

# 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

苑淑娟<sup>1</sup>, 牛国权<sup>1</sup>, 刘静<sup>1</sup>, 张欣<sup>2</sup>, 邢会文<sup>1</sup>, 姚喜军<sup>1</sup>

(1. 内蒙古农业大学, 内蒙古 呼和浩特 010018; 2. 水利部牧区水利科学研究所, 内蒙古 呼和浩特 010010)

**摘要:** 研究 3~4 年生柠条、沙柳、沙地柏和白沙蒿的单根(根径为 0.3~3 mm)在两个生长时期内瞬时大风作用下的抗拉力和平均抗拉强度。结果表明,在生长季初期(5月初)和旺盛生长期(8月中旬),4 种植物根系的单根抗拉力与直径均呈幂函数正相关关系;抗拉力和平均抗拉强度均表现为柠条>沙柳>沙地柏>白沙蒿;沙柳、沙地柏、白沙蒿在生长季初期的抗拉力和平均抗拉强度大于旺盛生长期,柠条反之。

**关键词:** 植物根系; 抗拉力; 抗拉强度

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2009)05-0021-05

中图分类号: S781.25

## Instantaneous Anti-tension and Tensile Strength of Single Root of Four Plant Species in Two Growth Periods

YUAN Shu-juan<sup>1</sup>, NIU Guo-quan<sup>1</sup>, LIU Jing<sup>1</sup>, ZHANG Xin<sup>2</sup>, XING Hu-wen<sup>1</sup>, YAO Xi-jun<sup>1</sup>

(1. Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China;

2. Institute of Water Resources of Pastoral Area, Ministry of Water Resources, Hohhot, Inner Mongolia 010010, China)

**Abstract:** Anti-tension and tensile strength of single root (the diameter range of roots is between 0.3 and 3 mm) under momentary gale were determined. Plants studied were *Caragana microphylla* Lam, *Salix psammophila* C. Wang et Ch. Y. Yang, *Sabina vulgaris* Ant., and *Artemisia sphaerocephala* Krasch., which were 3~4 years old. The function of momentary gale was simulated by instantaneous tension. Results show that in the early growth period (early May) and the vigorous growth period (mid-August), anti-tension of four kinds of single root shows a positive exponential relation to diameter. The plants, in terms of anti-tension and average tensile strength, are ranged in the order of *Caragana microphylla* Lam > *Salix psammophila* C. Wang et Ch. Y. Yang > *Sabina vulgaris* Ant. > *Artemisia sphaerocephala* Krasch. Anti-tension and average tensile strength of single root in the early growth period is greater than that in the vigorous growth period except *Caragana microphylla* Lam.

**Keywords:** plant root; anti-tension; tensile strength

根系是植物长期演化过程中适应陆生生活的产物,是植物直接与土壤接触的器官。根系在参与土壤中物质循环和能量流动两大生态过程的同时,还具有支撑植物体与固持土体的重要作用。在人工恢复生态,防治水土流失,提高土壤抗冲性的工作中,利用生物软措施代替或部分代替硬性的工程措施,根系的作用显得特别重要。李勇等<sup>[1]</sup>对植物根系与土壤抗冲性进行了系统的研究,认为植物根系提高土壤抗冲性的机制主要是根系提高土壤抗冲力,增进土壤渗透性

及建造抗冲性土体构型的物理性质。因此,植物根系的固土能力是植物措施充分发挥的基础,而根系的力学特性又是反映其固土能力的重要指标。在根系固土力学性能的研究领域,单根抗拉特性是根系固土力学性能的主要指标之一,在一定程度上可由单根的抗拉力(单根轴向极限抗拉力)和抗拉强度(单根极限抗拉强度)来反映单根抗拉特性。

目前,国内外学者对于单根抗拉力和抗拉强度已有大量的研究报道。阿部和时、岩元贤<sup>[2]</sup>、杨维西<sup>[3]</sup>

收稿日期: 2008-09-01

修回日期: 2009-03-25

资助项目: 国家自然科学基金项目“采煤塌陷区植物固土抗蚀生物力学特性的研究”(90610008); 水利厅科技项目“风水复合侵蚀下几种植物固土抗蚀生物力学特性的研究”

作者简介: 苑淑娟(1983—),女(汉族),内蒙古赤峰市人,在读硕士,主要研究方向为水土保持。E-mail: yuanshujuan-2008@163.com。

作者简介: 刘静(1958—),女(汉族),湖北省钟祥市人,博士,教授,研究方向为干旱、半干旱地区的水土保持与荒漠化防治。E-mail: ljing58@126.com。

等早在 20 世纪 80 年代对日本柳杉、北美香柏、杜梨、刺槐、山杏等树木根系抗拉力进行了测定, 结果表明, 根系抗拉力与直径呈显著的幂函数正相关关系; 周跃<sup>[4]</sup>、朱清科<sup>[5]</sup>等对西南地区松属侧根、贡嘎山地区峨眉冷杉和冬瓜杨根系抗拉力的研究表明, 根系最大抗拉力与直径亦呈正相关关系; 史敏华<sup>[6]</sup>、杨永红<sup>[7]</sup>等人的研究结果也与其相似。Genet<sup>[8]</sup>、Operstein<sup>[9]</sup>等对松树和栗树等木本植物根系进行研究, 结果表明根系极限抗拉强度与直径呈显著负相关关系, 与根纤维素含量呈正相关关系; Bischetti<sup>[10]</sup>、Mattie<sup>[11]</sup>等在研究了杞柳、黄花柳、绿赤杨、欧洲落叶松等乔灌木根系后, 均得出了单根抗拉强度和直径成反比的结论。杨永红<sup>[12]</sup>研究的苦刺、车桑子、合欢、桉树根系的抗拉强度与直径呈幂函数负相关关系。大多数学者对于抗拉强度的研究结果均表现为抗拉强度与直径呈负相关关系, 但是田佳等<sup>[13]</sup>对高羊茅、多年生黑麦草等草本植物根系的力学特性进行了研究, 得出所研究草本植物根的抗拉强度与直径成正相关关系。此外, 相关研究者也提出了所研究植物根系的抗拉强度指标, 例如, 银槭根系的平均抗拉强度为 15~30 MPa, 西铁杉 27 MPa, 越桔 10 MPa, 大麦 15~37 MPa, 香根草 85 MPa, 假俭草 27.3 MPa, 白三叶 24.6 MPa, 莎草 24.5 MPa, 宜安草 19.7 MPa, 百喜草 19.23 MPa, 马尼拉草 17.5 MPa, 狗牙根 13.45 MPa, 地衣仅 2~7 kPa<sup>[14]</sup>。现有的研究表明, 不同植物的生物学性质不同, 导致其生物力学特性不同, 根系的抗拉力、抗拉强度也不同, 随根径变化的趋势亦不同, 因此, 有必要对用于水土保持的主要植物进行研究。本文以鄂尔多斯地区 4 种水土保持植物根系为研究对象, 在根系分布特性研究的基础上, 模拟瞬时大风作用下根系受拉断裂状态, 研究根系抗拉力、抗拉强度, 以及根径、生长时期对根系抗拉力学特性的影响, 比较 4 种植物根系固土抗蚀力学性能差异, 为优良水土保持植物的选择提供基础力学数据。

## 1 试验区概况

研究区位于内蒙古鄂尔多斯市伊金霍洛旗, 属神华集团神东煤炭公司采煤塌陷区, 是毛乌素沙地的东南边缘, 研究区中心地理坐标为 110°07' E, 39°22' N, 属于温带干旱半干旱大陆性季风气候, 年平均温度 7.3 °C, 多年平均降水量约 400 mm, 一年的降水主要集中在 7—9 月, 约占全年降水量的 66.8%, 且多以暴雨的形式出现。秋末和冬春盛行西北风, 多年平均风速 3.6 m/s, 年均大风日数 42.2 d, 年均沙尘暴 17~26 d。成土母质主要为残积物和风积物(风成沙与

风成黄土), 土壤机械组成粗, 砂粒含量多, 土质疏松, 易遭受流水侵蚀和风蚀。

## 2 试验方案

### 2.1 试验材料选取

在试验区内, 选择 3~4 年生生长良好, 分布均匀的柠条(*Caragana microphylla* Lam)、沙柳(*Salix psammophila* C. Wang et Ch. Y. Yang)、沙地柏(*Sabina vulgaris* Ant.)、白沙蒿(*Artemisia sphaerocephala* Krasch.) 样地, 每种植物随机抽取 20 株, 对每株植物的株高、地径、冠幅重复测量 3 次, 取各指标的均值作为标准株的选择依据。标准株根系采用整株挖掘法取样, 柠条、沙柳和白沙蒿分别以植株为中心, 在距植株 2 m 的圆周处开挖, 开挖深度约为 2 m; 沙地柏在距植株 1 m 的圆周处开挖, 开挖深度约为 1 m。取样完毕, 将根系置于与生长环境相似的湿沙中低温保存, 带回实验室后, 放在培养箱中(定温定湿)保存, 以保持根的鲜活性, 尽快完成试验。采样时间为生长季初期(5月初)和旺盛生长期(8月中旬)。

### 2.2 试样制备

将待测植物根系以 0.1 mm 为一个径级进行分级, 每一径级取 30 根做重复试验。分级的根系从中间部分量取 6 cm 作为拉力试验材料, 在试验材料上每隔 1.5 cm 作一个标记(共做 5 个标记)。在试验根两端标记点的外侧贴上编有序号的标签, 用游标卡尺从上标签内侧点开始依次量取 5 个标记点处直径, 每个点正交方向各测量 1 次, 然后取其平均值作为该点直径。将量好的待测试验根按径级放入贴有标识的自封袋内, 模拟取样地点的土壤温度和湿度保存, 并在 24 h 内进行试验。

### 2.3 仪器和方法

采用 YG(B) 026H-250 型织物强力机的最大加载速度作为瞬时加载速度(加载速度为 500 mm/min), 模拟瞬时大风作用下, 单根受拉断裂的状态, 单根轴向极限抗拉力可由电脑直接读取。单根极限抗拉强度由下列公式进行计算<sup>[15]</sup>:

$$P = 4F/\pi D^2$$

式中:  $P$ ——极限抗拉强度(MPa);  $F$ ——极限抗拉力(N);  $D$ ——根系断裂处直径(mm)。由于根径沿轴向变化, 计算单根极限抗拉强度时, 根径取断裂处上下两个标记点直径的平均值。

## 3 实验结果与分析

### 3.1 4 种植物单根抗拉力

图 1 为两个生长时期 4 种植物单根直径—抗拉

力关系图。图 1 表明, 4 种植物单根抗拉力与直径呈幂函数正相关关系, 即随着直径增加, 抗拉力增加明显, 4 种植物抗拉力与直径的相关系数均大于 0.91, 具有良好的相关性。两个生长时期内 4 种植物单根抗拉力大小均表现为柠条 > 沙柳 > 沙地柏 > 白沙蒿。但是, 4 种植物随着根径的增大, 单根抗拉力的增幅存在较大差异。在生长季初期, 当根径为 1.35 mm 时, 柠条、沙柳、沙地柏、白沙蒿单根的抗拉力分别为 77.42, 41.47, 35.61, 13.07 N, 当根径为 1.95 mm 时, 单根抗拉力为 152.77, 71.70, 70.79, 17.53 N, 分别增加了 97.33%, 72.90%, 98.80%, 34.12%。

生长时期对 4 种植物单根抗拉力均有影响。沙

柳、沙地柏和白沙蒿单根在旺盛生长期的抗拉力小于生长季初期, 柠条反之。随着直径的增加, 4 种植物单根在两个生长时期内的抗拉力差异均明显增大。这可能因为沙柳、沙地柏和白沙蒿根系持水性较强, 而在生长季初期, 地下水位较深, 根系含水量较旺盛生长期低, 根系内部细胞间隙较小, 结构相对致密, 所以抗拉力较旺盛生长期高; 而柠条根系具有发达的次生韧皮部和木栓层, 其内部结构致密, 受生长时期的影响较小, 这部分原因涉及到根系生物学特性, 有待于进一步研究。以直径 1.75 mm 为例, 柠条、沙柳、沙地柏、白沙蒿根系抗拉力在旺盛生长期较生长季初期变化了 6.70%, - 8.72%, - 7.42%, - 48.29%。

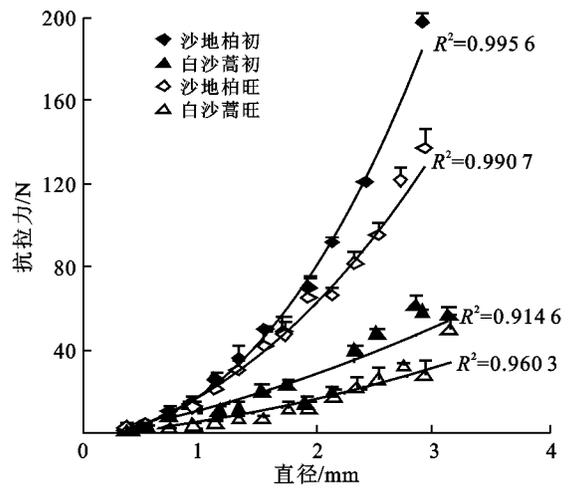
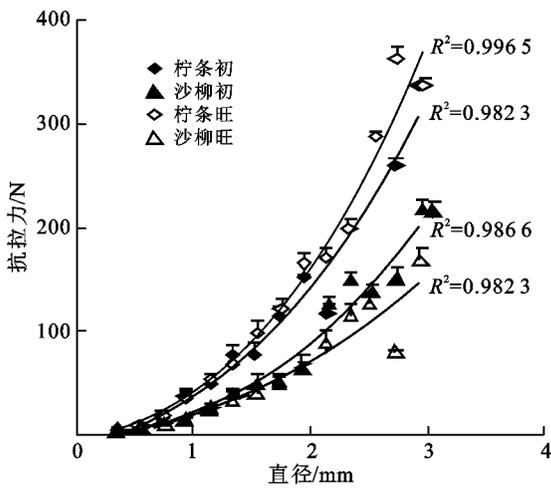


图 1 两个生长期 4 种植物单根直径—抗拉力关系

表 1 两个生长时期 4 种植物单根在不同根径范围的抗拉强度

直径/ mm	0.5~ 0.6	0.9~ 1.0	1.3~ 1.4	1.7~ 1.8	2.1~ 2.2	2.7~ 2.8	2.9~ 3.0	MPa 平均值
柠条生长季初期	32.95(0.20)	50.68(0.13)	50.60(0.23)	48.38(0.07)	32.27(0.09)	44.41(0.01)	50.03	45.31
柠条旺盛期	42.28(0.16)	47.40(0.20)	48.84(0.11)	50.44(0.08)	47.30(0.05)	55.84(0.12)	48.51(0.04)	49.70
沙柳生长季初期	24.83(0.09)	20.55(0.16)	28.16(0.13)	21.40(0.13)	33.84(0.06)	25.50(0.05)	31.52(0.05)	26.31
沙柳旺盛期	26.32(0.19)	20.33(0.22)	23.49(0.22)	21.13(0.15)	24.71(0.14)	13.67(0.04)	24.62(0.07)	22.58
沙地柏生长季初期	19.90(0.31)	21.09(0.15)	25.05(0.16)	21.21(0.14)	25.56(0.02)	29.81(0.02)	-	23.90
沙地柏旺盛期	21.49(0.20)	18.56(0.17)	22.39(0.11)	19.99(0.14)	18.84(0.07)	20.79(0.07)	20.35(0.07)	21.31
白沙蒿生长季初期	23.59(0.16)	21.45(0.18)	9.16(0.18)	9.98(0.06)	5.45(0.13)	9.72(0.18)	8.82	12.97
白沙蒿旺盛期	9.50(0.20)	6.16(0.19)	4.84(0.25)	5.00(0.24)	5.02(0.18)	5.41(0.06)	4.15(0.25)	5.91

注: ( ) 内为离差系数; 平均值表示在 0.3~ 3 mm 根径范围内的平均抗拉强度。

### 3.2 4 种植物单根抗拉强度

表 1 为两个生长时期 4 种植物根系部分径级的抗拉强度。表 1 表明, 在两个生长时期, 柠条、沙柳、沙地柏根系的抗拉强度分别在一定的数值范围内均匀波动。对每种植物在各个径级内的抗拉强度用 SAS 软件进行差异性检验可知, 柠条、沙柳、沙地柏根系各个径级的抗拉强度在  $\alpha=0.1$  的显著水平下差

异不显著, 所以取 0.3~ 3 mm 径级范围内的平均抗拉强度作为衡量其抗拉强度的指标。这可能由于植物根系是生物材料, 其结构具有各向异性及不均匀性的特点, 且在其生长过程中受外界因素影响, 根系内部结构会发生变化, 这方面的因素还有待于进一步研究。白沙蒿根系各个径级内的抗拉强度经差异性检验, 在  $\alpha=0.01$  的显著水平下差异显著; 两个生长时

期内的抗拉强度与直径关系均表现为幂函数负相关关系(见图 2), 相关系数均大于 0.712( $r_a = 0.01^{[15]} = 0.6055^{[16]}$ ), 具有显著的相关性, 且生长季初期的抗拉强度明显大于旺盛生长期, 这可能在一定程度上和白沙蒿根系的木质化程度有关, 随着根系木质化程度的增加, 根的脆性增大, 抗拉强度降低, 对此, 有待于试验验证。

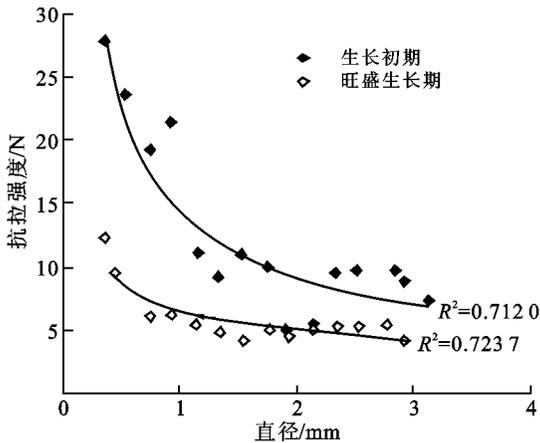


图 2 白沙蒿单根直径—抗拉强度关系

4种植物根系平均抗拉强度在两个生长时期均表现为柠条>沙柳>沙地柏>白沙蒿, 且柠条根系的平均抗拉强度明显高于其它3种植物。在生长季初期, 柠条根系的平均抗拉强度分别为沙柳的1.72倍, 沙地柏的1.90倍, 白沙蒿的3.49倍; 在旺盛生长期, 柠条根系的平均抗拉强度分别为沙柳的2.20倍, 沙地柏的2.08倍, 白沙蒿的8.41倍。生长时期对4种植物根系抗拉强度的影响与对抗拉力的影响一致, 表现为柠条、沙柳、沙地柏和白沙蒿在旺盛生长期的平均抗拉强度分别较生长季初期变化了9.68%, -14.18%, -10.84%, -54.43%。

## 4 讨论

(1) 李勇<sup>[17]</sup>等人以根系参数与土壤抗冲性关系

的研究为基础, 研究了几种乔灌草根系对土壤抗冲性的强化效应。研究表明,  $\leq 1$  mm 的根密度及根量是不同植物群落改善土壤结构稳定性, 提高土壤入渗及增强土壤抗冲性的有效根系参数, 进而提出了有效根密度的概念, 即土壤剖面中  $100 \text{ cm}^2$  截面上对土壤抗冲性有增强效应的  $\leq 1$  mm 径级须根的根数。本课题组的邢会文<sup>[18]</sup>对3~4年生柠条、沙柳、沙地柏和白沙蒿根系分布进行了研究, 结果表明, 4种植物根系均以细根为主,  $\leq 3$  mm 的根系在累计根数量和累计根长两个指标中分别占总根系的75%以上, 在累计根表面积和累计干重两个指标中也超过了50%。另外, 受试验仪器的限制,  $< 0.3$  mm 的根系较难准确测量其直径和拉力大小,  $> 3$  mm 的根系多数断裂在夹持点, 试验数据不理想。基于以上原因, 本文对0.3~3 mm 径级范围内的根系进行研究。

表 2 平均抗拉强度占 I 级钢筋抗拉强度的比例

生长期	柠条	沙柳	沙地柏	白沙蒿
生长季初期	12.3%	7.1%	6.5%	3.5%
旺盛生长期	13.4%	6.1%	5.8%	1.6%

(2) 表 2 为 4 种植物根系在 0.3~3 mm 径级内单根的平均抗拉强度占 I 级钢筋抗拉强度 (370 MPa) 的百分比。由表 3 可知, 柠条单根的极限抗拉强度约为 I 级钢筋抗拉强度的 12.3%~13.4%, 沙柳和沙地柏约为 6%。如果在水土保持工程中大面积采用钢筋固持土壤, 不仅造价高, 而且施工过程中对地表的扰动又会产生新的水土流失。通过分析表明, 利用植物根系固持土壤, 不仅造价低廉, 易于实现; 而且从生态学角度考虑, 植物地上部分及枯枝落叶层能降低雨滴击溅作用对地表土壤结构的破坏, 增大地表粗糙度, 增加下渗, 减少地表径流, 防风减沙, 能明显改善植物生长区的生态环境。从 4 种植物根系抗拉强度的角度分析, 柠条、沙柳、沙地柏都是优良的固土抗蚀的植物种, 其中柠条的表现尤为突出。

表 3 4 种植物根系总抗拉力

根径/mm	柠条		沙柳		沙地柏		白沙蒿		N
	根数	总拉力	根数	总拉力	根数	总拉力	根数	总拉力	
0.3~0.5	119	1 254	10	43	153	504	5	18	
0.5~1.0	105	2 346	45	525	171	1 762	13	85	
1.0~1.5	41	2 656	37	1 364	50	1 451	14	173	
1.5~2.0	8	1 036	31	2 497	25	1 343	16	261	
2.0~2.5	5	771	20	2 145	10	736	15	333	
2.5~3.0	3	618	8	1 240	4	338	6	170	
总计	282	8 681	152	7 814	412	6 134	70	1 039	

(3) 根据邢会文对3~4年生4种植物根系分布的研究, 不计入根系网在根系抗拉时的耦合作用的情况下, 推求0.3~3 mm根系的总抗拉力(见表3)。表3表明, 柠条细根的总抗拉力约为8.7 kN, 沙柳为7.8 kN, 沙地柏为6.1 kN, 在瞬时大风的作用下, 这3种植物具有较强的固土抗蚀、抗裂能力。白沙蒿虽然从抗拉力、抗拉强度角度分析, 其固土作用较差, 但是白沙蒿是流动沙丘主要植被类型, 是固定流沙的优良植物种。

## 5 结论

在两个生长时期, 4种植物单根抗拉力与直径均呈幂函数正相关关系; 各个径级单根抗拉力的相对大小均为: 柠条>沙柳>沙地柏>白沙蒿。

沙柳、沙地柏和白沙蒿在旺盛生长期的抗拉力均小于生长季初期, 柠条反之; 随直径的增加, 4种植物单根在两个时期的抗拉力差值逐渐增大。

4种植物在两个生长时期的单根抗拉强度差异与抗拉力差异的变化趋势一致; 在0.3~3 mm根径范围内, 柠条的平均抗拉强度在生长季初期为45.31 MPa, 旺盛生长期为49.70 MPa; 沙柳为26.31 MPa和22.58 MPa; 沙地柏为23.90 MPa和21.31 MPa。白沙蒿根系抗拉强度明显小于其它3种, 在生长季初期为12.97 MPa, 旺盛生长期为5.91 MPa。此外, 白沙蒿根系抗拉强度随着直径的增大呈现幂函数负相关关系。

### [ 参 考 文 献 ]

- [ 1 ] 李勇, 徐晓琴, 朱显谟. 黄土高原植物根系提高土壤抗冲性机制初步研究[J]. 中国科学 B 辑, 1992, 3: 254-259.
- [ 2 ] 阿部和时, 岩元贤. 用树木根系的抗拉强度测定根系固定坡面的作用[J]. 水土保持科技情报, 1992(4): 53-57.
- [ 3 ] 杨维西, 黄治江. 黄土高原九种水土保持树种根的抗拉力[J]. 中国水土保持, 1988(9): 47-49.
- [ 4 ] 周跃, 张军, 骆华松, 等. 松属、青冈属乔木侧根的力量在防护林固土护坡作用中的意义[J]. 植物生态学报, 2001, 25(1): 105-109.
- [ 5 ] 朱清科, 陈丽华, 张东升, 等. 贡嘎山森林生态系统根系固土力学机制研究[J]. 北京林业大学学报, 2002, 24(4): 64-69.
- [ 6 ] 史敏华, 王棣, 李任敏. 石灰岩区主要水保灌木根系分布特征与拉力研究初报[J]. 山西林业科技, 1994, 1: 17-19.
- [ 7 ] 杨永红, 刘淑珍, 王成华, 等. 浅层滑坡生物治理中的乔木根系抗拉实验研究[J]. 水土保持研究, 2007, 14(1): 138-140.
- [ 8 ] Genet M, Stokes A, Salin F, et al. The influence of cellulose content on tensile strength in tree roots [J]. Plant Soil, 2005, 278: 1-9.
- [ 9 ] Operstein V, Frydman S. The influence of vegetation on soil strength[J]. Ground Improvement, 2000, 4(2): 81-89.
- [ 10 ] Bischetti G B, Chiaradia E A, Simonato T, et al. Root strength and root area ratio of forest species in Lombardy (Northern Italy) [J]. Plant and Soil, 2005, 278: 11-22.
- [ 11 ] Mattie C, Bischetti G B, Gentile F. Biotechnical characteristics of root systems of typical Mediterranean species[J]. Plant and Soil, 2005, 278: 23-32.
- [ 12 ] 杨永红. 东川砾石土地区植被固土机理研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.
- [ 13 ] 田佳, 刘耀辉. 华北地区几种常用边坡绿化植物的根系力学特性研究[J]. 中国水土保持, 2007(10): 34-36.
- [ 14 ] 程洪, 颜传盛, 李建庆, 等. 草本植物根系网的固土机制模式与力学试验研究[J]. 水土保持研究, 2006, 13(1): 62-65.
- [ 15 ] 程洪, 张新全. 草本植物根系网固土原理的力学试验探究[J]. 水土保持通报, 2002, 22(5): 20-23.
- [ 16 ] 谭维炎, 张维然. 水文统计常用图表[M]. 水利出版社, 1982.
- [ 17 ] 李勇, 吴钦孝, 朱显谟, 等. 黄土高原植物根系提高土壤抗冲性能的研究[J]. 水土保持学报, 1990, 4(1): 1-6.
- [ 18 ] 邢会文, 姚喜军, 刘静, 等. 4种植物代表根的研究[J]. 内蒙古农业大学学报, 2008, 29(4): 22-25.