

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8期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.08.010

论文标题： 蒙古栎种质资源叶表型多样性分析

作　　者： 许 诺，彭儒胜，尹 杰，等

收稿日期： 2025-07-28

引文格式： 许诺,彭儒胜,尹杰,等.蒙古栎种质资源叶表型多样性分析[J].中南林业科技大学学报,2026,46(8):100-109.

Xu N, Peng R S, Yin J, et al. Leaf phenotypic diversity analysis of *Quercus mongolica* germplasm resources[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026, 46(8):100-109.

相关论文推荐

Recommended articles

辽东山区蒙古栎林不同发育阶段碳储量变化特征及其影响因素

Characteristics of carbon storage variations of *Quercus mongolica* forests at different development stages in the east of Liaoning mountainous area and their influencing factors

亚低温冷冻对蒙古栎和麻栎种子生活力及生理特性的影响

Effect of subzero temperature on seed viability and physiological characteristics of *Quercus mongolica* and *Quercus acutissima*

施肥对蒙古栎开花结实的影响

Effect of fertilization on flowering and fruiting of *Quercus mongolica*

蒙古栎种子贮藏过程内源激素变化及显微结构特征

Changes in endogenous hormone content and cellular structure during seed storage of *Quercus mongolica*

不同放牧强度下蒙古栎天然林土壤物理性质及土壤质量综合评价

A comprehensive evaluation regarding the effect of various grazing intensities on the soil physical properties of natural *Quercus mongolica* forest

接种芽孢杆菌对蒙古栎幼苗生长的影响

Effects of *Bacillus* inoculation on the growth of *Quercus mongolica* seedlings

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.08.010 http: //qks.csuft.edu.cn

蒙古栎种质资源叶表型多样性分析

许 诺[1]，彭儒胜[2]，尹 杰[2]，雷鸣雷[3]，亢士婷[1]，张晓林[1]
（1. 沈阳农业大学 辽宁省森林培育重点实验室，辽宁 沈阳 110866；
2. 辽宁省杨树研究所，辽宁 营口 115213；3. 朝阳市林业和草原事务服务中心，辽宁 朝阳 122000）

摘 要：【目的】揭示蒙古栎 *Quercus mongolica* 叶片表型多样性的变异规律及其驱动机制，为蒙古栎种质库构建、适生种源选育及可持续利用提供数据支撑。【方法】以我国东北、华北地区 55 个蒙古栎种源为对象，系统测定叶片 13 个表型性状。采用嵌套方差分析量化种源间和种源内变异贡献，通过表型分化系数解析遗传分化程度；结合主成分分析（PCA）和 UPGMA 聚类探究性状分类价值；利用回归模型评估种源地与种植地气候差异（年平均气温、季降水量等）对叶表型的影响。【结果】13 个性状均存在显著种源差异（$P < 0.05$），变异系数（CV）为 18.81% ～ 63.50%，其中叶面积（63.50%）、叶柄长（45.42%）和叶基角（39.86%）变异最显著。表型分化系数平均值为 61.99%，种源间方差贡献（57.65%）显著高于种源内（35.09%），表明变异主要来自地理种群分化。相关性分析表明，不同叶性状主要与叶长和叶宽的相关性较高。采用 PCA 提取 3 个主成分（累计贡献率 66.60%），依次为叶长（PC1 载荷 0.954）、叶顶角（PC2 载荷 0.745）和叶基角（PC3 载荷 0.743）。聚类分析将 55 个种源分为 3 类：大叶型（6 个）、中叶型（23 个）和小叶型（25 个），中叶型与小叶型占比 90.9%，分类依据为叶片尺寸（叶长、叶宽）及角度特征（叶顶角、叶基角）。种源 - 种植地气候差异对蒙古栎叶片的 6 个性状影响显著（$P < 0.05$），但解释率普遍较低（$R^2 < 0.17$）。【结论】叶面积、叶柄长、叶基角、叶周长和叶脉夹角是表型分化的关键指标，叶长、叶顶角和叶基角可作为种质分类的核心依据。蒙古栎叶片表型多样性以种源间遗传分化为主导，表明遗传背景是变异的主因。

关键词：蒙古栎；叶片；种源；表型性状；种源间变异
中图分类号：S718.46；S718.54 **文献标志码：**A **文章编号：**1673-923X(2026)08-0100-10

Leaf phenotypic diversity analysis of *Quercus mongolica* germplasm resources

Xu Nuo[1], Peng Rusheng[2], Yin Jie[2], Lei Minglei[3], Kang Shiting[1], Zhang Xiaolin[1]

(1. Liaoning Key Laboratory of Forest Cultivation, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, Liaoning, China; 2. Liaoning Poplar Research Institute, Yingkou 115213, Liaoning, China; 3. Chaoyang Forestry and Grassland Service Center, Chaoyang 122000, Liaoning, China)

Abstract:【Objective】To reveal the variation patterns and driving mechanisms underlying leaf phenotypic diversity in *Quercus mongolica* and provide a data basis for constructing *Quercus mongolica* germplasm banks, breed suitable provenances, and to promote sustainable utilization.【Method】Thirteen leaf phenotypic traits were systematically measured for 55 *Quercus mongolica* provenances from northeast and north China. Nested analysis of variance was used to quantify variation contributions among and within provenances; phenotypic differentiation coefficients were employed to analyze the degree of genetic differentiation; principal component analysis (PCA) and UPGMA clustering were combined to explore the classification value of traits; regression models were utilized to evaluate the impact of climatic differences (e.g., annual average temperature, seasonal rainfall) between provenance and planting sites on phenotypes.【Result】All 13 traits show significant differences among provenances ($P < 0.05$), with coefficients of variation (CV) ranging from 18.81% to 63.50%. Among them, leaf area (CV=63.50%), petiole length (45.42%), and leaf base angle (39.86%) exhibit the most significant variations. The average phenotypic differentiation coefficient is 61.99%, and the variance contribution among provenances (57.65%) is significantly higher than that within provenances (35.09%), indicating that variation mainly originates from geographical population differentiation. Correlation analysis shows that different leaf traits are mainly highly correlated with leaf length and leaf width. PCA extracts 3 principal components (cumulative contribution rate 66.60%), with dominant factors being leaf length (PC1 loading 0.954), leaf tip angle (PC2 loading 0.745), and leaf base angle (PC3 loading 0.743) in sequence. Cluster analysis

收稿日期（Received）：2025-07-28 **修订日期**（Revised）：2025-10-30
基金项目：国家重点研发计划项目（2021YFD2200302）。
第一作者：许诺（654508286@qq.com），硕士研究生。**通信作者：**张晓林（zxlsyau@syau.edu.cn），副教授，博士，博士研究生导师。
引文格式：许诺 , 彭儒胜 , 尹杰 , 等 . 蒙古栎种质资源叶表型多样性分析 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026,46(8):100-109.
Xu N, Peng R S, Yin J, et al. Leaf phenotypic diversity analysis of *Quercus mongolica* germplasm resources[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(8):100-109.
* 本文为第二十八届中国科协年会学术论文成果。
Academic Papers of the 28th Annual Meeting of the China Association for Science and Technology.

divides the 55 provenances into 3 types: large-leaf type (6 provenances), medium-leaf type (23 provenances), and small-leaf type (25 provenances). The medium-leaf and small-leaf types account for 90.9%, with classification based on leaf size (leaf length, leaf width) and angle characteristics (leaf tip angle, leaf base angle). Climatic differences between provenance and planting sites have significant effects on 6 traits ($P < 0.05$), but the explanatory rates (coefficient of determination, R^2) are generally low (< 0.17). 【Conclusion】 Leaf phenotypic diversity in *Quercus mongolica* is dominated by genetic differentiation among provenances. Leaf area, petiole length, leaf base angle, leaf perimeter, and leaf vein angle are key indicators of phenotypic differentiation; leaf length, leaf tip angle, and leaf base angle can serve as core indices for germplasm classification. Climatic factors have a weak impact on traits, indicating that genetic background is the main cause of variation.

Keywords: *Quercus mongolica*; leaf; provenance; phenotypic traits; variation among provenances

植物表型性状多样性是植物进化的基础，受到基因型和外部生长环境的双重调控 [1]。其中，作为植物最重要的营养器官，叶片对环境变化通常较为敏感，在不同环境下表现出丰富的可塑性 [2-3]。表型性状变异在植物适应和进化过程中具有重要的意义，不同表型性状是区分植物类群的重要指标，反映其不同的生长发育机制 [4-7]。探究植物叶片表型性状变异，不仅有助于了解其遗传规律，还能为优质种质资源的选育和改良提供理论参考 [8]。

近年来，国内外学者在揭示叶片形态多样性机制特别是叶片复杂性调控机制方面取得了较大进展。越来越多的研究表明，植物的叶片表型性状通常在种源间表现出显著的变异 [9-10]。魏春梅等 [11] 对 49 份茶树 *Camellia sinensis* 种质资源叶片表型性状的遗传多样性进行分析，发现茶树的数量性状在种源间的平均变异系数高达 29.45%。已有研究发现，不同种源铁心杉 *Cunninghamia lanceolata*[12]、油橄榄 *Olea europaea*[13]、酸枣 *Ziziphus jujuba*[14]、水松 *Glyptostrobus pensilis*[15] 及豹皮樟 *Lista coreana*[16] 等植物的叶片表型均差异显著。王雪洁等 [17] 对我国 42 份冬青种质资源叶表型性状进行分析，结果表明叶长、叶片紧实度、栅栏组织和气孔密度是影响冬青种质资源的主导因子。陈恺茜 [18] 对我国不同地区栓皮栎叶片进行研究发现，栓皮栎叶片解剖性状（如叶片厚度、上表皮厚度和海绵组织厚度等）变异主要来自种源内。曹德美 [19] 在对青杨不同种群叶片表型性状的遗传变异研究中发现，青杨叶片表型与地理气候因子相关性较强，且呈现以海拔为主的地理变异模式。曹向文等 [20] 关于川滇和乌蒙山高山栎的研究表明，同一种源高山栎叶片在不同海拔表现出显著的表型变异。

蒙古栎 *Quercus mongolica* 是壳斗科栎属落叶乔木，广泛分布于我国东北、华北和西北各地，是北方阔叶林的重要树种，具有较高的经济价值和生态价值。近年来，栎属植物的重要性愈发受到关注，众多研究者围绕蒙古栎的表型变异及遗传多样性等方面开展了大量相关研究。例如，尹杰 [21] 针对采自黑龙江、吉林、辽宁和内蒙古等省区的 40 个蒙古栎种源，对其 2 年生植株的叶片表型性状多样性进行研究，发现其中 23 个种源的叶片变异系数较高，对环境的适应性较好。李海霞等 [22] 则针对黑龙江省带岭林业局引种的 25 个蒙古栎种源，分析其表型性状的变异特点与多样性，结果显示蒙古栎当年生枝条长度的变异系数最高。尽管目前针对蒙古栎叶片变异已有一些研究，但这些研究多局限于区域性范围，针对大尺度自然分布区的蒙古栎叶表型性状多样性分析尚未见报道。

因此，本研究选择分布于我国东北和华北地区的 55 个蒙古栎种源为对象，从形态学水平对叶片表型性状进行测定，分析不同种源蒙古栎叶片性状变异特征，探究其遗传变异规律，为蒙古栎种质资源的开发、保护和利用提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　供试材料

采集蒙古栎分布区内 55 个地理种源的种质材料（表 1），构建包含经纬度梯度变异、海拔生态型分异及不同生境类型的全分布区种质资源库，样本容量及地理覆盖度能够充分反映该树种天然种群的地理遗传多样性特征。采集的种子于 2020 年秋播，造林时间为 2023 年，试验林种植均采用随机完全区组设计，重复 3 次，株行距为 1 m×2 m，并且定期抚育，各区组内每个种源选择 3 ～ 5 株长势良好的蒙古栎幼树作为标准木并挂牌标记。该示范园区位于辽宁省锦州市黑山县，气候类型属于温带大陆性季风气候，年平均气温 8.6 ℃，年平均降水量 556 mm。2023 年进行采样时，蒙古栎幼林基本进入稳定期，蒙古栎幼树树龄为 3 a。

1.2　叶片样品采集

2023 年 9 月，在树木生长旺季采集叶片，在各区组内，每个种源选择长势相近的 3 株样树，

表 1　蒙古栎 55 个种源地理信息

Table 1　Geographical information of 55 provenances of *Quercus mongolica*

编号 No.	种源 Provenance	纬度 Latitude	经度 Longitude	编号 No.	种源 Provenance	纬度 Latitude	经度 Longitude
1	辽宁省大连市金州区大黑山林场	39°06′36″N	121°47′24″E	29	辽宁省丹东市宽甸满族自治县白石砬子国家级自然保护区	40°55′12″N	124°49′12″E
2	辽宁省营口市国营大石桥林场	40°28′12″N	122°53′24″E	30	黑龙江省牡丹江市宁安市湖西经营所	44°09′00″N	129°08′24″E
3	吉林省白山市露水河镇	42°31′12″N	127°47′24″E	31	黑龙江省大兴安岭加格达奇区	50°25′48″N	124°07′48″E
4	辽宁省丹东市硼海镇	40°48′00″N	124°56′24″E	32	黑龙江省伊春市嘉荫县农业技术推广中心	48°53′24″N	130°24′36″E
5	山东省潍坊市青州市杨集林场	36°41′24″N	118°29′24″E	33	黑龙江省伊春市带岭林科所	47°01′48″N	129°01′12″E
6	内蒙古自治区呼伦贝尔市大杨树乃木河林场	49°24′00″N	124°04′48″E	34	辽宁省本溪市	41°29′24″N	123°42′36″E
7	吉林省四平市铁东区叶赫镇林场	43°09′36″N	124°24′36″E	35	黑龙江省伊春市乌马河青山林场	47°43′48″N	128°49′12″E
8	辽宁省抚顺市湾甸子镇	41°57′36″N	125°07′48″E	36	吉林省白山市	41°57′00″N	126°24′36″E
9	辽宁省抚顺市东洲区哈达林场	41°51′36″N	124°02′24″E	37	黑龙江省伊春市桃山林业局	46°55′48″N	128°10′12″E
10	黑龙江省双鸭山市上游林场	46°40′48″N	131°09′36″E	38	黑龙江省牡丹江市宁安市斗子沟林场	43°59′24″N	129°12′36″E
11	黑龙江省绥化市绥棱县绥棱林业局	47°15′36″N	127°06′36″E	39	辽宁省营口市盖州市万福镇孙家窝棚	40°06′36″N	122°26′24″E
12	河北省承德市兴隆县雾灵山森林公园	40°36′00″N	117°28′48″E	40	吉林省临江市六道沟镇宝山村	41°37′12″N	127°18′00″E
13	齐齐哈尔市龙江县龙兴镇错海林场	47°27′36″N	122°52′12″E	41	内蒙古自治区呼和浩特市大青山林场	48°06′36″N	123°18′00″E
14	大兴安岭地区呼玛县韩家园林业局	52°03′00″N	125°41′24″E	42	黑龙江省牡丹江市海林市柴河镇柴河林业局	44°45′36″N	129°41′24″E
15	黑龙江省大兴安岭加格达奇跃进林场	50°25′12″N	124°12′00″E	43	吉林省集安市五女峰森林公园	41°16′48″N	126°07′48″E
16	黑龙江省大兴安岭地区松岭林业局	50°48′36″N	124°16′48″E	44	内蒙古自治区呼伦贝尔市鄂伦春自治旗阿里河林业局小奎勒河	50°36′00″N	123°43′48″E
17	黑龙江省牡丹江绥芬河林场	44°24′00″N	131°10′12″E	45	内蒙古自治区鄂伦春自治旗诺敏镇毕拉河林业局	49°12′00″N	123°45′00″E
18	延边州和龙市和龙林业局星火林场	42°18′36″N	128°27′36″E	46	黑龙江省清河林业局育林林场	46°19′12″N	129°09′00″E
19	通辽市科尔沁左翼后旗大青沟林场	42°46′48″N	122°12′00″E	47	黑龙江省鸡西市密山市大顶山林场	45°31′48″N	131°52′48″E
20	内蒙古自治区呼伦贝尔扎兰屯	48°01′48″N	122°43′48″E	48	黑龙江省黑河市逊克县三间房林场	49°34′12″N	128°28′48″E
21	吉林省吉林市舒兰市国营溪河林场	44°24′36″N	126°59′24″E	49	黑龙江省黑河市爱辉区三站林场	50°11′24″N	127°19′48″E
22	内蒙古自治区呼伦贝尔市鄂伦春自治旗大杨树镇	49°44′24″N	124°37′48″E	50	内蒙古自治区呼伦贝尔市鄂伦春自治旗吉文镇吉文林业局林奎林场	48°21′00″N	121°27′36″E
23	黑龙江省伊春市乌伊岭区东克林林场	48°35′24″N	129°26′24″E	51	黑龙江省牡丹江市东宁县林场	44°05′24″N	131°07′48″E
24	黑龙江省黑河市嫩江市	49°10′48″N	125°15′00″E	52	内蒙古自治区呼伦贝尔市阿荣旗得力其尔林场	48°42′36″N	123°36′00″E
25	黑龙江省绥化市庆安县	46°52′48″N	127°30′36″E	53	黑龙江省哈尔滨市依兰县对青山林场	46°18′36″N	129°21′00″E
26	河北省秦皇岛市青龙满族自治县都山林场	40°25′12″N	118°56′24″E	54	河北省承德市隆化县茅荆坝乡	41°31′48″N	118°07′48″E
27	内蒙古自治区兴安盟科尔沁右翼前旗	46°04′48″N	121°57′00″E	55	北京市门头沟区	39°56′24″N	116°06′00″E
28	辽宁省大连市庄河市老黑山	40°03′36″N	122°53′36″E				

设 3 次重复，共采集 9 株样树，分别在样树的东南西北 4 个方向，对枝顶下第 5 ～ 6 片成熟健康的太阳叶进行采样。采集完成后，将叶片装入带有硅胶的塑封袋中编号保存，带回实验室待测。

1.3　表型性状测定

叶片样品采集完成后，设置 13 个叶片样点（图 1），根据 13 个样点对表型性状进行测定。本研究测定的叶片表型性状包括叶长（Leaf length，LL）、叶宽（Leaf width，LD）、叶柄长（Petiole length，PL）、叶柄宽（Petiole width，PW）、叶面积（Leaf area，LA）、叶周长（Leaf perimeter，LP）、叶基角（Leaf base angle，LBA）、叶脉夹角（Leaf vein angle，LVA）、叶顶角（Leaf tip angle，LTA）、锯齿角（Serration angle，SA）、叶脉数（Number of lateral veins，NLV）、叶形指数（Leaf shape index，LSI）和叶缘因子（Leaf margin factor，LMF）。其中，所有变量（除叶形指数和叶缘因子外）使用 ImageJ 软件进行扫描和测定。根据崔珺等 [23] 的方法计算叶形指数和叶缘因子，计算公式如下：

叶形指数（叶长宽比）= 叶长 / 叶宽。　　（1）

叶缘因子 =4× 叶面积 / 叶周长。　　（2）

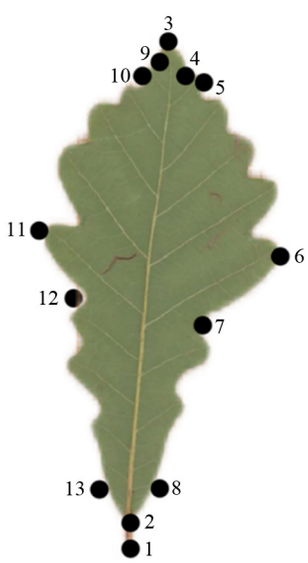


图 1　蒙古栎叶片样点

Fig. 1　*Quercus mongolica* leaf sampling points

1.4　数据处理与分析

使用 SPSS 23.0 软件对叶片表型性状进行描述性统计，包括最小值、最大值、均值、标准差、极差和变异系数。采用 Shannon-Wiener 多样性指数表征叶片多样性，采用嵌套方差分析计算叶片表型性状的方差分量及表型分化系数。表型分化系数计算公式 [24] 如下：

$$V_{st}=\delta_p^2\Big/(\delta_p^2+\delta^2)。\qquad（3）$$

式中：V_{st} 为表型分化系数，δ_p^2 为种源间方差分量，δ^2 为种源内方差分量。

运用 Pearson 相关性分析探究叶片性状之间的关系。对数据实施标准化处理后，采用最大方差法开展叶片性状的主成分分析，并运用欧氏距离类平均法进行聚类分析。最后，以种植地和种源地之间的气候差异作为自变量，借助 Schmidtling 方法评估叶片性状与气候变量之间的关系。例如，将种源地与种植地的年平均气温差作为 1 个独立变量，剖析其与叶片性状之间的关联 [25]。数据分析及绘图借助 R4.4.1 软件完成，所有数据分析的显著性水平均设定为 α=0.05。

2　结果与分析

2.1　蒙古栎叶片表型性状变异及多样性分析

从表 2 可以看出，蒙古栎叶片的叶长、叶宽、叶柄长、叶柄宽、叶顶角、叶基角、叶脉夹角、锯齿角、叶面积、叶周长、叶脉数、叶形指数和叶缘因子的平均值分别为 11.48 cm、5.54 cm、0.33 cm、0.21 cm、123.15°、83.39°、81.73°、111.39°、39.74 cm^2、55.19 cm、9.11 条、2.14 和 2.79，其中叶形指数和叶缘因子为无量纲比值。从变异系数来看，蒙古栎种质资源各性状在不同种源间具有显著的变异（P ＜ 0.05），且不同的性状变异不同。整体上来说，蒙古栎种质资源叶片性状变异系数为 18.81% ～ 63.50%。具体而言，在 13 个叶片表型性状中，叶面积的变异系数最大，为 63.50%，其余叶片表型性状的变异系数从大到小依次为叶柄长、叶基角、叶周长、叶脉夹角、叶缘因子、叶柄宽、叶宽、叶长、锯齿角、叶脉数、叶顶角、叶形指数，叶形指数的变异系数最小，为 18.81%。此外，叶形指数的变异系数小于叶长和叶宽，表明叶片形状较叶长或叶宽性状稳定。

2.2　蒙古栎叶片表型性状变异的表型分化

采用嵌套设计方差分析对蒙古栎叶片 13 个表型性状进行方差分量及表型分化系数分析，结果见表 3。蒙古栎叶片 13 个表型性状的平均表型分化系数为 61.99%，种源间方差分量占总变异的

57.65%，种源内方差分量占总变异的 35.09%。具体而言，叶基角的表型分化系数最大，为 83.01%；其余叶片表型性状的表型分化系数从大到小依次为叶宽、叶脉夹角、叶形指数、叶面积、叶长、叶柄长、叶脉数、叶顶角、叶周长、叶柄宽、锯齿角和叶缘因子；叶缘因子的表型分化系数最小，为 36.51%。叶基角的种源间方差分量百分比最大，为 79.07%；其余表型性状的种源间方差分量百分比从大到小依次为叶宽、叶脉夹角、叶形指数、叶面积、叶长、叶柄长、叶脉数、叶顶角、叶周长、叶柄宽、锯齿角和叶缘因子；叶缘因子的种源间方差分量百分比最小，为 33.14%。整体上，蒙古栎叶片性状在种源间和种源内均存在一定程度的变异，且种源间的变异是表型变异的主要来源。

2.3 蒙古栎叶片表型性状相关性分析

如图 2 所示，叶长与叶宽、叶柄长、叶柄宽、叶面积、叶周长、叶缘因子均呈极显著正相关（$P < 0.001$）；叶宽与叶柄长、叶柄宽、叶面积、叶周长、叶缘因子均呈极显著正相关（$P < 0.001$）；叶柄长与叶柄宽、叶面积、叶周长、叶脉数呈极显著

表 2 蒙古栎种质资源叶表型性状变异分析 †

Table 2 Variation analysis of leaf phenotypic traits germplasm resources of *Quercus mongolica*

表型性状 Phenotypic trait	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Mean	标准差 Standard deviation	极差 Range	变异系数 Coefficient of variation /%	*F* 值 *F* value
叶长 Leaf length	5.32	21.11	11.48	3.12	15.79	27.21	6.42*
叶宽 Leaf width	2.16	11.41	5.54	1.80	9.25	32.67	7.43*
叶柄长 Petiole length	0.05	0.93	0.33	0.15	0.88	45.42	6.55*
叶柄宽 Petiole width	0.09	0.41	0.21	0.07	0.32	32.75	3.45*
叶顶角 Leaf tip angle	15.52	160.90	123.15	26.12	145.38	21.27	4.39*
叶基角 Leaf base angle	39.05	158.20	83.39	33.15	119.15	39.86	12.33*
叶脉夹角 Leaf vein angle	15.48	162.40	81.73	31.70	146.92	38.90	7.25*
锯齿角 Serration angle	38.31	163.07	111.39	28.71	124.76	25.85	2.65*
叶面积 Leaf area	7.51	147.59	39.74	25.16	140.08	63.50	6.74*
叶周长 Leaf perimeter	4.37	155.99	55.19	21.62	151.62	39.29	4.25*
叶脉数 Number of lateral veins	5.00	17.00	9.11	2.22	12.00	24.44	5.02*
叶形指数 Leaf shape index	1.37	4.18	2.14	0.40	2.81	18.81	6.91*
叶缘因子 Leaf margin factor	1.15	9.68	2.79	1.01	8.53	36.23	2.49*

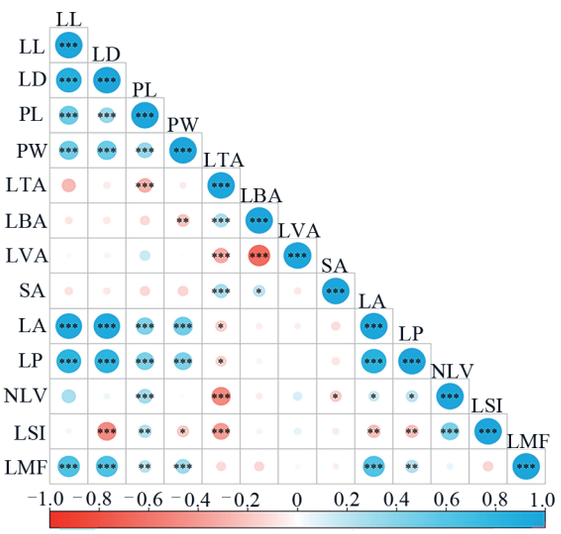
† *：$P < 0.05$ 水平差异显著。*: significant difference at $P < 0.05$ level.

表 3 蒙古栎种质资源叶表型性状的方差分量与表型分化系数

Table 3 Variance components and phenotypic differentiation coefficients of leaf phenotypic traits in germplasm resources of *Quercus mongolica*

表型性状 Phenotypic traits	方差分量 Variance component			方差分量百分比 Percentage of variance component /%			表型分化系数 Phenotypic differentiation coefficient /%
	种源间 Among provenances	种源内 Within provenances	随机误差 Random error	种源间 Among provenances	种源内 Within provenances	随机误差 Random error	
叶长 Leaf length	6.33	2.85	0.65	64.39	28.99	6.61	68.95
叶宽 Leaf width	2.25	0.85	0.20	68.18	25.76	6.06	72.58
叶柄长 Petiole length	0.015	0.007	0.002	62.50	29.17	8.33	68.18
叶柄宽 Petiole width	0.0021	0.0022	0.0004	44.68	46.81	8.51	48.84
叶顶角 Leaf tip angle	366.36	270.37	53.63	53.07	39.16	7.77	57.54
叶基角 Leaf base angle	882.03	180.55	52.98	79.07	16.18	4.75	83.01
叶脉夹角 Leaf vein angle	688.45	266.56	63.77	67.58	26.16	6.26	72.09
锯齿角 Serration angle	295.46	461.39	75.52	35.50	55.43	9.07	39.04
叶面积 Leaf area	421.36	178.80	41.60	65.66	27.86	6.48	70.21
叶周长 Leaf perimeter	245.88	190.00	37.22	51.97	40.16	7.87	56.41
叶脉数 Number of lateral veins	2.86	1.77	0.37	57.20	35.40	7.40	61.77
叶形指数 Leaf shape index	0.109	0.045	0.010	66.46	27.44	6.10	70.78
叶缘因子 Leaf margin factor	0.341	0.593	0.095	33.14	57.63	9.23	36.51
平均值 Average value	—	—	—	57.65	35.09	7.26	61.99

正相关（$P < 0.001$），与叶形指数、叶缘因子呈显著正相关（$P < 0.01$）；叶柄宽与叶面积、叶周长、叶缘因子呈极显著正相关（$P < 0.001$）；叶顶角与叶基角、锯尺齿角呈极显著正相关（$P < 0.001$），与叶脉夹角、叶脉数、叶形指数呈极显著负相关（$P < 0.001$）；叶基角与叶脉夹角呈极显著负相关（$P < 0.001$）；叶面积与叶周长、叶缘因子呈极显著正相关（$P < 0.001$）。



* 表示在 $P < 0.05$ 水平显著；** 表示在 $P < 0.01$ 水平显著；*** 表示在 $P < 0.001$ 水平显著。
* indicates significance at $P < 0.05$; ** indicates significance at $P < 0.01$; *** indicates significance at $P < 0.001$.

图 2　蒙古栎种质资源叶表型性状间的相关性
Fig. 2　Correlation of leaf phenotypic traits in germplasm resources of *Quercus mongolica*

2.4　蒙古栎叶片表型性状主成分分析

对蒙古栎 13 个叶片表型性状进行主成分分析，得到 3 个特征值大于 1 的主成分，累计贡献率为 66.60%（表 4）。主成分 1 和主成分 2 的贡献率达 54.78%，选取前 2 个主成分来解释蒙古栎叶片表型变异。此外，PC1 在叶长、叶宽和叶面积中具有较大载荷；PC2 在叶顶角和叶形指数中具有较大的载荷；PC3 在叶基角和叶脉夹角中具有较大的载荷。

2.5　蒙古栎叶片表型性状聚类分析

经过标准化转换，采用欧氏距离类平均法（UPGMA）进行聚类（图 3），55 份蒙古栎种质资源在欧氏距离 5.0 处分为 4 类。第 I 类种源包括嫩江市、庆安县、庄河市、宽甸满族自治县、嘉荫县和临江市 6 个种源；第 II 类种源仅包括密山市种源；第 II 类种源为牡丹江市、清河县、逊克县、承德市和北京市等 23 个种源；第 VI 类种源为硼海镇、双鸭山市、绥棱县和舒兰市等 25 个种源。其中，主要分类特征为叶长、叶宽、叶顶角和叶基角。从分类数量上来看，蒙古栎种质资源主要表现为中叶和小叶型，大叶型在 55 个种源中所占比例较低。

表 4　蒙古栎种质资源表型特征的主成分分析
Table 4　Principal component analysis of leaf phenotypic traits in germplasm resources of *Quercus mongolica*

表型性状 Phenotypic trait	主成分载荷 Principal loadings		
	主成分 1 PC1	主成分 2 PC2	主成分 3 PC3
叶长 Leaf length	0.954	−0.003	0.152
叶宽 Leaf width	0.929	0.298	−0.082
叶柄长 Petiole length	0.555	−0.373	0.191
叶柄宽 Petiole width	0.624	0.063	−0.197
叶顶角 Leaf tip angle	−0.268	0.745	−0.092
叶基角 Leaf base angle	−0.169	0.489	0.743
叶脉夹角 Leaf vein angle	0.059	−0.554	−0.667
锯齿角 Serration angle	−0.169	0.349	0.075
叶面积 Leaf area	0.956	0.145	0.065
叶周长 Leaf perimeter	0.846	0.096	0.096
叶脉数 Number of lateral veins	0.239	−0.628	0.440
叶形指数 Leaf shape index	−0.202	−0.699	0.453
叶缘因子 Leaf margin factor	0.644	0.088	−0.089
特征值 Eigenvalue	4.75	2.37	1.54
贡献率 Contribution rate /%	36.51	18.27	11.82
累计贡献率 Cumulative contribution rate /%	36.51	54.78	66.60

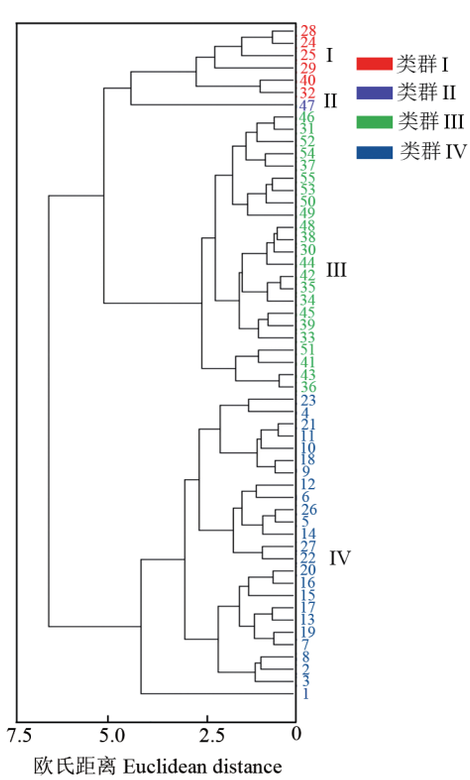


图 3　55 份蒙古栎种质资源的聚类分析
Fig. 3　Clustering analysis of 55 germplasm resources of *Quercus mongolica*

2.6 气候变量对蒙古栎叶片表型性状的影响

运用回归分析探究种源地与种植地的气候变量差对蒙古栎叶片表型变异的影响。由表 5 可知，最干季度降水差（R^2=0.080）显著影响叶长；年平均气温差（R^2=0.160）、最暖季度平均气温差（R^2=0.170）和最冷季度平均气温差（R^2=0.130）显著影响叶柄长（$P < 0.05$）；最冷季度平均气温差（R^2=0.050）显著影响锯齿角（$P < 0.05$）；最干季度降水差（R^2=0.020）显著影响叶面积（$P < 0.05$）；年平均气温差（R^2=0.020）和最冷季度平均气温差（R^2=0.020）显著影响叶脉数（$P < 0.05$）；年平均气温差（R^2=0.008）、最暖季度平均气温差（R^2=0.020）和最冷季度平均气温差（R^2=0.008）显著影响叶形指数（$P < 0.05$）。

表 5 蒙古栎种质资源表型性状与气候变量差的回归分析 †

Table 5 Regression analysis between phenotypic characteristics of *Quercus mongolica* germplasm resources and differences in climate variables

表型性状 Phenotypic traits	年平均气温差 Annual mean temperature difference	最暖季度平均气温差 Mean temperature difference of the warmest quarter	最冷季度平均气温差 Mean temperature difference of the coldest quarter	年平均降水差 Annual mean precipitation difference	最湿季度降水差 Precipitation difference of the wettest quarter	最干季度降水差 Precipitation difference of the driest quarter
叶长 Leaf length	NS	NS	NS	NS	NS	0.080*
叶宽 Leaf width	NS	NS	NS	NS	NS	NS
叶柄长 Petiole length	0.160**	0.170***	0.130**	NS	NS	NS
叶柄宽 Petiole width	NS	NS	NS	NS	NS	NS
叶顶角 Leaf tip angle	NS	NS	NS	NS	NS	NS
叶基角 Leaf base angle	NS	NS	NS	NS	NS	NS
叶脉夹角 Leaf vein angle	NS	NS	NS	NS	NS	NS
锯齿角 Serration angle	NS	NS	0.050*	NS	NS	NS
叶面积 Leaf area	NS	NS	NS	NS	NS	0.020*
叶周长 Leaf perimeter	NS	NS	NS	NS	NS	NS
叶脉数 Number of lateral veins	0.020*	NS	0.020*	NS	NS	NS
叶形指数 Leaf shape index	0.008**	0.020*	0.008**	NS	NS	NS
叶缘因子 Leaf margin factor	NS	NS	NS	NS	NS	NS

† 表中数值为决定系数（R^2），表示各气候因子差异对叶片性状变异的解释率。*：$P < 0.05$，**：$P < 0.01$，***：$P < 0.001$；NS：$P \geq 0.05$。气候因子差异指不同种源原产地气候指标之间的绝对差值。
Values are coefficients of determination (R^2), indicating the proportion of variation in leaf traits explained by differences in climatic factors. *: $P < 0.05$, **: $P < 0.01$, ***: $P < 0.001$; NS: $P \geq 0.05$. Differences in climatic factors refer to the absolute differences in climatic indices among provenances.

3 讨 论

叶片表型变异是在遗传因素与环境因素共同作用下产生的可观测性状，植物叶片存在广泛的性状变异已在诸多研究中得到证实 [26-28]。本研究通过整合蒙古栎分布区 55 个自然种群的 13 个叶片性状，结果显示不同种源的蒙古栎 13 个叶片表型性状呈现出显著的种源差异以及丰富的性状变异。青钱柳 [29]、古樟树 [30] 和香合欢 [31] 的研究结果表明，遗传因素与环境因子的双重作用使得不同植物呈现出显著的表型变异，这些变异为优良种源的筛选提供了基础 [32]，这与本研究结果相一致。

本研究还发现，蒙古栎叶片的叶面积、叶柄长、叶基角、叶周长和叶脉夹角的变异系数较高，表明这 5 个性状能够较好地反映相同种源蒙古栎间的遗传变异。相比而言，叶形指数的变异系数远低于其他性状，这说明蒙古栎叶形指数相较于其他特征更为稳定，在不同种源间基本保持恒定。此外，本研究中叶柄宽、锯齿角、叶缘因子主要表现出种源内变异，这表明叶片性状并非始终呈现较大的种源间变异。在本研究中，蒙古栎种质资源叶片性状变异系数为 18.81% ～ 63.50%。与麻栎 [33] 和香椿 [34] 相比，蒙古栎叶片变异程度处于较高水平。

方差分量百分比及表型分化系数显示，蒙古栎 13 个叶片表型性状在种源间的方差分量百分比为 57.65%，种源内为 35.09%，表型分化系数为 36.51% ～ 83.01%，这表明蒙古栎叶片在种源内和种源间均存在丰富的遗传变异，但变异主要源于种源间。这一结果与青海云杉 [35]、水青树 [36] 和无患子 [37] 的研究结论基本一致，即不同种源间树种的叶片性状变异是其表型变异的主要来源。进一步比较分析发现，本研究中蒙古栎的表型分化系数平均值（61.99%）低于无患子（62.21%），但高于水青树（46.69%）和青海云杉（27.19%）。

55 个蒙古栎种源具有显著的区域分布特征，这可能是其存在丰富表型变异的原因。

在本研究中，蒙古栎的叶片表型变异主要来自种源间，表明蒙古栎的种群分化程度较高，表现出较强的环境适应性。从叶片各性状的变异系数来看，最大的是叶面积（63.50%），其次是叶柄长（45.42%），最低的是叶形指数（18.81%）。这表明蒙古栎叶面积和叶柄长变异较大，而叶形指数较为稳定。陈娟等 [38] 在对川西亚高山林线交错带不同坡向林木竞争与叶片表型可塑性关系的研究中指出，植物对异质生境的适应体现在不同性状的差异化可塑性上，稳定的性状往往执行核心的生理功能，而变异较大的性状则提供更强的环境适应性。这与本研究结果相一致：叶形指数的低变异性可能体现其在维持叶片基础功能中的保守性，而叶面积与叶柄长的高变异性则反映了植物在资源获取策略上的适应性调整。

相关性分析表明，13 个叶片性状间呈现出显著的相关性，如叶长与叶宽、叶面积、叶周长表现出显著的相关性，这表明蒙古栎叶表型性状对环境因子的响应具有一定的协同变异。这可能是因为这些性状在植物的生理功能和形态建成方面相互关联，共同受到遗传和环境因素的调控。进一步分析可知，叶长、叶柄长、锯齿角、叶面积、叶脉数和叶形指数与部分气候变量表现出显著但微弱的关系。这支持了适应性理论，即树木生长和叶片发育均与生理过程相关，并且根据种源起源的限制因素在种源之间存在差异。回归分析结果表明，种源地环境因子虽然可能显著影响部分蒙古栎叶片性状，但其影响较为有限，即同一生长环境下的蒙古栎叶片变异主要源于遗传因素。根据主成分分析选取 3 个主成分，累计贡献率达到 66.60%，基本上能够反映 13 个叶片性状的绝大部分信息。其中，叶长、叶顶角和叶基角是 3 个主成分的主导因子，对蒙古栎叶片表型多样性起着主导作用。基于欧氏距离的聚类分析结果则更加直观地展示了蒙古栎种质资源在叶片表型方面的差异及其亲缘关系。聚类分析结果显示，55 个种源可划分为 4 类，其中第Ⅰ类为大叶型，第Ⅱ、Ⅲ类为中叶型，第Ⅳ类为小叶型。整体而言，55 个种质资源能够依据叶片大小和叶片角度进行分类。第Ⅰ类蒙古栎种质资源具备较大的叶面积和叶柄长，以及较小的叶顶角和叶基角；第Ⅱ、Ⅲ类蒙古栎种质资源拥有中等的叶面积和叶柄长，且叶顶角和叶基角适中；第Ⅳ类蒙古栎种质资源的叶面积和叶柄长较小，但叶顶角和叶基角较大。大叶型总体数量较少，这表明蒙古栎种质资源主要集中于中叶和小叶类型。不同类型蒙古栎种质资源在地理分布上的分散性，可能反映出局部气候环境的复杂性与多样性。即便在地理距离较远的地区，只要具备相似的局部气候条件，就有可能形成具有相似叶片表型的蒙古栎种质资源。

4　结　论

本研究对 55 个蒙古栎种源的叶片表型多样性进行系统分析，结果显示，不同种源蒙古栎叶片的 13 个表型性状表现出丰富的变异，且主要源于种源间的遗传分化（57.65%）。因此，在种质资源收集过程中，应优先涵盖不同地理种源，从而充分保存遗传多样性。叶面积、叶柄长、叶基角、叶周长和叶脉夹角是变异最为显著的性状，可作为种质筛选与鉴定的关键指标。蒙古栎种源整体可划分为大叶型、中叶型与小叶型 3 类，其中小叶型和中叶型占比 90.9%。在生产实践中，可依据立地条件进行种源的定向选择。此外，气候因子对叶片形态的影响相对较小，因此在跨区域引种时，应首先考虑种源的遗传类型。

参考文献：

[1] 李斌 , 顾万春 , 卢宝明 . 白皮松天然群体种实性状表型多样性研究 [J]. 生物多样性 ,2002,10(2):181-188.
Li B, Gu W C, Lu B M. A study on phenotypic diversity of seeds and cones characteristics in *Pinus bungeana*[J]. Biodiversity Science,2002,10(2):181-188.

[2] 陈守一 , 王红林 , 罗昌国 , 等 . 贵州晚熟李表型性状分析及优良种质筛选 [J]. 经济林研究 ,2022,40(2):100-111.
Chen S Y, Wang H L, Luo C G, et al. Analysis of phenotypic characters and selection of excellent germplasm of late maturity plum in Guizhou[J]. Non-wood Forest Research,2022,40(2): 100-111.

[3] Martín-Sánchez R, Sancho-Knapik D, Alonso-Forn D, et al. Oak leaf morphology may be more strongly shaped by climate than by phylogeny[J]. Annals of Forest Science,2024,81:14.

[4] 张凯 , 侯继华 , 何念鹏 . 油松叶功能性状分布特征及其控制因素 [J]. 生态学报 ,2017,37(3):736-749.
Zhang K, Hou J H, He N P. Leaf functional trait distribution and controlling factors of *Pinus tabuliformis*[J]. Acta Ecologica Sinica,2017,37(3):736-749.

[5] 张腾驹 , 陈小红 , 刘静 , 等 . 四川省不同天然种群珙桐叶片解剖结构与其耐热性的关系 [J]. 植物研究 ,2019,39(2):208-221.
Zhang T J, Chen X H, Liu J, et al. Relationship between anatomical structures and heat resistance of *Davidia involucrata*

natural populations in Sichuan Province[J]. Bulletin of Botanical Research,2019,39(2):208-221.

[6] Zheng Y, Feng M S, Li X, et al. Phenotypic variation analysis and excellent clone selection of *Alnus cremastogyne* from different provenances[J]. Plants,2023,12(18):3259.

[7] Gong H M, Yang M, Wang C C, et al. Leaf phenotypic variation and its response to environmental factors in natural populations of *Eucommia ulmoides*[J]. BMC Plant Biology,2023,23:562.

[8] Wang Y H, Niu X, Wang B. Study on leaf morphological and stoichiometric traits of *Cunninghamia lanceolata* based on different provenances[J]. Sustainability,2024,16:4236.

[9] 黄敏 , 黄旭萍 , 陈孝丑 , 等 . 基于 ISSR 分子标记的枫香遗传多样性分析 [J]. 福建农林大学学报 (自然科学版),2022,51(4):524-532.
Huang M, Huang X P, Chen X C, et al. Genetic diversity analysis of *Liquidambar formosana* based on ISSR molecular marker[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition),2022,51(4):524-532.

[10] 李春侨 , 周龙 , 陆彪 , 等 . 天山樱桃种质资源表型多样性研究 [J]. 西北农业学报 ,2018,27(1):91-97.
Li C Q, Zhou L, Lu B, et al. Study on phenotypic diversity of *Cerasus tianschanica* Pojark germplasm resources[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica,2018,27(1):91-97.

[11] 魏春梅 , 安福全 , 苏奇倩 , 等 . 49 份茶树种质资源叶片表型性状的遗传多样性分析 [J]. 茶叶学报 ,2024,65(4):21-32.
Wei C M, An F Q, Su Q Q, et al. Genetic diversity of 49 tea germplasms classified by leaf phenotypes[J]. Acta Tea Sinica, 2024,65(4):21-32.

[12] 谢功良 , 何功秀 , 李家湘 , 等 . 不同海拔铁心杉天然群体的叶表型变异 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2024,44(5):144-155.
Xie G L, He G X, Li J X, et al. Leaf phenotypic variation in natural populations of the *Cunninghamia securinega* at different altitudes[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2024,44(5):144-155.

[13] 戚建莉 , 吴文俊 , 陈炜青 , 等 . 不同油橄榄品种叶片表型性状分析 [J]. 林业科技通讯 ,2023(4):106-109.
Qi J L, Wu W J, Chen W Q, et al. Analysis of leaf phenotypic characters of different *Olea europaea* varieties[J]. Forest Science and Technology,2023(4):106-109.

[14] 曲凯伦 , 张云程 , 王海青 , 等 . 不同种源酸枣表型多样性分析 [J]. 植物资源与环境学报 ,2024,33(2):58-70.
Qu K L, Zhang Y C, Wang H Q, et al. Analysis on phenotypic diversity of *Ziziphus jujuba* from different provenances[J]. Journal of Plant Resources and Environment,2024,33(2):58-70.

[15] 杨晓娟 , 梁永延 , 王禧龙 , 等 . 广西野生水松表型多样性及其与地理 - 气候因子的关系 [J]. 植物资源与环境学报 , 2024,33(4):61-70.
Yang X J, Liang Y Y, Wang X L, et al. Phenotypic diversity of wild *Glyptostrobus pensilis* in Guangxi and its relationship with geographical-climatic factors[J]. Journal of Plant Resources and Environment,2024,33(4):61-70.

[16] 廖梦芸 , 袁刚毅 , 谢娜 , 等 . 贵州豹皮樟叶表型与解剖结构特性及其与环境因子关系 [J]. 经济林研究 ,2024,42(4):72-80.
Liao M Y, Yuan G Y, Xie N, et al. Characteristics of *Lista coreana* var. *sinensis* leaf and its relationships with environmental factors in Guizhou Province[J]. Non-wood Forest Research,2024, 42(4):72-80.

[17] 王雪洁 , 周鹏 , 侯思璇 , 等 . 冬青种质资源叶表型多样性分析 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版),2024,48(5):90-96.
Wang X J, Zhou P, Hou S X, et al. Leaf phenotypic diversity analysis of holly germplasm resources[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition),2024,48(5):90-96.

[18] 陈恺茜 . 中国不同地区栓皮栎叶片结构地理变异及全基因组关联分析 [D]. 杨凌 : 西北农林科技大学 ,2024:29.
Chen K X. Geographic variation and genome-wide association study on leaf structure of *Quercus variabilis* in various regions of China[D].Yangling: Northwest A & F University,2024:29.

[19] 曹德美 . 青杨天然种质叶片表型性状的分子遗传基础 [D]. 北京 : 中国林业科学研究院 ,2021:22-23.
Cao D M. Molecular genetic basis of leaf phenotypic traits in natural germplasm of *Populus cathayana*[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry,2021:22-23.

[20] 曹向文 , 张淼淼 , 陈健 , 等 . 川滇高山栎叶片氮磷含量的海拔变化 [J]. 陆地生态系统与保护学报 ,2023,3(5):1-9.
Cao X W, Zhang M M, Chen J, et al. Variation of N and P contents of *Quercus aquifolioides* leaves along elevation[J]. Terrestrial Ecosystem and Conservation,2023,3(5):1-9.

[21] 尹杰 . 不同种源蒙古栎幼苗叶表型性状变异分析 [J]. 林业科技通讯 ,2023(8):56-60.
Yin J. Analysis of leaf phenotypic character variation of *Quercus mongolica* seedlings from different provenances[J]. Forest Science and Technology,2023(8):56-60.

[22] 李海霞 , 李静 , 李正华 , 等 . 蒙古栎种源表型性状遗传多样性分析 [J]. 西部林业科学 ,2024,53(5):71-79.
Li H X, Li J, Li Z H, et al. Genetic diversity analysis of phenotypic of *Quercus mongolica* provenances[J]. Journal of West China Forestry Science,2024,53(5):71-79.

[23] 崔珺 , 樊燕 , 乔玉立 , 等 . 安徽省不同区域枫香叶片性状研究 [J]. 安徽林业科技 ,2022,48(6):12-20.
Cui J, Fan Y, Qiao Y L, et al. Study on the leaf character of *Liquidambar formosana* in different parts of Anhui Province[J]. Anhui Forestry Science and Technology,2022,48(6):12-20.

[24] 张捷 , 李蓉蓉 , 孟景祥 , 等 . 我国风铃木类植物叶性状表型变异与遗传多样性研究 [J]. 植物研究 ,2021,41(6):851-861.
Zhang J, Li R R, Meng J X, et al. Phenotypic variation and genetic diversity of leaves traits of *Tabebuia* and *Handroanthus* (Bignoniaceae) in China[J]. Bulletin of Botanical Research,2021, 41(6):851-861.

[25] Schmidtling R C. Use of provenance tests to predict response to climate change: loblolly pine and Norway spruce[J]. Tree Physiology, 1994,14: 805-817.

[26] 赵阳 , 毕泉鑫 , 句娇 , 等 . 文冠果种子及苗期生长性状地理种源变异 [J]. 林业科学研究 ,2019,32(1):160-168.
Zhao Y, Bi Q X, Ju J, et al. Geographic variation of seed and seedling growing traits in *Xanthoceras sorbifolium*[J]. Forest Research,2019,32(1):160-168.

[27] 任玲芸 , 王新莹 , 徐源 , 等 . 刺五加 10 个居群叶片表型性状多样性分析 [J]. 森林工程 ,2025,41(6):1218-1229.
Ren L Y, Wang X Y, Xu Y, et al. Analysis of leaf phenotypic trait diversity among 10 populations of *Acanthopanax senticosus*[J]. Forest Engineering,2025,41(6):1218-1229.

[28] Alcántara-Ayala O, Oyama K, Ríos-Muñoz C A, et al. Morphological variation of leaf traits in the *Ternstroemia lineata* species complex (Ericales: Penthaphylacaceae) in response to geographic and climatic variation[J]. PeerJ,2020,8:e8307.

[29] 杨万霞 , 陈爱平 , 贺茜茜 , 等 . 不同种源家系青钱柳在福建沙县的生长适应性评价 [J]. 防护林科技 ,2024(6):10-15,84.
Yang W X, Chen A P, He Q Q, et al. Growth adaptability evaluation of *Cyclocarya paliurus* of different provenance families in Shaxian of Fujian[J]. Protection Forest Science and Technology,2024(6):10-15,84.

[30] 赖骏 , 张北红 , 胡先涛 , 等 . 不同种源古樟树叶片表型性状及叶出油率研究 [J]. 分子植物育种 ,2025,23(24):8243-8251.
Lai J, Zhang B H, Hu X T, et al. Studies on leaf phenotypic characters and leaf oil yield of *Cinnamomum camphora* from different provenances[J]. Molecular Plant Breeding,2025,23(24): 8243-8251.

[31] 高凤 , 文仕知 , 韦铄星 , 等 . 不同种源香合欢种子和叶表型性状变异分析 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2023,43(2):57-66.
Gao F, Wen S Z, Wei S X, et al. Variation analysis of seed and leaf phenotypic traits of *Albizia odoratissima* from different provenances[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2023,43(2):57-66.

[32] Yan W, Xiang Y Q, Gao M, et al. Phenotypic diversity and provenance variation of *Cupressus funebris*: a case study in the Sichuan basin, China[J]. PeerJ,2024,12:e18494.

[33] 张元燕 , 虞木奎 , 方炎明 . 麻栎不同种源的表型性状变异分析 [J]. 植物资源与环境学报 ,2014,23(3):36-44.
Zhang Y Y, Yu M K, Fang Y M. Analysis on phenotypic trait variation of different provenances of *Quercus acutissima*[J]. Journal of Plant Resources and Environment,2014,23(3):36-44.

[34] 冷天凤 , 付莉 , 田小琴 , 等 . 不同种源香椿苗期生长特性及评价 [J]. 贵州林业科技 ,2025,53(3):74-79,86.
Leng T F, Fu L, Tian X Q, et al. Evaluating growth traits of *Toona sinensis* seedling from different provenances[J]. Guizhou Forestry Science and Technology,2025,53(3):74-79,86.

[35] 王俊臣 . 云杉属五个种解剖及光合生理特性比较研究 [D]. 杨凌 : 西北农林科技大学 ,2020:12-42.
Wang J C. Contrasting study on anatomy and photosynthetic-physiological characteristics of five *Picea* species[D]. Yangling: Northwest A & F University,2020:12-42.

[36] 李珊 , 甘小洪 , 憨宏艳 , 等 . 濒危植物水青树叶的表型性状变异 [J]. 林业科学研究 ,2016,29(5):687-697.
Li S, Gan X H, Han H Y, et al. Leaf phenotypic traits of *Tetracentron sinense*, an endangered plant species[J]. Forest Research,2016,29(5):687-697.

[37] 刁松锋 , 邵文豪 , 姜景民 , 等 . 基于种实性状的无患子天然群体表型多样性研究 [J]. 生态学报 ,2014,34(6):1451-1460.
Diao S F, Shao W H, Jiang J M, et al. Phenotypic diversity of natural populations of Sapindus mukorossi based on fruit and seed traits[J]. Acta Ecologica Sinica,2014,34(6):1451-1460.

[38] 陈娟 , 张小晶 , 李巧玉 , 等 . 不同坡向川西亚高山林木竞争与叶片表型可塑性的关系研究 [J]. 生态学报 ,2022,42(5):1788-1797.
Chen J, Zhang X J, Li Q Y, et al. Relationships between competition intensity and leaf phenotypic plasticity of woody plants in subalpine forests on different slope directions[J]. Acta Ecologica Sinica,2022,42(5):1788-1797.

[本文编校：戴欧琳]