

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

夏霁晖¹, 冶佩霞¹, 杨海², 张圣全², 靳珊珊¹, 周梦丽¹, 闫东锋¹

(1. 河南农业大学林学院, 河南郑州 450000; 2. 河南省国有新县林场, 河南新县 465550)

摘要: 【目的】探讨大别山北缘不同生活型木本植物叶功能性状变异, 研究叶功能性状指标之间的耦合关系, 为解析植物对气候变化的响应机制提供依据。【方法】采集大别山北缘连康山国家级自然保护区 30 种常见的不同生活型木本植物(常绿、落叶、乔木、灌木)的叶片, 测定其叶绿素含量(以 SPAD 表示)、干鲜比、氮质量分数、磷质量分数、钾质量分数、氮磷比、叶面积、比叶面积共 8 个叶功能性状指标, 分析了不同生活型木本植物叶功能性状及其相关性。【结果】不同生活型木本植物叶功能性状指标具有一定的差异性, 其中常绿和落叶树种的叶片 SPAD、氮质量分数、磷质量分数、钾质量分数、叶面积和比叶面积之间差异显著($P<0.05$); 乔木与灌木树种的叶面积、氮质量分数、磷质量分数、钾质量分数、干鲜比与氮磷比差异显著($P<0.05$)。部分叶功能性状指标之间存在一定的相关性, 叶片氮、磷质量分数与钾质量分数呈显著正相关($P<0.05$), 叶片氮质量分数与磷质量分数呈显著正相关($P<0.05$); 叶面积与叶片氮、磷、钾质量分数呈显著正相关($P<0.05$), 比叶面积与叶片氮、磷、钾质量分数呈显著正相关($P<0.05$)。主成分分析结果表明: 叶片磷、氮、钾质量分数是较为重要的叶功能性状指示指标, 可将 30 种木本植物归为 4 个功能组, 且第 1 和第 2 主成分对植物叶功能性状变异的贡献率分别为 55.2% 和 12.8%。【结论】叶功能性状指标在不同生活型木本植物之间存在一定差异, 其中叶磷、氮、钾质量分数是指示性指标, 且与叶面积显著正相关。图 4 表 1 参 28

关键词: 木本植物; 叶功能性状; 生活型; 大别山北缘

中图分类号: S718.5 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2024)05-0970-08

Leaf functional traits and their coupling relationships of woody plants with different life forms in the northern Dabie Mountains

XIA Jihui¹, YE Peixia¹, YANG Hai², ZHANG Shengquan², JIN Shanshan¹, ZHOU Mengli¹, YAN Dongfeng¹

(1. College of Forestry, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450000, Henan, China; 2. State-owned Xinxian Forest Farm, Xinxian 465550, Henan, China)

Abstract: [Objective] This study aim to explore the variation of leaf functional traits among different life forms of woody plants on the northern edge of the Dabie Mountains, investigate the coupling relationship between indicators of leaf functional traits, and provide a basis for deciphering the response mechanisms of plants to climate change. [Method] Leaf functional traits of 30 common woody plants with different life forms (evergreen, deciduous, arbor, shrub) in Liankangshan National Nature Reserve on the northern edge of the Dabie Mountains were collected, and eight leaf functional traits including chlorophyll content, dry/fresh ratio, nitrogen content, phosphorus content, potassium content, nitrogen/phosphorus ratio, leaf area, and specific leaf area were determined. The leaf functional traits and their correlations of different life forms of woody plants were analyzed. [Result] There were certain differences in leaf functional traits among different life forms of woody plants, among which the average chlorophyll content, nitrogen content, phosphorus content, potassium

收稿日期: 2024-02-04; 修回日期: 2024-06-02

基金项目: 河南省科技攻关项目 (222102110418)

作者简介: 夏霁晖 (ORCID: 0009-0007-1200-3144), 从事森林生态系统经营研究。E-mail: 2867917158@qq.com。通信作者: 闫东锋 (ORCID: 0000-0002-8997-384X), 教授, 博士, 从事森林经营和数量生态学研究。E-mail: ydfx@henau.edu.cn

content, leaf area, and specific leaf area of evergreen and deciduous trees showed significant differences ($P < 0.05$). The average leaf area, nitrogen content, phosphorus content, potassium content, dry/fresh ratio, and nitrogen/phosphorus ratio of arbor and shrub showed significant differences ($P < 0.05$). There were certain correlations between some leaf functional traits, such as positive correlation between leaf nitrogen and phosphorus content and potassium content ($P < 0.05$), significant positive correlation between leaf nitrogen content and phosphorus content ($P < 0.05$), positive correlation between leaf area and leaf nitrogen, phosphorus, potassium content ($P < 0.05$), and positive correlation between specific leaf area and leaf nitrogen, phosphorus, potassium content ($P < 0.05$). The principal component analysis results showed that the leaf phosphorus, nitrogen, and potassium contents were important indicators of leaf functional traits, and the 30 woody plants could be classified into four functional groups based on the first and second principal components, with the contribution rates of 55.2% and 12.8% to the variation of plant leaf functional traits respectively. [Conclusion] There exists a certain pattern of variation in leaf functional trait indicators among different life forms of woody plants. Among them, leaf phosphorus, nitrogen, and potassium mass fractions are indicative indicators, and they are significantly positively correlated with leaf area. [Ch, 4 fig. 1 tab. 28 ref.]

Key words: woody plants; leaf functional traits; life form; northern Dabie Mountains

研究植物与其环境之间的相互关系是目前林业研究的热点问题之一^[1]。植物在个体水平上表现出的生理、形态或物候等方面的属性，被称为植物功能性状^[2]。植物的功能性状是植物不断适应环境条件的变化而演化的结果，可以直观地反映植物对环境变化的适应能力^[3]。植物叶性状与植物个体、群落、生态系统功能的基本行为和功能具有密切相关性，可反映植物适应环境变化所形成的生存对策^[4]。植物叶功能性状指标中的叶面积与氮、磷、钾元素质量分数是植物功能性状的重要表征指标^[5]，氮磷比可以指示植物的氮、磷限制^[6]，而比叶面积和干鲜比能够综合反映植物利用资源的能力^[7-8]。

生活型是植物在长期适应环境中，所表现出的外部形态、结构、性状的分类类型。不同生活型的植物对光合作用的需求和利用效率存在差异，这一差异与物种自身的生物学特性及生态适应能力有关^[9]。如落叶和常绿植物中，落叶物种具有喜光不耐阴的特性，而常绿物种具有较高的耐阴性，因此落叶物种更容易受到光资源的限制^[10]。相关研究表明，落叶树种的叶面积、比叶面积大于常绿树种，但叶干物质质量小于常绿树种^[11]。与灌木相比，乔木对环境中的氮、磷、钾等养分的吸收和储存能力更强^[12]。乔木和灌木之间的叶氮质量分数和比叶面积存在显著差异。通常情况下，乔木的叶氮质量分数、比叶面积均高于灌木^[13]，但也有研究发现，灌木的比叶面积大于乔木^[14]。影响植物功能性状的因素还包括环境因素（气候、纬度、海拔、水热条件等）和自身因素（生长情况、健康程度、寿命等）^[15]。上述研究有助于理解不同生活型植物适应其所处的生态环境的规律，以及所处森林生态系统的健康状况和对环境变化的响应。然而，随着气候变化的加剧，特殊生存环境内不同生活型树种的叶功能性状特征及其差异规律尚不清楚，因此，研究气候过渡区不同生活型树种叶功能性状及其耦合关系尤为重要。

河南省连康山国家级自然保护区位于大别山北麓，属于中国北亚热带北缘过渡区。该保护区的主要保护对象为北亚热带森林生态系统以及亚热带北部边缘常绿阔叶植被类型。大别山北缘森林群落呈现复杂的结构和丰富的物种多样性，其林冠郁闭度较高。因此，研究该生态系统中叶功能性状之间的关系具有重要意义。本研究旨在通过对连康山国家级自然保护区森林群落木本植物叶功能性状的测定，分析其功能性状之间的关系，揭示大别山北缘森林植物叶功能性状的变化规律，以更好地解释植物对所处环境的响应机制，并为连康山国家自然保护区森林的保护和管理提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于连康山国家级自然保护区新县林场，处于河南省南部的新县境内，豫、鄂两省交界处的大别山腹地（ $31^{\circ}33' \sim 31^{\circ}43' \text{N}$ ， $114^{\circ}43' \sim 114^{\circ}52' \text{E}$ ）。研究区地处北亚热带，是北亚热带向暖温带过渡的季风气候湿润区。年均气温为 15.1°C ，极端最低温为 -17.3°C ，极端最高温为 42.5°C ；日照时数为

1 900.8 h, $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的活动积温为 4 769.5 $^{\circ}\text{C}$, 年均太阳总辐射为 4 720.0 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$, 无霜期为 227.0 d; 年均降水量为 1 248.0 mm, 相对湿度为 76%。境内山峦起伏, 沟壑纵横, 地貌奇特, 相对高差为 100~700 m。复杂的地貌特征和特殊的气候条件, 构成了各种不同的生态小环境, 孕育了丰富的生物资源。研究区内森林植被为北亚热带常绿、落叶阔叶林类型, 属北亚热带向暖温带过渡带的森林生态系统, 乔木植物主要有青冈 *Cyclobalanopsis glauca*、枫香 *Liquidambar formosana*、马尾松 *Pinus massoniana*、白檀 *Symplocos paniculata* 和野漆 *Toxicodendron succedaneum* 等, 林下灌木植物主要有檵木 *Loropetalum chinense*、柃木 *Eurya japonica*、毛樱桃 *Cerasus tomentosa* 等。

2 研究方法

2.1 样地设置与调查

样地设置于连康山国家级自然保护区常绿次生林分布区, 位于连康河两岸, 其中河岸北侧的群落主要分布在阳坡, 河岸南侧的群落主要分布在阴坡。利用全站仪(南方测绘)在河岸南侧连续建立 34 个监测样地, 在河岸北侧连续建立 16 个监测样地。利用全站仪, 采用等角测量的方式构建 50 个 20 m \times 20 m 样地, 通过网格法将样地划分为 4 个 10 m \times 10 m 的样方和 16 个 5 m \times 5 m 的小样方, 对每个 10 m \times 10 m 小样方中胸径 $\geq 1\text{ cm}$ 且树高 $\geq 1.3\text{ m}$ 的木本植物进行记录调查, 记录植物名称、胸径、树高, 相对坐标 (X, Y) 以及样地中心点全球定位系统 (GPS) 坐标。

2.2 植物样品的采集和处理

样地内共 30 种木本植物(表 1)。对样地内所有木本植物进行样品采集和处理, 同时分为常绿树种 (9 种) 和落叶树种 (21 种)、乔木树种 (26 种) 和灌木树种 (4 种) 等不同生活型。利用高枝剪和测高仪分别进行叶片取样和树高测量, 并在植株冠层采集 5~10 枚完整且无病虫害的成熟叶片样本, 然后选取 2 枚完整、健康且大小相似的叶片, 擦拭叶片表面的灰尘和污渍后装入密封袋, 以便进行相关指标的测定。

表 1 样地内的木本植物种类

Table 1 Species of woody plants in the sample plots

植物种	科名	生活型	缩写	植物种	科名	生活型	缩写
白蜡树 <i>Fraxinus chinensis</i>	木犀科 Oleaceae	落叶乔木	Frc	柃木 <i>Eurya japonica</i>	五列木科 Pentaphylacaceae	常绿灌木	Euj
白檀 <i>Symplocos paniculata</i>	山矾科 Symplocaceae	落叶乔木	Syp	毛八角枫 <i>Alangium kurzii</i>	八角枫科 Cornaceae	落叶乔木	Alk
豹皮樟 <i>Litsea coreana</i> var. <i>sinensis</i>	樟科 Lauraceae	常绿乔木	Lis	毛樱桃 <i>Cerasus tomentosa</i>	蔷薇科 Rosaceae	落叶灌木	Cet
冬青 <i>Ilex chinensis</i>	冬青科 Aquifoliaceae	常绿乔木	Ilc	茅栗 <i>Castanea seguinii</i>	壳斗科 Fagaceae	落叶乔木	Cas
杜鹃 <i>Rhododendron simsii</i>	杜鹃花科 Ericaceae	落叶灌木	Rhs	南烛 <i>Vaccinium bracteatum</i>	杜鹃花科 Ericaceae	常绿乔木	Vab
短柄栲栳 <i>Quercus serrata</i>	壳斗科 Fagaceae	落叶乔木	Qub	青冈 <i>Cyclobalanopsis glauca</i>	壳斗科 Fagaceae	常绿乔木	Cyg
枫香 <i>Liquidambar formosana</i>	蕈树科 Altingiaceae	落叶乔木	Lif	青皮木 <i>Schoepfia chinensis</i>	青皮木科 Schoepfiaceae	落叶乔木	Sec
海桐 <i>Pittosporum tobira</i>	海桐科 Pittosporaceae	常绿乔木	Pit	山矾 <i>Symplocos sumuntia</i>	山矾科 Symplocaceae	常绿乔木	Sys
合欢 <i>Albizia julibrissin</i>	豆科 Fabaceae	落叶乔木	Alj	山胡椒 <i>Lindera glauca</i>	樟科 Lauraceae	落叶乔木	Lig
化香树 <i>Platycarya strobilacea</i>	胡桃科 Juglandaceae	落叶乔木	Pls	石栎 <i>Lithocarpus glaber</i>	壳斗科 Fagaceae	常绿乔木	Litg
黄连木 <i>Pistacia chinensis</i>	漆树科 Anacardiaceae	落叶乔木	Pic	五角枫 <i>Acer pictum</i>	无患子科 Sapindaceae	落叶乔木	Acp
黄檀 <i>Dalbergia hupeana</i>	豆科 Fabaceae	落叶乔木	Dah	杨桐 <i>Adinandra millettii</i>	五列木科 Pentaphylacaceae	常绿乔木	Adm
檵木 <i>Loropetalum chinense</i>	金缕梅科 Hamamelidaceae	落叶灌木	Loc	野茉莉 <i>Styrax japonicus</i>	安息香科 Styracaceae	落叶乔木	Stj
君迁子 <i>Diospyros lotus</i>	柿科 Ebenaceae	落叶乔木	Dil	野桐 <i>Mallotus japonicus</i>	大戟科 Euphorbiaceae	落叶乔木	Maj
苦木 <i>Picrasma quassioides</i>	苦木科 Simaroubaceae	落叶乔木	Piq	野鸦椿 <i>Euscaphis japonica</i>	省沽油科 Staphyleaceae	落叶乔木	Euj

2.3 植物叶功能性状指标测定

选取与植物生长、光合、养分留存等特征有关的 8 项叶功能性状进行测定, 包括比叶面积 ($\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$)、叶面积 (mm^2)、干鲜比、叶绿素含量、氮质量分数 ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、磷质量分数 ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、钾质量分数 ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和氮磷比。比叶面积是单叶面积与其干质量的比值, 干鲜比为叶干质量与鲜质量的比值^[16]。因为植物叶片叶绿素含量与 SPAD 值呈正相关, 故采用叶片 SPAD 值表示叶绿素含量。

对采摘的新鲜叶片用剪刀除去叶柄后，用电子天平称取叶片鲜质量 (精度 0.000 1 g)，用叶面积仪 (Yaxin-1241) 测量叶片的长度、宽度以及叶面积，用叶绿素计 (SPAD-502 Plus) 测定 SPAD 值。将叶片放置于 80 ℃ 烘箱中经 48 h 烘干至恒量后，用电子天平称其干质量，叶片烘干后进行氮、磷、钾的测定。氮由半微量凯氏定氮仪测定，磷通过钼锑抗比色法测定，钾通过火焰分光光度法测定^[17]。

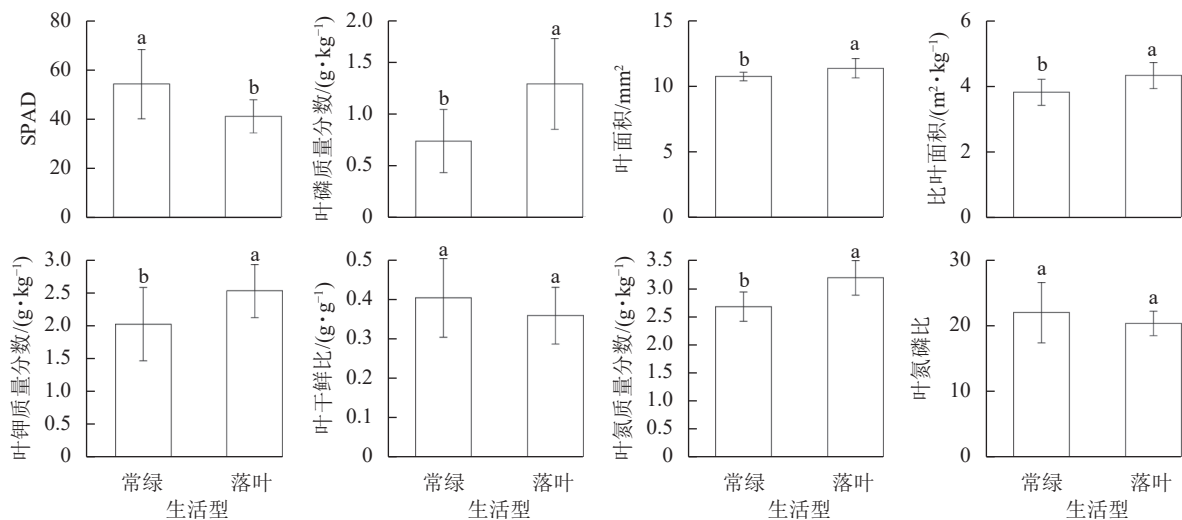
2.4 数据处理与分析

使用 Excel 2022 对原始数据进行对数转换的预处理，使其符合数据的正态性。对转换后的数据使用单因素方差分析和最小显著差异法 (LSD)，分析不同生活型木本植物叶功能性状指标的差异；采用 Pearson 相关系数检验叶功能性状之间的相关关系；采用主成分分析法 (PCA) 分析不同生活型木本植物叶功能性状的主成分。所有统计分析均在 Origin 2022 和 SPSS 27.0 中完成。

3 结果与分析

3.1 不同生活型木本植物叶功能性状的比较

由图 1 可知：常绿树种的 SPAD 显著高于落叶树种 (41.12) ($P < 0.05$)；落叶树种的叶氮、磷、钾质量分数均分别显著高于常绿树种 ($P < 0.05$)；落叶树种的叶面积和比叶面积均分别显著高于常绿树种 ($P < 0.05$)，而常绿树种和落叶树种的平均干鲜比与氮磷比之间均无显著差异。可见，常绿树种的叶片具有较低氮、磷、钾质量分数及较小的叶面积与比叶面积，还具有较高的叶绿素含量。



不同小写字母表示不同生活型之间差异显著 ($P < 0.05$)。

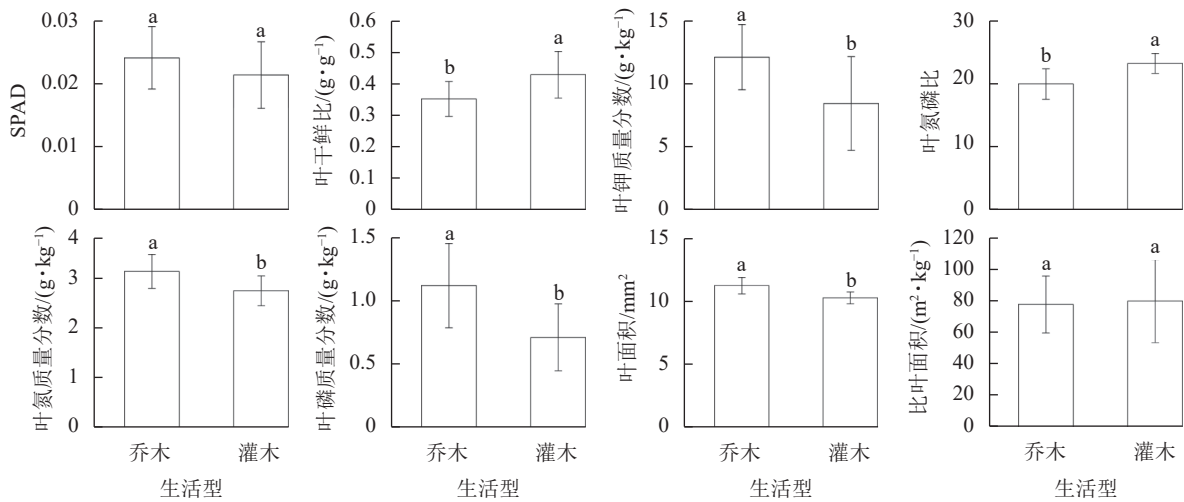
图 1 常绿树种与落叶树种叶功能性状差异比较

Figure 1 Comparison of differences in leaf functional traits between evergreen and deciduous tree species

由图 2 可知，乔木树种与灌木树种的 SPAD 与比叶面积无显著差异。乔木树种的叶面积以及叶氮、磷、钾质量分数均分别显著大于灌木树种 ($P < 0.05$)。此外，灌木树种叶干鲜比和叶氮磷比均分别显著大于乔木树种 ($P < 0.05$)。上述结果表明：乔木树种具有较大的叶面积和氮、磷、钾质量分数，以及较小的干鲜比与氮磷比。说明乔木树种相对于灌木树种更容易从环境中获取氮、磷、钾等资源，在与灌木树种的竞争中处于绝对优势。与此相反，灌木树种叶片具有较大的干鲜比与氮磷比，表明灌木树种在有限资源下更注重保障自身生长发育，在叶片中合成更多的有机物。

3.2 不同生活型木本植物叶功能性状的相关性

由图 3 可知：叶氮、磷质量分数与钾质量分数均呈显著正相关 ($P < 0.05$)，而叶氮磷比与氮、磷、钾质量分数均呈显著负相关 ($P < 0.05$)。这表明叶氮、磷、钾元素在植物生长过程中具有协调作用。另外，叶 SPAD 与叶氮磷比呈显著正相关 ($P < 0.05$)，而与叶氮、磷质量分数均呈负相关 ($P < 0.05$)；叶面积与比叶面积均分别与叶氮、磷、钾质量分数呈正相关 ($P < 0.05$)，而分别与叶 SPAD、干鲜比、氮磷比呈负相关 ($P < 0.05$)。表明植物通过增加叶干物质质量和叶面积的方式，增加光合速率，提高其对于环境中氮、磷、钾元素的吸收效率。



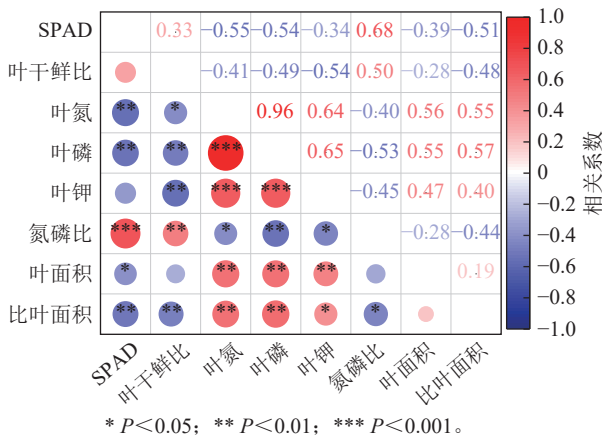
不同小写字母表示不同生活型之间差异显著 ($P < 0.05$)。

图2 乔木树种与灌木树种叶功能性状差异比较

Figure 2 Comparison of differences in leaf functional traits between tree and shrub species

3.3 不同生活型木本植物叶功能性状主成分分析

如图4所示：主成分分析将30种木本植物的8个叶功能性状划分为2个主成分，其中第1主成分对植物叶功能性状变异的贡献率为55.2%，该主成分相关度最高的是叶磷质量分数，其次为叶氮和钾质量分数、比叶面积，而叶面积的相关度最低。第2主成分的贡献率为12.8%，其中叶氮磷比的相关度最高，其次为SPAD，最低为干鲜比。主成分分析将叶功能性状指标归为4个功能组类型，其中第1组具有较大的叶氮磷比、SPAD、干鲜比，表明该组植物具有较高的光合速率并且合成了更多有机物，对该组叶功能性状贡献较大的树种有石栎、杨桐等树种；第2组具有较大的叶面积、叶氮、叶磷、叶钾质量分数，说明该组植物充分利用资源，通过增加叶面积的方式，进而提高叶片对阳光的利用效率，对该组叶功能性状贡献较大的树种有黄檀、毛八角枫等树种；第3组植物具有较大的比叶面积，说明该组植物具有较强的资源获取能力，对该组叶功能性状贡献较大的树种有豹皮樟、南烛等树种；第4组的叶功能性状指标无明显的规律性，该组物种包括欆木、青冈等树种。



* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$ 。

图3 不同生活型木本植物叶功能性状的相关性

Figure 3 Correlations among leaf functional traits of woody plants with different life forms

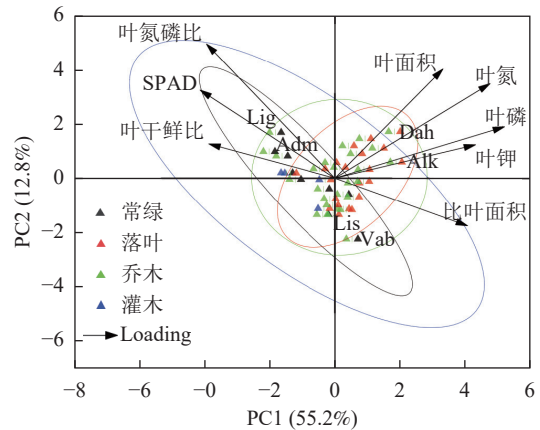


图4 不同生活型木本植物叶功能性状主成分分析

Figure 4 Principal component analysis (PCA) of leaf functional traits in different life forms of woody plants

4 讨论

不同生活型的叶功能性状往往存在一定的差别，这既是植物适应环境的结果，也是衡量叶片的能值水平及水分对植物的影响的判断依据。对不同生活型的叶功能性状进行研究，有助于在森林经营或保护过程中，有针对性地降低或阻止性状表现不好的物种竞争资源^[18]。本研究发现：不同生活型植物叶氮、

叶磷质量分数存在显著差异，其中落叶树种的叶氮、叶磷质量分数均显著大于常绿树种，这与已有研究结果^[19]基本一致。相比于落叶树种，常绿植物在叶片凋落前转移了更多的养分，且常绿乔木具有较高的叶片厚度、叶干鲜比、叶面积以及较低的叶磷质量分数、比叶面积^[20]。

在本研究中，常绿物种的叶钾质量分数低于落叶物种，这可能是由于钾元素在落叶植物体内不形成化合物，始终以离子游离状态存在，通常不断地向代谢旺盛的部位转移，间接反映了该地区落叶树种的叶片代谢可能较常绿乔木更为旺盛^[21]。此外，本研究发现：落叶树种的比叶面积高于常绿树种，这可能是由于落叶树种叶片寿命较短，仅在生长期内进行光合作用，与已有研究结果一致^[22]。落叶树种需要采取提高潜在回报能力、降低叶片构造成本的策略来最大程度提供光合产物，从而导致落叶树种相较于常绿树种有较高的光合速率和较高的比叶面积。本研究还发现：灌木为了在有限的光照条件下生存，表现出相对较低的叶氮、叶磷、叶钾质量分数，以及较高的叶干鲜比和氮磷比，与相关研究结论一致^[23]。

植物的生命活动以及功能表达并不是单一的，大部分植物通过性状组合，以适应和响应环境变化^[24]。植物功能性状之间存在显著相关性，其中促进和制约关系存在于不同功能性状之间，体现了相同生境中不同植物的趋同适应特征^[25]。相关研究表明，比叶面积、叶氮和叶磷质量分数之间均呈正相关^[26]；叶干鲜比与比叶面积之间呈显著负相关^[27]；叶氮和叶磷质量分数呈显著正相关，同时它们与比叶面积呈显著正相关^[28]，与上述研究结果相似。本研究发现，叶面积与比叶面积均分别与叶氮、叶磷、叶钾质量分数呈显著正相关，而与叶绿素含量 (SPAD)、叶干鲜比、叶氮磷比均呈显著负相关。

5 结论

本研究区内不同生活型木本植物叶功能性状存在着差异，其中常绿树种相对于落叶树种，具有较低叶氮、叶磷、叶钾质量分数及较小的叶面积与比叶面积，而乔木树种的叶干鲜比与叶氮磷比低于灌木树种。叶功能性状指标之间的相关分析结果表明：叶氮、叶磷、叶钾在研究区木本植物生长过程中具有协调作用，且研究区内木本植物通过增加叶片组织密度和叶面积的方式，增加叶片光合速率，进而提高植物对环境氮、磷、钾元素的吸收效率。

6 参考文献

- [1] 鞠雯, 黄志群, 傅彦榕, 等. 亚热带幼林树木功能性状与叶片氮磷重吸收率的关系[J]. 应用生态学报, 2022, 33(12): 3229 - 3236.
JU Wen, HUANG Zhiqun, FU Yanrong, *et al.* Relationships between tree functional traits and leaf nitrogen and phosphorus resorption efficiencies in sub-tropical young plantations [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(12): 3229 - 3236.
- [2] TOMASZ S, EWELINA Z, ELŻBIETA J, *et al.* Effects of γ -polyglutamic acid on grassland sandy soil properties and plant functional traits exposed to drought stress [J]. *Scientific Reports*, 2024, 14(1): 3769 - 3769.
- [3] 马瑞婷, 董晓明, 靳珊珊, 等. 间伐对栓皮栎人工林林下荆条根茎叶主要功能性状的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2021, 38(3): 567 - 576.
MA Ruiting, DONG Xiaoming, JIN Shanshan, *et al.* Effects of thinning on the functional traits of understory *Vitex negundo* var. *heterophylla* in *Quercus variabilis* plantation [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2021, 38(3): 567 - 576.
- [4] 宋帅帅, 王建, 蔡朝晖, 等. 濒危植物永瓣藤叶片功能性状对环境因子的响应[J]. 生态学报, 2023, 43(7): 7252 - 7262.
SONG Shuaishuai, WANG Jian, CAI Chaohui, *et al.* Response and adaptation of leaf functional traits of an endangered liana *Monimopetalum chinense* to environmental factors [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(7): 7252 - 7262.
- [5] 白岩松, 张雨鉴, 秦倩倩, 等. 大兴安岭典型灌木叶片功能性状对环境因子的响应[J]. 生态学杂志, 2024, 43(1): 131 - 139.
BAI Yansong, ZHANG Yujian, QIN Qianqian, *et al.* Responses of leaf functional traits in typical shrubs to environmental factors in the Daxing'an Mountains, northeast China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2024, 43(1): 131 - 139.
- [6] 辛鹏程, 魏天兴, 陈宇轩, 等. 山西西南部黄土丘陵区典型林分生态化学计量特征[J]. 浙江农林大学学报, 2024, 41(3): 549 - 556.
XIN Pengcheng, WEI Tianxing, CHEN Yuxuan, *et al.* Ecological stoichiometric characteristics of typical forest stands in the

- loess hilly region of southwest Shanxi [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2024, **41**(3): 549 – 556.
- [7] WANG Li, HE Yuejun, UMER M, *et al.* Strategic differentiation of subcommunities composed of evergreen and deciduous woody species associated with leaf functional traits in the subtropical mixed forest [J/OL]. *Ecological Indicators*, 2023, **150** [2024-02-01]. doi: 10.1016/j.ecolind.2023.110281.
- [8] 隆庆之, 杜虎, 苏樑, 等. 喀斯特常绿落叶阔叶林木本植物功能性状变异及其适应策略[J]. *生态学报*, 2023, **43**(21): 8875 – 8883.
- LONG Qingzhi, DU Hu, SU Liang, *et al.* Variation of functional traits and adaptive strategies of in karst evergreen deciduous broad-leaved forests [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, **43**(21): 8875 – 8883.
- [9] 詹紫馨, 冯天骄, 梅柏寒, 等. 晋西黄土区典型植被恢复生态系统各层次化学计量与生态因子的关系[J]. *浙江农林大学学报*, 2024, **41**(4): 797 – 809.
- ZHAN Zixin, FENG Tianjiao, MEI Bohan, *et al.* Relationship between stoichiometry and ecological factors at various levels of typical vegetation restoration ecosystem in the loess area of western Shanxi Province [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2024, **41**(4): 797 – 809.
- [10] 李玉玲, 梁素, 周丽珠, 等. 基于功能性状的中亚热带岩溶常绿落叶阔叶混交林物种多样性维持研究[J]. *生态学报*, 2024, **44**(10): 4400 – 4411.
- LI Yuling, LIANG Su, ZHOU Lizhu, *et al.* Maintenance of species diversity in evergreen deciduous broad-leaved mixed forest of karst hills in central subtropical region based on functional traits [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, **44**(10): 4400 – 4411.
- [11] 刘润红, 白金连, 包涵, 等. 桂林岩溶石山青冈群落主要木本植物功能性状变异与关联[J]. *植物生态学报*, 2020, **44**(8): 828 – 841.
- LIU Runhong, BAI Jinlian, BAO Han, *et al.* Variation and correlation in functional traits of main woody plants in the *Cyclobalanopsis glauca* community in the karst hills of Guilin, southwest China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2020, **44**(8): 828 – 841.
- [12] 朱晓旭, 温仲明, 郑诚, 等. 延河流域不同生活型植物功能性状特征及其对环境变化的响应[J]. *水土保持研究*, 2023, **30**(6): 328 – 336.
- ZHU Xiaoxu, WEN Zhongming, ZHENG Cheng, *et al.* Functional traits of plant life forms and their responses to environmental factors in the Yanhe River Basin [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, **30**(6): 328 – 336.
- [13] 罗恬, 俞方圆, 练璐瑜, 等. 冠层垂直高度对植物叶片功能性状的影响: 以鼎湖山南亚热带常绿阔叶林为例[J]. *生物多样性*, 2022, **30**(5): 4 – 17.
- LUO Tian, YU Fangyuan, LIAN Juyu, *et al.* Impact of canopy vertical height on leaf functional traits in a lower subtropical evergreen broad-leaved forest of Dinghushan [J]. *Biodiversity Science*, 2022, **30**(5): 4 – 17.
- [14] MONIKA R, KUSUM A, AYYANDAR A, *et al.* Assessment of leaf morphological, physiological, chemical and stoichiometry functional traits for understanding the functioning of Himalayan temperate forest ecosystem [J/OL]. *Scientific Reports*, 2021, **11**(1): 23807 [2024-02-01]. doi: 10.1038/s41598-021-03235-6.
- [15] 邵静, 范强勇, 陈晓萍, 等. 武夷山不同海拔青冈叶片功能性状差异[J]. *生态学杂志*, 2022, **41**(7): 1378 – 1384.
- SHAO Jing, FAN Qiangyong, CHEN Xiaoping, *et al.* Variations of leaf functional traits of *Cyclobalanopsis glauca* at different altitudes in Wuyi Mountain [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2022, **41**(7): 1378 – 1384.
- [16] 刘爱林, 张往祥, 刘陈好, 等. 7种樟科植物叶功能性状及其对土壤因子的响应[J]. *福建农业学报*, 2023, **38**(12): 1428 – 1436.
- LIU Ailin, ZHANG Wangxiang, LIU Chenyu, *et al.* Functional properties and relationship with soil of leaves on 7 varieties of Lauraceae [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2023, **38**(12): 1428 – 1436.
- [17] 刘子琪, 姚良锦, 焦洁洁, 等. 亚热带次生常绿阔叶林植物功能性状及多样性对人工抚育的响应[J]. *生态学报*, 2024, **44**(11): 4733 – 4743.
- LIU Ziqi, YAO Liangjin, JIAO Jiejie, *et al.* Response of plant functional traits and functional diversity of woody plants to tending in a secondary subtropical evergreen broad-leaved forest [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, **44**(11): 4733 – 4743.
- [18] 庞世龙, 欧芷阳, 凌福诚, 等. 桂西南岩溶区18种适生植物叶性状变异及经济谱[J]. *生态学杂志*, 2021, **40**(10): 3041 – 3049.

- PANG Shilong, OU Zhiyang, LING Fucheng, *et al.* Leaf trait variations and leaf economic spectrum of 18 plant species suitable in a karst area of southwest Guangxi [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, **40**(10): 3041 – 3049.
- [19] 李澳归, 蔡世锋, 罗素珍, 等. 亚热带常绿阔叶林 62 种木本植物凋落叶碳氮磷化学计量特征 [J]. *应用生态学报*, 2023, **34**(5): 1153 – 1160.
- LI Aogui, CAI Shifeng, LUO Suzhen, *et al.* C, N, and P stoichiometry for leaf litter of 62 woody species in a subtropical evergreen broadleaved forest [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, **34**(5): 1153 – 1160.
- [20] 刘文倩, 李家湘, 龚俊伟, 等. 柯-青冈常绿阔叶林优势树种叶片性状变异及适应策略 [J]. *生态学报*, 2022, **42**(17): 7256 – 7265.
- LIU Wenqian, LI Jiaxiang, GONG Junwei, *et al.* Variation in leaf functional traits and adaptation strategies of dominant tree species in a *Lithocarpus glaber-Cyclobalanopsis glauca* evergreen broad-leaved forest [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, **42**(17): 7256 – 7265.
- [21] 田岳梨, 杨航, 王芳玲, 等. 秦岭中段山脊油松叶功能性状差异及其对海拔梯度的响应 [J]. *西北植物学报*, 2021, **41**(2): 300 – 309.
- TIAN Yueli, YANG Hang, WANG Fangling, *et al.* Differences of leaf functional traits of *Pinus tabulaeformis* and its response to altitude gradient in the middle of Qinling Mountains [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2021, **41**(2): 300 – 309.
- [22] 熊玲, 龙翠玲, 梁盛, 等. 喀斯特森林木本植物叶片功能性状对土壤特性的响应 [J]. *热带亚热带植物学报*, 2024, **32**(3): 310 – 318.
- XIONG Ling, LONG Cuiling, LIANG Sheng, *et al.* Response of leaf functional traits of woody plants to soil characteristics in karst forest [J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2024, **32**(3): 310 – 318.
- [23] 桂旭君, 练璐愉, 张入匀, 等. 鼎湖山南亚热带常绿阔叶林群落垂直结构及其物种多样性特征 [J]. *生物多样性*, 2019, **27**(6): 619 – 629.
- GUI Xujun, LIAN Juyu, ZHANG Ruyun, *et al.* Vertical structure and its biodiversity in a subtropical evergreen broad-leaved forest at Dinghushan in Guangdong Province, China [J]. *Biodiversity Science*, 2019, **27**(6): 619 – 629.
- [24] 倪榕蔚, 甘玉婷, 杨桂梅, 等. 热岛效应下亚热带城市植被叶气孔权衡特征及其与叶功能性状的关系 [J]. *生态学报*, 2023, **43**(13): 5336 – 5346.
- NI Rongwei, GAN Yuting, YANG Guimei, *et al.* Trade-off characteristics of stomata of subtropical urban vegetation and its relationship with leaf functional traits under heat island effect [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, **43**(13): 5336 – 5346.
- [25] 徐海东, 熊静, 成向荣, 等. 麻栎和闽楠幼苗叶功能性状及生物量对光照和施肥的响应 [J]. *生态学报*, 2021, **41**(6): 2129 – 2139.
- XU Haidong, XIONG Jing, CHENG Xiangrong, *et al.* Responses of leaf functional traits and biomass of *Quercus acutissima* and *Phoebe bournei* seedlings to light and fertilization [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(6): 2129 – 2139.
- [26] YANG Yanzheng, WANG Han, HARRISON S P, *et al.* Quantifying leaf-trait covariation and its controls across climates and biomes [J]. *New Phytologist*, 2019, **221**(1): 155 – 168.
- [27] 李祖婵, 玄锦, 王秋雪, 等. 闽江江心洲不同生境的植物叶功能性状差异及其对土壤特性的响应 [J]. *生态学报*, 2024, **44**(14): 6301 – 6316.
- LI Zuchan, XUAN Jin, WANG Qiuxue, *et al.* Differences of plant leaf functional traits in different habitats and their response to soil characteristics in central bar of Minjiang River [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, **44**(14): 6301 – 6316.
- [28] 王军强, 刘彬, 常凤, 等. 博斯腾湖湖滨带水盐梯度下植物功能性状及生态化学计量特征分析 [J]. *植物生态学报*, 2022, **46**(8): 961 – 970.
- WANG Junqiang, LIU Bin, CHANG Feng, *et al.* Plant functional traits and ecological stoichiometric characteristics under water-salt gradient in the lakeshore zone of Bosten Lake [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2022, **46**(8): 961 – 970.