

根系主要成分含量对根系固土效能的影响

朱锦奇, 王云琦, 王玉杰, 张会兰, 白雪琪, 李云鹏, 刘勇

(北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083)

摘要: 选取中国北方两种常见树种油松(*Pinus tabulaeformis*)和元宝枫(*Acer truncatum*), 对这两种树0.2~6 mm直径的根系直径、根系抗拉强度、整根的根土复合体强度、根系3种主要成分含量(纤维素含量、半纤维素含量与木质素含量)进行测定。结果表明, 随着根系直径的增加, 植物根系半纤维素含量增高, 纤维素含量与木质素含量降低, 从而植物的抗拉强度降低。植物根系抗拉强度与纤维素含量、木质素含量成正相关关系, 与半纤维素含量成负相关关系。因此, 在排除根系结构影响的前提下, 植物根系纤维素含量与木质素含量是导致不同植物种固土效果差异的直接原因。

关键词: 植物根系; 抗拉强度; 纤维素; 木质素; 固土效果

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)03-0166-05

中图分类号: S714.7

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.03.032

Effect of Root Main Component Content on Its Soil-binding Capacity

ZHU Jin-qi, WANG Yun-qi, WANG Yu-jie, ZHANG Hui-lan, BAI Xue-qi, LI Yun-peng, LIU Yong

(School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: This study selected the two common tree species of *Pinus tabulaeformis* and *Acer truncatum* in North China. The objective was to investigate the root system tensile strength, the overall root strength of root-soil composite and three root principal component contents (cellulose content, hemicellulose content and lignin content) of the two tree species for root diameters from 0.2 to 6 mm. The results showed that with the increasing root diameter, plant roots got a higher hemicellulose content and cellulose content and a lower lignin content, followed by decreased root tensile strength. Plant root tensile strength had positive correlations with cellulose content and lignin content and, negative correlation with hemicellulose content. Therefore, beyond the root structure influence, the cellulose content and lignin content of plant roots are the direct causes of differences between the soil-binding capacity.

Keywords: root system; tensile strength; cellulose; lignin; soil-binding capacity

在中国北方山区, 沟蚀和浅层滑坡导致了大量的水土流失, 而植被覆盖可以加固边坡, 防止土壤和养分流失。边坡稳定程度取决于根系的总量分布、根土复合体的抗拉强度、抗剪切强度和根系土壤之间的相互作用。其中, 根土复合体的抗拉强度是最重要的因素之一。目前已有大量学者对根土复合体的抗拉强度进行了研究^[1-4]。根土复合体抗拉强度绝大程度体现在植物根系抗拉强度上。而植物根系抗拉强度则体现在提高土壤抗剪切强度上, 同时也能影响植物本身锚固力^[5]。对植物根系抗拉强度的研究多数集中在植物根系所处的位置、季节, 根系的直径和植物生长的周围环境等与植物种类和立地因子有关的因素上^[6]。Lindström等^[7]的研究显示野外生长樟子松

(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)的植物根系抗拉强度要大于人工种植的樟子松。在一年中的不同季节, 植物根系抗拉强度也被证实会发生变化, 冬季时候的植物根系抗拉强度大于夏季, 这主要原因是植物根系含水量的减小^[8]。因此, 研究单根抗拉强度有利于人们量化根系固土效能, 科学合理的对固坡植物种进行选择与空间配置的设计, 提高植物固坡效果。

很多研究证实, 根系的抗拉强度随着根系直径的增加而减小, 但缺少一些对根系本身特性的研究来解释这一现象。已有研究对植物纤维素含量进行了分析, 以此来研究植物纤维素含量对植物根系抗拉强度的影响, 但是仅此一个指标来确定根系特性, 无法解释不同物种根土复合体之间抗剪强度的差异。

收稿日期: 2013-07-23

修回日期: 2013-07-29

资助项目: 北京市教委科学研究与研究生培养共建项目“北京山区生态风险监测与评估技术研究”

作者简介: 朱锦奇(1991—), 男(汉族), 江西省九江市人, 硕士研究生, 研究方向为山地灾害防治。E-mail: zhu-jinqi@163.com。

通信作者: 王云琦(1979—), 女(汉族), 山西省灵石县人, 博士, 副教授, 主要从事水土保持工程研究。E-mail: wangyunqi@bjfu.edu.cn。

为研究不同植物根系主成分含量的差异对根系抗拉强度与根系固土效果的影响,本文选取北方山区常见植物种油松、元宝枫两种植物根系进行试验,通过研究油松、元宝枫两种植物根系中纤维素、半纤维素与木质素含量,研究其与植物根系直径的关系,分析植物根系抗拉强度变化的原因。同时使用 Wu 等^[9]模型与植物根系根土复合体直剪试验,讨论两种植物根系由于组成成分含量不同所导致的植物根土复合体抗剪强度的差异性。

本试验选择油松与元宝枫两种北方地区常见造林树种进行研究。植物根系取得地位于北京林业大学鹫峰国家森林公园,位于北京市西北郊,东经 116°28',北纬 39°54',为华北暖温带半湿润半干旱大陆性气候,年平均气温 12.2 °C,年平均降雨量 700 mm,多集中在 7—9 月。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

1.1.1 根系采集 为了最大限度减小植物之间立地条件造成的相互影响,在选择样本时尽量选择周围 300 cm 范围内无其他乔木生长且植物根系生长良好的区域。由于试验所用根系样本需要完整的放入直剪盒内,因此为了减小所选树种间的生长差异,应选取地上直径为 20 mm 左右的幼树,并且保证所有样本尽可能分布在同一区域内。采取人工挖掘的方式进行采掘以避免根系机械损伤,最大限度保证根系的整体结构,开挖深度为 600 mm。挖出植物根系后,从不同直径的树根随机选取生长正常、无病虫害、茎秆通直均匀的新鲜活根系,用刷子去除根系表面土壤,放入装满土样的密封袋内,带回实验室后,尽快进行试验,以保证根系材料的活性。

1.1.2 土壤样品制备 在试验样地内,取 200—300 mm 土层的原状土,并测定土壤含水量。通过小盒直剪试验测定原状土黏聚力和内摩擦角,并用电子天平测定土壤质量来计算土壤密度。测定结果见表 1。

表 1 土样物理性质

土壤密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	含水率/ %	紧实度/ kPa	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)
1.65×10^3	20.8	71.0	18.4	20.7

由于土壤取回后水分会有一定损失,因此根据测定的土壤含水量,通过 TDR 对直剪盒内含水量进行控制。静置 1 d 后,控制直剪盒内土壤含水量在 20.8%。使用土壤紧实度仪控制直剪盒内土壤紧实度在 71 kPa。在进行大根直剪试验前,对土壤的含

水量与紧实度进行反复测定,以保证每次直剪试验土壤物理性质均与表 1 结果一致。

1.2 试验方法

1.2.1 根系各组分含量的测定

(1) 纤维素测定。纤维素为 β -葡萄糖残基组成的多糖,在酸性条件下加热能分解成 β -葡萄糖。 β -葡萄糖在强酸作用下,可脱水生成 β -糠醛类化合物。 β -糠醛类化合物与蒽酮脱水缩合,生成黄色的糠醛衍生物。颜色的深浅可间接定量测定纤维素含量。

(2) 木质素的测定。木质素测定原理是利用浓硫酸水解试样中的非木质素部分,剩下的残渣即为木质素。

(3) 半纤维素的测定。采用间接测定法,测定总纤维素的含量,减去纤维素的含量即为半纤维素的含量^[10]。

1.2.2 根系抗拉试验 在植物根系的采集过程中,发现 1~6 mm 直径内的植物根系占植物总根系量的 92%,试验选择对 1~6 mm 直径的植物根系进行等分,即分为 6 个径级进行抗拉试验测定。试验测定的根系长度必须大于 6 cm,同时保证选择的根系新鲜且粗细均匀。在试验过程中,夹子与根系交接的部位最易破裂,为了防止这一现象发生,在夹子与根系之间增加一层海绵垫。植物根系在拉伸过程中,根系样本从中间断裂,判断该试验成功,数据有效。确保在每个径级的植物根系都有 3 组有效数据,即 18 组根系抗拉强度的有效数据。

1.2.3 植物根系直剪试验 直剪试验是测试根土复合体与无根土的抗剪强度值,并将其做对比。但是这种方法的缺陷是直接评定出根系对土壤黏聚力的增强效果,很难把根系对一块土壤的加固效果隔离开来研究。而且在试验过程中,无法保证试验中根土复合体结构与未扰动根土复合体结构一样。为了解决这些问题,Wu 等提出,试验的准确程度很大程度上取决于直剪盒尺寸的大小,直剪盒的尺寸越大,越能反映出真实的情况,同时也能为根系固土模型的研究提供基础。因此,本次试验选择自制直剪盒,大小为 300 mm×300 mm,总高度为 200 mm,其中上盒为 100 mm,下盒为 100 mm,盒体材料为 5 mm 厚度的 PVC 板,盒体内部抛光打磨。

2 结果与讨论

2.1 根系直径与根系抗拉强度

根系抗拉强度与根系直径之间的关系并不是线

性关系。如图 1 所示,油松与元宝枫根系直径与抗剪强度均存在指数关系。Bazant 和 Kazemi 于 1990 年对植物根系抗拉强度进行了研究,得出植物根系抗拉强度与直径的关系公式: $\sigma = aD^{-b}$ 。

本研究通过对根系拔出强度测定得出油松与元宝枫根系抗拉强度与根系直径计算公式: $y = 17.448x^{-0.199}$, $y = 15.24x^{-0.174}$, 与 Bazant 和 Kazemi 的研究相一致,根系的抗拉力受直径影响较大。大部分学者认为,根系的抗拉力与根径呈幂函数或指数函数关系,不同植物的根系抗拉力与根径的回归关系差异较大,这与植物生长的立地条件、根系种类、根生长方位和组织结构等有关,而且不同植物的根系抗拉强度与根系直径的关系差异也比较大^[11]。

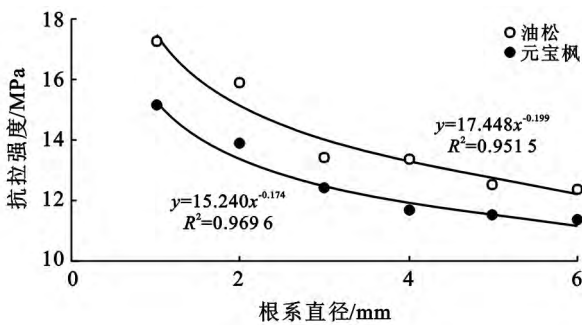


图 1 根系抗拉强度与根系直径的关系

2.2 根系主要成分与根系抗拉强度的关系

纤维素是植物细胞壁最重要的成分,可以简单的表述为一种 β -D-葡萄糖组成的线性高分子聚合物,纤维素分子以伸展的长链形式存在。平行排列的

纤维素分子链之间和链内均有大量氢键,使之具有晶体性质,有高度的稳定性和抗化学降解的能力。纤维素含量的多少,关系到植物细胞机械组织发达与否。因而影响植物根系的强度,进而影响植物根系固土的效果。

由表 2 可知,油松根系与元宝枫根系的平均纤维素含量分别为 52.65% 和 46.42%。元宝枫根系纤维素含量小于油松根系如图 2 所示。两种植物根系的纤维素含量都与根系直径呈负相关关系,植物根系纤维素含量随着植物直径的增加而减小,而且两种植物减小趋势类似。植物根系的直径为 0.1~7.0 mm,无论是油松还是元宝枫根系纤维素的含量与植物根系直径均存在显著一阶线性关系,而植物根系抗拉强度随着根系纤维素含量的增加而显著增加(图 3)。油松根系抗剪强度值为 12.38~17.27 MPa,元宝枫为 11.38~15.17 MPa。当根系直径小于 3 mm 时,油松根系抗剪强度高于元宝枫根系,而在根系直径越大的情况下,两种树种根系的抗剪强度将逐渐接近。Bischetti 等对植物细根进行了进一步研究,发现植物根系抗拉强度最大值出现在 0.2~0.5 mm^[1]。对该范围内植物进行根系纤维素含量测定发现,该径级内的植物根系纤维素含量最高可达到 90% 以上。

表 2 油松、元宝枫根系各主要成分的平均含量

树种	纤维素平均含量/%	木质素平均含量/%	半纤维平均含量/%	其他/%
油松	52.65	28.12	12.08	7.15
元宝枫	46.42	26.38	13.80	13.40

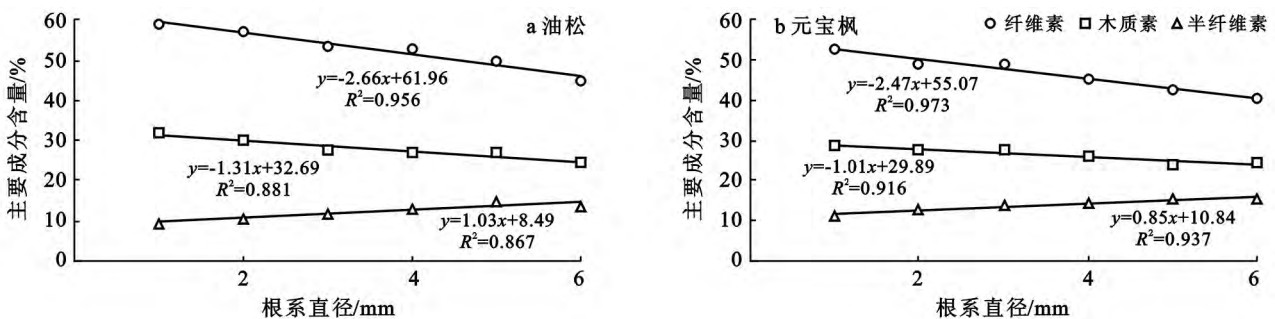


图 2 油松、元宝枫根系直径与各主要成分含量的关系

半纤维素是指在植物细胞壁中与纤维素共生、可溶于碱溶液,遇酸后远较纤维素易于水解的那部分植物多糖。半纤维素具有亲水性能,这将造成细胞壁的润胀,可赋予纤维弹性。植物根系中的半纤维素含量相对于纤维素含量与木质素含量是非常低的,在测定植物根系抗拉强度的时候,半纤维素含量的上升对植

物根系抗拉强度不能产生明显作用。在 Archer 和 Sjöström 的研究中发现植物根系主要强度体现为在根系受到拉伸变形时恢复的能力,但不能提高植物的抗扭曲破坏特性^[12-13]。

木质素是苯丙烷类结构单元构成的三维网状聚酚高分子化合物,尤其是在木本植物中,木质素是木

质部细胞壁的主要成分之一。在木材中,木质素作为一种填充和黏结物质,在木材细胞中以物理或化学的方式使纤维素之间黏结和加固,增强木材的机械强度^[14]。油松与元宝枫植物根系的木质素评价含量分别为 28.12%和 26.38%(表 2)。油松与元宝枫木质素含量都随直径的增大而减小(图 2)。在使用 SPSS 对比分析后发现,植物根系木质素含量的升高比纤维素含量的提高对根系抗剪强度提升更加显著。在 Hathaway 等^[15]对植物根系抗拉强度与木质素含量的研究中发现,植物根系木质素含量对植物的根系抗拉强度有十分显著的影响,特别是在植物根系含水量比较高的情况下。

植物中纤维素含量与半纤维素含量之和为植物根系综纤维素含量,油松与元宝枫植物根系综纤维素含量分别为 64.73%和 60.22%。以往研究证实不同植物类型的根系纤维素含量不同,且本试验的研究结果与以往研究的综纤维素含量在同一范围内。Chiantante 等^[16]研究发现,综纤维素含量平均值为 65%,Hathaway 等^[15]对杨柳科的 6 种植物根系的研究发现,植物根系的平均综纤维素含量为 72%。植物综纤

维素含量与植物根系抗拉强度之间有十分重要的联系,对于不同物种,植物综纤维素含量的差异性很大。

当根系直径发生变化时,根系的各组分含量都随之发生变化。在该次试验中,根系中纤维素与半纤维素含量都随着根系直径的增加而减少,而根系中木质素含量随着根系直径的增加而增加(图 2)。为使试验结果尽量准确,不同径级的植物根系选择为同一条根系上的不同分支。由于无法判断植物根系处于幼年期还是成年期(无法通过根系的直径来判断植物根系的成熟程度),所以在研究中,我们无法由此判断植物根系各个成熟阶段的成分含量来分析植物根系抗拉特性,这将是以后研究的重点。

如图 3 所示,油松、元宝枫植物根系抗拉强度与其各主成分含量均呈线性关系。植物纤维素含量与木质素含量的增加使植物根系抗拉强度急剧增加,而植物根系半纤维素含量的上升使得植物根系抗拉强度显著减小。这主要是由于在植物组织中,木质素作为一种填充和黏结物质,在植物细胞中以物理或化学的方式使纤维素之间黏结和加固,增强了植物组织的机械强度^[15]。

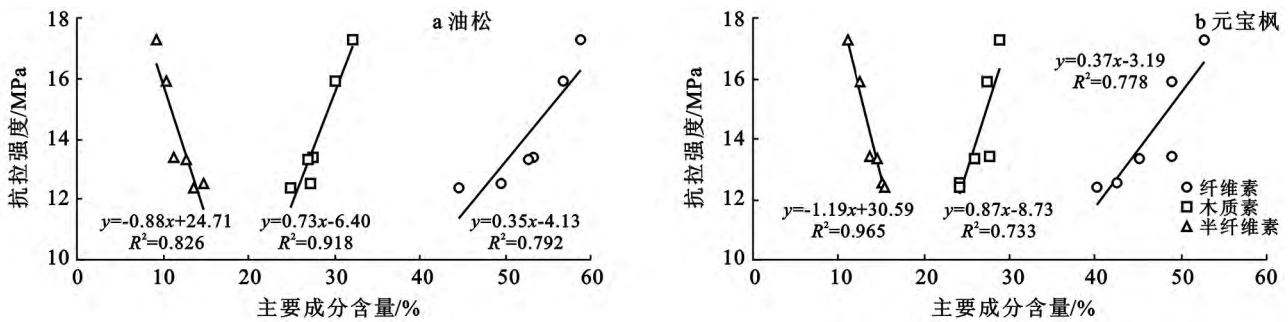


图 3 油松、元宝枫根系主成分含量与抗拉强度的关系

2.3 整根的固土效能

Wu^[9]和 Waldron^[17]的根土复合体模型是用于分析和计算根系固土效果的常用模型,该模型的计算基于土壤黏聚力与内摩擦角。该模型认为土壤根系增强的土壤强度为增强了土壤的黏聚力,把根系增强(C_r)与素土的强度相加来得到根土复合体的抗剪强度。

$$C_r = \frac{1.2}{A_{\text{shearplane}}} \overline{T_r} \sum_{i=1}^n A_i$$

式中: $A_{\text{shearplane}}$ ——直剪面的面积(m^2); C_r ——在 $A_{\text{shearplane}}$ 的直剪面上所有根系所能产生的抗剪强度增强总量(kPa); $\overline{T_r}$ ——直剪面上根系的平均强度(kPa);1.2——模型中校正后的根系系数 A_i 为根系的面积和(m^2)。

根据 Wu^[9]简单的垂直根系模型,根系增强的抗

剪强度仅仅与根系的数量和根系的强度相关。

众多研究表明 Wu 的模型高估了根系增强的抗剪强度值,该值在 16.5%~32.7%。Reinstenberg^[18]在根的拉拔试验和 Docker 等^[19]在根的拉拔测试和含根土的直接剪切测试中也证实了根系的逐渐破坏现象。由此,Wu 模型假设所有的根同时被破坏,使计算的根系增强值偏高。

本试验为了弥补 Wu 模型的不足,不计算根系增强值,但为了对比根系抗拉强度对根系增强抗剪强度的影响,使用大盒直剪设备直接测定抗拉强度增强值和根系面积,比较单位面积的根系对根系增强值得影响(表 3)。表 3 中比值部分为根系增强值除以根系面积比率并乘以 10^{-4} 后的结果,下文将称其为植物根系固土效能值。

对比油松与元宝枫,根系抗拉强度大的油松比元

宝枫更能增强土壤的抗剪能力。油松根系根土复合体的强度比值大于元宝枫根系,在同种根构型的情况

下,根系的抗拉强度对植物根系根土复合体的抗剪切强度产生一定影响,平均抗拉强度差值为 56.3 kPa。

表 3 油松与元宝枫根系根土复合体抗剪强度对比

根系编号	油松根系			元宝枫根系		
	面积比率/%	增强值/kPa	比值	面积比率/%	增强值/kPa	比值
1	6.5×10^{-4}	279.7	43.03	7.82×10^{-4}	306.39	39.18
2	8.1×10^{-4}	359.7	44.41	7.09×10^{-4}	288.60	40.72
3	7.6×10^{-4}	350.8	46.16	5.81×10^{-4}	226.39	38.96

根据 6 组植物的根系结构,统计具体每个根系中各种径级根系的数量,计算植物根系平均的纤维素、木质素、半纤维素含量。6 组植物平均主成分含量与相对应植物固土效能值的关系见图 4。植物根系固土效果好坏与植物根系纤维素含量与木质素含量有很大关系,并且随着植物根系纤维素含量与木质素含量上升植物根系固土效果越好。半纤维素由于含量较低,关系并不显著。油松根系因为纤维素含量与木质素含量都比元宝枫要高,所以其固土效果也比元宝枫好。对比 3 株不同的油松与元宝枫植物发现,植物根面积比率显示了植物的生长发育程度。

通过计算平均根系的主成分发现,在植物根系结构中随着植物个体的生长,小于 2 mm 径级所占的比重增大会导致植物根系平均纤维素含量与木质素含量升高,在植物的生长过程中,单位含根量的土壤的抗剪能力也将逐渐升高。

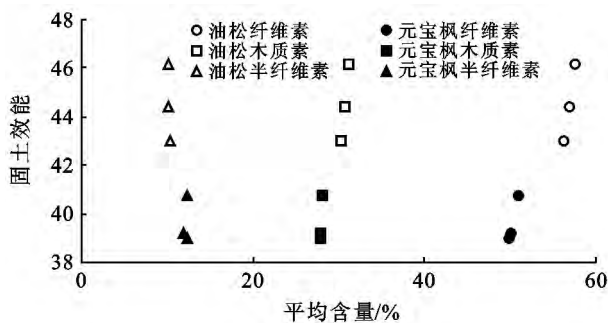


图 4 植物根系主要成分平均含量与植物根系固土效能值

3 结论

本文通过植物主要成分的测定,对比分析了他们对植物根系抗拉强度的影响,最终对植物根系固土效果的影响进行分析。油松与元宝枫根系的直径与植物根系抗拉强度拟合度最好的曲线被证实为 $y = ax^{-b}$ 。随着植物根系直径的增加,根系纤维素与木质素含量均减小,而半纤维素含量略有降低;植物根系抗拉强度的强弱主要由根系纤维素含量与木质素的含量决定,纤维素与木质素含量较高的植物根系抗拉

强度更大。在研究根系增强土壤抗剪强度试验中,通过单位面积比率上根系增强抗剪强度的值对比油松根系与元宝枫根系增强土壤抗剪强度的效果,发现植物根系抗拉强度对增强效果有显著影响;随着植物根系纤维素与木质素含量升高,植物根系固土效果也将变得更好。

[参 考 文 献]

- [1] 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(1/2): 11-22.
- [2] Norris J E. Root reinforcement by hawthorn and oak roots on a highway cut-slope in Southern England [J]. Plant and Soil, 2005, 278(1/2): 43-53.
- [3] Roering J J, Schmidt K M, Stock J D, et al. Shallow landsliding, root reinforcement, and the spatial distribution of trees in the Oregon Coast Range [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2003, 40(2): 237-253.
- [4] Morgan R P C, Rickson R J. Slope Stabilization and Erosion Control: A Bioengineering Approach [M]. Taylor & Francis, 1994.
- [5] Ennos A R, Fitter A H. Comparative functional morphology of the anchorage systems of annual dicots [J]. Functional Ecology, 1992, 6(1): 71-78.
- [6] Gray D H, Sotir R B. Biotechnical and soil bioengineering slope stabilization: A practical guide for erosion control [M]. John Wiley & Sons, 1996.
- [7] Lindström A, Rune G. Root deformation in plantations of container-grown Scots pine trees: Effects on root growth, tree stability and stem straightness [J]. Plant and Soil, 1999, 217(1/2): 29-37.
- [8] Stokes A, Mattheck C. Variation of wood strength in tree roots [J]. Journal of Experimental Botany, 1996, 47(5): 693-699.
- [9] Wu T H, McKinnell III, W P, et al. Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1979, 16(1): 19-33.

(下转第 177 页)

今后绿化造林过程中,针对不同情况采取不同的造林、育林措施及选择相应的适宜树种,提高造林的成活率和植被生长状况具有重要意义。

[参 考 文 献]

- [1] 于勇,周大迈,王红,等. 土地资源评价方法及评价因素权重的确定探析[J]. 中国生态农业学报, 2006, 14(2): 213-215.
- [2] 中国森林立地分类6编写组. 中国森林立地分类[M]. 北京:中国林业出版社, 1989.
- [3] 邓送求,闫家锋,关庆伟,等. 基于聚类分析的风景林立地类型划分[J]. 南京林业大学学报:自然科学版, 2009, 33(3): 73-77.
- [4] 张万儒. 中国森林立地[M]. 北京:科学出版社, 1997.
- [5] 樊华,赵方莹,孙保平,等. 北京市门头沟区植被恢复立地类型划分[J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(8): 29-31.
- [6] 周应书,何兴辉,谢永贵,等. 毕节喀斯特山地植被恢复立地类型划分[J]. 林业科学, 2008, 44(12): 123-128.
- [7] 黄家荣,马天晓,王艳梅,等. 基于BP网络的无林地立地质量评价模型研究[J]. 山地农业生物学报, 2006, 25(6): 479-483.
- [8] 郭艳荣,吴保国,刘洋,等. 立地质量评价研究进展[J]. 世界林业研究, 2012, 25(5): 47-52.
- [9] 郑佳丽,高国雄,吕粉桃,等. 青海省大通县脑山区退耕还林土壤质量演变评价[J]. 水土保持通报, 2007, 27(1): 6-10.
- [10] 王永昌. 云台山立地分类及造林树种选择[J]. 中南林业调查规划, 1994, 13(3): 5-7.
- [11] 孙波,张桃林,赵其国. 我国东南丘陵山区土壤肥力的综合评价[J]. 土壤学报, 1995, 32(4): 362-369.
- [12] 鲁法典,谷建才,贾俞彬,等. 沂蒙工程造林区立地类型划分的研究[J]. 河北林学院学报, 1996, 11(1): 37-40.
- [13] Sharply A N, Williams J R. Epic-erosion Productivity impact Calculator (I): Model Documentation [M]. Washington D C: U S Department of Agriculture, 1990.
- [14] 刘崇洪. 几种土壤质量评价方法的比较[J]. 干旱环境监测, 1996, 10(1): 26-29.
- [15] 刘世梁,傅伯杰,陈利顶,等. 两种土壤质量变化的定量评价方法比较[J]. 长江流域资源与环境, 2003, 12(5): 422-426.
- [16] 谢瑾,李永梅,候天才. 纳板河流域不同土地利用类型下土壤综合肥力分析[J]. 云南农业大学学报, 2012, 27(3): 401-407.
- [17] 吴玉红,田霄鸿,同延安,等. 基于主成分分析的土壤肥力综合指数评价[J]. 生态学杂志, 2010, 29(1): 173-180.
- [18] 唐晓平. 四川紫色土肥力的 Fuzzy 综合评价[J]. 土壤通报, 1997, 28(3): 107-109.
- [19] 李学全,李松仁,韩旭里. AHP 理论与方法研究:一致性检验与权重计算[J]. 系统工程学报, 1997, 12(2): 111-117.
- [20] 陶晓燕. 基于主成分分析的资源型城市产业转型能力评价[J]. 资源与产业, 2013, 15(2): 1-5.

(上接第 170 页)

- [10] 波钦诺克 X H. 植物生物化学分析方法[M]. 荆家海,丁钟荣译. 北京:科学出版社, 1981.
- [11] 陈丽华,余新晓,张东升,等. 整株林木垂向拔拉试验研究[J]. 资源科学, 2004(1): 39-43.
- [12] Archer R R. Growth stresses and strains in trees[M]. Springer-Verlag, 1987.
- [13] Sjöström E. Wood chemistry: fundamentals and applications[M]. Gulf Professional Publishing, 1993.
- [14] 杨淑惠. 植物纤维化学[M]. 北京:中国轻工业出版社, 2001.
- [15] Hathaway R L, Penny D. Root strength in some Populus and Salix clones[J]. New Zealand Journal of Botany, 1975, 13(3): 333-344.
- [16] Chiatante D, Scippa S G, Di Iorio A, et al. The influence of steep slopes on root system development[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2002, 21(4): 247-260.
- [17] Waldron L J. The shear resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 1977, 41(5): 843-849.
- [18] Riestenberg M M. Anchoring of thin colluvium by roots of sugar maple and white ash on hillslopes in Cincinnati[M]. US Government Printing Office, 1994.
- [19] Docker B B, Hubble T C T. Quantifying root-reinforcement of river bank soils by four Australian tree species[J]. Geomorphology, 2008, 100(3): 401-418.