

引文格式: 宋云霞, 厉月桥, 何平, 等. 不同家系木姜叶柯的叶功能性状与主要活性成分差异[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2025, 40(3): 140–151. DOI: [10.12101/j.issn.1004-390X\(n\).202411017](https://doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X(n).202411017)

不同家系木姜叶柯的叶功能性状与 主要活性成分差异*

宋云霞^{1,2,3}, 厉月桥^{1,2,3**}, 何平^{1,2,3}, 刘仁^{1,2,3}, 孙韵^{1,2,3},
刘儒¹, 聂林芽¹, 吴亮¹

(1. 中国林业科学研究院亚热带林业实验中心, 江西 新余 336600;

2. 新余市森林碳汇监测与调控重点实验室, 江西 新余 336600;

3. 生物多样性保护与资源利用江西省重点实验室, 江西 新余 336600)

摘要:【目的】探明不同家系木姜叶柯 (*Lithocarpus polystachyus*) 的叶功能性状和主要活性成分含量, 并分析两者的相关性, 为木姜叶柯经济生态型优良种质选择和遗传改良提供科学依据。【方法】以采自 9 个种源 16 个家系的木姜叶柯叶片为材料, 测定其形态特征指标、养分含量和主要活性成分含量, 并比较其差异。【结果】家系来源对木姜叶柯叶片的形态特征、养分含量及主要活性成分含量具有显著影响, 且叶片功能性状和主要活性成分间存在显著相关性。湖南城步家系 (LNT2) 表现出最优的资源利用效率, 其叶干质量 (0.25 g)、叶体积 (550.75 mm³) 和叶干物质含量 (34.62%) 均最高, 而比叶面积 (110.97 cm²/g) 最小; 江西安福家系 (AF) 的根皮苷含量 (27.93 mg/g) 最高; 湖南绥宁家系 (C2) 的三叶苷含量 (37.12 mg/g) 和根皮素含量 (3.68 mg/g) 最高; 二氢查耳酮含量较高的 3 个家系分别是 AF (60.08 mg/g)、C2 (54.92 mg/g) 和江西分宜家系 (NZ, 44.88 mg/g)。叶主要活性成分含量在家系间的变异幅度较大, 其中, 根皮苷和三叶苷含量的变异系数最大, 分别为 48.12% 和 45.93%。【结论】木姜叶柯家系间叶功能性状与活性成分变异丰富。湖南城步家系 (LNT2) 资源利用效率高, 湖南绥宁 (C2)、江西分宜 (NZ) 和江西安福家系 (AF) 活性成分含量突出, 是优质种质选育的理想材料。

关键词: 木姜叶柯; 家系; 叶片功能性状; 主要活性成分

中图分类号: S792.01

文献标志码: A

文章编号: 1004-390X (2025) 03-0140-12

Differences of Leaf Functional Traits and Main Active Components in Different *Lithocarpus polystachyus* Families

SONG Yunxia^{1,2,3}, LI Yueqiao^{1,2,3}, HE Ping^{1,2,3}, LIU Ren^{1,2,3}, SUN Yun^{1,2,3},
LIU Ru¹, NIE Linya¹, WU Liang¹

(1. Experimental Center of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Xinyu 336600, China;

2. Key Laboratory of Forest Carbon Sequestration Monitoring and Regulation in Xinyu City, Xinyu 336600, China;

3. Key Laboratory of Biodiversity Conservation and Resource Utilization in Jiangxi Province, Xinyu 336600, China)

Abstract: [Purpose] To investigate the functional traits and content of main active components in

收稿日期: 2024-11-14

修回日期: 2025-06-18

网络首发日期: 2025-07-08

*基金项目: 江西省林业局科技创新专项 (202208); 中国林业科学研究院中央级公益性科研院所科研专项资金 (CAFYBB2021MA004); 中国林科院亚林中心杉木马尾松省级重点林木良种基地建设项目。

作者简介: 宋云霞 (1996—), 女, 江西赣州人, 硕士, 中级工程师, 主要从事林木遗传育种研究。

E-mail: yunxsoong@163.com

**通信作者 Corresponding author: 厉月桥 (1981—), 男, 河北吴桥人, 博士, 正高级工程师, 主要从事森林培育研究。E-mail: liyueqiao132@163.com

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/53.1044.S.20250708.1336.001>



leaves of *Lithocarpus litseifolius* among different families, as well as their interrelationships, providing a scientific basis for the selection and genetic improvement of economically and ecologically superior germplasm of *L. litseifolius*. [Methods] Leaf samples were collected from 16 families originating from nine provenances of *L. litseifolius*. The morphological traits, nutrient contents, and main active component contents of the samples were measured, and their differences were analyzed.

[Results] The family origin significantly influenced the leaf morphological traits, nutrient contents, and main active components contents of *L. litseifolius*. Significant correlations were also found between leaf functional traits and the main active components. The Hunan Chengbu family (LNT2) exhibited the highest resource use efficiency, possessing the highest leaf dry weight (0.25 g), leaf volume (550.75 mm³), and leaf dry matter content (34.62%), while having the lowest specific leaf area (110.97 cm²/g). The Jiangxi Anfu family (AF) had the highest phloridzin content (27.93 mg/g). The Hunan Suining family (C2) showed the highest trilobatin content (37.12 mg/g) and phloretin content (3.68 mg/g). The families with higher dihydrochalcone content were AF (60.08 mg/g), C2 (54.92 mg/g), and Jiangxi Fenyi family (NZ, 44.88 mg/g). The variation range of the main active components contents in leaves among the families was relatively large, and the coefficient of variation of phloridzin and trilobatin content was the largest, which was 48.12% and 45.93%, respectively. [Conclusion] Substantial variation exists in functional traits and active components among *L. litseifolius* families. The Hunan Chengbu family (LNT2) demonstrates high resource use efficiency, the Hunan Suining (C2), Jiangxi Fenyi (NZ), and Jiangxi Anfu (AF) families exhibit outstanding active component contents, making them promising candidates for breeding superior germplasm.

Keywords: *Lithocarpus polystachyus*; family; leaf functional trait; main active components

木姜叶柯 (*Lithocarpus polystachyus*) 又名多穗柯或甜茶, 为壳斗科 (Fagaceae) 柯属 (*Lithocarpus*) 植物, 主要分布于中国长江以南各省, 其中湖南、江西等省资源尤为丰富^[1]。现代医学研究表明: 以根皮苷、三叶苷、根皮素等二氢查尔酮为主的黄酮类物质是木姜叶柯药物中的主要有效成分^[2], 具有降血糖血脂^[3-4]、抗氧化^[5-6]等功能。随着食疗、养生、保健等观念的深入, 木姜叶柯商业化利用规模不断扩大, 许多地区的木姜叶柯天然资源遭到过度开采, 其活性成分品质也参差不齐。因此, 针对加工产业对优质原料的需求, 开展木姜叶柯定向培育, 选育活性成分含量高、生态适应性强的优良种质对木姜叶柯种质的保护和利用具有重要意义。

叶功能性状 (如形态、养分和光合能力) 是植物与外界联系并进行资源吸收、利用与保存而形成的稳定生理生态指标, 与植物的生存和繁殖密切相关^[7]。它不仅反映了植物对环境变化的响应, 也反映了植物自身营养水平和生态系统特征。叶片作为植物最重要的光合器官, 通过周围环境的能量转换与物质交换进而影响植物的基本行为与

功能特征, 其功能性状在一定程度上反映了植物对有限资源的分配与权衡^[8-9]。研究木姜叶柯叶功能性状与主要活性成分之间的相互关系, 有助于开展木姜叶柯定向培育, 筛选优良种质。

目前, 关于木姜叶柯的研究报道多集中于其培育措施^[10]、化学成分检测^[11]、功能成分鉴定与分离^[12]、功能疗效检验^[13]等, 鲜有对其叶片功能性状与主要活性成分的研究报道, 因此, 需加强该方面的研究以了解木姜叶柯内部资源分配规律, 为其遗传改良、高效培育、高值化利用等提供理论依据。本研究对 9 个种源 16 个家系的木姜叶柯植株进行调查, 对其叶片功能性状、主要活性成分含量等指标进行测定分析, 探究木姜叶柯不同家系间叶片功能性状和主要活性成分的差异, 并进一步分析两者的相关性, 以期为木姜叶柯经济生态型优良种质选择和遗传改良提供科学依据。

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年珠林场青石湾 (27°34'N, 114°33'E)。该地属于亚热带季风气候区, 年平均气温 16.8 ℃, 年降水量 1656 mm, 年蒸发量 1503 mm, 全年无霜期 265 d, 母岩为砂页岩, 土壤为红黄壤, 适宜木姜叶柯生长。

1.2 试验材料

供试材料为 4 年生木姜叶柯植株, 由 2020 年从 9 个种源地采集的种子培育而成, 2021 年栽植于试验地, 采种地的地理位置及气象因子见表 1, 其中, 气象因子数据来自国家气象数据中心 (data.cma.cn)。于 2024 年 4 月采集供试木姜叶柯叶片, 共 16 个家系 (表 2)。

1.3 试验设计与供试叶片采集

栽植区分为 4 个重复区, 每个重复区覆盖 9

个种源 16 个家系, 每排种植 10 株同一家系, 株行距为 2 m×2 m。采叶树为生长及结实状况良好的单株, 每个家系选择 4 株生长发育良好的健壮植株, 分别于东、西、南、北 4 个方位各选取 10 片形状、大小基本相同, 叶片完全展开, 无病虫害, 叶边缘较完整的叶片作为样本进行表型指标测定。再采集叶片 100 g 于 105 ℃ 杀青 15 min, 60 ℃ 烘干至恒量, 粉碎过 60 目筛, 作为叶片化学元素和主要活性成分待测材料。

1.4 叶功能性状指标与成分测定

1.4.1 叶形态指标测定

使用电子天平称量叶片鲜质量 (leaf fresh weight, LFW)。将所有叶片平铺于扫描仪, 分辨率设为 300 dpi 进行扫描; 采用万深 LA-S 叶分析软

表 1 采种地地理位置及气象因子
Tab. 1 Geographic location and meteorological factors of seed harvesting sites

种源 provenance	地理位置 geographic location	海拔/m altitude	温度/℃ temperature			年均降水量/mm average annual precipitation	年均日照时间/h average annual sunshine duration
			1月 January	7月 July	年均 annual average		
四川雅安 Yaan, Sichuan	30.09°N, 102.65°E	627.6	7.10	26.70	19.33	1 745.48	828.78
湖南城步 Chengbu, Hunan	26.22°N, 110.22°E	477.7	6.63	28.12	17.78	1 159.70	1 324.88
湖南会同 Huitong, Hunan	26.84°N, 109.68°E	281.4	6.68	29.05	18.20	1 299.75	1 255.43
湖南浏阳 Liuyang, Hunan	28.27°N, 113.95°E	101.1	6.85	29.65	18.80	1 544.60	1 528.33
湖南绥宁 Suining, Hunan	26.62°N, 110.22°E	559.0	6.73	29.75	18.08	1 325.80	1 348.90
湖南新宁 Xinning, Hunan	27.44°N, 109.41°E	346.1	6.68	29.00	17.98	1 210.43	1 364.40
湖南溆浦 Xupu, Hunan	27.89°N, 110.72°E	204.0	6.53	29.00	18.20	1 468.65	1 344.78
江西分宜 Fenyi, Jiangxi	27.57°N, 114.57°E	93.7	7.73	29.93	17.33	1 640.65	1 500.75
江西安福 Anfu, Jiangxi	27.39°N, 114.62°E	85.9	8.20	29.88	19.40	1 385.33	1 482.68

表 2 家系概况
Tab. 2 Overview of the families

序号 serial number	种源 provenance	家系号 family number	家系数量 number of families
1	四川雅安 Yaan, Sichuan	YA2	1
2	湖南城步 Chengbu, Hunan	LNT1、LNT2	2
3	湖南会同 Huitong, Hunan	B2、B8	2
4	湖南浏阳 Liuyang, Hunan	D5	1
5	湖南绥宁 Suining, Hunan	C2	1
6	湖南新宁 Xinning, Hunan	HS1、HS2、XN4、XN5、XN6、XN7	6
7	湖南溆浦 Xupu, Hunan	A6	1
8	江西分宜 Fenyi, Jiangxi	NZ	1
9	江西安福 Anfu, Jiangxi	AF	1

件对扫描的图片进行批量处理,测量叶长 (leaf length, LL)、叶宽 (leaf width, LW)、叶周长 (leaf perimeter, LP) 和叶面积 (leaf area, LA); 使用游标卡尺测量叶片厚度 (leaf thickness, LT)。将扫描后的叶片放入烘箱, 110 °C 杀青 0.5 h, 60 °C 烘干 48 h 后取出, 称其干质量 (leaf dry weight, LDW)。结合相关测量指标计算比叶面积 (specific leaf area, SLA)、叶体积 (leaf volume, LV)、叶干物质含量 (leaf dry matter content, LDMC)、叶组织密度 (leaf tissue density, LD) 和叶形指数 (leaf shape index, LSI)。计算公式为: $SLA=LA/LDW$; $LV=LA \times LT \times 100$; $LDMC=(LDW/LFW) \times 100\%$; $LD=(LDW \times 1000)/LV$; $LSI=LL/LW$ 。

1.4.2 叶片养分测定

全碳含量采用元素分析仪 (elementar, vario III) 测定; 全氮含量采用自动定氮分析仪 (海能, K9860) 测定; 全磷含量采用压力罐消解法—电感耦合等离子体发射光谱仪 (perkinelmer, optima 8000) 测定; 全钾含量采用火焰原子吸收光谱仪 (perkinelmer, pinAAcle 900 T) 测定^[14]。根据测定数据计算碳氮比 (C : N)、碳磷比 (C : P)、氮磷比 (N : P)、氮钾比 (N : K) 和磷钾比 (P : K)。

1.4.3 叶片主要活性成分测定

木姜叶柯中的黄酮类物质主要为二氢查耳酮, 包括根皮苷、三叶苷、根皮素等。参考王钰等^[15]的方法并稍作改进, 采用高效液相色谱仪 (岛津, LC20A) 测定根皮苷、三叶苷和根皮素的含量。称取叶片粉末样品 0.2 g, 加入 70% 甲醇 50 mL, 于 500 W、40 kHz 超声提取 30 min, 取出后冷却, 于 50 mL 容量瓶定容; 转移至冷冻离心机 (Eppendorf, 5810R), 于 4200 r/min 条件下离心 8 min, 取上清液在 0.45 μm 有机滤膜中过滤, 进样。色谱柱为 waters C18 柱 (250.0 mm×4.6 mm, 5.0 μm), 流动相 A 为 0.04% 甲酸水溶液, 流动相 B 为色谱级乙腈, 梯度洗脱; 柱温 40 °C; 流速 0.8 mL/min; 检测波长 280 nm; 进样量 10 μL。二氢查耳酮含量为根皮苷、三叶苷、根皮素三者含量之和^[16]。

1.5 数据处理与统计分析

采用 Excel 2010 汇总数据; 采用 SPSS 26.0 对不同家系木姜叶柯的叶表型性状进行单因素方差分析, 并采用邓肯 (Duncan) 法进行多重比较; 采用皮尔逊 (Pearson) 相关性分析方法, 进一步分析叶片表型性状与主要活性成分含量之间的相关

性; 采用 Origin Pro 2021 对家系群体叶片主要活性进行聚类分析。

2 结果与分析

2.1 不同家系木姜叶柯的叶片形态特征

由表 3 可知: 不同家系的叶长 (LL)、叶宽 (LW) 和叶周长 (LP) 整体间无显著差异; 不同家系的叶干质量 (LDW) 和比叶面积 (SLA) 整体间存在极显著差异, 其中, LNT2 家系的 LDW 最大 (0.25 g)、SLA 最小 (110.97 cm²/g), 而 XN5 家系 LDW 最小 (0.11 g)、SLW 最大 (175.68 cm²/g); 不同家系的叶体积 (LV) 整体间存在显著差异, 其中, LNT2、HS1 和 B2 家系大于其他家系, 且与 XN4、XN5 家系存在显著差异; 不同家系的叶干物质含量 (LDWC) 整体间存在极显著差异, 其中, LNT2 家系最大 (34.62%), 且显著大于 A6、HS1、XN4、XN5 和 YA2, XN5 家系的最小 (23.57%); 不同家系的叶组织密度 (LD) 整体间存在显著差异, 其中, AF 家系最大, NZ 家系最小, 其值分别为 0.50 和 0.34 g/cm³; 不同家系的叶形指数 (LSI) 整体间存在显著差异, 其中, NZ、XN4 和 XN5 家系显著大于 D5、HS1、HS2 家系。在 16 个家系中, LNT2 家系的 LL、LP、LDW、LV 和 LDWC 最大, LW、LD 和 LSI 也大于平均值, SLA 最小, 说明 LNT2 家系叶片较大、较厚, 在叶片形态特征上相对表现更优。

2.2 不同家系木姜叶柯叶片的养分含量

由图 1 可知: 不同家系木姜叶柯叶片的养分含量存在显著差异。叶片全碳含量为 440.29~510.56 mg/g, 平均值为 483.92 mg/g; XN6 家系的叶片全碳含量最高, 且显著高于 D5、HS1 和 XN7 家系; XN7 家系的叶片全碳含量最低。叶片全氮含量为 11.60~14.62 mg/g, 平均值为 13.20 mg/g; HS2、YA2 和 A6 家系的全氮含量较高, 分别为 14.62、14.54 和 14.33 mg/g; C2 家系的全氮含量最低。叶片全磷含量在各家系间的差异较大, 其中, B8 家系的含量 (最高) 是 C2 家系 (最低) 的 1.9 倍。在 16 个家系中, XN4 家系的叶片全钾含量最高, 达 16.22 mg/g; B2 家系的叶片全钾含量最低, 为 10.63 mg/g。

由表 4 可知: 16 个木姜叶柯家系叶片的化学计量比, 除 C : N 无显著差异, 其他化学元素计量比均呈极显著差异。从家系来看, B8 家系的叶

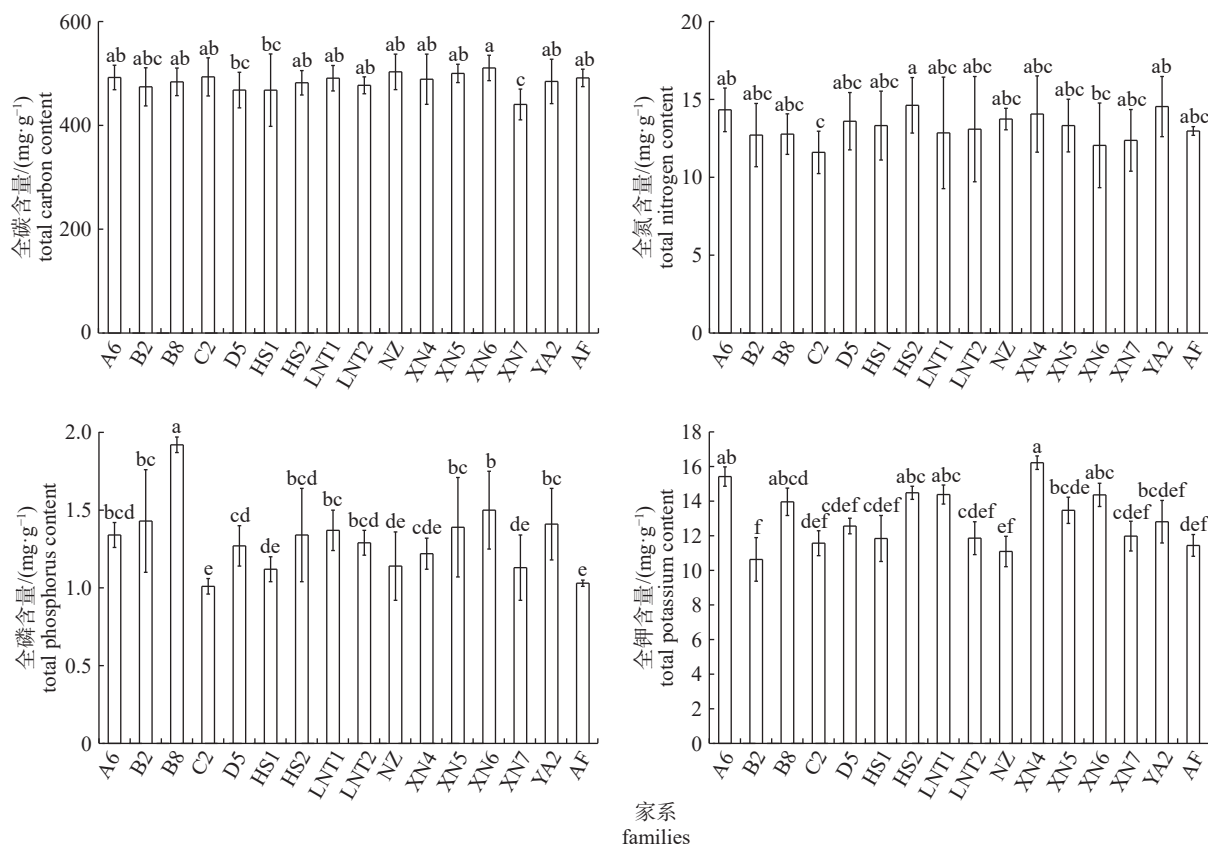
表 3 不同家系木姜叶柯的叶片形态特征

Tab. 3 Leaves morphological traits of *Litsea foeniculifolia* from different families

家系 families	叶长/cm leaf length	叶宽/cm leaf width	叶周长/cm leaf perimeter	叶干质量/g leaf dry weight	比叶面积/(cm ² ·g ⁻¹) specific leaf area	叶体积/mm ³ leaf volume	叶干物质含量/% leaf dry matter content	叶组织密度/(g·cm ⁻³) leaf tissue density	叶形指数 leaf shape index
A6	9.00±0.91 a	3.73±0.06 abc	23.88±2.16 ab	0.15±0.01 bcde	148.99±15.77 abcd	384.09±50.66 bc	27.35±0.33 cd	0.40±0.07 abcd	2.42±0.28 ab
B2	9.11±0.90 a	4.00±0.37 abc	24.69±2.51 ab	0.20±0.03 ab	124.90±18.79 cde	485.71±162.58 ab	33.56±2.97 ab	0.43±0.03 abcd	2.28±0.07 ab
B8	8.96±1.25 a	3.93±0.56 abc	24.31±3.36 ab	0.16±0.01 bcde	155.22±45.50 abc	389.34±47.11 bc	28.86±5.43 abcd	0.41±0.06 abcd	2.28±0.21 ab
C2	8.18±0.93 a	3.49±0.45 bc	22.01±2.46 b	0.16±0.05 bcde	124.72±21.83 cde	340.64±140.44 bc	29.57±3.85 abcd	0.48±0.04 abc	2.35±0.18 ab
D5	8.36±0.97 a	4.02±0.61 abc	23.79±2.59 ab	0.16±0.04 bcde	144.18±20.47 abcde	376.54±100.58 bc	28.74±1.88 abcd	0.43±0.06 abcd	2.09±0.14 b
HSI	8.96±0.26 a	4.23±0.35 a	25.01±0.62 ab	0.19±0.03 abc	137.74±17.36 bcde	476.57±92.39 ab	28.38±3.86 bcd	0.41±0.04 abcd	2.13±0.16 b
HS2	8.58±1.37 a	4.00±0.57 abc	23.71±3.56 ab	0.17±0.05 bcde	143.04±13.25 abcde	410.20±101.00 abc	30.08±4.02 abc	0.40±0.01 abcd	2.15±0.29 b
LNT1	9.74±0.50 a	3.97±0.22 abc	26.36±1.87 ab	0.18±0.01 bcd	140.03±13.31 abcde	391.09±85.51 abc	29.60±4.48 abcd	0.49±0.01 ab	2.46±0.02 ab
LNT2	9.84±0.90 a	4.10±0.38 ab	27.21±1.74 a	0.25±0.03 a	110.97±7.65 e	550.75±74.30 a	34.62±1.00 a	0.45±0.03 abc	2.42±0.36 ab
NZ	9.54±1.48 a	3.60±0.22 abc	25.18±2.91 ab	0.15±0.02 bcde	147.29±3.40 abcd	431.44±79.87 abc	30.08±3.32 abc	0.34±0.02 d	2.64±0.30 a
XN4	8.99±0.72 a	3.51±0.22 abc	24.08±2.20 ab	0.12±0.02 de	166.84±13.57 ab	272.03±66.84 c	23.76±4.14 d	0.47±0.08 abc	2.56±0.07 a
XN5	8.77±0.31 a	3.38±0.18 c	22.57±0.98 b	0.11±0.02 e	175.68±24.20 a	279.65±50.17 c	23.57±3.48 d	0.40±0.08 abcd	2.59±0.12 a
XN6	8.94±0.58 a	3.85±0.50 abc	24.58±1.53 ab	0.16±0.03 bcde	147.13±9.27 abcd	415.40±58.95 abc	31.06±1.65 abc	0.39±0.05 bcd	2.34±0.21 ab
XN7	8.96±0.49 a	3.73±0.14 abc	23.71±1.63 ab	0.17±0.03 bcd	129.66±17.49 cde	375.77±44.04 bc	31.41±1.37 abc	0.46±0.04 abc	2.40±0.11 ab
YA2	8.79±0.30 a	3.59±0.11 abc	23.73±0.99 ab	0.14±0.00 cde	151.97±1.54 abc	386.04±0.65 bc	26.96±1.31 cd	0.37±0.01 cd	2.45±0.02 ab
AF	9.14±0.26 a	3.91±0.09 abc	24.70±1.18 ab	0.21±0.01 ab	113.42±2.46 de	412.47±18.79 abc	31.33±1.24 abc	0.50±0.02 a	2.34±0.12 ab
平均值 mean value	8.99±0.82	3.82±0.38	24.35±2.21	0.17±0.04	141.36±23.04	398.61±97.21	29.31±3.90	0.42±0.06	2.37±0.22
F	0.814	1.375	0.985	3.480**	2.738**	2.106*	2.724**	2.013*	2.009*

注：各家系对应的种源见表2；同列不同小写字母表示不同家系间存在显著差异 ($P<0.05$)；“**”和“***”分别表示不同家系整体间存在显著 ($P<0.05$)和极显著差异 ($P<0.01$)；下同。

Note: The provenances corresponding to each family are shown in Tab.2; different lowercase letters indicate significant differences among different families ($P<0.05$); “*” and “***” indicates significant differences ($P<0.05$) and extremely significant differences ($P<0.01$) among different families as a whole; the same as below.



注: 各家系对应的种源见表2; 不同小写字母表示不同家系间存在显著差异 ($P < 0.05$); 下同。

Note: The provenances corresponding to each family are shown in Tab.2; different lowercase letters indicate significant differences among families ($P < 0.05$); the same as below.

图1 不同家系木姜叶柯的叶片养分含量

Fig. 1 Leaf nutrient content of *Lithocarpus litseifolius* from different families

片C:N较高, P:K最高, 而C:P和N:P最低; C2家系的叶片C:P最高, C:N和N:P高于大部分家系, 但N:K和P:K较低; A6和HS2家系的叶片C:N、C:P和N:K均低于平均值。从化学元素计量比来看, C:N最高的是XN6家系, 最低的是HS2和YA2家系; N:P值的范围为6.67~12.57, 其中, AF和NZ家系显著高于大部分家系; C:P值的范围为252.55~486.40, 其中, AF和NZ家系高于大部分家系; N:K最高的是B2家系, 其值是最低家系XN6的1.6倍; P:K最高的是B2和B8家系, 最低的是XN4家系。

2.3 不同家系木姜叶柯叶片的主要活性成分含量及其变异性

由图2可知: 在16个木姜叶柯家系叶片中, 根皮苷、三叶苷、根皮素和二氢查耳酮含量均存在差异, 其平均值分别为12.52、17.60、2.83和32.95 mg/g。根皮苷含量最高的2个家系是AF和NZ, 分别为27.93和25.74 mg/g, 且显著高于其

他家系; 含量最低的2个家系是LNT1和XN6, 仅分别为7.01和6.77 mg/g; 含量高于平均值的家系是AF、NZ、B2、LNT2、B8、C2和A6。三叶苷含量为8.79~37.12 mg/g, C2家系最高, XN6家系最低, 高于平均值的家系是C2、AF、XN5和XN4, 含量最低的3个家系是HS2、D5和XN6。可见, AF家系的根皮苷和三叶苷含量均高于大部分家系, XN6家系的根皮苷和三叶苷含量则均为最低。

由图2还可知: 木姜叶柯叶片的根皮素含量相对较低, 为2.23~3.68 mg/g, 其中, C2、XN4和XN5家系的含量分别为3.68、3.63和3.56 mg/g, 显著高于其他家系; HS2家系的含量最低。AF家系叶片的二氢查耳酮含量最高, 为60.08 mg/g; 其次为C2、NZ、XN5、XN4和B8家系, 分别为54.92、44.88、41.42、39.74和33.61 mg/g; D5、HS2和XN6家系的二氢查耳酮含量显著低于其他家系, 其中XN6家系最低, 仅为18.05 mg/g。

表 4 不同家系木姜叶柯叶片的化学元素计量比

Tab. 4 Stoichiometric ratios of chemical elements in the leaves of *L. litseifolius* from different families

家系 families	C : N	C : P	N : P	N : K	P : K
A6	34.53±0.91 bc	366.63±4.90 d	10.64±0.20 abcd	0.93±0.03 cde	0.09±0.00 cd
B2	38.13±2.11 abc	348.96±32.36 d	9.12±0.63 de	1.35±0.18 a	0.14±0.01 a
B8	38.35±1.84 abc	252.55±5.38 e	6.67±0.26 f	0.94±0.06 cde	0.14±0.01 a
C2	42.83±1.20 ab	486.40±9.33 a	11.41±0.31 abc	1.03±0.07 bcde	0.09±0.01 bcd
D5	34.85±1.36 bc	370.80±12.36 d	10.76±0.55 abcd	1.09±0.05 abcde	0.10±0.01 bc
HS1	36.05±2.32 abc	418.35±15.65 bcd	11.86±0.63 ab	1.20±0.11 abc	0.10±0.01 bc
HS2	33.34±1.48 c	376.25±26.57 d	11.27±0.58 abcd	1.01±0.05 bcde	0.09±0.01 bcd
LNT1	41.36±4.41 abc	360.92±13.12 d	9.43±0.85 cde	0.91±0.09 cde	0.10±0.00 bcd
LNT2	39.23±4.16 abc	372.53±10.46 d	10.12±0.76 bcde	1.18±0.15 abcd	0.12±0.01 b
NZ	36.65±0.49 abc	458.70±31.45 abc	12.47±0.73 a	1.31±0.11 ab	0.11±0.01 bc
XN4	35.93±2.73 abc	403.45±13.71 cd	11.59±0.74 abc	0.87±0.05 de	0.08±0.00 d
XN5	38.16±2.07 abc	379.17±33.33 d	9.82±0.46 bcde	1.01±0.05 bcde	0.11±0.01 bc
XN6	44.58±3.92 a	348.13±16.99 d	8.24±0.69 ef	0.85±0.06 e	0.11±0.01 bc
XN7	37.03±2.34 abc	410.77±29.39 bcd	11.61±1.34 abc	1.08±0.10 abcde	0.10±0.01 bcd
YA2	33.81±1.87 c	352.21±23.42 d	10.41±0.35 abcde	1.16±0.06 abcde	0.11±0.01 bc
AF	37.91±2.21 abc	476.10±27.63 ab	12.57±0.19 a	1.15±0.05 abcde	0.09±0.01 bcd
平均值 mean value	37.82±0.66	385.57±6.98	10.45±0.21	1.07±0.03	0.10±0.01
F	1.521	0.901**	5.437**	2.576**	5.201**

由表 5 可知：根皮苷、三叶苷含量的变异系数和相对极差明显高于根皮素和二氢查耳酮。在 16 个家系中，XN4 家系的根皮苷含量波动幅度较大，其变异系数和相对极差分别为 25.69% 和 74.81；而 A6 家系最为稳定，变异系数和相对极差分别为 2.76% 和 6.17。AF 家系的三叶苷含量波动幅度最大，变异系数和相对极差分别为 20.84% 和 50.57；XN4 和 XN5 家系最稳定，变异系数分别为 3.33% 和 3.04%。对根皮素含量而言，C2 家系波动幅度最大，变异系数和相对极差分别为 15.82% 和 51.77；YA2 家系波动幅度最小，变异系数和相对极差分别为 3.71% 和 10.40。AF 家系的二氢查耳酮含量变化幅度最大，变异系数和相对极差分别为 13.58% 和 34.52，XN5 家系最小，其变异系数和相对极差分别为 2.40% 和 6.30。由此可见，木姜叶柯家系间叶片中的根皮素含量相对稳定，而根皮苷和三叶苷含量波动幅度大，其中根皮苷含量在家系间变化幅度最大，其变异系数和相对极差达 48.12% 和 229.82。

2.4 木姜叶柯叶片功能性状与主要活性成分的相关性

由图 3 可知：木姜叶柯叶片功能性状与活性

成分存在显著相关性。在叶片功能性状间，叶干质量 (LDW) 与全钾呈显著负相关；比叶面积 (SLA) 与全氮、全磷呈显著正相关，与全钾呈极显著正相关，与 N : K 呈显著负相关；叶干物质含量 (LDWC) 与全氮呈显著负相关，与全钾呈极显著负相关，与 N : K、P : K 呈显著正相关；叶组织密度 (LD) 与全磷呈显著负相关。在叶片主要活性成分与功能性状间，根皮苷与 SLA 呈显著负相关，与全钾呈极显著负相关，与 C : P 呈显著正相关，与 N : K 呈极显著正相关；三叶苷与叶宽 (LW)、叶体积 (LV)、LDWC、全磷呈显著负相关，与 LD 呈显著正相关，与 C : P 呈极显著正相关；根皮素与 LW、LV、LDWC、N : K 呈显著负相关，与 P : K 呈极显著负相关，与 LD 呈显著正相关；二氢查耳酮与 LW、全磷呈显著负相关，与叶形指数 (LSI)、N : P 呈显著正相关，与 C : P 呈极显著正相关。

2.5 木姜叶柯叶片主要活性成分的聚类分析

由图 4 可知：以主要活性成分进行聚类，以欧氏距离 0.90 为阈值，可将 16 个木姜叶柯家系聚为 3 大类：第 I 类包括 A6、HS1、LNT1、XN7 等 11 个家系，此类家系主要活性成分含量较其他

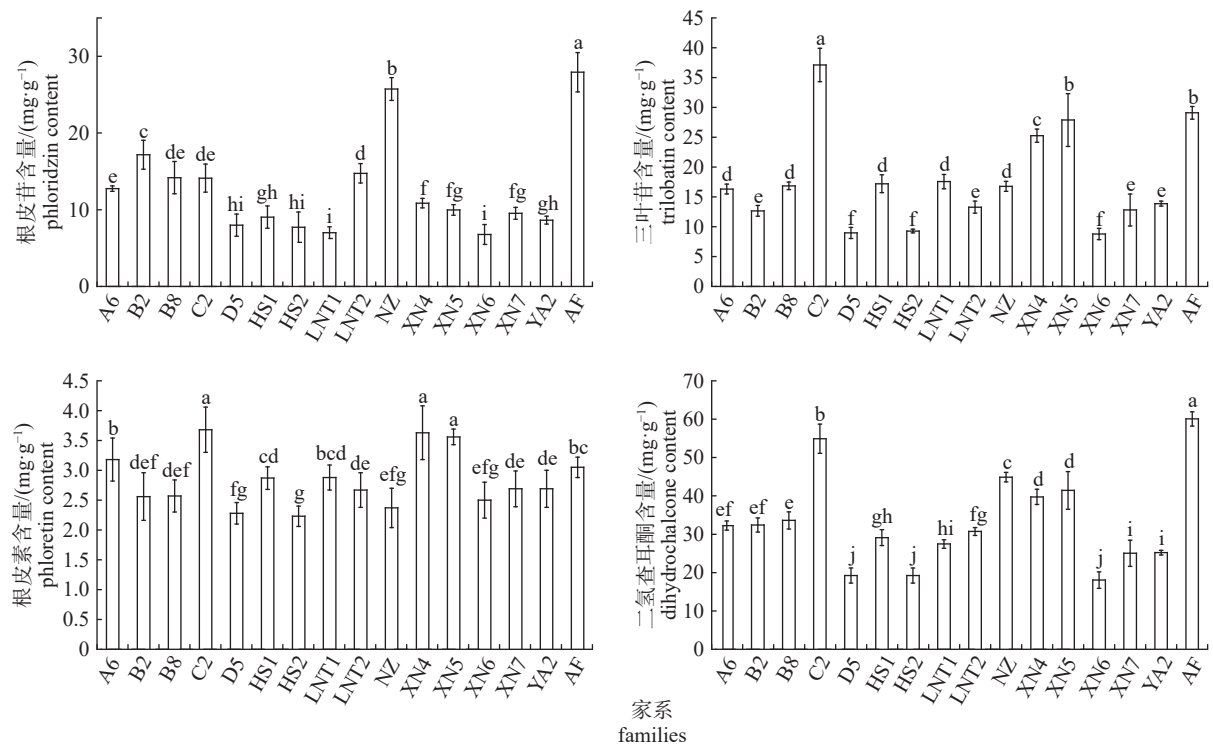


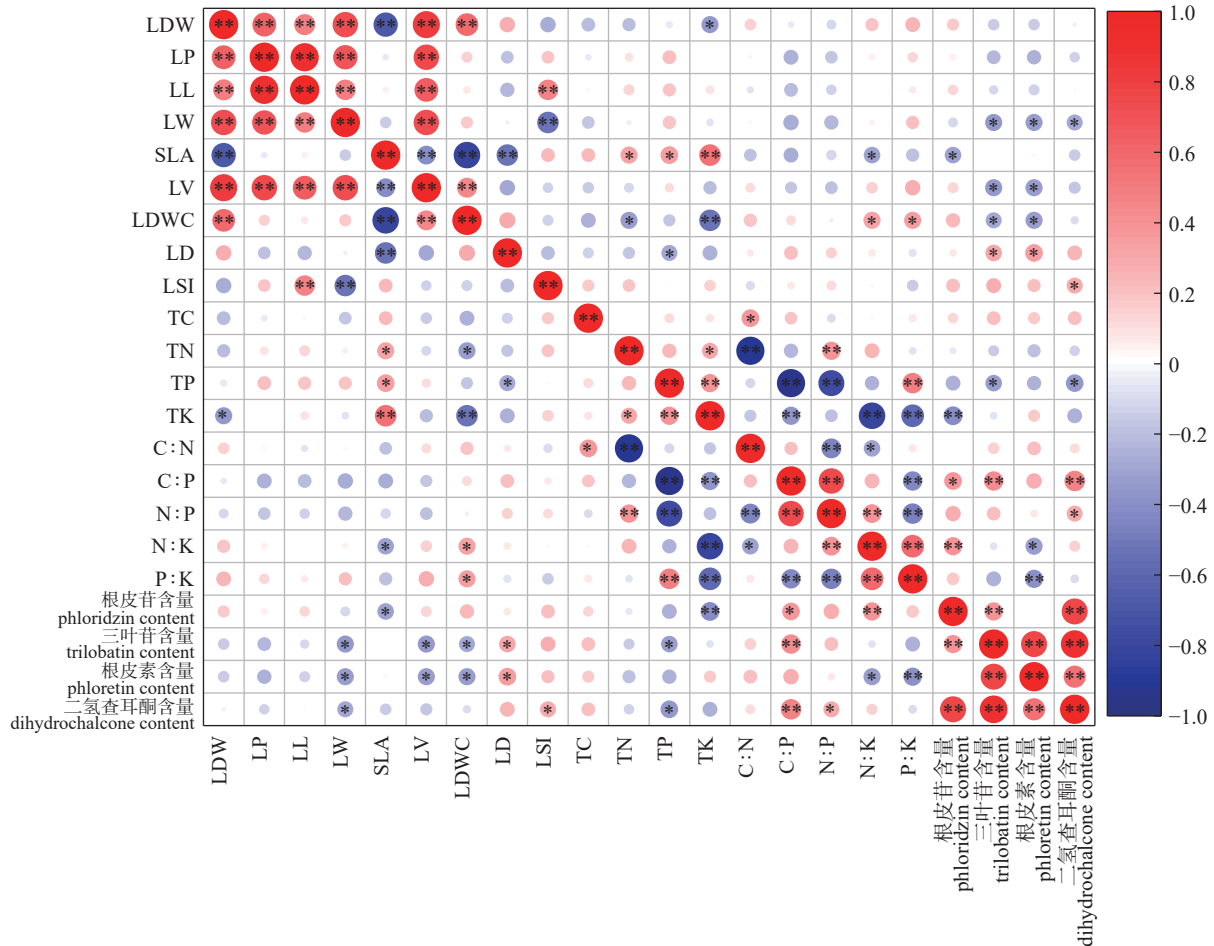
图 2 不同家系木姜叶柯叶片的主要活性成分含量

Fig. 2 Main active components contents in the leaves of *L. litseifolius* from different families

表 5 不同家系木姜叶柯叶片主要活性成分含量的变异系数和相对极差

Tab. 5 Coefficient of variation and relative range of main active components contents in the leaves of *L. litseifolius* from different families

家系 families	根皮苷含量 phloridzin content		三叶苷含量 trilobatin content		根皮素含量 phloretin content		二氢查耳酮含量 dihydrochalcone content	
	变异系数/% coefficient of variation	相对极差 relative range	变异系数/% coefficient of variation	相对极差 relative range	变异系数/% coefficient of variation	相对极差 relative range	变异系数/% coefficient of variation	相对极差 relative range
A6	2.76	6.17	5.08	13.34	11.32	32.96	3.68	8.84
B2	12.96	33.84	7.55	21.73	10.33	29.60	6.94	18.31
B8	18.02	46.71	10.26	32.49	7.85	23.99	10.12	25.96
C2	10.96	33.97	7.07	18.80	15.82	51.77	5.71	20.58
D5	14.78	40.78	3.72	11.62	10.36	25.36	6.65	19.53
HS1	9.17	24.81	3.62	10.70	5.51	13.49	3.10	9.14
HS2	5.79	19.42	4.93	13.65	14.07	37.46	2.76	7.93
LNT1	10.79	34.50	6.76	15.30	7.20	20.03	4.02	10.96
LNT2	8.52	22.53	7.53	21.56	10.70	25.88	3.29	8.90
NZ	16.01	45.18	8.67	29.87	6.45	17.54	7.12	18.63
XN4	25.69	74.81	3.33	10.70	7.77	19.79	10.18	30.37
XN5	5.94	16.30	3.04	9.08	11.69	32.26	2.40	6.30
XN6	5.73	17.38	4.35	12.22	12.30	34.42	5.02	14.81
XN7	19.19	57.38	10.75	34.53	12.14	29.05	11.93	38.17
YA2	6.94	20.90	15.88	41.08	3.71	10.40	11.82	32.77
AF	8.03	21.12	20.84	50.57	11.19	32.27	13.58	34.52
平均值 mean value	48.12	229.82	45.93	194.06	19.03	83.36	35.71	145.87



注: LDW. 叶干质量; LP. 叶周长; LL. 叶长; LW. 叶宽; SLA. 比叶面积; LV. 叶体积; LDWC. 叶干物质含量; LD. 叶组织密度; LSI. 叶形指数; TC. 全碳含量; TN. 全氮含量; TP. 全磷含量; TK. 全钾含量。“*”表示在 0.05 水平上显著相关; “***”表示在 0.01 水平上极显著相关。

Note: LDW. leaf dry weight; LP. leaf perimeter; LL. leaf length; LW. leaf width; SLA. specific leaf area; LV. leaf volume; LDWC. leaf dry matter content; LD. leaf tissue density; LSI. leaf shape index; TC. total carbon content; TN. total nitrogen content; TP. total phosphorus content; TK. total potassium content. “*” indicates significant correlation ($P < 0.05$), “***” indicates extremely significant correlation ($P < 0.01$).

图 3 木姜叶柯叶片功能性状与主要活性成分之间的相关性

Fig. 3 Correlation between functional traits and main active components in leaves of *L. litseifolius*

家系低;第Ⅱ类为 C2、XN4 和 XN5 家系,此类家系的三叶苷和根皮素含量较高,但根皮苷含量较低;第Ⅲ类为 NZ 和 AF 家系,此类家系的根皮苷含量最高,且三叶苷和二氢查耳酮含量也高于大部分家系。

3 讨论

3.1 不同家系的叶片形态特征差异及相关性

植物叶片形态反映了其资源获取能力、生长状况及适应环境的策略^[17-18]。有研究表明:叶长(LL)和叶宽(LW)能表征植物叶片光合作用的强弱,比叶面积(SLA)能反映植物获取和利用资源的能力,叶干物质含量(LDWC)则反映了植物养分维持及防御能力^[19]。在本研究中,LNT2 家系的

LL、叶周长(LP)、叶干质量(LDW)、叶体积(LV)和 LDWC 均最大,LW 也较大,但 SLA 最小;而 XN5 家系的 LW、LDW 和 LDWC 最小,LL 和 LV 也较小,但 SLA 最大。这说明 LNT2 家系叶片大而厚,叶片更重、干物质含量更高,资源利用率最高,该家系投入了大量生物量构建大型、厚实、结构坚固的叶片,使其在适应环境过程中通过增加叶体积和物质积累来提高抗逆性,从而抵御外界伤害;而 XN5 家系则对环境的适应能力以及资源获取能力较差,因此,该家系更倾向于构建小型、轻薄的叶片,以实现用极少的干物质构建尽可能大的光合面积^[20]。本研究还表明:木姜叶柯叶片的 SLA 与 LDW、LV、LDWC、叶组织密度(LD)呈极显著负相关,表明不同功能性

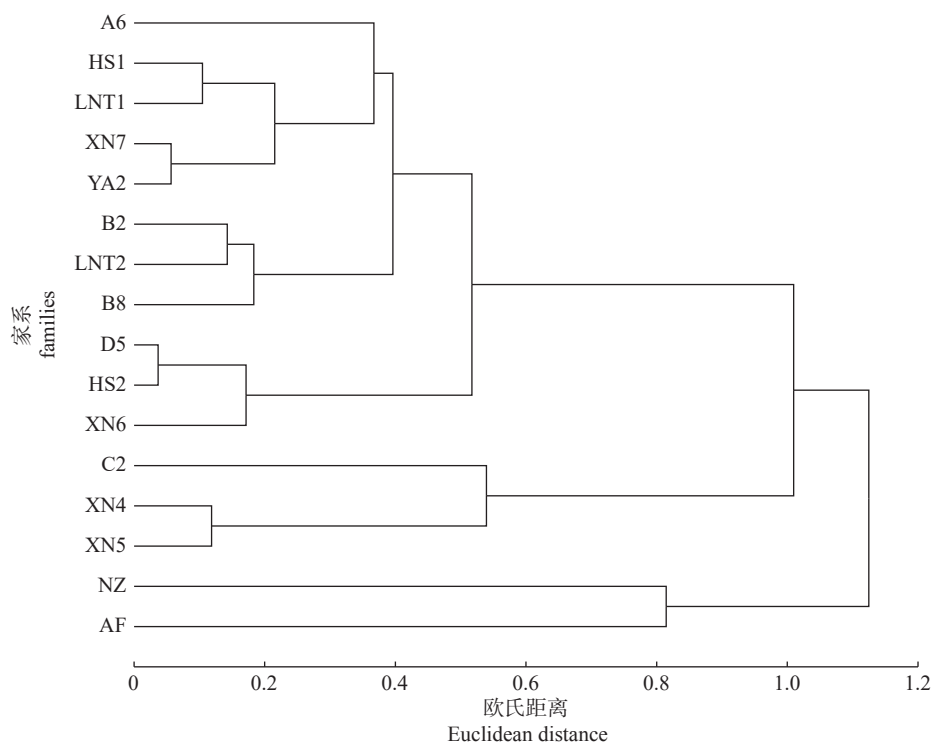


图4 16个木姜叶柯家系的叶片主要活性成分聚类分析

Fig. 4 Cluster analysis of the main active components in 16 *L. litseifolius* families

状间存在协同与权衡关系^[9,21]。在竞争条件下,木姜叶柯倾向于通过提高 LDWC、LD 和 LV,将更多干物质投入到构建叶片以提高竞争力,这与程雯等^[22]对喀斯特高原峡谷植物、褚蓉蓉等^[23]对国槐的研究结果一致。叶形指数 (LSI) 与植物抵抗逆境的能力相关, LSI 越小,通常意味着耐寒性更强、净光合速率和水分利用效率更高^[24]。在本研究中, D5、HS1 和 HS2 家系的 LSI 小于其他家系,说明其抗逆性更强。此外,本研究 16 个木姜叶柯家系的 LSI 范围为 2.09~2.64,与黄晓露等^[25]的研究结果存在差异,其原因可能是随着经纬度的升高,木姜叶柯的 LSI 呈下降趋势。相较于广西等低纬度地区,本研究区域的经纬度较高,故 LSI 较小。

3.2 不同家系叶片养分含量差异及化学计量特征

植物叶片是连接个体与生态系统养分循环的纽带,其养分含量和化学计量比能反映植物生长过程中的营养状况、养分利用效率和元素限制程度^[26-27]。植物体内 C : N 和 C : P 反映了植物吸收营养同化碳的能力,其值越高,表示植物适应贫瘠环境的能力越强^[28]。在本研究中,16 个家系叶片的全碳含量平均值高于全球陆生植物叶片的

平均含量 (464.0 mg/g),但全氮和全磷含量却低于全球陆生植物叶片的平均含量 (分别为 20.6 和 2.0 mg/g)^[29]。这说明木姜叶柯处于生长旺盛时期,叶片有机物积累能力强,能储存更多的碳。而在 16 个家系中, C2、NZ 和 AF 家系的 C : N 和 C : P 均较高,说明其同化能力较强,干物质含量较高,对贫瘠环境的适应力更强。氮和磷作为植物生长的主要限制元素, WRIGHT 等^[8]认为:当 N : P 小于 14 时,植物生长主要受氮元素限制;当 N : P 大于 16 时,受磷元素限制;当 N : P 为 14~16 之间时,则受 2 种元素的共同限制。本研究 16 个木姜叶柯家系的叶片 N : P 为 6.67~12.57,均小于 14,表明其生长均受到不同程度的氮限制,这可能与研究区的气候有关,低温和高降水量降低了氮的矿化效率,抑制植物叶片对氮的吸收利用^[30];也可能与采集样品的时间有关,在生长初期,木姜叶柯叶片发育对磷的需求可能高于对氮的吸收,从而导致木姜叶柯叶片 N : P 降低^[31]。

钾是植物生长发育的关键元素,在蛋白质合成、酶功能表达、碳氮代谢以及光合作用方面起着关键作用^[32]。在本研究中,木姜叶柯全钾含量与 LDW 呈显著负相关,与 LDWC、根皮苷含量

呈极显著负相关,这与前人关于“钾元素促进植物物质积累”的研究结论^[33]不一致,其原因可能是试验区土壤钾素养分较为贫乏^[34],且采样时木姜叶柯处于叶片发育和新陈代谢启动期,叶细胞处于快速分裂阶段,此时根皮苷含量随着叶片生长而升高^[1],干物质积累和根皮苷合成需要大量的蛋白质和核蛋白参与,因此,需要消耗更多的钾元素^[35]。根据本研究结果,试验地所处的大岗山地区,其土壤中的磷含量已能满足 4 年生木姜叶柯的生长需求,在今后的生产实践中,可以适当提高氮、钾肥的投入。

3.3 不同家系木姜叶柯叶片的主要活性成分差异及相关性

16 个木姜叶柯家系的叶片功能性状及主要活性成分存在显著差异,表明家系间存在丰富的变异,其变异幅度受环境和竞争共同影响。本研究发现:与叶功能性状相比,木姜叶柯的主要活性成分变异更为明显,其中,根皮苷和三叶苷含量的变异系数最高,分别达 48.12% 和 45.93%,这表明木姜叶柯家系中存在根皮苷、三叶苷含量差异显著的个体,能为今后开展选择育种提供丰富的遗传材料。在本研究中,叶主要活性成分含量较高的家系分别来自湖南绥宁 (C2)、江西分宜 (NZ) 和江西安福 (AF),可作为筛选高活性成分种质资源的候选材料。此外,16 个木姜叶柯家系的叶片功能性状和主要活性成分之间存在显著相关性,LW、SLA、LV、LDWC 均与有效成分呈显著负相关,而 LD、LSI 与有效成分呈显著正相关,分析其原因可能是:根皮苷、三叶苷和根皮素均属于黄酮类物质,是反映叶片化学防御能力的重要指标,合成该类物质需要消耗大量能量,为保证生长,木姜叶柯可能会减少对该类物质的投入^[36-37]。因此,可以通过叶形指标来预测叶片根皮苷、三叶苷等有效活性成分的含量,这与许继业等^[38]利用银杏叶功能性状来预测叶片萜内酯含量的方法类似。本研究还发现:二氢查耳酮含量与全磷含量呈显著负相关,与 N:P 呈显著正相关,表明木姜叶柯体内含有较高的氮含量和较低的磷含量,有利于二氢查耳酮积累,这与徐圆圆等^[39]的研究结果一致,其机制可能是:在低磷和高氮胁迫下,合成该类物质的苯丙氨酸解氨酶 (PAL)、肉桂酸-4-羟化酶 (C4H) 等相关基因上调表达^[37,40]。

然而,本研究仅于 4 月对 16 个家系材料进行采集与分析,尚未能解释全年以及更多不同地理环境下木姜叶柯有效成分的动态累积及其与叶功能性状的关系,仍需在后续研究中不断完善。

4 结论

家系来源对木姜叶柯叶片的形态特征、养分含量及主要活性成分含量具有显著影响,且叶片功能性状和主要活性成分间存在显著相关性。在 16 个家系中,湖南城步家系 (LNT2) 的叶干质量、叶体积和叶干物质含量最高,但其比叶面积最小,表明其叶片厚实、物质积累能力强,资源利用效率最优。在活性成分方面,湖南绥宁家系 (C2) 的三叶苷和根皮素含量最高,江西安福家系 (AF) 的根皮苷和二氢查耳酮含量最高,江西分宜家系 (NZ) 的根皮苷和二氢查耳酮含量也较高;根皮苷和三叶苷的变异幅度最大,为种质筛选提供了材料基础。综上所述,湖南城步家系 (LNT2) 家系在资源利用上具有优势,而湖南绥宁 (C2)、江西安福 (AF)、江西分宜 (NZ) 家系因活性成分含量较高可作为定向育种的优质材料。

[参考文献]

- [1] 何平,厉月桥,刘儒,等.不同种源多穗柯主要生物活性成分与矿质元素含量变异分析[J].中南林业科技大学学报,2021,41(1):188. DOI: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2021.01.020.
- [2] 刘鸿基,曾琛悦,曾霞,等.甜茶木姜叶柯及其主要活性成分三叶苷药理作用研究进展[J].广东药科大学学报,2024,40(3):129. DOI: 10.16809/j.cnki.2096-3653.2024031102.
- [3] ZHANG W, CHEN S Q, FU H L, et al. Hypoglycemic and hypolipidemic activities of phlorizin from *Lithocarpus polystachyus* Rehd in diabetes rats[J]. Food Science & Nutrition, 2021, 9(4): 1989. DOI: 10.1002/fsn3.2165.
- [4] HE M, ZHAI Y H, ZHANG Y Q, et al. Inhibition of α -glucosidase by trilobatin and its mechanism: kinetics, interaction mechanism and molecular docking[J]. Food & Function, 2022, 13(2): 857. DOI: 10.1039/D1FO00363J.
- [5] SHANG A, LIU H Y, LUO M, et al. Sweet tea (*Lithocarpus polystachyus* Rehd.) as a new natural source of bioactive dihydrochalcones with multiple health benefits[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022, 62(4): 917. DOI: 10.1080/10408398.2020.1830363.
- [6] XIAO R, WEI Y, ZHANG Y P, et al. Trilobatin, a naturally occurring food additive, ameliorates exhaustive exercise-induced fatigue in mice: involvement of Nrf2/ARE/ferroptosis signaling pathway[J]. Frontiers in Pharmacology, 2022, 13: 913367. DOI: 10.3389/fphar.2022.913367.
- [7] 王东旭,王宪伟,谭稳稳,等.大兴安岭典型灌丛—莎草泥炭地植物功能性状和功能多样性[J].生态学报,2025,45(2):962. DOI: 10.20103/j.stxb.202403190565.
- [8] WRIGHT I J, REICH P B, WESTOBY M, et al. The worldwide leaf economics spectrum[J]. Nature, 2004,

- 428(6985): 821. DOI: [10.1038/nature02403](https://doi.org/10.1038/nature02403).
- [9] 夏霁晖, 冶佩霞, 杨海, 等. 大别山北缘不同生活型木本植物叶功能性状及其耦合关系[J]. 浙江农林大学学报, 2024, 41(5): 970. DOI: [10.11833/j.issn.2095-0756.20240161](https://doi.org/10.11833/j.issn.2095-0756.20240161).
- [10] 厉月桥, 何平, 周新华, 等. 基质配比、缓释肥用量和容器规格对多穗柯容器育苗的影响[J]. 东北林业大学学报, 2021, 49(6): 46. DOI: [10.13759/j.cnki.dlxb.2021.06.010](https://doi.org/10.13759/j.cnki.dlxb.2021.06.010).
- [11] 杨志玲, 谭梓峰, 杨旭, 等. 18份木姜叶柯生化成分多样性及药效成分特征研究[J]. 中国农学通报, 2023, 39(13): 130. DOI: [10.11924/j.issn.1000-6850.casb2021-0522](https://doi.org/10.11924/j.issn.1000-6850.casb2021-0522).
- [12] 朱哈修, 冯清香, 孙术富, 等. 木姜叶柯查尔酮合酶基因的克隆及在合成生物学的应用[J]. 中国中药杂志, 2024, 49(24): 6676. DOI: [10.19540/j.cnki.cjcmm.20240911.102](https://doi.org/10.19540/j.cnki.cjcmm.20240911.102).
- [13] 韦运钦, 蔡玉兰, 阳琰, 等. 木姜叶柯提取物二氢查尔酮治疗2型糖尿病及其并发症的研究进展[J]. 中国中药杂志, 2025, 50(3): 658. DOI: [10.19540/j.cnki.cjcmm.20240827.701](https://doi.org/10.19540/j.cnki.cjcmm.20240827.701).
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [15] 王钰, 王磊, 张东星, 等. 高效液相色谱法测定木姜叶柯中根皮苷、三叶苷和根皮素的含量[J]. 天津科技, 2019, 46(7): 66. DOI: [10.14099/j.cnki.tjkj.2019.07.023](https://doi.org/10.14099/j.cnki.tjkj.2019.07.023).
- [16] 王颂, 黄俊彬, 徐巧林, 等. 木姜叶柯不同表型叶中二氢查耳酮类物质的差异分析[J]. 林业与环境科学, 2022, 38(6): 159. DOI: [10.3969/j.issn.1006-4427.2022.06.024](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-4427.2022.06.024).
- [17] 邹旭阁, 王寅, 王健铭, 等. 胡杨叶功能性状的协同与权衡及对树龄、土壤因子的响应[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(5): 82. DOI: [10.12171/j.1000-1522.20220522](https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20220522).
- [18] 张月萍, 张梦婷, 李敏瑄, 等. 不同生境下木棉幼苗叶性状和光合特性研究[J]. 西部林业科学, 2024, 53(2): 64. DOI: [10.16473/j.cnki.xblykx.1972.2024.02.009](https://doi.org/10.16473/j.cnki.xblykx.1972.2024.02.009).
- [19] WRIGHT I J, REICH P B, CORNELISSEN J H C, et al. Assessing the generality of leaf trait of global relationships[J]. New Phytologist, 2005, 166(2): 485. DOI: [10.1111/j.1469-8137.2005.01349.x](https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2005.01349.x).
- [20] 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. DOI: [10.13759/j.cnki.dlxb.2024.08.005](https://doi.org/10.13759/j.cnki.dlxb.2024.08.005).
- [21] 姜飘, 范体凤, 翁殊斐, 等. 木质与草质藤本叶性状及对不同光环境的适应策略[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2024, 44(2): 202. DOI: [10.11929/j.swfu.202305036](https://doi.org/10.11929/j.swfu.202305036).
- [22] 程雯, 喻阳华, 熊康宁, 等. 喀斯特高原峡谷优势种叶片功能性状分析[J]. 广西植物, 2019, 39(8): 11. DOI: [10.11931/guihaia.gxzw201808003](https://doi.org/10.11931/guihaia.gxzw201808003).
- [23] 褚蓉蓉, 冯国庆, 张中一, 等. 不同树龄国槐叶片性状特征及其适应策略研究[J]. 中国农业科技导报, 2024, 26(3): 48. DOI: [10.13304/j.nykjdb.2023.0438](https://doi.org/10.13304/j.nykjdb.2023.0438).
- [24] 苏培玺, 张立新, 杜明武, 等. 胡杨不同叶形光合特性、水分利用效率及其对加富CO₂的响应[J]. 植物生态学报, 2003, 27(1): 34. DOI: [10.17521/cjpe.2003.0005](https://doi.org/10.17521/cjpe.2003.0005).
- [25] 黄晓露, 梁文汇, 李宝财, 等. 不同种源多穗柯叶表型与叶脉特征差异分析[J]. 北华大学学报(自然科学版), 2019, 20(2): 237. DOI: [10.11713/j.issn.1009-4822.2019.02.021](https://doi.org/10.11713/j.issn.1009-4822.2019.02.021).
- [26] 韦兴兰, 井卉竹, 茶晓飞, 等. 白枪杆幼苗氮、磷、钾含量及化学计量特征对遮阴的响应[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2024, 39(2): 130. DOI: [10.12101/j.issn.1004-390X\(n\).202210084](https://doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X(n).202210084).
- [27] LUO X Z, HOU E Q, CHEN J Q, et al. Dynamics of carbon, nitrogen, and phosphorus stocks and stoichiometry resulting from conversion of primary broadleaf forest to plantation and secondary forest in subtropical China[J]. Catena, 2020, 193(16): 104606. DOI: [10.1016/j.catena.2020.104606](https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104606).
- [28] 岳国强, 侯瑞丽, 闫鑫泽, 等. 土壤氮浓度对油松天然林新生枝叶碳氮磷含量的影响[J]. 森林与环境学报, 2022, 42(1): 8. DOI: [10.13324/j.cnki.jfcf.2022.01.005](https://doi.org/10.13324/j.cnki.jfcf.2022.01.005).
- [29] ELSER J J, FAGAN W F, DENNO R F, et al. Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs[J]. Nature, 2000, 408(6812): 578. DOI: [10.1038/35046058](https://doi.org/10.1038/35046058).
- [30] REICH P B, OLEKSYN J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2004, 101(30): 11001. DOI: [10.1073/pnas.0403588101](https://doi.org/10.1073/pnas.0403588101).
- [31] ÅGREN G I. Stoichiometry and nutrition of plant growth in natural communities[J]. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2008, 39(1): 153. DOI: [10.1146/annurev.ecolsys.39.110707.173515](https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.39.110707.173515).
- [32] MOSTOFA M G, RAHMAN M M, GHOSH T K, et al. Potassium in plant physiological adaptation to abiotic stresses[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2022, 186: 279. DOI: [10.1016/j.plaphy.2022.07.011](https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2022.07.011).
- [33] 韦海南, 张金燕, 龙光强, 等. 不同钾水平对二年生三七生长特征及皂苷含量的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2019, 34(4): 695. DOI: [10.12101/j.issn.1004-390X\(n\).201903038](https://doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X(n).201903038).
- [34] 王燕, 刘苑秋, 曾炳生, 等. 江西大岗山常绿阔叶林土壤养分特征研究[J]. 江西农业大学学报, 2010, 32(1): 96. DOI: [10.13836/j.jjau.2010018](https://doi.org/10.13836/j.jjau.2010018).
- [35] LIN T, FANG X, LAI Y R, et al. Shifts in leaf and branch elemental compositions of *Pinus massoniana* (Lamb.) following three-year rainfall exclusion[J]. Forests, 2020, 11(1): 113. DOI: [10.3390/f11010113](https://doi.org/10.3390/f11010113).
- [36] ZENG S P, YU L H, HE P, et al. Integrated transcriptome and metabolome analysis reveals the regulation of phlorizin synthesis in *Lithocarpus polystachyus* under nitrogen fertilization[J]. BMC Plant Biology, 2024, 24: 366. DOI: [10.1186/s12870-024-05090-9](https://doi.org/10.1186/s12870-024-05090-9).
- [37] 彭仲韬, 金光泽, 刘志理. 小兴安岭三种槭树叶性状随植株大小和林冠条件的变异[J]. 植物生态学报, 2024, 48(6): 730. DOI: [10.17521/cjpe.2023.0369](https://doi.org/10.17521/cjpe.2023.0369).
- [38] 许继业, 牟志刚, 刘国华, 等. 银杏半同胞家系叶主要功能性状及组分含量差异[J]. 经济林研究, 2022, 40(3): 27. DOI: [10.14067/j.cnki.1003-8981.2022.03.003](https://doi.org/10.14067/j.cnki.1003-8981.2022.03.003).
- [39] 徐圆圆, 李文, 罗梅妹, 等. 苏木不同器官的总黄酮、总酚含量及其与养分含量间的关系[J/OL]. 分子植物育种, 1-14[2024-11-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.s.20240327.0958.002.html>.
- [40] 刘春霞, 王玥, 严胜柒, 等. 氮、磷营养限制及光照、蔗糖浓度对黄酮代谢相关基因表达的影响[J]. 江苏农业科学, 2010(1): 4. DOI: [10.3969/j.issn.1002-1302.2010.01.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-1302.2010.01.002).

责任编辑: 何馨成