

# 加载速度及含水率对四种植物直根抗折强度的影响

朱宏慧<sup>1</sup>, 刘静<sup>1</sup>, 张欣<sup>2</sup>, 苏禹<sup>1</sup>, 王晨嘉<sup>1</sup>, 李雪松<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. 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年生柠条、沙柳、沙棘、白沙蒿为研究对象,采用TY8000系列伺服控制材料试验机,研究加载速度及土壤含水率对直根抗折强度的影响。结果表明:4种植物直根的抗折强度与加载速度呈正相关,1.5~2.0 mm及3.0~3.5 mm 2个径级的直根在承受瞬时折断力(加载速度500 mm/min和860 mm/min)时的抗折强度显著高于相同径级的根在缓慢折断力(加载速度10 mm/min)时的抗折强度,其中加载速度500 mm/min时2个径级直根抗折强度为柠条((58.30±7.45)MPa,(49.21±3.45)MPa)>沙柳((23.21±1.88)MPa,(19.12±2.95)MPa)>沙棘((7.79±1.06)MPa,(6.61±1.05)MPa)>白沙蒿((5.51±0.66)MPa,(4.43±0.38)MPa),相同径级的根在缓慢折断力时的抗折强度分别为上述强度的87.1%、83.7%、82.8%、86.8%、79.2%、81.8%、90.0%、73.6%。4种植物直根抗折强度随着土壤和根系含水率的增加呈减小趋势,2.0~2.5 mm的直根在土壤干旱(含水率为0.0%)时的抗折强度为柠条((60.05±7.00)MPa)>沙柳((25.99±2.88)MPa)>沙棘((8.52±1.17)MPa)>白沙蒿((5.85±0.63)MPa),在土壤含水率饱和(含水率为25.6%)时的抗折强度分别为上述强度79.1%、73.0%、74.3%、65.1%。

**关键词:**加载速度;土壤含水率;根系含水率;抗折强度

**中图分类号:**S 722.3<sup>+</sup>6 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2016)06-0070-04

采用种植植物等方法固土抗蚀、防护边坡是一项积极、长远的措施。植物根系具有良好的固土抗蚀作用,植物根系在土壤中的交织穿插、纵横交错,限制了土体的滑动与位移,有效地增强了土体的稳定性<sup>[1-4]</sup>。很多学者认为,影响根系固土的力学因素主要有植物单根的抗拉特性<sup>[5]</sup>、抗弯特性<sup>[6]</sup>、根-土复合体抗剪特性<sup>[7-8]</sup>、根-土界面摩阻特性<sup>[9]</sup>等。当土体发生坍塌、错动、变形时,根系与土壤发生摩擦并受到轴向拉力,土壤与根系共同抵抗剪切力,还会受径向力的作用,存在折断的可能。关于根系抗折特性的研究,刘鹏飞等<sup>[10]</sup>对4种植物侧根分支处抗折特性进行了研究报道。苑淑娟<sup>[11]</sup>与张永亮<sup>[12]</sup>报道,不同加载速度和土壤水分条件下抗拉力学特性不同,小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla* Lam.)、沙地柏(*Sabina vulgaris* Ant.)、沙柳(*Salix psammophila* C. wang et Ch. Y. Yang)、白沙蒿(*Artemisia sphaerocephala*

Krasch.)、沙棘(*Hippophae rhamnoides* Linn.)单根抗拉强度均随加载速度增加呈增大的趋势,随着土壤含水率的增加呈下降的趋势。而加载速度和水分状况对植物直根抗折特性的影响尚鲜见报道。该研究以3~4年生柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii* Kom.)、沙柳、沙棘、白沙蒿的直根为研究对象,模拟当土体坍塌、错动或位移时,裂缝两端的根固持于土体,而裂缝处的根因抵抗径向外力被破坏的状态,研究不同速度的折断力及含水率对直根抗折强度的影响,以期进一步完善植物根系固土力学机制,并为水土流失区植被建设树种的选择提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验区位于内蒙古巴彦淖尔市磴口县。以3~4年生柠条锦鸡儿(*Caragana*)、沙柳(*Salix*)、沙棘(*Hippophae*)、白沙蒿(*Artemisia*)的直根为研究对象,2014年5月(根系生长初期)在每种植物的样地随机选取30株待测植物,测量株高、冠幅和地径3个指标,选取与各指标均值相近的植株作为标准株,试验根均取自标准株。将挖掘的试验根置于4℃湿沙土覆盖的环境下保存。选择D<sub>1</sub>、D<sub>2</sub>、D<sub>3</sub>等3个直径为同一径级的根作为试验根,试验根总长不小于80 mm,其中试验根段D<sub>1</sub>D<sub>3</sub>段为40 mm(图1)。

**第一作者简介:**朱宏慧(1990-),男,山东菏泽人,硕士研究生,研究方向为干旱及半干旱地区水土保持与荒漠化防治。E-mail:654965154@qq.com.

**责任作者:**刘静(1958-),女,博士,教授,研究方向为干旱及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:**2015-12-18

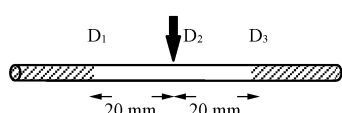


图1 试验根尺寸

Fig. 1 The size of straight root

## 1.2 试验方法

1.2.1 加载速度 每种植物分别选取 1.5~2.0 mm 和 3.0~3.5 mm 2 个径级的直根作为试验根。每个径级取 90 根左右,平均分成 3 组,分别以 10、500、860 mm/min 的加载速度进行试验。10 mm/min 为模拟根缓慢受力时的速度,500 mm/min 和 860 mm/min 为模拟根瞬时受力时的速度。

1.2.2 土壤含水率 包括该试验组在内的很多学者研究表明,不同土壤水分环境下的根系力学特性存在差异<sup>[11-12]</sup>。对每种植物均选取 2.0~2.5 mm 的直根 120 根左右,平均分成 4 组,分别置于含水率为 0.0%、6.8% (饱和度 26.6%)、16.8% (饱和度 65.6%) 和 25.6% (饱和含水率) 的土壤中保存 24 h。含水率为 0.0% 是模拟土壤极度干旱状态,而饱和含水率是模拟暴雨状态。该部分试验加载速度为 500 mm/min。

## 1.3 项目测定

试验使用 TY8000 系列伺服控制材料试验机以及自制夹具,采用两端固定式三点弯曲法研究直根的抗折特性。夹持点位于根段中点往外 20 mm 处(图 1 阴影部分),施力点位于根段中点(D<sub>2</sub>),压头位于施力点上方,与试验根垂直。设置试验机和联机软件的相关参数,试验机自动记录力-位移关系曲线图。抗折强度为破坏处单位根横截面积上的抗折力,即  $P=4F/\pi D^2$ ,其中,  $P$  为抗折强度 (MPa);  $F$  为抗折力(N);  $D$  为折断点直径(mm)。

## 1.4 数据分析

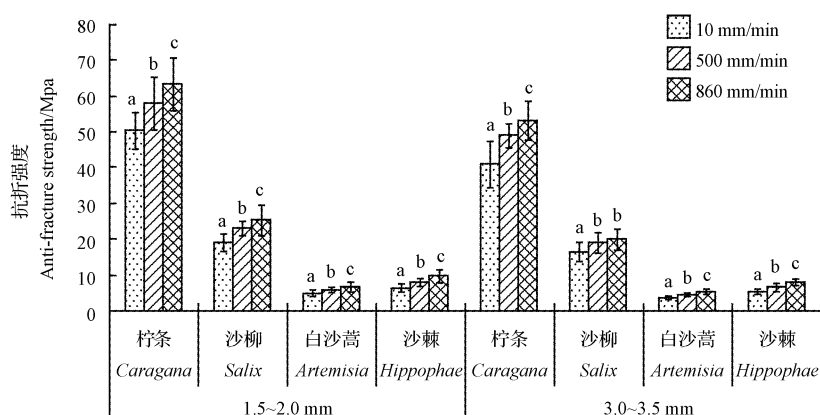
试验数据采用 SAS 9.0 软件进行分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 加载速度对 4 种植物直根抗折强度的影响

由图 2 可知,4 种植物 2 个径级的抗折强度均为 860 mm/min 时最大,其次为 500 mm/min 时,10 mm/min 时最小。其中,直径 1.5~2.0 mm 的直根在 3 个加载速度间的抗折强度均差异显著;当直径达到 3.0~3.5 mm 时,沙柳直根在加载速度 10 mm/min 时的抗折强度与加载速度 500、860 mm/min 时抗折强度均差异显著,但加载速度 500 mm/min 和 860 mm/min 时抗折强度差异不显著,柠条、沙棘、白沙蒿各加载速度间抗折强度均差异显著。

随着加载速率的增大,4 种植物直根在 2 个径级内的抗折强度均呈增大趋势。其中,柠条、沙柳、白沙蒿、沙棘在 1.5~2.0 mm 径级范围,加载速度从 10 mm/min 增大到 500 mm/min,抗折强度分别从  $(50.76 \pm 5.2)$ 、 $(19.22 \pm 2.38)$ 、 $(4.96 \pm 1)$ 、 $(6.17 \pm 1.19)$  MPa 增大到  $(58.30 \pm 7.45)$ 、 $(23.21 \pm 1.88)$ 、 $(5.51 \pm 0.66)$ 、 $(7.79 \pm 1.06)$  MPa,分别增长了 14.9%、20.8%、11.1%、26.3%;当直径达到 3.0~3.5 mm 时,柠条、沙柳、白沙蒿、沙棘加载速度从 10 mm/min 增大到 500 mm/min,抗折强度分别从  $(41.17 \pm 6.41)$ 、 $(16.6 \pm 2.73)$ 、 $(3.26 \pm 0.56)$ 、 $(5.41 \pm 0.69)$  MPa 增大到  $(49.21 \pm 3.45)$ 、 $(19.12 \pm 2.95)$ 、 $(4.43 \pm 0.38)$ 、 $(6.61 \pm 1.05)$  MPa,分别增长了 19.5%、15.2%、35.9%、22.2%。而加载速度从 500 mm/min 增大到 860 mm/min,柠条、沙柳、白沙蒿、沙棘在 1.5~2.0 mm 和 3.0~3.5 mm 2 个径级的抗折强度分别增长了 (9.4%、8.6%)、(10.0%、4.8%)、(9.3%、20.3%)、(23.9%、17.4%)。随着加载速度从 10 mm/min 增大到



注:同径级同种植物不同加载速度间,字母不同表示抗折强度差异显著( $P < 0.05$ )。

Notes: Different letters indicated significant difference among loading rate of the same diameter and plants ( $P < 0.05$ ).

图2 4种植物直根在不同加载速度下的平均抗折强度

Fig. 2 The anti-fracture strength of 4 kinds of plants' straight roots under different loading rate

860 mm/min, 在 1.5~2.0 mm 径级范围内, 4 种植物中沙棘的抗折强度增长率最大, 白沙蒿增长率最小, 在 3.0~3.5 mm 径级范围内, 白沙蒿的抗折强度增长率最大, 沙柳增长率最小。

## 2.2 含水率对 4 种植物直根抗折强度的影响

从图 3 可以看出, 随着土壤含水率的增大, 4 种植物直根根系含水率均呈升高趋势, 抗折强度呈减小趋势。对 4 种植物 2.0~2.5 mm 直根不同土壤含水率下的抗折强度做 Duncan 检验 ( $\alpha=0.05$ ) 显示, 柠条直根仅 0.0% 和 6.8% 2 个土壤含水率下抗折强度差异不显著; 沙柳直根仅 6.8% 和 16.8% 2 个土壤含水率下抗折强度差异不显著; 沙棘直根在相邻土壤含水率下的抗折强度无显著性差异; 而白沙蒿直根在 4 个土壤含水率下的抗折强度均存在显著性差异。

随着土壤含水率从 0.0% 升高到 25.6%, 柠条、沙柳、白沙蒿、沙棘的直根平均含水率增长量分别为 12.8%、14.9%、19.0%、9.9%, 抗折强度从 (60.05±7.00)、(25.99±2.88)、(5.85±0.63)、(8.52±1.17) MPa 降低到 (47.51±5.80)、(18.97±2.75)、(6.33±1.20)、(3.81±0.62) MPa。其中白沙蒿的直根平均含水率增长率 (43.2%) 最大, 其次为沙柳 (30.1%)、柠条 (26.6%)、沙棘 (19.4%), 抗折强度减小率最大的为白沙蒿 (34.9%), 其次为沙柳 (27.0%)、沙棘 (25.7%), 柠条减小率 (20.9%) 最小。可见, 白沙蒿根系含水率及抗折强度受土壤含水率变化影响最大, 柠条和沙棘受土壤含水率变化影响较小。

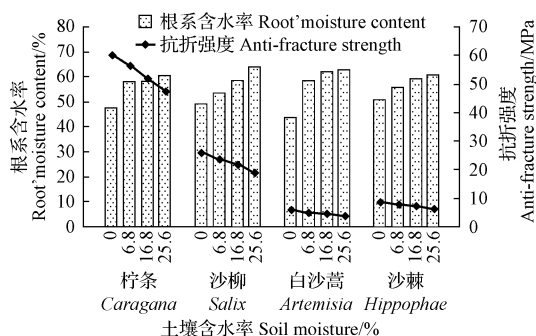


图 3 4 种植物直根在不同土壤含水率土中浸埋 24 h 后的根系含水率和抗折强度

Fig. 3 Roots' moisture content and anti-fracture strength of the roots immersed in different moisture soils for 24 hours

## 3 讨论

试验所测得的 2 个径级的直根抗折强度均随加载速度的增大而增大, 加载速度从 10 mm/min 增大到 500 mm/min 和 860 mm/min, 柠条、沙柳、白沙蒿、沙棘在 1.5~2.0 mm 和 3.0~3.5 mm 2 个径级的抗折强度

均显著的提高, 说明与缓慢受折力变形 (10 mm/min) 相比, 4 种植物在承受瞬时折力 (500、860 mm/min) 时能表现出更好的抗折强度。这与苑淑娟<sup>[11]</sup>、张永亮<sup>[12]</sup> 关于抗拉强度与加载速度的规律一致。这可能与根系的解剖结构有关<sup>[13]</sup>, 根在承受径向折力时, 受力点一侧受压而另一侧受拉, 由于根横断面上木质部与韧皮部的纤维分布不均匀, 在加载速度 10 mm/min 时, 受拉侧纤维会被一点点拉断, 该断面受力面积逐渐减小, 产生应力集中, 表现出的抗折强度变小; 而在 500 mm/min 和 860 mm/min 加载速度下, 由于速度较快, 应力集中未完全体现前达到极限强度, 有更多的纤维被同时断裂, 表现出的抗折强度较大, 这种现象在加载速度 860 mm/min 时表现的更明显。

4 种植物直根平均抗折强度均随着土壤及根系含水率增加而减小。YUTAKA 等<sup>[14]</sup> 和刘杏娥等<sup>[15]</sup> 认为, 水对木材微纤丝起着润胀和软化作用, 水分会破坏纤维素、半纤维素和木质素复合物中的部分氢键, 使得微纤丝运动更充分, 细胞壁趋于软化。当根系含水率增大时, 微纤丝摩擦减小, 同时木质素软化点降低使得根系刚度减小, 造成的抗折强度降低。因此, 在土壤干旱时, 植物根系含水率较低, 表现出的直根抗折强度较强; 随着降雨的产生, 土壤含水率逐渐增加, 植物根系吸水, 根系含水率增大导致其表现出的抗折强度减小, 此时根变得更易被折断。

## 4 结论

柠条、沙柳、沙棘、白沙蒿 2 个径级的直根抗折强度均随加载速度的增加而增大。1.5~2.0 mm 及 3.0~3.5 mm 2 个径级的直根在承受瞬时折断力 (加载速度 500、860 mm/min) 时的抗折强度, 显著高于相同径级的根在缓慢折断力 (加载速度 10 mm/min) 时的抗折强度。

4 种植物直根抗折强度与土壤及根系含水率呈负相关关系。在干旱时期, 干旱土壤中的根系含水率较低, 直根抵抗折断的能力较强; 在暴雨时期, 湿润土壤中的根系含水率增大, 其表现出的抗折强度变小。

## 参考文献

- [1] POLLEN-BANKHEAD N, SIMON A, THOMAS R E. The reinforcement of soil by roots: recent advances and directions for future research [M]//SHROODER J. Treatise on geomorphology, volume 12; ecogeomorphology. New York: Academic Press, 2013: 107-124.
- [2] ABDOLHOSSEIN K, FAISAL H A, NORMANIZA O. Contribution of the root to slope stability[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2012, 30(2): 277-288.
- [3] ZHANG C, JIANG J, MA J, et al. Evaluating soil reinforcement by plant roots using artificial neural networks[J]. Soil Use and Management, 2015, 31(3): 408-416.
- [4] 刘福全, 刘静, 姚喜军, 等. 根系固土主导力学因素初探与差异性评

价[J]. 生态学报, 2015(19):1-11.

[5] ZHANG C B, CHEN L H, JIANG J, et al. Effects of gauge length and strain rate on the tensile strength of tree roots[J]. Trees, 2012(26):1577-1584.

[6] 刘玥, 刘静, 张格, 等. 二种植物同根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.

[7] YAO X J, WANG L H, LIU J, et al. Biomechanics and utility of shallow soil fixation by *Sabina vulgaris* Ant. roots in arid and semiarid soils[J]. Sensors and Transducers, 2014, 67(3):129-134.

[8] 姚喜军, 王林和, 刘静, 等. 3种植物单根对土体残余抗剪强度影响的研究[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(2):110-114.

[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的研究[J]. 摩擦学报, 2010, 30(1):87-91.

[10] 刘鹏飞, 刘静, 张格, 等. 四种植物生长旺盛期侧根分支处抗折特性研究[J]. 北方园艺, 2015(17):58-61.

[11] 苑淑娟. 4种植物单根抗拉力学特性研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2010.

[12] 张永亮. 沙棘根系生物力学特性研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2011.

[13] 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.

[14] YUTAKA I, KAZUTOSHI A, MASATO M, et al. Physical and mechanical properties of wood after moisture conditioning[J]. The Japan Wood Research Society, 2001, 47(3):185-191.

[15] 刘杏娥, 吕文华, 郑雅娟. 水分对棕榈藤材弯曲性能的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2014, 41(6):934-938.

## Effect of Loading Rate and Moisture Content on the Anti-fracture Strength of Straight Roots of Four Plant Species

ZHU Honghui<sup>1</sup>, LIU Jing<sup>1</sup>, ZHANG Xin<sup>2</sup>, SU Yu<sup>1</sup>, WANG Chenjia<sup>1</sup>, LI Xuesong<sup>1</sup>

(1. Institute of Ecological Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010010; 2. Institute of Water Resource for Pasturing Area of the Ministry of Water Resources, Hohhot, Inner Mongolia 010010)

**Abstract:** The anti-fracture strength of straight roots of four plant species were measured by the Multifunctional Electronic Pull Test Machine of TY8000 in vigorous loading rates and vigorous moisture content seasons. The four plant species were the vegetation species of *Caragana korshinskii*, *Salix psammophila*, *Artemisia sphaerocephala* and *Hippophae rhamnoides*. For the four plant species, the roots were selected from the corresponding plant age of 3—4-year-old. The results showed that the anti-fracture strength of straight roots of four plant species were positively correlated with the loading rate. The anti-fracture strength of the root under instantaneous breaking force (the loading rate of 500 mm/min and 860 mm/min) was significantly higher than that of the root under the slow breaking force (the loading rate of 10 mm/min) with the same diameter. Under the loading rate of 500 mm/min, the anti-fracture strength of 1.5—2.0 mm and 3.0—3.5 mm diameter class roots followed the sequence of *Caragana* ((58.30±7.45)MPa, (49.21±3.45)MPa) > *Salix* ((23.21±1.88)MPa, (19.12±2.95)MPa) > *Hippophae* ((7.79±1.06)MPa, (6.61±1.05)MPa) > *Artemisia* ((5.51±0.66)MPa, (4.43±0.38)MPa); comparing with the strength of the roots mentioned above, the anti-fracture strength of the same diameter class occupied 87.1% and 83.7% for *Caragana*, 82.8% and 86.8% for *Salix*, 79.2% and 81.8% for *Hippophae*, 90.0% and 73.6% for *Artemisia* under the loading rate of 10 mm/min. With the increase of soil moisture content, the root moisture content of four plant species increased and the anti-fracture strength had a tendency to reduce. The anti-fracture strength of 2.0—2.5 mm straight roots for the four species followed the sequence of *Caragana* ((60.05±7.00)MPa) > *Salix* ((25.99±2.88)MPa) > *Hippophae* ((8.52±1.17)MPa) > *Artemisia* ((5.85±0.63)MPa) under drying soil (soil moisture content was 0.0%). The anti-fracture strength of the same diameter class occupied 79.1% for *Caragana*, 73.0% for *Salix*, 74.3% for *Hippophae* and 65.1% for *Artemisia*.

**Keywords:** loading rate; soil moisture content; roots moisture content; anti-fracture strength