

内蒙古中西部 3 种典型乡土植物根系抗折力学特性

崔天民, 格日乐, 杨锐婷, 王争贤

(内蒙古农业大学沙漠治理学院, 呼和浩特 010018)

摘要: 为固土抗蚀优良树种的选择提供生物力学方面的参考依据, 也为揭示植物根系持续固土抗蚀力学特性。以内蒙古中西部风水复合侵蚀区的 3 年生人工柠条(*Caragana korshinskii*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、紫花苜蓿(*Medicago sativa*) 3 种典型乡土植物根系为对象, 相同立地条件下使用 HG100 数显式推拉力和自制便携式实验平台, 在测试直径 0.5~4 mm 范围内, 对单根进行 70% 极限折力受损, 待自修复 3 个月后, 研究 3 种植物根系抗折力及抗折强度的变化、比较不同植物种之间的差异性。结果表明, 3 种植物愈伤后单根平均抗折强度大小为: 柠条(15.504 MPa) > 沙棘(12.342 MPa) > 紫花苜蓿(6.584 MPa), 说明柠条根系受折受损愈伤自修复后的抗折能力优于沙棘和紫花苜蓿, 沙棘又优于紫花苜蓿。3 种植物根系总体呈现平行对照组单根抗折力(强度) > 愈伤后单根抗折力(强度), 只有紫花苜蓿平行对照组单根抗折强度与其愈伤后的值无显著差异。柠条平均抗折力下降 64%, 沙棘平均抗折力下降 28%, 紫花苜蓿平均抗折力下降 27%; 柠条平均抗折强度下降 40%, 沙棘平均抗折强度下降 22%, 紫花苜蓿平均抗折强度下降 12%, 说明植物种不同则生物学特性不同, 受损愈伤后恢复抗侵蚀能力不同。

关键词: 折损; 愈伤; 抗折力; 抗折强度

中图分类号: Q947.8

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)02-0138-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2021.02.019

Root Anti-fracture and Mechanical Properties of Three Typical Native Plants in Central and Western Inner Mongolia

CUI Tianmin, GE Rile, YANG Ruiting, WANG Zhengxian

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

Abstract: In order to provide a biomechanical reference for the selection of excellent tree species for soil fixation and erosion resistance, and to reveal the mechanical characteristics of plant roots for continuous soil fixation and erosion resistance, three typical native plant roots of 3-year-old *Caragana korshinskii*, *Hippophae rhamnoides* and *Medicago sativa* in the complex erosion area of wind and water in the central and Western Inner Mongolia were taken as the research objects. Under the same site conditions, using the self-made portable root radial and axial mechanical properties test bench and HG100 digital display push-pull meter, 70% ultimate bending force of single root was damaged in the test diameter range of 0.5~4 mm. After 3 months of self-healing, the changes of anti-fracture forces and anti-fracture strength of three kinds of plant roots after damaged callus were studied, and the differences among different plant species were compared. The results showed that the average comparison of anti-fracture strength of three kinds of plants after restoration were *Caragana korshinskii* (15.504 Mpa) > *Hippophae rhamnoides* (12.342 Mpa) > *Medicago sativa* (6.584 Mpa), indicating that the bending resistance of *Caragana korshinskii* was better than that of *Hippophae rhamnoides* and *Medicago sativa*, and *Hippophae rhamnoides* was better than *Medicago sativa*. However, in numerical value, there was no significant difference in single root anti-fracture strength between *Medicago sativa* parallel control group and after callus. For the average anti-fracture forces, *Caragana korshinskii*, *Hippophae rhamnoides* and *Medicago sativa* decreased by 64%, 28% and 27% respectively. For the average

收稿日期: 2020-09-19

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); 内蒙古自然科学基金项目“沙结皮防风抗蚀的力学特性研究”(2017MS0407)

第一作者: 崔天民(1997—), 男, 汉族, 山东蓬莱人, 硕士研究生, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: cuitianmin1997@126.com

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

anti-fracture strength, *Caragana korshinskii*, *Hippophae rhamnoides* and *Medicago sativa* decreased by 40%, 22% and 12% respectively. These results showed that the biological characteristics of different plant species were different, and the recovery ability of erosion resistance was different after damaged callus.

Keywords: damage; wound curing; anti-fracture forces; anti-fracture strength

内蒙古中西部地区生态环境脆弱,极易产生风水复合侵蚀,水土流失严重^[1]。同时,由于鄂尔多斯地区进行煤炭的大量开采,地面出现裂缝、沉陷^[2],进而导致土壤水分流失和植物根系损伤,对植物的正常生长和发育造成重大影响,使植物的保水保土能力降低,从而使干旱、半干旱矿区生态环境发生进一步恶化^[3-4]。当前,水土保持三大治理措施中生物林草措施是防治水土流失最有效、最经济的措施^[5]。随着植物措施在治理水土流失、护岸护坡方面的实施运用,根系固土已成为当前生态环境领域研究的热点^[6]。根系对于植物来说,不仅用来吸收水分,还储藏营养物质。在土壤中,植物根系相互缠绕在一起,形成根—土复合体,根—土复合体能够抵抗径流对土体的冲刷、风力拉拔以及地表沉降所产生的压力^[7]。当土体发生位移时,根—土复合体会受到剪切力^[8]。同时,土体中的根系还会承受径向折力^[9]、径向弯力^[10]和轴向拉力^[11]。

目前,针对根系力学特性的研究,植物直根抗拉特性^[12]尤为众多;根—土复合体抗剪特性^[13]和根与特定土壤界面摩阻特性^[14]也有了大量的研究。这些成果为深入植物根系固土抗蚀力学机理的研究提供了宝贵的经验,然而,研究的植物均以静态的方法进行。事实上,植物根系的力学特性会随根系生长而发生相应的变化,由于在自然环境生长过程中,植物不可避免受到各种外界应力的刺激,“应力—生长”关系的变化也必然改变根系力学特性^[15]。植物是具有生长特性的活体,根系受到径向折断力后,会不断增殖和分化新细胞,促进根系自我修复并保持继续生长^[16]。目前,对于根系受损自修复后力学特性的变化相关研究^[17]才刚刚开始。通过外力干扰来研究植物根系受损愈合的能力,有助于深入了解根系在逆境中的生存状况和根系固土机理固土机制。

当植物根系受到垂直于根轴线的自然界向作用力时,由于施力点两端根系穿插在土壤中,根系表现出抗折性能,这种根系抵抗折断的力称为抗折力,与这种力对应的强度称为抗折强度。目前,国内外关于根系抗折性能的研究较少,试验一般通过采用悬臂梁(一端固定)、3点弯曲和4点弯曲(两端不固定)的方法来研究植物根系抗折性能^[18]。固土抗蚀植物种的选择是改善侵蚀区水土流失现状的关键,本文以内蒙古中西部风水复合侵蚀区的人工柠条(*Caragana korshinskii*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、紫花

苜蓿(*Medicago sativa*)3种典型乡土植物根系为对象,使用HG100数显式推拉力计和自制便携式试验平台采用两端固定式折断法,在相同立地条件下进行原位试验,对3种植物单根进行70%极限折力受损,待自修复3个月后,研究3种植物根系抗折力及抗折强度的变化、比较不同植物种之间的差异性,为该地区生态环境修复与植被建设提供理论基础。

1 研究区概况

试验地位于内蒙古自治区呼和浩特市和林格尔县公布营村附近生态公益林(39°58′—40°41′N,111°26′—112°18′E),属中温带半干旱大陆性季风气候,由于地理位置和常年深受大气环流的影响,其主要特征是气候干燥,日光资源充足,昼夜温差较大。该区域地处内蒙古高原向黄土高原的过渡地带,总体地形呈东高西低、南高北低的态势。拥有石质土、风沙土、栗钙土等不同种类的土壤,长期受风水复合侵蚀的影响,土质疏松,水土流失严重。典型草原植被是该地区自然植被的主要代表。

2 材料与方 法

2.1 样地选择与标准株的确定

在试验地内分别选择3年生人工沙棘、柠条及紫花苜蓿样地,样地选择在地势平坦的开阔地,且要求立地条件一致。在每种植物的样地中随机选择生长正常植株20株,分别测量其株高、冠幅和地径等指标后,计算其平均值。选取与平均值相近的植株3~5株作为该植物种的标准株进行试验测定。3种植物生长状况见表1。

2.2 试验方法

于2019年5月初挖掘采集3年生柠条、沙棘、紫花苜蓿单根(直根)。在标准株周围大约2m处绕植株1圈向根颈采用收缩法由外向内进行保护性挖掘。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长度和直径时停止挖掘,开始用毛刷轻轻刷去根表面粘连土体,同时在挖掘过程中每隔3~5min喷1次水,尽量保持露出根周围湿润。在施加损伤力后,卸下仪器并使用棉线、铁丝、纸片标记试验根和试验株;然后覆土填埋,使其还原到挖掘前的样子。在植物生长3个月后的8月初,将试验根挖出,测量试验根抗折力和抗折强度。

待测根尽量选择直径均匀的通直根作为试验根。从图 1 可以看出,试验根系总长不小于 80 mm,将分级后的各径级根系从中间部分量取长度为 60 mm 的 AE 段作为抗折试验部分,在试验部分上每隔 15 mm 作 1 个标记(共做 5 个标记)。其中,AB 和 DE 段为

夹具夹持部分。用游标卡尺(精度为 0.01 mm)以十字交叉法在中间 3 个标记点 B、C、D 正交方向上各测量 2 次直径,然后取 3 点的平均值作为平均根径 $D^{[19]}$ 。每种植物以 0.5 mm 为 1 个径级间隔进行分级,从 0.5~4 mm 逐级划分。

表 1 3 种植物株高、冠幅和地径指标

样株	柠条			沙棘			紫花苜蓿		
	株高/cm	冠幅/cm	地径/mm	株高/cm	冠幅/cm	地径/mm	株高/cm	冠幅/cm	地径/mm
1	121	107	18	96	98	16	48.4	7.8	4.6
2	124	113	17	89	75	13	44.5	7.1	4.5
3	117	115	20	101	119	22	45.1	6.4	4.0
4	110	101	19	68	77	21	44.0	5.3	3.7
5	112	90	19	63	61	23	39.6	5.8	3.8
6	115	88	18	105	103	24	46.2	6.7	4.1
7	112	120	19	91	93	21	51.7	7.9	4.3
8	117	110	21	108	117	25	49.5	7.1	3.9
9	111	119	21	74	65	19	50.6	7.2	4.3
10	122	122	22	83	95	20	59.4	7.7	4.0
11	125	103	19	86	100	11	53.9	8.4	4.7
12	107	117	17	116	108	21	47.3	6.2	3.9
13	110	97	19	71	72	18	42.9	6.0	4.5
14	120	84	21	103	105	23	48.4	5.9	3.9
15	109	111	20	112	114	25	51.7	7.5	4.4
16	119	115	21	47	92	18	52.8	7.2	4.2
17	121	105	19	112	109	21	46.2	7.3	3.8
18	119	98	20	115	124	20	56.1	6.4	4.6
19	118	103	19	71	125	24	58.3	7.8	4.3
20	121	101	22	59	59	20	48.4	6.8	4.2
均值	116.6±5.2	105.9±10.62	19.6±1.47	88.5±20.14	95.6±20.41	20.2±3.53	49.25±5.03	6.93±0.81	4.19±0.3

注:均值为平均值±标准差。

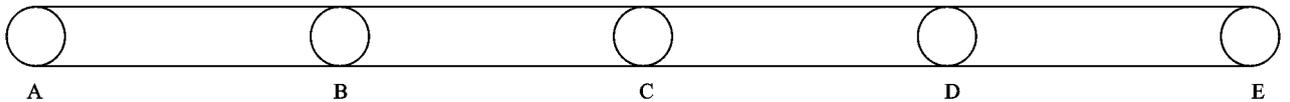


图 1 根系分段标记

野外原位试验仪器为 HG100 数显式推拉量力计(精度 0.05 N)和自制手摇试验平台,试验时匀速手动操作,以控制加载速度。

2.3 损伤力的确定和施加

首先进行每种植物根系各径级单次荷载极限抗折力试验,每个径级重复测定 20 次,计算平均值作为该径级的极限折力,其中非有效点即靠近两端夹持点断裂数据不计入重复。

根系单次荷载极限抗折强度计算方法为:

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

式中: σ 为抗折强度(MPa); F 为抗折力(N); D 为试验根断裂点直径(mm)。

每种植物待测根每个径级试验均分为 A、B、C 3 组。其中 A 组对根系施加瞬时极限折损力。B 组根

据预试验结果,即在本课题组的预试验过程中发现,当损伤折力大于等于极限折力的 80% 时试验根死亡率极高,且部分根系在施加损伤力的过程中已发生折断;另据苑淑娟^[20]的研究得出,对于柠条,当应力达到自身极限应力的 40% 左右时,出现弹性极限点;对于沙棘,当应力达到自身极限应力的 60% 左右时,出现弹性极限点。因此为避免植株受损严重死亡,本组施加瞬时极限折损力的 70% 进行受折受损。不同径级范围内的瞬时极限折损力以 A 组所对应径级范围内的平均值为参照。C 组作为平行对照组,根系不施加任何损伤力仅保持与 B 组进行相同处理(挖掘、暴露、洒水、填埋等扰动操作)^[19],从而对比观察根系受损后恢复状况。每种植物根系各径级受损根及对照根均需 20 根重复。

3 结果与分析

3.1 3 种植物愈伤后单根抗折力比较

由图 2 可知,3 种植物经 3 个月时间的愈伤后单根抗折力随直径的增加而增加。采用 Excel 数据分析功能进行曲线回归拟合,拟合方程为: $y_{\text{柠条}} = 15.005x^{1.2634}$ ($R^2 = 0.8584, x = 0.507 \sim 3.829 \text{ mm}$); $y_{\text{沙棘}} = 7.170x^{1.8176}$ ($R^2 = 0.8685, x = 0.567 \sim 3.960 \text{ mm}$); $y_{\text{紫花苜蓿}} = 3.8439x^{1.6594}$ ($R^2 = 0.9182, x = 0.517 \sim 3.980 \text{ mm}$)。回归方程表明,3 种植物愈伤后单根抗折力与直径相关系数 > 0.5 ,均呈幂函数正相关关系。

由表 2 可知,在 $\alpha = 0.05$ 的显著水平下,当柠条、沙棘愈伤后单根在直径 0.5~1, 1~1.5 mm、紫花苜蓿愈伤后单根在直径 1~1.5, 1.5~2 mm 差异不显著

表 2 3 种植物愈伤后单根在不同径级下种内抗折力差异性检验结果

单位: N

树种	F 值	Pr>F	0.5~1 mm	1~1.5 mm	1.5~2 mm	2~2.5 mm	2.5~3 mm	3~3.5 mm	3.5~4 mm
柠条	289.61	<0.0001	17.208F	17.584F	28.429E	39.925D	53.202C	74.761B	88.813A
沙棘	768.58	<0.0001	12.152F	13.424F	27.977E	33.574D	54.805C	67.814B	89.666A
紫花苜蓿	282.51	<0.0001	6.816F	13.676E	14.895E	18.533D	26.400C	41.201B	45.739A

注:表中数字后不同大写字母表示差异性显著($P < 0.05$)。下同。

由表 3 可知,在 $\alpha = 0.05$ 显著水平下,直径在 0.5~4 mm 范围内时,经检验, $F_{\text{方差}} = 1.87 < F_c = 3.55$, 3 种植物单根愈伤后抗折力大小总体表现为柠条和沙棘间无显著差异,二者与紫花苜蓿存在显著差异,且柠条和沙棘单根愈伤后抗折力显著大于紫花苜蓿。抗折力均值大小为柠条(48.440 N) > 沙棘(44.315 N) > 紫花苜蓿(23.861 N)。

表 3 3 种植物愈伤后单根在相同径级下种间抗折力差异性检验结果

径级/mm	F 值	Pr>F	柠条	沙棘	紫花苜蓿
0.5~1	24.21	<0.0001	17.584A	12.152A	6.816B
1~1.5	13.20	<0.0001	17.208A	13.676A	13.424A
1.5~2	75.26	<0.0001	28.429A	27.977A	14.895B
2~2.5	103.44	<0.0001	43.574A	39.925A	18.553B
2.5~3	207.29	<0.0001	64.805A	53.202A	26.400B
3~3.5	298.74	<0.0001	77.814A	74.761A	41.201B
3.5~4	571.79	<0.0001	89.666A	88.510A	45.739B

3.2 3 种植物愈伤后单根抗折强度比较

由图 3 可知,3 种植物愈伤后单根抗折强度随直径增大呈减小趋势,拟合方程分别为: $y_{\text{柠条}} = 19.9640x^{-0.787}$ ($R^2 = 0.6475, x = 0.507 \sim 3.829 \text{ mm}$);

表 4 3 种植物愈伤后单根在不同径级下的种内抗折强度差异性检验结果

单位: MPa

树种	F 值	Pr>F	0.5~1 mm	1~1.5 mm	1.5~2 mm	2~2.5 mm	2.5~3 mm	3~3.5 mm	3.5~4 mm
柠条	75.89	<0.0001	46.989B	12.462C	9.328C	8.586C	8.500C	8.316C	8.108C
沙棘	76.73	<0.0001	31.683B	11.875C	10.772C	10.683C	10.278C	9.024C	8.321C
紫花苜蓿	53.03	<0.0001	19.207B	6.056C	4.922C	4.749C	4.333C	3.959C	3.858C

由表 5 可知,在 $\alpha = 0.05$ 显著水平下,直径在 0.5~4 mm 范围内时,相同径级下经检验, $F_{\text{方差}} = 1.45 < F_c =$

以外,其他各径级间均存在显著性差异,表明直径是影响 3 种植物愈伤后单根抗折力大小的重要因子。

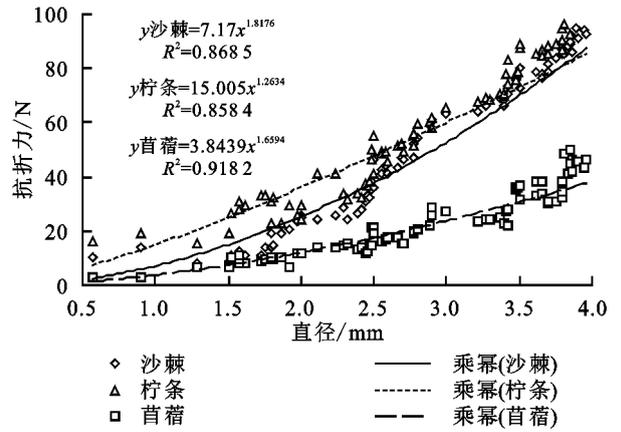


图 2 3 种植物愈伤后单根抗折力随直径的变化

$y_{\text{沙棘}} = 9.1337x^{-0.182}$ ($R^2 = 0.0623, x = 0.567 \sim 3.960 \text{ mm}$); $y_{\text{紫花苜蓿}} = 4.9858x^{-0.376}$ ($R^2 = 0.3419, x = 0.517 \sim 3.980 \text{ mm}$)。其中柠条复相关系数 > 0.5 ,呈幂函数递减以外其他 2 个种复相关系数均 < 0.5 ,二者的相关性较低,该结果与刘鹏飞等^[21]研究结果一致。

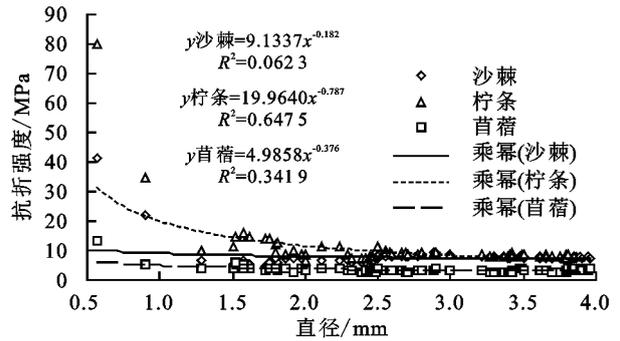


图 3 3 种植物愈伤后单根抗折强度随直径的变化

由表 4 可知,在 $\alpha = 0.05$ 的显著水平下,3 种植物根系只有在直径 0.5~1 mm 与各径级之间抗折强度均存在显著差异性以外,其他径级间抗折强度无显著差异,只是在数值上表现为随着径级的增大,抗折强度逐渐减小,说明直径对抗折强度的影响不明显。

3.55, 3 种植物愈伤后单根种间抗折强度总体上差异显著;单根抗折强度均值大小为柠条(15.504 MPa) > 沙

棘(12.342 MPa) > 紫花苜蓿(6.584 MPa), 表明 3 种植物中柠条根系受折受损愈伤自修复后的抗折能力优于沙棘和紫花苜蓿, 沙棘又优于紫花苜蓿。

3.3 3 种植物愈伤后与对照的单根抗折力学特性比较

由表 6 和表 7 可知, $\alpha=0.05$ 显著水平时相同径级下, 3 种植物平行对照组单根抗折力与愈伤后单根抗折力总体存在显著差异, 平行对照组单根抗折力 > 愈伤后单根抗折力; 3 种植物平行对照组单根抗折强度与愈伤后单根抗折强度比较, 柠条和沙棘均存在显著差异, 其平行对照组单根抗折强度 > 愈伤后单根抗折强度; 而草本植物紫花苜蓿则无显著差异。表明 3 种植物根系受 70% 极限折力损伤, 愈伤自修复 3 个月后柠条和沙棘根系抗折能力仍未完全恢复, 紫花苜蓿没有明显的变化。3 种植物单根遭受 70% 极限折力损伤, 经 3 个月愈伤后, 柠条平均抗折力下降

64%, 沙棘平均抗折力下降 28%, 紫花苜蓿平均抗折力下降 27%; 柠条平均抗折强度下降 40%, 沙棘平均抗折强度下降 22%, 紫花苜蓿平均抗折强度下降 12%。说明外力损伤显著抑制根系极限抗折力的增加, 但是外力损伤并不会让根系彻底失去固土能力, 且植物种不同其抗折力学特性的恢复能力不同。

表 5 3 种植物愈伤后单根在相同径级下种间

径级/mm	抗折强度差异性检验结果			单位: MPa		
	F 值	Pr>F	柠条	沙棘	紫花苜蓿	
0.5~1	28.06	<0.0001	46.990A	31.680B	18.210C	
1~1.5	82.38	<0.0001	12.462A	11.875B	4.922C	
1.5~2	51.30	<0.0001	10.278A	8.586B	6.056C	
2~2.5	313.57	<0.0001	10.772A	9.328B	4.333C	
2.5~3	208.41	<0.0001	10.683A	8.500B	4.749C	
3~3.5	302.59	<0.0001	9.024A	8.316B	3.858C	
3.5~4	1110.35	<0.0001	8.320A	8.108A	3.959B	

表 6 3 种植物愈伤后和平行对照的单根抗折力比较

单位: N

径级/mm	柠条对照组	柠条愈伤后	沙棘对照组	沙棘愈伤后	苜蓿对照组	苜蓿愈伤后
0.5~1	19.028A	9.584B	12.152A	2.293B	6.816A	2.869B
1~1.5	39.527A	9.649B	13.424A	10.849B	13.207A	8.834B
1.5~2	59.233A	24.429B	27.977A	22.142B	18.206A	13.378B
2~2.5	75.762A	33.896B	43.574A	29.043B	25.210A	18.291B
2.5~3	131.322A	44.756B	64.805A	49.294B	33.082A	24.933B
3~3.5	198.130A	54.724B	77.814A	65.899B	42.123A	34.085B
3.5~4	268.121A	71.760B	89.666A	84.800B	45.739A	44.127A

表 7 3 种植物愈伤后和平行对照的单根抗折强度比较

单位: MPa

径级/mm	柠条对照组	柠条愈伤后	沙棘对照组	沙棘愈伤后	苜蓿对照组	苜蓿愈伤后
0.5~1	26.608A	24.834B	31.680A	10.290B	18.207A	13.037B
1~1.5	21.234A	10.456B	11.875A	9.654A	7.325A	6.174A
1.5~2	18.618A	10.305B	10.278A	10.470A	5.955A	4.546A
2~2.5	15.015A	7.546B	10.772A	7.476B	4.854A	4.742A
2.5~3	12.923A	7.780B	10.683A	8.641B	4.261A	3.858A
3~3.5	11.578A	6.088B	9.024A	8.057B	4.120A	3.959A
3.5~4	10.695A	6.474B	8.320A	7.544B	3.959A	3.879A

4 讨论

3 种植物愈伤后单根抗折力随着直径的增大呈幂函数增大趋势; 抗折强度随直径的增大呈幂函数减小趋势, 这与郑永刚^[22]、李雪松等^[23] 研究结果一致, 表明直径是影响抗折力学特性的重要因子, 其内在机理与构成细胞壁的纤维素、半纤维素等化学组分的含量有关, 随着直径的增大, 纤维素、半纤维素含量增加^[24]。

3 种植物平行对照组单根抗折力 > 愈伤后单根抗折力; 3 种植物平行对照组单根抗折强度与愈伤后单根抗折强度比较, 柠条和沙棘均存在显著差异, 其平行对照组单根抗折强度 > 愈伤后单根抗折强度; 而草本植物紫花苜蓿则无显著差异。说明外力损伤显著抑制根系极限抗折力的增加, 但是外力损伤并不会让根系彻底失去

固土能力。有研究^[25] 表明, 适度的机械刺激可以提高植物细胞的分裂和分化能力, 从而促进植物的生长。但如果根系承受的应力过大, 超过根系最大应力承受限度, 根系的生理功能下降, 将导致根细胞的严重失活, 甚至死亡。当植物根系经受住一定的破坏力后, 细胞还具有恢复损伤并存活下去的能力, 那么根系的应力处理机制将会被激活, 细胞组织将开始进行修复, 从而提高植物对环境的适应能力^[26-27]。本研究中, 对 3 种植物施加极限抗折力的 70%, 这种损伤力已超过了所对应径级的弹性承受极限点, 造成较为严重的机械刺激和损伤, 破坏了根系组织结构, 植物根系正常生长受到了抑制, 从而激发了细胞组织的自愈机制。分析原因主要有 3 个方面: (1) 根细胞受损后, 完整细胞

总量减少;(2)运输水的通道被阻断;(3)外界对根系造成的损伤刺激根系激素调节。

3 种植物单根遭受 70% 极限折力损伤,经 3 个月愈伤后,柠条平均抗折力下降 64%,沙棘平均抗折力下降 28%,紫花苜蓿平均抗折力下降 27%;柠条平均抗折强度下降 40%,沙棘平均抗折强度下降 22%,紫花苜蓿平均抗折强度下降 12%;植物种不同则生物学特性不同,受损愈伤后自修复能力不同。刘鹏飞^[28]研究表明,植物抵抗恶劣环境的能力强弱与维管组织占根截面积的比例大小有关。维管组织所占比例越大,疏导组织功能越强,植物运输水分和营养物质能力越强,当植物根系受到一定损伤后,其发达的维管组织有利于抵御外界环境的胁迫,从而更有利于根系的愈伤修复。3 种植物中紫花苜蓿和沙棘虽都是耐旱植物,但其耐旱等级与柠条相比较低,柠条为强旱生植物,细胞小排列紧密,沙棘和紫花苜蓿为中旱生植物,细胞较大且排列疏松,对水分较为敏感,维管组织较发达的缘故,关于这点还需要进行进一步研究。

5 结论

在 0.5~4 mm 测试径级范围内,3 种植物愈伤后单根抗折力与直径均呈幂函数正相关,单根抗折强度与直径均呈幂函数负相关。

3 种植物单根愈伤后抗折力大小总体表现为柠条和沙棘间无显著差异,二者与紫花苜蓿存在显著差异,且柠条和沙棘单根愈伤后抗折力显著大于紫花苜蓿的值。抗折力均值大小为柠条(48.440 N) > 沙棘(44.315 N) > 紫花苜蓿(23.861 N);3 种植物愈伤后单根种间抗折强度总体上差异显著;单根抗折强度均值大小为柠条(15.504 MPa) > 沙棘(12.342 MPa) > 紫花苜蓿(6.584 MPa),表明 3 种植物中柠条根系受折受损愈伤自修复后的抗折能力优于沙棘和紫花苜蓿,沙棘又优于紫花苜蓿。

3 种植物平行对照组单根抗折力与愈伤后单根抗折力总体存在显著差异,平行对照组单根抗折力 > 愈伤后单根抗折力;3 种植物平行对照组单根抗折强度与愈伤后单根抗折强度比较,柠条和沙棘均存在显著差异,其平行对照组单根抗折强度 > 愈伤后单根抗折强度;而草本植物紫花苜蓿则无显著差异。表明 3 种植物根系受 70% 极限折力损伤,愈伤自修复 3 个月后柠条和沙棘根系抗折能力仍未完全恢复,紫花苜蓿没有明显的变化。3 种植物单根遭受 70% 极限折力损伤,经 3 个月愈伤后,柠条平均抗折力下降 64%,沙棘平均抗折力下降 28%,紫花苜蓿平均抗折力下降 27%;柠条平均抗折强度下降 40%,沙棘平均

抗折强度下降 22%,紫花苜蓿平均抗折强度下降 12%。说明外力损伤会显著抑制根系极限抗折力的增加,但是外力损伤并不会让根系彻底失去固土能力,证明植物种不同则生物学特性不同,受损愈伤后自修复能力不同。

参考文献:

- [1] 马玉凤.内蒙古十大孔兑区河谷沙丘风水复合侵蚀现代过程研究[J].中国科技成果,2016,17(20):15-16.
- [2] Zhou D W, Wu K, Cheng G L, et al. Mechanism of mining subsidence in coal mining area with thick alluvium soil in China[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2015,8(4):1855-1867.
- [3] 王双明,杜华栋,王生全.神木北部采煤塌陷区土壤与植被损害过程及机理分析[J].煤炭学报,2017,42(1):17-26.
- [4] 胡晶晶,毕丽银,龚云丽,等.接种 AM 真菌对采煤沉陷区文冠果生长及土壤特性的影响[J].水土保持学报,2018,32(5):341-345,351.
- [5] 汪媛.植物根系环境保护及生态建设研究进展[J].南方农机,2020,51(13):76-77.
- [6] 夏旖琪.草类根系根土复合体的强度和渗透特性及对边坡稳定性的影响[D].长沙:长沙理工大学,2017.
- [7] 刘治兴,杨建英,杨阳,等.高速公路不同植物防护边坡根土复合体抗剪能力研究[J].生态环境学报,2015,24(4):631-637.
- [8] 武艺儒.4 种植物单根抗剪力特性的研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2019.
- [9] 王晨嘉.3 种植物根系受折愈伤后抗折力学特性研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2017.
- [10] 格日乐,刘艳琦,孙保平,等.半干旱地区 3 种植物根系的抗弯力特征[J].水土保持通报,2018,38(3):112-117.
- [11] 李宁,陈丽华,杨苑君.油松、华北落叶松根系抗拉特性的影响因素[J].北京林业大学学报,2015,37(12):77-84.
- [12] Boldrin D, Leung A K, Bengough A G. Root biomechanical properties during establishment of woody perennials[J]. Ecological Engineering, 2017, 109: 196-206.
- [13] 曹志国,张礼,张定邦,等.植物根系改良鄂东矿渣混合土抗剪强度的研究[J].湖北理工学院学报,2020,36(1):49-52,61.
- [14] 朱宏慧.4 类土根—土界面摩阻特性研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2016.
- [15] 查国栋.梯度应力作用下拟南芥根系生长行为研究[D].重庆:重庆大学,2015.
- [16] 岳辉,刘英.基于五室培养法的接菌紫花苜蓿受损根系模拟修复研究[J].基因组学与应用生物学,2015,34(5):1053-1060.
- [17] 刘嘉伟,刘静,张欣,等.两类侵蚀营力损伤下小叶锦鸡儿直根自修复能力研究[J].北方园艺,2019,43(8):82-89.

- 2000,66(12):5368-5382.
- [26] Ward B B, O'Mullan G D. Worldwide distribution of *Nitrosococcus oceani*, a marine ammonia-oxidizing γ -proteobacterium, detected by PCR and sequencing of 16SrRNA and *amoA* genes[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2002, 68(8): 4153-4157.
- [27] 高俊莲, 王永生, 张爱平, 等. 生物质炭对稻田氮素淋失和氧化亚氮排放的影响[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(6): 87-94.
- [28] Li S L, Zhang Y W, Yan W M, et al. Effect of biochar application method on nitrogen leaching and hydraulic conductivity in a silty clay soil[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 183: 100-108.
- [29] Hassan M, Liu Y J, Naidu R, et al. Influences of feedstock sources and pyrolysis temperature on the properties of biochar and functionality as adsorbents: A meta-analysis[J]. Science of the Total Environment, 2020, 744(20): 1-15.
- [30] Dai Y J, Wang W S, Lu L, et al. Utilization of biochar for the removal of nitrogen and phosphorus[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 257(1): 1-15.
- [31] Lu H L, Zhang W H, Yang Y X, et al. Relative distribution of Pb^{2+} sorption mechanisms by sludge-derived biochar[J]. Water Research, 2012, 46(3): 854-862.
- [32] 石钧元, 荀咪, 崔迎宾, 等. 炭化苹果枝皮和木材对水中硝态氮和铵态氮的差异吸附[J]. 水土保持学报, 2020, 34(2): 253-260.
- [33] 赵凌宇, 王延华, 杨浩, 等. 木屑和稻秆基生物质炭对汞的吸附特征比较[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34: 556-562.
- [34] Case S D C, McNamara N P, Reay D S, et al. The effect of biochar addition on N_2O and CO_2 emissions from a sandy loam soil: The role of soil aeration[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012, 51: 125-134.
- [35] 王兵, 赵闪闪, 秦治家, 等. 生物质炭对黑土吸附—解吸硝态氮性能的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(1): 115-121.
- (上接第 143 页)
- [18] 张欣, 刘静, 郑永刚, 等. 4 种植物直根抗折力和抗折强度的研究[J]. 水土保持研究, 2016, 23(5): 338-342.
- [19] 王博. 半干旱区水土保持灌木根系拉拔损伤后的自修复机制[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.
- [20] 苑淑娟. 4 种植物单根抗拉力学特性的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2010.
- [21] 刘鹏飞, 刘静, 朱宏慧, 等. 4 种植物生长旺盛期侧根分支处与相邻上级直根抗折特性的差异[J]. 应用生态学报, 2016, 27(1): 33-39.
- [22] 郑永刚. 4 种植物直根抗折力学特性的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2015.
- [23] 李雪松, 刘静, 王博, 等. 黑沙蒿直根的材料力学特性研究[J]. 水土保持学报, 2017, 31(6): 353-358.
- [24] Ropitiaux M, Bernard S, Follet-Gueye M L, et al. Xyloglucan and cellulose form molecular cross-bridges connecting root border cells in pea (*Pisum sativum*) [J]. Plant Physiology Biochemical, 2019, 139(6): 191-196.
- [25] 刘益良, 刘晓立, 付旭, 等. 锦鸡儿、沙打旺根系对边坡土体抗剪强度影响的试验研究[J]. 北华航天工业学院学报, 2016, 26(3): 24-28.
- [26] Arthur G, Marcus S. The role of nutrients in drought-induced tree mortality and recovery[J]. New Phytologist, 2017, 214: 513-520.
- [27] Vincent B, Yves C, Freddy R. Effects of wood chip amendments on the revegetation performance of plant species on eroded marly terrains in a Mediterranean mountainous climate (Southern Alps, France) [J]. Solid Earth, 2016, 7(2): 599-610.
- [28] 刘鹏飞. 4 种植物侧根分支处抗折力学特性的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2016.