

江苏宝华山宝华玉兰种群结构与动态特征分析

李乃伟^{1,①}, 吴宝成^{1,①}, 庄维兵¹, 袁帅², 王奇², 王涛^{1,②}

[1. 江苏省中国科学院植物研究所(南京中山植物园)江苏省植物资源研究与利用重点实验室, 江苏南京 210014;
2. 句容市宝华山国家森林公园管委会, 江苏镇江 212415]

摘要: 为了揭示极危(CR)植物宝华玉兰(*Yulania zenii* (W. C. Cheng) D. L. Fu)野生种群的结构和动态特征,对江苏省句容市宝华山宝华玉兰野生资源进行全面调查,并运用静态生命表、存活曲线和生存分析等方法综合分析宝华玉兰种群结构和动态变化。结果表明:宝华山全境现存宝华玉兰野生开花植株 115 株,主要分布于宝华山北坡中部。宝华玉兰种群以中树和大树[10 cm≤胸径(DBH)<25 cm]为主,占比达 66.1%,属于衰退型种群。从静态生命表看,宝华玉兰种群的生命期望随着径级的增加逐渐下降,种群存活曲线趋向于 Deevey-II 型。生存分析结果显示:宝华玉兰种群趋势具有前期锐减、中期稳定、后期衰退的特点。种群动态量化分析结果表明:宝华玉兰种群动态总体呈增长趋势,但增长极为缓慢。基于上述研究结果,建议采取人工播种、补植实生苗等方式加强对宝华玉兰种群的保护和管理,促进其种群的更新和良性发展。

关键词: 宝华玉兰; 种群结构; 静态生命表; 存活曲线; 生存分析

中图分类号: Q948.15; S685.15; S718.54⁺2 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2024)05-0098-08
DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2024.05.10

Analyses on population structure and dynamic characteristics of *Yulania zenii* in Baohua Mountain of Jiangsu Province LI Naiwei^{1,①}, WU Baocheng^{1,①}, ZHUANG Weibing¹, YUAN Shuai², WANG Qi², WANG Tao^{1,②} [1. Jiangsu Key Laboratory for the Research and Utilization of Plant Resources, Institute of Botany, Jiangsu Province and Chinese Academy of Sciences (Nanjing Botanical Garden Mem. Sun Yat-Sen), Nanjing 210014, China; 2. Jurong Baohua Mountain National Forest Park Management Committee, Zhenjiang 212415, China], *J. Plant Resour. & Environ.*, 2024, 33(5): 98-105

Abstract: To reveal the structure and dynamic characteristics of the wild population of the critically endangered (CR) plant *Yulania zenii* (W. C. Cheng) D. L. Fu, a comprehensive investigation on the wild resources of *Y. zenii* in Baohua Mountain, Jurong City, Jiangsu Province, was conducted, and methods including static life table, survival curve, and survival analysis were employed to comprehensively analyze the structure and dynamic changes of *Y. zenii* population. The results show that there are currently 115 wild flowering individuals of *Y. zenii* existing in the entire Baohua Mountain, and they are primarily located on the mid-position of the north slope of Baohua Mountain. The *Y. zenii* population is dominated by medium and large trees [10 cm≤diameter at breast height (DBH)<25 cm], accounting for 66.1% of the total, indicating a declining type population. In terms of static life table, the life expectancy of the *Y. zenii* population gradually decreases with the increase of diameter class, and the survival curve of the population tends to be the Deevey-II type. The survival analysis result shows that the trend of *Y. zenii* population exhibits characteristics of a sharp decline in the early stage, stability in the middle stage, and decline in the late stage. The population dynamic quantitative analysis result shows that

收稿日期: 2024-05-24

基金项目: 江苏省林业科技创新与推广项目(LYKJ[2022]08; LYKJ[2020]24)

作者简介: 李乃伟(1983—),男,山东聊城人,硕士,高级实验师,主要从事植物种质资源保护利用方面的研究。

吴宝成(1980—),男,江苏南京人,硕士,副研究员,主要从事植物分类和资源开发方面的研究。

①共同第一作者

②通信作者 E-mail: johnwt1007@163.com

引用格式: 李乃伟, 吴宝成, 庄维兵, 等. 江苏宝华山宝华玉兰种群结构与动态特征分析[J]. 植物资源与环境学报, 2024, 33(5): 98-105.

the population dynamics of *Y. zenii* show a growth tendency in general, but the growth is extremely slow. Based on the above results, it is recommended to strengthen the protection and management of *Y. zenii* population by means of artificial sowing, replanting seedlings, etc., thereby promoting the rejuvenation and sustainable growth of *Y. zenii* population.

Key words: *Yulania zenii* (W. C. Cheng) D. L. Fu; population structure; static life table; survival curve; survival analysis

宝华玉兰 [*Yulania zenii* (W. C. Cheng) D. L. Fu] 隶属于木兰科 (Magnoliaceae) 玉兰属 (*Yulania* Spach), 为落叶乔木, 其树干挺拔通直, 材质细致, 开花时红白掩映, 素雅秀丽, 是极佳的园林观赏树种^[1-2]。作为木兰科为数不多的纯种, 宝华玉兰对玉兰属的分类研究也具有重要的科学意义^[3]。然而, 宝华玉兰自然种群的分布范围极其狭窄, 仅分布于江苏省句容市宝华山, 且数量稀少, 在《国家重点保护野生植物名录》(https://www.gov.cn/zhengce/2021-09/07/content_5727413.htm) 中列为国家二级重点保护野生植物, 在《中国物种红色名录》^[4] 中列为极危 (CR), 亟待采取有效的保护措施, 促进宝华玉兰的生存和繁衍。

迄今为止, 研究者对宝华玉兰开展了一系列研究, 包括地理分布及资源现状^[5]、叶绿体全基因组序列及分类地位^[6]、形态学^[7]、生物生态学特性^[8-9]、种苗繁育^[10]、遗传多样性和遗传分化^[11]、濒危机制^[12]等, 并取得了一定的进展。然而, 近年来关于宝华玉兰野生资源的调查主要描述了宝华玉兰种群分布格局和群落特征^[2,13], 研究结果未涵盖宝华玉兰在宝华山的全部分布区域, 关于宝华玉兰的种群结构和动态特征也尚不清楚, 严重制约了对宝华玉兰长期有效的保护及可持续利用。

植物的种群结构可以反映种群在时间和空间上的变化规律, 从而揭示种群的生长特性和生存潜力^[14-16]。静态生命表、存活曲线和生存分析是种群动态变化研究的重要工具。采用种群结构分析及静态生命表揭示宝华玉兰种群特性及动态变化规律, 对宝华玉兰种群的更新及稳定具有重要的指导意义^[17-19]。据此, 本研究基于2022年和2023年连续2年对宝华山全境范围内宝华玉兰野生资源的调查结果, 分析了群落物种组成和种群年龄结构, 并通过静态生命表、生存分析及种群动态量化分析, 揭示宝华玉兰的种群结构及种群动态特征, 以为保护宝华玉兰野生资源及宝华玉兰的合理开发和利用提供基

础理论依据。

1 研究地概况和研究方法

1.1 研究地概况

宝华山国家森林公园位于江苏省句容市西北部宝华镇, 地处沪宁铁路龙潭镇以南的宁镇山脉中段, 东至皮条岗, 南至东葛庵石宕, 西至哑巴口茶园, 北至铜山山顶 (东经 119°02'46" ~ 119°08'17"、北纬 32°05'32" ~ 32°09'26"), 属北亚热带中部季风气候区, 四季分明, 热量充裕, 雨量充沛, 光照充足。年平均气温 15.6 °C, 年平均日照时数 2 000.9 h, 年平均降水量 1 088.2 mm, 年平均空气相对湿度 77%, 全年无霜期 229 d。该地区的土壤为棕壤土, 酸碱度在 pH 5.5 至 pH 6.5 之间, 土层较为深厚。森林群落类型主要为常绿阔叶混交林和落叶阔叶林^[20]。该地区主要植物种类有毛竹 [*Phyllostachys edulis* (Carrière) J. Houz.]、虎刺 (*Damnacanthus indicus* C. F. Gaertn.)、青冈 (*Quercus glauca* Thunb.)、枫香树 (*Liquidambar formosana* Hance)、榆 (*Ulmus pumila* Linn.)、苦竹 [*Pleioblastus amarus* (Keng) P. C. Keng]、构 [*Broussonetia papyrifera* (Linn.) L'Hér. ex Vent.]、紫楠 [*Phoebe sheareri* (Hemsl.) Gamble]、油茶 (*Camellia oleifera* Abel)、胡桃楸 (*Juglans mandshurica* Maxim.)、栗 (*Castanea mollissima* Blume)、胡桃 (*Juglans regia* Linn.)、桂竹 [*Phyllostachys reticulata* (Rupr.) K. Koch]、臭椿 [*Ailanthus altissima* (Mill.) Swingle]、皂荚 (*Gleditsia sinensis* Lam.)、朴树 (*Celtis sinensis* Pers.)、南京椴 (*Tilia miqueliana* Maxim.)、青檀 (*Pteroceltis tatarinowii* Maxim.)、梧桐 [*Firmiana simplex* (Linn.) W. Wight]、牛鼻栓 (*Fortunearia sinensis* Rehder et E. H. Wilson)、榉树 [*Zelkova serrata* (Thunb.) Makino.]、石蒜 [*Lycoris radiata* (L'Hér.) Herb.]、络石 [*Trachelospermum jasminoides* (Lindl.) Lem.]、山麦冬 [*Liriope spicata* (Thunb.) Lour.]、天葵

[*Semiaquilegia adoxoides* (DC.) Makino]、阔鳞鳞毛蕨 [*Dryopteris championii* (Benth.) C. Chr.]、天南星 (*Arisaema heterophyllum* Blume)、明党参 (*Changium smyrnioides* H. Wolff) 和野蔷薇 (*Rosa multiflora* Thunb.) 等。

1.2 研究方法

1.2.1 宝华玉兰野生资源调查 分别于2022年和2023年的2月至3月(即宝华玉兰开花期),对宝华山全境宝华玉兰所有可能分布点进行野外调查,对所有开花个体进行标记,采用每木检尺法调查和记录开花个体数、胸径和株高,并记录其经纬度、海拔、坡向、坡位、土壤类型和土层厚度等生境特征。此外,记录每株开花个体周边5 m范围内的伴生植物。

1.2.2 种群结构划分 参照王剑伟等^[13]的方法,以径级代替龄级,对宝华玉兰种群结构进行分级。根据宝华玉兰的生长特性,并结合实际情况适当调整,依据胸径(DBH)划分为I(DBH<5 cm)、II(5 cm≤DBH<10 cm)、III(10 cm≤DBH<15 cm)、IV(15 cm≤DBH<20 cm)、V(20 cm≤DBH<25 cm)、VI(25 cm≤DBH<30 cm)、VII(30 cm≤DBH<35 cm)、VIII(35 cm≤DBH<40 cm)、IX(40 cm≤DBH<45 cm)和X(DBH≥45 cm)10个径级。此外,植物种群的高度级结构可以作为种群结构稳定性的辅助判断依据^[14]。依据株高(*h*)将宝华玉兰种群划分为H1(*h*<5 m)、H2(5 m≤*h*<10 m)、H3(10 m≤*h*<15 m)、H4(15 m≤*h*<20 m)、H5(20 m≤*h*<25 m)和H6(*h*≥25 m)6个高度级。

1.2.3 种群静态生命表编制及曲线绘制 参照巩亚梅等^[21]的方法,根据径级结构划分的个体数,编制宝华玉兰种群静态生命表。为防止编制中可能出现死亡率为负的情况,采用方程拟合法对不同径级内的个体数进行匀滑处理^[22]。以径级(*x*)为横坐标,分别以相应径级的个体死亡率(q_x)、消失率(K_x)和标准化

存活个体数的自然对数($\ln l_x$)为纵坐标,绘制宝华玉兰种群的死亡率曲线、消失率曲线和存活曲线。

1.2.4 存活曲线拟合 采用指数函数模型 $N_x = N_0 e^{-bx}$ 和幂函数模型 $N_x = N_0 x^{-b}$ 检验宝华玉兰种群存活曲线的类型^[23]。式中, N_x 和 N_0 分别代表*x*径级内存活个体数和种群形成初期的个体数, b 为死亡率。

1.2.5 生存分析 基于静态生命表和生存分析理论^[24],参照林春惠等^[25]的方法,采用种群生存率函数 $S(i)$ 、累计死亡率函数 $F(i)$ 、死亡密度函数 $f(ti)$ 和危险率函数 $\lambda(ti)$ 分析宝华玉兰种群生存状况。

1.2.6 种群动态量化分析 根据宝华玉兰种群内相邻径级间个体数量变化动态指数(V_n)、不考虑未来外部环境干扰时种群的数量变化动态指数(V_{pi})、考虑未来外部环境干扰时种群的数量变化动态指数(V_{pi}')以及种群对完全随机干扰所承担的最大风险概率(P_{max})定量评价种群结构动态^[26]。其中, V_n 为正值、负值、零时分别反映种群相邻径级个体数增长、衰退、稳定的结构动态关系^[27]。

1.3 数据统计与分析

利用EXCEL 2016软件进行数据统计和作图,利用SPSS 19.0软件进行模型拟合和统计学分析。

2 结果和分析

2.1 宝华玉兰的数量和分布

宝华玉兰自然分布地全境的调查结果(表1)显示:现存宝华玉兰野生开花个体全部分布于宝华山北坡中部水土条件较好的养老山、大华山、秦庵和连山4个区域,土壤类型主要为黄土、沙土和黑土,土层厚度0.5~1.0 m。宝华玉兰共有115株,其中,养老山分布87株,占宝华玉兰总个体数的75.7%;大华山和秦庵分别分布11和13株;连山分布的最少,仅在海拔220~230 m范围分布4株。上述地区均位于宝华山

表1 宝华玉兰自然分布地概况

Table 1 Basic status of natural distribution of *Yulania zenii* (W. C. Cheng) D. L. Fu

地点 Location	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔/m Altitude	坡向 Slope aspect	坡位 Slope position	土壤类型 ¹⁾ Soil type ¹⁾	土层厚度/m Soil thickness	$n^2)$
养老山 Yanglao Mountain	E119°05'	N32°07'	120-211	北 North	中位 Mid-position	YS,SS,BS	0.5-1.0	87
大华山 Dahua Mountain	E119°06'	N32°07'	203-320	北 North	中位 Mid-position	YS,SS,BS	0.5-1.0	11
秦庵 Qin'an	E119°05'	N32°08'	133-293	北 North	中位 Mid-position	YS,SS,BS	0.5-1.0	13
连山 Lianshan Mountain	E119°04'	N32°07'	220-230	北 North	中位 Mid-position	BS	0.5-1.0	4

¹⁾YS: 黄土 Yellow soil; SS: 沙土 Sandy soil; BS: 黑土 Black soil.

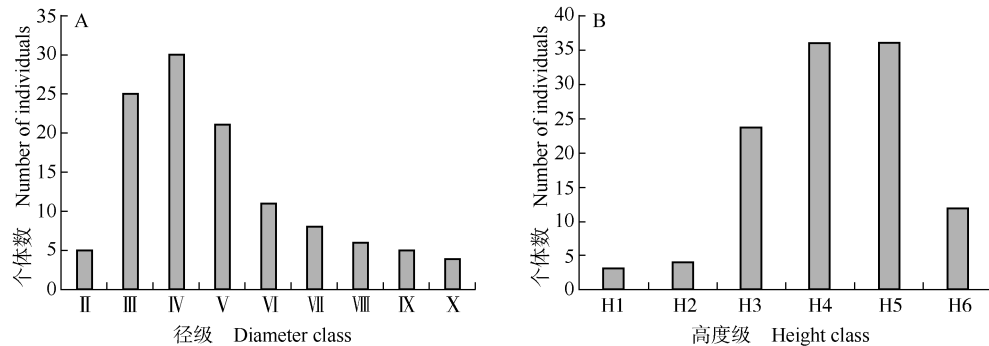
²⁾ n : 宝华玉兰个体数 Individual number of *Yulania zenii* (W. C. Cheng) D. L. Fu.

自然保护区范围内。此外,伴生植物调查结果显示:养老山和大华山宝华玉兰种群的主要伴生树种有毛竹、苦竹、油茶、枫香树、榆和紫楠等,地被植物包括石蒜、山麦冬、络石和天葵等;秦庵和连山的主要伴生树种有皂荚、南京椴、青檀、油茶、牛鼻栓和枫香树等,地被植物包括石蒜、山麦冬、明党参和野蔷薇等。

2.2 宝华玉兰种群结构

宝华玉兰种群中的 I [胸径 (DBH) < 5 cm] 级幼树数量极少,未作直接计数。宝华玉兰种群的径级结构和高度级结构见图 1。由图 1 可见:宝华玉兰种群中胸径在 II (5 cm ≤ DBH < 10 cm) 级小树仅 5 株,数量偏少; III (10 cm ≤ DBH < 15 cm) 级至 V (20 cm ≤ DBH < 25 cm) 级的中树和大树共有 76 株,占宝华玉

兰总个体数的 66.1%。由于 II 级宝华玉兰个体数较少,表明自然分布的宝华玉兰种群更新能力较弱,并呈现出潜在的衰退趋势。宝华玉兰种群的高度级结构显示:H1 [株高 (h) < 5 m] 级和 H2 (5 m ≤ h < 10 m) 级分别有 3 和 4 株,数量偏少;从 H3 (10 m ≤ h < 15 m) 级开始,个体数上升为 24 株,占宝华玉兰总个体数的 20.9%;个体数最多的高度级为 H4 (15 m ≤ h < 20 m) 级和 H5 (20 m ≤ h < 25 m) 级,均含有 36 株,累计占宝华玉兰总个体数的 62.6%;之后高度级的个体数迅速下降,H6 (h ≥ 25 m) 级仅有 12 株。由此可见,现存宝华玉兰的高度多在 10 m 以上,小树稀缺,种群高度级结构呈衰退趋势,这与其径级结构反映的特征情况基本一致。



II: 5 cm ≤ DBH < 10 cm; III: 10 cm ≤ DBH < 15 cm; IV: 15 cm ≤ DBH < 20 cm; V: 20 cm ≤ DBH < 25 cm; VI: 25 cm ≤ DBH < 30 cm; VII: 30 cm ≤ DBH < 35 cm; VIII: 35 cm ≤ DBH < 40 cm; IX: 40 cm ≤ DBH < 45 cm; X: DBH ≥ 45 cm. DBH: 胸径 Diameter at breast height. H1: h < 5 m; H2: 5 m ≤ h < 10 m; H3: 10 m ≤ h < 15 m; H4: 15 m ≤ h < 20 m; H5: 20 m ≤ h < 25 m; H6: h ≥ 25 m. h: 株高 Height.

图 1 宝华玉兰种群的径级结构 (A) 和高度级结构 (B)

Fig. 1 Diameter class structure (A) and height class structure (B) of *Yulania zenii* (W. C. Cheng) D. L. Fu population

2.3 宝华玉兰种群静态生命表

以宝华玉兰种群的径级为自变量、存活个体数为因变量,采用方程拟合法进行数据匀滑,同时根据方程拟合结果估算 I [胸径 (DBH) < 5 cm] 级幼树的存活数量,并编制静态生命表 (表 2)。结果显示:随着径级的增加,宝华玉兰种群的标准化存活个体数 (l_x) 逐渐下降,在不同径级均出现个体死亡的情况。此外, I 级幼树的生命期望 (e_x) 最高,达到 3.850,但随着径级的增加, e_x 值也呈逐渐下降的趋势。值得注意的是,宝华玉兰种群的 e_x 值在 V (20 cm ≤ DBH < 25 cm) 级至 VII (30 cm ≤ DBH < 35 cm) 级降幅减缓,表明这一径级间隔期间的宝华玉兰为壮年期。之后,宝华玉兰对环境的适应能力减弱, e_x 值再次迅速降低。

宝华玉兰种群死亡率曲线、消失率曲线和存活曲

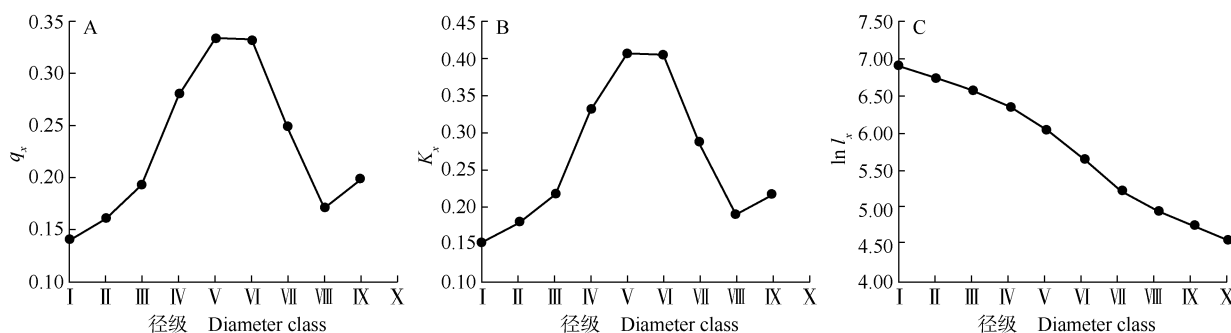
线图 2。由图 2 可见:宝华玉兰种群死亡率曲线和消失率曲线的变化趋势基本一致,在 I 级至 V 级逐渐上升,表明个体出现大量死亡;在 V 级至 VI (25 cm ≤ DBH < 30 cm) 级达到高峰;在 VI 级至 VIII (35 cm ≤ DBH < 40 cm) 级逐渐下降;结合 l_x 值,仅有 14.0% 的个体存活并进入之后的生长阶段,且个体死亡率和消失率再次升高。

宝华玉兰种群存活曲线随着径级的增加呈单调递减的变化趋势。在 IV (15 cm ≤ DBH < 20 cm) 级至 VII 级 $\ln l_x$ 值的下降幅度较大,表明此径级间隔期间的宝华玉兰存活能力较弱。分别采用指数函数模型和幂函数模型对宝华玉兰种群存活曲线进行拟合,结果显示:宝华玉兰种群存活曲线指数函数模型的拟合方程为 $N_x = 7.544 7e^{-0.051x}$ ($R^2 = 0.980, F = 387.093, P =$

表2 宝华玉兰种群静态生命表¹⁾Table 2 Static life table of *Yulania zenii* (W. C. Cheng) D. L. Fu population¹⁾

径级 Diameter class	a_x	a_x'	l_x	$\ln l_x$	d_x	L_x	T_x	q_x	e_x	K_x	S_x
I (DBH<5 cm)	0	43	1 000	6.908	140	930	3 850	0.140	3.850	0.151	0.860
II (5 cm≤DBH<10 cm)	5	37	860	6.757	139	791	2 920	0.162	3.395	0.176	0.838
III (10 cm≤DBH<15 cm)	25	31	721	6.581	140	651	2 129	0.194	2.953	0.216	0.806
IV (15 cm≤DBH<20 cm)	30	25	581	6.365	162	500	1 478	0.279	2.544	0.327	0.721
V (20 cm≤DBH<25 cm)	21	18	419	6.038	140	349	978	0.334	2.334	0.407	0.666
VI (25 cm≤DBH<30 cm)	11	12	279	5.631	93	233	629	0.333	2.254	0.405	0.667
VII (30 cm≤DBH<35 cm)	8	8	186	5.226	46	163	396	0.247	2.129	0.284	0.753
VIII (35 cm≤DBH<40 cm)	6	6	140	4.942	24	128	233	0.171	1.664	0.188	0.829
IX (40 cm≤DBH<45 cm)	5	5	116	4.754	23	105	105	0.198	0.905	0.221	0.802
X (DBH≥45 cm)	4	4	93	4.533	—	—	—	—	—	—	—

¹⁾ DBH: 胸径 Diameter at breast height. a_x : x 径级的个体数 Number of individuals in x diameter class; a_x' : 匀滑后 x 径级的个体数 Number of individuals in x diameter class after smoothing; l_x : x 径级的标准化存活个体数 Standardized survival number of individuals in x diameter class; $\ln l_x$: l_x 的自然对数 Natural logarithm of l_x ; d_x : 从 x 到 $x+1$ 径级的标准化死亡个体数 Standardized death number of individuals from x to $x+1$ diameter class; L_x : 从 x 到 $x+1$ 径级的平均存活个体数 Average survival number of individuals from x to $x+1$ diameter class; T_x : 大于或等于 x 径级的个体总数 Total individual number greater than or equal to x diameter class; q_x : 从 x 到 $x+1$ 径级的个体死亡率 Individual mortality rate from x to $x+1$ diameter class; e_x : x 径级的生命期望 Life expectancy of x diameter class; K_x : x 径级的消失率 Vanishing rate of x diameter class; S_x : 从 x 到 $x+1$ 径级的存活率 Survival rate from x to $x+1$ diameter class. —: 无数据 No datum.



I: DBH<5 cm; II: 5 cm≤DBH<10 cm; III: 10 cm≤DBH<15 cm; IV: 15 cm≤DBH<20 cm; V: 20 cm≤DBH<25 cm; VI: 25 cm≤DBH<30 cm; VII: 30 cm≤DBH<35 cm; VIII: 35 cm≤DBH<40 cm; IX: 40 cm≤DBH<45 cm; X: DBH≥45 cm. DBH: 胸径 Diameter at breast height. q_x : 从 x 到 $x+1$ 径级的个体死亡率 Individual mortality rate from x to $x+1$ diameter class; K_x : x 径级的消失率 Vanishing rate of x diameter class; $\ln l_x$: x 径级的标准化存活个体数的自然对数 Natural logarithm of standardized survival number of individuals in x diameter class.

图2 宝华玉兰种群死亡率曲线(A)、消失率曲线(B)和存活曲线(C)

Fig. 2 Curves of mortality rate (A), vanishing rate (B), and survival (C) of *Yulania zenii* (W. C. Cheng) D. L. Fu population

0.000), 幂函数模型的拟合方程为 $N_x = 7.626 1x^{-0.191}$ ($R^2 = 0.821$, $F = 36.781$, $P = 0.000$)。2种函数模型拟合的 P 值均小于 0.05, 达到显著水平, 且指数函数的 R^2 和 F 值均大于幂函数, 结合上述方程及存活曲线, 宝华玉兰种群的存活曲线趋向于 Deevey- II 型, 在生活史各阶段的死亡率基本相同。

2.4 宝华玉兰种群生存分析

宝华玉兰种群生存分析结果见图 3。结果显示: 宝华玉兰生存率函数和累计死亡率函数呈互补状态, 随着龄级的增加, 生存率函数逐渐下降, 累计死亡率函数逐渐上升, 二者在 III [10 cm≤胸径 (DBH) < 15 cm] 级至 IV (15 cm≤DBH<20 cm) 级间达到平衡。其中, 生存率函数在 I (DBH<5 cm) 级至 V (20 cm≤

DBH<25 cm) 级锐减, 在 V 级至 IX (40 cm≤DBH<45 cm) 级的变化趋于平稳, 之后降幅又迅速增大, 这一研究结果与静态生命表结果一致。死亡密度函数在前 3 个径级的变化较为平稳, 之后先小幅上升, 从 IV 级开始迅速下降, 至 IX 级后又快速上升; 危险率函数的变化趋势则与累计死亡率函数基本一致。由此可见, 宝华玉兰种群具有前期锐减、中期稳定、后期衰退的特点。

2.5 宝华玉兰种群动态量化分析

由于宝华玉兰 I [胸径 (DBH) < 5 cm] 级幼树未作直接计数, 因此, 从宝华玉兰种群 II (5 cm≤DBH<10 cm) 级开始分析相邻径级间个体数量变化动态指数。宝华玉兰种群 II 级到 III (10 cm≤DBH<15 cm)

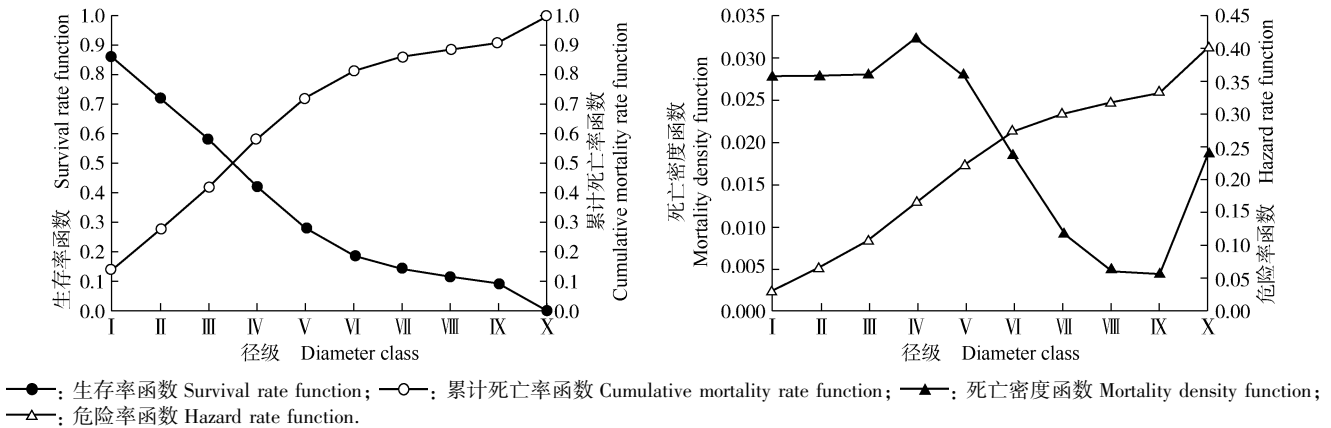


图 3 宝华玉兰种群生存分析结果
Fig. 3 Survival analysis result of *Yulania zenii* (W. C. Cheng) D. L. Fu population

I: DBH<5 cm; II: 5 cm≤DBH<10 cm; III: 10 cm≤DBH<15 cm; IV: 15 cm≤DBH<20 cm; V: 20 cm≤DBH<25 cm; VI: 25 cm≤DBH<30 cm; VII: 30 cm≤DBH<35 cm; VIII: 35 cm≤DBH<40 cm; IX: 40 cm≤DBH<45 cm; X: DBH≥45 cm. DBH: 胸径 Diameter at breast height.

级、Ⅲ级到Ⅳ(15 cm≤DBH<20 cm)级、Ⅳ级到Ⅴ(20 cm≤DBH<25 cm)级、Ⅴ级到Ⅵ(25 cm≤DBH<30 cm)级、Ⅵ级到Ⅶ(30 cm≤DBH<35 cm)级、Ⅶ级到Ⅷ(35 cm≤DBH<40 cm)级、Ⅷ级到Ⅸ(40 cm≤DBH<45 cm)级、Ⅸ级到Ⅹ(DBH≥45 cm)级的个体数量变化动态指数分别为-0.800、-0.167、0.300、0.476、0.273、0.250、0.167、0.200,波动幅度较大,种群稳定性较弱。其中,Ⅱ级到Ⅲ级、Ⅲ级到Ⅳ级的个体数量变化动态指数均小于0,说明种群在Ⅱ级至Ⅳ级呈衰退的结构动态。不考虑未来外部环境干扰时种群的数量变化动态指数(V_{pi})为0.161,表明种群总体上仍呈增长趋势。考虑未来外部环境干扰时种群的数量变化动态指数(V_{pi}')为0.004,趋近于0,种群对完全随机干扰所承担的最大风险概率(P_{max})为0.037,说明在外部环境干扰下,宝华玉兰种群结构增长性低,趋于稳定型,且对外部环境干扰具有较高的敏感度。

3 讨 论

宝华玉兰由中国著名植物学家郑万钧先生于1933年在江苏省句容市宝华山首次发现并命名^[28]。有资料显示,1984年宝华山自然保护区建立时仅统计到宝华玉兰野生个体13株。1999年,徐惠强等^[5]对宝华山自然保护区的资源调查结果显示宝华玉兰成年个体有34株。2008年,王剑伟等^[13]在宝华山地区的样地调查共发现宝华玉兰149株,其中成年个体38株。本研究基于2022年和2023年对宝华山地区

宝华玉兰的本底调查,共统计宝华玉兰野生开花个体115株。与以往报道相比,本次调查的宝华玉兰成年个体数量明显升高,这不仅与宝华玉兰种群的繁衍及有效保护紧密相关,还得益于对宝华玉兰所有潜在分布地点的详尽调查和定位标记。此外,本次调查极少发现宝华玉兰幼树,这与王剑伟等^[13]的报道结果并不一致。究其原因可能是宝华玉兰幼树的存活率低,且经过多年的生长发育,宝华玉兰不同龄级(径级)的个体数量发生不同程度的变化。

3.1 宝华玉兰种群结构特征

木本植物的径级结构与自身的生态学特性和外界的环境竞争关系密切^[29]。由宝华玉兰径级结构分析结果可知,Ⅲ[10 cm≤胸径(DBH)<15 cm]级至Ⅴ(20 cm≤DBH<25 cm)级的宝华玉兰个体数在其种群中占比较高,表明近年来对宝华玉兰成年个体的保护颇具成效。然而,Ⅱ(5 cm≤DBH<10 cm)级小树的数量较少,暗示宝华玉兰野生种群仍存在更新困难的问题。种群动态量化分析结果显示:宝华玉兰种群的Ⅱ级到Ⅲ级、Ⅲ级到Ⅳ(15 cm≤DBH<20 cm)级的个体数量变化动态指数均为负值,说明中小径级个体数量的大量减少是导致宝华玉兰种群呈现衰退特征的主要原因。尽管不考虑未来外部环境干扰时种群的数量变化动态指数(V_{pi})仍为正值,暗示宝华玉兰种群仍呈现增长趋势,但增长极为缓慢,考虑未来外部环境干扰时种群的数量变化动态指数(V_{pi}')趋近于0,表明人为干扰和环境竞争严重威胁宝华玉兰种群的稳定性^[30]。根据现场踏查可知,部分宝华玉兰

中树、大树虽能开花结果,但林下乱石林立,聚合果破败腐烂后,种子难以入土发芽,导致周边鲜有幼树生长;此外,已经萌发的宝华玉兰幼树多生长在郁闭度较高的林下,透光性差,很难长成大树。这与楚秀丽^[31]对宝华玉兰濒危机制的报道一致。幼龄阶段是维持后续龄级更新和保持种群增长趋势的重要阶段^[22,32]。宝华玉兰幼树缺乏,随着越来越多个体进入老龄阶段,种群将逐渐面临衰退甚至灭绝的风险。这也是多数狭域分布的濒危植物致危的重要原因之一^[19]。

3.2 宝华玉兰种群数量特征

静态生命表和存活曲线反映了种群的现实状况和对环境的适应性^[33]。宝华玉兰种群的死亡率曲线和消失率曲线具有相似的变化趋势,均在 I [胸径(DBH) < 5 cm] 级至 V (20 cm ≤ DBH < 25 cm) 级逐渐上升,并在 V 级至 VI (25 cm ≤ DBH < 30 cm) 级达到高峰;而以标准化存活个体数的自然对数($\ln I_x$)为基础的存活曲线随径级的增加呈不断降低的趋势,且在 IV (15 cm ≤ DBH < 20 cm) 级至 VII (30 cm ≤ DBH < 35 cm) 级降幅较大。上述结果与项小燕等^[34]对大别山五针松(*Pinus dabeshanensis* C. Y. Cheng et Y. W. Law)种群的报道类似,反映了环境竞争对宝华玉兰种群生长状况的潜在影响。与存活曲线相比,生存分析函数能更为直观和具体地反映种群的结构与动态。生存分析结果表明:宝华玉兰的种群特点主要表现为前期锐减、中期稳定和后期衰退,这与静态生命表及存活曲线的分析结果基本一致。宝华玉兰野生种群主要分布在宝华山北坡中部相距不远的 4 个地区,以养老山分布的数量最多、且较为集中,大华山和秦庵分布的数量次之,连山分布的数量最少。不同地区的宝华玉兰所在的坡位和坡向一致,海拔和土壤略有不同,而伴生植物存在一定的差异,这从侧面反映了环境竞争可能也是限制宝华玉兰种群扩张的重要因子之一。值得注意的是,毛竹一直被认为是宝华玉兰栖息地的一大威胁。然而,本研究调查发现位于将军洞上方(养老山区域)毛竹林内的宝华玉兰数量众多,且以 III (10 cm ≤ DBH < 15 cm) 级和 IV 级中树为主,这可能与早年开展的毛竹林疏伐密切相关,这在一定程度上佐证了人为干扰及竞争剧烈导致的“自疏和他疏”现象对种群数量及动态的影响^[22,35]。

3.3 宝华玉兰种群保护管理策略

目前,现存的宝华玉兰野生开花植株仅百余株,

且仅分布在宝华山北坡的 4 个地区,种群整体呈现衰退趋势,这意味着宝华玉兰种群具有较高的灭绝风险,对宝华玉兰种群进行人工抚育和干预已迫在眉睫。近年来,对宝华玉兰野生种群的威胁已由单纯的人为破坏转变成人工林种群扩张所形成的种间竞争。在人为干扰下,不同径级结构的植物种群个体应采取不同的保护措施,比如通过就地保护促进大径级个体的自然生长。然而,在营养丰富的地区,即使是现有的优势种群也不可能长期生存,除非恢复或建立幼树生存的有利条件,并维持遗传多样性的稳定^[36]。因此,就宝华玉兰种群而言,首先应该在加强现有种群保护力度的基础上,继续采取有效措施避免以毛竹林为主的人工林快速扩张对后续新生个体的影响。其次,随着宝华玉兰人工繁育技术的不断进步,基于现有的迁地保护和野外回归理论,建议合理开展宝华玉兰种群的迁移和立地条件的改善,以扩大种群数量和规模。最后,需要在减少人为干扰的同时增加小树和幼树的数量,比如采取人工播种、补植实生苗等方式,使宝华玉兰种群结构由衰退型逐渐向增长型转变,实现种群正常的自我繁衍^[37]。

通过与句容市宝华山国家森林公园管委会的合作,本调查结果进一步明确了宝华玉兰野生种群与人工种群的分布,以确保数据报道的可靠性。这是迄今为止对宝华玉兰现存资源和分布状况最新及范围最大的调查报道,对宝华玉兰这一极小种群的研究和保护具有重要意义。

参考文献:

- [1] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志: 第三十卷第一分册[M]. 北京: 科学出版社, 1996: 133.
- [2] 王鹏程, 杨国栋, 张晓晨, 等. 宝华玉兰生存群落的自组织特征映射网络排序与分类[J]. 浙江农林大学学报, 2019, 36(2): 255-263.
- [3] 方寅. 江苏树木大观[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1997: 71-72.
- [4] 汪松, 解焱. 中国物种红色名录: 第1卷 红色名录[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 309-468.
- [5] 徐惠强, 郝日明, 姚志刚, 等. 珍稀树种小叶银缕梅和宝华玉兰自然现状及就地保护研究[J]. 江苏林业科技, 2001, 28(5): 19-21.
- [6] LI Y F, SYLVESTER S P, LI M, et al. The complete plastid genome of *Magnolia zenii* and genetic comparison to Magnoliaceae species[J]. *Molecules*, 2019, 24(2): 261.
- [7] 王 珊, 沈永宝, 鲍华鹏, 等. 宝华玉兰大小孢子发生和雌雄配子体发育过程中解剖结构的变化[J]. 植物资源与环境学报,

- 2021, 30(3): 46-53.
- [8] 蒋国梅, 孙国, 张光富, 等. 濒危植物宝华玉兰种内与种间竞争[J]. 生态学杂志, 2010, 29(2): 201-206.
- [9] WANG H R, ZHI F Y, ZHANG G F. Predicting impacts of climate change on suitable distribution of critically endangered tree species *Yulania zenii* (W. C. Cheng) D. L. Fu in China [J]. *Forests*, 2024, 15(5): 883.
- [10] 宗树斌, 鲍荣静, 段春玲. 宝华玉兰扦插繁殖技术研究[J]. 山东林业科技, 2008, 38(6): 39-41.
- [11] 陈云霞, 南程慧. 珍稀濒危植物宝华玉兰遗传多样性的 ISSR 分析[J]. 四川农业大学学报, 2016, 34(4): 445-449.
- [12] 薛晓明, 阚芯蕊, 张晶. 江苏省特有植物宝华玉兰的濒危状况及其保护对策研究[J]. 科技情报开发与经济, 2010, 20(35): 137-139.
- [13] 王剑伟, 张光富, 陈会艳. 特有珍稀植物宝华玉兰种群分布格局和群落特征[J]. 广西植物, 2008, 28(4): 489-494.
- [14] 龚笑飞, 余水生, 张川英, 等. 人为干扰对乌溪江流域山蜡梅种群结构与动态的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2022, 31(6): 73-83.
- [15] YAN Y X, BAI Z, YAN S K, et al. Variance in woody debris components is largely determined by the belowground microbial phylum-level composition [J]. *Forests*, 2022, 13(9): 1446.
- [16] GHANBARI S, SEFIDI K, KERN C C, et al. Population structure and regeneration status of woody plants in relation to the human interventions, Arasbaran biosphere reserve, Iran [J]. *Forests*, 2021, 12(2): 191.
- [17] LIU D, GUO Z L, CUI X Y, et al. Estimation of the population dynamics of *Taxus cuspidata* by using a static life table for its conservation [J]. *Forests*, 2023, 14(11): 2194.
- [18] CHHETRI P K, BISTA R, CAIRNS D M. Population structure and dynamics of *Abies spectabilis* at treeline ecotone of Barun Valley, Makalu Barun National Park, Nepal [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36: 269-274.
- [19] 王世彤, 李玲丽, 徐耀粘, 等. 极小种群野生植物长果安息香种群结构与动态特征[J]. 植物科学学报, 2022, 40(5): 627-636.
- [20] 韦苏晏, 吴宝成, 田方, 等. 江苏宝华山区药用维管植物资源组成分析[J]. 植物资源与环境学报, 2016, 25(2): 100-110.
- [21] 巩亚梅, 谢功良, 刘森, 等. 铁心杉种群结构与动态特征[J]. 中南林业科技大学学报, 2024, 44(2): 138-145.
- [22] 赵阳, 齐瑞, 焦健, 等. 尕斯库勒-则岔地区紫果云杉种群结构与动态特征[J]. 生态学报, 2018, 38(20): 7447-7457.
- [23] HETT J M, LOUCKS O L. Age structure models of balsam fir and eastern hemlock [J]. *Journal of Ecology*, 1976, 64(3): 1029-1044.
- [24] 杨凤翔, 王顺庆, 徐海根, 等. 生存分析理论及其在研究生命表中的应用[J]. 生态学报, 1991, 11(2): 153-158.
- [25] 林春惠, 顾惠怡, 叶钦良, 等. 珍稀濒危植物大苞山茶种群结构与动态特征[J]. 植物生态学报, 2023, 47(12): 1684-1692.
- [26] 陈晓德. 植物种群与群落结构动态量化分析方法研究[J]. 生态学报, 1998, 18(2): 214-217.
- [27] 冯琳骄, 陆彪, 卢倩倩, 等. 新疆伊犁和塔城天山樱桃种群数量特征比较[J]. 植物资源与环境学报, 2022, 31(5): 74-80.
- [28] CHENG W C. Magnoliaceae [J] // P'EI C. The vascular plants of Nanking II. Contributions from the Biological Laboratory of the Science Society of China. Botanical Series, 1933, 8: 291-293.
- [29] BUDRONI M A, FARRIS E, ZIRULIA A, et al. Evidence for age-structured depensation effect in fragmented plant populations: the case of the Mediterranean endemic *Anchusa sardoa* (Boraginaceae) [J]. *Ecological Complexity*, 2014, 20: 142-150.
- [30] 吴其超, 臧凤岐, 李呈呈, 等. 濒危树种五莲杨梅种群结构与动态特征[J]. 生态学报, 2021, 41(12): 5016-5025.
- [31] 楚秀丽. 珍稀濒危植物宝华玉兰的保护及相关研究进展[J]. 植物学研究, 2021, 10(3): 331-337.
- [32] 张婕, 上官铁梁, 段毅豪, 等. 灵空山辽东栎种群年龄结构与动态[J]. 应用生态学报, 2014, 25(11): 3125-3130.
- [33] 舒琪, 胡璇, 徐瑞晶, 等. 海南岛甘什岭青梅种群结构与动态[J]. 林业科学, 2020, 56(5): 160-167.
- [34] 项小燕, 吴甘霖, 段仁燕, 等. 大别山五针松种群结构及动态研究[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(1): 55-62.
- [35] 白卫国, 徐惠玲, 吴庆标, 等. 广西雅长林区铁坚油杉种群结构分布研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2017, 41(3): 71-76.
- [36] COLLING G, MATTHIES D. Effects of habitat deterioration on population dynamics and extinction risk of an endangered, long-lived perennial herb (*Scorzonera humilis*) [J]. *Journal of Ecology*, 2006, 94(5): 959-972.
- [37] COGONI D, SULIS E, BACCHETTA G, et al. The unpredictable fate of the single population of a threatened narrow endemic Mediterranean plant [J]. *Biodiversity and Conservation*, 2019, 28(7): 1799-1813.

(责任编辑: 张明霞)