

林木直径大小多样性量化测度指数的比较研究

白超, 惠刚盈*

(中国林业科学研究院林业研究所, 国家林业局林木培育重点实验室, 北京 100091)

摘要:[目的]为了客观恰当地量化表达林分水平上的林木直径大小多样性。[方法]采用6块定位样地数据,对比分析基于直径分布的 Simpson (D_N)、Shannon (H_N) 及单木断面积 Gini 系数 (GC), 基于直径大小分化度的 Simpson (D_T)、Shannon (H_T) 及其均值 (\bar{T}) 这6种林木直径大小多样性量化测度指数, 筛选出符合逻辑排序且具有较好辨别能力的直径大小多样性量化测度指数。[结果]6块样地的林木直径大小多样性逻辑排序为吉林胡桃楸针阔混交林经营样地 > 吉林胡桃楸针阔混交林对照样地 > 甘肃锐齿栎阔叶混交林经营样地 > 甘肃锐齿栎阔叶混交林对照样地 > 北京油松落叶松人工混交林样地 > 北京侧柏人工纯林; 林木直径大小多样性为天然林高于人工林, 更为成熟的吉林老龄林样地高于甘肃中龄林样地, 经过至少5年结构化经营的样地高于对照样地, 人工混交林样地高于人工纯林样地。基于直径分布的 D_N 、 H_N 和 GC 测度的6块样地林木直径大小多样性排序结果与逻辑排序不一致; 基于直径大小分化度的 D_T 、 H_T 和 \bar{T} 测度的各林分林木直径大小多样性排序与逻辑排序一致。[结论]基于直径分布的 D_N 、 H_N 和 GC 量化测度指数不能恰当地表达林木直径大小多样性。基于直径大小分化度的 D_T 、 H_T 和 \bar{T} 量化测度指数能恰当表达林木直径大小多样性; 相对 D_T 和 H_T , \bar{T} 是一个连续型变量的测度指数, 而且能从林分整体水平上量化林木间的大小分化程度, 易于解释其生物学意义。因此, 认为 \bar{T} 是恰当表达及区分各林分林木直径大小多样性的最优量化测度指数。

关键词: 林木直径大小多样性; 直径分布; 直径大小分化度

中图分类号: S718.54

文献标识码: A

Study on Diversity Indices of Tree Diameter Size

BAI Chao, HUI Gang-ying

(Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, State Forestry Administration; Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: [Objective] To evaluate the tree size diversity of natural and artificial forest. [Method] The data of 6 sample plots were compared and used to estimate the 6 size diversity indices, including size diversity indices that based on diameter distribution of Simpson (D_N), Shannon (H_N) and individual tree basal area of Gini coefficient (GC), and the size diversity indices that based on differentiation of diameter distribution of Simpson (D_T), Shannon (H_T) and its mean value (\bar{T}). [Result] The results showed that the size diversity logical ranking of the 6 plots was successively the contrastive plot of *Juglans mandshurica* mixed broadleaf-conifer forest in Jilin > the structure-based forest managed plot of *J. mandshurica* mixed broadleaf-conifer forest in Jilin > the structure-based forest managed plot of *Quercus aliena* var. *acutiserrata* broadleaved mixed forest in Gansu > the contrastive plot of *Q. aliena* var. *acutiserrata* broadleaved mixed forest in Gansu > the plot of *Pinus tabulaeformis* and *Larix gmelinii* mixed plantation > the plot of *Platycladus orientalis* mixed plantation. The size diversity of natural forest was higher than that of the artificial forest, the more matured stand of old-growth forests in Jilin was higher than half-matured forest

收稿日期: 2016-02-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(31370638)

作者简介: 白超(1988—), 女, 云南人, 在读博士, 主要从事森林空间结构研究。

* 通讯作者。

in Gansu, the stand been applied structure-based forest management for at least 5 years was higher than the contrastive plot, the mixed artificial stand was higher than the pure artificial stand. [**Conclusion**] The ordering results of methods GC , H_N and D_N showed inconformity to the logical ranking, stating that the methods based on diameter distribution could not properly express the differences of size diversity. The ordering results of methods \bar{T} , D_T and H_T showed conformity to the logical ranking, stating that the methods based on diameter differentiation distribution could properly express the differences of diameter diversity among the 6 plots. It was better for \bar{T} to discriminate the differences among 6 plots than D_T and H_T , due to its ability to estimate continuous variable, reflecting the differential degree between the target trees and the nearest neighboring trees, and that prone to explain its biological meaning. Therefore, it is considered that the \bar{T} as the best method to express the diameter size diversity.

Key words: tree diameter size diversity; diameter distribution; diameter size differentiation

林木大小多样性作为森林结构多样性的重要组成部分^[1],表现为林分的水平结构(林木直径大小多样性)、垂直结构(林木树高大小多样性)或年龄结构的变异越大,则林分结构越复杂^[1-2]。客观恰当地量化表达林分水平上的林木大小多样性对于评价天然林或人工林的经济、生态、社会价值及其经营措施是至关重要的。林木大小多样性高的林分,如混交异龄林,其林内的林木株数分布随着径级增大而减少,这样的林分只适于采取择伐具有较高经济价值的成熟大径级林木的经营措施。若林分的林木大小多样性低,且林分内绝大多数的树木都为成熟林木,皆伐(部分皆伐)则被认为是这种林分最实用的经营措施。林分的林木大小多样性越高则其内的生境就越丰富多样,不断产生的大径阶枯死木能为森林生态系统提供较高水平的生物多样性^[3]。除此之外,复杂多样的林分结构能提供休闲娱乐的优美风景,因此而产生积极的社会价值^[4],显然,对林木大小多样性的研究具有非常重要的意义。

用于描述林木大小的因子包括林木直径、树高和冠幅等,由于胸高直径(胸径)在林分中测定简单、方便、准确,而且通常与其他因子(树高和冠幅)之间高度相关^[5],因此,直径被普遍用于分析林木大小多样性^[5-6]。国内有少量关于林木直径大小多样性的研究,这些研究测度林木直径大小多样性的方法都是以各径级断面积的频率计算的 Shannon 值,如向玮等^[7]把此类林木直径大小多样性指数引入矩阵生长模型;舒树森等^[8]分析了此类林木直径大小多样性与立地条件、林分结构的作用关系;然而,Valbuena 等^[9]认为,以各径级的株数频率计算的林木直径大小多样性更能反映出林分幼树更新的差异。林分的及时更新与采伐方式是实现森林可持续利用的关键^[10],能反映出林分更新差异的林木直径

大小多样性的测度方法会更有意义。目前,与距离无关的林木直径大小多样性方法已有大量的研究,包括常用于评估物种丰富度的多样性指数,如 Shannon 指数、Simpson 指数等;分析林木大小不一致性的断面面积 Gini 系数和直径离散程度的变异系数等及描述直径分布特征的偏度等方法^[1-13]。与距离有关的方法能够提供更多林分结构深层次的信息,但目前缺少与距离有关的林木直径大小多样性量化测度指数的研究。优良的林木直径大小多样性量化测度指数在评价不同结构类型^[9]的林分时应该具备一定的逻辑性^[5];同时也应该具有较强的判别能力,即在分析具有相似林分结构的林分时应该得到接近的指数值,若评价林分结构差异大的林分时则应该得到差异较大的指数值,但至今还没有研究从上述的 2 个方面去评价和比较各种林木直径大小多样性量化测度指数(与距离有关和与距离无关)。此外,Lexerød 等^[5]认为,排序不同类型的林分的林木大小多样性,得到的排序结果应符合逻辑,即逻辑排序。逻辑排序是一种定性的非空间结构的判断林分的林木大小多样性标准,但不能定量地测度林分的林木大小多样性。因此,有必要提出符合多样性逻辑排序且能量化林木大小多样性的测度指数。Gadow^[14]提出的直径大小分化度是一个与距离有关,量化林木与其最近邻木之间的大小差异程度,能体现林分更为微观的结构特征。因此,本研究提出基于直径大小分化度的 Simpson (D_T)、Shannon (H_T) 和均值 (\bar{T}) 这 3 个与距离有关的林木直径大小多样性量化测度指数;同时,也采用了基于直径分布的 Simpson (D_N) 和 Shannon (H_N) 及断面面积 Gini 系数 (GC) 这 3 个与距离无关的林木直径大小多样性量化测度指数。通过比较分析这 6 个指数对实测样地的林木直径大小多样性的排序结果,试图选出符合多样性逻辑

辑排序准则的直径大小多样性量化测度指数。

1 样地基本情况

2007年,在吉林省蛟河林业实验区管理局东大坡自然保护区(127°35′~127°51′ E,43°51′~44°05′ N)人为干扰的天然老龄林内,设置2块胡桃楸(*Juglans mandshurica* Maxim.) 针阔混交林样地,其中一块为对照样地,另一块在2008年进行了结构化经营(表1)。2块样地进行过多次复查,本研究采用2014年的复查数据。境内平均海拔400~500 m,地势为东北部山高坡陡,西南部地势平缓。该区属温带大陆性季风山地气候,全年平均气温1.7℃,降雨集中在6-8月,年均降水量700~800 mm,无霜期120~150 d,平均积雪厚度20~60 cm,土壤为暗棕壤,结冻深度为1.5~2.0 m。

2009年,在甘肃省南部小陇山百花林场小阳沟营林区(104°22′~105°43′ E,33°30′~34°40′ N)人为干扰的天然中龄林内,设置2块锐齿栎(*Quercus aliena* var. *acutiserrata* Maxim.) 阔叶混交林样地,其

中一块样地为对照样地,另一块在2009年进行了结构化经营(表1)。2块样地同样经过多次复查,本研究采用2014年的复查数据。境内海拔700~2500 m。该区属暖温湿润—中温半湿润大陆性季风气候,年平均气温7~12℃,年均降水量600~900 mm,年日照时数1520~2313 h,无霜期130~220 d,土壤为黄褐土。

2013年3月,在北京市门头沟区九龙山自然保护区(115°59′~116°06′ E,39°54′~39°57′ N)内设置2块永久性样地,一块为油松(*Pinus tabulaeformis* Carriere) 落叶松(*Larix gmelinii* Rupr.) 针阔人工混交林(表1,样地5),另一块为侧柏(*Platycladus orientalis* L.) 人工纯林(表1)。2块样地在2013年6月进行了结构化森林经营,本研究采用未经经营时的数据。境内海拔400~1000 m。该区属大陆性东岸季风气候,年平均气温11~12℃,年均降水量600~700 mm,年日照时数2500~2700 h,无霜期190~200 d,区内400 m以下为山地粗骨褐土,400 m以上为山地淋溶褐土。

表1 6块样地的林分特征

样地号	树种/株	样地大小 /hm ²	密度/ (株·hm ⁻²)	每公顷断面积 /(m ² ·hm ⁻²)	直径					
					径阶数/个	范围/cm	平均/cm	标准差/cm	变异系数/%	偏度
1	22	1.00	699	28.72	30	5.1~82.5	18.7	13.151	70.3	1.295
2	19	1.00	677	31.24	33	5.0~81.5	19.7	14.068	71.2	1.215
3	35	0.49	771	26.64	23	5.0~73.0	17.7	11.185	63.0	1.045
4	34	0.49	798	23.16	26	5.0~57.2	15.8	10.978	69.5	1.371
5	12	0.50	1332	25.45	13	5.0~30.0	14.6	5.570	38.2	0.248
6	9	0.50	2084	18.13	8	5.0~20.4	10.3	2.960	28.9	0.519

注:1为吉林胡桃楸针阔混交林对照样地;2为吉林胡桃楸针阔混交林经营样地;3为甘肃锐齿栎阔叶混交林对照样地;4为甘肃锐齿栎阔叶混交林经营样地;5为北京油松落叶松人工混交林样地;6为北京侧柏人工纯林。

2 研究方法

样地内所有直径≥5 cm的林木进行挂牌标号,利用全站仪(TOPCON-GTS-602AF)测定林木坐标,并记录林木树种、直径、树高、冠幅和健康状况等。

2.1 林木直径大小多样性的判别标准与方法

直径大小多样性量化测度指数的优劣取决于其对不同林分的判别能力以及逻辑排序。判别能力是决定指数能否应用于森林经营规划的重要因素,判别能力差的指数会出现完全不同直径分布的林分具有相同或相似的指数值,这会导致给予不合理的经营决策。除了判别能力,不同类型林分的大小多样性指数值的排序需要符合逻辑,即逻辑排序^[8]。是否符合逻辑排序,依赖于描述林木直径多样性的一些属性特征,目前研究中,具有以下特征的排序被

认为是符合逻辑的:(1)对于不同直径分布(直径分布曲线和偏度)的林分,直径分布为反J型的林分应比正态分布的林分具有更高的林木直径大小多样性;(2)对于具有相同或相似直径分布的林分,具有更广直径范围(直径变异系数和直径划分等级数)的林分应具有更高的林木直径大小多样性;(3)对于具有相似直径分布和直径范围且大树(直径大于50 cm以上林木)的断面积占整个林分断面积比例更高的林分应具有更高的林木直径大小多样性。符合逻辑排序的直径大小多样性量化测度指数的判别能力好坏,取决于它计算不同林分得到的一组指数值的差异程度(变异系数),指数值变异系数越大的量化测度指数的判别能力越好。

本研究采用变异系数(CV)和偏度(SK)^[15]分析林木直径的大小差异和分布不对称程度,采用Excel

统计分析。直径按 2 cm 划分,并绘制各样地直径株数分布直方图(图 1)和断面积频率分布直方图(图 2)。用负指数函数拟合分析异龄林样地的直径分布曲线,直径分布曲线负指数函数公式^[16]为:

$$N = ke^{-aD}$$

式中: N 为各径级的株数; e 为自然对数的底; D 为胸径径阶中值; a, k 为常数。

2.2 基于直径分布的林木大小多样性量化测度指数和单木断面积 Gini 系数

本研究从林分水平研究林木直径大小多样性,因此,选择测度林分水平的 α -多样性指数——最为广泛应用的指数 Shannon 指数^[17] 和 Simpson 指数^[18]。每块样地林木直径按 2 cm 划分 S_N 个等级,采用 Excel 统计各径阶的林木株数 $n_j (j=1, \dots, S_N)$, 并计算出每个径阶林木株数 n_j 占总株数 n 的频率 $p_j = n_j/n$, 采用软件 R 3.0.1 计算 2 个多样性指数的值。

基于直径分布的 Simpson 林木大小多样性指数 (D_N) 常被用来分析物种多样性,其取值范围在 $[0, 1 - S_N^{-1}]$, 计算公式:

$$D_N = 1 - \sum_{j=1}^{S_N} p_j^2$$

基于直径分布的 Shannon 林木大小多样性指数 (H_N) 是目前用于测度林木直径大小多样性的最常用的方法^[19-20], 该指数的取值范围在 $[0, \ln(S_N)]$, 其计算公式为:

$$H_N = - \sum_{j=1}^{S_N} p_j \ln(p_j)$$

单木断面积 Gini 系数 (GC): GC 是意大利经济学家 Gini^[21] 根据洛伦茨曲线计算出来能反映收入分配不平等程度的指数,后来被用于评估种群中的个体大小的不一致性^[22]。本研究则将其用于描述林分内单株断面积 (BA_i) 的大小不一致性。 GC 的优点是能避免主观地分组数据,因而尽可能地保留数据中包含的所有信息;但缺点是只适用于具有累积统计意义的变量(如断面积、材积或生物量)^[23]。 GC 的取值区间在 $[0, 1]$, 是一个易于解释的指数。本研究采用软件 R 3.0.1 计算各样地的 GC 值,其公式为:

$$GC = \frac{\sum_{i=1}^n (2i - n - 1) BA_i}{\sum_{i=1}^n BA_i (n - 1)}$$

2.3 基于直径大小分化度的林木大小多样性量化测度指数

林木直径大小分化度 (T_i) 是 Gadow 等^[14] 在对混交林的研究中提出的概念,本研究用参照树直径 d_i 与其最近一株相邻木(为避免多株最近相邻木的平均值导致潜在折中混淆的问题,通常采用一株最近邻木来分析)直径 d_1 的相对比值表示,并且总是以二者中的大者作为分母,取值范围在 $[0, 1)$, 当 $T = 0$ 时说明最近相邻木与参照树的大小相同; $T \approx 1$ 则表示最近相邻木与参照树之间相差非常悬殊。为避免边缘效应对林分结构的影响,计算时缓冲区设置为 5 m, 采用软件 R 3.0.1 计算林木直径大小分化度, T_i 的计算公式为:

$$T_i = 1 - \frac{\min(d_i, d_1)}{\max(d_i, d_1)}$$

本研究将 T_i 划分为 5 个等级:(1) $0 \leq T_i < 0.2$, 对象木与其最近邻木之间相差 20% 以下;(2) $0.2 \leq T_i < 0.4$, 对象木与其最近邻木之间相差 20% ~ 40%;(3) $0.4 \leq T_i < 0.6$, 对象木与其最近邻木之间相差 40% ~ 60%;(4) $0.6 \leq T_i < 0.8$, 对象木与其最近邻木之间相差 60% ~ 80%;(5) $0.8 \leq T_i < 1.0$, 对象木与其最近邻木之间相差 80% 及以上。用 Excel 统计样地核心区 5 个等级的林木株数 $N_j (j=1, \dots, 5)$, 并计算出每个等级林木株数 N_j 占核心区总株数 N 的频率 $P_j = N_j/N$, 分别采用软件 R 3.0.1 计算基于直径大小分化度的 Simpson (D_T) 和 Shannon (H_T) 林木大小多样性及其均值 (\bar{T})。

基于直径大小分化度的 Simpson 大小多样性指数 (D_T), 该指数的取值范围 $[0, 1 - 5^{-1}]$, 其计算公式为:

$$D_T = 1 - \sum_{j=1}^5 P_j^2$$

基于直径大小分化度的 Shannon 大小多样性指数 (H_T), 该指数的取值范围 $[0, \ln(5)]$, 其计算公式为:

$$H_T = - \sum_{j=1}^5 P_j \ln(P_j)$$

直径大小分化度均值 (\bar{T}), 该指数的取值范围 $[0, 1)$, 其计算公式为:

$$\bar{T} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i$$

3 结果与分析

3.1 不同林分的林木直径大小多样性逻辑

样地 1、2、3、4 为天然混交林,直径分布都近似

反J型分布(图1),各径阶的林木株数从总体上呈随着径阶增大而分布株数减少的趋势。样地1的林木直径分布范围广,其中最大林木的直径达到82.5 cm,平均直径为18.7 cm,但受人为干扰,在径阶58、60、64~76 cm时林木缺失;负指数函数拟合直径分布的方程为:

$$y = 109.88e^{-0.062x}, R^2 = 0.8876$$

样地2的林木直径分布范围也较广,最大直径为81.5 cm,平均直径为19.8 cm,同样受人为干扰,在径阶58、62、64、72、76和80 cm时林木也缺失。其负指数函数:

$$y = 107.62e^{-0.062x}, R^2 = 0.8708$$

样地3的最大直径为73.0 cm,平均直径为17.8 cm,由于人为干扰严重,大径阶仅有50、64、74 cm的林木。其负指数函数为:

$$y = 62.282e^{-0.061x}, R^2 = 0.8914$$

样地4的最大直径为57.2 cm,平均直径为15.8 cm;该林分也受人为干扰,但仅在50 cm径阶处没有林木分布。其负指数函数:

$$y = 83.314e^{-0.08x}, R^2 = 0.8717$$

样地5、6为人工林,其直径分布为近正态分布

(图1);样地5的最大直径为30.0 cm,平均直径为14.6 cm,受林分抚育补植的影响,该林分在6 cm径阶有较多小径级的林木分布。样地6的最大直径为20.4 cm,平均直径为10.3 cm。6块样地的林木直径偏度都大于零,说明各样地内小于平均直径的林木个体占多数。

从直径分布(图1,表1)特征可以看出:4块天然林样地的径阶等级数远多于2块人工林,因此具有倒J型分布的4块天然林林木直径大小多样性应高于呈正态分布的2块人工林样地。4块天然林样地拟合的负指数函数都具有相似的直径分布曲线,从4块天然林的径阶等级数看,依次为样地2(33个) > 样地1(30个) > 样地4(26个) > 样地3(23个)(表1);直径变异系数为样地2(71.2%) > 样地1(70.3%) > 样地4(69.5%) > 样地3(63.0%);除此之外,4块天然林样地中大于50 cm以上的大树断面积占整个林分断面积比例依次为样地2(0.177) > 样地1(0.127) > 样地4(0.106) > 样地3(0.057)(图2)。因此,4块天然林样地的林木直径大小多样性逻辑排序应为样地2 > 样地1 > 样地4 > 样地3。从2块人工林的径阶等级数看,分别为样地5(13个)

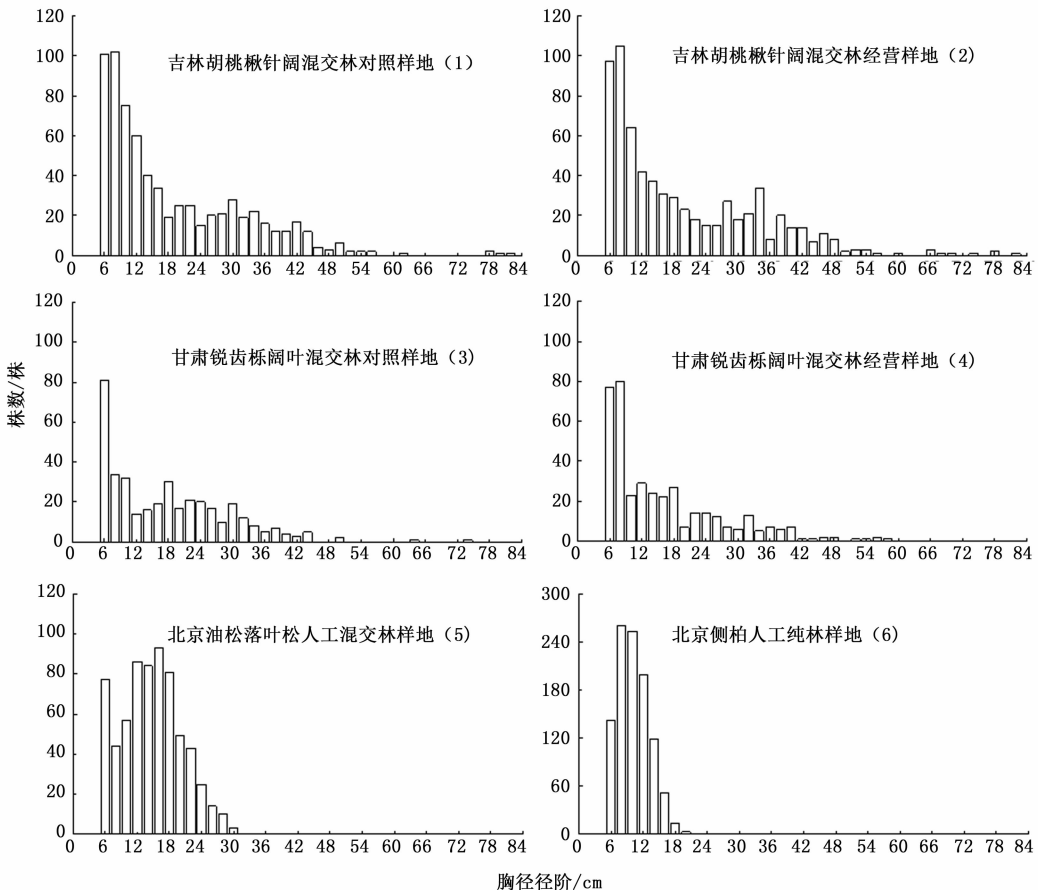


图1 不同林分不同胸径径阶的株数分布(每块样地按2 cm划分径阶)

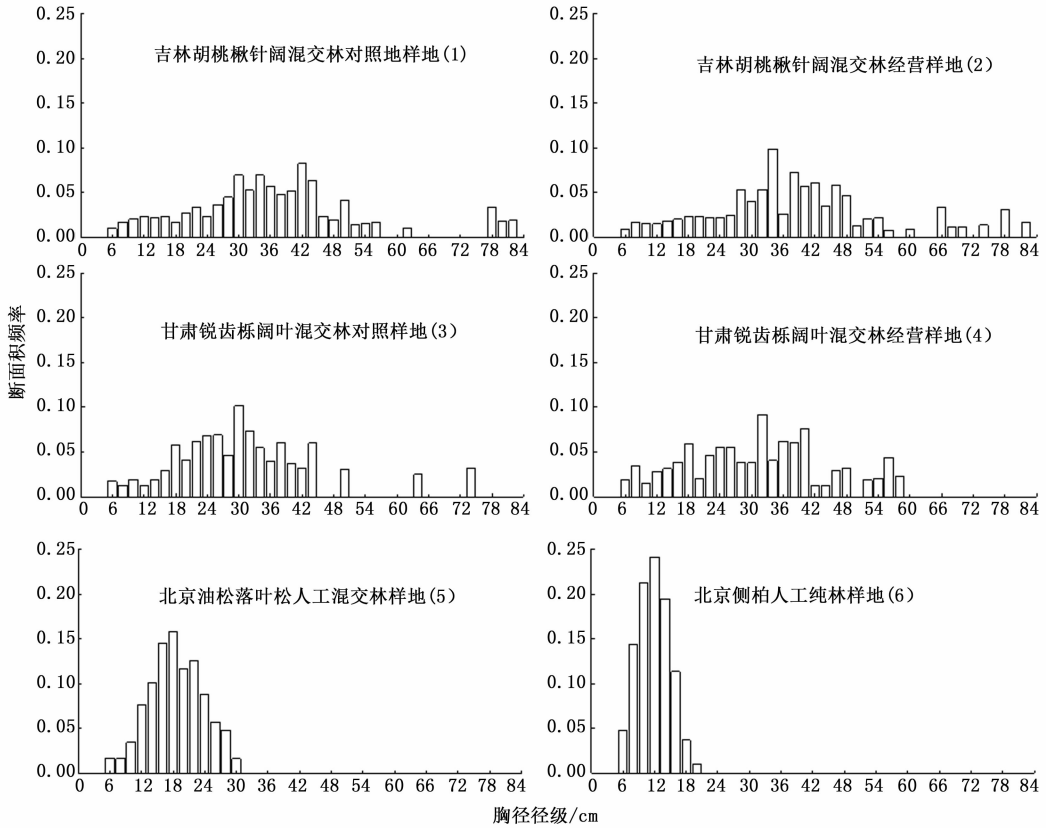


图2 不同林分不同胸径径阶的断面积频率分布(每块样地按2 cm划分径阶)

>样地6(8个),直径变异系数为样地5(38.2%)>样地6(28.9%)。从总体上看,6块样地的林木直径大小多样性逻辑排序为样地2>样地1>样地4>样地3>样地5>样地6。

3.2 基于直径分布的林木大小多样性和单木断面积 Gini 系数

从基于直径分布的 Simpson (D_N) 和 Shannon (H_N) 林木大小多样性量化测度指数(表2)看, D_N 从大到小为样地2(0.925)>样地1(0.922)>样地3(0.911)>样地5(0.896)>样地4(0.892)>样地6(0.808), D_N 没有恰当表达出天然林和人工林的林木直径大小多样性差异; H_N 从大到小依次为样地2(2.909)>样地1(2.858)>样地3(2.730)>样地4(2.610)>样地5(2.357)>样地6(1.750),天然林样地3与样地4的林木直径大小多样性指数值排序与逻辑排序准则不符。从林木断面积 GC 值看,2块人工林的 GC 值都在0.4以下,而4块天然林的 GC 值都在0.5以上, GC 值虽然能区分直径分布为正态的人工林和直径分布为倒J型的天然林,但从其与逻辑排序不符的排序结果样地4(0.633)>样地2(0.632)>样地1(0.629)>样地3(0.582)>样地5

(0.389)>样地6(0.306)看,该指数却无法恰当地区分开直径分布类型相似的天然林。由此可见, D_N 、 H_N 和 GC 都不能恰当地表达6块样地的林木直径大小多样性。

表2 6块样地的林木直径大小多样性指数值

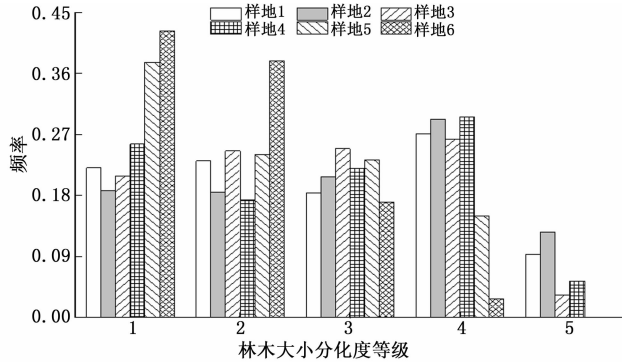
直径大小多样性 量化测度指数	样地号						CV
	1	2	3	4	5	6	
D_N	0.922	0.925	0.911	0.892	0.896	0.808	
H_N	2.858	2.909	2.730	2.610	2.357	1.750	
GC	0.629	0.632	0.582	0.633	0.389	0.306	
D_T	0.782	0.786	0.764	0.765	0.724	0.648	0.070
H_T	1.558	1.574	1.484	1.504	1.334	1.133	0.118
\bar{T}	0.454	0.489	0.433	0.444	0.323	0.252	0.229

注: D_N 、 H_N 及 GC 分别为基于直径分布的 Simpson、Shannon 林木大小多样性及代码断面积 Gini 系数; D_T 、 H_T 及 \bar{T} 分别为基于直径大小分化度 Simpson、Shannon 大小多样性及其均值;CV 为6块样地林木直径大小多样性指数值的变异系数。

3.3 基于直径大小分化度的林木大小多样性

从图3可以看出:4块天然混交林与2块人工林的直径大小分化度分布差异很大。4块天然林样地第1~3等级上分布的频率大约为0.2;到第4等级分布的频率最多,达0.25以上,即有25%以上的林木与其最近邻木的大小差异悬殊;而在第5等级分布的频率都少于0.15。2块人工林在第1等级上

分布的频率最多,都超过 0.35,说明样地中与其最近邻木的大小相近的林木占总株数的 35% 以上;之后随着等级的增大分布的频率减少,到第 5 等级上没有频率分布。



林木直径大小分化度等级:1 为 $0 \leq T_i < 0.2$; 2 为 $0.2 \leq T_i < 0.4$; 3 为 $0.4 \leq T_i < 0.6$; 4 为 $0.6 \leq T_i < 0.8$; 5 为 $0.8 \leq T_i < 1$

图3 不同林分不同大小分化度等级的频率分布

从基于直径大小分化度的 Simpson (D_T)、Shannon (H_T) 林木大小多样性及其均值 (\bar{T}) (表 2) 看,6 块样地的 D_T 从大到小为样地 2 (0.786) > 样地 1 (0.782) > 样地 4 (0.765) > 样地 3 (0.764) > 样地 5 (0.724) > 样地 6 (0.648), 排序结果与逻辑排序一致。 H_T 对 6 块样地的排序依次为样地 2 (1.574) > 样地 1 (1.558) > 样地 4 (1.504) > 样地 3 (1.484) > 样地 5 (1.334) > 样地 6 (1.133), 排序结果与逻辑排序一致。6 块样地的 \bar{T} 从大到小为样地 2 (0.489) > 样地 1 (0.454) > 样地 4 (0.444) > 样地 3 (0.433) > 样地 5 (0.323) > 样地 6 (0.252), 排序结果与逻辑排序一致。从总体上看,4 块天然林的直径大小分化度等级数(丰富度)都为 5,2 块人工林为 4;从直径大小分化度在每个等级上分布的均匀程度看,分别为样地 2 > 样地 1 > 样地 4 > 样地 3 > 样地 5 > 样地 6。在丰富度相同时均匀度越高则多样性指数值越大,由此可见,无论是从直径大小分化度分布情况,还是从基于直径大小分化度的均值 (\bar{T})、Simpson (D_T) 和 Shannon (H_T) 林木大小多样性值看,均为样地 2 > 样地 1 > 样地 4 > 样地 3 > 样地 5 > 样地 6。显然,3 个基于直径大小分化度的方法都能恰当表达 6 块样地林木直径大小多样性。3 个方法测度 6 块样地林木直径大小多样性指数值的变异系数依次为 \bar{T} (0.229) > H_T (0.118) > D_T (0.070)。可见, \bar{T} 区分辨别各林分林木直径大小多样性的能力最强,而 D_T 能力最差。

4 讨论

通过 Lexerød^[5] 提出的逻辑排序准则,对 6 块样地的林木直径大小多样性进行排序,结果为样地 2 > 样地 1 > 样地 4 > 样地 3 > 样地 5 > 样地 6,也就是天然林的林木直径大小多样性高于人工林,林分更为成熟的吉林地区的胡桃栎针阔混交林的林木直径大小多样性高于甘肃地区的锐齿栎阔叶混交林,同一地区经过结构化经营样地的林木直径大小多样性高于对照样地,人工混交林的林木直径大小多样性高于人工纯林。现有对天然林和人工林林木直径大小多样性的研究^[5,24-25] 都表明,直径分布为倒 J 型的天然林比正态分布的人工林林木直径大小多样性更高。对于不同发育阶段的林分,Varga 等^[11] 认为,林分年龄是影响林木直径大小多样性的重要因素;Lei 等^[12] 研究表明,随着林分发育阶段的变化,即从幼龄林到过熟林,林分的结构大小多样性(包括物种多样性、林木直径大小多样性和树高大小多样性)会逐渐增大,也就是随着林分的生长发育林分结构趋于复杂;Spies^[25] 的研究也表明,随着花旗松 (*Pseudotsuga menziesii* Franco) 林的演替发展,其林木直径和树高大小多样性呈现 S 型变化,上述研究结果与本研究结果一致。结构化森林经营遵循连续覆盖、生态有益,采用单株择伐保护并促进林分天然更新,经过结构化森林经营的样地林木直径大小多样性增大,适度采伐可能促进资源的高效利用及种内种间竞争的生态位分化;这与 Wang 等^[26] 和 Lei 等^[12] 的研究结果一致,他们认为,择伐或部分采伐可以提高天然林的结构多样性(包括林木直径大小多样性)。对于混交林和纯林的林木直径大小多样性,Varga 等^[11] 研究发现,多树种混交的林分由于不同树种间固有生长速率的差异,理应具有更高的结构多样性(包括直接林木直径大小多样性),本研究结果也与此一致。

Lexerød 等^[5] 和 Valbuena 等^[9] 一致认为,相对于需要主观划分等级的 D_N 和 H_N 等林木直径大小多样性指数,GC 能更客观更好地表达林木直径大小多样性;但 Rouvinen 等^[27] 对经营和天然未经营成熟樟子松林的林木直径大小多样性的研究认为, D_N 、 H_N 和 GC 都不能更好地表达和判别这 2 种林分的林木直径大小多样性;Hui 等^[28] 对中国东北和西北地区天然林林木直径大小多样性的研究也认为, D_N 、 H_N 和 GC 都不能理想地区分这 2 个地区林分的林木

直径大小多样性。本研究结果同样认为与距离无关的 D_N 、 H_N 和 GC 测度指数均不能恰当地表达林木直径大小多样性。

5 结论

与距离无关的 D_N 、 H_N 和 GC 三个测度指数都不能恰当地表达林木直径大小多样性。与距离有关的林木直径大小多样性测度指数 \bar{T} 、 D_T 和 H_T , 对 6 块样地林木直径大小多样性的排序与逻辑排序一致, 说明它们都能恰当地表达 6 块样地的林木直径大小多样性。 \bar{T} 和 D_T 是介于 0~1 之间的均一化指数, 易于解释其生物学意义; 而 H_T 的值介于 0~ln5, 不易于解释其生物学意义。 \bar{T} 从林分整体水平上反映林木的大小分化程度, 体现了各林木与其最近相邻木之间的微观结构特征, 量化出直径差异的程度, 且比 D_T 和 H_T 区分辨别各林分林木直径大小多样性的能力强。因此, 本研究认为, \bar{T} 是恰当表达及区分各林分林木直径大小多样性的最优量化测度指数。

参考文献:

[1] Macarthur R H, Macarthur J W. On bird species diversity[J]. *Ecology*, 1961, 42(3): 594-598.

[2] Buongiorno J, Dahir S, LU H, et al. Tree size diversity and economic returns in uneven-aged forest stand[J]. *Forest Science*, 1994, 40(1): 83-103.

[3] Fries C, Johansson O, Pettersson B, SIMONSSON P, et al. Silvicultural models to maintain and restore natural stand structures in Swedish boreal forests[J]. *Forest Ecology and Management*, 1997, 94(1): 89-103.

[4] Rydberg D, Falck J. Urban forestry in Sweden from a silvicultural perspective: a review[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2000, 47(1): 1-18.

[5] Lexerød N L, Eid T. An evaluation of different diameter diversity indices based on criteria related to forest management planning[J]. *Forest Ecology and Management*, 2006, 222(1): 17-28.

[6] Solomon D S, Gove J H. Effects of uneven-age management intensity on structural diversity in two major forest types in New England[J]. *Forest Ecology and Management*, 1999, 114(2): 265-274.

[7] 向玮, 雷相东, 洪玲霞, 等. 落叶松冷杉林矩阵生长模型及多目标经营模拟[J]. *林业科学*, 2011, 47(6): 77-87.

[8] 舒树森, 赵洋毅, 段旭, 等. 基于结构方程模型的云南松次生林林木多样性影响因子[J]. *东北林业大学学报*, 2015, 43(10): 63-67.

[9] Valbuena R, Packalén P, Marti S, et al. Diversity and equitability ordering profiles applied to study forest structure[J]. *Forest Ecology and Management*, 2012(276): 185-195.

[10] 黄清麟. 浅谈德国的“近自然森林经营”[J]. *世界林业研究*,

2005, 18(3): 73-77.

[11] Varga P, Chen H Y H, Klinka K. Tree-size diversity between single-and mixed-species stands in three forest types in western Canada[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2005, 35(3): 593-601.

[12] lei X D, Wang W, Peng C H. Relationships between stand growth and structural diversity in spruce-dominated forests in New Brunswick, Canada[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2009, 39(10): 1835-1847.

[13] Neumann M, Starlinger F. The significance of different indices for stand structure and diversity in forests[J]. *Forest ecology and Management*, 2001, 145(1): 91-106.

[14] Gadov K V, Bredenkamp B. *Forest management*[M]. Pretoria: Academica, 1992.

[15] 黄良文. *统计学原理*[M]. 北京: 中国统计出版社, 2000.

[16] 惠刚盈, 胡艳波, Gadov K 等. *结构化森林经营*[M]. 北京: 中国林业出版社, 2007.

[17] Shannon C E. Communication theory of secrecy systems[J]. *Bell System Technical Journal*, 1949, 28(4): 656-715.

[18] Simpson E H. Measurement of diversity[J]. *Nature*, 1949(21): 213-251.

[19] Buongiorno J. Quantifying the implications of transformation from even to uneven-aged forest stands[J]. *Forest Ecology and Management*, 2001, 151(1): 121-132.

[20] Staudhammer C L, v Lemay M. Introduction and evaluation of possible indices of stand structural diversity[J]. *Canadian journal of forest research*, 2001, 31(7): 1105-1115.

[21] Gini C. Measurement of inequality of incomes[J]. *The Economic Journal*, 1921(31): 124-126.

[22] 王懿祥, 张守攻, 陆元昌, 等. 林木个体大小不一致性指标对人工林间伐方式的即时性响应[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(6): 1645-1651.

[23] Duduman G. A forest management planning tool to create highly diverse uneven-aged stands[J]. *Forestry*, 2011, 84(3): 301-314.

[24] O'hara K L, Hasenauer H, Kindermann G. Sustainability in multi-aged stands: an analysis of long-term plenter systems[J]. *Forestry*, 2007, 80(2): 163-181.

[25] Spies T A. Forest structure: a key to the ecosystem[J]. *Northwest science*, 1998, 72(2): 34-36.

[26] Wang W, Lei X, Ma Z, et al. Positive relationship between aboveground carbon stocks and structural diversity in spruce-dominated forest stands in New Brunswick, Canada[J]. *Forest Science*, 2011, 57(6): 506-515.

[27] Rouvinen S, Kuuluvainen T. Tree diameter distributions in natural and managed old Pinus sylvestris-dominated forests[J]. *Forest Ecology and Management*, 2005, 208(1): 45-61.

[28] Hui G, Pommerenin G A. Analysing tree species and size diversity patterns in multi-species uneven-aged forests of Northern China[J]. *Forest Ecology and Management*, 2014(316): 125-138.