

## 中亚热带不同林龄杉木人工林径级结构与林下物种多样性分析

巢林<sup>1a</sup>, 洪滔<sup>1a,1b</sup>, 李键<sup>1a,1b</sup>, 陈灿<sup>1a,1b</sup>, 洪伟<sup>1a,1b</sup>, 吴承祯<sup>1a,1b,2,①</sup>

(1. 福建农林大学: a. 林学院, b. 福建省高校森林生态系统过程与经营重点实验室, 福建 福州 350002;

2. 武夷学院生态与环境学院, 福建 武夷山 354300)

**摘要:** 采用典型抽样法, 以位于中亚热带的福建省将乐县的杉木 [*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.] 人工林为研究对象, 对 10、15、20、25、30 和 40 a 林分的径级结构、林下植被组成以及物种多样性变化进行调查和分析。结果表明: 不同林龄杉木人工林的径级结构均呈正态分布, 均在接近平均胸径的径级上植株数量最多; 径级和密度间的关系可以用 3 参数的 Gaussian 函数表征; 不同林龄间胸径差异显著。杉木人工林林下分布有 45 科 80 属 97 种植物, 其中灌木层 69 种、草本层 28 种, 物种丰富, 但不同林龄的林分内各种类的重要值差异较大, 且不同林龄的林分间优势种、共有种和独有种均明显不同。随林龄的增加, 林下灌木层和草本层的物种组成、丰富度指数 ( $R_0$ )、Simpson 多样性指数 ( $D$ ) 和 Shannon-Wiener 多样性指数 ( $H'$ )、Pielou 均匀度指数 ( $J_{sw}$ ) 和 Alatalo 均匀度指数 ( $E_a$ ) 均有明显变化。10 a 林分的林下物种数量最少 (18 种), 而 20 a 林分的林下物种数量最多 (40 种)。林下灌木层的  $D$  和  $H'$  值分别为 0.827 ~ 0.923 和 1.956 ~ 2.917, 且随林龄的增加均呈“上升—下降—平稳”的变化趋势; 灌木层的  $J_{sw}$  和  $E_a$  值分别为 0.876 ~ 0.959 和 0.686 ~ 0.890, 随林龄增加均呈“降低—升高—降低—升高”的变化趋势, 且均在 20 a 林分中最小、在 25 a 林分中最大。林下草本层的  $D$  和  $H'$  值分别为 0.639 ~ 0.898 和 1.274 ~ 2.435, 并随林龄增加均呈波动的变化趋势; 草本层的  $J_{sw}$  和  $E_a$  值分别为 0.775 ~ 0.949 和 0.663 ~ 0.896, 随林龄增加均呈“降低—升高—降低—升高—降低”的变化趋势, 且均在 15 a 林分中最小、在 10 a 林分中最大。总体上看, 林龄对杉木人工林林下灌木层和草本层的物种丰富度指数和多样性指数以及草本层的均匀度指数均有显著影响。根据研究结果, 建议在杉木人工林的经营过程中对林下物种进行合理配置, 并进行合理间伐, 以促进林下植被的生长发育。

**关键词:** 杉木人工林; 中亚热带; 林龄; 径级结构; 林下植被; 物种多样性

中图分类号: S718.54+2; S791.27 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2015)02-0088-09

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2015.02.13

**Analyses on diameter class structure and species diversity of understory of artificial forest of *Cunninghamia lanceolata* with different forest ages in mid-subtropical region** CHAO Lin<sup>1a</sup>, HONG Tao<sup>1a,1b</sup>, LI Jian<sup>1a,1b</sup>, CHEN Can<sup>1a,1b</sup>, HONG Wei<sup>1a,1b</sup>, WU Chengzhen<sup>1a,1b,2,①</sup> (1. Fujian Agriculture and Forestry University: a. College of Forestry, b. Key Laboratory of Fujian Forest Ecosystem Process and Management of Fujian University, Fuzhou 350002, China; 2. College of Ecology and Environment, Wuyi University, Wuyishan 354300, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2015, 24(2): 88-96

**Abstract:** Changes in diameter class structure, vegetation composition of understory and species diversity of artificial forest of *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook., with forest age of 10, 15, 20, 25, 30 and 40 a, located in Jiangle County of Fujian Province in mid-subtropical region, were investigated and analyzed by typical sampling method. The results show that diameter class structure of artificial forest of *C. lanceolata* with different forest ages all appears the normal distribution, and the largest individual number is at the diameter class close to average diameter at breast height (DBH); Gaussian function with three parameters can represent the relationship between diameter class and density; and difference in

收稿日期: 2014-11-20

基金项目: 福建省科技重大专项 (2012NZ0001)

作者简介: 巢林 (1988—), 男, 安徽六安人, 硕士研究生, 主要从事数量森林经理方面的研究。

① 通信作者 E-mail: fjwcz@126.com

DBH among different forest ages is significant. There are 97 species in 80 genera of 45 families in understory of artificial forest of *C. lanceolata*, in which, there are 69 species in shrub layer and 28 species in herb layer. Species is abundant, while difference in important value of each species among stands with different forest ages is larger, and dominant species, common species and their own species among stands with different forest ages are obviously various. There are obvious changes in species composition, richness index ( $R_0$ ), Simpson diversity index ( $D$ ), Shannon-Wiener diversity index ( $H'$ ), Pielou evenness index ( $J_{sw}$ ) and Alatalo evenness index ( $E_a$ ) of shrub and herb layers in understory with increasing of forest age. Species number in understory of 10 a stand is the least (18 species), and that of 20 a stand is the most (40 species).  $D$  and  $H'$  values of shrub layer in understory are 0.827–0.923 and 1.956–2.917, respectively, and both appear the trend of “increasing–decreasing–stable” with increasing of forest age;  $J_{sw}$  and  $E_a$  values of shrub layer are 0.876–0.959 and 0.686–0.890, respectively, and both appear the trend of “decreasing–increasing–decreasing–increasing” with increasing of forest age;  $J_{sw}$  and  $E_a$  values of shrub layer of 20 a stand are the smallest, and those of 25 a stand are the largest.  $D$  and  $H'$  values of herb layer in understory are 0.639–0.898 and 1.274–2.435, respectively, and both appear the fluctuant trend with increasing of forest age;  $J_{sw}$  and  $E_a$  values of herb layer are 0.775–0.949 and 0.663–0.896, respectively, and both appear the trend of “decreasing–increasing–decreasing–increasing–decreasing” with increasing of forest age; and  $J_{sw}$  and  $E_a$  values of herb layer of 15 a stand are the smallest, and those of 10 a stand are the largest. In general, forest age has significant effects on species richness index and diversity index of shrub and herb layers and on evenness index of herb layer of understory of artificial forest of *C. lanceolata*. Based on above research results, it is suggested that rational allocation and thinning out species can promote growth and development of vegetation in understory during the process of management of artificial forest of *C. lanceolata*.

**Key words:** artificial forest of *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.; mid-subtropical region; forest age; diameter class structure; vegetation in understory; species diversity

目前,全球的人工林面积大约占森林总面积的7%<sup>[1]</sup>,而中国的人工林面积为 $6.9 \times 10^7$  hm<sup>2</sup>,约占全国森林总面积的31.2%,人工林面积居世界首位<sup>[2]</sup>。杉木[*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.]是中国重要的人工用材林树种,其面积和蓄积量在人工林中所占比例均最高,在全国的林业发展中占有极其重要的地位。但由于自肥能力差、栽培模式不合理、经营管理措施不当以及化感作用等原因导致杉木人工林衰退,这在一定程度上成为制约森林永续利用及其经济效益和生态效益的重要因素<sup>[3-4]</sup>。

林木大小分布规律和林下植被多样性是林分结构的基本属性,与森林生物量、碳储量和总生产量等特征密切相关<sup>[5-7]</sup>,因而,了解和预测林木大小分布规律在基础和应用生态学领域的研究中均具有重要意义。从实践的角度,林木大小分布信息对于计算林分产量、配置营林工作措施以及保护森林等必不可少;导致林木大小分布变化的因素较多,包括物种组成、特定立地条件下资源的可利用性、群落年龄和干扰历史等<sup>[5-9]</sup>。

评估物种丰富度和多样性是群落和宏观生态学研究的中心内容,常应用于多样性保护计划的制定以

及鉴别需要保护的区域<sup>[10]</sup>。人工林林下植被多样性在森林植被多样性中扮演着重要角色,对森林生态系统的养分循环和能量流动有关键作用。很多物种受林下植被层的限制并且在幼苗阶段必须生存于林下植被层中,因而,林下植被对人工林的物种多样性具有实质性贡献<sup>[11]</sup>。此外,林下植被是森林生态系统总体生物量的重要组成部分,可通过控制部分森林微气候影响种子萌发和幼苗存活,并为动物提供栖息地,使其作为种子扩散的载体之一。

前人对森林的林木大小分布规律和林下物种多样性进行了大量研究。研究者尝试采用通用数学模型描述林木大小分布规律<sup>[6,12]</sup>,其中,多种概率密度函数被应用于描绘林木大小分布<sup>[5,13-14]</sup>。目前,对林下植被组成与无脊椎动物和土壤微生物的关系、林下植被更新、林下植被对干扰的响应、不同人工林林下植被多样性的比较及林下植被多样性与环境关系<sup>[15]</sup>等方面已有研究报道,但是对于不同林龄杉木人工林径级结构及林下植被多样性动态变化的研究报道尚不多见<sup>[4,16-19]</sup>。

福建省将乐县是杉木人工林的分布中心<sup>[20]</sup>。作者采用空间代替时间的方法,对该地不同林龄杉木人

工林径级结构及林下植被多样性进行调查和分析,以期深入了解不同林龄杉木人工林径级结构及林下植被物种丰富度和多样性的变化特征,为杉木人工林林分结构调整、林下植被多样性的恢复与保护、制定合理的管理措施以及杉木人工林的可持续经营提供理论依据。

## 1 研究区概况和研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区域位于福建省将乐县,地理坐标为东经117°05'~117°40'、北纬26°26'~27°04',地处武夷山脉东南麓,扼闽江支流金溪中下游;地形复杂多样,以低山和丘陵为主。属于中亚热带季风气候,年平均气温18.7℃,≥10℃年活动积温5 500℃~6 800℃;年平均降水量1 698.2 mm;年平均日照时数1 730 h;年无霜期295 d,年平均空气相对湿度82%,主导风向为东南风。土壤为典型的中亚热带地带性土壤,山地土壤分布具有垂直地带性,随着海拔的升高土壤类型依次为红壤—黄红壤—黄壤—山地草甸土<sup>[21]</sup>;土壤类型以酸性花岗岩发育的红壤为主、黄壤为次,土壤腐殖质层厚15~30 cm,土层厚度大多1 m以上,有机质含量3.5%~4.4%。

地带性植被属中国东部湿润森林区亚热带常绿阔叶林,植物种类丰富;植被群落有杉木人工林—芒萁〔*Dicranopteris dichotoma* (Thunb.) Berhn.〕群落、杉木

人工林—五节芒〔*Miscanthus floridulus* (Lab.) Warb. ex Schum. et Laut.〕+蕨类群落、马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)人工林—芒萁群落、丝栗栲(*Castanopsis fargesii* Franch.)天然林+木荷(*Schima superba* Gardn. et Champ.)—榿木〔*Loropetalum chinense* (R. Br.) Oliver.〕+黄瑞木〔*Adinandra millettii* (Hook. et Arn.) Benth. et Hook.〕—五节芒+蕨类群落以及米楮〔*Castanopsis carlesii* (Hemsl.) Hayata.〕天然林+马尾松—江南越桔(*Vaccinium mandarinorum* Diels)+杜鹃(*Rhododendron simsii* Planch.)—五节芒群落,无林地则以榿木+黄瑞木—芒萁群落为主<sup>[20]</sup>。

### 1.2 研究方法

1.2.1 样地设置与调查 在野外踏查基础上,采用空间代替时间的方法,于2014年6月在位于将乐县的福建金森林业股份有限公司邓坊林区的典型地段,选定森林经营类型一致、立地条件相近且林龄分别为10、15、20、25、30和40 a的杉木人工林为供试林分,各样地的基本状况见表1。各林龄林分的样地面积为1.7~19.8 hm<sup>2</sup>,在每块不同林龄的林分内分别设置面积20 m×30 m的样地3个,再划分成10 m×10 m的样方,调查每个样方内所有乔木的种类、株数、胸径和树高;在每个样地内采用对角线方法选取2个面积10 m×10 m的灌木层样方,同时划定5个面积1 m×1 m的草本层样方,记录每个样方内植物的种类、株(丛)数、基径、株高、多度和盖度等<sup>[22-23]</sup>,并测定各样地的海拔、坡度和坡向等地形因子。

表1 不同林龄杉木人工林样地的基本状况

Table 1 Basic status of sampling plots of artificial forest of *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook. with different forest ages

林龄/a Forest age	海拔/m Altitude	经度 Longitude	纬度 Latitude	坡度/(°) Slope	坡向 Aspect	郁闭度 Canopy density	林分 密度/hm <sup>-2</sup> Stand density	平均胸径/cm Average DBH	平均树高/m Average height
10	213	E117°32'27"	N26°48'26"	28	东北 Northeast	0.4	2 699	6.1	8.7
15	214	E117°31'29"	N26°48'50"	32	东北 Northeast	0.6	2 549	12.0	9.0
20	211	E117°32'14"	N26°48'16"	32	北 North	0.8	2 489	12.4	11.1
25	263	E117°30'15"	N26°41'02"	35	东南 Southeast	0.9	2 414	14.9	13.2
30	290	E117°30'24"	N26°41'03"	29	北 North	0.7	2 309	16.3	14.4
40	215	E117°32'18"	N26°47'04"	28	东南 Southeast	0.8	2 249	19.6	16.0

1.2.2 径级结构调查 根据杉木的生活史特点及调查资料,以2 cm为径阶距,根据胸径(DBH)将杉木植株划分为15个径级,其中,0 cm≤DBH<2 cm为第1径级、2 cm≤DBH<4 cm为第2径级,依此类推,划分至第15径级(28 cm≤DBH<30 cm);按林龄分别统计

各样地不同径级的杉木株数,然后以径级为横坐标、以不同林龄各径级的杉木密度为纵坐标,绘制不同林龄杉木人工林径级结构图。

1.2.3 林下植被物种多样性分析 根据样地调查数据,分别计算不同物种的重要值(IV)<sup>[24]</sup>,统计不同林

龄各样地不同物种重要值的平均值;以物种的重要值为基础,采用  $\alpha$  多样性指数<sup>[25-26]</sup> 测量林下物种的多样性和均匀度。其中,  $IV = (\text{相对多度} + \text{相对频度} + \text{相对盖度}) / 3$ ; 丰富度指数 ( $R_0$ ) =  $S$ ; Simpson 多样性指数 ( $D$ ) =  $1 - \sum P_i^2$ ; Shannon-Wiener 多样性指数 ( $H'$ ) =  $-\sum P_i \ln P_i$ ; Pielou 均匀度指数 ( $J_{sw}$ ) =  $H' / \ln S$ ; Alatalo 均匀度指数 ( $E_a$ ) =  $[(\sum P_i^2)^{-1} - 1] / [\exp(H') - 1]$ 。式中,  $S$  为样方中出现的种类数,  $P_i$  为第  $i$  个种类的相对重要值。

1.3 数据处理和分析

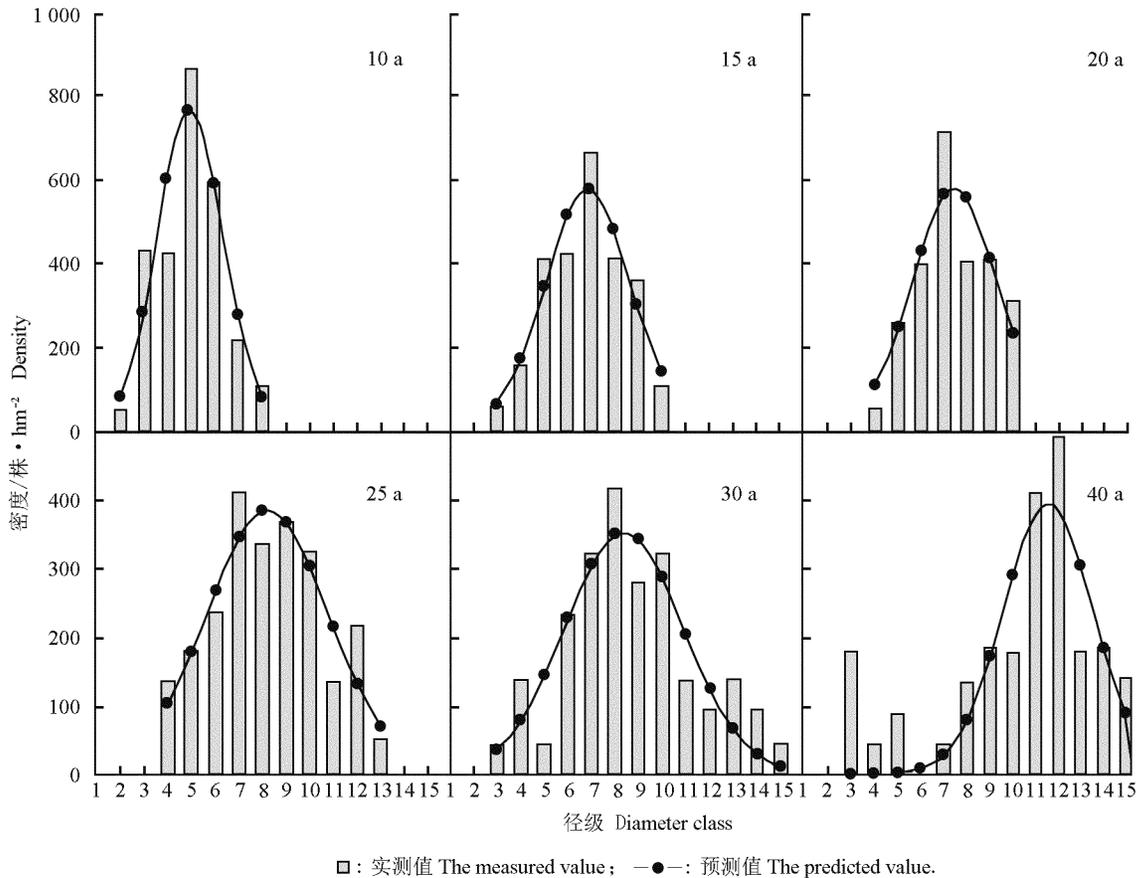
使用 EXCEL 2007 软件记录数据;采用 SPSS 19.0 统计分析软件对不同林龄林分的植被多样性进行单因素方差分析(one way-ANOVA);通过 LSD 检验比较不同林龄林分间多样性指数的差异 ( $\alpha = 0.05$ )。采用 SigmaPlot 12.5 软件绘制图表。

2 结果和分析

2.1 径级结构分析

不同林龄杉木人工林的径级结构见图 1。由图 1 可见:各林龄杉木人工林的径级结构均呈正态分布。其中,10 a 林龄的林分中杉木密度的最大值出现在第 5 径级,为 864 株 · hm<sup>-2</sup>;15、20 和 25 a 林龄的林分中杉木密度均在第 7 径级达到峰值,分别为 656、700 和 411 株 · hm<sup>-2</sup>;30 a 林龄的林分中杉木密度的峰值出现在第 8 径级,为 417 株 · hm<sup>-2</sup>;40 a 林龄的林分中杉木密度在第 12 径级最大,达到 494 株 · hm<sup>-2</sup>。

由图 1 还可知:随着杉木人工林林龄的增加,小径级杉木密度减小、大径级杉木密度逐渐增大,而中径级杉木密度所占比例最大。



1: 0 cm ≤ DBH < 2 cm; 2: 2 cm ≤ DBH < 4 cm; 3: 4 cm ≤ DBH < 6 cm; 4: 6 cm ≤ DBH < 8 cm; 5: 8 cm ≤ DBH < 10 cm; 6: 10 cm ≤ DBH < 12 cm; 7: 12 cm ≤ DBH < 14 cm; 8: 14 cm ≤ DBH < 16 cm; 9: 16 cm ≤ DBH < 18 cm; 10: 18 cm ≤ DBH < 20 cm; 11: 20 cm ≤ DBH < 22 cm; 12: 22 cm ≤ DBH < 24 cm; 13: 24 cm ≤ DBH < 26 cm; 14: 26 cm ≤ DBH < 28 cm; 15: 28 cm ≤ DBH < 30 cm.

图 1 不同林龄杉木人工林径级结构比较

Fig. 1 Comparison on diameter class structure of artificial forest of *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook. with different forest ages

采用不同数学模型对不同林龄杉木人工林径级与密度进行回归分析,通过对实验数据的模拟选择最优曲线模型,结果显示:不同林龄杉木人工林径级结构的分布规律可以用3参数 Gaussian 峰值函数表征,回归模型为  $Y = a \exp\left[-0.5\left(\frac{X-c}{b}\right)^2\right]$ 。式中:Y 为密度;X 为径级;a、b 和 c 为参数。显著性检验结果显示不同林龄杉木人工林径级与密度的相关性达极显著水平(表2)。因此,可以用该模型预测不同林龄杉木人工林径级-密度的分布规律,采用此方法获得的预测值见图1。

表2 不同林龄杉木人工林径级与密度的回归分析  
Table 2 Regression analysis between diameter class and density of artificial forest of *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook. with different forest ages

林龄/a Forest age	参数 Parameter			$R^2$	P
	a	b	c		
10	766.897 8	2.818 1	9.970 6	0.895 4	0.003 5
15	571.955 3	3.690 0	13.761 3	0.931 2	<0.000 1
20	570.058 4	3.722 7	14.894 7	0.892 2	0.000 4
25	384.361 6	5.203 9	16.404 6	0.900 4	<0.000 1
30	351.917 9	5.046 9	16.721 9	0.831 0	<0.000 1
40	389.132 0	3.971 5	23.119 6	0.689 0	0.000 9

## 2.2 林下灌木层和草本层的种类组成及优势种和共有种分析

2.2.1 种类组成 对所有调查样方进行统计分析,结果显示:杉木人工林林下出现的植物种类共45科80属97种。其中,灌木层有28科54属69种,包含茜草科(Rubiaceae)7种,蔷薇科(Rosaceae)6种,樟科(Lauraceae)、山茶科(Theaceae)和豆科(Leguminosae)各5种,壳斗科(Fagaceae)和紫金牛科(Myrsinaceae)各4种,漆树科(Anacardiaceae)、金缕梅科(Hamamelidaceae)、大戟科(Euphorbiaceae)和桑科(Moraceae)各3种,鼠李科(Rhamnaceae)、百合科(Liliaceae)、五加科(Araliaceae)和马鞭草科(Verbenaceae)各2种,虎皮楠科(Daphniphyllaceae)、葡萄科(Vitaceae)、山矾科(Symplocaceae)、安息香科(Styracaceae)、杜鹃花科(Ericaceae)、防己科(Menispermaceae)、卫矛科(Celastraceae)和棕榈科(Palmae)等科各1种;草本层有21科27属28种,包含禾本科(Poaceae)5种,陵齿蕨科(Lindsaeaceae)3种,野牡丹科(Melastomataceae)2种,里白科(Gleicheniaceae)、蕨科(Pteridiaceae)、菊科

(Compositae)、苋科(Amaranthaceae)和莎草科(Cyperaceae)等科各1种。

2.2.2 灌木层优势种和共有种 对不同林龄杉木人工林林下灌木层物种重要值的计算结果表明:10 a林龄的杉木人工林的灌木层中盐肤木(*Rhus chinensis* Mill.)和短尾越桔(*Vaccinium carlesii* Dunn)占绝对优势,重要值分别达28.43%和23.76%,其他灌木种类的重要值差异则较小,分布相对均衡;15 a林龄的林分灌木层中野漆[*Toxicodendron succedaneum* (Linn.) O. Kuntze]、虎皮楠[*Daphniphyllum oldhami* (Hemsl.) Rosenth.]和拟赤杨[*Alniphyllum fortune* (Hemsl.) Makino]等种类占较大优势;20 a林龄的林分灌木层中盐肤木、苦槠[*Castanopsis sclerophylla* (Lindl. et Paxton) Schottky]和櫟木等种类为优势种,重要值均在11%以上;25 a林龄的林分灌木层以短梗幌伞枫(*Heteropanax brevipedicellatus* Li)、酸枣[*Ziziphus jujuba* var. *spinosa* (Bunge) Hu ex H. F. Chow]、拟赤杨和尖叶菝葜(*Smilax arisanensis* Hay.)等种类为主,重要值均超过10%;30 a林龄的林分灌木层中枫香树(*Liquidambar formosana* Hance)、黄瑞木和苦槠等种类占优势,重要值分别为18.59%、12.24%和10.42%;40 a林龄的林分灌木层以粗叶榕(*Ficus hirta* Vahl)、青冈[*Cyclobalanopsis glauca* (Thunb.) Oerst.]、油茶(*Camellia oleifera* Abel)和白藤(*Calamus tetradactylus* Hance)等种类为主。

对杉木人工林不同林龄林分间灌木层共有种和独有种的比较结果显示:仅显齿蛇葡萄[*Ampelopsis grossedentata* (Hand. -Mazz.) W. T. Wang]在各林龄林分中均出现,为不同林龄林分间的共有种;盐肤木、青冈和酸枣分别为10和20 a、20和40 a、15和25 a林分间的共有种,苦槠和櫟木为20和30 a林分间的共有种,油茶、拟赤杨、山血丹(*Ardisia punctata* Lindl.)和玉叶金花(*Mussaenda pubescens* Ait. f.)分别为10、30和40 a、15、25和30 a、15、20和40 a、15、20和25 a林分间的共有种。山榿(*Lindera reflexa* Hemsl.)和海南悬钩子(*Rubus hanceanus* Ktze.)为10 a林分灌木层的独有种;野漆、绒毛润楠(*Machilus velutina* Champ. ex Benth.)、山矾(*Symplocos sumuntia* Buch. -Ham. ex D. Don)和虎皮楠为15 a林分的独有种;浙闽樱桃[*Cerasus schneideriana* (Koehne) Yü et Li]、小槐花[*Desmodium caudatum* (Thunb.) DC.]和钩藤[*Uncaria rhynchophylla* (Miq.) Miq. ex Havil.]等种类为20 a林

分的独有種;细柄蕈树(*Altingia gracilipes* Hemsl.)、短梗幌伞枫和尖叶菝葜为25 a林分的独有種;黄瑞木、细齿叶桉(*Eurya nitida* Korthals)和枫香树为30 a林分的独有種;甜槠[*Castanopsis eyrei* (Champ. ex Benth.) Tutch.]、天仙果[*Ficus erecta* var. *beecheana* (Hook. et Arn.) King]和白藤为40 a林分的独有種。

2.2.3 草本层优势种和共有种 对不同林龄杉木人工林林下草本层物种重要值的计算结果表明:不同林龄杉木人工林的草本层均以芒萁、五节芒、淡竹叶(*Lophatherum gracile* Brongn.)、乌蕨(*Stenoloma chusanum* Ching)和狗脊[*Woodwardia japonica* (Linn. f.) Sm.]等种类占较大优势,为草本层的优势种。其中,10 a林龄的林分草本层以黑莎草(*Gahnia tristis* Nees)、地菘(*Melastoma dodecandrum* Lour.)、箬竹[*Indocalamus tessellatus* (Munro) Keng f.]和芒萁为优势种,重要值均在11%以上;15 a林龄的林分草本层以芒萁占绝对优势,重要值达到49.57%,乌蕨和淡竹叶也具有一定优势;20 a林龄的林分草本层以芒萁、五节芒和乌蕨等种类为主;25 a林龄的林分草本层以箬竹占绝对优势,重要值为54.73%,芒萁和团叶陵齿蕨[*Lindsaea orbiculata* (Lam.) Mett. ex Kuhn]也具有一定优势,重要值分别为19.47%和10.28%;30 a林龄的林分草本层优势种为芒萁、五节芒、乌蕨和竹叶草[*Oplismenus compositus* (Linn.) Beauv.]等,重要值均在10%以上;40 a林龄的林分草本层以狗脊和华山姜[*Alpinia chinensis* (Retz.) Rosc.]占绝对优势,重要值分别达到43.48%和19.38%,而黑莎草和芒萁也具有一定优势。

对杉木人工林不同林龄林分间草本层的共有种和独有種进行比较,结果显示:芒萁和狗脊为10、15、20、25、30和40 a林分的共有種;五节芒和团叶陵齿蕨分别为10、15、20和30 a,15、20、30和40 a林分的共有種;淡竹叶和乌蕨为15、20和30 a林分的共有種。野茉莉(*Styrax japonicas* Sieb. et Zucc.)和蕨[*Pteridium aquilinum* var. *latiusculum* (Desv.) Underw. ex Heller]为10 a林分草本层的独有種;叶底红[*Phyllagathis fordii* (Hance) C. Chen]和小蓬草[*Conyza canadensis* (Linn.) Cronq.]为20 a林分的独有種;牛膝(*Achyranthes bidentata* Blume)、白花败酱[*Patrinia villosa* (Thunb.) Juss.]和透茎冷水花[*Pilea pumila* (Linn.) A. Gray]为30 a林分的独有種;黑莎草、深绿卷柏(*Selaginella doederleinii* Hieron.)和扇叶

铁线蕨(*Adiantum flabellulatum* Linn.)为40 a林分的独有種;15 a林龄的林分中没有独有種。

## 2.3 林下物种丰富度和多样性分析

2.3.1 物种丰富度 不同林龄杉木人工林林下灌木层和草本层的物种丰富度指数见表3。由表3可知:随林龄的增加,杉木人工林林下物种丰富度指数呈现波动特征,且不同林龄的林分间物种丰富度指数存在明显差异。随林龄的增加,杉木人工林林下物种丰富度指数出现2个峰值,分别为林龄20和30 a的林分,且灌木层和草本层物种丰富度指数的变化趋势与林下总物种丰富度指数的变化趋势总体上一致。从灌木层的物种丰富度指数看,10 a林分的物种丰富度指数最小;而20 a林分的物种丰富度指数达到最大,之后急剧下降;25 a林分的物种丰富度指数明显小于20 a林分,之后随林龄增加物种丰富度指数有所回升;30 a林分的物种丰富度指数略有增加,但40 a林分的物种丰富度指数又略有下降;总体上看,15~40 a林分的物种丰富度指数均高于10 a林分。从草本层的物种丰富度指数看,15 a林分的物种丰富度指数较小,但20 a林分的物种丰富度指数达到第1个峰值,25 a林分的物种丰富度指数最小,但30 a林分的物种丰富度指数则升至最大,而40 a林分的物种丰富度指数则又有所降低。

多重比较结果显示:20 a林分的灌木层和其林下总的物种丰富度指数与其他林龄的林分间均有显著差异( $P<0.05$ ),30 a林分与10和20 a林分的灌木层和草本层的物种丰富度指数差异显著;20 a林分的草本层分别与15、25和40 a林分的草本层在物种丰

表3 不同林龄杉木人工林林下灌木层和草本层的物种丰富度指数( $\bar{X}\pm SD$ )<sup>1)</sup>  
Table 3 Species richness index of shrub and herb layers in understory of artificial forest of *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook. with different forest ages ( $\bar{X}\pm SD$ )<sup>1)</sup>

林龄/a Forest age	丰富度指数 Richness index		
	灌木层 Shrub layer	草本层 Herb layer	总计 Total
10	9.3±1.1a	9.3±1.1bc	18.6±1.1a
15	21.0±2.1c	7.0±1.4ab	28.0±1.9b
20	28.0±1.4d	12.0±2.6cd	40.0±2.5d
25	15.3±1.8b	5.0±0.7a	20.3±2.1a
30	19.0±2.6bc	15.0±0.7d	34.0±3.2c
40	16.0±2.1b	8.0±1.9ab	24.0±2.1ab

<sup>1)</sup> 同列中不同的小写字母表示差异显著( $P<0.05$ ) Different small letters in the same column indicate the significant difference ( $P<0.05$ ).

丰富度指数上均有差异显著,15 a 林分的草本层物种丰富度指数与 30 a 林分也有差异显著。

2.3.2 物种多样性 不同林龄杉木人工林林下灌木层和草本层的物种多样性指数见表 4。由表 4 可知:随林龄的增加,杉木人工林林下灌木层的 Simpson 多样性指数( $D$ )和 Shannon-Wiener 多样性指数( $H'$ )基本呈“上升—下降—平稳”的变化趋势,且在 20 a 林分中这 2 项指数均最大、在 10 a 林分中最小;不同林龄林分灌木层间的  $D$  值差异不显著,10 和 20 a 林分的  $H'$  值分别与 15、25、30 和 40 a 林分有显著差异。随林龄的增加,草本层的  $D$  和  $H'$  值均波动变化,且变化趋势基本一致;30 a 林分草本层的  $D$  和  $H'$  值均最大,在 25 a 林分中这 2 项指数均最小;15 和 25 a 林分草本层的  $D$  值分别与 10、20、30 和 40 a 林分间差异显著;20 a 林分草本层的  $H'$  值与 10 和 30 a 林分间均无显著差异,与其他林龄的林分间则存在显著差异。

随林龄增加,灌木层的 Pielou 均匀度指数( $J_{sw}$ )和 Alatalo 均匀度指数( $E_a$ )均呈“降低—升高—降低—升高”的波动趋势,且均在 20 a 林分中最小、在 25 a 林分中最大,但  $E_a$  值仅在 20 a 林分与 25 和 40 a 林分间差异显著, $J_{sw}$  值在不同林龄林分间均无显著差异( $P>0.05$ )。随林龄增加,草本层的  $J_{sw}$  和  $E_a$  均呈“降低—升高—降低—升高—降低”的波动趋势,且均在 10 a 林分中最大、在 15 a 林分中最小。多重比较结果显示:10、20 和 30 a 的杉木人工林林下草本层的  $J_{sw}$  和  $E_a$  值与 15、25 和 40 a 林分间均差异显著。

方差分析结果表明:林龄对灌木层、草本层以及整个林下的物种丰富度有极显著影响( $P<0.01$ );林龄对灌木层的  $H'$  值有极显著影响,对  $D$ 、 $J_{sw}$  和  $E_a$  值的影响均不显著;林龄对草本层的  $D$  值有显著影响,对  $H'$ 、 $J_{sw}$  和  $E_a$  值则均有极显著影响。

表 4 不同林龄杉木人工林林下灌木层和草本层的物种多样性分析( $\bar{X}\pm SD$ )<sup>1)</sup>

Table 4 Analysis on species diversity of shrub and herb layers in understory of artificial forest of *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook. with different forest ages ( $\bar{X}\pm SD$ )<sup>1)</sup>

林龄/a Forest age	Simpson 多样性指数 Simpson diversity index		Shannon-Wiener 多样性指数 Shannon-Wiener diversity index		Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index		Alatalo 均匀度指数 Alatalo evenness index	
	灌木层 Shrub layer	草本层 Herb layer	灌木层 Shrub layer	草本层 Herb layer	灌木层 Shrub layer	草本层 Herb layer	灌木层 Shrub layer	草本层 Herb layer
	10	0.827±0.053a	0.863±0.053b	1.956±0.035a	2.085±0.081d	0.890±0.014a	0.949±0.029b	0.787±0.045ab
15	0.914±0.060a	0.700±0.016a	2.708±0.129bc	1.509±0.065b	0.889±0.021a	0.775±0.018a	0.762±0.048ab	0.663±0.045a
20	0.923±0.054a	0.876±0.032b	2.917±0.083c	2.264±0.046de	0.876±0.018a	0.911±0.019b	0.686±0.080a	0.817±0.076b
25	0.917±0.094a	0.639±0.064a	2.598±0.139b	1.274±0.088a	0.959±0.015a	0.791±0.027a	0.890±0.022b	0.688±0.021a
30	0.907±0.065a	0.898±0.023b	2.596±0.040b	2.435±0.096e	0.882±0.072a	0.899±0.030b	0.787±0.080ab	0.842±0.039b
40	0.917±0.038a	0.742±0.043ab	2.597±0.074b	1.654±0.053c	0.937±0.045a	0.796±0.039a	0.866±0.050b	0.681±0.048a

<sup>1)</sup> 同列中不同的小写字母表示差异显著( $P<0.05$ ) Different small letters in the same column indicate the significant difference ( $P<0.05$ ).

### 3 讨论和结论

在不同类型森林中林木大小、分布以及不同径级的林木数量差异较大<sup>[13]</sup>。林木对资源的竞争、更新模式、干扰、环境条件、异常或季节性季候事件等因素导致全球森林中林木大小分布变异。因此,林木大小分布通常可用于评估干扰对森林的影响、描述森林的演替途径和结构发展以及预测未来林分的结构<sup>[27]</sup>。对不同林龄杉木人工林径级结构的分析结果表明:不同林龄杉木人工林的径级结构均呈正态分布,单位面积个体数量随径级增加逐渐增多,具有平均胸径的个体数量最多;随林龄的增加,各径级分布的单位面积个体数量逐渐减少,符合人工林径级结构的分布规

律<sup>[25]</sup>。回归分析结果显示:不同林龄杉木人工林的径级和单位面积个体数量间服从 3 参数 Gaussian 峰值函数关系。然而,从拟合结果可以看出,40 a 林分的模型拟合效果比其他林龄的林分差,这是由于在第 3 至第 7( $4\text{ cm}\leq\text{DBH}<14\text{ cm}$ ) 径级内,径级结构呈倒“J”型;DBH 大于 14 cm 时,仅第 11 径级( $20\text{ cm}\leq\text{DBH}<22\text{ cm}$ ) 和第 12 径级( $22\text{ cm}\leq\text{DBH}<24\text{ cm}$ ) 的单位面积个体数量较多,其他径级的个体数量分布比较均匀,这可能与自然稀疏和人为干扰有关。周永奇等<sup>[28]</sup>采用 Normal 分布、Lognormal 分布、Weibull 分布和 Gamma 分布 4 种分布函数对不同林龄杉木人工林的直径分布规律进行研究,发现分别用 Lognormal 分布和 Weibull 分布对 6 和 13 a 的杉木林分的径级结构

的拟合效果较好,而对20 a林分的拟合效果不理想,认为这一现象与人为干扰及林分的不合理经营有关。与天然林相比,人工林的径级结构相对简单,但受人为干扰的频率和程度更大,导致林分径级结构分布参差不齐。Lai等<sup>[6]</sup>提出用1个具有普适性的组合模型描述亚热带和温带森林群落林木直径分布规律,即采用Power函数描述小径级林木的数量分布,对于大径级林木的数量分布则利用Weibull分布函数进行描述。据此,建议在林分径级结构分布规律的研究过程中,运用组合模型进行拟合可能比使用单一数学模型进行林分径级结构研究效果更好。

林下物种丰富度指数随林龄的增加呈波动性变化。在10~20 a林分中,林下的总物种丰富度指数持续增加,由10 a林分的18种增加至15 a林分的28种,在20 a林分中则达到40种,主要是由于幼龄林阶段林分郁闭度较低、林下光照条件充足,为大量喜光植物的生长创造了条件,使盐肤木、柯〔*Lithocarpus glaber* (Thunb.) Nakai〕、苦槠、欆木和山莓(*Rubus corchorifolius* Linn. f.)等种类成为灌木层的优势种。在15~20 a的林分中,郁闭度达0.6~0.8,处于林分郁闭成林的过渡阶段,为山血丹、玉叶金花、梨叶悬钩子(*Rubus pirifolius* Smith)、箬竹和淡竹叶等耐阴植物的生存提供了适宜的生境条件,林内光照条件不均匀,灌木层和草本层生境具有较大异质性,从而导致20 a林分的林下物种丰富度指数最大。20~25 a林分的郁闭度增加至0.9,使耐阴的短梗幌伞枫、尖叶菝葜和大芽南蛇藤(*Celastrus gemmatus* Loes.)等种类继续繁殖和扩张,但不利于喜光植物的生存,林下种类对空间和养分的竞争加剧,这也可能是导致林龄大于20 a的林分林下物种数量下降的原因。30 a林分的郁闭度为0.7,且位于阴坡,光照时间相对较短、生境较阴湿,有利于喜阴和耐旱能力低的种类生长发育,所以30 a林分的林下植被丰富度指数高于25和40 a林分。上述分析结果表明:杉木人工林林下物种丰富度指数与林分郁闭度和坡向有关。因此,在杉木人工林的经营过程中应进行合理间伐、创造林隙、改善林下光照条件,以促进林下植被的生长发育。此外,成熟的杉木林分中的酚类等化感物质累积,对土壤有机质、有效氮、有效钾等土壤养分含量均有影响<sup>[3]</sup>,因而,对林下植被的丰富度也会产生一定的影响。粗叶榕、显齿蛇葡萄、芒萁和五节芒等种类在不同林龄的杉木人工林中均存在,表明这些种类对杉木人工林的

林下环境具有很强的适应性。随着杉木人工林群落的演替,林下生境存在较大差异,导致林下植被组成发生变化,因此,在人工林林下植被的恢复过程中,应选择在不同林龄的林分中均有分布的种类,而不能选择那些易受生境变化影响而消亡的种类。

杉木人工林林下灌木层物种多样性指数和均匀度指数均高于草本层,但草本层的物种多样性指数和均匀度指数波动幅度较大,这主要是由于灌木对杉木人工林的林下生境的适应能力更强,而草本层植物对环境的变化更为敏感,生长周期短且随机性大。20 a林分的灌木层 $D$ 和 $H'$ 值最高,10 a林分的最低,是由于10 a林分的草本层中芒萁、黑莎草和箬竹等优势种长势较好,使某些灌木层种类的生长空间和养分受到限制,从而导致某些灌木层种类衰退或死亡。灌木层 $J_{sw}$ 和 $E_a$ 值的变化趋势几乎相同,且变化幅度较小。随林龄的增加,中高齡的杉木人工林林下灌木层均匀度指数高于低齡林分,这是因为林分郁闭成林后,林下生境较为稳定,灌木层植被的覆盖度差异减少。草本层的 $D$ 和 $H'$ 值波动趋势完全一致,均在25 a林分中最低、在30 a林分中最高,推测造成这一现象的主要原因有2个:一是30 a林分的草本层物种数最多(15种),且物种的个体数量也较多;二是25 a林分的灌木层物种数较多,林分郁闭度达0.9,抑制了林下草本层植物的生长,所以其多样性指数最低。草本层 $J_{sw}$ 和 $E_a$ 值波动趋势几乎相同,但 $E_a$ 值的变动幅度更大,二者均在10 a林分中最高、在15 a林分中最低;虽然10 a林分的草本层物种数较少,但各种类的个体数量较多,覆盖度较大,故均匀度指数最高。杉木人工林的多样性指数和均匀度指数在最大林龄阶段并非最高,这与崔宁洁等<sup>[23]</sup>的研究结果相符。

林开敏等<sup>[16-17,29]</sup>对不同林龄杉木人工林林下植物的消长规律、植被多样性动态特征及 $\beta$ 多样性进行研究,认为林下植被的平均种类数量、物种丰富度指数、多样性指数及均匀度指数均为成熟齡林最高、幼齡林居中、中齡林最低,老齡林林下共有种较多,物种更替速率慢, $\beta$ 多样性小、灌木层 $D$ 和 $H'$ 值均在11 a林分中最低,本研究结果与之一致,但本研究中灌木层和草本层的多样性指数和均匀度指数的变化趋势与之有较大差异。曹小玉等<sup>[4]</sup>对福寿林场林龄6、13和20 a的杉木人工林林下植被多样性的研究结果表明,林下有灌木22种、草本21种,物种丰富度指数在林龄13 a时最高、林龄6 a时居中、林龄20 a时最低,

灌木层  $D$  和  $H'$  值在林龄 13 a 时最高、林龄 20 a 时居中、林龄 6 a 时最低,草本层  $D$  和  $H'$  值在林龄 13 a 时最高、林龄 6 a 时居中、林龄 20 a 时最低。曾斌等<sup>[18]</sup>认为:不同林龄杉木人工林林下植被种类及多样性有较大差异,16 a 林分的灌木层  $D$  和  $H'$  值高于 23 和 6 a 林分,6 a 林分的草本层多样性指数较高。本研究结果与上述研究结论有一定的相似性,但也存在一定的差异,这可能与研究区域、杉木人工林所处的发育阶段、立地条件、研究和调查方法等因素有关。建议进一步采用元分析(meta-analysis)<sup>[30]</sup>对有关杉木人工林林下植被多样性的研究结果进行定量综合分析,以期深入探究杉木人工林林下植被多样性变化规律。

#### 参考文献:

- [1] Food and Agriculture Organization of the United Nations. Global Forest Resources Assessment 2010[R]. Rome: [s. n.], 2010.
- [2] 国家林业局. 第八次全国森林资源清查结果[R]. 北京: 国家林业局, 2014.
- [3] 陈龙池, 汪思龙, 陈楚莹. 杉木人工林衰退机理探讨[J]. 应用生态学报, 2004, 15(10): 1953-1957.
- [4] 曹小玉, 李际平. 福寿林场杉木人工林林下植物物种多样性研究[J]. 西北林学院学报, 2014, 29(3): 57-61.
- [5] NIKLAS K J, MIDGLEY J J, RAND R H. Tree size frequency distributions, plant density, age and community disturbance[J]. Ecology Letters, 2003, 6: 405-411.
- [6] LAI J S, COOMES D A, DU X J, et al. A general combined model to describe tree-diameter distributions within subtropical and temperate forest communities[J]. Oikos, 2013, 122: 1636-1642.
- [7] STEPHENSON N L, Van MANTGEM P J, BUNN A G, et al. Causes and implications of the correlation between forest productivity and tree mortality rates[J]. Ecological Monographs, 2011, 81: 527-555.
- [8] COOMES D A, DUNCAN R P, ALLEN R B, et al. Disturbances prevent stem size-density distributions in natural forests from following scaling relationships[J]. Ecology Letters, 2003, 6: 980-989.
- [9] ENQUIST B J, WEST G B, BROWN J H. Extensions and evaluations of a general quantitative theory of forest structure and dynamics[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2009, 106: 7046-7051.
- [10] IKNAYAN K J, TINGLEY M W, FURNAS B J, et al. Detecting diversity: emerging methods to estimate species diversity[J]. Trends in Ecology and Evolution, 2014, 29: 97-106.
- [11] RAMOVS B V, ROBERTS M R. Understory vegetation and environment responses to tillage, forest harvesting, and conifer plantation development[J]. Ecological Applications, 2003, 13: 1682-1700.
- [12] BOKMA F. Evidence against universal metabolic allometry[J]. Functional Ecology, 2004, 18: 184-187.
- [13] WANG X G, HAO Z Q, ZHANG J, et al. Tree size distributions in an old-growth temperate forest[J]. Oikos, 2009, 118: 25-36.
- [14] MALTAMO M, KANGAS A, UUTTERA J, et al. Comparison of percentile based prediction methods and the Weibull distribution in describing the diameter distribution of heterogeneous Scots pine stands[J]. Forest Ecology and Management, 2000, 133: 263-274.
- [15] DUAN W J, REN H, FU S L, et al. Community comparison and determinant analysis of understory vegetation in six plantation in south China[J]. Restoration Ecology, 2010, 18: 206-214.
- [16] 林开敏, 俞新妥, 黄宝龙, 等. 杉木人工林林下植物物种多样性的动态特征[J]. 应用与环境生物学报, 2001, 7(1): 13-19.
- [17] 林开敏, 黄宝龙. 杉木人工林林下植物物种  $\beta$  多样性的研究[J]. 生物多样性, 2001, 9(2): 157-161.
- [18] 曾斌, 刘瑞敏, 翟学昌, 等. 不同林龄杉木人工林物种多样性研究[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(9): 4877-4879, 4882.
- [19] 周德明, 王宗永. 南方不同林龄杉木人工林林下物种多样性比较[J]. 林业资源管理, 2010(6): 65-70.
- [20] 巢林, 洪滔, 林卓, 等. 中亚热带杉阔混交林直径分布研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2014, 34(9): 31-37.
- [21] 巢林, 洪滔, 李键, 等. 不同林龄、径级杉木人工林种内竞争规律[J]. 浙江农林大学学报, 2015, 32(3): 353-360.
- [22] 方精云, 王襄平, 沈泽昊, 等. 植物群落清查的主要内容、方法和技术规范[J]. 生物多样性, 2009, 17(6): 533-548.
- [23] 崔宁洁, 陈小红, 刘洋, 等. 不同林龄马尾松人工林林下灌木和草本多样性[J]. 生态学报, 2014, 34(15): 4313-4323.
- [24] 杨立学, 孙跃志. 不同林龄胡桃楸林下植物多样性的差异[J]. 生态学杂志, 2013, 32(4): 807-812.
- [25] 孟祥楠, 赵雨森, 郑磊, 等. 嫩江沙地不同年龄樟子松人工林种群结构与林下物种多样性动态[J]. 应用生态学报, 2012, 23(9): 2332-2338.
- [26] 邹扬, 贺康宁, 赵畅, 等. 高寒区青海云杉人工林密度与林下植物多样性的关系[J]. 西北植物学报, 2013, 33(12): 2543-2549.
- [27] ARSENEAULT D, PAYETTE S. Reconstruction of millennial forest dynamics from tree remains in a subarctic tree line peatland[J]. Ecology, 1997, 78: 1873-1883.
- [28] 周永奇, 李际平, 曹小玉. 福寿林场杉木人工林不同林龄直径结构研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2014, 34(7): 61-66.
- [29] 林开敏, 马祥庆, 范少辉, 等. 杉木人工林林下植物的消长规律[J]. 福建林学院学报, 2000, 20(3): 231-234.
- [30] GÓMEZ-APARICIO L, LORTIE C J. Advancing plant ecology through meta-analyses[J]. Journal of Ecology, 2014, 102: 823-827.

(责任编辑: 张明霞)