

## 刺槐根系抗弯特性研究

罗龙皂<sup>1</sup>, 李绍才<sup>2</sup>, 孙海龙<sup>3</sup>, 龙凤<sup>2</sup>, 卢荻秋<sup>4</sup>, 王云翔<sup>4</sup>, 张丞<sup>4</sup>

(1. 西南大学 资源环境学院, 重庆 400715; 2. 四川大学 生命科学学院, 四川 成都 610064;

3. 四川大学 水力学与山区河流保护国家重点实验室, 四川 成都 610064; 4. 四川大学, 水利水电学院, 四川 成都 610064)

**摘 要:** 从根径和坡位两方面研究了石质陡边坡刺槐根系的抗弯特性。通过对刺槐根系进行室内单根弯曲试验, 分析了不同坡位下坡向侧根的抗弯特性。试验结果表明, 根系的抗弯强度与坡位的关系显著, 不同坡位抗弯强度关系为: 坡顶 > 坡中 > 坡底。坡顶和坡底根系的抗弯强度与根径之间存在递增的幂函数关系, 而坡中根系抗弯强度与根径之间的关系不显著。弯曲弹性模量与根径存在递减的幂函数关系, 在根径大于 8 mm 左右, 不同坡位根系弯曲弹性模量大小关系为: 坡顶 > 坡中 > 坡底。不同坡位根系的最大弯曲力之间差异不显著, 最大弯曲力沿着坡面向下呈递减趋势。不同坡位根系的断裂挠度之间差异也不显著, 但根系的断裂挠度沿着坡面向下呈递增趋势。综合这些结果, 可以发现坡顶根系的抗弯性能最佳, 对边坡稳定的贡献较大。

**关键词:** 石质陡边坡; 抗弯强度; 坡位; 弯曲弹性模量; 断裂挠度; 最大弯曲力

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2011)02-0077-05

中图分类号: Q14, Q94

### Anti-Bending Characteristics of *Robinia Pseudoacacia* L. Roots

LUO Long-zao<sup>1</sup>, LI Shao-cai<sup>2</sup>, SUN Hai-long<sup>3</sup>, LONG Feng<sup>2</sup>, LU Di-qiu<sup>4</sup>, Wang Yun-xiang<sup>4</sup>, ZHANG Cheng<sup>4</sup>

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing

400715, China; 2. School of Life Science, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China;

3. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan

610064, China; 4. College of Water Resource & Hydropower, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China)

**Abstract:** In order to investigate the variations of root characteristics in terms of anti-bending with changes of root diameter and slope position, a total number of 36 *Robinia pseudoacacia* L. trees on a steep rocky slope were selected and root samples were collected. Anti-bending forces of the root samples were measured using an electronic universal testing machine. The results show that the relationship between anti-bending capability and slope position was significant. Root anti-bending capability decreased from upper-slope position to the down-slope position. For roots in the upper and the lower slope positions, the relationship between bending strength and root diameter can be described by a power function, and root tolerance of bending increased with root diameter. As for the roots collected in the mid-slope position, there was no significant relationship between bending tolerance and root diameter. Root flexural modulus decreased as root diameter increased, which can also be described by a power function. Flexural modulus decreased from the upper slope to the down slope for roots with diameters greater than 8 mm. Maximum anti-bending forces and fracture deflections of the roots did not differ significantly among the three slope positions. The former decreased from the upper slope towards the down slope, while the latter increased from the upper to down slope. In conclusion, the roots in the upper slope had the strongest bending resistance, which contributed most to the slope stability.

**Keywords:** steep rocky slope; bending tolerance; slope position; flexural modulus; fracture deflection; maximum bending force

收稿日期: 2010-08-18

修回日期: 2010-09-07

资助项目: 国家自然科学基金项目“基于岩体裂隙及植物适应的根系锚固模型研究”(50974092)

作者简介: 罗龙皂(1985—), 男(汉族), 江西省上饶市人, 硕士研究生, 主要从事环境生态方向研究。E-mail: luolongzao@sina.com。

通信作者: 孙海龙(1976—), 男(汉族), 黑龙江省海林市人, 博士, 讲师, 主要从事生态工程方面研究。E-mail: lizist@vip.sina.com。

我国是一个多山的国家,山地、丘陵和地形比较崎岖的高原所构成的山区占国土总面积的 50% 以上。为了开发山区、建设山区、改变山区经济滞后的面貌,提高人民生活水平,交通便利是一个必要的条件,公路、铁路建设对促进山区经济和社会的发展起着十分重要的作用。近年来,随着国家对基础设施建设项目投资力度的不断加大,公路、铁路建设项目越来越多。在山区的铁路、公路工程建设中,道路多穿行于河谷山川之间,经常要开挖大量边坡,边坡的开挖破坏了原有植被覆盖层,导致出现大量的次生裸地以及产生严重的水土流失现象,造成生态环境的破坏,边坡岩土体的崩塌、滑坡、泥石流等失稳破坏形式还会给人民生命和财产带来巨大的损失<sup>[1-4]</sup>。在工程建设开挖形成的边坡中,岩石边坡占有很大比例,如何对其有效实施生态防护,恢复被破坏植被,减少坡面水土流失,是岩土科技工作者所关心的热点问题<sup>[5-7]</sup>。植被在提高边坡稳定性和防止坡面整块垮塌中扮演着很重要的角色<sup>[8]</sup>,植物根系不光从土壤中吸收养分,还能将树地上部分受到的力(如风力)传输到土壤中,从而保证整个植株系统的稳定性<sup>[9-10]</sup>。

植物生长在边坡这种复杂的环境条件下,会受到多种应力的作用,比如植物的自重、风力、植物和土体倾斜造成的转矩等<sup>[11]</sup>。植物在受到风力作用时,迎风面根系主要表现为抗拉特性,而背风面根系则表现为抗弯特性<sup>[12-13]</sup>。与之相似的是,植物在重力作用下,上坡向根系表现为抗拉特性,下坡向根系表现为抗弯特性。鉴于此,大量的有关植株在风荷载作用下失稳的研究逐一开展<sup>[12-17]</sup>。比如利用幼年植株的风道试验研究植株在风力作用下的抗拉拔特性<sup>[18]</sup>和植株的吊起试验<sup>[15, 17]</sup>。但这些研究主要集中在根系的抗拉特性上,而对根系的抗弯特性研究的较少<sup>[12-14, 19-22]</sup>。通过测量侧根的抗弯强度、弯曲弹性模量、挠度,可以评价背风面/下坡向根系对植株锚固的贡献<sup>[12]</sup>。因此,有必要对单根的抗弯特性进行研究。

刺槐在我国分布广泛,遍及华北、西北、东北南部广大地区,而且它适应性强,生长快、繁殖易、用途广,尤其适合石质陡边坡的生态防护。由于下坡向根系更易受到弯曲作用,所以本研究以刺槐为研究对象,只对下坡向根系进行室内单根抗弯特性测试,并比较它们之间的差异。讨论根系抗弯强度和根径、坡位之间的关系,弹性模量与根径间的关系,同时也对单根抗弯试验过程的抗弯力—挠度作了分析。通过这项工作,可以探讨根系抗弯特性在石质陡边坡上的变化特征。为定量评价植物根系的材料力学行为提供依据,以进一步为岩石边坡生态防护提供指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

研究样区在四川省励自生态技术有限公司试验基地内(103°53'E, 30°59'N),该基地位于四川省彭州市升平镇。当地属于亚热带季风气候,年平均温度 16.3℃,最热月(7 月份)平均气温 25.8℃,最冷月(1 月份)平均气温 5.6℃,年平均降水量 1 146.5 mm。

该边坡是一个人工模拟边坡,靠近路边,坡向 S,坡度为 44.2°,面积为 4.75 m×15 m,岩石面由石板砌成。基质用土壤(黏粒 25.60%,粉粒 41.76%,砂粒 32.64%)与 TBS 绿化基材按重量比 10:1 混合,采用干法喷射(12 m<sup>3</sup> 空压机,5 m<sup>3</sup>/h 混泥土喷射机)至试验坡面,厚度 10 cm。刺槐、构树、桑树种子混合均匀并采用喷播法播种至坡面。播种时间是 2005 年 6 月。当这些植物开始生长后对它们进行编号和实行人工管理。

### 1.2 植株选择与挖掘

试验开始时间是 2009 年 5 月。由于植株大小可能会对根系力学特性有影响,故选取基径在一定范围内(40~60 cm)的植株,以保证植株大小相差不大。共选择了 36 棵刺槐(坡顶 12 棵、坡中 14 棵、坡底 10 棵)。刺槐的立木度是 2.1 株/m<sup>2</sup>。每棵树在离坡面 0.5 m 处被砍倒,然后测量其基径。由于坡面土壤板结严重,直接开挖会对根系产生严重破坏,故对土壤浇水至饱和,24 h 后开始人工挖掘根系。对挖掘出来的根系进行人工清洗,然后转移到试验室进行测量。

### 1.3 根系生长情况及抗弯强度测量

记录根系的生长方位(上坡向、下坡向)<sup>[25]</sup>,根系分级<sup>[26-27]</sup>,坡位。然后对根系进行取样(取根系中比较直的部分,长度 150 mm)。用游标卡尺测定根系样品粗端、中间、细端处的根径<sup>[24]</sup>。测量完根径后贴上标签,将根系放进密封塑料袋,并于 4℃ 保鲜柜进行保鲜处理<sup>[35]</sup>。进行根系力学特性前测得根系含水量为 1.36%。利用电子万能试验机对根系进行单根力学试验,测定其抗弯力(CMT 5000,深圳新三思材料有限公司)。试验使用的传感器是 2 kN(精度 0.000 0 N),弯曲速度是 10 mm/min<sup>[35]</sup>。试验原理参照了金属弯曲力学性能试验方法(GB/T 14452-93)中的三点弯曲法。将根系两端放在万能试验机的两个可调夹具上,使根系刚好能放在夹具上,以保证根系中部受到向下压力作用时,根两端与夹具产生的作用力足够小。然后调节万能试验机和联机软件的相关参数并开始试验。

根段抗弯强度的计算公式为<sup>[28]</sup>:

$$\sigma = \frac{F_a L_s}{4W}$$

式中: $\sigma$ ——抗弯强度(MPa); $F_a$ ——根系被折断的峰值荷载(N); $L_s$ ——两支点之间的跨距(mm);

$W$ ——根系截面系数( $W = \frac{1}{32}\pi d^3$ , $d$ ——根系断裂处直径,即试验前测得的根段中间处直径)。

#### 1.4 数据分析

采用 SPSS 软件包(SPSS 16.0)对数据进行统计分析。数据的正态性检验使用的是 Kolmogorov—Smirnov 检验法,如果数据不符合正态分布,则对数据进行对数转化。对不同坡位土壤养分指标进行单因素方差分析,探明它们之间的差异。利用幂函数对根系抗弯强度、弹性模量与根径进行拟合,探讨它们之间的关系。再对抗弯过程中获得的弯曲力—挠度数据进行统计处理,分析曲线的特征。为了分析不同坡位上根系的抗弯强度、弹性模量、最大抗弯力、断裂挠度之间的差异,采用协方差分析法(ANCOVA),其中根径作为协变量,坡位作为固定因子,抗弯强度、弹性模量、最大抗弯力、断裂挠度作为因变量。用于协方差分析的根系数量为 116,其中坡底 38,坡中 37,坡顶 41。

## 2 结果与讨论

### 2.1 坡面土壤特征分析

每次雨后测量土壤的含水率,不同坡位的土壤含水率变化趋势见图 1。

土壤含水率随时间变化而变化,绝大多数时间内,坡中段土壤的含水率最高,而坡顶土壤含水率最低。坡面土壤含水率与季节、重力、光照、温度等因素有关。由于重力作用,水分会沿着坡面向下迁移,故坡顶含水率最低。而坡底靠近水泥路面,水分蒸发比

较大,故其土壤含水率低于坡中土壤含水率。不同坡位土壤的养分含量除了全钾之外都没有显著性差异(表 1),从坡顶到坡底,土壤养分呈递减趋势。这种变化趋势与土壤水分的传输以及植物对养分的吸收利用有关。

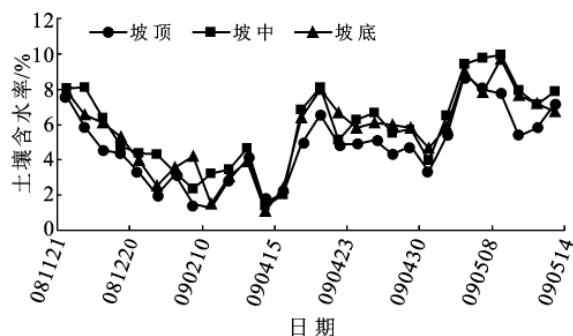


图 1 坡面土壤含水率随时间变化趋势

### 2.2 抗弯强度与坡位关系

不同坡位根系的抗弯强度之间存在显著差异( $F = 3.499, p < 0.05$ )。其中坡顶根系的抗弯强度平均值最大( $37.26 \pm 2.50$  MPa),坡中根系次之( $33.55 \pm 2.65$  MPa),坡底根系最小( $27.86 \pm 2.47$  MPa)。坡位作为较小尺度上的因子,对土壤养分含量有影响<sup>[29]</sup>。而植物根系在营养更丰富的土壤中具有更好的长势<sup>[30]</sup>,这有可能会引起不同坡位植物根系特征的不同。本研究中,坡面土壤养分从坡顶到坡底呈递减的趋势,这与根系抗弯强度的递减趋势是一致的。可以认为不同坡位根系抗弯强度的变化与土壤养分的变化有关。另外,水分供给控制着木本植物的管腔,从而影响它们的木质部结构<sup>[31-34]</sup>。而根系的强度与木质部结构有很大的关系,也就是说土壤含水率会影响根系的强度<sup>[31, 34]</sup>。由图 1 可知,不同坡位的土壤含水率之间存在差异,这种差异也会造成不同坡位根系抗弯强度的不同。

表 1 不同坡位的土壤养分含量

养分指标	坡底	坡中	坡顶	N	p
全钾/(g·kg <sup>-1</sup> )	3.87±0.09	3.33±0.07	3.49±0.02	5	0.004
全氮/(g·kg <sup>-1</sup> )	3.28±0.46	3.14±0.58	4.04±0.44	5	0.440
全磷/(g·kg <sup>-1</sup> )	6.725±0.96	6.73±0.94	7.43±0.97	5	0.840
有机质/(g·kg <sup>-1</sup> )	91.67±14.94	99.21±13.19	114.00±11.88	5	0.530

注:表中数据是平均值±标准误差;p表示方差分析的结果;N是每个坡位上取样点个数。

### 2.3 抗弯强度与根径关系

很多研究<sup>[35-39]</sup>表明,根系强度与其根径有很大的关系。因此,在以往研究中<sup>[37-42]</sup>,抗拉强度的研究都

以强度—根径的形式进行。本研究分析了根系抗弯强度与根径间的关系。研究表明,坡顶和坡底根系抗弯强度与根径之间存在幂函数关系,抗弯强度随根径

的增大而增大,而坡中根系抗弯强度与根径间的关系不显著(图 2)。曲线参数,样本数量,根径范围,判定系数,相伴概率列于表 2 中。回归方程中的指数  $\beta$  表示抗弯强度随根径增加的速率, $\alpha$  可以作为一个尺度因子<sup>[35]</sup>。坡顶根系和坡底根系的  $\beta$  相差不大,但坡顶根系具有较高的  $\alpha$ ,故坡顶较坡底根系具有更好的抗弯特性。这意味着抗弯强度与立地因子比如坡位、根径等有关<sup>[38]</sup>。

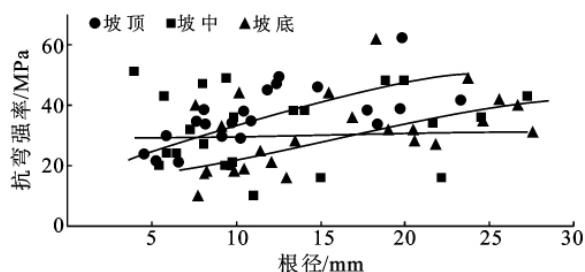


图 2 根系抗弯强度与根径拟合曲线

表 2 抗弯强度—根径幂函数方程中有关参数

坡 位	$\alpha$	$\beta$	根径/mm	$R^2$	样本数	$p$
坡 顶	12.439	0.442	4.58~22.78	0.577	22	<0.001
坡 中	27.872	0.032	4.00~27.28	0.002	27	>0.050
坡 底	7.520	0.493	7.62~27.56	0.305	27	<0.001

注: $R^2$  为判定系数; $p$  为回归分析结果; $\alpha, \beta$  为拟合方程的参数。下同。

#### 2.4 弯曲弹性模量与根径间关系

弹性模量可视为衡量材料产生弹性变形难易程度的指标,其值越大,使材料发生一定弹性变形的应力也越大,即材料刚度越大。研究发现,弯曲弹性模量与根径存在显著幂函数关系,弯曲弹性模量随着根径的增大而减小。拟合曲线见图 3,所有的曲线在一个相对较窄的区域内下降。曲线参数,样本数量,根径范围,判定系数,相伴概率列于表 3 中。从坡顶到坡底,回归方程中的尺度因子  $\alpha$  和指数  $\beta$  均逐渐增大,从这些数据难以看出哪个坡位根系的刚度较大。但从拟合曲线中可以发现,在根径大于 8 mm 左右,

不同坡位弹性模量大小关系为:坡顶>坡中>坡底。即在根径大于 8 mm 左右时,坡顶根系刚度最大,坡中根系次之,坡底根系刚度最小。

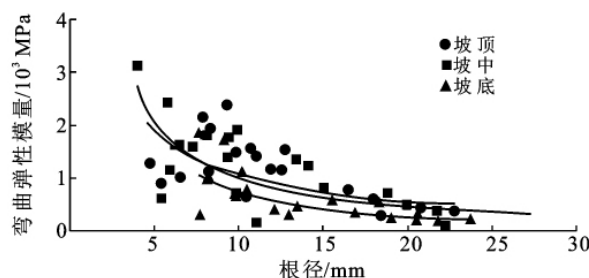


图 3 根系弯曲弹性模量与根径拟合曲线

表 3 弯曲弹性模量—根径幂函数方程中有关参数

坡 位	$\alpha$	$\beta$	根径/mm	$R^2$	样本数	$p$
坡 顶	7 509.02	0.856	4.58~22.78	0.467	22	<0.001
坡 中	14 341.23	1.174	4.00~27.28	0.476	21	0.001
坡 底	39 902.15	1.725	7.62~23.70	0.743	22	<0.001

#### 2.5 弯曲力—挠度分析

试验分析结果表明,不同坡位根系的最大弯曲力之间不存在显著性差异( $F=1.619$ ,  $p>0.05$ ),但是它们之间的平均值呈递减趋势:坡顶>坡中>坡底。这种变化趋势与抗弯强度的变化一致,可以理解为土壤水分和养分共同作用的结果。不同坡位根系的断裂挠度之间差异也不显著( $F=0.898$ ,  $p>0.05$ ),但是它们之间的平均值呈递增趋势:坡顶<坡中<坡底。由此可见,坡顶根系的弯曲变形是最小的,刚度最大;而坡底根系的弯曲变形最大,刚度最小。图 4 是典型的弯曲力—挠度曲线。从图上可以看出,相同

挠度情况下,坡顶根系的抗弯力是最大的,而坡底根系的抗弯力最小。

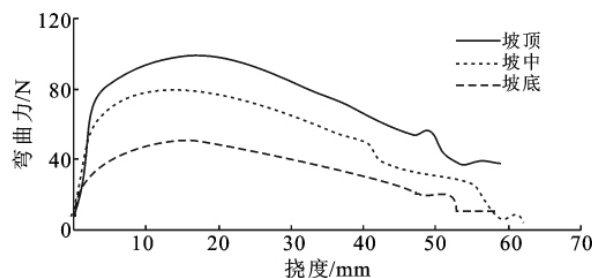


图 4 不同坡位根系弯曲力—挠度曲线

### 3 结论

坡位作为较小的尺度因子,对土壤养分和水分含量都有影响,这势必影响根系的生长,从而造成不同坡位根系力学特性的差异。本研究中,根系抗弯强度与坡位的关系显著,坡顶根系抗弯强度最大、坡中根系次之、坡底根系最小;根系刚度也沿着坡面向下呈递减趋势,故坡顶根系的抗弯性能最好,对边坡稳定的贡献较大。根系强度与根径的关系一直是研究的热点,本研究发现,坡顶和坡中根系抗弯强度与根径之间存在递增幂函数关系,而坡中根系抗弯强度与根径之间的关系不显著;弯曲弹性模量与根径存在递减的幂函数关系。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] Morgan R P C, Rickson R J. Slope Stabilization and Erosion Control: A Bioengineering Approach[M]. London: E & E N Spon., 1995:274.
- [2] 张俊云,周德培,李绍才. 岩石边坡生态护坡研究简介[J]. 水土保持通报, 2000, 20(4):36-38.
- [3] 杨喜田,董惠英,黄玉荣,等. 黄土地区高速公路边坡稳定性的研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(1):77-81.
- [4] 艾应伟,刘浩,范志金,等. 我国道路边坡治理现状及其对策[J]. 水土保持研究, 2006, 13(5):222-224.
- [5] 李绍才,孙海龙. 中国岩石边坡植被护坡技术现状及发展趋势[J]. 资源科学, 2004, 26(S):61-66.
- [6] 张俊云,周德培,李绍才. 岩石边坡生态种植基试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(2):239-242.
- [7] 张俊云,周德培. 厚基材植被护坡植物选型设计研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(4):163-165.
- [8] Norris J E, Cammeraat L H, Stokes A, et al. The use of vegetation to improve slop stability[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2006, 24:427-428.
- [9] Coutts M P. Development of the structural root system of Sitka spruce[J]. Forestry, 1983, 56:1-16.
- [10] Ennos A R. The mechanics of anchorage in wheat *Triticum aestivum* L. I: The anchorage of wheat seedlings[J]. Journal of Experimental Botany, 1991, 42: 1607-1613.
- [11] Di Iorio A, Lasserre B. Root system architecture of *Quercus pubescens* trees growing on different sloping conditions[J]. Annals of Botany, 2005, 95: 351-361.
- [12] Crook M, Ennos A. The anchorage mechanics of deep rooted larch, *Larix europea*  $\times$  *L. japonica*[J]. Journal of Experimental Botany, 1996, 47: 1509-1517.
- [13] Coutts M. Components of tree stability in Sitka spruce on peaty gley soil[J]. Forestry, 1986, 59: 173-197.
- [14] Coutts M. Root architecture and tree stability[J]. Plant and Soil, 1983, 71: 171-188.
- [15] Stokes A. Strain distribution during anchorage failure of *Pinus pinaster* Ait. at different ages and tree growth response to wind-induced root movement[J]. Plant and Soil, 1999, 217: 17-27.
- [16] Peltola H, Kellomaki S, Hassinen A. Mechanical stability of Scots pine, Norway spruce and birch: An analysis of tree-pulling experiments in Finland[J]. Forest Ecology and Management, 2000, 135: 143-153.
- [17] Cucchi V, Meredieu C, Stokes A, et al. Root anchorage of inner and edge trees in stands of Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) growing in different podzolic soil conditions [J]. Trees-Structure and Function, 2004, 18: 460-466.
- [18] Stokes A, Fitter A, Coutts M. Responses of young trees to wind and shading: Effects on root architecture [J]. Journal of Experimental Botany, 1995, 46: 1139-1146.
- [19] Stokes A, Mattheck C. Variation of wood strength in tree roots[J]. Journal of Experimental Botany, 1996, 47: 693-699.
- [20] Crook M, Ennos A. The increase in anchorage with tree size of the tropical tap rooted tree *Mallotus wrayi*, King (Euphorbiaceae)[J]. Annals of Botany, 1998, 82: 291-296.
- [21] Niklas K. Variations of the mechanical properties of *Acer saccharum* roots [J]. Journal of Experimental Botany, 1999, 50: 193.
- [22] Coutts M, Nielsen C, Nicoll B. The development of symmetry, rigidity and anchorage in the structural root system of conifers[J]. Plant and Soil, 1999, 217: 1-15.
- [23] 张俊云,周德培,李绍才. 厚层基材喷射护坡试验研究[J]. 水土保持通报, 2001, 21(4):45-48.
- [24] Tosi M. Root tensile strength relationships and their slope stability implication of three shrub species in the Northern Apennines[J]. Geomorphology, 2007, 87: 268-283.
- [25] Chiatante D, Scippa G S, Di Iorio A, et al. The influence of steep slope on root system development[J]. Plant Growth Regulation, 2003, 21: 247 - 260.
- [26] Hackket C, Bartlette B O. A study of the root system of barley: 3. Branching pattern[J]. New Phytologist, 1971, 70: 409-413.
- [27] Hackket C. A study of the root system of barley: 1. Effects of nutrition on two varieties[J]. New Phytologist, 1968, 67: 287-300.
- [28] 国家技术监督局. GB/T 14452-1993 金属弯曲力学性能试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1993.

- 30(1): 43-48, 138.
- [11] 邹厚远, 刘国彬, 王晗生. 子午岭林区北部近 50 年植被的变化发展[J]. 西北植物学报, 2002, 22(1): 1-8.
- [12] 王凯博, 陈美玲, 秦娟, 等. 子午岭植被自然演替中植物多样性变化及其与土壤理化性质的关系[J]. 西北植物学报, 2007, 27(10): 2089-2096.
- [13] 李裕元, 邵明安. 黄土高原子午岭森林群落演替与结构特征演化[J]. 西北植物学报, 2003, 23(5): 693-699.
- [14] 汪超, 王孝安, 郭华, 等. 黄土高原马栏林区主要森林群落物种多样性研究[J]. 西北植物学报, 2006, 26(4): 0791-0797.
- [15] 方坚, 王孝安, 郭华, 等. 黄土高原马栏林区辽东栎林种内、种间竞争研究[J]. 西北植物学报, 2007, 27(2): 0334-0339.
- [16] 许光辉, 郑洪元. 土壤微生物分析方法手册[M]. 北京: 农业出版社, 1986: 50-52, 176-179.
- [17] 中国科学院南京土壤研究所微生物室. 土壤微生物研究法[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [18] 孙儒泳. 动物生态学原理 [M]. 3 版. 北京: 北京师范大学出版社, 2001: 398-399.
- [19] 胡亚林, 汪思龙, 黄宇, 等. 凋落物化学组成对土壤微生物学性状及土壤酶活性的影响[J]. 生态学报, 2005, 25(10): 2662-2669.
- [20] 梁健, 王孝安, 陶树兴, 等. 森林演替过程中优势树种凋落叶对土壤微生物组成的影响[J]. 生态学杂志, 2008, 27(7): 1127-1133.
- [21] 张文婷, 来航线, 王延平, 等. 黄土高原不同植被坡地土壤微生物区系特征[J]. 生态学报, 2008, 28(9): 4228-4234.
- [22] 沈丽娜, 邓新辉, 蒋忠诚, 等. 不同植被演替阶段的岩溶土壤的微生物特征: 以广西马山弄拉峰从洼地为例[J]. 中国岩溶, 2007, 26(4): 310-314.
- [23] 吕春花, 郑粉莉, 安韶山. 子午岭地区植被演替过程中土壤养分及酶活性特征研究[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(2): 227-232.
- [24] 王百群, 吴金水, 赵世伟. 子午岭林区植被类型对土壤氮素的效应[J]. 水土保持通报, 2002, 22(6): 23-25.
- [25] 张亮, 程智慧, 周艳丽. 百合生育期根际土壤微生物和酶活性的变化[J]. 园艺学报, 2008, 35(7): 1031-1038.
- [26] 安慧. 子午岭林区典型植物生长的氮素调控机理[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2008.
- [27] 翟明普, 武颀文. 杨树刺槐混交林及纯林根际微生物数量及其生化强度的季节性动态研究[J]. 土壤通报, 2002, 33(3): 219-222.
- [28] 龙健, 李娟, 江新荣, 等. 贵州茂兰喀斯特森林土壤微生物活性的研究[J]. 土壤学报, 2004, 41(14): 597-602.
- [29] 于学珍, 路葵, 李秀艳, 等. 天童常绿阔叶林退化过程中土壤微生物主要类群变化特性研究[J]. 安全与环境学报, 2005, 5(4): 61-64.
- [30] 邓若磊, 徐海荣, 曹云飞, 等. 植物吸收铵态氮的分子生物学基础[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(3): 512-519.
- [31] 张秀艳. 川西常绿阔叶林不同恢复阶段土壤微生物区系研究[D]. 四川雅安: 四川农业大学, 2004.

(上接第 81 页)

- [29] 祁建, 马克明, 张育新. 北京东灵山不同坡位辽东栎叶属性的比较[J]. 生态学报, 2008, 28(1): 122-128.
- [30] George E, Seith B, Schaeffer C, et al. Responses of *Pinus*, *Pinus* and *Pseudotsuga* roots to heterogeneous nutrient distribution[J]. Tree Physiology, 1997, 17: 39-45.
- [31] Barij N, Stokes A, Bogaard T, et al. Does growing on a slope affect tree xylem structure and water relations? [J]. Tree Physiology, 2007, 27: 757-764.
- [32] Baas P, Werker E, Fahn A. Some ecological trends in vessel characters[J]. IAWA Bulletin, 1983: 141-159.
- [33] Corcuera L, Camarero J, Gil-Pelegrin E. Effects of a severe drought on *Quercus ilex* radial growth and xylem anatomy [J]. Trees-Structure and Function, 2004, 18: 83-92.
- [34] Hales T C, Ford C R, Hwang T, et al. Topographic and ecologic controls on root reinforcement[J]. Journal of Geophysical Research, 2009, 114: 3013.
- [35] 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.
- [36] Abe K, Iwamoto M. An evaluation of tree-root effect on slope stability by tree-root strength[J]. Japanese Forestry Society, 1986, 68: 505-510.
- [37] Burroughs E, Thomas B. Declining root strength in Douglas fir after felling as a factor in slope stability [C]. USA: International Forest and Range Experiment Station, 1977: 27.
- [38] Gray D, Sotir R. Biotechnical and soil bioengineering slope stabilization: A practical guide for erosion control[M]. New York: Wiley-Interscience Publication, 1996.
- [39] Nilaweera N, Nutalaya P. Role of tree roots in slope stabilization[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 1999, 57: 337-342.
- [40] O'Loughlin C, Watson A. Root-wood strength deterioration in radiata pine after clearfelling[J]. New Zealand Journal of Forest Science, 1979, 9: 284-293.
- [41] Operstein V, Frydman S. The influence of vegetation on soil strength[J]. Ground Improvement, 2000, 4: 81-89.
- [42] Wu T, McKinnell W, Swanston D. Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1979, 16: 19-33.