

# 福建天宝岩国家级自然保护区猴头杜鹃天然种群数量动态和稳定性分析

穆振北<sup>1a,1b</sup>, 陈妍<sup>1a,1b</sup>, 王李睿<sup>1a,1b</sup>, 李宁<sup>1a,1b</sup>, 游巍斌<sup>1a,1b</sup>, 刘进山<sup>2</sup>, 蔡昌棠<sup>2</sup>, 何东进<sup>1a,1b,①</sup>

(1. 福建农林大学: a. 林学院, b. 福建省南方森林资源与环境工程技术研究中心, 福建 福州 350002;

2. 福建天宝岩国家级自然保护区, 福建 永安 366032)

**摘要:** 对福建天宝岩国家级自然保护区 4 个猴头杜鹃(*Rhododendron simiarum* Hance) 天然种群进行调查, 分析了猴头杜鹃种群的龄级结构、静态生命表、存活曲线和死亡率曲线以及猴头杜鹃林稳定性, 并用时间序列模型和动态指数预测猴头杜鹃种群的发展和演变。结果显示: 4 个猴头杜鹃种群属于增长型和稳定型, 基径在 2.5 cm 及以下的幼苗个体数较多, 中高龄级个体数少但分布较均匀。随着龄级的增加, 猴头杜鹃种群的生命期望先升高后逐步降低, 死亡率则先降低后逐步升高。猴头杜鹃种群的存活曲线大致符合 Deevey-III 型。稳定性分析结果显示: 仅猴头杜鹃纯林相对稳定, 其他 3 个猴头杜鹃混交林均不稳定。时间序列预测结果和动态指数显示: 猴头杜鹃种群呈现逐步增加、发展稳定的特征; 未来中低龄级个体数明显增加, 高龄级个体数无明显变化, 但易受外部环境影响。总体上看, 虽然福建天宝岩国家级自然保护区猴头杜鹃种群呈增长型和稳定型, 且生存环境较为稳定, 但种群整体面临激烈的生存竞争, 幼苗存活率较低, 种群结构略失衡。

**关键词:** 猴头杜鹃; 龄级结构; 静态生命表; 种群动态; 稳定性指数

中图分类号: Q948.15; S685.21 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2021)01-0044-08

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2021.01.06

**Analyses on quantitative dynamics and stability of *Rhododendron simiarum* population in Tianbaoyan National Nature Reserve of Fujian** MU Zhenbei<sup>1a,1b</sup>, CHEN Yan<sup>1a,1b</sup>, WANG Lirui<sup>1a,1b</sup>, LI Ning<sup>1a,1b</sup>, YOU Weibin<sup>1a,1b</sup>, LIU Jinshan<sup>2</sup>, CAI Changtang<sup>2</sup>, HE Dongjin<sup>1a,1b,①</sup> (1. Fujian Agriculture and Forestry University: a. College of Forestry, b. Fujian Southern Forest Resources and Environmental Engineering Technology Research Center, Fuzhou 350002, China; 2. Tianbaoyan National Nature Reserve of Fujian, Yong'an 366032, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2021, 30(1): 44-51, 68

**Abstract:** Four natural populations of *Rhododendron simiarum* Hance in Tianbaoyan National Nature Reserve of Fujian were investigated, the age class structure, static life table, survival curve, and mortality rate curve of *R. simiarum* population and stability of *R. simiarum* forest were analyzed, and the time series model and dynamic index were used to predict the development and evolution of *R. simiarum* population. The results show that four *R. simiarum* populations belong to growth type and stable type, the individual number of seedlings with basal diameter at 2.5 cm or below is more, and those of middle and high age classes are less but their distribution are more even. With the increase of age class, the life expectancy of *R. simiarum* population increases first and then decreases gradually, while the mortality rate decreases first and then increases gradually. The survival curve of *R. simiarum* population is similar to Deevey-III type. The result of stability analysis shows that only *R. simiarum* pure forest is relatively

收稿日期: 2020-08-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31370624); 福建农林大学科技创新项目(KF2015032; KF2015033)

作者简介: 穆振北(1995—), 男, 河北沧州人, 硕士研究生, 主要从事植物地理学与自然资源利用方面的研究。

①通信作者 E-mail: fjhdj1009@126.com

引用格式: 穆振北, 陈妍, 王李睿, 等. 福建天宝岩国家级自然保护区猴头杜鹃天然种群数量动态和稳定性分析[J]. 植物资源与环境学报, 2021, 30(1): 44-51, 68.

stable, and other three *R. simiarum* mixed forests are unstable. The time series prediction result and dynamic index show that *R. simiarum* population has the characteristics of gradual increase and stable development. In the future, the individual numbers of low and middle age classes increase obviously, and that of high age class has no obvious change, but it is vulnerable to the external environment. On the whole, although *R. simiarum* population in Tianbaoyan National Nature Reserve of Fujian belongs to growth type and stable type, and the living environment is relatively stable, the population as a whole is facing fierce competition, the survival rate of seedlings is low, and the population structure is slightly unbalanced.

**Key words:** *Rhododendron simiarum* Hance; age class structure; static life table; population dynamics; stability index

种群数量动态是植物种群生态学研究极为重要的内容,能够体现植物种群结构的时间动态变化以及演替趋势<sup>[1-3]</sup>。种群数量特征反映了植物种群与生存环境的适合程度和受干扰程度,可根据种群数量特征推测植物种群未来的演变特征<sup>[4-5]</sup>。种群动态变化是森林生态学的研究热点<sup>[6]</sup>,研究植物种群数量特征和种群动态变化,能够增进对植物生存状况、稳定性和演化趋势的了解,对植物种群的更新、演替及其所在生态系统的保护和恢复具有科学意义<sup>[7]</sup>。

猴头杜鹃(*Rhododendron simiarum* Hance)隶属于杜鹃花科(Ericaceae)杜鹃花属(*Rhododendron* Linn.),为分布较广泛的常绿灌木,多见于山地苔藓矮曲林。猴头杜鹃矮林是中国亚热带山顶矮林中分布最广泛的植被群系<sup>[8-9]</sup>,也是亚热带东部常绿阔叶林中最具代表性的地形顶极群落<sup>[10]</sup>。猴头杜鹃所在的亚热带天然阔叶林生境多样、物种组成极为丰富,各类植物群落的空间结构、数量特征、生态功能和动态演化等差异明显<sup>[3,11],[12]2</sup>。福建天宝岩国家级自然保护区景观格局的分布规律在中亚热带具有极为典型的代表性<sup>[13]</sup>,猴头杜鹃在该保护区大面积集中分布,这在全国范围内十分罕见。福建天宝岩国家级自然保护区自成立以来,主要研究集中在长苞铁杉(*Tsuga longibracteata* W. C. Cheng)倒木分解以及森林生态系统组成与环境因子差异<sup>[14-18]</sup>等方面,但是对广泛分布的猴头杜鹃,只见对其分布格局的初步研究<sup>[19]</sup>,缺乏对猴头杜鹃种群保育与动态演替方面的研究,且对种群的生存状况也无深入了解,制约了对该种的合理利用和保护<sup>[20]</sup>,因此,亟待开展更为系统的猴头杜鹃种群调查研究。

鉴于此,作者以分布于福建天宝岩国家级自然保护区的猴头杜鹃天然种群为研究对象,对猴头杜鹃种群的龄级特征、生存状况和稳定性进行定量研究,分

析研究猴头杜鹃种群的静态生命表、存活曲线和死亡率曲线,并采用动态指数<sup>[5,21]</sup>和时间序列模型<sup>[22-23]</sup>预测猴头杜鹃种群的未来演变,以期为科学管理和合理利用猴头杜鹃天然林资源提供准确的理论支撑,并为福建天宝岩国家级自然保护区的物种多样性保护、森林景观多样性保护和种质资源库建立提供科学依据。

## 1 研究区概况和研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于福建省永安市的福建天宝岩国家级自然保护区内(东经 117°28'03"~117°35'28"、北纬 25°50'51"~26°01'20"),地理位置属中亚热带南缘。该保护区总面积 110.154 km<sup>2</sup>,其中核心区面积 34.012 km<sup>2</sup>;最高海拔 1 605 m,最低海拔 580 m。森林覆盖率达 96.8%。福建天宝岩国家级自然保护区属中亚热带海洋性季风气候,年均气温 15 ℃,7 月平均气温 23 ℃,1 月平均气温 5 ℃,无霜期约 290 d,年均降水量 2 039 mm,降水主要集中于 5 月至 9 月,年均空气相对湿度在 80%以上。

该保护区内动植物资源极为丰富,约有 640 余种 3 200 余种,其中维管植物有 185 科 688 属 1 512 种<sup>[12]4</sup>,植被种类主要为亚热带和热带植物,植被呈南亚热带到中亚热带过渡性地带的典型特征,最具代表性的保护物种为广泛分布的长苞铁杉和猴头杜鹃。保护区内土壤类型垂直分异明显,海拔 800 m 以下区域的土壤以砂岩和花岗岩自然风化发育形成的红壤为主;海拔 800~1 350 m 区域的土壤以山地黄壤为主;海拔 1 350 m 以上区域的土壤多为山地黄壤,且部分山间盆地发育有泥炭土<sup>[12]4,[24]</sup>。

### 1.2 研究方法

1.2.1 样地设置和数据调查 根据实际调查以及作

者所在课题组前期的研究结果,面积较大的猴头杜鹃林位于海拔 1 100~1 500 m 的近山顶区域,面积达 106.7 hm<sup>2</sup>,其中纯林约占 37.7%。猴头杜鹃林中共有植物 53 种,隶属于 24 科 31 属<sup>[12]</sup>,主要树种有猴头杜鹃、长苞铁杉、青冈〔*Cyclobalanopsis glauca* (Thunb.) Oerst.〕和深山含笑 (*Michelia maudiae* Dunn) 等。由于伴生树种较多,根据物种重要值,选取 4 个猴头杜鹃天然种群,即:位于猴头杜鹃纯林 (FRS) 的猴头杜鹃种群 (RS),位于猴头杜鹃-长苞铁杉混交林 (FRT) 的猴头杜鹃种群 (RT),位于猴头杜鹃-阔叶树混交林 (FRB) 的猴头杜鹃种群 (RB),位于猴头杜鹃-长苞铁杉-阔叶树混交林 (FRTB) 的猴头杜鹃种群 (RTB),其中,阔叶树主要为青冈和深山含笑等。

在前期全面踏查的基础上,于 2018 年 10 月对福建天宝岩国家级自然保护区的猴头杜鹃纯林与混交

林进行调查。选取分布较为集中且基本无人为干扰的地段,在猴头杜鹃纯林、猴头杜鹃-长苞铁杉混交林、猴头杜鹃-阔叶树混交林和猴头杜鹃-长苞铁杉-阔叶树混交林均设置面积 20 m×30 m 的样地 3 个,共 12 个。采用相邻格子法进行调查,在每个样地内设置 6 个面积 10 m×10 m 的样方。对各样方内基径大于 2.5 cm 的猴头杜鹃植株,记录其个体数,并进行每木检尺,通过测量树冠投影的方法<sup>[25]</sup>使用卷尺(精度 1 cm)测量植株的冠幅,使用围径尺(精度 1 mm)测量植株地面处的基径,使用红外树木测高仪(精度 1 cm)测量植株的树高(地面至树冠顶部),所有指标重复测量 3 次。若某个树桩有多个无性系分株,只记录基径大于 2.5 cm 的分株。对于基径小于等于 2.5 cm 的猴头杜鹃植株以及林下其他乔木、灌木和草本植物等,只记录种名和个体数。各猴头杜鹃林的基本情况见表 1。

表 1 福建天宝岩国家级自然保护区猴头杜鹃林的基本情况

Table 1 Basic situation of *Rhododendron simiarum* Hance forest in Tianbaoyan National Nature Reserve of Fujian

林型 <sup>1)</sup> Forest type <sup>1)</sup>	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔/m Altitude	坡度/(°) Slope	郁闭度/% Canopy density	样地面积/m <sup>2</sup> Plot area
FRS	E117°33'09"	N25°55'14"	1 516	31	85	1 800
FRT	E117°32'54"	N25°55'25"	1 335	9	90	1 800
FRB	E117°32'52"	N25°54'46"	1 358	15	87	1 800
FRTB	E117°32'14"	N25°55'35"	1 237	20	87	1 800

<sup>1)</sup> FRS: 猴头杜鹃纯林 *Rhododendron simiarum* pure forest; FRT: 猴头杜鹃-长苞铁杉混交林 *R. simiarum-Tsuga longibracteata* mixed forest; FRB: 猴头杜鹃-阔叶树混交林 *R. simiarum-broad-leaved tree* mixed forest; FRTB: 猴头杜鹃-长苞铁杉-阔叶树混交林 *R. simiarum-T. longibracteata-broad-leaved tree* mixed forest.

1.2.2 静态生命表编制 由于准确测得树木年龄且不伤害树木极为困难,且在相同生境条件下,同种树木胸径与树龄呈正相关<sup>[5]</sup>,本研究采用空间推时间的方法,以树木的径级度量其龄级<sup>[1,25-26]</sup>,根据猴头杜鹃各林型的实际测查情况按照基径 (BD) 进行划分,0.0 cm<BD≤2.5 cm 为 I 龄级,2.5 cm<BD≤5.0 cm 为 II 龄级,5.0 cm<BD≤7.5 cm 为 III 龄级,7.5 cm<BD≤10.0 cm 为 IV 龄级,10.0 cm<BD≤12.5 cm 为 V 龄级,12.5 cm<BD≤15.0 cm 为 VI 龄级,15.0 cm<BD≤20.0 cm 为 VII 龄级,BD>20.0 cm 为 VIII 龄级。统计各龄级的个体数,编制猴头杜鹃种群的静态生命表。

1.2.3 时间序列预测 根据猴头杜鹃种群各龄级个体数的调查数据,用移动平均法<sup>[21-22]</sup>预测种群的龄级结构。

1.2.4 群落稳定性评价 利用 M. Godron 稳定性指数法<sup>[27]</sup>对猴头杜鹃林稳定性进行评价,并克服传统方法的弊端。根据物种相对频度和物种总数的倒数累计值建立数学模型,用平滑曲线模拟多项式方程和两点之间的交点坐标判断群落的稳定性。以 (20, 80) 为群落的稳定坐标点,交叉坐标点越接近 (20, 80),群落越稳定<sup>[27-28]</sup>。

1.2.5 种群年龄结构的数量动态 运用陈晓德<sup>[29]</sup>的种群结构动态量化分析方法,更为客观、准确地评价猴头杜鹃种群的动态变化。推导猴头杜鹃种群龄级间的数量变化动态,对种群动态 ( $V$ ) 进行定量描述,龄级间动态指数 ( $V_n$ )、龄级结构动态指数 ( $V_{pi}$ )、外部干扰纳入影响因子后的龄级结构动态指数 ( $V'_{pi}$ ) 取正值、负值、零的意义分别反映种群或相邻龄级个体数的增长、衰退、稳定的动态关系<sup>[7]</sup>。

### 1.3 数据统计及分析

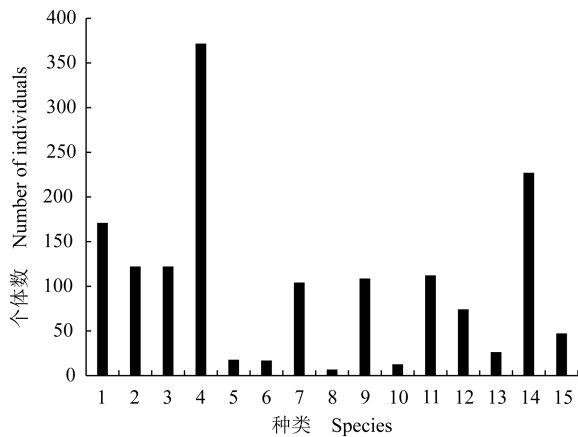
采用 EXCEL 2007 和 R 语言 3.5.1 软件对数据进行统计、处理和分析。

## 2 结果和分析

### 2.1 猴头杜鹃林物种组成及结构特征

猴头杜鹃林植物种类多样, 常见乔木、灌木和草本植物的种类和数量见图 1。由图 1 可见: 猴头杜鹃林中不同种类的数量差异较大, 除猴头杜鹃外, 新木姜子 [*Neolitsea aurata* (Hay.) Koidz.]、格药铃 (*Eurya muricata* Dunn)、厚皮香 [*Ternstroemia gymnanthera* (Wight et Arn.) Beddome]、箬竹 [*Indocalamus tessellatus* (Munro) Keng f.]、日本粗叶木 (*Lasianthus japonicus* Miq.) 和肾蕨 [*Nephrolepis auriculata* (Linn.) Trimen] 等种类数量较多; 白灯笼 (*Clerodendrum fortunatum* Linn.)、双蝴蝶 [*Tripterispermum chinense* (Migo) H. Smith]、罗浮槭 (*Acer fabri* Hance) 和豆腐柴 (*Premna microphylla* Turcz.) 种类数量很少。

福建天宝岩国家级自然保护区猴头杜鹃种群的龄级结构见表 2。由表 2 可见: 4 个猴头杜鹃种群中



1: 新木姜子 *Neolitsea aurata* (Hay.) Koidz.; 2: 格药铃 *Eurya muricata* Dunn; 3: 厚皮香 *Ternstroemia gymnanthera* (Wight et Arn.) Beddome; 4: 猴头杜鹃 *Rhododendron simiarum* Hance; 5: 白灯笼 *Clerodendrum fortunatum* Linn.; 6: 双蝴蝶 *Tripterispermum chinense* (Migo) H. Smith; 7: 箬竹 *Indocalamus tessellatus* (Munro) Keng f.; 8: 罗浮槭 *Acer fabri* Hance; 9: 青冈 *Cyclobalanopsis glauca* (Thunb.) Oerst.; 10: 豆腐柴 *Premna microphylla* Turcz.; 11: 日本粗叶木 *Lasianthus japonicus* Miq.; 12: 红鳞蒲桃 *Syzygium hancei* Merr. et Perry; 13: 深山含笑 *Michelia maudiae* Dunn; 14: 肾蕨 *Nephrolepis auriculata* (Linn.) Trimen; 15: 长苞铁杉 *Tsuga longibracteata* W. C. Cheng.

图 1 福建天宝岩国家级自然保护区猴头杜鹃林植物的种类和数量  
Fig. 1 Species and number of plants in *Rhododendron simiarum* Hance forest in Tianbaoyan National Nature Reserve of Fujian

猴头杜鹃共有 372 株, 其中位于猴头杜鹃纯林的猴头杜鹃种群 (RS) 中猴头杜鹃个体数最多, 有 152 株, 占比高达 40.9%; 位于猴头杜鹃-长苞铁杉混交林的猴头杜鹃种群 (RT) 中猴头杜鹃个体数最少, 仅 43 株, 占比 11.6%; 位于猴头杜鹃-阔叶树混交林的猴头杜鹃种群 (RB) 和位于猴头杜鹃-长苞铁杉-阔叶树混交林的猴头杜鹃种群 (RTB) 的猴头杜鹃个体数居中, 分别为 80 和 97 株。

由表 2 还可见: 4 个猴头杜鹃种群中, I [0.0 cm<基径 (BD) ≤2.5 cm] 龄级的猴头杜鹃幼苗有 190 株, 占比高达 51.1%, 其余龄级个体数较少, II (2.5 cm<BD≤5.0 cm) 和 VIII (BD>20.0 cm) 龄级个体数最少。说明猴头杜鹃种群中幼苗比例较大, 且存在一定比例的中龄、成龄和高龄植株。RS 和 RB 种群包含各龄级植株, 属于稳定型种群。RT 和 RTB 种群中 VI (12.5 cm<BD≤15.0 cm)、VII (15.0 cm<BD≤20.0 cm) 和 VIII 龄级个体数极少或无, 低龄级个体数较多, 属于增长型种群。

由于测量幼苗树高和基径的意义较小, 所以种群生长情况调查时不计入。福建天宝岩国家级自然保护区猴头杜鹃种群成年植株 (BD>2.5 cm) 的生长状况见表 3。由表 3 还可见: 不同猴头杜鹃种群中猴头杜鹃成年植株的平均树高差异较大, RS 种群的平均树高为 10.32 m, RT 种群的平均树高仅 4.94 m。各种群猴头杜鹃成年植株个体数也差异较大, RS 种群有

表 2 福建天宝岩国家级自然保护区猴头杜鹃种群的龄级结构  
Table 2 Age class structure of *Rhododendron simiarum* Hance population in Tianbaoyan National Nature Reserve of Fujian

种群 <sup>1)</sup> Population <sup>1)</sup>	不同龄级的个体数 <sup>2)</sup> Number of individuals in different age classes <sup>2)</sup>							
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
RS	72	1	16	14	11	7	19	12
RT	30	1	4	6	1	1	—	—
RB	36	11	9	6	10	12	9	4
RTB	52	3	8	13	4	—	—	—
总计 Total	190	16	37	39	26	20	28	16

<sup>1)</sup> RS: 位于猴头杜鹃纯林的猴头杜鹃种群 *Rhododendron simiarum* population in *R. simiarum* pure forest; RT: 位于猴头杜鹃-长苞铁杉混交林的猴头杜鹃种群 *R. simiarum* population in *R. simiarum-Tsuga longibracteata* mixed forest; RB: 位于猴头杜鹃-阔叶树混交林的猴头杜鹃种群 *R. simiarum* population in *R. simiarum-broad-leaved tree mixed forest*; RTB: 位于猴头杜鹃-长苞铁杉-阔叶树混交林的猴头杜鹃种群 *R. simiarum* population in *R. simiarum-T. longibracteata-broad-leaved tree mixed forest*.

<sup>2)</sup> I: 0.0 cm<BD≤2.5 cm; II: 2.5 cm<BD≤5.0 cm; III: 5.0 cm<BD≤7.5 cm; IV: 7.5 cm<BD≤10.0 cm; V: 10.0 cm<BD≤12.5 cm; VI: 12.5 cm<BD≤15.0 cm; VII: 15.0 cm<BD≤20.0 cm; VIII: BD>20.0 cm. BD: 基径 Basal diameter. —: 无数据 No datum.

表3 福建天宝岩国家级自然保护区猴头杜鹃种群成年植株(基径大于2.5 cm)的生长状况

Table 3 Growth status of adult plant (basal diameter above 2.5 cm) of *Rhododendron simiarum* Hance population in Tianbaoyan National Nature Reserve of Fujian

种群 <sup>1)</sup> Population <sup>1)</sup>	个体数 Number of individuals	平均树高/m Mean height	平均基径/cm Mean basal diameter	平均冠幅/m Mean crown width
RS	80	10.32	12.56	3.68
RT	13	4.94	8.21	3.57
RB	61	6.82	10.73	3.24
RTB	28	8.88	8.57	3.60

<sup>1)</sup> RS: 位于猴头杜鹃纯林的猴头杜鹃种群 *Rhododendron simiarum* population in *R. simiarum* pure forest; RT: 位于猴头杜鹃-长苞铁杉混交林的猴头杜鹃种群 *R. simiarum* population in *R. simiarum*-*Tsuga longibracteata* mixed forest; RB: 位于猴头杜鹃-阔叶树混交林的猴头杜鹃种群 *R. simiarum* population in *R. simiarum*-broad-leaved tree mixed forest; RTB: 位于猴头杜鹃-长苞铁杉-阔叶树混交林的猴头杜鹃种群 *R. simiarum* population in *R. simiarum*-*T. longibracteata*-broad-leaved tree mixed forest.

80株,RT种群仅13株。4个种群猴头杜鹃成年植株的平均基径和平均冠幅差异不明显,其中RS种群的平均基径和平均冠幅较大。

表4 福建天宝岩国家级自然保护区猴头杜鹃种群的静态生命表<sup>1)</sup>

Table 4 Static life table of *Rhododendron simiarum* Hance population in Tianbaoyan National Nature Reserve of Fujian<sup>1)</sup>

龄级 Age class	$A_x$	$a_x$	$l_x$	$\ln(l_x)$	$d_x$	$q_x$	$L_x$	$T_x$	$e_x$	$K_x$
I (0.0 cm<BD≤2.5 cm)	190	190	1 000	6.91	537	0.54	732	2 416	2.42	0.77
II (2.5 cm<BD≤5.0 cm)	16	88	463	6.14	63	0.14	432	1 684	3.64	0.15
III (5.0 cm<BD≤7.5 cm)	37	76	400	5.99	63	0.16	368	1 253	3.13	0.17
IV (7.5 cm<BD≤10.0 cm)	39	64	337	5.82	63	0.19	305	884	2.63	0.21
V (10.0 cm<BD≤12.5 cm)	26	52	274	5.61	63	0.23	242	579	2.12	0.26
VI (12.5 cm<BD≤15.0 cm)	20	40	211	5.35	63	0.30	179	337	1.60	0.36
VII (15.0 cm<BD≤20.0 cm)	28	28	147	4.99	63	0.43	116	158	1.07	0.56
VIII (BD>20.0 cm)	16	16	84	4.43			42	42	0.50	

<sup>1)</sup> BD: 基径 Basal diameter;  $x$ : 龄级 Age class;  $A_x$ :  $x$  龄级的个体数 Number of individuals in  $x$  age class;  $a_x$ :  $x$  龄级经过匀滑处理的个体数 Number of individuals in  $x$  age class treated by smoothing treatment;  $l_x$ : 标准化个体存活数 Standardized survival number of individuals;  $\ln(l_x)$ :  $l_x$  的自然对数 Natural logarithm of  $l_x$ ;  $d_x$ : 从  $x$  龄级到  $x+1$  龄级的标准化个体死亡数 Standardized death number of individuals from  $x$  age class to  $x+1$  age class;  $q_x$ : 从  $x$  龄级到  $x+1$  龄级种群的个体死亡率 Individual mortality rate of population from  $x$  age class to  $x+1$  age class;  $L_x$ : 从  $x$  龄级到  $x+1$  龄级的平均个体存活数 Average survival number of individuals from  $x$  age class to  $x+1$  age class;  $T_x$ : 大于等于  $x$  龄级的个体总数 Total individual number greater than or equal to  $x$  age class;  $e_x$ :  $x$  龄级的生命期望 Life expectancy in  $x$  age class;  $K_x$ : 致死率 Fatality rate.

标准化个体存活数的自然对数 [ $\ln(l_x)$ ] 和  $q_x$  值为纵坐标,绘制福建天宝岩国家级自然保护区猴头杜鹃种群的存活曲线和死亡率曲线(图2)。

由图2-A可见:根据Deevey<sup>[30]</sup>构建的种群存活曲线类型,猴头杜鹃种群存活曲线大致符合Deevey-III型。猴头杜鹃种群的 $\ln(l_x)$ 值与龄级呈负相关,II龄级的 $\ln(l_x)$ 值明显降低,III龄级至VII龄级的 $\ln(l_x)$ 值降幅较缓,VIII龄级的 $\ln(l_x)$ 值明显降低,表明猴头杜鹃幼苗受生存环境自然选择的强度较大,死亡率较高;植株成年后,死亡个体相对较少。

## 2.2 猴头杜鹃种群静态生命表、存活曲线和死亡率曲线分析

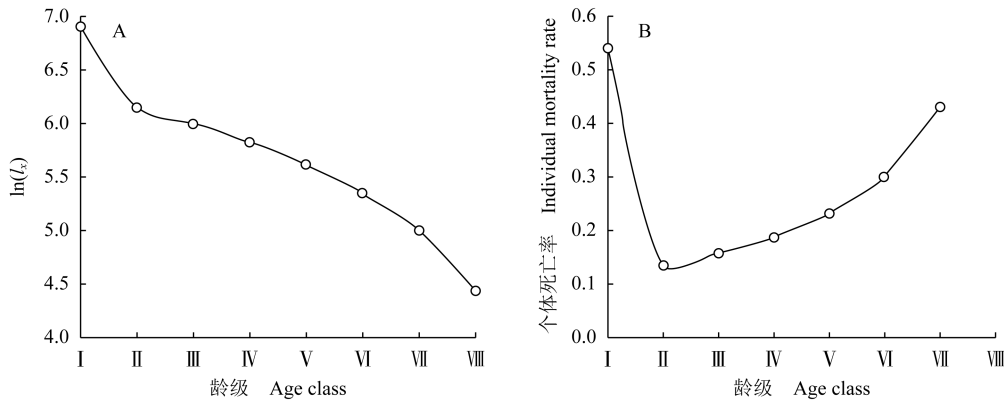
2.2.1 种群静态生命表分析 福建天宝岩国家级自然保护区猴头杜鹃种群的静态生命表见表4。由表4可见,猴头杜鹃种群中各龄级个体数波动较大,I [0.0 cm<基径(BD)≤2.5 cm]龄级个体数( $A_x$ )较多,明显高于其他龄级。I龄级到II [2.5 cm<BD≤5.0 cm]龄级的个体死亡率( $q_x$ )最高,达0.54。III (5.0 cm<BD≤7.5 cm)龄级至VII (15.0 cm<BD≤20.0 cm)龄级间的个体死亡率较低,但随着龄级的增加呈逐渐升高的趋势,各龄级的猴头杜鹃整体上过渡平缓。VII龄级到VIII (BD>20.0 cm)龄级的个体死亡率高达0.43,说明该龄级可能接近猴头杜鹃的生命上限。II龄级的生命期望( $e_x$ )最大,高达3.64,III和IV (7.5 cm<BD≤10.0 cm)龄级的生命期望也较大,说明福建天宝岩国家级自然保护区的生态环境较为稳定。

2.2.2 种群存活曲线和死亡率曲线分析 根据猴头杜鹃种群的静态生命表,以龄级为横坐标,分别以

由图2-B可见:随着龄级的增加,猴头杜鹃的个体死亡率呈先降后升的变化趋势,端点值较大。I龄级到II龄级的个体死亡率最高,超过0.5,VII龄级到VIII龄级的个体死亡率也较高,II龄级到III龄级的个体死亡率最低,之后个体死亡率递增。

## 2.3 猴头杜鹃种群时间序列预测

对猴头杜鹃种群进行时间序列预测分析,评估预测未来分别经过2、3和4个龄级后猴头杜鹃的个体数,并绘制猴头杜鹃种群的时间序列预测图(图3)。由图3可见:各阶段猴头杜鹃种群中猴头杜鹃个体数



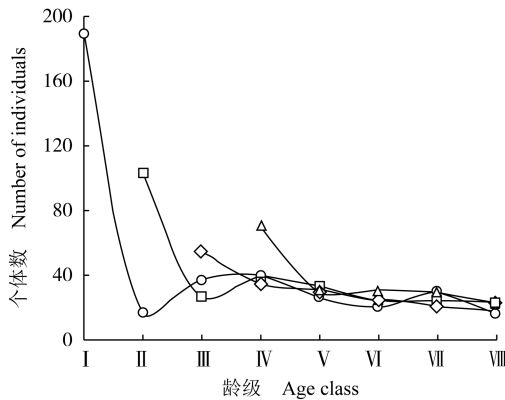
$\ln(l_x)$ : 标准化个体存活数的自然对数 Natural logarithm of standardized survival number of individuals.

I: 0.0 cm<BD≤2.5 cm; II: 2.5 cm<BD≤5.0 cm; III: 5.0 cm<BD≤7.5 cm; IV: 7.5 cm<BD≤10.0 cm; V: 10.0 cm<BD≤12.5 cm; VI: 12.5 cm<BD≤15.0 cm; VII: 15.0 cm<BD≤20.0 cm; VIII: BD>20.0 cm. BD: 基径 Basal diameter.

图 2 福建天宝岩国家级自然保护区猴头杜鹃种群的存活曲线(A)和死亡率曲线(B)  
Fig. 2 Survival curve (A) and mortality rate curve (B) of *Rhododendron simiarum* Hance population in Tianbaoyan National Nature Reserve of Fujian

总体上随龄级增大而减少。与当前种群相比, 经过 2 个龄级后, II [2.5 cm<基径 (BD) ≤5.0 cm] 龄级个体数增幅较大, III (5.0 cm<BD ≤7.5 cm) 龄级个体数有所下降, 其余龄级个体数没有明显变化; 经过 3 个龄级后, III 龄级个体数明显增加, 其余龄级个体

数没有明显变化; 经过 4 个龄级后, IV (7.5 cm<BD ≤10.0 cm) 龄级个体数有所增加, 其余龄级个体数没有明显变化。综合各时间序列预测来看, 猴头杜鹃种群呈现逐步增加、发展稳定的特点, 每个时间序列的低龄级阶段植株个体数增幅较大, 其他龄级变化不明显, 表明福建天宝岩国家级自然保护区猴头杜鹃种群的生长繁殖较为稳定。



—○—: 种群当前龄级结构 The current age class structure of population;  
—□—: 经过 2 个龄级后种群的龄级结构 The age class structure of population after through 2 age classes;  
—◇—: 经过 3 个龄级后种群的龄级结构 The age class structure of population after through 3 age classes;  
—△—: 经过 4 个龄级后种群的龄级结构 The age class structure of population after through 4 age classes.

I: 0.0 cm<BD≤2.5 cm; II: 2.5 cm<BD≤5.0 cm; III: 5.0 cm<BD≤7.5 cm; IV: 7.5 cm<BD≤10.0 cm; V: 10.0 cm<BD≤12.5 cm; VI: 12.5 cm<BD≤15.0 cm; VII: 15.0 cm<BD≤20.0 cm; VIII: BD>20.0 cm. BD: 基径 Basal diameter.

图 3 福建天宝岩国家级自然保护区猴头杜鹃种群时间序列预测图  
Fig. 3 Time series prediction diagram of *Rhododendron simiarum* Hance population in Tianbaoyan National Nature Reserve of Fujian

### 2.4 猴头杜鹃林稳定性分析

根据 M. Godron 稳定性指数法<sup>[27]</sup>, 建立二次函数并进行平滑曲线拟合, 得到交点坐标, 结果见表 5。由表 5 可见: 4 个猴头杜鹃林稳定性交点坐标均没有接近 (20, 80), 其中, 猴头杜鹃纯林稳定性交点坐标为 (32.33, 67.67), 与其他 3 个林型相比较为稳定, 其他 3 个猴头杜鹃混交林均不稳定。此外, 各林型的稳定性交点坐标较接近, 表明福建天宝岩国家级自然保护区内各类猴头杜鹃林的种类资源利用情况相似, 且竞争较为激烈。

### 2.5 猴头杜鹃种群年龄结构的动态分析

福建天宝岩国家级自然保护区猴头杜鹃种群相邻龄级间的数量变化动态和结果见表 6。由表 6 可见: 猴头杜鹃种群龄级间动态指数 ( $V_n$ ) 有较大幅度波动, 种群稳定性较弱。II [2.5 cm<基径 (BD) ≤5.0 cm] 和 III (5.0 cm<BD ≤7.5 cm) 龄级间的  $V_n$  值为负值, 说明猴头杜鹃种群在幼苗阶段呈衰退趋势, 幼苗在 I (0.0 cm<BD ≤2.5 cm) 龄级向 II 龄级以及 II 龄级

表5 福建天宝岩国家级自然保护区猴头杜鹃林稳定性分析

Table 5 Stability analysis on *Rhododendron simiarum* Hance population in Tianbaoyan National Nature Reserve of Fujian

林型 <sup>1)</sup> Forest type <sup>1)</sup>	主要种类数 Number of main species	二次函数 Quadratic function	拟合优度 Goodness of fit	交点坐标 Coordinate of intersection	稳定性 Stability
FRS	10	$y = -0.012 1x^2 + 2.041 7x + 14.310 0$	0.993 8	(32.33, 67.67)	相对稳定 Relatively stable
FRT	11	$y = -0.011 6x^2 + 2.113 3x + 2.825 1$	0.996 3	(36.29, 63.71)	不稳定 Unstable
FRB	13	$y = -0.011 8x^2 + 2.086 2x + 7.271 0$	0.997 9	(34.63, 65.37)	不稳定 Unstable
FRTB	12	$y = -0.010 9x^2 + 2.004 8x + 7.142 5$	0.994 9	(35.60, 64.40)	不稳定 Unstable

<sup>1)</sup> FRS: 猴头杜鹃纯林 *Rhododendron simiarum* pure forest; FRT: 猴头杜鹃-长苞铁杉混交林 *R. simiarum*-*Tsuga longibracteata* mixed forest; FRB: 猴头杜鹃-阔叶树混交林 *R. simiarum*-broad-leaved tree mixed forest; FRTB: 猴头杜鹃-长苞铁杉-阔叶树混交林 *R. simiarum*-*T. longibracteata*-broad-leaved tree mixed forest.

表6 福建天宝岩国家级自然保护区猴头杜鹃种群龄级间动态指数  
Table 6 Dynamic index between age classes of *Rhododendron simiarum* Hance population in Tianbaoyan National Nature Reserve of Fujian

龄级 <sup>1)</sup> Age class <sup>1)</sup>	龄级间动态指数/% Dynamic index between age classes
I (0.0 cm < BD ≤ 2.5 cm)	91.58
II (2.5 cm < BD ≤ 5.0 cm)	-56.76
III (5.0 cm < BD ≤ 7.5 cm)	-5.13
IV (7.5 cm < BD ≤ 10.0 cm)	33.33
V (10.0 cm < BD ≤ 12.5 cm)	23.08
VI (12.5 cm < BD ≤ 15.0 cm)	28.57
VII (15.0 cm < BD ≤ 20.0 cm)	42.86
VIII (BD > 20.0 cm)	

<sup>1)</sup> BD: 基径 Basal diameter.

向Ⅲ龄级过渡时,面对极为严峻的环境筛选,极易出现高死亡率。其他龄级均为正值,说明成年后的猴头杜鹃较少出现死亡,种群渐趋稳定。 $V_n$ 最大值出现在Ⅰ龄级,高达91.58%,且龄级结构动态指数( $V_{pi}$ )达到54.92%,说明猴头杜鹃种群结构总体上为增长型,并且表现出较高的增长趋势。将外部干扰纳入影响因素后,猴头杜鹃种群龄级结构动态指数( $V'_{pi}$ )锐减为0.43%,与 $V_{pi}$ 值相差较大,表明猴头杜鹃种群易受外部环境干扰的影响,种群非常不稳定,虽然幼苗数量较多,但若周围生境发生剧烈变化,成年个体减少,可能会严重影响其种群的动态演化。

### 3 讨论和结论

种群数量结构与所处环境和生物学特性紧密相关,有助于说明种群的形成机制和生长机制<sup>[31]</sup>。猴头杜鹃种群数量特征结果表明:福建天宝岩国家级自然保护区4个猴头杜鹃种群整体上属于增长型,幼苗储备丰富,基径2.5 cm及以下的幼苗占比超过50%;其中,位于猴头杜鹃纯林的猴头杜鹃种群和位于猴头

杜鹃-阔叶树混交林的猴头杜鹃种群各龄级个体俱全,且个体数较其他2个种群相对平均,表现出相对稳定的趋势;位于猴头杜鹃-长苞铁杉混交林的猴头杜鹃种群和位于猴头杜鹃-长苞铁杉-阔叶树混交林的猴头杜鹃种群高龄级个体缺乏,表明这2个种群形成时间相对较短。福建天宝岩国家级自然保护区猴头杜鹃林约有96.25%的猴头杜鹃成年植株高度为1~15 m<sup>[16]</sup>。测量结果显示:4个猴头杜鹃种群中猴头杜鹃树高基本在1~15 m之间。由于低龄级个体较多,且种群各龄级较齐全,猴头杜鹃种群整体演替趋势较好,这与周梦遥等<sup>[8]</sup>关于福建天宝岩国家级自然保护区森林景观演替的结论相似。

静态生命表表明:猴头杜鹃种群的期望寿命在Ⅱ[2.5 cm < 基径(BD) ≤ 5.0 cm]龄级最高,之后随着龄级的增长而下降,猴头杜鹃生存环境稳定,受非自然因子影响较小。存活曲线显示:猴头杜鹃种群大致符合Deevey-Ⅲ型,即种群早期死亡率高,而后死亡率降低,随着龄级的增加缓慢上升,整体上趋于稳定。这是由于同区域伴生树种较多,如长苞铁杉和青冈等,成年的猴头杜鹃仍面临激烈的生存竞争。但基于较为安全的外部环境,分布于福建天宝岩国家级自然保护区内的猴头杜鹃种群保护较好<sup>[32]</sup>,受人类开发的影响很小,未发生大规模毁林现象。

时间序列预测结果显示:猴头杜鹃种群经过2、3、4个龄级后,种群各龄级个体数发展稳定,Ⅱ、Ⅲ(5.0 cm < BD ≤ 7.5 cm)和Ⅳ(7.5 cm < BD ≤ 10.0 cm)龄级的个体数增加,而高龄级个体数变化不明显,偶见下降趋势。该区域没有受到人为破坏和大规模自然灾害的干扰,各龄级个体数小幅稳定增加。由于生存竞争激烈,同区域优势树种较多,导致在同一时间序列,高龄级的植株个体数有所波动,但随时间推移,有小幅增加的趋势。动态分析结果显示:猴头杜鹃种群

表现出明显的增长趋势。但若考虑受外部风险影响, 猴头杜鹃种群对外界生存环境的抗干扰能力较弱, 易受环境变化影响, 猴头杜鹃植株数量有下降的风险。值得注意的是, 猴头杜鹃种群由 I ( $0.0 \text{ cm} < \text{BD} \leq 2.5 \text{ cm}$ ) 龄级到 II 龄级的过渡过程出现数量锐减的现象。猴头杜鹃种群多分布在海拔 1 000 m 以上的山地区域, 人迹罕至, 同区域伴生树种更为粗壮, 导致原生种群面临着严峻的自然筛选和激烈的生存竞争, 幼苗在附近缺乏大树的情况下难以存活。

根据 M. Godron 稳定性指数法分析得出, 猴头杜鹃林整体呈不稳定的特征, 仅猴头杜鹃纯林相对稳定。这是由于猴头杜鹃林内灌木和草本植物种类虽较少, 但个体数较多, 福建天宝岩国家级自然保护区猴头杜鹃植株未来更集中在低龄级, 高龄级个体数增长缓慢, 尽管幼苗具有较强的生存能力, 但对外界生存环境的抗干扰能力较弱, 且目前的生存环境对幼苗的环境筛作用较强, 对低龄级幼苗的生存不利, 导致种群结构略失衡<sup>[33]</sup>。

综上所述, 虽然福建天宝岩国家级自然保护区猴头杜鹃种群呈增长型和稳定型, 但是, 由于森林环境不够稳定, 种群整体面临激烈的生存竞争, 幼苗存活率较低。由于样地设置和种群调查位置的关系, 本次调查的猴头杜鹃种群多为中高龄种群, 缺失中低龄级个体, 后续研究有待完善。未来福建天宝岩国家级自然保护区的保护政策会在一定程度上向森林旅游和社区经济方面倾斜<sup>[34]</sup>, 并致力于建设国家保护动植物的优质种源基因库, 如何在猴头杜鹃林的开发和保护上实现有效平衡, 也是进一步研究工作的重点内容。

#### 参考文献:

- [1] 宋超, 余琦殷, 于梦凡, 等. 北京地区黄檗种群数量结构及空间分布特征[J]. 生态学杂志, 2015, 34(11): 3040-3049.
- [2] WIEGAND T, MOLONEY K A. Rings, circles and null models for point pattern analysis in ecology [J]. *Oikos*, 2004, 104(2): 209-229.
- [3] 桂亚可, 潘萍, 欧阳勋志, 等. 赣中闽楠天然种群数量特征及分布格局[J]. 生态学杂志, 2019, 38(10): 2918-2924.
- [4] FUCHS M A, KRANNITZ P G, HARESTAD A S. Factors affecting emergence and first-year survival of seedlings of Garry oaks (*Quercus garryana*) in British Columbia, Canada [J]. *Forest Ecology and Management*, 2000, 137(1/3): 209-219.
- [5] 矢佳显, 韩海荣, 程小琴, 等. 河北辽河源自然保护区油松种群年龄结构和种群动态 [J]. 生态学杂志, 2017, 36(7): 1808-1814.
- [6] GUILLERMO C M, ROBERT N, RIVAS B G, et al. Stand dynamics and basal area change in a tropical dry forest reserve in Nicaragua [J]. *Forest Ecology and Management*, 2005, 208(1/3): 63-75.
- [7] 杨立荣, 张治礼, 云勇, 等. 濒危植物海南龙血树的种群结构与动态 [J]. 生态学报, 2018, 38(8): 2802-2815.
- [8] 周梦遥, 游巍斌, 林美娇, 等. 基于 LANDIS 模型的福建天宝岩森林景观演替动态模拟 [J]. 北京林业大学学报, 2018, 40(8): 12-22.
- [9] 叶居新. 中国的猴头杜鹃矮林 [J]. 武汉植物学研究, 1994, 12(2): 170-174.
- [10] 耿晓磊. 福建苔藓矮曲林群落生态学研究 [D]. 厦门: 厦门大学环境与生态学院, 2017: 6-12.
- [11] DÍAZ S, MERCADO C, ALVAREZ-CARDENAS S. Structure and population dynamics of *Pinus lagunae* M.-F. Passini [J]. *Forest Ecology and Management*, 2000, 134(1/3): 249-256.
- [12] 李霖. 福建天宝岩自然保护区天然猴头杜鹃种群数量特征研究 [D]. 福州: 福建农林大学林学院, 2008.
- [13] 游巍斌, 林巧香, 何东进, 等. 天宝岩自然保护区森林景观格局与环境关系的尺度效应分析 [J]. 应用与环境生物学报, 2011, 17(5): 638-644.
- [14] 何东进, 游惠明, 肖石红, 等. 天宝岩长苞铁杉林倒木接触处土壤酶活性变化及其环境效应 [J]. 生态学报, 2017, 37(1): 118-126.
- [15] 肖石红, 张中瑞, 覃德华, 等. 天宝岩国家级自然保护区 4 种类型泥炭藓沼泽植被组成及其与环境因子的关系 [J]. 应用与环境生物学报, 2016, 22(4): 631-638.
- [16] 周亚琦, 官凤英, 范少辉, 等. 天宝岩竹阔混交林毛竹及其伴生树种生态位的研究 [J]. 北京林业大学学报, 2017, 39(7): 46-53.
- [17] YOU H M, HE D J, YOU W B, et al. Effect of environmental gradients on the quantity and quality of fallen logs in *Tsuga longibracteata* forest in Tianbaoyan National Nature Reserve, Fujian Province, China [J]. *Journal of Mountain Science*, 2013, 10(6): 1118-1124.
- [18] 李苏闽, 何东进, 覃德华, 等. 福建天宝岩国家级自然保护区长苞铁杉林林窗的物种构成和边缘效应分析 [J]. 植物资源与环境学报, 2015, 24(4): 89-96.
- [19] 何小娟, 何东进, 洪伟, 等. 天宝岩天然猴头杜鹃种群空间分布格局研究 [J]. 云南农业大学学报, 2009, 24(5): 734-738.
- [20] 包维楷, 王丽. 海南重楼 (*Paris dunniana* Lévl.) 种群的生存状况 [J]. 植物资源与环境学报, 2004, 13(1): 32-36.
- [21] 李翔, 侯璐, 李双喜, 等. 濒危树种庙台槭种群数量特征及动态分析 [J]. 植物科学学报, 2018, 36(4): 524-533.
- [22] 刘丹, 刘士玲, 郭忠玲, 等. 水冬瓜赤杨种群生命表与时间序列分析 [J]. 北京林业大学学报, 2017, 39(10): 62-69.



- [20] 辛娜娜, 张蕊, 徐肇友, 等. 木荷1代育种群体遗传多样性分析[J]. 林业科学研究, 2015, 28(3): 332-338.
- [21] 齐明, 何贵平, 李恭学, 等. 杉木不同水平试验林的遗传参数估算和高世代育种的亲本评选[J]. 东北林业大学学报, 2011, 39(5): 4-8.
- [22] HODGE G R, DVORAK W S. The CAMCORE international provenance/progeny trials of *Gmelina arborea*: genetic parameters and potential gain[J]. *New Forests*, 2004, 28: 147-166.
- [23] GOH D K S, JAPARUDIN Y, ALWI A, et al. Growth differences and genetic parameter estimates of 15 teak (*Tectona grandis* L. f.) genotypes of various ages clonally propagated by microcuttings and planted under humid tropical conditions [J]. *Silvae Genetica*, 2013, 62(4/5): 196-206.
- [24] 王旭军, 程勇, 吴际友, 等. 红榉不同种源叶片形态性状变异[J]. 福建林学院学报, 2013, 33(3): 284-288.
- [25] 罗芊芊, 楚秀丽, 李峰卿, 等. 5年生南方红豆杉生长和分枝性状家系变异与选择[J]. 林业科学研究, 2020, 33(1): 136-143.
- [26] 韩威, 刘超, 樊艳文, 等. 长白山阔叶木本植物叶片形态性状沿海拔梯度的响应特征[J]. 北京林业大学学报, 2014, 36(4): 47-53.
- [27] 潘红丽, 李迈和, 蔡小虎, 等. 海拔梯度上的植物生长与生理生态特性[J]. 生态环境学报, 2009, 18(2): 722-730.
- [28] SLOT M, WIRTH C, SCHUMACHER J, et al. Regeneration patterns in boreal Scots pine glades linked to cold-induced photoinhibition[J]. *Tree Physiol*, 2005, 25(9): 1139-1150.
- [29] 陶宏征, 赵昶灵, 李唯奇, 等. 植物对低温的光合响应[J]. 中国生物化学与分子生物学报, 2012, 28(6): 501-508.

(责任编辑: 佟金凤)

(上接第51页 Continued from page 51)

- [23] 李辛雷, 孙振元, 李纪元, 等. 濒危植物杜鹃红山茶种群结构和动态变化[J]. 植物资源与环境学报, 2018, 27(2): 17-23.
- [24] 游惠明, 何东进, 刘进山, 等. 倒木覆盖对天宝岩国家级自然保护区长苞铁杉林内土壤理化特性的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2013, 22(3): 18-24.
- [25] SKOGLUND J. Age structure of woody species populations in relation to seed rain, germination and establishment along the river Dalälven, Sweden[J]. *Vegetatio*, 1989, 82: 25-34.
- [26] 毕晓丽, 洪伟, 吴承祯, 等. 黄山松种群统计分析[J]. 林业科学, 2002, 38(1): 61-67.
- [27] GODRON M. Some aspects of heterogeneity in grasslands of Cantal [J]. *Statistical Ecology*, 1972, 3: 397-415.
- [28] 陆龙龙, 郭忠玲, 范春楠, 等. 吉林磨盘山次生落叶阔叶林群落特征和稳定性分析[J]. 应用生态学报, 2018, 29(7): 2079-2087.
- [29] 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.
- [30] DEEVEY E S, Jr. Life tables for natural populations of animals[J]. *The Quarterly Review of Biology*, 1947, 22(4): 283-314.
- [31] 金慧, 赵莹, 尹航, 等. 长白山濒危植物牛皮杜鹃 (*Rhododendron chrysanthum*) 种群数量特征与动态分析[J]. 生态学杂志, 2017, 36(11): 3123-3130.
- [32] 苏炳霖, 何东进, 洪伟, 等. 武夷山风景名胜区天然林乔木层主要种群的种间联结性研究[J]. 植物资源与环境学报, 2007, 16(3): 40-45.
- [33] PALA N A, NEGI A K, GOKHALE Y, et al. Diversity and regeneration status of Sarkot Van Panchyat in Garhwal Himalaya, India[J]. *Journal of Forestry Research*, 2012, 23(3): 399-404.
- [34] 林旻. 福建天宝岩自然保护区植物资源的现状与保护对策[J]. 亚热带农业研究, 2007, 3(1): 77-80.

(责任编辑: 张明霞)