论文

中国主要树种木材物理力学属性的地理格局及其环境控制

朱江玲^①, 石岳^②, 方乐祺^③, 刘杏娥^④, 吉成均^{①*}

① 北京大学城市与环境学院, 北京 100871;

② 中国科学院植物研究所, 北京 100093;

③ 武汉大学物理科学与技术学院, 武汉 430072;

④ 国家林业局国际竹藤网络中心, 北京 100102

* 联系人, E-mail: jicj@pku.edu.cn

收稿日期: 2014-08-16; 接受日期: 2014-09-16; 网络版发表日期: 2015-01-05

国家自然科学基金(批准号: 31321061, 30370419, 31300450)资助项目

doi: 10.1360/N052014-00211

摘要 木材的物理力学属性制约树木生长发育的重要过程,也是决定木材用途的主要依据.研究木材的物理力学属性及其影响因素,可为合理应用木材、科学开展林木选育、改进林业管理等提供必要参考.目前已有的研究多关注单一的木材密度指标,且缺乏多种影响因子的比较.本研究通过建立中国木材物理力学属性及影响因素综合数据库,对自然状态下我国主要树种木材力学属性的分布格局及其驱动因素进行了探讨.结果表明,选择气干密度、弦向干缩系数和冲击韧性作为评估木材物理力学属性的基础指标,比单一木材密度指标更准确,解释率更高;在选用的生活型、气候和土壤等 3 类因素中,生活型是影响木材力学物理属性变化的最重要因素,气候因子次之,土壤因子基本可忽略,并且气候和土壤因子的作用被生活型所掩盖,这意味着气候因子对于木材物理力学属性的影响是通过影响物种分布而产生作用的.

关键词木材密度
干缩系数
冲击韧性
地理格局
环境因子

木材是由诸如乔木、灌木、木质藤本等能够进行次生生长的植物所形成的木质化组织,是木本植物根、茎的基本组成部分之一^[1-3].木材的物理性质制约了木本植物生长发育中水分输导、机械支持等很多重要环节^[4-6],与树木的个体形态结构^[7]、生活史策略^[8]、种间资源竞争^[9]、群落动态^[10]乃至陆地生态系统功能^[11,12]等都有密切联系.因此,研究木材的物理力学属性并探究其影响因素,有助于进一步理解陆地生态系统的结构与功能,提高对全球变化下生态

系统响应的评估和预测能力.同时,作为一类具有非均质、各向异性特征的天然高分子材料,木材是人类社会中应用最广泛的材料之一^[2,13].据联合国粮食及农业组织统计,2007~2011 年,全世界共消费原木约 $1.71 \times 10^{11} \text{ m}^3$,其中 45.6%用于造纸、加工板材等各类工业生产,54.4%用作燃料^[14].作为评价木材的基本要素之一,木材物理力学属性是决定木材用途的重要依据^[15].因此,对木材物理力学属性及其影响因素的研究,也为合理应用木材、科学开展林木选育、改

引用格式: 朱江玲, 石岳, 方乐祺, 等. 中国主要树种木材物理力学属性的地理格局及其环境控制. 中国科学: 生命科学, 2015, 45: 56-67

Zhu J L, Shi Y, Fang L Q, et al. Patterns and determinants of wood physical properties across major tree species in China. SCIENTIA SINICA Vitae, 2015, 45: 56-67, doi: 10.1360/N052014-00211

进林业管理等提供必要的参考。

木材的物理力学属性主要包括密度、干缩系数、弹性、强度、硬度等。这些属性一方面因树木种类和生活型的不同而发生变化,例如,针叶树材通常较为疏松柔软,而阔叶树材则多为致密坚硬^[13,16];另一方面,由于木材物理力学属性与树木生长过程密切相关,故而也显著受到气候、土壤等立地环境的影响^[9,17]。因此,探讨木材物理力学属性的分布格局及其可能的驱动因素具有重要的意义。

截至目前,国外学者已对区域尺度上木材物理性质的分布、格局及控制因素进行了较多的研究^[10~12,18,19]。然而,这些研究大多仅关注木材密度这一属性,对于木材的干缩系数、弹性、强度等属性缺乏关注。由于木材的不同属性往往会共同影响植物的生长发育过程^[20~22],单纯对木材密度进行研究显然是不够的;并且这些研究大多集中于欧美国家,其物种组成与东亚地区有明显区别,因此难以反映中国木材物理力学属性的格局及其影响因素。在国内,学者们对国内常见或重要商用树木的木材物理力学属性展开了不少研究,积累了大量资料^[2,23~26],也对物理力学属性之间的相互关系进行了一些探讨^[27,28]。但这些研究仅关注于木材物理性质本身,缺乏对其影响因素的探讨。近来,尽管有少量研究对木材属性及其影响因素进行探讨,但缺乏对不同影响因子的

贡献及土壤因素作用的分析^[29]。

本研究利用大量积累的中国木材物理力学性质的研究资料,建立中国主要木材物理力学属性及影响因素综合数据库;在此基础上探讨中国主要树种木材力学性质的统计特征,构建不同木材物理力学属性之间的统计关系,分析树种生活型、气候和土壤因素对木材物理力学属性变化的影响。

1 材料与方法

1.1 木材物理力学属性数据库

基于覆盖科属多、分布均匀、缺失值少的原则,本研究收集《中国主要树种的木材物理力学性质》^[24]、《中国木材志》^[23]、《中国裸子植物木材质志》^[25]以及《中国主要人工林树种木材性质》^[26]等文献中的数据,建立“中国主要树种木材物理力学属性数据库”。该数据库基本涵盖了我国主要的树种(图 1),共计 417 种,隶属于 80 科、234 属。其中,松科(Pinaceae)、壳斗科(Fagaceae)、豆科(Fabaceae)、樟科(Lauraceae)以及杉科(Taxodiaceae)的物种数排列前 5 位,所占比例分别为 25.9%, 16.3%, 8.2%, 6.5%和 6.2%。数据库所选取的木材物理力学属性指标包括基本密度(basic density, BD)、气干密度(air-dried density, ADD)、径向干缩系数(radial shrinkage coefficient, RSC)、弦向干缩

图 1 中国主要木材物理力学属性样点分布图

系数(tangential shrinkage coefficient, TSC)、体积干缩系数(volume shrinkage coefficient, VSC)、抗弯强度(bending strength, MOR)、抗弯弹性模量(bending modulus of elasticity, MOE)、顺纹抗压强度(compression strength parallel to grain, CSG)、冲击韧性(resilience, RES)、端面硬度(hardness of transverse section, HES)、径面硬度(hardness of radial section, HRS)和弦面硬度(hardness of tangential section, HTS), 共计 12 项, 能够充分表征木材密度、干缩系数、弹性、强度、硬度等木材物理性质的主要方面. 各项指标的简单描述和定义见表 1.

此外, 基于《中国木本植物分布图集》^[30], 数据库收集了各树种相应的生活型数据. 本研究中, 树种生活型共分为 4 类, 分别为常绿阔叶、落叶阔叶、常绿针叶和落叶针叶.

1.2 气候和土壤数据

本研究所使用的气候指标主要为年均温和年降水, 气候数据来自于世界气候数据网站(<http://www.worldclim.org>), 其空间分辨率为 0.0083°(赤道附近约为 1 km²)^[31,32].

土壤指标包括土壤有机碳密度、土壤总氮密度及土壤 pH. 其中, 土壤有机碳密度数据来自 Yang 等人^[33], 土壤总氮密度数据引自 Yang 等人^[34], 土壤 pH 数据来自中国土壤图集^[35].

以上气候和土壤数据均通过 Cokriging 插值获得各木材采集地的环境因子指标. 基于以上木材物理属性指标、树种生活型以及环境因子指标, 建立中国木材物理性质及影响因素综合数据库.

1.3 数据分析

在 12 项木材物理力学属性指标中, 3 个硬度指标和冲击韧性数据均呈现对数正态分布(图 2). 为此, 在进行分析前对此 4 个指标进行对数变换. 文中若不作特殊说明, 所使用的值均为正态变换后的数据.

利用 Pearson 相关分析检验 12 项木材物理力学属性指标之间的相关性. 考虑到木材物理力学属性指标较多(12 项), 故通过主成分分析(principle component analysis, PCA)对数据进行降维处理, 然后选择主成分中贡献最大的物理力学属性指标作为代表性特征指标. 基于这些特征指标, 采取逐步回归对其余木材物理力学属性指标建立相应的预测方程.

进一步, 对选取的特征指标, 以树种生活型、气候和土壤因子为自变量, 采用一般线性模型(general linear model, GLM)分析各因子对木材物理力学属性指标变化的相对贡献率. 考虑到树种生活型、气候和土壤因子之前可能存在共线性, 故采用偏回归分析(partial regression)分离生活型、气候和土壤 3 类因子的相对贡献.

本研究所有统计分析均在 R package 3.0.2 中实

表 1 主要木材物理力学属性描述

木材物理属性	单位	定义
基本密度(BD)	g/cm ³	木材试样的烘干重量与其饱和水分时的体积之比, 即基本密度=全干木材重量/生材体积
气干密度(ADD)	g/cm ³	木材在气干后的重量与气干后的体积之比, 通常指木材的含水率在 12%时的密度. 气干密度=气干材重量/气干材体积
径向干缩系数(RSC)	%	木材沿树干半径方向或木射线方向的含水率每减少 1%时, 其体积缩减的百分率
弦向干缩系数(TSC)	%	木材沿着年轮方向的含水率每减少 1%时, 其体积缩减的百分率
体积干缩系数(VSC)	%	整块木材由湿材状态干燥到绝干状态时体积的干缩系数
抗弯强度(MOR)	MPa	木材承受逐渐施加弯曲荷载的最大能力, 用曲率半径的大小(R)来度量. $R=(3FL)/(2bh^2)$, 其中, F 为破坏载荷, L 为跨距, b 为宽度, h 为厚度
抗弯弹性模量(MOE)	GPa	木材受力弯曲时, 在比例极限内应力与应变之比. 它代表木材的弹性或刚度, 是木材在比例极限内抵抗弯曲变形的能力
顺纹抗压强度(CSG)	MPa	抗压强度指木材受到外压力时, 能抵抗外力压缩变形破坏的能力. 外部的压力与木材纤维方向平行时的抗压强度为顺纹抗压强度
冲击韧性(RES)	J/cm ²	木材受冲击载荷折断时, 木材单位面积吸收的能量. 它表示木材在冲击载荷作用下抵抗变形和断裂的能力
端面硬度(HES)	kgf/cm ²	木材局部抵抗硬物压入其表面的能力. 标准为将一个直径为 11.28 mm 的钢球压入待测木材横切面半球深度时需要的压力
径面硬度(HRS)	kgf/cm ²	木材局部抵抗硬物压入其表面的能力. 标准为将一个直径为 11.28 mm 的钢球压入待测木材径切面半球深度时需要的压力
弦面硬度(HTS)	kgf/cm ²	木材局部抵抗硬物压入其表面的能力. 标准为将一个直径为 11.28 mm 的钢球压入待测木材弦切面半球深度时需要的压力.

图2 木材物理力学属性 12 个指标的数据分布及相关关系

对角线上为每个指标的数据分布情况, 右上方显示指标间的相关系数, 左下方显示指标间的散点图。所有的相关关系均表现为极显著 ($P < 0.001$)。BD: 基本密度; ADD: 气干密度; RSC: 径向干缩系数; TSC: 弦向干缩系数; VSC: 体积干缩系数; MOR: 抗弯强度; MOE: 抗弯弹性模量; CSG: 顺纹抗压强度; RES: 冲击韧性; HES: 端面硬度; HRS: 径面硬度; HTS: 弦面硬度

现^[36]。其中, 主成分分析基于 FactoMineR 分析包^[37]。

2 结果与分析

2.1 木材物理力学属性的基本特征

总体上看, 木材物理力学属性的不同指标差异程度不一致: 木材硬度指标和韧性指标在不同树种间差异较大, 相差 13~20 倍, 而木材密度、干缩系数和强度指标的差异相对较小, 为 5 倍左右(表 2)。

为了解不同树种木材物理力学属性的差异, 本研究比较了木材各物理力学属性指标最大值和最小值排列前 5 的树种。结果显示, 各物理力学属性最大值前 5 位的树种均为阔叶植物。其中, 硬度和顺纹抗压强度最大值树种均为常绿阔叶植物(如荔枝(*Litchi chinensis*)、细子龙(*Amesiodendron chinense*)、竹叶青冈(*Cyclobalanopsis neglecta*)等); 冲击韧性最大值树种多为落叶阔叶植物(如旱柳(*Salix matsudana*)、青檀(*Pteroceltis tatarinowii*)、蚬木(*Excentrodendron*

表 2 木材各物理力学属性大小的统计值^{a)}

力学性质	样本数	均值	范围	标准差
基本密度	482	0.53	0.20~1.00	0.14
气干密度	585	0.62	0.24~1.13	0.17
径向干缩系数	572	0.17	0.06~0.32	0.04
弦向干缩系数	575	0.30	0.11~0.49	0.06
体积干缩系数	556	0.50	0.19~0.81	0.10
抗弯强度	538	91.57	29.40~183.10	24.99
抗弯弹性模量	465	11.08	4.50~21.10	2.71
顺纹抗压强度	574	46.17	16.00~87.30	12.39
冲击韧性	280	0.66	0.16~1.94	0.37
端面硬度	527	570.89	131.0~1650.0	288.13
径面硬度	462	444.32	88~1598	280.39
弦面硬度	463	460.89	96~1554	273.22

a) 冲击韧性、端面硬度、径面硬度、弦面硬度均为对数变换前的原始数据

tonkinense)等); 基本密度、干缩系数及其他强度指标的最大值树种多为常绿阔叶植物(如坡垒(*Hopea hainanensis*)、铁力木(*Mesua ferrea*)等), 而各物理力学属性最小值排列前 5 的树种, 除轻木(*Ochroma lagopus*)等少数物种外, 基本为落叶阔叶植物或常绿针叶植物(如槟榔青(*Spondias pinnata*)、川泡桐(*Paulownia fargesii*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、柳杉(*Cryptomeria japonica* var. *sinensis*)等)(网络版附表 1)。

进一步, 相关分析的结果显示, 各物理力学属性指标间均表现为极显著的正相关关系($P<0.001$, 图 2)。其中, 同属硬度指标的弦面硬度和径面硬度相关系数最高, 达 0.99; 在反映不同物理属性的指标中, 密度指标与硬度指标关系最好, 其相关系数均在 0.9 以上。相关性最差的指标为弦向干缩系数和端面硬度, 相关系数仅为 0.49。

2.2 木材物理力学属性指标之间的经验预测模型

对木材物理力学属性 12 个指标进行主成分分析, 发现第一、二、三主分量的累计贡献率达 84.2%(表 3), 足以反映木材物理力学属性的绝大部分信息。

从表 3 可以看出: 对于第一主分量, 木材密度、木材硬度、抗弯、抗压等各项指标的因子贡献程度都较高, 其中气干密度的贡献最高; 对于第二主分量, 仅有径向、弦向和体积干缩系数 3 个表征干缩系数的指标贡献较大, 其中弦向干缩系数的相对贡献最大; 对于第三主成分, 大部分指标的贡献均较低, 但表征

韧性的冲击韧性具有很高的贡献值。因此, 气干密度、弦向干缩系数和冲击韧性 3 个指标基本能够反映木材密度、干缩系数、弹性、强度、硬度等物理力学属性的信息。

据此, 以这 3 个指标(气干密度、弦向干缩系数和冲击韧性)为自变量, 采用逐步线性回归对其余 9 个木材物理力学属性指标建立经验模型(表 4)。结果显示, 经验模型均能较好的给出拟合结果: 对于基本密度、体积干缩系数、抗弯强度、顺纹抗压强度、端面硬度、径面硬度和弦面硬度, 经验模型的 R^2 均在 0.75 以上, 其中对于径面硬度的拟合优度可达到 0.94; 径向干缩系数和抗弯弹性模量的拟合程度虽然较低, 其 R^2 也分别达到了 0.54 和 0.61。

2.3 生活型和环境因素对木材物理力学属性的影响

根据生活型对气干密度、弦向干缩系数和冲击韧性进行单因子方差分析的结果显示, 不同生活型树种存在显著的差异。对于气干密度, 常绿阔叶树种最高, 而常绿针叶和落叶针叶树种最低; 对于弦向干缩系数, 常绿阔叶树种较高, 落叶阔叶和常绿针叶树较低; 对于冲击韧性, 落叶阔叶和常绿阔叶树种较高, 而落叶针叶和常绿针叶均较低(网络版附图 1)。

对这 3 个基本属性指标与 2 个气候因子和 3 个土壤因子进行相关分析, 结果表明(网络版附表 2), 气干密度与气候因子均表现出极显著的正相关($P<0.01$), 与土壤 pH 值表现为显著的负相关($P<0.05$), 而与土

表 3 对木材物理力学属性 12 个指标进行主成分分析的结果^{a)}

相对贡献(%)	属性	第一主分量	第二主分量	第三主分量	第四主分量	第五主分量
各指标对主分量的 相对贡献	基本密度	9.01	0.10	10.84	0.19	0.42
	气干密度	10.46	0.36	2.93	0.53	0.17
	径向干缩系数	7.09	13.18	0.01	0.01	68.00
	弦向干缩系数	5.83	27.94	0.10	6.17	28.79
	体积干缩系数	7.20	25.99	0.04	4.94	0.00
	抗弯强度	9.96	0.50	0.87	12.68	0.15
	抗弯弹性模量	7.31	0.75	13.76	42.19	2.00
	顺纹抗压强度	9.56	0.26	3.47	10.24	0.28
	冲击韧性	5.16	2.04	62.94	11.65	0.00
	端面硬度	9.62	7.22	4.83	2.16	0.09
	径面硬度	9.40	11.19	0.12	4.39	0.03
	弦面硬度	9.41	10.47	0.09	4.84	0.06
主分量的方差贡献率		68.27	10.15	5.78	4.33	2.98

a) 给出每个指标对前 5 个主分量的相对贡献, 以及每个主分量的方差贡献率

表 4 以气干密度(ADD)、弦向干缩系数(TSC)和冲击韧性(RES)为解释变量, 通过逐步线性回归建立的木材物理力学属性指标经验预测模型

物理属性指标	经验预测模型	R^2	解释变量	P 值
基本密度	0.841×ADD	93.2%	ADD	0.000***
			TSC	—
			RES	—
径向干缩系数	0.025+0.119×ADD+0.234×TSC	54.2%	ADD	0.000***
			TSC	0.000***
			RES	—
体积干缩系数	0.049+0.148×ADD+1.172×TSC	87.4%	ADD	0.000***
			TSC	0.000***
			RES	—
抗弯强度	14.76+119.97×ADD+27.15×TSC+14.14×RES	84.1%	ADD	0.000***
			TSC	0.053 [†]
			RES	0.003**
抗弯弹性模量	1.495+9.627×ADD+12.372×TSC	61.1%	ADD	0.000***
			TSC	0.000***
			RES	—
顺纹抗压强度	0.276+71.97×ADD-6.199×RES	78.6%	ADD	0.000***
			TSC	—
			RES	0.017*
端面硬度	2.050+1.279×ADD-0.432×TSC	85.4%	ADD	0.000***
			TSC	0.000***
			RES	—
径面硬度	1.839+1.535×ADD-0.582×TSC+0.0860×RES	94.0%	ADD	0.000***
			TSC	0.000***
			RES	0.003**
弦面硬度	1.865+1.515×ADD-0.594×TSC+0.061×RES	92.5%	ADD	0.000***
			TSC	0.000***
			RES	0.051 [†]

a) 显示每个经验模型的 R^2 、进入模型的变量及其显著性水平, 未进入模型变量的 P 值以“—”表示. ***: $P<0.001$; **: $P<0.01$; *: $P<0.05$; [†]: $P<0.1$

壤总氮密度则表现为弱的负相关($P<0.1$); 弦向干缩系数与年均温、年降水、土壤总氮密度以及土壤 pH 均无显著相关关系, 但与土壤有机碳密度表现为弱的正相关($P<0.1$); 冲击韧性与年均温和土壤 pH 有显著的正相关关系($P<0.05$), 与土壤总氮密度呈现弱的负相关($P<0.1$), 但与其余因子相关关系不显著。

进一步, 以树种生活型、气候和土壤因子为解释变量, 分别对这 3 个基本属性构建一般线性模型。结果表明, 3 个模型均显著($P<0.001$), 但解释率有着较大区别: 对于气干密度和冲击韧性的解释率相对较高, 解释率分别为 23.0%和 30.6%, 但对于弦向干缩系数仅解释了 7.2%的变异(表 5)。从每个影响因素的贡献率可以看出, 对于这 3 个基本力学属性, 树种生活型均极显著且解释率最高($P<0.001$), 分别解释了 21.11%, 4.06%和 25.36%的变异(表 5)。同时, 在消除生活型改变带来的影响后, 环境因子对于不同物理

力学属性指标变化的影响差异较大: 对于气干密度, 年均温和土壤 pH 的贡献(解释率)分别为 1.34%和 0.46%; 对于弦向干缩系数, 年均温和总氮密度的贡献(解释率)分别为 2.06%和 0.60%; 而对于冲击韧性, 年降水、年均温和土壤 pH 值的贡献(解释率)分别为 1.62%, 2.00%和 1.49%。

考虑到树种生活型、气候和土壤因子之间可能存在的共线性, 因此利用偏回归分析来分离 3 者之间的贡献。从偏回归分析的结果可以看出(图 3), 对这 3 个基本木材力学属性(气干密度、弦向干缩系数和冲击韧性), 树种生活型的独立解释率都是最高的, 分别为 13.04%, 4.71%和 20.66%, 而气候因子和土壤因子的独立解释率均不超过 2.30%。同时, 对于气干密度和冲击韧性的大尺度格局, 气候和土壤因子的独立解释率均小于它们与生活型的共同解释率, 这表明气候和土壤因子的作用绝大部分为生活型所掩盖。

表 5 以树种生活型、气候因子和土壤因子为解释变量, 对气干密度(ADD)、弦向干缩系数(TSC)和冲击韧性(RES)的 GLM 分析^{a)}

因变量	解释变量	df	均方	F 值	P 值	解释率(%)
气干密度	树种生活型	3	1.13	52.52	<0.001***	21.11
	年平均降水量	1	0.01	0.30	0.587	0.04
	年平均气温	1	0.21	10.00	0.002**	1.34
	土壤有机碳密度	1	0.00	0.01	0.908	0.00
	土壤总氮密度	1	0.00	0.02	0.879	0.00
	土壤 pH	1	0.07	3.45	0.068†	0.46
	残差	575	0.02			77.04
弦向干缩系数	树种生活型	3	0.09	8.23	<0.001***	4.06
	年平均降水量	1	0.04	12.50	<0.001***	2.06
	年平均气温	1	0.00	0.07	0.798	0.01
	土壤有机碳密度	1	0.01	1.86	0.174	0.31
	土壤总氮密度	1	0.01	3.64	0.057†	0.60
	土壤 pH	1	0.00	1.29	0.256	0.21
	残差	564	2.03			92.76
冲击韧性	树种生活型	3	1.22	32.77	<0.001***	25.36
	年平均降水量	1	0.23	6.29	0.013**	1.62
	年平均气温	1	0.29	7.73	0.006**	2.00
	土壤有机碳密度	1	0.02	0.47	0.494	0.12
	土壤总氮密度	1	0.00	0.00	0.991	0.00
	土壤 pH	1	0.21	5.76	0.017**	1.49
	残差	564	0.04			69.41

a) ***: $P<0.001$; **: $P<0.01$; *: $P<0.05$; †: $P<0.1$

图3 气干密度(ADD)、弦向干缩系数(TSC)和冲击韧性(RES)的偏回归分析

字母表示 $P < 0.05$ 下显著性水平. 因冲击韧性(RES)进行对数变换后为负值, 绘图时使用的为原始数据

3 讨论

3.1 中国主要树种木材物理力学属性的特征及其实践意义

根据对中国主要树种木材物理力学属性的比较可以看出, 阔叶植物木材的各项主要指标均比较高, 说明其木材具有较广泛的应用途径, 可满足多种实际需求; 而常绿针叶和落叶针叶则总体较差, 木材可能更适合某些特定需求. 这与中国现有木材来源及利用现状是一致的, 如工业中常用的橡木、水曲柳、栎木、桦木等均为阔叶植物^[2].

但从对木材物理力学属性的 3 个特征性指标(气干密度、弦向干缩系数和冲击韧性)的方差分析可以看出, 生活型的作用在不同的指标间并不一致. 例如, 对于冲击韧性, 阔叶树种要显著高于针叶树种; 而对于干缩形变, 落叶阔叶树种则同针叶树种没有明显的差别. 由于选用木材时并不能单纯以密度大、干缩系数低、弹性好来决定其用途, 因此从本研究的结果可以看出, 当在木材用途上对于某一指标有特殊要求而对其他指标要求不高的时候, 可以选择另一些替代性的树种. 例如, 在家具制造上通常要使用干缩形变较小的木材, 但对韧性的要求不高, 在实际应用中就可以选择干缩形变较小的常绿针叶树种代替阔叶落叶树种.

3.2 木材物理力学属性预测模型的改进

木材物理力学性质包括密度、干缩系数、弹性、强度、硬度等多个方面, 是用以评价木材品质、决定木材用途的最主要的依据和参考^[3,15]. 但由于木材物

理力学性质指标繁多, 通过少数的指标来对其他指标进行评估就显得十分必要.

通常认为, 木材密度是决定木材强度、弹性和硬度的物质基础, 同时密度又是最容易测量的指标, 因此前人多以木材密度和其他物理指标的相关关系来进行预测. 例如, 对全球尺度上进行的研究发现, 木材密度与弹性模量和挠折模量(modulus of rupture)之间表现为显著的正相关, 其关系可用幂指数关系拟合^[38]. 赵春瑞和董玉库^[27]分析中国木材物理属性后则认为, 密度与抗拉、抗压、抗弯等指标之间存在着很高的正相关性, 可以通过其线性关系来拟合, 而密度与冲击韧性的关系则可用幂指数拟合. 通过比对这些经验模型可以看出, 对于干缩系数、抗弯弹性模量等部分指标, 单纯利用木材密度作为预测变量显然有所不足.

从本研究主成分分析的结果可以看出, 第一主分量解释率为 68.3%, 第二和第三主分量则涵盖了 15.9% 的物理属性信息. 显然, 单纯考虑第一主分量并不全面. 模型拟合的结果也显示, 对于除基本密度外的其他物理力学性质指标, 使用气干密度、弦向干缩系数和冲击韧性这 3 个指标的经验模型的拟合优度都要较传统的线性模型或幂指数模型有不同程度的提高, 特别是对干缩系数和抗弯弹性模量预测的提高非常明显(网络版附表 3). 这表明, 传统上以木材密度进行判别木材用途^[39-41]或预测其他指标的方法, 在其可靠性上是值得商榷的. 尽管密度较其他指标更容易测量, 但如果要充分反映木材的物理力学属性信息, 除木材密度之外, 还应考虑干缩系数等指标. 这一结果也暗示, 尽管木材物理力学性质的各项

指标之间均存在显著的相关关系,但实际上不同的指标之间存在一定的独立性,并不完全受其他指标的影响。

3.3 中国木材物理力学属性地理格局的控制因素

木材的形成是木本植物自身生长发育的结果^[2,3,13]。因此,木材的各种属性受到树木本身的遗传特征制约,与其进化地位密切相关^[9,12]。本研究分析表明,无论是对于气干密度、弦向干缩系数和冲击韧性,生活型对其大尺度格局的影响都是最大的。考虑到生活型能够综合反映植物的进化过程^[42],这一结果意味着进化过程是导致中国树木物理属性大尺度变化的主要原因。

另一方面,由于树木的生长发育离不开外在环境条件的影响,因此可以预测,木材的物理力学属性也必然受到气候、土壤等各种环境因素的影响^[17,18,43]。GLM 分析表明,在排除生活型的作用后,中国木材的物理力学属性与气候因子的关系是不一致的,木材的密度受温度的作用更大,干缩形变受降水的影响更大,而冲击韧性则同时受到温度和降水的影响;土壤因子对木材物理力学属性的作用均比较微弱。

关于气候对木材物理力学属性,特别对木材密度的影响,前人有不少研究,但结论多有不同。对于墨西哥地区树木的研究表明,木材密度与降水为负相关关系^[44];对亚马逊森林的研究则表明,在降水量小于 3000 mm/年的地区,木材密度与降水之间表现出显著的正相关^[45];而对美洲地区木材密度的研究则认为,木材密度与温度表现出正相关关系,而与降水的关系则并不显著^[46];对于全球 4667 种种子植物木材密度的研究也显示,温度而不是降水对木材物理力学属性作用更强^[9];而 Zhang 等人^[29]的研究则认为,在消除进化作用影响后,木材物理力学属性与温度和降水都表现出明显的正相关关系,但降水的作用更强烈。

结合本研究的偏回归分析可以看出,对于气干密度和冲击韧性而言,气候因子与树种生活型共同对木材物理力学属性的解释率要高于气候因子独立的作用。这意味着气候因子对于木材物理力学属性格局的作用首先是通过影响物种分布实现的。以往的研究表明,不同区域控制物种分布的原因并不相同,例如,北美地区的植物分布受到环境能量的影响^[47],东亚地区木本植物的分布则受到了冬季最低

温的限制^[48],而亚马逊等热带雨林的物种分布则更加随机^[49]。因此,以往研究中气候因子与木材物理力学属性关系的不同,可能是由气候对物种分布影响的机制不同而导致。本研究与 Zhang 等人^[29]尽管都关注于中国木材物理力学属性,但在温度和降水作用对分布格局的贡献方面存在差异。Zhang 等人^[29]认为对于木材密度,降水的作用更强,而本研究则支持温度比降水对木材密度的影响更强的结论。

环境因子除了通过影响物种分布而影响到木材物理力学属性格局外,还可能通过影响植物生长发育的生理过程而对木材的物理力学属性产生影响。例如,对于阿拉斯加白杉(*Abies alba*)和挪威云杉(*Picea abies*)的研究都表明,气温升高会通过引起水分亏缺等因素造成木材生长缓慢、密度增加^[50]。土壤因子则可能通过肥力影响树木生长及其化学组成,导致木材物理属性发生改变^[19,51]。但本研究的 GLM 分析和偏回归分析都显示,气候和土壤因子对于木材物理力学属性的大尺度格局的贡献都非常小。这意味着环境因子对生理过程的影响并不是导致木材属性格局的主要原因,气候和土壤对木材物理力学属性指标的作用主要是通过影响物种分布而实现的。

GLM 分析和偏回归分析显示,树种生活型与环境因子对于气干密度、弦向干缩系数和冲击韧性 3 个指标格局的贡献各不一致。这一结果也再次为前面提出的“木材物理力学属性不同指标之间存在一定的独立性”的观点提供依据。

本研究模型结果表明,各因子的解释率较低,基本低于 50%。究其原因,主要有以下两个方面:(i) 本研究范围为全国,空间尺度较大。而所构建的数据库主要来源于已有的文献,而这些文献除了提供地理信息外,并无较为准确的环境数据(气候、土壤等),所需数据均通过 Cokriging 算法插值得到,数据的空间分辨率较低;(ii) 尽管生活型可以作为树木遗传进化的综合指标,却不能全面反映所有的遗传进化信息。因此,后续研究需要对模型进一步改进。

4 结论

本研究通过建立中国木材物理力学属性及影响因素综合数据库,对自然状态下我国主要树种木材力学性质的分布格局及其驱动因素进行探讨,得到如下初步结论:(i) 不同木材物理属性指标之间存

在一定的独立性. 选择气干密度、弦向干缩系数和冲击韧性作为评估木材物理力学属性的基础指标, 比单一密度指标更准确, 解释率更高. (ii) 在生活型、气候、土壤因素中, 生活型是中国主要木材物理力学

属性大尺度格局的主要控制因素, 气候因子次之, 土壤因子基本可忽略, 并且气候和土壤因子的作用被生活型所掩盖, 这意味着气候因子对于木材物理力学属性格局的作用首先是通过影响物种分布实现的.

参考文献

- Hickey M, King C. The Cambridge Illustrated Glossary of Botanical Terms. Cambridge: Cambridge University Press, 2000
- 成俊卿. 木材学. 北京: 中国林业出版社, 1985
- Wu R. Microstructural study of sanded and polished wood by replication. *Wood Sci Technol*, 1998, 32: 247–260
- Roderick M L, Berry S L. Linking wood density with tree growth and environment: a theoretical analysis based on the motion of water. *New Phytol*, 2001, 149: 473–485
- Ter Steege H, Hammond D S. Character convergence, diversity, and disturbance in tropical rain forest in Guyana. *Ecology*, 2001, 82: 3197–3212
- Larjavaara M, Muller-Landau H C. Rethinking the value of high wood density. *Funct Ecol*, 2010, 24: 701–705
- Sterck F J, Bongers F, Newbery D M. Tree architecture in a Bornean lowland rain forest: intraspecific and interspecific patterns. In: Eduard Linsenmair K, Davis A J, Fiala B, et al, eds. *Tropical Forest Canopies: Ecology and Management*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2001. 279–292
- Van Gelder H, Poorter L, Sterck F. Wood mechanics, allometry, and life-history variation in a tropical rain forest tree community. *New Phytol*, 2006, 171: 367–378
- Swenson N G, Enquist B J. Ecological and evolutionary determinants of a key plant functional trait: wood density and its community-wide variation across latitude and elevation. *Am J Bot*, 2007, 94: 451–459
- Chao K J, Phillips O L, Gloor E, et al. Growth and wood density predict tree mortality in Amazon forests. *J Ecol*, 2008, 96: 281–292
- Baker T R, Phillips O L, Malhi Y, et al. Variation in wood density determines spatial patterns in Amazonian forest biomass. *Global Change Biol*, 2004, 10: 545–562
- Chave J, Muller-Landau H C, Baker T R, et al. Regional and phylogenetic variation of wood density across 2456 neotropical tree species. *Ecol Appl*, 2006, 16: 2356–2367
- Bergman R, Cai Z, Carll C G, et al. *Wood Handbook: Wood As an Engineering Material*. Madison: United States Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010
- FAO. *FAO Yearbook of Forest Products 2011*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2013
- Bowyer J L, Shmulsky R, Haygreen J G. *Forest Products and Wood Science: An Introduction*. Ames: Blackwell Publishing, 2007
- Carlquist S. *Comparative Wood Anatomy: Systematic, Ecological, and Evolutionary Aspects of Dicotyledon Wood*. New York: Springer, 2001
- Quesada C A, Phillips O L, Schwarz M, et al. Basin-wide variations in Amazon forest structure and function are mediated by both soils and climate. *Biogeosciences*, 2012, 9: 2203–2246
- Briffa K, Schweingruber F, Jones P, et al. Reduced sensitivity of recent tree-growth to temperature at high northern latitudes. *Nature*, 1998, 391: 678–682
- Muller-Landau H C. Interspecific and inter-site variation in wood specific gravity of tropical trees. *Biotropica*, 2004, 36: 20–32
- Chave J, Coomes D, Jansen S, et al. Towards a worldwide wood economics spectrum. *Ecol Lett*, 2009, 12: 351–366
- Zanne A E, Westoby M, Falster D S, et al. Angiosperm wood structure: global patterns in vessel anatomy and their relation to wood density and potential conductivity. *Am J Bot*, 2010, 97: 207–215
- Poorter L, McDonald I, Alarcón A, et al. The importance of wood traits and hydraulic conductance for the performance and life history strategies of 42 rainforest tree species. *New Phytol*, 2010, 185: 481–492
- 成俊卿, 杨宗驹, 刘鹏. 中国木材志. 北京: 中国林业出版社, 1992
- 中国林业科学研究院木材工业研究所. 中国主要树种的木材物理力学性质. 北京: 中国林业出版社, 1982
- 姜笑梅, 程业明, 殷亚方. 中国裸子植物木材志. 北京: 科学出版社, 2010
- 鲍甫成, 江泽慧. 中国主要人工林树种木材性质. 北京: 中国林业出版社, 1998
- 赵春瑞, 董玉库. 木材物理力学性质的综合分析(ii)——相关分析. 东北林业大学学报, 1989, 17: 45–54
- 董玉库, 赵春瑞. 木材物理力学性质的综合分析(i)——主成分分析. 东北林业大学学报, 1988, 16: 105–118
- Zhang S B, Slik J, Zhang J L, et al. Spatial patterns of wood traits in China are controlled by phylogeny and the environment. *Global Ecol Biogeogr*, 2011, 20: 241–250

- 30 方精云, 王志恒, 唐志尧. 中国木本植物分布图集. 北京: 高等教育出版社, 2009
- 31 Hijmans R J, Cameron S E, Parra J L, et al. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *Int J Climatol*, 2005, 25: 1965–1978
- 32 Ma W H, He J S, Yang Y H, et al. Environmental factors covary with plant diversity-productivity relationships among Chinese grassland sites. *Global Ecol and Biogeogr*, 2010, 19: 233–243
- 33 Yang Y, Mohammad A, Feng J, et al. Storage, patterns and environmental controls of soil organic carbon in China. *Biogeochemistry*, 2007, 84: 131–141
- 34 Yang Y, Ma W, Mohammad A, et al. Storage, patterns and controls of soil nitrogen in China. *Pedosphere*, 2007, 17: 776–785
- 35 熊毅, 李锦. 中国土壤图集. 北京: 科学出版社, 1986
- 36 R Development Core Team. R: a language and environment for statistical computing. R foundation for statistical computing. Vienna: R Development Core Team, 2014
- 37 Lê S, Josse J, Husson F. Factominer: an R package for multivariate analysis. *J Stat Software*, 2008, 25: 1–18
- 38 Armstrong J, Skaar C. The effect of specific gravity on several mechanical properties of some world woods. *Wood Sci Technol*, 1984, 18: 137–146
- 39 陈瑞, 童方平, 李贵, 等. 戴菊栲木材材性、化学组分及热值株内纵向变异模式研究. *中国农学通报*, 2013, 29: 24–28
- 40 季孔庶, 邱进清, 陈亚斌, 等. 马尾松纸浆材无性系选育和多地点试种. *林业科学*, 2004, 40: 64–69
- 41 管宁, 刘昭息, 潘志刚. 不同种源火炬松和湿地松木材基本密度和管胞长度的变异. *林业科学研究*, 1993, 6: 235–241
- 42 冯纓, 徐海量, 周斌. 塔里木河流域下游植物区系及生态学研究. *西北植物学报*, 2005, 25: 2285–2288
- 43 Beets P, Gilchrist K, Jeffreys M. Wood density of radiata pine: effect of nitrogen supply. *Forest Ecol Manag*, 2001, 145: 173–180
- 44 Barajas-Morales J. Wood specific gravity in species from two tropical forests in Mexico. *Iawa Bull*, 1987, 8: 143–148
- 45 Patiño S, Lloyd J, Paiva R, et al. Branch xylem density variations across the Amazon basin. *Biogeosciences*, 2009, 6: 545–568
- 46 Wiemann M C, Williamson G B. Geographic variation in wood specific gravity: effects of latitude, temperature, and precipitation. *Wood Fiber Sci*, 2002, 34: 96–107
- 47 Currie D J. Energy and large-scale patterns of animal-and plant-species richness. *Am Nat*, 1991, 137: 27–49
- 48 Wang Z, Fang J, Tang Z, et al. Patterns, determinants and models of woody plant diversity in China. *Proc R Soc B-Biol Sci*, 2011, 278: 2122–2132
- 49 Chave J. Neutral theory and community ecology. *Ecol Lett*, 2004, 7: 241–253
- 50 Barber V A, Juday G P, Finney B P. Reduced growth of Alaskan white spruce in the twentieth century from temperature-induced drought stress. *Nature*, 2000, 405: 668–673
- 51 Novaes E, Kirst M, Chiang V, et al. Lignin and biomass: a negative correlation for wood formation and lignin content in trees. *Plant Physiol*, 2010, 154: 555–561

Patterns and Determinants of Wood Physical Properties Across Major Tree Species in China

ZHU JiangLing¹, SHI Yue², FANG LeQi³, LIU XingE⁴ & JI ChengJun¹

1 College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China;

2 Institute of Botany, Chinese Academic of Sciences, Beijing 100093, China;

3 School of Physics and Technology, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

4 International Center for Bamboo and Rattan, State Forestry Administration of China, Beijing 100102, China

The physical properties of wood affect the growth and development of trees, and also act as the main criteria when determining wood usage. Our understanding on patterns and determinants of wood physical properties could provide benefits for forestry management and also provide bases for wood application and forest tree breeding. However, current studies regarding wood properties mainly focus on wood density and usually ignore other wood physical indexes. In this study, we established a comprehensive database of wood physical properties across major tree species in China. Based on this database, we explored spatial patterns and driving factors of wood properties across major tree species in China. Our results showed that compared with wood density, air-dried density, tangential shrinkage coefficient and resilience provided more accuracy and higher explanation power when used as the evaluation index of wood physical properties; among the life form, climatic and edaphic variables, life form is the dominant factor shaping spatial patterns of wood physical, climatic factors the next, and edaphic factors have the least effects, suggesting that the effects of climatic factors on spatial variations of wood properties is indirectly induced by its effects on species distribution.

wood density, shrinkage coefficient, resilience, geographic pattern, environmental factors

doi: 10.1360/N052014-00211