 (约 1 cm), 并进行一定的震压。参考紫羊茅常用草坪播种量 (0.004 g · cm⁻²), 本实验中种子用量为每个实验单元播 0.15 g。由于植被混凝土技术主要应用于坡度为 50° ~ 80° 边坡的生态恢复, 实验中种植盆倾

斜成 50° 角摆放, 以模拟边坡生长环境。为保证后期地上植株数量一致, 在萌发期通过剔除多余幼苗使每个实验单元植株的密度保持在 134 株。定期对各实验单元进行水分养护以保证植物的正常生长。

实验以生长时间为变量, 共设置五个处理水平, 根据地上部的生长状况分别为生长初期 (45 d)、生长旺盛期 (90 d)、生长成熟期 (135 d、180 d) 和衰亡期 (225 d)。每个处理水平下各设置 9 个重复和 4 个对照 (无植物生长的混凝土基材)。每 9 个实验单元为一个处理 (9 个重复), 整个实验含 45 个重复和 20 个对照。在上述各生长时期分别进行植物生长与植被混凝土固土护坡性能的测定。在测定指标的前一天用水将实验单元浇水至饱和, 第二天用剪刀将种植盆剪开使其与内部土样分离, 然后取出土样 (23 cm × 16 cm × 10 cm)。每个处理水平各取 9 个带有植物的土样和 4 个空白土样, 共 13 个土样。

1.2 地上部生长及其截留量的测定

在各处理带有植物的 9 个样品中, 每个样品随机挑取 10 株植株, 分别测定其株高和叶片数。由于简易吸水法能表现出植被冠层达到饱和时冠层截留能力, 测定的截留量为地上部分最大或饱和截留量以及茎叶的潜在截留能力, 比较适用于面积较小的试验区^[21], 本实验采用该方法进行茎叶截留性能的测定。将各样品地上全部植株沿土表剪断, 再称取其地上部鲜重, 然后将地上部茎叶完全浸入清水中 5 min, 再轻轻取出后分别称重, 用下列公式计算最大截留率和最大截留量:

$$R_{\max} = (W_2 - W_1) / W_1 \times 100\% \quad (1)$$

$$W_{\max} = R_{\max} \times M_1 / 10 \quad (2)$$

式中, R_{\max} 为最大截留率 (%); W_1 为茎叶样本吸水前重量 (g); W_2 为茎叶样本吸水后重量 (g); W_{\max} 为最大截留量 (g); M_1 为单位面积上茎叶鲜质量 (g · cm⁻²)。

完成上述实验测定后, 将茎叶装入标记好的纸袋中, 将样品放入 105 °C 的烘箱内杀青 30 min, 放在 65 °C 条件下烘干至衡重后称取重量, 用于分析地上生物量与茎叶截留效应的关系。

1.3 地下部生长及其固土护坡性能的测定

从上述每个处理的土样中随机选取 3 个实验样品和 1 个对照样品, 样品大小与种植盆规格一致。采用静水崩解法测定其抗侵蚀性能^[22]。先将含饱和水土样进行称重, 再放置于孔径为 2 cm 的吊网

上,然后放入水中静置 30 min,最后取出水中的土样进行称重。抗蚀性增强系数为:

$$Ce = V_0/V_2 = (V_1 - V_2)/V_1 \quad (3)$$

式中, Ce 为根系抗蚀性增强系数,指由于根系存在而使土壤崩解速率减缓的系数,取值范围在 0~1 之间,越接近 1 说明增强系数越大; V_1 为空白对照土壤的崩解速率($g \cdot min^{-1}$); V_2 为含根土壤的崩解速率($g \cdot min^{-1}$); V_0 为由于根系存在而使土壤崩解速率的减缓值($g \cdot min^{-1}$)。崩解速率用单位时间崩解的含饱和水的土重来衡量,即:

$$V_{1,2} = M/T = (M_1 - M_2)/t \quad (4)$$

式中, M_1 为起始土重(g); M_2 为 30 min 后土重(g); t 为时间(min)。

从上述每个时间段采取的土样中选取 3 个实验土样和 3 个对照土样。将土样沿垂直面切分为 0~3、3~6、6~9 cm 三层,利用袖珍剪切土壤仪分别测定每个土层的抗剪强度,每个土层测试三次,以三次抗剪强度的平均值作为该土层的抗剪强度。仪器由扭力计和 3 个扭力叶片组成,叶片测量的范围值分别为 0~0.2、0~1、0~2.5 $kg \cdot cm^{-2}$,本次实验使用 0~1 $kg \cdot cm^{-2}$ 的叶片进行测量。

将上述抗侵蚀和抗剪实验中根土复合体样品的根系分别从清洗出来,利用根系扫描系统(WinRHIZO 根系分析系统)测定每个样品的根系平均直径、总的根系长度及根表面积。最后,将每个样品的根系放入纸袋中,放入 80 °C 烘箱中烘干至恒重,测定其地下生物量和地下生物量密度(单位面积内所含有地下生物量)。

将上述每个处理所剩余的 3 个土样分别放入尼龙网袋中清洗,直至土壤与根系完全分离。并从每个样品中随机选取 5 条植物根系用于测定抗拉强度。用抗拉测力计测定各根系的最大拉力,并用游标卡尺测量断面直径。每个样品的上述参数用其 5 条根系的平均值表征,然后计算根系的抗拉强度:

$$P = 4F/\pi D^2 \quad (5)$$

式中, P 为抗拉强度($N \cdot mm^{-2}$); F 为最大拉力(N); D 为根茎拉断面直径(mm)。

1.4 数据分析

以紫羊茅生长时间为变量,以植物生长指标和固土护坡指标为因变量进行单因素方差分析(One-way ANOVA),并采用 Duncan 多重比较分析不同生

长时期的差异显著性。然后利用双变量和线性回归对植物地上部茎叶生长状况、茎叶截留量、地下部根系状况、根土复合体的固土护坡性能进行相关性分析和逐步回归分析,以深入了解紫羊茅植被混凝土的固土护坡性能及其与植物地上部和地下部生长的关系。上述分析均采用 SPSS 19.0 进行。

2 结果分析

2.1 紫羊茅生物学特征随时间的动态变化

紫羊茅地上部与地下部生长状况随着生长天数的延长而发生显著性增长($F = 87.19, P < 0.05$),各项指标在地下部衰亡期(225 d)达到最大值(表 1)。植株的株高、地上生物量和叶片数在生长 45~135 d 时增长较快,在生长成熟期至衰亡期(135~225 d)增长逐渐变缓。衰亡期(225 d)植株的株高、地上生物量和叶片数较生长初期(45 d)分别增长了 117.26%、122.83% 和 165.76%;植株地下部生长也呈前期快、后期逐渐减缓的变化。衰亡期(225 d)植株地下部的根平均直径、根表面积、根总长和地下生物量分别比生长初期(45 d)增长了 96.23%、508.22%、311.57% 和 284.09%。

2.2 紫羊茅茎叶截留效应随时间的动态变化

紫羊茅植被混凝土茎叶截留效应随着生长时间的延长而不断变化。地上部最大截留量随着生长天数延长而增加(图 1a),而最大截留率则呈先增加后减小的变化(图 1b)。最大截留量和最大截留率在不同生长时间之间存在显著性差异($F = 52.389, P < 0.05$; $F = 35.824, P < 0.05$)。截留量在衰亡期(225 d)达到最大值(0.48 g),较生长初期(45 d)增加了 285.69%;截留率在生长成熟期(180 d)达到最大值(72.27%),比生长初期(45 d)增加了 33.24%。

2.3 紫羊茅根系固土护坡性能随时间的动态变化

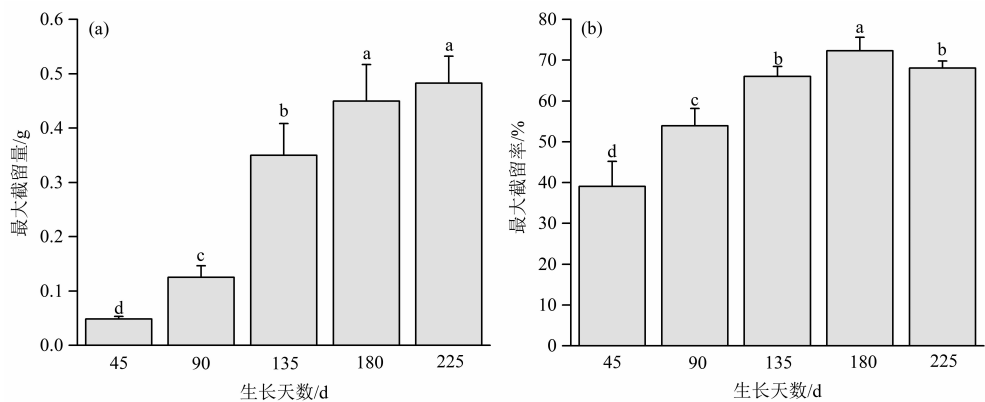
紫羊茅根系抗拉强度随着生长时间的延长而不断增大(图 2),且在不同生长时期呈显著性差异($F = 52.37, P < 0.05$)。紫羊茅根系抗拉强度在生长初期至生长成熟期(45~180 d)增长速率较快,而在生长成熟期(180 d)至衰亡期(225 d)增长较为缓慢。抗拉强度在衰亡期(225 d)达到最大值(80.633 $N \cdot mm^{-2}$),比生长初期(45 d)增加了 260.12%。

表 1 植物生物学特征随生长时间的变化

Tab. 1 Changes of plant biological characteristics with growth time

生长天数/ d	株高/ cm	叶数量/ 片	根平均直径/ mm	根表面积/ cm ²	地上生物量密度/ (g·m ⁻²)	根总长/ m	地下生物量密度/ (g·m ⁻²)
45	12.17 ± 2.30a	3.30 ± 0.47a	0.53 ± 0.01a	239.70 ± 31.92a	62.31 ± 12.13d	3.67 ± 0.15a	33.63 ± 2.26a
90	20.07 ± 3.39b	4.70 ± 0.60a	0.69 ± 0.02b	800.17 ± 66.00b	98.91 ± 8.29d	9.22 ± 0.93b	62.59 ± 1.37b
135	22.67 ± 5.72b	7.03 ± 1.35b	0.97 ± 0.02c	1300.17 ± 165.38c	115.85 ± 9.35c	13.21 ± 0.86c	94.66 ± 5.74c
180	24.51 ± 2.64c	8.56 ± 0.94b	1.01 ± 0.01d	1381.87 ± 78.54c	135.23 ± 3.24b	14.65 ± 0.95d	121.38 ± 5.09d
225	26.44 ± 3.65c	8.77 ± 0.48c	1.04 ± 0.10e	1457.91 ± 89.41d	138.85 ± 3.65a	15.11 ± 0.56d	129.17 ± 2.72e

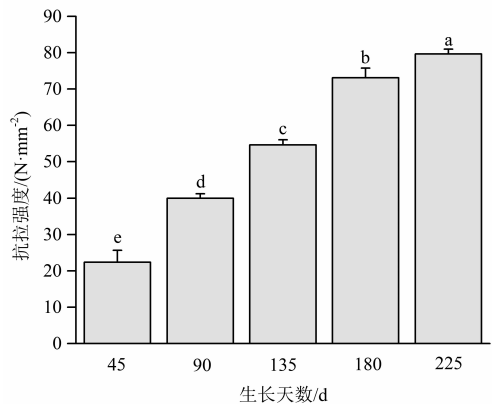
注:数据为均值 ± 标准差,小写字母表示在 0.05 水平的差异显著。



注:小写字母表示在 0.05 水平的差异显著。

图 1 紫羊茅的茎叶截留效应:(a)最大截留量;(b)最大截留率

Fig. 1 Interception effect of *F. rubra* stems and leaves: (a) maximum Interception; (b) maximum Interception rate



注:小写字母表示在 0.05 水平的差异显著。

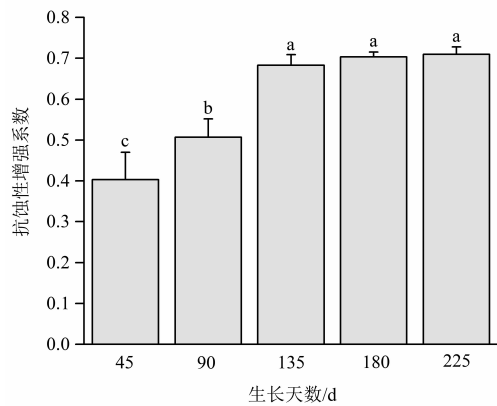
图 2 紫羊茅根系在不同生长时间的抗拉强度

Fig. 2 Tensile strength of *F. rubra* roots during different growth time

紫羊茅根系能有效增强植被混凝土基材抗侵蚀性能,且其增强效应随着生长天数的增加而显著增加 ($F = 67.255, P < 0.05$) (图 3)。紫羊茅根土复合体

的抗侵蚀平均增强系数在不同生长时期在 0.40 ~ 0.71 范围内变化。根土复合体抗侵蚀性在生长初期至生长成熟期(45 ~ 135 d)增长较快,在生长旺盛期至衰亡期(135 ~ 225 d)增长趋于平缓,并在衰亡期达到最大值。生长成熟期(135 d)和衰亡期(225 d)根土复合体的抗侵蚀性增强系数分别比生长初期(45 d)高出 69.43% 和 76.18%。

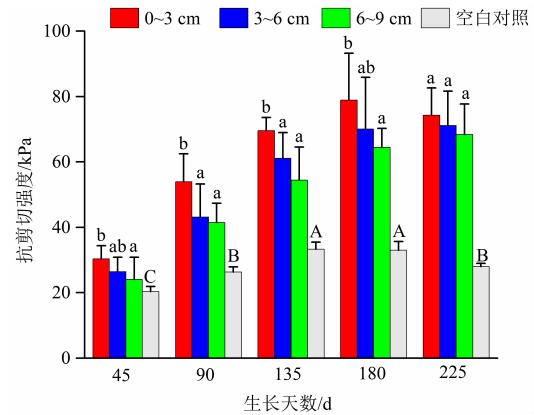
紫羊茅能有效提高植被混凝土基材的抗剪强度 ($F = 42.682, P < 0.05$) (图 4),且其抗剪强度随生长时间呈现出先增加后减少的显著变化 ($F = 30.733, P < 0.05$)。紫羊茅根土复合体的抗剪强度在生长成熟期(180 d)达到最大值,比无植被生长的空白对照增加了 250.31%,比生长初期(45 d)增加了 163.73%。紫羊茅根土复合体的抗剪强度还随土体深度的变化而显著变化 ($F = 38.254, P < 0.05$),浅层的抗剪强度高于中层和深层。以生长成熟期(180 d)为例,浅层的抗剪强度分别比中层和下层的高 12.69% 和 22.40%。



注:小写字母表示在 0.05 水平的差异显著。

图 3 不同生长时间紫羊茅根土复合体的抗侵蚀性

Fig. 3 Erosion resistance of *F. rubra* root-soil composites during different growth time



注:小写字母表示在 0.05 水平上同一生长阶段不同深度土层间的差异显著;大写字母表示在 0.05 水平上不同生长阶段间的差异显著。

图 4 不同生长时间紫羊茅根土复合体的抗剪强度

Fig. 4 Shear strength of *F. rubra* root-soil composites during different growth time

2.4 紫羊茅生长特性和固土护坡性能之间的相关性

紫羊茅茎叶最大截留量与生长状况(株高、叶片数、地上生物量)存在极显著相关($P < 0.01$),而与地下部根系的生长状况相关性不显著(根总长除外)(表 2),表明地上部的生长是影响截留量的主要因素,而地下部的影响较小。地下生物量及植株根系生长参数与土壤抗侵蚀性和根土复合体的抗剪切性存在显著相关($P < 0.05$)和极显著相关的关系($P < 0.01$),说明根系的生长状况对植被混凝土的固土护坡性有显著影响。由于株高与根表面积、根

分叉数密度、根总长均显著相关($P < 0.05$),地上部的生长也能间接影响到地下部的固土护坡性能。截留量与抗剪切性和抗侵蚀性呈极显著相关($P < 0.01$),说明植株在减少降水对土壤的冲刷时,也能提高根土复合体的固土护坡性能。根系抗拉强度与根平均直径、根表面积有显著正相关($P < 0.05$),表明根系生长参数对根系抗拉强度有直接影响。随着生长时间的延长,紫羊茅植被混凝土根系的平均直径与根表面积不断增长,根土复合体的抗侵蚀性和抗剪切性随之呈线性增长(图 5)。

表 2 紫羊茅地上部和地下部生长与固土护坡性能的相关性分析

Tab. 2 Correlation analysis between the growth of *F. rubra* aboveground and underground parts and the performance of soil conservation and slope reinforcement

指标	PH	NOF	ARD	RSA	AGB	RL	MI	ER	SR	TS	UD
PH	1										
NOF	0.69 **	1									
ARD	0.53 *	0.49	1								
RSA	0.56 *	0.51	0.98 **	1							
AGB	0.71 *	0.85 *	0.43	0.549	1						
RL	0.53 *	0.51	0.98 **	0.99 **	0.61	1					
MI	0.95 **	0.98 **	0.48	0.43	0.91 **	0.94 **	1				
ER	0.32	0.20	0.83 **	0.79 **	0.44	0.81 **	0.80 **	1			
SR	0.36 **	0.44 **	0.65 **	0.59 *	0.58	0.55 *	0.68 **	0.39	1		
TS	0.05	0.24	0.85 *	0.91 *	0.69	0.88	0.87	0.19	0.84	1	
UD	0.48	0.56	0.99 **	0.98 **	0.73	0.92 **	0.97 **	0.82 **	0.68 **	0.82	1

注:PH 为株高;NOF 为叶片数;ARD 为根平均直径;RSA 为根表面积;AGB 为地上生物量;RL 为根总长;MI 为最大截留量;ER 为抗侵蚀性;SR 为抗剪切性;TS 为抗拉强度;UD 为地下生物量;* 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关;** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

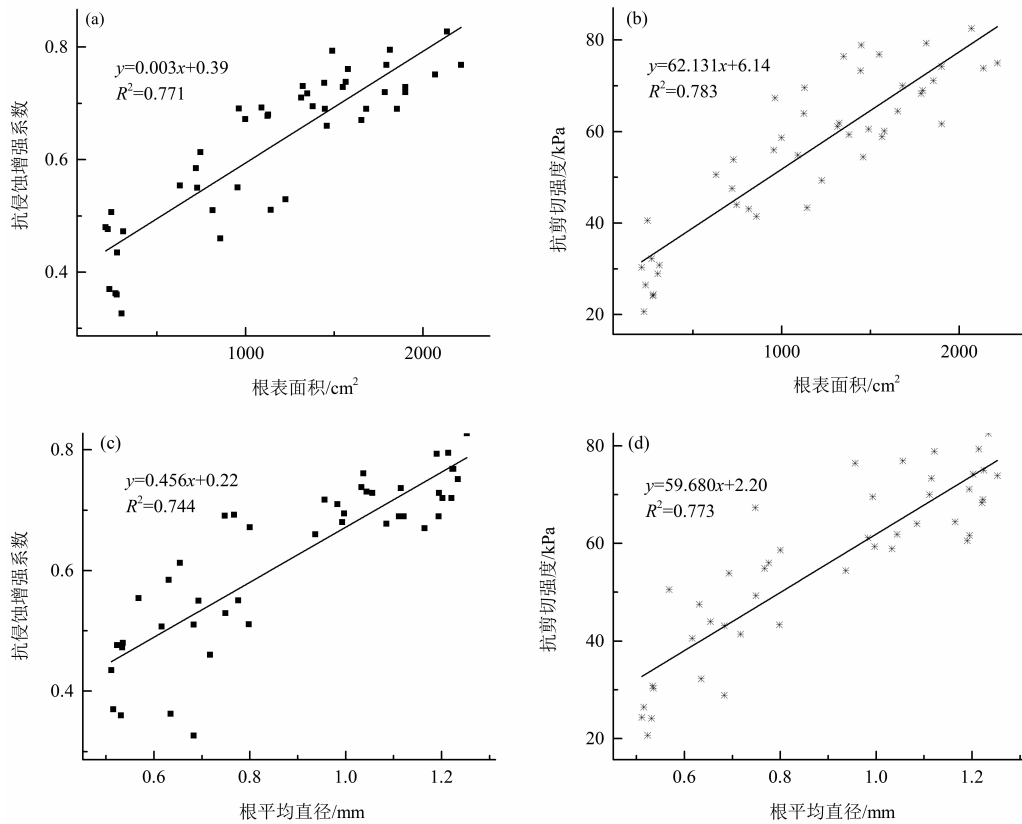


图 5 植物地下部生长特性与根土复合体抗剪和抗侵蚀性能的关系：

(a) 根表面积与抗侵蚀性能的关系；(b) 根表面积与抗剪切强度的关系；

(c) 根平均直径与抗侵蚀性能的关系；(d) 根平均直径与抗剪切强度的关系

Fig. 5 Relationship between growth characteristics of underground part and erosion resistance and shear resistance of root - soil composites:

(a) relationship between root surface area and erosion resistance; (b) relationship between root surface area and shear strength;

(c) relationship between average root diameter and erosion resistance; (d) relationship between average root diameter and shear strength

3 讨论

3.1 紫羊茅茎叶截留性能及其与地上部生长的关系

植物地上部对降雨具有截留效应^[23],植物茎叶除了能使降落到植物体表的大雨滴破散为小雨滴,减少雨水对表面土壤的冲击和溅蚀外^[24-25],还能将一部分雨水吸附与吸收储存起来,再通过蒸发与植物的蒸腾作用将水分逐渐蒸发到大气中^[26]。相关研究表明草本群落对降雨的截留效果较林地更为明显^[27],但不同草本植物种类的茎叶截留效能有着较大差异。张莹等对四种草本茎叶进行降水截留实验^[28],发现偃麦草 (*E. repens*),披碱草 (*E. dahuricus*),细茎冰草 (*A. trachycaulum*) 和赖草 (*L. secalinus*) 最大截留量分别为 0.99 g、0.65 g、0.47 g 和 0.34 g,最大截留率

分别为 33.6%、28.9%、21.8% 和 10.0%。Xiong 等研究了 55 种草本植物的截留量和 27 种草本植物截留率,发现其截留量为 0.12 ~ 1.26 g,截留率为 40.2% ~ 93.2%^[29]。本研究中紫羊茅的茎叶最大截留量和最大截留率随着生长时间的延长整体呈上升趋势,最大截留率为 39.02% ~ 72.27%,最大截留量为 0.52 g 左右。相比之下,紫羊茅的截留效能处于较高水平。紫羊茅的截留效应与其生长期相关,从生长初期经历到衰亡期的过程中截留效应会因植物生产的差异而显著变化,对于紫羊茅不同生长期植被的生长特征与截留效应的关系还需要做更细致的研讨。

植物地上部的生长状况与茎叶截留效应关系密切,植株叶片数、株高、叶面积和地上部生物量都有可能对茎叶截留效应产生影响^[30]。李琴和何周窈

等的研究表明,地上生物量越大植株地上部茎叶截留的效果也越大^[31-32]。本研究中,紫羊茅最大截留量与株高和叶片数呈极显著相关,表明随着植物的生长,株高和叶片数的增加会促进地上部截留效应的增加。

3.2 紫羊茅地下部固土护坡性能及其与根系生长特征的关系

植物根系通过交叉串连,相互缠绕来固结土体,形成了根土复合体。根系对土体进行深根锚固和浅根加筋的力学作用能提升土壤的稳固性能^[33-34]。草本根系属于浅细根,对土体产生的是加筋作用^[8]。植物根系的存在可以增强土体的抗侵蚀性和抗剪切性^[35-36]。但不同物种由于根系的机械性能和生长特性的不同,其地下部固土护坡性能常有着较大的差异^[37]。本研究中紫羊茅的根系明显提升了植被混凝土基材的抗侵蚀和抗剪切性能,其抗侵蚀增强系数在 0.48~0.72 范围内,大于 Ye 等^[38]和 Chen 等^[39]所研究的百喜草(*P. flugge*)和狗牙根(*C. dactylon*),小于孟广涛等^[40]所研究的狗尾草(*S. viridis*)、狼尾草(*P. alopecuroides*)和白三叶(*T. repens*)。紫羊茅植被混凝土最大抗剪切强度(0~9 cm)达到了 61.70 kPa,高于巨菌草(*P. giganteum*)和宽叶雀稗(*P. wettsteinii*)根土复合体的抗剪切强度(16~34 kPa)^[41],以及牧地狼尾草(*P. polystachion*)和花梗狼尾草(*P. pedicellatum*)根土复合体的抗剪切强度(7.5~20 kPa)^[42],其中原因除了植被混凝土基材与普通土壤基质所存在的差异外,植物种类的差异也是原因之一。紫羊茅地下部的固土护坡能力在生长初期、旺盛期、成熟期、衰亡期有不同表现,以生长初期进入到成熟期的增长幅度最大,变化最为明显。

植物根系的生长状况与土壤抗侵蚀性能密切相关^[43]。植物根系的直径、分叉数、根系长度、根密度是影响根土复合体抗侵蚀性的关键因素^[44]。紫羊茅地下部固土护坡性能也与植物根系的生长特性密切相关。相关性分析显示,紫羊茅根系的根平均直径、根表面积、根系长度和生物量与植被混凝土抗剪切性和抗侵蚀性存在显著相关性,其中根系平均直径是抗剪切性和抗侵蚀性的主导因子。由于植物根系随着生长时间的延长而不断生长壮大,紫羊茅地下部固土护坡性能也随之发生增加,其中以生长初

期至成熟期增长速率最快,成熟期至衰亡期增长趋势逐渐减缓。该变化趋势与植物根系的生长动态保持一致。

紫羊茅是一种分布于我国西南部的多年生植物,每年的冬季其地上部大多会枯死,次年会重新萌发新的茎叶,而地下部则大多会得以保存,并在次年继续生长。工程边坡在形成后因稳定性下降需要及时治理,本研究表明该物种所构建的植被混凝土可有效提高边坡的稳定性能,因此可用于我国西南地区工程边坡形成初期的生态治理。由于本研究只是测定了播种当年植被生长和固土护坡性能的动态变化及其相互之间的关系,今后需进一步测定不同生长年限之间的相关变化,以科学掌握其固土护坡效应随植被生长年限的变化规律,为工程边坡的生态恢复与管理提供科学依据。

4 结论

(1)紫羊茅植被混凝土植株生物量与茎叶和根系构件随生长时间的延长而不断增加,至衰亡期达到最大。衰亡期植株的株高、地上生物量和叶片数均值较生长初期(45 d)分别高出 117.26%、122.83%和 165.76%,地下部根平均直径、根表面积、根总长、和地下生物量分别增加了 96.23%、508.22%、311.57%和 284.09%。

(2)紫羊茅地上部茎叶截留效果明显,最大截留量随着生长天数增加而增加,衰亡期(225 d)较生长初期(45 d)增加了 285.69%。最大截留率则呈先增加后减少的变化。紫羊茅根系能显著提高植被混凝土基材的抗侵蚀性和抗剪切性,且其增强效应随着植物生长时间的延长而不断增加,在生长成熟期进入较优状态。土壤基材表层的抗剪切强度较中层、下层分别增加了 12.69%和 22.40%。

(3)紫羊茅植被混凝土固土护坡性能与植被的生长状况密切相关。

(4)工程边坡形成后因稳定性下降需要及时治理,采用紫羊茅植被混凝土治理技术,除了发挥和利用混凝土基材的稳固作用,还能利用植物地上部与根系的作用来进一步增强其固土护坡性能。随着植被的生长与发育,植被混凝土的固土护坡性能会得

到进一步增强,并在植被进入生长旺盛期后达到最佳状态。

参考文献 (References)

- [1] LI Y, QI S, LIANG B, et al. Dangerous degree forecast of soil loss on highway slopes in mountainous areas of the Yunnan - Guizhou Plateau (China) using the Revised Universal Soil Loss Equation [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2019, **19**(4): 757 - 774. DOI: 10.5194/nhess - 19 - 757 - 2019
- [2] POURMALEKSHAH A A M A, MOAYERI M H, PARSAKHOO A. Effect of the root biotechnical characteristics of *Alnus subcordata*, *Paulownia fortunei* and *Populus deltoides* on the soil mechanics [J]. *Journal of Forest Science*, 2019, **65**(7): 283 - 290. DOI: 10.17221/55/2019 - JFS
- [3] TANG Y, BOSSARD C, REIDHEAD J. Effects of percent cover of Japanese cedar in forests on slope slides in Sichuan, China [J]. *Ecological Engineering*, 2015, **74**(2014): 42 - 47. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2014.09.040
- [4] 曹洋兵,程志伟,黄真萍,等. 地下水封洞库施工巷道开挖对仰坡稳定性的影响规律[J]. *山地学报*, 2020, **38**(1): 62 - 72. [CAO Yangbing, CHENG Zhiwei, HUANG Zhenping, et al. Influence law of access tunnel excavation on the stability of the entrance slope of underground water-sealed cavern [J]. *Mountain Research*, 2020, **38**(1): 62 - 72] DOI: 10.16089/j.cnki.1008 - 2786.000491
- [5] XU R, LI X, YANG W, et al. Use of local plants for ecological restoration and slope stability: A possible application in Yan'an, Loess Plateau, China [J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2019, **10**(1): 2106 - 2128. DOI: 10.1080/19475705.2019.1679891
- [6] SHEN P, ZHANG L, CHEN H, et al. Role of vegetation restoration in mitigating hillslope erosion and debris flows [J]. *Engineering Geology*, 2016, **216**: 122 - 133. DOI: 10.1016/j.enggeo.2016.11.019
- [7] 许文年,夏振尧,周明涛,等. 植被混凝土生态防护技术理论与实践[M]. 北京:中国水利水电出版社,2012: 55 - 64. [XU Wennian, XIA Zhenyao, ZHOU Mingtao, et al. Theory and practice of ecological protection technology of vegetation concrete [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2012: 55 - 64]
- [8] 王艳红,宋维峰,李财金. 不同森林类型林冠截留效应研究[J]. *亚热带水土保持*, 2008, **20**(3): 5 - 10. [WANG Yanhong, SONG Weifeng, LI Caijin. Study on crown interception effect of different forest canopies [J]. *Subtropical Soil and Water Conservation*, 2008, **20**(3): 5 - 10] DOI: 10.3969/j.issn.1002 - 2651.2008.03.002
- [9] STOKES A, ATGER C, BENGOUGH A G, et al. Desirable plant root traits for protecting natural and engineered slopes against landslides [J]. *Plant Soil*, 2009, **324**(1 - 2): 1 - 30. DOI: 10.1007/s11104 - 009 - 0159 - y
- [10] WANG Y, SHU Z, ZHENG Y, et al. Plant root reinforcement effect for coastal slope stability [J]. *Journal of Coastal Research*, 2015, **73**(SI): 216 - 219. DOI: 10.2112/SI73 - 038.1
- [11] FAN C, CHEN Y. The effect of root architecture on the shearing resistance of root-permeated soils [J]. *Ecological Engineering*, 2010, **36**(6): 813 - 826. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2010.03.003
- [12] NIU X, NAN Z. Roots of *Cleistogenes songorica* improved soil aggregate cohesion and enhance soil water erosion resistance in rainfall simulation experiments [J]. *Water Air Soil Pollution*, 2017, **228**(3): 109 - 123. DOI: 10.1007/s11270 - 017 - 3289 - 5
- [13] 黄晓乐,周正军,许文年. 植被混凝土基材 2 中草本植物根 - 土复合体抗剪强度与根系分形特征研究[J]. *三峡大学学报 (自然科学版)*, 2012, **34**(2): 59 - 62. [HUANG Xiaole, ZHOU Zhengjun, XU Wennian. Research on shear strength and fractal feature of root-soil composite system by two herb plants in vegetation-growing concrete matrix [J]. *Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences)*, 2012, **34**(2): 59 - 62] DOI: 10.3969/j.issn.1672 - 948X.2012.02.014
- [14] KIM J H, FOURCAUD T, JOURDAN C, et al. Vegetation drives slope stability and its variability through hydrological impacts [J]. *Geophysical Research Letters*, 2017(44): 4897 - 4907. DOI: 10.1002/2017GL073174
- [15] 孙吉雄. 草坪学[M]. 北京:中国农业出版社,1995: 6 - 18, 101 - 155. [SUN Jixiong. *Turf science* [M]. Beijing: China Agricultural Press, 1995: 6 - 18, 101 - 155]
- [16] 方文,潘声旺,何平,等. 先锋种丰富度对边坡植被群落特征及其护坡效益的影响[J]. *生态学报*, 2015, **35**(11): 3653 - 3662. [FANG Wen, PAN Shengwang, HE Ping, et al. Effects of pioneer plants richness on community characteristics of vegetation and their soil and water conservation benefit for highway side slope [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(11): 3653 - 3662] DOI: 10.5846/stxb201308102055
- [17] NORMANIZA O, FAISAL H A, BARAKBAH S S. Engineering properties of *Leucaena leucocephala* for prevention of slope failure [J]. *Ecological Engineering*, 2008, **32**(3): 215 - 221. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2007.11.004
- [18] TEMGOUA A G T, KOKUTSE N K, KAVAZOVIC Z. Influence of forest stands and root morphologies on hillslope stability [J]. *Ecological Engineering*, 2016, **95**: 622 - 634. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2016.06.073
- [19] 王稷,陈芳清,唐彪,等. 两种草本植物光合生理与生化特性对植被混凝土水泥含量的响应[J]. *应用与环境生物学报*, 2020, **26**(1): 25 - 30. [WANG Ji, CHEN Fangqing, TANG Biao, et al. Responses of photosynthesis-related physiological and biochemical characteristics in two herbaceous plants to cement

- content in vegetation concrete matrix [J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2020, **26**(1): 25–30] DOI: 10.19675/j.cnki.1006-687x.2019.04027
- [20] 程虎, 许文年, 向瀚宇, 等. 不同修复年限植被混凝土基材有机碳氧化稳定性特征[J]. 应用与环境生物学报, 2019, **25**(2): 232–238. [CHENG Hu, XU Wennian, XIANG Hanyu, et al. Characteristics of soil oxidizable stable organic carbon in different restoration years for substrate of eco-restoration of vegetation concrete [J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2019, **25**(2): 232–238] DOI: 10.19675/j.cnki.1006-687x.2018.12040
- [21] 胡建忠, 李文忠, 郑佳丽, 等. 祁连山南麓退耕地主要植物群落植被冠层的截留性能[J]. 山地学报, 2004, **22**(4): 492–501. [HU Jianzhong, LI Wenzhong, ZHEN Jiali, et al. Rainfall interception capability of canopy layer of main plant community in rehabilitation lands at southern foot of Qilian Mountain [J]. Mountain Research, 2004, **22**(4): 492–501] DOI: 10.3969/j.issn.1008-2786.2004.04.018
- [22] 徐少君, 曾波. 三峡库区5种耐水淹植物根系增强土壤抗侵蚀效能研究[J]. 水土保持学报, 2008, **22**(6): 13–18. [XU Shaojun, ZENG Bo. Enhancement effects of 5 flooding-tolerant species' roots on soil anti-erodibility in Three Gorges Reservoir region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, **22**(6): 13–18] DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2008.06.020
- [23] NAZAR M, SADEGHI S M M, STAN II J T V, et al. Rainfall interception and redistribution by maize farmland in central Iran [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2020 (27): 100656. DOI: 10.1016/j.ejrh.2019.100656
- [24] 鲍文, 包维楷, 何丙辉, 等. 森林生态系统对降水的分配与拦截效应[J]. 山地学报, 2004, **22**(4): 483–491. [BAO Wen, BAO Weikai, HE Binghui, et al. Interception effects of forest ecosystem on precipitation: A review [J]. Mountain Research, 2004, **22**(4): 483–491] DOI: 10.3969/j.issn.1008-2786.2004.04.017
- [25] ASDAK C, JARVIS P G, GARDINGEN P V, et al. Rainfall interception loss in unlogged and logged forest areas of central Kalimantan, Indonesia [J]. Journal of Hydrology, 1998, **206**(3): 237–244. DOI: 10.1016/S0022-1694(98)00108-5
- [26] 李勇, 葛晓敏, 唐罗忠, 等. 森林不同组分对降水的生态效应研究进展[J]. 世界林业研究, 2015, **28**(2): 19–24. [LI Yong, GE Xiaomin, TANG Luozhong, et al. Ecological effects of different components of forest ecosystems on rainfall [J]. World Forestry Research, 2015, **28**(2): 19–24] DOI: 10.13348/j.cnki.sjlyyj.2015.02.004
- [27] 周跃, WATTS D. 高山峡谷区云南松林土壤侵蚀控制的水文效应[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, **4**(3): 31–38. [ZHOU Yue, WATTS D. Hydrological effect of pinus yunnanensis forest on soil erosion control in the Alpine Gorge region [J]. Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1998, **4**(3): 31–38]
- [28] 张莹, 毛小青, 胡夏嵩, 等. 草本与灌木植物茎叶降水截留作用研究[J]. 人民黄河, 2010, **32**(7): 95–96. [ZHANG Ying, MAO Xiaoqing, HU Xiasong, et al. Study on interception of rainfall by stems and leaves of herbaceous and shrub plants [J]. Yellow River, 2010, **32**(7): 95–96] DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2010.07.041
- [29] XIONG P, CHEN Z, YANG Q, et al. Surface water storage characteristics of main herbaceous species in semiarid Loess Plateau of China [J]. Ecohydrology, 2019, **12**(20): e2145. DOI: 10.1002/eco.2145
- [30] 樊才睿, 李畅游, 贾克力, 等. 不同放牧制度下呼伦贝尔流域草原植被冠层截留[J]. 生态学报, 2015, **35**(14): 4716–4724. [FAN Cairui, LI Changyou, JIA Keli, et al. Grass canopy interception of Hulun watershed under different grazing systems [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, **35**(14): 4716–4724] DOI: 10.5846/stxb201311052674
- [31] 李琴, 王建光, 于然, 等. 三种禾草不同比例混播护坡植被茎叶水文生态效应研究[J]. 草原与草业, 2016, **28**(2): 51–57. [LI Qin, WANG Jianguang, YU Ran, et al. Hydrological and ecological effects of three different gramineous grass in different rates for slope protection [J]. Grassland and Prataculture, 2016, **28**(2): 51–57] DOI: 10.3969/j.issn.2095-5952.2016.02.012
- [32] 何周窈, 苏正安, 熊东红, 等. 金沙江干热河谷区坡面剑麻的水土保持效应[J]. 山地学报, 2018, **36**(5): 731–739. [HE Zhouyao, SU Zheng'an, XIONG Donghong, et al. Effects of agave americana on soil and water conservation of slope in dry-hot valley of Jinsha River [J]. Mountain Research, 2018, **36**(5): 731–739] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000369
- [33] VERGANI C, GIADROSSICH F, SCHWARZ M, et al. Root reinforcement dynamics of European coppice woodlands and their effect on shallow landslides: A review [J]. Earth-Science Reviews, 2017, **167**: 88–102. DOI: 10.1016/j.earscirev.2017.02.002
- [34] TSIGE D, SENADHEERA S, TALEMA A. Stability analysis of plant-root-reinforced shallow slopes along mountainous road corridors based on numerical modeling [J]. Geosciences, 2020, **10**(1): 19. DOI: 10.3390/geosciences10010019
- [35] ZHANG B, ZHANG G, Yang H, et al. Soil resistance to flowing water erosion of seven typical plant communities on steep gully slopes on the Loess Plateau of China [J]. Catena, 2019, **173**: 375–383. DOI: 10.1016/j.catena.2018.10.036
- [36] 刘昌义, 胡夏嵩, 李希来, 等. 黄河源区高寒草地根—土复合体抗剪强度与土壤营养元素分布关系[J]. 山地学报, 2020, **38**(3): 349–359. [LIU Changyi, HU Xiasong, LI Xilai, et al. Relationship between shear strength of root-soil composite systems

- of alpine grassland and distribution of soil nutrient elements in the source region of the Yellow River, China [J]. Mountain Research, 2020, **38**(3): 349 – 359] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000515
- [37] HIMMELBAUER M L, VATEVA V, LOZANOVA L, et al. Site effects on root characteristics and soil protection capability of two cover crops grown in south Bulgaria [J]. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 2013, **61**(1): 30 – 38. DOI: 10.2478/johh-2013-0005
- [38] YE C, GUO Z, LI Z, et al. The effect of Bahiagrass roots on soil erosion resistance of Aquults in subtropical China [J]. Geomorphology, 2017, **285**(15): 82 – 89. DOI: 10.1016/j.geomorph.2017.02.003
- [39] CHEN F, ZHANG J, ZHANG M, et al. Effect of Cynodon dactylon community on the conservation and reinforcement of riparian shallow soil in the Three Gorges Reservoir area [J]. Ecological Processes, 2015, **4**(1): 3 – 11. DOI: 10.1186/s13717-014-0029-2
- [40] 孟广涛,方向京,李贵祥,等. 干热河谷不同引进草种水土保持效果比较[J]. 水土保持学报,2008,**22**(5): 65 – 67. [MENG Guangtao, FANG Xiangjing, LI Guixiang, et al. Effects of different introduced grasses on soil and water conservation in dry-hot valley [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, **22**(5): 65 – 67] DOI: 10.3321/j.issn:1009-2242.2008.05.015
- [41] 李慧,黄炎和,蒋芳市,等. 2 种草本植物根系对崩岗洪积扇土壤抗剪强度的影响[J]. 水土保持学报,2017,**31**(3): 96 – 101. [LI Hui, HUANG Yanhe, JIANG Fangshi, et al. Effects of two herbal plants' roots on soil shear strength in a collapsing gully alluvial fan [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, **31**(3): 96 – 101] DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2017.03.017
- [42] ETTBEB A E, RAHMAN Z A, IDRIS W M R, et al. Root tensile resistance of selected pennisetum species and shear strength of root-permeated soil [J]. Applied and Environmental Soil Science, 2020;3484718. DOI: 10.1155/2020/3484718
- [43] 潘天辉,杜峰,王月. 陕北黄土区护坡植物根系分布和抗剪增强分析[J]. 水土保持研究,2020,**27**(3): 357 – 363 + 371. [PAN Tianhui, DU Feng, WANG Yue. Analysis of root distributions and shear strengths of slope protection plants in the loess region of northern Shaanxi [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, **27**(3): 357 – 363 + 371] DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2020.03.051
- [44] 李强,杨俊诚,张加琼,等. 植物根系抗侵蚀指标及模型研究进展[J]. 农业资源与环境学报,2020,**37**(1): 17 – 23. [LI Qiang, YANG Juncheng, ZHANG Jiaqiong, et al. Progress of research on soil erosion resistance of plant roots and future prospects [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2020, **37**(1): 17 – 23] DOI: 10.13254/j.jare.2018.0316

Performance of *Festuca rubra* L. Population Vegetation Concrete in Soil Conservation and Slope Reinforcement under Experimental Conditions

XIONG Danwei¹, CHEN Fangqing^{1*}, TAN Xiangqian¹, LI Shuangyang¹, HUNAG Yongwen²

(1. Hubei International Scientific and Technological Cooperation Center of Ecological Conservation and Management in

Three Gorges Area, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China;

2. Hubei Zhengjiang Environmental Engineering and Technology Co., Ltd., Yichang 443002, Hubei, China)

Abstract: Vegetation concrete is a new ecological protection technology which is applied widely in engineering slope treatment in recent years. Plants have important influence on the performance of vegetation concrete in soil conservation and slope reinforcement. In this study, *Festuca rubra* L. was used as a research object to construct experimentally vegetation concrete. By simulating the growth conditions of the slope, the growth characteristics of the aboveground and underground parts of *F. rubra* vegetation concrete at different growth times, the interception effect of the stems and leaves, and the shear strength, erosion resistance and root tensile strength of the root-soil composites were determined. It aims to reveal the characteristics of soil conservation and slope reinforcement of *F. rubra* vegetation concrete and its time dynamics, and promote the application of *F. rubra* vegetation concrete technology. The results showed that the growth status of *F. rubra* reached its best in the mature period (135 ~ 180

days). With the prolongation of growth time, the maximum interception of *F. rubra* stems and leaves gradually increased, and the maximum interception rate of stems and leaves showed a trend of first increasing and then decreasing. The maximum interception rate of stems and leaves reached the maximum (72.27%) during the mature period of vegetation growth (180 days), which was 33.24% higher than that of the early growth period (45 days). The existence of the root system of *F. rubra* significantly enhanced the performance of the vegetation concrete substrate in soil conservation. The shear performance and erosion resistance of *F. rubra* vegetation concrete increased by 74.17% and 155.23% respectively compared with the control. The performance of vegetation concrete in soil conservation increased continuously with the prolongation of growth time, reaching the maximum value near the decay period (225 days), and increased by 152.55% and 86.59% respectively compared with the initial growth period. This study provides reference for the application of *F. rubra* vegetation concrete technology in slope ecological treatment of mountain engineering.

Key words: vegetation concrete; *Festuca rubra* L.; interception effect; shear resistance; erosion resistance