

紫金山南麓枫香种群结构与动态特征

邹朋峻¹, 关庆伟^{1*}, 袁在翔¹, 谷雨晴¹, 吴 茜¹, 牛莹莹¹, 陈 霞², 金雪梅²

(1. 南京林业大学生物与环境学院, 南方现代林业协同创新中心, 江苏 南京 210037;
2. 中山陵园管理局, 江苏 南京 210014)

摘要:【目的】明晰自然演替下枫香(*Liquidambar formosana*)种群的数量动态特征,为南京紫金山地区森林的可持续经营提供参考。【方法】以南京紫金山南麓受人为干扰较小的固定样地中枫香种群为研究对象,记录样地内所有枫香个体的胸径、树高、冠幅等指标;根据调查样地内枫香个体胸径的大小,划分为 9 个径级(以 0~7.5 cm 径阶为径级 I,后每间隔 5 cm 划分径级直至径级 IX),用径级来对应种群个体的龄级,绘制枫香种群年龄结构图,并用结构动态指数定量描述种群数量动态。通过编制植物种群静态生命表,绘制种群存活率、死亡率和消失率曲线,利用生存分析函数和线性平稳时间序列对该种群的结构特征现状及未来变化趋势进行分析和预测。【结果】①枫香种群个体年龄结构为“金字塔”型,在干扰下种群整体的龄级结构数量变化指数为 0.02,表明种群个体数量在当前演替阶段能够维持正增长。②种群存活曲线趋于 Deevey-I 型,种群个体生存率逐渐下降,死亡率、消失率、累积死亡率和危险率总体上逐渐上升,死亡密度则趋于稳定。③时间序列模型的预测结果表明枫香种群能够在未来较长的演替时间内仍呈增长趋势。④枫香树在胸径达到 $\geq 32.5 \sim 37.5$ cm 后可能逐渐进入寿命后期阶段,抗外界环境干扰能力较差。【结论】作为北亚热带、暖温带区域地带性树种,枫香种群在南京紫金山地区能够保持较多的个体数量以及完整的年龄结构,具有较强的天然更新能力,这使得枫香种群在未来演替阶段有占据先锋树种马尾松(*Pinus massoniana*)种群生态位的可能。但是枫香种群个体在胸径达到 VII 龄级($\geq 32.5 \sim 37.5$ cm)后逐渐进入生理寿命,抗外界环境干扰能力较差。因此,为进一步发挥紫金山地区景观功能,建议加强对胸径达到 32.5 cm 的枫香个体的保护力度,增加该种群的抵抗力稳定性和生态空间扩展潜力,促进森林群落的进展性演替。

关键词: 枫香; 种群结构; 数量动态; 静态生命表; 生存分析

中图分类号: S718.54

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 1000-2006(2023)03-0157-07



The population structure and dynamics of *Liquidambar formosana* on the southeast foothill of Zijin Mountain, Nanjing City

ZOU Pengjun¹, GUAN Qingwei^{1*}, YUAN Zaixiang¹, GU Yuqing¹, WU Qian¹,
NIU Yingying¹, CHEN Xia², JIN Xuemei²

(1. Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, College of Biology and the Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2. The Administration Bureau of Dr. Sun Yat-sen Mausoleum, Nanjing 210014, China)

Abstract: 【Objective】The aim of this study is to evaluate the quantitative population dynamics of *Liquidambar formosana* under natural succession to provide a theoretical basis for the sustainable forest management on Zijin Mountain in Nanjing, China. 【Method】Using the *L. formosana* population in a fixed sample plot on the southeastern foothill of Zijin Mountain in Nanjing as the research object, the indices of diameter at breast height (DBH), height, and crown width of all individuals were recorded. Subsequently, the DBH of the *L. formosana* population was divided into nine diameter classes, which were used as age class surrogates to examine the population structure. An age structure diagram of *L.*

收稿日期 Received: 2022-01-12

修回日期 Accepted: 2022-10-09

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0502703); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)。

第一作者: 邹朋峻(zou1511977682@163.com)。* 通信作者: 关庆伟(guanjapan999@163.com), 教授。

引文格式: 邹朋峻, 关庆伟, 袁在翔, 等. 紫金山南麓枫香种群结构与动态特征[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2023, 47(3): 157-163. ZOU P J, GUAN Q W, YUAN Z X, et al. The population structure and dynamics of *Liquidambar formosana* on the southeast foothill of Zijin Mountain, Nanjing City[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2023, 47(3): 157-163. DOI: 10.12302/j.issn.1000-2006.202201020.

formosana population was constructed and the population dynamics were described quantitatively using the structural dynamic index. Finally, the structural characteristics and change trends of the population were analyzed and predicted by compiling the static life table, constructing the survival, mortality, and disappearance rate curves using the survival analysis function and linear stationary time series.【Result】(1) The individual age structure diagram of *L. formosana* population was a “pyramid” shape, and the quantitative variability dynamic index of the age structure under intervention was 0.02, indicating the population is able to maintain a positive growth in the current succession stage. (2) The survival curve of *L. formosana* population was inclined to Deevey-I, where the individual survival rate slowly decreased with an increase in age, while the mortality, disappearance, cumulative mortality, and hazard rates increased, and the death density diminished. (3) The predicted results from the time-sequence model showed that *L. formosana* would continue to grow in a lengthy succession in the future. (4) *L. formosana* is expected to enter the later stage of life as the DBH reaches $\geq 32.5-37.5$ cm, and the ability to resist the interference from the external environment is relatively poorer.【Conclusion】*L. formosana* is a zonal tree species in northern subtropical and warm temperate regions and has a strong natural regeneration ability, with the ability to retain many seedlings and a complete age structure on Zijin Mountain in Nanjing. Therefore, the *L. formosana* population may occupy the niche of the pioneer species *Pinus massoniana* population in a future succession stage. However, it is worth noting that the individuals in the *L. formosana* population gradually reach their physiological life span when the DBH reaches age class VII ($\geq 32.5-37.5$ cm), and their ability to resist the interference from the external environment is poor. Accordingly, it is suggested to strengthen the protection of *L. formosana* individuals whose DBH reaches 32.5 cm to further improve the scenic splendor of Zijin Mountain, increase the resistance stability and ecological space expansion potential of the population, and promote the progressive succession of forest communities.

Keywords: *Liquidambar formosana*; population structure; quantity dynamic; static life table; survival analysis

种群数量动态是种群个体长期适应生境的结果,也是生态学中关于种群研究的热点问题^[1-3]。它不仅反映物种与生境之间的契合度^[4],也反映了该物种在群落中的地位与作用^[5-7]。静态生命表是研究植物种群数量动态的基本方法^[8],能够反映植物种群在特定时间段内的死亡率和存活率,进而估算该种群在一定生境条件下的内禀增长率,并结合时间序列模型推测种群数量未来的变化趋势^[9-12]。研究地带性优势种群的数量动态特征对于了解典型森林群落的稳定性和演替动态具有重要意义^[13-16]。

枫香(*Liquidambar formosana*)是我国北亚热带及部分暖温带森林的上层先锋树种^[17]。作为秋季彩林景观的重要组成部分,紫金山南麓枫香林的年龄约 59 a,受人为干扰程度较低,林分郁闭度较高,优势种群径阶结构完整,研究其种群结构与数量动态具有重要理论价值和实践意义^[18]。然而,以往关于枫香种群的研究主要为干扰条件下(如采伐)的种群结构、分布格局及天然更新特征。例如,陈水永^[19]和王丹^[20]的研究表明,在人为干扰严重的生境中,枫香苗木个体数量最多,且主要聚集分布在下坡位。李冬林等^[17]在连云港市枫树湾的研究发现,在生物入侵和人为活动的双重干扰下枫香种群径级结构不完整,龄级结构呈偏正态分布,苗木总体较少,种群趋于衰退。王传华等^[21]研究表明,

枫香幼苗萌芽更新是对生境的适应,伐桩萌芽更新是对砍伐干扰的响应,其中萌芽更新在林木生长过程中存在显著的自疏现象。当前,对于森林群落长期自然演替下的枫香种群结构与数量动态特征研究依旧较为缺乏。仅少量研究表明,在中亚热带常绿阔叶林自然保护区中,枫香种群径级结构完整,幼苗个体较少,天然更新较为困难,种群呈现出前期薄弱、中期稳定、后期衰退的特征^[22]。而该种群特征在北亚热带至暖温带过渡带的地带性植被针阔混交林中是否同样适用,需要做进一步实证研究。

为此,本研究以南京紫金山南麓样地中的枫香种群为研究对象,利用植物种群静态生命表、结构动态指数、时间序列模型等方法分析和预测该种群的结构特征及未来变化趋势,以期阐明自然演替条件下枫香种群的数量动态特征,为该地区森林的可持续经营提供重要的参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究地概况及试验设计

南京紫金山位于南京市城东($118^{\circ}48'24''\sim 118^{\circ}53'04''$ E, $32^{\circ}01'57''\sim 32^{\circ}06'15''$ N),总面积 $2\,970\text{ hm}^2$,海拔最高处 448.9 m,相对高度 420 m,属于北亚热带向暖温带过渡的季风气候区,四季分明,年降水量在 $1\,000\sim 1\,050\text{ mm}$,年均气温 15.4

℃,年均日照 2 213 h,全年无霜期 322 d^[23]。土壤为酸性山地黄棕壤和灰棕壤。森林资源清查数据表明,紫金山针叶林约 516.71 hm²,阔叶林约 1 752.50 hm²,针阔混交林约 14.01 hm²,其他林分约 118.04 hm²^[24]。

在紫金山南麓针阔混交林(118°51'56"E, 32°03'32"N)中受人为干扰较小处,用全站仪和罗盘仪设定固定样地 1.36 hm²。在相邻格子法划分的 100 个 10 m×10 m 调查样方中,记录每株胸径≥5 cm 林木的植物种名、胸径、树高、冠幅、坐标距离位置。在每个调查样方的 4 个边角及中心设置 2 m×2 m 调查小样方,在调查小样方内记录更新幼树、灌木、草本和藤本植物的种名、坐标距离位置、基径、株高、株数(或丛数)、盖度。

1.2 试验指标测定

1.2.1 乔木树种重要值

针阔混交林中每个树种的优势度以重要值大小来衡量,相对密度、相对频度、相对显著度及重要值的计算方法详见文献[2]。

1.2.2 种群个体径阶与龄级划分

由于缺乏江苏省枫香树的解析木资料,并且利用生长锥获取林木年轮较为困难,因而无法精确测定紫金山南麓枫香种群个体的真实年龄。但是,林木胸径与年龄存在一定的正相关关系,故采用径级来对应种群个体的龄级。枫香种群的径阶划分主要参考熊文愈等^[25]对紫金山森林乔木大小等级的划分方法,并在此基础上稍做改动:在原方法上Ⅰ、Ⅱ级苗木与Ⅲ级立木合并为胸径为 0~7.5 cm 的幼苗幼树,定义为第Ⅰ径级,之后每径阶间隔 5 cm;第Ⅰ径级对应龄级Ⅰ,第Ⅱ径级对应龄级Ⅱ,依此类推直至龄级Ⅸ。按照径阶统计种群各龄级株数。

1.2.3 种群结构动态指数

定量描述种群结构的数量动态,参见文献[26]测定两相邻龄级间个体数量动态(V_n)、整个种群龄级结构的数量动态(V_{pi})以及在外环境干扰下整个种群龄级结构的数量动态(V'_{pi})。

1.2.4 静态生命表与生存分析函数

参见文献[27]对种群各龄级个体数编制静态生命表,包括种群每一龄级的存活率、死亡率、消失率等指标。引用生存率 $S(t)$ 、累计死亡率 $F(t)$ 、死亡密度 $f(t)$ 、危险率 $\lambda(t)$ 等 4 个生存分析函数,具体算法参见文献[28]。

此外,以龄级为横坐标,以标准化存活个体数的自然对数 $\ln l_x$ 为纵坐标,绘制的种群个体存活曲

线,可归为 3 种类型:Deevey-Ⅰ凸线型,该类型的种群在接近生理寿命前只有少数个体死亡;Deevey-Ⅱ直线型,该类型的种群在各龄级死亡率相等;Deevey-Ⅲ凹线型,该类型的种群在苗木期死亡率很高^[1, 29]。此外,Deevey-Ⅱ直线型又被细分为 3 个亚型,其中 B_1 亚型指种群在各龄级的存活个体数(l_x)相差较大; B_2 亚型指种群各龄级的死亡率(q_x)基本相同; B_3 亚型指种群在苗木期的死亡率较高,而后死亡率则明显下降。采用函数(Deevey-Ⅱ与 Deevey-Ⅲ)模型对存活曲线进行拟合检验^[27, 30]。

1.2.5 时间序列预测模型

采用线性平稳时间序列预测种群年龄结构动态,其计算公式详见文献[31]。本研究对枫香种群经过Ⅱ、Ⅲ、Ⅴ、Ⅶ龄级时间后的各龄级个体数进行预测。

1.3 数据分析

用 Excel 2016 进行数据处理, SPSS 20.0 进行数据分析, Origin 9.0 进行图形处理。

2 结果与分析

2.1 针阔混交林固定样地内植被特征

研究发现,紫金山南麓固定样地内胸径≥5 cm 的树种有 36 种,总计 1 616 株,林分密度为 1 188 株/hm²,平均胸径为 21.3 cm,平均树高为 12.5 m。在这 36 个乔木树种中,针叶树为马尾松(*Pinus massoniana*)、水杉(*Metasequoia glyptostroboides*)、柳杉(*Cryptomeria japonica*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)和杉木(*Cunninghamia lanceolata*),共计 267 株。针阔混交林固定样地内针叶树与阔叶树的比例为 1.0:5.1。重要值前 10 位树种依次为枫香、马尾松、樟(*Cinnamomum camphora*)、山胡椒(*Lindera glauca*)、椴木石楠(*Photinia bodinieri*)、水杉、柳杉、黄连木(*Pistacia chinensis*)、糙叶树(*Aphananthe aspera*)和石楠(*Photinia serratifolia*),共计 1 373 株,占总株数的 84.93%(表 1)。固定样地内胸径≥5 cm 枫香有 528 株,其相对密度(32.67%)、相对显著度(18.73%)和相对频度(34.44%)的总和最高,因而可被认为是针阔混交林主要群落(枫香+马尾松)建群种之一。另外,固定样地内植物多样性较高(Shannon-Wiener 指数:乔木层 3.473,灌木层 3.840,草本层 3.688),其中灌木有 43 种,草本有 44 种,藤本有 8 种。

表 1 紫金山针阔混交林固定样地重要值前 27 个树种概况

Table 1 Surveys of 27 tree species in the permanent plot under the coniferous and broad-leaved mixed forest in Zijin Mountain, Nanjing City

树种 tree species	平均 胸径/cm mean DBH	平均 树高/m average height	平均 冠幅/m mean crown	相对 密度/% relative density	相对 显著度/% relative dominance	相对频度/% relative frequency	重要值/% important value
枫香 <i>Liquidambar formosana</i>	16.7	10.3	3.6	32.67	18.73	34.44	85.84
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	29.5	12.6	3.3	8.29	27.34	8.68	44.31
樟 <i>Cinnamomum camphora</i>	9.7	7.0	3.0	12.96	5.44	13.76	32.16
山胡椒 <i>Lindera glauca</i>	6.6	5.5	2.9	8.91	4.76	9.26	22.93
栲木石楠 <i>Photinia bodinieri</i>	9.5	6.2	3.3	3.47	4.76	3.65	11.88
水杉 <i>Metasequoia glyptostroboides</i>	24.2	15.4	3.9	3.34	3.94	3.52	10.80
柳杉 <i>Cryptomeria japonica</i>	20.6	12.0	2.7	3.34	3.53	3.33	10.20
黄连木 <i>Pistacia chinensis</i>	9.3	6.8	2.8	3.28	3.40	3.46	10.14
糙叶树 <i>Aphananthe aspera</i>	10.1	6.8	4.8	3.28	2.31	3.39	8.98
石楠 <i>Photinia serratifolia</i>	1.0	5.5	2.8	3.22	2.45	3.26	8.93
栓皮栎 <i>Quercus variabilis</i>	26.8	12.7	5.2	2.78	3.26	1.70	7.74
白檀 <i>Symplocos paniculata</i>	7.1	5.4	2.6	1.24	2.45	1.30	4.99
冬青 <i>Ilex chinensis</i>	7.7	5.7	3.0	1.05	2.04	1.11	4.20
三角枫 <i>Acer buergerianum</i>	8.2	6.6	3.7	1.24	1.63	1.04	3.91
朴树 <i>Celtis sinensis</i>	20.1	11.6	5.3	0.87	1.36	0.78	3.01
侧柏 <i>Platycladus orientalis</i>	10.8	6.7	2.6	0.87	1.09	0.91	2.87
玉兰 <i>Yulania denudata</i>	7.3	7.1	4.2	0.68	1.22	0.72	2.62
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	11.0	6.8	2.2	0.68	1.22	0.72	2.62
刺楸 <i>Kalopanax septemlobus</i>	8.4	4.7	2.9	0.56	0.95	0.59	2.10
拐枣 <i>Hovenia acerba</i>	8.0	7.0	4.0	0.43	0.82	0.52	1.77
广玉兰 <i>Magnolia grandiflora</i>	8.5	6.9	3.0	0.50	1.09	0.07	1.66
青桐 <i>Firmiana simplex</i>	8.7	8.5	2.8	0.37	0.82	0.39	1.58
樟 <i>Cinnamomum camphora</i>	9.0	6.4	2.4	0.47	0.95	0.07	1.49
紫薇 <i>Lagerstroemia indica</i>	10.3	8.6	1.7	0.50	0.55	0.20	1.25
麻栎 <i>Quercus acutissima</i>	46.5	17.4	8.0	0.19	0.68	0.13	1.00
榔榆 <i>Ulmus parvifolia</i>	26.5	10.2	6.4	0.25	0.41	0.26	0.92
刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>	29.3	11.9	7.6	0.25	0.41	0.26	0.92

注:树种按重要值降序排列。Tree species were sorted in descending order of their important values。

2.2 种群结构和动态变化指数

经分析发现,紫金山南麓固定样地内枫香种群个体有 555 株,种群各龄级结构分布见图 1。其中,苗木低龄级(I)的 131 株,占种群个体数的 23.6%;中龄树(II ~ VI)357 株,占种群的 71. 89%。两相邻龄级间个体数量变化指数 V_2 (0. 18)、 V_3 (0. 35)、 V_4 (0. 21)、 V_5 (0. 35)、 V_6 (0. 56)、 V_7 (0. 50)、 V_8 (0. 88) 均大于 0,表明枫香种群在 II—IX 龄级间呈现出增长型的结构动态关系;此外,整个种群龄级结构的数量变化动态指数 V_{pi} (0. 24) 以及在外环境干扰下的整个种群龄级结构数量变化动态指数 V'_{pi} (0. 02) 均大于 0,表明紫金山南麓的枫香种群在当前演替阶段为增长型种群。

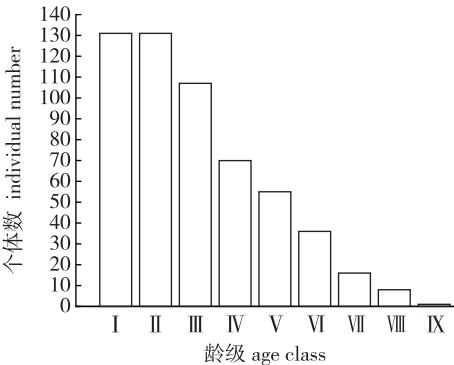


图 1 紫金山固定样地内枫香种群年龄结构图

Fig.1 The age structure of *Liquidambar formosana* population in the permanent plot under the coniferous and broad-leaved mixed forest in Zijin Mountain, Nanjing City

2.3 种群静态生命表、存活曲线、死亡率曲线和消失率曲线

数(l_x) 和生命期望值(e_x) 整体上随龄级增加而降低(表 2)。

经分析, 固定样地内枫香种群标准化存活个体

表 2 紫金山固定样地内枫香种群静态生命表

Table 2 The life table of <i>Liquidambar formosana</i> population in the permanent plot under the coniferous and broad-leaved mixed forest in Zijin Mountain, Nanjing City										
龄级 age class	径阶/cm DBH class	存活数 survival number	l_x	$\ln l_x$	d_x	q_x	L_x	T_x	e_x	k_x
I	0~7.5	131	1 000	6.91	0	0.00	1 000	3 737	3.74	0.00
II	≥7.5~12.5	131	1 000	6.91	183	0.18	908	2 737	2.74	0.20
III	≥12.5~17.5	107	817	6.71	282	0.35	676	1 828	2.24	0.42
IV	≥17.5~22.5	70	534	6.28	115	0.21	477	1 153	2.16	0.24
V	≥22.5~27.5	55	420	6.04	145	0.35	347	676	1.61	0.42
VI	≥27.5~32.5	36	275	5.62	153	0.56	198	328	1.19	0.81
VII	≥32.5~37.5	16	122	4.81	61	0.50	92	130	1.06	0.69
VIII	≥37.5~42.5	8	61	4.11	53	0.88	34	38	0.63	2.08
IX	≥42.5	1	8	2.03	—	—	4	4	0.50	2.03

注: x . 龄级 age class; l_x . 在 x 龄级开始时标准化存活个体数 the standardized number of survivals at the start of age class x ; d_x . 从 x 到 $x+1$ 龄级标准化死亡数 the standardized number of deaths during the interval between age class x and age class $x+1$; q_x . 从 x 到 $x+1$ 龄级死亡率 the mortality during the interval between age class x and age class $x+1$; L_x . 从 x 到 $x+1$ 龄级还存活的个体数 the survivals during the interval between age class x and age class $x+1$; T_x . 从 x 龄级始的个体总数 the total individuals from age class x to higher age class; e_x . 进入 x 龄级个体的生命期望 the life expectancy of individual enter age class; k_x . 消失率 the disappearance rate.

通过比较生存曲线 Deevey-Ⅱ ($R^2=0.663$) 与 Deevey-Ⅲ ($R^2=0.406$) 拟合模型, 结合静态生命表中种群死亡率 q_x 前期较低后期较高(表 2) 可知, 枫香种群的存活曲线趋于 Deevey-I 型(图 2)。由图 2 可知, 枫香种群死亡率、消失率曲线的变化趋势相似, 总体上随龄级增加而增加, 局部存在一定波动。

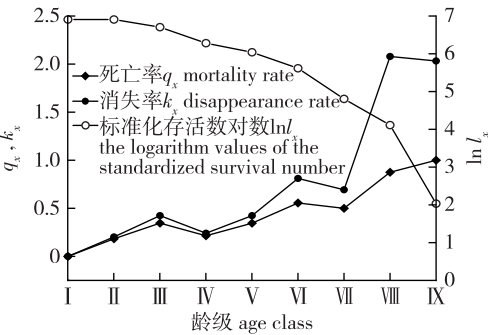


图 2 紫金山固定样地内枫香种群存活率、死亡率和消失率曲线

Fig.2 The curves of living population, mortality and disappearance rates of *Liquidambar formosana* population in the permanent plot under the coniferous and broad-leaved mixed forest in Zijin Mountain, Nanjing City

2.4 种群生存变化规律

分析表明, 枫香种群生存率随龄级增加而逐渐降低, 累积死亡率随龄级单调递增, 二者互补

(表 3), 并且在第Ⅵ龄级之后, 种群生存率与累积死亡率逐渐趋于平缓。种群死亡密度仅在Ⅱ、Ⅲ龄级间数值较大, 在其他龄级间相对较小; 危险率则随龄级单调递增, 表明固定样地内枫香种群抵抗力稳定性逐渐增强, 而恢复力稳定性逐渐下降。

表 3 紫金山枫香种群生存函数估算值

Table 3 Estimated values of fourdepicted survival functions for <i>Liquidambar formosana</i> population in Zijin Mountain, Nanjing City					
龄级 age class	径阶/cm DBH class	$S(t)$	$F(t)$	$f(t)$	$\lambda(t)$
I	0~7.5	1.000	0.000	0.000	0.000
II	≥7.5~12.5	0.817	0.183	0.046	0.050
III	≥12.5~17.5	0.534	0.466	0.071	0.152
IV	≥17.5~22.5	0.420	0.580	0.029	0.204
V	≥22.5~27.5	0.275	0.725	0.036	0.284
VI	≥27.5~32.5	0.122	0.878	0.038	0.391
VII	≥32.5~37.5	0.061	0.939	0.015	0.442
VIII	≥37.5~42.5	0.008	0.992	0.013	0.492
IX	≥42.5	0.000	1.000	0.002	0.500

2.5 种群个体数量的时间序列预测

基于固定样地内枫香种群各龄级的个体数, 利用一阶移动平均法, 对经过Ⅱ、Ⅲ、Ⅴ、Ⅶ龄级时间后种群各龄级的个体数量进行预测, 结果见表 4。在经过Ⅱ龄级时间后, 除龄级Ⅱ外, 枫香种群的各

龄级个体数均有不同程度的增加;经过Ⅲ、Ⅴ龄级时间后,枫香种群内中龄树(Ⅱ—Ⅵ)依旧是种群主体;并且,种群老龄树(Ⅶ—Ⅸ)个体数量在经过Ⅴ、Ⅶ龄级时间后得到了大幅提升。

表4 紫金山固定样地内枫香种群数量动态变化的时间序列预测

Table 4 Time series prediction of age structure of *Liquidambar formosana* population in the permanent plot under coniferous and broad-leaved mixed forest in Zijin Mountain, Nanjing City

龄级 age class	个体数 individual number	$M_2^{(1)}$	$M_3^{(1)}$	$M_5^{(1)}$	$M_7^{(1)}$
I	131				
II	131	131			
III	107	119	123		
IV	70	89	103		
V	55	63	77	99	
VI	36	46	54	80	
VII	16	26	36	57	78
VIII	8	12	20	37	60
IX	1	5	8	23	42

注: $M_2^{(1)}$ 、 $M_3^{(1)}$ 、 $M_5^{(1)}$ 、 $M_7^{(1)}$ 分别表示一阶移动平均模型下对经过Ⅱ、Ⅲ、Ⅴ、Ⅶ龄级时间后种群各龄级个体数量的预测值。 $M_2^{(1)}$ 、 $M_3^{(1)}$ 、 $M_5^{(1)}$ 、 $M_7^{(1)}$ represent the predicted value of individual number in each age class of population after Ⅱ, Ⅲ, Ⅴ and Ⅶ age class using the first-order moving average model, respectively.

3 讨 论

在当前演替阶段,针阔混交林中枫香种群个体数量较多,径阶结构完整且为“金字塔”型,具有较多的苗木数量,具备较好的天然更新能力,这与干扰条件下的枫香种群呈衰退型结构特征^[17, 19-20]显著不同。这是因为枫香为强阳性树种,其苗木稍耐阴,喜温湿润气候和深厚的土壤条件,不耐水涝,极易在北亚热带至部分暖温带的森林群落中成为优势树种;并且,枫香种子小且具翅,能够借助风力传播,易在山脚处散布;此外,紫金山南麓针阔混交林为砂质酸性壤土,土壤深厚,海拔较低,坡度平缓,适合枫香种群的天然更新。有研究表明,在受干扰较小的马尾松-枫香针阔混交林中,枫香种群具有较为丰富的实生幼苗库,并且能够通过萌芽更新主动适应环境压力^[17]。

本次研究发现,紫金山南麓枫香种群存活曲线为Deevey-I凸线型,与安徽省黄山市查湾自然保护区枫香种群存活曲线一致^[22],均表现出种群死亡率和消失率在幼龄期较低,在老龄期较高,这表明自然状态下的枫香种群个体在胸径达到Ⅶ龄级($\geq 32.5 \sim 37.5$ cm)后可能逐渐进入生理寿命,对外

在环境干扰(如种间竞争和病虫害等)的抵抗力较差,符合枫香可能是乔木树种中偏向r-对策者的推测^[21]。时间序列模型的预测结果表明,枫香种群能够在未来较长的演替时间内仍呈增长趋势,这与紫金山北坡红柴枝(*Meliosma oldhamii*)种群^[32]、南坡栓皮栎(*Quercus variabilis*)种群^[2]等地带性优势种群相类似,这是因为紫金山森林质量持续改善,郁闭度较高,阳性先锋树种马尾松已无林下更新^[18];虽然在紫金山南麓针阔混交林中马尾松的重要值较大,但随着森林群落进展性演替,枫香及其他地带性乡土树种会逐渐占据马尾松种群生态位,实现种群个体数量的正增长。并且,紫金山南麓枫香林空间结构(混交度、角尺度、大小比数和开敞度)较为合理,群落处于较高的演替阶段^[18],因而具有较强抵抗力。此外,有研究表明,位于阳坡下坡位的枫香种群分形维数较高,生态间隙维较大,表现出较强的生态空间扩展潜力^[19]。

参考文献(reference):

- [1] 李博. 生态学[M]. 北京:高等教育出版社, 2000. LI B. Ecology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [2] 袁在翔, 金雪梅, 马婷瑶, 等. 南京灵谷寺栓皮栎种群结构与动态[J]. 生态学杂志, 2017, 36(6): 1488-1494. YUAN Z X, JIN X M, MA T Y, et al. The population structure and dynamics of *Quercus variabilis* in Nanjing Spirit Valley[J]. Chin J Ecol, 2017, 36(6): 1488-1494. DOI: 10.13292/j.1000-4890.201706.013.
- [3] 吴邦利, 龙翠玲, 秦随涛. 茂兰喀斯特森林梓叶槭种群结构与数量动态[J]. 西北植物学报, 2018, 38(10): 1918-1926. WU B L, LONG C L, QIN S T. Population structure and its quantity dynamics of *Acer catalpifolium* of Karst forest in Maolan National Natural Reserve[J]. Acta Bot Boreali Occidentalia Sin, 2018, 38(10): 1918-1926. DOI: 10.7606/j.issn.1000-4025.2018.10.1918.
- [4] 张文辉, 卢志军, 李景侠, 等. 秦岭北坡栓皮栎种群动态的研究[J]. 应用生态学报, 2003, 14(9): 1427-1432. ZHANG W H, LU Z J, LI J X, et al. Population dynamics of *Quercus variabilis* on northern slope of Qinling Mountains[J]. Chin J Appl Ecol, 2003, 14(9): 1427-1432. DOI: CNKI: SUN: YYSB.0.2003-09-005.
- [5] GALAL T M. Size structure and dynamics of some woody perennials along elevation gradient in Wadi Gimal, Red Sea coast of Egypt[J]. Flora Morphol Distribution Funct Ecol Plants, 2011, 206(7): 638-645. DOI: 10.1016/j.flora.2010.11.010.
- [6] LI W, ZHANG G F. Population structure and spatial pattern of the endemic and endangered subtropical tree *Parrotia subaequalis* (Hamamelidaceae) [J]. Flora Morphol Distribution Funct Ecol Plants, 2015, 212: 10-18. DOI: 10.1016/j.flora.2015.02.002.
- [7] 姜在民, 和子森, 宿昊, 等. 濒危植物羽叶丁香种群结构与动态特征[J]. 生态学报, 2018, 38(7): 2471-2480. JIANG Z M, HE Z S, SU H, et al. Population structure and dynamic characteristics of endangered *Syringa pinnatifolia* Hemsl [J]. Acta Ecol Sin, 2018, 38(7): 2471-2480. DOI: 10.5846/stxb201704250753.
- [8] 王进, 姚兰, 艾训儒, 等. 鄂西南不同区域亮叶桦种群结构与动态特征[J]. 应用生态学报, 2020, 31(2): 357-365. WANG J, YAO L, AI X R, et al. Structure and dynamic characteristics of *Betula luminifera* populations in different regions of Southwest

- Hubei Province, China[J]. Chin J Appl Ecol, 2020, 31(2): 357–365. DOI: 10.13287/j.1001-9332.202002.010.
- [9] 江洪. 云杉种群生态学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1992. JIANG H. *Picea* population ecology[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1992.
- [10] ARISTA M. The structure and dynamics of an *Abies pinsapo* forest in southern Spain[J]. For Ecol Manag, 1995, 74(1/2/3): 81–89. DOI: 10.1016/0378-1127(94)03507-S.
- [11] 任毅华, 周尧治, 侯磊, 等. 色季拉山急尖长苞冷杉种群不同龄级立木的空间分布格局[J]. 生态学报, 2021, 41(13): 5417–5424. REN Y H, ZHOU Y Z, HOU L, et al. Spatial distribution patterns of standing trees at different ages in *Abies georgei* var. *smithii* forests in Sejila Mountain[J]. Acta Ecol Sin, 2021, 41(13): 5417–5424. DOI: 10.5846/stxb202005301406.
- [12] 朱伟, 张光富, 胥振宇. 江苏南通古银杏的种群结构与动态[J]. 生态学杂志, 2019, 38(12): 3609–3616. ZHU W, ZHANG G F, ZAN Z Y. Population structure and dynamics of old *Ginkgo biloba* in Nantong, Jiangsu Province[J]. Chin J Ecol, 2019, 38(12): 3609–3616. DOI: 10.13292/j.1000-4890.201912.016.
- [13] 陈科屹, 张会儒, 张博, 等. 云冷杉天然次生林死木分布格局及空间关联性[J]. 应用生态学报, 2021, 32(8): 2745–2754. CHEN K Y, ZHANG H R, ZHANG B, et al. Spatial distribution and associations of dead woods in natural spruce-fir secondary forests[J]. Chin J Appl Ecol, 2021, 32(8): 2745–2754. DOI: 10.13287/j.1001-9332.202108.003.
- [14] 周赛霞, 彭焱松, 詹选怀, 等. 庐山黄山松种群结构及数量动态研究[J]. 广西植物, 2020, 40(2): 247–254. ZHOU S X, PENG Y S, ZHAN X H, et al. Population structure and numeric dynamics of *Pinus taiwanensis* in Lushan Mountain of Jiangxi Province[J]. Guihaia, 2020, 40(2): 247–254. DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201812049.
- [15] 王春晖, 陈昕, 王本忠, 等. 湖南高望界国家级自然保护区雪峰山梭罗种群结构与动态特征[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2022, 46(3): 57–64. WANG C H, CHEN X, WANG B Z, et al. Population structure and dynamics of *Reevesia pubescens* var. *xuefengensis* in the Gaowangjie National Nature Reserve of Hunan Province[J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), 2022, 46(3): 57–64. DOI: 10.12302/j.issn.1000-2006.202105012.
- [16] 江杳香, 陈玉凯, 吴石松, 等. 海南濒危植物蕉木种群结构与动态特征[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2021, 45(1): 116–122. JIANG X X, CHEN Y K, WU S S, et al. Population structure and dynamics of the endangered plant *Chieniodendron hainanense* in Hainan[J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), 2021, 45(1): 116–122. DOI: 10.12302/j.issn.1000-2006.2019070040.
- [17] 李冬林, 江浩, 王火, 等. 连云港市枫树湾景区枫香种群结构与分布格局[J]. 生态环境学报, 2020, 29(1): 49–58. LI D L, JIANG H, WANG H, et al. Population structure and spatial distribution pattern of *Liquidambar formosana* in maple tree bay of Li-anyungang[J]. Ecol Environ Sci, 2020, 29(1): 49–58. DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2020.01.006.
- [18] 邓送求, 闫家锋, 关庆伟. 南京紫金山枫香风景林空间结构分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2010, 34(4): 117–122. DENG S Q, YAN J F, GUAN Q W. Spatial structure of scenic forest of *Liquidambar formosana* in Nanjing Zijin Mountain[J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), 2010, 34(4): 117–122. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2006.2010.04.026.
- [19] 陈水永. 岳麓山枫香种群空间分布格局及动态研究[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2008. CHEN S Y. Research on the spatial pattern and dynamic of *Liquidambar formosana* Hance. on Yuelu Mountain[D]. Changsha: Hunan Normal University, 2008.
- [20] 王丹. 枫香种群格局与生境适应性研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2017. WANG D. Study on the population pattern and habitat adaptability of *Liquidambar formosana*[D]. Guiyang: Guizhou University, 2017.
- [21] 王传华, 杨莹, 李俊清. 鄂东南低山丘陵区枫香种群的天然更新方式与特征[J]. 植物学报, 2009, 44(6): 710–717. WANG C H, YANG Y, LI J Q. Natural regeneration of Chinese sweet gum (*Liquidambar formosana*) population in southeast hilly region of Hubei Province[J]. Chin Bull Bot, 2009, 44(6): 710–717. DOI: 10.3969/j.issn.1674-3466.2009.06.08.
- [22] 李瑞芬, 宋丁全. 查湾自然保护区枫香种群生命表与生存分析[J]. 金陵科技学院学报, 2012, 28(4): 66–70. LI R F, SONG D Q. Life table and survival analysis of *Liquidambar formosana* population in Zhawan Nature Reserve[J]. J Jinling Inst Technol, 2012, 28(4): 66–70. DOI: 10.16515/j.cnki.32-1722/n.2012.04.001.
- [23] 袁在翔. 南京紫金山2种典型林分土壤碳库与养分特征[D]. 南京: 南京林业大学, 2017. YUAN Z X. Characteristics of carbon pool and nutrients under two typical forests in Nanjing Zijin Mountain[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2017.
- [24] 曹静. 南京紫金山森林植物多样性及其价值评估[D]. 南京: 南京林业大学, 2011. CAO J. Research on plant diversity and value assessment in the purple mountain in Nanjing[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2011.
- [25] 熊文愈, 韩福庆, 姚琢. 南京灵谷寺森林的变化分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 1983, 7(2): 1–23. XIONG W Y, HAN F Q, YAO Z. An analytical study on the successional change of the Spirit Valley forest, Nanjing[J]. J Nanjing For Univ, 1983, 7(2): 1–23. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2006.1983.02.001.
- [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. CHEN X D. Study on dynamic quantitative analysis method of plant population and community structure[J]. Acta Ecol Sin, 1998, 18(2): 214–217. DOI: 10.3321/j.issn.1000-0933.1998.02.017.
- [27] 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 C Z, HONG W, XIE J S, et al. Life table analysis of *Tsuga longibracteata* population[J]. Chin J Appl Ecol, 2000, 11(3): 333–336. DOI: 10.13287/j.1001-9332.2000.0085.
- [28] 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. YANG F X, WANG S Q, XU H G, et al. The theory of survival analysis and its application to life table[J]. Acta Ecol Sin, 1991, 11(2): 153–158. DOI: 10.1007/BF02945291.
- [29] DEEVEY E S. Life tables for natural populations of animals[J]. Q Rev Biol, 1947, 22(4): 283–314. DOI: 10.1086/395888.
- [30] HETT J M, LOUCKS O L. Age structure models of Balsam fir and eastern hemlock[J]. J Ecol, 1976, 64(3): 1029. DOI: 10.2307/2258822.
- [31] 王泳腾, 黄治昊, 王俊, 等. 燕山山脉黄檗种群结构与动态特征[J]. 生态学报, 2021, 41(7): 2826–2834. WANG Y T, HUANG Z H, WANG J, et al. The population structure and dynamic characteristics of *Phellodendron amurense* in Yanshan Mountains[J]. Acta Ecol Sin, 2021, 41(7): 2826–2834. DOI: 10.5846/stxb202003300743.
- [32] 朱贵珍, 丁彦芬, 卓启苗, 等. 南京紫金山红柴枝种群结构及动态特征[J]. 东北林业大学学报, 2020, 48(1): 29–33. ZHU G Z, DING Y F, ZHUO Q M, et al. Structure and dynamic characteristics of *Meliosma oldhamii* population in Zijin Mountain, Nanjing[J]. J Northeast For Univ, 2020, 48(1): 29–33. DOI: 10.13759/j.cnki.dlxb.2020.01.006.

(责任编辑 王国栋)