

华北护坡阔叶树种根系抗拉性能与其微观结构的关系

蒋坤云, 陈丽华^{*}, 盖小刚, 杨苑君

(北京林业大学水土保持学院, 教育部水土保持与荒漠化防治重点实验室, 北京 100083)

摘要: 为了研究乔木单根抗拉性能与其微观结构和纤维的关系, 为筛选合适的水土保持、边坡防护树种提供理论基础, 对白桦、榆树、蒙古栎 3 种北方常见阔叶树种的根系进行了抗拉力、抗拉强度、根系解剖结构以及根系分子离析等一系列的试验, 并运用多元回归的方法对两者之间的关系进行定量的分析。试验结果表明: 3 种阔叶树种的根系显微结构基本和其树材相同; 根系显微结构中木纤维所占根系横截面积的百分比、韧皮部所占根系横截面积的百分比、木纤维的尺寸因素影响单根的抗拉特性; 其中木纤维所占根系横截面积的百分比对单根抗拉力的影响因子最大且呈正相关, 韧皮部所占根系横截面积的百分比对单根抗拉强度的影响因子最大且呈正相关; 同时单根抗拉特性与木纤维的长度、木纤维的长宽比以及壁腔比均成正相关, 但影响因子小于木纤维所占根系横截面积的百分比、韧皮部所占根系横截面积的百分比; 3 个树种中榆树在相同直径下的各项测定指标都高于白桦和蒙古栎, 表现出单根具有更好的抗拉特性。研究结果可为固土护坡阔叶树种的选择提供参考。

关键词: 抗拉特性, 微观结构, 纤维, 水土保持, 阔叶树种根系

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.03.016

中图分类号: S718

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-03-0115-09

蒋坤云, 陈丽华, 盖小刚, 等. 华北护坡阔叶树种根系抗拉性能与其微观结构的关系[J]. 农业工程学报, 2013, 29(3): 115—123.

Jiang Kunyun, Chen Lihua, Gai Xiaogang, et al. Relationship between tensile properties and microstructures of three different broadleaf tree roots in North China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(3): 115—123. (in Chinese with English abstract)

0 引言

近 20 a 来, 利用植被对边坡进行稳固和保护在国内越来越受欢迎^[1]。根系是植物最重要器官之一, 而植被主要是通过根系提高土壤的稳定性。在土壤中根系呈网状, 盘横错节, 在土壤的结构上起到网结和桩固作用^[2], 同时根系可以增加土壤的团聚力, 提高坡面的稳定性, 对治理和预防浅表层滑坡具有重要的作用, 并可有效的防止水土流失^[3]。根系是一种特殊的材料, 由于它参与植物的代谢活动, 具有多相、非均匀、各向异性等特点^[4-5], 以及具有扩张、抗压和抗曲折的性能^[6], 因此在不同的生理状态和环境下, 根系的力学性质差异性很大。

对木材材料的物理—力学性能与其特定微观结构相关性的研究已有几十年的历史, 研究结果说明, 木材微观结构组成、比例对其力学机械性能有很大的影响^[7]。但目前关于乔木阔叶植物根系微观结构、根系中纤维对根系力学性能影响的研究很少, 而根系是由多细胞组成的具有复杂层状结构和特殊分子力学现象的生物复合材料, 且宏观尺度上的性能往往是由其微观结构所决定的, 因此需要进一步对根系进行显微结构的观察, 以解释不同植物间根系力学性能与内在结构的实质性联系。

植物根系抗拉特性作为衡量水土保持植物的一个重要指标^[8], 同时也是增加边坡稳定性最重要因素之一^[9], 所以目前根系力学性能研究方面主要集中在根系抗拉研究上, 不仅种内和种间, 而且同一个根系内, 抗拉特性也有很大变化^[10]。

因此本文期望通过对华北地区常见护坡阔叶树种根系微观结构的研究并结合根系微观结构的数量特征和纤维特点, 参考运用木材学、材料学中的研究方法, 定量、定性的分析可能影响单根抗拉力、抗拉强度的内在因素, 从而为进一步探明、预测、评价乔木固持水土的力学机制提供植物内在结构的理论基础。

收稿日期: 2012-08-16 修订日期: 2013-01-15

基金项目: 国家林业局林业公益科技专项“华北土石山区典型森林生态系统健康维护机制研究”(200804022)、国家自然科学基金(30872067)、教育部博士点基金(20090014110002)和青年科学基金项目(30901162)
作者简介: 蒋坤云(1984—), 女, 宁夏银川人, 博士生。主要从事边坡防护与生态环境的研究。北京 北京林业大学水土保持学院, 教育部水土保持与荒漠化防治重点实验室, 100083。

Email: jiang_kunyun@sohu.com

^{*}通信作者: 陈丽华(1957—), 女, 教授, 博导, 研究方向: 流域治理、森林水文、城镇规划等。北京 北京林业大学水土保持学院, 教育部水土保持与荒漠化防治重点实验室, 100083。

Email: c_lihua@bjfu.edu.cn

1 研究区概况

研究区位于河北省承德市木兰围场林管局下辖的北沟林场,地处 117°27'E, 40°54'N, 海拔 750~1 829 m。北沟林场属于大陆性季风型山地气候,具有雨热同季、冬长夏短、四季分明、昼夜温差大的特征,年平均气温-1.4~4.7℃。年均降水量 380~560 mm,主要集中在 6~8 月,年均蒸发量 1 462.9~1 556.8 mm,年平均相对湿度 63%,降雨形式多为暴雨。植物区系为东北区系。林场总经营面积 5 428.8 hm²,其中天然林 1 485.4 hm²,以白桦、杨树、落叶松、云杉和蒙古栎为主要乔木树种;以油松、落叶松、河杨等树种为主的人工林 1 180.5 hm²;混交林 1 560.9 hm²,混交类型为针阔混交。

2 材料与方法

2.1 根系材料

选择了华北地区的主要乡土树种为研究对象,分别为白桦(*Betula platyphylla*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)和榆树(*Ulmus pumila*)。用完全挖掘法采集根系样品。为了使采集的根样具有代表性,同一树种选择 3 棵树龄在 20 a 左右的树木,随机挑选生长正常、单根通直均匀的根系,经破碎过筛、挑拣活根之后,用游标卡尺逐一量测、分级。将取好的根样用密封袋保存,送往实验室冷藏保存在冰箱 4℃ 环境下,并在一周内进行试验。

由于所采集的根系直径分布在 2.00~8.00 mm 之间,为了使试验更加全面分别选取直径为(3.00±0.5)、(5.00±0.5)、(7.00±0.5) mm 的白桦、蒙古栎和榆树根系进行试验,先取单根的一小部分制作根系显微切片和进行根系纤维的离析试验,然后用剩余的部分进行单根抗拉试验。

2.2 单根抗拉试验

本试验选用的是济南试金集团有限公司生产的微机控制电子式万能试验机,型号 WDW-100E,试验力测量范围 0.4~100 kN,全程自动换挡,速度范围 0.001~500 mm/min。试验具体操作由两部分组成:万能试验机和控制终端。

试验根系的标距为 100 mm,以 10 mm/min 为速度匀速拉伸直径在根系直至完全拉断。具体步骤是首先将所需测定的根系放入夹具中,拧紧上部夹具,调节电脑上试验力和峰值后,拧紧下部夹具。选择拉伸速度为 10 mm/min,点击开始键,开始试验。当根被拉断时试验停止。通过试验分析,纪录本次试验根系最大抗拉力、抗拉强度。本研究认为单根在夹具中间或接近中间处断裂时,是由拉力引起的破坏而非其他测试过程中的损伤引起,此时记

录的数据为有效数据,试验成功率为 33%。

2.2 根系切片试验

由于乔木根系的直径较大且不透明,不能直接在显微镜下观察。要研究植物的内部结构,一定要经过特殊的处理,使材料减少厚度及体积,使光线透过样品才能进行显微观察。所以本研究所选择的切片方法为常规的木材显微切片法。

基本步骤为将选取的进行抗拉试验的根系,切取 5~10 mm 长的小段。然后对试验材料进行抽气、软化,用旋转切片机将根段切成约 10 μm 的横向薄片,选用番红溶液进行染色,染色完成后,用光学树脂胶制成永久切片。

切片制备完毕后,用日本 Olympus 公司生产的奥林巴斯 BH-2 显微镜以及长春博盛量子产品科技有限公司生产的 Penguin 600CL 型数字摄像传感器和计算机联机构成数字图像动态采集系统。根据木材的细胞腔和细胞壁在切片制取时着色情况的不同,对获取的显微构造数字图像进行二值化处理,即选择合理的阈值(凡灰度值高于阈值的像素均置成白色,凡灰度值低于阈值的像素均置成黑色),得到二值图像。此时白色和黑色分别是木材的细胞腔和细胞壁部分,完成对细胞的识别。再根据像素灰度值、大小、数目和所在的位置等特征值,完成对阔叶树种根系的显微结构特征及韧皮部、次生木质部、导管等结构的面积比的测量^[1]。

2.3 根系解剖分子离析试验

切片的显微观察,往往还不能全面地反映各种根系细胞整体、尖端形状、胞壁整体构造的特点。为了进一步确定根系各种解剖分子和根系抗拉性能之间的关系,需要运用离析试验,将根系的解剖分析分离开来,观察它们的特征与形态尺寸。

基本步骤是将根系去掉皮层、韧皮部,将根系木质部劈成火柴杆大小,放入试管中,注水加热,排除其中的空气。然后在试管中加入硝酸和一定量的氯酸钾放入水浴锅中加热,直到木材软化后,倒去试管中的溶液。待试管冷却后,用水冲洗数次,至无酸为止。注水于试管中,用手指按着试管口用力振荡,木材细胞则被分离,木材变为木浆。最后用解剖针挑出少许木浆置于载玻片上,加水一滴,使木材细胞分离,盖上盖玻片,用吸水纸吸去盖玻片上多余水分,最后,即可置于奥林巴斯 BH-2 显微镜下观察和图像的采集。并用 Image-pro Plus 分析软件计算采集的图像中离析细胞的尺寸。

2.4 数据统计方法

由于阔叶树材根系的解剖特征较多,对抗拉特性的影响也互异,为了能更加科学对根系抗拉特性和内在结构进行定量的分析,采用 SPSS 19.0 for

Windows 软件 (SPSS, Chicago, IL, USA) 的回归分析对数据进行处理, 以确定抗拉特性与显微结构特点的内在联系。而多元线性回归能进一步确定决定所设的那几个变量对根系抗拉特性的影响较大并能去除相关性小的自变量^[12], 采用逐步筛选策略对变量进行筛选。除了把常见的显微结构设定为自变量, 还将木纤维的尺寸也加入到自变量中, 回归方程如下

$$Y_1 = \sum_{i=1}^9 a_i X_i, \quad Y_2 = \sum_{i=1}^9 b_i X_i$$

式中, Y_1 为抗拉力, N; Y_2 为抗拉强度, MPa; a_i, b_i 为回归系数; X_i 为自变量, 其定义为: X_1 为木纤维所占根系横截面积的百分比 (%), 简称木纤维面积百分比; X_2 为导管所占根系横截面积的百分比 (%), 简称导管面积百分比; X_3 为韧皮部所占根系横截面积的百分比 (%), 简称韧皮部面积百分比; X_4 为木射线所占根系横截面积的百分比 (%), 简称木射线面积百分比; X_5 为导管直径 (μm); X_6 为木纤维长度 (μm) X_7 为木纤维直径 (μm); X_8 为木纤维壁腔比 X_9 为木纤维长宽比。

因为数据单位的不同, 所以在数据处理前需要进行标准化。同时采用方差分析不同变量间的显著性差异。

3 结果与分析

3.1 乔木阔叶树种单根抗拉特性分析

3.1.1 抗拉力与直径的关系

通过数学统计分析得出了白桦、蒙古栎和榆树 3 个树种在相同标距下最大抗拉力与直径的关系曲线。结果表明 3 个树种根系的最大抗拉力均与直径呈正相关关系, 即粗根拥有更大的极限抗拉力而细根的极限抗拉力相对较小。对其关系进行回归分析, 回归曲线采用幂函数关系, 方程的具体形式及

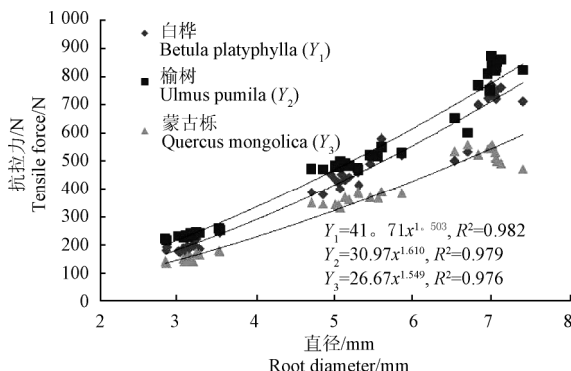


图 1 3 种阔叶树种单根抗拉力与直径的关系

Fig.1 Relationship between root tensile force and diameter of three different Broadleaf species

拟合度如图 1。由表中的数据可知, 幂函数能很好地解释根系最大抗拉力与根径之间的关系, 并且决定系数在 0.9 以上。

试验树种根系的直径范围大致相同, 同一树种最大抗拉力随直径的变幅较大, 据图分析可知在相同直径条件下, 榆树的最大抗拉力大于白桦和蒙古栎。由回归方程得出, 当根径为 5 mm 时, 榆树的最大抗拉力为 469 N, 而白桦的最大抗拉力为 413 N, 蒙古栎的最大抗拉力仅为 322 N。

3.1.2 抗拉强度与直径的关系

通过对标距为 100 mm 的白桦、榆树和蒙古栎的直径与抗拉强度之间的比较, 并对数据作基本的描述统计, 可以看出不同树种其根系表现出不同的抗拉特性, 如图 2, 并且 3 个树种的抗拉强度均与根径呈负相关关系, 决定系数均高于 0.8。具体为: 当根系直径在 3~5 mm 之间时, 其抗拉强度随直径的增加略微有所降低; 当直径大于 5 mm 以上, 其抗拉强度随直径增加而下降的趋势趋于平缓。虽然根系直径在不断增大, 但其抗拉强度在一定的直径后会达到一个相对平稳的状态, 即不再随着根系直径的增大而减小。

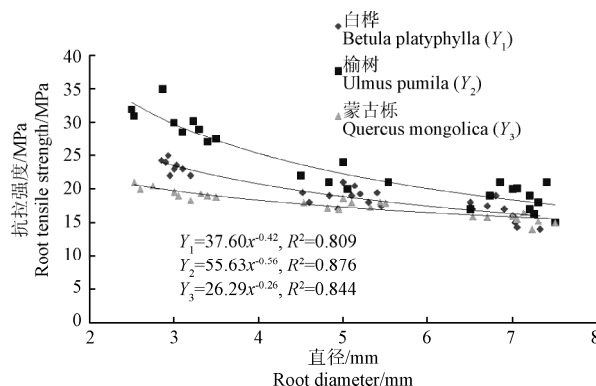


图 2 3 种阔叶树种单根抗拉强度与直径的关系

Fig.2 Relationship between root tensile strength and diameter of three different Broadleaf species

由回归方程可知, 当根径为 5 mm 时, 榆树的平均抗拉强度为 23 MPa, 白桦为 19 MPa, 而蒙古栎的平均抗拉强度仅为 17 MPa。榆树在不同直径下的平均抗拉强度显著大于白桦和蒙古栎。

3.2 阔叶树材根系的横切面显微构造观察结果

在对 3 种阔叶乔木白桦、蒙古栎和榆树 3 个不同直径下的根系显微结构进行观察后发现: 阔叶乔木树种的根系结构及其木材构造基本相同, 各种结构较复杂, 排列不规整, 虽然 3 种树种的主要的组成部分相同, 包括导管、木射线、木纤维、次生木质部、次生韧皮部, 但不同树种的各类结构的形状和大小有一定的差异。由于导管在横切面上呈孔

状，所以称为管孔。

白桦根系的次生韧皮部由多层窄长韧皮纤维细胞组成；管孔类型为复管孔，分布于整个木质部中，大小差别较大，离初生木质部越近的管孔越小；木纤维在横切面形状规则；初生木质部由于木纤维细胞小，密度大，所以为深褐色呈五角形；木射线从初生木质部呈辐射状延伸至皮层，由单列细胞组成，；生长轮明显，宽度窄但均匀，由单层细胞组成。（图 3a）

榆树皮层较薄，组成次生韧皮部的韧皮纤维小，排列紧密，3 种阔叶树材中榆木的韧皮部最厚；管孔类型为管孔团，分布在整个木质部中；基本看

不到初生木质部；木射线同白桦根系，但是由 2 列细胞组成；生长轮不明显。（图 3b）

蒙古栎皮层、韧皮部均较薄，韧皮纤维排列密集；管孔类型为单管孔，其中初生木质部的管孔最小，木质部中的管孔大小不一；虽然初生木质部同榆树一样被管孔充满，但仍可以观察到呈五角形；木射线短而窄，且不规则的分布于次生木质部中，不同于其他 2 种树材的根系；生长轮虽不明显，但可观察到是由单层细胞构成。（图 3c）

经试验测得，不同根系直径条件下，白桦、榆树和蒙古栎 3 个阔叶树种显微结构在根系横切面的平均面积百分比（表 1）。

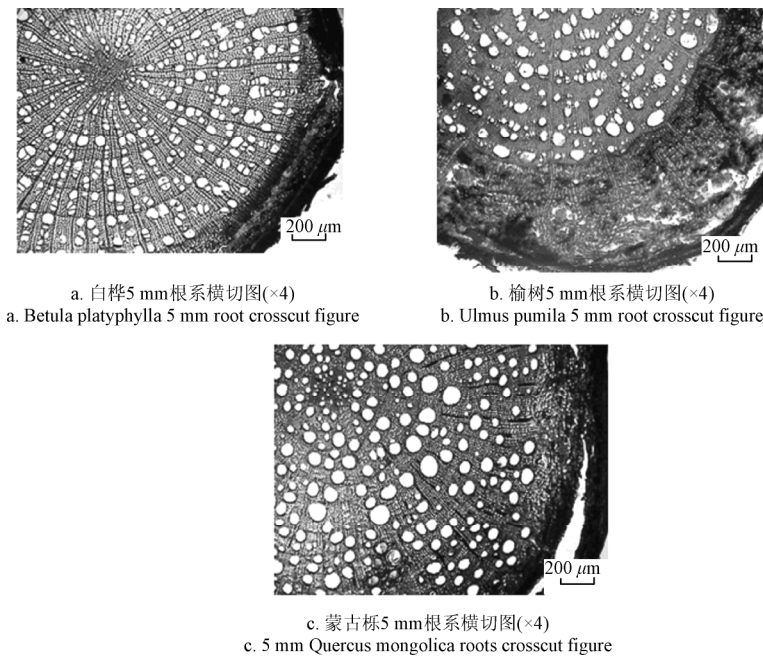


图 3 不同树种根系横切图
Fig.3 Crosscut figures of different roots

表 1 3 种阔叶树材不同根系直径下各组成结构的平均面积百分比

Table 1 Three different root under different root diameter of anatomy structure of average area percentage

树种 species	直径/mm Root diameter/mm	导管/% Vessel/%	木射线/% Xylem ray/%	韧皮部/% Phloem/%	木纤维/% Wood fiber/%	数据量（组）
白桦 <i>Betula platyphylla</i>	3	9.65	7.84	38.75	41.34	30
	5	11.15	8.00	34.66	43.64	30
	7	14.61	9.44	30.84	44.59	30
榆树 <i>Ulmus pumila</i>	3	7.25	7.83	42.78	44.37	30
	5	8.33	6.24	40.62	46.67	30
	7	7.79	7.27	37.36	48.69	30
蒙古栎 <i>Quercus mongolica</i>	3	17.52	7.71	35.01	40.59	30
	5	18.10	8.30	32.18	42.44	30
	7	20.73	10.66	28.53	43.11	30

4 阔叶树种根系的横切面显微构造与单根抗拉特性的关系

4.1 根系显微结构与抗拉力的关系

3 种阔叶树材中，根据单根抗拉力试验结果分

析可知，单根最大抗拉力均随根系直径的增大而增加，它们之间存在幂函数关系。运用数学统计方法对所测根系各类微观结构数据进行整理和分析，得出 3 个树种在不同根系直径下最大抗拉力与各主要结构有一定的关系。所得多元线性回归方程如表 2。

表2 单根抗拉力与各主要结构的多元线性回归方程

Table 2 Multiple linear regression equation of single root tensile force and main structures

根系直径 Root diameter/mm	树种 species	多元线性回归方程 Multiple linear regression equation	判定系数 R^2 Coefficient of determination	P 值
3	白桦	$Y_1=1.637E^{-15}+0.787X_1+0.024X_6+0.381X_8+0.352X_9$	0.732	<0.05
	榆树	$Y_1=2.173E^{-16}+0.536X_1+0.152X_6+0.323X_8+0.207X_9$	0.656	<0.05
	蒙古栎	$Y_1=1.934E^{-15}+0.674X_1+0.132X_6+0.268X_8+0.155X_9$	0.673	<0.05
5	白桦	$Y_1=2.735E^{-15}+0.867X_1+0.034X_6+0.531X_8+0.347X_9$	0.735	<0.05
	榆树	$Y_1=4.002E^{-16}+0.443X_1+0.171X_6+0.234X_8+0.215X_9$	0.628	<0.05
	蒙古栎	$Y_1=2.108E^{-15}+0.557X_1+0.138X_6+0.278X_8+0.235X_9$	0.776	<0.05
7	白桦	$Y_1=3.724E^{-15}+0.625X_1+0.057X_6+0.476X_8+0.347X_9$	0.569	<0.05
	榆树	$Y_1=5.623E^{-16}+0.772X_1+0.158X_6+0.358X_8+0.225X_9$	0.693	<0.05
	蒙古栎	$Y_1=2.783E^{-15}+0.634X_1+0.142X_6+0.289X_8+0.276X_9$	0.592	<0.05

由于所得方程的决定系数在 0.5~0.8 之间,说明方程的拟合程度较好,且 P 值小于给定的显著性水平,即 0.05。多元线性回归方程的结果表明,不同的根系结构对抗拉力有影响,具体为:木纤维所占根系横截面积的百分比、木纤维长度、木纤维壁腔比以及木纤维的长宽比与白桦、榆木和蒙古栎根系的抗拉力成正相关,起决定性的作用,而其他未能进入回归方程的自变量,则并非是影响抗拉力的主要相关因素,对根系抗拉力的影响较低或者没有太大影响。根据回归方程各变量的回归系数,可知变量 X_1 即木纤维所占的面积百分比对不同树种根系的抗拉力影响最大。

由表 1 可知,3 个树种单根木纤维所占根系横截面积的百分比随着根系直径的增加而增加,在相同的直径下,榆树的平均木纤维面积百分比高于白桦和蒙古栎。而榆树的最大抗拉力也是 3 种阔叶树种中最大的,这也进一步说明单根抗拉力和木纤维的面积百分比有关联,即木纤维所占根系横截面积的百分比越大,根系的抗拉力越大。

木纤维主要存在于次生木质部中,随着根系的不断增粗,次生木质部的面积增加,木纤维的组织比量不断提高。3 种阔叶树材的根系均为多年生,木质化程度高,从显微结构图中观察可知榆树木纤

维细胞排列紧密,基本看不到木纤维的细胞腔。

木材学中常用组织比量即构成木材的各种细胞所占横截面积的百分比,来研究木材纤维构造的数量特征,探寻木材解剖分子和材性因子之间的内在联系^[14]。Hill 研究红栎(rubra)时,曾发现纤维比量与木材力学性质的关系密切(0.88~0.99),是衡量木材性质的最好指标^[15]。近几年的研究已经证实,木纤维的组织比量可以用做用作衡量阔叶树材的密度和强度,一般厚壁の木纤维组织比量越高,木材的力学性能越好^[16]。

阔叶树种根系本身解剖结构与木材基本相同,木材学中的组织比量,相当于根系次生木质部中各解剖结构所占的面积比,如果去除根系的皮层、韧皮部,3 个树种木纤维所占的面积比均高于 50%,和其木材基本也相当,但是 3 个树种木纤维组织比量的差别随之加大。当根系直径为 5 mm 时,榆树木纤维组织比量为 63%,显著高于白桦的 57%和蒙古栎的 53%,即能承担力学性质的木纤维分子在榆树中最多。

4.2 根系显微结构与抗拉强度

与所得的单根抗拉力和显微结构的回归方程相同,所得抗拉强度的多元线性回归方程的拟合度较好,且差异显著(表 3)。

表3 不同树种、不同直径时抗拉强度的多元线性回归方程

Table 2 Multiple linear regression equation of Single root tensile strength and the main structures

根系直径 Root diameter/mm	树种 species	多元线性回归方程 Multiple linear regression equation	决定系数 R^2 Coefficient of determination	P 值
3	白桦	$Y_2=1.786E^{-15}+0.379X_1+0.883X_3+0.013X_6+0.324X_8+0.105X_9$	0.752	<0.05
	榆树	$Y_2=2.205E^{-16}+0.447X_1+0.572X_3+0.263X_6+0.402X_8+0.274X_9$	0.643	<0.05
	蒙古栎	$Y_2=6.342E^{-17}+0.392X_1+0.675X_3+0.025X_6+0.353X_8+0.231X_9$	0.627	<0.05
5	白桦	$Y_2=1.990E^{-15}+0.456X_1+0.932X_3+0.006X_6+0.234X_8+0.105X_9$	0.689	<0.05
	榆树	$Y_2=2.050E^{-16}+0.347X_1+0.385X_3+0.23X_6+0.289X_8+0.274X_9$	0.549	<0.05
	蒙古栎	$Y_2=8.860E^{-17}+0.265X_1+0.72X_3+0.039X_6+0.252X_8+0.231X_9$	0.534	<0.05
7	白桦	$Y_2=1.592E^{-15}+0.387X_1+0.793X_3+0.025X_6+0.272X_8+0.105X_9$	0.687	<0.05
	榆树	$Y_2=3.153E^{-16}+0.428X_1+0.528X_3+0.12X_6+0.324X_8+0.274X_9$	0.559	<0.05
	蒙古栎	$Y_2=7.778E^{-17}+0.273X_1+0.722X_3+0.024X_6+0.231X_8+0.231X_9$	0.723	<0.05

回归方程的结果表明:木纤维面积百分比、韧皮部面积百分比、木纤维长度、木纤维壁腔比以及木纤维长宽比对单根抗拉强度起决定性的作用。根据回归方程各变量的回归系数,这4个应变量都对单根抗拉强度有不同程度的影响,根据回归系数可知, X_3 即韧皮部的面积百分比其影响最大,并且两者呈正相关。

在相同根径下,榆树根系次生韧皮部的面积百分比明显高于白桦和蒙古栎。从显微结构上来看,不同根系直径条件下榆树的次生韧皮部都较厚,当根系直径为3 mm时,次生韧皮部所占面积几乎达到了根系横截面积的50%以上。但在同一树种中,虽然韧皮部面积百分比随着根系直径的增加有所减小,但是不同直径之间韧皮部面积比的差异不显著($F=20.28$, $p>0.05$),因此韧皮部面积百分比虽然对根系抗拉强度有影响,但还不能作为抗拉强度随直径减小的主要原因。

根系的形成层细胞不断的分化生长,次生木质部的向外累积增加,使根系增粗,而次生韧皮部受到挤压面积不断减小,由于次生韧皮部主要是由韧皮纤维组成的,而韧皮纤维和木纤维一样同属于机械组织,都能对植物起到一定的支持作用,但是两者的区别主要在弹性上,韧皮纤维的柔韧性更强。根系在纵向的拉伸过程中,韧皮纤维不断被拉长,由于其具有韧性,使其能承受外界更大的拉伸强度。

3种阔叶树种中,白桦、蒙古栎根系韧皮部的面积显著小于榆树,能增强根系材料强度的韧皮纤维的数量就相对较少,同时在切片试验中发现,榆树根系的皮层中含有很多黏液,这增加了韧皮部中韧皮纤维间的黏性,使榆树较其他2个树种具有更大的抗拉强度。

4.3 木纤维与单根抗拉特性的关系

阔叶树材的主要组成分子是木纤维,占整个木材组织比量的50%以上,它是阔叶树材木材强度的物质基础,其形态直接影响木材质量^[17-19]。材料学中,常常通过向木纤维中加入某种化学成分,即通过对木纤维的改性来提高木材材料的力学性能如,如拉伸强度、冲击强度、断裂伸长率等^[20]。所以对不同树种、不同根系直径下木纤维尺寸的测定可以更全面的从分子角度解释根系力学特性与其内在微观结构的关系。

从图4a、图4b、图4c和对数据进行单因素方差分析得出,3个树种不同根系直径条件下木纤维的长度、长宽比的显著性水平都大于0.05,根系直径对木纤维的长度、长宽比没有影响,即可说明随着根系的增粗,木纤维只是在数量有所增加,而尺

寸的变化不显著,并相对稳定在一个区间内。但不同树种的木纤维尺寸却有较强的差别,相同直径下,榆树木纤维的长度、长宽比都显著大于其他2个树种。当根系直径为5 mm时,榆树木纤维的平均长度达到1 081 μm ,长宽比为93;白桦木纤维平均长度为847 μm ,长宽比为36;蒙古栎根系的木纤维尺寸最小,平均长度和长宽比仅为榆树木纤维的1/3,分别为461 μm 和34。3个树种中木纤维壁腔比最大的也是榆树,不同根系直径时它的壁腔比均值为0.54,白桦为0.45,最小的是蒙古栎0.3。

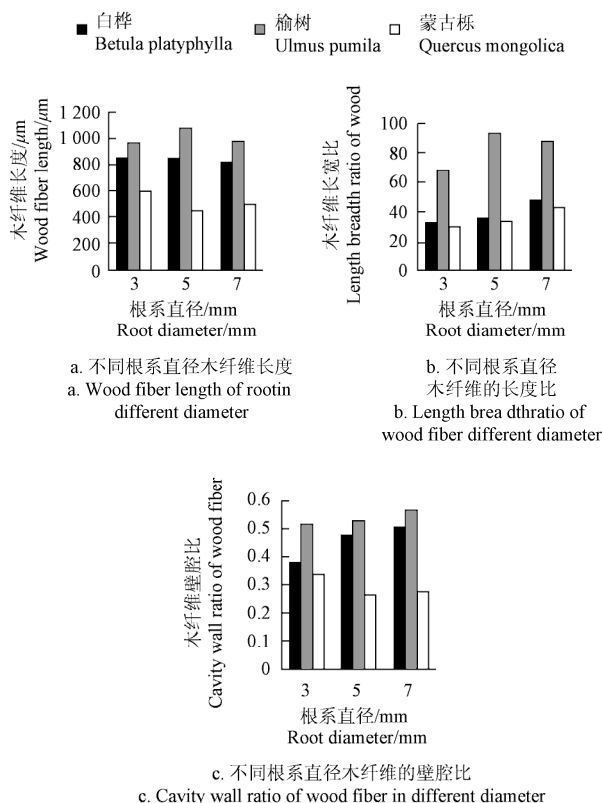


图4 不同树种根系木纤维尺寸特性

Fig.4 Wood fiber dimensions of three different roots

从显微图5a, 5b, 5c可以看出,不同树种根系木纤维的形态也有所不同。从木纤维的类型来说,虽然榆树、白桦、蒙古栎的根系木纤维都为韧型纤维,但榆树根系的木纤维为韧性纤维分类中的分隔木纤维。根据国际木材解剖学会的规定,木纤维长度在900~1 600 μm 之间为中级长度,700~900 μm 之间为短级长度。因此榆树根系木纤维为中级长度,白桦、蒙古栎的根系木纤维为短级长度。

从前面多元线性方程的分析已知,木纤维的长度、长宽比以及壁腔比对单根抗拉特性即抗拉力和抗拉强度的大小都有一定影响,且为正相关。根据回归系数得出,这3个指标对根系抗拉特性的影响程度的大小为:木纤维壁腔比>木纤维长宽比>木纤维的长度。

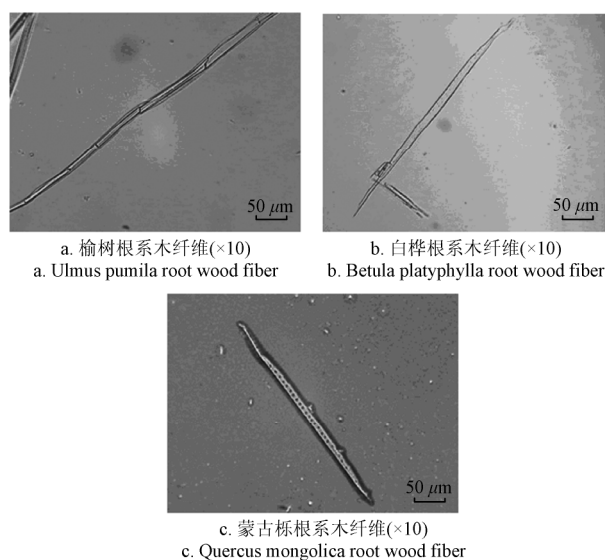
图5 不同树种根系木纤维($\times 10$)

Fig.5 Wood fiber of different roots

纤维长度、纤维长宽比是纤维形态中最为重要的因子^[21]。纤维长度比是纤维长度和纤维宽度的比值,是纤维长度和纤维宽度共同作用的结果^[22]。榆树的木纤维长度以及长宽比明显大于白桦和蒙古栎,研究表明木纤维长度越长,抗拉强度越大,木纤维长宽比大,交织性能好,有利于纤维之间的结合,木纤维应该具有更好的力学性能,是根系能更好的抵抗外界对其的破坏力。因此榆树的抗拉特性好于白桦和蒙古栎。

而纤维壁腔比是胞壁厚度与胞腔直径之比。榆树根系木纤维的壁腔比大,说明其木纤维的胞壁厚,胞腔小,材料密实,表现的强度大。同时由于胞壁的主要化学成分为纤维素、半纤维素以及木质素,纤维素分子链在细胞壁中形成的微纤丝沿细胞的轴向排列,赋予了木材较高的顺纹抗拉强度和弹性^[23],半纤维素贯穿存在于植物细胞壁中^[24],而木质素填充于纤维素构架中以增强植物体的机械强度^[25]。榆树木纤维的壁腔比大,在根系中胞壁所占的面积大,各种增强材料力学性能的化学成分含量随之增加,因此应该高于壁腔比小的白桦和蒙古栎的根系,这是使得榆树的抗拉特性好于白桦和蒙古栎的另一个重要原因。

5 讨论

所测得的3种华北阔叶树种的根系最大抗拉力随直径的增大而增大,根系抗拉强度随直径的增大而减小,且均呈幂指数关系,这与赵丽兵、朱海丽等关于灌木、草本单根抗拉强度与直径关系的研究结果相似^[26-27]。其中根系抗拉强度为什么随直径的增大而减小的原因一直未有明确的解释,Marie^[13]

的研究指出这可能与根系中纤维素含量的多少以及根系微纤丝角的大小等因素有关,本研究得出根系韧皮部的面积百分比也可能是原因之一,但在今后的研究中还需增加所测定样本的数量以及加测直径大于8 mm根系的微观结构,以进一步说明此研究结果。

多年生乔木根系木质化程度较高,次生韧皮部、周皮很薄,所占面积较小,次生木质部为最主要的根系组成部分。3种阔叶类树种根系主要的显微结构是导管、木纤维和木射线,这与其树材相同,但根系显微结构与木材结构最大的区别在于,木材由于高度的木质化,韧皮部很薄,在测量抗拉强度时,测定的是木质部的抗拉强度,忽略了韧皮部对抗拉强度的贡献,而根系的木质化程度较其树材的低,某些树种根系韧皮部所占的面积几乎与木质部相当,因此韧皮部以及韧皮纤维的含量与木纤维一样对根系抗拉特性有影响。

本研究从根系微观结构这个角度出发研究了3种中国华北地区常见阔叶树种根系保持水土能力的内在机理,结果得出根系显微结构组成以及木纤维的尺寸影响着根系抗拉特性的优良。以往的研究也指出榆树根系发达、适应性强、耐旱^[28],且榆树的根系相对于白桦和蒙古栎具有更强的抵御外界纵向拉伸破坏的能力,因此榆树是华北地区一种较优良的保持水土及边坡防护阔叶类树种。

6 结论

1) 3个阔叶树种的单根最大抗拉力与根系直径呈正相关关系,回归曲线采用幂函数关系,决定系数大于0.9;单根抗拉强度与根系直径呈负相关关系,决定系数高于0.8,在相同根系直径下,3个树种根系的单根最大抗拉力、抗拉强度的平均值为榆树>白桦>蒙古栎。

2) 所测阔叶树种根系微观结构与其树材相同,其中木纤维是阔叶树种最主要的组成结构,通过试验分析得出,3个树种木纤维的尺寸和类型均有一定的差别。随根系直径的增加,木纤维只是数量上的增加,而尺寸的变化较小。

3) 对9个可能影响根系抗拉特性的因素进行多元统计共线性分析得出,次生木质部中木纤维面积百分比、韧皮部面积百分比、木纤维长度、木纤维壁腔比以及木纤维的长宽比对根系抗拉特性有影响且均呈正比,但影响程度不同。其中木纤维面积百分比对根系抗拉力的影响最大,韧皮部面积百分比决定了不同树种间单根抗拉强度的大小。木纤维尺寸对单根抗拉力、抗拉强度都有影响,但三者中木纤维壁腔比对其影响最大。

4) 相同直径下, 榆树根系木纤维面积百分比大, 同时韧皮部面积百分比也高于其他 2 个树种, 决定了其拥有最好的单根抗拉特性; 并且其木纤维无论是尺寸还是壁腔比也均高于白桦和蒙古栎, 进一步说明其单根抗拉特性好的原因。

[参 考 文 献]

- [1] 吕春娟. 不同乔木根系的抗拉力学特性研究[J]. 农业工程学报, 2011, 27(增刊 1): 329—335.
Lü Chunjuan. Root mechanical characteristics of different tree species[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(Supp.1): 329—335. (in Chinese with English abstract)
- [2] 蒲智. 植物措施在公路工程护坡中的应用[J]. 甘肃水利水电技术, 2003, 20(4): 124—127.
Pu Zhi. Plant measures in highway engineering application of slope protection[J]. Gansu Water Conservancy and Hydropower Technology, 2003, 20(4): 124—127. (in Chinese with English abstract)
- [3] 周朔. 林木根系拉伸力学特性研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2011: 13—15.
Zhou Shuo. Study On Tensile Mechanical Characteristics of Root System[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2011: 13—15. (in Chinese with English abstract)
- [4] 郭维俊, 黄高宝, 王芬娥, 等. 土壤—植物根系复合体本构关系的理论研究[J]. 中国农业大学学报, 2006, 11(2): 35—38.
Guo Weijun, Huang Gaobao, Wang Fen'e, et al. Study on constitutive relation of soil-root composite[J]. Journal of China Agricultural University, 2006, 11(2): 35—38. (in Chinese with English abstract)
- [5] 刘国彬, 蒋定生, 朱显谟. 黄土区草地根系生物力学研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 2(3): 21—28.
Liu Guobin, Jiang Dingsheng, Zhu Xianmo. Study on grasses root bio-mechanics in loss plateau[J]. Journal of Soil Erosion and Soil Water Conservation, 1996, 2(3): 21—28. (in Chinese with English abstract)
- [6] 毛伶俐. 生态护坡中植被根系的力学分析[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007: 16—22.
Mao Lingli. The Mechanics Analysis of Vegetation Root in Ecology Slope Protection[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2007: 16—22. (in Chinese with English abstract)
- [7] John Barnett, George Jeronimidis (Eds). Wood Quality and its Biological Basis[M]. Oxford: Blackwell Publishing Ltd, 2003.
- [8] 赵丽兵, 张宝贵. 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[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9): 7—12.
Zhao Libing, Zhang Baogui. Experimental study on root bio-mechanics and relevant factors of *Medicago sativa* and *Digitaria sanguinalis*[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(9): 7—12. (in Chinese with English abstract)
- [9] Vidal H. The principle of reinforced earth[J]. Highway Research Record. 1969, 282: 1—16.
- [10] 张超波. 植物根系固土护坡力学基础研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2011, 12.
Zhang Chaobo. Fundamental and mechanical study on soil reinforcement and slope protection by plant roots[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2011, 12. (in Chinese with English abstract)
- [11] 任宁, 于海鹏, 刘一星. 应用数字图像处理技术测量木材显微构造特征参数[C]//中国林学会木材科学分会第十次学术研讨会论文集, 广西, 2005: 576—577.
Ren Ning, Yu Haipeng, Liu Yixing. Measurement of wood microstructure characteristic parameter by digital image processing[C]//Proceedings of International Symposium on Research and Effective Utilization of Bio-based Materials, Guangxi, 2005: 576—577. (in Chinese with English abstract)
- [12] Uetimane Jr E, Ali A C. Relationship between mechanical properties and selected anatomical features of nholo[J]. Journal of Tropical Forest Science, 2011, 23(2): 166—176.
- [13] Maris Genet. The influence of cellulose content on tensile strength in tree roots[J]. Plant and soil, 2005, 278(1/2): 1—9.
- [14] 张述银. 辽东栎木材解剖特征与物理力学性质的关系[J]. 安徽农学院学报, 1987, 14(2): 26—38.
Zhang Shuyin. Relationship between anatomical structure and physico-mechanical properties of East-Liaoning Oak[J]. Journal of Anhui Agricultural College, 1987, 14(2): 26—38. (in Chinese with English abstract)
- [15] Maeglin R R. National variation of tissue proportions and vessel and fiber length in mature northern red oak[J]. Silvae Genetica, 1976, 25: 122—126.
- [16] 尹思慈. 木材学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1996, 63—64.
- [17] Fu Ligu, Li Nan, Robert R Mill. Taxaceae-hong dou shan ke. Flora of China[M]. Beijing: Science Press, 1999: 89—96.
- [18] 郑万钧, 傅立国. 中国植物志: 第 7 卷[M]. 北京: 科学出版社, 1978.
- [19] 康宁, 汤仲坝. 榧属分类学研究[J]. 植物研究, 1995, 15(3): 349—362.
Kang Ning, Tang Zhongxun. Studies on the taxonomy of the genus *torreya*[J]. Bulletin of Botanical Research, 1995, 15(3): 349—362. (in Chinese with English abstract)
- [20] 丁筠, 钟鑫, 薛平. 木纤维改性对聚氯乙烯/木纤维力学性能的影响[J]. 北京化工大学学报: 自然科学版, 2004, 31(1): 76—78.
Ding Yun, Zhong Xin, Xue Ping. Effect of a modifying method of wood 2 fiber on the mechanical properties of polyvinyl chloride/wood 2 fiber composite[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology, 2004, 31(1): 76—78. (in Chinese with English abstract)
- [21] 张耀丽. 不同施肥处理对尾叶桉纤维形态的影响[J]. 南京林业大学学报, 2000, 24(1): 41—44.
Zhang Yaoli. A study on effects of fertilization of fiber formation of *eucalyptus urophylla*[J]. Journal of Nanjing Forestry University, 2000, 24(1): 41—44. (in Chinese with English abstract)
- [22] 武恒. 人工林杨树 12 个无性系木材纤维形态特征及变异[J]. 东北林业大学学报, 2011, 39(2): 10.
Wu Heng. Morphological features of wood fiber and its variation for twelve clones of poplar plantations[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2011, 39(2): 10. (in Chinese with English abstract)
- [23] 徐有明主编. 木材学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2006, 117.
- [24] 蒋挺大编著. 木质素[M]. 北京: 北京化学出版社, 2009: 3—5.

- [25] 郭维俊. 小麦茎秆力学性能与化学组分试验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(2): 110—114.
Guo Weijun. Experiment on mechanical properties and chemical compositions of wheat stems[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2009, 40(2): 110—114. (in Chinese with English abstract)
- [26] 赵丽兵, 张宝贵. 草本植物根系增强土壤抗剪切强度的量化研究[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(3): 718—722.
Zhao Libing, Zhang Baogui. Quantitative analysis of soil anti-shearing strength enhancement by the root system s of herb plants[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2008, 16(3): 718—722. (in Chinese with English abstract)
- [27] 朱海丽, 胡夏嵩, 毛小青, 等. 青藏高原黄土区护坡灌木植物根系力学特性研究[J]. 岩土力学与工程学报, 2008, 27(增刊 2): 3445—3452.
Zhu Haili, Hu Xiasong, Mao Xiaoping, et al. Study on mechanical characteristics of shrub roots for slope protection in loess area of Tibetan plateau[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(Supp.2): 3445—3452. (in Chinese with English abstract)
- [28] 李红丽, 董智, 王林和, 等. 浑善达克沙地榆树根系分布特征及生物量研究[J]. 干旱区资源与环境, 2002, 16(4): 99—105.
Li Hongli, Dong Zhi, Wang Linhe, et al. Study on the root distribution characteristic and biomass of ulmus pumila in Hunshandake Sands[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2002, 16(4): 99—105. (in Chinese with English abstract)

Relationship between tensile properties and microstructures of three different broadleaf tree roots in North China

Jiang Kunyun, Chen Lihua^{*}, Gai Xiaogang, Yang Yuanjun

(Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification of Education Ministry, College of Water and Soil Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Forest vegetation is known to increase slope stability by reinforcing soil shear resistance, and root tensile properties are important factors to consider when choosing suitable species for reinforcing soil on an unstable slope. The macroscopic properties are determined by the microscopic structure; as a result, the microscopic structure of roots needs to be further observed to help us understand the relationship between the soil's mechanical properties and the microstructure of roots. We chose three common broadleaf species (*Betula platyphylla*, *Quercus mongolica*, *Ulmus pumila*) in North China and carried out several experiments, including single-root tensile tests, root anatomical-structure tests, and wood-fiber segregation experiments. To analyze data from those experiments, we used multiple regression and analysis of variance (ANOVA) in order to determine the relationship between root tensile properties and selected anatomical structure. Results showed that in all species a significant power relationship existed between tensile properties and root diameter ($R^2 > 0.8$). The root tensile force increased with increasing root diameter, but root tensile strength increased with decreasing root diameter. According to the results of root tensile tests, we found that *Ulmus pumila* was the most resistant to failure, followed by *Betula platyphylla* and *Quercus mongolica*. Through the observation of microscopic sections, the root anatomical features of three kinds of broadleaf species were the same as those of their trunk, and wood fiber was the main anatomical feature in the root. According to the multiple regression models, the area percentage of wood fiber in the root cross-section (short for the area percentage of wood fiber), the area percentage of phloem in root cross section (short for the area percentage of phloem), and fiber dimensions affected single roots' tensile properties. The percentage of wood fiber area was the most important impact factor on root tensile force, exhibiting positive correlation. The percentage of phloem area had the biggest influence on root tensile strength. Wood fiber length, the length-width ratio of wood fiber, and the ratio of cell wall to cell cavity also affected tensile properties, but their quantitative influence was less than other factors. Although the area percentage of phloem affected root tensile strength, within a given species there was no significant difference in different root diameter. From the measurement of wood fiber in roots, we found that wood fiber size and type were different in the three selected species. The quantity of wood fiber increased with increasing root diameter, but the size of wood fiber varied only slightly. In three different broadleaf species' roots, the related index (including the percentage of wood fiber area, the percentage of phloem area, and the fiber dimensions) of *Ulmus pumila* was higher than that of *Betula platyphylla* and *Quercus mongolica* in the same diameter; that is to say, *Ulmus pumila* had better tensile properties than the other species. In accordance with the root anatomical features, fiber dimension, and tensile properties, *Ulmus pumila*, the roots of which have a better ability to reinforce soil on unstable slopes, is an appropriate broadleaf species for soil and water conservation.

Key words: tensile properties, microstructure, fibers, water conservation, broadleaf Plant's roots