

DOI:10.11937/bfyy.201517015

# 四种植物生长旺盛期侧根 分支处抗折特性研究

刘鹏飞<sup>1</sup>, 刘 静<sup>1</sup>, 张 格<sup>2</sup>, 张 欣<sup>3</sup>, 朱宏慧<sup>1</sup>, 李有芳<sup>1</sup>

(1. 内蒙古农业大学 生态环境学院, 内蒙古 呼和浩特 010010; 2. 中国林业科学研究院 沙漠林业实验中心, 内蒙古 磴口 015200; 3. 水利部牧区水利科学研究所, 内蒙古 呼和浩特 010010)

**摘 要:**以 3~4 年生生长旺盛期柠条、沙柳、沙棘、白沙蒿为研究对象, 供试试验根均为由上级根通过侧根分支处分为 2 条下级根的根段, 采用 TY-8000 伺服强力机测定 4 种植物侧根分支处的抗折力、抗折强度。结果表明: 柠条、沙柳、沙棘、白沙蒿的侧根分支处均为试验根的薄弱部位, 其抗折能力低于该部位之上的根段, 也低于该部位之下的 2 条下级根; 侧根分支处的抗折力与侧根分支处直径为幂函数正相关, 抗折强度与直径为幂函数负相关, 抗折强度的种间差异为: 柠条(31.47±7.68)MPa>沙柳(17.27±1.90)MPa>沙棘(3.76±1.07)MPa>白沙蒿(2.10±0.28)MPa。

**关键词:**根; 侧根分支处; 抗折特性

**中图分类号:**S 793 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2015)17-0058-04

近几年, 国内外学者将根系的形态学与生物学研究扩展到固土力学方面<sup>[1-2]</sup>。植物根系相当于加筋材料, 与土体形成根-土复合体, 使土体的强度和变形特性得到增强。当根-土复合体受到剪切等外力作用时, 根与土之间发生错动或存在错动的趋势, 这种错动被根土之间的摩阻力抵抗, 使根系受到轴向拉力, 径向折断力、弯曲力等。

目前植物根系固土力学特性的研究报道主要集中在单根抗拉特性, 根-土复合体抗剪特性、根-土界面摩阻特性等。多数学者<sup>[3-5]</sup>得出单根抗拉力随直径的增加而增大, 抗拉强度随直径的增加而减小。BURYLO 等<sup>[6]</sup>、LOADES 等<sup>[7]</sup>、胡宁等<sup>[8]</sup>的研究表明, 含根系土体的抗剪强度高于无根土。邢会文等<sup>[9]</sup>对柠条、沙柳根-土界面摩阻特性的研究表明, 柠条、沙柳根-土界面摩擦系数均大于土-土界面。但是, 上述研究均针对直根段, 对构成根系的侧根分支处的研究仅有该课题组成员 LIU 等<sup>[10]</sup>测定了 3 种植物侧根分支处的抗拉力学特性, 发现侧根分支处的抗拉力、抗拉强度随直径变化趋势与直根一致; 关于根系对径向力的抵抗作用, 除该课题组成员刘玥等<sup>[11]</sup>进行了 2 种植物抗弯特性的研究外, 尚鲜见其它报道。现以 3~4 年生的柠条(*Caragana korshinskii*

Lam)、沙柳(*Salix psammophila* C. wang et Ch. Y. Yang)、沙棘(*Hippophae rhamnoides* Linn.)、白沙蒿(*Artemisia sphaerocephala* Krasch.)的侧根分支处为研究对象, 研究生长旺盛期植物因土体坍塌、开裂等变形时, 侧根分支处对径向折断力的抵抗力, 以期进一步完善植物根系固土的力学机理, 为生态建设植物种的选取提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

8 月于植物生长旺盛期在内蒙古自治区巴彦淖尔市磴口县试验样地, 对 3~4 年柠条、沙柳、沙棘、白沙蒿每种植物随机抽取 20 株, 测量其株高、冠幅、地径, 取各项指标平均值作为该种植株的标准株, 选取与标准株相近的 10 株挖掘试验根系, 将挖掘好的根系置于与自然环境相同条件下, 确保根系的鲜活。

### 1.2 试验方法

**1.2.1 侧根分支处的选取与制备** 试验根均为由上级根通过一个侧根分支处分为 2 条下级根的根段, 由于所研究植物侧根分支处直径小于 1.0 mm、大于 4.5 mm 的根段相对较少, 因此选取侧根分支处直径为 1.0~4.5 mm 的根段进行试验。试验根按分支前根轴线的延长线量取长, 如图 1 所示。将试验根每隔 0.5 mm 为一个径级进行分级, 每径级约选取 20 根左右, 由于侧根分支处横截面不是标准的圆形, 采用游标卡尺每隔 120°量取根径, 取 3 个角度测量的平均值作为侧根分支处的直径。

**第一作者简介:**刘鹏飞(1990-), 女, 内蒙古乌兰察布人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持。E-mail: liupengfei115@163.com.

**责任作者:**刘静(1958-), 女, 博士, 教授, 研究方向为干旱与半干旱地区的水土保持与荒漠化防治。E-mail: ljing58@126.com.

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(51364034)。

**收稿日期:**2015-05-25

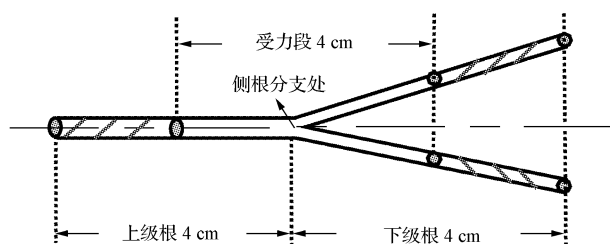


图1 侧根分支段试验根示意图

Fig.1 The diagram of lateral root branch of test roots

1.2.2 侧根分支处抗折力的测定 仪器为 TY-8000 伺服强力机。将侧根分支处上级根与下级根用夹具固定于同一水平面,夹头两端各夹持 2 cm(如图 1 阴影部分所示),使侧根分支处位于夹具中央,即仪器施力点的正下方。以 500 mm/min 的速度下压侧根分支处,直至试

表 1

4 种植物试验根侧根分支处承受径向折断力的破坏统计

Table 1 The destruction statistics about bearing the radial breaking resistance of lateral root branch of four kinds of plants' test roots

植物名称 Plant name	侧根分支处破坏根数 The break number of lateral root branch	侧根分支处破坏根数/有效试验根数 The break number of lateral root branch/ The number of effective test root/%	上、下级根断裂数 The break number of upper and lower straight root	上、下级根断裂数/有效试验根数 The break number of upper and lower straight roots/The number of effective test root/%
柠条 <i>Caragana korshinskii</i>	154	87.50	22	12.50
沙柳 <i>Salix psammophila</i>	167	92.27	14	7.73
沙棘 <i>Hippophae rhamnoides</i>	120	87.59	17	12.41
白沙蒿 <i>Artemisia sphaerocephala</i>	174	88.32	23	11.68

## 2.2 4 种植物侧根分支处抗折特性

2.2.1 4 种植物侧根分支处抗折力 由图 2 可知,4 种植物侧根分支处抗折力与直径呈幂函数正相关,同种植物随侧分支处直径的增加,抗折力均出现递增的趋势。从 4 种植物的回归拟合曲线可以看出,柠条与沙柳侧根分支处抗折力随直径变化的趋势线近似平行,各径级范围内,柠条侧根分支处的抗折力均大于沙柳;当侧根分支处直径小于 2 mm 时,沙棘与白沙蒿侧根分支处抗折力随直径变化的趋势线几乎重合,说明二者侧根分支处的抗折力随直径增加相差不多,当侧根分支处直径大于 2 mm 时,沙棘的拟合曲线逐渐远离白沙蒿,可见随分支处直径增加沙棘侧根分支处的抗折力均较白沙蒿大。柠条侧根分支处直径从 1.06 mm 增至 4.46 mm,侧根分支处抗折力的变化为(62.92±10.87)~(293.60±14.62) N;沙柳侧根分支处直径从 1.25 mm 增至 4.54 mm,侧根分支处抗折力的变化为(29.40±3.15)~(213.99±7.92) N;沙棘侧根分支处直径从 1.02 mm 增至 4.49 mm,侧根分支处抗折力变化为(6.60±1.38)~(43.05±2.23) N;白沙蒿侧根分支处直径从 1.07 mm 增至 4.49 mm,侧根分支处抗折力变化为(3.45±0.42)~(27.13±2.40) N。尤其当直径在 2.50~4.54 mm,抗折力的增加更为明显,柠条、沙柳、沙棘、白沙蒿的增幅为 72.82%、99.93%、121.71%、112.31%,即侧根分支处粗的根系具有较强的

抗折力。记录根的断裂位置,由仪器自动采集极限抗折力。抗折强度为破坏处单位根径上的抗折力,即  $P=4F/\pi D^2$ ,其中,  $P$  为抗折强度(MPa);  $F$  为抗折力(N);  $D$  为侧根分支处直径(mm)。

## 1.3 数据分析

试验数据均采用 Excel、SAS 软件进行处理分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 试验根破坏部位统计

4 种植物试验根侧根分支处在承受径向折断力时,主要存在 3 种破坏情况:由于夹具的挤压造成夹口处根受到破坏,此类数据视为无效数据;侧根分支处上级根或下级根部位,即直根段断裂;侧根分支处被破坏。表 1 表明,4 种植物侧根分支处破坏的根数占有效试验根数的 85%以上,即侧根分支处的抗折力低于上、下级直根。

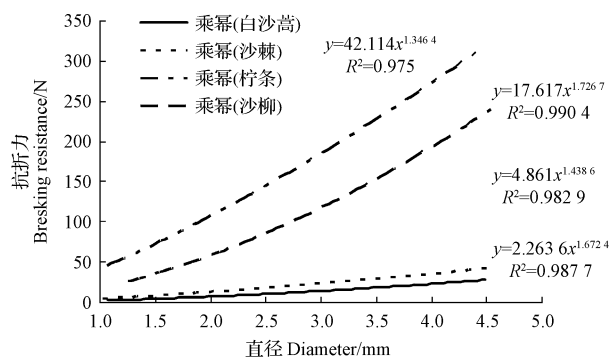


图2 4种植物侧根分支处抗折力与直径的回归拟合曲线

Fig.2 The regression curve between the breaking resistance and diameter of the four kinds of plants' lateral root branch

抗折力。

2.2.2 4 种植物侧根分支处抗折强度 图 3 为侧根分支处直径  $D=1.02\sim 4.54$  mm,4 种植物侧根分支处抗折强度与直径的回归拟合曲线。由图 3 可知,侧根分支处抗折强度与直径呈显著的幂函数负相关。在  $D=1\sim 3$  mm,柠条、沙柳、沙棘、白沙蒿侧根分支处抗折强度随直径的增加下降较快,降幅为:59.22%、14.11%、78.22%、23.66%, $D\geq 3$  mm 时,抗折强度随直径增加逐渐趋于平缓,降幅为:23.28%、16.83%、3.20%、1.90%。当  $D=1.5\sim 2.0$  mm,柠条、沙柳、沙棘、白沙蒿侧根分支处抗折

强度分别为:(36.46±3.68)、(19.83±1.28)、(5.05±0.27)、(2.42±0.16)MPa,可知柠条侧根分支处抗折强度是沙柳的1.84倍,沙棘侧根分支处抗折强度是白沙蒿的2.09倍,沙柳侧根分支处抗折强度是沙棘的3.93倍。4种植物侧根分支处平均抗折强度的种间比较为:柠条(31.47±7.68)MPa>沙柳(17.27±1.90)MPa>沙棘(3.76±1.07)MPa>白沙蒿(2.10±0.28)MPa。

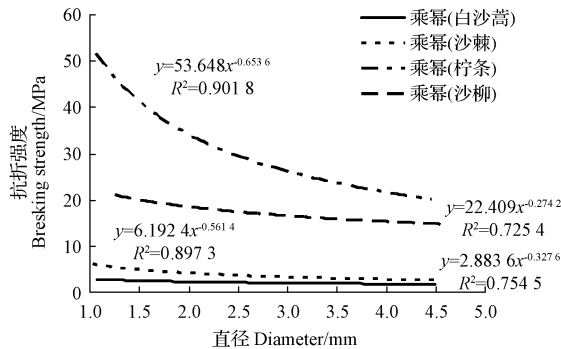


图3 4种植物侧根分支处抗折强度与直径的回归拟合曲线

Fig. 3 The regression curve between the breaking strength and diameter of the four kinds of plants' lateral root branch

### 3 讨论与结论

4种植物侧根分支处抗折力与直径的关系与刘晓敏<sup>[12]</sup>研究的4种植物侧根分支处抗拉力随直径变化趋势一致,均为柠条、沙柳、沙棘、白沙蒿侧根分支处的抗折力、抗拉力均随直径的增加呈幂函数正相关;抗折强度、抗拉强度与直径表现为幂函数负相关。各径级抗折力、抗折强度表现为柠条最大,沙柳次之,沙棘较大,白沙蒿最小;抗拉力、抗拉强度为柠条>沙柳>白沙蒿>沙棘;随侧根分支处直径增加,柠条侧根分支处的抗折力>抗拉力,抗折强度约为抗拉强度的1.13倍;沙柳抗折力、抗拉强度随直径的变化与抗折力、抗折强度随直径变化几乎一致;沙棘与白沙蒿的抗拉力均大于抗折力,抗拉强度约为抗折强度的1.15、3.67倍,且沙棘侧根分支处的抗折力、抗折强度大于白沙蒿,而抗拉力、抗拉强度不及白沙蒿。可见,从植物根系固土角度考虑,当植物受到多种外营力作用时,柠条侧根分支处首先在抗折力作用下破坏,沙柳侧根分支处受到的抗折、抗拉力大小相近,而沙棘与白沙蒿的侧根分支处首先在抗拉力的作用下破坏;4种植物侧根分支处抗折、抗拉力学特性最优的植物种为柠条,苑淑娟等<sup>[13]</sup>对4种植物的单根进行抗拉力学特性研究,也得出同样的结果,由此说明,相对于其它植物种而言,柠条的固土能力较优。柠条、沙柳、沙棘、白沙蒿4种植物侧根分支处为试验根的薄弱部位,其抗折能力低于上、下级直根。

4种植物侧根分支处的抗折力与抗拉力均随直径的增加呈幂函数正相关,侧根分支处直径在2.50~4.54 mm,抗折力的增幅为72.82%、99.93%、121.68%、112.28%。

4种植物侧根分支处抗折强度、抗拉强度与直径表现为幂函数负相关。侧根分支处直径范围为1.02~4.54 mm,抗折强度的降幅为118.23%、37.81%、86.25%、35.63%。抗折强度的种间差异仍为柠条(31.47±7.68)MPa>沙柳(17.27±1.90)MPa>沙棘(3.76±1.07)MPa>白沙蒿(2.10±0.28)MPa。

柠条抗折、抗拉力学特性的差异表现为抗折力>抗拉力、抗折强度>抗拉强度;沙柳抗折力与抗拉力、抗折强度与抗拉强度相差不大;沙棘、白沙蒿的抗拉力>抗折力、抗拉强度>抗折强度。

### 参考文献

- [1] ABDI E, MAJNOUNIAN B, GENET M, et al. Quantifying the effects of root reinforcement of Persian Ironwood (*Parrotia persica*) on slope stability; a case study, Hillslope of Hyrcanian forests, northern Iran[J]. Ecological Engineering, 2010, 36: 1409-1416.
- [2] 吕春娟, 陈丽华, 宋恒川, 等. 植物根系固坡力学机理研究进展[J]. 亚热带水土保持, 2011, 23(3): 21-28.
- [3] 李长喧, 陈丽华, 周娟, 等. 蒙古栎根系单根抗拉力学特性[J]. 水土保持通报, 2014, 34(4): 232-235.
- [4] 李谦, 周本智, 安艳飞, 等. 绿竹根系分布及生物力学性质[J]. 应用生态学报, 2014, 25(5): 1320-1326.
- [5] 惠尚, 张云伟, 刘晶, 等. 丛生竹根系抗拉力学特性[J]. 山地学报, 2013, 31(1): 65-70.
- [6] BURYLO M, HUDEK C, REY F. Soil reinforcement by the roots of six dominant species on eroded mountainous marly slopes (Southern Alps, France) [J]. Catena, 2011, 84: 70-78.
- [7] LOADES K W, BENGOUGH A G, BRANSBY M F, et al. Planting density influence on fibrous root reinforcement of soils[J]. Ecological Engineering, 2010, 36: 276-284.
- [8] 胡宁, 刘静, 姚喜军, 等. 快剪条件下柠条根对3种土壤土工特性的影响机制研究[J]. 水土保持学报, 2014, 28(1): 106-111.
- [9] 邢会文, 刘静, 王林和, 等. 柠条、沙柳根与土及土与土界面摩擦特性[J]. 摩擦学报, 2010, 30(1): 87-91.
- [10] LIU X M, LIU J, SUN X, et al. Study on the lateral root branch tensile mechanical characteristics of three kinds of plants at exuberant growth period [C]//CBEES. Proceedings of 2012 4th International Conference on Agriculture and Animal Science. CBEES, 2012: 5.
- [11] 刘玥, 刘静, 张格, 等. 二种植物同径级直段根和侧根分支处抗弯力学特性的研究[J]. 北方园艺, 2014(19): 16-19.
- [12] 刘晓敏. 5种植物侧根分支处抗拉力学特性的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2013.
- [13] 苑淑娟, 牛国权, 刘静, 等. 瞬时拉力下两个生长期4种植物单根抗拉力与抗拉强度的研究[J]. 水土保持通报, 2009, 29(5): 21-25.

# 外源水杨酸对低温胁迫下狭叶红景天 幼苗生理及膜伤害的影响

何淑玲, 马令法, 杨敬军, 常毓巍

(甘肃民族师范学院 高寒生态研究所, 甘肃 合作 747000)

**摘要:**以狭叶红景天幼苗为试材,在 0℃低温条件下,研究外源 SA 对狭叶红景天幼苗过氧化氢酶(CAT)、超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)3 种抗氧化酶活性、MDA 含量以及膜伤害的影响,探讨外源 SA 对低温胁迫下红景天幼苗生理及膜伤害的影响。结果表明:在 0℃低温胁迫条件下,不同浓度的外源 SA 总体上均使红景天幼苗叶片 CAT、POD、SOD 活性不同程度升高,使叶片 MDA 含量不同程度降低;使叶绿体膜  $\text{Ca}^{2+}$ -ATP 活性、 $\text{Mg}^{2+}$ -ATP 活性不同程度增强。在低温胁迫下,外源 SA 通过提高抗氧化酶活性、抗氧化物质含量及渗透调节物质含量,减少了膜脂过氧化产物 MDA 的产生,叶绿体膜  $\text{Ca}^{2+}$ -ATP 活性、 $\text{Mg}^{2+}$ -ATP 活性的增强,减轻细胞膜的损伤,提高了狭叶红景天幼苗耐低温胁迫的能力;提高狭叶红景天耐寒力的外源物质 SA 适宜浓度为 0.1~0.3 mg/L,SA 的最适浓度为 0.3 mg/L。

**关键词:**狭叶红景天;低温胁迫;外源物质;膜伤害;生理条件

**中图分类号:**R 282.71 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2015)17-0061-05

狭叶红景天(*Rhodiola kirilowii* (Regel) Maxim)为名贵藏药,生长在海拔 3 000~4 500 m 的雪域高原,生长

**第一作者简介:**何淑玲(1975-),女,博士,副教授,研究方向为药用植物资源与利用。E-mail:heshuling2@163.com.

**基金项目:**国家星火计划资助项目(2010GA860031);甘肃民族师范学院院长基金资助项目(14-16,14-17)。

**收稿日期:**2015-06-02

环境高寒、低氧、紫外线照射强烈。藏药名“嘎都儿”,根及根茎或全草入药,主要用于治瘟疫时疫、肺炎、肺吐血、腹泻、发烧、脉病、腰痛跌、打损伤、崩漏,月经不调等病。课题组在参加全国第四次中药资源普查-甘肃省夏河县、合作市的普查及后续对青藏高原东缘地区药用植物进行调查时发现该区红景天属(*Rhodiola*)植物已濒临灭绝,仅有狭叶红景天尚存野生种,目前药品市场主要

## Study on Breaking Resistance Characteristics of Four Kinds of Plants' Lateral Root Branch During the Vigorous Growth Period

LIU Pengfei<sup>1</sup>, LIU Jing<sup>1</sup>, ZHANG Ge<sup>2</sup>, ZHANG Xin<sup>3</sup>, ZHU Honghui<sup>1</sup>, LI Youfang<sup>1</sup>

(1. Institute of Ecological Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010010; 2. Experimental Center for Desert Forestry, Chinese Academy of Forestry, Dengkou, Inner Mongolia 015200; 3. Institute of Water Resources for Pasturing Area of the Ministry of Water Resources, Hohhot, Inner Mongolia 010010)

**Abstract:** At the vigorous growth period, with the 3—4 year-old *Caragana korshinskii*, *Salix psammophila*, *Hippophae rhamnoides* and *Artemisia sphaerocephala* as the research objects, used the TianYuan-8000 test instrument to test the breaking resistance and the breaking strength of the four plants. The test roots both were that the upper straight root branched two lower straight roots through the lateral root branch. The results showed that the lateral root branch of four kinds of plants all were the weak part of test roots, and its breaking resistance was not as good as the upper straight root and the two lower straight roots. The breaking resistance and the diameter of lateral root branch were the positive correlation of power function, and the breaking strength and diameter were the negative correlation of power function. The breaking strength of the four kinds of plants compared: *Caragana korshinskii* ( $31.47 \pm 7.68$ ) MPa > *Salix psammophila* ( $17.27 \pm 1.90$ ) MPa > *Hippophae rhamnoides* ( $3.76 \pm 1.07$ ) MPa > *Artemisia sphaerocephala* ( $2.10 \pm 0.28$ ) MPa.

**Keywords:** roots; lateral root branch; breaking resistance characteristics