

长白山云冷杉针阔混交林径阶多样性指数对比

何列艳¹, 亢新刚¹, 赵俊卉¹, 高 延², 冯启祥²

(1. 北京林业大学 省部共建森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 吉林省汪清县林业局, 吉林汪清 133200)

摘要: 径阶多样性是林分结构多样性的一个重要方面, 并影响森林的经济、生态、社会效益。利用 7 个常用的多样性指数计算了长白山云杉 *Picea koraiensis* 冷杉 *Abies holophylla* 针阔混交林不同采伐强度采伐前后的径阶多样性指数值, 并对各指数的判别能力及对样本大小的敏感性进行了评价。结果表明: 在判别能力上 Margalef 指数、Shannon 指数和 Gini 指数较好, 但是 Margalef 指数和 Shannon 指数受样本的影响较大, 综合来说 Gini 指数评价效果较好。通过比较不同采伐强度采伐前后各指数值的变动得出, 当采伐强度为 20%~30% 时, 径阶多样性变大, 而当采伐强度为 40% 时, 径阶多样性反而减小。采用多样性指数来表示林分的径阶多样性可用于指导森林经营, 如比较不同林分的径阶多样性、评估林分或景观水平在一定时间内树木大小多样性变化以及比较不同的经营措施对林分径阶多样性的影响等。表 6 参 18

关键词: 森林测计学; 径阶多样性; 多样性指数; 判别能力; 样本大小; 长白山

中图分类号: S750 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2011)03-0432-07

Diameter class diversity indices for spruce-fir conifer and broadleaf mixed stands in the Changbai Mountains

HE Lie-yan¹, KANG Xin-gang¹, ZHAO Jun-hui¹, GAO Yan², FENG Qi-xiang²

(1. Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education, Beijing Forestry University, 100083 Beijing, China; 2. Forest Enterprise of Wangqing County, Wangqing 133200, Jilin, China)

Abstract: Diameter class diversity, as an important part of structural diversity within a stand, affects the economic, ecological, and social value of forests. The objective of this paper is to evaluate different diameter indices describing diameter class diversity based on discriminant ability and sensitivity to sample size. Seven commonly used diversity indices: the Margalef index, Shannon index, Gini coefficient, Simpson index, Berger-parker index, Pielou evenness and Shannon evenness were calculated for 4 spruce-fir conifer and broadleaf mixed stands with different cutting intensities (0, 20%, 30%, 40%) during 7 investigating time (1986, 1990, 1993, 1997, 2001, 2005, 2009) in the Changbai Mountains. Then, the discriminant ability and sensitivity for sample sizes of different diversity indices were evaluated. Results showed that with respect to discriminant ability the Margalef index, Shannon index, and Gini coefficient were superior, but the Gini coefficient was best as the Margalef and Shannon indices were sensitive to sample size. Based on different cutting intensities, variation in the index values before and after cutting showed that diameter diversity increased when the cutting intensity was between 20% and 30%, and decreased when the cutting intensity was 40%. A wide range of applications for diameter diversity indices in forest management include comparing diameter diversity in different stands, assessing changes in tree size diversity over time in stands or on a landscape level, and evaluating the effects of different management treatments on diameter diversity in stands.

收稿日期: 2010-09-26; 修回日期: 2010-11-03

基金项目: 林业公益性行业科研项目(200804027); “十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAD03A08)

作者简介: 何列艳, 从事森林可持续经营研究。E-mail: hehelie@126.com。通信作者: 亢新刚, 教授, 博士生导师, 从事森林结构与生长研究。E-mail: xingangk@163.com

[Ch, 6 tab. 18 ref.]

Key words: forest mensuration; diameter class diversity; diversity indices; discriminant ability; sample size; Changbai Mountains

生物多样性表现在生命系统的各个水平，即从基因到生态系统^[1]。对森林来说，生物多样性高的林分是由不同大小和年龄的各个树种组成的。在北方森林中树种种类不多，确定树木年龄或者林分年龄十分困难，而树木大小和分布非常容易确定^[2]，因此，研究树木大小多样性对北方森林很重要。林分的直径结构常通过直径分布图来描述，但该图仅能提供主观判断，并不能确切地反映直径多样性的大小。使用多样性指数描述林分的直径分布能更好地量化径阶多样性，评价也更为客观。树木大小多样性对森林的经济效益有很大影响。异龄林中，树木大小多样性较大时，才能保证每隔一定的时间都有成熟的可采林木，而当树木的大小多样性很低时，如同龄林，所有林木同时成熟，只有采用皆伐才能保证经济效益，而再次收获又需要经过一个完整的森林培育周期^[3]。同时，树木的大小多样性也会影响森林生态效益的发挥，树木大小多样性较大时能提供更丰富的生境，并能有持续死亡的大树，从而能提高森林生态系统的生物多样性^[4]。此外，对于森林社会效益来说，树木大小多样性较大时，能提供更丰富的景观特征，具有更好的游憩效益^[5]。郑景明等^[6]采用 Gini 指数来计算样地所有乔木的树高多样性，Liang 等^[7]把树种多样性和大小多样性引入转移概率模型，提高了模型估计的精度。雷相东等^[8]用群落本质多样性排序的方法比较了间伐与对照落叶松样地的树木大小多样性，得出间伐样地的树木大小多样性在本质上比对照样地高。笔者采用胸径来描述树木大小，利用 7 个常用的多样性指数计算了不同采伐强度的 4 块样地随时间变动的各个树木大小多样性指数值，并对各指数的判别能力及对样本大小的敏感性进行了评价。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区位于吉林省汪清林业局金沟岭林场，地理位置为 43°22′N，130°10′E。地貌属低山丘陵，海拔为 300 ~ 1 200 m，坡度多在 5° ~ 25°。该区属季风型气候，全年平均气温为 3.9 ℃左右，≥10 ℃积温 2 144 ℃；年降水量 600 ~ 700 mm，生长期为 120 d。土壤多为针叶林灰棕壤，沟谷是草甸土、泥炭土、沼泽土或冲积土，结构一般为黏壤土类，粒状结构，湿松，根系多，平均厚度为 40 cm 左右。

1.2 数据

研究数据来源于天然云杉 *Picea koraiensis* + 冷杉 *Abies holophylla* 针阔混交林不同采伐强度 4 块样地 1986 年、1990 年、1993 年、1997 年、2001 年、2005 年和 2009 年的调查数据，X-37 为对照样地（采伐强度为 0），X-38，X-39 和 X-40 号样地的采伐强度分别为 20%，30%和 40%，采伐的时间为 1987 年。采伐时遵循目标树动态管理的原则，只采伐成熟的目标树，保留珍贵树种。对每个样地，测量达到起测径 8 cm 的林木胸径，在每个林分内以 2 cm 为直径间隔划分径阶，统计每个林分内的径阶数，以及按径阶统计单位面积株数、单位面积断面积，用于计算各个指数。各样地的直径结构特征如表 1。

表 1 各样地采伐前后直径分布特征

Table 1 Diameter characteristics in different sample plots before and after cutting

样地号	样地面 积/hm ²	直径/cm						
		1986 年	1990 年	1993 年	1997 年	2001 年	2005 年	2009 年
X-37	0.16	7.0 ~ 31.3(13.8)	7.0 ~ 33.2(14.9)	7.0 ~ 33.9(15.3)	7.0 ~ 35.3(16.3)	7.0 ~ 36.1(17.3)	7.1 ~ 37.4(18.3)	7.1 ~ 38.7(20.0)
X-38	0.16	7.0 ~ 35.6(14.9)	7.0 ~ 39.1(15.7)	7.0 ~ 40.0(16.2)	7.0 ~ 43.0(17.4)	7.0 ~ 44.2(18.3)	7.0 ~ 44.9(19.3)	7.0 ~ 47.2(20.1)
X-39	0.16	7.0 ~ 36.4(14.2)	7.0 ~ 38.6(15.0)	7.0 ~ 39.0(15.5)	7.0 ~ 40.8(17.0)	7.0 ~ 42.5(18.0)	7.1 ~ 43.6(19.0)	7.6 ~ 43.9(20.3)
X-40	0.16	7.0 ~ 41.7(12.6)	7.0 ~ 42.6(13.6)	7.0 ~ 43.7(14.0)	7.0 ~ 43.7(15.4)	7.0 ~ 43.7(16.5)	7.0 ~ 43.7(17.6)	7.0 ~ 47.2(18.7)

说明：表中括号中数值为平均值。

1.3 指数

常用于评估物种多样性和丰富度的指数有 Margalef 指数、Shannon 指数、Gini 指数、Simpson 指数、

Berger-Parker 指数、Pielou 均匀度指数和 Simpson 均匀度指数。笔者采用上述 7 个指数对径阶多样性进行评估。描述丰富度常用的指标是每个物种的个体数,对于径阶多样性来说,物种数可用径阶数代替,每个物种的个体数由每个径阶的株数、断面积或是生物量所代替。由于大树显著地影响林分材积,因此用单位面积断面积用来描述每个径阶的丰富度^[10]。

径阶多样性可以由 2 种类型的指数来描述,第 1 种类型主要受径阶范围的影响,第 2 种类型主要受不同径阶的丰富度影响。受丰富度影响的指数又可以分为优势度指数和均匀度指数。优势度指数描述的是最丰富径阶分布的优势程度,均匀度指数描述的是林分中不同径阶丰富度分布的均匀程度。多样性指数计算公式如下:①受直径范围影响的指数^[10],Margalef 指数 $D_{\text{Mg}} = (S - 1)/\ln(A_B)$; Shannon 指数 $H' = - \sum_{i=1}^S$

$$p_i \ln(p_i); \text{ Gini 指数 } G_C = \frac{\sum_{j=1}^n (2j - n - 1)a_{bj}}{\sum_{j=1}^n a_{bj}(n - 1)}。②优势度指数^{[10]}: \text{ Simpson 指数 } D_{\text{si}} = 1 - \sum_{i=1}^S p_i^2; \text{ Berger-}$$

Parker 指数 $D_{\text{BP}} = 1 - a_{\text{bmax}}/A_B$ 。③均匀度指数^[12]: Pielou 均匀度指数 $E_{\text{sh}} = H'/\ln S$; Simpson 均匀度指数 $E_{\text{si}} = D_{\text{si}}/(1 - 1/S)$ 。其中: S 为径阶数量, A_B 为单位面积断面积($\text{m}^2 \cdot \text{hm}^{-2}$), p_i 为径阶 i 的断面积比例($\text{m}^2 \cdot \text{hm}^{-2}$), a_{bi} 为 i 径阶的断面积, a_{bj} 排序为 j 树的断面积($\text{m}^2 \cdot \text{hm}^{-2}$), j 为按升序 1, 2, 3, ..., n 排列的位置, n 为株数。 a_{bmax} 为最大径阶断面积。

Margalef 指数主要用于量化径阶范围,这个指数的理论最小值为 0,当所有树都属于同一个径阶时取最小值,指数值随着径阶数量的增加而增加,减小而减小。Shannon 指数是描述物种多样性常用的指数,Shannon 指数的最小值为 0,当所有树都属于同一径阶时取最小值。最大值为 $\ln(S)$,当树在所有径阶中均匀分布时取得最大值。Gini 指数是度量异质性的一种方法,最初被经济学家用来评估人们在收入和财富上的不平等性。后来被用于评估种群中的大小等级。因为指数值介于 0 ~ 1 之间,因此很容易解释。Gini 指数量化了最佳平等的偏离程度,当所有的树具有同样的大小时得到最小值 0,理论最大值为 1。Simpson 指数表达了任何 2 株树,在一个随机无穷大的种群中,属于同一径阶的比例。在本研究中,为了使多样性增加时,指数值也随着增加,采用了 1 减指数值的形式。Simpson 指数受样地中最丰富径阶的影响较大,而对径阶数量不敏感。Simpson 指数越大,说明最丰富径阶的地位比较突出。Berger-Parker 指数是描述优势种的很简单、直观的一个指数,这个指数与径阶数独立。它表达了丰富度最大径阶的断面积比例。为了使多样性增加时,指数值也随着增加,采用了 1 减指数值的形式。这个指数的最小值为 0,当所有树属于同一径阶时取 0。理论最大值为 1,当所有树均匀分布于每个径阶时取得最大值。Shannon 指数和 Simpson 指数都可以标准化而作为一种量度均匀度的方法,指数值介于 0 ~ 1 之间,当所有的径阶具有同样的丰富度时取得最大值。

1.4 评估的准则和方法

评价径阶多样性指数是否合理,其依据主要有:①判别能力——各个指数能否准确地反映径阶多样性,用各指数计算具有不同径阶多样性的样地时,该指数是否能反映出不同林分的多样性差异;②敏感性——各指数对样本大小是否敏感。判别能力对于能否在森林经营管理中应用非常重要,判别能力差的指数对不同的直径分布可能会提供极相近的指数值,显然这对于经营决策的制定是非常不利的。对于具有同样形状的直径分布类型,直径范围较大的林分应具有更高的径阶多样性指数值。除此之外,在实际的森林调查中,样本大小决定着投入的多少,因此评价不同指数对样本大小的敏感性是一个非常重要的因素。

指数的判别能力首先通过比较 2 个数据集的指数范围来评估,然后计算各个指数值的相关系数,并进行显著性检验。如果指数间的相关性很差,则说明至少其中一个指数的判别能力较差。比较采伐前后不同指数随时间的变动,如果变动不明显,说明该指数的判别能力差。同时,计算不同采伐强度样地的各个指数值,并比较采伐前和采伐后各个指数值的变动。各个指数对样本大小的敏感性是将样本数量分别减少到 75%, 50%, 25% 时,重新计算各个指数值,从样本数量减小到不同大小时的各个指数值与原指数值的偏差来判断各指数对样地大小的敏感性。

2 结果与分析

2.1 判别能力

不同指数在范围上的差别很大。从表 2 中可以看出：Margalef 指数提供了最大的范围，其次是 Gini 指数和 Shannon 指数，而其他 4 种指数提供的范围较小，其中范围最小的是 Simpson 均匀度指数。

表 2 各指数值的均值、范围及范围占均值的百分数

Table 2 Mean index values, ranges and range in percent of the mean

指数	均值	范围	范围/%	指数	均值	范围	范围/%
Margalef	4.73	3.89 ~ 5.02	23.89	Berger-Parker	0.86	0.84 ~ 0.88	0.13
Shannon	2.62	2.49 ~ 2.77	10.69	Pielou 均匀度	0.92	0.91 ~ 0.94	0.19
Gini	0.41	0.39 ~ 0.45	14.63	Simpson 均匀度	0.97	0.97 ~ 0.98	0.03
Simpson	0.92	0.90 ~ 0.93	0.10				

说明：各个指数计算出来的值差异较大，因此采用相对范围(范围占均值的比例)来对各个指数进行比较。

通过计算各指数的相关系数可以看出(表 3)，各指数之间的相关性都较好，相关系数都较高。其中 Berger-Parker 指数与 Margalef 指数和 Simpson 指数的相关性达到了极显著，与 Shannon 指数的相关性显著，Simpson 均匀度指数与其他各指数的相关性都不显著。

从表 4 中可以看出，不同的多样性指数随时间的变化不同。其中 Simpson 指数和 Simpson 均匀度指数随着时间的变化其值基本不变，这显然是不符合实际的。在 1990 年，即采伐 3 a 年后，各个指数值都增大，而 Berger-Parker 指数值减小，与其他指数值的变化不一致。

表 3 各指数值的相关系数

Table 3 Spearman correlations coefficients between different indices

指数	Shannon	Gini	Simpson	Berger-Parker	Pielou 均匀度	Simpson 均匀度
Margalef	0.980*	0.627	0.988*	0.999**	0.617	0.939
Shannon		0.652	0.999**	0.986*	0.630	0.932
Gini			0.664	0.605	0.998**	0.857
Simpson				0.991**	0.645	0.944
Berger-Parker					0.592	0.927
Simpson 均匀度						0.850

说明：**为在 0.01 水平上极显著相关，*为在 0.05 水平上显著相关。

表 4 各指数值随时间的变动

Table 4 Index values based on different investigation years

指数	1986 年	1990 年	1993 年	1997 年	2001 年	2005 年	2009 年
Margalef	4.06	4.16	3.99	4.17	4.21	4.29	4.37
Shannon	2.30	2.54	2.54	2.60	2.63	2.63	2.62
Gini	0.43	0.50	0.44	0.44	0.43	0.42	0.41
Simpson	0.91	0.91	0.91	0.92	0.92	0.92	0.92
Berger-Parker	0.86	0.85	0.85	0.89	0.87	0.86	0.86
Pielou 均匀度	0.88	0.94	0.95	0.94	0.94	0.93	0.92
Simpson 均匀度	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.97

综合以上几点可以看出：Simpson 指数、Simpson 均匀度指数和 Berger-Parker 指数判别能力较差，而 Margalef 指数、Shannon 指数和 Gini 指数较好。

2.2 对样本大小的敏感性

将样本数量分别减少到 75%，50%，25%时，重新计算各个指数值，从样本数量减小到不同大小时的各个指数值与原指数值的偏差来判断各指数对样本大小的敏感性。

通过表 5 可以看出，当样本数量减少时，各个指数值的变化不一致。当样本数量减小到 75%时，各个指数值变化不明显，当样本数量减少到 25%时，重新计算出来的指数值与原值数值的偏差较大，其

中, Margalef 指数的偏差最大, 其次是 Shannon 指数和 Gini 指数, 而 Simpson 指数、Berger-Parker 指数、Pielou 均匀度指数和 Simpson 均匀度指数样地数量减少时, 指数值的变动不大。

表 5 样本数量减少后各指数平均值的偏差

Table 5 Mean index values calculated from the reduced number of the sampling plots

指数	样本大小/%	指数值		偏差/%	指数	样本大小/%	指数值		偏差/%
		样本数量减少后	总样地				样本数量减少后	总样地	
Margalef	75	4.54	4.37	3.8	Berger-Parker	75	0.86	0.86	0.0
	50	4.46	4.37	1.9		50	0.86	0.86	0.0
	25	3.89	4.37	11.0		25	0.84	0.86	2.3
Shannon	75	2.65	2.62	1.1	Pielou 均匀度	75	0.92	0.92	0.0
	50	2.63	2.62	0.4		50	0.93	0.92	1.1
	25	2.49	2.62	5.0		25	0.92	0.92	0.0
Gini	75	0.41	0.41	0.0	Simpson 均匀度	75	0.97	0.97	0.3
	50	0.42	0.41	2.4		50	0.98	0.97	0.5
	25	0.39	0.41	4.9		25	0.97	0.97	0.0
Simpson	75	0.92	0.92	0.0					
	50	0.92	0.92	0.0					
	25	0.90	0.92	2.2					

2.3 不同采伐强度采伐前后各指数值的变动

通过计算不同采伐强度的样地在采伐前后各个指数值的变动可以看出(表 6), 对于对照样地 X-37, 随着时间的变动各指数值基本不变, 除了 Margalef 指数和 Shannon 指数, 当采伐强度为 20%和 30%时, 各个指数值都比对照样地大, 而强度为 40%时, 指数值反而比对照样地小。这一结果表明该地区采伐强度过大时, 林分的径阶多样性会降低。

表 6 不同采伐强度采伐前后的各指数均值

Table 6 Mean index values based on different cutting intensities before and after cutting

指数	X-37(采伐强度 0)		X-38(采伐强度 20%)		X-39(采伐强度 30%)		X-40(采伐强度 40%)	
	采伐前	伐后	采伐前	伐后	采伐前	伐后	采伐前	伐后
Margalef	4.21	3.96	4.10	4.68	4.09	4.30	3.84	3.86
Shannon	2.47	2.52	2.15	2.69	2.21	2.64	2.35	2.52
Gini	0.42	0.42	0.45	0.46	0.43	0.46	0.40	0.42
Simpson	0.91	0.91	0.92	0.92	0.92	0.92	0.89	0.91
Berger-Parker	0.86	0.86	0.87	0.88	0.85	0.86	0.84	0.86
Pielou 均匀度	0.96	0.95	0.84	0.95	0.82	0.93	0.92	0.93
Simpson 均匀度	0.98	0.98	0.99	0.98	0.99	0.98	0.97	0.97

3 讨论

采用 7 个不同类型的多样性指数描述林分径阶多样性, 其中 3 个主要受直径范围影响, 2 个为优势度指数, 2 个为均匀度指数。通过比较各指数值的范围得出, Margalef 指数提供了最大的范围, 其次是 Gini 指数和 Shannon 指数, 而通过计算各指数的相关系数可以看出, 除了 Simpson 均匀度指数与其他指数相关性不显著以外, 其余各指数都存在显著的相关关系。Simpson 指数和 Simpson 均匀度指数、Berg-

er-Parker 指数随时间的变动值不变, 表明判别力不佳, 而 Margalef 指数、Shannon 指数和 Gini 指数较好, 最后将样本数量减少到 25% 时, 计算得到 Margalef 指数的偏差最大, 其次是 Shannon 指数和 Gini 指数。另外, 介于 0 ~ 1 之间的指数值, 在理解上比较直观, 接近 1 表明径阶多样性高, 接近 0 表明几乎所有的树都一样大, 综合以上几点可以看出 Gini 指数相对来说评价效果较好。这一结论与前人的一些研究一致^[10]。另外, 本研究通过计算不同采伐强度采伐前后各指数值的变动得出, 当采伐强度较小时, 如 20% ~ 30% 时, 径阶多样性变大, 而当采伐强度为 40% 时, 径阶多样性反而减小。这对该地区的森林经营具有一定的指导意义。用径阶多样性指数来量化林分的树木大小多样性还可用于客观地比较不同林分的径阶多样性, 评估一定时间内林分或景观水平树木大小多样性变化以及比较不同的经营措施对林分径阶多样性的影响等。

本研究将生态学上常用于评价物种多样性的指数用于评价林分中林木的径阶多样性, 这在国内的研究中比较少见, 同时计算并比较了不同采伐强度采伐前后各个指数值的变化, 并用判别能力和对样地大小敏感性对各指数进行了评价。采用单位面积断面面积而不是林木株数来描述每个径阶的丰富度是因为大树显著地影响林分材积^[10]。由于森林调查中通常只调查胸径达到起测径的林木, 而对于未达到起测径的林木没有考虑, 因此本研究没有考虑各个指数对于未达到起测径林木判别能力。另外, 基于 Shannon 指数的林分结构多样性指标需要将结构变量进行分组来计算相应的比例, 需将连续变量离散化, 如分成树高阶、径阶等, 分组的方法和标准缺乏统一的依据^[13]。本研究采用的以 2 cm 为一径阶为森林经营中常用的, 并无其他考虑。以上几点有待今后进一步研究。

参考文献:

- [1] 马克平. 试论生物多样性的概念[J]. 生物多样性 1993, **1** (1): 20 - 22.
MA Keping. The concept of biodiversity [J]. *Chin Biodiversity*, 1993, **1** (1): 20 - 22.
- [2] LAHDE E, LAIHO O, NOROKORPI Y, *et al.* Stand structure as the basis of diversity index [J]. *For Ecol Manage*, 1999, **115**: 213 - 220.
- [3] 阎玉慧, 亢新刚. 人工林与天然林经济效益分析: 以金沟岭林场人工落叶松林与天然云冷杉林为例[J]. 西北林学院学报, 2009, **24** (2): 220 - 223
YAN Yuhui, KANG Xingang. Cost-effectiveness analysis of plantation and natural forest: take the artificial larch and the natural-fir in Jingouling Forest Farm as an example [J]. *J Northwest For Univ*, 2009, **24** (2): 220 - 223.
- [4] LAHDE E, LAIHO O, NOROKORPI Y. Diversity-oriented silviculture in the boreal zone of Europe [J]. *For Ecol Manage*, 1999, **118**: 223 - 243
- [5] RYDBERG D, FALCK J. Urban forestry in Sweden from a silvicultural perspective: a review [J]. *Landscape Urban Plan*, 2000, **47** (1/2): 1 - 18.
- [6] 郑景明, 赵秀海, 张春雨. 北京百花山森林群落的结构多样性研究[J]. 北京林业大学学报, 2007, **29** (1): 7 - 11.
ZHENG Jingming, ZHAO Xiuhai, ZHANG Chunyu. Structural diversity of forest community in Baihuashan Mountain, Beijing [J]. *J Beijing For Univ*, 2007, **29** (1): 7 - 11.
- [7] LIANG J J, BUONGIORNO J, MONSERUD R A. Growth and yield of all-aged Douglas-fir-western hemlock forest stands: a matrix model with stand diversity effects [J]. *Can J For Res*, 2005, **35**: 2368 - 2381.
- [8] 雷相东, 唐守正. 群落本质多样性排序及应用[J]. 林业科学研究, 2002, **15** (3): 285 - 290.
LEI Xiangdong, TANG Shouzheng. Community intrinsic diversity ordering and its application [J]. *For Res*, 2002, **15** (3): 285 - 290.
- [9] 孟宪宇. 测树学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1990.
- [10] LEXEROD L N, EID T. An evaluation of different diameter diversity indices based on criteria related to forest management planning [J]. *For Ecol Manage*, 2006, **222**: 17 - 28.
- [11] MAGNUSSEN S, BOYLE T J B. Estimating sample size for inference about Shannon-Weaver and Simpson's indices of species diversity [J]. *For Ecol Manage*, 1995, **78**: 71 - 84.
- [12] 马克平. 生物多样性的原理与方法[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1994: 141 - 165.
- [13] 雷相东, 唐守正. 林分结构多样性指标研究综述[J]. 林业科学, 2002, **38** (3): 140 - 146.

- LEI Xiangdong, TANG Shouzheng. Indicators on structural diversity within-stand: a review [J]. *Sci Silv Sin*, 2002, **38** (3): 140 – 146.
- [14] LATHAM P A, ZUURING H R, COBEL D W. A method for quantifying vertical forest structure [J]. *For Ecol Manage*, 1998, **104**: 157 – 170.
- [15] 于顺利, 马克平, 徐存宝, 等. 环境梯度下蒙古栎群落的物种多样性特征[J]. 生态学报, 2004, **24** (12): 2932 – 2939.
- YU Shunli, MA Keping, XU Cunbao, *et al.* The species diversity characteristics comparison of *Quercus mongolica* community along environmental gradient factors [J]. *Acta Ecol Sin*, 2004, **24** (12): 2932 – 2939.
- [16] WIKSTROM P, ERIKSSON O L. Solving the stand management problem under biodiversity-related considerations [J]. *For Ecol Manage*, 2000, **126**: 361 – 376.
- [17] 陈新美, 张会儒. 东北林区 4 种主要森林类型直径结构的比较研究[J]. 浙江林业科技, 2009, **29** (1): 20 – 24.
- CHEN Xinmei, ZHANG Huiru. Comparison of diameter structure of four forest types in Jinlin Province [J]. *J Zhejiang For Sci Technol*, 2009, **29** (1): 20 – 24.
- [18] 雷相东, 唐守正, 李冬兰, 等. 影响天然林林下层物种多样性的林分因子的研究[J]. 生态学杂志, 2003, **22** (3): 18 – 22.
- LEI Xiangdong, TANG Shouzheng, LI Donglan, *et al.* Stand variables affecting understory plant species diversity in natural forests [J]. *Chin J Ecol*, 2003, **22** (3): 18 – 22.