DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2026.06.047 CSTR:32311.14.rswc.2027.01.047
黄钢, 马强, 卢雪松, 等. 干湿循环下鄂东大别山区草灌混合植被根-土复合体力学特性[J]. 水土保持研究,2026,33(6):294-301,310.
Huang Gang, Ma Qiang, Lu Xuesong, et al. Mechanical properties of root-soil composites in grass-shrub mixed vegetation under dry-wet cycles in Dabie Mountains in eastern Hubei[J]. Research of Soil and Water Conservation,2026,33(6):294-301,310.

干湿循环下鄂东大别山区草灌混合植被根-土复合体力学特性

黄 钢[1,3], 马 强[2,3], 卢雪松[1], 王鹏飞[1]
(1.黄冈师范学院, 湖北 黄冈 438000; 2.湖北工业大学, 武汉 430000;
3.河湖健康智慧感知与生态修复教育部重点实验室, 武汉 430000)

摘 要:[**目的**]评估干湿循环下鄂东大别山区草灌混合植被的根-土复合体力学特性,为该地区的生态修复和水土流失治理提供参考。[**方法**]以草灌混合植被根系为研究对象,通过单根抗拉试验和根-土复合体的抗剪强度试验,探究干湿循环下草灌根系的抗拉特性及根-土复合体的抗剪强度的演化规律。[**结果**]干燥状态下草、灌根系抗拉强度分别是饱和根的1.2~1.5倍,1.1~1.3倍;黏聚力受草灌根系类型和干湿循环的影响显著,而内摩擦角受上述因素影响较小;草灌混合根-土复合体的黏聚力大于单一灌木或草本,其中灌木占比75%时黏聚力达到最大值;黏聚力随着干湿循环增大呈幂对数降低的变化,劣化度达35%~43%;建立了可以考虑灌木占比、根直径和干湿循环次数的根-土复合体黏聚力预测模型。[**结论**]根径、根系类型与干湿循环共同调控鄂东大别山区草灌混合植被根-土复合体的力学特性。

关键词:根-土复合体; 黏聚力; 直剪试验; 草灌混合植被; 鄂东大别山区
中图分类号:S157; TU45 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-3409(2026)06-0294-08

Mechanical properties of root-soil composites in grass-shrub mixed vegetation under dry-wet cycles in Dabie Mountains in eastern Hubei

Huang Gang[1,3], Ma Qiang[2,3], Lu Xuesong[1], Wang Pengfei[1]
(1.*Huanggang Normal University, Huanggang, Hubei* 438000, *China*;
2.*Hubei University of Technology, Wuhan* 430000, *China*; 3.*Key Laboratory of Intelligent Health Perception and Ecological Restoration of Rivers and Lakes, Ministry of Education, Wuhan* 430000, *China*)

Abstract: [**Objective**] This study evaluates the mechanical properties of root-soil composites in grass-shrub mixed vegetation under dry-wet cycles in the Dabie Mountains in eastern Hubei, thereby providing a reference for ecological restoration and soil erosion control in this region. [**Methods**] Roots of grass-shrub mixed vegetation were selected as the study object. Single-root tensile tests and shear strength tests of root-soil composites were conducted under dry-wet cycles to investigate the tensile characteristics of grass and shrub roots and the evolution patterns of shear strength of root-soil composites. [**Results**] The tensile strengths of grass and shrub roots in the dry state were 1.2~1.5 times and 1.1~1.3 times those of saturated roots, respectively. Cohesion was significantly affected by grass-shrub root types and dry-wet cycles, while the internal friction angle was less affected by these factors. The cohesion of grass-shrub mixed root-soil composites was greater than that of single shrub or grass root-soil composites, and reached the maximum when the shrub proportion was 75%. Cohesion decreased according to a power function with increasing dry-wet cycles, and the degradation degree reached 35%~43%. Considering shrub proportion, root diameter, and number of dry-wet cycles, a predictive model for the cohesion of root-soil composites

收稿日期:2026-02-07 **修回日期:**2026-03-01 **接受日期:**2026-03-24
资助项目:国家自然科学基金项目(52078194);湖北省自然科学基金项目(2025AFD363);河湖健康智慧感知与生态修复教育部重点实验室(HGKFZP015);环境岩土与河湖生态修复湖北省重点实验室(HJKFYP202408)
第一作者:黄钢(1987—),男,江西九江人,副教授,博士,主要从事环境岩土工程研究。E-mail:huanggang@hgnu.edu.cn

was established. [**Conclusion**] The mechanical properties of root-soil composites in grass-shrub mixed vegetation in the Dabie Mountains in eastern Hubei are jointly controlled by root diameter, root type, and dry-wet cycles.

Keywords: root-soil composite; cohesion; direct shear test; grass-shrub mixed vegetation; Dabie Mountains in eastern Hubei

植物因具有防止边坡浅表层破坏(滑坡和水土流失)和提供良好生态效益(绿色环保和投资少)被广泛应用于岩土工程防护中[1]。植物根系与土壤组成的根-土复合体的力学特性对边坡浅层土体稳定性具有重要影响。根系可将土壤的剪应力转化为根系自身拉应力,从而增强土体的抗剪强度,这一增强效应得到了大量学者的试验证实[2]。然而,边坡的单一植被类型防护存在生物多样性低、水土保持能力弱、根-土复合体抗剪强度不足等缺陷,难以长期稳定实际边坡[3-4]。在南方大别山区公路的边坡防护工程中,草灌混合植被根系防护已成为主流,但目前有关多种类型植物根系与土壤的协同作用对根-土复合体力学性能的影响研究仍受到忽视。

在全球气候变化日益加剧的情况下,极端降雨、干旱等极端天气事件频发。反复的降雨和蒸发会引发根-土复合体强度与内应力改变[5]。干湿循环对土壤的不可逆变化会诱发浅层滑坡(深度通常小于2 m)等地质灾害[6-7]。干湿循环对植被边坡的长期稳定性构成了较大威胁。因此,深入研究干湿循环作用下草灌植物根-土复合体力学特性具有重要的理论价值和实际工程意义。

在草灌混合植被根-土复合体力学特性方面,刘亚斌等[8]和姚怡宁等[9]的试验表明草本植物和灌木植物组合的根面积比随着深度增加而减少,根-土复合体抗拉强度较素土明显增加;许桐等[10]开展剪切试验发现单一植被边坡、素土边坡的位移量大于草灌组合边坡;赵玉娇等[11-12]的原位直剪试验表明寒旱环境单一草本根-土复合体黏聚力显著大于灌木根-土复合体,草灌混合根-土复合体黏聚力显著大于单一草本或灌木根-土复合体。在根-土复合体力学试验和理论研究方面,研究学者开展植被根系的抗拉试验[13-15]和根-土复合体的抗剪试验[16-17],并先后提出了Wu-Waldron Model[18]、Fiber-Bundle Model[19]、纤维束模型等[20]多个力学数学模型,从试验和理论方面来衡量植被根系对边坡土壤抗剪强度的增强能力。

然而,目前仍缺乏有关干湿循环时不同植被根系类型对根-土抗剪强度的影响,尤其是干湿循环次数对根-土复合体力学性能产生的强度效应理论模型。此外,现有研究多聚焦于单一草本或灌木根系,而南方大别山区生态护坡中草灌混合的应用更为广泛,其草灌混合根系对边坡浅层土体力学性能的影响机制研究较为匮乏。

针对以上研究不足,结合鄂东大别山区生态防护的实际需求,本文选取鄂东大别山区生态护坡中常见的护坡植物(灌木植物多花木蓝*Indigofera amblyantha*和草本植物香根草*Chrysopogon zizanioides*)为研究对象,两者均具有根系发达、适应性强等特点。本文通过室内抗拉试验和直剪试验分析灌根与草灌根占比值(灌根占比)和干湿循环两个关键因素对根-土复合体力学性能(抗拉强度和抗剪强度)的影响规律,并基于试验数据构建干湿循环作用下根-土复合体强度预测模型,为草灌混合植被护坡工程的设计与优化提供参考。

1　研究区概况

取样地点位于湖北省黄冈市英山县某高速公路,地处大别山区腹地,岩土风化程度较高。该地区为亚热带湿润季风气候,气候温和,全年降雨量丰沛,为各类植物的生长提供良好的条件。该地区年多年平均降雨量1 300 mm,5—7月的梅雨季节,累计降雨量达400 mm,占比约40%,而在梅雨过后的夏季呈现持续高温天气,地表蒸发量较大。这种由降雨入渗与高温蒸发组成反复干湿循环过程易诱发浅层滑坡地质灾害。

在2022年8月发生滑坡事件,在当地公路局的管理下,边坡浅层通过客土喷播方式种植灌木植物多花木蓝和草本植物香根草进行生态防护,如图1所示。



图1　研究区滑坡与草灌修复图

Fig. 1　Landslide and grass-shrub restoration of the study area

研究区的土体岩性为粉质黏土,试验土颗粒粒径级配采用室内颗粒分析试验得到,颗粒分级曲线如图2所示。其中土体的饱和渗透系数通过渗透试验测定,抗剪强度指标(黏聚力和内摩擦角)通过直剪试验测得,其物理参数如表1所示。

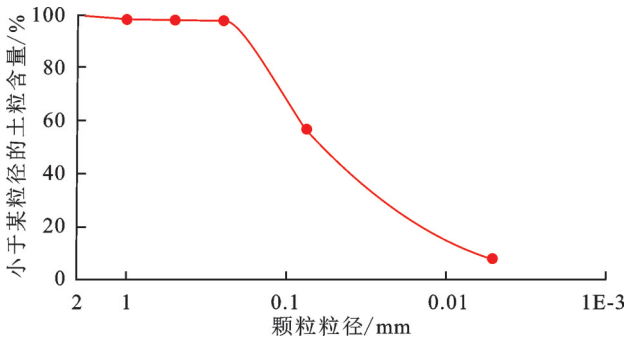


图 2 试验土颗粒粒径级配图

Fig. 2 Particle size distribution curve of test soil

表 1 边坡浅层土体的物理参数

Table 1 Physical parameters of shallow soil layers on slopes

材料	重度/(kN·m^{-3})	含水率/%	液限/%	塑限/%
素土	18.25	20.76	35.17	17.42

2 材料和方法

2.1 试验材料

为了研究不同干湿循环和植被根系类型对根-土复合体抗剪强度的影响，选取研究区草灌混合植被生长成熟期（36 个月），草本香根草根系、灌木多花木蓝根系主要分布在距坡面 10—30 cm，10—60 cm 土层处。在研究区内斜坡上选定面积为 1 m×1 m 的 3 个草灌混合植被区域（避开草灌混合植被稀疏区与人为干扰区），采集根-土复合体带回实验室并进行冲洗得到草灌根系和试验土样，试验共采集草本根系 50 根和灌木根系 30 根。

2.2 抗拉试验

在试验区边坡上采集的草本根系和灌木根系选取较直的 5 cm 段作为抗拉试验材料。为了保证根新鲜、完整，把剪好根放入保鲜袋里面储存。根系分为饱和根和干燥根两组，新鲜根放入水中 12 h 得到饱和根，新鲜根在室内风干至质量恒定得到干燥根。室内抗拉试验采用电子拉力仪进行，拉伸加载速度控制为 0.02 mm/s，测得最大拉力。试验完用游标卡尺测量根断裂处的平均根径。根抗拉强度 T 计算公式为

$$T = 4F/\pi D^2 \quad (1)$$

式中：T 为抗拉强度（MPa）；F 为单根抗拉拔力（kN）；D 为单根直径（mm）。

2.3 抗剪试验

在直剪试验中，根-土复合体土样的制备严格遵照国家规范《土工试验方法标准（GB/T50123—2019）》。根系和土样将分层放入到试验盒中，分 3 层击实[21]。根据文献[22]的试验和根系分布，根系分布为竖向分布。根据采集的新鲜草、灌根筛选 5 根质量在（0.25±0.02）g 范围的草本根和 1 根质量在（1.25±0.10）g 范围的灌木根，5 根草本根与 1 根灌木根质量相同，根系统一制备成为 16 根放入根-土复合体。

一次干湿循环过程先经历干燥阶段（烘箱设定 60 ℃烘干至质量恒定为止），后经历湿润阶段（静水中浸泡 6 h）。在干湿循环次数（0，1，3，6，10 次）后取饱和的试样进行直剪试验。考虑草灌混合植被根系中灌木根占比大小的影响，占比设计为 0（全部为草本根），25%，50%，75%，100%（全部为灌木根）的 5 组。每个干湿循环、每种灌木根占比各制备 4 个试样，增加素土组作为对照。

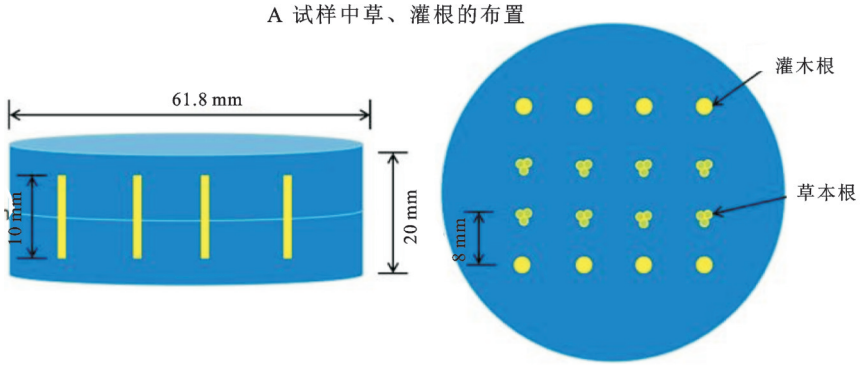
采用 ZJ 型应变控制式直剪仪对根-土复合体试样进行试验，如图 3 所示。剪切速度根据土工试验方法标准与相关文献设定为 0.2 mm/min[9]，竖向压力分别为 50，100，150，200 kPa 共 4 个级别的平衡组。根据直剪试验结果绘制应力应变曲线，然后通过库仑定律得到抗剪强度指标黏聚力和内摩擦角。

$$\tau_f = c + \sigma\tan\varphi \quad (2)$$

式中：τ_f 为抗剪强度；c 为黏聚力；σ 为正应力；φ 为内摩擦角。

每组直剪试验设置 3 次平行重复，最终结果取平均值。为了降低直剪试验的结果误差，采用单因素方差分析（Analysis of Variance，ANOVA）比较不同根径、干湿循环或物种间的抗剪强度差异。

A 试样中草、灌根的布置



B ZJ型应变控制式直剪仪



图 3 试样和试验设备

Fig. 3 Test specimens and test equipment

3　结果与分析

3.1　不同含水率下草灌根的抗拉强度

根系的拉伸性能是评价草灌混合植被护坡的重要指标,抗拉强度与根径的幂律关系见图 4。抗拉强度随着根径的增大呈幂律减小趋势,草本根的抗拉强度可达 40～120 MPa,灌木根均较低,通常在 70 MPa以下,这是由于草本根较细(直径小于 1 mm),直径小的草本根具有较高的抗拉强度,而直径较粗(直径 1 mm～5 mm)灌木根抗拉强度较小。

在直径相同时,干燥根的抗拉强度大于饱和根,草本植物干燥根抗拉强度是饱和根的 1.2～1.5 倍,灌木植物干燥根抗拉强度是饱和根的 1.1～1.3 倍。根饱和后出现直径增加而张力会降低,根的细胞壁结合强度降低。这是由于草本植物根的根直径更小,土壤含水率较高时更容易饱和,根细胞壁在饱水后膨胀软化,细胞壁之间的连接受到削弱,从而张力下降更显著。

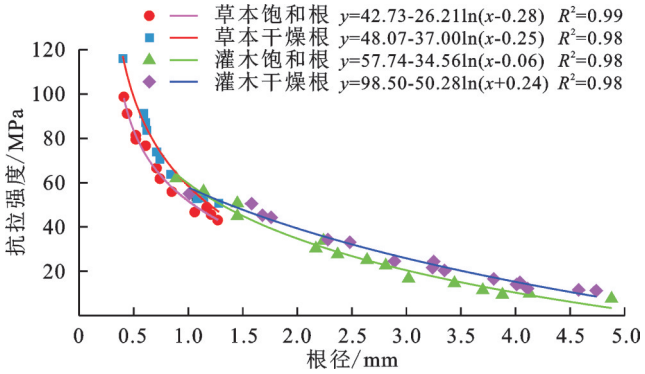


图 4　抗拉强度与草、灌根径的关系

Fig. 4　Relationship between tensile strength and root diameter of grasses and shrubs

3.2　草灌根系类型对根-土复合体力学特性的影响

为了研究植被物种多样性对根-土复合体力学特性的影响,测定不同灌根占比下根-土复合体的抗剪强度,如表 2 和图 5 所示。

表 2　根-土复合体的抗剪强度

Table 2　Shear strength of root-soil composites

灌根占比/%	干湿循环次数 N	不同竖向压力下土体的抗剪强度/kPa				抗剪强度指标	
		50	100	150	200	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
素土	0	37.35	65.34	92.07	113.73	18.16	27.10
0	0	49.79	74.85	109.57	126.92	23.76	28.02
	1	46.84	71.30	103.97	123.91	20.54	27.82
	3	44.54	66.12	99.87	119.67	17.77	27.40
	6	41.47	64.88	96.53	116.01	15.91	27.05
	10	39.07	62.04	90.54	111.58	14.30	26.20
25	0	53.61	77.34	114.87	132.92	25.82	28.85
	1	48.74	72.93	110.55	126.66	21.88	28.49
	3	45.97	67.99	95.55	121.10	19.42	26.83
	6	42.96	65.04	92.47	117.14	16.91	26.56
	10	40.13	62.85	91.04	112.48	15.32	26.13
50	0	56.34	82.27	110.78	139.01	27.97	28.94
	1	51.94	77.55	106.11	133.54	23.95	28.67
	3	48.34	68.95	100.41	123.23	21.20	27.12
	6	45.89	67.90	95.04	121.11	19.29	26.82
	10	43.00	65.61	90.82	115.90	17.86	26.00
75	0	58.73	84.97	113.53	144.38	29.03	29.73
	1	53.02	79.30	110.11	134.77	25.29	28.90
	3	49.59	74.32	107.56	129.01	22.25	28.50
	6	45.88	72.37	103.90	123.06	20.54	27.75
	10	44.45	65.97	92.93	116.91	18.98	26.04
100	0	50.98	74.04	107.01	126.82	24.59	27.52
	1	46.01	71.17	101.33	120.72	21.24	26.25
	3	44.32	65.24	94.21	116.84	18.52	26.25
	6	41.27	64.71	93.58	114.51	16.37	26.44
	10	39.78	62.95	91.19	112.91	14.80	26.35

土体抗剪强度指标是研究草灌根-土复合体力学特性的重要参数。根-土复合体的黏聚力与内摩擦角均存在显著的差异性($p<0.05$)。由图5A可知,相同含水率下黏聚力与灌根占比的增大呈现先增加后减少的趋势,对灌根占比变化较为敏感,黏聚力大小对应的植被类型依次为草灌根系>草本根系>灌木根系。干湿循环6次时草灌混合根-土复合体黏聚力较灌木根-土复合体提高11.69%~12.82%,比草本根-土复合体增加了10.10%~11.20%。草灌混合根-土复合体对土体黏聚力增长量大于单一物种的草本根-土复合体和灌木根-土复合体。这是由于草本根系以须根为主,呈水平或倾斜分布状态,其根-土复合体中剪切面上仅有部分的根段,即仅部分根系能增强土体的抗剪切变形作用,灌木根系在土体中仅有部分呈近似的主直根生长,即垂直方向的主根和水平方向的侧根,其在根-土复合体中剪切面上大多数根段都存在,锚固作用提供抗剪能力;草灌根-土复合体既有灌木型的主根或侧根的锚固,又有草本根-土复合体的部分须根对剪切变形作用,两者协同构成"深层锚固+浅层加筋"的多维度加固体系,剪切过程中应力由脆弱的土体通过根-土界面的摩擦或连接传递给高强度的根系,从而黏聚力增幅最大。另外,从图5B可以看出,植被物种下不同灌根占比的土样内摩擦角变化不明显,内摩擦角主要集中在一定范围内波动,不随植被物种波动而变化。尽管根系通过加筋作用和抗拉作用能增强抗剪强度,由于未改变土体的微观结构和内摩擦特性,因此宏观上内摩擦角的变化不大。

分析表明,植被根系的存在可明显提高根-土复合体的抗剪强度,并随灌根占比的增加而先增加后降低,草、灌根系增加抗剪效应可能受含水率的影响。这是由于草、灌根系在土体里可增大土体周围的容重,从而导致土体的摩擦力增强。同时草本根系的存在相对于灌木根系与土体颗粒的接触面更大,进而具有更强的根-土界面的作用力,适量的灌木根系能通过抗拉作用增大土体抗剪强度[23]。

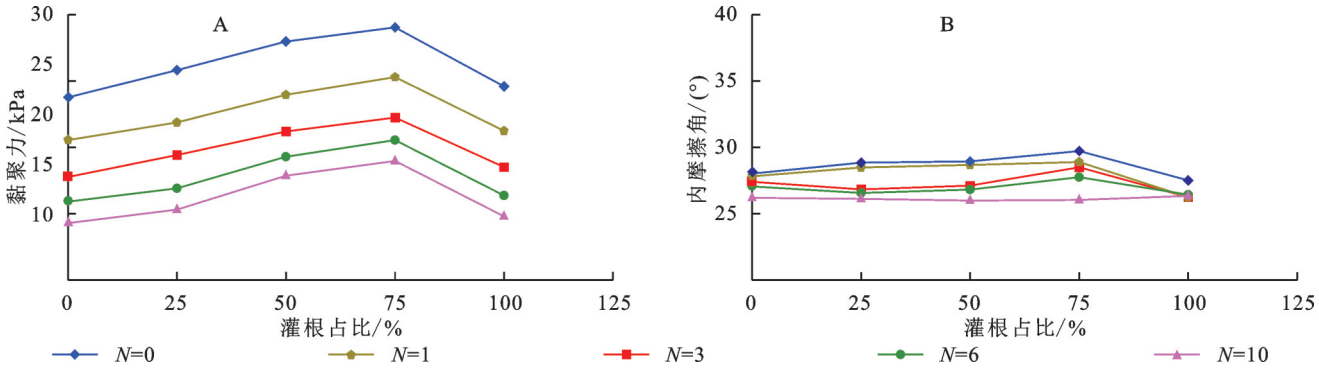


图5 黏聚力和内摩擦角与灌根占比的关系

Fig. 5 Relationship of cohesion and internal friction angle with shrub proportion

3.3 干湿循环对根-土复合体力学特性的影响

为了定量研究根-土复合体受干湿循环的破坏影响,采用式(3)定义的劣化度D来研究干湿循环次数N对不同灌根占比的根-土复合体剪切强度的损伤程度[24]。

$$D_i=\frac{c_0-c_n}{c_0}\times 100\% \tag{3}$$

式中:D_i为根-土复合体黏聚力劣化度(%);c_0为初始试样的黏聚力(kPa),取3次平行直剪试验的平均值;c_n为第N次干湿循环后试样的黏聚力(kPa),取3次平行直剪试验的平均值。

由每组3次平行直剪试验平均值得到黏聚力,再根据式(3)得到不同灌根占比时干湿循环次数的劣化度(见图6)。黏聚力均随着干湿循环次数的增加而降低,黏聚力与干湿循环次数呈非线性减小关系。在干湿循环3次以内,黏聚力降低较快;干湿循环第3次时,没有灌木根时黏聚力下降5.99 kPa,劣化度达到25.22%;在3次后,黏聚力降低速率逐渐放缓,灌根占比25%时黏聚力在干湿循环6次时下降8.91 kPa,劣化度达到34.51%。这是由于干湿循环导致根-土复合体发生缩胀,引发根-土界面黏结能力衰减、土体结构的微裂缝和空隙增大,从而导致黏聚力的降低。经历了6次干湿循环后,根-土复合体发生根系重新填充空隙、土体结构重新调整适应和水分吸湿-脱湿平衡平衡,从而劣化效应随着干湿循环次数的增加而衰弱。

3.4 干湿循环下草草灌混合-土复合体抗剪强度预测模型

不同干湿循环次数N对根-土复合体抗剪强度的劣化度D影响如图7所示,可以看出劣化度D与干湿循环次数N呈对数关系,拟合如下关系式。

$$D_i=\frac{c_0-c_i}{c_0}=A\ln N+B \tag{4}$$

式中:A,B分别为曲线的拟合参数。从图7可以看出

劣化度 D 与干湿循环次数 N 具有较高的相关系数，式(4)适用于 $N\geqslant 1$，$N=0$ 时 $D=0$ 拟合效果良好，参数 $A=14.18$，$B=9.45$。

根据 3.2 节的研究可知，当干湿循环次数 $N=0$ 时，黏聚力 c_0 与灌根占比 η 呈非线性关系，两者的关系如式(5)所示：

$$c_0=a\eta^2+b\eta+c \tag{5}$$

式中：η 为灌根占比；a，b，c 为拟合参数。从图 8 可以看出，无干湿循环下黏聚力 c_0 与灌根占比 η 具有较高的相关系数，拟合效果良好，参数 $a=-0.0018$，$b=0.18$，$c=23.24$。

将公式(5)代入公式(4)得到黏聚力 c_n 与灌根占比 η、干湿循环次数 N 的关系式：

$$c_n=(1-A\ln N-B)\left(a\eta^2+b\eta+c\right) \tag{6}$$

在实际应用中可根据公式(6)，预测不同干湿循环、灌根占比的草灌混合根-土复合体黏聚力。

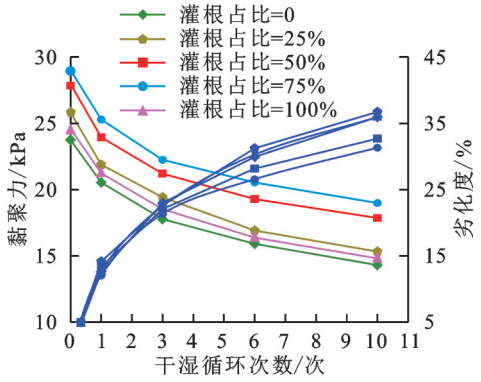


图 6　黏聚力、劣化度与干湿循环次数的关系

Fig. 6　Relationship between cohesion, degradation degree, and number of dry-wet cycles

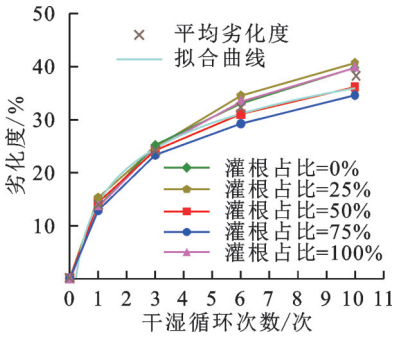


图 7　黏聚力的劣化度与干湿循环次数的拟合关系

Fig. 7　Fitting relationship between degradation degree of cohesion and number of dry-wet cycles

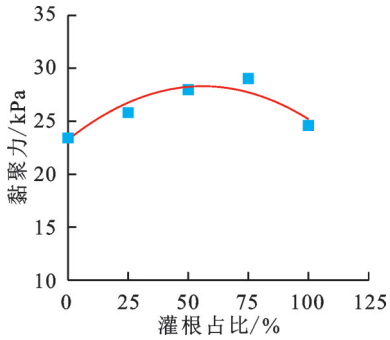


图 8　无干湿循环下黏聚力与灌根占比的拟合关系

Fig. 8　Fitting relationship between cohesion and shrub proportion without dry-wet cycles

根据公式(6)得到不同灌根占比和干湿循环下的加固根-土复合体黏聚力预测值，将黏聚力预测值与实测值进行对比，拟合曲线如图 9 所示。计算预测值与实际值的均方根误差(RMSE)小于 3 kPa、平均绝对百分比误差(MAPE)小于 5%、拟合优度(R^2)大于 0.95，说明预测值与实际值的平均偏差小、相对误差较小、拟合效果好，该黏聚力预测模型可以较好地进行草灌根-土复合体预测，具有较好的实用价值。

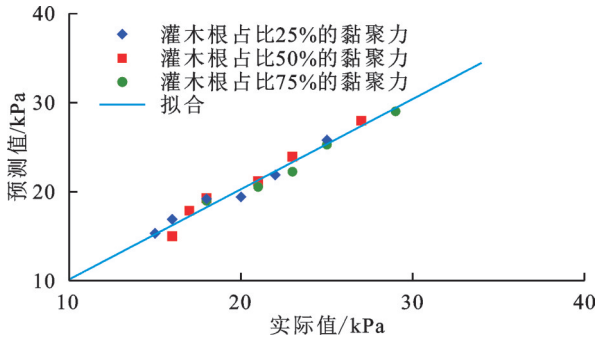


图 9　黏聚力预测值与实测值

Fig. 9　Predicted and measured values of cohesion

4　讨　论

4.1　草本须根与灌木主根的形态学差异及其对力学性能的影响

植被根系形态影响了根-土复合体的抗剪特性[12]。在鄂东大别山区，生长期 2.5 a 时草本香根草的须根深度可达 40 cm，灌木多花木蓝主根深度可达 60 cm，高于西宁盆地的草本紫花苜蓿根深度 30 cm 和灌木柠条锦鸡儿的根系深度 50 cm[10]，是由于西宁盆地的年均降雨量少，而蒸发量较大，自然环境不利于植物根系的生长。草本香根草须根具有直径细、细胞壁薄、数量多且密集的形态特征，灌木多花木蓝根具有直径大、细胞壁增厚、木质化程度高的形态特征。在边坡发生剪切时，两者不同形态特征决定了对土体的不同力学性能，韧性较强的草本根系与土体颗粒的接触面积大于脆性的灌木根系，可有效加筋土颗粒和提升根-土复合体的黏聚力。抗弯折性能强的灌木主侧根能有效抵抗土体的剪切变形，从而增强根-土复合体的抗剪强度。

本研究中，草、灌根的形态特征对抗拉性能的影响呈现出显著规律性，这与草本根的抗拉强度高于灌木根的类似[24]。植被根木质化程度影响了其抗拉特性，木质化程度低的草本根抗拉力低于木质化程度高的灌木根，但灌木的根径大于草本，抗拉强度与根径呈现指数负相关性，从而存在草本根的抗拉强度可能大于灌木根，也可能小于灌木根，主要取决于根径、木质化程度等影响因素。

4.2　根–土界面的黏结机制和破坏模式

根-土界面的黏结作用是根-土复合体的力学性能的关键[25]。草本须根通过与土颗粒的分子引力与

毛细物理作用、黏液分泌化学作用和三维立体机械啮合作用提升根-土界面的黏结强度，刚性较大的灌木根的黏结强度低于草本须根，主要通过自身的刚度抵抗土颗粒的滑移。

本研究中草、灌根在根-土复合体的破坏形态呈现出不同的破坏模式，界面黏结强度高于自身抗拉强度的草本根在剪切试验中多发生根拔出破坏，界面黏结强度低于自身抗拉强度的灌木根在剪切试验中多发生根滑移破坏，与杉树根系[25]、云南松[26]、条锦鸡儿[27]类似，根-土界面黏结性能受到根系直径、根系方位等影响。根径较大时，根系对土体的机械咬合作用和界面的接触面积大，其黏结强度会增加。根系与剪切面的角度影响了根系的受力状态，垂直根系较倾斜根系的易发挥拉拔阻力作用，但不利于根系发挥阻剪效应。

4.3 干湿循环对根系抗拉强度和根–土界面强度的双重影响

在抗拉试验中，干湿循环影响根系的抗拉强度。相较于饱和根，干燥的香根草和多花木蓝根的抗拉强度大于饱和根，这与小叶女贞根[28]类似，含水率影响根的抗拉强度，干湿循环对根细胞壁易产生微裂缝。在直剪试验中，干湿循环对根-土复合体的截面强度的结果具有直接影响。相较于未干湿循环，10次干湿循环的根-土复合体黏聚力劣化度43%，与垂穗披碱草[29]类似。干湿循环通过物理与化学作用，破坏了根-土界面的物质组成和接触状态，这种不可逆的界面破坏会随着干湿循环的次数的增加而减小，从而降低根-土界面的黏结强度。干湿循环通过水分的渗透与蒸发，破坏根土界面黏结力及土壤颗粒间胶结作用，导致复合体力学性能随循环次数增加呈递减趋势，前期循环中，水分蒸发使根系与土壤产生收缩变形，界面出现微裂隙，力学性能下降速度快；后期循环中，根土变形趋于稳定，裂隙扩展速率减缓，力学性能衰减幅度降低。

本次试验采用的室内直剪试验是根据根-土复合体的试样标准尺寸与相同的环境变量，是对实际边坡环境的简化，存在一定局限性。室内试验没有考虑土壤结构不均匀、草灌根系分布复杂、孔隙水压力变化等实际影响[30]，试验结果与实际边坡存在一定偏差，后续将开展现场原位剪切试验。

本文采用的干湿循环为考虑干燥、湿化条件的变化对根-土复合体的强度影响，这与实际干湿循环条件（周期与强度）有差距，后续将进一步研究干湿循环条件参数（烘干温度与浸泡时间）下根-土复合体的强度劣化机理。

5 结 论

（1）草、灌根系抗拉强度随着根径增大而非线性减少，灌木根的抗拉强度小于草本根的抗拉强度。干燥状态下根系的抗拉强度大于饱和状态，且干燥的草本根、灌木根系的抗拉强度分别是饱和根系1.2～1.5倍，1.1～1.3倍；

（2）黏聚力受草灌根系类型和干湿循环的影响显著（$p<0.05$），内摩擦角变化较小。根-土复合体的黏聚力均大于素土，黏聚力增幅为30.86%～59.86%。灌木占比75%时草灌混合黏聚力大于单一灌木或草本，黏聚力随着干湿循环增大呈幂指数减少的变化，降幅达35%～43%；

（3）基于试验数据，通过引入干湿循环劣化度，构建了可综合考虑灌木占比、根直径和干湿循环次数的根-土复合体黏聚力数学表达式，该模型能很好地表述干湿循环对草灌混合根-土复合体的抗剪强度的弱化效应，可适用于大别山区类似气候、草灌混合植被边坡的根-土复合体，具备较高预测精度。该模型可应用于鄂东大别山区边坡草灌混合植被防护工程的设计与稳定性评价。

参考文献（References）：

[1] Li J, Wang X, Jia H X, et al. Assessing the soil moisture effects of planted vegetation on slope stability in shallow landslide-prone areas[J]. Journal of Soils and Sediments, 2021,21(7):2551-2565.

[2] 谢亚军，顾浩，苏宇宸，等.考虑植被力学-水力作用的洪泽湖堤防加固效果分析[J].河海大学学报（自然科学版），2024,52(2):61-68.
Xie Y J, Gu H, Su Y C, et al. Reinforcement effects of Hongze Lake embankment considering hydro-mechanical effects of vegetation[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024,52(2):61-68.

[3] Zhang Z Y, Wang C G, Ma B, et al. The effect of herbaceous and shrub combination with different root configurations on soil saturated hydraulic conductivity[J]. Water, 2025,17(15):2187.

[4] Cai Y, Yu X F, Zou Y C, et al. Shrubification of herbaceous peatlands modulates root exudates, increasing rhizosphere soil CO_2 emissions while decreasing CH_4 emissions [J]. Catena, 2024,245:108282.

[5] Hu B L, Su L J, Zhang C L, et al. Mobility characteristics of rainfall-triggered shallow landslides in a forest area in Mengdong, China[J]. Landslides, 2024,21(9):2101-2117.

[6] Lu N, Godt J W. Hillslope Hydrology and Stability[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013.

[7] Liu L L, Zhang J, Li J Z, et al. A bibliometric analysis of

the landslide susceptibility research(1999 - 2021)[J]. Geocarto International, 2022,37(26):14309-14334.

[8] 刘亚斌,胡夏嵩,余冬梅,等.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[J].工程地质学报, 2020,28(3):471-481.
Liu Y B, Hu X S, Yu D M, et al. Distribution characteristics of combined herb and shrub roots in loess area of Xining basin and their effect on enhancing soil shear strength[J]. Journal of Engineering Geology, 2020,28(3):471-481.

[9] 姚怡宁,宗桦,周璐,等.川西大渡河干热河谷优势灌草植物根系特征及固土能力[J].生态学报,2025,45(6):2798-2810.
Yao Y N, Zong H, Zhou L, et al. Root characteristics and soil-fixing ability of the dominant shrubs and herbs in the dry and hot valley of Dadu River in West Sichuan[J]. Acta Ecologica Sinica, 2025,45(6):2798-2810.

[10] 许桐,刘昌义,胡夏嵩,等.西宁盆地黄土区荷载条件下植被护坡力学效应[J].农业工程学报,2021,37(2):142-151.
Xu T, Liu C Y, Hu X S, et al. Mechanical effects of vegetation protection on slope under loading conditions in loess areas of Xining Basin[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021,37(2):142-151.

[11] 赵玉娇,胡夏嵩,刘昌义,等.寒旱环境植物根系增强边坡土体抗剪强度试验研究[J].水土保持研究,2016,23(4):212-220.
Zhao Y J, Hu X S, Liu C Y, et al. Research on soil shear strength reinforced by vegetation roots in slope of cold and arid environments[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016,23(4):212-220.

[12] 卢海静,胡夏嵩,付江涛,等.寒旱环境植物根系增强边坡土体抗剪强度的原位剪切试验研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(8):1712-1721.
Lu H J, Hu X S, Fu J T, et al. In-situ shearing test on the shear strength of soil slope reinforced by plant roots in cold and arid environments[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016,35(8):1712-1721.

[13] Hollis L O, Turner R E. The tensile root strength of Spartina patens declines with exposure to multiple stressors[J]. Wetlands Ecology and Management, 2021,29(1):143-153.

[14] Gao Q F, Yu H, Zeng L, et al. Roles of vetiver roots in desiccation cracking and tensile strengths of near-surface lateritic soil[J]. Catena, 2023,226:107068.

[15] 张川,谢祥荣,段青松,等.木纤维重构红壤下根系特征对根土复合体抗剪特性的影响[J].农业工程学报,2024,40(4):138-146.
Zhang C, Xie X R, Duan Q S, et al. Effects of root characteristics on the shear characteristics of root-soil complex in wood fiber reconstructed red soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024,40(4):138-146.

[16] Liu Q, Huang J K, Zhang Z W, et al. Effect of freeze-thaw cycles on the shear strength of root-soil composite [J]. Materials, 2024,17(2):285.

[17] 毛正君,耿咪咪,毕银丽,等.紫花苜蓿-黄土复合体抗剪强度时间效应研究[J].煤炭科学技术, 2023,51(11):234-247.
Mao Z J, Geng M M, Bi Y L, et al. Study on the time effect of shear strength of alfalfa-loess composite[J]. Coal Science and Technology, 2023,51(11):234-247.

[18] Zhang L, Yan W M, Leung F T Y. Probabilistic estimation of root cohesion in regards to intra-specific variability of root system[J]. Catena, 2021,196:104898.

[19] 吴美苏,周成,王林,等.根系和裂隙对土体水力和力学特性影响数值模拟[J].岩土力学, 2019,40(S1):519-526,534.
Wu M S, Zhou C, Wang L, et al. Numerical simulation of the influence of roots and fissures on hydraulic and mechanical characteristics of the soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019,40(S1):519-526,534.

[20] Pollen N, Simon A. Estimating the mechanical effects of riparian vegetation on stream bank stability using a fiber bundle model[J]. Water Resources Research, 2005, 41(7):2004WR003801.

[21] 邓友生,姚志刚,段邦政,等.基于分形理论的香根草根系护坡力学性能分析[J].农业工程学报,2024,40(4):147-154.
Deng Y S, Yao Z G, Duan B Z, et al. Mechanical properties of slope protection by vetiver root using fractal theory[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024,40(4):147-154.

[22] 赵东晖,冀晓东,张晓,等.冀西北地区白桦根系-土壤界面摩擦性能[J].农业工程学报,2021,37(3):124-131.
Zhao D H, Ji X D, Zhang X, et al. Friction performance of root-soil interface of Betula platyphylla in Northwestern Hebei Province, China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021,37(3):124-131.

[23] 骆丕昭,王云琦,李通,等.基于三轴UU试验的土体含水率对根土复合体强度特性的影响[J].水土保持学报,2023,37(6):153-160.
Luo P Z, Wang Y Q, Li T, et al. Effect of soil moisture content on strength characteristics of root-soil complex based on triaxial UU test[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023,37(6):153-160.

[24] 刘昌义,胡夏嵩,赵玉娇,等.寒旱环境草本与灌木植物单根拉伸试验强度特征研究[J].工程地质学报,2017,25(1):1-10.
Liu C Y, Hu X S, Zhao Y J, et al. Strength characteristics of single root tensile test of herbs and shrubs in cold and arid environments[J]. Journal of Engineering Geology, 2017,25(1):1-10.

(下转第 310 页)