

# 南方型无性系杨树木材的主要物理力学性质

李大纲

(南京林业大学木材工业学院, 南京 210037)

**摘要:** 研究结果表明南方型无性系杨树木材物理力学性质的平均值分别是: 密度为 $0.438\text{g/cm}^3$ ; MOE(抗弯弹性模量)为 $6.988\text{GPa}$ ; MOR(抗弯强度)为 $62.48\text{MPa}$ ; 顺纹抗压强度为 $30.21\text{MPa}$ ; 横纹抗压比例极限强度为 $4.77\text{MPa}$ ; 差异干缩大于 $2.00$ 。影响木材顺纹拉伸强度的主要因子是木材密度和纤维长度。

**关键词:** 物理性质; 力学性质; 南方型无性系

## The Main Properties of Wood of Southern Type Clones Popular

LI Da-gang

(College of Wood Science & Technology, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037)

**Abstract:** The average values about the main physical and mechanical properties of wood are respectively illustrated as following: SG(wood density is  $0.438\text{g/cm}^3$ , MOE(modulus of elasticity) is  $6.988\text{GPa}$ , MOR(modulus of rupture) is  $62.48\text{MPa}$ , D(difference shrinkage on drying) is larger than  $2.00$ ,  $\sigma_{//}$  (compression strength parallel to the grain) is  $30.21\text{MPa}$ ,  $\sigma_{\perp}$  (compression strength perpendicular to the grain) is  $4.77\text{MPa}$ . The tensile strength parallel to the grain is mainly determined by the wood density and fiber length.

**Keywords:** Physical Properties; Mechanical Properties; Southern Type Clones Popular

南方型无性系杨树是早期速生树种, 进入成熟期后生长速度明显降低, 应进行合理采伐, 使其能尽快进入木材流通市场。为了使不同栽培条件下生长的杨树木材能找到最佳使用场合, 必需对其木材材性进行综合研究。作者对不同密度林分中生长的南方型无性系杨树(I-63杨、I-69杨和I-214杨)进行了干缩、压缩和抗弯等主要物理力学性质的研究, 意在为找出造林密度与杨树木材材性之间的关系, 为造林优化设计和合理利用杨树提供理论依据。

### 1 试验材料和方法

试材是黑杨派南方型无性系的 *Populus deltoides* Bartr.cv"Harvard"(I-63杨), *P.deltoides* Barr.cv"Lux"(I-69杨)和 *P.xeuramericana* (Dode) Guinier cv. I-214(I-214杨)。造林密度为525株/公顷、400株/公顷、278株/公顷, 相应的株行距分别为 $4\times 4\text{m}$ 、 $5\times 5\text{m}$ 、 $6\times 6\text{m}$ , 共计9株树。取 $0.3\sim 2.3\text{m}$ 高处木段的边材部位的木材进行材性测定, 试材按《木材物理力学试验方法》(GB 1927-1943-91)进行加工。抗弯强度(MOR)和抗弯弹性模量(MOE)的加荷速度为 $5\text{mm/min}$ , 采用

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(项目编号: 30271050)

作者简介: 李大纲, 1959年生, 男, 博士后, 教授, 博士生导师。南京林业大学木材工业学院包装工程系系主任, 主要从事木材科学与技术, 新型包装材料的教学与科研。电话: 025-5427628; 电子邮件: [lidagang@njfu.edu.cn](mailto:lidagang@njfu.edu.cn)

三点加载方式测定MOE和MOR; 顺纹抗压强度的加荷速度为3mm/min, 横纹抗压强度的加荷速度为2mm/min。压缩厚度为试样厚度过的50%, 进行径向大变形横纹抗压能量吸收。每个试样做完试验后立即取一小块测定其含水率, 试材含水率范围在12.6~14.5%之间。全部试验均在岛津AG-10TA力学试验机上进行。全干缩率和吸水率的测定完全按国标(GB 1927-1943-91)进行。

为了研究木材强度与木材解剖性状的关系, 沿半径方向切制弦面切片用于测定微拉伸强度, 并进行微拉伸强度与木材密度、纤维角、年轮宽度和纤维形态的相关分析。微拉伸试样是取自I-63杨株行距为7×7m的胸高处的木块, 沿径向从外向内用滑走式切片机连续切片制成厚度为60 μm的薄片, 再在模子下用单面刀片加工成哑铃形试片, 两端用单板粘住, 在力学试验机上用5KN的传感器进行拉伸试验。纤维角采用偏光显微镜法进行测定。

## 2 结果与分析

### 2.1 测试结果与方差分析

表1 各无性系在不同株行距下木材的力学性质

无性系	株行距 (m)	特征数	抗弯弹性模量 (GPa)	抗弯强度 (MPa)	顺纹抗压 (MPa)	横纹抗压 (MPa)	横压能量吸收 (J)
63杨	4×4	M	7.94250	67.346	32.816	4.725	31.520
		S	1.19210	4.37	4.14	1.89	3.60
		V%	15.01	6.48	12.62	39.58	11.42
	5×5	M	7.80800	66.227	31.544	4.626	31.185
		S	0.61751	8.23	2.51	1.59	9.47
		V%	7.90	12.34	7.96	34.37	30.37
	6×6	M	6.71672	58.039	29.354	3.840	29.726
		S	1.13373	6.60	3.59	0.35	3.99
		V%	16.88	11.37	12.23	9.11	13.42
69杨	4×4	M	7.72020	69.791	32.900	5.419	44.187
		S	1.81412	9.64	5.13	1.12	5.73
		V%	23.50	13.81	15.59	20.67	12.97
	5×5	M	7.26649	65.161	31.513	5.326	39.316
		S	1.57563	6.11	4.80	0.74	5.25
		V%	21.68	9.37	15.23	14.06	13.35
	6×6	M	7.29530	68.000	31.774	5.516	43.003
		S	0.85453	8.81	4.15	0.72	6.28
		V%	11.71	12.96	13.06	13.05	14.60
214杨	4×4	M	7.17979	65.567	31.735	4.824	38.064
		S	1.97514	12.85	6.91	1.28	9.45
		V%	27.51	19.60	21.77	26.53	24.83
	5×5	M	4.87868	48.323	24.856	4.148	25.446
		S	1.08863	6.06	2.63	1.15	4.32
		V%	22.31	6.06	10.58	27.72	17.06
	6×6	M	6.08863	53.896	25.408	4.509	32.121
		S	0.51750	2.96	2.68	1.43	4.14
		V%	8.49	5.49	10.55	31.71	12.89

表2 各无性系在不同株行距下木材的物理性质

无性系	株行距 (m)	特征数	气干密度 (g/cm <sup>3</sup> )	全干缩率(%)				差异干缩
				纵向	径向	弦向	体积	
63杨	4×4	M	0.408	0.91	3.86	8.62	12.48	2.23
		S	0.027	0.27	0.54	1.55	2.09	
		V%	6.620	9.34	13.99	17.98	16.75	
	5×5	M	0.427	0.66	4.00	7.78	11.78	1.95
		S	0.036	0.12	0.42	0.49	0.91	
		V%	8.430	18.18	10.50	6.30	7.72	
	6×6	M	0.410	1.00	4.18	9.28	13.46	2.22
		S	0.025	0.39	0.63	1.33	1.96	
		V%	6.100	39.00	15.07	14.33	14.56	
69杨	4×4	M	0.480	1.00	4.75	10.44	15.19	2.20
		S	0.035	0.25	0.67	1.55	2.22	
		V%	7.290	25.00	14.11	14.85	14.61	
	5×5	M	0.495	1.04	5.13	11.02	16.15	2.15
		S	0.019	0.38	1.07	1.44	2.51	
		V%	3.840	36.19	20.86	13.07	15.54	
	6×6	M	0.489	1.00	4.37	10.47	14.84	2.40
		S	0.014	0.12	0.30	0.73	1.03	
		V%	2.860	12.00	6.86	6.97	6.94	
214杨	4×4	M	0.445	0.92	5.00	10.15	15.15	2.03
		S	0.048	0.20	0.80	0.97	1.77	
		V%	10.790	21.51	16.00	9.56	11.68	
	5×5	M	0.413	1.09	4.74	10.79	15.53	2.28
		S	0.013	0.25	1.32	1.80	3.12	
		V%	3.150	22.73	27.84	16.68	20.09	
	6×6	M	0.375	1.02	3.67	9.86	13.53	2.69
		S	0.016	0.21	0.25	0.84	1.09	
		V%	4.270	20.39	6.81	8.52	8.06	

注：M为平均值，S为标准差，V%为变异系数。

从表1中可见①I-63杨各项力学强度的平均值均随株行距的增加而下降，其中MOE和横纹抗压比例极限强度在株行距为4×4m时分别比6×6m高18.25%和23.05%。②I-69杨和杨I-214杨均是株行距为4×4m最大、6×6m时次之、5×5m最小，而I-214杨在株行距为4×4m和5×5m相差较大，其相差百分率分别为MOE相差47.16%，MOR相差35.68%，顺纹抗压相差27.68%，横纹抗压相差16.30%，横纹抗压能量吸收相差49.59%。③株行距为5×5m时各项力学强度均是I-63杨>I-69杨>I-214杨。④株行距为6×6m时MOE、MOR和顺纹抗压是I-69杨>I-63杨>I-214杨；横纹抗压和横纹抗压能量吸收是I-69杨>I-214杨>I-63杨。⑤木材差异干缩除63杨5×5m株行距为中等外，其余均大于2.0为差异干缩大。⑥随株行距加大木材密度下降，I-214杨完全符合规律，I-69杨和I-63杨的4×4m株行距与密度关系有异常现象，木材气干密度为0.375-0.495g/cm<sup>3</sup>范围，I-69杨5×5m时为最大，I-214杨6×6m最小。

表2方差分析表明①MOE是无性系之间差异不显著；株行距之间差异显著。②MOR是各无

性系之间和株行距之间差异均极显著。③顺纹抗压强度和横纹抗压能量吸收是各无性系之间差异极显著, 而株行距之间差异不显著。④横纹抗压强度则是各无性系和株行距之间差异均不显著。⑤纵向干缩率是株行距间差异极显著, 弦向干缩率是无性系间差异极显著。

木材的抗弯性能和抗压强度是木材力学性质中最重要的指标之一, 抗弯强度和顺纹抗压强度之和即为木材的品质系数, 木材的品质系数关系到木材的适用性和类别。表1中数据表明南方型无性系杨树木材的品质系数均低于110, 属于低强度树种, MOE属于甚低级别。

在进行抗弯性能的测试中发现I-69杨在较大的弯曲变形下不发生破坏, 具有较好的韧性, 而I-63杨常出现脆断。为此进行了大变形径向横纹抗压能量吸收的试验, 以观察在超过弹性范围进入塑性区域后木材的性能。结果表明I-69杨能量吸收均大于I-63杨和I-214杨, 故I-69杨可用作弯曲木生产的原材料。

## 2.2 主成分分析

在多指标(参数变量)的研究中, 往往由于变量个数太多, 并且彼此之间存在着一定相关性, 因而使得所观测的数据在一定程度上反映的信息有所重叠, 而且当变量较多时, 在高维空间中研究样本的分布规律比较麻烦, 而利用主成分分析可以找出几个综合因子来代表原来众多的变量, 使这些综合因子能尽可能地反映原来变量的信息, 而且彼此之间互不相关。采用主成分分析对三个无性系的主要力学性质进行分类, 然后对力学性质的类型进行分析评价。

以三个无性系在三个株行距下共9株标准木的10个主要材性的平均值为基本资料, 对10个主要指标编号如下:  $X_1$ : MOE(GPa);  $X_2$ —MOR(MPa);  $X_3$ —顺纹抗压(MPa);  $X_4$ —横纹抗压(MPa);  $X_5$ —横纹抗压能量吸收(J);  $X_6$ —气干密度( $g/cm^3$ );  $X_7$ —纵向全干缩率(%);  $X_8$ —径向全干缩率(%);  $X_9$ —弦向全干缩率(%);  $X_{10}$ —差异干缩。

用Jacobi法解得相关矩阵的特征根、贡献率和累计贡献率见表3。因前三个特征根的累计贡献率已达94.32%, 故前三个因素已经能较好地表达原始变量所含的大部分信息。第一主成分的贡献率为52%, 第二主成分的贡献率为31%, 前两个主成分的累计贡献率为83%, 即前两个主成分集中了全部10个变量83%的信息。

表3 各主要物理力学强度的方差分析

项目	变异来源	自由度	离差平方和	均方	F值
抗弯弹性模量 (MOE)	无性系间	2	6.521E+07	3.261E+07	2.167
	无性系内株行距间	28	6.801E+07	2428873	1.615*
	株行距内各试样间	117	1.760E+08	1504291	
	总变异	125	3.092E+08		
抗弯强度 (MOR)	无性系间	2	3675.625	1837.813	30.868**
	无性系内株行距间	28	3907.688	139.560	2.344**
	株行距内各试样间	117	6965.969	59.5382	
	总变异	125	14549.280		
顺纹抗压 强度	无性系间	2	506.921	253.461	16.340**
	无性系内株行距间	28	613.406	21.907	1.412

	株行距内各试样间	117	1814.844	15.512	
	总变异	125	2935.172		
横纹抗压 强度	无性系间	2	9.864	4.932	3.602
	无性系内株行距间	16	14.448	0.903	0.659
	株行距内各试样间	63	86.259	1.369	
	总变异	71	110.570		
横纹抗压 能量吸收	无性系间	2	1126.774	563.387	8.026**
	无性系内株行距间	16	712.977	44.561	0.635
	株行距内各试样间	63	4422.297	70.195	
	总变异	71	6262.047		
纵向 全干缩率	无性系间	2	0.256	0.128	2.130
	无性系内株行距间	14	6.571	4.078	67.970**
	株行距内各试样间	54	3.223	0.060	
	总变异	62	4.050		
径向 全干缩率	无性系间	2	4.145	2.072	3.954
	无性系内株行距间	14	10.498	0.757	1.445
	株行距内各试样间	54	28.272	0.524	
	总变异	62	43.015		
弦向 全干缩率	无性系间	2	86.185	43.092	24.866**
	无性系内株行距间	14	16.537	1.181	0.680
	株行距内各试样间	54	93.583	1.733	
	总变异	62	196.304		

第一主成分的 $X_1$ -- $X_6$ 个载荷因子都是正值，集中反映了与木材力学性能有关的各个变量，它的大小可表明强度的高低，称为强度指标;第二主成分反映了木材的干缩性能，称为干缩指标。这一结果与李坚<sup>[2]</sup>对中国主要树种物理力学性质进行主成分分析的结论完全一致，即木材物理力学性能的第一主成分为强度指标，第二主成分为干缩指标。

表4 前五个主成分的特征值、贡献率和累计贡献率

主成分	1	2	3	4	5
特征值	5.7007	3.4276	1.2473	.3002	.2030
贡献率	51.8248	31.1597	11.3395	2.7295	1.8451
累计贡献率	51.8248	82.9845	94.3240	97.0534	98.8985

表5 前五个主成分的单位正交特征向量

指标	1	2	3	4	5
$X_1$	.3275	-.3058	.1560	.2907	-.0826
$X_2$	.3843	-.1927	.1027	.2201	.0791
$X_3$	.3686	-.2153	-.0352	.4293	-.1631
$X_4$	.3749	.1402	.2030	-.3542	.2449
$X_5$	.3720	.1527	.1913	.1220	.5571
$X_6$	.3295	.2759	.1376	-.2753	-.4259

X <sub>7</sub>	-.0795	.4917	.0633	.5848	-.3515
X <sub>8</sub>	.1877	.2874	-.6346	.0848	.2246
X <sub>9</sub>	.0701	.5234	-.1364	.0851	.1778
X <sub>10</sub>	-.1599	.2988	.6598	.0542	.0832

从主成分分析可见, 木材物理力学性质参数指标通过简化为几个彼此独立的综合指标, 使统计分析系统结构简化, 并且可以根据各主成分中因子载荷量的分布推测主成分批指标的意义, 从而对各类综合指标进行有效的分析。

### 2.3 微拉伸强度与木材解剖性状的关系

从表6可见, 由髓心沿半径方向从内向外在第6年时顺纹抗拉强度急剧上升、纤维角急剧下降、基本密度明显上升、年轮宽度突然变窄和纤维长度增加的现象表明, 1-6年为杨树的幼龄阶段, 7-10年进入成熟阶段。因此对于生长在江苏睢宁的南方型无性系杨树其成熟年龄为6-7年, 并与吕士行<sup>[1]</sup>提出杨树的数量成熟龄的观点基本一致。综上分析作者认为, 木材抗拉强度、纤维角、木材密度、年轮宽度和纤维长度均可以作为判断杨树成熟期的指标。

为了分析强度与解剖性状的关系对表中各指标进行编号并进行回归分析, 多元回归方程为:  $Y = 693.25 - 7.41 X_1 - 1267.78 X_2 - 1.23 X_3 + 2001.79 X_4 - 62.87 X_5 - 40.20 X_6$

式中X<sub>1</sub>:纤维角;X<sub>2</sub>:基本密度;X<sub>3</sub>:年轮宽度;X<sub>4</sub>:纤维长度;X<sub>5</sub>:纤维宽度;X<sub>6</sub>:长宽比;Y:微片的顺纹抗拉强度。复相关系数平方 = 0.9043, D W 统计量 = 2.2787, 由此可见,影响木材拉伸强度的主要指标是木材密度和纤维长度。

表 6 各指标沿半径方向的变化规律

年轮 从内向外	顺纹抗拉 (MPa)	纤维角 (°)	基本密度 (g/cm <sup>3</sup> )	年轮宽度 (mm)	纤维长度 (mm) <sup>[2]</sup>	纤维宽度 (μm) <sup>[2]</sup>	长宽比
1	44.676	14.23	0.296	28.30	0.60	20.1	29.6
2	31.157	15.86	0.283	21.86	0.70	20.0	35.0
3	35.617	15.50	0.284	20.12	1.06	19.8	53.4
4	30.838	14.50	0.306	12.81	1.11	20.0	55.5
5	40.791	13.96	0.313	8.50	1.14	21.6	54.1
6	64.240	14.85	0.348	4.82	1.15	22.0	52.3
7	79.522	14.21	0.332	3.25	1.23	20.7	58.7
8	51.965	12.00	0.344	2.96	1.26	20.7	60.9
9	69.353	12.20	0.330	2.86	1.28	21.7	60.4
10	57.881	10.20	0.357	4.70	1.30	21.0	61.9

### 3 结论

- (1) I-63杨和I-69杨和强度相近, I-214杨的强度较低。I-69杨具有较好的弯曲韧性可作曲木家具的原材料。
- (2) 无性系和株行距与各力学强度的差异各不相同, 各项力学指标三种杨树均在株行距为4×4m时最高, 因此在进行造林密度设计和选择无性系时应根据各种定向培育的要求来进行优化设计。
- (3) 主成分分析表明, 木材物理力学性质的第一主成分为强度指标, 第二主成分为干缩指标。
- (4) 多元回归的结果表明, 影响木材顺纹抗拉强度的主要因素是木材的密度和纤维长度。

(5) 沿半径方向，6~7年是杨树从幼龄材向成熟材过度的转折点，抗拉强度、纤丝角、基本密度、纤维长度和年轮宽度均可以作为判断木材成熟期的指标。

### 参考文献

- 1 南京林业大学杨树课题组. 黑杨派南方型无性系速生丰产技术论文集. 学术书刊出版社, 北京, 1991
- 2 李 坚等. 木材科学新篇. 东北林业大学出版社, 1991
- 3 渡边治人. 木材应用基础. 上海科学技术出版社, 1986
- 4 成俊卿. 木材学. 中国林业出版社, 1985
- 5 P.F.Kollmann. Principles of Wood Science and Technology ( I ) solid wood, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1968
- 6 郭德荣等. 人工林红松纤丝倾角变异与管胞长度和拉伸强度的关系. 东北林业大学学报, 1982, 6 (2) 39~46