

引用格式: 郭文文, 白有志, 卓么草, 等. 色季拉山杜鹃花属植物叶功能性状特征及其资源权衡分析[J]. 浙江农林大学学报, 2026, 43(5): 1036–1049. GUO Wenwen, BAI Youzhi, ZHUO Mecao, *et al.* Leaf functional traits and resource balance analysis of *Rhododendron* in Shergyla Mountain[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2026, 43(5): 1036–1049.

色季拉山杜鹃花属植物叶功能性状特征及其资源权衡分析

郭文文^{1,2}, 白有志³, 卓么草⁴, 王超¹, 邢震³, 罗大庆¹

(1. 西藏农牧大学 高原生态研究所/西藏林芝高山森林生态系统国家野外科学观测研究站/西藏高原森林生态教育部重点实验室, 西藏 林芝 860000; 2. 西藏大学 生态环境学院, 西藏 拉萨 850000; 3. 西藏农牧大学 资源与环境学院, 西藏 林芝 860000; 4. 米林市农业农村局农技推广站, 西藏 米林 860500)

摘要: 【目的】探究色季拉山杜鹃花属 *Rhododendron* 植物的叶功能性状及其组合特征, 系统分析该区域杜鹃花属植物的生态策略差异, 为高寒山地生物多样性保护和管理提供理论依据。【方法】选取色季拉山 13 种杜鹃花属植物为研究对象, 选择叶面积、叶厚度、叶干物质质量分数等 16 个叶功能性状, 计算各性状的变异系数, 探究叶功能性状特征及其相互关系, 构建杜鹃花属植物的叶经济谱。【结果】色季拉山杜鹃花属植物叶功能性状的变异系数为 10.67%~120.29%, 其中叶干质量和叶面积属于强变异, 比叶面积、海绵组织厚度、栅栏组织厚度、叶碳氮比、叶氮质量分数、叶磷质量分数、叶形指数、叶碳磷比、叶厚度、叶氮磷比属于中等变异, 其余性状属于弱变异, 且杜鹃花属植物叶性状种间变异系数普遍高于种内变异系数。杜鹃花属植物在生长和防御能力之间存在“此消彼长”的权衡关系, 以达到平衡植物生存、生长、繁殖的目的。山育杜鹃 *R. oreotrephes*、草萼花杜鹃 *R. fragariiflorum*、鳞腺杜鹃 *R. lepidotum*、雪层杜鹃 *R. nivale*、林芝杜鹃 *R. nyingchiense*、柳条杜鹃 *R. virgatum* 和三花杜鹃 *R. triflorum* 倾向于“快速投资-收益型”策略, 白毛杜鹃 *R. vellereum*、鲁朗杜鹃花 *R. lulangense*、光蕊杜鹃 *R. coryanum*、硬毛杜鹃 *R. hirtipes*、栎叶杜鹃 *R. phaeochrysum* 和黄杯杜鹃 *R. wardii* 倾向于“缓慢投资-收益型”策略。【结论】色季拉山杜鹃花属植物通过调整叶片功能性状, 形成了 2 种不同的资源权衡策略, 反映了植物功能性状间的资源权衡关系以及不同物种生态位的分化。图 4 表 3 参 73

关键词: 叶功能性状; 叶经济谱; 权衡策略; 杜鹃花属; 色季拉山

中图分类号: S718.3 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2026)05-1036-14

Leaf functional traits and resource balance analysis of *Rhododendron* in Shergyla Mountain

GUO Wenwen^{1,2}, BAI Youzhi³, ZHUO Mecao⁴, WANG Chao¹, XING Zhen³, LUO Daqing¹

(1. Institute of Xizang Plateau Ecology/National Field Scientific Observation and Research Station for Alpine Forest Ecosystems in Nyingchi/Key Laboratory of Forest Ecology in Xizang Plateau of Ministry of Education, Xizang Agriculture and Animal Husbandry University, Nyingchi 860000, Xizang, China; 2. School of Ecology and Environment, Xizang University, Lhasa 850000, Xizang, China; 3. College of Resources and Environment, Xizang Agriculture and Animal Husbandry University, Nyingchi 860000, Xizang, China; 4. Agricultural Technology Extension Station, Agricultural and Rural Bureau of Mainling City, Mailing 860500, Xizang, China)

Abstract: [Objective] This study aims to investigate the leaf functional traits and the combination characteristics of *Rhododendron* in Shergyla Mountain, and systematically analyze ecological strategy differences among the species in this region, so as to provide a theoretical basis for the conservation and management of biodiversity in alpine mountainous regions. [Method] 13 *Rhododendron* species were

收稿日期: 2026-01-11; 修回日期: 2026-03-04

基金项目: 西藏自治区自然科学基金项目 (XZ202501ZR0123); 林芝市林业和草原局项目

作者简介: 郭文文 (ORCID: 0000-0003-1117-7912), 讲师, 从事植物功能性状与环境变化研究。E-mail: m15394012552@163.com。通信作者: 罗大庆 (ORCID: 0009-0006-0173-5123), 研究员, 从事高原群落和种群生态学研究。E-mail: 307910021@qq.com

selected as study subjects. 16 leaf functional traits, including leaf area, leaf thickness, and leaf dry matter content were measured. The coefficient of variation for each trait was calculated to investigate the characteristics and interrelationships of leaf functional traits, thereby constructing a leaf economic spectrum for *Rhododendron* species. [Result] The coefficient of variation for leaf functional traits of *Rhododendron* in Shergyla Mountain ranged from 10.67% to 120.29%. Among them, leaf dry weight and leaf area exhibited strong variation, while specific leaf area, spongy tissue thickness, palisade tissue thickness, leaf carbon nitrogen ratio, leaf nitrogen content, leaf phosphorus content, leaf shape index, leaf carbon phosphorus ratio, leaf thickness, and leaf nitrogen phosphorus ratio showed moderate variation. The remaining indicators demonstrated weak variation, and the inter-species coefficient of variation for leaf traits in *Rhododendron* plants was generally higher than intraspecific coefficient of variation. *Rhododendron* plants exhibited a trade-off between growth and defense capabilities, achieving a balance between plant survival, growth, and reproduction. *R. oreotrephes*, *R. fragariiflorum*, *R. lepidotum*, *R. nivale*, *R. nyingchiense*, *R. virgatum* and *R. triflorum* tended to adopt a “fast investment-return” strategy, while *R. vellereum*, *R. lulangense*, *R. coryanum*, *R. hirtipes*, *R. phaeochrysum* and *R. wardii* tended to adopt a “slow investment-return” strategy. [Conclusion] The *Rhododendron* genus has developed 2 distinct resource balancing strategies by adjusting leaf functional trait indicators, reflecting the resource balancing relationship between plant functional traits and the differentiation of ecological niches among different species. [Ch, 4 fig. 3 tab. 73 ref.]

Key words: leaf functional trait; leaf economic spectrum; balancing strategy; *Rhododendron*; Shergyla Mountain

植物功能性状是植物生命周期中获取、利用和保留资源等一系列活动的关键指示,是植物对外界环境长期适应和演化的结果,能够在一定程度上反映植物对环境资源的利用情况^[1-3]。当外界环境发生变化时,为维持体内环境的相对稳定,植物功能性状会进行适应性调整,以适应复杂多变的环境^[4]。叶片作为植物进行光合作用、呼吸作用和蒸腾作用的核心器官,是植物与外界进行水、气、热交换的关键门户,对外界环境反应最为敏感^[5]。通过对大量植物叶功能性状进行研究,不仅可以表征植物物种间的差异,还可进一步揭示和推测植物对环境的适应及生长策略^[6]。因此,从叶功能性状视角出发,研究植物叶功能性状特征及其权衡关系已经成为植物生态学研究热点领域之一^[7]。

近年来,大量研究通过分析植物叶功能性状的变异特征及其资源权衡,揭示了植物在资源获取与利用之间的策略选择^[8-9]。WRIGHT 等^[10]对全球范围内多个物种的叶功能性状进行了研究,在全球尺度上首次揭示了叶性状组合之间的相互联系和协同变化规律,并提出了叶经济谱理论。叶经济谱理论认为叶功能性状沿着一条连续变化的资源梯度有序排列,并表现出 2 种截然不同的叶性状变化策略:资源轴的一端表现为物种具有较长的叶片寿命、较低的叶氮和叶磷、低的光合速率、高的干物质和低的比叶面积,被划分为“缓慢投资-收益型”策略(保守型策略);在资源轴的另一端则表现为较短的叶片寿命、较高的叶氮和叶磷、高的光合速率、低的干物质和高的比叶面积,属于“快速投资-收益型”策略(获取型策略)^[11-13]。因此,植物通过叶性状间的协作与权衡来实现对环境变化的响应与适应^[14]。目前,对植物叶功能性状适应策略的研究多集中于草本植物,有关木本植物的研究相对较少,且多以跨科、跨属的大范围研究为主^[15-17],对小尺度范围特别是属内木本植物在相似演化背景下,如何通过精细的叶功能性状权衡适应小尺度生境的认知有限,也难以完善从大尺度到小尺度的性状权衡理论体系。因此,深入研究植物叶功能性状关系有助于揭示属内植物的资源分配方式。

杜鹃花属 *Rhododendron* 隶属于杜鹃花科 Ericaceae,是北半球最大的木本植物属,有 1 000 多个物种,广泛分布于亚洲、欧洲和北美洲,其中以亚洲分布的种类最多^[18-19]。中国杜鹃花属植物已超 600 种,以云南、西藏、四川所在的横断山脉分布最多^[20-21]。杜鹃花属植物大多姿态优美、花径大而颜色娇艳,具有很高的观赏、审美和经济价值^[22-23]。同时,杜鹃花属植物在自然状态下常常形成大规模的

灌木丛，根系发达、保水能力强，在山地生态系统的稳定与流域保护等方面发挥着极其重要的作用^[24]。目前对色季拉区域杜鹃花的研究主要集中在解剖结构^[25-26]、凋落物分解^[27]、亲缘关系^[28]等多个方面，对杜鹃花属植物叶功能性状特征及其资源权衡的研究鲜有报道，因此本研究以色季拉山 13 种杜鹃花属植物为研究对象，测定其 16 个叶功能性状，分析杜鹃花属植物生长及资源分配过程中的生长策略，旨在丰富该区域植物叶功能性状研究，为该区域生物多样性保护和管理提供理论依据。

1 研究区概况

研究区色季拉山位于青藏高原东南部，是念青唐古拉山向南延伸的余脉，整体呈现西北—东南走向，海拔为 2 500~5 430 m。该研究区受印度洋季风的影响，干湿分明，植被垂直分布明显，植被类型丰富，人为干扰较少^[29-30]。年降水量为 1 134.0 mm，6—9 月为雨季，约占全年总降水量的 80%，年均相对湿度为 78.8%，年平均气温为-0.7℃，7 月最热月平均气温为 9.2℃，1 月最冷月平均气温为-14.0℃，年日照时数为 1 151.0 h^[31]。该区除杜鹃花属植物外，木本植物主要有急尖长苞冷杉 *Abies georgei* var. *smithii*、方枝柏 *Juniperus saltuaria*、林芝云杉 *Picea likiangensis* var. *linzhiensis*、川滇高山栎 *Quercus aquifolioides* 等^[29, 32]。石砾较多，土壤以山地棕壤和山地酸性棕壤为主，以酸性和强酸性为主^[33-34]。

2 研究方法

2.1 样品采集

2024 年 5—6 月和 2025 年 3—6 月，在全面踏查的基础上，在色季拉山选取典型杜鹃花属植物群落，在其中随机布设 3 个 20 m×20 m 样地，在每个样地内通过对角线法设置 3 个 5 m×5 m 的样方进行杜鹃花属植物调查^[35-36]。植物群落常规调查时，记录样方中植物的名称、株高、盖度、数量等相关数据，同时利用便携式全球定位系统 (GPS) 记录大样方的经度、纬度和海拔 (表 1)，同时采集所有杜鹃花属植物标本带回实验室，由植物分类专业人员对照《中国植物志》和《西藏植物志》进行鉴定，确定植物学名，杜鹃花标本保存于西藏农牧大学高原生态学院 (研究所) 标本室。根据色季拉山杜鹃花属植物的调查结果，共选取其中 13 种杜鹃花属植物作为研究对象，分别是三花杜鹃 *R. triflorum*、硬毛杜鹃 *R. hirtipes*、栎叶杜鹃 *R. phaeochrysum*、山育杜鹃 *R. oreotrephe*s、黄杯杜鹃 *R. wardii*、雪层杜鹃 *R. nivale*、林芝杜鹃 *R. nyingchiense*、草莓花杜鹃 *R. fragariiflorum*、白毛杜鹃 *R. vellereum*、光蕊杜鹃 *R. coryanum*、柳条杜鹃 *R. virgatum*、鳞腺杜鹃 *R. lepidotum* 和鲁朗杜鹃花 *R. lulangense*。

对样地内杜鹃花属植物叶片进行采集时，在每种杜鹃花 (指同一物种不同个体，不含变种) 中选择 5 株生长均一、株高相近的成熟健康植株作为标准株，在冠层中部相同高度不同方位采集生长均匀、完全展开、无病虫害、无损伤的 25 片叶片，其中 15~20 片用湿润滤纸覆盖并装入提前做好标记的自封袋中，带回实验室处理^[4]。另外 5~10 片叶片，用剪刀修剪后立即放入事先准备好的甲醛-乙酸-乙醇 (FAA) 混合固定液 (武汉赛维尔生物科技有限公司) 中保存，带回实验室备用^[21]。同时采集 400~500 g 叶片混合样品，用于后续叶片碳、氮、磷质量分数测定。本研究测定的植物叶功能性状指标：叶面积 (mm)、叶厚度 (mm)、叶干质量 (g)、叶组织密度 ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)、叶干物质质量分数 ($\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)、叶形指数、叶片含水量 (%)、比叶面积 ($\text{cm}^2\cdot\text{g}^{-1}$)、叶碳质量分数 ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、叶氮质量分数 ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、叶磷质量分数 ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、叶碳氮比、叶碳磷比、叶氮磷比、栅栏组织厚度 (μm)、海绵组织厚度 (μm)。

表 1 色季拉山杜鹃花属植物采样点信息

Table 1 Sampling site information for *Rhododendron* in the Shergyla Mountain

序号	物种	纬度(N)	经度(E)	海拔/m
1	光蕊杜鹃	29°53'08.03"	94°47'12.84"	2 782
2	三花杜鹃	29°51'25.61"	94°46'12.83"	2 911
3	鲁朗杜鹃花	29°37'15.07"	94°42'33.44"	4 208
4	硬毛杜鹃	29°38'05.96"	94°42'56.03"	4 105
5	栎叶杜鹃	29°38'08.53"	94°42'47.53"	4 096
6	山育杜鹃	29°39'56.76"	94°42'55.21"	3 720
7	黄杯杜鹃	29°39'31.84"	94°43'25.55"	3 804
8	雪层杜鹃	29°41'49.84"	94°43'45.34"	3 434
9	林芝杜鹃	29°37'24.57"	94°37'49.00"	4 177
10	白毛杜鹃	29°33'32.74"	94°34'25.72"	3 830
11	草莓花杜鹃	29°36'56.89"	94°39'36.24"	4 462
12	柳条杜鹃	29°52'34.75"	94°46'40.06"	2 805
13	鳞腺杜鹃	29°38'44.23"	94°42'10.99"	3 937

2.2 指标测定

2.2.1 叶片结构性状测定 每种杜鹃花属植物随机选取 8 片叶片, 选用电子数显游标卡尺 (精度为 0.01 mm) 在叶片沿主脉方向, 避开叶片主脉, 随机选择 3 个部位进行测量, 取 3 次测量的平均值作为叶厚度。使用叶面积仪 (LA-S 系列植物图像分析仪系统, 杭州万深检测科技有限公司) 测定杜鹃花属植物的叶面积、叶长和叶宽。将扫描完的叶片用电子天平 (精确到 0.000 1 g) 称量, 得到叶鲜质量, 随后在 120 ℃ 下杀青 30 min, 65 ℃ 烘干 72 h 至质量恒定, 称取叶干质量^[37]。最后参考文献 [38–39] 计算比叶面积、叶干物质质量分数、叶组织密度、叶形指数和叶含水量。

2.2.2 叶片解剖性状测定 取出经 FAA 固定液固定后的杜鹃花属植物叶片, 经蒸馏水冲洗数次后, 用刀片切取宽约 0.5 cm×0.5 cm 的叶片, 经不同浓度梯度的乙醇脱水、二甲苯透明、石蜡浸蜡、石蜡包埋、全自动石蜡切片机 (ERM 4000) 切割叶片 (厚度为 10 μm)、番红-固绿染色、中性树胶封片^[40]。每个物种制作 5 张封片。待封片干燥后用显微镜 (尼康 ECLIPSE 80i) 随机拍摄 5 张照片, 用 Leica Application Suite X 软件测定栅栏组织和海绵组织的厚度。每项指标重复测定 5 次。

2.2.3 叶片化学性状测定 用球磨仪将烘干后的植物叶片磨碎, 过 100 目筛, 采用元素分析仪 (Vario Max CN Element analyzer, Elementar) 测定叶碳质量分数和叶氮质量分数, 采用钼锑比色法测定叶磷质量分数^[8, 15]。

2.3 数据处理

使用 Excel 2010 对杜鹃花属植物的各项功能性状数据进行统计整理。首先使用 SPSS 26 对各项功能性状求平均值和标准差, 计算变异系数 (V_C)=(标准差/平均值×100%), 评估各功能性状的变异程度。用 Pearson 相关性分析法评估各功能性状间的关系。采用主成分分析法 (PCA) 对 16 个叶功能性状进行综合分析。利用 Origin 2021 绘图。

3 结果与分析

3.1 杜鹃花属植物叶功能性状的变化特征

由表 2 可知: 色季拉山杜鹃花属植物叶功能性状的变异系数为 10.67%~120.29%, 变异系数由大到小依次为叶干质量 (120.29%)、叶面积 (96.28%)、比叶面积 (48.81%)、海绵组织厚度 (47.31%)、栅栏组织厚度 (33.68%)、叶磷质量分数 (27.25%)、叶氮质量分数 (27.00%)、叶形指数 (25.73%)、叶碳磷比 (25.22%)、叶碳氮比 (24.22%)、叶厚度 (22.93%)、叶氮磷比 (20.20%)、叶组织密度 (18.88%)、叶干物质质量分数 (16.22%)、叶含水量 (14.61%)、叶碳质量分数 (10.67%)。其中叶干质量和叶面积属于强变异, 比叶面积、海绵组织厚度、栅栏组织厚度、叶磷质量分数、叶氮质量分数、叶形指数、叶碳磷比、叶碳氮比、叶厚度、叶氮磷比属于中等变异, 其余指标属于弱变异。

在物种水平上, 色季拉山 13 种杜鹃花属植物的叶功能性状差异明显。在结构性状方面 (图 1), 白毛杜鹃叶面积最大 (6 178.94 mm², 变异系数为 19.87%), 林芝杜鹃叶面积为 65.26 mm², 变异系数为 20.70%。鲁朗杜鹃花叶厚度 (0.41 mm) 最大, 栎叶杜鹃次之 (0.40 mm), 所有物种叶厚度的变异系数均小于 20.00%, 属于弱变异。白毛杜鹃叶干质量最大 (1.340 0 g, 变异系数为 32.42%), 草莓花杜鹃和雪层杜鹃叶干质量最小, 分别为 0.006 1 g (变异系数为 11.59%) 和 0.005 6 g (变异系数为 23.17%)。白毛杜鹃叶组织密度最大, 为 0.55 g·cm⁻³, 而雪层杜鹃叶组织密度变异系数最大, 为 15.47%。林芝杜鹃叶干物质质量分数最大, 为 0.59 g·g⁻¹, 光蕊杜鹃和鲁朗杜鹃花叶干物质质量分数均为 0.47 g·g⁻¹, 雪层杜鹃叶干物质质量分数变异系数最大, 为 13.32%。光蕊杜鹃叶形指数最大, 达 3.59, 山育杜鹃和林芝杜鹃叶形指数均为 2.22。三花杜鹃叶含水量最大, 为 72.73%, 林芝杜鹃叶含水量最小, 为 40.76%, 雪层杜鹃叶含水量变异系数最大, 为 9.85%。三花杜鹃比叶面积最大 (169.75 cm²·g⁻¹, 变异系数为 25.72%), 是比叶面积最小的雪层杜鹃的 3.89 倍。黄杯杜鹃栅栏组织厚度最大, 为 164.56 μm, 山育杜鹃最小, 为 67.58 μm, 且山育杜鹃栅栏组织的变异系数最小, 为 3.99%。白毛杜鹃海绵组织厚度最大, 为 267.33 μm, 柳条杜鹃海绵组织厚度最小, 为 66.02 μm, 光蕊杜鹃海绵组织厚度变异系数最大, 硬毛杜鹃海绵组织厚度变异系数最小, 为 8.68%。

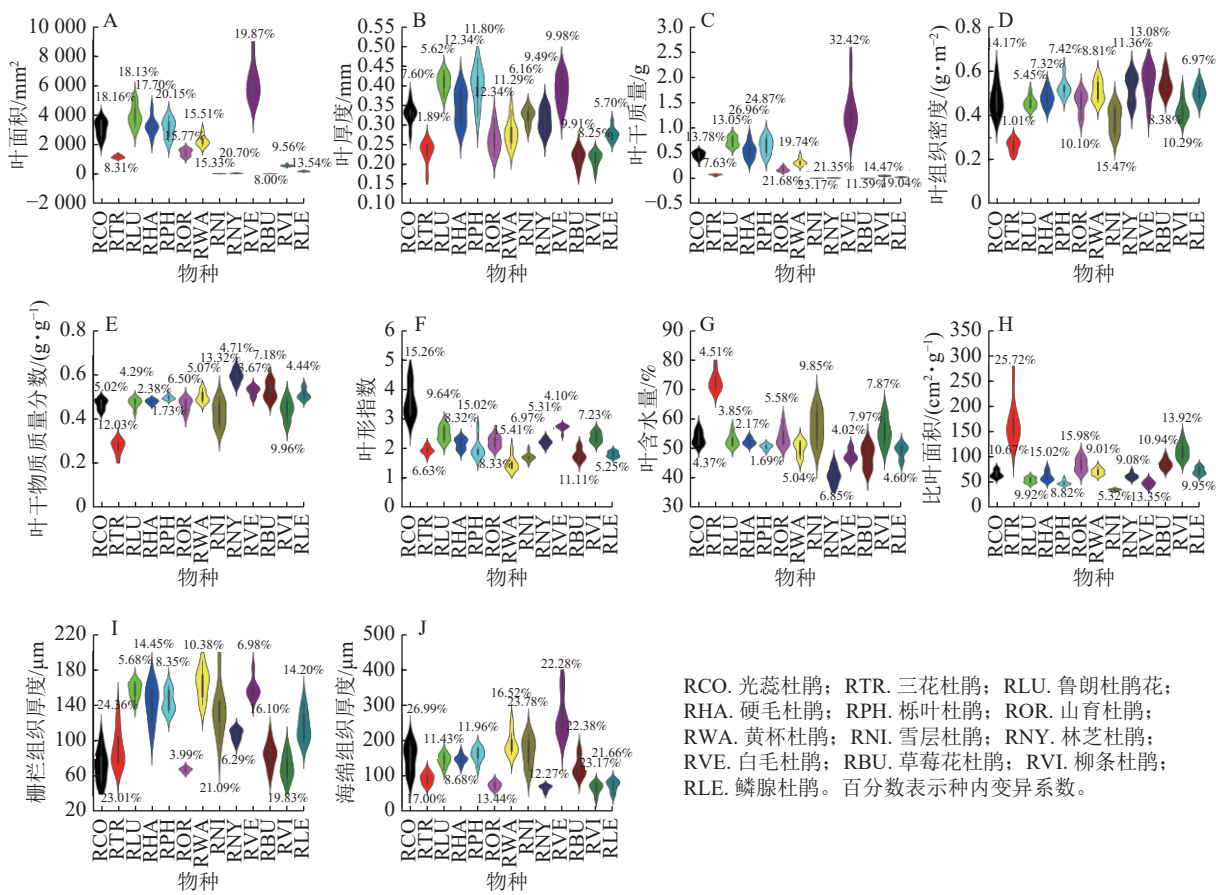
在化学性状方面 (图 2), 雪层杜鹃叶碳质量分数最大 (609.67 g·kg⁻¹), 所有变异系数均小于

表 2 色季拉山杜鹃花属植物叶功能性状统计特征

Table 2 Statistical characteristics of leaf functional traits for *Rhododendron* on Shergyla Mountain

项目	叶面积/mm ²	叶厚度/mm	叶干质量/g	叶组织密度/(g·cm ⁻³)	叶干物质/(g·g ⁻¹)	叶形指数	叶含水量/%	比叶面积/(cm ² ·g ⁻¹)
平均值±标准差	1 959.13±1 886.28	0.31±0.07	0.340 0±0.410 0	0.47±0.09	0.47±0.08	2.20±0.56	52.61±7.69	74.43±36.33
最大值	8 695.56	0.47	2.320 0	0.63	0.63	4.48	79.44	269.28
最小值	36.88	0.17	0.003 8	0.22	0.21	1.31	36.97	31.87
变异系数/%	96.28	22.93	120.290 0	18.88	16.22	25.73	14.61	48.81
变异强度	强变异	中等变异	强变异	弱变异	弱变异	中等变异	弱变异	中等变异
项目	叶碳/(g·kg ⁻¹)	叶氮/(g·kg ⁻¹)	叶磷/(g·kg ⁻¹)	叶碳氮比	叶碳磷比	叶氮磷比	栅栏组织厚度/μm	海绵组织厚度/μm
平均值±标准差	535.91±57.16	15.04±4.06	0.88±0.24	37.68±9.13	647.73±163.38	17.47±3.53	116.44±39.21	132.80±62.83
最大值	686.64	21.79	1.36	62.60	1 059.09	25.35	196.03	371.07
最小值	401.20	9.49	0.53	24.92	401.89	10.70	49.79	35.55
变异系数/%	10.67	27.00	27.25	24.22	25.22	20.20	33.68	47.31
变异强度	弱变异	中等变异	中等变异	中等变异	中等变异	中等变异	中等变异	中等变异

说明：变异系数≥50%为强变异，20%≤变异系数<50%为中等变异，变异系数<20%为弱变异^[4]。



RCO. 光蕊杜鹃; RTR. 三花杜鹃; RLU. 鲁朗杜鹃花;
RHA. 硬毛杜鹃; RPH. 栎叶杜鹃; ROR. 山育杜鹃;
RWA. 黄杯杜鹃; RNI. 雪层杜鹃; RNY. 林芝杜鹃;
RVE. 白毛杜鹃; RBV. 草莓花杜鹃; RVI. 柳条杜鹃;
RLE. 鳞腺杜鹃。百分数表示种内变异系数。

图 1 杜鹃花属植物叶结构性状

Figure 1 Leaf structural traits of *Rhododendron*

10.00%。雪层杜鹃叶氮质量分数最大(21.65 g·kg⁻¹)，是叶氮质量分数最小的白毛杜鹃的 1.23 倍；黄杯杜鹃叶氮质量分数变异系数最大，为 5.44%。鳞腺杜鹃叶磷质量分数最大(1.31 g·kg⁻¹)，光蕊杜鹃和三花杜鹃叶磷质量分数均为 0.75 g·kg⁻¹，鲁朗杜鹃花叶磷质量分数变异系数最大，为 12.04%。栎叶杜鹃叶碳氮比最大(46.95，变异系数为 5.87%)，草莓花杜鹃叶碳氮比最小，为 26.60。白毛杜鹃叶碳磷比最大，为 942.98，是叶碳磷比最小的鳞腺杜鹃的 1.19 倍，雪层杜鹃叶碳磷比变异系数最大，为 11.13%。草莓花杜鹃叶氮磷比最大，为 23.65，而鳞腺杜鹃叶氮磷比变异系数最小，为 2.68%。

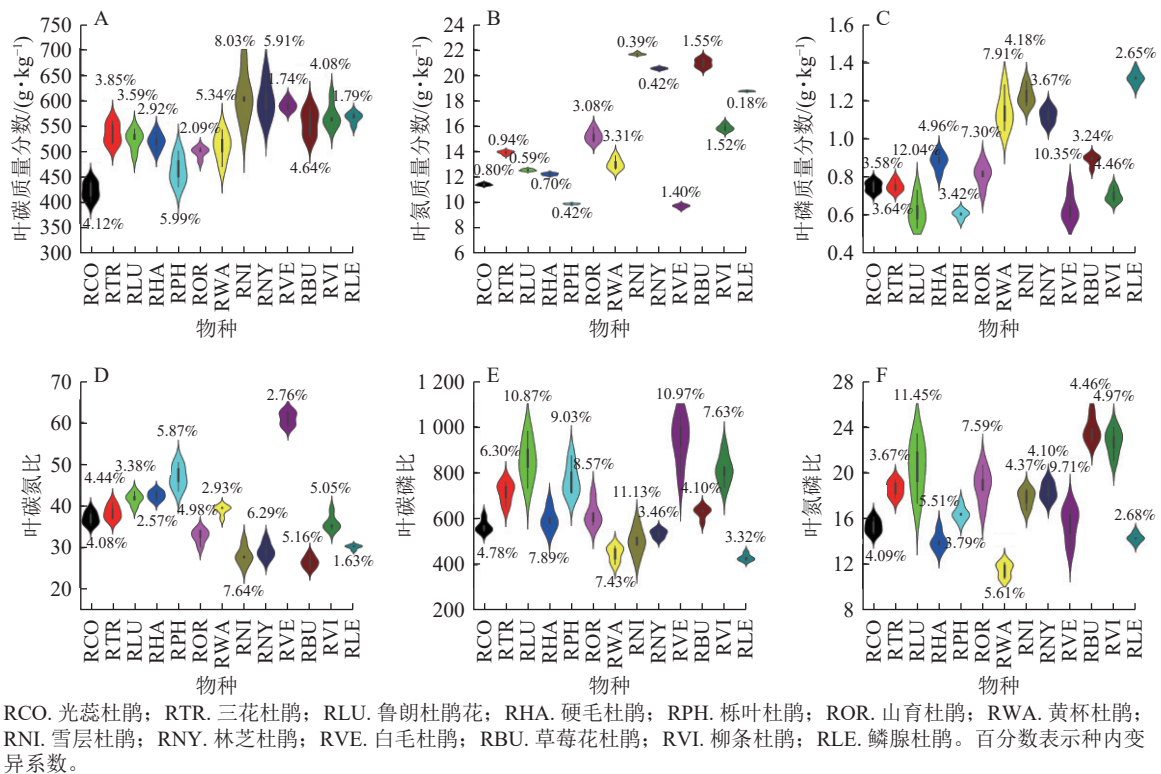


图 2 杜鹃花属植物叶化学性状
Figure 2 Leaf chemical traits of *Rhododendron*

3.2 杜鹃花属植物叶功能性状间相互关系

相关性矩阵结果如图 3 所示。杜鹃花属植物不同的叶功能性状间存在着不同的相关关系，其中比叶面积与叶干物质质量分数、叶厚度呈极显著负相关 ($P < 0.01$)，与叶组织密度呈显著负相关 ($P < 0.05$)，与叶含水量呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。比叶面积与叶面积呈极显著正相关 ($P < 0.01$)，叶干质量与叶面积呈极显著正相关 ($P < 0.001$)，叶含水量与叶干物质质量分数、叶组织密度呈极显著负相关 ($P < 0.001$)。叶氮质量分数与叶磷质量分数呈显著正相关 ($P < 0.05$)，叶碳氮比与叶面积、叶干质量呈极显著正相关 ($P < 0.001$)。栅栏组织厚度与叶厚度呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。

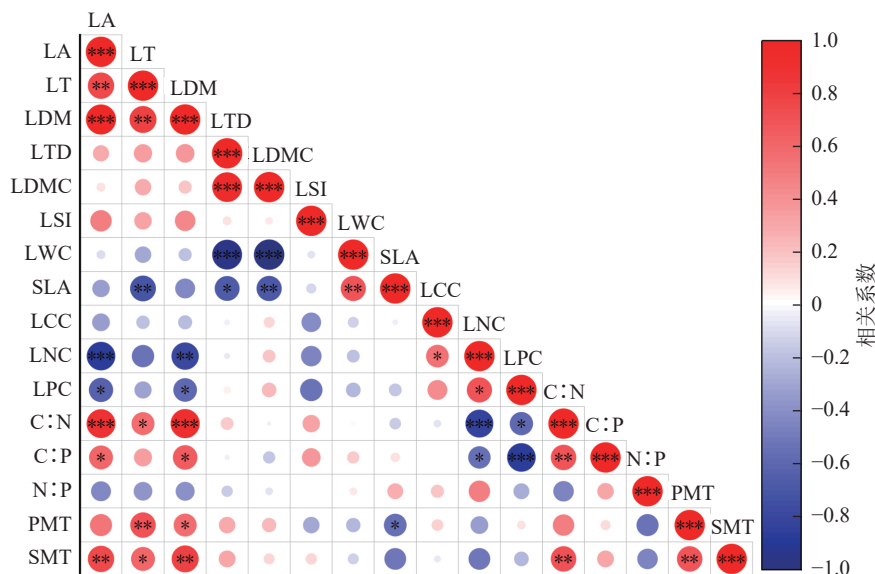
3.3 不同杜鹃花属植物叶经济谱特征

主成分分析表明：13 种杜鹃花属植物的叶功能性状之间存在一定的相关性 (表 3 和图 4)。杜鹃花属植物叶功能性状前 4 个主成分的特征值分别为 6.212、3.642、2.014 和 1.493，贡献率分别为 38.824%、22.765%、12.585% 和 9.328%，累计贡献率为 83.502%，表明这 4 个主成分是影响杜鹃花叶片功能性状变化的主要因素。主成分 1 与叶干质量、叶面积、叶碳氮比、叶厚度、叶氮质量分数相关性较强，主成分 2 与叶干物质质量分数、叶组织密度、叶含水量、比叶面积相关性较强，主成分 3 与叶氮磷比、栅栏组织厚度相关性较强，主成分 4 与叶碳质量分数、叶碳磷比相关性较强。在本研究中，山育杜鹃、草莓花杜鹃、鳞腺杜鹃、雪层杜鹃和林芝杜鹃位于第 1 主成分轴的负向区域，具有较大的叶磷质量分数、叶氮质量分数和较小的叶厚度、海绵组织厚度、栅栏组织厚度；白毛杜鹃、鲁朗杜鹃花、光蕊杜鹃、硬毛杜鹃和栎叶杜鹃位于第 1 主成分轴的正向区域，具有较大的叶厚度、海绵组织厚度、栅栏组织厚度和较小的叶磷质量分数、叶氮质量分数；柳条杜鹃和三花杜鹃位于第 2 主成分轴的负向区域，具有较大的比叶面积、叶含水量和较小的叶干物质质量分数、叶组织密度；黄杯杜鹃位于第 2 主成分轴的正向区域，具有较大的叶干物质质量分数、叶组织密度和较小的比叶面积、叶含水量。

4 讨论

4.1 杜鹃花属植物叶功能性状的差异分析

植物叶功能性状变异是物种适应环境异质性，实现生态位分化的关键生长策略，变异幅度在一定程



LA. 叶面积; LT. 叶厚度; LDM. 叶干质量; LTD. 叶组织密度; LDMC. 叶干物质质量分数; LSI. 叶形指数; LWC. 叶含水量; SLA. 比叶面积; LCC. 叶碳质量分数; LNC. 叶氮质量分数; LPC. 叶磷质量分数; C:N. 叶碳氮比; C:P. 叶碳磷比; N:P. 叶氮磷比; PMT. 栅栏组织厚度; SMT. 海绵组织厚度。*表示 $P<0.05$; **表示 $P<0.01$; ***表示 $P<0.001$ 。

图 3 杜鹃花属植物叶功能性状间相互关系
Figure 3 Correlation between leaf functional traits of *Rhododendron*

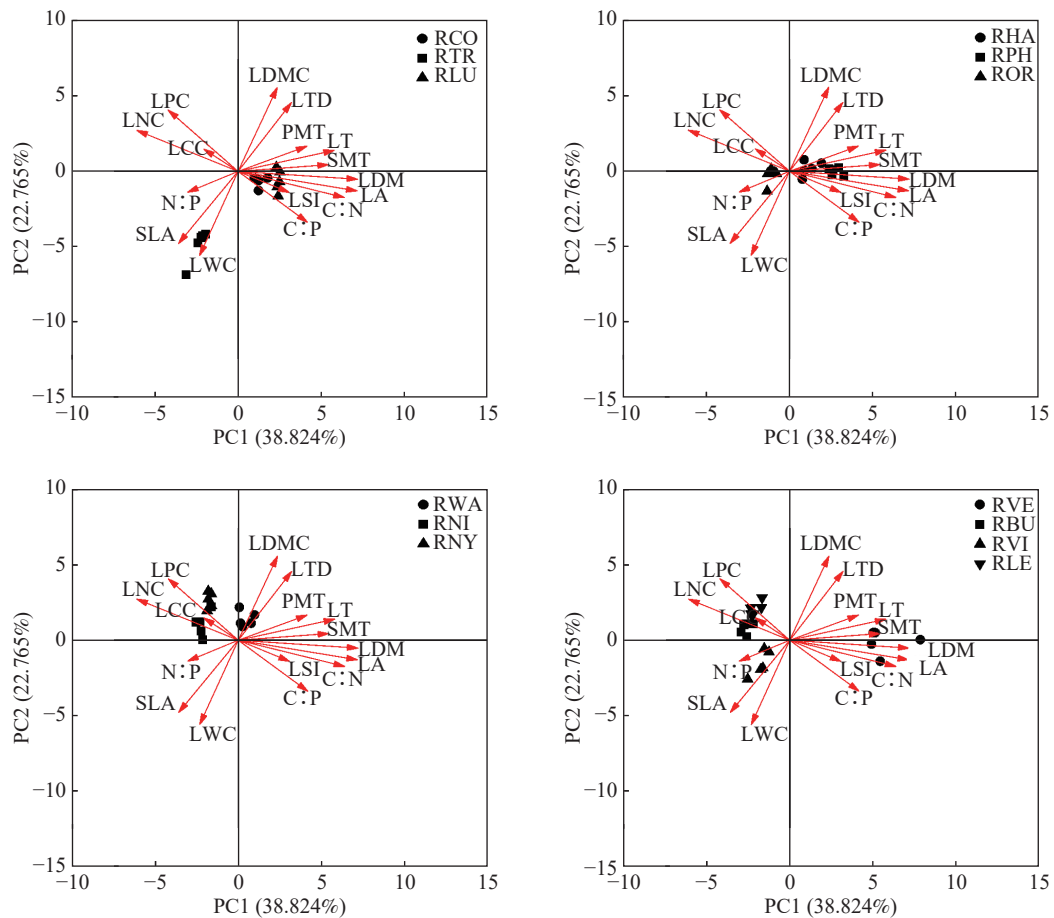
表 3 杜鹃花属植物叶功能性状主成分分析因子载荷矩阵

Table 3 Factor loading matrix of principal component analysis of leaf functional traits of *Rhododendron*

性状	第1主成分	第2主成分	第3主成分	第4主成分	性状	第1主成分	第2主成分	第3主成分	第4主成分
叶面积	0.381	-0.104	-0.027	-0.008	叶磷质量分数	-0.224	0.325	-0.344	-0.068
叶厚度	0.308	0.111	-0.046	-0.020	叶碳氮比	0.340	-0.138	-0.104	0.167
叶干质量	0.383	-0.042	0.002	0.074	叶碳磷比	0.222	-0.270	0.270	0.416
叶组织密度	0.171	0.363	0.239	-0.030	叶氮磷比	-0.162	-0.110	0.477	0.350
叶干物质质量分数	0.125	0.443	0.256	0.025	栅栏组织厚度	0.220	0.132	-0.421	0.184
叶形指数	0.164	-0.111	0.357	-0.352	海绵组织厚度	0.289	0.035	-0.238	0.123
叶含水量	-0.123	-0.446	-0.256	-0.028	特征根	6.212	3.642	2.014	1.493
比叶面积	-0.191	-0.382	-0.037	0.015	方差贡献率/%	38.824	22.765	12.585	9.328
叶碳质量分数	-0.110	0.118	-0.112	0.665	累积贡献率/%	38.824	61.589	74.174	83.502
叶氮质量分数	-0.324	0.217	0.066	0.220					

度上反映了植物生态适应性范围^[42]。相关研究发现：不同叶性状的种间变异幅度差异非常大，即使是同一性状，在时空尺度上的变异程度差异也很大^[43-44]。本研究结果显示：色季拉山 13 种杜鹃花属植物的 16 个叶功能性状的变异幅度为 10.67%~120.29%。变异的程度代表了植物种质资源的固有特征及个体差异范围，变异系数越大，在资源选择时其选择空间也越大^[45]。本研究中，杜鹃花属植物的叶干质量的变异系数最大，为 120.29%，属于强变异，表明其选择空间较大；叶面积、比叶面积、叶碳氮比和叶磷质量分数的变异程度均较大，其中叶面积的变异系数达 96.28%。这些性状与植物对光、水和土壤养分的竞争密切相关^[46]。植物叶片大小直接影响植物对光的截取和对碳的获取能力，并且通过影响叶片边界层厚度进而影响叶片温度和蒸腾速率，最终影响叶片热量和水平衡^[47]。相关研究结果表明：植物叶干物质质量分数的变异幅度较低，是资源获取轴上较稳定的变量^[48]，这与本研究的结果相似。本研究中杜鹃花属植物叶碳质量分数的变异系数最小，与已有研究结果一致^[49]，属于稳定的叶功能性状指标。

本研究中，杜鹃花属植物叶功能性状的种间变异普遍高于种内变异，表明种间变异在植物性状变异中占据主导地位，对群落构建的影响更显著^[50]。然而，越来越多的证据表明：种内变异也是不可忽视的，可达性状总变异的 28.00%~52.00%^[51]。色季拉山杜鹃花属植物叶功能性状的种内变异平均达



LA. 叶面积; LT. 叶厚度; LDM. 叶干质量; LTD. 叶组织密度; LDMC. 叶干物质质量分数; LSI. 叶形指数; LWC. 叶含水量; SLA. 比叶面积; LCC. 叶碳质量分数; LNC. 叶氮质量分数; LPC. 叶磷质量分数; C:N. 叶碳氮比; C:P. 叶碳磷比; N:P. 叶氮磷比; PMT. 栅栏组织厚度; SMT. 海绵组织厚度. RCO. 光蕊杜鹃; RTR. 三花杜鹃; RLU. 鲁朗杜鹃花; RHA. 硬毛杜鹃; RPH. 栎叶杜鹃; ROR. 山育杜鹃; RWA. 黄杯杜鹃; RNI. 雪层杜鹃; RNY. 林芝杜鹃; RVE. 白毛杜鹃; RBV. 草莓花杜鹃; RVI. 柳条杜鹃; RLE. 鳞腺杜鹃。

图 4 杜鹃花属植物叶功能性状主成分分析

Figure 4 Principal component analysis of leaf functional traits of *Rhododendron*

9.38%，相较于其他植被类型，其性状种内变异幅度较低，这可能反映了严酷生境（高寒、强紫外线、缺氧）条件下较小的形态可塑性^[52]。碳、氮、磷元素是植物生长发育过程中所必需的元素，不仅影响植物蛋白质、酶和核酸等的合成，而且对植物光合作用、呼吸作用、能量传递等过程至关重要^[53-54]。本研究结果显示：色季拉山杜鹃花属植物叶氮质量分数、叶磷质量分数、叶氮磷比均属于中等变异，分别为 $15.04 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $0.88 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、17.47。与全球陆生植物叶氮质量分数 ($18.74 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、叶磷质量分数 ($1.21 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和叶氮磷比 (15.55)^[55-56] 相比，色季拉山杜鹃花属植物叶磷质量分数相对较低。相关研究结果表明：叶氮磷比 ≥ 16.00 表示植被生长受磷限制，叶氮磷比 < 14.00 表示受氮限制， $14.00 \leq$ 叶氮磷比 < 16.00 时受氮磷的共同限制^[43]。色季拉山杜鹃花属植物叶氮磷比为 17.47，表明杜鹃花生长受磷限制。

4.2 杜鹃花属植物叶功能性状间的相关性

植物在生长过程中受到环境、生理、系统发育等因素的共同作用，各性状间存在一定的相关性。这是在漫长进化历程中，植物通过不断协同与权衡，经自然筛选最终形成的，与周围环境相适应的性状组合^[57-59]。本研究发现：色季拉山杜鹃花属植物比叶面积与叶厚度均呈显著负相关，这与前人的研究结果一致^[60]。通常来说，较厚的叶片伴随较低的比叶面积，且叶片增厚有利于增加叶片内部水分向叶片表面扩散的阻力或距离，增强抵抗水分丧失的能力。这类叶片虽然光合作用效率较低，但能增强植物适应恶劣环境压力的能力^[61]。资源分配假说认为：当植物将较多资源分配给叶片物理防御结构时，对叶片光合能力的投资则会降低^[62]。本研究中，杜鹃花属植物叶功能性状中，反映植物光合作用的比叶面积与反映防御能力的叶干物质质量分数呈显著负相关，分析原因可能是色季拉山常年温度较低、紫外线较强，植

物需要更多结构物质和更厚的叶片来保护光合器官。这也充分证明了资源分配假说,同时也表明植物在生长和防御能力之间存在一种“此消彼长”的权衡关系,以达到平衡植物生存、生长、繁殖的目的^[63]。

本研究中,叶含水量与叶干物质质量分数、叶组织密度呈极显著负相关,这说明杜鹃花属植物在低温强辐射的环境中,优先积累干物质来增强叶片的结构强度,且因“空间被挤占”和“代谢需求适配”,表现出更高的水分亏缺;同时更高的叶干物质质量分数常伴随叶组织密度的提高,这进一步降低了叶片内部活跃水分的含量^[64]。本研究中,叶碳氮比与叶面积呈极显著正相关,这是因为杜鹃花扩大叶面积时,会优先分配资源合成坚固的结构框架来避免低温冻裂和强风损伤,导致叶碳质量分数随叶面积增加而上升,而叶氮质量分数的增长速度远慢于叶碳质量分数,最终导致叶碳氮比随叶面积的增大而升高^[65],反映了植物在长期进化过程中,通过外部形态及内部结构特征的调节来适应环境的变化,最终形成一系列适应特定生境的最佳性状组合^[59]。此外,色季拉山杜鹃花属植物的叶氮质量分数与叶磷质量分数呈显著正相关。这表明杜鹃花在相似生境中对氮、磷营养元素的需求基本一致,两者协同作用促进植物的生长^[56]。这与 WANG 等^[66]、闫风辰等^[67]的研究结论一致。

4.3 杜鹃花属植物叶功能性状的权衡分析

根据植物叶经济谱理论,植物为适应特定环境变化所产生的资源权衡策略可以通过植物功能性状组合来反映^[68]。WRIGHT 等^[10]提出了“叶经济谱”的概念,揭示了植物 2 种不同的生态策略,即“快速投资-收益型”策略和“缓慢投资-收益型”策略。在植物叶功能性状参数中,叶干物质质量分数、比叶面积、叶面积、叶氮质量分数、叶厚度、叶磷质量分数、叶组织密度与叶含水量等指标是众多植物在资源利用分类轴上的最佳变量,具有很好的可预测性^[13]。本研究中色季拉山 13 种杜鹃花属植物处于叶经济谱不同位置,说明属内不同物种在相似环境中可能具有不同的生长策略^[69]。山育杜鹃、草莓花杜鹃、鳞腺杜鹃、雪层杜鹃和林芝杜鹃位于第 1 主成分轴的负向区域,倾向于高的叶氮质量分数、叶磷质量分数和较小的叶厚度,倾向于“快速投资-收益型”策略;白毛杜鹃、鲁朗杜鹃花、光蕊杜鹃、硬毛杜鹃和栎叶杜鹃位于第 1 主成分轴的正向区域,倾向于较大的叶厚度和较小的叶氮质量分数、叶磷质量分数,倾向于“缓慢投资-收益型”策略;柳条杜鹃和三花杜鹃位于第 2 主成分轴的负向区域,倾向于高的比叶面积、叶含水量和较小的叶干物质质量分数、叶组织密度,在叶经济谱上倾向于“快速投资-收益型”策略;黄杯杜鹃位于第 2 主成分轴的正向区域,具有较大的叶干物质质量分数、叶组织密度和较小的比叶面积、叶含水量,在叶经济谱上倾向于“缓慢投资-收益型”策略^[70]。在自然状态下,植物群落中资源环境在水平和垂直层面上都存在明显的异质性,这种异质性为多物种共存提供了环境基础^[71],而植物功能性状间的资源权衡关系使不同物种表现出不同的性状组合,从而充分利用资源环境来降低共存物种间生态位重叠,促进物种间稳定共存^[72]。本研究中杜鹃花属植物不同物种沿性状轴的变化不仅表明了属内物种间生态策略的差异,同时也反映了植物功能性状间资源权衡关系以及不同物种生态位的分化^[73]。为了更准确地揭示功能性状权衡和环境变量之间的关系,未来的研究应尽可能广泛地收集地形、土壤、光照强度、海拔等信息,以获得最可靠的研究结果。

5 结论

本研究以青藏高原色季拉山为研究区域,通过对 13 种杜鹃花属植物的叶功能性状差异及其权衡关系的分析,揭示了杜鹃花属植物的生长策略和生态适应机制。研究发现:杜鹃花属植物 16 个叶功能性状的变异幅度为 10.67%~120.29%,叶干质量变异系数最大,为 120.29%,说明杜鹃花属植物对环境适应能力强,且叶干质量是该属植物适应环境的核心维度。色季拉山杜鹃花属植物通过调整叶片功能性状,形成了 2 种不同的资源权衡策略,反映了植物功能性状间的资源权衡关系以及不同物种生态位的分化。研究结果可为探明该区域杜鹃花属植物资源权衡策略提供理论依据。

6 参考文献

- [1] CORNELISSEN J H C, LAVOREL S, GARNIER E, *et al.* A handbook of protocols for standardised and easy measurement of plant functional traits worldwide[J]. *Australian Journal of Botany*, 2003, 51(4): 335–380. DOI: 10.1071/bt02124.
- [2] MIDOLO G, de FRENNE P, HÖLZEL N, *et al.* Global patterns of intraspecific leaf trait responses to elevation[J]. *Global*

- Change Biology*, 2019, **25**(7): 2485–2498. DOI: [10.1111/gcb.14646](https://doi.org/10.1111/gcb.14646).
- [3] DÍAZ S, KATTGE J, CORNELISSEN J H C, *et al.* The global spectrum of plant form and function[J]. *Nature*, 2016, **529**(7585): 167–171. DOI: [10.1038/nature16489](https://doi.org/10.1038/nature16489).
- [4] 柴巧弟, 马瑞, 王安林, 等. 河西走廊阻沙固沙带典型荒漠植物叶功能性状[J]. *干旱区研究*, 2024, **41**(11): 1898–1907. CHAI Qiaodi, MA Rui, WANG Anlin, *et al.* Leaf functional traits of typical desert plants in the sand-blocking and sand-fixing belt of the Hexi Corridor[J]. *Arid Zone Research*, 2024, **41**(11): 1898–1907. DOI: [10.13866/j.azr.2024.11.10](https://doi.org/10.13866/j.azr.2024.11.10).
- [5] 何念鹏, 刘聪聪, 张佳慧, 等. 植物性状研究的机遇与挑战: 从器官到群落[J]. *生态学报*, 2018, **38**(19): 6787–6796. HE Nianpeng, LIU Congcong, ZHANG Jiahui, *et al.* Perspectives and challenges in plant traits: from organs to communities[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(19): 6787–6796. DOI: [10.5846/stxb201710241900](https://doi.org/10.5846/stxb201710241900).
- [6] 杨芷一, 封昕怡, 淑婷, 等. 采伐强度对吉林蛟河针阔混交林叶功能性状的影响[J]. *浙江农林大学学报*, 2026, **43**(1): 33–44. YANG Zhiyi, FENG Xinyi, SHU Ting, *et al.* Impact of logging intensity on leaf functional traits of conifer-broadleaf mixed forest in Jiaohe, Jilin Province[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2026, **43**(1): 33–44. DOI: [10.11833/j.issn.2095-0756.20250155](https://doi.org/10.11833/j.issn.2095-0756.20250155).
- [7] 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. SONG Yunxia, LI Yueqiao, HE Ping, *et al.* Differences of leaf functional traits and main active components in different *Lithocarpus polystachyus* families[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science)*, 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).
- [8] 陈瑞鑫, 简婷怡, 林勇明, 等. 闽江河口秋茄异龄叶性状及其叶经济谱[J]. *应用生态学报*, 2025, **36**(5): 1330–1338. CHEN Ruixin, JIAN Tingyi, LIN Yongming, *et al.* Traits and economic spectrum of different-aged leaf of *Kandelia obovata* in Minjiang River estuary, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2025, **36**(5): 1330–1338. DOI: [10.13287/j.1001-9332.202505.008](https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.202505.008).
- [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): 970–977. XIA Jihui, YE Peixia, YANG Hai, *et al.* Leaf functional traits and their coupling relationships of woody plants with different life forms in the northern Dabie Mountains[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2024, **41**(5): 970–977. DOI: [10.11833/j.issn.2095-0756.20240161](https://doi.org/10.11833/j.issn.2095-0756.20240161).
- [10] WRIGHT I J, REICH P B, WESTOBY M, *et al.* The worldwide leaf economics spectrum[J]. *Nature*, 2004, **428**(6985): 821–827. DOI: [10.1038/nature02403](https://doi.org/10.1038/nature02403).
- [11] 杜英杰, 范爱连, 王雪, 等. 亚热带天然常绿阔叶林乔木树种与林下灌木树种根-叶功能性状协调性及差异[J]. *植物生态学报*, 2025, **49**(4): 585–595. DU Yingjie, FAN Ailian, WANG Xue, *et al.* Coordination and differences in root-leaf functional traits between tree species and understory shrub species in a subtropical natural evergreen broadleaf forest[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2025, **49**(4): 585–595. DOI: [10.17521/cjpe.2024.0140](https://doi.org/10.17521/cjpe.2024.0140).
- [12] 程思祺, 姜峰, 金光泽. 温带森林阔叶植物幼苗叶经济谱及其与防御性状的关系[J]. *植物生态学报*, 2022, **46**(6): 678–686. CHENG Siqi, JIANG Feng, JIN Guangze. Leaf economics spectrum of broadleaved seedlings and its relationship with defense traits in a temperate forest[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2022, **46**(6): 678–686. DOI: [10.17521/cjpe.2022.0005](https://doi.org/10.17521/cjpe.2022.0005).
- [13] 李善家, 王子濠, 苏培玺, 等. 荒漠植物性状权衡策略及功能多样性研究进展[J]. *生态学报*, 2022, **42**(18): 7308–7320. LI Shan-jia, WANG Zihao, SU Peixi, *et al.* Research progress on the trade-off strategy and functional diversity of desert plants[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, **42**(18): 7308–7320. DOI: [10.5846/stxb202107151909](https://doi.org/10.5846/stxb202107151909).
- [14] 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 of the United States of America*, 2004, **101**(30): 11001–11006. DOI: [10.1073/pnas.0403588101](https://doi.org/10.1073/pnas.0403588101).
- [15] 刘万新, 蔡江平, 付佳琳, 等. 不同草地植物叶功能性状对沙化的响应及适应策略[J]. *应用生态学报*, 2025, **36**(8): 2379–2387. LIU Wanxin, CAI Jiangping, FU Jialin, *et al.* Responses of leaf functional traits of different grassland plants to desertification and their adaptation strategies[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2025, **36**(8): 2379–2387. DOI: [10.13287/j.1001-9332.202508.006](https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.202508.006).
- [16] 陈雪纯, 刘虹, 朱少琦, 等. 漓江流域不同弃耕年限下 4 种常见草本植物功能性状种内变化及其影响因素[J]. *植物生态学报*, 2023, **47**(4): 559–570. CHEN Xuechun, LIU Hong, ZHU Shaoqi, *et al.* Intraspecific variations in plant functional

- traits of four common herbaceous species under different abandoned years and their relevant driving factors in Lijiang River Basin, China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2023, **47**(4): 559–570. DOI: [10.17521/cjpe.2022.0188](https://doi.org/10.17521/cjpe.2022.0188).
- [17] 杭宇杰, 陈志成, 王林, 等. 宝天曼 8 种阔叶树木材密度的解剖学决定因素及其与叶性状的协同与权衡[J]. *林业科学*, 2024, **60**(4): 62–70. HANG Yujie, CHEN Zhicheng, WANG Lin, *et al.* Anatomical determinants of wood density of eight broad-leaved tree species in Baotianman and their coordination and trade-off with leaf traits[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2024, **60**(4): 62–70. DOI: [10.11707/j.1001-7488.LYKX20230646](https://doi.org/10.11707/j.1001-7488.LYKX20230646).
- [18] LIU N, ZHANG Lu, ZHOU Yanli, *et al.* The *Rhododendron* Plant Genome Database (RPGD): a comprehensive online omics database for *Rhododendron*[J]. *BMC Genomics*, 2021, **22**(1): 376. DOI: [10.1186/s12864-021-07704-0](https://doi.org/10.1186/s12864-021-07704-0).
- [19] MACKAY M, GARDINER S E. A model for determining *ex situ* conservation priorities in big Genera is provided by analysis of the subgenera of *Rhododendron* (Ericaceae)[J]. *Biodiversity and Conservation*, 2017, **26**(1): 189–208. DOI: [10.1007/s10531-016-1237-0](https://doi.org/10.1007/s10531-016-1237-0).
- [20] TIAN Xiaoling, CHANG Yuhang, NEILSEN J, *et al.* A new species of *Rhododendron* (Ericaceae) from northeastern Yunnan, China[J]. *Phytotaxa*, 2019, **395**(2): 66–70. DOI: [10.11646/phytotaxa.395.2.2](https://doi.org/10.11646/phytotaxa.395.2.2).
- [21] 郭文文, 卓么草, 韩嘉华, 等. 色季拉山杜鹃花属植物叶片解剖结构特征与抗逆性评价[J]. *河南农业科学*, 2024, **53**(6): 111–119. GUO Wenwen, ZHUO Mecao, HAN Jiahua, *et al.* Anatomical structure and stress resistance evaluation of leaves of *Rhododendron* L. in the Shergyla Mountain[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2024, **53**(6): 111–119. DOI: [10.15933/j.cnki.1004-3268.2024.06.012](https://doi.org/10.15933/j.cnki.1004-3268.2024.06.012).
- [22] LI Zhiliang, YANG Qiaofeng, DONG Xue, *et al.* Transcriptome analysis of flower color variation in five *Rhododendron* species (Ericaceae)[J]. *Brazilian Journal of Botany*, 2021, **44**(3): 685–695. DOI: [10.1007/s40415-021-00720-0](https://doi.org/10.1007/s40415-021-00720-0).
- [23] WU Xiaopei, ZHANG Lu, WANG Xiuyun, *et al.* Evolutionary history of two evergreen *Rhododendron* species as revealed by chromosome-level genome assembly[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, **14**: 1123707. DOI: [10.3389/fpls.2023.1123707](https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1123707).
- [24] SHOOTHA D, TRIPATHI D, SINGH M, *et al.* Antioxidant, antimicrobial and phytochemical analysis of three endemic *Rhododendron* spp. of Sikkim Himalaya[J]. *South African Journal of Botany*, 2022, **151**: 403–412. DOI: [10.1016/j.sajb.2022.04.016](https://doi.org/10.1016/j.sajb.2022.04.016).
- [25] GUO Wenwen, ZHUO Mecao, BAI Youzhi, *et al.* Plasticity of the anatomical traits of *Rhododendron* L. (Ericaceae) leaves and its implications in adaptation to the plateau environment[J]. *Open Life Sciences*, 2025, **20**(1): 20251116. DOI: [10.1515/biol-2025-1116](https://doi.org/10.1515/biol-2025-1116).
- [26] 郭文文, 卓么草, 方江平, 等. 藏东南色季拉山薄毛海綿杜鹃叶解剖结构特征与环境适应性[J]. *西北植物学报*, 2020, **40**(5): 811–818. GUO Wenwen, ZHUO Mecao, FANG Jiangping, *et al.* Anatomical characteristics and environmental adaptability of *Rhododendron aganniphum* var. *schizopeplum* leaf in Sejila Mountain, southeastern Tibet[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2020, **40**(5): 811–818. DOI: [10.7606/j.issn.1000-4025.2020.05.0811](https://doi.org/10.7606/j.issn.1000-4025.2020.05.0811).
- [27] 侯卓男, 李欣彤, 张新军, 等. 海拔和坡向对色季拉山高山杜鹃凋落物分解的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2024, **29**(4): 264–273. HOU Zhuonan, LI Xintong, ZHANG Xinjun, *et al.* Effects of elevation and slope orientation on litter decomposition of *Rhododendron simsii* in Mount Segrila[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, **29**(4): 264–273. DOI: [10.11841/j.issn.1007-4333.2024.04.23](https://doi.org/10.11841/j.issn.1007-4333.2024.04.23).
- [28] 徐静静, 张良英, 赵冰, 等. 色季拉山 8 个杜鹃花野生种亲缘关系的 ISSR 分析[J]. *种子*, 2016, **35**(3): 1–4. XU Jingjing, ZHANG Liangying, ZHAO Bing, *et al.* Genetic relationship of eight *Rhododendron* located on Sejila Mountain using ISSR[J]. *Seed*, 2016, **35**(3): 1–4. DOI: [10.16590/j.cnki.1001-4705.2016.03.001](https://doi.org/10.16590/j.cnki.1001-4705.2016.03.001).
- [29] ZHU Jiyu, HE Weijun, YAO Jiangming, *et al.* Spectral reflectance characteristics and chlorophyll content estimation model of *Quercus aquifolioides* leaves at different altitudes in Sejila Mountain[J]. *Applied Sciences*, 2020, **10**(10): 3636. DOI: [10.3390/app10103636](https://doi.org/10.3390/app10103636).
- [30] 贾玉琪, 于德水, 任毅华, 等. 色季拉山急尖长苞冷杉种群径向生长对气候的分异响应[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2026, **54**(1): 87–98, 108. JIA Yuqi, YU Deshui, REN Yihua, *et al.* Divergent response of radial growth to temperature and precipitation in a population of *Abies georgei* var. *smithii* in the Sygera Mountains[J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2026, **54**(1): 87–98, 108. DOI: [10.13207/j.jnwafu.2026.01.009](https://doi.org/10.13207/j.jnwafu.2026.01.009).
- [31] LI Yueyao, FU Fangwei, LI Jiangrong, *et al.* Stoichiometric characteristics of *Abies georgei* var. *smithii* plants in Southeast

- Tibet[J]. *Sustainability*, 2023, **15**(11): 8458. DOI: [10.3390/su15118458](https://doi.org/10.3390/su15118458).
- [32] 赵迎霞, 任毅华, 赵国庆, 等. 色季拉山急尖长苞冷杉林倒木分解对土壤养分的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2025(6): 23–29. ZHAO Yingxia, REN Yihua, ZHAO Guoqing, *et al.* Effects of decomposition of fallen wood on soil nutrients in *Abies georgei* var. *smithii* forest in Sejila Mountain[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2025(6): 23–29. DOI: [10.11838/sfsc.1673-6257.24567](https://doi.org/10.11838/sfsc.1673-6257.24567).
- [33] ZOU Zehao, YUAN Ke, MING Lili, *et al.* Changes in alpine soil bacterial communities with altitude and slopes at Mount Shergyla, Tibetan Plateau: diversity, structure, and influencing factors[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2022, **13**: 839499. DOI: [10.3389/fmicb.2022.839499](https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.839499).
- [34] FU Fangwei, LI Yueyao, ZHANG Bo, *et al.* Differences in soil microbial community structure and assembly processes under warming and cooling conditions in an alpine forest ecosystem[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, **907**: 167809. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2023.167809](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167809).
- [35] SONG Lingling, TIAN Qing, LI Guang, *et al.* Variation in characteristics of leaf functional traits of alpine vegetation in the Three-River Headwaters Region, China[J]. *Ecological Indicators*, 2022, **145**: 109557. DOI: [10.1016/j.ecolind.2022.109557](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109557).
- [36] 郭文俊, 李鑫豪, 田赞, 等. 北京东北部山区不同生活型木本植物叶功能性状特征及其权衡关系[J]. *林业科学*, 2025, **61**(9): 70–80. GUO Wenjun, LI Xinhao, TIAN Yun, *et al.* Characteristics and trade-offs of leaf functional traits of woody plants with different life forms in mountainous areas of northeastern Beijing[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2025, **61**(9): 70–80. DOI: [10.11707/j.1001-7488.LYKX20240342](https://doi.org/10.11707/j.1001-7488.LYKX20240342).
- [37] 姜晓燕, 高圣杰, 蒋燕, 等. 毛乌素沙地植被不同恢复阶段植物群落物种多样性、功能多样性和系统发育多样性[J]. *生物多样性*, 2022, **30**(5): 15–25. JIANG Xiaoyan, GAO Shengjie, JIANG Yan, *et al.* Species diversity, functional diversity, and phylogenetic diversity in plant communities at different phases of vegetation restoration in the Mu Us sandy grassland[J]. *Biodiversity Science*, 2022, **30**(5): 15–25. DOI: [10.17520/biods.2021387](https://doi.org/10.17520/biods.2021387).
- [38] 王方琳, 柴成武, 贺访印, 等. 沙冬青叶绿素荧光及叶功能性状对脱水胁迫的响应及生态适应性研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2025, **39**(7): 84–91. WANG Fanglin, CHAI Chengwu, HE Fangyin, *et al.* Response of chlorophyll fluorescence and leaf functional traits in two species of *Ammopiptanthus* to dehydration stress and their ecological adaptability[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2025, **39**(7): 84–91. DOI: [10.13448/j.cnki.jalre.2025.117](https://doi.org/10.13448/j.cnki.jalre.2025.117).
- [39] 吴贵进, 陈龙清, 韦秋雨, 等. 滇山茶登录品种统计及表型性状分析[J]. *园艺学报*, 2023, **50**(10): 2157–2170. WU Guijin, CHEN Longqing, WEI Qiuyu, *et al.* Statistics and phenotypic traits analysis of *Camellia reticulata* registered cultivars[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2023, **50**(10): 2157–2170. DOI: [10.16420/j.issn.0513-353x.2022-1192](https://doi.org/10.16420/j.issn.0513-353x.2022-1192).
- [40] 郭文文, 卓么草, 何竹, 等. 藏东南色季拉山不同海拔川滇高山栎叶解剖结构及环境适应性[J]. *西南林业大学学报 (自然科学)*, 2022, **42**(2): 33–38. GUO Wenwen, ZHUO Mecao, HE Zhu, *et al.* Anatomical characteristics and environmental adaptability of *Quercus aquifolioides* leaf in Sejila Mountain, southeastern Tibet[J]. *Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences)*, 2022, **42**(2): 33–38. DOI: [10.11929/j.swfu.202010094](https://doi.org/10.11929/j.swfu.202010094).
- [41] 秦娟, 孔海燕, 刘华. 马尾松不同林型土壤 C、N、P、K 的化学计量特征[J]. *西北农林科技大学学报 (自然科学版)*, 2016, **44**(2): 68–76, 82. QIN Juan, KONG Haiyan, LIU Hua. Stoichiometric characteristics of soil C, N, P and K in different *Pinus massoniana* forests[J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2016, **44**(2): 68–76, 82. DOI: [10.13207/j.cnki.jnwafu.2016.02.010](https://doi.org/10.13207/j.cnki.jnwafu.2016.02.010).
- [42] 高永龙, 孙艳丽, 徐铭泽, 等. 北京百花山落叶阔叶林群落内木本植物的叶片功能性状变异特征[J]. *北京林业大学学报*, 2024, **46**(4): 40–51. GAO Yonglong, SUN Yanli, XU Mingze, *et al.* Variation characteristics in leaf functional traits of woody plants in deciduous broadleaved forest community in Baihua Mountain of Beijing[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2024, **46**(4): 40–51. DOI: [10.12171/j.1000-1522.20220462](https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20220462).
- [43] 宋彦涛, 周道玮, 王平, 等. 松嫩草地 66 种草本植物叶片性状特征[J]. *生态学报*, 2013, **33**(1): 79–88. SONG Yantao, ZHOU Daowei, WANG Ping, *et al.* Leaf traits of 66 herbaceous species in Songnen grassland in Northeast China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(1): 79–88. DOI: [10.5846/stxb201111041666](https://doi.org/10.5846/stxb201111041666).
- [44] SONG Yanping, YU Yanghua, LI Yitong. Leaf functional traits and relationships with soil properties of *Zanthoxylum planispinum* ‘dintanensis’ in plantations of different ages[J]. *Agronomy*, 2022, **12**(8): 1891. DOI: [10.3390/agronomy12081891](https://doi.org/10.3390/agronomy12081891).
- [45] 罗达, 史彦江, 宋锋惠, 等. 38 个榛种质资源叶功能性状与光合特征变异及其相关性[J]. *生态学杂志*, 2021, **40**(1):

- 11–22. LUO Da, SHI Yanjiang, SONG Fenghui, *et al.* Variation and correlation of leaf functional traits and photosynthetic characteristics of 38 hazelnut germplasm resources[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, **40**(1): 11–22. DOI: [10.13292/j.1000-4890.202101.022](https://doi.org/10.13292/j.1000-4890.202101.022).
- [46] DONG Ning, PRENTICE I C, WRIGHT I J, *et al.* Components of leaf-trait variation along environmental gradients[J]. *The New Phytologist*, 2020, **228**(1): 82–94. DOI: [10.1111/nph.16558](https://doi.org/10.1111/nph.16558).
- [47] WRIGHT I J, DONG Ning, MAIRE V, *et al.* Global climatic drivers of leaf size[J]. *Science*, 2017, **357**(6354): 917–921. DOI: [10.1126/science.aal4760](https://doi.org/10.1126/science.aal4760).
- [48] 陈文, 王桔红, 马瑞君, 等. 粤东 89 种常见植物叶功能性状变异特征[J]. *生态学杂志*, 2016, **35**(8): 2101–2109. CHEN Wen, WANG Juhong, MA Ruijun, *et al.* Variance in leaf functional traits of 89 species from the eastern Guangdong of China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, **35**(8): 2101–2109. DOI: [10.13292/j.1000-4890.201608.033](https://doi.org/10.13292/j.1000-4890.201608.033).
- [49] 王钊颖, 陈晓萍, 程英, 等. 武夷山 49 种木本植物叶片与细根经济谱[J]. *植物生态学报*, 2021, **45**(3): 242–252. WANG Zhaoying, CHEN Xiaoping, CHENG Ying, *et al.* Leaf and fine root economics spectrum across 49 woody plant species in Wuyi Mountains[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2021, **45**(3): 242–252. DOI: [10.17521/cjpe.2020.0280](https://doi.org/10.17521/cjpe.2020.0280).
- [50] JACKSON B G, PELTZER D A, WARDLE D A. The within-species leaf economic spectrum does not predict leaf litter decomposability at either the within-species or whole community levels[J]. *Journal of Ecology*, 2013, **101**(6): 1409–1419. DOI: [10.1111/1365-2745.12155](https://doi.org/10.1111/1365-2745.12155).
- [51] JIANG Yong, CHEN Xingbin, MA Jiangming, *et al.* Interspecific and intraspecific variation in functional traits of subtropical evergreen and deciduous broadleaved mixed forests in karst topography, Guilin, southwest China[J]. *Tropical Conservation Science*, 2016, **9**(4): 1–9. DOI: [10.1177/1940082916680211](https://doi.org/10.1177/1940082916680211).
- [52] AUGER S, SHIPLEY B. Inter-specific and intra-specific trait variation along short environmental gradients in an old-growth temperate forest[J]. *Journal of Vegetation Science*, 2013, **24**(3): 419–428. DOI: [10.1111/j.1654-1103.2012.01473.x](https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2012.01473.x).
- [53] 周荣磊, 温仲明, 刘洋洋, 等. 延河流域不同植被带植物功能性状变化及其对环境因子的响应[J]. *生态学报*, 2023, **43**(14): 6045–6057. ZHOU Ronglei, WEN Zhongming, LIU Yangyang, *et al.* Responses of plant functional traits to environmental variables across different vegetation zones in the Yanhe River Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, **43**(14): 6045–6057. DOI: [10.5846/stxb202207111972](https://doi.org/10.5846/stxb202207111972).
- [54] 范卓鹏, 解婷婷, 单立山, 等. 荒漠绿洲过渡带沙丘不同固定阶段植物群落叶功能性状特征[J]. *生态学报*, 2025, **45**(7): 3370–3388. FAN Zhuopeng, XIE Tingting, SHAN Lishan, *et al.* Characterization of leaf functional traits in plant communities at different stages of fixation in sand dunes in the transition zone of desert oases[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, **45**(7): 3370–3388. DOI: [10.20103/j.stxb.202407081591](https://doi.org/10.20103/j.stxb.202407081591).
- [55] TIAN Di, YAN Zhengbing, NIKLAS K J, *et al.* Global leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry and their scaling exponent[J]. *National Science Review*, 2018, **5**(5): 728–739. DOI: [10.1093/nsr/nwx142](https://doi.org/10.1093/nsr/nwx142).
- [56] 田地, 严正兵, 方精云. 植物生态化学计量特征及其主要假说[J]. *植物生态学报*, 2021, **45**(7): 682–713. TIAN Di, YAN Zhengbing, FANG Jingyun. Review on characteristics and main hypotheses of plant ecological stoichiometry[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2021, **45**(7): 682–713. DOI: [10.17521/cjpe.2020.0331](https://doi.org/10.17521/cjpe.2020.0331).
- [57] SOLIVERES S, MAESTRE F T, BOWKER M A, *et al.* Functional traits determine plant co-occurrence more than environment or evolutionary relatedness in global drylands[J]. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 2014, **16**(4): 164–173. DOI: [10.1016/j.ppees.2014.05.001](https://doi.org/10.1016/j.ppees.2014.05.001).
- [58] 朱远忠, 黄文达, 于海伦, 等. 科尔沁沙质草地不同水热梯度植物群落叶功能性状特征[J]. *中国沙漠*, 2024, **44**(2): 143–150. ZHU Yuanzhong, HUANG Wenda, YU Hailun, *et al.* Leaf functional traits of plant community with different hydrothermal gradients in Horqin sandy grassland[J]. *Journal of Desert Research*, 2024, **44**(2): 143–150. DOI: [10.7522/j.issn.1000-694X.2023.00093](https://doi.org/10.7522/j.issn.1000-694X.2023.00093).
- [59] 盘远方, 邱思婷, 苏治南, 等. 红树林人工幼林叶功能性状尺度变异及关联[J]. *湿地科学*, 2024, **22**(5): 641–650. PAN Yuanfang, QIU Siting, SU Zhinan, *et al.* Scale variation and correlation in leaf functional traits of young mangrove plantation[J]. *Wetland Science*, 2024, **22**(5): 641–650. DOI: [10.13248/j.cnki.wetlandsci.2024.05.003](https://doi.org/10.13248/j.cnki.wetlandsci.2024.05.003).
- [60] 王英鲲, 吕坤, 吴宇, 等. 蛛网萼叶功能性状随植物生长发育进程的变化[J]. *植物科学学报*, 2021, **39**(5): 526–534. WANG Yingkun, LÜ Kun, WU Yu, *et al.* Changes in the functional traits of *Platycrater arguta* Sieb. et Zucc. leaves with plant growth and development[J]. *Plant Science Journal*, 2021, **39**(5): 526–534. DOI: [10.11913/PSJ.2095-0837.2021](https://doi.org/10.11913/PSJ.2095-0837.2021).

50526.

- [61] 盘远方, 邱思婷, 苏治南, 等. 红树植物桐花树老林与幼林叶功能性状差异及权衡策略[J]. *海洋学报*, 2025, **47**(3): 98–107. PAN Yuanfang, QIU Siting, SU Zhinan, *et al.* Differences and trade-off strategies of leaf functional traits between old and young forests of the mangrove *Aegiceras corniculatum*[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2025, **47**(3): 98–107. DOI: [10.12284/hyxb2025030](https://doi.org/10.12284/hyxb2025030).
- [62] KORICHEVA J. Meta-analysis of sources of variation in fitness costs of plant antiherbivore defenses[J]. *Ecology*, 2002, **83**(1): 176–190. DOI: [10.1890/0012-9658\(2002\)083\[0176:MAOSOV\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2002)083[0176:MAOSOV]2.0.CO;2).
- [63] 代远萌, 李满乐, 徐铭泽, 等. 毛乌素沙地沙丘不同固定阶段黑沙蒿叶性状特征[J]. *植物生态学报*, 2022, **46**(11): 1376–1387. DAI Yuanmeng, LI Manle, XU Mingze, *et al.* Leaf traits of *Artemisia ordosica* at different dune fixation stages in Mau Us Sandy Land[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2022, **46**(11): 1376–1387. DOI: [10.17521/cjpe.2022.0257](https://doi.org/10.17521/cjpe.2022.0257).
- [64] 刘朝阳, 罗应华, 于瀛, 等. 4 种乡土珍贵阔叶树种叶功能性状的种内和种间变异[J]. *广西植物*, 2022, **42**(2): 257–266. LIU Zhaoyang, LUO Yinghua, YU Ying, *et al.* Interspecific and intraspecific variation in leaf functional traits of four local precious hardwood species[J]. *Guihaia*, 2022, **42**(2): 257–266. DOI: [10.11931/guihaia.gxzw202001005](https://doi.org/10.11931/guihaia.gxzw202001005).
- [65] GAO Yang, LIU Jian, WANG Duoia, *et al.* Synergy and trade-off between plant functional traits enhance grassland multifunctionality under grazing exclusion in a semi-arid region[J]. *Journal of Environmental Management*, 2025, **373**: 123877. DOI: [10.1016/j.jenvman.2024.123877](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123877).
- [66] WANG Wenjie, WANG Huimei, ZU Yuangang. Temporal changes in SOM, N, P, K, and their stoichiometric ratios during reforestation in China and interactions with soil depths: importance of deep-layer soil and management implications[J]. *Forest Ecology and Management*, 2014, **325**: 8–17. DOI: [10.1016/j.foreco.2014.03.023](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.03.023).
- [67] 闫凤辰, 朱江, 艾训儒, 等. 青冈叶片功能性状对不同海拔梯度的响应与适应[J]. *中南林业科技大学学报*, 2025, **45**(10): 115–123. YAN Fengchen, ZHU Jiang, AI Xunru, *et al.* Response and adaptation of *Quercus glauca* leaf functional traits to different altitudinal gradients[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2025, **45**(10): 115–123. DOI: [10.14067/j.cnki.1673-923x.2025.10.012](https://doi.org/10.14067/j.cnki.1673-923x.2025.10.012).
- [68] 陈莹婷, 许振柱. 植物叶经济谱的研究进展[J]. *植物生态学报*, 2014, **38**(10): 1135–1153. CHEN Yingting, XU Zhenzhu. Review on research of leaf economics spectrum[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2014, **38**(10): 1135–1153. DOI: [10.3724/SP.J.1258.2014.00108](https://doi.org/10.3724/SP.J.1258.2014.00108).
- [69] 刘可佳, 何念鹏, 侯继华. 中国温带典型森林植物比叶面积的空间格局及其影响因素[J]. *生态学报*, 2022, **42**(3): 872–883. LIU Kejia, HE Nianpeng, HOU Jihua. Spatial patterns and influencing factors of specific leaf area in typical temperate forests[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, **42**(3): 872–883. DOI: [10.5846/stxb202101040020](https://doi.org/10.5846/stxb202101040020).
- [70] 黄贝佳, 朱静, 何晨阳, 等. 潮汐对秋茄叶表型塑造及叶经济谱的影响[J]. *林业科学*, 2021, **57**(4): 63–72. HUANG Beijia, ZHU Jing, HE Chenyang, *et al.* Effects of tides on leaf phenotypic modeling and leaf economics spectrum of *Kandelia obovata*[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2021, **57**(4): 63–72. DOI: [10.11707/j.1001-7488.20210407](https://doi.org/10.11707/j.1001-7488.20210407).
- [71] HILLERISLAMBERS J, ADLER P B, HARPOLE W S, *et al.* Rethinking community assembly through the lens of coexistence theory[J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2012, **43**: 227–248. DOI: [10.1146/annurev-ecolsys-110411-160411](https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-110411-160411).
- [72] 刘晓娟, 马克平. 植物功能性状研究进展[J]. *中国科学 (生命科学)*, 2015, **45**(4): 325–339. LIU Xiaojuan, MA Keping. Plant functional traits: concepts, applications and future directions[J]. *Science in China (Series C)*, 2015, **45**(4): 325–339. DOI: [10.1360/N052014-00244](https://doi.org/10.1360/N052014-00244).
- [73] 袁雅妮, 周哲, 陈彬洲, 等. 基于功能性状的锐齿槲栎林共存树种生态策略差异[J]. *植物生态学报*, 2023, **47**(9): 1270–1277. YUAN Yani, ZHOU Zhe, CHEN Binzhou, *et al.* Differential ecological strategies in functional traits among coexisting tree species in a *Quercus aliena* var. *acuteserrata* forest[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2023, **47**(9): 1270–1277. DOI: [10.17521/cjpe.2022.0255](https://doi.org/10.17521/cjpe.2022.0255).