

引用格式: 李奇鸽, 俞叶飞, 陈伟杰, 等. 浙江大盘山云锦杜鹃群落结构和优势种群动态研究[J]. 浙江农林大学学报, 2025, 42(1): 1–11. LI Qige, YU Yefei, CHEN Weijie, et al. Community structure and dominant population dynamics of *Rhododendron fortunei* in Mount Dapanshan, Zhejiang Province[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2025, 42(1): 1–11.

浙江大盘山云锦杜鹃群落结构和优势种群动态研究

李奇鸽¹, 俞叶飞², 陈伟杰¹, 何安国², 陈子林³, 金孝锋¹

(1. 浙江农林大学 林业与生物技术学院, 浙江 杭州 311300; 2. 浙江省大盘山国家级自然保护区管理局, 浙江 磐安 322300; 3. 磐安县中药产业发展促进中心, 浙江 磐安 322300)

摘要: 【目的】研究浙江大盘山国家级自然保护区较高海拔区域针阔混交林群落结构及群落中云锦杜鹃 *Rhododendron fortunei* 种群动态, 预测未来的演替趋势。【方法】2018 年 7 月建立 1 hm² 固定监测样地, 对样地内胸径 (DBH) ≥ 1.0 cm 的木本植物挂牌、鉴定并测量胸径, 每 5 a 复查 1 次。根据样地内物种的重要值和优势种等, 分析群落物种组成和优势种径级结构。利用云锦杜鹃种群年龄结构图和种群生命表等分析云锦杜鹃种群动态。【结果】2018 年共记录木本植物 4 773 株, 分属于 35 科 55 属 90 种; 2023 年有 3 个物种在样地内消失, 个体死亡率为 1.38%, 补员率为 2.38%。样地林层结构清晰, 其中亚乔木层云锦杜鹃数量占主要优势。2018、2023 年所有乔木树种的总体径级结构皆为倒“J”型, 且 2023 年乔木树种中 5.0 cm ≤ DBH ≤ 20.0 cm 的个体数量明显增多。云锦杜鹃种群径级结构为金字塔型, 集中在 II、III、IV 龄级, I、VI、VII 龄级个体数量很少。从存活曲线看, 种群内大多数个体能够存活到生理寿命, 呈现出稳定增长的动态特征。【结论】云锦杜鹃群落物种丰富, 5 a 间物种组成和结构比较稳定, 低龄级个体比例高, 更新较好。云锦杜鹃种群为增长型, 但 I 龄级植株数量储备不足。图 6 表 2 参 38

关键词: 云锦杜鹃; 群落结构; 空间分布格局; 种群结构; 物种多样性; 大盘山

中图分类号: S728.54 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2025)01-0001-11

Community structure and dominant population dynamics of *Rhododendron fortunei* in Mount Dapanshan, Zhejiang Province

LI Qige¹, YU Yefei², CHEN Weijie¹, HE Anguo², CHEN Zilin³, JIN Xiaofeng¹

(1. College of Forestry and Biotechnology, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 2. Administration of Zhejiang Dapanshan National Nature Reserve, Pan'an 322300, Zhejiang, China; 3. Traditional Chinese Medicine Industry Development and Promotion Center of Pan'an County, Pan'an 322300, Zhejiang, China)

Abstract: [Objective] The objective is to study the community structure and dominant population dynamics of *Rhododendron fortunei* in the high-altitude coniferous and broad-leaved mixed forest in Dapanshan National Nature Reserve in Zhejiang Province, and predict its future successional trends. [Method] A 1 hm² fixed monitoring plot was established in July 2018, and woody plants with a diameter at breast height (DBH) ≥ 1.0 cm were tagged, identified, and measured for DBH, and re-examined every 5 years. Based on species importance and dominance, the composition of community species and DBH structure of dominant species were analyzed. The population dynamics of *R. fortunei* were analyzed using age structure diagrams and population life tables. [Result] In 2018, a total of 4 773 woody plants were recorded, belonging to 90 species in 55 genera of 35 families. In 2023, three species disappeared from the plot, with an individual mortality rate of 1.38% and a

收稿日期: 2024-08-03; 修回日期: 2024-11-14

基金项目: 浙江省林业局资助项目 (2017-2020)

作者简介: 李奇鸽 (ORCID: 0009-0002-1090-8787), 从事植物资源与分类研究。E-mail: li13262032959@163.com。

通信作者: 金孝锋 (ORCID: 0000-0002-8195-6738), 教授, 博士, 从事植物系统进化和生物多样性保护研究。E-mail: docxfjin@163.com

recruitment rate of 2.38%. The forest layer structure of the plot was clear, with the sub-canopy dominated by *R. fortunei* species. The overall diameter class structure of all tree species in 2018 and 2023 exhibited a reversed “J” pattern, and the number of individuals with $5.0\text{ cm} \leq \text{DBH} \leq 20.0\text{ cm}$ in tree species significantly increased in 2023. The population structure of *R. fortunei* was pyramid-shaped, mainly concentrated in age classes II, III, and IV, with very few individuals in age classes I, VI, and VII. The survival curve showed that most individuals within the population could survive to their physiological lifespan, exhibiting a dynamic characteristic of stable growth. [Conclusion] The *R. fortunei* community has a richness of species, with a relatively stable species composition and structure in the past 5 years, characterized by a high proportion of young individuals and good regeneration. The population of *R. fortunei* is growing, but there is insufficient reserve of individuals in age class I. [Ch, 6 fig. 2 tab. 38 ref.]

Key words: *Rhododendron fortunei*; community structure; spatial distribution pattern; population structure; species diversity; Mount Dapanshan

云锦杜鹃 *Rhododendron fortunei* 为杜鹃花科 Ericaceae 常绿小乔木或灌木, 主要分布于中国长江流域, 生长在海拔 600 m 以上的沟谷阔叶林或山顶灌草丛中, 为中国丘陵山地较高海拔地区常见的观赏价值较高的木本花卉^[1], 以“苍干如松柏, 花姿若牡丹”著称。

近年来, 中国关于云锦杜鹃的研究较多。不同地区的云锦杜鹃群落物种组成差异较大。陈艳华等^[2]对湖南阳明山云锦杜鹃纯林和混交林比较发现: 无论是纯林还是混交林, 物种组成均不丰富, 群落垂直结构单一。邓贤兰等^[3]对江西井冈山、袁丛军等^[4]对贵州雷公山调查发现: 不同海拔的云锦杜鹃样地物种多样性较高。在种群结构方面, 赵丽娟等^[5]对湖南平江幕阜山、黄川腾等^[6]对广东天井山、付剑等^[7]对湖北大别山的云锦杜鹃种群调查均发现: 云锦杜鹃种群结构稳定, 但幼苗较少, 从而导致其种群更新不良。管康林等^[8]分析了浙江华顶山云锦杜鹃林衰退的原因, 认为可能系上层树种黄山松 *Pinus taiwanensis* 和柳杉 *Cryptomeria fortunei* 不断扩大和低灌层箬竹 *Indocalamus tessellatus* 的入侵蔓延所致。

边才苗等^[9]研究发现: 云锦杜鹃的种子不适合在过于湿润的土壤环境中萌发, 但其种子对于干旱胁迫比较敏感。杨华等^[10]测定了 2 种光照条件下低海拔引种的云锦杜鹃的光合作用日变化, 发现栽培的云锦杜鹃喜光特性并不会因为气温高而改变。此外, 研究还涉及云锦杜鹃的扦插繁育^[11]、花期的挥发物质成分分析^[12]、转录组分析^[13]及分子标记开发^[14]等。

尽管云锦杜鹃群落特征、种群结构、种子萌发特性、光合生理等已有研究报道, 但针对其种群及群落动态变化的研究仍显不足。此外, 当前针对云锦杜鹃的研究方法通常是选取有限的小型样地进行静态分析, 这种方法虽然有助于了解特定时间点的物种丰富度和群落组成, 但未能充分反映种群动态变化的复杂性, 而样地面积大小影响群落物种多样性及种群结构的分析结果。本研究基于浙江大盘山国家级自然保护区 1 hm² 固定监测样地的长期监测和调查资料, 分析该区云锦杜鹃群落的基本特征、种群结构的动态变化, 为资源保护、管理和利用等提供理论依据, 同时也为大盘山国家级自然保护区较高海拔的地带性植被恢复与林相改造提出参考建议。

1 研究地区与方法

1.1 样地概况

浙江大盘山国家级自然保护区位于浙江省金华市磐安县内, 是浙江省钱塘江、灵江、甌江三大水系主要支流的发源地, $28^{\circ}57'05''\sim 29^{\circ}01'58''\text{N}$, $120^{\circ}28'05''\sim 120^{\circ}33'40''\text{E}$ 。该区地貌属于中山山地, 为典型的亚热带季风气候区, 年均降水量为 1 427.8 mm, 年均气温为 15.0 °C, 年均日照时数为 1 827.6 h。地形复杂, 气候优越, 植物种类丰富。目前构成大盘山植被的主要类型为人工杉木 *Cunninghamia lanceolata* 林、竹林、马尾松 *Pinus massoniana* 林和常绿阔叶林, 另有针阔混交林植被等^[15]。

1.2 样地设置及树种调查

参照美国史密森热带研究所热带森林研究中心 (Center for Tropical Forest Science, CTFS) 的技术规

范^[16], 2018 年在大盘山国家级自然保护区选择云锦杜鹃集中分布且生长状态较好的林地, 建立 1 hm^2 ($100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$) 的固定监测样地, 地理位置为 $28^\circ 58' 33.24'' \text{N}$, $120^\circ 31' 36.12'' \text{E}$ 。样地最高点海拔为 $1\,224 \text{ m}$, 最低点海拔为 $1\,148 \text{ m}$ 。样地地形较复杂, 南北方向有 1 条纵沟, 北部平均海拔高 (图 1)。用全站仪将整个样地划分为 25 个 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 的样方, 每个样方再划分为 16 个 $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ 的小样方。对样地内胸径 (DBH) $\geq 1.0 \text{ cm}$ 的木本植株主干及其分支挂牌编号, 以便永久监测, 记录其胸径、冠幅、树高、小样方内坐标、生长状况等。2023 年对该样地内所有挂牌木本植株进行复查, 对新增树木 (DBH $\geq 1.0 \text{ cm}$) 挂牌编号, 记录死亡个体。

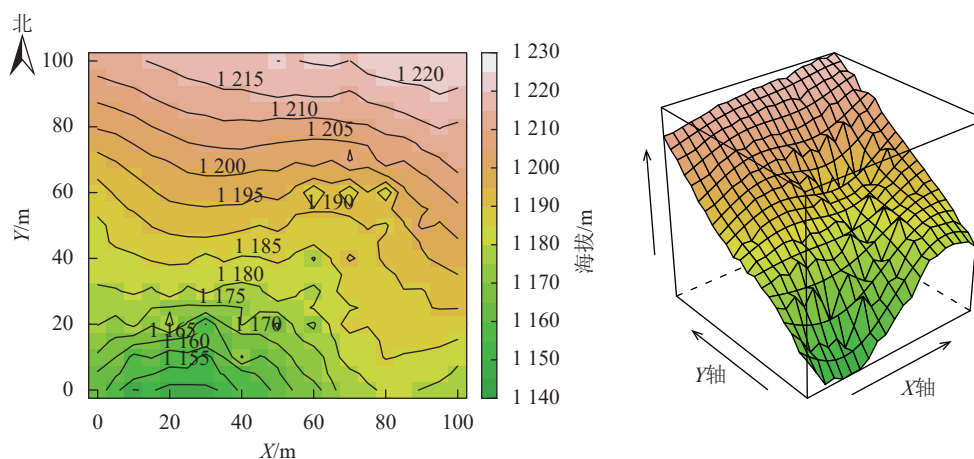


图 1 浙江大盘山 1 hm^2 森林固定监测样地地形图

Figure 1 Topography of 1 hm^2 forest dynamics plot in Mount Dapanshan of Zhejiang Province

1.3 数据统计和分析

参照《浙江植物志 (新编)》^[1] 鉴定样地植物。参照仲磊等^[17]、丁炳扬等^[18] 的方法, 按生长型划分样地木本植物的径级。乔木: $1.0 \text{ cm} \leq \text{DBH} < 5.0 \text{ cm}$ (小树)、 $5.0 \text{ cm} \leq \text{DBH} < 10.0 \text{ cm}$ (中树)、 $10.0 \text{ cm} \leq \text{DBH} < 25.0 \text{ cm}$ (大树)、 $\text{DBH} \geq 25.0 \text{ cm}$ (老树)。小乔木: $1.0 \text{ cm} \leq \text{DBH} < 3.0 \text{ cm}$ (小树)、 $3.0 \text{ cm} \leq \text{DBH} < 5.0 \text{ cm}$ (中树)、 $5.0 \text{ cm} \leq \text{DBH} < 15.0 \text{ cm}$ (大树)、 $\text{DBH} \geq 15.0 \text{ cm}$ (老树)。灌木: $1.0 \text{ cm} \leq \text{DBH} < 2.0 \text{ cm}$ (小树)、 $2.0 \text{ cm} \leq \text{DBH} < 3.0 \text{ cm}$ (中树)、 $3.0 \text{ cm} \leq \text{DBH} < 10.0 \text{ cm}$ (大树)、 $\text{DBH} \geq 10.0 \text{ cm}$ (老树)。稀有种: 1 hm^2 仅为 1 株的物种。偶见种: 样地内个体数大于 1 株且小于 10 株的物种。常见种: 样地内个体数大于等于 10 株的物种^[19]。

物种重要值 = (相对多度 + 相对频度 + 相对显著度) / 3, 其中相对多度和相对频度仅计算独立个体, 相对显著度计算包括了分枝的胸高截面积^[20]。死亡率 $M = \frac{(\ln N_0 - \ln S_t)}{T}$; 补员率 $R = \frac{(\ln N_t - \ln S_t)}{T}$ 。其中: N_0 和 N_t 分别为第 1、2 次调查的个体数, S_t 是该物种在第 1、2 次调查时都存在的活个体数, T 为 2 次调查时间间隔。种群大小变化率 (λ) 用补员率和死亡率的差值表示。

参照文献 [18], 采用径级结构代替年龄结构的方法, 将该种群径级结构划分为 7 个等级: I 级 ($1.0 \text{ cm} \leq \text{DBH} < 2.5 \text{ cm}$), II 级 ($2.5 \text{ cm} \leq \text{DBH} < 5.0 \text{ cm}$), III 级 ($5.0 \text{ cm} \leq \text{DBH} < 8.0 \text{ cm}$), IV 级 ($8.0 \text{ cm} \leq \text{DBH} < 11.0 \text{ cm}$), V 级 ($11.0 \text{ cm} \leq \text{DBH} < 15.0 \text{ cm}$), VI 级 ($15.0 \text{ cm} \leq \text{DBH} < 20.0 \text{ cm}$), VII 级 ($\text{DBH} \geq 20.0 \text{ cm}$)。根据 7 个径级的个体数编制云锦杜鹃静态生命表^[21]。生命表最关键的原始数据为 a_x , $l_x = a_x / a_0 \times 1\,000$;

$d_x = l_x - l_{x+1}$; $q_x = d_x / l_x$; $L_x = (l_x + l_{x+1}) / 2$; $T_x = \sum_{x=0}^{\infty} L_x$; $e_x = T_x / l_x$; $K_x = \ln l_x - \ln l_{x+1}$ 。其中: x 为龄级; a_x 为匀滑后 x 龄级存活数; a_0 为最大个体数; l_x 为 x 龄级初始状态标准化存活个体数; d_x 为 x 到 $x+1$ 龄级区间内标准化死亡数; q_x 为 x 到 $x+1$ 龄级间隔期死亡率; L_x 为从 x 到 $x+1$ 龄级间隔期还存活的个体数; T_x 为从 x 龄级到超过 x 龄级的个体总数; e_x 为进入 x 龄级的平均寿命; K_x 为各龄级致死力 (消失率)。根据静态生命表数据, 绘制存活曲线 ($\ln l_x$)、死亡率曲线 (q_x)。

数据分析作图使用 SPSS 27.0.1、R 4.3.2 和 Origin 2022 等。

2 结果与分析

2.1 群落物种组成及其变化

云锦杜鹃群落 1 hm² 固定监测样地于 2018 年调查并记录 4 773 株 DBH≥1.0 cm 的木本植物, 分属于 35 科 55 属 90 种。其中, 常绿树种只有 16 种, 但个体数占调查总数的 67%。样地中, 云锦杜鹃的重要值最高, 其次为黄山松 (表 1), 因此该样地为常绿针阔混交林。从乔木层科的组成来看, 含属数最多的为壳斗科 Fagaceae (4 属)、蝶形花科 Fabaceae (4 属) 等。从属的组成来看, 含有种数最多的为山胡椒属 *Lindera* (4 种)、槭属 *Acer* (4 种) 和李属 *Prunus* (4 种) 等。样地内常见种 33 种, 其中个体数≥1 000 株的仅有云锦杜鹃 1 种, 个体数≥100 株的常见种有黄山松、水马桑 *Weigela japonica* var. *sinica*、红果钓樟 *Lindera erythrocarpa* 等 6 种; 偶见种共 35 种, 包括茅栗 *Castanea seguinii*、盐肤木 *Rhus chinensis* 等; 稀有种 22 种。2023 年复查记录了 5 018 株 DBH≥1.0 cm 的木本植物, 共计 35 科 53 属 87 种。间隔 5 a 后, 有 3 种稀有种植物在样地消失, 分别是接骨木 *Sambucus williamsii*、圆叶鼠李 *Rhamnus globosa* 和隔药铃 *Eurya muricata*。此外, 样地中 DBH≥1.0 cm 的个体年死亡率为 1.38%, 年补员率为 2.38%, 种群大小变化率为 1.00%。

表 1 大盘山 1 hm² 固定监测样地重要值排名前 10 位的树种

Table 1 Top ten species with the highest importance values in the 1 hm² forest dynamics plot in Mount Dapanshan

树种	个体数/株		重要值/%		生活型
	2018年	2023年	2018年	2023年	
云锦杜鹃 <i>Rhododendron fortunei</i>	2 341	2 380	36.21	36.43	常绿小乔木
黄山松 <i>Pinus taiwanensis</i>	359	336	15.61	13.71	常绿乔木
红果钓樟 <i>Lindera erythrocarpa</i>	228	254	5.30	5.53	落叶灌/小乔木
水马桑 <i>Weigela japonica</i> var. <i>sinica</i>	243	197	4.72	3.86	落叶灌木
朝鲜白檀 <i>Symplocos coreana</i>	208	289	4.59	5.41	落叶乔木
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	112	101	4.11	3.87	常绿乔木
尖连蕊茶 <i>Camellia cuspidata</i>	219	312	3.44	4.56	常绿灌木
灯台树 <i>Bothrocaryum controversum</i>	98	97	2.77	2.63	落叶乔木
短柄榛 <i>Corylus heterophylla</i> var. <i>brevipes</i>	90	103	1.88	1.95	落叶灌/小乔木
合轴荚蒾 <i>Viburnum sympodiale</i>	93	134	1.84	2.51	落叶灌木

样地内群落的垂直结构分层明显。根据高度和生长型划分群落的垂直结构, 树高 (H)≥15.0 m 的林冠层包括黄山松、杉木、灯台树等; H ≥5.0 m 的亚乔木层主要有云锦杜鹃、红果钓樟等; H <5.0 m 的灌木层主要有尖连蕊茶、合轴荚蒾等。样地中优势度明显, 重要值前 10 位的物种个体数占总个体数的 80.45%, 这 10 个物种的相对多度总和为 83.62%, 相对显著度总和为 89.09%。2023 年复查结果显示: 样地内重要值前 10 位的物种未发生变化, 但黄山松的重要值降幅最大, 尖连蕊茶的重要值增幅最大。

2.2 群落径级结构

样地内所有木本植物 (DBH≥1.0 cm) 的径级分布呈现倒“J”型 (图 2)。2018 年所有木本植物的平均径级为 7.5 cm, 其中 1.0 cm≤DBH<5.0 cm 的个体有 1 655 株, 占总个体数的 34.67%; 5.0 cm≤DBH<20.0 cm 的个体有 2 928 株, 占总个体数的 61.36%; DBH≥20.0 cm 的个体有 190 株, 占总个体数的 3.98%。2023 年所有木本植物的平均径级为 8.3 cm, 5 a 间该样地平均径级增长了 0.8 cm, 径级分布依然为倒“J”型, 其中 1.0 cm≤DBH<5.0 cm 的个体减少了 169 株; 5.0 cm≤DBH<20.0 cm 的个体增加了 358 株, DBH≥20.0 cm 的个体增加了 56 株。样地重要值排名前 9 位的径级结构如图 3。云锦杜

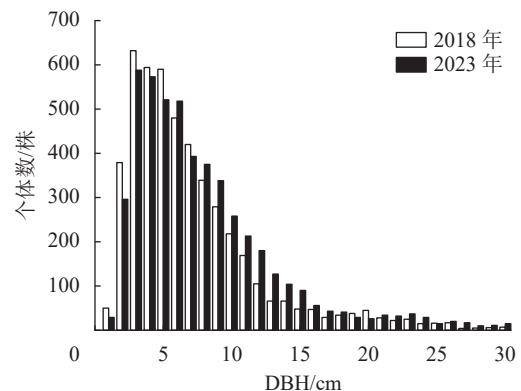
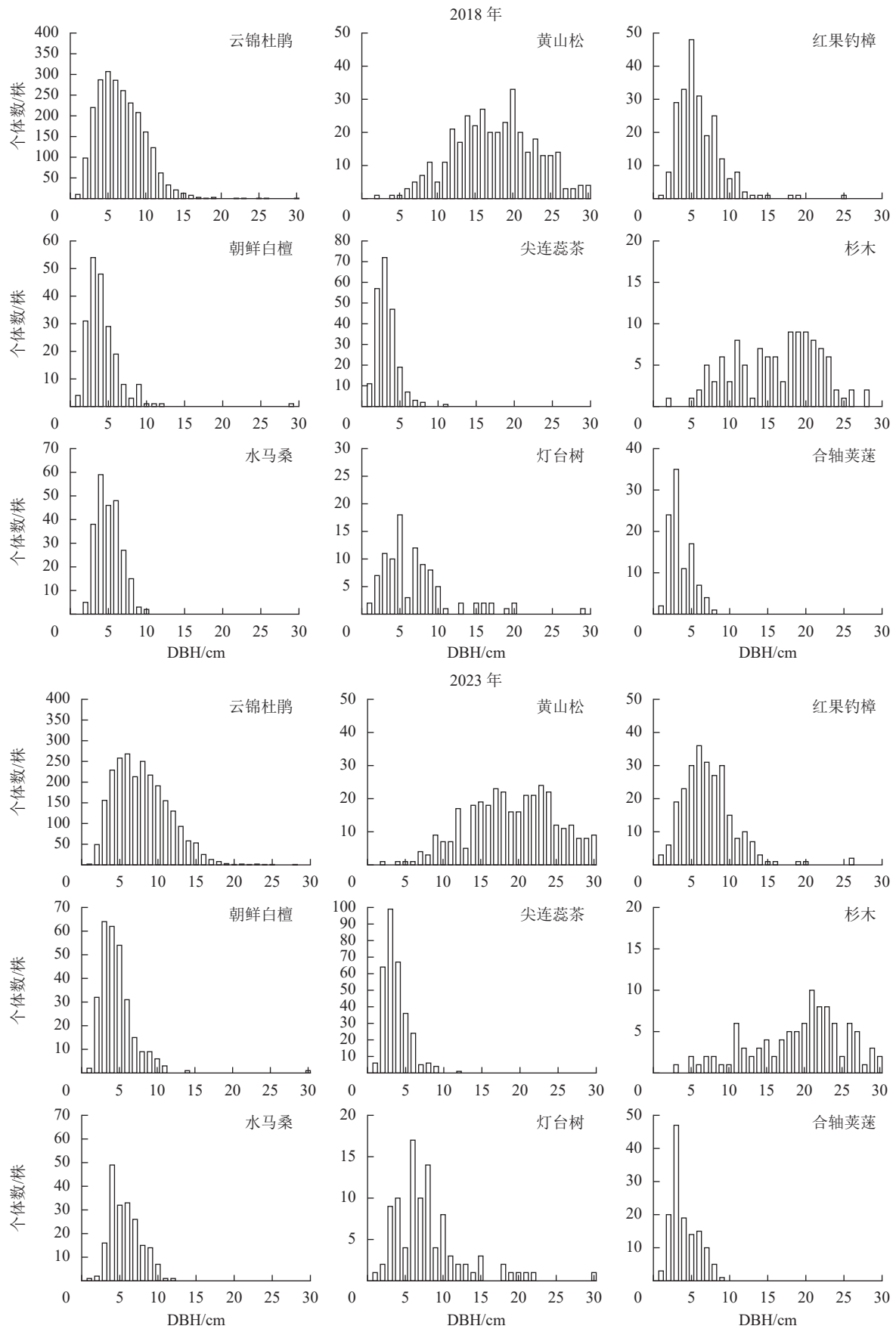


图 2 大盘山 1 hm² 固定监测样地径级分布
Figure 2 DBH class distribution of 1 hm² forest dynamics plot of Mount Dapanshan

图 3 大盘山 1 hm^2 固定监测样地 9 个优势种的径级结构Figure 3 DBH class distribution of the top 9 tree species in the 1 hm^2 forest dynamics plot in Mount Dapanshan

鹃的径级分布表现为金字塔型, 2018年小树和老树个体数较少, 中树个体数占总个体数的21.66%, 大树个体数占总个体数的72.32%; 2023年大树的比例有所增加。黄山松小树和中树的储备较少, 大树和老树的数量较多, 2023年老树的比例上升。红果钓樟、朝鲜白檀、尖连蕊茶的径级分布总体呈现“L”型。杉木集中在大径级个体, 并且径级分布不连续, 有多个不同的峰; 水马桑、灯台树和合轴荚蒾在样地内的种群数量少, 且集中在小径级范围内。

2.3 群落优势种空间分布特征

样地沿南北方向存在1条纵向沟谷, 且北部的平均海拔高于南部, 整体坡度为 $10^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 。优势种云锦杜鹃(图4A)在样地内的分布与地形表现出明显的相关性, 集中分布在山沟的两侧, 山沟处有极少数分布。黄山松(图4B)在样地内分布较分散, 且老树和大树的比例偏高。红果钓樟(图4C)和朝鲜白檀(图4D)在整个样地内均有分布。灌木树种尖连蕊茶(图4E)主要聚集在样地南部海拔相对较低的位置, 大树占比为73%。杉木(图4F)聚集于样地西北角, 位于海拔较高的地方, 其中大树73株, 占比为70%, 老树19株, 占比为20%, 这意味着杉木以大树为主。灌木树种水马桑(图4G)多见于样地北部, 南部稀疏分布。灯台树(图4H)在样地内共有97株, 表现为零星分布。灌木树种合轴荚蒾(图4I)聚集分布在样地南部海拔较低的地方, 北部零星分布, 且以大树为主, 占比为80%。

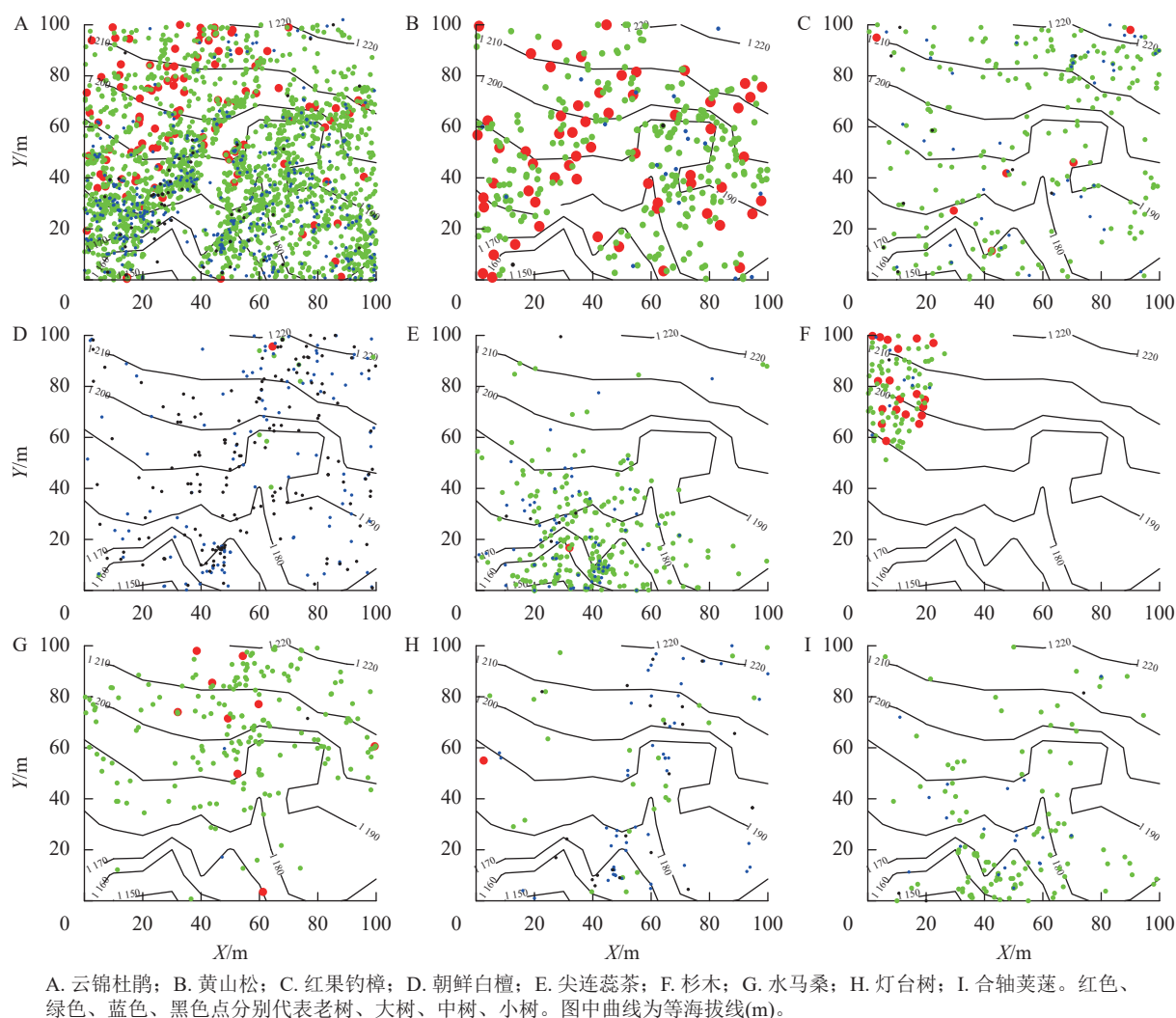


图4 大盘山固定监测样地重要值排前9位的优势种空间分布

Figure 4 Spatial distribution pattern of the top 9 dominant species with important values in Mount Dapanhsan

2.4 云锦杜鹃种群结构变化

2018年云锦杜鹃个体数为2341株, 占样地内总个体数的49.00%; 2023年为2380株, 占比为47.43%。云锦杜鹃的年龄结构总体表现为金字塔结构(图5), 即集中在Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ龄级, Ⅰ、Ⅵ、Ⅶ龄

级的个体数很少。2023 年Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ龄级的个体数相比 2018 年明显增多,说明其 5 a 间对自然环境变化适应较好,龄级生长发育良好。根据云锦杜鹃种群存活曲线判断,2018、2023 年均为Ⅰ型(凸型)(图 6),表现为绝大多数个体都能活到生理年龄,早期死亡率极低,但是达到一定生理年龄时,短期内几乎全部死亡。云锦杜鹃死亡率在 2018、2023 年都表现出随着龄级逐渐增加,存活数逐渐减少,说明幼龄个体数较多(表 2)。2018 年调查时显示:Ⅰ~Ⅳ龄级个体死亡率较低,Ⅴ、Ⅵ龄级个体死亡率较高,分别为 0.9 和 0.8;2023 年死亡率随着龄级的增加而逐渐增大,Ⅵ龄级的个体死亡率最高,为 0.9(表 2)。2018 和 2023 年的个体平均寿命随着龄级的增加而降低,在Ⅰ龄级最高,说明该阶段种群生存能力强。

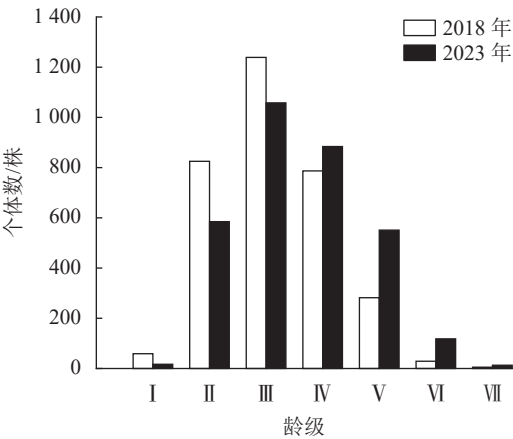


图 5 云锦杜鹃种群年龄结构
Figure 5 Age structure of *R. fortunei* population

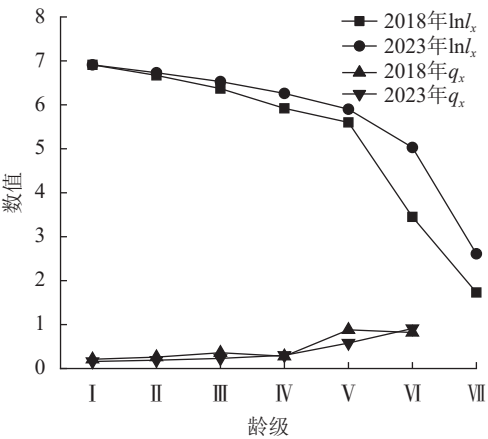


图 6 云锦杜鹃种群存活曲线($\ln l_x$)和死亡率(q_x)
Figure 6 Survival curve ($\ln l_x$) and mortality rate curve (q_x) of *R. fortunei* population

表 2 云锦杜鹃种群静态生命表

Table 2 Static life table of *R. fortunei* population

调查年份	龄级	A_x	a_x	l_x	$\ln l_x$	d_x	q_x	L_x	T_x	e_x	K_x
2018	I	43	888	1 000.0	6.9	208.3	0.2	895.8	2 554.1	2.6	0.2
	II	572	703	791.7	6.7	209.5	0.3	686.9	1 658.2	2.1	0.3
	III	854	517	582.2	6.4	208.3	0.4	478.0	968.5	1.7	0.4
	IV	600	332	373.9	5.9	104.7	0.3	321.5	493.2	1.3	0.3
	V	239	239	269.1	5.6	237.6	0.9	150.3	171.7	0.6	2.1
	VI	28	28	31.5	3.5	25.9	0.8	18.6	21.4	0.7	1.7
	VII	5	5	5.6	1.7	—	—	2.8	2.8	0.5	—
2023	I	14	665	1 000.0	6.9	159.4	0.2	920.3	3 079.0	3.1	0.2
	II	422	559	840.6	6.7	157.9	0.2	761.7	2 158.7	2.6	0.2
	III	739	454	682.7	6.5	159.4	0.2	603.0	1 397.0	2.1	0.3
	IV	658	348	523.3	6.3	157.9	0.3	444.4	787.2	1.5	0.4
	V	436	243	365.4	5.9	212.0	0.6	259.4	349.6	1.0	0.9
	VI	102	102	153.4	5.0	139.9	0.9	83.5	90.2	0.6	2.4
	VII	9	9	13.5	2.6	—	—	6.8	6.8	0.5	—

说明: A_x 表示龄级内现有存活数。由于缺少下一龄级数据, d_x 、 q_x 和 K_x 无法计算,用—表示。

3 讨论

3.1 群落物种组成和动态

物种组成是决定群落性质的重要因素,也是了解生态系统维持机制的重要途径^[22]。大盘山的云锦杜鹃群落物种组成丰富,5 a 间样地排前 10 位的优势物种组成无变化,说明样地内的优势种总体上自我更新较好^[23],与同样以云锦杜鹃为优势种的湖南阳明山群落 10 a 间乔木层的物种组成研究结果一致^[2],即

样地内优势种稳中有变,更新状态良好。样地常绿树种个体占比高达67%,整体上可反映亚热带较高海拔的森林群落特征。5 a间样地林冠层常绿树种云锦杜鹃重要值增长0.22%,尖连蕊茶增幅最大,相比5 a前增加了1.12%,而针叶树种黄山松和杉木的重要值则分别降低了1.90%和0.24%。该结果与地理位置和植被类型较为接近的浙江东白山1 hm²次生针阔混交林样地^[24]的研究结果相似,即喜光的先锋树种黄山松等针叶树种的优势地位在未来可能会丧失。该样地随着时间推移将可能逐渐演替为以云锦杜鹃等为优势种的常绿阔叶林。大盘山群落的物种多样性较高,而同样以云锦杜鹃为优势种的江西井冈山样地^[3]的群落多样性也同样丰富。这2个样地均位于中国东部较高海拔地区,且都处于亚热带温暖湿润气候区。这种气候特征为植物种群多样化生长提供了良好的环境。此外,较高海拔的地形和微气候的多样性进一步丰富了物种的生态位,推动了物种间的相互作用和竞争,有助于维持和增强物种多样性^[25]。样地内偶见种和稀有种数较多,复查时死亡的3个物种全部为稀有种,可能由于其适合度较低,在样地中竞争力较弱,因而更容易被竞争排除^[26]。

3.2 群落径级结构

径级结构可以表示在该群落内各物种的不同胸径大小的个体数量分布情况,而径级结构的动态则反映种群内不同年龄个体的生长和发展趋势^[27]。2018—2023年,大盘山云锦杜鹃群落1 hm²样地内径级结构呈现倒“J”型分布,说明群落总体上幼龄植株数量多,更新良好。5 a间样地内所有物种的径级结构无显著变化,小径级个体数下降,中径级个体增加,说明外界条件适宜,样地内物种稳定增长。优势种云锦杜鹃呈现金字塔型,以4.0 cm≤DBH<6.0 cm的个体为主,更新良好,但1.0 cm≤DBH<2.0 cm的幼树个体储备不足,应确保幼苗库的补给,否则长时间演替可能出现“青黄不接”的情况。群落内黄山松和杉木主要为10.0 cm≤DBH<25.0 cm的大树。这表明个体从小径级发育为大径级的过程中,为了获取更多水分、光照、营养和空间,同种个体的自疏作用导致相邻个体的死亡,综合竞争力较强的植株生长较为稳定,最终得以长成大树^[28-29]。红果钓樟、朝鲜白檀、尖连蕊茶的径级分布均呈现“L”型,表明其更新状况良好,种群数量会保持稳定增长。此外,一些数量较少的树种,如水马桑等多以小径级个体为主,种群更新较快,有利于群落结构的稳定^[30-31]。

3.3 群落优势种空间分布特征

种群在空间上的分布反映了外界环境因子对个体生存的影响,是分析种内和种间竞争、种子扩散和干扰等生态过程的基础^[32]。该样地的优势物种空间分布具有生境偏好,且不同物种之间的生境偏好存在差异。对浙江古田山样地^[33]的研究表明:物种在同一生态系统中能够通过时间、空间或资源使用上的差异,避免直接竞争,从而实现更有效的资源利用,即生态位分化机制在样地森林群落的生物多样性维持中有重要的作用。优势种云锦杜鹃种群在样地内均有分布,但山沟底部分布稀少,可能是由于其环境较为潮湿。有研究表明:云锦杜鹃的种子不适宜在过于湿润的土壤环境中萌发^[9]。乔木亚层树种小径级较多,如云锦杜鹃、红果钓樟和尖连蕊茶等出现聚集分布,有利于改善群落微环境,增强种群抵御不良环境的能力^[34]。LIU等^[35]研究发现:竞争是构建群落和驱动树木空间分布模式的主要机制,在小范围聚集,且聚集程度随着距离增加而降低与种子扩散能力有关。乔木亚层植株高度有限,种子落在母株附近的概率更大,新生个体更容易聚集在母株周围。树种从小径级到大径级的空间分布特征一般由聚集分布到随机分布,最终为规则分布^[36]。在样地中,黄山松、杉木等高大乔木由于个体生长发育对空间资源的竞争加强,逐渐过渡为随机分布。

3.4 云锦杜鹃种群结构

云锦杜鹃种群的年龄结构呈金字塔,为增长型,种群数量随着龄级的增加呈先升后降的趋势,但5 a间Ⅰ龄级个体更新少。在复查过程中发现:灌木层云锦杜鹃幼苗的出现概率很低,推测可能是由于种子发育为幼苗的过程存在障碍。广东天井山、湖北大别山的云锦杜鹃种群均报道有幼苗不足的情况。也有研究表明:杜鹃花属*Rhododendron*植物种子自然更新对生境条件要求严格^[37]。边才苗等^[11]研究发现:云锦杜鹃结实率和结籽率很低。另外,样地内黄山松大树的冠幅较大,郁闭度高也会使幼苗生长光照不够,还可能与区域地形复杂有关,如坡度较大、林下的凋落物层较厚,飘落的种子难以直接在枯枝落叶层上萌发。种群内Ⅵ、Ⅶ龄级数量稀少,说明云锦杜鹃老树对环境的适应能力减弱。本研究中云锦

杜鹃种群的个体平均寿命总体呈现下降的趋势,在 I 龄级最大,说明此时种群生存能力较强,对环境具有较强的适应力。存活曲线属于 Deevey-I 型,说明种群稳定增长,自然环境适宜大多数个体存活到生理寿命。结合年龄结构和存活曲线,5 a 间种群更新较好,但 I 龄级数量少将难以保障其种群向中龄级植株和大龄级植株生长的需求,在演替的过程中遭受环境波动和气候变化等自然灾害易造成种群年龄结构的变动^[38]。为实现云锦杜鹃种群结构的稳定和种群数量的增长,建议保护现有幼龄植株,并通过人为辅助措施提高幼苗的存活率,加大就地保护力度。

4 致谢

浙江大盘山国家级自然保护区王盼、金京华,浙江农林大学段雨豪、王冠舜、解江涛、张坤、张秀娟、何淑冉,杭州师范大学蔡鑫、耿新、何芳参加了野外样地调查;鲁益飞在数据分析过程中提供了帮助;温州大学刘金亮对论文初稿提出宝贵修改意见。谨致谢意!

5 参考文献

- [1] 《浙江植物志(新编)》编辑委员会. 浙江植物志(新编) [M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 2021.
Editorial Board of Flora of Zhejiang (New Edition). *Flora of Zhejiang (New Edition)* [M]. Hangzhou: Zhejiang Science and Technology Publishing House, 2021.
- [2] 陈艳华, 彭重华, 陈建荣. 湖南阳明山云锦杜鹃的群落学研究[J]. 中国园艺文摘, 2009, 25(12): 60–62.
CHEN Yanhua, PENG Zhonghua, CHEN Jianrong. Community ecology study of the *Rhododendron fortunei* in Yangming Mountains, Hunan Province, China [J]. *Chinese Horticulture Abstracts*, 2009, 25(12): 60–62.
- [3] 邓贤兰, 刘鹏, 吴杨, 等. 井冈山云锦杜鹃群落特征研究[J]. 亚热带植物科学, 2011, 40(4): 20–25.
DENG Xianlan, LIU Peng, WU Yang, et al. Studies on the community characteristics of *Rhododendron fortunei* in Jinggang Mountain [J]. *Subtropical Plant Science*, 2011, 40(4): 20–25.
- [4] 袁丛军, 陈光丽, 戴晓勇, 等. 雷公山保护区云锦杜鹃群落结构及其多样性特征[J]. 贵州农业科学, 2021, 49(11): 125–133.
YUAN Congjun, CHEN Guangli, DAI Xiaoyong, et al. Structure and diversity characteristics of *Rhododendron fortunei* community in Leigong Mountain Nature Reserve [J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2021, 49(11): 125–133.
- [5] 赵丽娟, 李家湘, 邓家兴. 湖南平江幕阜山云锦杜鹃群落特征的分析[J]. 中南林学院学报, 2005, 25(2): 81–84.
ZHAO Lijuan, LI Jiaxiang, DENG Jiaxing. Primary studies of *Rhododendron fortunei* community of Mufu Forest Park, Pingjiang, Hunan [J]. *Journal of Central South Forestry University*, 2005, 25(2): 81–84.
- [6] 黄川腾, 唐光大, 刘乐, 等. 广东天井山云锦杜鹃种群及其所处群落特征[J]. 西南林学院学报, 2010, 30(6): 15–19.
HUANG Chuanteng, TANG Guangda, LIU Le, et al. Population and community characteristics of *Rhododendron fortunei* at Mount Tianjing of Guangdong Province [J]. *Journal of Southwest Forestry University*, 2010, 30(6): 15–19.
- [7] 付剑, 詹先银, 漆俊, 等. 湖北大别山国家级自然保护区云锦杜鹃种群生态学研究[J]. 湖北林业科技, 2020, 49(4): 19–21.
FU Jian, ZHAN Xianyin, QI Jun, et al. Study on the population ecology of *Rhododendron fortunei* in Dabie Mountains National Nature Preserve, Hubei Province [J]. *Hubei Forestry Science and Technology*, 2020, 49(4): 19–21.
- [8] 管康林, 吴家森, 范义荣, 等. 华顶山云锦杜鹃林衰退原因及对策[J]. 浙江林学院学报, 2001, 18(2): 195–197.
GUAN Kanglin, WU Jiasen, FAN Yirong, et al. Cause and countermeasure of deterioration of *Rhododendron fortunei* forest in Mount Huading [J]. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 2001, 18(2): 195–197.
- [9] 边才苗, 金则新, 张俊会, 等. 云锦杜鹃种子萌发及对干旱胁迫的响应[J]. 植物研究, 2006, 36(20): 718–721.
BIAN Caimiao, JIN Zexin, ZHANG Junhui, et al. Response of seed germination of *Rhododendron fortunei* to drought stress [J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2006, 36(20): 718–721.
- [10] 杨华, 宋绪忠, 王秀云, 等. 2 种光照下低海拔引种云锦杜鹃的光合作用日变化[J]. 林业与环境科学, 2021, 37(1): 43–47.
YANG Hua, SONG Xuzhong, WANG Xiuyun, et al. Diurnal variation of photosynthesis of *Rhododendron fortunei* in two kinds of illumination intensity under low altitude [J]. *Forestry and Environmental Science*, 2021, 37(1): 43–47.
- [11] 边才苗, 金则新. 天台山云锦杜鹃的开花与结实特性[J]. 园艺学报, 2006, 33(1): 101–104.

- BIAN Caimiao, JIN Zexin. The flowering and fruit set features of *Rhododendron fortunei* in Tiantai Mountains [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2006, **33**(1): 101–104.
- [12] 章辰飞, 谢晓鸿, 汪庆昊, 等. 云锦杜鹃不同花期挥发性成分的 HS-SPME-GC-MS 检测与主成分分析[J]. *广西植物*, 2020, **40**(7): 1033–1045.
- ZHANG Chenfei, XIE Xiaohong, WANG Qinghao, *et al.* Analysis of volatile components of *Rhododendron fortunei* at different flowering stages by HS-SPME-GC-MS and PCA [J]. *Guihaia*, 2020, **40**(7): 1033–1045.
- [13] 许蔷薇, 楼雄珍, 杨彬, 等. 云锦杜鹃转录组分析[J]. *浙江农林大学学报*, 2019, **36**(6): 1190–1198.
- XU Qiangwei, LOU Xiongzheng, YANG Bin, *et al.* Transcriptome sequencing and analysis of *Rhododendron fortunei* [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2019, **36**(6): 1190–1198.
- [14] 杨彬, 许蔷薇, 牛明月, 等. 云锦杜鹃转录组 SSR 分析及其分子标记开发[J]. *核农学报*, 2018, **32**(12): 2335–2345.
- YANG Bin, XU Qiangwei, NIU Mingyue, *et al.* Analysis of SSR information in transcriptome and development of SSR molecular markers in *Rhododendron fortunei* [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2018, **32**(12): 2335–2345.
- [15] 陈远志. 浙江大盘山国家级自然保护区自然资源考察与研究[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2011: 1–272.
- CHEN Yuanzhi. *Investigations and Researches on the Natural Resources of Zhejiang Dapanshan National Nature Reserve* [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2011: 1–272.
- [16] CONDIT R. *Tropical Forest Census Plots: Methods and Results from Barro Colorado Island, Panama and a Comparison with Other Plots* [M]. Berlin: Springer, 1998.
- [17] 仲磊, 雷祖培, 刘西, 等. 浙江乌岩岭森林动态样地: 树种及其分布格局[M]. 北京: 清华大学出版社, 2023: 19.
- ZHONG Lei, LEI Zupei, LIU Xi, *et al.* *Zhejiang Wuyanling Forest Dynamics Plots: Tree Species and Their Distribution Patterns* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2023: 19.
- [18] 丁炳扬, 陈德良, 骆争荣, 等. 浙江百山祖森林动态样地: 树种及其分布格局[M]. 北京: 中国林业出版社, 2013: 112.
- DING Bingyang, CHEN Deliang, LUO Zhengrong, *et al.* *Zhejiang Bashanzu Forest Dynamics Plot: Tree Species and Their Distribution Patterns* [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2013: 112.
- [19] HE Fangliang, LEGENDRE P, LAFRANKIE J V. Distribution patterns of tree species in a Malaysian tropical rain forest [J]. *Journal of Vegetation Science*, 1997, **8**(1): 105–114.
- [20] LINARES-PALOMINO R, ALVAREZ S I P. Tree community patterns in seasonally dry tropical forests in the Cerros de Amotape Cordillera, Tumbes, Peru [J]. *Forest Ecology and Management*, 2005, **209**(3): 261–272.
- [21] 吴承祯, 洪伟, 谢金寿, 等. 珍稀濒危植物长苞铁杉种群生命表分析[J]. *应用生态学报*, 2000, **11**(3): 333–336.
- WU Chengzhen, HONG Wei, XIE Jinshou, *et al.* Life table analysis of *Tsuga longibracteata* population [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, **11**(3): 333–336.
- [22] GAMFELDT L, SNÄLL T, BAGCHI R, *et al.* Higher levels of multiple ecosystem services are found in forests with more tree species [J/OL]. *Nature Communications*, 2013, **4**: 1340[2024-07-03]. DOI: 10.1038/ncomms2328.
- [23] LIU Libin, NI Jian, ZHONG Qiaolian, *et al.* High mortality and low net change in live woody biomass of karst evergreen and deciduous broad-leaved mixed forest in southwestern China [J/OL]. *Forests*, 2018, **9**(5): 263[2024-07-03]. DOI: 10.3390/f9050263.
- [24] 李桥, 范清平, 唐战胜, 等. 浙江东白山次生针阔混交林群落组成及结构动态[J]. *广西植物*, 2022, **42**(6): 1067–1076.
- LI Qiao, FAN Qingping, TANG Zhansheng, *et al.* Community composition and structure dynamics of secondary coniferous and broad-leaved mixed forest in Dongbaishan, Zhejiang Province [J]. *Guihaia*, 2022, **42**(6): 1067–1076.
- [25] 何远政, 黄文达, 赵昕, 等. 气候变化对植物多样性的影响研究综述[J]. *中国沙漠*, 2021, **41**(1): 59–66.
- HE Yuanzheng, HUANG Wenda, ZHAO Xin, *et al.* Review on the impact of climate change on plant diversity [J]. *Journal of Desert Research*, 2021, **41**(1): 59–66.
- [26] WANG Yunquan, CADOTTE M W, CHEN Jianhua, *et al.* Neighborhood interactions on seedling survival were greatly altered following an extreme winter storm [J/OL]. *Forest Ecology and Management*, 2020, **461**: 117940[2024-07-03]. DOI: 10.1016/j.foreco.2020.117940.
- [27] 葛结林, 熊高明, 邓龙强, 等. 湖北神农架山地米心水青冈-多脉青冈混交林的群落动态[J]. *生物多样性*, 2012, **20**(6): 643–653.
- GE Jielin, XIONG Gaoming, DENG Longqiang, *et al.* Community dynamics of a montane *Fagus engleriana*-

- Cyclobalanopsis multiervis* mixed forest in Shennongjia, Hubei, China [J]. *Biodiversity Science*, 2012, **20**(6): 643–653.
- [28] 刘贵峰, 丁易, 臧润国, 等. 天山云杉种群分布格局[J]. *应用生态学报*, 2011, **22**(1): 9–13.
LIU Guifeng, DING Yi, ZANG Runguo, *et al.* Distribution patterns of *Picea schrenkiana* var. *tianschanica* population in Tianshan Mountains [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, **22**(1): 9–13.
- [29] SMITH K T, SHORTLE W C. Radial growth of hardwoods following the 1998 ice storm in New Hampshire and Maine [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2003, **33**(2): 325–329.
- [30] 陈德良, 顾莎莎, 丁炳扬, 等. 百山祖木荷的种群结构与分布格局[J]. *浙江林业科技*, 2015, **35**(1): 1–7.
CHEN Deliang, GU Shasha, DING Bingyang, *et al.* Population structure and distribution pattern of *Schima superba* in Baishanzu [J]. *Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology*, 2015, **35**(1): 1–7.
- [31] 刘啸林, 吴友贵, 张敏华, 等. 浙江百山祖 25 ha 亚热带森林动态监测样地群落组成与结构特征[J]. *生物多样性*, 2024, **32**(2): 1–11.
LIU Xiaolin, WU Yougui, ZHANG Minhua, *et al.* Community composition and structure of a 25-ha forest dynamics plot of subtropical forest in Baishanzu, Zhejiang Province [J]. *Biodiversity Science*, 2024, **32**(2): 1–11.
- [32] 刘艳会, 刘金福, 何中声, 等. 基于戴云山固定样地黄山松群落物种组成与结构研究[J]. *广西植物*, 2017, **37**(7): 881–890.
LIU Yanhui, LIU Jinfu, HE Zhongsheng, *et al.* *Pinus taiwanensis* community composition and structure based on fixed sample Daiyun Mountain [J]. *Guihaia*, 2017, **37**(7): 881–890.
- [33] 祝燕, 赵谷风, 张俐文, 等. 古田山中亚热带常绿阔叶林动态监测样地——群落组成与结构[J]. *植物生态学报*, 2008, **32**(2): 262–273.
ZHU Yan, ZHAO Gufeng, ZHANG Liwen, *et al.* Community composition and structure of Gutianshan forest dynamic plot in a mid-subtropical evergreen broad-leaved forest, east China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2008, **32**(2): 262–273.
- [34] 康佳鹏, 马盈盈, 马淑琴, 等. 荒漠绿洲过渡带柽柳种群结构与空间格局动态[J]. *生态学报*, 2019, **39**(1): 265–276.
KANG Jiapeng, MA Yingying, MA Shuqin, *et al.* Dynamic changes of spatial pattern and structure of the *Tamarix ramosissima* population at the desert-oasis ecotone of the Tarim Basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(1): 265–276.
- [35] LIU Pengcheng, WANG Wendong, BAI Zhiqiang, *et al.* Competition and facilitation co-regulate the spatial patterns of boreal tree species in Kanas of Xinjiang, northwest China [J/OL]. *Forest Ecology and Management*, 2020, **467**: 118167[2024-07-03]. DOI: 10.1016/j.foreco.2020.118167.
- [36] GAVRIKOV V, STOYAN D. The use of marked point processes in ecological and environmental forest studies [J]. *Environmental and Ecological Statistics*, 1995, **2**(4): 331–344.
- [37] 杨慧琴, 刘圆媛, 刘芳黎, 等. 西南特有濒危植物大王杜鹃种群结构及动态特征[J]. *西北植物学报*, 2020, **40**(12): 2148–2156.
YANG Huiqin, LIU Yuanyuan, LIU Fangli, *et al.* Population structure and dynamic characteristics of an endangered and endemic species *Rhododendron rex* subsp. *rex* in southwest, China [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2020, **40**(12): 2148–2156.
- [38] 余潇, 代嫚婷, 普甜, 等. 珍稀濒危植物蒜头果种群结构及动态特征研究[J]. *西部林业科学*, 2023, **52**(3): 8–16.
YU Xiao, DAI Manting, PU Tian, *et al.* Population structure and dynamics analysis of rare and endangered plant *Malania oleifera* [J]. *Journal of West China Forestry Science*, 2023, **52**(3): 8–16.