

· 东北森林资源建设 Construction of Forest Resources In Northeast China ·

长白落叶松生长与材性分析及优良无性系选择

许军¹, 杜俊婕¹, 张磊^{1*}, 王福德^{2*}, 杨维满³

(1. 东北林业大学, 林学院, 林木遗传育种全国重点实验室, 哈尔滨 150040; 2. 黑龙江省林业科学研究所, 哈尔滨 150080;
3. 黑龙江省林口县林业和草原局森林资源管理股, 黑龙江 牡丹江 157600)

摘 要: 为对落叶松进行初步评价并选择优良无性系, 以黑龙江省牡丹江市林口县青山国家落叶松良种基地的长白落叶松收集区 68 个无性系为材料, 对其生长和材性性状进行测定, 并利用变异分析、方差分析和相关性分析等方法进行分析进而对其综合评价。方差分析的结果表明生长和材性性状在无性系间的差异水平呈现极显著。生长和材性的变异分析表明, 各性状的变异系数范围在 2.55%~19.71%, 材积的变异系数最大, 综纤维素的变异系数最小; 重复力范围在 0.602~0.924, 树高重复力最高, 其次是基本密度、综纤维素。相关性分析的结果表明, 胸径与树高呈极显著正相关, 东西冠幅与南北冠幅之间存在极显著正相关, 材积和胸径与树高都呈现极显著正相关, 且与胸径的相关性系数更大, 这表明材积受胸径影响更大; 生长性状和木材材性性状之间没有较为显著的相关关系。利用布雷金多性状综合评价方法, 基于 15% 的入选率从生长性状和材性性状两方面筛选优良无性系, 生长性状筛选的优良无性系为 241、456、96、475、179、161、83、759、339、43; 材性性状筛选的优良无性系为 357、223、161、7、249、741、657、14、475、113; 生长和材性性状表现均优良的无性系为 475 和 161。筛选的优良无性系可以为未来的优良品种选育提供新的材料。

关键词: 长白落叶松; 无性系; 木材性状; 重复力

中图分类号: S722.3; S791.22

文献标识码: A

DOI: 10.7525/j.issn.1006-8023.2025.06.009

Growth and Wood Quality Analysis of *Larix olgensis* and Selection of Superior Clonal Lines

XU Jun¹, DU Junjie¹, ZHANG Lei^{1*}, WANG Fude^{2*}, YANG Weiman³

(1. State Key Laboratory of Tree Genetic and Breeding, College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China;
2. Heilongjiang Academy of Forestry, Harbin 150080, China; 3. Forest Resources Management Section, Forestry and Grassland Bureau of Linkou County, Heilongjiang Province, Linkou 157600, China)

Abstract: To conduct a preliminary evaluation and select superior clonal lines of *Larix olgensis*, this study used 68 clonal lines from the *Larix olgensis* collection area at the Qingshan National Larch Seed Orchard in Linkou County, Mudanjiang City, Heilongjiang Province, as materials, measured their growth and wood quality traits were measured, and analyzed them using variation analysis, variance analysis, correlation analysis, and other methods for comprehensive evaluation. The results of the variance analysis showed that the differences in growth and wood quality traits among the clonal lines were highly significant. The variation analysis of growth and wood quality traits indicated that the coefficients of variation ranged from 2.55% to 19.71%, with volume exhibiting the largest coefficient of variation and total cellulose having the smallest. The repeatability values ranged from 0.602 to 0.924, with tree height showing the highest repeatability, followed by basic density and total cellulose. Correlation analysis revealed that diameter at breast height (DBH) was significantly positively correlated with tree height, and the east-west crown width was highly positively correlated with the north-south crown width. Volume, DBH, and tree height all exhibited significant positive correlations, with a

收稿日期: 2024-12-02

基金项目: 黑龙江省省属科研院所科研业务费项目重点项目 (ZD2022-02)。

第一作者简介: 许军, 硕士研究生。研究方向为林木遗传育种。E-mail: zyjxswx2000@163.com

* 通信作者: 王福德, 研究员, 研究方向为林木遗传育种。E-mail: wangfude070605@163.com

张磊, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为林木遗传育种。E-mail: zhanglei@nefu.edu.cn

引文格式: 许军, 杜俊婕, 张磊, 等. 长白落叶松生长与材性分析及优良无性系选择[J]. 森林工程, 2025, 41(6): 1182-1192.

XU J, DU J J, ZHANG L, et al. Growth and wood quality analysis of *Larix olgensis* and selection of superior clonal lines[J]. Forest Engineering, 2025, 41(6): 1182-1192.

stronger correlation between volume and DBH, indicating that volume was more influenced by DBH. Furthermore, correlation analysis revealed no significant relationship between growth traits and wood quality traits. Using the Breeding multi-trait evaluation method, superior clonal lines were selected based on both growth and wood quality traits, with a selection rate of 15%. The superior clonal lines selected for growth traits were 241, 456, 96, 475, 179, 161, 83, 759, 339, and 43, while those selected for wood quality traits were 357, 223, 161, 7, 249, 741, 657, 14, 475, and 113. The clonal lines 475 and 161 exhibited excellent performance in both growth and wood quality traits. The selected superior clonal lines can provide valuable material for the future breeding of superior varieties.

Keywords: *Larix olgensis*; clonal lines; wood quality traits; repeatability

0 引言

落叶松(*Larix*)为松科(Pinaceae)落叶松属的落叶乔木,落叶松属植物在全国分布约25种^[1],分布面积约1 063万hm²,蓄积量约9.55亿m³,占针叶林总面积的21.6%,是其蓄积量的18.9%^[2]。落叶松的生长特点主要具有耐寒性、抗逆性、生长适应性强和成材良好等抗性品质^[3-4],是我国北方及南方亚高山地区的重要造林针叶树种,木材可用于制浆造纸^[5],是林木中成材率和经济效益都较高的树种^[6]。其中,长白落叶松(*Larix olgensis*),在我国主要分布于黑龙江省东南部及辽宁省、吉林省东部的长白山地区,是我国东北、内蒙古以及华北主要的森林组成树种,亦是各分布区重要的针叶用材林树种。长白落叶松的人工林早期生长迅速、成林快、适应性广,已经成为制浆造纸的重要原料^[7],同时也作为部分地方的主要造林树种,被广泛用于退耕还林以及防护林工程。落叶松的遗传改良对于国家经济和生态环境有着重要的意义,符合既要保护好生态环境,又要使木材生产满足人们的日常生产生活的当下需要,也符合国家发展的需要。

对于落叶松的遗传育种工作,前人研究集中在生长性状分析、材性性状分析以及其他各个方面,如王树力等^[8]对纸浆木材材性和纸浆特性研究得出年龄、立地条件以及年龄立地条件相同情况下的林分密度对长白落叶松纸浆材的材性及纸浆特性具有明显影响;邓继峰等^[9]对生长和材性进行综合评价,选出3个比较理想的多性状指数方程,并进一步进行排名,筛选出3个家系;王佳兴等^[10]对长白落叶松家系生长变异进行了研究,初步选出5个长白落叶松优良家系;在生长和材性联合研究中,Fries等^[11]、赖猛等^[12]都从生长和材性性状进行了共同分析,前者谈到木材生长和材性之间关系复杂,选择过程需要有更多考虑,后者利用树高、胸径、生长轮密度、生长轮壁腔比、生长轮微纤维角和生长轮弹性模量等指标选出了优良日本落叶松27号无性系;陆文达等^[13]鉴于落叶松主要作为工程用材和制浆用材,从木材材性角度评价地理种源的优劣,得

出小北湖种源是优良的工程用材种源,和龙、天桥岭、大石头、小北湖种源是优良的制浆用材种源的结论。

本研究以黑龙江省牡丹江市林口县青山落叶松国家良种基地的68个长白落叶松无性系为试验材料,对其进行生长性状的调查以及半纤维素、纤维素、木质素、木材基本密度的检测,通过数据分析与综合评价,筛选优良的无性系,为长白落叶松的良种选育奠定基础。

1 材料和方法

1.1 试验地

试验地点位于黑龙江省牡丹江市林口县青山国家落叶松良种基地,地理位置处于东经130°33',北纬45°24',平均海拔320m,属中温带大陆季风气候,年平均气温3.2℃,年≥10℃积温2 500℃,年降雨量600~800mm,土壤以暗棕壤为主。

1.2 材料

材料包含68个长白落叶松无性系,见表1,表中系号为具体无性系编号,该材料来源于黑龙江省牡丹江市林口县青山林场国家落叶松良种基地营建的优树收集区,定植时间为1980年,每个无性系定植6株,株行距2.5m×5m,坡度百分比约为1.5%,现每个无性系保存株数3~6株,总保存率约为59%。

1.3 方法

2022年树木停止生长后,调查长白落叶松优树收集区不同无性系的树高、胸径、冠幅。利用树高测量仪(Vertex IV型)进行树高测量,利用标准胸径尺进行胸径测量,采用卷尺在地面测量树冠的垂直投影获得冠幅测量的直径数据。木芯取样采用直径5mm的生长锥进行取样,在胸高1.3m处同向钻取由树皮至髓心的完整无疵木芯,每个无性系取3个试样^[14]。基本密度测量采用排水法测定木芯(饱水试样)体积^[15],利用电热鼓风干燥箱(GGL-230D)102℃±2℃烘4~6h至试样绝干后测量质量。利用ANKOM A2000i型全自动纤维分析仪,采用滤袋法测定木材半纤维素、纤维素、木质素和综纤维素质量分数^[16]。

表1 68个无性系具体编号
Tab. 1 Specific identifiers for 68 clonal lines

系号 Clones	保存率 /% Survival rate	系号 Clones	保存率 /% Survival rate	系号 Clones	保存率 /% Survival rate	系号 Clones	保存率 /% Survival rate	系号 Clones	保存率 /% Survival rate
7	100	113	50	219	50	369	66.67	665	50
12	50	119	50	223	50	382	50	681	50
14	66.67	135	66.67	241	50	390	66.67	697	50
19	66.67	136	50	249	50	398	50	698	50
27	50	140	50	266	66.67	452	50	705	50
34	66.67	158	50	289	50	456	50	719	66.67
40	50	161	50	292	50	475	50	727	50
43	50	171	66.67	297	50	504	50	741	50
46	50	172	66.67	318	50	562	83.33	752	50
83	66.67	179	50	324	66.67	563	58.3	759	50
92	50	183	50	334	50	568	50	767	66.67
94	50	188	66.67	339	50	572	66.67	798	66.67
96	50	194	50	341	66.67	581	66.67	—	—
104	50	198	50	357	50	657	50	—	—

1.4 分析方法

数据分析利用SPSS(27.0)及R4.4.1进行分析。

材积计算公式为

$$V = 0.000\ 050\ 168\ 241 \times D^{1.758\ 289\ 4} \times H^{1.149\ 665\ 3} \quad (1)$$

式中: D 为1.3 m处胸径,cm; H 树高,m。

方差分析公式为

$$y_{ij} = \mu + \alpha_i + \varepsilon_{ij} \quad (2)$$

式中: y_{ij} 为单株个体的表型; μ 为总体平均值; α_i 为无性系效应; ε_{ij} 为随机误差^[17-18]。

变异系数(PVC,式中记为 P_{VC})计算公式为

$$P_{VC} = \frac{S_D}{\bar{X}} \quad (3)$$

式中: \bar{X} 表示性状均值; S_D 表示标准差。

重复力计算利用公式为

$$R = 1 - 1/F \quad (4)$$

式中: F 为方差分析中的费希尔比值^[19]。

利用布雷金多性状综合评价法,对无性系进行多性状综合评定和选择,具体计算公式为

$$Q_i = \sqrt{\sum_{j=1}^n a_j}, \quad a_i = X_{ij}/X_{jmax} \quad (5)$$

式中: Q_i 为综合评价值; X_{ij} 为某一性状均值; X_{jmax} 为某

一性状最优值; n 为评价性状的个数^[20]。

遗传增益计算公式为

$$\Delta G = \frac{h^2 W}{\bar{X}} \times 100\% \quad (6)$$

式中: W 为选择差; h^2 为性状的重复力; \bar{X} 为某一性状的平均值^[21]。

2 结果与分析

2.1 无性系生长性状描述性统计

无性系生长方面平均值统计结果见表2,树高为19.68 m,胸径为24.01 cm,南北冠幅为5.37 m,东西冠幅为6.3 m,材积为0.422 6 m³。树高最高的3个无性系是456、241、83,树高分别为23.87、23.27、22.23 m,树高最矮的无性系是12,树高为17.10 m;胸径最大的3个无性系是241、759、179,胸径分别为30.73、28.50、28.20 cm,胸径最小的无性系是698,胸径为18.60 cm;东西冠幅最大的无性系是96,为7.60 m,最小的无性系是452,为4.70 m;南北冠幅的最大的无性系是289,为6.70 m,最小的无性系是452,为3.87 m;材积最大的3个无性系是241、456、475,材积分别为0.770 9、0.673 5、0.584 0 m³,材积最小的无性系是698,为0.281 9 m³。

表 2 部分无性系生长性状分析表
Tab. 2 Analysis of growth traits for selected clonal lines

性状 Traits	系号 Clones	均值 Average	PVC/ %
树高/m Tree height	456	23.87 ± 0.40	1.69
	241	23.27 ± 0.83	3.58
	83	22.23 ± 2.43	10.94
	475	21.50 ± 1.14	5.28
	369	21.24 ± 1.31	6.18
	46	17.60 ± 2.00	11.35
	357	17.33 ± 0.93	5.36
	136	17.17 ± 0.65	3.79
	40	17.13 ± 0.78	4.53
	12	17.10 ± 0.17	1.01
胸径/cm Diameter at breast height	241	30.73 ± 2.16	7.03
	759	28.50 ± 0.82	2.87
	179	28.20 ± 4.68	16.6
	96	28.10 ± 1.66	5.92
	456	27.97 ± 1.76	6.3
	136	21.13 ± 6.62	31.33
	171	20.85 ± 2.64	12.64
	46	19.80 ± 6.61	33.41
	334	19.80 ± 4.16	21.01
	698	18.60 ± 3.42	18.4
东西冠幅/m East-west crown width	96	7.60 ± 0.26	3.48
	179	7.57 ± 0.78	10.27
	161	7.37 ± 0.46	6.27
	14	7.35 ± 0.30	4.08
	83	7.30 ± 0.42	5.81
	798	5.48 ± 0.17	3.12
	698	5.13 ± 1.16	22.58
	390	5.08 ± 0.95	18.79
	46	4.70 ± 2.65	56.29
	452	4.70 ± 2.54	53.95
南北冠幅/m North-south crown width	289	6.70 ± 0.35	5.17
	96	6.63 ± 0.83	12.55
	27	6.47 ± 0.64	9.82
	475	6.47 ± 1.86	28.74
	104	6.33 ± 1.36	21.44
	390	4.48 ± 0.59	13.2
	698	4.40 ± 1.10	25
	292	4.30 ± 0.10	2.33
	46	4.07 ± 2.90	71.37
	452	3.87 ± 2.31	59.78
材积/cm ³ Timber volume	241	0.770 9 ± 0.067 2	8.71
	456	0.673 5 ± 0.064 6	9.6
	475	0.584 0 ± 0.183 6	31.44
	96	0.573 8 ± 0.083 7	14.58
	759	0.546 9 ± 0.015 6	2.86
	40	0.308 5 ± 0.066 6	21.58
	334	0.304 1 ± 0.098 7	32.45
	136	0.297 4 ± 0.178 4	59.97
	46	0.283 9 ± 0.170 0	59.87
	698	0.281 9 ± 0.104 0	36.89

注:前 5 系号为均值前 5 名,黑体为均值最后 5 名。下同

Note: The first five clone numbers represent the top five mean values, while the black ones represent the bottom five mean values. The same as below.

2.2 无性系材性性状描述性统计

无性系材性方面平均值统计结果见表3,半纤维

素的总体平均质量分数为14.1536%,质量分数最高的3个无性系是398、172和681,分别是15.4854%、

表3 部分无性系材性性状分析表

Tab. 3 Analysis of wood quality traits for selected clonal lines

性状 Traits	系号 Clones	均值 Average	PVC /%
半纤维素/% Hemicellulose	398	15.485 4 ± 0.429 6	2.774 4
	172	15.350 0 ± 0.779 9	5.080 7
	681	15.136 0 ± 0.850 6	5.619 9
	289	15.076 7 ± 0.398 0	2.639 8
	452	15.063 0 ± 0.916 3	6.083 2
	382	13.272 0 ± 0.512 7	3.863 3
	339	12.756 6 ± 0.854 5	6.698 8
	475	12.687 3 ± 0.230 1	1.814 0
纤维素/% Cellulose	324	12.638 5 ± 0.448 5	3.548 4
	456	12.468 5 ± 0.744 2	5.968 8
	475	49.664 8 ± 0.898 8	1.809 6
	741	49.554 7 ± 1.859 2	3.751 9
	657	49.297 3 ± 0.350 3	0.710 5
	223	48.962 1 ± 2.768 4	5.654 1
	581	48.247 8 ± 0.472 6	0.979 5
	96	43.463 0 ± 2.191 6	5.042 5
木质素/% Lignin	568	43.450 1 ± 2.934 6	6.754 0
	172	43.261 8 ± 1.404 3	3.246 0
	135	43.077 0 ± 2.707 0	6.284 1
	697	42.718 5 ± 0.642 8	1.504 8
	727	32.314 4 ± 3.335 6	10.322 3
	452	31.359 9 ± 3.261 8	10.401 1
	140	31.351 3 ± 1.898 7	6.056 1
	46	31.319 3 ± 2.151 4	6.869 3
综纤维素/% Total cellulose	83	30.918 3 ± 4.804 8	15.540 3
	759	27.010 9 ± 1.685 9	6.241 7
	249	26.509 8 ± 1.173 5	4.426 7
	357	26.095 0 ± 0.993 5	3.807 1
	382	26.022 7 ± 0.204 9	0.787 5
	161	25.509 8 ± 1.220 1	4.782 9
	657	64.133 1 ± 1.010 8	1.576 0
	741	63.652 9 ± 1.454 2	2.284 6
基本密度/(g·cm ⁻³) basic density	223	62.538 4 ± 2.094 5	3.349 2
	475	62.352 1 ± 0.779 1	1.249 5
	581	62.345 4 ± 0.988 1	1.584 9
	140	57.798 2 ± 0.641 6	1.110 1
	135	57.742 7 ± 2.650 8	4.590 7
	83	57.648 3 ± 4.274 4	7.414 5
	339	57.563 3 ± 2.704 9	4.698 9
	697	56.937 2 ± 0.948 5	1.666 0
基本密度/(g·cm ⁻³) basic density	456	0.490 7 ± 0.011 3	2.302 9
	665	0.489 8 ± 0.037 4	7.628 0
	562	0.484 6 ± 0.056 2	11.594 2
	136	0.481 5 ± 0.031 8	6.600 8
	198	0.479 6 ± 0.147 8	30.823 7
	657	0.390 0 ± 0.068 0	17.436 7
	172	0.389 1 ± 0.023 3	6.000 6
	92	0.388 3 ± 0.015 7	4.037 5
基本密度/(g·cm ⁻³) basic density	297	0.367 4 ± 0.015 7	4.270 9
	241	0.361 7 ± 0.004 7	1.292 1

15.350 0% 和 15.136 0%, 质量分数最低的无性系是 456, 为 12.468 5%; 纤维素总体平均质量分数为 45.599 0%, 质量分数最高的 3 个无性系是 475、741 和 657, 分别是 49.664 8%、49.554 7% 和 49.297 3%, 质量分数最低的无性系是 697, 为 42.718 5%; 木质素的平均质量分数为 29.006 3%, 质量分数最高的无性系是 727, 为 32.314 4%, 质量分数最低的无性系是 161, 为 25.509 8%; 综纤维素的平均质量分数为 59.750 0%, 质量分数最高的 3 个无性系是 657、741 和 223, 分别是 64.133 1%、63.652 9% 和 62.538 4%, 质量分数最低的无性系是 697, 为 56.937 2%; 基本密度的总体平均值为 0.432 0 g/cm³, 基本密度最大的 3 个无性系是 456、665、562, 分别为 0.490 7、0.489 8、0.484 6 g/cm³, 基本密度最小的无性系是 241, 为 0.361 7 g/cm³。

2.3 不同无性系间方差分析

对 68 个长白落叶松无性系各性状进行方差齐性检验, 显示各性状方差不齐, 进一步采用韦尔奇方差检验, 见表 4。由表 4 可知, 半纤维素、纤维素、木质素、综纤维素、基本密度、树高、胸径、东西冠幅、南北冠幅、材积的无性系间差异水平平均达到极显著 ($P < 0.01$) 水平。

2.4 不同无性系变异参数分析

长白落叶松生长和材性性状的变异分析见表 4, 各性状的均值及极差反映了研究中各无性系不同性状的大致范围。从变异系数上看, 各性状的变异系数范围在 2.55%~19.71%, 材积的变异系数最大, 综纤维素的变异系数最小; 重复力范围在 0.602~0.924, 树高重复力最高, 其次是基本密度、综纤维素。

表 4 无性系各性状变异分析

Tab. 4 Variation analysis of traits among clonal lines

性状 Traits	树高/m Tree height	胸径/cm Diameter at breast height	东西冠幅/m East-west crown width	南北冠幅/m North-south crown width	材积/cm ³ Timber volume	半纤维素/% Hemicellulose	纤维素/% Cellulose	木质素/% Lignin	综纤维素/% Total cellulose	基本密度/ (g·cm ⁻³) Basic density
最小值 Minimum value	17.10	18.60	4.70	3.87	0.281 9	12.468 5	42.718 5	25.509 8	56.937 2	0.361 7
最大值 Maximum value	23.87	30.73	7.60	6.70	0.770 9	15.485 4	49.664 8	32.314 4	64.133 1	0.490 7
平均值 Average	19.67a	24.08a	6.32a	5.40a	0.424 6a	14.139 9a	45.672 1a	28.970 5a	59.812 0a	0.431 3a
方差 F 值 ANOVA-F	13.204	4.733	4.994	3.714	5.677 0	2.510 0	4.597 0	3.358 0	6.284 0	9.280 0
标准差 Standard deviation	1.29	2.07	0.62	0.58	0.083 7	0.616 6	1.514 4	1.340 2	1.522 3	0.029 6
极差 Range	6.77	12.13	2.90	2.83	0.489 0	3.016 9	6.946 3	6.804 6	7.195 9	0.129 0
PVC	6.56	8.60	9.81	10.74	19.710 0	4.360 0	3.320 0	4.630 0	2.550 0	6.860 0
重复力 Repeatability	0.924	0.789	0.800	0.731	0.824 0	0.602 0	0.782 0	0.702 0	0.841 0	0.892 0

注: 小写字母 a 表示差异达极显著水平 ($P < 0.01$)

Note: The lowercase letter "a" indicates a highly significant difference ($P < 0.01$).

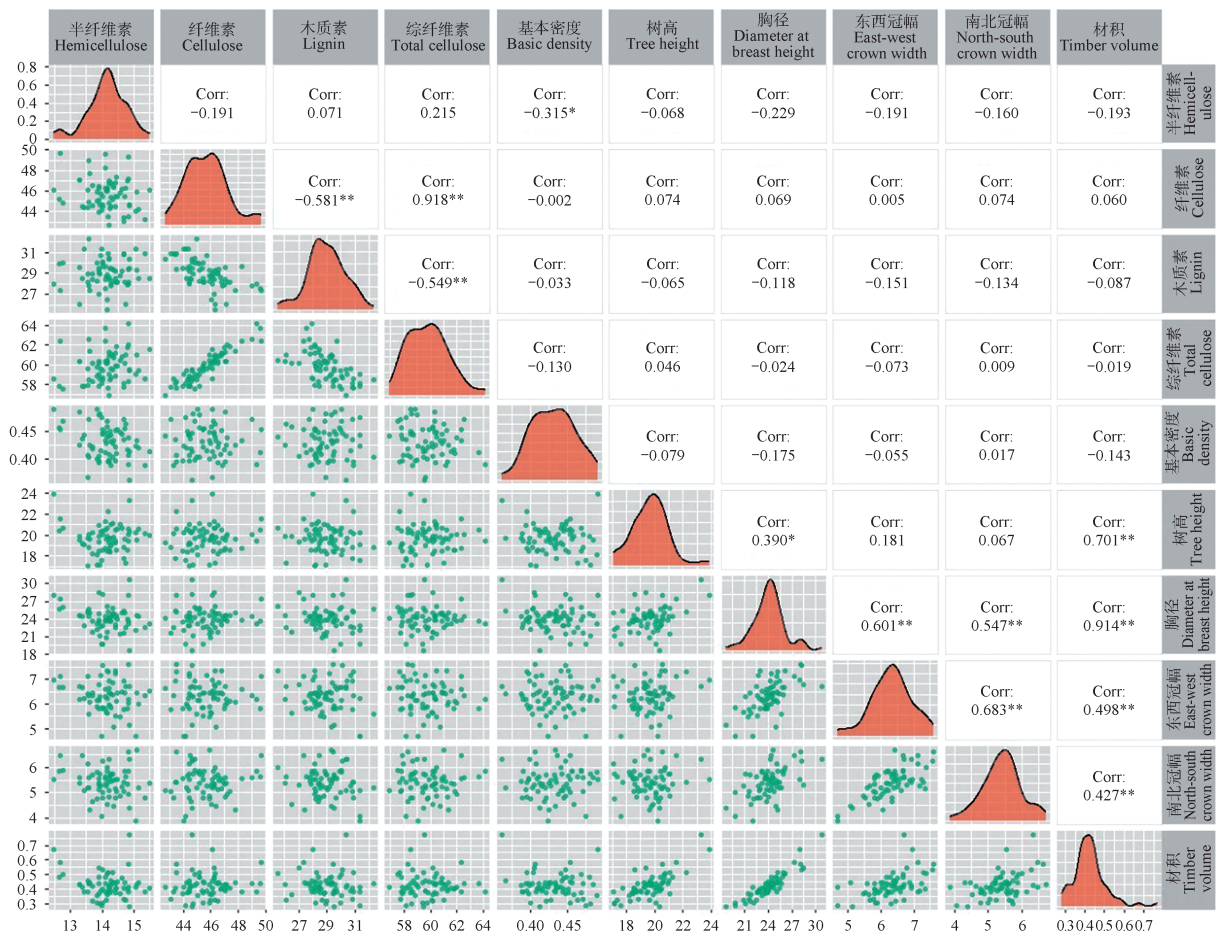
2.5 各性状之间相关性分析

对研究的 68 个无性系的各性状进行相关性分析, 如图 1 所示。由相关性分析得出: 胸径与树高呈显著正相关趋势, 相关系数为 0.390; 东西冠幅与南北冠幅之间呈极显著正相关趋势, 相关系数为 0.683; 材积和胸径与树高都呈极显著正相关, 相关系数分别为 0.914、0.701, 表明材积受胸径影响更大。

纤维素与木质素呈极显著负相关趋势, 相关系数

为 -0.581; 同时, 纤维素与综纤维素呈极显著正相关, 相关系数为 0.918; 木质素与综纤维素呈极显著负相关, 相关系数为 -0.549; 木质素与基本密度相关系数不显著 (-0.033), 这表明试验材料木质素与基本密度没有达到明显的线性关系。

树高和木质素、综纤维素、基本密度之间相关系数分别为 -0.065、0.046、-0.079, 基本呈现不相关趋势。胸径和木质素、综纤维素、基本密度之间相关系数分别



上三角区域显示各变量之间的相关系数;下三角区域展示各指标之间的散点图;对角线展示单个变量的密度分布;**表示 $P < 0.01$, 差异达极显著水平;*表示 $P < 0.05$, 差异达显著水平。

The upper triangle displays the correlation coefficients between variables; the lower triangle shows scatter plots between indicators; the diagonal represents the density distribution of individual variables. ** indicates $P < 0.01$, denoting a highly significant difference, and * indicates $P < 0.05$, denoting a significant difference.

图1 各性状相关性分析

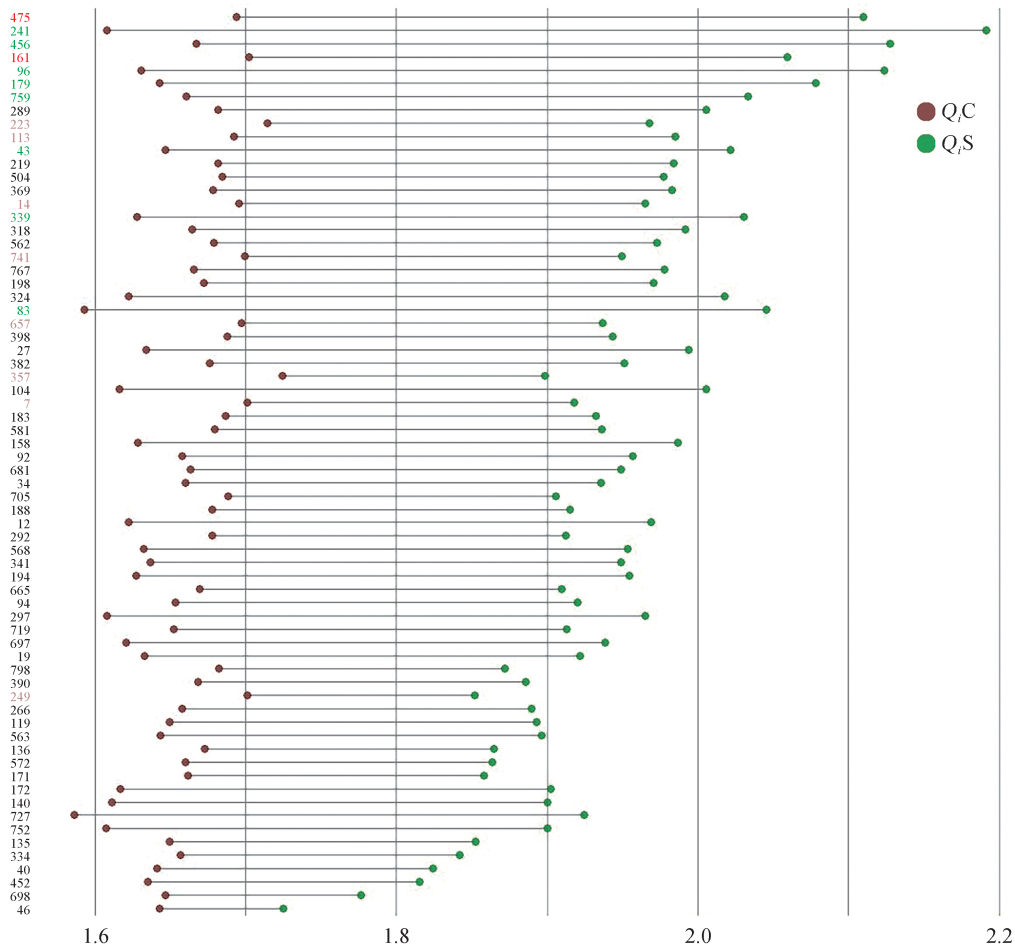
Fig. 1 Correlation analysis of traits

为-0.118、-0.024、-0.175,基本呈现不相关趋势。材积和木质素、综纤维素、基本密度之间相关系数分别为-0.087、-0.019、-0.143,基本呈现不相关趋势。综上所述,主要生长性状和材性性状之间基本不呈现显著相关趋势。

2.6 无性系综合评价

通过结合方差分析和各性状间的相关性分析可以发现,无性系的生长和材性之间相关性较弱,应对68个长白落叶松无性系从生长和材性两方面进行独立综合评价(在材性性状的纸浆材方面,木质素质量分数过高会导致纸张的质量下降,因此评价时采用木质素对应参数的相反数),评价得出 Q_i ,如图2所示,以及根据 Q_i 进行的排名如图3所示。以15%的入选率对长白落叶松进行优良无性系选择,从生长性状选择优良

无性系为241、456、96、475、179、161、83、759、339、43,从材性性状选择优良无性系为357、223、161、7、249、741、657、14、475、113。生长性状选择的优良无性系的树高均值为21.176 m,比群体均值高7.65%,遗传增益为7.07%;胸径均值为27.408 cm,比群体均值高13.83%,遗传增益为10.91%;材积均值为0.572 m³,比群体均值高34.68%,遗传增益为28.58%。材性性状选择的优良无性系的综纤维素平均质量分数为61.77%,比群体均值高3.28%,遗传增益为2.76%;基本密度平均值为0.443 g/cm³,比群体均值高2.81%,遗传增益为2.51%;木质素质量分数为27.32%,比群体均值降低5.7%。评价结果表明,在15%入选率情况下,生长和材性性状表现均优良的无性系为475和161。



纵坐标代表各系号;横坐标代表 Q_i 得分值, Q_iS 为生长性状 Q_i , Q_iC 为材性性状 Q_i 。

The vertical axis represents the clonal line numbers, and the horizontal axis represents the Q_i score values. Q_iS denotes the Q_i for growth traits, and Q_iC denotes the Q_i for wood quality traits.

图 2 各系号评价结果 Q_i 值

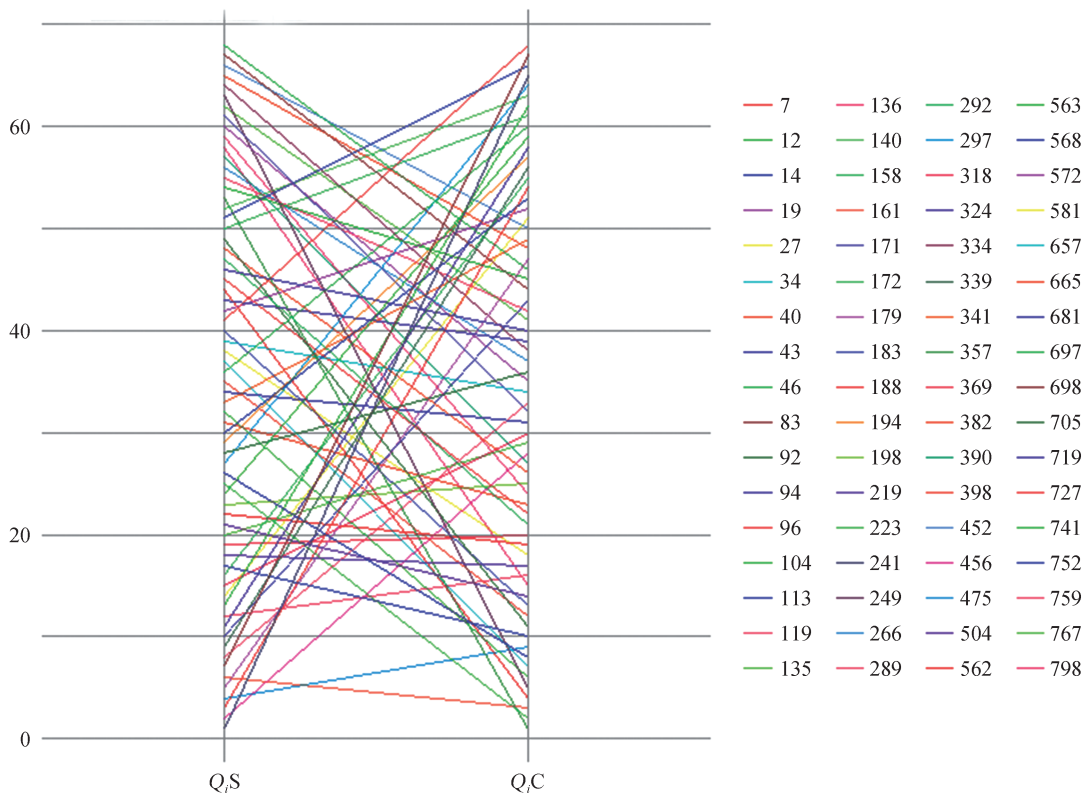
Fig. 2 Evaluation results of clonal lines based on Q_i value

3 讨论

本研究的生长性状分析结果与王金宁等^[22]和王佳兴等^[10]对长白落叶松无性系的研究得出的结论相似,说明长白落叶松各生长性状间有较大差异,对其进行生长性状的选择分析有意义。材性性状方面的分析结果与于宏影等^[16]对长白落叶松纸浆材及王绪等^[15]对杂种落叶松的研究结果相符,进一步证实长白落叶松材性性状间存在显著差异,其单独选择分析具有重要的应用价值。经对 10 个试验性状的相关性分析显示,生长性状与材性性状之间并未呈现显著相关性,这与梁德洋等^[20]对红松无性系及尹绍鹏^[23]对长白落叶松无性系的研究结果相似,可能反映二者之间较低的关联性。因此,单独以生长性状或材性性状进行评估

各具参考意义。贾庆彬等^[24]对杂种落叶松家系的研究发现生长性状与多数材性性状存在正相关关系,而 Belonger 等^[25]对火炬松的研究则指出材积与木材密度之间呈负相关,这些部分差异可能与树种差异、树龄或样本数量等因素有关,提示未来应在更大样本及多因素条件下深入探讨生长性状与材性性状之间的内在联系。基于目前的结果,可以将生长性状与材性性状均表现优良的无性系作为亲本,通过杂交育种培育后代,以期获得同时具备优良生长和材性的新型品种。

此外,无性繁殖因其基因稳定和繁殖速度快等优势,因此对无性系的选育研究是落叶松育种工作中的一个重要环节,也在落叶松种子园建设中具有重要作用。随着分子标记技术及全基因组关联分析的不发



纵坐标为 Q_i 排名; 横坐标代表不同类型得分, $Q_{i,S}$ 为生长性状 Q_i 排名, $Q_{i,C}$ 为材性性状 Q_i 排名。

The vertical axis represents the Q_i ranking, and the horizontal axis represents different types of scores. $Q_{i,S}$ denotes the ranking of Q_i for growth traits, and $Q_{i,C}$ denotes the ranking of Q_i for wood quality traits.

图3 不同系号评价结果 Q_i 值排名

Fig. 3 Ranking of Q_i values for clonal lines based on evaluation results

展, 未来有望筛选出控制生长与材性性状的关键基因, 并借助现代转基因技术培育出兼具两方面优良特征的材料, 从而进一步推动长白落叶松优良品种的生产与应用。

4 结论

通过对黑龙江省牡丹江市林口县青山林场的68个无性系进行生长和材性分析, 方差和变异分析结果显示, 树高、胸径、东西冠幅、南北冠幅以及材积等生长性状间的差异均达极显著水平, 同时半纤维素、纤维素、木质素、综纤维素和基本密度等材性性状的差异亦呈现极显著水平。然后对各无性系的10个试验性状: 半纤维素、纤维素、木质素、综纤维素、基本密度、树高、胸径、东西冠幅、南北冠幅、材积进行相关性分析, 结果表明主要生长性状如树高、胸径、材积等与主要材性性状木质素质量分数、综纤维素质量分数、基本密度等之间不呈现显著相关性。经无性系综合评价后以15%的入选率对长白落叶松进行优良无性系选择, 从生长性

状选择优良无性系为241、456、96、475、179、161、83、759、339、43, 从材性性状选择优良无性系为357、223、161、7、249、741、657、14、475、113。最后综合评价结果表明在15%入选率情况下, 生长和材性性状表现均优良的无性系为475和161。

参考文献

- [1] 马常耕, 孙晓梅. 我国落叶松遗传改良现状及发展方向[J]. 世界林业研究, 2008(3): 58-63.
MA C G, SUN X M. Larch genetic improvement and its future development in China [J]. World Forestry Research, 2008(3): 58-63.
- [2] 贾治邦. 中国森林资源报告: 第七次全国森林资源清查[M]. 北京: 中国林业出版社, 2009.
JIA Z B. China forest resource report: The 7th national forest resource survey [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2009.
- [3] 邓继峰. 杂种落叶松自由授粉家系纸浆材遗传变异研究及多性状联合选择[D]. 哈尔滨: 东北林业大学,

- 2011.
- DENG J F. Genetic variations in pulpwood qualities of generation of open-pollinated hybrid *Larch* and multi-traits selection[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2011.
- [4] 张丹丹,李翔,王璧莹,等. 长白落叶松种子园亲本无性系生长性状变异研究[J]. 植物研究, 2022, 42(1): 130-137.
- ZHANG D D, LI X, WANG B Y, et al. Variation analysis of growth traits of *Larix olgensis* parental clones in seed orchards[J]. Bulletin of Botanical Research, 2022, 42(1): 130-137.
- [5] 王军辉,陆熙娴,张守攻. 落叶松制浆造纸适应性及开发利用前景[J]. 中国造纸, 2004(6): 47-52.
- WANG J H, LU X X, ZHANG S G. Larch: Its adaptability and potential of pulping and papermaking[J]. China Pulp & Paper, 2004(6): 47-52.
- [6] 周崑. 中国落叶松属木材[M]. 北京: 中国林业出版社, 2001.
- ZHOU Y. Wood of *Larix* species in China[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2001.
- [7] 李巍巍. 不同种源长白落叶松生长与纸浆材材性研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2009.
- LI W W. Research on the growth and pulpwood properties of different provenances of *Larix olgensis* Henry[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2009.
- [8] 王树力,吴济生,仲崇淇. 长白落叶松纸浆林木材材性及纸浆特性的研究[J]. 林业科学, 1997(3): 283-288.
- WANG S L, WU J S, ZHONG C Q. Studies on wood property and pulp characteristics of wood from *Larix olgensis* pulp plantation[J]. Scientia Silvae Sinicae, 1997(3): 283-288.
- [9] 邓继峰,张含国,张磊,等. 杂种落叶松 F_2 代自由授粉家系纸浆材遗传变异及多性状联合选择[J]. 林业科学, 2011, 47(5): 31-39.
- DENG J F, ZHANG H G, ZHANG L, et al. Genetic variations in pulpwood qualities of F_2 generation of open-pollinated *Larch* hybrid families and multi-traits selection[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2011, 47(5): 31-39.
- [10] 王佳兴,闫平玉,孙佰飞,等. 长白落叶松自由授粉家系生长变异及优良家系早期选择[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2024, 48(5): 81-89.
- WANG J X, YAN P Y, SUN B F, et al. Growth variation and superior families early selection of *Larix olgensis* free-pollinated families[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2024, 48(5): 81-89.
- [11] FRIES A. Genetic parameters, genetic gain and correlated responses in growth, fibre dimensions and wood density in a Scots pine breeding population[J]. Annals of Forest Science, 2012, 69(7): 783-794.
- [12] 赖猛. 落叶松无性系遗传评价与早期选择研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2015.
- LAI M. Genotypic evaluation and early selection of *Larix* clones[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2015.
- [13] 陆文达,刘一星,崔永志. 不同地理种源的人工林长白落叶松木材材性的研究[J]. 木材工业, 1993(1): 34-37.
- LU W D, LIU Y X, CUI Y Z. A study on the wood properties of the geographic provenances of plantation of *Larix olgensis*[J]. China Wood Industry, 1993(1): 34-37.
- [14] 李艳霞,张含国,邓继峰,等. 长白落叶松木芯基本密度与材性指标相关及建筑材优良家系选择研究[J]. 北京林业大学学报, 2012, 34(5): 6-14.
- LI Y X, ZHANG H G, DENG J F, et al. Correlations among wood density, wood physical mechanics index and growth trait, and selection of elite families for production of building products in *Larix olgensis*[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2012, 34(5): 6-14.
- [15] 王绪,张含国,张磊,等. 杂种落叶松纸浆材优良家系选择[J]. 东北林业大学学报, 2015, 43(4): 1-4.
- WANG X, ZHANG H G, ZHANG L, et al. Superior family selection of hybrid *Larch* for pulp material[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2015, 43(4): 1-4.
- [16] 于宏影,张含国,闫晓娜,等. 凉水地区长白落叶松纸浆材优良种源选择[J]. 温带林业研究, 2018, 1(1): 58-62.
- YU H Y, ZHANG H G, YAN X N, et al. Superior pulpwood provenance selection of *Larix olgensis* in Liangshui, Heilongjiang Province[J]. Journal of Temperate Forestry Research, 2018, 1(1): 58-62.
- [17] 张鑫鑫,夏辉,赵昕,等. 长白落叶松种子园亲本生长与结实性状综合评价[J]. 植物研究, 2017, 37(6): 933-940.
- ZHANG X X, XIA H, ZHAO X, et al. Comprehensive evaluation of growth and fruit traits of *Larix olgensis* parents in seed orchard[J]. Bulletin of Botanical Research, 2017, 37(6): 933-940.
- [18] 夏辉. 长白落叶松种子园优良亲本评价选择[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2018.
- XIA H. Evaluation and selection of excellent parents in *Larix olgensis* seed orchard[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2018.
- [19] 续九如. 林木数量遗传学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.

- XU J R. Quantitative genetics of trees [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [20] 梁德洋, 金允哲, 赵光浩, 等. 50 个红松无性系生长与木材性状变异研究[J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(6): 51-59.
- LIANG D Y, JIN Y Z, ZHAO G H, et al. Variance analyses of growth and wood characteristics of 50 *Pinus koraiensis* clones [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2016, 38(6): 51-59.
- [21] 朱之悌. 林木遗传学基础 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1990.
- ZHU Z T. The basic of tree genetics [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1990.
- [22] 王金宁, 侯丹, 张含国, 等. 长白落叶松生长变异及优良家系选择研究[J]. 森林工程, 2018, 34(1): 6-12.
- WANG J N, HOU D, ZHANG H G, et al. Genetic variation on growth characters and family selection of *Larix olgensis* Henry [J]. Forest Engineering, 2018, 34(1): 6-12.
- [23] 尹绍鹏. 长白落叶松 (*Larix olgensis*) 优良无性系评价选择及木材性状 SNP 关联分析 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2018.
- YIN S P. The evaluation and selection of *Larix olgensis* excellent clones and SNP correlation analysis of wood property [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2018.
- [24] 贾庆彬, 张含国, 张磊, 等. 杂种落叶松家系变异分析与优良家系选择 [J]. 东北林业大学学报, 2016, 44(4): 1-7.
- JIA Q B, ZHANG H G, ZHANG L, et al. Variation analysis of hybrid *Larch* families and superior families selection [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2016, 44(4): 1-7.
- [25] BELONGER P J, MCKE S E, JETT J B. Genetic and environmental effects on biomass production and wood density in Loblolly pine [J]. Tree Improvement for Sustainable Tropical Forestry, 1996(2): 307-310.