西北林学院学报 2016,31(4):201～205
Journal of Northwest Forestry University

doi:10.3969/j.issn.1001-7461.2016.04.34

应力波在落叶松活立木中传播二维模拟研究

刘丰禄[1],姜　芳[1*],王喜平[2],张厚江[1],杨志慧[3]

(1.北京林业大学 工学院,北京 100083;2.美国农业部林产品实验室,威斯康辛 麦迪逊 WI53726;
3.隆化县国营林场管理局 茅荆坝林场,河北 承德 068150)

摘　要:近年来应力波技术用于活立木材质无损检测与评价的研究,受到了广泛的关注。主要研究集中在应力波在活立木中传播速度的测量,即通过应力波波速预测活立木木材质量。目前对应力波在活立木中的传播形式,还缺乏了解。通过二维数值模拟研究应力波在活立木中的传播形式,并将模拟结果与野外测量实验结果对比。树干被看作是正交各向异性圆柱体,应力波沿与树干成45°方向导入,利用 COMSOL Multiphysics 软件对应力波在树干中传播波阵面进行了模拟计算。模拟计算结果与野外实验结果有很好的一致性,应力波传播波阵面在开始阶段为倾斜曲线,都弯向脉冲力输入点;随着距离的增大,波阵面倾斜度逐渐减小,直至最后与原木长度方向近似垂直。

关键词:应力波;落叶松;活立木;COMSOL Multiphyscis;数值模拟;波阵面

中图分类号:S781.23　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1001-7461(2016)04-0201-05

Stress Wave Propagation in Larch Plantation Trees:Numerical Simulation

LIU Feng-lu[1],JIANG Fang[1*],WANG Xi-ping[2],ZHANG Hou-jiang[1],YANG Zhi-hui[3]

(1. *School of Technology*,*Beijing Forestry University*,*Beijing* 100083,*China*; 2. *USDA Forest Products Laboratory*,*Madison*,*Wisconsin* 53726,*USA*; 3. *Maojingba Forest Farm*,*Longhua County Administration of State-Owned Forest Farm*,*Chengde*,*Hebei* 068150,*China*)

Abstract:The use of stress wave technology for standing tree quality assessment has been received a lot of attention in recent years. By far,most researches have been limited to direct measurement of stress wave velocity in trees. Subsequent wood property prediction was solely based on the measured velocity value. There is still a lack of understanding of how stress waves propagate in standing trees. The objective of this study was to investigate the mechanism of stress wave propagation in standing trees through two dimensional (2D) numerical simulations,as well as comparison of the simulation results and field testing results. The field testing was conducted on three logs freshly cut from larch (*Larix principis-rupprechtii*) trees. A tree trunk was subsequently modeled as an orthotropic cylinder. Longitudinal stress wave propagation under this physical model was investigated using COMSOL Multiphysics software under the dynamic loading scenarios: impact on the side of the end with a 45-degree angle to the surface. The 2D-wave fronts observed in numerical simulations were in agreement with those obtained through field stress wave testing on larch tree stems. The wave front in start stage was a sloping curve,bending to input point of the force pulse; with the increase of the distance,inclination of the wave front decreased gradually until approximately vertical with log length direction.

Key words:stress wave; *Larix principis-rupprechtii*; standing trees; COMSOL Multiphyscis; numerical simulation; wave front

收稿日期:2015-10-08　**修回日期**:2015-12-16
基金项目:国家自然科学基金项目"应力波在人工林活立木中的传播机理及波速转换模型的研究"(31328005)。
作者简介:刘丰禄,男,硕士研究生,研究方向:机械测试与控制技术。E-mail:liufenglu39@126.com
* **通信作者**:姜　芳,女,博士,副教授,研究方向:复合材料损伤力学与流体动力学仿真。E-mail:jf0602@bjfu.edu.cn

近年来应力波技术用于活立木材质无损检测与评价的研究，受到了广泛的关注[1-14]。这方面研究目前主要集中于应力波在活立木中传播速度的测量，即通过应力波波速预测活立木木材质量[6-14]。相比之下，对应力波在活立木中的传播形式，以及胸径、树种、树龄、环境条件等对传播形式的影响，还缺乏了解，相关研究很少。张厚江[15-16]等曾以美国红松活立木为对象，试验研究了应力波在红松树干中的传播机理，通过试验数据处理得到了应力波在树干中传播的二、三维波阵面图。但通过数值模拟的方式，对应力波在活立木中的传播形式的研究，到目前为止还没有见到报道。

本研究以我国大面积存在的落叶松人工林活立木为对象，利用 COMSOL Multiphysics 软件进行应力波传播二维仿真，并与试验测量结果对比，力图得到一种可行的应力波在活立木中传播数值模拟方法，为今后进一步研究应力波在活立木中的传播机理奠定基础。

1 材料与方法

1.1 应力波在活立木中传播模拟软件

本研究所用的 COMSOL Multiphysics 是一款大型的多物理场高级数值仿真软件，在波的传播方面具有强大的仿真能力。它以有限元法为基础，通过求解偏微分方程(单场)或偏微分方程组(多场)来实现真实物理现象的仿真。COMSOL Multiphysics 广泛应用于各个领域的科学研究以及工程计算，适用于模拟科学和工程领域的多种物理过程，比如其在声学、生物科学、结构力学、波传播等领域已经得到了广泛的应用[17]。COMSOL Multiphysics 关于波传播的数值模拟是在三维应力波理论的基础上，基于三维波动方程进行的，其实质就是通过有限元法求解偏微分方程的过程，在给定泛定方程和定解条件(初始条件和边界条件)后就能求出偏微分方程的解。

本研究模拟计算利用的主要是该软件的基础模块和结构力学模块。其中基本模块包含软件的前、后处理以及求解器等主要功能。结构力学模块专门用于分析受静态或动态载荷作用的力学结构，包括稳态、瞬态、准静态、频率响应和预应力等，适于的材料包括岩石、混凝土和土壤等。将其用于模拟仿真应力波在活立木中的传播，构建出应力波在活立木树干中的传播波阵面图，是一种新的尝试。

1.2 应力波在活立木中传播野外试验方法

为对比软件应力波传播模拟结果，在模拟计算之前，首先在野外进行了应力波传播测量试验。试验在承德茅荆坝林场落叶松人工林中进行，现场砍伐了 3 棵落叶松树木，从每棵树树干根部开始截取 3.6 m 长的一段原木进行测量试验。也就是说，通过对新鲜砍伐的原木应力波传播测量，达到在活立木上测量试验的目的。采用匈牙利产 FAKOPP 微秒计测定应力波在原木中的传播时间，应力波通过敲击导入极产生，通过接收极来接收。

导入极的位置在测量过程中保持不动，始终处于试样原木大端面最高点处，而接收极的位置在测量过程中不断变动。每当一个横截面完成测量，试样原木将被等距离截去一段，长度为 30 cm，从而生成一个新的数据采集面，而接收极相应地转移到新的截面上。导入极与试样原木的轴线方向成 45°插入[3,9,14]，接收极则垂直于横截面插入。在每个被测横截面中间垂线(即竖直直径线)上，以截面中心为中心都划有间距为 2.5 cm 的点，这些点就是接收极的测量点。保证同一原木各个被测横截面中间垂线在同一平面内，形成一个中纵截面，导入极要布置在中纵截面内，然后利用应力波传播时间法测量应力波到达各点的时间并记录。应力波在活立木中传播的野外实验测量方法如图 1 所示。测量数据经 Surfer 软件处理得到应力波在中纵截面上传播波阵面实验图。

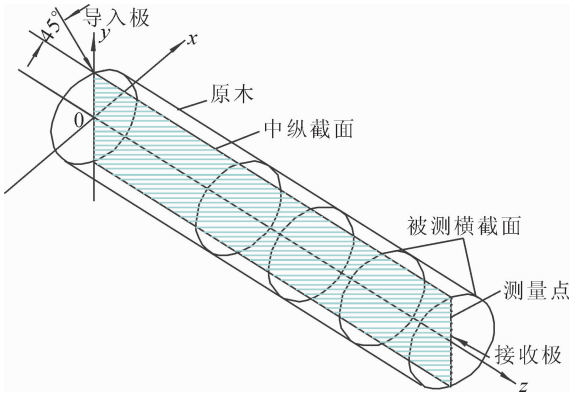

图 1 应力波传播野外试验示意

Fig. 1 Schematic diagram of the stress wave test

2 数值建模与求解过程

数值建模和求解过程是在图 2 所示的软件界面下进行的。整个数值建模与求解过程包括几何建模、输入材料属性、设定载荷、设定初始条件及边境条件、网格划分和求解等，具体如下。

3.1 几何模型

本研究模拟的是应力波在树干二维传播形式，为方便模拟结果与野外试验结果对比，将几何模型设定为野外试验 3 根新鲜原木的中纵截面。3 根原木的几何尺寸如表 1 所示。可以知道，传播介质几何模型应为细长的梯形。

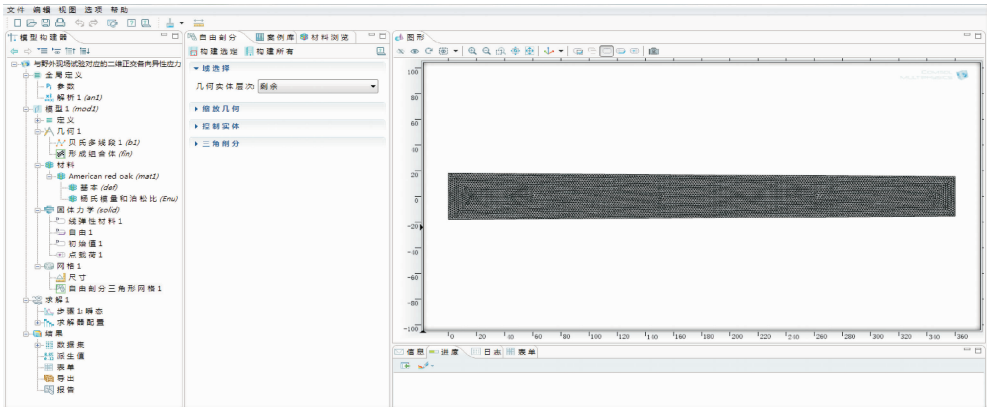

图 2　COMSOL Multiphysics 软件操作界面

Fig. 2　Interface of COMSOL Multiphysics software

表 1　原木试样几何尺寸

Table 1　Geometry size of logs

试样	长度 L /cm	大端直径 D /cm	小端直径 d /cm
原木 A	360	38	31
原木 B	360	32	27
原木 C	360	28	24

2.2　物理模型与材料属性

树干的物理模型选为正交各向异性体,定义轴向 L、径向 R、弦向 T 为树干(原木)的 3 个主轴方向,通过电测法和三点弯曲法测定了落叶松活立木的 12 个弹性常数如表 2 所示。试样取自河北省承德市隆化县茅荆坝林场的人工林落叶松,树龄为 40 a,采伐 3 根原木现场测试后拉回实验室进行弹性常数的测定,原木含水率为 95%,表 2 中的测定值为 3 根原木不同位置弹性常数的平均值。表中的 E 为杨氏模量,G 为剪切模量,μ 为泊松比。木材密度 $\rho=838\ \mathrm{kg\cdot m^{-3}}$。

2.3　设定载荷

输入的压缩波通过小锤瞬态敲击输入极产生,模拟计算时采用半正弦脉冲函数来定义,其表达式如式(1)所示。

$$F(t)=\begin{cases}A\sin(2\pi ft), & t<(1/2f)\\ 0, & t\geqslant(1/2f)\end{cases}\tag{1}$$

式中 A 为幅值,f 为频率。实际测量了小锤敲击脉冲力信号,其幅值约为 200 N。由于输入极与原木轴线方向成 45°,即脉冲力沿与原木轴线成 45°方向进入树干,所以根据矢量分解原则,将力 $F(t)$ 分解为 2 个分量:$F_y(t)$ 和 $F_z(t)$,每个分力幅值为 141.4 N。根据实测脉冲力情况,取脉冲力频率 $f=1\times10^8$(Hz)。单个脉冲分力的函数图形如图 3 所示。

表 2　落叶松活立木 12 个弹性常数

Table 2　Twelve elastic constant values of larch forest

E_L/MPa	μ_{LT}	μ_{LR}	E_T/MPa	μ_{TL}	μ_{TR}	E_R/MPa	μ_{RL}	μ_{RT}	G_{RT}/MPa	G_{LR}/MPa	G_{LT}/MPa
4 350.33	0.41	0.23	1 099.6	0.1	0.67	1 054.97	0.08	0.62	523.18	460.32	412.42

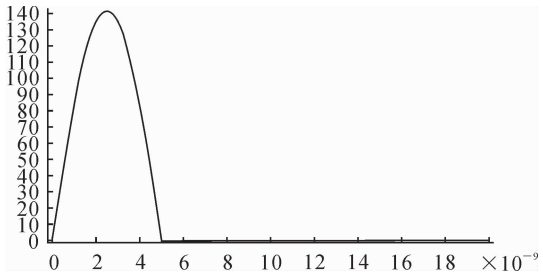

图 3　半正弦脉冲力函数

Fig. 3　Function of half-sine force pulse

2.4　初始条件和边界条件设定

2.4.1　*初始条件*　包括初始位移和初始速度。设定木材(介质)各质点初始位移和初始速度均为 0。用 u 代表质点位移,则 2 初始条件的数学表达式如式(2)和(3)所示。

初始位移:

$$u_i=0(i=x,y,z)\tag{2}$$

初始速度:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t}=0(i=x,y,z)\tag{3}$$

2.4.2　*边界条件*　模型的边界采用自由边界条件,即当应力波传到模型边界上时,透射波和反射波同时存在,并伴随波的衰减。

2.5　网格划分和求解

2.5.1　*网格划分*　对分析对象(原木中纵截面)划分采用自由剖分的三角形网格,单元数为 10 592,其中最大单元尺寸为 1.73 cm,最小单元尺寸为 0.004

cm。图 2 右侧图框中的梯形为原木 A 中纵截面划分后的网格情况。

2.5.2 求解 求解步长设定为:1)瞬态求解器采用的时间步长为自由,设置初始步长为 1e-9s,最大步长为 1e-4s;2)输出求解结果的步长为 5.0e-7s。

在完成前面所有设定后,执行软件,观察并记录模拟计算结果。

3 结果与分析

3.1 位移等值线图

位移等值线是指波源发出的振动在介质中传播经相同时间所到达的各点组成的线,线上各点的振动位移相同。以原木 A 为例,在仿真结果中选取时间 t=5e-5s、1.4e-4s、1.9e-4s、3.5e-4s、5e-4s、7e-4s、1e-3s,绘制出这几个时间点的中纵截面上位移等值线图,结果如图 4 所示。每个时间点的位移等值线图的最前端的等值线即为应力波在该时间点的波阵面(波前),它是应力波在传播过程中扰动区域和未扰动区域的分界线。

3.2 应力波传播波阵面仿真结果

为了能直观形象地显示波阵面在整个原木中的传播形式,提取每个原木中纵截面上多个时间点的位移等值线图最前端的等值线,形成应力波传播波阵面图,如图 5 所示。该图显示的是应力波前端在整个原木中的传播过程。图中曲线上的数值为传播时间(μs);左上角圆点为脉冲力导入点;横、纵坐标分别为原木长度和直径(cm)。

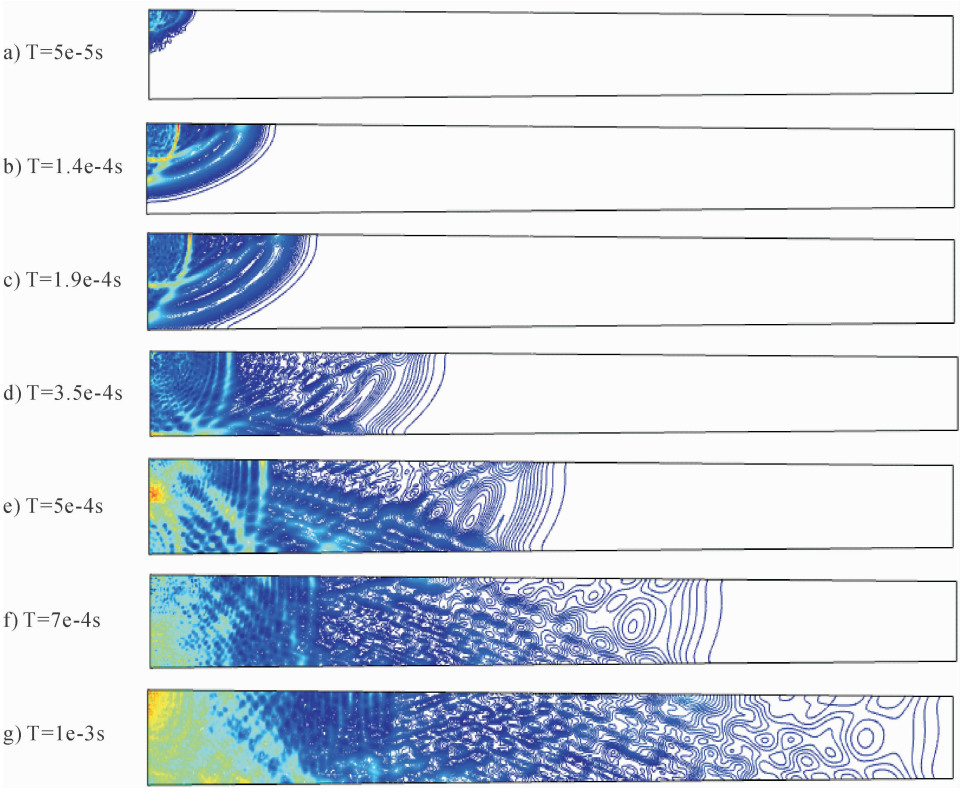

图 4 中纵截面上位移等值线(原木 A)

Fig. 4 Contour maps of total displacement on longitudinal-radial (L-R) log plane (log A)

由图 5 可以看出,不论是原木 A、B 还是 C,应力波传播波阵面在开始阶段均为倾斜曲线,弯向脉冲力输入点;随着距离的增大,波阵面倾斜度逐渐减小,直至最后与原木长度方向近似垂直。

3.3 模拟结果与野外试验结果对比

为了验证数值模拟结果的正确性和可靠性,将数值模拟结果和野外应力波传播测定试验结果进行比较。图 6 为野外试验的应力波传播波阵面图,图中横、纵坐标分别为原木长度和直径(cm);曲线上的数值为传播时间(μs)。由于野外应力波传播测定实验的测定距离是从距离原木大端面 45 cm 处开始的,因此图 6 所示的波阵面图的起始端为 45 cm 处。

对比图 5、图 6 发现,不论是原木 A、B 还是 C,数值模拟得出的应力波在原木中的传播规律与野外应力波传播测定实验所得的结果基本一致,波形上基本相似,应力波传播波阵面在开始阶段均为倾斜曲线,都弯向脉冲力输入点;随着距离的增大,波阵面倾斜度逐渐减小,直至最后与原木长度方向近似垂直。

同时,对比两图也可以发现:1) 数值模拟时,由于将材料看作均匀的正交各向异性,所以得到的波

形更加规整和均匀,而实测的波形,由于木材的各向异性、不同生长年限和含水率等因素的影响,其波形相对于理论波形会有一定的畸变;2) 应力波传播波阵面实验曲线光滑度不如数值模拟结果,且在应力波传播的中后期,出现了不规则的应力波波阵面。其原因可能是:活立木本身是各向异性的材料,其各个部位的物理性能和力学性能差异性较大,而数值模拟则做了一些简化,假定活立木为正交各向异性材料,这一假定可能导致模拟结果与实测结果存在偏差;该中纵截面处可能存在缺陷,比如活节、腐朽等,造成了应力波在该处传播速度变化。

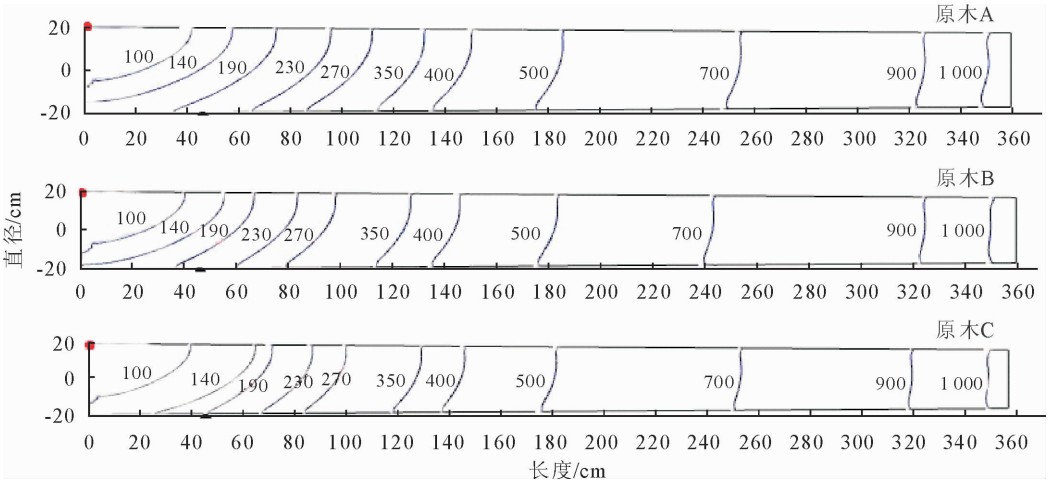

图 5　应力波传播波阵面仿真结果

Fig. 5　Simulation results of stress wave front

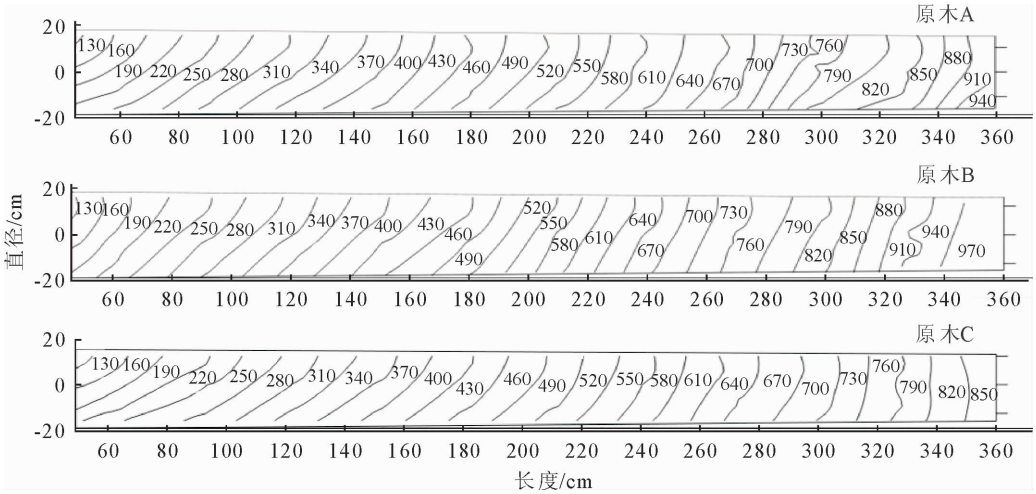

图 6　应力波传播波阵面试验结果

Fig. 6　Experimental results of stress wave front

4　结论

利用 COMSOL Multiphysics 软件的基础模块和结构力学模块对应力波在落叶松人工林活立木中的传播形式进行了数值模拟研究,并与新鲜砍伐原木上取得的试验数据进行了对比。发现模拟中将树干假设为正交各向异性是合理的,数值模拟得出的应力波在原木中的传播规律与野外实验所得的结果基本一致,应力波传播波阵面在开始阶段为倾斜曲线,都弯向脉冲力输入点;随着距离的增大,波阵面倾斜度逐渐减小,直至最后与原木长度方向近似垂直。

参考文献:

[1]　刘艳贞,谢华,周伟,等.应力波法检测活立木品质的研究进展[J].林业机械与木工设备,2013,41(1):22-23.
LIU Y Z,XIE H,ZHOU W,*et al*. Research progress in the use of stress wave for inspecting living standing tree quality [J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment,2013,41(1):22-23. (in Chinese)

[2]　孙燕良,张厚江,朱磊.木构件材料力学性能快速检测研究[J].西北林学院学报,2012,27(2):245-248.
SUN Y L,ZHANG H J,ZHU L. Rapid test on mechanical properties of wooden components [J]. Journal of Northwest Forestry University,2012,27(2):245-248. (in Chinese)

(下转第 240 页)

[9] 周重光,柴锡周,沈辛作,等.天目山森林土壤的水文生态效应[J].林业科学研究,1990,3(3):215-221.

[10] 范佩佩,韦新良,郭如意,等.天目山针阔混交林林木空间特性[J].浙江农林大学学报,2015,32(5):675-682.

[11] 周秀佳,马炜梁,刘永强.西天目山森林植被类型及其分布规律[J].生态学杂志,1987,6(3):17-20.
ZHOU X J,MA W L,LIU Y Q. Forest vegetation type of west Tianmu Mountains and their characteristics of distr ibution[J]. Chinese Journal of Ecology,1987,6(3):17-20.(in Chinese)

[12] 张志华,韦新良,汤孟平,等.天目山针阔混交林中枫香的结构特征[J].浙江农林大学学报,2012,29(6):867-874.

[13] 范佩佩,韦新良,郭如意.天目山针阔混交林林木碳储量树种分布特征[J].西北林学院学报,2015,30(5):191-195.
FAN P P,WEI X L,GUO R Y. Tree species distribution characteristics of carbon storage of coniferous and broad-leaved mixed forest in Tianmu Mountain[J]. Journal of Northwest Forestry University,2015,30(5):191-195.(in Chinese)

[14] 李希菲,唐守正,王松林.大岗山实验局杉木人工林可变密度收获表的编制[J].林业科学研究,1988,1(4):382-389.

[15] 欧祖兰,李先琨,苏宗明,等.元宝山两类森林群落的乔木物种多样性[J].应用与环境生物学报,2003,9(6):563-568.

[16] 沈楚楚.浙江省主要树种(组)生物量转换系数研究[D].临安:浙江农林大学,2013.

[17] 徐罗.天然林立地质量评价[D].北京:北京林业大学,2014.

[18] 官凤英,孟宪宇,梁永伟,等.封山育林类型划分标准的探讨——密云县古北口镇潮关西沟示范区封山育林类型划分[J].林业资源管理,2003(2):8-12.

[19] 徐罗,亢新刚,刘洋,等.长白山天然云冷杉针阔混交林地位指数导向曲线的模拟[J].东北林业大学学报,2014,42(4):32-37.

[20] 陈永富.基准年龄立地质量评价的影响分析[J].林业科学研究,2010,23(2):283-287.
CHEN Y F. Research on standard age affecting analysis of site quality evaluation[J]. Forest Research,2010,23(2):283-287.(in Chinese)

[21] 徐蕾.综合指数评价法在地表水饮用水源地水质评价中的应用[J].农业与技术,2013,33(4):36-37.

[22] 汤孟平,陈永刚,施拥军,等.基于Voronoi图的群落优势树种种内种间竞争[J].生态学报,2007,27(11):4707-4716.
TANG M P,CHEN Y G,SHI Y J,*et al*. Intraspecific and interspecific competition analysis of community dominant plant populations based on Voronoi diagram[J]. Acta Ecologica Sinica,2007,27(11):4707-4716.(in Chinese)

(上接第205页)

[3] 张婉婷,王立海.基于应力波的活立木力学特性无损检测研究进展[J].森林工程,2014,30(2):48-51.

[4] 苏娟,张厚江,王喜平.应力波评价活立木材质的研究与进展[J].林业机械与木工设备,2008,36(8):40-43.

[5] 周志茹,赵茂程,王正,等.基于应力波的意杨原木、单板及LVL弹性模量相关性研究[J].西北林学院学报,2014,29(3):188-193.
ZHOU Z R,ZHAO M C,WANG Z,*et al*. Correlations of the modulus of elasticity among poplar log,veneer and LVL based on the stress wave method[J]. Journal of Northwest Forestry University,2014,29(3):188-193.(in Chinese)

[6] WANG X P,CARTER P,ROSS R J,*et al*. Acoustic assessment of wood quality of raw forest materials-a path to increased profitability[J]. Forest Products Journal,2007,57(5):6-14.

[7] PELLERIN R F,ROSS R J. Nondestructive evaluation of wood[M]. USA,Madison:Forest Products Society,2002.

[8] 朱磊,张厚江,孙燕良.基于应力波和微钻阻力的红松类木构件力学性能的无损检测[J].南京林业大学学报:自然科学版,2013,37(2):156-158.

[9] 高珊,王立海,王洋.应力波在立木冻结与常温状态下的传播速度比较[J].林业科学,2010,46(10):124-129.
GAO S,WANG L H,WANG Y. Comparisons of stress wave propagating velocities in frozen state and in normal temperature state of standing trees[J]. Scientia Silvae Sinicae,2010,46(10):124-129.(in Chinese)

[10] 余观夏,阮锡根.木质材料中动弹模量色散关系的分析[J].南京林业大学学报:自然科学版,2007,31(1):131-134.

[11] WANG X P,ROBERT J R,CARTER P. Acoustic evaluation of wood quality in standing trees. Part I. acoustic wave behavior[J]. Wood and Fiber Science,2007,39(1):28-38.

[12] GAO S,WANG X,WANG L,*et al*. Effect of temperature on acoustic evaluation of standing trees and logs:Part 1-laboratory investigation[J]. Wood and Fiber Science,2012,44(3):286-297.

[13] GAO S,WANG X,WANG L,*et al*. Effect of Temperature on acoustic evaluation of standing trees and logs:Part 2- field investigation[J]. Wood and Fiber Science,2013,45(1):15-25.

[14] 王再超,李光辉,冯海林.基于应力波和支持向量机的木材缺陷识别分类方法[J].南京林业大学学报:自然科学版,2015,39(3):130-136.

[15] 张厚江,王喜平,苏娟.应力波在美国红松立木中传播机理的试验研究[J].北京林业大学学报,2010,32(2):145-149.
ZHANG H J,WANG X P,SU J. Investigation of stress wave propagation mechanism in American red pine trees[J]. Journal of Beijing Forestry University,2010,32(2):145-149.(in Chinese)

[16] ZHANG H J,WANG X P,SU J. Experimental investigation of stress wave propagation in standing trees[J]. Holzforschung,2011,65(5):743-748.

[17] 周家作,韦昌富,李文涛.基于COMSOL Multiphysics数学模块的固体弹塑性力学分析[J].武汉大学学报:工学版,2015,48(2):195-201.