

崔天民, 格日乐, 毅勃勒, 等. 沙棘根系固土力学特性对其平茬复壮的影响[J]. 华中农业大学学报, 2024, 43(1): 108-114.
DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2024.01.012

沙棘根系固土力学特性对其平茬复壮的影响

崔天民, 格日乐, 毅勃勒, 查力干

内蒙古农业大学沙漠治理学院, 呼和浩特 010018

摘要 为考察平茬措施对根系力学特性的影响, 以内蒙古干旱半干旱地区水土保持先锋灌木沙棘(*Hippophae rhamnoides*)根系为研究对象, 使用TY-8000拉力机, 进行单根极限拉伸试验和根土界面拉拔摩擦阻试验, 并分析平茬对沙棘根系固土力学特性的影响。试验结果显示, 在测试根径为0~5 mm时, 平茬和未平茬条件下, 沙棘单根极限抗拉力、抗阻拉力均与直径呈幂函数正相关; 单根极限抗拉强度、根-土界面拉拔抗剪强度均与直径呈幂函数负相关。在代表根径级0.5~1.5 mm, 沙棘平茬较未平茬平均单根极限抗拉力值提高31%; 平均单根极限抗拉强度提高37%; 平均拉拔抗剪强度提高30%。研究结果表明, 直径对沙棘根系抗拉强度和抗剪强度均有影响, 且沙棘经平茬处理后, 抗拉特性和抗剪特性均有所提高。

关键词 沙棘; 根系; 抗拉; 摩擦特性; 抗剪强度; 平茬; 水土保持; 生物力学

中图分类号 S157.1 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2024)01-0108-07

水土流失是目前世界上最重要的土地退化问题之一^[1]。砒砂岩岩层薄, 沙粒之间的黏结度低, 成岩程度差, 岩石结构不稳定, 当受到自然和人文外力时, 极易发生剥蚀^[2]。黄河流域的山西、陕西、内蒙古三省(自治区)交界地区分布着大量的砒砂岩, 该地区不仅是黄土高原水土流失最严重的地区之一, 同时也是最难治理的区域之一。植物措施是防治水土流失的重要手段。沙棘(*Hippophae rhamnoides*)是半干旱地区水土保持的经济林种, 具有根系发达、萌发力强的特点, 对当地环境起到固氮肥土的作用, 并且经济价值高。沙棘对立地条件要求并不严格, 它可以耐旱、耐寒、耐瘠薄, 在山顶和沟谷等地均可生长良好, 即使是70°的陡坡地也可以存活^[3]。沙棘具有突出的防洪防沙效果, 可改善种植地区的生态环境^[4], 因此, 沙棘已经被普遍使用在水土保持和治理砒砂岩等领域。随沙棘生长以及地上植被盖度的增大, 其生物量也会增加。如果该区域长时间干旱, 沙棘易遭遇木蠹蛾病虫害, 导致大规模死亡。沙棘由于缺水导致抵抗病虫害能力低下, 再加上树种单一、管理不善等原因, 营造林地就会出现退化现象。

平茬是伐除植株地上部分以促使新枝萌发的一

种营林措施, 通过平茬可以有效地维持灌木林的生态和经济效益。灌木平茬不但可以获得大量的燃料和饲料, 而且还能够促进根系萌蘖, 从而达到更新、复壮的目的^[5]。适时对灌木进行平茬, 不仅能延缓灌木林的自然衰退, 还能增强抵抗病虫害的能力^[6]。在沙棘林抚育管理和种群稳定性恢复中, 平茬已经成为最重要的手段之一。目前, 国内外关于灌木平茬的研究报道较多, 主要集中在平茬年龄、平茬时间和平茬高度, 以及平茬后对其周围生长环境、生理特征及病虫害的影响等方面^[7-8]。关于沙棘平茬后对其根系固土抗蚀作用的影响鲜见报道。随着植物措施在土壤侵蚀防治和水土流失治理方面的广泛运用, 根系固土抗蚀作用已经成为当前环境治理领域研究的热点之一。在植物根系固土抗蚀和防治水土流失的作用方面, 国内外很多专家学者进行了大量研究, 其中包括植物根系的极限抗拉特性^[9]、根-土界面摩擦阻特性^[10]、根-土复合体抗剪特性^[11]等, 这都是影响根系发挥固土作用的主要力学因素。但有关平茬后根系力学特性方面研究较少。

本研究以内蒙古砒砂岩区典型水土保持先锋树种沙棘根系为对象, 进行单根极限拉伸试验和根土界面拉拔摩擦阻试验, 分析平茬复壮措施对沙棘根系

收稿日期: 2022-07-04

基金项目: 内蒙古自然科学基金项目(2021MS04011); 国家自然科学基金项目(41867011)

崔天民, E-mail: cuitianmin1997@126.com

通信作者: 格日乐, E-mail: gerile197081@126.com

抗拉力学特性和根土界面摩阻特性的影响,进一步从力学方面探究平茬对沙棘生长的影响,以期对沙棘人工灌木林的可持续经营和管理提供理论支撑。

1 材料与方 法

1.1 平茬复壮处理

试验地点位于内蒙古鄂尔多斯市准格尔旗暖水乡,该地受季风影响,冬季寒冷漫长。试验于2021年8月下旬进行,选择10 a生人工沙棘林进行根系的挖掘和采样。平茬样地内沙棘株行距为2 m。试验前一年的2020年8月下旬,在待平茬样地内随机选择40株植株测量其株高、冠幅、地径(最粗)等指标,计算其平均值,测量结果显示,待平茬样地沙棘株高(95.0±6.7) cm、南北冠幅(105.0±7.2) cm、东西冠幅(123.0±11.3) cm、地径(5.21±0.70) cm。根据平均值找出与平均值最接近的8株植株作为标准株(丛)进行标记,其中4株进行全面平茬,留茬高度为10 cm,另外4株不进行平茬处理,待翌年进行根系的挖掘和取样。

1.2 根系挖掘和采样

挖掘根系时,以标准株为中心,在半径为2 m的圆圈内采用由外向内方法进行收缩式挖掘,当露出根系时立即停止挖掘,采用便携式小铲顺着根系走向轻轻挖掘,待根系裸露长度和根径达到测试要求的长度和直径时停止挖掘,再用毛刷刷去根表面粘连土体。挖掘过程中每隔3~5 min喷1次水,尽量使露出根周围保持湿润。所需根系采集完后,放入黑色塑料袋覆土、喷水,防止根系失水。将待测根系带回实验室,放入4℃恒温箱保存,并尽快完成试验以保证根系的鲜活状态。根系挖掘采集的同时在标准植株下修整土壤剖面,并在根系集中分布土层内收集土壤样品,选取10个样品测定土壤干密度和自然含水率,取平均值,试验样品的干密度和含水率依据上述方法进行制作。另取5~8 kg根系集中分布土层内的土壤带回实验室用于根-土复合体重塑土样的制备,确保尽可能地还原根系生长状况。

1.3 试样制备

单根极限拉伸试样制备:将取得的根系以0.5 mm为1个间隔进行分级装袋,分为10个级别,具体见表1,其中径级0~0.5和0.5~1.0分别表示 $0.0\text{ mm} \leq d < 0.5\text{ mm}$ 和 $0.5\text{ mm} \leq d < 1.0\text{ mm}$,其他以此类推。试样选择表皮完整、弯曲度小且笔直的根段采集完成,拉伸根段为60 mm。试验前,在60 mm根段上做5个

标记,分成4等份。然后用游标卡尺依次量取5个标记点的直径,每个点上需要正交方向各测量1次,取其平均值分别作为该点直径,最后将根系放入密封袋中,并按根径等级依次分开,贴上标签。

根-土复合体重塑土样制备的PVC圆柱状塑料管,直径为6 cm,长度为8 cm。先在PVC管内盛满土样,然后在塑料管横向中心处开通1个直径约1 cm的圆孔,圆孔用于固定穿插根系。将植物根系插入圆孔后,继续加载土壤样品,并用相同的力交替敲打PVC管的两端,使得根土紧密接触,直至达到试验所需土体密度。

用烘干法测得的原状土含水率为6.35%,用环刀法测得的干密度为1.52 g/cm³,过孔径2 mm筛风干土壤后备用。制备重塑土所需风干土质量和所需加水量公式如式(1)~(3)所示^[12]。

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + 0.01\omega} \quad (1)$$

式(1)中: ρ_d 为试验土干密度,g/cm³; ω 为土壤含水率,%; ρ 为土壤密度,g/cm³。

$$m = (1 + 0.01\omega_0)V\rho_d \quad (2)$$

式(2)中: m 为所需风干土质量,g; ω_0 为风干土含水率,%; V 为风干土体积,cm³。

$$m_s = \frac{m}{1 + 0.01\omega_0} \times (\omega - \omega_0) \quad (3)$$

式(3)中: m_s 为试样所加水的质量,g; m 为试样所需风干土质量,g; ω_0 为风干土含水率,%; ω 为土壤的自然含水率,%。

1.4 试验方法

单根极限拉伸试验和根土界面拉拔摩阻特性试验仪器均为TY-8000伺服式力学实验机。实验机夹具距离为60 mm,加载速度为150 mm/min。由于植物根系直径沿轴向变化,在计算单个根系的极限抗拉强度时,取断裂点处的根径作为直径代入公式计算。试验时在根段中心处发生断裂的数据视为有效,在两端发生断裂的数据视为无效。

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

式(4)中: P 为单根极限抗拉强度,MPa; F 为单根极限抗拉力,N; D 为根系断裂处直径,mm。

在进行根-土复合体的单根拉拔试验必须假定根被拔动时,根土界面摩擦应力是均匀分布的;并且根土界面处拉拔剪应力与摩擦应力相同,合力为零,即:

$$\tau\pi dl - F = 0 \quad (5)$$

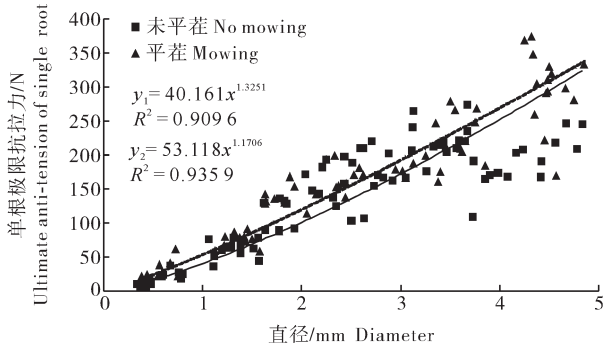
式(5)中: τ 为根-土界面拉拔剪应力,kPa; d 为根

系的平均直径, m ; l 为根系在土中的长度, m ; F 为根被拔出时的最大拉拔阻力, kN ^[13]。依据上式变换得: $\tau = F/\pi dl$ 。

2 结果与分析

2.1 沙棘单根的极限抗拉力和抗拉强度

由图1可知,测试根径为0~5.0 mm时,沙棘单根在未平茬和平茬条件下,极限抗拉力均随直径的增长而增大,且呈幂函数正相关。沙棘代表根径一般为0.5~1.5 mm^[14]。测试根径0~5.0 mm时,未平茬和平茬条件下沙棘单根极限抗拉力分别为5.62~273.72、10.92~373.66 N。在代表根径为0.5~1.5 mm时,未平茬和平茬条件下沙棘单根极限抗拉力分别为17.67~78.45、20.94~90.71 N。



y_1 和 y_2 分别代表未平茬和平茬,下同。 y_1 和 y_2 represent no mowing and mowing, respectively. The same as below.

图1 沙棘单根极限抗拉力与直径关系

Fig.1 Ultimate anti-tension of a single *Hippophae rhamnoides* root with diameter

由表1可知:未平茬和平茬条件下沙棘单根平均极限抗拉力在各径级间均存在显著性差异($P < 0.05$)。同一径级下,除0~0.5、2.0~3.5 mm径级外,未平茬和平茬沙棘单根极限抗拉力差异不明显($P > 0.05$),其余径级下,均存在显著差异。在测试根径为0~5 mm时,平茬和未平茬条件下沙棘单根极限抗拉力均值分别为160.42、137.44 N,平茬值较未平茬值提高17%。代表根径为0.5~1.5 mm时,平茬和未平茬条件下沙棘单根极限抗拉力均值分别为56.67、43.35 N,平茬较未平茬提高31%。

由图2可知,在测试根径为0~5.0 mm时,沙棘单根极限抗拉强度在未平茬和平茬2种条件下均随直径的增长而减小,且二者呈幂函数负相关。另外,在测试径级为0~5.0 mm时,未平茬和平茬条件下沙棘单根极限抗拉强度分别是10.03~106.30、10.33~183.33 MPa。在代表根径为0.5~1.5 mm时,未平

表1 不同径级的沙棘单根极限抗拉力

Table 1 Ultimate anti-tension of single *Hippophae rhamnoides* root under different diameter classes N

径级/mm Diameter class	未平茬 No mowing	平茬 Mowing
0~0.5	11.15Aa	16.47Aa
0.5~1.0	25.41Ba	36.32Bb
1.0~1.5	61.29Ca	77.01Cb
1.5~2.0	97.87Da	125.77Db
2.0~2.5	155.83Ea	156.02Ea
2.5~3.0	179.31Fa	174.99Fa
3.0~3.5	211.66Ia	199.92Ga
3.5~4.0	196.94Ha	228.20Hb
4.0~4.5	187.62Ga	309.76Jb
4.5~5.0	247.32Ja	279.78Ib

注:大写字母表示相同处理下不同径级之间的差异性;小写字母表示相同径级下平茬与未平茬之间的差异性, $P < 0.05$, 下同。Note: Capital letters represent the difference between different diameter classes under the same treatment; small letters represent the difference between mowing and non mowing under the same diameter class ($P < 0.05$), the same as below.

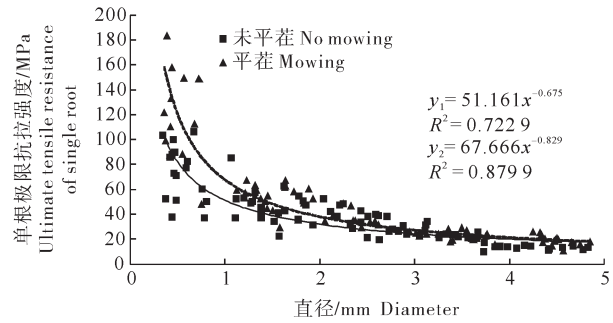


图2 平茬和未平茬沙棘单根极限抗拉强度与直径关系

Fig.2 Ultimate tensile resistance of single *Hippophae rhamnoides* root with diameter between mowing and no mowing

茬和平茬条件下沙棘单根极限抗拉强度大小分别是36.00~106.30、42.85~149.31 MPa。

由表2可知,在未平茬条件下,除1.5~2.0与2.0~2.5 mm、4.0~4.5与4.5~5.0 mm沙棘单根极限抗拉强度均值差异不显著($P > 0.05$),其余各径级间均存在显著差异($P < 0.05$);在平茬条件下,除1.0~1.5与1.5~2.0 mm、3.0~3.5与3.5~4.0、4.0~4.5 mm沙棘单根极限抗拉强度均值差异不显著,其余各径级间均存在显著性差异。同一径级下,除径级0~0.5、0.5~1.0、1.5~2.0 mm,未平茬和平茬沙棘单根极限平均抗拉强度存在显著差异外,其余径级下,未平茬和平茬差异不明显($P > 0.05$)。在测试根径为0~5.0 mm时,平茬和未平茬条件下沙棘单根极限抗

表 2 平茬和未平茬沙棘不同径级的单根极限抗拉强度
Table 2 Ultimate tensile strength of single root of *Hippophae rhamnoides* in different diameter classes between mowing and no mowing MPa

径级/mm Diameter class	未平茬 No mowing	平茬 Mowing
0~0.5	75.41Aa	127.44Ab
0.5~1.0	68.91Ba	109.41Bb
1.0~1.5	50.83Ca	55.16Ca
1.5~2.0	42.37Da	52.91Cb
2.0~2.5	38.83Da	37.69Da
2.5~3.0	31.17Ea	31.53Ea
3.0~3.5	25.61Fa	23.60Fa
3.5~4.0	18.20Ga	21.50Fa
4.0~4.5	13.22Ha	20.45Fa
4.5~5.0	13.20Ha	16.30Ga

拉强度均值分别为 49.60、37.77 MPa, 平茬值较未平茬值提高 31%。在代表根径级为 0.5~1.5 mm, 平茬和未平茬条件下沙棘单根极限抗拉强度均值分别为 82.28、59.87 MPa, 平茬值较未平茬值提高 37%。

2.2 沙棘根土界面拉拔摩阻特性

1) 沙棘单根抗阻拉力。从图 3 可以看出, 平茬和未平茬条件下沙棘单根抗阻拉力均随直径的增长而增大, 且均以幂函数递增。测试根径为 0~5.0 mm 时, 未平茬和平茬条件下沙棘单根抗阻拉力大小分别是 2.21~112.23、3.65~105.44 N。代表根径为 0.5~1.5 mm 时, 未平茬和平茬条件下沙棘单根抗阻拉力大小分别是 5.24~39.36、7.05~38.91 N。

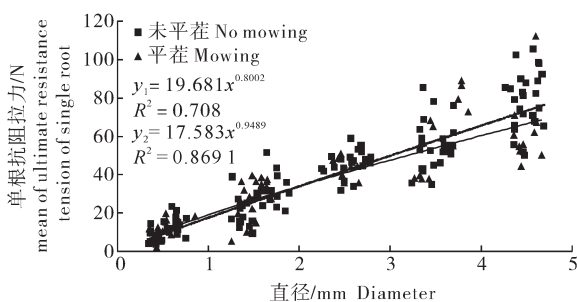


图 3 平茬和未平茬沙棘单根抗阻拉力与根径的关系

Fig.3 Resistance tension of single *Hippophae rhamnoides* root with diameter between mowing and no mowing

由表 3 可知, 在 0.05 水平下以及在 1.0~1.5、2.5~3.0、3.5~4.0、4.0~4.5、4.5~5.0 mm 的同一径级下, 未平茬和平茬沙棘单根抗阻拉力存在显著差异, 其余径级下未平茬和平茬沙棘差异不明显 ($P > 0.05$)。未平茬条件下, 除 3.0~3.5 与 3.5~4.0 mm

外, 其余各径级间均存在显著性差异 ($P < 0.05$); 平茬条件下根径 2.0~2.5 和 2.5~3.0 mm 无显著差异性, 其余各径级间均存在显著性差异。在根径级为 0~5.0 mm 时, 平茬和未平茬条件下沙棘单根抗阻拉力均值分别为 43.37、42.48 N, 二者差异不显著。在代表根径级为 0.5~1.5 mm 时, 平茬和未平茬条件下沙棘单根抗阻拉力均值分别是 17.39、19.81 N, 二者差异不显著。

表 3 平茬和未平茬沙棘不同径级的单根抗阻拉力
Table 3 Resistance tension of single root of *Hippophae rhamnoides* in different diameter classes between mowing and no mowing N

径级/mm Diameter class	未平茬 No mowing	平茬 Mowing
0~0.5	7.28Aa	9.61Aa
0.5~1.0	14.37Ba	15.03Ba
1.0~1.5	20.40Ca	24.59Cb
1.5~2.0	31.88Da	31.73Da
2.0~2.5	42.35Ea	43.56Ea
2.5~3.0	49.45Fa	44.60Eb
3.0~3.5	53.58Ga	49.94Fa
3.5~4.0	55.97Ga	76.41Ib
4.0~4.5	75.14Ha	56.42Gb
4.5~5.0	83.25Ia	72.89Hb

2) 沙棘单根拉拔抗剪强度。由图 4 可知, 平茬和未平茬条件下, 沙棘根-土界面拉拔抗剪强度均值均随着根径的增加而呈幂函数下降, 表明根径越大, 植株根部单位面积摩擦力也就越小, 即细根单位根径的抗拉拔能力强于粗根。另外, 在测试径级为 0~5 mm 时, 未平茬和平茬条件下沙棘单根拉拔抗剪强度分别是 81.40~135.13、75.25~223.30 kPa。由表 4 可知, 在平茬条件下, 除 2.0~2.5 和 4.0~4.5 mm、2.5~3.0 和 3.0~3.5、3.5~4.0 mm 外, 其余各径级间单根拉拔抗剪强度均存在显著性差异 ($P < 0.05$); 在未平茬条件下 0.5~1.0 和 1.5~2.0 mm、2.0~2.5 和 4.5~5.0 mm、1.0~1.5 和 2.5~3.0 mm、3.0~3.5 和 4.0~4.5 mm 无显著性差异以外, 其余各径级间均存在显著性差异 ($P < 0.05$)。除 2.0~2.5、3.5~4.0 和 4.0~4.5 mm, 其余径级范围内平茬与未平茬间均存在显著差异性 ($P < 0.05$)。在测试的径级为 0~5 mm 时, 平茬和未平茬条件下单根拉拔抗剪强度均值分别是 107.51、94.51 kPa, 平茬值较未平茬值提高 14%。在代表根径级为 0.5~1.5 mm 时, 平茬和未平茬条件下沙棘单根拉拔抗剪强度均值分别为 115.00、90.26 kPa, 平茬值较未平茬值提高 30%。

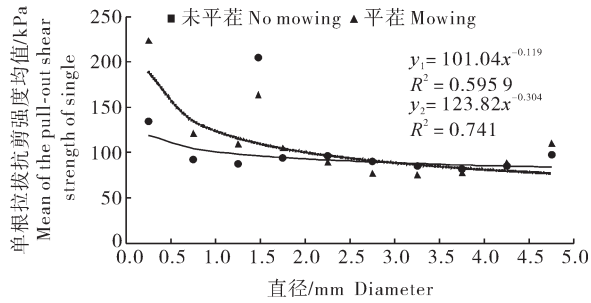


图4 平茬和未平茬沙棘单根拉拔抗剪强度均值与根径关系

Fig.4 Pull-out shear strength of single *Hippophae rhamnoides* root with diameter between mowing and no mowing

表4 平茬和未平茬沙棘不同径级的单根拉拔抗剪强度

Table 4 The difference of shear strength of single root of *Hippophae rhamnoides* in different diameter classes between mowing and no mowing kPa

径级/mm Diameter class	未平茬 No mowing	平茬 Mowing
0~0.5	135.13Aa	223.30Ab
0.5~1.0	92.52Ba	120.88Bb
1.0~1.5	88.00Ca	109.11Db
1.5~2.0	94.18Ba	104.93Eb
2.0~2.5	95.83Ba	88.87Fa
2.5~3.0	89.57Ca	76.50Gb
3.0~3.5	85.27Da	75.25Gb
3.5~4.0	81.40Ea	77.44Ga
4.0~4.5	85.52Da	88.72Fa
4.5~5.0	97.69Ba	110.15Cb

3 讨论

本研究表明,在测试根径为0~5.0 mm时,在平茬和未平茬条件下沙棘单根极限抗拉力、单根抗阻拉力与直径均呈幂函数正相关。在代表根径为0.5~1.5 mm时,平茬和未平茬条件下沙棘单根极限抗拉力均值分别为56.67、43.35 N,平茬较未平茬值提高31%;平茬和未平茬条件下沙棘单根抗阻拉力均值分别是17.39、19.81 N。在测试根径为0~5 mm时,在平茬和未平茬条件下沙棘单根极限抗拉强度、沙棘根-土界面拉拔抗剪强度与直径均呈幂函数负相关。在代表根径级为0.5~1.5 mm时,平茬和未平茬条件下沙棘单根极限抗拉强度均值分别为82.28、59.87 MPa,即平茬值较未平茬值提高

37%;平茬和未平茬条件下沙棘拉拔抗剪强度均值分别为117.50、90.26 kPa,平茬值较未平茬值提高30%。因此,直径对沙棘根系抗拉强度和抗剪强度均有影响,且经平茬处理后,抗拉特性和抗剪特性均有所提高。

在根径为0~5.0 mm时,在平茬与未平茬条件下沙棘单根极限抗拉力均随着根径的不断增长而增大,这是由于根系中化学物质成分含量不同所致。研究表明,根系抗拉力与纤维素和半纤维素含量呈正相关,与木质素含量呈负相关;随着根径的增加,纤维素和半纤维素含量逐渐增加,而木质素的含量逐渐减少,因此单根极限抗拉力就会增大^[15]。而根-土界面的拉拔抗剪强度,随着根径的不断增长呈幂函数减小,这与邢会文^[16]关于灌木根系的研究结论以及刘飞等^[17]关于旱柳根系的研究结论相似。这是由于根系抗阻拉力与根系表面积大小有关,即当根长、根量一定时,根系越粗,根系与土壤接触面就越大,根-土界面摩擦力施加得越强,从而导致根-土间的摩擦阻力越大。同时,根径越大,根单位表面积抗摩擦力越小,拉拔抗剪强度就越小。而且,沙棘根系为保持地上部分平衡,使后代更容易抵御不良生境,细根含量占比会高于粗根,这有益于根系与土体接触^[14]。

沙棘经平茬处理后,单根极限抗拉力、抗拉强度和根-土界面拉拔抗剪强度值有所提高。研究表明,植物在遭遇外力的损伤和破坏后,会出现生长加快和生物量迅速恢复的现象^[18]。温健^[19]关于柠条平茬复壮的研究结果显示,平茬促进了柠条根系的生长,细根数量明显增加,根-土接触面积增加,那么根-土界面摩擦力也会增加,因此根土界面的拉拔抗剪强度有所增大。研究表明,当植物地上组织受到破坏后,植物体会调动地下根系储存的养分用于地上部分的重建,从而加快根系的物质运输,这种现象称为补偿生长现象^[20]。张海娜^[21]发现柠条锦鸡儿平茬后根系植物激素增多、淀粉酶代谢活性提高,不同组织游离氨基酸含量也有所增加。赵文昊^[22]研究发现,经过平茬后,柠条各径级游离氨基酸总量基本均大于未平茬处理。另一方面,沙棘经平茬处理后,单根极限抗拉力、抗拉强度和根-土界面拉拔抗剪强度值有所提高,但是变幅很小,是否与平茬年限有关?关于这点还需要随着平茬年限变化(或增加)进行动态研究。

参考文献References

- [1] HAYATZADEH M, MOOSAVI V, ALIRAMAEE R. Assessment and prioritization of soil erosion triggering factors using analytical hierarchy process and taguchi method [J]. International journal of sediment research, 2023, 38(3):396-404.
- [2] 李龙, 秦富仓, 钱秋颖, 等. 砒砂岩区水力侵蚀下坡面微地貌变化特征及过程研究[J]. 土壤, 2022, 54(1):198-205. LI L, QIN F C, QIAN Q Y, et al. Micro-geomorphic change characteristics and process of slope under water erosion in pisha sandstone area [J]. Soils, 2022, 54(1):198-205 (in Chinese with English abstract).
- [3] 王根厚. 沙棘育苗及栽培技术[J]. 河北林业科技, 2016(6):98-99. WANG G H. Seedling raising and cultivation techniques of seabuckthorn [J]. The journal of Hebei forestry science and technology, 2016(6):98-99 (in Chinese).
- [4] LADOL S, KUMAR A, SHARMA D. Nutritional and health benefits of high altitude wild food plant, *Hippophae rhamnoides* for the himalayan communities [M]. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023:149-161.
- [5] 陈月锋, 董世平, 邢东伦, 等. 柠条平茬收获现状及发展建议[J]. 农业工程, 2020, 10(7):30-34. CHEN Y F, DONG S P, XING D L, et al. Current situation and development suggestions of *Caragana microphylla* stumping harvest [J]. Agricultural engineering, 2020, 10(7):30-34 (in Chinese with English abstract).
- [6] 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 X H, WEI C G, TE M Q, 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 (in Chinese with English abstract).
- [7] JONATHAN A, ROBERT E, MERLE V, et al. Spectral estimates of crop residue cover and density for standing and flat wheat stubble [J]. Agronomy journal, 2012, 104(2):271-279.
- [8] FREY B R, LIEFFERS V J, LANDHÄUSSER S M, et al. An analysis of sucker regeneration of trembling aspen [J]. Canadian journal of forest research, 2003, 33(7):1169-1179.
- [9] JUNG-TAI L, SUNG-MING T. The nitrogen-fixing Frankia significantly increases growth, uprooting resistance and root tensile strength of *alnus formosana* [J]. African journal of biotechnology, 2018, 17(7):213-225.
- [10] 那顺. 北沙柳等4种植物根-土界面拉拔摩擦特性研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021. NA S. The study on the friction drag characteristics of root-soil interface of four plants including *Salix psammophila* [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2021 (in Chinese with English abstract).
- [11] NI J J, LEUNG A K, NG C W. Influences of plant spacing on root tensile strength of *Schefflera arboricola* and soil shear strength [J]. Landscape and ecological engineering, 2019, 15(2):223-230.
- [12] 吴伟伟. 晋中市2019年农田灌溉水有效利用系数测算分析[J]. 中国水运(下半月), 2020, 20(6):170-172. WU W W. Calculation and analysis of effective utilization coefficient of irrigation water in Jinzhong City in 2019 [J]. China water transport, 2020, 20(6):170-172 (in Chinese).
- [13] 夏振尧, 刘琦, 许文年, 等. 多花木蓝根系与土体界面摩擦特征[J]. 水土保持学报, 2018, 32(1):128-134. XIA Z Y, LIU Q, XU W N, et al. Characteristics of interface friction between *Indigofera amblyantha* root system and soil [J]. Journal of soil and water conservation, 2018, 32(1):128-134 (in Chinese with English abstract).
- [14] 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 H Y, Gerile, ZHAO X H, 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 (in Chinese with English abstract).
- [15] 张春涛, 马建刚, 丁明净, 等. 蔓竹单根抗拉及根-土复合体抗剪特性[J]. 四川农业大学学报, 2022, 40(6):883-892. ZHANG C T, MA J G, DING M J, et al. Tensile properties of single root and shear properties of root-soil complex of *Bashania qiaojiaensis* [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2022, 40(6):883-892 (in Chinese with English abstract).
- [16] 邢会文. 4种植物根-土界面摩擦特性研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2009. XING H W. Test studies on the surface friction characteristics of 4 kinds of plant roots-soil [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2009 (in Chinese with English abstract).
- [17] 刘飞, 王卫, 罗东志, 等. 生态边坡防护中旱柳根系固土特性研究[J]. 工程技术研究, 2021, 6(2):244-245. LIU F, WANG W, LUO D Z, et al. Study on soil consolidation characteristics of *Salix matsudana* root system in ecological slope protection [J]. Engineering and technological research, 2021, 6(2):244-245 (in Chinese).
- [18] FANG X W, LI J H, XIONG Y C, et al. Responses of *Caragana korshinskii* Kom. to shoot removal: mechanisms underlying re-growth [J]. Ecological research, 2008, 23(5):863-871.
- [19] 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]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018. WEN J. Study on the growth and physiological characteristics of fine root of *Caragana korshinskii* kom. by flat stubble measures [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2018 (in Chinese with English abstract).
- [20] 施积炎, 袁小凤, 丁贵杰. 作物水分亏缺补偿与超补偿效应的研究现状[J]. 山地农业生物学报, 2000, 19(3):226-233. SHI J Y, YUAN X F, DING G J. The reviews of study on water deficit compensation and over effect for crops [J]. Journal of mountain agriculture and biology, 2000, 19(3):226-233 (in Chinese with English abstract).
- [21] 张海娜. 柠条锦鸡儿平茬后补偿生长的生理生态机制[D]. 兰

- 州:甘肃农业大学,2011.ZHANG H N.Ecophysiology compensatory mechanisms of *Caragana korshinskii* after clipping [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2011 (in Chinese with English abstract).
- [22] 赵文昊.不同平茬模式对柠条锦鸡儿根系游离氨基酸及叶绿素荧光动力学参数的影响[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2018. ZHAO W H.The effects of different stubble patterns on the amino acid and photosynthesis of *Caragana microphylla* root [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2018 (in Chinese with English abstract).

Response of soil consolidation mechanical properties of *Hippophae rhamnoides* roots to rejuvenation of mowing

CUI Tianmin, Gerile, Yibole, Chaligan

College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China

Abstract A single root ultimate tensile test and a root soil interface pull-out friction test were conducted using a TY-8000 tensile machine and the root system of *Hippophae rhamnoides*, a pioneer shrub for soil and water conservation in the arid and semi-arid areas of Inner Mongolia to investigate the effect of mowing measures on the mechanical properties of roots. The effect of mowing on the soil fixation mechanical properties of *Hippophae rhamnoides* root system was analyzed. The results showed that the ultimate anti-tension and resistance tensile force of a single root were positively correlated with the diameter as a power function under the conditions of mowing and non-mowing when the measured root diameter was 0-5.0 mm. The ultimate tensile strength of a single root and the tensile shear strength of the root soil interface were negatively correlated with the diameter as a power function. In the representative root diameter class of *Hippophae rhamnoides* ranging from 0.5 to 1.5 mm, the average ultimate anti-tension of a single root in mowing was 31% higher than that in non-mowing. The average ultimate tensile strength of a single root increased by 37% and the average pull-out shear strength increased by 30%. It is indicated that the diameter has an impact on the strength of tensile and shear of the *Hippophae rhamnoides* root system, and the properties of tensile and shear have been improved after the mowing treatment.

Keywords *Hippophae rhamnoides*; root system; tensile; friction characteristics; shear strength; mowing; water and soil conservation; biomechanics

(责任编辑:陆文昌)