DOI: 10.20103/j.stxb.202405161114
姚怡宁,宗桦,周璐,李荷,冯旭环.川西大渡河干热河谷优势灌草植物根系特征及固土能力.生态学报,2025,45(6):2798-2810.
Yao Y N,Zong H,Zhou L,Li H,Feng X H.Root characteristics and soil-fixing ability of the dominant shrubs and herbs in the dry and hot valley of Dadu River in West Sichuan.Acta Ecologica Sinica,2025,45(6):2798-2810.

川西大渡河干热河谷优势灌草植物根系特征及固土能力

姚怡宁[1],宗 桦[1,2,*],周 璐[3],李 荷[4],冯旭环[1]
1 西南交通大学风景园林系,成都 610097
2 西南交通大学道路工程四川省重点实验室,成都 610097
3 中铁二院工程集团有限公司,成都 610031
4 成都市公园城市建设发展研究院,成都 610042

摘要:研究选取川西泸定大渡河干热河谷区的 6 种优势乡土植物,草本有鬼针草(*Bidens pilosa*)、黄茅(*Heteropogon contortus*)、艾草(*Artemisia argyi*)和两头毛(*Incarvillea arguta*),灌木有假杜鹃(*Barleria cristata*)和木蓝(*Indigofera tinctoria*),在生长期(雨季)和衰老期(旱季)分别研究其根系形态和分布特征及含水率变化,通过拉伸实验计算根系的抗拉强度(P)从而计算其根系的黏聚力(C_r),厘清影响其固土能力的关键因子。结果显示:①从根系的分布来看,6 种植物的根面积比(RAR)均随土壤深度增加呈下降趋势,且在生长期和衰老期的变化趋势有所不同。灌木和草本的 RAR 均值差异不显著。②从根系形态来看,黄茅的根长密度和根数显著地超过其他物种,且根系在不同状态下含水率变化最小、持水能力最稳定,在旱季中的生存能力最佳。③6 种优势植物在衰老期的 C_r 值均显著地高于生长期,表明根系的固土能力在旱季强于雨季。无论在生长期还是衰老期,黄茅根系的 P 值及 C_r 值均显著地高于其他植物,两头毛则最低。Pearson 相关性分析显示,根径和根系含水率是影响 P 值的关键因子,根径是影响 C_r 值的关键因子。总体而言,黄茅根系的固土能力最优,可在川西干热河谷区生态修复过程中优先推广。

关键词:干热河谷; 优势植物; 根系特征; 根系黏聚力; 固土能力

Root characteristics and soil-fixing ability of the dominant shrubs and herbs in the dry and hot valley of Dadu River in West Sichuan

YAO Yining[1],ZONG Hua[1,2,*],ZHOU Lu[3],LI He[4],FENG Xuhuan[1]
1 *Department of Landscape,Southwest Jiaotong University,Chengdu* 610097,*China*
2 *Highway Engineering Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu* 610097, *China*
3 *China Railway Second Academy Engineering Group Co.,Ltd.,Chengdu* 610031,*China*
4 *Chengdu Park City Construction and Development Research Institute,Chengdu* 610042,*China*

Abstract: Six dominant native plants in the dry and hot river valley of Dadu River in West Sichuan were selected in this study. The herbs selected were *Bidens pilosa*,*Heteropogon contortus*,*Artemisia argyi*,and *Incarvillea arguta*,and the shrubs were *Barleria cristata* and *Indigofera tinctoria*,to study the morphological characteristics,distribution properties,and changes in water content of their roots during the growth and senescence periods,and to calculate the differences in tensile strength (P) and thus cohesive strength (C_r) of their root systems,by means of tensile tests and to clarify the key factors influencing their variance. Results show: ①In terms of root distribution,the root area ratio (RAR) across all six plants tended to decrease with soil depth,with variations between growth and senescence periods. There is no significant difference was found

基金项目:国家自然科学基金面上项目(31971716,32271945);成都市中铁二院横向项目(KYY2019132)
收稿日期:2024-05-16; **网络出版日期**:2024-12-23
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: zonghua@swjtu.edu.cn

in the mean values of RAR between shrubs and herbs. ②In terms of root morphology, among the six plant, the roots of *H. contortus had the favorable root length density and root number with the most stable water-holding capacity in different statues, which showed it had the best ability to survive in the dry season.* ③The C_r values of the six dominant plants were significantly higher in the senescence period than those in the growth period, indicating that the soil fixation capacity of root system was stronger in the dry season than that in the rainy season. Both in the growing and senescence periods, the *P*-values and C_r values of *H. contortus* were significantly higher than those of the other plants. Pearson correlation analysis showed that root diameter and root water content were key determinants of tensile strength, with root diameter being the key factor influencing cohesive strength. Overall, *H. contortus* had the best soil-binding capacity and should be prioritized in the ecological restoration of the dry and hot river valley in western Sichuan.

Key Words: dry and hot river valleys; dominant plants; root characteristics; root cohesion; soil-fixing capacity

干热河谷区主要分布在我国四川、云南和贵州等地,具有光热资源丰富、降水干湿季分明的特点,其土壤水分含量较少、有机质缺失、侵蚀十分严重,是典型的生态环境脆弱区。干热河谷区地质构造复杂,植被以灌草为主,通常呈现分布稀疏、长势低矮、脆弱退化状态[1]。近年来,随着重大交通工程深入干热河谷区,导致水土流失问题愈发严重[2]。2018 年四川省人民政府出台的《关于印发四川省生态保护红线方案的通知》明确提出,必须加强干热河谷区的地质灾害防治和水土流失治理。当自然修复(封山育林、禁牧禁伐等措施)已无法改善当地的生态系统,近自然修复或可成为改善土壤侵蚀和水土流失的有效途径[3]。近自然修复是指参照自然生态系统的结构与功能,通过精准识别退化生态系统的特征及其驱动因素,以适当的人为干预措施精准施策,激发生态系统自我修复的能力,强调使用自生乡土群落物种修复生态脆弱区[4]。因此,在优势乡土植物中筛选出固土能力优越的物种并予以推广,是实现干热河谷近自然修复的可靠途径。

植物根系一方面依托于天然生物纤维的抗拉强度在土体中发挥加筋效应来加固土体;一方面通过串连缠绕土壤颗粒形成根—土复合体,引起复合体黏聚力和内摩擦角发生改变,增强根系对土壤的锚固作用[5—6]。因此,植物根系的抗拉力学性能(弹性模量)及其对周边土壤颗粒的摩擦锚固性能(简称为根系黏聚力,C_r),是评价其固土能力的两个重要指标[7—8]。已有研究先后探讨了三峡消落带[9]、黄河源区曲流河岸[10]、盐湖寒旱区域[11]、中西部高原季节冻土区[12]、黄土丘陵区[13]等生态脆弱区的灌草植物根系特征对根系抗拉强度(P)或 C_r值的影响。结果表明,根系形态及分布特征是影响根系固土能力的重要因素,但因物种的不同影响差异较大[8,14]。就根径而言,P 值通常随着根系直径(根径)的增长呈线性减小[2,15],但青藏高原东部边坡的柠条锦鸡儿(*Caragana microphylla*)和早熟禾(*Poa annua*)的 P 值则随根径的增大呈幂函数或指数函数减小[16]。当根径一定时,铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)和苔草(*Carex lanceolata*)等植物的 P 值则随根长的增大而减小[17]。就根长而言,拉巴豆(*Dolichos lablab*)和紫花苜蓿(*Medicago sativa*)的 C_r值与根长呈显著正相关[18]。此外,刘国松和唐菡等指出 C_r值还随含根量的增加而变大,增幅可达 2.7%—77.9%[10,19]。就根系的分布特征而言,地下 0—30 cm 深度范围内的根系能显著提升 C_r值,且沿竖向分布的根系产生的 C_r值最大[12]。紫花地丁(*Viola philippica*)和水麦冬(*Triglochin palustris*)根系的 C_r值与根土面积比(RAR)呈显著正相关[20]。另外,因季节和环境的不同引起的根系含水率变化也会影响根系的固土能力[21]。有研究表明,P 值会随根系含水率的降低而增高[22]。但由于根系含水率测定较为繁琐,此类研究数量少。此外,根系的固土能力还与根系微观结构及组分(木质素和纤维素等)密切相关[23]。

总体而言,当前鲜有研究针对川西干热河谷区展开,已有成果[2]仅从抗拉力学特性(弹性模量)的视角比较了川西干热河谷优势植被根系的固土能力差异,指出黄茅、鬼针草和假杜鹃根系的抗拉力学特性优于其他物种,但优势物种根系对土壤的摩擦锚固性能(C_r)及其影响因子尚未可知。为此,本研究以同一区域的 6 种优势乡土灌草植物为例,探索根系形态和分布特征及含水率对根系黏聚力的影响,最终筛选出适用于当地水土流失治理和近自然修复的最适物种。研究成果可为生态极其脆弱区生态修复过程中的植物精准选择奠定科学基础。

1 研究对象与方法

1.1 研究区域概况

本研究涉及的 6 种优势乡土植物的采样地位于四川甘孜州泸定县大渡河干热河谷——白日坝流域(102°13′28.30″E—102°14′9.4″E,29°55′21.12″N—29°56′14.45″N)。大渡河干热河谷干旱少雨、蒸发量大,生境砾石多、河岸坡度大,是川西地区干旱问题异常突出、植被退化和水土流失极其严重的区域,生态恢复异常困难。白日坝流域位于大渡河低中山河谷区,年平均气温为 15.5℃,年降水量 664.4 mm 并集中在 6—7 月,10 月到次年 4 月降水量仅占全年的 10%,年蒸发量 1275.7 mm[2]。该地土壤类型主要是沙土、冲积土、棕壤土和褐土,土层较薄(厚度约 10—30 cm)。

1.2 研究材料与方法

1.2.1 乡土优势植物的筛选及其根系材料的获取

课题组前期对白日坝流域的自生灌草植物进行了多样性调查[2],筛选出了 6 种优势自生乡土植物,含 4 种一年生草本和 2 种灌木。一年生草本有:鬼针草(*Bidens pilosa*)、黄茅(*Heteropogon contortus*)、艾草(*Artemisia argyi*)和两头毛(*Incarvillea arguta*);灌木有假杜鹃(*Barleria cristata*)和木蓝(*Indigofera tinctoria*)。研究选择在植被生长期(6 月,雨季)和衰老期(10 月,旱季),在白日坝流域两侧的山坡上采集生长状况(主茎粗度、平均高度和冠幅)较为一致的健康植株(表 1),每种植物采集 20 株,采用沿根基周围逐层挖掘的“全部挖掘法”挖掘其根系材料,过程中尽量避免损伤根系的完整性。挖掘时分别测量根系在 0—5 cm、5—10 cm、10—15 cm、15—20 cm、20—25 cm 和 25—30 cm 土壤层分布区的土体横截面积。随后剪去部分枝叶降低蒸腾作用,除去包裹完整根系的多余土体后将植株放入保鲜袋带回实验室(图 1),冲洗根系、用滤纸吸干水分后进行拍照和测量。

图 1 假杜鹃植株全部挖掘图

Fig.1 Complete excavation photo of *Barleria cristata*

1.2.2 植物根系特征测量及根面积比测算

采用普通尺和精度为 0.001 mm 的电子数显游标卡尺分别测量植株的根长和根径。每种植物各取 5 株样本测量根数、根径和根系总长度(简称根长)。单位土壤体积所含根系的长度为根长密度(cm/cm^3)[23],反映根系在土体中延伸、穿插和交织的程度。随机选择 20 条完整无损伤的根系,分别测定其两端和中部 3 个部位的直径,计算平均值作为其根径值。植物根面积比(RAR)是根系横截面积与土体横截面积的比值[6],反映不同深度土壤中植物根系分布的特征[7],计算公式如下[20]:

$$\mathrm{RAR} = \sum_{i=1}^{n} \frac{\pi d_i^2}{4A} \tag{1}$$

式中,n 为根系的数量,d_i 为第 i 个根系的根径(cm),A 为土壤剖面横切面的面积(cm^2)。

1.2.3 不同状态下根系含水率的测定

将鲜根称重后送入电热恒温鼓风干燥箱烘干,按照以下公式计算其含水率 W(%):

$$W = \frac{G_W - G_0}{G_0} \times 100\% \tag{2}$$

式中,G_w为根系的鲜重(g),G_0为根系的干重(g)。随后运用风干法和浸泡法分别测量根系含水率,模拟根系在土壤中遭受干旱或洪涝灾害时的状态。风干法中,每种植物准备 A、B 两组(20 个单根/组)鲜活根系编号备用。将鲜根悬挂于通风处使其逐渐失去水分,风干 6 h 和 12 h 后测定其根系含水率变化。浸泡法中,每种植物选取 20 个单根,放入备满水的玻璃器皿中,每 3 h 测量根系含水量变化,直至其不再变化达到饱和状态,按照以下公式计算其含水率 W_1(%):

$$W_1 = \frac{G_W - G_H}{G_H} \times 100\% \tag{3}$$

式中,G_w为根系的鲜重(g),G_H为浸泡处理后根系的重量(g)。

1.2.4　根系抗拉强度(P)和及根系黏聚力(C_r)

依次采用鲜根、风干根和饱和根进行单根拉伸实验。使用艾德堡 HLD-HP50 数显推拉力机(最大负荷力为 50 N,精确到 0.01 N,精度在±0.5%)记录单根形变过程的拉力变化数据。固定单根时,将根系两端均伸入夹具 3 cm 左右并与基座保持垂直,随后手动匀速(20 mm/min)转动手轮实施拉伸。每种植物的根系至少重复 20 次,均值为单根的平均极限抗拉力,并计算单根的平均抗拉强度 P(MPa),公式如下[24]:

$$P = \frac{4F}{\pi D^2} \tag{4}$$

式中,F 为根系平均极限抗拉力(N),D 为根系的平均根径(mm)。随后采用由 Wu 等[25]和 Waldron[26]提出的 Wu-waldron 模型计算根系黏聚力(C_r,KPa)。此模型建立了根系抗拉强度和 RAR 等参数与抗剪强度增量的关系,因概念清晰和理论成熟而被广泛应用,公式如下[27—28]:

$$C_r = 1.2 \times \sum_{j=1}^{N} P \times \mathrm{RAR} \tag{5}$$

式中,P 为单根的平均抗拉强度(MPa);RAR 为根面积比,N 为根系数量。

2　结果与分析

2.1　6 种优势乡土植物在生长期和衰老期的根系特征

2.1.1　优势乡土植物的平均根数、根长密度与平均根径

在生长期和衰老期分别采集到优势乡土植物的有效单根样本数 558 个和 674 个。草本植物的根系主要分布在 0—20 cm 的土壤深度,并密集散布于 0—15 cm 的范围内;灌木根系虽可达地表 20 cm 以下,但当土体深度超过 20 cm 后根系极少。就平均根数而言,草本中黄茅的根数明显多于其他物种,灌木中假杜鹃的根数多于木蓝(表 1)。就根长而言,2 种灌木在生长期的平均根长均超过其衰老期,其中假杜鹃的平均根长(135.6 mm)显著地高于木蓝(120.40 mm)(图 2);草本中,仅艾草的平均根长在生长期大于衰老期,其中黄茅的平均根长(100.42 mm)显著小于其他草本(图 3)。从平均根长密度来看(表 1),两头毛和木蓝的平均根长密度显著地小于其余植物。衰老期的黄茅(0.017 cm/cm^3)、假杜鹃(0.019 cm/cm^3)和木蓝(0.011 cm/cm^3)的根长密度显著高于其生长期(0.011 cm/cm^3、0.012 cm/cm^3、0.005 cm/cm^3),而其余 3 种植物则无显著差异。就根径而言,除两头毛(1.53 mm)外,其他草本植物的平均根径均小于 1 mm(图 3)。两头毛的根径介于 0.29—4.97 mm 之间,粗细差异最大;黄茅的根径介于 0.16—0.75 mm 之间,粗细最为均匀。草本中仅黄茅的平均根径在生长期小于衰老期。总体而言,本研究涉及的灌木与草本相比,在平均根数、根长、根长密度和根径上均无显著差异。

2.1.2　优势乡土植物根系在不同土壤深度下的 RAR 值变化

在生长期中,草本植物的 RAR 均值(0.0254%)高于灌木(0.019%)。草本中(表 2),两头毛的 RAR 均值(0.0541%)最大,且显著地高于其他草本植物;灌木中,木蓝的 RAR 均值最大且显著地高于假杜鹃。在衰老期中,草本的 RAR 均值(0.0590%)略高于灌木(0.0579%)。草本中,黄茅的 RAR 均值最大(0.0616%),两头毛次之、艾草最小,但物种间差异不显著;两种灌木的 RAR 值差异也不显著。

表 1 6 种乡土植物的基本形态特征

Table1 Morphological characteristics of six native plants

类型 Type	物种 Species	平均高度 Mean height/cm	平均冠幅 Mean crown width/cm	平均根数 Mean root number	平均根长密度 Mean root length density/ (cm/cm^3)	根系特征 Root characteristics
草本	鬼针草	25.10	17.30	29.8b	0.017b	根数量多且长,颜色呈乳白或深褐色
Herbs	艾草	36.5	18.98	13.91a	0.018b	根数量少,极短且细,颜色呈乳黄色
	黄茅	17.8	21.6	56.8c	0.014b	根数量极多但细且硬,颜色呈乳白色或棕色
	两头毛	34	24.3	11.6a	0.006a	根数量少但粗壮,颜色呈乳黄色
灌木	假杜鹃	21.3	30.65	20.3ab	0.018b	根数量多质硬,颜色呈棕色
Shrubs	木蓝	32.7	34.25	14.4a	0.008a	根数量少且细,韧性强,颜色呈深褐色

数据后跟随的英文字母表明同组数值间差异显著性,字母不同则表明差异显著($P<0.05$)

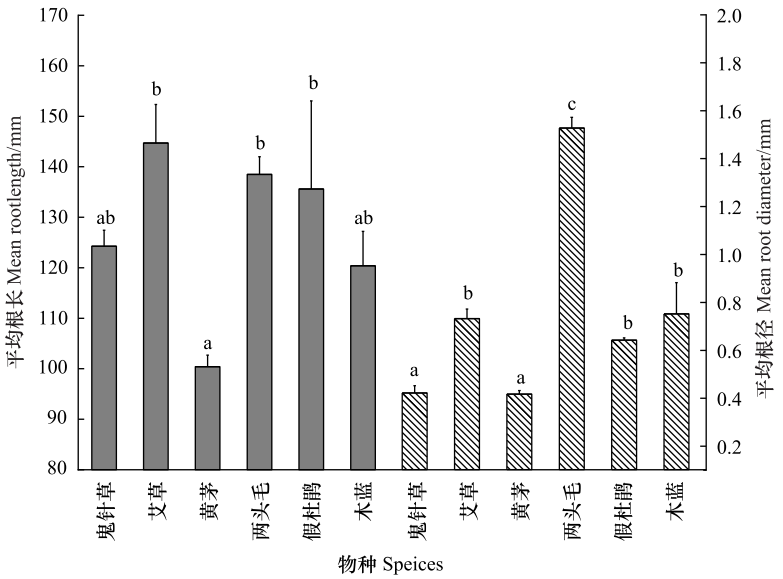

图 2 6 种乡土植物的平均根长及根径的比较

Fig.2 Comparison of the mean root length and root diameter of the six native plants

图中标注的不同英文字母表示同组数值间的差异显著($P<0.05$)

植物根系在不同土层中的分布并不均匀。但无论生长期还是衰老期,6 种乡土植物在 0—5 cm 土层中的 RAR 值均为最高,其中黄茅的 RAR 值最大,两头毛最低。此外,物种的 RAR 值随植物生长周期变化明显。生长期中(图 4),两头毛在所有测量土层中的 RAR 值始终高于其他植物。在 5—10 cm 和 10—15 cm 的土壤深度时,黄茅根系的 RAR 值始终最小(分别为 0.0031% 和 0.0002%),在 15—20 cm 的土壤深度时,黄茅根系消失;在 20—25 cm 的土层深度时,鬼针草根系消失。衰老期中(图 5),假杜鹃在所有测量土层中的 RAR 值始终高于木蓝。当土壤深度为 10—15 cm 时,黄茅根系消失,当土壤深度为 15—20 cm 时,假杜鹃根系消失,当土壤深度达到 20—25 cm 深度时,仅剩两头毛根系(RAR

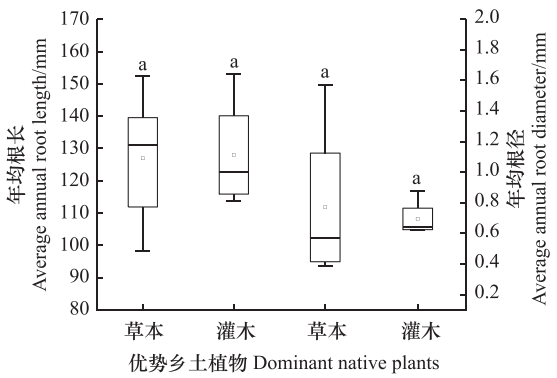

图 3 草本和灌木的平均根长及根径的比较

Fig.3 Comparison of the mean root length and root diameter of herbs and shrubs

=0.0252%)。总体而言,生长期中 6 种植物从土壤表面到深处的 RAR 减少的速率差异不大;但衰老期中其 RAR 值在 0—15 cm 的土壤深度范围内减小速率最快,随后逐步放缓。

表 2　6 种乡土植物的 RAR 均值差异

Table 2　Mean RAR values of the six native plants

物种 Species		草本 Herbs				灌木 Shrubs	
		鬼针草	艾草	黄茅	两头毛	假杜鹃	木蓝
RAR 均值	生长期	0.0075a	0.0266ab	0.0134a	0.0539b	0.0077a	0.0308ab
Mean RAR/%	衰老期	0.0604a	0.0527a	0.0616a	0.0613a	0.0672a	0.0486a

表中数据后跟随的不同英文字母表示同组数值间的差异显著($P<0.05$),下表同;RAR:根面积比 Root area ratio

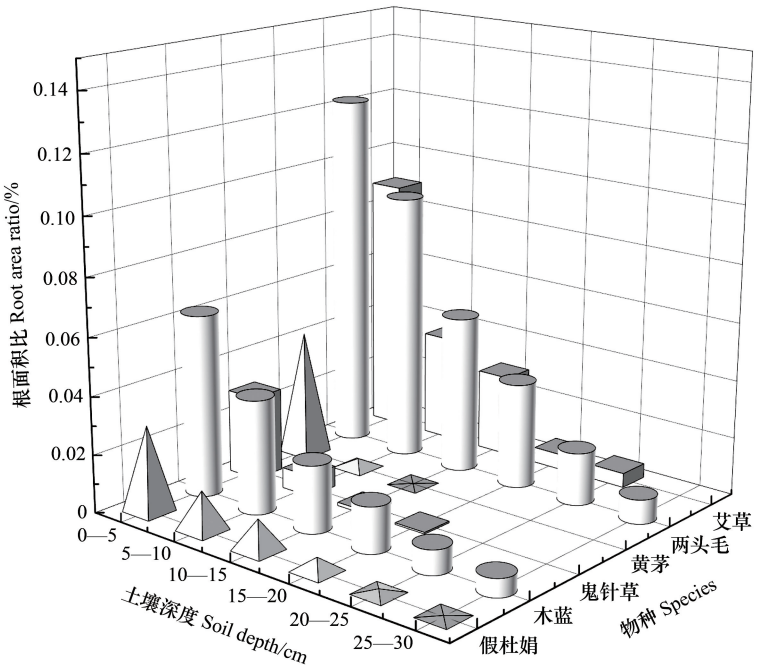

图 4　生长期中 6 种乡土植物的 RAR 值随土壤深度变化情况

Fig.4　The RAR variation of the six native plants with soil depth increasing during the growth period

2.2　6 种优势乡土植物根系在不同状态下的含水率变化

表 3 显示了不同时期的植物根系在 4 种状态下(鲜根、风干 6 h 和 12 h 及浸泡至饱和态)的含水率。就鲜根而言,两头毛根系的含水率显著地高于其他物种。草本中的艾草、两头毛与 2 种灌木在生长期内的鲜根含水率均远高于其衰老期;黄茅的鲜根含水率在生长期和衰老期差异最小且均值也最小;而鬼针草在衰老期的鲜根含水率远高于其生长期。在风干过程中,6 种植物的根系含水率均在风干 6 h 内锐减,随后其含水率减少速率明显变慢,风干 12 h 后根系含水率均处于相对平稳状态。在生长期,两头毛的根系含水率在风干 6 h 内的减少速率最慢、木蓝的减少速率最快;12 h 风干结束后,草本中黄茅的根系含水率最低,两头毛最高;灌木中假杜鹃的根系含水率高于木蓝。在衰老期,艾草根系的含水率减少速率最快,两头毛的减少速率最慢;但 12 h 风干结束后,木蓝根系的含水率高于假杜鹃。就饱和状态而言,处于生长期的 6 种乡土植物根系的含水率均高于衰老期。总体而言,无论在生长期还是衰老期,各状态下两头毛的根系含水率均显著高于其余植物,其土壤需水量最大;鬼针草在生长期(雨季)根系的吸水能力最强。黄茅根系在饱和状态下的含水率均为最低,且仅为鲜根的 1.52 倍,其吸水能力虽不占优势,但对水分的要求低,在各种环境中的持水能力最为稳定。

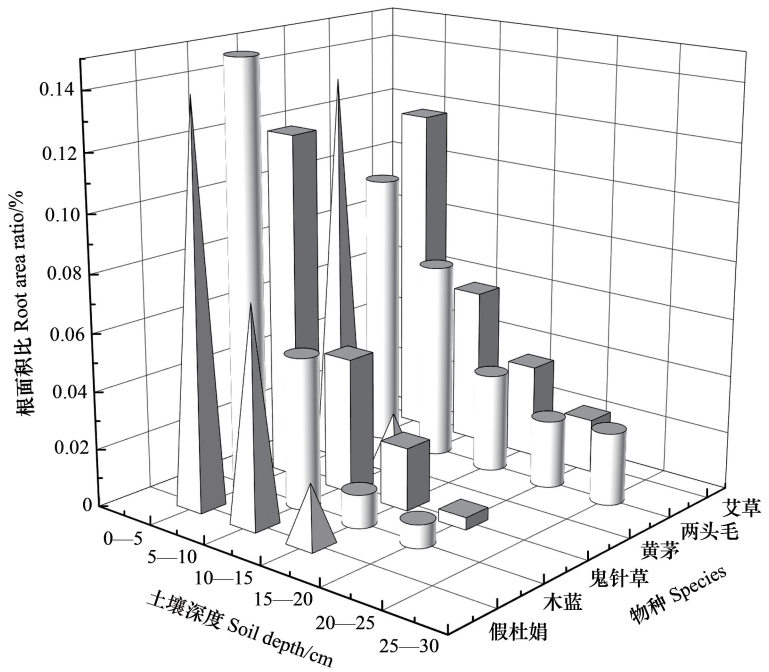

图 5 衰老期中 6 种乡土植物的 RAR 值随土壤深度变化情况

Fig.5 The RAR variation of the six native plants with soil depth increasing during the senescence period

表 3 不同状态下 6 种乡土植物的根系含水率变化

Table 3 Changes in root water content of the six native plants in the different treatments

类型 Type	物种 Species	状态 Statuses	平均含水率 Mean water content/%		
			生长期 Growing period	衰老期 Senescence period	年均值 Annual mean values
草本 Herbs	鬼针草	鲜根	44.19	148.00	96.10a
		风干 6 h	11.76	15.79	13.78a
		风干 12 h	9.64	13.82	11.73a
		饱和	287.44	173.47	230.46c
	艾草	鲜根	122.63	79.26	100.95a
		风干 6 h	13.16	15.76	14.46a
		风干 12 h	11.79	12.63	12.21a
		饱和	230.33	173.07	201.70bc
	黄茅	鲜根	50.19	56.67	53.43a
		风干 6 h	7.69	22.45	15.07a
		风干 12 h	6.56	16.48	11.52a
		饱和	76.25	69.62	72.94a
	两头毛	鲜根	324.31	239.80	282.06b
		风干 6 h	153.48	183.03	168.26b
		风干 12 h	106.04	153.87	129.96b
		饱和	355.56	277.59	316.58d
灌木 Shrubs	假杜鹃	鲜根	114.53	85.94	100.24a
		风干 6 h	10.21	28.66	19.44a
		风干 12 h	9.35	15.47	12.41a
		饱和	149.20	99.68	124.44ab
	木蓝	鲜根	209.66	74.02	141.84a
		风干 6 h	12.41	17.70	15.06a
		风干 12 h	10.50	16.72	13.61a
		饱和	236.63	80.00	158.32bc

2.3　6 种优势乡土植物根系在不同状态下的平均极限抗拉力(F)及抗拉强度(P)

由图 6 可见,不同状态下的 6 种植物根系的 F 值差异巨大。灌木中,无论在生长期还是衰老期,木蓝根系在鲜根、风干 6 h 和 12 h 状态下的 F 值(分别为 16.53 N、13.68 N 和 21.13 N)均高于假杜鹃(分别为 14.19 N, 12.94 N 和 10.36 N)。草本中,无论在生长期还是衰老期,黄茅和鬼针草在不同状态下的根系 F 值变化最为平稳(图 5),表明根系含水率变化对其 F 值的影响最小,且黄茅根系的所有 F 值均高于鬼针草。与之相反,艾草在不同状态下的 F 值变化最为剧烈,其受根系含水率的影响最大。但总体而言,木蓝根系在各状态下的 F 均值(16.16 N)显著地高于其他 5 种植物,鬼针草系在各状态下的 F 均值(5.84 N)显著地低于其他植物。

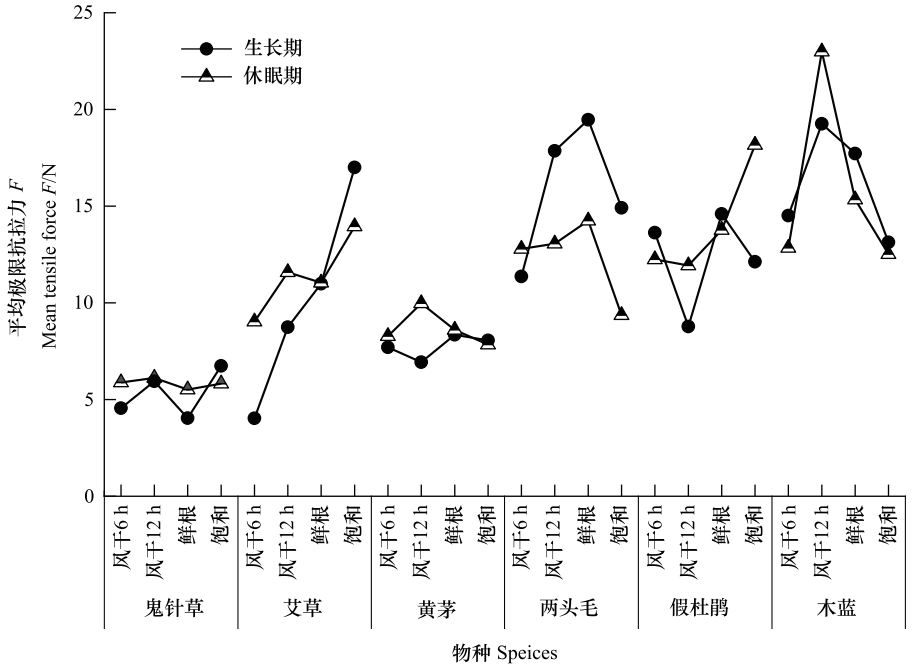

图 6　不同状态下 6 种乡土植物根系的 F 值

Fig.6　Root F-values of six native plant root with different statues

由图 7 可见,衰老期时 6 种乡土植物根系在风干状态下的 P 值均高于鲜根及饱和状态。生长期时,除木蓝外的其余植物根系处于饱和状态下的 P 值总是低于其他状态。鬼针草、黄茅、两头毛和木蓝根系在 6 h 风干状态下的 P 值高于其他状态;艾草和假杜鹃的根系在 12 h 风干状态下的 P 值高于其他状态。反映出适度干旱能提高根系的平均抗拉强度。总体而言,无论在生长期还是衰老期(图 8),两头毛根系在不同状态下的 P 均值(8.2 MPa)显著地低于其他 5 种植物,且变化最为平稳;黄茅根系在不同状态下的 P 均值(65.78 MPa)显著地高于其他 5 种植物。

2.4　6 种优势乡土植物的鲜根在生长期和衰老期的平均黏聚力(C_r)

表 4 展示了不同时期优势乡土植物根系的 C_r 值变化,6 种植物的 C_r 值在衰老期显著地高于生长期,但灌木和草本之间差异不显著。具体来看,生长期中黄茅的 C_r 值显著地高于其他植物,两头毛和假杜鹃的 C_r 值显著地低于其他植物。衰老期中,黄茅的 C_r 值仍显著地高于其他植物,两头毛的 C_r 值依旧显著地低于其他植物。在不同生长时期,假杜鹃的 C_r 值差异最大,两头毛 C_r 值最为稳定。

2.5　根系特征对抗拉系数 P 及平均黏聚力 C_r 的影响分析

Pearson 相关性分析显示,6 种乡土植物的 P 值均与根长无关,但与根径均呈显著或极显著负线性相关(表 5),根径越大抗拉强度越小。6 种植物整体的根系含水率与 P 值呈现极显著负线性相关(生长期的相关系数 $r=-0.722^{**}$,衰老期的 $r=-0.750^{**}$),表明根系含水率越高,根系抗拉强度越小,线性拟合见图 9,拟合准

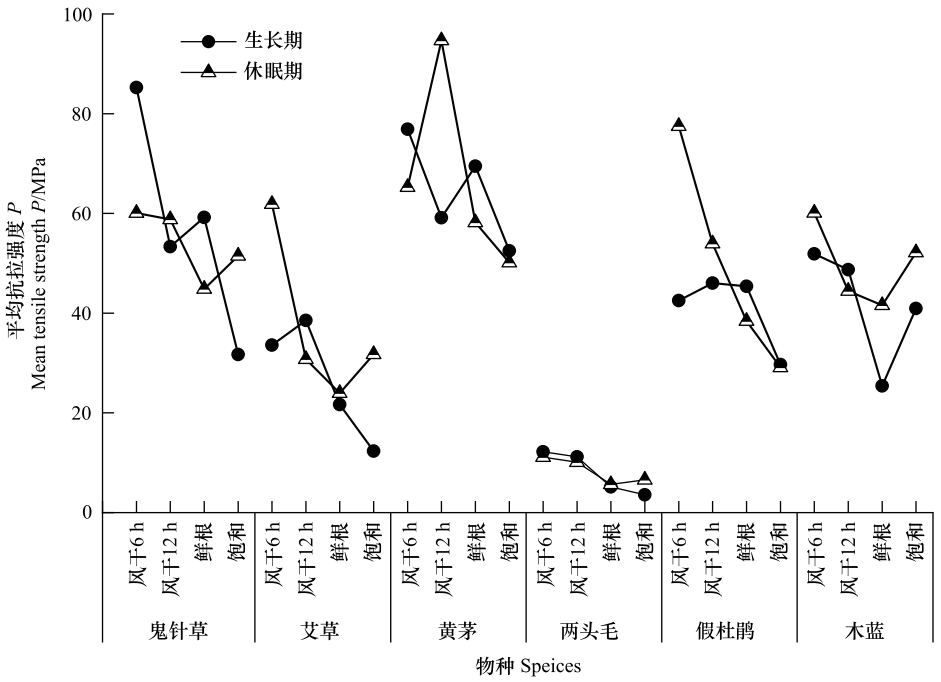

图 7 不同状态下 6 种乡土植物根系的 *P* 值

Fig.7 Root *P*-values of six native plant root with different statues

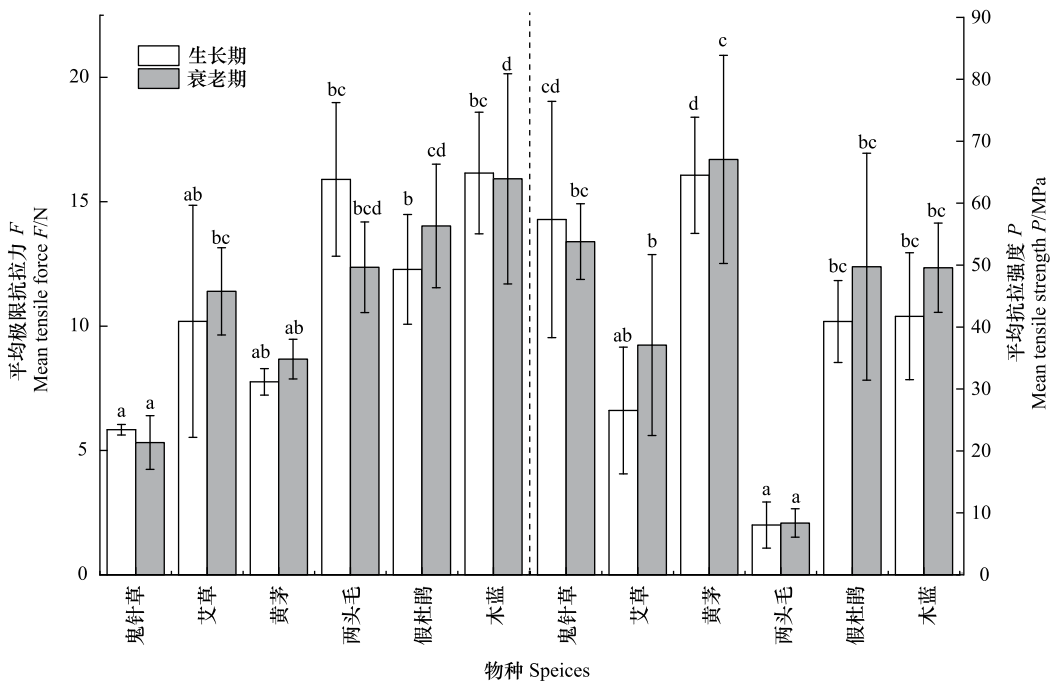

图 8 6 种乡土植物在生长期和衰老期的 *F* 值和 *P* 值对比

Fig.8 Comparison of *F*- and *P*-values of the six native plants during the growing and senescence periods

图中标注的不同英文字母表示同组数值间的差异显著($P<0.05$)

确度较好($R^2>0.5$)。具体分析来看,鬼针草、两头毛和木蓝的根系含水率与 *P* 值呈显著负线性相关,且相关性两头毛>鬼针草>木兰,黄茅和假杜鹃的 *P* 值受根系含水率的影响最小。

表 4　6 种乡土植物的鲜根 C_r 值

Table 4　C_r values of fresh root from the six native plants

类型 Type	物种 Species	时期 Period	平均根数 Average number of roots	RAR 均值 Mean RAR/%	P/MPa	C_r/KPa
草本	鬼针草	生长期	14	0.0075	59.21	5.33ab
Herbs		衰老期	30	0.0604	44.84	32.50c
	艾草	生长期	18	0.0266	21.68	6.92bc
		衰老期	14	0.0527	23.97	15.16b
	黄茅	生长期	55	0.0134	69.48	11.17d
		衰老期	57	0.0616	58.18	43.01d
	两头毛	生长期	8	0.0539	5.17	3.35a
		衰老期	12	0.0613	5.67	4.17a
灌木	假杜鹃	生长期	20	0.0077	45.38	4.19a
Shrubs		衰老期	15	0.0672	38.41	30.97c
	木蓝	生长期	13	0.0308	25.41	9.45cd
		衰老期	14	0.0486	41.59	24.26bc

表中数据后跟随的不同英文字母表示同组数值间的差异显著($P<0.05$); P:抗拉强度 Tensile strength; C_r:根系黏聚力 Cohesive strength of root

表 5　6 种乡土植物根系特征与抗拉强度 p 及平均黏聚力 C_r 的关联

Table 5　Pearson correlation between root characteristics with p and C_r values of the six native plants

类型 Type	种类 Species	根径与 P 值的关联 Correlation between root diameter and P	根系含水率与 P 值的关联 Correlation between root water content and P	根长与 C_r 值的关联 Correlation between root length and C_r	根径与 C_r 值的关联 Correlation between root diameter and C_r
草本	鬼针草	−0.393**	−0.773*	0.416*	−0.428*
Herbs	艾草	−0.551**	−0.665	0.153	−0.573*
	黄茅	−0.593**	−0.638	0.547**	−0.701*
	两头毛	−0.518**	−0.930*	0.399*	−0.579**
灌木	假杜鹃	−0.213*	−0.590	0.006	−0.149
Shrubs	木蓝	−0.542**	−0.724*	0.172	−0.484*

表中 * 表明同组数据之间的 Pearson 相关性为显著, ** 表明相关性为极显著

植物根系特征与 C_r 的关联差异较大(表 5)。除艾草外的其余 3 种草本植物的根长均与 C_r 呈显著或极显著正线性相关;而两种灌木的根长与 C_r 的关联均不显著。4 种草本的根径均与 C_r 呈显著或极显著负线性相关,表明根径越粗根系平均黏聚力越低。其中黄茅的相关性最强,鬼针草最弱。灌木中木蓝的根径与 C_r 呈显著负线性相关,假杜鹃的相关性不显著。相较之下,根径对 C_r 的影响程度超过根长。

3　讨论

3.1　优势物种根系的空间分布特征及形态特征

根系形态及分布格局反映了植物对于环境的适应能力和竞争能力[28]。在大渡河干热河谷区,优势草本的根系密集的散布于土壤 0—15 cm 深度范围内,灌木的根系可超过土壤深度 20 cm 以上,高于三峡水库消落带[29]的牛鞭草(*Hemarthria sibirica*)和扁穗牛鞭草(*Hemarthria compressa*)等 4 种优势草本的根系分布深度(0—5 cm 土层)。推测是由于三峡水库消落带土壤含水量高、空气含量低,而干热河谷区域土地蒸发量高,土壤含水量低,降雨入渗分布较深而诱导植物根系适应环境生长所致。6 种乡土植物根系的 RAR 随土壤深度的增加而呈现先增加后减小趋势,与前人研究结果较为一致[21,30],但 RAR 值在生长期的减小趋势较为均匀,而在衰老期却呈现先快后缓的趋势,与山西土石山区[31]的阿尔泰狗娃花(*Aster altaicus*)、硬质早熟禾(*Poa sphondylodes*)等优势植物的 RAR 值减小持续变快有所不同。

本研究涉及的灌木与草本相比在平均根数、根长、根长密度和根径上并无显著差异,仅在物种间差异显著,但灌木的根长远小于金沙江干热河谷优势灌木的根长[32]。推测由于两者虽都为干热河谷且年降水量接近,但金沙江干热河谷的年蒸发量约为大渡河干热河谷的 3 倍[33],迫使其植物根系不断延长向土壤深处吸收水分所致。根长密度与根系吸水能力呈正线性相关,是反映植物根系潜在水分和营养利用状态的重要指标[34],同时也与土壤抗剪强度的增量呈正线性相关[22,35]。本研究发现鬼针草、黄茅、艾草和假杜鹃之间的根长密度差异不显著,但均显著地高于两头毛和木蓝。在相似的根长密度的前提下,黄茅的根数明显多于其他物种且单根最短。有研究表明,单根越短其所能产生的吸水力越大,对土层产生的吸力更显著[37]。因此,从根系形态综合来看,黄茅根系的吸水及固土潜力均优于其他物种。此外,由于衰老期(旱季)黄茅的根长密度及平均根径均显著高于生长期(雨季),表明其抵抗恶劣环境的生存能力更强。

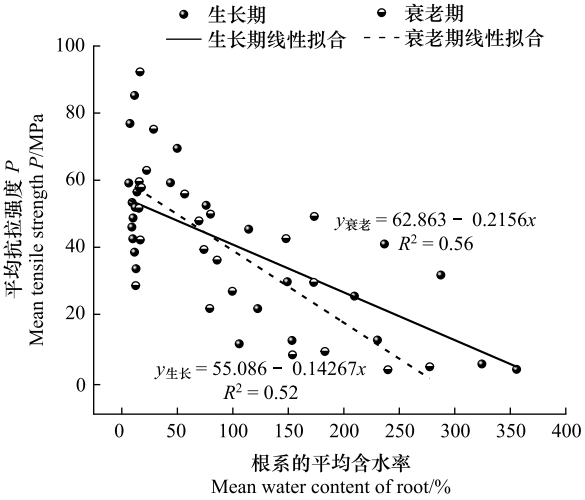

图 9 6 种乡土植物的根系含水率与 *P* 值的线性拟合

Fig.9 Linear fit of root water content to *p*-value of the six native plants

3.2 优势物种的根系含水率差异

物种间甚至同一物种在不同生长时期的根系含水率差异巨大。有 4 种植物(艾草、两头毛、假杜鹃和木兰)在生长期的鲜根含水率均远高于衰老期,与雷相科等[14]提出的根系水分含量会因为季节不同而有所差异较为一致。两头毛根系在各状态下的含水率均显著高于其余 5 种植物,其对水分的需求量最高;而鬼针草根系的吸水能力最强,对径流的消解潜力最佳。在旱雨季变化时,以上两头毛和鬼针草也最易因旺盛的吸水需求导致胀缩性水土流失[36]。与之相反,黄茅鲜根的含水率在生长期和衰老期的差异最小,在各状态下的含水率均为最低,表明其对水分的要求低,在雨季和旱季的持水能力最为稳定,不易引发胀缩性水土流失。

3.3 优势植物根系的固土能力及其影响因子

植物的根系黏聚力 C_r是评价根系固土能力的重要指标,单根抗拉强度 P 是计算 C_r的重要中间变量[14]。研究发现,黄茅根系在不同状态下的 P 值均值显著地高于其他 5 种植物,而两头毛则显著地低于其他植物。有研究指出,根系长度会对 P 产生影响,且 P 值会随根长增加而降低[14]。但本研究未曾发现二者的关联,只明确观察到根径是影响 P 值的重要因素,与抗拉强度呈负线性相关。李会科等[38]对花椒(*Zanthoxylum bungeanum*),田佳等[39]对早熟禾(*Poa annua*)等 4 种草本,欧阳前超等[40]对香根草(*Chrysopogon zizanioides*)等 3 种草本的根系研究,均发现了类似的线性相关关系。生长期时,除木蓝外的 5 种植物根系在饱和状态下的 P 值总是低于其他状态;衰老期时,所有乡土植物根系在风干后的 P 值均高于鲜根及饱和状态。相关性分析进一步印证了 6 种乡土植物整体的根系含水率与 P 值呈现极显著负线性相关,根系含水率是影响植物根系的固土能力的关键因子。这一发现与绿竹(*Bambusa oldhamii*)根系在 12%含水率下抗拉强度显著高于饱和状态的根系抗拉强度[41],以及植物根系含水率与植物的抗拉强度存在负线性相关一致[31]。

6 种乡土植物 C_r差异较大,黄茅的 C_r值在不同生长时期均最稳定且显著地高于其他植物,两头毛的 C_r值则显著地低于其他植物。6 种植物的 C_r值与根长呈正相关与、根径呈负相关,且根径对 C_r的影响程度超过根长,这一趋势与苜蓿根系类似[42],表明根径也是影响干热河谷区优势植物固土能力的关键因子。此外,6 种植物在衰老期的 C_r值均高于生长期,印证出其根系的固土能力在旱季强于雨季,推测是由于衰老期根系木质素含量更高所致。植物根系主要由纤维素、半纤维素、木质素、蛋白质和果胶等物质组成,随根系的不断生长木质素不断积累,以化学或物理方法使植物纤维之间黏结,可以增加根系的机械强度[23]。衰老期时植物根系

已完全发育、成熟度更高,因此机械强度更大。

4　结论

(1)6 种植物的 RAR 均随土壤深度增加呈下降趋势,但在生长期的减小趋势较为均匀,衰老期则呈现先快后缓的趋势。

(2)根系形态上,黄茅的根长密度和平均根数最为优越且单根最短,其固土潜力优于其他物种。加之其根系在生长期和衰老期的含水率差异最小,对水分的要求低、持水能力最强,抵抗恶劣环境(旱季)的生存能力最佳。

(3)6 种优势植物在衰老期的 C_r 值均显著地高于生长期,其根系的固土能力在旱季强于雨季。无论在生长期还是衰老期,黄茅根系的 P 值及 C_r 值均显著地高于其他植物,两头毛则最低。此外,根径和根系含水率是影响 6 种乡土植物 P 值的关键因子,根径则是影响其 C_r 值的关键因子。

综上,结合根系形态优势和根系 P 值及 C_r 值综合考虑,在实施大渡河干热河谷区近自然生态修复时,建议优先选用黄茅为推广植物,其不仅能对河谷坡地起到最好的牢固和稳定作用,还可减少物种入侵及引种驯化的风险和支出。

参考文献(References):

[1] 杨济达,张志明,沈泽昊,欧晓昆,耿宇鹏,杨明玉. 云南干热河谷植被与环境研究进展. 生物多样性,2016,24(4):462-474.

[2] 冯旭环,周璐,熊伟,宗桦. 大渡河干热河谷区本土优势灌草植物根系的抗拉力学特性及其影响因素研究. 干旱区资源与环境,2023,37(7):159-169.

[3] 马华,钟炳林,岳辉,曹世雄. 典型红壤区自然生态修复的适用性. 生态学报,2015,35(18):6148-6156.

[4] 张克荣,张小全,李潜,赵铭石,王龙柱,张全发. 退化生态系统近自然精准修复——基于自然的解决方案. 植物科学学报,2023,41(6):751-758.

[5] 曾红艳,吴美苏,周成,陈群,龚震. 根系与植筋带固土护坡的力学机理试验研究. 岩土工程学报,2020,42(S2):151-156.

[6] 李佳,汪霞,贾海霞,赵云飞,欧延升,柳洋. 浅层滑坡多发区典型灌木根系对边坡土体抗剪强度的影响. 生态学报,2019,39(14):5117-5126.

[7] 徐贵迁,赵洋毅,王克勤,段旭,李志成. 金沙江干热河谷冲沟区优先流影响下的土壤力学特性. 水土保持学报,2023,37(2):100-110.

[8] 刘福全,刘静,姚喜军,张永亮,苑淑娟. 根系固土主导力学因素与差异性评价. 生态学报,2015,35(19):6306-6315.

[9] 钟荣华,鲍玉海,贺秀斌,高进长,阎丹丹,李峪,王铭锋. 三峡水库消落带 4 种草本根系抗拉特性及根系粘聚力. 水土保持学报,2015,29(4):188-194.

[10] 刘国松,朱海丽,张玉,刘亚斌,李国荣. 冻融作用对黄河源区曲流河岸土体抗剪特性的影响. 干旱区研究,2023,40(10):1637-1643.

[11] 栗岳洲,付江涛,余冬梅,胡夏嵩,朱海丽,李光莹,虎啸天. 寒旱环境盐生植物根系固土护坡力学效应及其最优含根量探讨. 岩石力学与工程学报,2015,34(7):1370-1383.

[12] 唐诗佳,刘恩龙,杨柳新. 冻融循环条件下含根系土的力学特性. 冰川冻土,2024,46(1):162-169.

[13] 刘亚斌,胡夏嵩,余冬梅,杨幼清,朱海丽. 西宁盆地黄土区草本和灌木组合根系分布特征及其增强土体抗剪强度效应. 工程地质学报,2020,28(3):471-481.

[14] 雷相科,张雪彪,杨启红,欧阳前超,张超波. 植物根系抗拉力学性能研究进展. 浙江农林大学学报,2016,33(4):703-711.

[15] 薛杨,赵洋毅,王克勤,段旭,杜玉雪. 磨盘山典型灌草根系抗拉力学特性及其影响因素研究. 西南林业大学学报:自然科学,2019,39(2):99-107.

[16] 李可,朱海丽,宋路,李国荣,谢彬山,李本峰. 青藏高原两种典型植物根系抗拉特性与其微观结构的关系. 水土保持研究,2018,25(2):240-249.

[17] 苏雪萌,刘俊娥,周正朝,李秋嘉,赵富王. 黄土丘陵区不同植物根系抗拉力学特性. 水土保持研究,2019,26(3):259-264.

[18] 魏艳,刘有斌,刘枭宏,谌芸,颜哲豪,都艺芝. 紫色土区拉巴豆和紫花苜蓿根-土复合体抗剪性能研究. 草业学报,2023,32(8):82-90.

[19] 唐菡,谌芸,刘枭宏,何丙辉,李勇,强娇娇,李铁. 喀斯特坡地拉巴豆地埂篱根及根-土复合体力学特性. 生态学报,2019,39(16):6114-6125.

[20] 刘向峰,张强,郝国亮,王逸腾,孙颖聪,王来贵. 草本植物根系类型和分布对根土复合体无侧限抗压强度的影响. 长江科学院院报,2023,40(9):106-111,117.

[21] 李长暄. 林木单根力学性能及其影响因素研究[D]. 北京：北京林业大学,2014.
[22] 杨旸,字淑慧,余建新,张川,段青松. 植物根系固土机理及模型研究进展.云南农业大学学报(自然科学版). 2014,29(5):759-765.
[23] 李建兴,何丙辉,谌芸. 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.
[24] 黄广杰,段青松,李建兴,熊寿德,刘武江,保锐琴,张立芸. 三江并流区水库消落带5种草本根系形态及抗拉特性. 水土保持研究,2022,29(3)：389-395.
[25] Wu T H,McKinnell W P,Swanston D N. Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island,Alaska. Canadian Geotechnical Journal,1979,16(1)：19-33.
[26] Waldron L J. The shear resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil. Soil Science Society of America Journal,1977,41(5)：843-849.
[27] Waldron L J,Dakessian S. Soil reinforcement by roots. Soil Science,1981,132(6)：427-435.
[28] 盛亚萍,赵成章,高福元,张军霞,石福习,屈勇. 高寒山区混播草地燕麦和毛苕子种间的竞争关系. 生态学杂志,2011,30(11)：2437-2441.
[29] 熊寿德,段青松,方雪峰,李建兴,黄广杰,刘宇飞,刘武江,张立芸. 三江并流区水电站消落带适生草本植物根系固土能力. 生态学报,2022,42(17)：7210-7221.
[30] 冷瑜. 土壤生物工程早期紫花苜蓿根系固土机制研究[D]. 东北师范大学,2021.
[31] 雷相科. 山西土石山区植物根系固土力学性能研究[D]. 太原：太原理工大学,2016.
[32] 刘颖,贺静雯,李松阳,余杭,吴建召,崔羽,林勇明,王道杰,李键. 干热河谷优势灌木种类的根系结构及碳氮磷元素含量特征. 应用与环境生物学报,2020,26(1)：31-39.
[33] 彭彬,宋思梦,张艳,李勋,周扬. 甘孜州大渡河流域干旱河谷概况及建议. 现代园艺,2022,45(5)：56-58.
[34] 任志鹏,何良伟. 基于 Logistic 模型的盐渍农田向日葵根长密度分布模拟. 节水灌溉,2023(8)：34-43.
[35] 周云艳,陈建平,杨倩,王晓梅. 植物根系固土护坡效应的原位测定. 北京林业大学学报,2010,32(6)：66-70.
[36] 钟彩尹,崔鹏,朱帅润,卿毅伟,吴礼舟. 植物根系吸水对非饱和土边坡稳定性影响的分析. 水土保持学报,2022,36(2)：99-105.
[37] 刘川顺,王伟,刘湘清. 树木根系吸水宏观模型的建立与验证. 岩石力学与工程学报,2007,26(S2)：4419-4425.
[38] 李会科,王忠林,贺秀贤. 地埂花椒林根系分布及力学强度测定. 水土保持研究,2000,7(1)：38-41.
[39] 田佳,刘耀辉. 华北地区几种常用边坡绿化植物的根系力学特性研究. 中国水土保持,2007(10)：34-36.
[40] 欧阳前超,魏杨,周霞,张超波. 土石山区护坡草本植物根系抗拉力学特性. 中国水土保持科学,2017,15(4)：35-41.
[41] 李谦,周本智,安艳飞,徐升华. 绿竹根系分布及生物力学性质. 应用生态学报,2014,25(5)：1319-1326.
[42] 展鹏,张超波,张强,冯潇慧,丁阳,蒋静. 干湿交替下苜蓿根系对黄土抗剪力学能力影响. 水土保持研究,2023,30(6):222-230.