

DOI:10.12171/j.1000-1522.20190120

基于邻近木的林分结构多样性研究

白宇¹ 杨华¹ 温静² 王全军³

(1. 国家林业和草原局森林资源与环境管理重点实验室(北京林业大学), 北京 100083;
2. 北京市西山试验林场, 北京 100093; 3. 吉林省延吉市汪清林业局, 吉林 延吉 133200)

摘要:【目的】林分是森林生物多样性的重要组成部分, 典型多样性指数由于其复杂性或缺乏生态相关性, 不能在空间尺度进行分析, 因此无法反映物种和空间结构的内部变化。【方法】以吉林省汪清县金沟岭林场的落叶松-云冷杉混交林为例, 采用相邻格子法建立了2块60 m × 60 m典型样地, 对描述邻近木空间单元多样性的新指数——邻近木多样性指数进行评估。【结果】(1)研究区落叶松-云冷杉林直径结构曲线呈多峰的反“J”型曲线, 中小径阶林木所占比例较高, 大径阶林木较少, 径阶株数分布连续且较为合理。(2)落叶松-云冷杉林的物种多样性和林木直径大小多样性高, 树种和径阶分布较为均匀, 混交程度强, 水平结构变异大, 林分结构复杂。(3)按3种邻近木多样性指数(物种多样性 H_s 、按径阶分布的结构多样性 H_{dec} 、按直径变化的结构多样性 S_{dv})的分析结果与传统的 Shannon 多样性指数的结果保持一致, 对具有相似结构的林分计算时得到了接近的指数值。【结论】邻近木多样性指数可以描述林分多样性及空间结构特征, 并反映物种和结构多样性的空间变化, 且具有明显的生态意义, 可应用于林分结构调整, 为森林合理经营提供理论依据。

关键词: 邻近木; 结构多样性; 空间尺度; 林分结构

中图分类号: S758.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522(2020)06-0052-07

引文格式: 白宇, 杨华, 温静, 等. 基于邻近木的林分结构多样性研究 [J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(6): 52-58. Bai Yu, Yang Hua, Wen Jing, et al. Study on forest structure diversity based on the neighbourhood trees [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(6): 52-58.

Study on forest structure diversity based on the neighbourhood trees

Bai Yu¹ Yang Hua¹ Wen Jing² Wang Qunjun³

(1. Key Laboratory of Forest Resources and Environmental Management, National Forestry and Grassland Administration (operated by Beijing Forestry University), Beijing 100083, China;
2. Beijing Xishan Experimental Forest Farm, Beijing 100093, China;
3. Wangqing Forestry Bureau, Yanji 133200, Jilin, China)

Abstract: [Objective] Stand is an important part of forest biodiversity. Due to its complexity or lack of ecological relevance, the typical diversity index cannot be analyzed on a spatial scale and therefore cannot reflect the internal changes of species and spatial structure. [Method] Taking the spruce-fir forest in Jin'gouling Forest Farm in Wangqing County of Jilin Province, northeastern China as an example, two 60 m × 60 m typical sample plots were set by contiguous grid quadrat method, and a new index describing the diversity of spatial structural units-neighbourhood diversity index was evaluated. [Result] (1) The diameter structure curve of spruce-fir forest in the study area is multi-peak anti-J-shaped curve. The proportion of forests with small and medium-order diameter was higher, the trees with large diameter were

收稿日期: 2019-03-04 修回日期: 2019-03-15

基金项目: 国家重点研发计划项目“长白山次生林更新技术与示范”(2017YFC0504101)。

第一作者: 白宇. 主要研究方向: 森林资源监测与评价。Email: 1131338362@qq.com 地址: 100083 北京市海淀区清华东路35号北京林业大学林学院。

责任作者: 杨华, 博士, 副教授。主要研究方向: 森林资源监测与评价。Email: huayang8747@163.com 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

less, and the distribution of diameters was continuous and reasonable. (2) The species diversity and tree diameter of the spruce-fir forest were high, tree species and the diameter distribution were relatively uniform, the degree of mixing was strong, the horizontal structure was highly variable, and the stand structure was complex. (3) Results of the analysis of three neighbourhood diversity indices (species diversity, structural diversity by diameter distribution, and structural diversity by diameter variation) were consistent with the results of the Shannon diversity index, and the close index values were obtained for stand with similar structure. [Conclusion] The neighbourhood diversity index can describe the diversity of forest stands and spatial structure characteristics, and reflect the spatial variation of species and structure diversity, and has obvious ecological significance. It can be applied to the structural adjustment of forest stands and provide a theoretical basis for rational forest management.

Key words: neighbourhood tree; structural diversity; spatial scale; stand structure

生物多样性保护已成为现代森林可持续经营的一个重要目标^[1]。林分是森林生物多样性的重要组成部分,对林下动植物、昆虫、鸟类和土壤微生物的多样性影响剧烈。与结构多样化程度较低的林分相比,结构多样化程度高的林分物种个体大小之间通常存在较大的差异^[2]。为量化林分结构多样性,一些传统多样性指数已在森林经营管理中被广泛使用。在林分水平上,通常采用 Shannon 多样性指数^[3]来表示林分多样性,当使用直径、树高、断面积、叶覆盖度、树冠覆盖度、生物量或其他结构分类变量代替物种,以描述树木大小的多样性等指标时,就可以反映林分结构多样性^[4-10]。这种传统多样性指数虽然对林分结构的平均状态有所反映,但没有体现林分内部的变化(空间异质性),而这也是林分结构多样性的一个重要方面^[11-12]。在森林经营管理中,林分结构的内部变化尤为重要,由于人为管理干预导致林内物种和结构多样性不稳定,使得林分空间分布和格局发生显著变化^[13]。

事实上,已有研究人员提出了包括空间结构在内的多样性指数,通过比较林分内对象木与最邻近木之间的距离差异,以及对象木的大小分布情况等方法来计算这些指数^[2,6,14]。尽管这些多样性指数可以与树木更新、生长和死亡等生态过程联系起来,但它们缺乏对相邻木空间位置关系的考虑。而林分结构与相邻木之间的空间关系联系紧密^[15],鉴于此,惠刚盈等提出了基于结构单元中相邻木物种分布差异的树种空间多样性指数(TSS),其将群落中树种间的空间隔离关系考虑在内,在一定程度上反映了森林结构的差异^[16]。提出了基于结构单元中相邻木物种分布差异的树种空间多样性指数(TSS),将群落中树种间的空间隔离关系考虑在内,在一定程度上反映了森林结构的差异。Man 等^[17]则是改进了 Shannon 多样性指数,提出了以林分邻近木空间单元为基础评估林分内物种和结构多样性的新指数——邻近木多

样性指数。本研究以吉林省汪清县金沟岭林场的落叶松-云冷杉混交林为研究对象,采用邻近木多样性指数反映邻近木空间单元尺度上的林分物种和结构多样性特征,旨在了解落叶松-云冷杉混交林的林分多样性特征及空间结构特征,以期为该地区落叶松-云冷杉混交林的恢复和保护提供指导。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于吉林省汪清县金沟岭林场(43°22'N、130°10'E),总面积 16 286 hm²,属低山丘陵地貌,海拔 550 ~ 1 200 m。林区属季风性气候,年均气温 3.9 °C,年降水量 600 ~ 700 mm,多集中在 7 月。本区属低山灰化土灰棕壤区,母岩为玄武岩。研究区内乔木树种主要为臭冷杉(*Abies nephrolepis*)、红松(*Pinus koraiensis*)、鱼鳞云杉(*Picea jezoensis*)和红皮云杉(*Picea koraiensis*)、落叶松(*Larix olgensis*)等,其他树种有白桦(*Betula platyphylla*)、色木槭(*Acer mono*)、枫桦(*Betula costata*)、青楷槭(*Acer tegmentosum*)、花楷槭(*Acer ukurunduense*)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、黄檗(*Phellodendron amurense*)等。主要灌木有忍冬(*Lonicera japonica*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、柳叶绣线菊(*Spiraea salicifolia*)等。草本植物以苔草(*Carex tristachya*)和禾本科(Gramineae)草类为主。

1.2 样地调查

2018 年 8 月,在金沟岭林场内云冷杉针阔混交林中,选择立地条件基本一致的林分,设立了 2 块 60 m × 60 m 落叶松-云冷杉针阔混交林样地。野外调查时用相邻格子法将样地布设成 36 个 10 m × 10 m 的小样方进行每木检尺,调查样地内所有乔木胸径(DBH) ≥ 5 cm 的树种、树高、胸径和冠幅,采用相对坐标法(x, y)记录样地内所有乔木树种的坐标。样地具体情况见表 1。

表1 样地调查因子

Tab. 1 Survey factors of sample plots

样地 Sample plot	株数 Tree number	密度/ (株·hm ⁻²) Density/ (tree·ha ⁻¹)	树种组成 Tree species composition	胸径 DBH/cm			树高 Tree height/m			平均冠幅 Average crown width/m	
				最大 Max.	最小 Min.	平均 Average	最大 Max.	最小 Min.	平均 Average	南北 South-north	东西 East-west
样地1 Sample plot 1	361	1 003	2落1冷1杨1枫1云1红1椴 1白1色+黄+水+青+花	46.6	5.0	18.6	23.9	3.5	14.5	5.01	5.05
样地2 Sample plot 2	430	1 194	3落2冷1红1白1云1枫1色+ 水+杨-椴-青-花	43.2	5.0	17.5	22.9	2.9	13.6	3.50	3.43

注Notes: 落. 落叶松 *Larix olgensis*; 冷. 冷杉 *Abies nephrolepis*; 杨. 大青杨 *Populus ussuriensis*; 枫. 枫桦 *Betula costata*; 云. 红皮云杉 *Picea koraiensis*; 鱼鳞云杉 *Picea jezoensis*; 红. 红松 *Pinus koraiensis*; 椴. 紫椴 *Tilia amurensis*; 白. 白桦 *Betula platyphylla*; 色. 色木槭 *Acer mono*; 黄. 黄梨 *Phellodendron amurense*; 水. 水曲柳 *Fraxinus mandshurica*; 青. 青楷槭 *Acer tegmentosum*; 花. 花楷槭 *Acer ukurunduense*.

1.3 研究方法

1.3.1 邻近木多样性指数

传统的林分多样性指数选用 Shannon 多样性指数 (H'), 以每个样地作为整体, 计算公式为:

$$H' = - \sum_{i=1}^r p_i \ln p_i$$

式中: p_i 是第 i 个树种的数量占总树种数的比例, r 为林分内树种总数。

邻近木多样性指数不仅考虑了树种多样性, 同时全面考虑了对象木与最邻近木之间的空间结构关系, 以邻近木空间单元作为单个整体, 对象木 P_i 及其 4 个最邻近木 P_{i1} 、 P_{i2} 、 P_{i3} 和 P_{i4} 共同组成一个邻近木空间单元(图 1)。图 1 中圆的大小代表树的胸径大小, 圆的颜色代表不同物种, 反映了在不同空间尺度上林分物种和结构多样性特征。邻近木多样性指数计算公式为:

$$H_s = - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^r p_{ij} \ln p_{ij}$$

式中: p_{ij} 是第 i 个对象木及其 k 个最邻近木组成的邻近木空间单元内第 j 个物种的所占比例, r 是邻近木空间单元内树种的总数 ($r \leq k+1$)。 H_s 是物种邻近木多样性指数, 通过林分中所有对象木 (n) 的平均

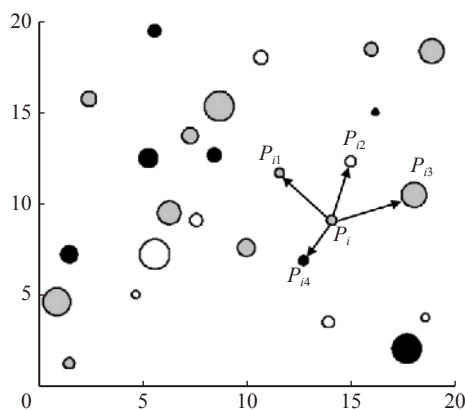


图1 邻近木空间单元示例

Fig. 1 Example of spatial structure unit of neighbourhood trees

值来计算。同时, 可以利用最邻近木之间的变异系数 (CV) 来评估物种多样性的内部空间变化, 这既取决于空间尺度, 也取决于邻近木空间单元的尺寸。

结合径阶分布 (H_{dcd}) 的树木大小邻近木结构多样性指数, 可以类似地导出计算公式:

$$H_{dcd} = - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^c d_{ij} \ln d_{ij}$$

式中: d_{ij} 是第 i 个对象木及其 k 个最邻近木组成的邻近木空间单元内第 j 个林木径阶的所占比例, c 是邻近木空间单元内径阶的总数 ($c \leq k+1$)。 H_{dcd} 通过林分中所有对象木 (n) 的平均值来计算。本研究采用的径阶距为 2 cm。

同样, 通过最邻近木的胸径大小变化 (标准差) 来替换树种数量, 可以利用下式获得与树木大小相关的邻近木多样性指数 (S_{dv})。

$$S_{dv} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n s_i$$

式中: s_i 是第 i 个对象木及其 k 个最邻近木组成的邻近木空间单元内的胸径的标准差。

1.3.2 邻近木空间单元与边缘校正

邻近木空间单元是森林空间结构分析的基本单元, 由对象木与其周围最邻近木所组成。空间多样性的计算需要确定样地内所有对象木的 k 个最邻近木。对象木是样地内任意一株树木, 其最邻近木采用 R 语言中的 RANN 包 (2.4.1 版本) 中的算法 nm2 基于树的 x 、 y 坐标确定 [18]。本研究中通过邻近木空间单元从 4 株 (野外易直接确定邻近木) 到 12 株 (野外直接确定邻近木越来越难) 不断变化, 以确定邻近木多样性值是否随邻近木空间单元的大小变化, 并将其与全林尺度多样性结果进行比较。

在计算样地平均值之前, 采用缓冲区法消除边缘效应, 将样地每条边向内水平缩进 5 m (近似于树木之间平均距离) 的边界区域作为缓冲区, 缓冲区内所有林木不作为对象木, 以减少样地边缘可能出现

的假邻近木与对象木的影响。样地内扣除缓冲区后
 所剩区域称为矫正样地, 大小为 50 m × 50 m, 矫
 正后样地 1 和样地 2 对象木株数分别为 255 株和
 301 株。

2 结果与分析

2.1 径阶株数分布变化特征

2 个样地的平均胸径分别是 18.6 cm 和 17.5 cm。
 对 2 个样地中的林木株数密度和径阶关系作图(图 2),
 可以看出: 2 块样地的树种径阶株数分布均近似为多
 峰的反“J”型曲线, 即林木株数从总体上呈随着径阶
 增大而减少的趋势, 符合异龄林直径分布规律。样
 地 1 从 6 cm 径阶开始, 随着径阶的增大, 株数急剧
 减少, 22 cm 径阶之后曲线开始波动, 38 cm 径阶后
 林木株数减少幅度渐趋平缓; 样地 2 株数分布的最
 大值出现在 6 cm 径阶处, 在 14 cm 径阶以后曲线剧
 烈波动, 同样在 38 cm 径阶后林木株数变化幅度趋
 于平缓, 且大径阶林木有缺失现象。说明研究区内
 处于中小径阶的林木所占比例较高, 而大径阶的林
 木较少。进一步分析看出, 样地 1 的径阶分布范围略
 大于样地 2, 说明样地 1 的径阶分布范围较广并且连
 续, 径阶株数分布较合理, 有利于林分的进一步发展。

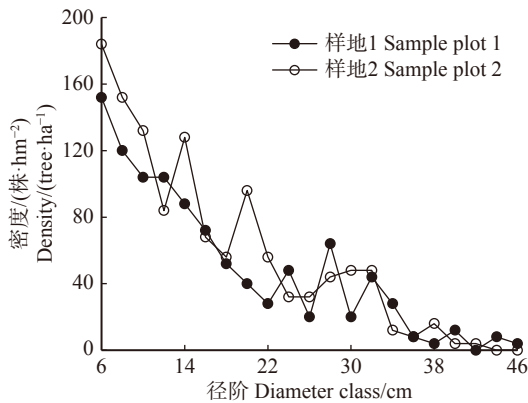


图 2 落叶松-云冷杉混交林的直径分布

Fig. 2 Diameter distribution of larch-spruce-fir mixed stands

2.2 邻近木多样性指数分析

从图 3 看出: 在林分水平上, 样地 1 的物种和径
 阶分布的 Shannon 多样性指数(H')均高于样地 2, 而
 按直径变化的结构多样性(DV)则是样地 2 高于样
 地 1。从空间尺度来看, 样地 1 在各尺寸大小的多样
 性值普遍高于样地 2, 说明样地 1 树种分配和径阶分
 布更均匀, 林分更加稳定。

随着邻近木空间单元的增大, 样地 1 和样地 2
 的 3 个邻近木多样性指数均有所增加, 但相较按物
 种和径阶分布的邻近木多样性指数, 按直径变化的
 邻近木多样性指数的增长幅度明显较小(图 3c), 说

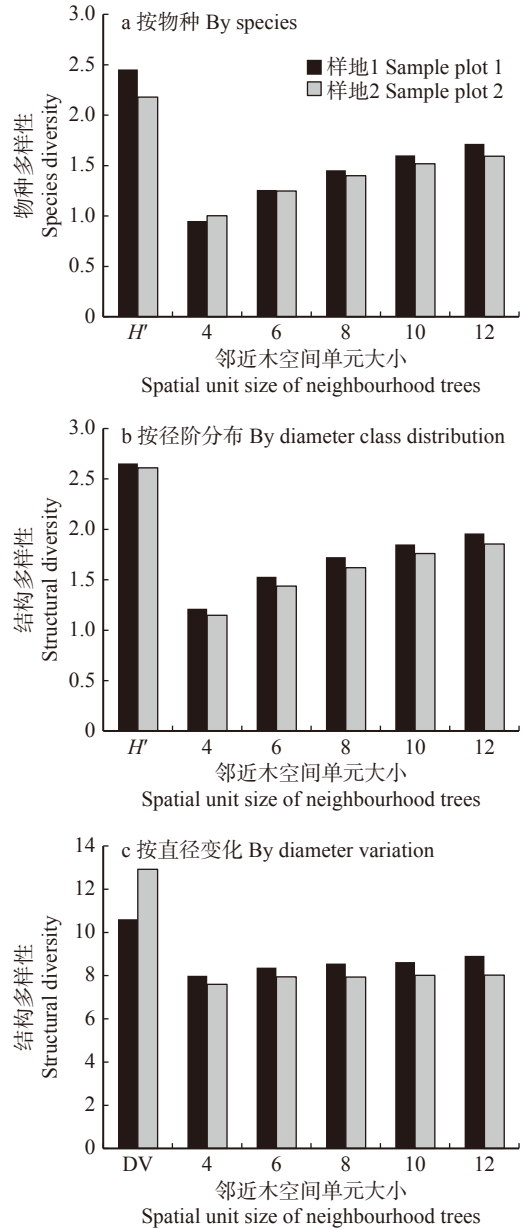


图 3 邻近木多样性指数
 H' 为传统 Shannon 多样性指数结果, DV 为林分整体直径的标准
 差。 H' is the result of Shannon diversity index, and DV is the standard
 deviation of the whole stand diameter.

图 3 邻近木多样性指数

Fig. 3 Neighbourhood diversity indices

明其较少依赖于邻近木空间单元的尺寸, 对林分结
 构变化的敏感性高于前两者。

随着邻近木空间单元的增大, 各样地邻近木多
 样性值的离散程度(变异系数 CV)有所下降, 样
 地 1 在各尺寸大小多样性值的空间变异普遍低于样
 地 2, 同样表明样地 1 在空间上分布更均匀(表 2)。

2.3 4 株邻近木多样性指数分析

进一步分析邻近木空间单元为 4 株木的邻近木
 多样性的数量关系(表 3), 从图 3a 看出: 样地 1 的平
 均 H_s 为 0.95, 样地 2 的平均 H_s 为 1.00, 说明相邻 4
 株木的混交比例高于 2 种树种 50:50 的混交比($H_s =$

表2 邻近木多样性的林内空间变异(变异系数)

Tab. 2 Within-stand spatial variation (coefficients of variation) in neighbourhood diversity

邻近木多样性指数 Neighbourhood diversity index	样地 Sample plot	邻近木空间单元大小 Spatial unit size of neighbourhood trees				
		4	6	8	10	12
H_s	样地1 Sample plot 1	0.36	0.24	0.18	0.14	0.12
	样地2 Sample plot 2	0.33	0.25	0.21	0.18	0.15
H_{dcd}	样地1 Sample plot 1	0.19	0.14	0.12	0.10	0.08
	样地2 Sample plot 2	0.23	0.17	0.14	0.11	0.11
S_{dv}	样地1 Sample plot 1	0.47	0.36	0.31	0.27	0.25
	样地2 Sample plot 2	0.52	0.40	0.35	0.31	0.29

0.69), 低于3种树种50:25:25的混交比例($H_s = 1.04$)。从图4a可以看出:样地1和样地2均在邻近木多样性取值为1.04时株数分布最多,这表明2块样地树种分布较为均匀,总体处于强度混交的状态。从图3b看出:样地1的平均 H_{dcd} 为1.21,样地2的平均 H_{dcd} 为1.15,均高于3种径阶的混合比例($H_{dcd} = 1.04$),说明2块样地林木直径大小多样性程

度高,水平结构变异大。

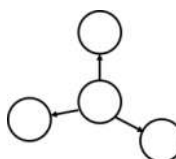
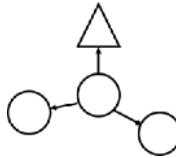
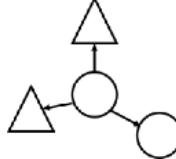
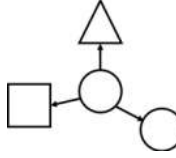
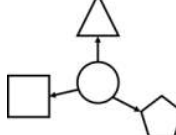
从主要树种方面分析(图4b),得到样地1和样地2冷杉的平均邻近木多样性分别为1.04和1.03,云杉的平均邻近木多样性分别为1.09和1.16,落叶松的平均邻近木多样性分别为0.94和1.01,表明2块样地中云杉和冷杉分布很均匀,落叶松分布较为均匀。样地1和样地2中,云杉和冷杉都无邻近木多样性为0的情况,邻近木多样性均为1.04时的相对分布最多,邻近木多样性为1.39时次之;落叶松在样地1中邻近木多样性为0的株数分布较少,样地2无邻近木多样性为0的情况,样地1和样地2邻近木多样性为1.04时相对分布最多。结果表明样地1和样地2中,落叶松存在分布很不均匀的情况但很少,极大部分落叶松都存在混交情况;云杉和冷杉无分布不均匀的情况,说明林分中的所有云杉和冷杉都与邻近木存在混交。

3 结论与讨论

林分空间结构决定了树木之间的竞争优势及其空间生态位,在很大程度上影响着林分生长、发育和稳定性^[9]。量化林分空间水平上的林木多样性对于评价林分的经济、生态、社会价值及其经营措施具有

表3 相邻4株木情况下邻近木多样性可能的取值范围

Tab. 3 Possible value range of neighbourhood diversity under the condition of 4 neighbourhood trees

邻近木多样性取值 Neighbourhood diversity value	说明 Interpretation	图示 Diagram	分布情况 Distribution situation
0	个数比为4:0:0:0 Ratio of number is 4:0:0:0		很不均匀 Very irregular
0.56	个数比为3:1:0:0 Ratio of number is 3:1:0:0		不均匀 Irregular
0.69	个数比为2:2:0:0 Ratio of number is 2:2:0:0		随机 Random
1.04	个数比为2:1:1:0 Ratio of number is 2:1:1:0		均匀 Regular
1.39	个数比为1:1:1:1 Ratio of number is 1:1:1:1		很均匀 Very regular

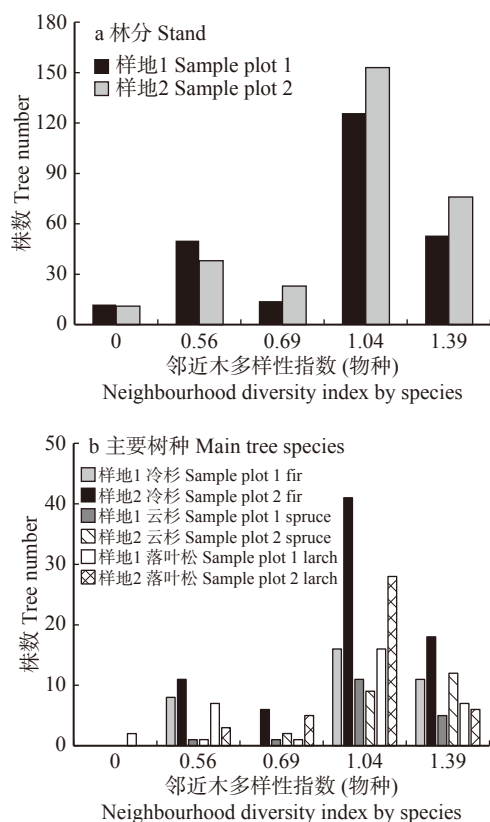


图4 不同邻近木多样性取值对应的株数分布情况

Fig. 4 Tree number distribution corresponding to different neighbourhood diversity values

重要意义。通过对金沟岭林场落叶松-云冷杉针阔混交林的结构特征及空间尺度上的物种多样性和林木直径大小多样性分析发现,从林分直径结构来看,落叶松-云冷杉林的曲线呈现为多峰的反“J”型曲线,研究区内处于中小径阶的林木所占比例较高,而大径阶的林木较少,径阶株数分布连续且较为合理,这与陈亚南等^[20]的研究结果一致,反映了在云冷杉过伐林中人工种植落叶松会引起径阶分布的波动。从林分多样性角度来看,研究区落叶松-云冷杉林的物种多样性和林木直径大小多样性高,树种和径阶分布较为均匀,混交程度强,水平结构变异大,林分结构复杂,与 Varga 等^[21]的研究结果一致。由于不同树种间固有生长速率有差异,对于多树种的混交林来说,林木直径多样性更高。当前研究区落叶松-云冷杉林中云冷杉分布十分均匀,部分落叶松则存在聚集现象,可适当采伐,进一步调整落叶松分布格局,促进林分向高演替方向发展。随着邻近木空间单元的增大,邻近木多样性指数增加,邻近木多样性值的离散程度下降,但相较按物种和径阶分布的邻近木多样性指数,按直径变化的邻近木多样性指数较少依赖于邻近木空间单元的尺寸,对林分结构变化的敏感性更高,这与 Man 等^[17]的研究结果一致。

优良的林木多样性量化测度指数应该具有较强

的判别能力^[10],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,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。从林分平均水平上看,邻近木多样性指数的分析结果与传统的 Shannon 多样性指数的结果保持一致。本次研究所选的2块样地在立地条件、株数密度、树种组成等方面较为相似,通过邻近木多样性指数得出的结论也基本相同,说明邻近木多样性指数是较理想的描述邻近木空间单元多样性的指数,且该指数具有明显的生态学意义,可操作性强。以邻近木空间单元大小是4株木为例,邻近木物种多样性指数的范围从0(所有树是同一物种)到1.39(4株木都为不同的物种),可以充分反映邻近木空间单元的林木混交度,并对物种间的空间分布作出明确判定。

邻近木空间单元尺寸的选择需要考虑样地结构复杂性和数据采集的难易程度。较大的结构单元可以获得更大的样地总体多样性,但样地空间变化较小,并且在野外调查成本更高。当混交林的林分组成相对简单时,邻近木空间单元为4株(1株对象木加3个邻近木)就可以取得较高的物种多样性。而在树种组成较复杂的混交林中,获得相似水平的林分总体多样性需要更大的邻近木空间单元。在没有空间坐标数据的情况下,也可以通过随机抽样选择对象木并获得其邻近木的方法来简化邻近木多样性指数。随着数字图像和 LiDAR 数据分辨率的提高,树木位置的准确数据可以直接从图像中获得,邻近木多样性分析将得到更广泛的应用。

参 考 文 献

- [1] 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 X D, Tang S Z. Indicators on structural diversity within-stand: a review[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2002, 38(3): 140-146.
- [2] Von Gadow K, Zhang C Y, Wehenkel C, et al. Forest structure and diversity[M]//Pukkala T, Von Gadow K. Continuous cover forestry, managing forest, ecosystems 23. Dordrecht: Springer, 2012: 29-83.
- [3] Peet R K. The measurement of species diversity[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1974, 5(1): 285-307.
- [4] Franzreb K E. Tree species used by birds in logged and unlogged mixed-coniferous forests[J]. *The Wilson Bulletin*, 1978, 90(2): 221-238.
- [5] Swindel B F, Conde L F, Smith J E. Species diversity: concept, measurement, and response to clearcutting and site-preparation[J]. *Forest Ecology and Management*, 1984, 8(1): 11-22.
- [6] Staudhammer C L, Lemay V M. Introduction and evaluation of possible indices of stand structural diversity[J]. *Canadian Journal*

- of Forest Research, 2001, 31(7): 1105–1115.
- [7] Thakur T, Swamy S L, Nain A S. Composition, structure and diversity characterization of dry tropical forest of Chhattisgarh using satellite data[J]. *Journal of Forestry Research*, 2014, 25(4): 819–825.
- [8] 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 J M, Zhao X H, Zhang C Y. Structural diversity of forest community in Baihuashan Mountain, Beijing[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2007, 29(1): 7–11.
- [9] 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.
- Shu S M, Zhao Y Y, Duan X, et al. Impact factors of forest diversity in Yunnan pine secondary forest based on structural equation model[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2015, 43(10): 63–67.
- [10] 白超, 惠刚盈. 林木直径大小多样性量化测度指数的比较研究[J]. *林业科学研究*, 2016, 29(3): 340–347.
- Bai C, Hui G Y. Study on diversity indices of tree diameter size[J]. *Forest Research*, 2016, 29(3): 340–347.
- [11] Lähde E, Laiho O, Norokorpi Y, et al. Stand structure as the basis of diversity index[J]. *Forest Ecology and Management*, 1999, 115(2/3): 213–220.
- [12] Zenner E K, Hibbs D E. A new method for modeling the heterogeneity of forest structure[J]. *Forest Ecology and Management*, 2000, 129(1/3): 75–87.
- [13] Comeau P G, Kabzems R, McClarnon J, et al. Implications of selected approaches for regenerating and managing western boreal mixedwoods[J]. *The Forestry Chronicle*, 2005, 81(4): 559–574.
- [14] Kuuluvainen T, Penttinen A, Leinonen K, et al. Statistical opportunities for comparing stand structural heterogeneity in managed and primeval forests: an example from boreal spruce forest in southern Finland[J]. *Silva Fennica*, 1996, 30(2/3): 315–328.
- [15] Hui G Y, Zhao X H, Zhao Z H, et al. Evaluating tree species spatial diversity based on neighborhood relationships[J]. *Forest Science*, 2011, 57(4): 292–300.
- [16] 惠刚盈. 基于相邻木关系的林分空间结构参数应用研究[J]. *北京林业大学学报*, 2013, 35(4): 1–8.
- Hui G Y. Studies on the application of stand spatial structure parameters based on the relationship of neighborhood trees[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2013, 35(4): 1–8.
- [17] Man R Z, Yang H. Construction of neighbourhood diversity indices with stem mapping data[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2015, 45(8): 1137–1141.
- [18] Arya S, Mount D, Kemp S E, et al. Package “RANN”[EB/OL]. [2018–10–18]. <http://cran.r-project.org/web/packages/RANN/RANN.pdf>.
- [19] 汤孟平, 唐守正, 雷相东, 等. 两种混交度的比较分析[J]. *林业资源管理*, 2004(4): 25–27.
- Tang M P, Tang S Z, Lei X D, et al. Comparison analysis on two minglings[J]. *Forest Resources Management*, 2004(4): 25–27.
- [20] 陈亚南, 杨华, 马士友, 等. 长白山2种针阔混交林空间结构多样性研究[J]. *北京林业大学学报*, 2015, 37(12): 48–58.
- Chen Y N, Yang H, Ma S Y, et al. Spatial structure diversity of semi-natural and plantation stands of *Larix gmelini* in Changbai Mountains, northeastern China[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2015, 37(12): 48–58.
- [21] 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.

(责任编辑 冯秀兰
责任编辑 汤孟平)