

• 研究报告 •

林木分布格局多样性测度方法： 以阔叶红松林为例

惠刚盈* 张弓乔 赵中华 胡艳波 白 超

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

摘要: 林木分布格局是森林结构的重要组成部分, 直接影响森林生态系统的健康与稳定, 维持森林结构多样性被认为是保护生物多样性的最佳途径。本研究探讨了林木分布格局多样性的测度方法, 以期揭示森林结构多样性提供理论依据。格局多样性研究的关键在于选择合适的生物多样性测度方法和具有分布属性的格局指数。本研究通过统计角尺度分布频率和Voronoi多边形边数分布频率, 运用Simpson指数分别计算角尺度多样性和Voronoi多边形边数分布多样性, 作为表达林木分布格局多样性指数的方法, 并以我国东北吉林蛟河的3个100 m × 100 m的阔叶红松(*Pinus koreansis*)林长期定位监测标准地为例, 分析了林木分布格局的多样性。结果表明: 无论是角尺度分布还是Voronoi多边形的边数分布都接近正态分布, 角尺度分布中随机分布林木的频数最多, 占55%以上; Voronoi多边形的类型多达10个以上, 50%以上的林木有5–6株最近相邻木。利用Simpson指数衡量林木格局多样性, 角尺度分布与Voronoi多边形的边数分布都显示出聚集分布的林分比随机分布林分的格局多样性高。研究还发现, 两种格局判定方法得出的Simpson指数值有所不同, 角尺度分布的多样性数值明显低于Voronoi多边形的边数分布的多样性数值, 主要原因是二者的等级数量不同。可见, 林木分布格局多样性研究应选择具有分布属性的格局指数, 但由于各指数反映的角度不同, 所以在分析比较不同林分格局多样性时应采用相同的分析方法。

关键词: 分布格局多样性; 角尺度分布; Voronoi多边形边数分布; Simpson指数

Measuring diversity of tree distribution patterns in natural forests

Gangying Hui*, Gongqiao Zhang, Zhonghua Zhao, Yanbo Hu, Chao Bai

Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation of the State Forestry Administration, Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091

Abstract: Patterns of tree distribution are an important part of forest structure and directly affect the health and stability of forest ecosystems. Maintaining and preserving forest structural diversity has often been considered the best way to protect biodiversity. One method measuring the diversity of tree distribution patterns was discussed in this paper in order to provide a theoretical basis for the expression of forest structure diversity. The key to the study of distribution pattern diversity is to select the appropriate biodiversity measuring method and index which has a distributed attribute. In this paper, we put forward a method to express tree distribution pattern diversity which counted the distributions frequency of uniform angle index and Voronoi polygon side, and calculate uniform angle index diversity and Voronoi polygon side distribution diversity by the Simpson index, respectively. The distribution pattern diversity of three long-term monitoring *Pinus koreansis* broad-leaved forest plots (area = 100 m × 100 m) in northeastern China was analyzed by this method. The results showed that both of the distribution of uniform angle index and the Voronoi polygon side were close to the normal distribution. The frequency of randomly distributed trees was the maximum and more than 55% in the uniform angle index distribution; the type of Voronoi polygon side was great than 10 and over 50% of the trees had 5–6 closest neighboring trees. The result of using the Simpson index to analyze tree distribution pattern diversity showed that the tree distribution pattern diversity was higher in the cluster

收稿日期: 2015-09-17; 接受日期: 2015-11-02

基金项目: “十二五”国家科技支撑课题“西北华北森林可持续经营技术研究示范”(2012BAD22B03)

*通讯作者 Author for correspondence. E-mail: hui@caf.ac.cn

distribution stand than the random distribution stand. We also found that Simpson index values were different when different distribution pattern diversity methods were used, and the uniform angle distribution diversity was significantly lower than that of the Voronoi polygon side distribution diversity, which mainly due to the different quantity grade of each index. Therefore, study on the diversity of forest distribution pattern should choose distribution pattern indices with distribution attribute. The uniform angle index distribution and Voronoi polygon side distribution used in this paper had this attribute, however, different indices reflected different aspects of distribution pattern, so the same pattern analysis method should be used in the analysis and comparison of distribution pattern diversity of different forest stands.

Key words: distribution pattern diversity; uniform angle index distribution; Voronoi polygon side distribution; Simpson index

生物多样性是生物与周围环境形成的生态复合体以及与此相关的各种生态过程的总和, 具有十分重要的价值, 是人类生存的物质基础(马克平和钱迎倩, 1998)。生物多样性不仅影响森林生态系统的结构与功能, 而且决定着森林生态系统的稳定性。研究森林生物多样性可以更好地认识群落的组成变化和发展趋势, 同时可以揭示干扰的影响。对于生物(物种)多样性的测度通常采用Shannon-Wiener和Simpson指数(Krebs, 1999; Purvis & Hector 2000; Hui et al, 2006)。

生物多样性保护是森林可持续经营的关键目标(Gao et al, 1999; 雷相东和唐守正, 2002; Spiecker, 2003), 维持森林结构多样性或生境复杂性被认为是保护生物多样性的最佳途径。自20世纪90年代初以来, 生物多样性与生态系统功能(BEF)间的关系开始受到科学界的重视。BEF研究对生物多样性保护和生态系统管理都具有重要意义(马克平, 2013)。林分空间结构与森林生态系统的过程和功能密切相关, 天然林尤其是结构和组成高度异质的原始林, 其生物多样性显著高于人工经营的林分, 具有较强的抵御环境干扰和自我修复的能力(McNaughton, 1977; Stapanian et al, 1997), 能提供许多物质产品和观赏休闲空间, 具有土壤保护能力以及景观美学价值。因此, 有人建议将天然林作为森林经营管理的模板, 以期实现生态可持续发展(Kuuluvainen, 2002)。研究天然林的结构、动态以及由此引起的种间或物种和环境因子之间的共存关系, 可使我们进一步在森林更新、植被恢复以及树种组成等方面获得重要发现(Kuuluvainen et al, 1996)。

森林结构主要通过位置(点格局)、林木大小和

树种多样性来体现。除树种和林木大小多样性外, 林木分布格局多样性是森林结构的重要组成部分, 直接影响森林生态系统的健康与稳定。已有很多文献从格局分析方法、不同森林类型的格局特征以及格局的生态过程等方面对林分整体分布格局进行了研究(如Clark & Evans, 1954; Ripley, 1977; Pommerening, 2002; Aguirre et al, 2003; 惠刚盈和Gadow, 2003; Kint et al, 2003; 惠刚盈, 2013), 但有关格局多样性的研究还鲜有报道, 主要原因可能是缺乏相关研究的方法。由于环境的异质性, 林分中各林木及其相邻木之间的相对位置表现出聚集、均匀或随机关系, 群落的水平结构呈现镶嵌性, 从而构成了林分在水平分布上的多样性即格局多样性, 正是由于这种丰富的多样性才孕育了森林群落各种复杂的生命现象和生态过程(李俊清, 2006)。因此, 对于林木格局的研究不应该仅限于经典的格局分析, 而应该更进一步分析格局多样性, 以便发掘不同点格局的细微特征变化对林木生态过程的影响。本研究试图通过实例介绍林木分布格局多样性的测度方法。

1 方法

1.1 样地概况

分析数据来源于吉林省蛟河阔叶红松(*Pinus koreansis*)林固定实验地(43°51'–44°05' N, 127°35'–127°51' E)。样地1、2、3的大小均为100 m × 100 m, 密度分别为756、800和1,186株/ha。该实验地植被类型属于长白山温带针阔混交林, 主要树种有水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、红松、胡桃楸(*Juglans mandshurica*)、千金榆(*Carpinus cordata*)、杉松(*Abies holophylla*)等。实验地内所有胸径≥ 5 cm的林木都

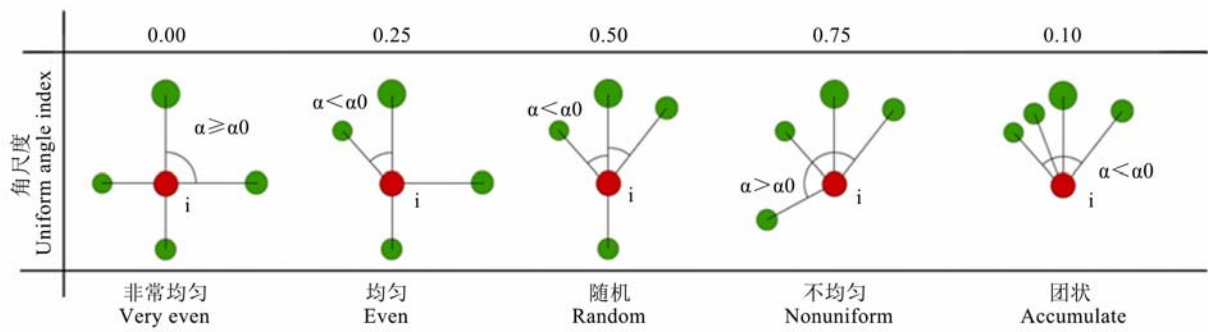


图1 角尺度的取值和含义。*i*为第*i*株参照树。
Fig. 1 Values and the meanings of uniform angle index. The *i* represents *i*th reference tree.

已挂牌标号,用全站仪(TOPCON-GTS-602AF,日本拓普康)测定并记录林木坐标、树种、胸径、树高、冠幅和健康状况,同时调查林分的郁闭度、坡度、林分平均高、幼苗更新和枯立木情况等。

1.2 数据分析方法

格局多样性研究的关键在于选用合适的多样性测度方法和确定具有分布属性的格局指数。

Shannon-Wiener指数(Shannon & Weaver, 1959)和Simpson指数(Simpson, 1949)是目前应用最为广泛的生物多样性测度指数(Krebs, 1999)。由于Shannon-Wiener指数取值的非归一化,而Simpson指数(*D*)是取值在0–1之间的归一化指数。又因为格局归一化的指数易于理解,且可与其他归一化指标进行比较,故本研究采用Simpson指数计算格局多样性。

尽管用于林木分布格局评估的方法很多,但能用于其多样性研究的方法并不多见。本研究采用角尺度和Voronoi多边形方法。角尺度方法既可用角尺度分布也可用其均值表达格局(惠刚盈等, 1999, 2004; Zhao et al, 2014),其均值在[0.475, 0.517]为随机分布,大于0.517为聚集(惠刚盈等, 2004)。Voronoi多边形方法虽然不能直接用边数的均值进行林木格局判断,但其边数分布的标准差可用来确定林木分布格局类型,其值在[1.264, 1.402]为随机分布,小于1.264为均匀分布,大于1.402为聚集分布(张弓乔和惠刚盈, 2015)。

1.2.1 角尺度分布多样性

角尺度定义为 α 角(对象木与其最近2株相邻木组成的夹角) $<$ 标准角 α_0 ($\alpha_0 = 72^\circ$)的个数占所考察的4个夹角的比例(惠刚盈等, 1999)。其可能的取值和含义见图1。角尺度 W_i 的计算公式为:

$$W_i = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 Z_{ij} \tag{1}$$

其中,当第*j*个 α 角 $<$ 标准角 α_0 时, $Z_{ij} = 1$; 否则, $Z_{ij} = 0$ 。
角尺度分布多样性(D_w): 通过统计林分中角尺度 W_i 的频数,计算其相对频率 x_i ,用Simpson指数计算 D_w 。

$$D_w = 1 - \sum_{i=1}^5 x_i^2 \tag{2}$$

1.2.2 Voronoi多边形分布多样性

假设林分中每株林木都为单个点,则可得到林分唯一的Delaunay三角网,该三角网包含了相邻木间的距离信息和角度信息,边长长度等于参照树与其相邻木的距离。Delaunay三角网具有唯一的对偶

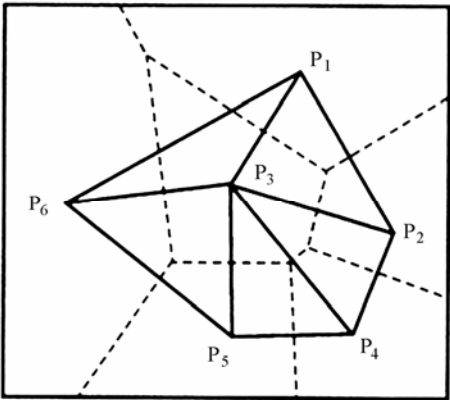


图2 6个点的Delaunay三角网及其对应的Voronoi图(P_1 – P_6 为6株林木的点位)
Fig. 2 Delaunay triangulation and the corresponding Voronoi diagram for 6 points of forest trees

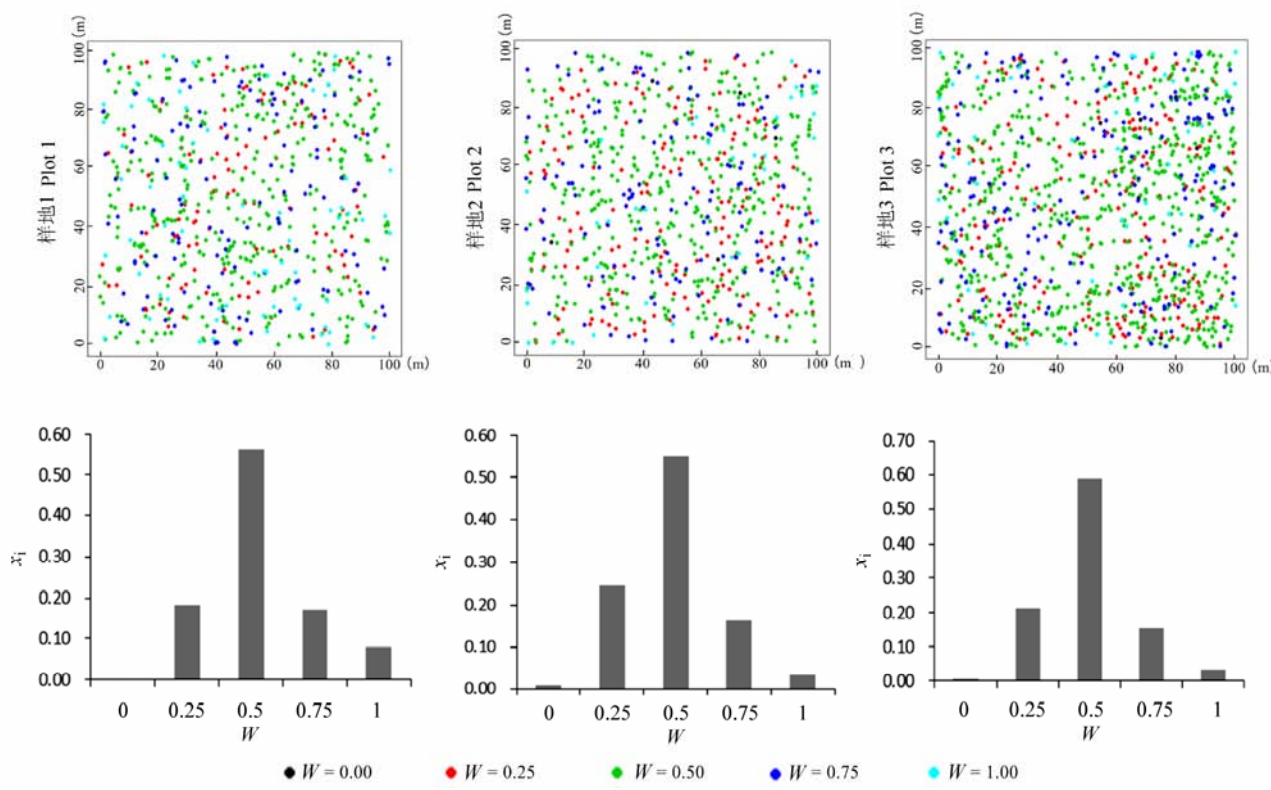


图3 吉林蛟河天然阔叶红松林的角尺度分布。 W 为角尺度, x 为相对频率。
Fig. 3 The uniform angle index distribuion of *Pinus koreansis* broad-leaved forest in Jiaohe, Jilin Province. W : Uniform angle; x : Relative frequency.

结构Voronoi图, 两株相邻林木对应的Voronoi多边形共享一条边, 也就是公共边。如图2中, 实线代表 P_1 – P_6 这6个点的Delaunay三角网, 虚线表示相对应的Voronoi图。对于非样地边缘林木, 其Voronoi多边形公共边的条数代表了该林木的相邻木数目, 这也是本研究Voronoi多边形边数分布的基础理论依据(汤孟平等, 2009; 赵春燕等, 2010; 张弓乔和惠刚盈, 2015)。

Voronoi多边形的边数分布(D_v): 统计林分唯一对应的Voronoi图中林木对应边数(s)的频数, 计算其相对频率 x_i , 用Simpson指数计算 D_v 。

$$D_v = 1 - \sum_{i=1}^s x_i^2 \tag{3}$$

2 结果

2.1 林木格局角尺度分布

图3展示了阔叶红松林3个样地角尺度分布的

多样性。3个天然林样地林木格局角尺度总体接近正态分布。所分析的林分中, 角尺度分布的全部5个等级($W_i = 0.00, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00$)中均有林木存在。随机分布林木($W_i = 0.50$, 即最近4株相邻木随机分布于所分析林木的四周)的频数最多, 占55%以上, 特别均匀($W_i = 0.00$, 即最近4株相邻木很均匀地分布于所分析林木的周围)的只有不足1%, 特别不均匀($W_i = 1.00$, 即最近4株相邻木全部分布于所分析林木的一侧)的不足10%, 较均匀($W_i = 0.25$, 即最近4株相邻木中仅有1株没有独立占据一个方位, 其他3株均匀地分布于周围)和较不均匀($W_i = 0.75$, 即最近4株相邻木中有3株没有独立占据一个方位)的结构组合计为40%左右。样地1、2、3的平均角尺度分别为: 0.536、0.492、0.499。样地1为聚集分布, 样地2和3为随机分布。

2.2 林木格局Voronoi多边形的边数分布

图4展示了阔叶红松林3个样地的Voronoi多边

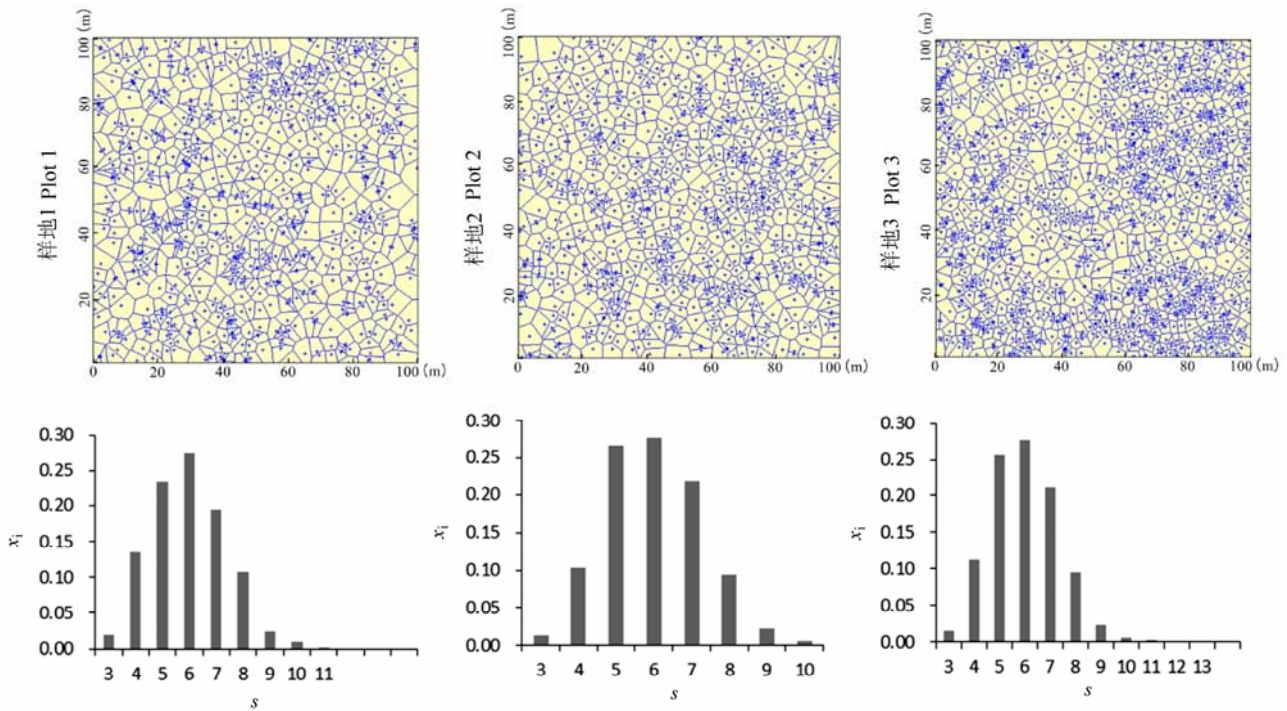


图4 吉林蛟河阔叶红松林Voronoi多边形的边数分布。 s 为Voronoi多边形对应边数, x 为相对频率。
Fig. 4 Side number of Voronoi polygon distribuion of *Pinus koreansis* broad-leaved forest in Jiaohe, Jilin Province. s : Number of Voronoi polygon side; x : Relative frequency.

类型多达10个以上, 50%以上的林木有5–6株最近相邻木, 1–2%的林木仅有3株最近相邻木, 有10–13株最近相邻木的只有不到1%。3个天然林样地的Voronoi多边形的边数分布也接近正态分布, 其标准差分别为: 1.404、1.287和1.322。样地1为聚集分布, 样地2和3为随机分布。

2.3 林木分布格局多样性

Simpson指数计算结果表明, 样地1、2、3的角尺度分布多样性指数值分别为0.614、0.608、0.580, 聚集分布的样地1比随机分布的样地2、3的格局多样性高。所有3个样地按角尺度计算的格局多样性属中等偏上。样地1、2、3的Voronoi多边形的边数分布多样性指数值分别为0.801、0.785、0.791, 同样显示聚集分布的样地1比随机分布的样地2、3的格局多样性高。所有3个样地都表现出了较高的边数多样性。总体来看, 聚集分布林分(样地1)比随机分布林分(样地2、样地3)的林木格局多样性略高。

3 讨论

林木水平分布格局多样性反映的是林分中各种结构等级数量及其分布的均匀性。传统研究大多注重林木格局的判定, 并没有深入研究表征林木分布格局的细微结构特征的分布。角尺度方法是通过判断林木与其相邻木之间组成的角度与标准角之间的关系来确定林木分布格局; Voronoi多边形边数分布则是通过林木与其最近相邻木组成唯一多边形的边数的标准差来确定林木分布格局类型。这2种方法均采用了林分中各个结构等级的分布频率, 可以用来表达林木分布格局的多样性。本研究中, 将林分中每株林木作为一个统计单元, 统计其周围相邻木的角尺度分布类型或多边形边数分布频率, 用常用的Simpson指数来计算林木水平分布格局的多样性, 其值在0–1之间, 值越大, 说明林木水平格局的多样性越高。通过对天然阔叶红松林的格局多样性分析发现, 其林木分布格局多样性较高, 用

Voronoi多边形的边数分布标准差判定的林木分布格局与角尺度分析的结果完全一致。

格局多样性研究的关键在于选择合适的多样性测度方法和具有分布属性的格局指数。显然,不同格局指数采用相同的生物多样性指数所计算出的林木格局多样性数值有所不同,比如,文中所采用的角尺度分布的多样性数值低于Voronoi多边形的边数分布的多样性数值,主要原因是由于构成各指数分布的等级数量不同。由于不同指数从不同的角度反映格局,所以在分析比较不同林分格局多样性时应采用相同的格局分析方法。

参考文献

- Aguirre O, Gadow K, Jiménez J (2003) An analysis of spatial forest structure using neighborhood-based variables. *Forest Ecology and Management*, 183, 137–145.
- Clark PJ, Evans FC (1954) Distance to nearest neighbor as a measure of spatial relationships in populations. *Ecology*, 35, 445–453.
- Gao BJ, Li DY, Cai WP, Yu FC (1999) Community characteristics of degraded Chinese pine stands and their biodiversity restoration. *Acta Ecologica Sinica*, 19, 647–653.
- Hui GY, Gadow K, Albert M (1999) A new parameter for stand spatial structure—neighbourhood comparison. *Forest Research*, 12(1), 1–6.
- Hui GY, Gadow K, Hu YB (2004) The optimum standard angle of the uniform angle index. *Forest Research*, 17, 687–692. (in Chinese with English abstract) [惠刚盈, Gadow K, 胡艳波 (2004) 林分空间结构参数角尺度的标准角选择. *林业科学研究*, 17, 687–692.]
- Hui GY (2013) Studies on the application of stand spatial structure parameters based on the relationship of neighborhood trees. *Journal of Beijing Forestry University* (北京林业大学学报), 35(4), 1–8. (in Chinese with English abstract) [惠刚盈 (2013) 基于相邻木关系的林分空间结构参数应用研究. *北京林业大学学报*, 35(4), 1–8.]
- Hui GY, Gadow K (2003) Quantitative Analysis of Forest Spatial Structure. China Science and Technology Press, Beijing. (in Chinese) [惠刚盈, Gadow K (2003) 森林空间结构量化分析方法. 中国科学技术出版社, 北京.]
- Hui GY, Hu YB, Xu H (2006) Beziehungen zwischen Baumdimensionen und kleinräumiger Strukturvielfalt in einem Mischwald in Nordostchina. *Allgemeine Forst und Jagdzeitung*, 177(10/11), 199–205. (in German)
- Kint V, van Meirvenne M, Nachtergale L, Geudens G, Lust N (2003) Spatial methods for quantifying forest stand structure development: a comparison between nearest-neighbor indices and variogram analysis. *Forest Science*, 49, 36–49.
- Krebs CJ (1999) *Ecological Methodology*. Benjamin/Cummings Menlo Park, California.
- Kuuluvainen T, Penttinen A, Leinonen K, Nygren M (1996) Statistical opportunities for comparing stand structural heterogeneity in managed and primeval forests: an example from boreal spruce forest in southern Finland. *Silva Fennica*, 30, 315–328.
- Kuuluvainen T (2002) Natural variability of forests as a reference for restoring and managing biological diversity in boreal Fennoscandia. *Silva Fennica*, 36, 97–125.
- Lei XD, Tang SZ (2002) Indicators on structural diversity within-stand: a review. *Scientia Silvae Sinicae*, 38(3), 140–145. (in Chinese with English abstract) [雷相东, 唐守正 (2002) 林分结构多样性指标研究综述. *林业科学*, 38(3), 140–145.]
- Li JQ (2006) *Forest Ecology*. Higher Education Press, Beijing. (in Chinese) [李俊清 (2006) 森林生态学. 高等教育出版社, 北京.]
- Ma KP (马克平) (2013) Studies on biodiversity and ecosystem function via manipulation experiments. *Biodiversity Science* (生物多样性), 21, 247–248. (in Chinese) [马克平 (2013) 生物多样性与生态系统功能的实验研究. *生物多样性*, 21, 247–248.]
- Ma KP, Qian YQ (1998) Biodiversity conservation and its research progress. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 4, 95–99. (in Chinese with English abstract) [马克平, 钱迎倩 (1998) 生物多样性保护及其研究进展. *应用与环境生物学报*, 4, 95–99.]
- McNaughton SJ (1977) Diversity and stability of ecological communities: a comment on the role of empiricism in ecology. *The American Naturalist*, 111, 515–525.
- Pommerening A (2002) Approaches to quantifying forest structures. *Forestry*, 75, 305–324.
- Purvis A, Hector A (2000) Getting the measure of biodiversity. *Nature*, 405, 212–219.
- Ripley BD (1977) Modeling spatial patterns. *Journal of the Royal Statistical Society Series B (Methodological)*, 39, 172–212.
- Simpson EH (1949) Measurement of diversity. *Nature*, 21, 213–251.
- Spiecker H (2003) Silvicultural management in maintaining biodiversity and resistance of forests in Europe temperate zone. *Journal of Environmental Management*, 67, 55–56.
- Stapanian MA, Cline SP, Cassell DL (1997) Evaluation of a measurement method for forest vegetation in a large-scale ecological survey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 45, 237–257.
- Shannon CE, Weaver W (1959) *The Mathematical Theory of Communication*. University of Illinois Press, Urbana.
- Tang MP, Zhou GM, Chen YG, Zhao MS, He YB (2009) Mingling of evergreen broad-leaved forests in Tianmu Mountain based on Voronoi diagram. *Scientia Silvae Sinicae*, 45(6), 1–5. (in Chinese with English abstract) [汤孟

- 平, 周国模, 陈永刚, 赵明水, 何一波 (2009) 基于 Voronoi 图的天目山常绿阔叶林混交度. 林业科学, 45(6), 1–5.]
- Zhao CY, Li JP, Li JJ (2010) Quantitative analysis of forest stand spatial structure based on Voronoi diagram & Delaunay triangulated network. *Scientia Silvae Sinicae*, 46(6), 78–84. (in Chinese with English abstract) [赵春燕, 李际平, 李建军 (2010) 基于 Voronoi 图和 Delaunay 三角网的林分空间结构量化分析. 林业科学, 46(6), 78–84.]
- Zhao ZH, Hui GY, Hu YB, Wang HX, Zhang GQ, Gadow K (2014) Testing the significance of different tree spatial distribution patterns based on the uniform angle index. *Canadian Journal of Forest Research*, 44, 1417–1425.
- Zhang GQ, Hui GY (2015) Analysis and application of polygon side distribution of Voronoi diagram in tree patterns. *Journal of Beijing Forestry University*, 37(4), 1–7. (in Chinese with English abstract) [张弓乔, 惠刚盈 (2015) Voronoi 多边形的边数分布规律及其在林木格局分析中的应用. 北京林业大学学报, 37(4), 1–7.]

(责任编辑: 王绪高 责任编辑: 黄祥忠)