

中南林业科技大学学报

Journal of Central South University of Forestry & Technology

ISSN 1673-923X，CN 43-1470/S

《中南林业科技大学学报》2026年第9期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.09.009

论文标题： 雪灾后木荷家系表型适应性与抗灾能力评价

作　　者： 蔡宗明，丁 颖，周志春，等

收稿日期： 2025-08-11

引文格式： 蔡宗明,丁颖,周志春,等.雪灾后木荷家系表型适应性与抗灾能力评价[J].中南林业科技大学学报,2026,46(9):98-110.

Cai Z M, Ding Y, Zhou Z C, et al. Evaluation of phenotypic adaptability and disaster resistance of *Schima superba* families after snow disaster[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(9):98-110.

相关论文推荐

Recommended articles

木荷初级种子园花期同步性与无性系优化配置

Synchronization of flowering and optimal clonal configuration in primary *Schima superba* seed orchard

木荷种子园自由授粉家系生长遗传变异及初选

Genetic variation and selection of the free-pollinated families in *Schima superba* seed orchard

闽楠-木荷混交林空间结构及其养分利用

Spatial structure and nutrient utilization of mixed forest of *Phoebe bournei* and *Schima superba*

闽楠木荷混交幼林生长规律及生物量分布特征研究

Study on growth regularity and biomass distribution feature of *Phoebe bournei-Schima superba* young mixed forest

广东木荷各器官含碳率及碳储量研究

Component specific carbon contents and storage of *Schima superba* in Guangdong Province

广东木荷资源的基因型特征分析

Genotypic characteristics of *Schima superba* resources from Guangdong Province

马尾松木荷不同比例混交林植被碳密度特征

Carbon density of vegetation of mixed plantation of *Pinus massoniana* and *Schima superba* in different proportions

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.09.009 http: //qks.csuft.edu.cn

雪灾后木荷家系表型适应性与抗灾能力评价

蔡宗明[1, 2]，丁 颖[1, 2]，周志春[3]，刘 仁[1, 2]，姚甲宝[1, 2]，肖 斌[1, 2]，徐克芹[1, 2]，
袁 媛[1, 2]，万 晨[1, 2]，丁业新[1, 2]

（1. 中国林业科学研究院亚热带林业实验中心，江西 分宜 336600；2. 生物多样性保护与资源利用江西省重点实验室，江西 分宜 336600；3. 中国林业科学研究院亚热带林业研究所，浙江 杭州 311400）

摘 要：【目的】研究不同木荷 *Schima superba* 家系在雪灾后的表型适应性及抗性机制，为木荷的抗灾育种与种质资源改良提供理论依据。【方法】以 24 个受雪灾影响的木荷家系为研究对象，测定其胸径、树高、冠幅等 13 项表型及灾后林木受损指标，采用方差分析、相关性分析、聚类分析及主成分分析法，系统探讨不同木荷家系表型特征与抗灾能力的关联。【结果】1）不同木荷家系在生长性状和冠形特征上表现出显著差异，龙泉 15（LQ15）、信丰 02（XF02）、建瓯 30（JO30）、建瓯 58（JO58）、庆元 10（QY10）家系的胸径远高于平均值（5.47 cm），表现出速生潜力。云霄 01（YX01）家系以低矮树高（2.8 m）提高生存率。兰溪 02（LX02）和华安 02（HA02）家系的枝下高及自然整枝能力突出。2）木荷家系冠层生长策略分化明显，建瓯 16（JO16）家系通过冠层扩展提升资源利用效率，而 YX01 家系则采取抑制冠层扩张策略以适应雨雪灾害环境。3）木荷家系对雨雪灾害的敏感性存在显著差异，YX01 家系受损率最高，其抗机械损伤能力弱，而 LX02 和 JO16 家系则表现出较强的抗雪灾能力，未受明显损害。4）生长性状与抗灾能力显著相关，胸径、树高等与受损率、平均受损级别和受损指数呈负相关（$P < 0.05$），枝下高比例、树冠体积和树冠高度等因素与木荷的损伤程度存在显著正相关关系，反映了它们在高胁迫环境下的脆弱性。5）主成分分析显示，LX02、JO16、龙泉 01（LQ01）、建瓯 5（JO5）和 XF02 家系在表型特征方面综合表现最优，累计贡献率达 92.735%。【结论】LX02、JO16、LQ01、JO5 和 XF02 家系兼具生长潜力与抗灾适应性，可作为优先选育材料，YX01 家系则不适合作为育种材料。木荷后续培育应贴合应用需求，依据其生长潜力与抗灾性能择优选育、定向培育。

关键词：木荷；家系；雪灾；表型特征；林木受损指数

中图分类号：S718.51+9 **文献标志码：**A **文章编号：**1673-923X(2026)09-0098-13

Evaluation of phenotypic adaptability and disaster resistance of *Schima superba* families after snow disaster

Cai Zongming[1,2], Ding Ying[1,2], Zhou Zhichun[3], Liu Ren[1,2], Yao Jiabao[1,2], Xiao Bin[1,2], Xu Keqin[1,2], Yuan Yuan[1,2], Wan Chen[1,2], Ding Yexin[1,2]

(1. Experimental Center of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Fenyi 336600, Jiangxi, China;
2.Biodiversity Conservation and Resource Utilization of Jiangxi Provincial Key Laboratory, Fenyi 336600, Jiangxi, China;
3.Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou 311400, Zhejiang, China)

Abstract:【Objective】To explore the phenotypic adaptability and resistance mechanism of different *Schima superba* families after snow disaster, and to provide a theoretical basis for breeding and disaster resistance improvement of *S. superba*.【Method】Taking 24 *S. superba* families affected by snow disaster as the research object, 13 phenotypes such as DBH, tree height and crown width and forest damage indexes were measured. The correlation between phenotypic characteristics and disaster resistance of families was comprehensively evaluated by variance analysis, correlation analysis, cluster analysis and principal component analysis.【Result】1) Different families of *S. superba* showed significant differences in growth traits and crown shape characteristics. The DBH of LQ15, XF02, JO30, JO58 and QY10 families was much higher than the average value of 5.47 cm, showing fast-growing potential. The YX01 family enhanced the survival rate with low tree height (2.8 m). The branch height and natural pruning ability of LX02 and HA02 families were

收稿日期（Received）：2025-08-11 **修订日期**（Revised）：2025-10-20
基金项目：江西省重点研发计划项目（20252BCF320009）；江西省自然科学基金项目（20232BAB205047）；中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金（CAFYBB2023QC001）；新余市科技计划项目（余科发〔2024〕44 号）。
第一作者：蔡宗明（cafczm1998@163.com），助理工程师，硕士。 **通信作者：**肖斌（ylzx7626@163.com），硕士，工程师。
引文格式：蔡宗明 , 丁颖 , 周志春 , 等 . 雪灾后木荷家系表型适应性与抗灾能力评价 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026,46(9):98-110.
Cai Z M, Ding Y, Zhou Z C, et al. Evaluation of phenotypic adaptability and disaster resistance of *Schima superba* families after snow disaster[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(9):98-110.

outstanding; 2) The JO16 family improved resource utilization efficiency through canopy expansion, while the YX01 family adopted a strategy of inhibiting canopy expansion to adapt to the rain and snow disaster environment; 3) There were significant differences in the sensitivity of *S. superba* families to rain and snow disasters. The YX01 family had the highest damage rate and its resistance to mechanical damage was weak, while the LX02 and JO16 families showed strong resistance to snow disasters and were not significantly damaged; 4) Growth traits were significantly correlated with disaster resistance. DBH and tree height were negatively correlated with damage rate, average damage level and damage index ($P < 0.05$). The proportion of branch height, crown volume and crown height were significantly positively correlated with the damage degree of *S. superba* , reflecting their vulnerability under high stress environment; 5) Principal component analysis (cumulative contribution rate of 92.735%) showed that LX02, JO16, LQ01, JO5 and XF02 families performed best in phenotypic characteristics.【Conclusion】The LX02, JO16, LQ01, JO5 and XF02 families have both growth potential and disaster resistance adaptability, and can be used as priority breeding materials. The YX01 family is not suitable as a breeding material. In the future cultivation of *S. superba*, reasonable selection and cultivation should be carried out according to the growth potential and disaster resistance of *S. superba*.

Keywords: *Schima Superba*; family; snow disaster; phenotypic characteristics; forest damage index

随着全球气候变化的加剧，极端天气事件的发生频率和强度逐年上升，气候变化不仅对人类生活产生深远影响，还对生态环境和生物多样性构成了巨大的挑战 [1]。雪灾作为一种突发性且具有强大破坏力的气候现象，越来越成为影响森林资源和生态系统稳定性的重要因素之一 [2]。在森林生态系统中，雪灾是重要的非生物干扰因子，对林业发展产生显著的负面影响。雪灾通过减少木材的产量和降低木材质量，给林业经济带来重大损失 [3]，尤其在我国南方及部分中高纬度地区，雪灾的频繁发生对森林植被、农业生产以及生态环境的破坏不容忽视。2008 年 1—2 月，我国南方地区出现了罕见的大范围低温、雨雪和冰冻灾害，对该地区的人民生命财产安全和经济发展造成了巨大损失 [4]。2024 年初，我国中东部地区遭受大范围且持续性的低温雨雪冰冻天气，对森林造成了严重破坏 [5]。雪灾不仅影响了树木的生长，还削弱了树木抵御自然灾害的能力，增加了病虫害等次生灾害的风险，导致森林生态系统多种服务功能受损，从而降低森林的生态价值 [6-7]。面对这种挑战，如何增强森林植物对雪灾的抗性并筛选高雪灾抗性良种，成为林业领域亟待解决的关键问题。

木荷 *Schima superba* 为我国南方地区重要的经济与生态树种，具有广泛的应用价值 [8]。木荷不仅在生态保护、土壤保持、空气净化等方面发挥着重要作用，而且其木材在建筑、家具等行业中有着较高的经济价值 [9-10]。木荷分布广泛，在长期适应不同地理环境的过程中形成了丰富的表型变异，地理种源变异为木荷改良提供了宝贵的材料 [11]。周志春等 [12] 研究发现，37 个产地的 3 年生木荷种源在树高、地径和分枝性状上均存在显著的种源效应。姚甲宝等 [13] 研究发现，不同木荷种源在不同养分条件下的生长和根系发育存在较大差异，福建建瓯种源的生长表现优异。余琳等 [14] 研究发现，28 个木荷种源的幼苗在生物量分配方面存在显著差异。也有研究发现，不同木荷种源在生长和形质性状上存在显著差异 [15]，6 年生和 7 年生木荷的生长和木材基本密度受种源地温度影响，呈典型的纬度变异模式 [16]。然而，木荷的生长与发展，尤其是在极端气候条件下的表现，仍然缺乏系统的研究，尤其是雪灾这一气候现象，其对木荷的影响尚未得到充分重视。王刚 [17]、葛晓改等 [18] 和李晓靖 [19] 开展了木荷受雪灾干扰的相关研究，但也仅关注雪灾对林窗的影响以及木荷的恢复。木荷对环境变化虽具备一定的适应性，但在遭遇雪灾时，其受损程度往往因种源的不同而存在较大差异。有的木荷家系能够承受较大的积雪压力并保持较高的生长势，而有的家系则可能因枝干折断、树冠受损甚至死亡等原因大幅度降低生长势和生产力。不同木荷家系对雪灾的适应能力和抗性差异，是决定木荷能否在不稳定的气候条件下稳定生长和发展的关键因素。因此，筛选出具有较强雪灾抗性的木荷家系，并对其进行科学的抗性评价，不仅对木荷的保护和发展具有重要意义，也对制定相应的林业管理策略和改良木荷种质资源具有现实价值。林木受损指数作为一种科学的评估工具，能够较为全面地反映木荷家系在雪灾中的表现 [20]。基于林木受损指数来评估不同木荷家系在遭遇雪灾后的抗性表现，探索木荷在极端天气条件下的生长表现与适应机制，为木荷家系的筛选、保护及未来育种工作提供理论支持和技术依据。

因此，本研究以受雪灾影响的 24 个木荷家系为研究对象，对其表型特征进行调查与分析，结合林木受损指数等量化指标，对木荷家系的抗性进行筛选与评价，揭示其在雪灾等极端气候事件中的抗性差异，从生长特性及抗性特征方面筛选

优质家系，为未来林业管理和生态恢复提供科学依据和可行方案。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于江西省新余市分宜县中国林业科学研究院亚热带林业实验中心长埠实验林场，地理坐标为 114°36′27″ E、27°34′06″ N，海拔为 302 m，属亚热带湿润季风气候，年平均日照时间约 1 512 h，年平均气温 17.5 ℃，平均年降水量 1 650 mm，降水集中在 4—6 月，6 月最多，无霜期约 270 d。母岩为千枚岩，土壤为红壤，土层厚度大于 80 cm，土壤肥力较好，适宜木荷生长。

1.2 试验设计

2019 年 4—5 月在长埠实验林场花园村东北侧进行木荷种源林造林试验，木荷为 2 年生容器苗。试验采用随机区组设计，共设置 5 个重复（区组）。参试材料为 24 个家系，每个区组内设置 24 个家系小区，各家系小区在区组内随机排列，且小区行向与环境梯度方向垂直。每个家系小区列植 8 株，株行距为 2.0 m×2.5 m；区组间设置 3 m 缓冲带，样地总面积为 0.8 hm²。造林当年进行缺株补植，此后每年除草 2 次。

1.3 受灾木荷林分调查

2024 年 1 月 21—23 日，新余市分宜县发生雨雪冰冻灾害，长埠实验林场花园村木荷种源林遭受极端冰雪灾害胁迫，林分内植株产生不同程度的冻害与机械损伤。为收集不同种源木荷林木的受损情况，于 2024 年 6 月在长埠实验林场花园村木荷种源林内进行林木受损状况调查，共调查 5 个重复。调查内容包括胸径、树高、枝下高、冠幅、通直度、损伤等级和损伤数量等。林木损伤级别共分为 6 级 [2]，分别为树干和树枝未受损坏且基本正常（0 级）、树干压弯（1 级）、少量断枝（2 级）、大量断枝（3 级）、严重断梢或严重断枝（4 级）、主干折断、倒伏或死亡（5 级）。木荷 24 个家系的基本情况见表 1。

表 1 木荷家系的基本信息

Table 1 Basic information of *Schima superba* families

序号 No.	家系 Family	来源 Provenance	简称 Abbreviation	家系数量 Number of families	家系简称 Family abbreviation
1	1	福建云霄	YX	1	YX01
2	1、2	浙江兰溪	LX	2	LX01、LX02
3	1、2、15、27、14、26	浙江龙泉	LQ	6	LQ01、LQ02、LQ15、LQ27、LQ14、LQ26
4	1、2	江西信丰	XF	2	XF01、XF02
5	2	福建华安	HA	1	HA02
6	26、5、59、16、6、45、13、53、30、58	福建建瓯	JO	10	JO26、JO5、JO59、JO16、JO6、JO45、JO13、JO53、JO30、JO58
7	1、10	浙江庆元	QY	2	QY1、QY10

1.4 指标测定

根据调查数据，计算木荷家系的平均受损级别、损伤指数、枝下高比例、平均冠幅、树冠高度、树冠圆满度、树冠体积、树冠表面积和通直度等指标 [21-22]，其中平均受损级别、林木损伤指数的计算方法如下。

平均受损级别（D_{AL}）：

$$D_{AL}=\sum_{i=0}^{5}(D_{Li}\times n_i)/N \text{。} \quad (1)$$

式（1）中：D_{AL} 为平均受损级别；D_{Li} 为 i 级损伤级别；n_i 为损伤级别为 i 的株数；N 为同一家系木荷林调查样本总株数。

林木损伤指数（I_D）：

$$I_D=\sum_{i=0}^{5}(D_{Li}\times n_i)/(D_{Lmax}\times N) \text{。} \quad (2)$$

式（2）中：D_{Lmax} 为最大损伤级别，本文中为 5。

通直度参照傅斌烨 [23] 的方法进行统计并计分。通直度分为Ⅰ～Ⅴ级，Ⅰ级表示最通直，评分为 5；Ⅴ级表示最弯曲，评分为 1。

1.5 数据处理及分析

使用 WPS Office 软件进行数据汇总，使用 SPSS 26.0 软件对不同木荷家系各项指标进行方差分析，以 $P<0.05$ 表示差异显著，使用 OriginPro 2024 软件进行相关性分析、聚类分析和主成分分析并制图。

2　结果与分析

2.1　不同木荷家系的表型特征差异

由表 2 可知，不同木荷家系的生长性状存在较大差异，24 个木荷家系的胸径为 3.95 ～ 8.01 cm，LQ15 家系的胸径最大（8.01 cm），XF02、JO30、JO58、QY10 家系的胸径均在 6.00 cm 以上，远高于平均值（5.48 cm），而 LQ27 家系的胸径最小，仅为 3.95 cm，显著低于其他家系（$P < 0.05$），这表明木荷家系胸径生长存在显著遗传分异。LQ15 等 5 个家系具有速生潜力，而 LQ27 家系的极端低值暗示其独特的抗逆资源分配策略。LX02、LQ01、LQ27、LQ26 以及 JO16 家系的树高均在 5.00 m 以上，远高于平均树高（4.43 m），YX01 家系树高最低（2.80 m），这表明 YX01 家系的极端低树高（2.80 m）与部分较高树高家系（树高大于 5.00 m）形成双峰分布，揭示了木荷家系在资源分配上存在显著分异，其中 YX01 可能通过抑制高生长以换取高雪灾抗性。24 个木荷家系平均枝下高为 0.48 m，LX02 和 HA02 家系枝下高最高，为 0.68 m，是 QY10 家系的 2.83 倍，表明其具有显著的自然整枝能力与顶端优势，揭示其具备应对雪灾胁迫的适应性进化优势。此外，LX01、HA02、JO26、JO6、JO45 和 JO13 家系的枝下高比例要显著高于其他家系（$P < 0.05$），表明木荷遗传特性驱动了枝下高的显著分异，反映出木荷家系在抗雪灾适应策略上的本质差异。YX01、LX01 和 QY10 家系通直度评分均在 3.0 以上，LQ26 家系通直度评分最低，为 1.88，显著低于其他木荷家系（$P < 0.05$），这表明 YX01、LX01 与 QY10 家系的生长质量显著优于其他家系。

由表 3 可知，24 个木荷家系受雪灾影响后，在早期的恢复过程中表现出不同的冠形特征。JO16 家系的冠形特征均较优，其中平均冠幅、树冠体积和树冠表面积均显著高于其他家系（$P < 0.05$），分别为 2.36 m、8.37 m^3 和 19.16 m^2，表

表 2　不同家系木荷生长性状和干形性状差异分析 †

Table 2　Differences in growth and stem-form traits among *Schima superba* families

家系 Family	胸径 DBH /cm	树高 Tree height /m	枝下高 Height to crown base /m	枝下高比例 Crown base height ratio /%	通直度 Stem straightness
YX01	5.10±0.49 bcd	2.80±0.36 e	0.33±0.03 efgh	12.27±1.47 b	3.00±0.32 ab
LX01	5.74±0.67 bc	3.91±0.39 abcd	0.55±0.06 abcd	14.97±2.01 a	3.00±0.44 ab
LX02	5.58±0.45 bc	5.31±0.33 ab	0.68±0.10 a	12.49±1.29 b	2.38±0.38 ab
LQ01	5.89±0.34 bc	5.41±0.45 a	0.51±0.05 abcd	9.83±1.12 de	2.63±0.38 ab
LQ02	4.43±0.40 cd	4.85±0.34 abcd	0.51±0.07 abcd	11.03±2.09 c	2.00±0.33 bc
LQ15	8.01±0.42 a	4.83±0.40 abcd	0.31±0.03 fghi	6.55±0.51 fg	2.38±0.18 ab
LQ27	3.95±0.38 d	5.00±0.34 abcd	0.28±0.01 hi	5.88±0.55 h	2.50±0.19 abc
LQ14	5.48±0.36 bc	4.95±0.32 abcd	0.38±0.03 defg	7.80±0.50 efgh	2.00±0.19 bc
LQ26	5.68±0.90 bc	5.01±0.45 abcd	0.29±0.02 ghi	6.15±0.65 gh	1.88±0.23 c
XF01	4.67±0.36 cd	4.70±0.77 abcd	0.53±0.04 abcd	13.12±2.46 b	2.50±0.67 abc
XF02	6.09±0.49 bc	4.44±0.45 abcd	0.50±0.05 abcde	11.85±1.31 b	2.88±0.30 abc
HA02	5.65±0.48 bc	4.04±0.69 abcd	0.68±0.09 a	18.89±2.42 a	2.13±0.23 ab
JO26	4.63±0.32 cd	3.79±0.61 bcde	0.45±0.04 cdef	14.17±2.79 a	2.63±0.18 ab
JO5	5.63±0.24 bc	4.55±0.46 abcd	0.49±0.03 bcde	11.12±0.93 c	2.00±0.01 bc
JO59	5.27±0.31 bc	4.75±0.46 abcd	0.55±0.03 abcd	12.53±1.99 b	2.83±0.31 ab
JO16	5.16±0.68 bc	5.21±0.51 abc	0.52±0.05 abcd	10.66±1.49 c	2.43±0.30 abc
JO6	4.96±0.38 bc	3.88±0.45 abcd	0.52±0.04 abcd	14.68±1.94 a	2.38±0.26 ab
JO45	5.77±0.58 bc	4.10±0.37 abcde	0.65±0.11 ab	16.25±2.63 a	2.57±0.43 ab
JO13	5.58±0.52 bc	3.63±0.42 de	0.62±0.08 abc	17.54±2.22 a	2.50±0.33 abc
JO53	4.70±0.58 cd	4.40±0.58 abcd	0.51±0.05 abcd	12.64±1.71 b	2.71±0.36 ab
JO30	6.14±0.47 bc	4.66±0.41 abcd	0.58±0.03 abc	12.89±0.89 b	2.75±0.16 ab
JO58	6.61±0.34 ab	4.28±0.33 abcd	0.47±0.04 bcde	11.67±1.44 c	2.38±0.18 ab
QY1	4.64±0.19 cd	3.73±0.39 cde	0.46±0.03 bcde	13.21±1.47 b	2.38±0.18 ab
QY10	6.15±0.77 bc	4.04±0.28 abcd	0.24±0.03 i	6.45±1.33 fg	3.13±0.30 a
平均值 Mean	5.48	4.43	0.48	11.86	2.50

† 同列不同小写字母表示不同木荷家系间差异显著（$P < 0.05$），下同。
Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among different *Schima superba* families ($P < 0.05$), the same below.

明其在资源利用方面具有更强的优势，能够更好地利用生长空间，从而促进其健康生长，提升生产潜力。而 YX01 家系则相反，除树冠圆满度外，其冠幅的各项指标均低于 24 个木荷家系的平均值，其中树冠高度、树冠体积和树冠表面积均最低，分别为 2.47 m、2.08 m^3 和 6.98 m^2，显著低于其他家系（$P < 0.05$），说明 YX01 家系呈现出胁迫适应性，其极端受限的冠层发育与空间竞争能力反映其对高胁迫环境的深度适应，可能通过抑制冠层扩张换取雪灾存活率提升。

表 3 不同木荷家系冠形特征及空间利用能力差异分析

Table 3 Differences in crown-form traits and spatial utilization capacity among *Schima superba* families

家系 Family	平均冠幅 Mean crown diameter /m	树冠高度 Crown length /m	树冠圆满度 Crown fullness ratio	树冠体积 Crown volume /m^3	树冠表面积 Crown surface area /m^2
YX01	1.57±0.33 cde	2.47±0.35 d	0.63±0.12 ab	2.08±0.79 d	6.98±1.97 d
LX01	2.24±0.19 abc	3.37±0.40 bcd	0.69±0.06 a	4.97±1.22 ab	13.02±2.30 abcd
LX02	2.35±0.13 ab	4.64±0.26 ab	0.51±0.02 abcd	7.09±1.17 ab	17.96±1.95 ab
LQ01	2.18±0.11 abcd	4.90±0.44 a	0.46±0.04 bcde	6.42±0.83 ab	17.56±1.89 ab
LQ02	1.89±0.28 abcd	4.34±0.37 abc	0.42±0.04 bcde	5.35±2.07 ab	14.21±3.35 abc
LQ15	1.64±0.09 bcde	4.51±0.38 abc	0.39±0.05 cdef	3.10±0.23 bcd	11.59±0.68 abc
LQ27	1.71±0.14 abcd	4.72±0.34 ab	0.37±0.03 def	3.92±0.75 bc	13.14±1.65 abc
LQ14	1.54±0.10 cde	4.57±0.31 ab	0.34±0.01 f	3.07±0.63 bc	11.50±1.49 abcd
LQ26	1.58±0.23 cde	4.72±0.45 ab	0.34±0.05 f	3.85±1.49 bc	12.43±2.74 abc
XF01	1.80±0.13 abcde	4.17±0.75 abc	0.58±0.18 abcd	3.59±0.84 bc	12.10±2.23 abcd
XF02	2.19±0.28 abcd	3.93±0.43 abcd	0.58±0.08 abcd	5.83±1.44 ab	14.74±2.73 abc
HA02	1.46±0.22 de	3.36±0.61 bcd	0.48±0.07 abcd	2.58±0.76 cd	8.92±2.19 cd
JO26	1.68±0.26 abcd	3.34±0.59 bcd	0.53±0.07 abcd	3.76±1.45 bc	10.68±3.07 bcd
JO5	2.24±0.13 abc	4.06±0.44 abc	0.58±0.05 abcd	5.64±1.00 abcd	15.15±2.06 abc
JO59	1.73±0.18 abcd	4.20±0.48 abc	0.42±0.02 bcde	3.77±0.82 bc	12.28±2.11 abc
JO16	2.36±0.30 a	4.69±0.51 ab	0.51±0.05 abcd	8.37±2.25 a	19.16±3.87 a
JO6	1.84±0.28 abcd	3.35±0.44 bcd	0.59±0.10 abcd	3.80±1.22 bcd	10.81±2.46 bcd
JO45	1.76±0.23 abcd	3.45±0.36 abcd	0.52±0.07 abcd	3.30±0.90 bcd	10.29±2.04 bcd
JO13	1.86±0.22 abcd	3.01±0.40 cd	0.64±0.06 ab	3.50±1.23 bcd	10.00±2.43 bcd
JO53	1.89±0.30 abcde	3.89±0.58 abcd	0.50±0.09 abcde	4.44±1.12 bc	12.71±2.64 abc
JO30	1.38±0.15 e	4.08±0.39 abc	0.35±0.04 ef	2.37±0.59 cd	9.36±1.68 cd
JO58	2.14±0.08 abcd	3.81±0.35 abcd	0.61±0.07 abc	4.48±0.34 bc	13.19±0.93 abc
QY1	1.52±0.23 cde	3.26±0.40 bcd	0.47±0.03 bcde	2.91±1.55 cd	8.94±2.82 cd

2.2 不同木荷家系的雪灾受损程度差异分析

由表 4 可知，受损率大于 50% 的有 YX01、LX01、LQ14、HA02、JO59、JO6、JO45 和 JO13 家系，因每个家系受损级别株数不同，受损指数也不一致。JO13 的受损率最高，达到 100.00%，而 LX02 和 JO16 家系并未受到明显损害，这表明不同木荷家系对雪灾的敏感性存在差异。平均受损级别反映了木荷林木在雪灾中受损的严重程度，YX01 的平均受损级别最高，为 2.65，而 LX02 和 JO16 的平均受损级别和受损指数均最低，这 2 个家系的 40 株木荷均未受到雪灾影响，这进一步证实了不同木荷家系对雪灾的抵抗力存在差异，同时表明其林木的抗损伤能力最强；而 YX01 家系的受损指数最高，为 0.53，远高于其他家系，表明其林木抗机械损伤能力最低。此外，LX02、LQ01、LQ02、LQ26、XF02、JO5、JO16、JO30、QY1 和 QY10 家系的林木损伤指数均较低，受损率基本在 25% 以下，表明其面对雨雪灾害时，能够很好地减少林木机械损伤。而 YX01、LX01、LQ27、LQ14、XF01、HA02、JO6、JO59、JO45 和 JO13 家系林木损伤指数较高，表明其受雪灾影响较大。另外，JO13 家系的受损率达到了 100%，但其受损指数为 0.43，低于 YX01 家系，主要原因是 YX01 家系林木受损级别在 3 ～ 5 级的木荷较多，JO13 家系受损级别主要分布在 1 ～ 3 级。

2.3 木荷表型特征和林木受损特征间的相关性分析

对 24 个木荷家系的生长性状特征与木荷林木损伤程度指标进行相关性分析，结果（图 1）表明，胸径与树高、平均冠幅、通直度和树冠表面

积呈极显著正相关（$P < 0.001$），与枝下高比例呈显著负相关（$P < 0.05$）；树高与平均冠幅、通直度、树冠表面积和树冠高度呈极显著正相关（$P < 0.001$），与枝下高比例、树冠圆满度、树冠体积呈极显著负相关（$P < 0.001$），与枝下高呈显著正相关（$P < 0.05$），与受损率、平均受损级别、林木受损指数呈极显著负相关（$P < 0.01$）；枝下高与枝下高比例、受损率呈极显著正相关（$P < 0.001$），与通直度、树冠表面积呈显著正相关（$P < 0.05$），与平均受损级别和林木受损指数呈极显著正相关（$P < 0.01$）；枝下高比例与平均冠幅、树冠表面积、树冠高度呈极显著负相关（$P < 0.001$），与通直度呈极显著负相关（$P < 0.01$），与树冠体积、受损率、平均受损级别和林木受损指数呈极显著正相关（$P < 0.001$）；平均冠幅与通直度、树冠表面积、树冠高度呈极显著正相关（$P < 0.001$），与树冠圆满度、树冠体积和受损率呈极显著负相关（$P < 0.001$），与平均受损级别和林木受损指数呈极显著负相关（$P < 0.01$）；通直度与树冠体积、树冠表面积和树冠高度呈极显著正相关（$P < 0.001$）；树冠圆满度与树冠体积呈极显著正相关（$P < 0.001$）；树冠体积与受损率呈极显著正相关（$P < 0.001$），与平均受损级别和林木受损指数呈极显著正相关（$P < 0.01$），与树冠表面积和树冠高度呈显著正相关（$P < 0.05$）；树冠表面积与树冠高度呈极显著正相关（$P < 0.001$）；树冠高度与受损率呈显著负相关（$P < 0.05$）；受损率与平均受损级别和林木受损指数呈极显著正相关（$P < 0.001$）。

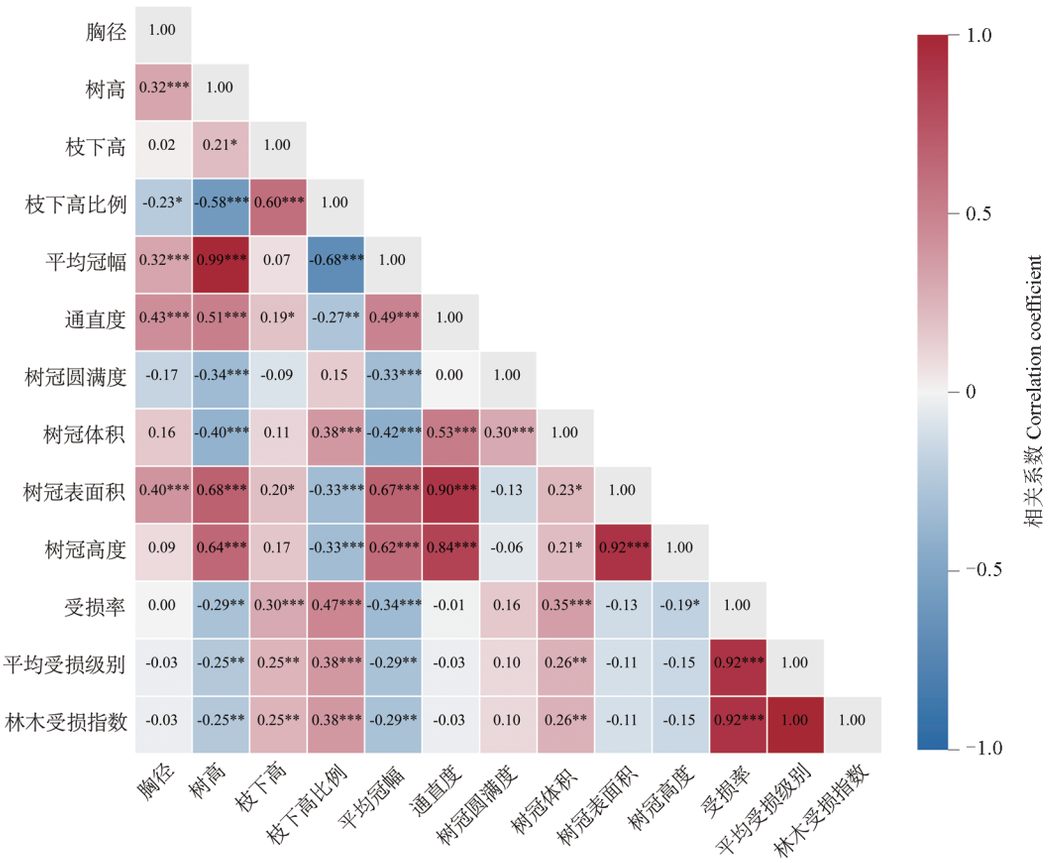
2.4　木荷家系表型性状特征和林木受损程度聚类分析

对 24 个木荷家系在受雪灾影响后的表型性状及林木受损程度分别进行聚类分析，结果（图 2、图 3）显示，木荷家系间表型特征存在显著差异，并呈现明确的遗传聚类结构。以欧氏距离 40 为阈

表 4　雪灾后不同木荷家系林木的受损程度

Table 4　Damage severity of *Schima superba* trees from different families following the snow disaster

种源 Provenance	家系 Family	株数 Number of trees	不同受损级别株数 Number of trees in each damage class						受损率 Damage rate /%	平均受损级别 Mean damage level	林木受损指数 Tree damage index
			0	1	2	3	4	5			
福建云霄 Yunxiao, Fujian	YX01	40	10	2	5	8	5	10	75.00	2.65	0.53
浙江兰溪 Lanxi, Zhejiang	LX01	40	15	5	9	6	0	5	62.50	1.65	0.33
	LX02	40	40	0	0	0	0	0	0	0	0
浙江龙泉 Longquan, Zhejiang	LQ01	40	39	1	0	0	0	0	2.50	0.03	0.01
	LQ02	40	37	2	1	0	0	0	7.50	0.10	0.02
	LQ15	40	30	8	2	0	0	0	25.00	0.30	0.06
	LQ27	40	20	0	5	5	5	5	50.00	1.75	0.35
	LQ14	40	10	0	25	5	0	0	75.00	1.63	0.33
	LQ26	40	35	1	0	0	4	0	12.50	0.43	0.09
江西信丰 Xinfeng, Jiangxi	XF01	40	20	0	3	12	1	4	50.00	1.65	0.33
	XF02	40	36	3	1	0	0	0	10.00	0.13	0.03
福建华安 Hua'an, Fujian	HA02	40	13	0	9	17	1	1	67.50	1.90	0.37
福建建瓯 Jian'ou, Fujian	JO26	40	20	4	6	9	1	0	50.00	1.18	0.24
	JO5	40	36	4	0	0	0	0	10.00	0.10	0.02
	JO59	40	15	0	9	6	0	10	62.50	2.15	0.43
	JO16	40	40	0	0	0	0	0	0	0	0
	JO6	40	15	5	5	15	0	0	62.50	1.50	0.30
	JO45	40	10	5	10	10	5	0	75.00	1.88	0.38
	JO13	40	0	15	5	20	0	0	100.00	2.13	0.43
	JO53	40	30	0	0	5	0	5	25.00	1.00	0.20
	JO30	40	39	1	0	0	0	0	2.50	0.03	0.01
	JO58	40	25	0	10	5	0	0	37.50	0.88	0.18
浙江庆元 Qingyuan, Zhejiang	QY1	40	39	1	0	0	0	0	2.50	0.03	0.01
	QY10	40	38	2	0	0	0	0	5.00	0.05	0.01



图中数值为 Pearson 相关系数；红色表示正相关，蓝色表示负相关，颜色越深表示相关性越强。*，$P < 0.05$；**，$P < 0.01$；***，$P < 0.001$。
Values indicate Pearson correlation coefficients. Red indicates positive correlations, blue indicates negative correlations, and darker colors represent stronger correlations. Significance levels are denoted as follows: * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, and *** $P < 0.001$.

图 1　木荷生长、干形性状、冠形及空间利用能力指标的相关性

Fig. 1　Correlation heatmap of growth, stem-form traits, crown traits, and spatial utilization capacity in *Schima superba*

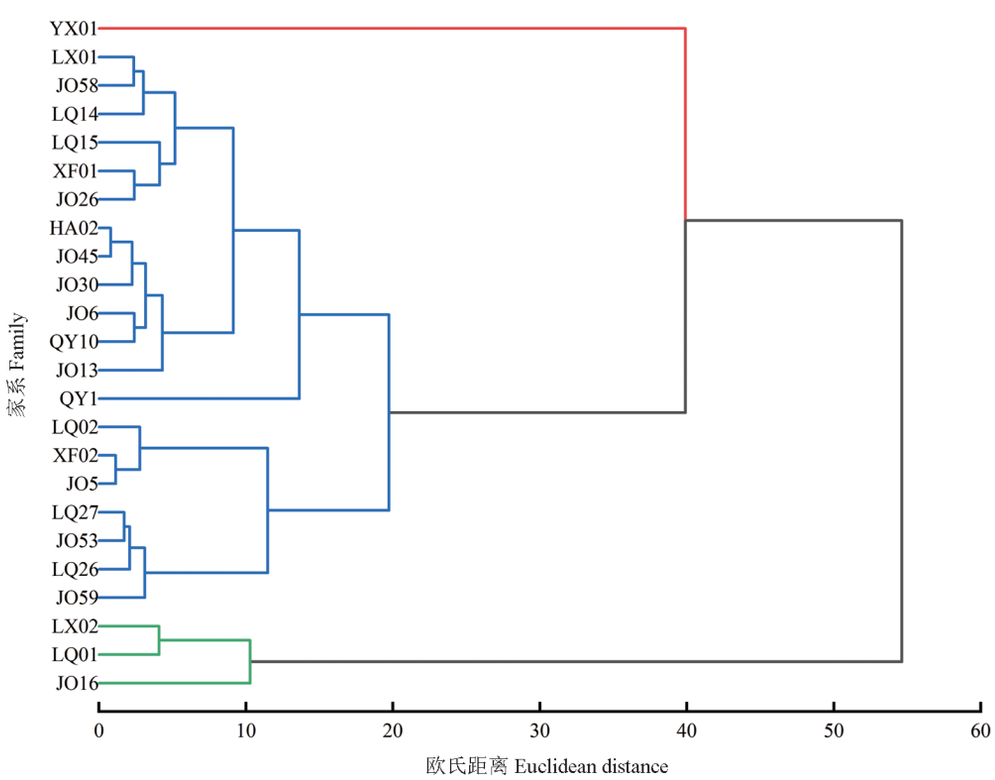


图 2　24 个木荷家系表型特征聚类分析结果

Fig. 2　Cluster analysis of phenotypic traits among 24 *Schima superba* families

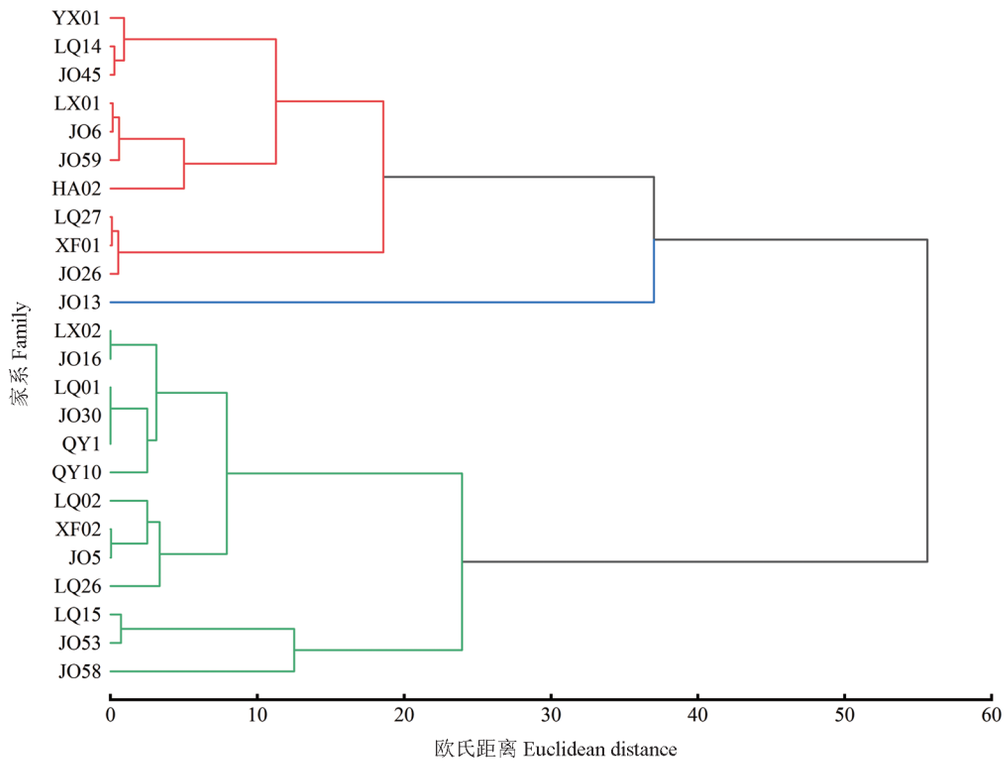


图 3　24 个木荷家系林木受损程度聚类分析结果
Fig. 3　Cluster analysis of tree damage severity among 24 *Schima superba* families

值，可以将 24 个木荷家系分为 3 个类群，第Ⅰ类主要包括 LX01、JO58、LQ14 等 20 个家系，这一类群主要特征为树高较低、枝下高比例高和冠层发育受限，表现为胁迫耐受型的适应策略；第Ⅱ类包括 LX02、LQ01 和 JO16 家系，主要表现为树高突出、枝下高适中、冠幅大和通直度优良，此类群兼具快速生长和机械抗性；第Ⅲ类以 YX01 家系单独为一类，主要特征为树高、枝下高、冠幅、树冠高度等均较低。根据木荷受损程度进行聚类分析，以欧氏距离 30 为阈值，可以将 24 个木荷家系分为 3 大类群，第Ⅰ类群包括 YX01、LQ14、JO45、LX01、JO6、JO59、HA02、LQ27、XF01 和 JO26 家系，主要表现为较高的林木受损率、平均受损级别和林木受损指数；第Ⅱ类以 JO13 家系单独成为一类，受损率 100%，表明该家系对雪灾具有高度敏感性；第Ⅲ类主要包括 LX02、JO16、LQ01、JO30、QY01、QY10、LQ02、XF02、JO5、LQ26、LQ15、JO53 和 JO58 家系，其主要特征为较低的受损率、平均受损级别和林木受损指数，表明这类家系在面对冰雪灾害时具有较高的抗机械损伤能力。

2.5　不同木荷家系表型特征的综合评价

对 24 个木荷家系的 10 个表型指标进行主成分分析及综合评价，结果见表 5 和表 6。将 11 个单项指标转换成综合指标，主成分 1（PC1）、主成分 2（PC2）、主成分 3（PC3）和主成分 4（PC4）的贡献率分别为 41.071%、26.932%、14.988% 和 9.744%，累计贡献率达到 92.735%。这表明前 4 个主成分能够保留原始指标 92.735% 的信息，可较全面地反映木荷家系表型性状的主要变异特征。PC1 主要特征为树高、树冠高度和树冠表面积较高，表现出较强的冠层垂直扩展能力。PC2 的平均冠幅和树冠圆满度荷载较高，主要反映木荷家系的冠形结构特征。PC3 主要反映了木荷的树干结构特性和分支发育，枝下高和枝下高比例荷载较高。PC4 代表胸径的独立变异，具有较高的胸径荷载值，反映了木荷树干径向生长的独特模式。以 4 个主成分对应的贡献率占 4 个主成分贡献率之和的比例为权重，得出不同木荷家系表型特征及林木受损程度特征综合得分的评价模型（$F=F_1\times 41.071/92.735+F_2\times 26.932/92.735+F_3\times 14.988/92.735+F_4\times 9.744/92.735$）。其中，$F$ 为各家系的综合评价得分，F_1、F_2、F_3 和 F_4 分别为各家系在 PC1、PC2、PC3 和 PC4 上的主成分得分。依据综合得分进行排序，发现 LX02、JO16、LQ01、JO5 和 XF02 家系在 24 个家系中位列前 5，而 LQ27、QY10、JO26、QY1 和 YX01 家系则位列后 5 位，由此说明，LX02、JO16、LQ01、JO5 和 XF02 家系的表型特征要优于其他家系。

表 5 不同木荷家系表型特征的主成分分析
Table 5 Principal component analysis of phenotypic traits among different *Schima superba* families

指标 Index	各主成分荷载 Loadings of each principal component			
	PC1	PC2	PC3	PC4
胸径 Diameter at breast height	0.055	−0.020	−0.281	0.937
树高 Tree height	0.457	−0.101	0.194	0.105
枝下高 Height to crown base	−0.064	0.358	0.590	0.265
枝下高比例 Crown base height ratio	−0.307	0.331	0.439	0.127
平均冠幅 Mean crown diameter	0.266	0.482	−0.193	−0.021
通直度 Stem straightness	−0.163	0.216	−0.487	−0.018
树冠圆满度 Crown fullness ratio	−0.202	0.489	−0.247	−0.047
树冠体积 Crown volume	0.375	0.369	−0.014	−0.126
树冠表面积 Crown surface area	0.443	0.263	−0.020	−0.060
树冠高度 Crown length	0.463	−0.167	0.077	0.051
特征值 Eigenvalue	4.107	2.693	1.499	0.974
方差贡献率 Variance contribution rate /%	41.071	26.932	14.988	9.744
累计方差贡献率 Cumulative variance contribution rate /%	41.071	68.003	82.991	92.735

3 讨 论

植物不同家系的生长性状存在显著差异，这与遗传背景、生态环境等因素密切相关 [24-25]。胸径作为衡量树木生长的重要指标，较高的胸径通常伴随更强的生长潜力和良好的适应性 [26]。Fan 等 [27] 研究表明，雪灾对植物胸径和树高有显著影响。本研究发现，不同木荷家系胸径表现出显著的遗传差异，LQ15 家系展现出优异的速生潜力，其胸径高达 8.01 cm，而 LQ27 家系则表现出极端低值（3.95 cm），可能与其在极端环境下的资源分配策略及环境适应性相关，该家系的低胸径可能是其对不利环境因素进行抗逆适应的结果，揭示木荷树种具有多样化的适应策略，以满足不同生态环境中的生长需求，这与周志春等 [12] 的研究结论一致。不同木荷家系树高之间的差异同样显著，尤其是 YX01 家系，其树高仅为 2.80 m，这一极低树高暗示该家系可能采取“抗逆保守策略”，通过减少高生长投资以提高对雪灾等环境胁迫的抗性，但 YX01 家系实际受损率达 75%，这表明

表 6 不同木荷家系表型特征的综合得分及排名
Table 6 Comprehensive scores and rankings of phenotypic traits among different *Schima superba* families

家系 Family	得分 Score				综合得分 Comprehensive score	综合排名 Ranking
	F_1	F_2	F_3	F_4		
YX01	−2.144	−0.187	−1.647	−0.913	−1.37	24
LX01	−0.543	1.686	−0.850	0.210	0.13	8
LX02	1.477	1.352	0.906	0.389	1.23	1
LQ01	1.579	0.506	−0.160	0.399	0.86	3
LQ02	0.761	−0.247	1.168	−1.124	0.34	6
LQ15	0.542	−1.595	−1.266	2.606	−0.15	14
LQ27	0.818	−1.417	−0.424	−2.151	−0.34	20
LQ14	0.536	−1.787	0.466	0.010	−0.21	17
LQ26	0.921	−1.916	0.030	−0.076	−0.15	13
XF01	−0.125	0.149	0.509	−0.676	0	10
XF02	0.353	1.071	−0.903	0.474	0.37	5
HA02	−1.231	−0.168	2.009	1.038	−0.16	15
JO26	−0.895	0.024	0.022	−1.036	−0.49	22
JO5	0.696	0.689	0.155	−0.018	0.53	4
JO59	0.027	−0.243	0.342	0.082	0.01	9
JO16	1.801	1.255	0.111	−0.648	1.11	2
JO6	−0.803	0.412	0.368	−0.508	−0.23	18
JO45	−0.874	0.370	0.843	0.878	−0.05	12
JO13	−1.309	0.948	0.540	0.459	−0.17	16
JO53	−0.090	0.254	0.125	−0.839	−0.03	11
JO30	−0.496	−1.100	0.667	1.361	−0.29	19
JO58	0.074	0.598	−0.661	1.115	0.22	7
QY1	−1.089	−0.646	0.450	−0.896	−0.69	23
QY10	0.012	−0.007	−2.802	−0.134	−0.46	21

其低生长并非抗逆适应，而是抗性脆弱的表现。相反，树高较高的家系如LX02、LQ01则显示出更强的生长潜力，这些家系可能依赖于资源的较高投入，从而在有利环境中实现更为快速的生长。枝下高和枝下高比例的显著差异进一步揭示了不同家系在树形结构上的适应性特征。LX02和HA02家系的枝下高为0.68 m，是QY10家系的2.83倍，显示出较强的自然整枝能力与顶端优势，这种结构性特征有助于这些家系在雪灾等极端气候条件下保持良好的生长优势。树冠是树木进行光合作用、蒸腾作用和呼吸作用等生理活动的重要场所，树冠特征表征植物空间利用能力及竞争策略[28]。YX01家系虽然在枝下高比例上表现较低，但其低树高和紧凑的树冠有助于减少枝条积雪的负担，增强抗雪灾能力。此外，JO16家系在树冠体积和树冠表面积等方面均表现较好，较大的树冠体积可提高抗风和抗雪灾能力，减少外力冲击带来的风险[29-33]，表明其在资源扩展和生物量积累方面具有优势[22]，因此具有较强的育种潜力，这与张萍等[33]的研究结论类似。相反，YX01家系在树冠发展方面显著受限，其树冠高度、树冠体积和树冠表面积等指标均低于其他家系，表明其采取了典型的“资源节约型”表型策略，这一策略使得YX01家系能够在高胁迫环境下生存，但可能导致其生长潜力下降。

优良家系选择是林木遗传育种的基础，能为品种筛选和不同育种目标提供材料[9]。对不同木荷家系在雨雪灾害中的林木损伤程度进行比较，发现不同木荷家系表现出显著的抗灾差异。木荷YX01家系的受损率较高，达到了50%以上，而LX02和JO16家系则表现出较低的受损率，几乎没有遭受明显的雪灾损伤。YX01等家系通过减少冠层扩展和资源投入来提高雪灾耐受性，而LX02和JO16家系则通过增强生长潜力和空间利用能力，表现出较强的适应性，这表明不同木荷家系对雪灾胁迫的响应存在显著差异[34]。这可能与种源地的地理气候有关，来自浙江龙泉的大部分木荷家系抵抗雪灾能力突出，是其在寒冷或多雪的气候条件下长期演化形成的结果，而福建云霄的木荷则在温暖潮湿环境中生长，抗雪灾能力较弱。这一现象表现了植物在特定气候条件下的适应性变化，也反映出地理气候因素对植物种源谱系的塑造作用[35]。通过对木荷受损程度与其生长性状的相关性分析，发现树高和胸径等性状与林木损伤程度呈显著负相关，换言之，树高和胸径越大的家系，在雪灾后的受损程度越低，表现出更强的适应能力。树冠形态对抗灾能力也有显著影响，树高和树冠体积较大的家系在面对雪灾等逆境时表现出较强的适应性，其承受积雪能力更强，从而降低灾害风险[36-37]。阎恩荣等[21]对浙江天童盘山8种人工林冰冻灾后的受损状况进行研究，发现较大的冠层空间在极端雪灾中会增加枝条断裂风险。树冠恢复能力的强弱与家系的生长模式、冠层特征以及生态适应性密切相关[38]，树冠恢复能力强的植物通常具有较高的生态适应性，能通过快速生长实现恢复，从而抵御环境压力[39]，这种恢复能力在雪灾发生后对植物的生长和长期生存尤为重要。本研究中，LX02和HA02家系枝下高是QY10家系的2.83倍，具有更显著的自然整枝能力与顶端优势，表明其能够更好地分配生长资源，使得树木的枝条更均匀分布，从而在雪灾中减少因枝条断裂而导致的损伤。相对而言，那些树冠小、枝下高较低的家系（如YX01），则表现出较差的抗灾能力，这也表明在雪灾等极端气候下，树木的生长模式和结构特征直接影响其生存状况。根据聚类分析结果，木荷家系表现出明显的表型特征差异，并与林木受损程度密切相关，这进一步确认了木荷家系在雪灾后的适应策略。

主成分分析结果表明，前4个主成分解释了92.735%的总变异，充分反映了木荷家系表型特征的多维性。通过综合得分评价模型的构建，得出LX02、JO16、LQ01、JO5和XF02家系的综合得分较高，表明这些家系在表型特征方面表现优异，具有较强的生长潜力。此外，结合林木受损程度特征，发现LX02、JO16、LQ01、JO5和XF02家系的受损程度均远低于其他家系，表明其也具备较高的抗林木机械损伤能力，这进一步验证了这5个家系具有较强的生长潜力和抗灾能力。而LQ14、JO30、LQ15、QY1和YX01家系则表现较差，表明其在面对环境压力时表现较为脆弱。

4 结 论

本研究评估了24个木荷家系在雪灾后的表型特征和林木损伤程度，揭示了木荷家系间显著的遗传差异与适应性策略。木荷的胸径、树高、枝下高和树冠特征等生长性状存在显著的遗传差异，且这些差异与家系的抗灾能力密切相关。LX02、JO16、LQ01、JO5和XF02家系兼顾生长潜力和抗机械损伤能力，具有较高的育种价值。YX01家系则表现出较低的生长潜力和较高的受损率，不建议作为育种材料。在今后的木荷培育中，应根据需求并结合木荷的生长潜力和抗灾能力，进行

合理选择和培育。本试验未充分考虑不同木荷家系在长期雨雪灾害后的恢复能力与生态适应性，下一步应加强对木荷在经历雪灾后的恢复过程及其生理适应机制的长期跟踪与分析，以更全面评估其抗灾性和适应性。

参考文献：

[1] 万辛如 , 程超源 , 白德凤 , 等 . 气候变化的生态影响及适应对策 [J]. 中国科学院院刊 ,2023,38(3):518-527.
Wan X R, Cheng C Y, Bai D F, et al. Ecological impacts of climate change and adaption strategies[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences,2023,38(3):518-527.

[2] 时亚坤 . 雪灾对常绿阔叶林树木损伤程度的影响及受损特征分析 [J]. 灾害学 ,2021,36(4):14-18.
Shi Y K. Effects of snow disaster on tree damage degree and damage characteristics in evergreen broad-leaved forest[J]. Journal of Catastrophology,2021,36(4):14-18.

[3] 宋国庆 . 雪载荷下的树木受力分析与强度监测 [D]. 合肥 : 安徽农业大学 ,2019:1-5.
Song G Q. Tree strength monitoring and stress analysis under snow load[D]. Hefei: Anhui Agricultural University,2019:1-5.

[4] 丁一汇 , 王遵娅 , 宋亚芳 , 等 . 中国南方 2008 年 1 月罕见低温雨雪冰冻灾害发生的原因及其与气候变暖的关系 [J]. 气象学报 ,2008,66(5):808-825.
Ding Y H, Wang Z Y, Song Y F, et al. Causes of the unprecedented freezing disaster in January 2008 and its possible association with the global warming[J]. Acta Meteorologica Sinica,2008,66(5):808-825.

[5] 周秋月 , 蔡秋芳 , 刘禹 , 等 . 湖南郴州树轮宽度的雪灾和气候环境变化记录 [J]. 第四纪研究 ,2024,44(4):987-995.
Zhou Q Y, Cai Q F, Liu Y, et al. Influences of snow disasters and climate changes on tree growth in Chenzhou, Hunan Province[J]. Quaternary Sciences,2024,44(4):987-995.

[6] 张磊 , 王晓荷 , 米湘成 , 等 . 古田山常绿阔叶林凋落量时间动态及冰雪灾害的影响 [J]. 生物多样性 ,2011,19(2):206-214.
Zhang L, Wang X H, Mi X C, et al. Temporal dynamics of and effects of an ice storm on litter production in an evergreen broad-leaved forest in Gutianshan national nature reserve[J]. Biodiversity Science,2011,19(2):206-214.

[7] 李笑寒 , 黄力 , 杨圣贺 , 等 . 缙云山常绿阔叶林雪灾受损特征及影响因素 [J]. 林业科学研究 ,2017,30(5):735-742.
Li X H, Huang L, Yang S H, et al. Patterns and factors causing snow-induced forest damage in a subtropical evergreen broad-leaved forest on Jinyun mountain[J]. Forest Research,2017,30(5):735-742.

[8] 倪健 . 中国木荷及木荷林的地理分布与气候的关系 [J]. 植物资源与环境 ,1996,5(3):28-34.
Ni J. Relationship between geographical distribution of *Schima superba*, its forest and climate in China[J]. Journal of Plant Resources and Environment,1996,5(3):28-34.

[9] 王淼 , 吴国亮 , 张蕊 , 等 . 木荷 18 年生种源生长、材性的地理种源变异 [J]. 应用生态学报 ,2023,34(9):2337-2344.
Wang M, Wu G L, Zhang R, et al. Geographical provenance variation of growth and wood properties of 18-year-old *Schima superba*[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2023,34(9):2337-2344.

[10] 周志春 , 张蕊 , 范辉华 , 等 . 中国木荷 [M]. 北京 : 科学出版社 , 2020:3-5.
Zhou Z C, Zhang R, Fan H H, et al. *Schima superba*[M]. Beijing: Science Press,2020:3-5.

[11] 徐肇友 , 王云鹏 , 肖纪军 , 等 . 不同产地木荷优树无性系表型多样性 [J]. 东北林业大学学报 ,2021,49(2):5-10,17.
Xu Z Y, Wang Y P, Xiao J J, et al. Phenotypic diversity analysis of *Schima superba* superior clones from different locations[J]. Journal of Northeast Forestry University,2021,49(2):5-10,17.

[12] 周志春 , 范辉华 , 金国庆 , 等 . 木荷地理遗传变异和优良种源初选 [J]. 林业科学研究 ,2006,19(6):718-724.
Zhou Z C, Fan H H, Jin G Q, et al. Geographic genetic variation and preliminary selection of superior provenance in *Schima superba*[J]. Forest Research,2006,19(6):718-724.

[13] 姚甲宝 , 楚秀丽 , 周志春 , 等 . 不同养分环境下木荷种源生长和根系发育对邻株竞争响应的差异 [J]. 应用生态学报 ,2017,28(4):1087-1093.
Yao J B, Chu X L, Zhou Z C, et al. Different responses of growth and root development of *Schima superba* provenance to the adjacent plant competition in different nutrient conditions[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2017,28(4):1087-1093.

[14] 余琳 , 张萍 , 周志春 , 等 . 木荷种源苗期干物质积累和分配差异 [J]. 林业科学研究 ,2005,18(1):91-94.
Yu L, Zhang P, Zhou Z C, et al. Differences of *Schima superba* provanances in seedling dry matter accumulation and allocation[J]. Forest Research,2005,18(1):91-94.

[15] 林磊 , 周志春 , 范辉华 , 等 . 木荷生长与形质地理变异和木制工艺材种源选择 [J]. 浙江林学院学报 ,2009,26(5):625-632.
Lin L, Zhou Z C, Fan H H, et al. Genetic variation of growth and form in *Schima superba* provenances with selection for wood processing materials[J]. Journal of Zhejiang Forestry College,2009,26(5):625-632.

[16] 王秀花 , 陈柳英 , 马丽珍 , 等 .7 年生木荷生长和木材基本密度地理遗传变异及种源选择 [J]. 林业科学研究 ,2011,24(3):307-313.
Wang X H, Chen L Y, Ma L Z, et al. Geographical provenance variation of growth and wood basic density of 7-year-old *Schima superba* and its provenance selection[J]. Forest Research,2011,

24(3):307-313.

[17] 王刚 . 雪灾干扰下木荷林林窗特征与更新研究 [D]. 北京 : 中国林业科学研究院 ,2011:20-24.
Wang G. Characteristics and regeneration of *Schima superba* forest gap caused by snow disturbance[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry,2011:20-24.

[18] 葛晓改 , 周本智 , 王刚 , 等 . 雪灾干扰下林窗对木荷幼苗更新的影响 [J]. 林业科学研究 ,2014,27(4):529-535.
Ge X G, Zhou B Z, Wang G, et al. The influence of forest gap on seedling regeneration of *Schima superba* after heavy snowstorm[J]. Forest Research,2014,27(4):529-535.

[19] 李晓靖 .2008 年冰雪灾害后受害木荷新萌枝光合生理特性研究 [D]. 北京 : 中国林业科学研究院 ,2012:15-21.
Li X J. Photosynthetic physiology of damaged *Schima superba* resprouts following the 2008 ice and snow storm[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry,2012:15-21.

[20] 黄川腾 , 庄雪影 , 李荣喜 , 等 . 冰灾后南岭五指山森林树种的受损与早期恢复 [J]. 生态学杂志 ,2012,31(6):1390-1396.
Huang C T, Zhuang X Y, Li R X, et al. Damaged status and early recovery of tree species in Wuzhishan of Nanling mountains, south China after the ice storm in 2008[J]. Chinese Journal of Ecology,2012,31(6):1390-1396.

[21] 阎恩荣 , 仲强 , 周武 , 等 . 浙江天童雨雪冰冻灾后林木机械受损与相关功能性状的关联 [J]. 浙江林学院学报 ,2010,27(3):360-366.
Yan E R, Zhong Q, Zhou W, et al. Mechanical damage in relation to tree characteristics after a catastrophic freeze in Tiantong region, Zhejiang Province[J]. Journal of Zhejiang Forestry College, 2010,27(3):360-366.

[22] 周新华 , 孙韵 , 王丽云 , 等 . 闽楠 - 杉木人工混交林混交比对闽楠生长形质和空间利用能力的影响 [J]. 东北林业大学学报 , 2024,52(5):13-18.
Zhou X H, Sun Y, Wang L Y, et al. The impact of mixing ratio in artificial mixed forests of *Phoebe bournei-Cunninghamia lanceolata* on the growth morphology and spatial utilization ability of *Phoebe bournei*[J]. Journal of Northeast Forestry University,2024,52(5):13-18.

[23] 傅斌烨 . 不同抚育强度对米槠林径级分布及干形的影响 [J]. 安徽农学通报 ,2018,24(8):90-92.
Fu B Y. Effects of different tending intensities on diameter class distribution and stem form of *Castanopsis carlesii* forest[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin,2018,24(8):90-92.

[24] 蔡宗明 , 刘仁 , 聂林芽 , 等 . 不同种源苦槠果实品质差异及综合评价 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2024,44(12):39-50.
Cai Z M, Liu R, Nie L Y, et al. Study on fruit quality difference and comprehensive evaluation of different provenances of *Castanopsis sclerophylla*[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2024,44(12):39-50.

[25] 刘仁 , 温黎彬 , 贺小林 , 等 . 不同山桐子家系叶片功能性状及养分特征差异 [J]. 东北林业大学学报 ,2024,52(8):60-68.
Liu R, Wen L B, He X L, et al. Leaf functional trait and nutrient characteristics variations among different *Idesia polycarpa* provenances[J]. Journal of Northeast Forestry University,2024, 52(8):60-68.

[26] Tang C Q, Han P B, Li S F, et al. Species richness, forest types and regeneration of *Schima* in the subtropical forest ecosystem of Yunnan, southwestern China[J]. Forest Ecosystems,2020,7:35.

[27] Fan Q Z, Yang H X, Li P R, et al. Ecological response of forest vegetation communities to snow damage: a meta-analysis[J]. Forests,2024,15:1989.

[28] 邢鸿林 , 赵彩鸿 , 沈忱 , 等 . 红皮云杉人工林树冠特征与生长形质的关系及间伐与修枝对其影响 [J]. 西北林学院学报 , 2024,39(2):91-96,202.
Xing H L, Zhao C H, Shen C, et al. Relationship between canopy morphological characteristics and growth characters of *Picea koraiensis* in plantations and the effect of thinning and pruning on them[J]. Journal of Northwest Forestry University,2024,39(2): 91-96,202.

[29] 张德顺 , 刘鸣 , 姚驰远 , 等 . 气候变化背景下滨海地区园林树种抗风性研究进展 [J]. 风景园林 ,2021,28(11):68-73.
Zhang D S, Liu M, Yao C Y, et al. Research advances of wind resistance of landscape tree species in coastal areas under climate change[J]. Landscape Architecture,2021,28(11):68-73.

[30] Petty J A, Swain C. Factors influencing stem breakage of conifers in high winds[J]. Forestry,1985,58(1):75-84.

[31] 肖洁舒 , 冯景环 . 华南地区园林树木抗台风能力的研究 [J]. 中国园林 ,2014,30(3):115-119.
Xiao J S, Feng J H. Research on the typhoon resistance ability of trees in south China[J]. Chinese Landscape Architecture, 2014,30(3):115-119.

[32] Li X F, Jin L, Zhu J J, et al. Response of species and stand types to snow/wind damage in a temperate secondary forest, northeast China[J]. Journal of Forestry Research,2018,29(2):395-404.

[33] 张萍 , 周志春 , 金国庆 , 等 . 木荷种源遗传多样性和种源区初步划分 [J]. 林业科学 ,2006,42(2):38-42.
Zhang P, Zhou Z C, Jin G Q, et al. Genetic diversity analysis and provenance zone allocation of *Schima superba* in China using RAPD markers[J]. Scientia Silvae Sinicae,2006,42(2):38-42.

[34] 金毅 . 冰雪灾害对古田山常绿阔叶林短期动态的影响 : 群落结构变化、幼苗更新与林窗干扰效应 [D]. 杭州 : 浙江大学 , 2015:73-74.
Jin Y. Impacts of ice storm on the short-term dynamics of broad-leaved forest in gutianshan: community structure alternation,

seedling regeneration, and effects of forest gap disturbance[D]. Hangzhou: Zhejiang University,2015:73-74.

[35] 王衷涵 , 吴初平 , 钱海源 , 等 . 冰雪灾害前后的浙江古田山亚热带常绿阔叶林群落谱系结构变化 [J]. 中国科学 (生命科学), 2020,50(4):373-380.
Wang Z H, Wu C P, Qian H Y, et al. The phylogenetic structure of a subtropical evergreen broad-leaved forest community before and after an ice-snow storm in Gutianshan, eastern China[J]. Science in China (Series C),2020,50(4):373-380.

[36] 李光南 . 植被冠层与枯落物对积雪分布及冻融过程的影响 [D]. 沈阳 : 沈阳农业大学 ,2016:18-24.
Li G N. Research on the influence of vegetation canopy and litter on snow distribution and soil freeze-thaw process[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University,2016:18-24.

[37] 冯嘉朗 . 基于风洞实验的深圳市 7 种行道树风荷载研究 [D]. 广州 : 仲恺农业工程学院 ,2021:68-70.
Feng J L. Study on wind roads of seven street trees in Shenzhen based on wind tunnel experiment[D]. Guangzhou: Zhongkai University of Agriculture and Engineering,2021:68-70.

[38] 方怡然 , 潘澜 , 薛立 . 冰雪灾害后的杉木人工林冠层结构与林下光照及土壤生化特性的关系 [J]. 生态环境学报 ,2018, 27(4):609-616.
Fang Y R, Pan L, Xue L. Relationships between canopy structure and understory light and soil biochemical property in a *Cunninghamia lanceolata* stand suffering from ice-snow damage[J]. Ecology and Environment Sciences,2018,27(4):609-616.

[39] 李婉舒 . 冰冻干扰对大明山常绿阔叶林林冠状况及幼苗动态的影响 [D]. 南宁 : 广西大学 ,2016:48-51.
Li W S. Effects of frozen disturbance on canopy condition and seedling dynamics of an evergreen broad-leaved forest in Damingshan[D]. Nanning: Guangxi University,2016:48-51.

[本文编校：谢荣秀]

（上接第 97 页）

[27] Jim C Y, Zhang H. Species diversity and spatial differentiation of old-valuable trees in urban Hong Kong[J]. Urban Forestry & Urban Greening,2013,12:171-182.

[28] Liu J J, Lindenmayer D B, Yang W J, et al. Diversity and density patterns of large old trees in China[J]. Science of the Total Environment,2019,655:255-262.

[29] 袁苏婷 . 基于古树名木保护的苏南地区传统村落空间形态优化研究 [D]. 南京 : 南京林业大学 ,2024:108-109.
Yuan S T. Optimisation of spatial morphology of traditional villages in southern Jiangsu based on the protection of old and valuable trees[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University,2024:108-109.

[30] 何林 . 江苏地区考古木材鉴定分析 [D]. 南京 : 南京林业大学 , 2015:82-83.
HE L. Identification and analysis of archaeology wood in Jiangsu Province[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University,2015:82-83.

[31] 李程 , 罗鹏 , 邓秀秀 , 等 . 古树名木生长状况与环境因子关系研究 : 以浙江省古樟树为例 [J]. 中南林业科技大学学报 , 2015,35(11):86-93.
Li C, Luo P, Deng X X, et al. Study on relationship between ancient and famous trees' growth status and environmental factors: taking ancient *Cinnamomum camphora* in Zhejiang Province as an example[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2015,35(11):86-93.

[32] 田大伦 . 杉木林生态系统学 [M]. 北京 : 科学出版社 ,2003: 454-456.
Tian D L. Ecosystem science of Chinese fir plantations[M]. Beijing: Science Press,2003:454-456.

[本文编校：谢荣秀]