



多花木蓝根截面微观结构对其抗拉特性的影响

张乔艳¹ 唐丽霞^{1*} 廖华刚² 潘露¹ 陈龙¹ 黄同丽¹

¹贵州大学林学院, 贵阳 550025; ²黔东南州林业科学研究所, 贵州凯里 556000

摘要 根截面微观结构由连通的骨架和相互贯通或封闭的孔洞构成, 其与根系抗拉力学特性有密切的联系。该文通过单根拉拔测试根系力学特性并采用扫描电镜获取根截面微观特征, 探讨根截面微观结构特征与根抗拉力学特性的关系。主要结果显示: 1) 根系截面单位面积承受拉力和拉伸应变的能力均随根直径的增大而降低。2) 根系抗拉强度和韧性随平均孔径的增加而降低, 其次孔径的均匀性对二者也存在一定的影响。3) 导管排列方式随根直径的增加, 呈现单管孔→复管孔→管孔链→管孔团的排列方式, 导管排列方式和分布均匀性对根抗拉力学特性都有影响, 其中排列方式较分布均匀性的影响大。4) 根截面管孔面积比对根抗拉特性的影响还受木质部和根皮及导管特征的影响。该研究从根系微观结构的角度揭示了根直径的增大影响截面微观结构进而影响根系的抗拉力学特性, 为进一步解析灌木根系固土力学机制提供了一定的理论基础。

关键词 导管; 力学特性; 根系; 微观结构

张乔艳, 唐丽霞, 廖华刚, 潘露, 陈龙, 黄同丽 (2019). 多花木蓝根截面微观结构对其抗拉特性的影响. 植物生态学报, 43, 709–717. DOI: 10.17521/cjpe.2019.0112

Effect of microstructure in cross section on tensile properties of *Indigofera amblyantha*

ZHANG Qiao-Yan¹, TANG Li-Xia^{1*}, LIAO Hua-Gang², PAN Lu¹, CHEN Long¹, and HUANG Tong-Li¹

¹College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025, China; and ²Qiandongnanzhou Institution of Forestry Science, Kaili, Guizhou 556000, China

Abstract

Aims The microstructure of root in cross section is composed of connected skeleton and interconnected or closed holes, which is closely related to the tensile mechanical properties of root system.

Methods The relationship of the microstructure of root in cross section and the tensile performances of root, in this study, was discussed by means of single root drawing test and scanning electron microscope (SEM).

Important findings The main results showed that: 1) the ability of root in cross section to bear tension and tensile strain decreased with the increase of root diameter in per unit area; 2) the tensile strength and ductile behaviors of root decreased with the increase of average pore size, and the uniformity of pore size also had a certain influence on them; with the increase of root diameter, the arrangement mode of vessels presents: single vessel → multiple vessel → chain of vessel → cluster of vessel. The arrangement mode of vessel and the uniformity of distribution have influences on the tensile strength characteristics of root, the influence of the arrangement mode has a greater influence than the uniformity distribution; 4) the influence of area ratio of root in cross section on root tensile properties, is also influenced by xylem, root bark and vessel characteristics. In conclusion, this study revealed that the increase of root diameter influenced the microstructure in cross section and affected the tensile properties of roots from the perspective of root microstructure, which provided a certain theoretical basis to further analysis of the soil fixation mechanism of shrub root systems.

Key words vessel; mechanical properties; root; microstructure

Zhang QY, Tang LX, Liao HG, Pan L, Chen L, Huang TL (2019). Effect of microstructure in cross section on tensile properties of *Indigofera amblyantha*. Chinese Journal of Plant Ecology, 43, 709–717. DOI: 10.17521/cjpe.2019.0112

随着生物措施在固土护坡方面的广泛应用, 植物根系对边坡稳定性的增强作用已引起人们极大的

关注。根系作为固土护坡的基本单元, 其抗拉能力的大小是决定边坡稳定系数的关键(刘小光, 2013)。

收稿日期Received: 2019-05-14 接受日期Accepted: 2019-08-14

基金项目: 贵州省科技计划项目(黔科合支撑[2016]2612号). Supported by Science and Technology Plan Project of Guizhou Province (Grant No. 2016[2612]).

* 通信作者Corresponding author (248206125@qq.com)

国内外研究表明,植物根系的抗拉能力是增强边坡稳定性最有效的因素并成为固土抗蚀的重要指标,根系材料的受力潜能直接决定根系抗拉力的大小(Hathaway & Penny, 1975; 李宁, 2016)。就单根抗拉特性而言,根系含水率(Genet *et al.*, 2005)、根直径、标距、拉伸速率和植物类型等对其抗拉特性具有显著影响,进而影响边坡的稳定性(Cofie *et al.*, 2000; Zhang *et al.*, 2012)。其中,尤以根直径的影响为主,表现为单根抗拉力随根直径的增加而增大,所呈现的相关关系为幂函数、对数函数和指数函数等;而抗拉强度随根直径的增粗总体呈下降趋势。众多学者将这一变化趋势归因于根系增粗生长导致的根系含水率、化学组成成分含量及截面组织的面积比三方面的改变,吕春娟和陈丽华(2013)和Zhang等(2014)认为根系力学特性降低的内因在于化学组成成分含量的变化随根直径的增粗产生改变。李谦等(2014)对绿竹(*Dendrocalamopsis oldhami* = *Bambusa oldhami*)根系的研究表明含水率对根系抗拉力学特性的影响随根直径的增粗而降低,在一定程度上揭示了根系力学特性随根直径的增大而降低的又一影响因素。李可等(2018)研究表明根直径的增加使截面组织比量产生变化进而影响了根系的抗拉特性。以上研究均在一定程度上探讨了根系抗拉特性与根直径的关系。而从根系发挥其力学性能的角度来讲,根截面的微观结构体现了根系内部的组成和构架方式,其必然对根系力学性质起到更大的作用。

根截面微观结构由连通的骨架和相互贯通或封闭的孔洞构成,主要包括孔径大小、管孔排列方式和管孔所占比例,且管孔结构是影响根系力学性质的主要因素(连广等, 1990; 何盛等, 2017)。罗文圣和赵广杰(2001)通过对木质材料的管孔进行物理或化学的填充,使力学性质相对较差的木材达到使用标准,表明木材的孔隙是影响其力学性能的重要因素。有关根系抗拉特性的研究报道较多,却鲜有关于根系抗拉力学性质与根系微观管孔间关系的。有鉴于此,本研究拟选取常用护坡灌木多花木蓝(*Indigofera amblyantha*)为研究对象,主要围绕以下三方面展开研究: (1)根系截面导管孔径特征及其对根系抗拉力学性质的影响; (2)导管分布特征对根系抗拉力学性质的影响; (3)导管面积比、木质部和皮层面积比等的变化对根系抗拉力学性质的影响,以期从

根截面这一微观角度来解析影响根系抗拉力学特性的内在机制。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区域位于贵州省贵阳市花溪区,地理位置26.45° N, 106.65° E, 海拔1 130 m, 属亚热带湿润气候。该区域平均年降水量达1 200 mm, 雨季集中在5–10月, 雨季易发生滑坡、坍塌等地质灾害, 且植被稀疏区极易形成侵蚀沟。年平均气温15.3 °C, 阴天多, 日照少, 辐射能量低, 年日照时间1 164.9 h, 无霜期长(301天), 年均相对湿度为77%, 全年气候温和, 雨量充沛。树种为人工修复边坡时撒种植物生长3年的多花木蓝, 边坡坡度约为35°, 坡向为阴坡。

1.2 根系分级及含水率测定

选取边坡撒种植物生长3年, 长势好且地径一致的多花木蓝于2018年11月采用整株挖掘法进行挖掘, 除去根表面杂质。将采集的直径1–5 mm植物根系, 参照文献(Zhang *et al.*, 2014)进行分级, 按直径每隔1 mm进行分级, 共分为5级, 标距为50 mm。分别为1 (1.00 ± 0.5 mm), 2 (2.00 ± 0.5 mm), 3 (3.00 ± 0.5 mm), 4 (4.00 ± 0.5 mm), 5 (5.00 ± 0.5 mm)。分类编号并装于密封袋中, 一部分用于拉伸试验, 一部分测定根系截面扫描电镜(SEM)图片。放于4 °C恒温箱保持根系鲜活, 并于一周内完成试验。

将上述分级的根系洗净并去除根表面多余的水分记录鲜质量后置于铝盒, 于105 °C烘箱干燥48 h, 记录烘干后根系的质量, 含水率计算公式如下:

$$w(\%) = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100 \quad (1)$$

式中, w 为根系含水率(%); m_1 为根系鲜质量(g); m_2 为根系干质量(g)。

1.3 单根抗拉试验

本试验采用济南耐而试验机有限公司生产的微机控电子万能试验机进行根系力学特性的测定, 仪器型号为DWD-10, 最大量程为10 kN, 最大速率为500 mm·min⁻¹。分测试端和电脑终端, 拉拔速率设置为10 mm·min⁻¹, 标距为5 cm, 测试完成后电脑终端自动复位。为防止和降低夹具对根系的破损, 试验中用魔术贴包裹住根系的两端。为消除夹具的影响, 认为断裂位置在标距内为有效试验, 全程电脑终端自动采集数据。单根抗拉强度测定参照公式(2),

极限延伸率的测试参照公式(3)。

$$P_i = \frac{4F_i}{4D_i^2} \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{L} \quad (3)$$

式中, i 为计算时所对应的根直径(mm), P_i 为单根抗拉强度(Mpa), F_i 为单根极限抗拉力(N), D_i 为单根直径(mm), ε 为极限延伸率, Δl 是根断裂时的形变(mm), L 为根长(mm)。

1.4 SEM扫描

将按1.2分级的新鲜根系清除根皮表面杂质, 后将其平整地切成2 mm长的小段, 然后置于离心管底部, 再加入一定量的戊二醛固定12 h。用0.1 mol·L⁻¹磷酸缓冲液清洗1次, 随后依次加入30%、50%、70%、90%、100%的叔丁醇/酒精混合液进行脱水, 前4种比例的混合液各脱水1次, 100%的叔丁醇/酒精混合液脱水2次, 每次5 min。其后抽干叔丁醇, 置于4 °C环境下5–10 min, 待叔丁醇变为固态, 于LGJ-10D冷冻干燥机1 h。最后, 将根系镀金后于S-3400 N电镜下进行, 获取根系横截面SEM图片。

1.4.1 根截面管孔分布特征

由于管孔多呈椭圆形, 对于管孔孔径的确定, 以管孔弦向直径作为管孔的孔径(刘一星和赵广杰, 2012)。将获取的SEM图片导入Nano Nwasure 1.2软件, 测量管孔弦向直径, 并分析根截面管孔孔径分布特征。

1.4.2 根截面微观管孔、木质部和根皮面积比的计算

将获取的SEM图片导入ArcGIS 10.2软件, 设置2个面数据库, 其一用于管孔面积的勾绘, 其二用于根截面面积的勾绘。分别勾绘管孔面积记为 S_1 , 总体木质部面积 S_2 , 总面积 S_3 , 勾绘完成导出面积数据, 采用公式(4)计算根截面导管面积的比值, 采用公式(5)计算木质部面积比, 采用公式(6)计算根皮面积比。(注: 根截面韧皮部不显著, 故将除木质部的部分归结为根皮)

$$\delta = \frac{S_1}{S_3} \quad (4)$$

$$\delta_1 = \frac{S_2 - S_1}{S_3} \quad (5)$$

$$\delta_2 = \frac{S_3 - S_2}{S_3} \quad (6)$$

式中, δ 为导管面积比(%); δ_1 为木质部面积比(%); δ_2 为根皮面积比(%)。

2 结果和分析

2.1 根系力学性质

2.1.1 根系的抗拉特性

根系固土护坡潜能的优劣取决于植物单根抗拉特性的大小。多花木蓝根系抗拉特性与根直径的关系如图1所示。从中可以看出, 根直径的大小对抗拉力影响较大, 表现为多花木蓝根系抗拉力随根直径的增加呈幂函数递增, 相关系数高达0.908, 表明抗拉力与根系直径间存在尺寸效应。其次, 根级相同的根系, 其抗拉力大小不一, 表现为根级较小(1–2 mm)时, 同根级间抗拉力差异不大, 随根级的增加(>2 mm), 抗拉力在不同根直径间的差异逐渐增大。

抗拉强度是抵御拉伸应力的最大临界能力, 是综合反映根系力学特性的指标, 由图1可以看出, 多花木蓝根系抗拉强度总体上随根直径的增加呈指数函数降低($R^2 = 0.82$)。其次, 在同一根系径级下, 抗拉强度大小亦不一, 对于细根(<2 mm), 抗拉强度间差异较大; 对于粗根(>2 mm), 差异相对较小, 这与抗拉力与根直径的关系相反。此外, 根直径为1 mm时, 平均抗拉强度为44.19 MPa, 相当于I级钢筋抗拉屈服强度(235 MPa)的18.8%。随根直径的增加, 抗拉强度降低, 最低为根直径5 mm时24.22 MPa, 亦相当于I级钢筋抗拉强度的10.3%。表明植物根系在抵抗土体变形过程中具有积极作用。

2.1.2 根系的极限延伸率

强度和韧性决定了木材的加工和使用性能, 对于根系亦是如此(陈思禹等, 2018)。极限延伸率是反映根系韧性的指标, 其与根直径的关系见图2。从中可知, 多花木蓝根直径范围为1.22–5.11 mm的根系, 极限延伸率为4.41%–19.25%, 表明根系具有弹性材料特征。随根直径的增加, 根系极限延伸率呈对数函数降低($R^2 = 0.7456$)。由此说明, 细根具有相对更高的抵抗变形作用, 即细根具有较强的韧性。

根系抗拉强度和极限延伸率(韧性)是表征和评价根系固土护坡的重要指标。随根直径的增大, 二者均降低, 表明随着根系的增粗, 根系截面单位面积承受拉力的能力下降, 同时单位面积上根系承受拉伸应变的能力亦下降。

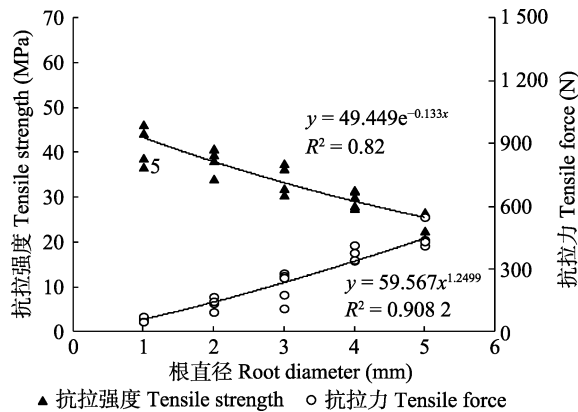


图1 多花木蓝根的抗拉特性。

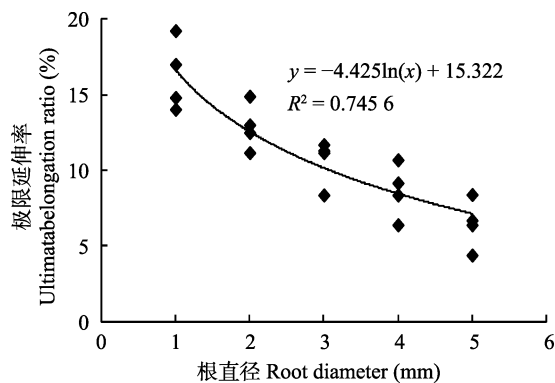
Fig. 1 Tensile properties of root of *Indigofera amblyantha*.

图2 多花木蓝根极限延伸率与根直径相关关系。

Fig. 2 The relationship of root ultimate elongation ratio and root diameter of *Indigofera amblyantha*.

2.2 根截面微观结构特征及对力学特性的影响

2.2.1 管孔孔径大小及其对力学特性的影响

根系截面管孔孔径的分布特征是植物适应环境与遗传特性所致, 研究多花木蓝根系截面管孔孔径的分布特征有利于解析根系力学特性差异的内因。不同根直径下, 多花木蓝管孔孔径分布频率特征如图3和表1所示。

由图3可知: 根直径1–5 mm时, 截面管孔最大孔径分别为0.068、0.07、0.08、0.11和0.13 mm, 平均孔径依次为0.028、0.034、0.040、0.042和0.057 mm, 由此说明随着根直径的增加, 根截面孔径类型增加, 平均孔径和截面最大孔径均增大。

累积频率 $P > 5\%$, 根直径1 mm时(图3A), 管孔孔径集中分布在0.009–0.058 mm且分布频率差异不大, 表明根直径1 mm截面孔径尺寸分布较为均匀。同理, 根直径2 mm时(图3B), 管孔孔径集中分布在0.01–0.62 mm, 截面管孔尺寸孔径均匀度较根直径1 mm差; 根直径3 mm时(图3C), 管孔孔径集中分布

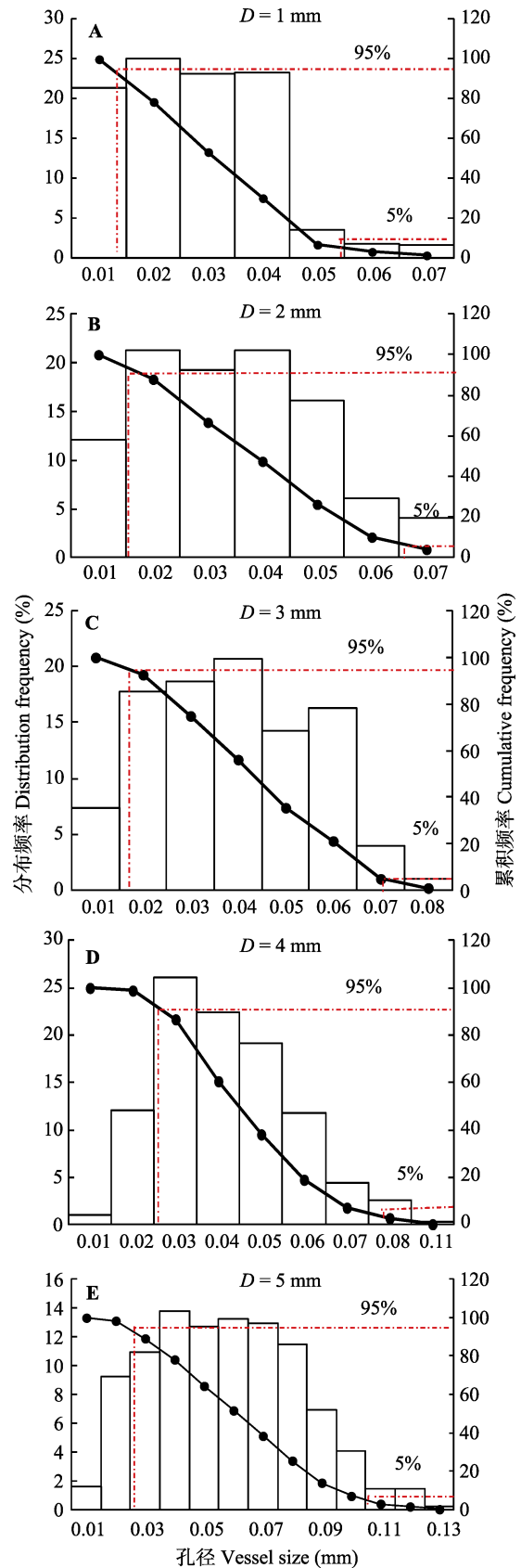


图3 多花木蓝不同根系直径(D)截面导管孔径分布特征。

Fig. 3 Characteristics of vessel pore size distribution of *Indigofera amblyantha* in cross section with different root diameters (D).

表1 多花木蓝不同根直径根截面管孔孔径

Table 1 Pore size of vessels of *Indigofera amblyantha* in cross section with different root diameters

根直径 Root diameter (mm)	最大孔径 Maximum of pore size (mm)	最小孔径 Minimum of pore size (mm)	平均孔径 Mean of pore size (mm)
1	0.068	0.009	0.028
2	0.07	0.01	0.034
3	0.08	0.01	0.040
4	0.11	0.01	0.042
5	0.13	0.01	0.057

在0.012–0.065 mm, 根截面管孔孔径分布较为均匀; 根直径4 mm时(图3D), 管孔孔径集中分布在0.021–0.073 mm, 各孔径分布频率差异较大, 说明根截面管孔孔径分布不均匀; 根直径5 mm时(图3E), 管孔孔径集中分布在0.032–0.112 mm, 孔径类型最多, 孔径分布均匀性较根直径4 mm的好。由此表明随根直径的增大, 根截面管孔孔径的分布发生变化, 表现为集中分布区间增大, 孔径均匀性以根直径1 mm最优, 根直径4 mm最劣, 根直径2、3、5 mm孔径均匀性差异不大。

结合2.1可知, 根系的抗拉强度随着根直径的增大而降低, 即根系截面单位面积承受拉力的能力下降。从根截面管孔孔径分布特征分析: (1)根直径增加, 根截面平均孔径在增大, 根单位面积上承受拉力的实质面积减小, 降低了根系的抗拉强度, 表明根系抗拉强度与孔径负相关。(2)根直径增大, 导管孔径集中分布区间增大, 即大孔隙增加, 进一步降低了根系的抗拉强度。(3)根直径增大, 导管孔径分布均匀性也在发生改变, 对根系的抗拉强度也有一定的影响。(4)平均孔径对抗拉强度的影响程度较孔径分布均匀性大(如平均孔径较小、均匀性较差的4 mm根直径的抗拉强度大于平均孔径较大、均匀性较高的5 mm根直径)。

同理, 对于根系韧性, 其随着根直径的增大而降低, 即单位面积上根系承受拉伸应变的能力在下降。从根截面管孔孔径分布特征分析: 根系为多孔材料, 在瞬时拉伸应变下, 能量因在孔隙之间传递、反射而被分散和削弱, 进而增加了根系抵抗拉伸应变的能力, 也即增加了根系的韧性。随根直径的增大, 根截面平均孔径在增大, 孔径过大, 使得能量在孔隙中的传递和反射程度降低, 从而对拉伸冲击能量的削弱能力减弱。

2.2.2 管孔排列分布特征及对力学特性的影响

管孔排列方式是反映管孔结构的重要指标, 是

影响木质材料理化性质的重要因素。不同根直径下, 根截面扫描电镜图如图4所示。从中可知, 根截面主要由木质部、根皮和管孔组成(韧皮部不明显), 管孔的排列及分布随根直径的变化而变化。

根直径1–2 mm时, 各管孔单独存在呈单管孔, 前者较后者在截面上的分布均匀(图4A、4B); 根直径3 mm时, 2至数个管孔相连呈径向或弦向排列、形成复管孔, 根截面管孔分布较为均匀(图4C); 根直径增至4 mm时, 管孔排列发生改变, 各管孔沿径向排列成管孔链状, 根截面分布不均匀但又呈径向辐射状的规律(图4D)。根直径为5 mm时, 管孔排列最为复杂, 管孔间相邻呈堆状, 形成管孔团(刘一星和赵广杰, 2012), 部分管孔团径向排列成链状, 根截面管孔分布最均匀(图4E)。由此说明, 对于同一种植物根系, 管孔的分布排列方式随植物的生长发育产生变化, 随根直径的增加, 管孔排列方式越趋复杂, 总体呈现单管孔→复管孔→管孔链→管孔团的变化趋势。

结合多花木蓝抗拉力学特性可知, 抗拉强度随根系的增粗生长而降低, 原因在于根截面管孔排列方式及其在截面上分布均匀性发生的变化。

根直径为1 mm时, 其根截面的管孔排列方式以单管孔为主, 此时抗拉强度和韧性相对最大。管孔以复管孔为主的2 mm和3 mm根直径抗拉强度和韧性次之。其次, 以管孔链排列的4 mm根直径和以管孔团为主的5 mm根直径的抗拉强度和韧性依次减小。由此说明管孔的排列方式对抗拉特性有影响, 管孔呈单管孔→复管孔→管孔链→管孔团排列时, 抗拉强度和韧性均依次减小。

根直径为1 mm和2 mm时的根截面管孔排列方式都以单管孔为主, 前者的管孔分布较后者更为均匀, 但两者的抗拉强度相差不大, 分别为44.19和40.86 MPa。由此说明, 管孔分布的均匀性对抗拉力学特性的影响较小。

综上所述, 根截面导管排列方式和分布均匀性对根抗拉力学特性产生影响, 尤以排列方式的影响较大。

2.2.3 根截面组织比量及其对力学特性的影响

木材学中, 常用“组织比量”(导管、木纤维及薄壁与截面的面积比)作为衡量木材材性的重要指标(张述银, 1987)。阔叶树种根系与其树材的解剖结构具有很多相似之处(蒋坤云等, 2013a, 2013b)。由表2

可知, 导管面积比随根直径的增大呈先降低后增加的趋势。其中, 根直径4 mm时, 导管面积比最小, 仅为4.44%; 根直径5 mm时, 导管面积比最大, 为10.8%; 根直径1–3 mm根截面导管面积比次之且差异不大。马大燕等(2010)指出, 导管面积比越大, 根系密度越低, 根系力学特性相对较好(郑欣欣等, 2018)。按理说, 根直径为1–3 mm, 其管孔面积比相对较大, 其抗拉力学特性理应不好, 根直径4 mm时, 其管孔面积比最小, 其抗拉特性应最佳。但实际测得的抗拉特性却一直降低。由此说明, 根截面管孔面积比的大小对根抗拉特性的影响有一定的规律可循, 但还受木质部和根皮及导管特征的影响。

木质部面积比随根直径的增加而增大, 根皮面积比则与此相反。这是由于根系增粗生长发育需增加水分与养分的汲取所致, 根系的增粗生长导致木质部面积比增大是必然趋势, 而木质部中含有大量的木质素, 木质素为不定型物质, 是根系硬度和刚性的主要来源。木质部面积比的增加, 使得根系硬度和刚性增加, 势必在一定程度上降低根系的韧性。

3 讨论

(1)多花木蓝根系抗拉力随根直径的增加而增大, 抗拉强度与极限延伸率的关系则与此相反。这与众多学者的研究结果(赵丽兵和张宝贵, 2007; 朱海丽等, 2008; 李可等, 2018)一致。但以上研究均为涉及根系增粗生长导致根截面导管特征的变化。有关木质材料微观结构与其力学特性的关系的研究大多集中在木材科学, 而植物根截面导管的变化与力学特性关系的研究鲜有报道。仅有北京林业大学朱海丽等(2009)通过石蜡切片法研究过根截面的组织面积所占比例及对根系力学特性的影响, 但未深入到导管孔径的变化特征对根系力学特性的影响。研究表明导管平均孔径及其集中分布区间随根直径的增大而增加。这是因为根直径的增粗生长需要更多的养分和水分, 导致管孔孔径增大, 且集中分布区间亦增大, 从而导致根系受拉时, 承受拉力的实质截面积较小(导管面积大), 导致根系抵抗拉伸的能力降低。

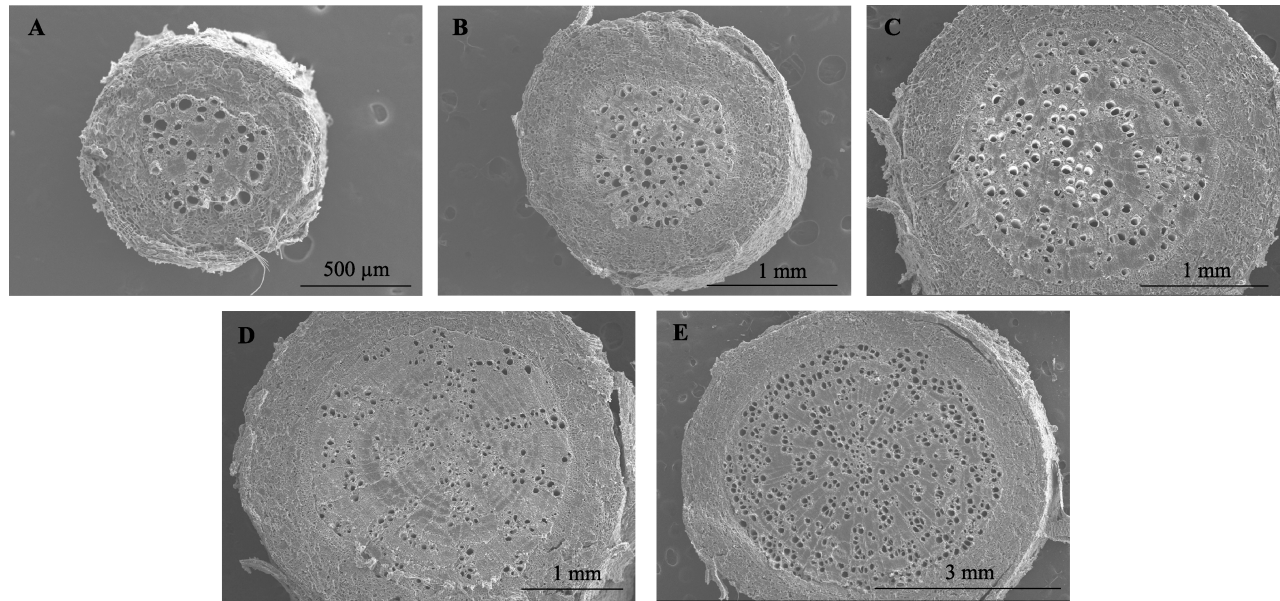


图4 多花木蓝1–5 mm根直径根截面管孔分布特征。
Fig. 4 Distribution features of vessels of *Indigofera amblyantha* in cross section with different root diameter.

表2 多花木蓝不同根直径根系显微构造百分比(平均值±标准偏差)
Table 2 Percentage of microstructure of *Indigofera amblyantha* with different roots diameter (mean ± SD)

根直径 Root diameter (mm)	1	2	3	4	5
导管面积比 Area ratio of vessels (%)	7.42 ± 0.29	6.91 ± 0.16	6.80 ± 0.37	4.44 ± 0.37	10.82 ± 0.13
木质部面积比 Area ration of xylem (%)	21.85 ± 1.18	36.44 ± 3.2	45.89 ± 0.66	47.16 ± 3.13	53.06 ± 1.27
根皮面积比 Area ratio of velamen (%)	67.35 ± 1.18	59.16 ± 7.25	47.30 ± 0.66	46.24 ± 3.12	39.53 ± 1.27

(2)随根直径的增大, 导管排列方式呈单管孔→复管孔→管孔链→管孔团的变化趋势, 经查阅相关资料, 未明确说明这一点。但在木材科学中, 管孔团排列方式在晚材中居多(刘一星和赵广杰, 2012), 说明植物生长成熟后期, 其管孔以管孔团排列为主, 进一步佐证了该研究的可信度。随根直径的增大, 根截面管孔呈单管孔→复管孔→管孔链→管孔团的变化趋势。可能的原因有三点: 1)研究区位于喀斯特地区, 植物根系为了适应地上地下的二元结构的喀斯特生境, 耐季节性缺水和生长空间所致; 2)根系同其径材具有很多相似之处, 具有各向异性、多孔状和层次状, 导管排列方式的差异进一步证实了这一点; 3)细根主要对养分和水分起吸收和运输作用, 通过分支的连接汇聚于粗根, 粗根再将其运输至茎秆。即不同径级的根系发挥的功能不同, 这在一定程度上对根系内部微观结构和外在力学特性产生影响。

(3)导管分布的均匀与否, 在一定程度上决定了根系受拉时, 拉应力在其截面上的分布特征。导管的分布均匀性受其排列方式的影响, 以管孔团排列时最为均匀, 其次为单管孔、复管孔。以管孔链排列时, 根系的抗拉强度和韧性也相对较差, 但导管最不均匀的4 mm根直径, 其强度和韧性却略高于分布最为均匀的5 mm根直径。这是由于5 mm根直径管孔较大且多, 使得根截面单位面积分担拉力的实质面积较少。这进一步说明导管分布均匀性对根系抗拉特性的影响低于管孔的孔径大小和面积比。

经典木材学认为, 根截面管孔主要是水分和养分的输运通道(周贤武, 2018), 管孔面积比的大小在一定程度上反映了根系含水率的变化特征。根系导管面积比越大, 根系含水率理应相对较高, 丁涛等(2012)指出根系水分的存在具有一定的增韧作用。由图5可看出, 随根系直径的增加, 含水率总体上呈降低趋势, 这进一步解释了根系韧性随根直径的增大而降低。导管面积比最大的根直径(5 mm), 其含水率最小。这是由于随着根直径的增加, 根系木质化程度加大是必然, 这可能是导致根皮及木质部含水率降低的原因, 这在一定程度上阐述了管孔面积比大而根系韧性和强度均较小的现象。

植物根系力学特性的优劣是决定和筛选固土护坡树种的重要因素, 研究表明细根具有较大的强度和韧性, 这与吕春娟和陈丽华(2013)和朱海丽等

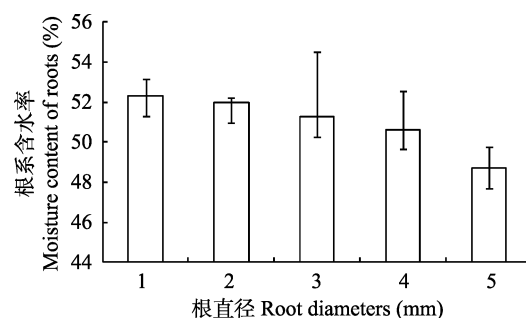


图5 多花木蓝根系含水率与直径的关系(平均值±标准偏差)。

Fig. 5 Relationship between moisture content of root and root diameters of *Indigofera amblyantha* (mean ± SD).

(2009)的研究结果一致, 但二者均未进一步揭示其降低的内在机理。从根截面表现形貌可知, 管孔排列方式对根系抗拉特性影响最大, 其次为平均孔径。这是由于管孔排列方式进一步决定了其在根截面的分布均匀性, 进而影响根截面的应力分布。此外, 植物根系是生物材料, 根系的密度、木质部的密度和导管密度等也将对根系力学特性产生一定的影响, 后期将进一步深入探讨。

4 结论

(1)根系力学特性(强度、韧性)与根直径存在明显的尺寸效应, 随根直径的增加, 抗拉力呈指数函数增加, 抗拉强度呈幂函数降低以及极限延伸率呈线性降低。即随根系的增粗生长, 多花木蓝根截面单位面积承受拉力的能力降低。

(2)根系管孔是水分和养分的运输通道, 根截面导管平均孔径增大、孔径集中分布区间增大及其孔径的分布均匀性是致使根系力学性能降低的重要原因。其中抗拉强度和韧性随平均孔径的增加而降低, 平均孔径较孔径分布均匀性对根系力学性质的影响大。

(3)根截面微观结构特征是生物材料多向异性的内在表现。随根直径的增加, 管孔排列方式越趋复杂, 但又呈现单管孔→复管孔→管孔链→管孔团排列规律。根系力学特性与管孔排列趋势一致, 表现为呈单管孔时, 力学性质较优, 其次依次为复管孔、管孔链和管孔团。

(4)导管面积比对根系抗拉特性有一定的影响, 但受木质部和根皮面积比的影响也较大。

参考文献

Chen SY, Xue ZH, Liu JW, Zhao KY, Bao XC (2018). Effect

DOI: 10.17521/cjpe.2019.0112

- of alkali treatment on relaxation properties of wood. *Journal of Northwest Forestry University*, 33, 193–197, 202. [陈思禹, 薛振华, 刘金炜, 赵凯燕, 包秀春 (2018). 碱处理对木材松弛性能的影响. 西北林学院学报, 33, 193–197, 202.]
- Cofie P, Koolen AJ, Perdok UD (2000). Measurement of stress-strain relationship of beech roots and calculation of the reinforcement effect of tree roots in soil-wheel systems. *Soil & Tillage Research*, 57, 1–12.
- Ding T, Bei ZT, Li Y (2012). Influence of heat treatment on crystallinity and mechanical properties of Chinese fir lumber. *China Forestry Science and Technology*, 26(2), 23–26. [丁涛, 贝政廷, 李源 (2012). 杉木热处理材结晶度及力学性能的研究. 林业科技开发, 26(2), 23–26.]
- Genet M, Stokes A, Salin F, Mickovski SB, Fourcaud T, Dumail JF, van Beek R (2005). The influence of cellulose content on tensile strength in tree roots. *Plant and Soil*, 278, 1–9.
- Hathaway RL, Penny D (1975). Root strength in some *Populus* and *Salix* clones. *New Zealand Journal of Botany*, 13, 333–344.
- He S, Xu J, Wu ZX, Bao YJ, Yu H, Chen YH (2017). Compare of porous structure of moso bamboo and *Pinus sylvestris* L. lumber. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 41, 157–162. [何盛, 徐军, 吴再兴, 包永洁, 于辉, 陈玉和 (2017). 毛竹与樟子松木材孔隙结构的比较. 南京林业大学学报(自然科学版), 41, 157–162.]
- Jiang KY, Chen LH, Gai XG, Yang YJ (2013a). Relationship between tensile properties and microstructures of three different broadleaf tree roots in North China. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 29(3), 115–123. [蒋坤云, 陈丽华, 盖小刚, 杨苑君 (2013a). 华北护坡阔叶树种根系抗拉性能与其微观结构的关系. 农业工程学报, 29(3), 115–123.]
- Jiang KY, Chen LH, Yang YJ, Gai XG (2013b). Relationship between tensile strength and selected anatomical features of two different conifer species roots in North China. *Journal of Soil and Water Conservation*, 27, 8–12, 19. [蒋坤云, 陈丽华, 杨苑君, 盖小刚 (2013b). 华北油松、落叶松根系抗拉强度与其微观结构的相关性研究. 水土保持学报, 27, 8–12, 19.]
- Li K, Zhu HL, Song L, Li GR, Xie BS, Li BF (2018). Relationship between tensile properties and microstructure of two typical plant roots in the Qinghai-Tibet Plateau. *Research of Soil and Water Conservation*, 25, 240–249. [李可, 朱海丽, 宋路, 李国荣, 谢彬山, 李本峰 (2018). 青藏高原两种典型植物根系抗拉特性与其微观结构的关系. 水土保持研究, 25, 240–249.]
- Li N (2016). *Study on Influence Factors of Root Tensile Properties by Four Arbor Root System*. Master degree dissertation, Beijing Forestry University, Beijing. 14–17. [李宁 (2016). 四种乔木根系抗拉特性的影响因素研究. 硕士学位论文, 北京林业大学, 北京. 14–17.]
- Li Q, Zhou BZ, An YF, Xu SH (2014). Root system distribution and biomechanical characteristics of *Bambusa oldhami*. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 25, 1319–1326. [李谦, 周本智, 安艳飞, 徐升华 (2014). 绿竹根系分布及生物力学性质. 应用生态学报, 25, 1319–1326.]
- Lian G, Wang TK, Dai CY (1990). Measuring wood voidage by X-ray absorption method. *Forestry Science & Technology*, (1), 39, 43–44. [连广, 王庭魁, 戴澄月 (1990). X射线吸收法测定木材空隙度. 林业科技, (1), 39, 43–44.]
- Liu XG (2013). *Study on Friction and Anchorage Characteristics Between Root System and Soil*. Master degree dissertation, Beijing Forestry University, Beijing. 5–6. [刘小光 (2013). 林木根系与土壤摩擦锚固性能研究. 硕士学位论文, 北京林业大学, 北京. 5–6.]
- Liu YX, Zhao GJ (2012). *Wood Science*. 2nd edn. China Forestry Publishing House, Beijing. 36. [刘一星, 赵广杰 (2012). 木材学. 第二版. 中国林业出版社, 北京. 36.]
- Lü CJ, Chen LH (2013). Relationship between root tensile mechanical properties and its main chemical components of typical tree species in North China. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 29, 69–78. [吕春娟, 陈丽华 (2013). 华北典型植被根系抗拉力学特性及其与主要化学成分关系. 农业工程学报, 29, 69–78.]
- Luo WS, Zhao GJ (2001). Pore structure of cell wall of wood and transport processes of substance. *Journal of Beijing Forestry University*, 23(2), 85–89. [罗文圣, 赵广杰 (2001). 木材细胞壁的空隙构造及物质的输运过程. 北京林业大学学报, 23(2), 85–89.]
- Ma DY, Wang XM, Xue ZH (2010). Study on wood density and organic proportion based on structure. *Journal of Inner Mongolia University of Science and Technology*, 29, 167–170. [马大燕, 王喜明, 薛振华 (2010). 基于构造的木材密度与组织比量的研究. 内蒙古科技大学学报, 29, 167–170.]
- Zhang CB, Chen LH, Jiang J (2014). Why fine tree roots are stronger than thicker roots: The role of cellulose and lignin in relation to slope stability. *Geomorphology*, 206, 196–202.
- Zhang CB, Chen LH, Jiang J, Zhou S (2012). Effects of gauge length and strain rate on the tensile strength of tree roots. *Trees*, 26, 1577–1584.
- Zhang SY (1987). Relationship between anatomical characteristics and physical-mechanical properties of east-Liaoning oak (*Q. liaotungensis*). *Journal of Anhui Agricultural College*, 14, 26–38. [张述银 (1987). 辽东栎木材解剖特征与物理-力学性质的关系. 安徽农学院学报, 14, 26–38.]
- Zhao LB, Zhang BG (2007). Experimental study on root bio-mechanics and relevant factors of *Medicago sativa* and

- Digitaria sanguinalis*. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 23, 7–12. [赵丽兵, 张宝贵 (2007). 紫花苜蓿和马唐根的生物力学性能及相关因素的试验研究. 农业工程学报, 23, 7–12.]
- Zheng XX, Tian PB, Pan B (2018). Comparison of the structure and properties of *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus deglupta*. *Forestry Machinery & Woodworking Equipment*, 46(11), 36–40, 52. [郑欣欣, 田佩彬, 潘彪 (2018). 巨桉和剥皮桉木材构造与性质的比较. 林业机械与木工设备, 46(11), 36–40, 52.]
- Zhou XW (2018). *Study on Cell Wall Structure and Properties of Down Regulated C3H and HCT Transgenic Poplar*. PhD dissertation, Chinese Academy of Forestry Sciences, Beijing. [周贤武 (2018). C3H和HCT下调转基因杨树木材细胞壁结构与性能研究. 博士学位论文, 中国林业科学研究院, 北京.]
- Zhu HL, Hu XS, Mao XQ, Li GR, Sheng HY, Chen GC (2008). Study on mechanical characteristics of shrub roots for slope protection in Loess area of Tibetan Plateau. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 27(Suppl. 2), 3445–3452. [朱海丽, 胡夏嵩, 毛小青, 李国荣, 盛海彦, 陈桂琛 (2008). 青藏高原黄土区护坡灌木植物根系力学特性研究. 岩石力学与工程学报, 27(增刊2), 3445–3452.]
- Zhu HL, Hu XS, Mao XQ, Li GR, Zhang XL, Chen GC (2009). Relationship between mechanical characteristics and anatomical structures of slope protection plant root. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 25(15), 40–46. [朱海丽, 胡夏嵩, 毛小青, 李国荣, 张兴玲, 陈桂琛 (2009). 护坡植物根系力学特性与其解剖结构关系. 农业工程学报, 25(15), 40–46.]
- 责任编辑: 王锁民 责任编辑: 李 敏 实习编辑: 赵 航