

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201812049

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 SX, PENG YS, ZHAN XH, et al. Population structure and numeric dynamics of *Pinus taiwanensis* in Lushan Mountain of Jiangxi Province [J]. *Guihaia*, 2020, 40(2): 247-254.

庐山黄山松种群结构及数量动态研究

周赛霞¹, 彭焱松^{1*}, 詹选怀¹, 张丽¹, 梁同军¹, 刘向平¹, 潘福兴²

(1. 江西省植物迁地保护与利用重点实验室, 江西省中国科学院庐山植物园, 江西 庐山 332900;

2. 江西省寻乌县林业局项山林业工作站, 江西 寻乌 342200)

摘要: 庐山黄山松 (*Pinus taiwanensis*) 广泛分布于海拔 800 m 以上至山顶地段, 在庐山现存植被中占有非常重要的地位。为了更好地了解黄山松在庐山的更新和演替情况, 该文通过对庐山黄山松种群的调查, 以种群径级结构代替年龄结构, 采用“空间代时间”的分析方法, 编制庐山黄山松种群的静态生命表, 结合种群结构动态指数、时间序列平均推移法模型等方法对黄山松的种群结构和数量动态进行了分析。结果表明: (1) 庐山黄山松种群结构呈纺锤形, 幼龄和老龄个体数量较少, 中龄个体多, 目前处于比较稳定的阶段。(2) 黄山松种群死亡高峰出现在第 8 龄级, 个体平均期望寿命第 2 龄级最大, 种群存活曲线属于 Deevy-I 型。(3) 随着时间的推移, 老龄个体逐渐增多, 小径级出现缺失, 种群表现出衰退趋势。建议在保护区经营和管理的过程中, 对黄山松林进行适当的人工抚育, 补植一些适宜的落叶阔叶树种, 以丰富该地区的树种多样性以及群落结构。

关键词: 黄山松, 静态生命表, 种群结构, 种群动态, 庐山

中图分类号: Q948.12 文献标识码: A

文章编号: 1000-3142(2020)02-0247-08

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Population structure and numeric dynamics of *Pinus taiwanensis* in Lushan Mountain of Jiangxi Province

ZHOU Saixia¹, PENG Yansong^{1*}, ZHAN Xuanhuai¹, ZHANG Li¹,
LIANG Tongjun¹, LIU Xiangping¹, PAN Fuxing²

(1. Key Laboratory for Plant Ex-Situ Conservation and Utilization, Lushan Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Lushan 332900, Jiangxi, China; 2. Xiangshan Forestry Station of Xunwu County Forestry Bureau, Xunwu 342200, Jiangxi, China)

Abstract: *Pinus taiwanensis* forest is distributed in an altitude of 800 m above to the peak area widely, which plays an important role in the actual vegetation of Lushan Mountain. In order to understand the population renewal and succession

收稿日期: 2019-05-19

基金项目: 国家自然科学基金(31460078); 中国科学院重点部署项目(KFJ-3W-N01-143); 国家科技基础性工作专项项目(2013FY111500-2-3); 江西省火炬计划项目(20151BBE51003) [Supported by the National Natural Science Foundation of China (31460078); Key Program of Chinese Academy of Sciences (KFJ-3W-N01-143); Basic Work Special Program of the National Ministry of Science and Technology of China (2013FY111500-2-3); Jiangxi Province Torch Plan Program (20151BBE51003)]。

作者简介: 周赛霞(1976-), 女, 湖北武汉人, 硕士, 副研究员, 主要从事植物保护生态学和种群生态学的研究, (E-mail) 454233192@qq.com。

* 通信作者: 彭焱松, 硕士, 副研究员, 主要从事植物分类学和植被生态学的研究, (E-mail) 454260156@qq.com。

of *P. taiwanensis* better, the population structure and numeric dynamics of *P. taiwanensis* were analyzed, through the investigation of the population of the *P. taiwanensis* in Lushan Mountain, by using the analysis method of "Space Generation Time" to comply the static life-table of the population of the *P. taiwanensis* and replacing the age structure to the population diameter level structure, which was combined the dynamic index of population structure and time-sequence model. The results were as follows: (1) The structure of the population of *P. taiwanensis* in Lushan Mountain was spindle-shaped. The number of middle-aged individuals was larger than that of saplings and old individuals, it was in a relatively stable stage at present. (2) The analysis of life-table and functional value curves showed the population had one peak of mortality in age Class 8 and the life expectancy was the highest in age Class 2. The survival curve of the population belonged to Deevey-I type. (3) Time-sequence models for *P. taiwanensis* population predicted that the number of old individuals would increase, the seedlings and saplings would constantly decline; the age structure was stable at present, but the species showed declining trends. We suggest that we should take some appropriate artificial measures for ensuring continuous and steady growth of *P. taiwanensis* populations, and replant some suitable species of broad-leaved trees to enrich the diversity of tree species and community structure in the process of operation and management of this area.

Key words: *Pinus taiwanensis*, static life-table, population structure, population dynamics, Lushan Mountain

以静态生命表编制为核心的种群统计方法近年来广泛用于研究种群数量动态(韩路等,2007;李蒙等,2013;张婕等,2014;张萱蓉等,2017;吴邦利等,2018),在年龄较长或世代重叠的种群中应用价值很大。生命表通过分析种群大小和年龄结构特征来追溯种群过去的生长历史,分析现存状态和更新情况,预测种群未来的发展趋势和稳定性(胡喜生等,2007;黄雅昆等,2015)。不同龄级的个体数量可以表现出种群的天然更新动态(滕毅等,2017),利用种群结构类型量化判定和种群数量动态的时间序列模型等作为数学工具,可以用来构建未来种群结构变化趋势和描述种群不同龄级对环境的适应性和稳定性(李晓笑等,2011)。

黄山松(*Pinus taiwanensis*)为中国特有树种,分布于台湾中央山脉以及福建、浙江、安徽、江西、湖南、湖北和河南南部山地。黄山松性喜阳光,为深根性树种,在土层深厚、排水良好的酸性土壤和向阳山地生长良好,是长江中下游地区海拔700 m以上荒山的重要造林树种,在我国东部亚热带中部中山地区常形成建群优势种(蔡小英等,2008)。近年来关于黄山松的研究逐渐增多,包括分类地位的讨论(季春峰等,2004)、遗传(张利锐等,2011)、生理生化(李淑娴等,2010)、栽培管理(罗世家等,2000)、群落生态(封磊等,2008;任国学等,2011)以及种群生态(吴承祯等,1998;毕晓丽等,2002;宋萍等,2008;蔡小英等,2008;蔡小英,2008;段仁燕等,2009;苏松锦等,2015)等各方面。其中,关于黄山松种群结构和数量动态方面的研

究在平江幕阜山(李家湘等,2004)、福建龙栖山(毕晓丽等,2002)、安徽黄山(罗世家等,1999)、福建武夷山(蔡小英,2008)、浙江省松阳县(张利权,1990)等多个山地展开,研究均表明黄山松的生物学特性和所处生境是主要的限制因素,各个山地黄山松龄级结构完整,在立地条件好的林地,黄山松幼苗幼树均较少,更新受到限制;在山顶或瘠薄地,黄山松种群或群落更稳定。庐山黄山松林主要分布在海拔800 m以上至山顶地段,遍及山体南北,在庐山现存植被中占有重要地位(王良平和卓正大,1989),然而庐山黄山松这方面的研究尚未见报道。本研究选择分布于庐山中海拔地段黄山松种群为研究对象,对该种群的年龄结构和种群数量动态进行分析及预测,旨在为该地区的森林经营和管理提供一点科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究地区自然条件概况

庐山位于江西省北部,长江与鄱阳湖的交汇处,是一座独立的断块山,北临长江,东南濒鄱阳湖,介于115°52'—116°8' E、29°26'—29°41' N之间,最高峰大汉阳峰海拔1 474 m。庐山多年平均温度17.2℃,多年平均降水量2 068.1 mm,冬长夏短,春迟秋早,风大,降水及云雾多,表现为典型的山地气候特征(刘信中和王琅,2010)。庐山黄山松自然种群集中分布在800 m以上的山地,常形成单优建群种或与落叶阔叶树种混交。群落内植

物资源丰富,乔木层以黄山松、石灰花楸(*Sorbus folgneri*)、短柄栎(*Quercus serrata*)、小叶白辛树(*Pterostyrax corymbosus*)、山合欢(*Albizia kalkora*)、三尖杉(*Cephalotaxus fortunei*)等为优势种;灌木层中满山红(*Rhododendron mariesii*)、映山红(*R. sim-sii*)、宜昌荚蒾(*Viburnum erosum*)、格药柃(*Eurya muricata*)数量丰富;草本层主要包括求米草(*Oplismenus undulatifolius*)、淡竹叶(*Lophatherum gracile*)、金星蕨(*Parathelypteris glanduligera*)、杜根藤(*Justicia quadrifaria*)、芒(*Miscanthus sinensis*)等。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置与数据收集 2017年8月,在庐山海拔800~1 000 m黄山松集中分布、群落条件较好的中高海拔地段选择典型黄山松群落,设置4个40 m × 40 m方形大样地。对样地内胸径1 cm以上活立木进行每木调查,记录每个植株的名称、树高、胸径、冠幅、盖度等。同时将每个大样地分成16个10 m × 10 m小样方,调查记录小样方内所有灌木物种组成、地径、高度和盖度,并在每个小样方内设置1个1 m × 1 m样方调查草本植物组成、高度、株数、盖度等信息。

1.2.2 种群径级划分和结构特征分析 同一树种在相同环境下龄级和径级对环境的反应具有一致性(Frost & Rydin, 2000),依据这一特点采用种群径级结构代替年龄结构的方法来分析黄山松的种群结构。根据样地调查数据,采用上限排外法,将胸径(DBH)在1~5 cm以内的植株定义1龄级,其后以4 cm为步长增加一龄级,即 $5 \leq DBH < 9$ 定义为2龄级,依此类推, $33 \text{ cm} \leq DBH < 37 \text{ cm}$ 的植株为第9龄级,因胸径41 cm以上个体只有1株,故将其归并到第10龄级。

参考陈晓德(1998)的种群结构类型量化判定方法,结合Leak(1975)的划分理论确定种群结构类型,利用种群结构的动态指数 V_{pi} 对种群稳定性进行分析,具体计算方法参考申仕康等(2008),变化动态指数 V_{pi} 、 V'_{pi} 与 V_n 为正值、负值或零值的意义分别为整个种群或者相邻年龄级个体数目的增长、衰退或稳定的动态关系。

1.2.3 种群静态生命表和存活曲线 将黄山松全部个体胸径按从小到大的顺序排列,看作是时间顺序关系,统计各径级个体数,编制黄山松的静态生命表(表1),进而分析其动态变化。静态生命表的参数和计算采用生态学传统方法(张婕等,2014;

表1 庐山黄山松种群结构的动态变化指数

Table 1 Dynamic index of population size structure of *Pinus taiwanensis*

种群动态指数级 Population dynamic index level	动态指数值 Dynamic index value (%)
V_1	20.00
V_2	-58.97
V_3	-58.51
V_4	-16.07
V_5	19.64
V_6	40.00
V_7	70.37
V_8	75.00
V_9	-33.33
V_{pi}	14.226
V'_{pi}	0.356

黄雅昆等,2015;滕毅等,2017)。为了进一步分析黄山松种群的动态,引入生存分析中的4个函数:生存函数 S_i 、累积死亡率函数 F_i 、死亡密度函数 $f(t_i)$ 和危险率函数 $\lambda(t_i)$ 。这4个函数的计算参考文献(黄雅昆等,2015;滕毅等,2017)中的公式。

以存活量的对数值 $\ln l_x$ 为纵坐标,以年龄为横坐标作图来得到种群的存活曲线,参照Deevy(1947)的划分方法来确定种群的存活曲线类型,具体方法参考文献(韩路等,2007;胡喜生等,2007)中的方法。

1.2.4 种群数量动态的时间序列预测模型 时间序列分析的一次移动平均法在病虫害预报分析、林业树木生产等领域应用广泛,近年来许多研究者将其应用到植物种群动态研究中(肖宜安等,2004;李晓笑等,2011;解婷婷等,2014)。本文采用此方法对庐山黄山松种群年龄结构进行预测,模型为 $M_t = \frac{1}{n} \sum_{k=t-n+1}^t X_k$ 。式中: n 为预测时间; t 为龄级; M_t 为未来 n 年时 t 龄级的种群存活数; X_k 为当前 k 龄级种群存活数,此次分析 n 取5 a、10 a、20 a 3个预测时间。

2 结果与分析

2.1 种群分布现状及结构特征

据统计,样方内共出现451株黄山松,最大胸

径为 51.6 cm, 平均胸径为 18.92 cm。1~3 龄级 75 株, 占总个体数的 16.63%; 4~7 龄级个体数为 350 株, 占总黄山松的 77.61%; 8~10 龄级 26 株, 个体数较少, 占总个体数的 5.76%。从种群龄级图(图 1)可以看出, 黄山松在每个龄级都有分布, 黄山松个体数随龄级变化呈纺锤形, 较小径级个体数少, 说明黄山松种群幼苗、小树数量不多, 更新不理想; 青壮年个体较多, 种群尚处于稳定状态。

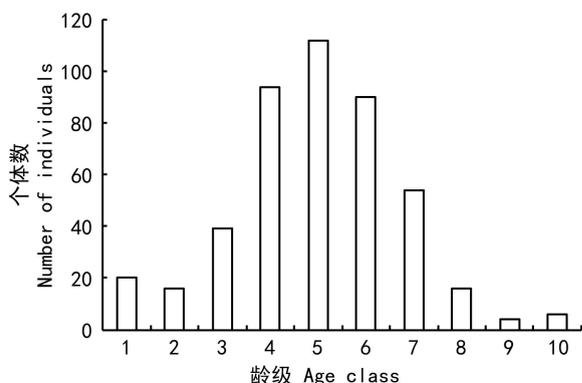


图 1 庐山黄山松种群龄级结构

Fig. 1 Age structure of *Pinus taiwanensis* population

根据陈晓德(1998)量化分析方法进行种群动态分析, 黄山松种群个体数量变化动态指数如表 1, V_2 、 V_3 、 V_4 、 V_9 为负值, 表明龄级 2、龄级 3、龄级 4 与龄级 9 个体比相邻龄级个体数量少, 有衰退发展的趋势; 考虑到 V_{pi} 、 V'_{pi} 均为正值, 说明整个种群结构表现稳定, 但种群结构对随机干扰的敏感性指数 $P = 0.025$, 对外界干扰较为敏感。

2.2 静态生命表及存活曲线

庐山黄山松生命表中出现死亡率为负值的情况, 这虽与数学假设不符, 但仍能用数据的波动性和大小来定性说明种群并非静止不动, 不同龄级在不断发展演替之中。由表 2 可知, 第 2 至第 4 龄级、第 9 龄级死亡率为负值, 表明这几个龄级个体死亡率低, 表现出个体数量少但能稳定向下一龄级过渡的能力。由于庐山中高海拔地段水肥土湿等自然条件更适合一些落叶阔叶树种的生长, 黄山松明显处于竞争的劣势, 造成自然更新状态不良。死亡率高峰出现在第 7 和第 8 龄级, 可能是由于黄山松接近老年期, 出现生理功能的明显衰退, 这也符合自然发展规律, 由此判断黄山松的生理年龄可能出现在第 7 至第 8 龄级。期望寿命 e_x 表

达的是个体的平均生存能力, 黄山松种群平均期望寿命在第 1 至第 3 龄级较大, 表明此阶段黄山松种群生存质量较高, 处于生理活跃期。平均生命期望寿命在第 2 龄级达到最大, 暗示此龄级个体处于生理活动鼎盛期。第 4 至第 9 龄级基本保持稳定, 这可能与此阶段植株通过了环境的选择达到一定的高度和大小后受到较小的竞争所致。消失率与死亡率变化规律相同, 死亡率高的龄级消失率就高, 在本研究中第 7 和第 8 龄级消失率较高。

庐山黄山松存活曲线(图 2)为明显的凸曲线, 划分为 Deevey-I 型, 表明庐山黄山松种群早期死亡率较低, 绝大多数个体能达到较高龄级, 活到该物种生理年龄第 7 至第 8 龄级, 这与前面对死亡率的分析结果相吻合。

2.3 种群生存分析

生存函数曲线(图 3)显示, 庐山黄山松生存函数前期单调上升, 到第 5 龄级达最大值, 之后单调下降; 与之对应的是累积死亡率的变化趋势以第 5 龄级为极低值, 单调性相反。危险率与死亡密度曲线变化趋势相似, 波动性都较小。第 8 龄级时危险率最高, 其次是第 7 龄级, 可能是由于庐山黄山松度过了生理壮年期, 向老年期过度, 出现正常的衰退现象; 死亡密度最高出现在第 7 龄级, 其次是第 6 龄级, 表明这两个龄级死亡个体数较多。4 种生存分析函数曲线显示庐山黄山松种群前期生存状态上升, 中期达到最好状态, 后期生存危险较大的特点, 这与前面存活曲线结果一致。

2.4 庐山黄山松种群数量动态预测

根据一次移动平均法对庐山黄山松 5 a、10 a、20 a 后各龄级种群数量和种群结构动态进行预测, 黄山松种群数量将从目前的 451 株变化到 5 a 后的 439 株, 10 a 后为 431 株, 20 a 后降为 368 株, 各龄级发展趋势见图 4。随着时间的推移, 小龄级个体减少, 逐渐出现了第 1 至 3 龄级的缺失, 老龄个体增多, 20 a 后黄山松发展成老龄林, 表现为种群的全面衰退。可以预测, 若黄山松幼苗幼树得不到及时补充, 种群稳定性将持续下降。

3 讨论

3.1 庐山黄山松的种群结构和动态

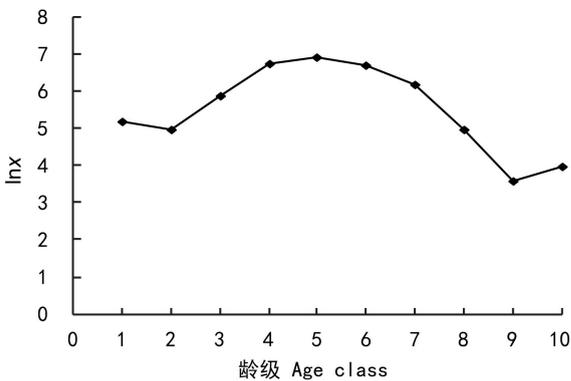
调查样地中, 庐山黄山松龄级结构呈纺锤形, 结合种群结构动态指数 V_n 、种群数量动态的时间

表 2 庐山黄山松种群静态生命表
Table 2 Life-table of *Pinus taiwanensis* population

龄级 Age class	径级 DBH range (cm)	a_x	l_x	d_x	q_x	L_x	T_x	e_x	K_x
1	1~5	20	178.57	35.71	0.20	160.71	3 937.50	22.05	0.22
2	5~9	16	142.86	-205.36	-1.44	245.54	3 776.79	26.44	-0.89
3	9~13	39	348.21	-491.07	-1.41	593.75	3 531.25	10.14	-0.88
4	13~17	94	839.29	-160.71	-0.19	919.64	2 937.50	3.50	-0.18
5	17~21	112	1 000.00	196.43	0.20	901.79	2 017.86	2.02	0.22
6	21~25	90	803.57	321.43	0.40	642.86	1 116.08	1.39	0.51
7	25~29	54	482.14	339.29	0.70	312.50	473.22	0.98	1.22
8	29~33	16	142.86	107.14	0.75	89.29	160.72	1.13	1.39
9	33~37	4	35.71	-17.86	-0.50	44.64	71.43	2.00	-0.41
10	37~52	6	53.57	53.57	1.00	26.79	26.79	0.50	

注: a_x . 存活数; l_x . 存活量; d_x . 死亡数; q_x . 死亡率; L_x . 区间寿命; T_x . 总寿命; e_x . 期望寿命; K_x . 消失率。

Note: a_x . Survival; l_x . Survival quantity; d_x . Death number; q_x . Mortality rate; L_x . Span life; T_x . Total life; e_x . Life expectancy; K_x . Vanish rate.



$\ln x$. 标准化存活量的对数。

$\ln x$. Nature logarithm of standardized survival quantity.

图 2 庐山黄山松存活曲线

Fig. 2 Survival curve of *Pinus taiwanensis* population

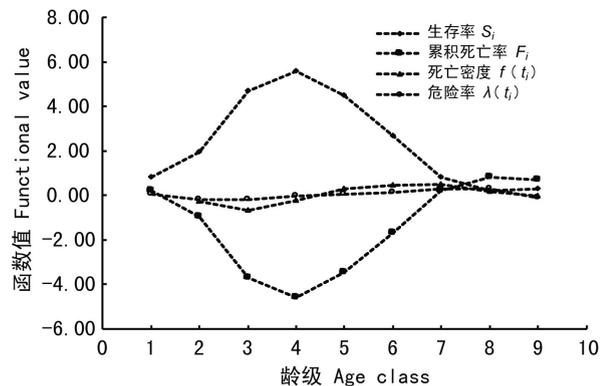


图 3 庐山黄山松种群的生存函数估计

Fig. 3 Survival functional value curves of *Pinus taiwanensis* population

序列预测模型等得出一致的分析结果,分析表明:庐山黄山松种群小龄级个体和老龄个体少,壮年个体多,随着时间的推移,中小龄级个体能进入生理年龄阶段;种群目前较为稳定,但如果更新苗不能及时得到补充,种群将在几十年后面临全面的衰退。庐山黄山松之所以大范围存在,是因为庐山原生性植被大面积破坏后,十九世纪六七十年代飞播或人工种植的黄山松,在各种土壤条件下均可生长,种子更新也较容易,因此在庐山南北山地比较常见。随着庐山封山育林,保护区建设的发展,庐山植被从人工林或次生林逐渐演替为现

如今的各种植被类型。海拔 800 m 以上,作为先锋树种的黄山松,能在林窗内进行天然更新,但随着群落的发展,林下较耐荫的满山红、映山红、宜昌茱萸及其他灌木的存在,极大地妨碍了黄山松更新苗的出现及成长;而且地带性树种石灰花楸、短柄枹、小叶白辛树等阔叶树种的定居,造成林地的荫蔽,进一步导致黄山松更新幼苗幼树难于成活。随着阔叶树种的生长,进入冠层之后,黄山松生长势将进一步减弱,加之黄山松种内竞争的存在,种群虽在一定时间内保持相对稳定,但黄山松种群数量会逐步减少,群落树种已处于更替阶段,群落将演替为针阔混交林或落叶阔叶林,这与浙

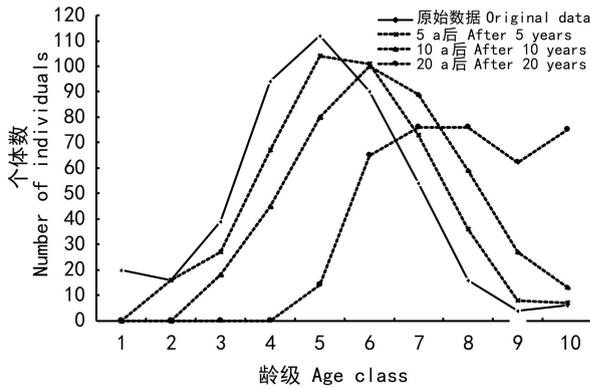


图4 庐山黄山松种群数量动态时间预测

Fig. 4 Time series prediction of dynamics of *Pinus taiwanensis* population

江和福建的黄山松(张利权, 1990; 刘艳会等, 2017)演替规律一致。

黄山松种群结构和数量动态与环境密切相关,是其生物学特征与环境因素共同作用的结果。大量的研究发现,黄山松在不同的生境或者不同生长时期会表现出不同的生态对策(曹光球等, 2002)。随着海拔的升高,黄山松胸径范围会减小(段仁燕, 2009);在海拔较高的山脊陡坡或山顶,黄山松更新好于较低海拔的针阔混交林中(罗世家等, 1999; 李家湘等, 2004);较高海拔黄山松种群稳定性更高(王良平和卓正大, 1989; 罗世家等, 1999; 蔡小英, 2008)。因此,在探讨黄山松种群结构和动态时,一定要充分考虑研究地的立地条件和群落组成。我们的研究结论也支持以上观点。王良平和卓正大(1989)在对黄山松在庐山植被垂直带谱中位置讨论研究后认为,庐山生境条件较好的黄山松是森林次生演替的先锋树种,在自然发展过程中,将被地带性植被落叶阔叶林所取代,处于向阳山顶、岭脊和陡坡等不利于植物生长的高海拔山地,黄山松林才会发展成为稳定的山地温性针叶林。而本文所选样地正好位于生境条件较好的中山地带,我们的分析结果正好印证了王良平和卓正大(1989)的推测。而经过30 a的自然发展,庐山黄山松在立地条件较差的山顶、岩石上、迎风坡地等保持较好的群落,形成了一道道奇特的景观。从庐山实地调查可知,黄山松在这种较为恶劣的生境环境下,形成优势种群,但群落中黄山松幼苗、幼树依然很缺乏,黄山松的生存策略

可能采取以壮年或成年树在群落中优势地位来获取竞争优势,这应当在以后进行相关研究。

在编制静态生命表时,有一些研究者为避免出现物种死亡率、死亡量和消失率为负的情况,会对种群标准存活数进行匀滑处理(苗艳明等, 2008; 范繁荣等, 2008; 李晓笑等, 2011; 万志兵等, 2014),从而得到合理的生态学解释,进而比较容易推断出种群的生活史特征。也有些学者在使用匀滑技术处理之后,发现种群一些指标会出现较大的偏差(项小燕等, 2016),从而掩盖了种群数量波动中的一些生态现象(李晓笑等, 2011)。本文作者在对庐山黄山松采用匀滑技术处理之后发现,纺锤形结构种群标准化存活数会出现较大变动,从而造成死亡率等数据的非波动性,与实际种群数据产生较大的出入,因而舍弃这种数据处理方法。死亡率为负值虽然不能得到生态学解释,但死亡率的波动可以更好地说明种群个体数的消涨状态,这也比较符合种群的生长规律。

3.2 庐山黄山松的现状及管理保护

种群持续发展离不开种群幼苗幼树的补充,如果更新苗供给不足将促使种群向衰退方向发展。黄山松在庐山分布较广,海拔800 m以上至山顶比较常见,在一些悬崖峭壁、山顶坡地常形成单优建群种。由于生境条件的限制,营养条件较好的中海拔地带常形成针阔混交林。从实地调查可知,黄山松虽广泛分布于庐山南北山地,但大都冠幅较小,植株不如阔叶树种高大,不难想象在长期的森林演替过程中必然被阔叶树种所取代。长久以来,庐山中高海拔针叶树种如日本柳杉(*Cryptomeria japonica*)、日本扁柏(*Chamaecyparis obtusa*)、黄山松等形成单优种群,林下灌木、草本植物很难生长,对庐山水土保持、生物多样性恢复、植被演替、冬季冰雪灾害防范等非常不利,因此,鉴于黄山松更新不良现状,建议立足现有种群生存维持的基础上,在悬崖峭壁、山顶坡地,其他树种难以存活的山地,可适当补植黄山松幼苗幼树,人为促进黄山松种群持续稳定发展;在营养条件较好的黄山松近自然恢复过程中,可适当补植一些适宜乡土落叶阔叶树种,如小叶白辛树、短柄枹、山合欢、锥栗(*Castanea henryi*)等,既可平衡群落中黄山松小龄级个体缺失所带来的衰退趋势,又可以人为促进群落演替,增加群落的物种多样性,以加速森林生态系统的平衡和稳定。

参考文献:

- BI XL, HONG W, WU CZ, et al., 2002. Population statistics analysis of *Pinus taiwanensis* [J]. *Sci Silv Sin*, 38(1):66-67. [毕晓丽, 洪伟, 吴承祯, 等, 2002. 黄山松种群统计分析 [J]. *林业科学*, 38(1):66-67.]
- CAI XY, 2008. Population structure and its dynamics of *Pinus taiwanensis* in Wuyi Mountain [D]. Fuzhou: Fujian Agricultural Forestry University. [蔡小英, 2008. 武夷山黄山松种群结构与动态研究 [D]. 福州: 福建农林科技大学.]
- CAI XY, HONG W, WU CZ, et al., 2008. The self-thinning law of *Pinus taiwanensis* natural forest in Wuyishan National Nature Reserve [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 16(5):414-418. [蔡小英, 洪伟, 吴承祯, 等, 2008. 武夷山国家级自然保护区黄山松天然林自然稀疏规律研究 [J]. *热带亚热带植物学报*, 16(5):414-418.]
- CAO GQ, LIN SZ, CAO ZL, et al., 2002. Eco-countermeasure of Chinese fir and its main associated tree species [J]. *J Fujian Coll For*, 22(2):180-183. [曹光球, 林思祖, 曹子林, 等, 2002. 杉木及其主要混交树种生态对策 [J]. *福建林学院学报*, 22(2):180-183.]
- CHEN XD, 1998. A study on the method of quantitative analysis for plant population and community structural dynamics [J]. *Acta Ecol Sin*, 18(2):214-217. [陈晓德, 1998. 植物种群与群落结构动态量化分析方法研究 [J]. *生态学报*, 18(2):214-217.]
- DEEVEY, 1947. Life tables for natural populations of animals [J]. *Quart Rev Biol*, (22):283-314.
- DUAN RY, HUANG MY, WU GL, 2009. Population structure and dynamics of *Pinus taiwanensis* [J]. *Chin J Ecol*, 26(1):35-37, 34. [段仁燕, 黄敏毅, 吴甘霖, 2009. 黄山松种群结构与动态研究 [J]. *生态学杂志*, 26(1):35-37, 34.]
- FAN FR, PAN BZ, MA XQ, et al., 2008. A study on structure and spatial distribution pattern of *Artocarpus hypargyreus* population [J]. *For Res*, 21(2):176-181. [范繁荣, 潘标志, 马祥庆, 等, 2008. 白桂木的种群结构和空间分布格局研究 [J]. *林业科学研究*, 21(2):176-181.]
- FENG L, HONG W, WU CZ, et al., 2008. Niche characteristics of dominant population in *Pinus taiwanensis* forest in Wuyi Mountain [J]. *J Mount Sci*, 26(3):308-316. [封磊, 洪伟, 吴承祯, 等, 2008. 武夷山黄山松林主要种群生态位特征 [J]. *山地学报*, 26(3):308-316.]
- FROST I, RYDIN H, 2000. Spatial pattern and size distribution of the animal-dispersed tree *Quercus robur* in two spruce-dominated forests [J]. *Ecoscience*, 7(1):38-44.
- HAN L, WANG HZ, ZHOU ZL, et al., 2007. Population structure and demography of *Populus euphraticu* in upper and middle reaches of Tarim River [J]. *Acta Ecol Sin*, 27(4):1315-1321. [韩路, 王海珍, 周正立, 等, 2007. 塔里木河上、中游胡杨种群结构与统计分析 [J]. *生态学报*, 27(4):1315-1321.]
- HU XS, HONG W, WU CZ, et al., 2007. Analysis of the life table of natural population *Schima superba* [J]. *Guihaia*, 27(3):469-474. [胡喜生, 洪伟, 吴承祯, 等, 2007. 木荷天然种群生命表分析 [J]. *广西植物*, 27(3):469-474.]
- HUANG YK, WANG DX, ZHANG HW, et al., 2015. Quantitative characteristics of *Quercus glandulifera* var. *brevipetiolata* population in Foping National Reserve of Qinling Mountains [J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 35(3):594-600. [黄雅昆, 王得祥, 张洪武, 等, 2015. 秦岭佛坪自然保护区短柄栎种群的数量特征 [J]. *西北植物学报*, 35(3):594-600.]
- JI CF, ZOU HY, XIANG QB, 2004. Research progress on *Pinus taiwanensis* [J]. *J Anhui Agric Univ*, 31(1):111-114. [季春峰, 邹惠渝, 向其柏, 2004. 黄山松研究进展 [J]. *安徽农业大学学报*, 31(1):111-114.]
- LEAK WB, 1975. Age distribution in *Virginred spruce* and Northern Hardwoods [J]. *Ecology*, 56:1451-1454.
- LI JX, ZHAO LJ, HUANG ZP, 2004. Study on the characteristics and succession rules of *Pinus taiwanensis* community in the Mufu Mount in Pingjiang County of Hunan [J]. *Hunan For Sci Technol*, 31(5):17-20. [李家湘, 赵丽娟, 黄展鹏, 2004. 平江幕阜山黄山松群落特征及其演替规律的探讨 [J]. *湖南林业科技*, 31(5):17-20.]
- LI M, YAN BX, ZHAO CG, et al., 2013. Numeric and structural characteristics of *Cerasus serrulata* population around the high-elevation wetlands of Dayangshan [J]. *J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed)*, 37(5):40-44. [李蒙, 严邦祥, 赵昌高, 等, 2013. 大仰山高山湿地山樱花种群数量结构特征 [J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 37(5):40-44.]
- LI SX, TAN Y, CHEN Y, et al., 2010. Variation trends of physiological and biochemical indexes of *Pinus taiwanensis* with increasing elevation [J]. *J NE For Univ*, 38(6):9-11. [李淑娴, 谭艳, 陈颖, 等, 2010. 黄山松不同生理生化指标随海拔高度变化趋势 [J]. *东北林业大学学报*, 38(6):9-11.]
- LI XX, WANG QC, CUI GF, et al., 2011. Structure and dynamic characteristics of a wild population of endangered *Abies fanjingshanensis* [J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 31(7):1479-1486. [李晓笑, 王清春, 崔国发, 等, 2011. 濒危植物梵净山冷杉野生种群结构及动态特征 [J]. *西北植物学报*, 31(7):1479-1486.]
- LIU YH, LIU JF, HE ZS, et al., 2017. *Pinus taiwanensis* community composition and structure based on fixed sample Daiyun Mountain [J]. *Guihaia*, 37(7):881-890. [刘艳会, 刘金福, 何中声, 等, 2017. 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*, 37(7):881-890.]
- LIU XZ, WANG L, 2010. Scientific survey and study of biodiversity on the Lushan Nature Reserve in Jiangxi Province [M]. Beijing: Science Press: 3-4. [刘信中, 王琅, 2010. 江西省庐山自然保护区生物多样性考察与研究 [M]. 北京: 科学出版社: 3-4.]
- LUO SJ, ZOU HY, YU SM, et al., 1999. Quantitative characteristics of *Pinus hwangshanensis* population [J]. *For Sci Technol*, 24(4):1-4. [罗世家, 邹惠渝, 于盛明, 等, 1999. 黄山松种群的数量特征 [J]. *林业科技*, 24(4):1-4.]
- LUO SJ, YI YM, 2000. Germination percentage and complex

- stressing vigor test (CSVT) of Huangshan pine (*Pinus huangshanensis*) [J]. J Hubei Inst Natl (Nat Sci Ed), 18(2): 27-29. [罗世家, 易咏梅, 2000. 黄山栎种子发芽率及活力的测定 [J]. 湖北民族学院学报(自然科学版), 18(2): 27-29.]
- MIAO YM, LIU RT, BI RC, 2008. Population structure and dynamics of *Pinus tabulaeformis* in Huoshan Mountain of Shanxi Province [J]. J Wuhan Bot Res, 26(3): 288-293. [苗艳明, 刘任涛, 毕润成, 2008. 山西霍山油松种群结构和动态研究 [J]. 武汉植物学研究, 26(3):288-293.]
- REN GX, LIU JF, XU DW, et al., 2011. Analysis on classification and species diversity of *Pinus taiwanensis* community in Daiyun Mountain National Nature Reserve [J]. J Plant Resour Environ, 20(3): 82-88. [任国学, 刘金福, 徐道炜, 等, 2011. 戴云山国家级自然保护区黄山松群落类型与物种多样性分析 [J]. 植物资源与环境学报, 20(3):82-88.]
- SHEN SK, MA HY, WANG YH, et al., 2008. The structure and dynamics of natural population of the endangered plant *Euryodendron excelsum* H. T. Chang [J]. Acta Ecol Sin, 28(5): 2404-2412. [申仕康, 马海英, 王跃华, 等, 2008. 濒危植物血木(*Euryodendron excelsum* H. T. Chang)自然种群结构及动态 [J]. 生态学报, 28(5):2404-2412.]
- SONG P, HONG W, WU CZ, et al., 2008. Spatial distribution pattern of natural *Pinus taiwanensis* population in Shouning County [J]. Acta Agric Univ Jiangxi, 30(5):829-832. [宋萍, 洪伟, 吴承祯, 等, 2008. 天然黄山松种群空间分布格局研究 [J]. 江西农业大学学报, 30(5):829-832.]
- SU SJ, LIU JF, MA RF, et al., 2015. Spatial distribution patterns and associations of *Pinus taiwanensis* population in Daiyun Mountain, Southeast China [J]. Res Sci, 37(4): 841-848. [苏松锦, 刘金福, 马瑞丰, 等, 2015. 戴云山黄山松种群的空间分布格局与关联性 [J]. 资源科学, 37(4):841-848.]
- TENG Y, ZHANG Q, KANG XG, et al., 2017. Population structures and dynamics of *Abies nephrolepis* in Changbai Mountain [J]. J Centr S Univ For Technol, 37(3):49-56. [滕毅, 张青, 亢新刚, 等, 2017. 长白山臭冷杉种群结构与动态 [J]. 中南林业科技大学学报, 37(3):49-56.]
- WAN ZB, LIU CG, ZU HH, 2014. Population structure dynamics of *Pinus massoniana* secondary forest in Jiling Mountain of Huangshan [J]. J Jinggangshan Univ (Nat Sci Ed), 35(6): 107-113. [万志兵, 刘成功, 祖浩浩, 2014. 黄山市稽灵山次生马尾松种群数量动态 [J]. 井冈山大学学报(自然科学版), 35(6):107-113.]
- WANG LP, ZHUO ZD, 1989. On the positional problem of the *Pinus taiwanensis* forest in the vegetation altitude belts of Mt. Lushan [J]. Acta Phytoecol Geobot Sin, 13(1): 28-35. [王良平, 卓正大, 1989. 论黄山松林在庐山植被垂直带谱中的位置 [J]. 植物生态学与地植物学学报, 13(1): 28-35.]
- WU BL, LONG CL, QIN ST, 2018. Population structure and its quantity dynamics of *Acer catalpifolium* of karst forest in Maolan National Natural Reserve [J]. Acta Bot Boreal-Occident Sin, 38(10): 1918-1926. [吴邦利, 龙翠玲, 秦随涛, 2018. 茂兰喀斯特森林栎叶槭种群结构与数量动态 [J]. 西北植物学报, 38(10):1918-1926.]
- WU CZ, HONG W, LIN CL, 1998. Study on quantitative dynamics of *Pinus taiwanensis* population [J]. J Zhejiang For Coll, 15(3):274-279. [吴承祯, 洪伟, 林成来, 1998. 黄山松种群数量动态研究 [J]. 浙江林学院学报, 15(3): 274-279.]
- XIANG XY, WU GL, DUAN RY, et al., 2016. Studies on population structure and dynamics of *Pinus dabeshanensis* [J]. Res Environ Yang Basin, 25(1):55-62. [项小燕, 吴甘霖, 段仁燕, 等, 2016. 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, 25(1):55-62.]
- XIAO YA, HE P, LI XH, et al., 2004. Study on numeric dynamics of natural populations of the endangered species *Dianthus cercidifolius* var. *ongipes* [J]. Chin J Plant Ecol, 28(2):252-257. [肖宜安, 何平, 李晓红, 等, 2004. 濒危植物长柄双花木自然种群数量动态 [J]. 植物生态学报, 28(2):252-257.]
- XIE TT, SU PX, ZHOU ZJ, et al., 2014. Structure and dynamic characteristics of *Calligonum mongolicum* population in the desert-oasis ecotone [J]. Acta Ecol Sin, 34(5): 4272-4279. [解婷婷, 苏培玺, 周紫鹃, 等, 2014. 荒漠绿洲过渡带沙拐枣种群结构及动态特征 [J]. 生态学报, 34(5):4272-4279.]
- ZHANG J, SHANGGUAN TL, DUAN YH, et al., 2014. Age structure and dynamics of *Quercus wutaishanica* population in Lingkong Mountain of Shanxi Province, China [J]. Chin J Appl Ecol, 25(11): 3125-3130. [张婕, 上官铁梁, 段毅豪, 等, 2014. 灵空山辽东栎种群年龄结构与动态 [J]. 应用生态学报, 25(11):3125-3130.]
- ZHANG LR, 1990. The age structure and spatial pattern of population of *Pinus taiwanensis* in Songyang County, Zhejiang Province [J]. Acta Phytoecol Geobot Sin, 14(4): 328-335. [张利权, 1990. 浙江省松阳县黄山松种群的年龄结构与分布格局 [J]. 植物生态学与地植物学学报, 14(4): 328-335.]
- ZHANG LR, PENG YL, REN GP, et al., 2011. Population genetic diversity and species divergence of *Pinus massoniana* and *P. huangshanensis* at two nucleotide loci [J]. Chin J Plant Ecol, 35(5):531-538. [张利锐, 彭艳玲, 任广朋, 等, 2011. 马尾松和黄山松两个核基因位点的群体遗传多样性和种间分化 [J]. 植物生态学报, 35(5):531-538.]
- ZHANG XR, LI D, YANG XB, et al., 2017. Structure and dynamic characteristics of wild longan population in Dongfang City, Hainan [J]. Guihaia, 37(4): 417-425. [张萱蓉, 李丹, 杨小波, 等, 2017. 海南省东方市野生龙眼种群动态特征研究 [J]. 广西植物, 37(4): 417-425.]