

华北地区4种常见乔木根系抗拉强度的力学综合模型

王萍花¹ 陈丽华¹ 冀晓东¹ 宋恒川¹ 盖小刚¹ 蒋坤云¹ 吕春娟^{1,2}

(1 北京林业大学水土保持学院, 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室 2 山西农业大学资源环境学院)

摘要: 抗拉强度是建立边坡稳定模型时最常使用的植被根系特性之一。为建立根系抗拉强度的力学综合模型,对华北地区4种常见乔木油松、白桦、落叶松和蒙古栎的单根依照不同标距、不同拉伸速率进行了拉力试验。试验数据的分析结果表明:所有根系抗拉强度的观测值均通过正态检验;从数学角度出发,应用聚类分析方法,区分出4种乔木的极细根和细根;标距、树种对抗拉强度影响显著,拉伸速率对抗拉强度影响不显著。在理论推导和数据分析的基础上建立了乔木单根抗拉强度的力学综合模型,并对模型参数进行求解。该研究探明了单根抗拉强度的作用机理,对建立边坡稳定模型具有重要参考价值。

关键词: 乔木根系; 单根抗拉; 边坡稳定; 抗拉强度; 力学模型

中图分类号: S758 文献标志码: A 文章编号: 1000-1522(2012)01-0039-07

WANG Ping-hua¹; CHEN Li-hua¹; JI Xiao-dong¹; SONG Heng-chuan¹; GAI Xiao-gang¹; JIANG Kun-yun¹; LÜ Chun-juan^{1,2}. **Establishing an integrated mechanical model of root tensile strength—taking four common arbor species in North China for example.** *Journal of Beijing Forestry University* (2012) 34(1) 39-45 [Ch, 17 ref.]

1 Key Laboratory of Soil and Water Conservation & Desertification Combating of Ministry of Education, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, 100083, P. R. China;

2 College of Resources and Environmental Science, Shanxi Agriculture University, Taigu 030801, P. R. China.

Tensile strength is one of the plant root traits most commonly used by engineers when modeling slope stability. In order to establish an integrated mechanical model of root tensile strength, specimens of root in North China of different lengths and varied tensile rates were carried out for tensile test. Analysis of test data showed that all values of root tensile strength were observed by normal inspection; from a mathematic point of view, a distinction was made between fine and thin roots of four tree species by using cluster analysis; both root length and tree species had significant effects on tensile strength, while tensile rates had no significant effects on tensile strength. Moreover, based on theoretical derivation and data analysis, the synthesis mechanical model of tree single-root tensile strength was established and its parameters were solved out. It had researched mechanism of single-root tensile strength, which can provide important reference value for the establishment of slope stability model.

Key words tree root; single-root tensile; slope stability; tensile strength; mechanical model

木本植物尤其是乔木阻止浅层滑坡的一个主要实现方式就是通过根系锚固土体。当非常大的木本植物侧根沿边坡分布在崩塌面较脆弱的一面时,根系的强度有利于防止大规模滑坡,如泥石流、崩塌等^[1]。Wu^[2]和Waldron^[3]早前已经用一个简单的力学机制模型介绍了根系对土壤力学性能的贡献主

要是通过增加黏聚力来实现的,在边坡滑裂面增加的黏聚力主要受2个变量制约:根的平均抗拉强度和根系面积比。因此,对单根抗拉强度的研究能为改善边坡稳定性分析、建立边坡稳定模型提供一些重要的参考指导。

目前,国内对单根抗拉的大部分研究还仅限于

收稿日期: 2011-08-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(30872067)、教育部博士点基金项目(20090014110002)、青年科学基金项目(30901162)。

第一作者: 王萍花。主要研究方向: 林木根系固土力学机制研究。电话: 010-62336108 Email: wangpinghua319@yahoo.com.cn 地址: 100083 北京市清华东路35号北京林业大学水土保持学院。

责任作者: 陈丽华, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 土壤侵蚀、森林水文、城镇规划。电话: 010-62336108 Email: c_lihua@bjfu.edu.cn 地址: 同上。

本刊网址: <http://journal.bjfu.edu.cn>

根系直径对根系抗拉强度的影响当中。李绍才等^[4]、赵丽冰等^[5]和朱海丽等^[6]的研究均表明,根系抗拉强度与直径呈幂函数或指数函数关系。李贺鹏等^[7]、王剑敏等^[8]通过浙江南部的山体滑坡、泥石流易发区内3种主要灌木(榿木(*Loropetalum chinense*)、鹿角杜鹃(*Rhododendron latoucheae*)和香港黄檀(*Dalbergia millettii*))进行野外和室内力学试验表明:根系抗拉力和抗剪力均与根径呈幂函数正相关关系;榿木和鹿角杜鹃根系抗拉强度与根径呈幂函数负相关关系,而香港黄檀则无明显相关性。越来越多的研究开始关注于各种不同因素对林木根系抗拉特性的影响。张东升^[9]的研究表明,在根径相同的情况下,根系抗拉强度会随根长的增加而减小。国外的研究主要侧重于考虑树种、立地因子等与抗拉强度的关系。Lindström等^[10]通过对比研究自然再生的欧洲赤松(*Pinus sylvestris*)和人工种植的红松(*Pinus koraiensis*)表明,根系抗拉阻力会受种植模式影响。Turmanina^[11]的研究发现季节也会影响抗拉强度,由于水分含量减少,冬季根系抗拉强度比夏季大。但目前国内外缺乏对单根拉伸影响因素的综合分析,也鲜少对抗拉强度力学模型的研究。

为全面理解拉伸过程中单根抗拉强度力学机制,对不同标距、不同拉伸速率的4种乔木根系进行室内单根拉伸试验,分析标距、树种和拉伸速率对其力学特性的影响,并在理论推导和数据分析基础上构建抗拉强度综合力学模型,以便为进一步边坡稳定性分析提供基础依据。

1 材料与方法

1.1 根系材料

试验研究区为河北木兰国营林场下属北沟林场,地理坐标为E116°32′~118°14′,N41°35′~42°40′。本地区气候类型属半干旱向半湿润过渡、寒温带向中温带过渡、大陆性季风型山地气候,植物区系为东北区系。全场总经营面积5428.8 hm²,其中天然林1485.4 hm²,以白桦(*Betula platyphylla*)、河杨(*Populus davidiana*)、落叶松(*Larix gmelinii*)、云杉(*Picea asperata*)和蒙古栎(*Quercus mongolica*)为主要乔木树种;人工林1180.5 hm²,主要为油松(*Pinus tabulaeformis*)、落叶松、河杨等树种;混交林1560.9 hm²,为针阔混交。

为使研究具有代表性,选取当地常见的4种乔木——油松、白桦、落叶松和蒙古栎。于2009年8月19—20日和10月23—24日分2次使用完全挖掘法采集这4种乔木的根系,在采掘过程中尽量避免对根系的机械损伤。对每种乔木而言,为使其根

样具有代表性,在不同坡度上选取3棵与其他林木间隔较大的树木,伐倒地上部分,完全挖出地下部分的所有树根(图1a),随机选取生长正常、茎杆通直均匀、径级为0~8 mm的鲜活根,经破碎过筛、清洁根系表面、用卷尺量取长度分类之后,将其用密封袋保存(图1b),送往实验室冷藏保存在冰箱4℃环境下。取得的试样尽快测定,以保证根系材料新鲜。

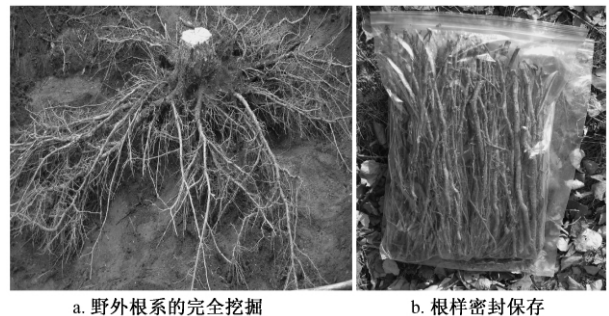


图1 野外根系取样

Fig.1 Field sampling roots

1.2 试验设计和单根抗拉力学特性测定

本研究参考国家标准《GB/T 228—2002 金属材料室温拉伸试验方法》^[12]进行试验设计。试验设计2种拉伸速率:10和400 mm/min;3个根系长度:50、100和250 mm。比较树种有4个,即油松、白桦、落叶松和蒙古栎。

本试验采用的仪器是微机控制电子式万能试验机,型号WDW-100E。仪器最大试验力为100 kN,全程自动换挡,速度范围0.001~500 mm/min,无级调速,试验力及位移准确度±0.5%。应用万能试验机测定单根抗拉力学特性的具体过程及方法参见文献[13—17]。

在试验过程中会出现在夹具两端断裂或滑出夹具的现象。本研究认为,单根在夹具中间或接近中间处断裂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。本试验共拉伸油松根系725根,其中有效根系426根,成功率58.76%;白桦根系673根,其中有效根系360根,成功率53.49%;落叶松根系305根,其中有效根系213根,成功率69.84%;蒙古栎根系194根,其中有效根系109根,成功率56.19%。

采用SPSS18.0软件进行统计分析。

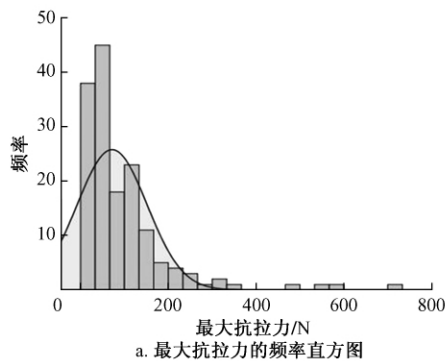
2 结果与分析

2.1 模型建立前的数据挖掘分析

2.1.1 正态性检验

大多数统计方法前提条件都需要假定每个观测向量来自多元正态分布,因此需要对单根抗拉的多维试验数据进行正态性检验。SPSS中规定,当样本

容量 n 满足 $3 \leq n \leq 5\,000$ 时, 结果以 W 检验为准; 当样本容量 n 大于 $5\,000$ 时, 结果以 $K-S$ 检验为准。选择 W 检验法并结合使用变量的频率直方图(图



2) 对所有的单根抗拉试验数据进行正态性检验, 检验结果显示, 单根最大抗拉力和抗拉强度均通过检验, 服从正态分布。

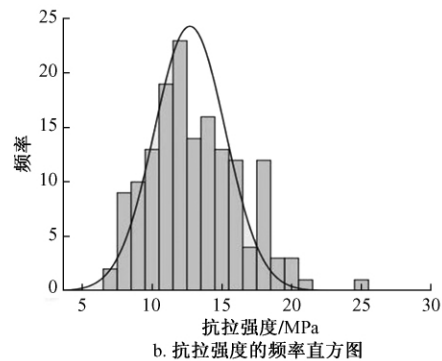


图2 最大抗拉力和抗拉强度2个随机变量的频率直方图

Fig.2 Frequency histogram of maximum tensile force and tensile strength

2.1.2 相关性分析

相关性分析通过图形和数值2种方式能够有效地揭示事物之间统计关系的强弱程度。以标距250 mm、拉伸速率10 mm/min的油松单根抗拉试验数据为例, 对直径与最大抗拉力和抗拉强度之间的相关性进行分析, 为林木单根抗拉模型的建立作前期分析与准备。

绘制散点图是相关分析过程中极为常用且非常直观的分析方式。通过观察散点图能够直观地发现变量间的统计关系以及它们的强弱程度和数据可能的走向。图3为直径、最大抗拉力和抗拉强度的矩阵散点图, 其表明直径与最大抗拉力的数据对集中形成一根棒状, 剩余少数数据点零散地分布在棒的上侧末端, 它们之间有较强的线性关系; 直径与抗拉强度的数据对组成类似于椭球的形状, 它们之间的线性关系不明显。

尽管散点图能够比较直观地展现变量之间的统计关系, 但并不精确。相关系数则以数值的方式精确地反映了2个变量间线性相关程度的强弱。可以用 Pearson 简单相关系数来度量两个变量间的线性相关性。对图3中的数据点应用数值法作相关分析, 结果显示: 直径与最大抗拉力之间存在线性关系, 且相关系数为 $0.907 > 0.8$, 说明直径与最大抗拉力之间存在高度线性关系; 直径与抗拉强度之间的相关系数为 -0.274 , 说明直径与抗拉强度之间存在负相关关系, 但关系极弱。

依据上述方法, 对油松、白桦、落叶松、蒙古栎所有的试验数据中直径与最大抗拉力、抗拉强度之间作相关性分析, 得出结论基本一致, 均显示直径与最大抗拉力之间存在高度线性关系, 而直径与抗拉强度之间存在负相关关系, 但线性关系极弱。

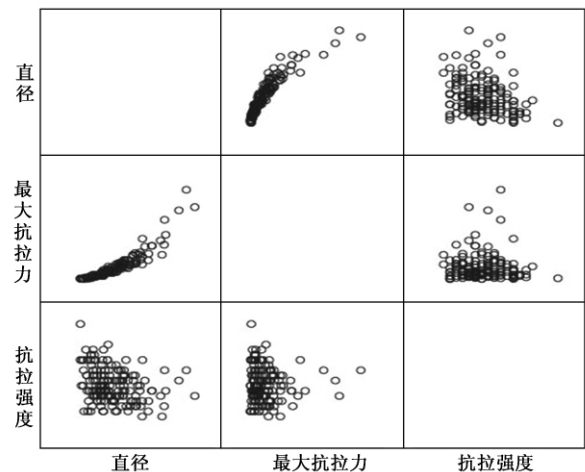


图3 直径、最大抗拉力和抗拉强度的矩阵散点图

Fig.3 Matrix scatter diagram of diameter, maximum tensile force and tensile strength

2.1.3 径级分类结果

单根抗拉的试验数据给出了某一直径根段相应的抗拉力和抗拉强度等力学特性指标。本研究中试验根段的径级为 $0 \sim 8$ mm, 为了更清晰地了解不同径级下根抗拉特性的结构从而更好地理解根系固持土壤的不同过程, 有必要依据试验测定的抗拉力、抗拉强度等力学特性指标对单根径级进行分类。应用聚类方法进行分析时所选择的变量应该满足: 各变量的变量值不应有数量级上的差异, 且各变量间不应有较强的线性相关关系。由相关性分析结果可知, 直径与最大抗拉力之间高度线性相关, 而直径与抗拉强度之间线性关系极弱, 因此, 选择直径与抗拉强度2个变量作为聚类分析的变量, 对径级进行分类。本研究应用一种比较流行的非分层聚类方法—— K 均值法对单根径级进行分类。因为试验根段的径级为 $0 \sim 8$ mm, 基本属于细根, 因此聚类时, 指定 $K=2$ 将径级进一步细分为极细根径级和细根

径级。

按此方法,将油松、白桦、落叶松、蒙古栎4个树种不同速率、不同标距下的径级进行分类,其样本的径级分类结果及相应径级下的平均抗拉强度如表1所示。

表1 4个树种不同速率、不同标距下径级的分类结果及平均抗拉强度

Tab. 1 Classification and average tensile strength results of four species at different tensile conditions

树种	速率/ (mm·min ⁻¹)	标距/ mm	分类后径级/ mm	平均抗拉强度/ MPa
油松	10	50	0.50 ~ 3.02	22.00
			3.06 ~ 6.75	14.00
		100	0.75 ~ 3.10	19.00
			3.18 ~ 7.20	13.00
		150	0.50 ~ 3.10	19.00
			3.19 ~ 7.50	12.00
	400	200	0.47 ~ 3.01	18.00
			3.05 ~ 7.40	11.00
		250	0.80 ~ 3.27	17.00
			3.30 ~ 8.00	11.00
		100	2.00 ~ 3.04	15.86
			3.20 ~ 7.03	13.08
白桦	10	50	1.04 ~ 3.25	30.00
			3.47 ~ 7.00	22.00
		100	1.00 ~ 3.10	29.19
			3.30 ~ 6.16	21.00
		250	1.70 ~ 3.40	21.63
			3.65 ~ 7.05	15.78
	400	100	0.70 ~ 3.23	28.67
			3.33 ~ 5.94	20.68
		50	2.80 ~ 4.75	14.67
			4.85 ~ 7.17	10.29
		100	3.30 ~ 4.55	13.40
			4.87 ~ 6.30	9.53
落叶松	10	250	2.90 ~ 4.40	12.50
			4.47 ~ 5.98	9.48
	400	100	2.00 ~ 3.60	13.29
			3.73 ~ 5.30	9.26
		50	1.99 ~ 4.09	27.22
			4.27 ~ 6.50	20.38
蒙古栎	10	100	1.77 ~ 4.02	22.67
			4.20 ~ 6.60	16.78
		250	2.37 ~ 3.80	19.13
			4.09 ~ 6.36	13.54

由表1可以看出:比较4个树种,蒙古栎和白桦的抗拉特性优于落叶松和油松的;同一树种内,拉伸速率和标距的增加都导致抗拉强度的下降。这4个树种极细根与细根的临界值分别为:油松3.10 ~ 3.50 mm处,白桦3.20 ~ 3.50 mm处,落叶松4.40 ~ 4.70 mm处,蒙古栎在4.10 ~ 4.30 mm处。

实际情况中,极细根的主要功能是吸收水分和养分,根龄还比较小,根嫩且还没有木质,其抗拉强度较大;细根较多地被木质化,其抗拉强度相应降低。

2.1.4 非参数检验

林木单根抗拉试验数据中,拉伸速率、树种、标距均作为试验设计中的控制因素,抗拉强度、最大抗拉力等作为观测变量值。分析判断控制变量的不同水平上观测变量值是否产生了明显波动,这对判断控制变量的选取是否合理至关重要。若某一控制变量各水平下的观测变量总体分布没有显著差异,则认为这一控制变量对该观测变量没有产生显著影响。

方差分析应用的前提条件是变量服从正态分布,且方差呈齐性。由于抗拉强度通不过方差齐性检验,所以选择非参数检验进行统计推断,分析树种、标距及拉伸速率3个控制变量对抗拉强度的影响是否显著。

依据试验设计树种、标距、拉伸速率3个控制变量分别有4、3、2个水平,即油松、白桦、落叶松、蒙古栎4个树种,50、100和250 mm的3个标距,10和400 mm/min的2个拉伸速率。对于2个水平的控制变量拉伸速率而言,分析其不同水平上抗拉强度的差异性,采用两独立样本的非参数检验法即可;对于分别为3、4个水平的控制变量标距、树种而言,应采用多独立样本的非参数检验法。

1) 将拉伸速率作为控制变量的检验分析

选择标距均为100 mm、直径径级均为极细根(第1类)的油松单根,分别以10和400 mm/min的拉伸速率拉伸的单根试验数据进行两独立样本的非参数检验,分析拉伸速率作为控制因素对抗拉强度是否存在显著影响。分别选取Mann-Whitney U(曼-惠特尼U)和Kolmogorov-Smirnov(K-S)2种检验法进行检验,2种非参数检验法的显著性(0.721和0.676)均大于 α 为0.05的显著性,因此应接受零假设,认为10和400 mm/min两种拉伸速率对抗拉强度的影响不显著。这说明拉伸速率在10和400 mm/min这2个水平上还不能表现出对单根抗拉特性有显著影响,如在试验设计中拉大两个水平的设定,可能就会有更为明显的影响效果。

2) 将标距作为控制变量的检验分析

选择速率均为10 mm/min、直径径级均为极细根(第1类)的油松单根,分别按标距50、100和250 mm进行单根拉伸的试验数据进行多独立样本的非参数检验,分析标距作为控制因素对抗拉强度的影响是否显著。选取Kruskal-Wallis(K-W)检验法进行检验,若选定显著性水平 α 为0.05,则检验法的

显著性(0.000)均小于0.05,应拒绝零假设,认为3个不同标距下单根抗拉强度的分布存在显著差异。检验结果显示不同标距水平对单根的抗拉强度实测值存在显著影响,因此可以认为标距这一因素确实对单根的抗拉特性存在显著影响。

3) 将树种作为控制变量的检验分析

选择速率均为10 mm/min、直径级均为极细根(第1类)以及标距均为100 mm的4种树木(1油松、2白桦、3落叶松、4蒙古栎)的单根拉伸试验数据进行多独立样本的非参数检验,分析树种作为控制因素对抗拉强度的影响是否显著。选取K-W检验法进行检验,结果表明树种作为控制变量也对单根的抗拉强度存在显著影响。

2.2 单根抗拉强度的力学综合模型

依据对林木单根抗拉特性的基本分析,考虑建立林木单根抗拉力学模型的数学形式如下:

$$U(P, F, E, \varepsilon, \varepsilon_{\text{残}}) = f(D, S, L, V) \quad (1)$$

式中: U 为函数形式, P 为抗拉强度, F 为最大抗拉力, E 为线弹性模量, ε 为极限延伸率, $\varepsilon_{\text{残}}$ 为残余应变, D 为直径, S 为树种, L 为标距, V 为拉伸速率。

抗拉强度表征材料的断裂抗力,是材料力学特性中最重要的指标之一。因此,有必要建立抗拉强度这一力学特性指标的综合模型,即

$$P = f(D, S, L, V) \quad (2)$$

2.2.1 固定控制变量情况下抗拉强度的回归模型

在固定控制变量情况下,先以标距250 mm、拉伸速率10 mm/min的油松单根抗拉试验数据为例,说明抗拉强度与直径回归模型确立的具体过程,其余各标距、各拉伸速率的不同树种抗拉强度与直径的模型可通过类似方法建立。

1) 变量转换

通过散点图,对抗拉强度数据与直径数据进行探索,无法直观地发现它们之间的关系。由相关性分析可知,最大抗拉力与直径之间存在较强的线性关系,而抗拉强度与直径的线性关系极弱。因为抗拉强度、最大抗拉力与直径满足如下关系式 $P = 4F/(\pi D^2)$,所以考虑将 D 取倒数,分析变量 $1/D$ 与 P 之间的关系更有利于发现它们回归方程的形式。

2) 回归模型确立

将 P 与转换后的自变量 $1/D$ 进行曲线回归,得到的回归分析结果如表2所示。

表2 P 与 $1/D$ 按各不同曲线模型的回归分析结果

Tab. 2 Regression analysis of tensile strength and $1/D$ according to different models

模型	回归系数	回归系数的显著性	模型数学表达形式	拟合优度 (R^2)	回归方程显著性
线性	5.007	0.001	$P = 10.859 + 5.007/D$	0.637	0.001
	10.859	0.000			
二次	4.027	0.442	$P = 0.920/D^2 + 4.027/D + 11.034$	0.638	0.006
	0.920	0.845			
	11.034	0.000			
对数	1.886	0.004	$P = 1.886 \ln(1/D) + 14.960$	0.550	0.004
	14.960	0.000			
幂	0.145	0.004	$P = 14.996/D^{0.145}$	0.538	0.004
	14.996	0.000			
S	-0.035	0.023	$\ln P = 2.671 - 0.035D$	0.386	0.023
	2.671	0.000			
增长	0.378	0.002	$\ln P = 2.395 + 0.378/D$	0.604	0.002
	2.395	0.000			

由于复合函数 $y = \beta_0 \beta_1^x$ 及指数函数 $y = \beta_0 e^{\beta_1 x}$ 经过变量转换后,本质形式均为增长模型的形式,所以在表2中略去了这2个函数的回归分析结果。由表2可知,所有这些曲线模型,其方程的显著性检验均可通过(显著性 < 0.05)。其中,二次回归模型的拟合度最高,说明 $1/D$ 用的二次模型能够最大限度地解释 P ,但二次模型中二次项回归系数及一次项回归系数均通不过显著性检验(显著性 > 0.05),因此二次回归模型不可用。其余回归模型方程的显著性检验和回归系数显著性检验均通过检验,模型可用。

通过比较拟合优度,最终线性模型被确认为最佳模型。因此,对标距250 mm、拉伸速率10 mm/min的油松单根而言, D 与 P 之间呈逆函数关系,其模型的数学表达式为 $P = 10.859 + 5.007/D$ 。

由非参数检验结果可知,10和400 mm/min 2个水平的拉伸速率对林木单根的抗拉强度影响不显著,因此拉伸速率被剔除,不再视为一个可控变量因素。应用同样方法,对拉伸速率均选10 mm/min、不同标距下所有树种的抗拉强度与直径回归方程拟合,结果如表3所示。

表3 所有树种各个标距下抗拉强度
与直径的回归分析结果

Tab. 3 Regression analysis of tensile strength
and diameter at different lengths for all species

树种	标距/mm	回归方程	R^2
油松	50	$P = 13.704 + 6.162/D$	0.741
	100	$P = 11.994 + 8.367/D$	0.640
	250	$P = 10.859 + 5.007/D$	0.637
白桦	50	$P = 20.399 + 12.242/D$	0.942
	100	$P = 20.018 + 12.184/D$	0.718
	250	$P = 14.191 + 16.517/D$	0.873
落叶松	50	$P = 4.639 + 29.670/D$	0.748
	100	$P = 4.533 + 31.610/D$	0.946
	250	$P = 4.501 + 23.201/D$	0.850
蒙古栎	50	$P = 18.079 + 15.170/D$	0.826
	100	$P = 16.953 + 11.979/D$	0.630
	250	$P = 15.837 + 19.234/D$	0.793

2.2.2 引入控制变量时抗拉强度的综合模型

2.2.2.1 综合模型建立

由2.2.1可知,林木单根抗拉强度与直径之间满足逆函数关系 $P = a + b/D$ 。将 S 和 L 这2个控制变量引入到模型中,它们的不同水平将影响参数 a 、 b 的取值,故引入控制变量抗拉强度的模型,数学形式应为

$$P = a(S, L) + b(S, L)/D \quad (3)$$

根据逆函数性质可知:

$$a = \lim_{D \rightarrow +\infty} P(D) \quad (4)$$

因此,参数 a 代表最小抗拉强度,它主要受到 S 的制约,每个树种的最小抗拉强度都将处在某一平均水平范围内;且随标距增加,最小抗拉强度在此均值上进一步减小。所以,参数 $a(S, L)$ 的具体形式可以表达为:

$$a(S, L) = \bar{a}_S - kL \quad (5)$$

式中: \bar{a}_S 为平均最小抗拉强度, k 为待拟合参数。

根据逆函数及导数的性质,可知:

$$P' = -b/D^2 \quad (6)$$

所以,参数 b 满足

$$b = -P'(1) \quad (7)$$

因此,参数 b 表征着 P 与 D 关系曲线在直径 $D=1$ 处斜率的相反数。从表3可看出,参数 b 主要受 S 的影响,而 L 对其影响不明显,因此,参数 $b(S, L)$ 的具体形式可以表达为

$$b(S, L) = b(S) = m\bar{b}_S + \varepsilon \quad (8)$$

式中: \bar{b}_S 为强度与直径关系曲线在直径 $D=1$ 处平均斜率的相反数, m 、 ε 为待拟合参数。

综上所述,引入树种和标距这2个控制变量后,林木单根抗拉强度综合模型的数学表达形式为:

$$P = \bar{a}_S - kl + (m\bar{b}_S + \varepsilon)/D \quad (9)$$

式中: l 表示标距的具体数值。

综合模型(9)丰富了逆函数模型 $P = a + b/D$ 的内容,使得分析树种、标距等控制因素对抗拉强度的作用机制更为透彻。

2.2.2.2 综合模型求解

以 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 分别代表油松、白桦、落叶松和蒙古栎4个树种。结合表3中的数据对综合模型(9)进行求解,采用最小二乘法确定参数 k 、 m 、 ε , 结果见表4。

表4 综合模型参数计算结果

Tab. 4 Calculation results of integrated model parameters

树种	\bar{a}_S	\bar{b}_S	k	m	ε
S_1	12.19	6.51	0.004	1	0
S_2	18.20	13.65	0.009		
S_3	4.56	28.16	0.001		
S_4	16.96	15.46	0.003		

因此模型(9)可以改写成:

$$P(S_i, L) = (\bar{a}_{S_i} - k_{S_i}l) + \bar{b}_{S_i}/D \quad (10)$$

式中: i 代表树种类别,每个不同的树种对应的参数需经过一定的试验数据拟合得到。对试验所得的油松、白桦、落叶松和蒙古栎,我们在表4中给出了拟合求解的模型参数,其各自的数学表达形式如下所示:

$$\begin{aligned} P(S_1, L) &= (12.19 - 0.004l) + 6.51/D \\ P(S_2, L) &= (18.20 - 0.009l) + 13.65/D \\ P(S_3, L) &= (4.56 - 0.001l) + 28.16/D \\ P(S_4, L) &= (16.96 - 0.003l) + 15.46/D \end{aligned} \quad (11)$$

3 结 论

1) 标距、树种对抗拉强度影响显著,可视为影响抗拉强度的控制因素;而拉伸速率在10和400 mm/min这2个水平上对抗拉强度的影响不显著,剔除出影响抗拉强度的控制因素。

2) 这4个树种极细根与细根的临界值分别为:油松3.10~3.50 mm,白桦3.20~3.50 mm,落叶松4.40~4.70 mm,蒙古栎4.10~4.30 mm。

3) 构建林木单根抗拉的力学特性综合模型,其数学表达式为 $P = a(S, L) + b(S, L)/D$ 。对模型中各参数的数学及实际物理意义进行了分析,并利用试验数据应用最小二乘法对参数进行了拟合,最后求解出林木单根抗拉力学特性综合模型的具体表达形式为 $P(S_i, L) = (\bar{a}_{S_i} - k_{S_i}l) + \bar{b}_{S_i}/D$ 。这一林木单根的力学特性综合模型引入了树种、标距作为控制变量,给出了它们对强度的具体作用形式,在一定程度上能反映林木单根力学作用机制,有一定指导意义。

义。另外,该力学模型适用于我国华北地区常见乔木根系力学特性的描述,且模型推导与建立的思想和方法可进一步推广应用到其他树种根系的力学特性研究中。

参 考 文 献

- [1] SIDLE R C, OCHIAI H. Landslides: processes, prediction and land use[J]. *Water Resource Monograph*, 2006, 18: 312.
- [2] WU T H. *Investigation of landslides on Prince of Wales Island* [R]. Columbus: Ohio State University, 1976: 94.
- [3] WALDRON L J. Shear resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1977, 41: 843–849.
- [4] 李绍才, 孙海龙, 杨志荣, 等. 护坡植物根系与岩体相互作用的力学特性[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(10): 2051–2057.
- [5] 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.
- [6] 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]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(22): 3445–3452.
- [7] 李贺鹏, 岳春雷, 赵广琦, 等. 中亚热带常绿阔叶林中主要灌木根系力学特性[J]. *西北林学院学报*, 2010, 25(5): 33–36.
- [8] 王剑敏, 沈烈英, 赵广琦. 中亚热带优势灌木根系对土壤抗剪切力的影响[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2011, 35(2): 47–50.
- [9] 张东升. 长江上游暗针叶林林木根系抗拉力学特性研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2002.
- [10] LINDSTRÖM A, RUNE G. Root deformation in containerised Scots pine plantations—effects on stability and stem straightness [J]. *Plant Soil*, 1999, 217: 29–37.
- [11] TURMANINA V. On the strength of tree roots [J]. *Bul of the Moscow Society of Naturalists, Biological Section*, 1965, 70(5): 36–45.
- [12] 国家质量监督检验检疫总局. GB/T 228—2002 金属材料室温拉伸试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [13] 吕春娟, 陈丽华, 周硕, 等. 不同乔木根系的抗拉力学特性[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(13): 329–335.
- [14] BISCHETTIL B G, CHIARADIA A E, SIMONATO T. Root strength and root area ratio of forest species in Lombardy (Northern Italy) [J]. *Plant and Soil*, 2005, 278: 11–22.
- [15] GENET M, STOKES A, SALIN F, et al. The influence of cellulose content on tensile strength in tree roots [J]. *Plant and Soil*, 2005, 278(1–2): 1–9.
- [16] POLLEN N. Temporal and spatial variability in root reinforcement of streambanks: Accounting for soil shear strength and moisture [J]. *Catena*, 2007, 69(3): 197–205.
- [17] POLLEN N, SIMON A, JAEGER K. Destabilization of stream-banks by removal of invasive species in Canyon de Chelly National Monument, Arizona [J]. *Geomorphology*, 2009, 103: 363–374.

(责任编辑 李 斐)