

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2021.005.006

不同种源杉木木材特性的比较研究

颜 耀^{1,2,3}, 李秉钧^{1,2,3}, 何宗明^{1,2,3}, 刘雨晖⁴,
李 明^{1,2,3}, 俞新妥^{1,2,3}, 马祥庆^{1,2,3*}

(1. 福建农林大学林学院, 福建 福州 350002; 2. 福建省杉木种质创新工程研究中心, 福建 福州 350002; 3. 国家林业和草原局杉木工程技术研究中心, 福建 福州 350002; 4. 福建农林大学莘口教学林场, 福建 三明 365002)

摘要: [目的] 比较不同种源杉木人工林木材特性的差异, 分析不同种源杉木材性的地理分布规律, 筛选材性较优的杉木种源。[方法] 选择 1958 年营造的全国第一片杉木种源试验林, 进行不同种源杉木的生长调查, 取样测定不同种源杉木木材密度、管胞形态、干缩性、湿胀性、顺纹抗剪强度、顺纹抗压强度、抗弯弹性模量、抗弯强度、冲击韧性、硬度等指标, 比较不同种源杉木木材材性差异, 采用聚类分析和主成分分析方法, 对不同种源杉木木材特性进行综合评价。[结果] 结果表明, 9 种不同种源杉木的木材特性存在显著差异 ($P < 0.05$), 木材干缩性和湿胀性有随纬度增加而增大的趋势, 但其他材性指标无明显的地理变异规律。安徽休宁种源木材密度显著高于其他种源 ($P < 0.05$), 管胞长宽比大小排序为: 广东郁南 > 浙江金华 > 福建南平 > 四川彭县 > 四川庐山 > 湖北竹溪 > 湖南会同 > 安徽休宁 > 贵州剑河。安徽休宁种源的差异干缩最小, 贵州剑河种源的体积干缩系数最小。福建南平种源木材抗弯弹性模量和抗弯强度最高, 安徽休宁种源木材冲击韧性和顺纹抗剪强度最高, 广东郁南种源木材顺纹抗压强度最高, 四川庐山种源木材硬度最高。不同材性指标间存在显著相关性, 木材密度与部分力学性质显著相关。根据不同种源杉木材性的差异, 将 9 种种源杉木分为 3 类, 福建南平、广东郁南、四川庐山和安徽休宁种源归为一类, 四川彭县、浙江金华、湖北竹溪和湖南会同种源归为一类, 贵州剑河种源归为一类。综合不同材性指标对 9 种种源杉木材性的综合评价排序为安徽休宁 > 四川庐山 > 福建南平 > 广东郁南 > 四川彭县 > 浙江金华 > 湖北竹溪 > 湖南会同 > 贵州剑河。[结论] 地理种源在一定程度上对杉木木材材性有重要影响。

关键词: 杉木; 种源; 材性; 管胞; 力学性质

中图分类号: S791.27

文献标志码: A

文章编号: 1001-1498(2021)05-0049-09

杉木 [*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.] 广泛分布于我国南方 17 个省区, 具有生长快、材质优、产量高等特点, 是我国人工林面积最大的造林树种, 在林业生产中占重要地位^[1]。不同种源杉木在长期适应不同气候环境条件的过程中形成了对环境的不同要求, 产生了不同的杉木地理类型^[2-4]。为比较不同种源杉木生长和材性差异, 俞新妥 1958 年在国内率先开展了杉木种源试验, 从南方

各省收集了 9 个不同种源杉木种子, 营造了不同种源的杉木林, 取得了一些研究成果^[5-7]。并在 1979 年对 23 年生不同种源杉木的生长和材性进行了调查, 发现不同种源杉木木材材性存在显著差异^[7], 但由于当时测定时杉木的年龄仅 23 年, 未能揭示种源对杉木材性的长期影响规律。

长期以来不同学者对杉木材性进行了大量研究, 取得了一定研究成果^[8-10]。施季森等^[11]发现杉

收稿日期: 2020-11-05 修回日期: 2021-02-20

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“不同地理类型杉木功能性状的适应性进化与资源配置权衡”(31971674); 福建省科技重大专项“特色树种人工林分质量精准提升技术研发与应用”(2018NZ0001-1); 福建农林大学科技创新专项基金项目(CXZX2019038G)

* 通讯作者: 马祥庆, 博士, 教授。主要研究方向: 森林培育。E-mail: lxymxq@126.com

木生长与材性性状在遗传上可能相互独立。孙成志等^[12]对12个杉木种源的研究发现南亚和北亚热带种源材性优于中亚热带种源。王传贵等^[13]对较小林龄的33种杉木种源测定发现不同种源杉木材性存在差异,同一种源不同生长点间的材性也存在差异,且不同种源杉木木材的主要物理性质随生长地纬度的增加呈渐增趋势。高建亮等^[14]发现30年生杉木萌生林材性优于实生林。韦如萍等^[15]发现广东乐昌种源杉木木材基本密度随年龄增大而增加,而管胞长宽比在不同年龄间无显著差异。李魁鹏等^[2]发现20年生广西融水红心杉木单株材积与基本密度的相关性不显著。可见,目前有关不同种源杉木材性方面的研究相对较少,以单一种源、无性系和年龄较小的木材材性研究居多^[16-18],未能揭示种源对杉木材性的长期影响。

鉴于此,本研究以1958年营造的61年生全国第一片杉木种源试验林为研究对象,通过对不同种源杉木林分调查,选择标准木取样测定不同种源杉木木材密度、管胞形态、干缩性、湿胀性、抗弯强度、硬度、顺纹抗压强度、抗弯弹性模量、冲击韧性、顺纹抗剪强度等指标,比较不同种源杉木木材材性差异,采用聚类分析和主成分分析方法对不

同种源杉木木材特性进行综合评价,为揭示地理种源对杉木材性的长期影响规律和筛选材性优良种源提供科学依据。

1 试验地概况

试验地位于福建省三明市莘口教学林场渡头坪(117°30'E、26°11'N),属亚热带季风气候,土壤为山地红壤,年平均气温19.5℃,年平均降水量1700mm,海拔250~300m,坡度20~25°。1956年从南方各省收集不同种源的杉木种子,1957年春在福州魁岐苗圃育苗,1957年10月对造林地劈杂炼山,按株行距1m×1.3m进行块状整地(40cm×40cm×30cm),1958年春造林。采用随机区组设计,每个种源面积225~530m²不等。幼林每年抚育1~2次,1973年进行一次抚育间伐,1979年冬部分林分被盗砍,1980年在相应部位补植同一种源苗木。试验林分基本情况见表1,杉木产区划分参考《杉木栽培学》^[19]。林下植被主要有乌毛蕨(*Blechnum orientale* L.)、地葱(*Melastoma dodecandrum* Lour.)、芒萁(*Dicranopteris dichotoma* (Thunb.) Berhn.)等。

表1 不同种源杉木试验林概况

Table 1 Conditions of Chinese fir provenance test plantation

种源 Provenances	产区 Product area	面积 Area/m ²	株数 Quantity/tree	平均胸径 Average DBH/cm	平均树高 Average height/m	平均冠幅 Average crown width/m
安徽休宁 Xiuning, Anhui	北带 Northern zone	268.16	33	19.94	17.24	3.38
贵州剑河 Jianhe, Guizhou	中带 Medial zone	225.41	36	18.72	17.16	2.93
四川庐山 Lushan, Sichuan	中带 Medial zone	225.77	40	19.26	17.22	3.35
四川彭县 Pengxian, Sichuan	中带 Medial zone	354.8	38	17.48	17.53	3.77
浙江金华 Jinhua, Zhejiang	中带 Medial zone	282.86	40	19.59	18.71	3.57
湖北竹溪 Zhuxi, Hubei	北带 Northern zone	257.72	16	21.88	19.13	3.73
湖南会同 Huitong, Hunan	中带 Medial zone	265.72	25	20.62	18.84	3.37
福建南平 Nanping, Fujian	中带 Medial zone	268.64	30	21.83	18.52	2.93
广东郁南 Yunan, Guangdong	南带 Southern zone	297.19	24	19.98	17.03	3.53

2 研究方法

2.1 外业调查方法

2018年1月,对不同种源杉木林进行每木检尺,调查胸径、树高和冠幅,每个种源选择3株标准木,整株伐倒。截取树高3.6~5.6m处木段,在当地木材加工厂每个木段沿长度方向取端面25mm×

25mm方条(无树皮)5~15根,取端面55mm×55mm方条(无树皮)3~5根。将加工好的方条捆好,做好标记,运回实验室测定。

2.2 材性测定方法

外业取回的杉木木材样品自然风干后,送福建省林业科学研究院进行木材材性测定。根据国家标

准 GB/T 1933—2009《木材密度测定方法》、GB/T 1932—2009《木材干缩性测定方法》、GB/T 1934.1—2009《木材湿胀性测定方法》、GB/T 1936.1—2009《木材抗弯强度试验方法》、GB/T 1941—2009《木材硬度试验方法》、GB/T 1935—2009《木材顺纹抗压强度试验方法》、GB/T 1936.2—2009《木材抗弯弹性模量测定方法》、GB/T 1940—2009《木材冲击韧性试验方法》、GB 1937—91《木材顺纹抗剪强度试验方法》进行木材密度、干缩性、湿胀性、抗弯强度、硬度、顺纹抗压强度、抗弯弹性模量、冲击韧性、顺纹抗剪强度的测定。木材管胞形态测定采用硝酸-氯酸钾法^[20]离析,用1%番红染色液染色,管胞宽度通过生物显微镜和目镜测微尺测量,管胞长度采用23J台式投影仪和木制滚轮尺测量。根据《木材的主要物理力学性质分级表》^[21]对木材主要物理力学性质进行分级。

2.3 材性综合评价方法

对试验测定的数据进行标准化处理后,根据各因子间相关性,对因子进行降维,得到主成分因子(F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 …),以及对应的相对贡献率(δ_1 、 δ_2 、 δ_3 、 δ_4 …),根据因子得分和综合得分公式^[22]分别计算各因子得分(F_p)和综合得分(Y):

$$F_p = \mu_{p1}X_1 + \mu_{p2}X_2 + \mu_{p3}X_3 \cdots + \mu_{pm}X_m \quad (1)$$

$$Y = \delta_1F_1 + \delta_2F_2 + \delta_3F_3 \cdots + \delta_pF_p \quad (2)$$

式中, μ_{p1} 、 μ_{p2} 、 μ_{p3} … μ_{pm} 表示第 p 个主成分因子的 m 个标准化的原始变量, X_1 、 X_2 、 X_3 … X_m 表示第 P 个主成分因子的 m 个标准化的原始变量对应的成份得分系数。

根据上述综合评价方法,对不同种源杉木的木材气干密度、全干密度、管胞长度、管胞宽度、管胞长宽比、体积干缩系数、气干体积干缩率、气干体积湿胀率、吸水体积湿胀率、差异干缩、抗弯弹性模量、冲击韧性、抗弯强度、顺纹抗剪强度、顺纹抗压强度、端面硬度、弦面硬度、径面硬度等18项指标进行综合评价,依据综合评价得分对不同种源杉木的木材材性进行排序。

2.4 数据统计方法

采用 Excel 2007 进行数据整理,应用 SPSS 19.0 软件进行单因素方差分析、Duncan 显著性分析、系统聚类分析、主成分分析及综合得分计算。应用 Origin 2018 进行图形绘制。

3 结果与分析

3.1 不同种源杉木木材密度及管胞形态的比较

由表2得,不同种源杉木的木材气干密度均属2级,但不同种源杉木木材密度和管胞形态存在显著差异。其中,安徽休宁种源的全干密度和气干密度显著高于其他种源,浙江金华与贵州剑河种源的全干密度和气干密度显著低于其他种源。广东郁南种源的管胞长度显著大于其他种源,贵州剑河种源的管胞长度显著低于其他种源。浙江金华种源的管胞宽度最小,贵州剑河种源的管胞宽度最大。广东郁南种源的管胞长宽比显著高于贵州剑河、安徽休宁和湖南会同种源。与该试验林23年生时的研究结果^[7]相比,随林龄增加,安徽休宁种源木材密度超过福建南平种源,贵州剑河种源管胞长度仍最小,广东郁南和湖北竹溪种源管胞长度超过福建南平和湖南会同种源。

3.2 不同种源杉木木材干缩性及湿胀性的比较

表3表明,9种不同种源杉木木材干缩性及湿胀性存在显著差异,北带种源木材干缩性及湿胀性略大于中带和南带种源。其中,贵州剑河种源木材体积干缩系数、气干体积湿胀率和吸水体积湿胀率显著小于其他种源。说明贵州剑河种源杉木保持尺寸稳定的能力较强。广东郁南种源杉木气干体积干缩率最小。不同种源杉木气干体积湿胀率大小排序为:安徽休宁>福建南平>湖北竹溪>广东郁南>浙江金华>四川彭县>四川庐山>湖南会同>贵州剑河。安徽休宁种源杉木吸水体积湿胀率显著高于其他种源,不同种源杉木吸水体积湿胀率大小排序为:安徽休宁>湖北竹溪>浙江金华>四川彭县>福建南平>四川庐山>广东郁南>湖南会同>贵州剑河。安徽休宁种源杉木差异干缩显著低于贵州剑河、四川彭县、湖北竹溪、湖南会同、福建南平种源,说明安徽休宁种源杉木在干燥过程中相对不易发生开裂和变形。

3.3 不同种源杉木木材力学性质的比较

由图1得到,9种不同种源杉木的力学性质存在显著差异,四川庐山和福建南平种源木材力学性质总体较好,而23年生时福建南平和广东郁南种源木材力学性质较好^[7],说明随着林龄增加,福建南平种源杉木材性仍较好,四川庐山种源杉木材性好于广东郁南种源。福建南平种源杉木抗弯弹性模量最大,属2级。贵州剑河种源杉木抗弯弹性模量

表2 不同种源杉木木材密度及管胞形态的比较

Table 2 Comparison of wood density and tracheid morphology of Chinese fir from different provenances

种源 Provenances	全干密度 Oven-dried densities/(g·cm ⁻³)	气干密度 Air-dried densities/(g·cm ⁻³)	管胞 Tracheid		
			长度 Length/μm	宽度 Width/μm	长宽比 Length-width ratio
AX	0.46 ± 0.01 a	0.48 ± 0.01 a	3 454.57 ± 522.41 d	32.53 ± 6.69 ab	109.76 ± 25.86 b
GJ	0.34 ± 0.03 e	0.37 ± 0.03 f	3 040.87 ± 760.06 e	34.70 ± 10.32 a	91.72 ± 27.30 c
SL	0.41 ± 0.01 c	0.43 ± 0.01 d	3 651.30 ± 606.63 cd	31.93 ± 8.08 ab	121.60 ± 36.29 ab
SP	0.38 ± 0.03 d	0.40 ± 0.03 e	3 405.57 ± 377.63 d	29.73 ± 6.59 bc	122.04 ± 38.70 ab
ZJ	0.35 ± 0.01 e	0.37 ± 0.01 f	3 393.27 ± 438.48 d	27.97 ± 4.86 c	124.27 ± 22.85 ab
HZ	0.37 ± 0.03 d	0.39 ± 0.03 e	3 954.13 ± 513.22 ab	34.20 ± 7.19 a	118.92 ± 23.15 ab
HH	0.41 ± 0.06 bc	0.44 ± 0.06 cd	3 584.37 ± 538.56 cd	32.00 ± 6.38 ab	116.86 ± 31.89 b
FN	0.42 ± 0.01 bc	0.46 ± 0.03 b	3 788.40 ± 644.52 bc	31.47 ± 4.81 abc	123.44 ± 29.55 ab
GY	0.43 ± 0.03 b	0.45 ± 0.02 bc	4 161.10 ± 455.03 a	31.67 ± 4.94 abc	135.29 ± 31.11 a

注: AX: 安徽休宁种源; GJ: 贵州剑河种源; SL: 四川庐山种源; SP: 四川彭县种源; ZJ: 浙江金华种源; HZ: 湖北竹溪种源; HH: 湖南会同种源; FN: 福建南平种源; GY: 广东郁南种源。不同小写字母表示不同种源杉木在对应指标上的显著性, 不同小写字母表示差异显著, 反之差异不显著。下同。

Note: AX: provenance from Xiuning, Anhui; GJ: provenance from Jianhe, Guizhou; SL: provenance from Lushan, Sichuan; SP: provenance from Pengxian, Sichuan; ZJ: provenance from Jinhua, Zhejiang; HZ: provenance from Zhuxi, Hubei; HH: provenance from Huitong, Hunan; FN: provenance from Nanping, Fujian; GY: provenance from Yunan, Guangdong. Different lowercase letters in the same column indicate significant differences ($P < 0.05$) of wood properties indexes of Chinese fir from different provenances. Different lowercase letters indicate significant difference. Otherwise the difference is not significant. The same as below.

表3 不同种源杉木干缩性及湿胀性的比较

Table 3 Comparison of shrinkage and swelling of Chinese fir from different provenances

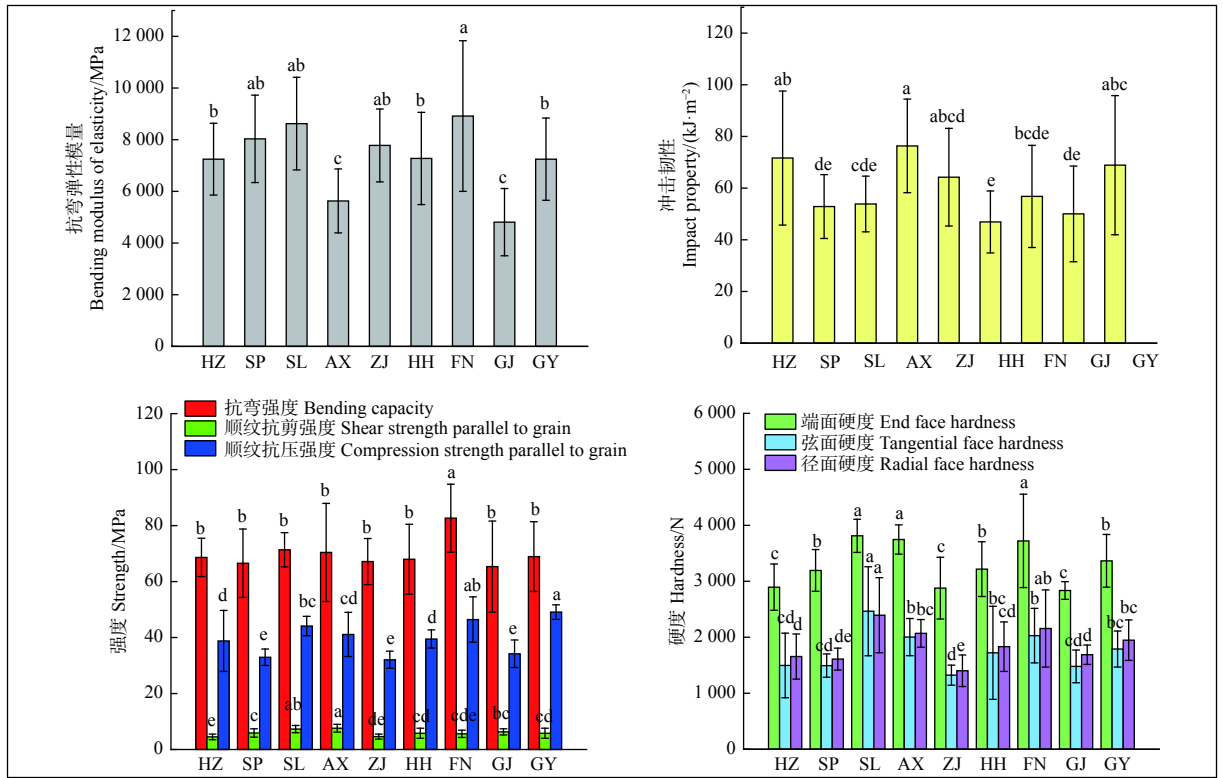
种源 Provenances	体积干缩系数 Volume shrinkage coefficient	气干体积干缩率 Air-dried volume shrinkage ratio/%	气干体积湿胀率 Air-dried volume swelling ratio/%	吸水体积湿胀率 Wet volume swelling ratio/%	差异干缩 Difference of oven-dried shrinkage
AX	0.53 ± 0.09 a	5.67 ± 0.58 a	7.89 ± 1.41 a	14.37 ± 1.42 a	1.96 ± 0.29 e
GJ	0.34 ± 0.10 e	4.79 ± 0.96 bc	5.20 ± 1.35 e	10.48 ± 1.86 d	2.83 ± 0.67 a
SL	0.45 ± 0.04 bcd	4.99 ± 0.55 b	6.16 ± 0.55 cd	11.72 ± 1.00 c	2.05 ± 0.55 de
SP	0.48 ± 0.06 abc	5.79 ± 0.59 a	6.25 ± 0.77 cd	12.78 ± 0.72 b	2.50 ± 0.63 b
ZJ	0.49 ± 0.07 ab	5.70 ± 0.84 a	6.50 ± 0.85 cd	12.94 ± 1.70 b	2.18 ± 0.40 de
HZ	0.54 ± 0.06 a	4.99 ± 1.16 b	7.29 ± 0.90 ab	12.95 ± 1.60 b	2.23 ± 0.31 cd
HH	0.42 ± 0.06 d	4.85 ± 0.49 b	6.00 ± 0.68 d	11.41 ± 1.10 c	2.45 ± 0.36 bc
FN	0.45 ± 0.17 bcd	4.35 ± 0.92 cd	7.43 ± 0.83 a	12.32 ± 1.91 bc	2.30 ± 0.22 bcd
GY	0.43 ± 0.16 cd	4.22 ± 1.25 d	6.75 ± 1.94 bc	11.51 ± 2.99 c	2.06 ± 0.27 de

最小, 属1级。安徽休宁种源杉木冲击韧性最高, 属2级。湖南会同种源杉木冲击韧性最低, 属2级。福建南平种源杉木抗弯强度显著高于其他种源, 属2级。安徽休宁与四川庐山种源杉木顺纹抗剪强度较高, 属2级。湖北竹溪和浙江金华种源杉木顺纹抗剪强度较低, 属1级。福建南平和广东郁南种源杉木顺纹抗压强度较高, 属3级。四川彭县、浙江金华和贵州剑河种源杉木顺纹抗压强度较低, 属2级。四川庐山、安徽休宁和福建南平种源杉木端面硬度显著高于其他种源, 属2级。四川庐

山种源杉木弦面硬度显著高于其他种源, 属2级。浙江金华种源杉木弦面硬度最小, 属2级。四川庐山和福建南平种源杉木径面硬度较高, 浙江金华种源杉木径面硬度最小。总体上表现为端面硬度 > 径面硬度 > 弦面硬度。

3.4 不同种源杉木木材材性指标的相关性分析

由表4得, 不同种源杉木材性指标之间存在相关性。全干密度与顺纹抗压强度、弦面硬度及径面硬度存在显著正相关, 与端面硬度存在极显著正相关。体积干缩系数与冲击韧性存在显著正相关, 与



注:不同种源杉木从左至右按种源地纬度递减排列。

Note: Different provenances of Chinese fir are arranged in descending order of latitude from left to right.

图1 不同种源杉木木材力学性质的比较

Fig. 1 Comparison of wood mechanical properties of Chinese fir from different provenances

吸水体积湿胀率存在极显著正相关,与差异干缩存在显著负相关。吸水体积湿胀率与冲击韧性存在显著正相关。抗弯弹性模量与管胞长宽比存在显著正相关。冲击韧性与差异干缩存在显著负相关。顺纹抗剪强度与端面硬度、弦面硬度及径面硬度存在显著正相关。顺纹抗压强度与端面硬度、弦面硬度及径面硬度存在显著正相关。端面硬度与弦面硬度及径面硬度存在极显著正相关。弦面硬度与径面硬度存在极显著正相关。

3.5 不同种源杉木木材材性的综合评价

根据测定的18项材性指标,对9种不同种源杉木进行聚类分析。聚类结果(图2)把9种种源杉木划分为3类,福建南平、广东郁南、四川庐山和安徽休宁种源归为一类,四川彭县、浙江金华、湖北竹溪和湖南会同种源归为一类。贵州剑河种源归为一类。

应用主成分分析方法对全干密度、气干密度、管胞长度、管胞宽度、体积干缩系数、气干体积干缩率、气干体积湿胀率、吸水体积湿胀率、抗弯弹性模量、抗弯强度、冲击韧性、顺纹抗剪强度、顺

纹抗压强度、端面硬度、弦面硬度、径面硬度、差异干缩、管胞长宽比18项指标进行降维。由于前4个因子累计贡献率达89.828%,故提取前4个因子 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 作为主因子来表征全部18项指标,由此进行不同种源杉木材性的综合评价分析。通过综合得分评价公式: $Y=0.4712F_1+0.2526F_2+0.164F_3+0.1122F_4$,分别计算4个主因子得分、综合评价得分及排名(表5)。

根据综合评价得分,9种不同种源杉木木材的材性优劣排序为:安徽休宁>四川庐山>福建南平>广东郁南>四川彭县>浙江金华>湖北竹溪>湖南会同>贵州剑河。安徽休宁和四川庐山种源杉木材性总体较优。

4 讨论

4.1 种源对林木材性的影响

大量研究表明,种源对林木材性有显著影响^[7,23-24]。本研究发现不同种源杉木的材性存在显著差异,这与盛国星^[3]的研究结果一致。与23年生同一试验林的材性研究结果^[7]相比,9种不同种源杉木材性

表 4 不同种源杉木木材材性指标的相关性分析

Table 4 Correlation analysis of wood property indexes of Chinese fir from different provenances

相关系数 Correlation coefficient	全干密度 Oven-dried densities	体积干缩系数 Volume shrinkage coefficient	吸水体积湿胀率 Wet volume swelling ratio	抗弯弹性模量 Bending modulus of elasticity	抗弯强度 Bending capacity	冲击韧性 Impact property	顺纹抗剪强度 Shear strength parallel to grain	顺纹抗压强度 Compression strength parallel to grain	端面硬度 End face hardness	弦面硬度 Tangential face hardness	径面硬度 Radial face hardness	差异干缩 Difference of oven-dried shrinkage	管胞长宽比 Tracheid length-width ratio
全干密度 Oven-dried densities	1												
体积干缩系数 Volume shrinkage coefficient	0.285	1											
吸水体积湿胀率 Wet volume swelling ratio	0.372	0.915**	1										
抗弯弹性模量 Bending modulus of elasticity	0.133	0.278	0.085	1									
抗弯强度 Bending capacity	0.474	0.117	0.150	0.539	1								
冲击韧性 Impact property	0.358	0.711*	0.705*	-0.178	0.041	1							
顺纹抗剪强度 Shear strength parallel to grain	0.576	-0.164	0.043	-0.270	0.068	-0.061	1						
顺纹抗压强度 Compression strength parallel to grain	0.749*	-0.021	-0.099	0.298	0.623	0.240	0.290	1					
端面硬度 End face hardness	0.851**	0.167	0.258	0.364	0.661	0.103	0.698*	0.703*	1				
弦面硬度 Tangential face hardness	0.698*	0.011	0.012	0.331	0.563	-0.022	0.711*	0.718*	0.921**	1			
径面硬度 Radial face hardness	0.723*	-0.064	-0.052	0.263	0.611	-0.019	0.702*	0.790*	0.911**	0.983**	1		
差异干缩 Difference of oven-dried shrinkage	-0.660	-0.669*	-0.601	-0.339	-0.290	-0.708*	-0.196	-0.543	-0.583	-0.512	-0.445	1	
管胞长宽比 Tracheid length-width ratio	0.348	0.402	0.207	0.765*	0.290	0.264	-0.320	0.470	0.278	0.170	0.127	-0.622	1

注：*表示显著相关 ($P < 0.05$)，**表示极显著相关 ($P < 0.01$)。

Note: *Indicates significant difference at $P < 0.05$, **indicates significant difference at $P < 0.01$.

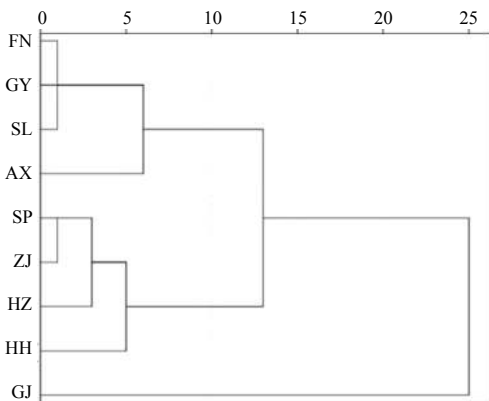


图 2 不同种源杉木木材材性的聚类分析

Fig. 2 Cluster analysis of wood properties of Chinese fir from different provenances

同样存在显著差异，说明同一环境条件下不同种源杉木材性主要受遗传差异影响，王传贵等^[13]还发现，在一定程度上地理环境因素比遗传因素对材性的影响更为显著。本研究发现，不同种源杉木木材

表 5 不同种源杉木木材材性主因子及综合评价

Table 5 Principal component analysis and comprehensive evaluation of wood properties of Chinese fir from different provenances

种源 Provenances	F_1	F_2	F_3	F_4	得分 Score	排名 Ranking
AX	0.50	0.15	0.37	-0.04	0.99	1
GJ	-0.83	-0.38	0.12	-0.08	-1.17	9
SL	0.39	-0.23	0.01	0.13	0.30	2
SP	-0.31	0.16	0.01	0.14	0.00	5
ZJ	-0.41	0.39	-0.08	0.09	-0.01	6
HZ	-0.09	0.26	-0.06	-0.18	-0.07	7
HH	-0.13	-0.17	-0.05	0.03	-0.32	8
FN	0.50	-0.12	-0.15	0.03	0.26	3
GY	0.37	-0.06	-0.17	-0.12	0.02	4

密度、管胞形态和物理力学性质无明显的地理变异规律，但木材干缩性及湿胀性表现出随种源地纬度

增加而增大的趋势,这可能是由于纬度影响了当地的气候、土壤等环境,杉木的部分性状做出适应性进化而形成一定的地理变异。杉木种源材性与地理位置可能存在密切关系,气温因子可能是其材性呈“V”形纬向变异趋势的原因^[12-13,25]。这说明杉木材性变异与地理位置并非简单的线性相关。不同种源杉木具有不同的生长规律,部分种源在23年时仍处于生长阶段,一些北带种源杉木的生长成熟期可能在30年后^[7],生长性状影响了木材材性^[26-27],这可能是61年生时9种种源杉木材性排序发生变化的原因。

4.2 林木材性指标的相关性及其材性评价标准

本研究表明,杉木材性评价指标之间存在复杂的相关性,木材密度与顺纹抗压强度、硬度相关性较高,但与其他力学性质相关性不明显,木材密度显著影响木材部分力学性质,这与其他学者的研究结论一致^[28],木材密度是林木材性评价的重要指标之一,但不能完全以此判断材性好坏。本研究发现,管胞长度与顺纹抗压强度显著相关,说明管胞形态影响木材强度。这可能是由于木材由多细胞组成,细胞越长,搭载的细胞数就越少,而细胞间的搭接力小于细胞自身强度,木材细胞长度越长,木材强度越高。杉木的干缩性和湿胀性与木材密度无显著相关,但杨秀淦等^[29]研究认为杉木木材干缩性与木材密度间存在极显著遗传负相关,也有学者^[30]认为木材干缩性越大,木材密度越大。造成结论不一致的原因可能与木材干缩性和湿胀性受木材密度和微纤丝角度等多因素的复杂影响有关。目前关于木材材性的评价标准尚不统一^[21,31-33],本研究认为木材材性的评价应由木材的用途确定。管胞长宽比大于35,木材有较好的造纸效果^[34],9种种源杉木木材均符合造纸要求,以广东郁南种源较好。建筑用材需要较高的力学性质,9种种源杉木木材力学性质等级均较高,说明杉木是优良的建筑用材,安徽休宁、四川庐山和福建南平种源力学性质较好。木材差异干缩越小,木材尺寸稳定性越强,木材制品不易开裂和翘曲^[28,35],安徽休宁种源木材是较稳定的家具用材。

5 结论

本研究表明:不同种源杉木材性存在差异,干缩性和湿胀性有随纬度增加而变大的趋势,其他材

性指标无明显地理变异规律。安徽休宁种源木材密度显著高于其他种源,管胞长宽比大小排序为广东郁南>浙江金华>福建南平>四川彭县>四川庐山>湖北竹溪>湖南会同>安徽休宁>贵州剑河。安徽休宁种源的差异干缩最小,贵州剑河种源体积干缩系数最小。福建南平种源木材抗弯弹性模量和抗弯强度最高,安徽休宁种源木材冲击韧性和顺纹抗剪强度最高,广东郁南种源木材顺纹抗压强度最高,四川庐山种源木材硬度最高。

根据不同种源杉木材性的差异,将9种种源分为3类,福建南平、广东郁南、四川庐山和安徽休宁种源归为一类,四川彭县、浙江金华、湖北竹溪和湖南会同种源归为一类,贵州剑河种源归为一类。

不同种源杉木材性指标间存在显著相关性,对9种种源杉木材性进行综合评价排序为安徽休宁>四川庐山>福建南平>广东郁南>四川彭县>浙江金华>湖北竹溪>湖南会同>贵州剑河。木材密度、管胞形态、干缩性、湿胀性及物理力学性质相对较好的种源为安徽休宁、四川庐山、福建南平和广东郁南种源。

参考文献:

- [1] Bi J, Blanco J A, Seely B, *et al.* Yield decline in Chinese-fir plantations: a simulation investigation with implications for model complexity[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2007, 37(9): 1615-1630.
- [2] 李魁鹏,韦正成,黄开勇,等.广西融水特色红心杉木优树材质性状变异规律研究[J]. *林业科学研究*, 2017, 30(3): 424-429.
- [3] 盛国星.杉木地理种源材性评估[J]. *安徽农业大学学报*, 1996, 23(2): 175-180.
- [4] 何智英,俞新妥,叶再春.杉木生物系统学研究(I)[J]. *福建林学院学报*, 1987, 7(1): 1-12.
- [5] 俞新妥,黄荣之.杉木、马尾松地理造林试验初报[J]. *福建林学院学报*, 1960, 1(1): 51-55.
- [6] 俞新妥,林思祖,洪伟.杉木种源地理位置的数学模型[J]. *福建林学院学报*, 1985, 5(2): 1-6.
- [7] 俞新妥,陈承德,何智英,等.杉木种源试验林(23年)的生长和材性研究[J]. *福建林学院学报*, 1984, 4(1): 1-8.
- [8] 程琳,覃晓颖,黄开勇,等.杉木不同种质和林龄的木材管胞形态变异规律[J]. *广西林业科学*, 2017, 46(1): 47-52.
- [9] 杭芸,俞金健,周世水,等.杉木木材形成功能基因内SSR标记的开发及应用[J]. *农业生物技术学报*, 2019, 27(1): 34-42.
- [10] 石江涛,丁笑红,张颀,等.天然次生林杉木枝材与干材材性比较[J]. *林业工程学报*, 2017, 2(1): 20-24.
- [11] 施季森,叶志宏,翁玉榛,等.杉木生长与材性联合遗传改良研

- 究[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 1993, 17(1): 1-8.
- [12] 孙成志, 谢国恩, 李 萍. 杉木地理种源材性变异及建筑材优良种源评估[J]. 林业科学, 1993, 29(5): 429-437.
- [13] 王传贵, 柯曙华, 费本华, 等. 不同种源杉木物理力学性质的比较研究[J]. 东北林业大学学报, 1998, 26(4): 3-5.
- [14] 高建亮, 赵林峰. 30a杉木萌生林和实生林木材的材性比较[J]. 东北林业大学学报, 2020, 48(4): 93-97.
- [15] 韦如萍, 胡德活, 郑会全, 等. 杉木优树生长性状和材质性状的研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2013, 33(2): 28-33.
- [16] 朱安明, 赖树华, 段爱国, 等. 21年生杉木优良无性系生长与材质性状研究[J]. 林业科技通讯, 2015, 35(4): 8-12.
- [17] 曾志光, 肖复明, 沈彩周, 等. 江西省优质速生杉木无性系选育研究[J]. 林业科学研究, 2006, 19(5): 561-566.
- [18] 王润辉, 胡德活, 郑会全, 等. 杉木无性系生长和材性变异及多性状指数选择[J]. 林业科学, 2012, 48(3): 45-50.
- [19] 俞新妥. 杉木栽培学[M]. 福州: 福建科学技术出版社, 1997.
- [20] 林 鹏, 林益明, 林建辉. 桐花树和海桑次生木质部的生态解剖[J]. 林业科学, 2000, 36(2): 125-128.
- [21] 李 坚. 木材科学研究[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [22] 虞晓芬, 傅 玳. 多指标综合评价方法综述[J]. 统计与决策, 2004(11): 119-121.
- [23] 洪 舟, 刘福妹, 杨曾奖, 等. 5个泰国种源大果紫檀的早期生长及材性分析[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2019, 43(2): 161-167.
- [24] 洪 舟, 杨曾奖, 张宁南, 等. 降香黄檀生长和材性性状种源差异及早期选择[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2020, 44(1): 11-17.
- [25] 黄安民, 费本华, 刘君良. 杉木木材性质研究进展[J]. 世界林业研究, 2006, 19(1): 47-52.
- [26] Ericsson T, Fries A. Genetic analysis of fibre size in a full-sib *Pinus sylvestris* L. progeny test[J]. Scandinavian Journal of Forest Research, 2004, 19(1): 7-13.
- [27] Ištók I, Sedlar T, šefc B, et al. Physical properties of wood in poplar clones 'I-214' and 'S1-8'[J]. Drvna Industrija, 2016, 67(2): 163-170.
- [28] 尚秀华, 张沛健, 罗建中, 等. 赤桉幼龄材物理力学性质研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2019, 47(5): 32-41.
- [29] 杨秀滢, 郑会全, 胡德活, 等. 杉木无性系木材干缩性与吸水性的变异[J]. 林业科技开发, 2012, 26(1): 33-35.
- [30] Tsoumis G. Science and Technology of Wood Structure, Properties, Utilization[M]. New York: Chapman & Hall, 1991.
- [31] Tsuchikawa S, Kobori H. A review of recent application of near infrared spectroscopy to wood science and technology[J]. Journal of Wood Science, 2015, 61(3): 213-220.
- [32] Silva C E S D, Pace J H C, Gomes F J B, et al. Comparison between resistograph analysis with physical properties of the wood of Brazilian native tree species[J]. Floresta e Ambiente, 2020, 27(1): e20190052.
- [33] Wu C, Vahedi N, Vassilopoulos A P, et al. Mechanical properties of a balsa wood veneer structural sandwich core material[J]. Construction and Building Materials, 2020, 265: 120193-120203.
- [34] 李 坚, 郭明辉, 赵西平. 木材品质与营林环境[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [35] 魏 路, 陈凤义, 孙照斌, 等. 白蜡木、黑胡桃木、橄榄木的干缩湿胀特性研究[J]. 林业机械与木工设备, 2015, 43(7): 16-19.

Comparative Study on Wood Characteristics of *Cunninghamia lanceolata* from Different Provenances

YAN Yao^{1,2,3}, LI Bing-jun^{1,2,3}, HE Zong-ming^{1,2,3}, LIU Yu-hui⁴,
LI Ming^{1,2,3}, YU Xin-tuo^{1,2,3}, MA Xiang-qing^{1,2,3}

(1. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China; 2. Fujian Chinese Fir Germplasm Innovation Engineering Research Center, Fuzhou 350002, Fujian, China; 3. Engineering Research Center of Chinese Fir, National Forestry and Grassland Administration, Fuzhou 350002, Fujian, China; 4. Xinkou Experimental Forest Farm of Fujian Agriculture and Forestry University, Sanming 365002, Fujian, China)

Abstract: [Objective] The study aims at comparing the differences of wood characteristics of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations from different provenances and analyzing their geographical variation regularity, so as to screen the better Chinese fir provenance. [Method] The first provenance test plantation of Chinese fir planted in 1958 was selected as the research object. Through investigating the growth of Chinese fir from different provenances, the intermediate trees were determined. The wood density, tracheid morphology, dry shrinkage, wet swelling, shear strength parallel to grain, compression strength parallel to grain, bending modulus of elasticity, bending capacity, impact property and hardness were determined and compared. The wood properties were evaluated by cluster analysis and principal component analysis. [Result] Significant differences were found in wood characteristics among nine provenances of Chinese fir ($P < 0.05$). The dry shrinkage and wet swelling of wood increased with latitude, but there was no significant geographical variation regularity in other wood characteristics. The wood density of Anhui Xiuning provenance was significantly higher than that of other provenances ($P < 0.05$). The rank order of the tracheid length-width ratio is as follows: Guangdong Yu'nan provenance > Zhejiang Jinhua provenance > Fujian Nanping provenance > Sichuan Pengxian provenance > Sichuan Lushan provenance > Hubei Zhuxi provenance > Hunan Huitong provenance > Anhui Xiuning provenance > Guizhou Jianhe provenance. The ratio of tangential to radial shrinkage of Anhui Xiuning provenance and volume shrinkage coefficients of Guizhou Jianhe provenance were the lowest. The bending modulus of elasticity and bending capacity of Fujian Nanping provenance were the highest. The impact property and shear strength parallel to grain of Anhui Xiuning provenance were the highest. The compression strength parallel to the grain of Guangdong Yu'nan provenance was the highest, while the hardness of wood from Sichuan Lushan provenance was higher than that of other provenances. A significant correlation between wood characteristics index and wood density was significantly correlated with some wood characteristics index. According to the difference of wood properties of different provenances, nine provenances of Chinese fir were clustered into three categories: category I included Fujian Nanping provenance, Guangdong Yu'nan provenance, Sichuan Lushan provenance and Anhui Xiuning provenance, category II included Sichuan Pengxian provenance, Zhejiang Jinhua provenance, Hubei Zhuxi provenance and Hunan Huitong provenance, category III included the Guizhou Jianhe provenance. Using comprehensive analysis, the rank order for wood properties of the nine provenances is as follows: Anhui Xiuning provenance > Sichuan Lushan provenance > Fujian Nanping provenance > Guangdong Yu'nan provenance > Sichuan Pengxian provenance > Zhejiang Jinhua provenance > Hubei Zhuxi > Hunan Huitong provenance > Guizhou Jianhe provenance. [Conclusion] Geographical provenance has an essential influence on wood properties of Chinese fir to a certain extent.

Keywords: *Cunninghamia lanceolata*; provenance; wood properties; tracheid; mechanical property