

# 沙棘根土复合体抗剪特性 对平茬复壮响应

卢亚慧, 格日乐, 志辉, 田金兰

(内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 内蒙古 呼和浩特 010018)

**摘要:** [目的] 探究内蒙古砒砂岩区沙棘根土复合体抗剪特性对平茬复壮的响应, 为该区固土保水和沙棘人工林可持续管理的生物力学策略优化提供理论指导。[方法] 以内蒙古砒砂岩区 8 年生衰退型沙棘人工林为研究对象, 对比平茬复壮 1 个生长季后与未平茬对照的根系分布特征及根土复合体抗剪特性。[结果] 沙棘标准株根系 0~1.5 mm 径级的根数、根长、根表面积、根干重较未平茬分别提升 9.29%, 0.03%, 8.35% 和 8.60%, 表明平茬促进了细根的生长。在根系集中分布的土层中, 根土复合体抗剪强度、残余抗剪强度分别增长了 4.08% 和 28.80%, 黏聚力和残余黏聚力与未平茬相比, 平茬后分别增长了 8.25% 和 50.64%, 内摩擦角和残余内摩擦角分别增长了 18% 和 25.57%; 且平茬与未平茬沙棘根土复合体的抗剪特性、残余抗剪特性均优于素土, 即含根土体的抗剪能力优于无根系土壤。[结论] 平茬促进了细根的生长, 细根旺盛的生命活动增强了根与土壤的相互作用, 根土黏结性能改善。通过细根的网络胶结缠绕等, 提高了平茬后沙棘根土复合体的抗剪强度, 促进了土体的稳定性及抗侵蚀能力。

**关键词:** 沙棘; 平茬复壮; 根土复合体; 抗剪强度; 黏聚力; 内摩擦角

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)05-0063-09

中图分类号: S157.1, Q947.6

**文献参数:** 卢亚慧, 格日乐, 志辉, 等. 沙棘根土复合体抗剪特性对平茬复壮的响应[J]. 水土保持通报, 2025, 45(5): 63-71. Lu Yahui, Gerile, Zhihui, et al. Response of shear resistance of *Hippophae rhamnoides* root-soil complex to stubble rejuvenation [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(5): 63-71. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2025.05.028; CSTR:32312.14.stbctb.2025.05.028.

## Response of shear resistance of *Hippophae rhamnoides* root-soil complex to stubble rejuvenation

Lu Yahui, Gerile, Zhihui, Tian Jinlan

(College of Desert Control Science and Engineering, Inner

Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China)

**Abstract:** [Objective] The response of the shear resistance characteristics of *Hippophae rhamnoides* root-soil complexes to stubble rejuvenation was examined in the Pisha sandstone area of Inner Mongolia. The aim was to obtain data for providing theoretical guidance for optimizing the biomechanical strategies used for conserving soil and water and sustainably managing *H. rhamnoides* plantations in this region. [Methods] The 8-year-old declining *H. rhamnoides* plantations in the Pisha sandstone area of Inner Mongolia were selected as research objects. The root distribution and shear characteristics of root-soil complexes were compared between a stubble rejuvenation group (after one growing season) and a control group. [Results] The number, length, surface area and dry weight of the roots with a 0—1.5 mm diameter in the root system of *H. rhamnoides* were 9.29%, 0.03%, 8.35%, and 8.60% larger, respectively, in the rejuvenation group than in the control group, indicating that stubble rejuvenation promoted the growth of fine roots. The shear and residual shear strengths of the root-soil complexes,

收稿日期: 2025-03-10

修回日期: 2025-06-29

采用日期: 2025-06-30

资助项目: 国家自然科学基金项目“梯度应力下植物根系在固土抗蚀受损后自修复的生物力学响应机制”(41867011); 内蒙古自治区教育厅关于“加强我国北方重要生态安全屏障建设”研究专项(STAQZX202309); 内蒙古自然科学基金项目(2021MS04011); 内蒙古自治区教育科学“十四五”规划专项(2023NGHZX-LD165)

第一作者: 卢亚慧(2000—), 女(汉族), 内蒙古自治区赤峰市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持与荒漠化防治。Email: 1814801650@qq.com。

通信作者: 格日乐(1970—), 女(蒙古族), 内蒙古自治区呼和浩特市人, 博士, 副教授, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究。Email: gerile197081@126.com。

the cohesion and residual cohesion, and the internal and residual internal friction angles were 4.08% and 28.80%, 8.25% and 50.64%, and 18.00% and 25.57% larger, respectively, in the stubble group than in the control group in the soil layer where the roots were concentrated. The shear and residual shear resistances of the root-soil complexes in the stubble and control *H. rhamnoides* were higher than those of plain soil; that is, the shear resistance of root-containing soil was higher than that of root-free soil. [Conclusion] Stubble rejuvenation promoted the growth of fine roots. The activities of fine roots increased the number of interactions between roots and soil, and the root-soil bonding strengthened. The shear strength of the *Hippophae rhamnoides* root-soil complex after stubble rejuvenation increased through the cementation of the fine root network and the entanglement of fine roots, which increased the stability and erosion resistance of the soil.

**Keywords:** *Hippophae rhamnoides*; stubble rejuvenation; root-soil complex; cohesion; shear strength; internal friction angle

水土流失造成的土地表层侵蚀、边坡失稳和水土损失,已经成为中国重大生态环境问题<sup>[1]</sup>。植被具有显著的水土保持功能以及这种功能所产生的生态、经济、社会效益。因此,林草植被建设作为治理水土流失与治理措施之一,是一种行之有效且长期的根本措施。植物根系的存在,能有效提升土体的稳定性及抗侵蚀能力。近年来,越来越多的学者对根系的分布特征展开深入研究。根系分布特征对土壤的稳定性和力学性质具有显著影响<sup>[2-3]</sup>。De Baets等<sup>[4]</sup>研究得出根系在土体的分布特征与土壤稳定性有密切联系。阮士航<sup>[5]</sup>通过研究4种植物的根系参数证明根系对土壤的抗蚀有明显效果。按照直径大小,根系一般可以分为细根(直径 $\leq 2$  mm)和粗根(直径 $> 2$  mm)<sup>[6]</sup>。土壤中粗根和细根的比例直接影响到根系对土壤的加固模式<sup>[7]</sup>。相同根面积比(root area ratio, RAR)条件下,与粗根相比,细根对土壤抗剪强度增加作用更显著。因此,调查研究根系分布形态特征是研究根系固土力学性能的基础。根系与周围土壤形成根土复合体,有效改善土的力学性状,提高抗侵蚀能力,治理水土流失。目前,国内外关于植物根系在土壤中的固土抗蚀、防治土壤侵蚀研究主要包括植物根系抗拉特性、根土复合体的剪切性能以及根土界面摩擦特性等方面,这也是影响根系固土作用的主要力学因素。植物根系通过在土壤中拉伸加固来增加土壤对剪切应力的抵抗力,抵消土壤对剪切力的自然敏感性<sup>[8]</sup>。有学者<sup>[9]</sup>采用直剪及三轴压缩试验测定根土复合体抗剪强度,结果表明根系对土体的剪切力有显著的增强作用,减少了土体的变形。此外,植物根系还可以通过改变土壤物理和化学性质,如土壤团聚体、黏聚力来影响土壤侵蚀,从而影响土壤侵蚀的过程<sup>[10]</sup>。

沙棘(*Hippophae rhamnoides*)是具有发达的根系,较强的萌蘖能力,固氮,肥沃土壤,抗旱耐寒,耐贫瘠,以及具有蓄水保土等多用途的灌木植物<sup>[11]</sup>。

但是,当沙棘生长到一定年限,地上植被覆盖度随着生物量的增加而增大,林地会出现病虫害,使其大面积死亡,营造林地出现退化<sup>[1]</sup>。因此,利用人为活动改善植物的生长发育逐渐成为当前研究热点<sup>[12]</sup>。平茬是林地抚育经营、维护群落稳定的重要措施<sup>[13]</sup>。平茬不仅促进植物地上部的生长发育,还显著地影响根系的生长发育、发生补偿性生长。当植物地上部分被平茬后,无顶端优势,植株的生长激素平衡发生改变,向根系的运输相对增加,并增加禾草植株的分蘖。其细根数量会增多,从而提高了根系对土壤的穿插和缠绕能力,达到固土效果。

目前,国内外对沙棘平茬的研究主要集中在平茬利用年龄、平茬方式、留茬高度以及平茬后种群的数量恢复能力、生理特征及其对土壤环境、根系生长的影响,以及从基因表达水平对其平茬萌蘖机制等诸多方面展开阐释。例如刘璐<sup>[14]</sup>通过研究平茬对沙棘根功能形状的影响,结果表明15 cm是最佳的留茬高度,即达到更新复壮的目的。有研究<sup>[15]</sup>表明柠条锦鸡儿平茬后粗根数量明显增多,其中以细根的增长最明显,较未平茬提高90%以上。还有学者<sup>[16]</sup>认为平茬对柠条植物具有一定的生态补偿作用,并对其根系生长有明显的促进作用。但是,关于灌木平茬对其根系固土抗蚀力学特性的影响研究较少。鉴于此,本文以内蒙古砒砂岩区8 a生沙棘人工林进行平茬复壮措施后的植株为研究对象,进行根系分布数量特征的调查测定和根土复合体直剪试验,并与同龄相同立地条件下未平茬复壮作为CK对照进行比较,分析其差异性,探究平茬复壮措施对根系固土作用的影响,阐明沙棘人工林平茬复壮机制,为该区域防治土壤侵蚀提供科学的理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区选定在鄂尔多斯市准格尔旗暖水乡北侧

的圪秋沟小流域,地理坐标处于 $39^{\circ}42'—39^{\circ}50'N$ , $110^{\circ}25'—110^{\circ}48'E$ ,所属气候类型为中温带半干旱大陆性季风气候区,年降雨量均值在400 mm左右,最大的年降雨量636.5 mm,最小的143.5 mm。该区降水分布不均匀,多集中于7—8月,一般为短时间内强降雨。土壤类型主要是非地带性黄绵土,与砒砂岩伴生的土壤以栗钙土、风沙区为主,土壤结构疏松,黏性差;该地区的植被类型以人工植被为主,其功能是保持水土、防止风沙侵袭,主要造林树种为沙棘、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii* Kom.)、沙枣(*Elaeagnus angustifolia*)和山杏(*Prunus sibirica*)等。平均海拔高度800~1 590 m。该小流域地形起伏大,沟壑纵横,梁峁高低不平,加之土壤侵蚀强度大,地下水资源贫乏,该区的水土流失十分严重,并存在许多中生代沉积碎屑岩。

## 1.2 标准株的选取

于2023年8月末在内蒙古鄂尔多斯市暖水乡的圪秋沟流域内选取立地条件一致的8 a生处于衰退型的沙棘人工林为研究对象,进行平茬与未平茬对照样地的设置,两种样地大小相同为 $50\text{ m}\times 50\text{ m}$ ,每种样地3个重复,平茬样地和未平茬对照样地共设置6个平行样地,位于坡度小于 $5^{\circ}$ 的西北坡。人工林株行距 $2\text{ m}\times 4\text{ m}$ ,在样地内随机选取50株植株测量其株高、冠幅、地径(最粗)等综合指标,计算得到其平均值,分别为株高 $1.68\pm 0.14\text{ m}$ ,南北冠幅 $1.45\pm 0.05\text{ m}$ ,东西冠幅 $1.42\pm 0.07\text{ m}$ ,地径(最粗) $4.56\pm 0.40\text{ cm}$ ,然后在平茬和未平茬样地内分别选择与平均值最相近的5株作为标准株挂牌进行标记,即每组5个重复,于试验前一年的11月初,进行样地的平茬处理,留茬高度15 cm。

## 1.3 根系分布特征的调查测定

根系分布特征的调查测定在标准株下进行,于2024年8月末植物生长末期,采用整株挖掘法进行根系的调查测定和采集,依据对沙棘根系分布范围预先挖掘调查的基础上,在沙棘标准株下根系集中分布土层地表以下0—60 cm、根颈处向外0—100 cm范围,进行根系的挖掘和采集,同时在根系集中分布的地表以下0—60 cm土层整修剖面,以20 cm分层,共

分3层(0—20 cm,20—40 cm,40—60 cm)进行土壤基本理化性质测定样品的取样。每层3个重复样的采集,再将9个样品的值进行平均即为该标准株下的值,最后将5株标准株得到的值进行进一步平均即为该平茬组的值,未平茬组取样方法与平茬组一致。根土复合体室内直剪试验制样用土壤的采集工作在根系分布的30 cm土层位置进行,共采集7~10 kg。

在采集沙棘根时,把标准植株根系集中分布的土层0—60 cm深,从根颈处向外0—100 cm范围内的根进行全部拣拾,根据其形态、色泽、弹性和与中柱的分离情况,对活根和死根进行鉴别,并将死根剔除,称量记录按标准株的次序进行编号,放入牛皮纸袋中,送回实验室。将所有根系依次放置在0.1 mm筛网上,清除根部黏附的土壤,再用EPSON10000XL型扫描仪对根进行扫描,用WinRHIZO根分析仪测定根的体积、根表面积、根长、根数等性状,根干重在 $80^{\circ}\text{C}$ 下进行烘干称重测定。最后将平茬和未平茬两组的5棵标准株下得到的值进行平均,即为该组所得到的根系形态数量分布值。

## 1.4 土壤基本性质的测定

试验使用 $105^{\circ}\text{C}$ 烘干法测定土壤含水率,环刀法测定容重,测定结果显示平茬处理标准株下土壤含水率为 $8.32\%\pm 0.56$ ,土壤容重测定结果为 $1.49\pm 0.03\text{ g/cm}^3$ ,未平茬处理标准株下土壤含水率为 $7.32\%\pm 0.34$ ,土壤容重测定结果为 $1.52\pm 0.06\text{ g/cm}^3$ 。即,土壤含水率表现为平茬组 $>$ 未平茬组,容重表现为:未平茬组 $>$ 平茬组。表1为直剪试验用土样基本化学性质测定结果。其中土壤有机质含量采用重铬酸钾氧化-外加加热法测定,全氮含量运用半微量开氏法检测,土壤全钾通过NaOH熔融结合火焰光度计法分析,全磷含量借助酸溶-钼锑抗比色法测定,速效氮采用碱解扩散法提取测定,速效钾运用醋酸铵浸提-火焰光度计法检测,速效磷含量则通过紫外分光光度计法进行测定。样地个养分测定结果详见表。从表1可以看出,林地土壤养分含量较低。其原因是砒砂岩区土壤本底养分贫瘠,现阶段林分改善土壤的作用不明显。

表1 样地0—60 cm土壤养分测定结果

Table 1 Soil nutrient determination results of plot at depth of 0—60 cm

单位:g/kg

项目	有机质	全氮	全磷	全钾	速氮	速磷	速钾
数值	$3.15\pm 0.09$	$0.75\pm 0.04$	$0.31\pm 0.02$	$7.55\pm 0.06$	$4.16\pm 0.03$	$4.22\pm 0.04$	$89.45\pm 4.76$

注:数据为平均值±标准误。

土壤机械组成的测定采用筛分法进行,结果详见表2。从表2可以看出,试验用土的物理性黏粒百分含

量为23.8%,对应的物理性砂粒含量为79.1%。根据卡庆斯基土壤质地分类制物理性黏粒( $<0.01\text{ mm}$ )

含量在 20%~30%, 物理性砂粒含量在 (>0.01 mm) 70%~80% 时土壤质地确定为轻壤土, 因此, 试验用土的土壤质地为轻壤土。土壤液限、塑限值采用 LP-100 型液塑限联合测定仪进行测定, 将土样混合后调至不同含水率, 测定其圆锥入土深度, 用圆锥入

土深度和对应含水率在双对数坐标上绘制线性关系图, 结果如表 2 所示。

根据中华人民共和国行业标准《土工试验规程》中土的工程分类<sup>[17]</sup>, 将研究区试验用土样进行定名, 其结果为含细粒土砂。

表 2 试验用土样塑、液限及机械组成测定结果

Table 2 Test results of plasticity limit, liquidity limit and mechanical composition of soil samples for experimentation

项目	土壤机械组成						塑限	塑性指数	液限	
	>2 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm	0.5~0.01 mm	0.01~0.075 mm				<0.075 mm
数值	1.45%	1.58%	7.29%	4.78%	63.97%	7.06%	16.73%	14.12	11.34	25.21

## 1.5 根土复合体直剪试验

### 1.5.1 试样制备

重塑根—土复合体试验用土壤含水率和干密度依据实测野外样地标准株下土壤自然含水率 8.32% 和干密度 1.49 g/cm<sup>3</sup> 测定结果进行制样。

根据试验要求的土壤含水率制备所需加水量的计算公式为

$$m_w = \frac{m}{(1 + 0.01\omega)} \times 0.01(\omega - \omega_0) \quad (1)$$

式中:  $m_w$  为土样所加水量(g);  $m$  为风干土质量(g);  $\omega_0$  为风干含水率(%);  $\omega$  为土样要求含水率(%)

干密度计算公式为

$$\rho^d = \frac{\rho}{(1 + 0.01\omega)} \quad (2)$$

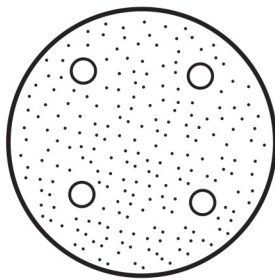
式中:  $\rho^d$  为土壤干密度(g/cm<sup>3</sup>);  $\omega$  为土壤含水率(%);  $\rho$  为土壤容重(g/cm<sup>3</sup>)。

土壤含水率计算公式为

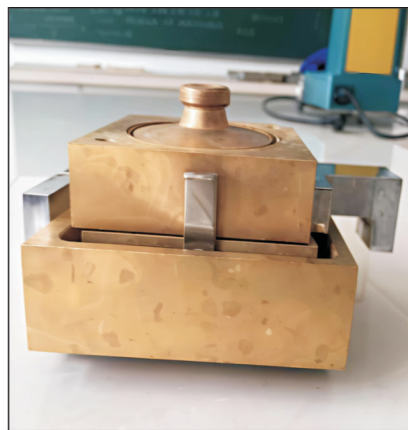
$$\omega = \frac{(m - n)}{n} \times 100\% \quad (3)$$

式中:  $\omega$  为土壤含水率(%);  $m$  为原土样的质量(g);  $n$  为烘干后土样的质量(g)。

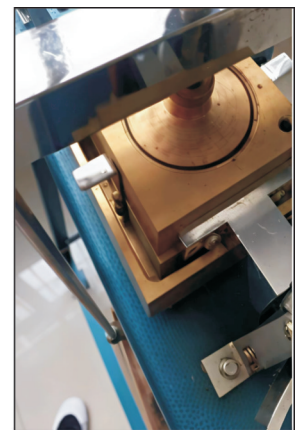
依据实测的土壤含水率值和干密度严格按照《土工试验方法标准(GB/T 50123—2019)》<sup>[17]</sup> 进行平茬和未平茬 CK 对照组重塑根土复合体及其无根系素土试样的制备(图 1)。根据环刀规格每一环刀中垂直均匀布设 4 根直根段。布设方向为垂直布设, 与剪切方向的夹角为 90°。根径的选取是依据前期研究结果, 采用沙棘代表根径级 1~1.5 mm<sup>[18]</sup>。



a 根土复合体试样横截面示意图



b 装入试样



c 施加压力

图 1 试验土样制备过程

Fig.1 Preparation process of test soil samples

### 1.5.2 试验方法及数据处理

将制备好的试样(图 1a, 1b, 1c)利用 ZJ 型四联应变控制式电动直剪仪进行直剪试验。由厂家将最大剪切位移由原先的 8 mm 增大到 14 mm。采用快剪试验(0.8 mm/min)模拟土体在降雨条件下土壤孔隙水承压土体发生位移或错动时的土体强度。每组试

验设 3 个重复, 将 3 个重复的值取平均数即为该组试验的值。在 12.5, 25, 50 和 100 kPa 的 4 个垂直压力下完成剪切试验。绘制出抗剪强度—垂直压力关系曲线, 依据摩尔-库仑定律可推出试样的抗剪强度指标及残余抗剪强度指标的数值。试验中, 上下剪切盒的接触界面发生剪切变形, 直到测力仪达到最大值,

如果最大值对应的剪切位移不超过4 mm,则继续进行剪切,直到位移达到4 mm为止;待测力传感器读数不出现峰值,则将其剪切到6 mm后停止工作。残余剪切强度的测量采用与抗剪强度试验相同的方法,将剪切位移设定在10~12 mm范围内。试验过程中利用计算机自动控制试验数据采集处理系统。数据分析采用Excel数据处理软件、Origin和SPSS 27.0数据统计分析软件制图和数据分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 沙棘根系分布数量特征对平茬复壮响应

根的数量、长度、表面积、体积等直接影响根-土界面的接触面积,从而影响植物对水分、养分的吸收效率

以及对土壤的固持性。从图2可以看出,在根径0~1.5 mm范围内,平茬处理下的根数占比为87.13%,高于未平茬处理的77.84%;平茬处理下的根长占比为87.16%,高于未平茬处理的87.13%;平茬处理下的根表面积占比为52.57%,高于未平茬处理的44.22%;平茬处理下的根干重占比为54.78%,高于未平茬处理的46.18%。经显著性检验,根数、根长、根表面积、根干重平茬组相比未平茬组均有显著差异,表明一方面沙棘平茬和未平茬下根系0~1.5 mm的细根根数、根长总体占总根的75%以上,即沙棘根系以细根分布为主,依靠其细根不断从土壤中吸收水分和养分供给地上部蒸腾作用维持正常的生命活动,这也是沙棘能够适应干旱贫瘠环境的重要原因。

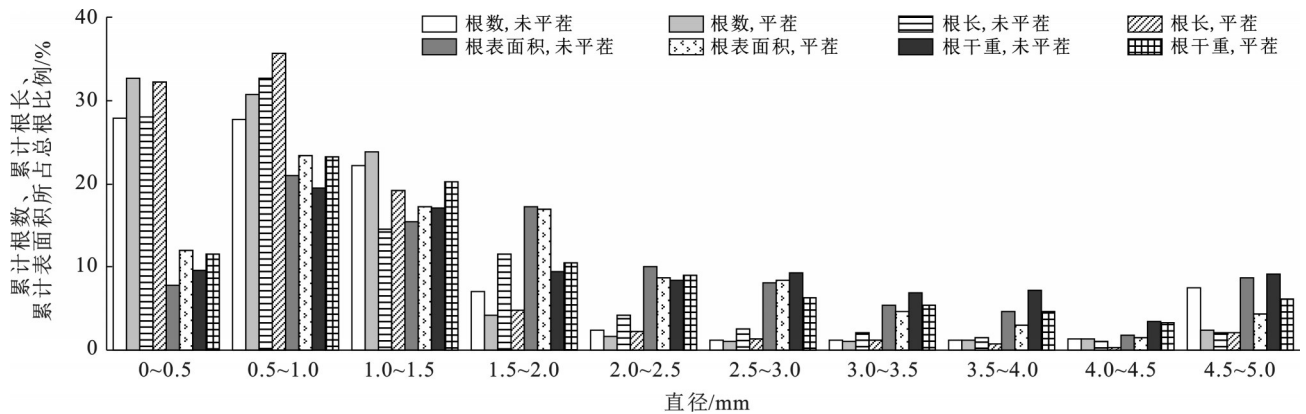


图2 累计根数、根长、根表面积所占总根比例

Fig.2 Cumulative root number, cumulative root length, and percentage of cumulative root surface area to total roots

### 2.2 平茬与未平茬沙棘根土复合体、素土与剪切位移的关系

根土复合体剪应力与剪切位移的关系如图3所示。由图3可知,素土和根土复合体的剪应力随剪切位移的变化规律,在不同荷载条件下呈现出相近的变化趋势。根土复合体、素土均表现为其剪应力随垂直荷载的增大而增大,随剪切位移的增长而增大,增长速率逐渐减小并趋于稳定。即当根土复合体发生剪切破坏时,随着剪切位移的增加在4~6 mm的区域,剪应力保持稳定,认为这时土体被剪破,此时的值即为垂直荷载下所对应的抗剪强度值。表明当土体发生剪切破坏时,根系仍能发挥作用保持土体的稳定,并保持一定的残余强度,且与摩尔库伦定律一致( $\tau = c + \sigma \tan \phi$ , 式中: $c$ 为土体黏聚力(或残余黏聚力), $\tau$ 为法向应力(kpa), $\phi$ 为界面摩擦角( $^{\circ}$ ))。残余强度的剪应力—剪切位移与抗剪强度规律一致不再赘述。

### 2.3 平茬与未平茬沙棘根土复合体、素土的抗剪特征

线性拟合分析结果表明随着垂直荷载的增加沙

棘根土复合体以及素土的抗剪强度和残余抗剪强度呈增大趋势,并且二者呈线性正相关,相关系数都在0.98以上,说明利用直线回归来拟合二者的关系效果较好,这与库伦强度公式 $\tau = c + \sigma \tan \phi$ 一致(式中 $c$ 为土体黏聚力(或残余黏聚力), $\sigma$ 为法向应力(kPa), $\phi$ 为界面摩擦角( $^{\circ}$ ))。证明素土及其根土复合体的剪切关系满足土力学中的摩尔-库伦强度的判据,据此计算出根土复合体的黏聚力、残余黏聚力、内摩擦角、残余内摩擦角等参数。

由图4—5可以看出,在垂直荷载为12.5 kPa下抗剪强度间相比较,平茬( $18.81 \pm 1.16$  kPa) > 未平茬( $14.25 \pm 1.14$  kPa) > 素土( $12.21 \pm 0.89$ ) kPa ( $p < 0.05$ ),平茬沙棘根土复合体抗剪强度值相比于素土增长了55%,未平茬沙棘根土复合体抗剪强度相比于素土增长了17%,平茬较未平茬增长了32%。在25 kPa时的抗剪强度,平茬( $35.32 \pm 2.87$  kPa) > 未平茬( $31.22 \pm 2.66$  kPa) > 素土( $28.67 \pm 2.34$  kPa) ( $p < 0.05$ ),平茬沙棘根土复合体的抗剪强度值相比于素土增长了23%,未平茬沙棘根土复合体的抗剪强

度值相比于素土增长了 9%，平茬较未平茬增长了 13.10%。平茬的黏聚力 > 未平茬的黏聚力 > 素土的黏聚力 ( $p < 0.05$ )，平茬根土复合体黏聚力相比于素土增长了 140.63%，未平茬根土复合体黏聚力相比于素土增长了 49.33%。平茬较未平茬增长了 61.14%。平茬的内摩擦角 > 未平茬内摩擦角 > 素土的内摩擦角 ( $p < 0.05$ )。平茬根土复合体内摩擦角相比于素土增长了 20%，未平茬根土复合体内摩擦角相比于素土增长了 2%，平茬较未平茬增长了 18%。以上结果表明抗剪强度、黏聚力、内摩擦角的变化规律均为平茬大于未平茬；根土复合体的值均大于素土的值。上述研究结果证明根系的加入提高了土体的抗剪强度。从黏聚力和内摩擦角增长率大小来看，黏聚力的增长率明显大于内摩擦角的增长率，说明根土复合体和素土抗剪强度的提高黏聚力和摩擦力共同发挥作用，且黏聚力的作用大于摩擦力的作用。分析原因并结合图 2 的结果可知，根径 0~1.5 mm 的根数相比较平茬的 87.13% > 未平茬 77.84%；根长相比较平茬的 87.16% > 未平茬 87.13%；根表面积相比较平茬的

52.57% > 未平茬 44.22%；根干重相比较平茬的 54.78% > 未平茬 46.18%，即平茬促进了细根的生长，细根旺盛的生命活动表现为从环境中摄取水分与养分的同时，也向其周围土壤中不断分泌有机酸、糖类、酚类等物质，这些分泌物可充当胶结物质。例如，糖类分子可借助氢键、范德华力等作用力，对土壤颗粒进行吸附与黏结，从而推动微团聚体的形成；而有机酸则能对土壤的酸碱环境起到调节作用，对矿物质的溶解和沉淀产生影响，有利于土壤颗粒的团聚。根系分泌物还能对根系微生物的活动起到刺激作用，微生物在代谢过程中所产生的多糖、胞外聚合物等物质，能够进一步增强土壤颗粒之间的胶结作用，提高团聚体的稳定性。简而言之，细根通过“自身网络的胶结缠绕、分泌物对颗粒团聚的介导以及激发微生物的促团聚效应”等多种途径，加强根与土之间的相互作用，进而使根土复合体的黏聚力得以增大。正是依靠细根的这一系列作用，沙棘能够增大根土复合体的抗剪强度，提升土体的稳定性以及抗侵蚀能力。

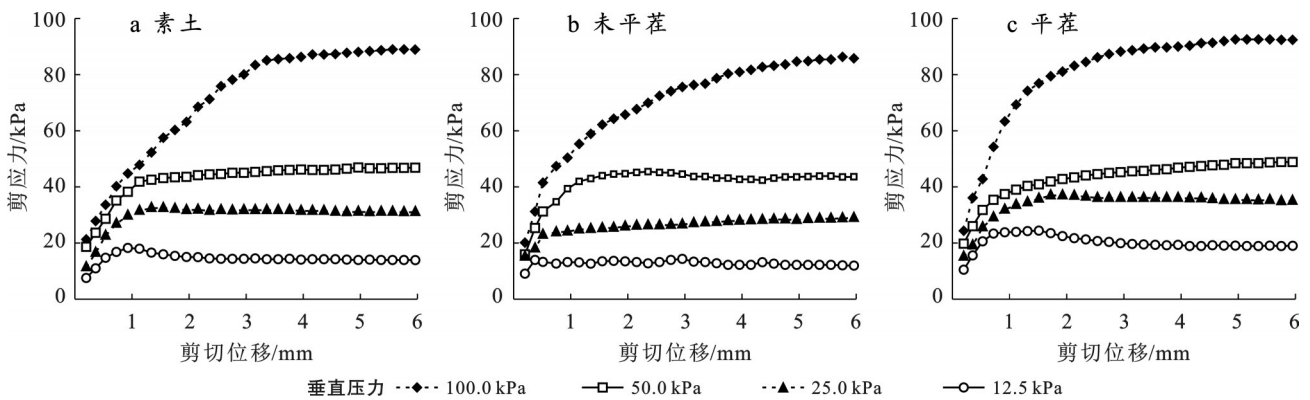
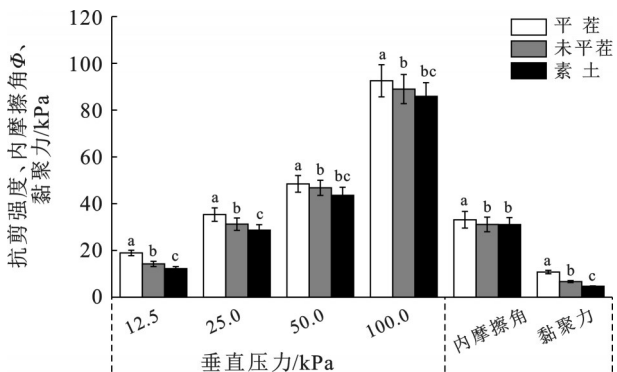


图 3 根土复合体剪应力与剪切位移的关系

Fig.3 Relationship between shear stress and shear displacement in root-soil composite system



注：相同字母表示差异性不显著 ( $\alpha = 0.05$ )，字母不同则表示差异性显著 ( $p < 0.05$ )。下同。

图 4 平茬与未平茬沙棘根土复合体、素土抗剪强度指标比较

Fig.4 Comparison of shear resistance of common and uncultivated *Hippophae rhamnoides* root-soil complex and plain soil

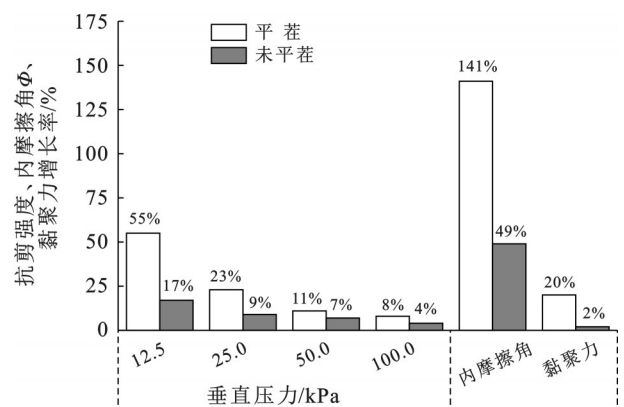


图 5 平茬与未平茬根土复合体抗剪强度及其强度指标相对于素土的增长率

Fig.5 Shear strength of plain stubble and unplowed root-soil complex, and growth rate of strength index relative to plain soil

由图6—7可知,12.5 kPa条件下林地沙棘根土复合体残余抗剪强度表现为:平茬>未平茬>素土,平茬沙棘根土复合体残余抗剪强度值与素土比较增长了49%,未平茬根土复合体残余抗剪强度与素土比较增长了16%,平茬与未平茬比较增长了28.80%。在25 kPa条件下残余抗剪强度表现为:平茬>未平茬>素土,平茬沙棘根土复合体的残余抗剪强度值与素土比较增长了21%,未平茬沙棘根土复合体的残余抗剪强度值与素土比较增长了10%,平茬与未平茬比较增长了11%。

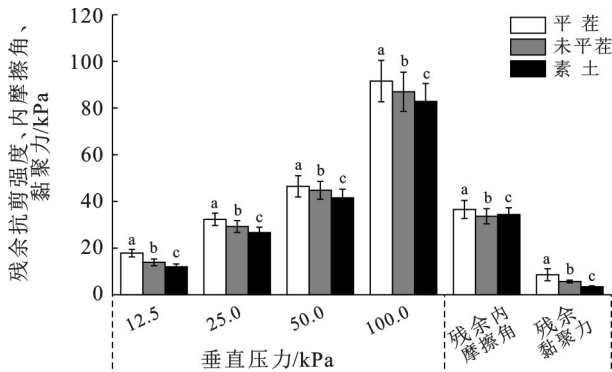


图6 平茬与未平茬沙棘根土复合体、素土残余抗剪特性比较  
Fig.6 Comparison of shear resistance of plain and unstubbed *Hippophae rhamnoides* root-soil complex and residual plain soil

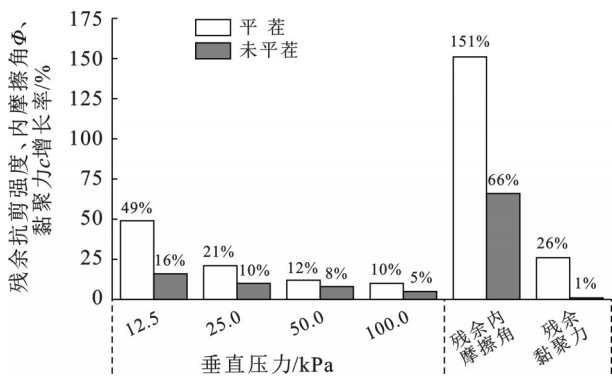


图7 平茬与未平茬沙棘根土复合体残余抗剪强度及其残余强度指标相对于素土的增长率

Fig.7 Residual shear strength and growth rate of residual strength index of *Hippophae rhamnoides* root-soil complex with flat and unflat stubs relative to plain soil

残余黏聚力间相比较表现为:平茬>未平茬>素土;平茬沙棘根土复合体残余黏聚力相比于素土增长了150.62%,未平茬沙棘根土复合体残余黏聚力相比于素土增长了66.37%,平茬与未平茬相比较残余黏聚力增长了50.64%。平茬的残余内摩擦角(48.08°±3.87)>未平茬的残余内摩擦角(38.29°±3.23)>素土的残余内摩擦角(38.01°±2.87)。平茬沙棘根土复合体残余内摩擦角相比于素土增长了

26.49%,而未平茬沙棘根土复合体残余内摩擦角相比于素土增长了0.73%,平茬与未平茬相比较残余内摩擦角增长了25.57%。以上结果显示残余抗剪特性的变化规律与抗剪特性的变化规律一致,均表现为平茬下的残余抗剪强度、残余黏聚力、残余内摩擦角的值分别大于未平茬下的值,且根土复合体的值大于素土的值。

### 3 讨论

#### 3.1 平茬对根土复合体抗剪强度的影响

根土复合体直剪试验研究结果显示,平茬下沙棘根土复合体抗剪特性和残余抗剪特性均优于未平茬下的值,且无论平茬与否沙棘根土复合体的抗剪特性、残余抗剪特性均优于素土。这表明一方面根系的加入提高了土体的抗剪、残余抗剪力学特性,另一方面对于衰退型沙棘林实施平茬复壮措施促进了林地土壤抗剪力学性能的提高。结合本文根系分布特征的研究结果分析原因,即平茬的沙棘标准株根系0~1.5 mm径级的根数、根长、根表面积、根干重较对照组显著增加,这些细根通过根网络缠绕等,增大沙棘根土复合体的抗剪强度,提升土体的稳定性及抗侵蚀能力。张金池等<sup>[19]</sup>的研究成果,根径≤2 mm的细根表现出显著的固土功能;Baker<sup>[20]</sup>的研究表明随着单位土体中根的数量(或根的体积、根表面积比)的增加,土体的抗剪强度越来越高;Jin Hui Fang等<sup>[21]</sup>研究发现0—2 mm直径的根是0—40 cm土层最多的根,增加了与土壤颗粒的接触面积,以此增加摩擦力,达到抗剪强度增加的效果;Hu等<sup>[22]</sup>开展了根土复合体试样的直接剪切与三轴压缩试验,指出植物根-土复合体中根系可贡献附加黏聚力 $\Delta c$ ,上述研究结论皆与本文的结论是一致的。也就是说细根旺盛的生命活动加强了根-土间相互作用,根-土间黏结作用增强,土壤团聚作用提高,使根土复合体黏聚力增大。另外温健<sup>[23]</sup>的研究也发现,平茬处理能明显提高柠条的根系活力和各项生理指标。表明平茬促进了细根的活力,细根的生长一方面吸收外界水分和营养的同时,还会持续地在土壤中分泌很多有机化合物,如有机酸、糖类、酚类等,它们又给根际微生物提供了物质、能量和营养,改变了土壤微生物的活性和生态分布,使根际效应得以产生,进而加强根-土间相互作用,根土黏结性能改善,通过根系网,促进土体的稳定性及抗侵蚀能力。关于这一点今后还需结合平茬后对于根际微域的作用进行进一步研究。

#### 3.2 平茬驱动根系变化与抗剪性能提升的内在关联

平茬处理引发沙棘根系发生显著变化,主要表

现为细根数量激增、根系活力与抗逆能力显著提升,这一现象可归因于植物生长的“补偿效应”。其他研究者<sup>[23-24]</sup>也表明平茬后促进植物根系的生长,其中细根数量明显增加。郭月峰等<sup>[11]</sup>关于沙棘平茬复壮研究证明,在砒砂岩区气候干旱降水量少时,沙棘会将更多的资源用于根系的生长。在平茬后地上部分生长对营养的需求降低,使沙棘把更多的养分给根系,促进了根系生物量的增长<sup>[25]</sup>和细根数量的增加。杨柳等<sup>[26]</sup>研究得出不同高度平茬处理后,文冠果的形态特征与未平茬相比均显著增加。张志强等<sup>[27]</sup>表明平茬能有效增加柠条的细根总根长,这与本文的结果一致。另据郭月峰等<sup>[28]</sup>通过平茬对砒砂岩区沙棘细根生长特征的影响,其研究结果指出,平茬能提高沙棘植株的生长速率、死亡率,即根系的周转作用增强。Bengough 等<sup>[29]</sup>和郭维俊等<sup>[30]</sup>从理论上论述根土复合体的力学性质和本构关系,提出根土复合体的强度除受土、根材料性质、组织结构等因素影响外,还受复合体中根含量的影响,也间接证明了本文的结论。

根系变化与根土复合体抗剪性能提升间存在紧密因果联系。平茬后细根数量的增加与活力的提升,为根土复合体抗剪强度的提高奠定基础。细根通过更广泛的网络胶结、更活跃的根际效应,持续优化根土黏结性能,最终实现土体稳定性与抗侵蚀能力的增强。这也解释了为何平茬后的沙棘林根土复合体抗剪力性能显著优于未平茬状态。未来研究可聚焦平茬对根际微域的动态影响,进一步明晰平茬提升根土复合体性能的完整作用路径。

## 4 结论

(1) 沙棘标准株根系0~1.5 mm径级的根数、根长、根表面积、根干重分别为87.13%,87.16%,52.57%,54.78%,均大于未平茬对照组,表明平茬促进了细根的生长。

(2) 根土复合体抗剪强度、残余抗剪强度平茬较未平茬分别增长了4.08%和28.80%。黏聚力和残余黏聚力平茬较未平茬分别增长了8.25%和50.64%。内摩擦角和残余内摩擦角平茬较未平茬分别增长了18%和25.57%。这表明沙棘根土复合体抗剪力性能平茬优于未平茬下的林地,平茬复壮措施使沙棘根土复合体的抗剪强度提高,促进根系固土力学作用的增强。

## 参考文献(References)

[1] 兰建,冯伟风,蒋林威,等.砒砂岩区人工林的研究现状[J].河南建材,2017(5):75-77.

- Lan Jian, Feng Weifeng, Jiang Linwei, et al. Research status of artificial forests in the Pisha sandstone area [J]. Henan Building Materials, 2017(5):75-77.
- [2] 聂晖,李翀,张金池,等.保水剂添加对刺槐根土力学特性的影响[J].安徽农业大学学报,2022,49(5):707-715.
- Nie Hui, Li Chong, Zhang Jinchi, et al. Effects of water retaining agent on root soil mechanical properties of *Robinia pseudoacacia* [J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2022,49(5):707-715.
- [3] Masi E B, Segoni S, Tofani V. Root reinforcement in slope stability models: A review [J]. Geosciences, 2021,11(5):212.
- [4] De Baets S, Poesen J, Knapen A, et al. Root characteristics of representative Mediterranean plant species and their erosion-reducing potential during concentrated runoff [J]. Plant and Soil, 2007,294(1):169-183.
- [5] 阮仕航.不同护坡草种根系分布特征及根土复合体力学性质研究[D].贵州 贵阳:贵州大学,2023.
- Ruan Shihang. Study on root distribution characteristics and mechanical properties of root-soil composites of different slope-protecting grass species [D]. Guiyang, Guizhou: Guizhou University, 2023.
- [6] 蒋静,张超波,张雪彪,等.土壤水分对植物根系固土力学性能的影响综述[J].中国农学通报,2015,31(11):253-261.
- Jiang Jing, Zhang Chaobo, Zhang Xuebiao, et al. Review on the effects of soil moisture on mechanical properties of soil reinforcement by plant roots [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015,31(11):253-261.
- [7] Schwarz M, Lehmann P, Or D. Quantifying lateral root reinforcement in steep slopes—from a bundle of roots to tree stands [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2010,35(3):354-367.
- [8] Rossi R, Picuno P, Fagnano M, et al. Soil reinforcement potential of cultivated cardoon (*Cynara cardunculus* L.): First data of root tensile strength and density [J]. Catena, 2022,211:106016.
- [9] Dumlaio M R, Ramanarivo S, Goyal V, et al. The role of root development of *Avena fatua* in conferring soil strength [J]. American Journal of Botany, 2015,102(7):1050-1060.
- [10] Wang Jianfang, Yang Yanfen, Wang Bing, et al. Soil detachment caused by flowing water erosion in six typical herbaceous plant root systems on the Loess Plateau, China [J]. Biosystems Engineering, 2022,217:56-67.
- [11] 郭月峰,卜繁靖,祁伟,等.内蒙古砒砂岩区沙棘生理特征对平茬的响应[J].扬州大学学报(农业与生命科学版),2021,42(2):129-134.
- Guo Yuefeng, Bu Fanjing, Qi Wei, et al. Response of the physiological characteristics of *Hippophae rhamnoides*

- in the arsenic sandstone area of Inner Mongolia to stumping [J]. Journal of Yangzhou University (Agricultural and Life Science Edition), 2021, 42(2): 129-134.
- [12] 刘晓宇, 郭月峰, 姚云峰, 等. 砒砂岩区不同留茬高度及坡向下沙棘根系分形特征[J]. 生态环境学报, 2021, 30(1): 100-107.
- Liu Xiaoyu, Guo Yuefeng, Yao Yunfeng, et al. Fractal features of *Hippophae rhamnoides* roots under different stubble height and slopes in soft sandstone area [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2021, 30(1): 100-107.
- [13] 吴秀花, 魏春光, 特木钦, 等. 固沙灌木平茬现状及平茬控制钻蛀性害虫探讨[J]. 中国森林病虫, 2015, 34(6): 38-43.
- Wu Xiuhua, Wei Chunguang, Te Muqin, et al. Status quo of stumping of sand-fixing shrubs and discussion on trunk borer control by stumping [J]. Forest Pest and Disease, 2015, 34(6): 38-43.
- [14] 刘璐. 平茬对砒砂岩区沙棘叶根功能性状及土壤理化性质的影响[D]. 内蒙古自治区呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023.
- Liu Lu. Effects of stumping on leaf and root functional traits and soil physicochemical properties of *Hippophae rhamnoides* in feldspathic sandstone area [D]. Hohhot, Inner Mongolia: Inner Mongolia Agricultural University, 2023.
- [15] 刘思禹, 姚云峰, 郭月峰, 等. 不同坡位对柠条锦鸡儿根系特性及游离氨基酸含量的影响[J]. 中国农业科技导报, 2017, 19(6): 111-116.
- Liu Siyu, Yao Yunfeng, Guo Yuefeng, et al. Effects of different slope position on *Caragana korshinskii* kom root characteristics and free amino acid content [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2017, 19(6): 111-116.
- [16] Guo Yuefeng, Qi Wei. Correlations between roots of *Caragana korshinskii* and soil moisture after stumping [J]. Ekoloji, 2018, 27: 9-20.
- [17] 南京水利科学研究所, 《土工试验规程》[S] SL237-1999, 南京: 辽宁民族出版社, 1999.
- Nanjing Hydraulic Research Institute. Geotechnical Test Procedures: SL237-1999 [S]. Shenyang: Liaoning Nationalities Publishing House, 1999.
- [18] 马红燕, 格日乐, 赵杏花, 等. 2种水土保持灌木的根系数量特征研究[J]. 水土保持通报, 2013, 33(2): 165-168.
- Ma Hongyan, Ge Rile, Zhao Xinghua, et al. Quantity characteristics of root system of two shrubs for soil and water conservation in waste dump [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013, 33(2): 165-168.
- [19] 张金池, 康立新, 卢义山, 等. 苏北海堤林带树木根系固土功能研究[J]. 水土保持学报, 1994, 8(2): 43-47.
- Zhang Jinchi, Kang Lixin, Lu Yishan, et al. A study on the root system conserving soil action of tree belt on the seawall in northern Jiangsu Province [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1994, 8(2): 43-47.
- [20] Baker D H. Enhancement of slope stability by vegetation [J]. Ground Engineering, 1986, 19(3): 11.
- [21] Jin Huiyang, Shi Dongmei, Zeng Xiaoying, et al. Mechanisms of root-soil reinforcement in bio-embankments of sloping farmland in the purple hilly area, China [J]. Journal of Mountain Science, 2019, 16(10): 2285-2298.
- [22] 于文涛. 平茬措施对柠条生理特征及土壤理化性质的影响[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- Yu Wentao. Effect of pruning measure on physiology character and soil physicochemical properties *Caragana korshinskii* [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2016.
- [23] 温健. 平茬措施对柠条锦鸡儿细根生长及生理特征的影响[D]. 内蒙古自治区呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018.
- Wen Jian. Study on the growth and physiological characteristics of fine root of *Caragana korshinskii* Kom. by flat stubble measures [D]. Hohhot, Inner Mongolia: Inner Mongolia Agricultural University, 2018.
- [24] 王鑫. 砒砂岩区不同平茬模式对沙棘生长和生理特征的影响研究[D]. 内蒙古自治区呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2022.
- Wang Xin. Research on the effects of different flat crop patterns on the growth and physiological characteristics of *Hippophae rhamnoides* in the feldspathic sandstone area [D]. Hohhot, Inner Mongolia: Inner Mongolia Agricultural University, 2022.
- [25] Zhao Wei, Chen Shiping, Lin Guanghui. Compensatory growth responses to clipping defoliation in *Leymus chinensis* (Poaceae) under nutrient addition and water deficiency conditions [J]. Plant Ecology, 2008, 196(1): 85-99.
- [26] 杨柳, 李思琪, 付庆新, 等. 文冠果生长及光合特性对平茬高度的响应[J]. 经济林研究, 2025, 43(2): 43-51.
- Yang Liu, Li Siqi, Fu Qingxin, et al. Response of growth and photosynthetic characteristics of *Xanthoceras sorbifolium* to plain stubble height [J]. Non-wood Forest Research, 2025, 43(2): 43-51.
- [27] 张志强, 郭月峰, 祁伟, 等. 不同平茬模式对柠条细根构型及土壤养分的影响[J]. 华中农业大学学报, 2024, 43(6): 210-218.
- Zhang Zhiqiang, Guo Yuefeng, Qi Wei, et al. Effects of stumping modes on configuration of fine root and nutrients in soil of *Caragana korshinskii* [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2024, 43(6): 210-218.