伊犁谷地加朗普特滑坡优势草本植物根系力学特性及其根土复合体抗剪强度

徐元鹏，张紫昭，张志伟，白一兵，翟高阳
（新疆大学，地质与矿业工程学院，新疆 乌鲁木齐 830046）

摘　要：［目的］研究伊犁谷地黄土滑坡区优势草本植物根系力学特性及其根土复合体力学强度，为伊犁地区滑坡植被护坡与灾害防治提供依据。［方法］以伊犁谷地加朗普特滑坡为研究区，结合野外植被调查与室内试验，开展黄花棘豆、线叶嵩草、冷地早熟禾与天蓝苜蓿4种优势草本植物的单根拉伸试验，并对线叶嵩草根土复合体进行不同植被覆盖率（含根量梯度）条件下的直剪试验，以揭示根系力学特征及其对根土复合体抗剪性能的影响规律。［结果］单根拉伸试验结果表明：4种植物的单根抗拉力排序为：冷地早熟禾＞天蓝苜蓿≈黄花棘豆＞线叶嵩草；4种植物的单根抗拉强度排序为：冷地早熟禾＞线叶嵩草＞天蓝苜蓿＞黄花棘豆。4种植物根径与单根抗拉力呈幂函数正相关，与抗拉强度呈幂函数负相关。直接剪切试验表明，线叶嵩草根土复合体抗剪强度随植被覆盖率增加呈先增后减趋势。在植被覆盖率为50%（对应含根量6.71 mg/cm^3）时达到峰值，黏聚力最大提升328.74%。［结论］研究区优势草本植物根系的力学特征与根径大小存在显著相关性，根系通过加筋、嵌固及界面摩阻作用显著提升根土复合体力学性能，但其增强作用存在最优含根量，过高含根量会破坏土体结构均匀性，从而削弱根土复合体的增强效果。

关键词：伊犁；单根力学特性；根土复合体；抗剪强度；植被覆盖率；含根量
文献标识码：A　　**文章编号：**1000-288X（2026）04-0061-11　　**中图分类号：**P642.3，TU411.7

文献参数：徐元鹏，张紫昭，张志伟，等.伊犁谷地加朗普特滑坡优势草本植物根系力学特性及其根土复合体抗剪强度[J].水土保持通报，2026，46（4）：61-71. Xu Yuanpeng，Zhang Zizhao，Zhang Zhiwei，et al. Mechanical characteristics of root system of dominant herbaceous plants and shear strength of root-soil composites in Jialangpute landslide area of Yili valley [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2026，46（4）：61-71.

DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2026.04.004　　**CSTR：32312.14.stbctb.2026.04.004**

Mechanical characteristics of root system of dominant herbaceous plants and shear strength of root-soil composites in Jialangpute landslide area of Yili valley

Xu Yuanpeng，Zhang Zizhao，Zhang Zhiwei，Bai Yibing，Zhai Gaoyang
（*School of Geology and Mining Engineering*，*Xinjiang University*，*Urumqi*，*Xinjiang* 830046，*China*）

Abstract：［Objective］The root mechanical properties of dominant herbaceous plants and the mechanical strength of their root-soil composites in the loess landslide area of the Yili valley were investigated，in order to provide a basis for vegetation-based slope protection and disaster prevention in the Yili region.［Methods］Taking the Jialangpute landslide in the Yili valley as a study area，field vegetation surveys and laboratory experiments were conducted on four dominant herbaceous plants：*Oxytropis ochrocephala*，*Carex capillifolia*，*Poa crymophila*，and *Medicago lupulina*. Additionally，direct shear tests were conducted on *C. capillifolia* root-soil composites under different vegetation coverage levels（root content gradients）to reveal root mechanical characteristics and their influence on the shear resistance of root-soil composites.［Results］The results of single-root tensile tests

收稿日期：2025-12-12　　**修回日期：**2026-01-15　　**采用日期：**2026-01-16
资助项目：国家自然科学基金“伊犁谷地冰雪融水叠加降雨入渗黄土滑坡形成机理与预警判据”（42367021）
第一作者：徐元鹏（2000—），男（汉族），山东省东阿县人，硕士研究生，研究方向为黄土力学。Email：2432112057@qq.com。
通信作者：张紫昭（1981—），男（汉族），山东省荣成市人，教授，博士研究生导师，主要从事地质灾害与矿山地质方面的科研。Email：zhangzizhao@xju.edu.cn。

indicated that the single-root tensile force of the four plants ranked as follows: *P. crymophila* > *M. lupulina* ≈ *O. ochrocephala* > *C. capillifolia*. The ranking of single-root tensile strength of the four plants was *P. crymophila* > *C. capillifolia* > *M. lupulina* > *O. ochrocephala*. The root diameter of all four plants showed a positive power-law correlation with single-root tensile force and a negative power-law correlation with single-root tensile strength. Direct shear tests revealed that the shear strength of the *C. capillifolia* root-soil composite exhibited an initial increase followed by a decrease with increasing vegetation coverage, reaching a peak at 50% coverage (corresponding to a root content of 6.71 mg/cm^3), with cohesion increasing by up to 328.74%. [Conclusion] The mechanical properties of dominant herbaceous plant roots in the study area are significantly correlated with root diameter. The roots significantly improve the mechanical properties of the root-soil composite through reinforcement, anchorage, and root-soil interface friction. However, there exists an optimal root content for the reinforcing effect, and excessive root content may disrupt the structural uniformity of the soil, thereby weakening the reinforcing effect of the root-soil composite.

Keywords: Yili valley; mechanical properties of single roots; root-soil composite; shear strength; vegetation coverage; root content

伊犁谷地位于新疆西部,地处欧亚大陆腹地。由于该地区黄土湿陷性强烈,加之春季融雪与夏季降雨,造成了其黄土滑坡频发的现象。根据新疆地质环境监测院统计数据,截至2024年底,伊犁谷地发育滑坡1 756处。其中黄土滑坡1 394处,占全区滑坡总数的79.95%。尤其是伊犁谷地中东部,由于其黄土分布广泛且地层较厚,黄土滑坡发育尤为突出[1],对当地居民财产及生命安全造成了严重的危害。因此,开展伊犁谷地黄土滑坡稳定性影响因素的研究,科学有效防治水土流失、浅层滑坡等次生地质灾害,具有重要的现实意义。

长期以来,针对伊犁谷地黄土滑坡的研究多集中于其地质成因、诱发机制(如降雨、冻融)及时空分布特征[2-3]。这些研究为灾害预警和风险区划提供了重要基础,但治理思路仍较多依赖传统工程措施。近年来,基于自然的解决方案日益受到重视,其中植被护坡作为一种生态友好,可持续的边坡加固途径,其核心机理在于植物根系与土体共同形成根土复合体,通过根系的加筋与锚固作用,从力学上显著提升土体的抗剪强度与整体稳定性。

大量研究表明,草本植物单根力学性能与根径存在显著的函数关系。例如,李宏斌等[4]对陕北黄土区不同植物的研究表明,单根抗拉力与根径呈幂函数正相关关系,而单根抗拉强度则与根径呈幂函数负相关关系,即细根具有更高的单位面积强度。何伟鹏等[5]在对青藏铁路沿线人工恢复草地的研究中也得出了类似结论,并进一步指出根系的空间分布特征(如根长密度、根表面积密度)是影响其与土体机械咬合效率的关键形态指标。这些单根层次的力学与形态参数,是评估植物固土潜力的首要依据。

根系对边坡稳定的宏观贡献,最终通过根土复合体的抗剪强度来体现。室内外试验一致证实,根系能显著提高土体的抗剪强度,尤其对黏聚力(c值)的提升最为显著[6-7]。程平等[8]通过三轴试验发现,根系主要通过提供抗拉能力来提高土体抗剪强度,且主要影响黏聚力,对内摩擦角的影响较小;当根系含量为0.36%时,黏聚力增加了64.91%。杨路等[9]对黄土区优势灌木根土复合体的研究也表明,其抗剪强度指标均显著高于素土。

进一步分析表明,根土复合体的抗剪强度在一定程度上受根系形态及力学特性和土体性质的影响,例如根土复合体密度、含水量、根长密度、土壤有机质等[10-11]。杨馥铖等[12]对高寒草地的研究表明,草地退化会显著削弱根土复合体的抗剪能力,其强度降幅最高可超过80%,且抗剪强度的增强与根系自身的平均抗拉强度及根面积比直接相关。王莉茹[13]对陡坡土坎植物群落的研究则定量分析了不同因素的影响程度,发现根系的表面积密度对黏聚力的提升贡献最大,而含水率则主要影响内摩擦角;根系密度指标(如根重密度、根表面积密度)与强度增加值呈正相关,含水率则呈负相关。

目前,针对伊犁谷地黄土滑坡区草本植物根系力学特性及其根土复合体强度的研究仍较少,尤其缺乏对该区域优势草本植物根系系统力学性能及其与土体协同作用机制的深入探讨。因此,本研究选取伊犁谷地加朗普特滑坡区为研究对象,通过野外调查与室内试验相结合的方法,系统研究区内优势草本植物的单根力学特性,分析其与根径的关系,并开展根土复合体的直接剪切试验,探讨植被覆盖率(含根量)对根土复合体抗剪强度的影响规律,揭示其增强机制,确定最优植被覆盖率。本研究结果可为科学有效防治伊犁谷地水土流失、浅层滑坡等灾

害提供理论支撑和实际指导,为在伊犁谷地黄土滑坡开展植被生态护坡提供理论指导。

1　试验材料与方法

1.1　研究区概况

研究区位于新源县北部阿吾拉勒山区则克台沟上游加朗普特附近,省道S316沿线。地理坐标为83°19′32.81″E,43°38′37.34″N,平均海拔为1 447 m。研究区内气候属温带大陆性半干旱气候,平均气温8.1～8.5 ℃,1月均温－14.4 ℃,7月均温27.95 ℃;年降水量270～880 mm,且主要集中于夏季,蒸发量达1 300～2 000 mm。该地区日照充足(年均2 400～2 700 h),无霜期160～169 d。加朗普特滑坡发生于2002年5月10日,坡长686 m,高230 m,滑动方向285°,总方量约为2.28×10^7 m^3,伤亡30多人,属特大型滑坡,是十多年来伊犁地区规模最大的黄土滑坡。

1.2　野外调查与取样

加朗普特滑坡为3个同时发生的大型滑坡组成的特大型滑坡,滑坡后壁的北侧、东侧、东南侧3个方向,形成巨大的“圈椅状”。本项研究选取滑坡北侧滑坡壁、滑坡体后缘、滑坡体中部、滑坡体前缘,依据优势草本植物分布情况及其覆盖度分别布设11个不同的采样点,以统计并分析滑坡不同位置处优势草本植物发育情况与其根土复合体的力学性质,于2024年11月完成野外取样工作。

本研究采用样方法对区内植物分布特征进行调查,即在每个取样位置随机布置3组规格为50 cm×50 cm的样方,统计样方框内植物种类,同时利用卷尺及游标卡尺测量其株高、地径等生物量指标。其中,丛生植物以株丛个体为测量与统计单位记录丛径,非丛生植物以单株个体记录基径。然后对优势草本植物根系进行取样,放置于试样袋内密封妥善保存。

其中计算植物重要值的公式为:

$$A=\frac{x_n}{x}\times100\% \tag{1}$$

式中:A为植物重要值(%);x_n为被统计植物数量;x为样方框内全部植物数量。

在选定取样点,通过轻微挖掘勘察,确认目标植物主根与须根系主要分布于地表以下0—20 cm土层内。使用不锈钢环刀(直径61.8 mm,高20 mm),采用静压法沿垂直于地表方向(环刀轴线与地表法线一致)压入目标植物根系主要分布的地表以下0—20 cm土层,获取未经扰动的原状根土复合体试样。由于研究对象以须根型根系为主,根系在浅表土层内呈近垂直向下与侧向分布并存,其中贯穿土层方向的根段占比较高。因此该取样方式可较好地反映根系贯穿土层方向的原位结构特征与根-土接触状态。试样取出后立即将环刀装入盒中,并用保鲜膜和胶带密封,置于专用试样箱内运回实验室,用于直接剪切试验。每个目标覆盖率位置制取试样3组。同时在环刀取样相邻位置,使用铝盒采集0—20 cm深度土壤样品,用于立即测定土壤天然含水率。采集适量散装土样,用于实验室测定土壤颗粒比重、密度、液塑限等基本物理性质。加朗普特滑坡群黄土基本物理性质如下:天然含水率为20.89%,天然密度为1.96 g/cm^3,天然干密度为1.64 g/cm^3,饱和含水率为24.57%,塑限为17.34%,液限为27.09%,最大干密度为1.86 g/cm^3,最优含水率为17.4%。

1.3　优势草本植物根系及其根土复合体物理力学性质测试

1.3.1　单根拉伸试验

本项研究采用万能拉伸试验机(HY-0580,精度等级为0.5级(以内),有效测力范围为0.1/100～99.99)。该仪器由工作系统和数据采集系统两部分构成。其工作原理为采用位移传感器和力传感器将夹具与计算机上的数据采集系统连接,试验时通过数据采集系统记录受测单根的位移、抗拉力等相关数据。试验步骤如下:将采回的植物根系中泥砂洗净,并按照植物类型进行分组,选取生长正常且植株完整的植物根系,利用游标卡尺测定根系中部的根径并记录。保持上下两夹具之间的根段标距为60 mm,在此基础上安装根系试样,开始仪器施加垂直拉力进行拉伸,统计测试滑坡区优势草本植物根系在20 mm/min拉伸速率下的根系抗拉力直至试样断裂;通过测试植物根系拉伸过程中断裂时的最大拉力F,并根据公式计算其抗拉强度。为消除夹具对试验结果的影响,单根拉伸试验中,受拉根段须在其中部发生断裂,该数据方可视为有效数据。

计算单根抗拉强度公式为:

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

式中:P为单根抗拉强度(MPa);F为单根最大抗拉力(N);D为根系的直径(mm)。

1.3.2　根土复合体直剪试验

试验采用ZJ型应变控制式直剪仪。试验步骤如下:将制备完成的原状试样放置于剪切盒内上、下两块透水石之间,分别在50,100,200,300 kPa的垂直压力(P)作用下,以2.4 mm/min的速度施加水平应力推动下剪切盒,使试样沿上下盒之间的水平面上受剪直

至破坏。试验过程中通过电脑系统采集不同垂直压力下试样的剪应力(τ)和剪切位移(L),并且由计算机自动生成剪应力-位移关系曲线,从而计算出该组试样的黏聚力值(c)和内摩擦角值(φ)。

计算黏聚力指标(c)和内摩擦角指标(φ)的公式为

$$\tau = c + \sigma\tan\varphi \tag{3}$$

式中:τ为抗剪强度(kPa);c为黏聚力(kPa);σ为法向应力(kPa);φ为内摩擦角(°)。

1.3.3 含根量测定

将直剪试验后的每组直剪试样(4个根土复合体)放入托盘中并用水浸泡,待土体吸水变软后,用水冲洗试样并轻轻搅动使试样中的土全部被水冲走而留下试样中的根系,最后,将根系烘干后称取干根质量并计算根土复合体含根量。

$$M_r = \frac{m_s}{V} \tag{4}$$

式中:M_r为根土复合体含根量(mg/cm^3);m_s为根土复合体内所含根系干重(mg);V为根土复合体试样体积。本试验取每组直剪试样4个环刀总体积(240 cm^3)。

2 结果与分析

2.1 优势草本植物筛选结果及其生物量统计特征

本研究沿滑坡体北侧壁至坡脚共设置11个采样点,系统调查了各采样点区内的植物群落组成。表1列出了加朗普特滑坡区不同坡位草本植物的分布情况及其株高和地径。

北侧滑坡壁以黄花棘豆和线叶嵩草为主要优势种,二者重要值总和高达76%。其中黄花棘豆的平均地径为2.44±0.93 mm,为全坡位最高值,平均株高为4.30±1.98 cm;线叶嵩草平均株高为7.85±2.56 cm,平均地径仅0.77±0.67 mm,为全坡位草本植物最低。另外伴生种冷地早熟禾和阿尔泰狗娃花分布较少。

滑坡体后缘以线叶嵩草、天蓝苜蓿与冷地早熟禾共同构成优势种组合,重要值总和达70%。其中,冷地早熟禾在此处的平均株高为13.91±7.74 cm,发育明显优于其他坡位;天蓝苜蓿平均地径为1.56±1.39 mm,变异幅度居全坡位之首。伴生种包括芨芨草、西伯利亚远志、二裂委陵菜、阿尔泰狗娃花,是多样性最丰富的坡位。

表1 加朗普特滑坡区草本植物的分布情况及其生物量

Table 1 Distribution and biomass of herbaceous plants in Jialangpute landslide area

坡 位	物种中文名	物种拉丁文学名	重要值/%	优势度类型	平均株高/cm	基径/丛径/mm
北侧滑坡壁	黄花棘豆	*Oxytropis ochrocephala*	41	优势种	4.30±1.98	2.44±0.93
	线叶嵩草	*Carex capillifolia*	35	优势种	7.85±2.56	0.77±0.67
	冷地早熟禾	*Poa crymophila*	14	伴生种	11.47±2.51	1.36±0.27
	阿尔泰狗娃花	*Aster altaicus*	10	伴生种	2.36±0.74	1.60±0.41
滑坡体后缘	线叶嵩草	*Carex capillifolia*	31	优势种	4.24±1.11	1.23±0.36
	天蓝苜蓿	*Medicago lupulina*	21	优势种	6.31±1.63	1.56±1.39
	冷地早熟禾	*Poa crymophila*	18	优势种	13.91±7.74	1.24±0.40
	芨芨草	*Neotrinia splendens*	10	伴生种	12.29±1.11	0.97±0.25
	西伯利亚远志	*Polygala sibirica*	8	伴生种	7.73±2.54	1.01±0.42
	二裂委陵菜	*Potentilla bifurca*	7	伴生种	3.19±1.79	1.76±1.19
	阿尔泰狗娃花	*Aster altaicus*	5	伴生种	2.21±0.44	1.57±1.28
滑坡体中部	冷地早熟禾	*Poa crymophila*	30	优势种	11.37±0.51	2.07±1.33
	线叶嵩草	*Carex capillifolia*	24	优势种	5.78±0.31	2.62±1.43
	黄花棘豆	*Oxytropis ochrocephala*	21	优势种	5.60±1.12	0.93±0.21
	芨芨草	*Neotrinia splendens*	14	伴生种	11.12±0.61	1.37±0.42
	多裂委陵菜	*Potentilla multifida*	11	伴生种	4.71±1.23	0.47±0.18
滑坡体前缘	线叶嵩草	*Carex capillifolia*	40	优势种	6.29±0.81	0.87±0.29
	冷地早熟禾	*Poa crymophila*	32	优势种	11.73±1.27	1.21±0.41
	二裂委陵菜	*Potentilla bifurca*	11	伴生种	2.89±1.17	1.26±0.89
	多裂委陵菜	*Potentilla multifida*	10	伴生种	2.77±0.61	1.17±0.75
	赖 草	*Leymus secalinus*	7	伴生种	13.91±1.21	1.62±0.43

注:①优势种指某物种的个体数占样方内所有物种个体总数的百分比,重要值>15%;伴生种指某物种的个体数占样方内所有物种个体总数的百分比,重要值0%~15%。②表中列出了样方框中出现的所有物种。

滑坡体中部处冷地早熟禾重要值升高,超越线叶嵩草成为第一优势种,与黄花棘豆三者共同构成优势种组合,重要值总和达75%。其中,线叶嵩草在此处的平均地径达2.62±1.43 mm,为全坡位最大值;冷地早熟禾平均株高11.37±0.51 cm,较后缘降低32%。伴生种为芨芨草和多裂委陵菜。

滑坡体前缘以线叶嵩草与冷地早熟禾为主,重要值总和达72%。线叶嵩草平均株高为6.29±0.81 cm,冷地早熟禾地径为1.21±0.41 mm,变异幅度较低。伴生种以二裂委陵菜和多裂委陵菜为主,二者平均株高均不足3 cm,另外分布少量赖草。

2.2　优势草本植物单根抗拉力学特性及其特征

2.2.1　区内优势草本植物筛选

基于表1,黄花棘豆(*O. ochrocephala*)、线叶嵩草(*C. capillifolia*)、冷地早熟禾(*P. crymophila*)与天蓝苜蓿(*M. lupulina*)兼具生态主导性、空间普适性及形态变异性,可全面反映滑坡区优势草本植物根系力学特性。以上4种植物为单根拉伸试验对象。

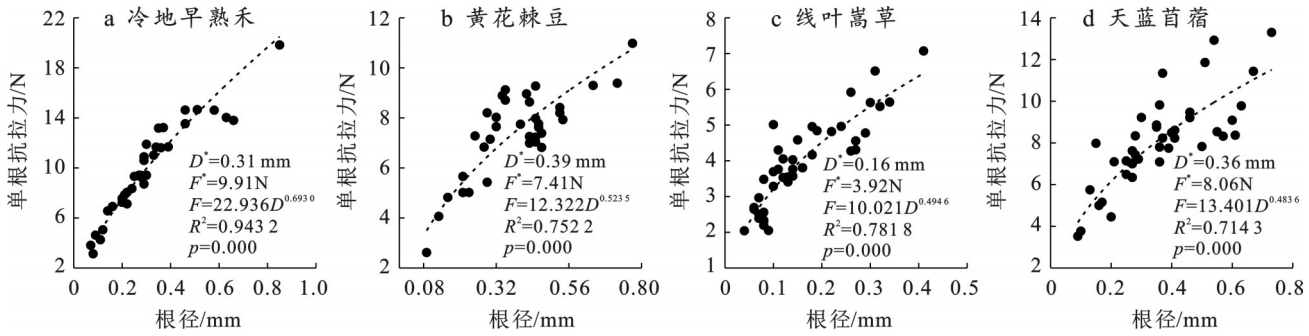
2.2.2　单根抗拉力及其特征

本研究对4种优势草本植物的单根抗拉力进行了测试与分析。结果显示,4种植物的单根平均抗拉力为3.92～9.91 N,其中冷地早熟禾最高,天蓝苜蓿与黄花棘豆次之,而线叶嵩草最低。

具体而言,当根径达到0.85 mm时,冷地早熟禾的单根抗拉力最高可达19.826 N,明显优于其他物种;相比之下,线叶嵩草在根径为0.41 mm时最大抗拉力仅为7.072 N。

此外,根径在0.2～0.4 mm时,4种植物单根抗拉力由大到小依次为:冷地早熟禾 ＞天蓝苜蓿≈黄花棘豆 ＞线叶嵩草。

进一步分析表明,4种植物的单根抗拉力与根径之间均呈现显著的幂函数正相关关系,拟合曲线为上凸型(见图1)。其中,冷地早熟禾的拟合优度最高,其余3种植物的拟合优度为0.714 3～0.781 8。在4种植物中,冷地早熟禾的幂指数最高,相较而言,其余植物的幂指数较低。这表明冷地早熟禾的抗拉力随根径增大而增大的速率最快,且在0.2～0.4 mm根径范围内,此增长优势尤为明显。而黄花棘豆、线叶嵩草和天蓝苜蓿的曲线斜率相对平缓,尤其在上述根径区间内增长更为缓慢。



注:D^*为平均根径;F^*为单根平均抗拉力;R^2为拟合优度;p为显著性水平。下同。

图1　研究区优势草本植物单根抗拉力与根径的关系

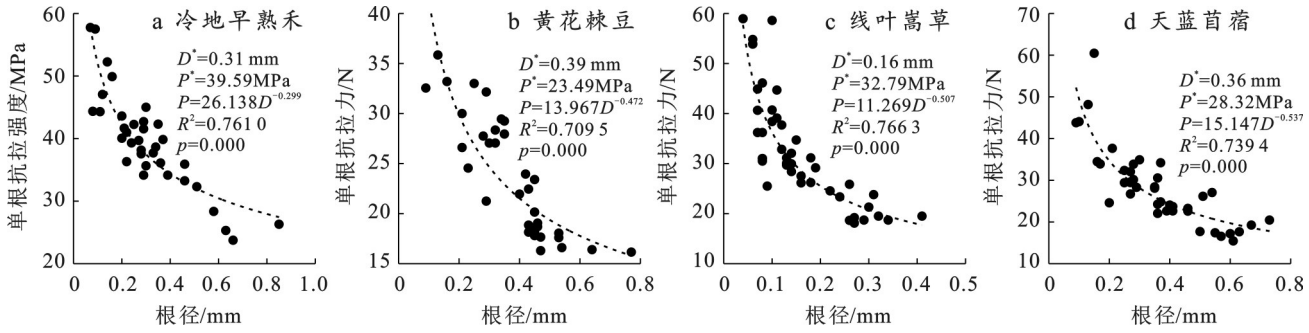
Fig.1　Relationship between single-root tensile force and root diameter of dominant herbaceous plants in study area

2.2.3　单根抗拉强度及其特征

植物的单根抗拉强度是反映根土复合体力学性能的关键参数,是评价植物根系固土护坡效能的重要指标之一[14]。本研究对4种优势草本植物的单根抗拉强度进行了测试与分析。结果显示,4种植物的单根平均抗拉强度为23.49～39.59 MPa,其排序为:冷地早熟禾＞线叶嵩草＞天蓝苜蓿＞黄花棘豆。天蓝苜蓿的抗拉强度变化范围最大,其最大值(60.45 MPa)至最小值(16.55 MPa)的降幅达72.62%,表明其强度对根径尺寸最为敏感。冷地早熟禾与黄花棘豆抗拉强度降幅最小,两者较为接近,均在58%左右。在本试验样本范围内,冷地早熟禾、线叶嵩草和天蓝苜蓿的最大抗拉强度均高于57.75 MPa;相比之下,黄花棘豆的最大抗拉强度低于该阈值,峰值水平相对较低。

进一步分析表明,4种植物的单根抗拉强度与根径之间均呈现显著的幂函数负相关关系,拟合曲线为下凸型。4种植物的拟合优度在0.709 5～0.766 3之间,基本接近。根据回归方程以及图2可以确定当根径在0～1 mm之间时,天蓝苜蓿的幂函数指数的绝对值最大,曲线斜率最大,表明其抗拉强度随根径增大而降低的速率相对最快。这与观测到的从最大抗拉强度(60.45 MPa)到最小抗拉强度(16.55 MPa)这一强度变化相符。冷地早熟禾的幂函数指数绝对值最小,表明其抗拉强度随根径增大的下降趋势最为平缓,这也与其具有四者中最高的平均根径的同时

仍维持最高的平均抗拉强度的结果一致。黄花棘豆的抗拉强度整体偏低,且最大观测值(43.8 MPa)明显低于其他三者在细根径条件下的高值,体现了其固有的力学特性差异。



注:P^*为单根平均抗拉强度。下同。

图2 研究区优势草本植物单根抗拉强度与根径的关系

Fig.2 Relationship between single-root tensile strength and root diameter of dominant herbaceous plants in study area

2.3 线叶嵩草根土复合体抗剪力学强度特征

为探讨含根量变化对根土复合体抗剪强度的影响,本研究选取了线叶嵩草这一研究区内广泛分布的优势物种,以其根土复合体为研究对象。通过样线法[15]测定并建立了地表植被覆盖率与根系含量之间的线性对应关系(见图3),即植被覆盖率G为0%,10%,30%,50%,70%,90%时,对应根系含量分别为0,2.05,3.37,6.71,8.75,12.21 mg/cm^3,并据此制备了6种含根量梯度的试样进行直接剪切试验。

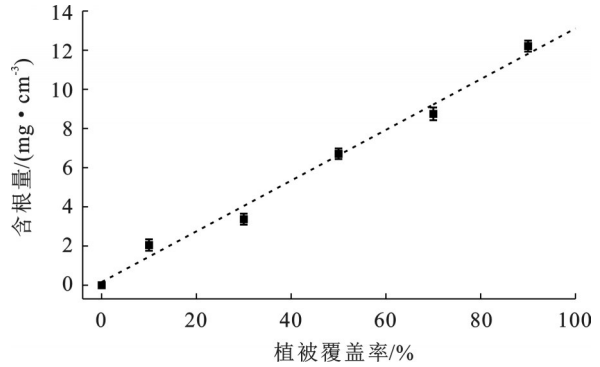


图3 线叶嵩草根系含量与研究区坡表植被覆盖率的关系

Fig.3 Relationship between root content of *C. capillifolia* and surface vegetation coverage in study area

2.3.1 应力位移曲线

图4为研究区6种植被覆盖率条件下即6种含根量梯度下试样的应力-位移曲线关系。剪切过程中剪应力与剪切位移总体关系呈非线性:在剪切试验初期,根土复合体试样与素土试样的剪应力和剪切位移关系近似呈线性。在位移初始阶段剪应力迅速上升,剪切中后段缓慢上升。在所有法向应力水平下,剪切应力随剪切位移的增加均表现出明显的增加。与素土试样(G=0%)相比,线叶嵩草根土复合体试样在各级垂直压力下均表现出更小的剪切位移,说明根系能够抑制剪切变形,提高抗剪切变形能力。为便于比较含根量(以植被覆盖率G表征)对剪切位移的影响规律,分别在P_1—P_4各级垂直压力下选取该压力水平下各曲线均可达到的代表性剪应力点进行对比,结果如下。

(1)P_1垂直压力下(取剪应力τ=40 kPa),不同G条件下剪切位移随含根量变化差异明显:G=50%时剪切位移最小(约1.37 mm),G=90%次之(约1.94 mm);随后依次为G=30%(约2.30 mm),G=70%(约2.39 mm),G=0%(约3.93 mm)和G=10%(约4.12 mm)。在该条件下抗剪切变形能力由强到弱总体表现为:(G=50%)>(G=90%)>(G=30%)>(G=70%)>(G=0%)≈(G=10%)。

(2)P_2垂直压力下(取剪应力τ=60 kPa),在相同剪应力水平下,根土复合体剪切位移整体小于素土:其中G=90%最小(约2.42 mm);G=50%次之(约2.55 mm);随后依次为G=70%(约2.73 mm),G=30%(约3.28 mm),G=10%(约3.44 mm),G=0%(约4.42 mm)。因此该条件下抗剪切变形能力由强到弱为:(G=90%)>(G=50%)>(G=70%)>(G=30%)>(G=10%)>(G=0%)。

(3)P_3垂直压力下(取剪应力τ=100 kPa),素土剪切位移最大(约4.76 mm),含根后显著减小。其中G=90%最小(约1.94 mm),随后依次为G=30%(约2.05 mm),G=50%(约2.22 mm),G=10%(约2.54 mm),G=70%(约3.70 mm)。据此该条件下抗剪切变形能力由强到弱为:(G=90%)>(G=30%)>(G=50%)>(G=10%)>(G=70%)>(G=0%)。

(4)P_4垂直压力下(300 kPa,取剪应力τ=

160 kPa),根土复合体在不同G下剪切位移由小到大为G=50% 为 3.01 mm,G=70% 为 3.18 mm,G=30% 为 3.81 mm,G=90% 为 3.90 mm,G=10% 为 3.92 mm。这说明该条件下对应抗剪切变形能力由强到弱为:(G=50%)>(G=70%)>(G=30%)>(G=90%)>(G=10%)>(G=0%)。

综上所述,在P_1—P_4不同垂直压力下,含根试样在相同剪应力水平下均表现出更小的剪切位移,但最优含根量(G)在不同垂直压力下存在差异:低—中等垂直压力下更偏向较高覆盖率或中等覆盖率取得较小位移,而在高垂直压力P_4(300 kPa)下以G=50% 表现最佳。

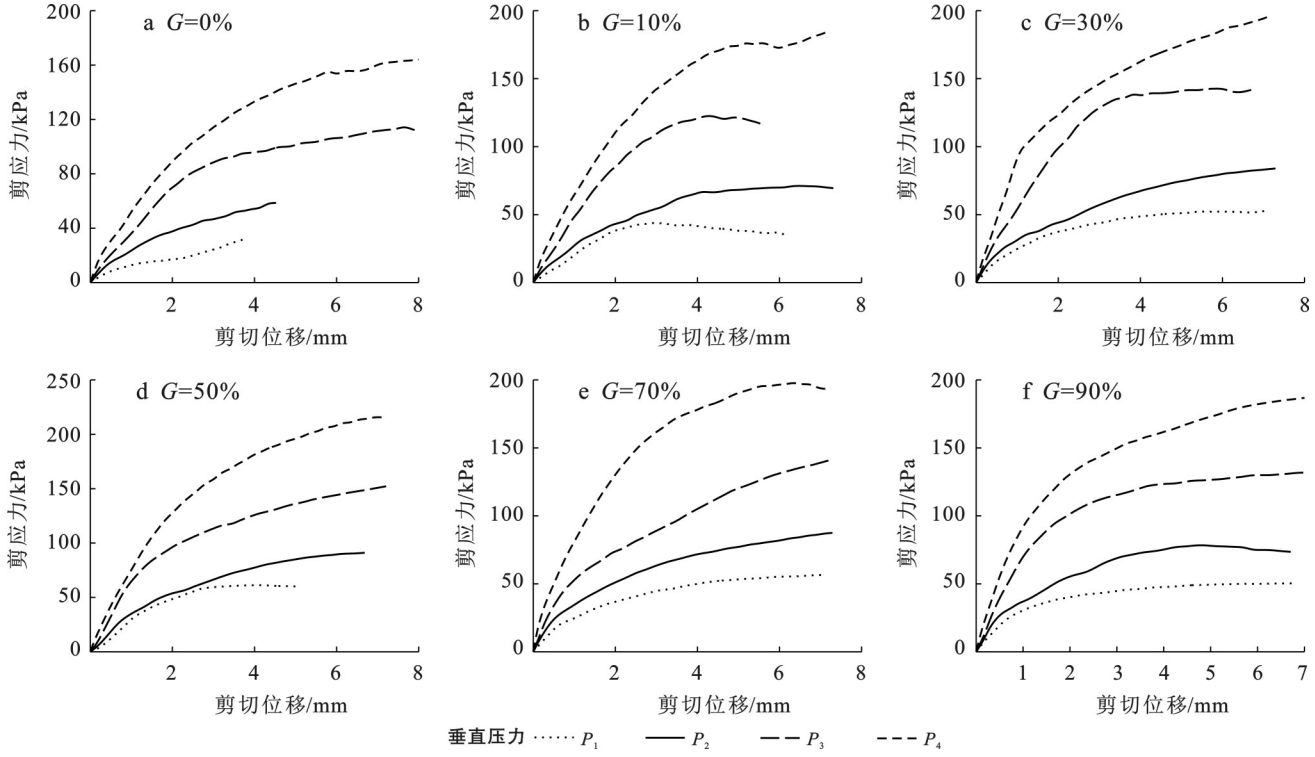


图 4　研究区线叶嵩草根土复合体应力—位移关系

Fig.4　Stress-displacement relationship curves of root-soil composite of *C. capillifolia* in study area

2.3.2　抗剪强度指标分析

依据直接剪切试验结果,对素土和线叶嵩草根土复合体试样的抗剪强度指标进行了统计分析(如表 2 所示)。在 6 种植被覆盖率条件下,线叶嵩草根土复合体相较于不含根素土黏聚力的增长量为 11.21~22.65 kPa,增幅为 162.70%~328.74%,且由大到小依次为G=50%,G=70%,G=30%,G=90%,G=10%。线叶嵩草为须根型植物,因此试样中多数根系能够贯穿剪切面,表现为试样在受到剪切作用时,贯穿剪切面的根系可以抵抗土体的剪切变形破坏,能够为根土复合体试样提供一定的加筋作用,并有效地促进剪应力的传递和扩散[16]。

内摩擦角(φ)反映了根土复合体内部由于根系与土颗粒相互机械咬合、摩擦以及根系受拉产生的附加法向应力效应,共同形成的对剪切变形的抵抗能力。图 5 为研究区线叶嵩草根土复合体内摩擦角与植被覆盖率的关系,由图 5 可知,研究区内试样的内摩擦角呈现出随植被覆盖率先增大后减小的规律,主要受根系加筋作用与土体结构变化的共同影响。含根量较低时,随根系增多,其在土体中形成空间网络,通过摩擦、咬合及受拉产生附加抗力,增强土体抗剪强度,使内摩擦角变大。而当含根量过高时,植物根系可能引起土体结构疏松或密实度下降,削弱颗粒间咬合作用,从而导致内摩擦角降低。

表 2　研究区线叶嵩草根土复合体抗剪强度指标试验结果

Table 2　Test results of shear strength indicators of root-soil composite of *C. capillifolia* in study area

植被覆盖率G/%	平均含根量/(mg·cm^{-3})	平均黏聚力c/kPa	黏聚力增长量/kPa	黏聚力增幅/%
0	0	6.89		
10	2.05	18.10	11.21	162.70
30	3.37	23.81	16.92	245.57
50	6.71	29.54	22.65	328.74
70	8.75	28.34	21.45	311.32
90	12.21	22.98	16.09	233.53

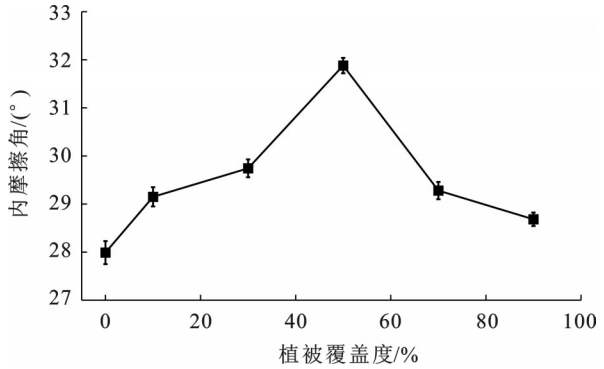


图5 研究区线叶嵩草根土复合体内摩擦角与植被覆盖率的关系

Fig.5 Relationship between internal friction angle of *C. capillifolia* root-soil composite and vegetation coverage in study area

2.3.3 最优含根量探讨

根土复合体是将根系与土体视为一个统一的整体,根系通过其加筋效应显著增强土体的抗剪强度。这是根土复合体的重要力学特性[17]。6种植被覆盖率所对应含根量条件下根土复合体抗剪强度与含根量之间的关系如图6所示。结果表明,在不同垂直压力(50, 100, 200, 300 kPa)作用下,根土复合体的抗剪强度随植被覆盖率的增加呈现明显的非线性变化规律:初期,抗剪强度随植被覆盖率增大而增大;当植被覆盖率达到50%时,抗剪强度出现峰值;超过该峰值后,继续增加植被覆盖率反而导致抗剪强度逐渐降低。二次多项式拟合结果显示,各压力条件下拟合曲线均为开口向下的二次函数,拟合优度较高,说明二次模型能够较好地描述根土复合体抗剪强度随植被覆盖率变化的总体趋势。由拟合曲线计算得到的抗剪强度峰值对应植被覆盖率主要分布在52%~56%的范围内,与试验观测到的"峰值出现在50%覆盖率"的结果基本吻合。上述现象表明,存在一个最优的植被覆盖率,即根土复合体中存在一个最优含根量,在该含量附近,根系对土体的加筋增强效果最为显著,抗剪强度达到最大值。已有研究显示,根土复合体抗剪强度对含根量的响应常呈二次型关系,这与本研究得到的"先增后降"规律相吻合[18]。产生这种变化的原因在于当含根量超过最优值后,根与土在剪切荷载下因根、土刚度与抗剪能力差异而产生不协调变形,使根土接触面周围土颗粒更易发生转动、滑移与重排,从而加速剪切面结构破坏与贯通滑移面的形成,导致强度贡献递减甚至转为负效应,表现为抗剪强度下降[19]。从结构尺度进一步解释,当含根量处于低—中等水平时,根系在土体中形成相对连续的加筋网络,通过根土界面摩阻与嵌合作用、根系受拉承载等共同抑制剪切带扩展,从而提升抗剪强度;但当含根量过高时,根系空间占据效应增强,根体分布更易出现局部聚集与不均匀,削弱土体骨架的连续性并增加界面不连续区域,使剪切过程中更易产生局部应力集中与潜在弱面[20-21]。同时,根系生长及根道(包括根体收缩或腐解后形成的通道)会增加土体大孔隙的发育与连通性,改变孔隙结构与介质均一性[22]。当这种孔隙与弱界面在局部集聚并与剪切面相互耦合时,根系的有效加筋贡献可能下降,最终表现为抗剪强度在超过最优含根量后出现回落。

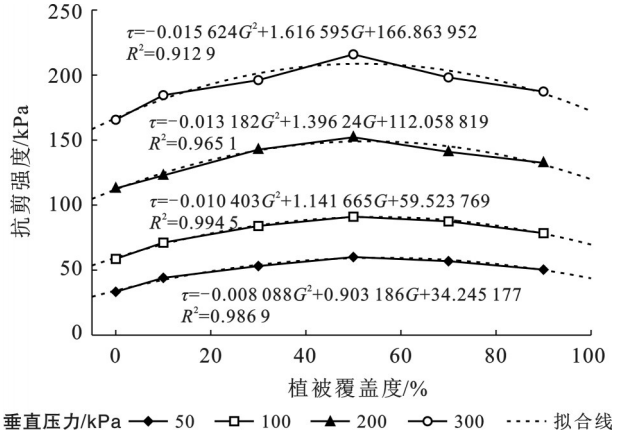


图6 研究区线叶嵩草根土复合体不同垂直压力下抗剪强度与植被覆盖率的关系

Fig.6 Relationship between shear strength of *C. capillifolia* root-soil composite and vegetation coverage under different vertical pressures in study area

此外,线叶嵩草根土复合体的抗剪强度随垂直压力的增大而增大。该现象反映了根系在土体中的埋深位置是影响其抗剪性能的重要因素,即根系埋深越大,根土复合体所表现出的抗剪强度也相应提高[16]。这一结果说明,随着线叶嵩草根系向更深土层中生长,其对于增强土体抗剪能力和促进边坡稳定的作用也更为显著,进一步体现出该植物在固土护坡方面具有积极的生态功能。

显著提升土体黏聚力是植物根系加筋固土作用的一个重要标志[23-24]。基于研究区内线叶嵩草根土复合体在不同含根量与垂直压力下的抗剪强度试验,本文进一步分析了含根量与黏聚力之间的关系(见图7)。结果表明,当植被覆盖率(对应含根量)较低时,黏聚力随植被覆盖率的增大而增大;当植被覆盖率达到50%时,黏聚力取得最大值;超过该值后,则呈现下降趋势。如图7所示,该最优植被覆盖率对应黏聚力的峰值。在本研究中,当G=50%时,即含根量为6.71 mg/cm³时,线叶嵩草根土复合体的黏聚力达到最大值,为29.54 kPa。这一现象说明,存在一个最优含根量,能够最大程度地发挥根系的加筋固土效应。确定研究区线叶嵩草的最优植被覆盖率,从而

在根土复合体中确定最优含根量,对该区域开展植被护坡具有重要指导意义。可在具体种植范围内,通过科学调控植株密度与间距,使根系在土体中的分布达到或趋近最优含根状态。这不仅能够充分发挥线叶嵩草根系的固土护坡效能,还可有效减轻水土流失,对抑制滑坡灾害的发生也具有实用价值。

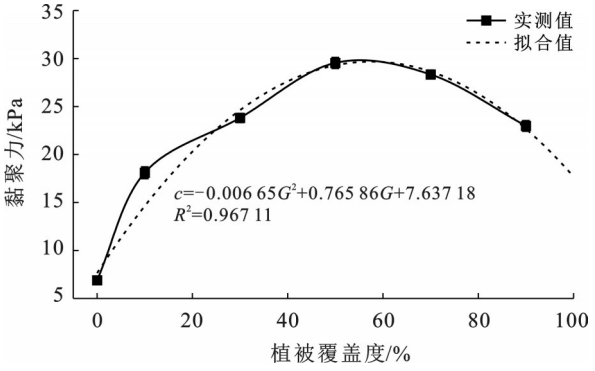


图 7　研究区线叶嵩草根土复合体黏聚力与植被覆盖率的关系

Fig.7　Relationship between cohesion of *C. capillifolia* root-soil composite and vegetation coverage in study area

3　讨　论

3.1　根系抗拉性能差异的机理分析

为深入探究植物根系力学差异的内在机制,需结合植物根系化学组成与微观结构的现有认知进行推论。根系抗拉特性不仅受根径控制,更与其细胞壁化学成分和微观结构密切相关。在化学层面,纤维素作为细胞壁的主要骨架物质,其含量对根系抗拉特性有重要影响。相关研究表明,植物根系抗拉强度随纤维素含量的增加而显著提高[25]。在结构层面,纤维素微纤丝的排列方式对力学性能具有决定性影响;当微纤丝取向角较小时,细胞壁能更有效地抵抗轴向拉伸应力[26]。基于上述机理,本研究观测到的种间差异具有一定合理性。作为禾本科植物,冷地早熟禾通常具有较高的纤维素含量及更有利于承载轴向拉伸的微纤丝排列特征,因此其单根抗拉强度表现显著高于其余3种植物。另一方面,有研究指出,根系直径较小的细根与毛根往往具有较高的单根抗拉强度,反映出细根在力学性能上的相对优势。这可以用于解释本研究中平均根径最小的线叶嵩草单根抗拉强度高于黄花棘豆与天蓝苜蓿的现象。另外,由于细根和毛根能够与土颗粒形成更为紧密的联结,从而显著增强土体的抗冲性能,并有效提升根土复合体的整体抗剪强度[27-28]。

3.2　根土复合体抗剪强化的加筋机理与最优含根量解释

直剪结果表明,根土复合体的抗剪性能较素土获得显著提升,但随含根量增加并非单调增强,而呈现“先增后减”的非线性特征。这一现象与大量根土复合体试验结论一致:无论以根面积比(RAR)还是以根质量密度表征含根程度,抗剪强度及其参数往往存在一个使加筋效果最充分的阈值[19]。

根土复合体在力学上可视为一种“天然纤维加筋土”[29]。在剪切变形发展过程中,跨越潜在剪切面的根系随位移增长逐渐发挥受拉作用,通过影响剪切带附近的应力传递与变形局部化特征提升整体抗剪能力;已有研究表明,根系可使剪切带与塑性区分布发生调整,剪切带范围扩大并在根系附近集中,从而提高抗剪强度[30]。

最优含根量的形成与剪切带内有效受力根系数量及土体骨架连续性密切相关。含根量较低时,贯穿剪切面的有效根数不足,根-土界面粘结与摩阻作用有限,界面剪切传递能力较弱,使根系受拉作用对整体抗剪承载的贡献受限,因而强度增量有限;随着含根量增加,贯穿剪切面的根数及界面接触面积同步增大,根-土相互作用增强,根系加筋效应得以更稳定地发挥,抗剪强度随之提高。当含根量进一步增大并超过更有利范围后,根体的空间占据与根-土不协调变形对土体结构的不利影响开始突出。例如,颗粒接触骨架削弱,局部孔隙与弱界面增多,剪切变形更倾向于沿根周界面或相对松散带集中发展,导致根-土协同承载能力下降,从而出现峰后回落。

3.3　工程启示与展望

研究结果表明,植物根系能够提高土体抗剪强度,但该作用随含根量增加并非无限增强,而存在更为有利的含根量范围。工程实践中,坡面植被配置不宜仅以提高覆盖度为目标,而应兼顾根系结构特征与土体结构稳定性。工程上可优先选择在研究区适应性强,细根与毛根发达且根系更新能力较强的优势草本,以增强根-土界面联结与加筋作用;同时通过合理控制播种密度、株距与养护管理,使根系发育保持在适宜范围内,避免根量过高导致土体骨架削弱,局部孔隙与弱界面增多,从而影响固土效果的稳定性。后续工作可在不同含水条件和原位工况下开展补充验证,并进一步明确含根量(或根面积比)与抗剪强度参数之间的定量关系,为研究区生态护坡的设计取值与效果评估提供支撑。

4　结　论

(1) 加朗普特滑坡区不同坡位草本群落组成存在差异,线叶嵩草、冷地早熟禾、黄花棘豆和天蓝苜蓿为研究区优势草本植物,分布广,适应性强,可作

为该区草本根系固土作用评价的代表物种。

（2）研究区优势草本植物根系力学特性与其根径之间具有显著相关性。4种植物根径与单根抗拉力呈幂函数正相关，与抗拉强度呈幂函数负相关，其中细根（根径＜0.4 mm）具有更高的抗拉强度。

（3）线叶嵩草根土复合体抗剪强度、黏聚力与内摩擦角随植被覆盖率增加呈先增后减趋势；当植被覆盖率约为50%（对应含根量6.71 mg/cm^3）时抗剪强度与黏聚力达到最大，黏聚力最高增幅可达328.74%；当覆盖率继续增大时，过量根系可能破坏土体结构完整性，降低加筋协同效率，从而使抗剪贡献下降。

参考文献（References）

[1] 刘毅.伊犁黄土滑坡特征、成因及稳定性分析[D].新疆石河子：石河子大学，2015.
Liu Yi. Analysis of geological features, cause and stability of the loess landslide in Ili [D]. Shihezi, Xinjiang: Shihezi University, 2015.

[2] 王佳运，石小亚，吴子龙，等.伊犁谷地黄土工程地质性质与滑坡地质灾害时空分布成因[J].西北地质，2025，58(5)：204-212.
Wang Jiayun, Shi Xiaoya, Wu Zilong, et al. Engineering geological property of loess and cause of spatial and temporal distribution of landslide geo-hazards in Yili valley [J]. Northwestern Geology, 2025,58(5): 204-212.

[3] 曹小红.冻融循环作用下伊犁河谷黄土强度劣化及促滑效应研究[D].新疆 乌鲁木齐：新疆农业大学，2024.
Cao Xiaohong. Study on strength deterioration and sliding-promoting effect of loess under freeze-thaw cycles in Yili valley [D]. Urumqi, Xinjiang: Xinjiang Agricultural University, 2024.

[4] 李宏斌，张旭，姚晨，等.陕北黄土区不同植物根系抗拉力学特性研究[J].水土保持研究，2023，30(4)：122-129.
Li Hongbin, Zhang Xu, Yao Chen, et al. Study on root tensile mechanical properties of six typical plants in the loess area of northern Shaanxi [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(4):122-129.

[5] 何伟鹏，刘昌义，周国英，等.退化高寒草原人工恢复植被根系及根-土复合体力学特性研究[J].水文地质工程地质，2022，49(2)：207-218.
He Weipeng, Liu Changyi, Zhou Guoying, et al. A study of the mechanical properties of herbaceous roots and root-soil composite systems in the degraded alpine pasture artificially restored grassland [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022,49(2):207-218.

[6] 嵇晓雷，杨平，张海亚.根土复合体三轴剪切试验研究[J].科学技术与工程，2016，16(34)：270-275.
Ji Xiaolei, Yang Ping, Zhang Haiya. Riaxial shear test study on root-soil composite [J]. Science Technology and Engineering, 2016,16(34):270-275.

[7] 王莉茹，康永祥，巫翠华，等.黄土高原陡坡土坎植被根-土复合体抗剪强度研究[J].西北林学院学报，2021，36(2)：17-23.
Wang Liru, Kang Yongxiang, Wu Cuihua, et al. Shear strength of root-soil composite of vegetation on steep slope ridge of Loess Plateau [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021,36(2):17-23.

[8] 程平，李鹏程，钟彩尹，等.根土复合体依赖根系含量的力学特性及非线性破坏准则[J].长江科学院院报，2023，40(12)：110-117.
Cheng Ping, Li Pengcheng, Zhong Caiyin, et al. Mechanical properties and nonlinear failure criteria of root-soil composite dependent on root content [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2023, 40(12):110-117.

[9] 杨路，杜峰，秦晶晶，等.黄土区3种优势灌木根土复合体的抗剪强度研究[J].水土保持研究，2022，29(1)：295-300.
Yang Lu, Du Feng, Qin Jingjing, et al. Research on shear strengths of root-soil complexes of three dominant shrubs in loess region [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(1):295-300.

[10] 余冬梅，祁兆鑫，刘亚斌，等.青海柴达木盆地盐湖区5种盐生植物根-土复合体抗剪强度影响因素及评价[J].水土保持研究，2019，26(4)：157-165.
Yu Dongmei, Qi Zhaoxin, Liu Yabin, et al. Factors affecting shear strength and contribution evaluation of root-soil composite systems of five halophytes in the salt lake region of northwest Qaidam basin, Qinghai Province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019,26(4):157-165.

[11] 申紫雁，刘昌义，胡夏嵩，等.黄河源区高寒草地不同深度土壤理化性质与抗剪强度关系研究[J].干旱区研究，2021，38(2)：392-401.
Shen Ziyan, Liu Changyi, Hu Xiasong, et al. Relationships between the physical and chemical properties of soil and the shear strength of root-soil composite systems at different soil depths in alpine grassland in the source region of the Yellow River [J]. Arid Zone Research, 2021,38(2):392-401.

[12] 杨馥铖，刘昌义，胡夏嵩，等.黄河源区不同退化程度高寒草地理化性质及复合体抗剪强度研究[J].干旱区研究，2022，39(2)：560-571.
Yang Fucheng, Liu Changyi, Hu Xiasong, et al. Study on physical and chemical properties and shear strength characteristics of root-soil composite system with different degradation degrees of alpine grassland in the source region of the Yellow River [J]. Arid Zone Research,

2022,39(2):560-571.

[13] 王莉茹.黄土高原陡坡土坎不同植物群落根-土复合体抗剪强度研究及固土效应评价[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2020.
Wang Liru. Research on shear strength of root-soil composite and effect evaluation of soil-fixing for plant communities on steep slope ridge of Loess Plateau [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2020.

[14] Yan Zhixin, Song Yun, Jiang Ping, et al. Mechanical analysis of interaction between plant roots and rock and soil mass in slope vegetation [J]. Applied Mathematics and Mechanics (English Edition), 2010,31(5):617-622.

[15] 杨琴,蒲红梅,赵学春,等.3种人工草地不同植被覆盖度实地测量方法比较[J].应用与环境生物学报,2021,27(1):220-227.
Yang Qin, Pu Hongmei, Zhao Xuechun, et al. Comparison of different plant cover investigation methods for three artificial grasslands [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2021,27(1):220-227.

[16] 栗岳洲,付江涛,余冬梅,等.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[J].岩石力学与工程学报,2015,34(7):1370-1383.
Li Yuezhou, Fu Jiangtao, Yu Dongmei, et al. Mechanical effects of halophytes roots and optimal root content for slope protection in cold and arid environment [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015,34(7):1370-1383.

[17] Li Pengcheng, Xiao Xuepei, Wu Lizhou, et al. Study on the shear strength of root-soil composite and root reinforcement mechanism [J]. Forests, 2022,13(6):898.

[18] Cao Yuying, Su Xuemeng, Zhou Zhengchao, et al. Effects of root traits on shear performance of root-soil complex and soil reinforcement in the Loess Plateau [J]. Soil and Tillage Research, 2025,252:106625.

[19] Liu Jianping, Tang Yusha, Jiang Yulin, et al. Experimental study on the effect of root content on the shear strength of root-soil composite with thick and fine roots of *Cryptomeria japonica* (Thunb.ex L.F.) D. Don [J]. Forests, 2024,15(8):1306.

[20] 王万梅.根土复合体抗剪强度影响因素分析及本构模型研究[D].河北 张家口:河北建筑工程学院,2023.
Wang Wanmei. Analysis of influencing factors on shear strength of root-soil composite and study on constitutive model [D]. Zhangjiakou, Hebei, 2023.

[21] 王瑞红,崔芸静,骆浩,等.冻融作用对白家包滑坡狗牙根根土复合体强度影响研究[J].水土保持研究,2025,32(4):208-216.
Wang Ruihong, Cui Yunjing, Luo Hao, et al. Research on the effect of freeze-thaw action on the strength of root-soil composite of *Cynodon dactylon* in the Baijiabao landslide [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025,32(4):208-216.

[22] Qu Yuanyuan, Wu Qinxuan, Khan F U, et al. The impact of root systems on soil macropore abundance and soil infiltration capacity [J]. Plant and Soil, 2025, 513(1):1197-1214.

[23] 单炜,孙玉英,王强,等.高等级公路边坡植物护坡机理与深根锚固作用[J].东北林业大学学报,2008,36(11):59-60.
Shan Wei, Sun Yuying, Wang Qiang, et al. Mechanism of biotechnical slope protection for highway slope and anchorage effect of deep-rooted plants [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2008,36(11):59-60.

[24] 宋庆丰,黄小芸,刘宇.植被护坡功能浅析[J].四川建筑,2009,29(4):85-86.
Song Qingfeng, Huang Xiaoyun, Liu Yu. Analysis of vegetation slope protection function [J]. Sichuan Architecture, 2009,29(4):85-86.

[25] Genet M, Stokes A, Salin F, et al. The influence of cellulose content on tensile strength in tree roots [J]. Plant and Soil, 2005,278(1):1-9.

[26] Lee J, Choi J, Feng Luyi, et al. Regiospecific cellulose orientation and anisotropic mechanical property in plant cell walls [J]. Biomacromolecules, 2023,24(11):4759-4770.

[27] 吕春娟,陈丽华,周硕,等.不同乔木根系的抗拉力学特性[J].农业工程学报,2011,27(S1):329-335.
Lü Chunjuan, Chen Lihua, Zhou Shuo, et al. Root mechanical characteristics of different tree species [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011,27(S1):329-335.

[28] 李建兴,何丙辉,谌芸,等.不同护坡草本植物的根系分布特征及其对土壤抗剪强度的影响[J].农业工程学报,2013,29(10):144-152.
Li Jianxing, He Binghui, Chen Yun, et al. Root distribution features of typical herb plants for slope protection and their effects on soil shear strength [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013,29(10):144-152.

[29] 陈飞,施康,钱乾,等.根土复合体材料的抗剪强度特性研究进展[J].有色金属科学与工程,2021,12(6):96-104.
Chen Fei, Shi Kang, Qian Qian, et al. Research progress on shear strength characteristics of root soil composite materials [J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2021,12(6):96-104.

[30] 徐华,袁海莉,王歆宇,等.根系形态和层次结构对根土复合体力学特性影响研究[J].岩土工程学报,2022,44(5):926-935.
Xu Hua, Yuan Haili, Wang Xinyu, et al. Influences of morphology and hierarchy of roots on mechanical characteristics of root-soil composite [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022,44(5):926-935.