

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第34卷 第6期 Vol.34 No.6 2014

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 34 卷 第 6 期 2014 年 3 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 全球气候变暖对凋落物分解的影响..... 宋 飘,张乃莉,马克平,等 (1327)
- 从系统到景观:区域物质流分析的景观取向 张晓刚,曾 辉 (1340)
- 论湿地生态系统服务的多维度价值评估方法..... 宋豫秦,张晓蕾 (1352)
- 保幼激素在昆虫中的分子作用机理..... 金敏娜,林欣大 (1361)
- 岩画和壁画类文物微生物病害研究进展..... 李 强,葛琴雅,潘晓轩,等 (1371)
- 基于 3S 技术的图们江流域湿地生态安全评价与预警研究 朱卫红,苗承玉,郑小军,等 (1379)
- 跨界保护区网络构建研究进展..... 王 伟,田 瑜,常 明,等 (1391)

个体与基础生态

- 速生树种尾巨桉和竹柳幼苗耗水特性和水分利用效率..... 邱 权,潘 昕,李吉跃,等 (1401)
- 三种增温情景对入侵植物空心莲子草形态可塑性的影响..... 褚延梅,杨 健,李景吉,等 (1411)
- 气象要素及土壤理化性质对不同土地利用方式下冬夏岩溶作用的影响 刘 文,张 强,贾亚男 (1418)
- 施用纳米碳对烤烟氮素吸收和利用的影响..... 梁太波,尹启生,张艳玲,等 (1429)
- 基于 Voronoi 图的林分空间模型及分布格局研究 刘 帅,吴舒辞,王 红,等 (1436)
- 近自然毛竹林空间结构动态变化..... 仇建习,汤孟平,沈利芬,等 (1444)
- 基于种实性状的无患子天然群体表型多样性研究..... 刁松锋,邵文豪,姜景民,等 (1451)
- 不同林分起源的相容性生物量模型构建..... 符利勇,雷渊才,孙 伟,等 (1461)

种群、群落和生态系统

- 毛竹材用林林下植被群落结构对多花黄精生长的影响..... 樊艳荣,陈双林,杨清平,等 (1471)
- 温度和 CO₂ 浓度升高下转 *Bt* 水稻种植对土壤活性碳氮和线虫群落的短期影响
..... 陈 婧,陈法军,刘满强,等 (1481)
- 中国东北地区近 50 年净生态系统生产力的时空动态 李 洁,张远东,顾峰雪,等 (1490)
- 遥感与 GIS 支持下的盘锦湿地水禽栖息地适宜性评价..... 董张玉,刘殿伟,王宗明,等 (1503)
- 秦岭火地塘林区土壤大孔隙分布特征及对导水性能的影响..... 陆 斌,张胜利,李 侃,等 (1512)
- 磷浓度对铜绿微囊藻、大型溞和金鱼藻三者相互作用的影响..... 马剑敏靳 萍,郭 萌,等 (1520)
- 普生轮藻浸提液对两种淡水藻类的化感抑制作用及其数学模型..... 何宗祥,刘 璐,李 诚,等 (1527)
- 北京永定河-海河干流河岸带植物的区系分析 修 晨,欧阳志云,郑 华 (1535)
- 基于河流生境调查的东河河流生境评价..... 王 强,袁兴中,刘 红,等 (1548)

景观、区域和全球生态

- 应用 SWAT 模型研究潮河流域土地利用和气候变化对径流的影响 郭军庭, 张志强, 王盛萍, 等 (1559)
- 长白山不同海拔树木生长对气候变化的响应差异..... 陈 力, 尹云鹤, 赵东升, 等 (1568)
- 石家庄市空气花粉散布规律及与气候因子的关系..... 李 英, 李月丛, 吕素青, 等 (1575)
- 不同放牧梯度下呼伦贝尔草甸草原土壤碳氮变化及固碳效应..... 闫瑞瑞, 辛晓平, 王 旭, 等 (1587)
- 南四湖区农田土壤有机质和微量元素空间分布特征及影响因素..... 武 婕, 李玉环, 李增兵, 等 (1596)

资源与产业生态

- 跨国土地利用及其生态影响 陆小璇 (1606)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 288 * zh * P * ¥ 90.00 * 1510 * 30 * 2014-03



封面图说: 图们江河流中段——图们江位于吉林省东南边境, 发源于长白山东南部的石乙水, 河流的绝大部分是中国与朝鲜的界河, 下游很小一段为俄罗斯与朝鲜的界河, 并由这里流入日本海, 我国珲春距离日本海最近的地方仅有 15km。图们江是我国重要的国际性河流之一, 随着我国经济的迅速崛起, 图们江地区进入到多国合作联合开发阶段, 湿地生态系统处于中度预警状态, 并有向重度预警发展的趋势, 生态安全面临的威胁越来越严重。对该区域进行湿地生态安全评价与预警研究, 可为图们江流域生态环境的可持续发展提供依据。图中河道的远方为朝鲜、河道近方为中国。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201210131416

刘帅, 吴舒辞, 王红, 张江, 李建军, 王传立. 基于 Voronoi 图的林分空间模型及分布格局研究. 生态学报, 2014, 34(6): 1436-1443.

Liu S., Wu S. C., Wang H., Zhang J., Li J. J., Wang C. L. The stand spatial model and pattern based on voronoi diagram. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(6): 1436-1443.

基于 Voronoi 图的林分空间模型及分布格局研究

刘 帅¹, 吴舒辞^{1,*}, 王 红^{1,2}, 张 江¹, 李建军¹, 王传立¹

(1. 中南林业科技大学, 长沙 410004; 2. 湖南省科学技术厅, 长沙 410013)

摘要:以南洞庭湖龙虎山次生林为研究对象, 建立林分 Voronoi 图模型, 通过该模型表示林分空间结构特征, 提取林木空间量化信息。在此基础上, 引入变异系数量化 Voronoi 多边形面积的变化率, 将林木空间格局分析转化为计算 Voronoi 图变异系数, 并将计算结果与角尺度作相关性比较。结果表明: 林分 Voronoi 图模型能准确表达林木邻接关系、相邻木距离及角度、空间密度等重要空间信息; 大尺度取样时(76m 以上), 变异系数趋于稳定, 林分整体空间格局呈接近随机分布的轻度聚集; Voronoi 图变异系数和角尺度存在显著的正相关关系, 进一步说明本研究格局分析方法的可行性和有效性; 受多种因素影响, 乔木层主要树种在不同发育阶段的空间格局表现出强烈的时间和空间动态特性, 且小径木多为聚集分布, 大径木呈轻度聚集或随机分布。基于 Voronoi 图的林分空间模型及格局分析方法, 从空间上表征林木的生长繁育特性、种内种间关系、资源及环境分布特征, 为计算几何方法应用于林分空间经营提供了新的思路。

关键词: Voronoi 图; 林分空间模型; 林分空间格局; 角尺度

The stand spatial model and pattern based on voronoi diagram

LIU Shuai¹, WU Shuci^{1,*}, WANG Hong^{1,2}, ZHANG Jiang¹, LI Jianjun¹, WANG Chuanli¹

1 Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China

2 China Hunan Provincial Science & Technology Department, Changsha 410013, China

Abstract: The secondary forest of Mt. Longhu in the south Dongting Lake is chosen as the research object in this paper which tries to establish a stand model based on Voronoi diagram. This diagram is applied here to illustrate the stand spatial structure and extract forest spatial quantitative information. Based on this, coefficient of variation (CV) is used to quantify the change rate of Voronoi polygon area, transferring the analytic results of stand spatial pattern to the calculation of the CV based on Voronoi diagram, and comparing the calculation results with uniform angle index. The result shows that the stand model of Voronoi diagram can accurately display some important spatial information, such as the correlation, distance and angle between adjacent trees as well as spatial density, etc. When sampling large scale (above 76m), CV tends to remain stable, and the overall stand spatial pattern shows mild aggregation which is close to random distribution. The CV of Voronoi diagram and uniform angle index have notable positive correlation, which further proves the feasibility and effectiveness of the analytical methods applied in this paper. The spatial pattern of main tree species of above layer in different development stages shows a distinct temporal and spatial dynamic characteristics due to many factors. The small-diameter wood belongs to aggregated distribution, while the large-diameter belongs to mild aggregation or random distribution. The stand spatial model and its pattern analytical method, both based on Voronoi diagram, characterize the tree growth feature, intraspecific and interspecific relationship, characteristics of resources and environment distribution from the perspective of spatial structure, providing a new way of thinking for stand spatial management by applying computational geometry method.

基金项目: 国家自然科学基金(31070568); 湖南省自然科学基金重点项目(10JJ2022); 湖南省教育厅重点科研项目(11A128)

收稿日期: 2012-10-13; **修订日期:** 2013-03-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wu-shuci@163.com

Key Words: voronoi diagram; stand spatial model; stand spatial pattern; uniform angle index

与林木空间位置有关的林分结构统称为林分空间结构,主要包含树种混交、大小分化和空间格局3个方面的内容。林分空间结构决定了林木间的竞争优势及其空间生态位,在很大程度上影响着林分的健康和稳定。采用何种手段从而更加准确、有效地表征林分空间结构特征一直是现代森林经理学研究热点,对于近自然森林经营意义重大^[1-2]。

林分空间格局源于种群空间格局,指林木在水平空间上的配置状况和分布特征,是林木生长特性、种内种间关系、环境因子等综合作用的结果^[3]。研究林木空间格局有助于理解森林的建立、更新和发展过程,是实际营林所必须测定的空间结构因子。目前,林分空间格局研究多采用与距离有关的格局分析方法,主要包括聚集指数、精确最近邻体分析^[4]、Ripley's $K(d)$ 函数分析^[5]。其中,精确最近邻体分析和 Ripley's $K(d)$ 函数分析以林木坐标点图为基础进行格局分析,亦称为点格局分析^[4,6],已被广泛应用于描述林木的空间分布,可分析不同距离尺度下的种群格局及不同种群的种间关联关系,具有显著的优越性。但该类方法提供的是种群的统计格局,很难从中导出与森林空间经营直接相关的具体信息,且方法复杂,计算量较大。惠刚盈^[7-8]提出基于相邻木角度测量的角尺度,该方法简单可靠,既能分析林分整体空间格局,又可表征林分精细结构即林木点结构的分布格局,是林分经营中最常用的格局分析方法^[2-3]。但角尺度与距离无关,无法反映林分疏密程度及相邻木距离等空间要素。

Voronoi 图是计算几何的基本数据结构,按照对象集合元素的最近邻原则将空间划分为许多不相重叠的凸多边形(Voronoi 多边形)。每个凸多边形都有唯一的集合元素与之相关联,其内任一点到该元素的距离总小于到其他元素的距离。Voronoi 图具有邻接性、唯一性、空间动态等特性,适用于表征空间目标的复杂邻域关系^[9]。由于可根据需要对 Voronoi 图定义进行扩展,Voronoi 图在计算机图形学、分子生物学、空间规划等众多领域具有广阔的应用背景^[10-11]。Brown^[12]最早将 Voronoi 图引入林学领域,提出林木竞争分析的 APA (area potentially available) 指数;汤孟平等将 Voronoi 图用于群落优势

树种的种内种间分析^[13]和混交度研究^[14];赵春燕^[15]等人通过 Voronoi 图研究红树林空间结构指数。但应用 Voronoi 图深入分析林分空间结构特征及林木分布格局的研究尚不多见。本研究选择南洞庭湖龙虎山林场典型常绿阔叶林为对象,建立基于 Voronoi 图的林分空间模型,量化林木空间结构,包括林木水平位置、空间近邻关系、空间密度等信息。在该模型的基础上,分析样地林木整体空间格局及主要乔木种群的格局动态。

1 研究区概况和样地调查

研究地点位于南洞庭湖区龙虎山林场,地理位置为东经 112°17'2"—112°18'30",北纬 28°54'4"—28°54'56"。该地属中亚热带季风湿润气候,年均气温 16.7℃。林场内有木本植物 100 余种,其代表性林分是青桐混交林,主要乔木树种有青桐 (*Cyclobalanopsis myrsinaefolia*)、香樟 (*Cinnamomum camphora*)、青冈栎 (*Cyclobalanopsis glauca*)、毛豹皮樟 (*Litsea coreana* var. *lanuginosa*)、苦槠 (*Castanopsis sclerophylla*)、钩栗 (*Castanopsis tibetana*)、马褂木 (*Liriodendron chinense*)、木荷 (*Schima superba*)、枫香 (*Liquidambar formosana*) 等。当地资料和林分调查表明,研究地森林群落是受过轻微干扰而形成的天然次生林,青桐、香樟、青冈栎等为当地优势树种^[16-17]。

笔者于 2010 年 8 月在研究区内设置面积为 100m×100m 的标准样地 1 块。采用全站仪等设备对样地内胸径大于 5cm 的活立木进行定位、编号及每木检尺,检测内容为林木位置、树种信息、胸径、树高、冠幅等。以样地西南角为坐标原点,记样地内林木的相对空间坐标为 (x, y) ,其中 x 表示东西方向坐标, y 表示南北方向坐标。该次研究共涉及林木 982 株。

2 研究方法

2.1 Voronoi 图定义

设二维平面空间中有一离散点集 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$,其中任意两点不相等,任意四点不共圆。点集中任一元素 $p_i (1 \leq i \leq n)$ 根据空间邻接关系确定 Voronoi 多边形 $t_{p_i} (1 \leq i \leq n)$ ^[10]:

$$t_{p_i} = \{s: \|s - p_i\| \leq \|s - p_j\|, p_i, p_j \in P, i \neq j\} \quad (1)$$

式中,符号 $\|\cdot\|$ 表示两点间的欧氏距离,点 p_i 称为 Voronoi 多边形 t_{p_i} 的生成元,该定义确保 Voronoi 多边形 t_{p_i} 内任意点 s 到生成元 p_i 的距离小于到其他生成元 p_j 的距离,则由 $t_{p_i} (1 \leq i \leq n)$ 组合成的平面图称为离散点集 P 的 Voronoi 图。至此,离散点集完成对二维平面的空间剖分。

2.2 基于 Voronoi 图的格局分析方法

离散点集在平面空间通常有 3 种格局分布形式:均匀分布、随机分布和聚集分布,如图 1 所示。点集的 Voronoi 图可以直观地反映点状目标在平面空间的分布情况^[18]。当平面点均匀分布时,相邻 Voronoi 多边形大小相当;聚集分布时,Voronoi 多边形大小各异,聚集区内的较小,聚集区外的较大;随

机分布时的情况则介于均匀分布和聚集分布之间。可见,通过量化 Voronoi 多边形面积的变化关系则可确定平面点的分布格局。因此,本研究引入变异系数(Coefficient of Variation, CV)来衡量 Voronoi 多边形面积的相对变化,其表达式为:

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{s}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)^2}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i} \quad (2)$$

式中, σ 是 n 个彼此邻接的 Voronoi 多边形面积的标准差, \bar{s} 是其面积均值, x_i 表示第 i 个 Voronoi 多边形的面积, \bar{x}_i 表示第 i 个 Voronoi 多边形及其相邻 Voronoi 多边形面积的均值。按照公式(2)计算图 1 的 Voronoi 图的变异系数,结果依次为:0.125、0.273、0.781。

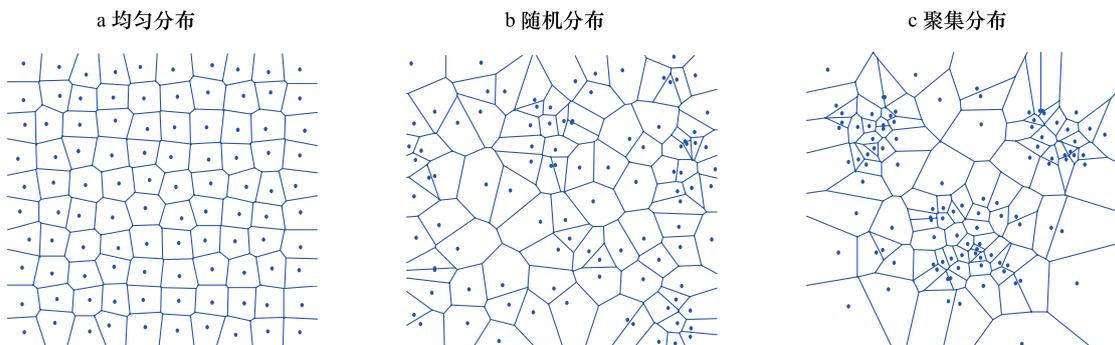


图 1 点集的空间分布

Fig.1 Spatial distribution of point set

变异系数反映了单位均值上点状目标的离散程度和分布状态,当取值从低到高时,空间点将依次经历均匀、随机、聚集 3 种分布格局。为明确 3 种不同分布格局下变异系数的取值范围,采用 Monte Carlo 模拟方法对平面点的分布进行显著性检测,具体步骤如下:模拟本研究林分样地在 $100\text{m} \times 100\text{m}$ 的二维平面随机布点 982 个,根据点位置对二维平面进行 Voronoi 分割,计算每个 Voronoi 多边形的面积;为研究格局分布与空间尺度的关系,采用种-面积关系研究中的巢式取样^[23],始终以坐标原点(西南角)为起点,取样尺度按每次 4m 递增,一共获取 25 个方形小样地: $4\text{m} \times 4\text{m}$, $8\text{m} \times 8\text{m}$, $12\text{m} \times 12\text{m}$, ..., $100\text{m} \times 100\text{m}$, 计算每个小样地内 Voronoi 多边形的变异系数,以上过程重复 99 次,按 99% 的置信水平来确定置信区

间。再根据样地林木实际分布情况计算变异系数,计算结果如果在置信区间内,则为随机分布;如果在置信区间外,则显著偏离随机分布。以上计算过程在 MATLAB 7.1 平台上完成。

2.3 边缘校正

受人为划分样地的影响,样地边缘林木的相邻木可能位于样地以外,因而样地边缘木的 Voronoi 多边形是不完整的。计算这部分林木的变异系数,会使整体结果产生较大误差,进而影响林木空间格局判断的精度。

传统的边缘校正方法,如设置 8 邻域样地^[19]、建立缓冲区^[20]等不适用本研究。本研究的处理办法是标记所有以样地边界为边的 Voronoi 多边形,在林木空间格局分析时不纳入变异系数的计算中。

3 结果与分析

3.1 林分空间 Voronoi 图模型

点格局分析将林木的空间位置视为平面点,从点的数量特征入手分析其空间格局^[6]。然而,实际情况是森林中每株林木都要通过与周边林木竞争来获取必要的资源和生长空间,仅仅将林木抽象成平面点会引起林木空间信息的缺失。因此,本研究建立样地林木水平空间的 Voronoi 图模型,借此反映林木及其“影响圈”的空间分布,作为进一步分析林木空间格局的基础。

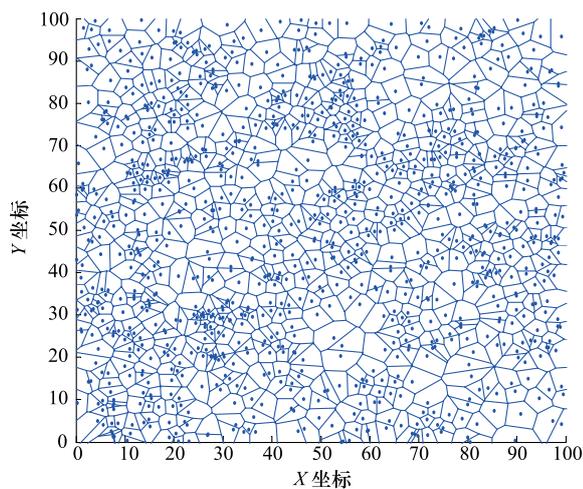


图2 样地林木空间分布 Voronoi 图

Fig.2 Voronoi diagram of spatial distribution in sample plot

为了建模需要,忽略样地的地形、地貌特征,视其为二维平面,样地内所有起径 5cm 以上的林木为该二维平面的点状目标,在 MATLAB 平台上编程绘制样地林木 Voronoi 图并计算其相关参数,结果如图 2 所示。该 Voronoi 图模型不但显示了林木详细的空间位置,可用于定性分析林木空间格局,还能通过该图提取林分空间结构信息,具体如下:

(1) 平面点即生成元代表林木在样地中的空间相对位置 (x_i, y_i) , $1 \leq i \leq 982$ 。

(2) Voronoi 多边形代表林木的“影响圈”,即林木所占据的空间生态位,反映了林木间相互作用及对环境适应的结果,其面积或周长度量了该空间的大小,其面积的倒数则表示该林木的点密度。一定范围内 Voronoi 多边形平均面积 \bar{s} 的倒数则表示该区域内林木的空间密度 ρ , 即:

$$\rho = \frac{1}{\bar{s}} \quad (3)$$

式中, $\bar{s} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n s_i$, s_i 为单株林木 Voronoi 多边形的面积。

(3) 林木的生长状况、分布格局等情况与其直接邻体的数量、规模、距离有密切关系。两株林木相邻的依据是两者对应的 Voronoi 多边形共享一条边,该边称为公共边。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。

(4) Voronoi 图具有唯一的对偶结构 Delaunay 三角网,如图 3 所示,实线代表 Delaunay 三角网,虚线表示相对应的 Voronoi 图。单个 Delaunay 三角形包含相邻木间的距离信息和角度信息,其边长长度等于参照树与其相邻木的距离,其内角可直接计算参照树的角尺度^[7]。

经样地边缘校正,本研究样地林木 Voronoi 图的有关参数及取值如表 1 所示。

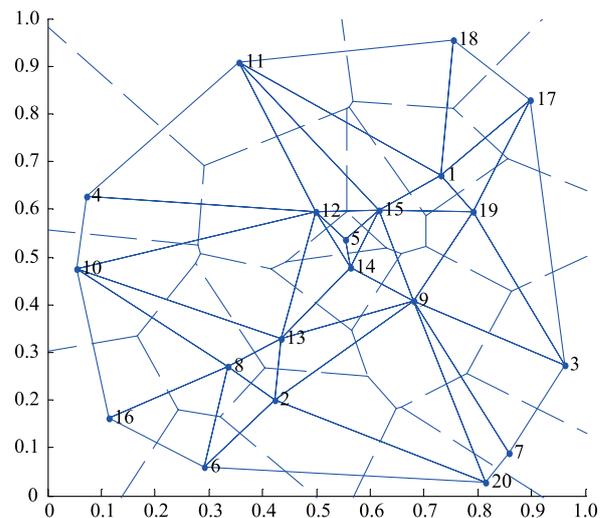


图3 Delaunay 三角网示例

Fig.3 An example of Delaunay Triangulation

3.2 林木空间格局分析

3.2.1 林分整体分布格局

本文采用基于 Voronoi 图变异系数的格局分析方法研究不同空间尺度下的林木分布格局,结果如图 4 所示。当小尺度取样时,空间格局呈显著聚集分布,20—40m 为强度聚集,观察图 2 可看到该尺度下有明显的林木聚生区域。此后,随着尺度的增大,变异系数逐渐减小并趋于稳定。当取样尺度大于 76m 时,空间格局呈接近随机分布的轻度聚集,说明在大尺度范围林木的空间格局有从聚集分布向随机分布过渡的趋势。由此可知,基于 Voronoi 多边形变

异系数的格局分析与取样尺度有密切关系,尺度越大所包含样本越多,则分析结果越接近林分真实的空间格局。

表 1 样地 Voronoi 图信息

Table 1 Information of Voronoi diagram in the plot

参数 Parameters	基本信息 Basic information			边缘校正 Edge correction		Voronoi 多边形 Voronoi tessellation		
	林木总数 Tree numbers	平均相邻木数 Average numbers of neighbor tree	相邻木平均 距离/m Average distance of neighbor tree	角尺度均值 Uniform angle index	保留林木数 Reserved tree numbers	边缘校正率/% Edge correction ratio	平均公共边数 Average number of side	变异系数 Coefficient of variation
数据 Values	982	6	2.31	0.532	877	10.7	6	0.458

为对比基于 Voronoi 图的格局分析方法,本研究选取结构化森林经营中有代表性的角尺度^[7-8]方法分析同一块样地的空间格局。图 4 为样地中角尺度各个取值的统计情况,其均值为 0.532,表明样地林木整体上呈轻度聚集分布。可见,基于 Voronoi 图变

异系数方法与角尺度方法对于林分整体空间格局的判断是一致的。图 4 显示了 25 种不同空间尺度下变异系数和角尺度的相关性分析结果,其相关系数 R^2 等于 0.7714(显著正相关),则进一步说明两种格局分析方法可以相互替代。

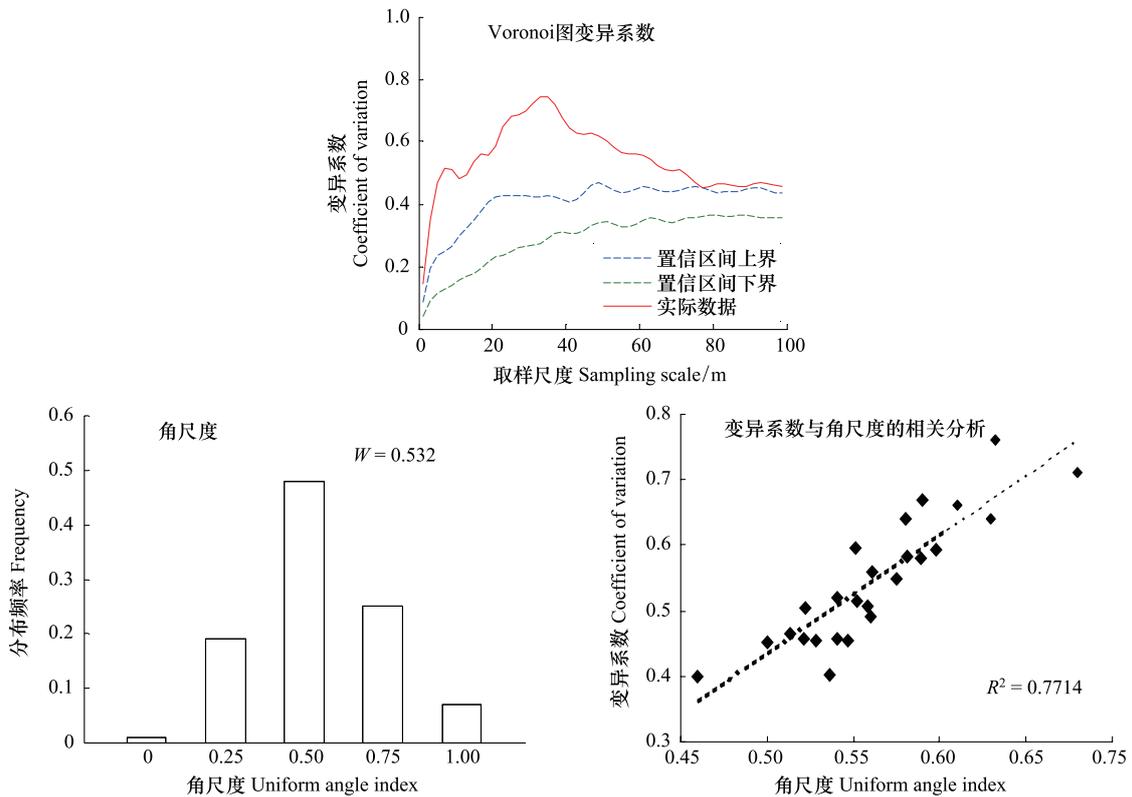


图 4 林分空间分布格局

Fig.4 Stand spatial pattern

3.2.2 主要树种的空间格局动态

林木分布格局不仅可以定量描述林分的水平空间结构,而且能够说明林分种群的动态变化。目前多以林木径级结构代替年龄结构分析种群格局动态^[21]。本研究按照胡小兵等人^[22]对木本植物种群

的划分标准,以胸径 10cm 为界将样地林木分为小径木(小树和中树,胸径小于等于 10cm)和大径木(大树,胸径大于 10cm),分析林分内主要树种的空间格局动态(图 5),图中横坐标表示取样尺度,纵坐标对应具体树种的 Voronoi 图变异系数值。

青桐属地带性常绿阔叶优势树种,具有水源涵养和水土保持作用,更新能力强,兼有实生和萌生两

种繁殖方式,其小径木呈强度聚集,且随尺度增大聚集程度进一步加深。由于在群落中分布最广,数量

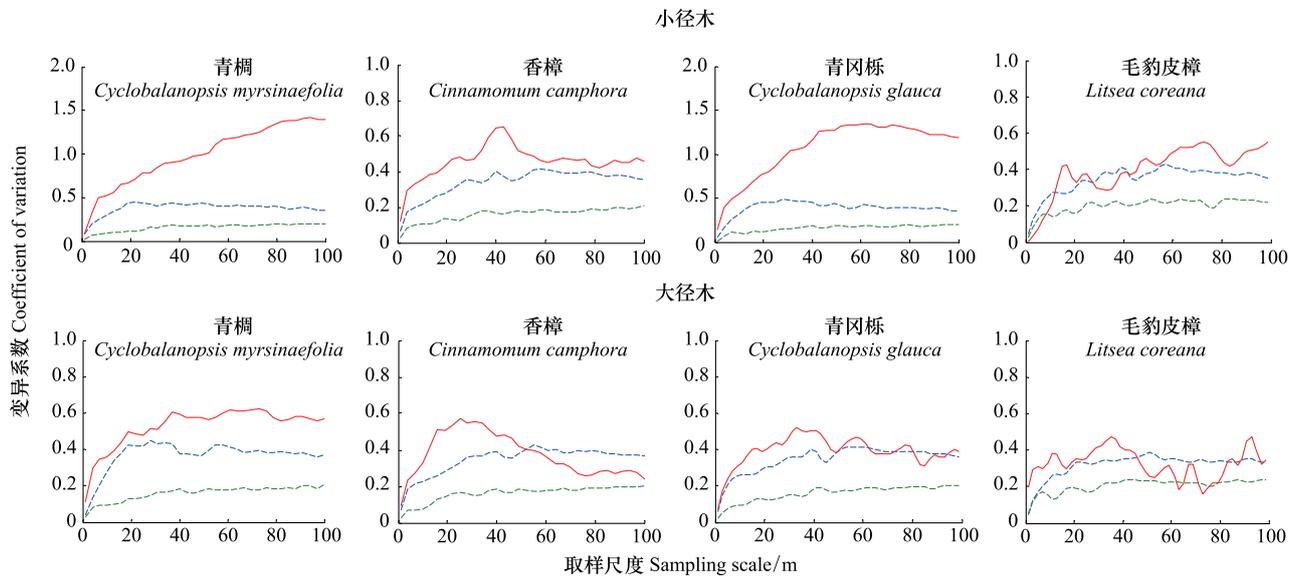


图5 主要树种的空间分布格局

Fig.5 Spatial pattern of main tree species

最多,该树种所承受的竞争压力也最大,因而其大径木虽呈显著聚集,但聚集程度相比小径木明显降低(图5)。香樟是群落中另一种优势树种,根系发达,具有较强的适应性,其种子轻,结实量大,散播范围广,在群落中与青桐全方位竞争,小树在林分内呈轻度聚集分布,而成年大树则因自然稀疏其格局过渡到随机分布(图5)。青冈栎与青桐同属山毛榉科,林下更新良好,种子粒大而重,萌发率高,小树多聚生在一起。但青冈栎在群落中的优势地位不及青桐和香樟,由于自稀疏及环境影响,使得其成年大树的格局在随机与聚集分布之间震荡(图5)。毛豹皮樟是群落中的非优势种(限于篇幅,非优势种仅列出毛豹皮樟),其空间格局波动较大,分布特征不明显,这可能与该种群数量较少有关(图5)。总的来看,样地内小径木的空间格局多为聚集分布,大径木主要呈轻度聚集或随机分布;优势种空间分布较明显,非优势种分布特征不明显或呈随机分布;林分空间格局主要由优势种的格局决定,各树种分布格局的动态变化与林分整体呈聚集态,且有向随机分布演变的趋势保持一致。

以上分析表明,受随机自稀疏、个体生长差异等多重因素影响,同一树种在不同的发育阶段,其空间格局会发生动态变化。同时,受空间尺度改变的影

响,林木在小尺度上形成的分布格局可能会在大尺度上复合进而引起分布状态的改变,使得种群分布动态表现出强烈的空间及时间特征。

4 结论与讨论

本研究以南洞庭湖龙虎山林场典型常绿阔叶林群落为研究对象,根据林木点位置剖分样地平面空间,建立基于 Voronoi 图的林分空间模型。该模型不但能显示出林木的空间位置和疏密程度,而且量化了林木的空间邻近关系,具有明确的林学及生态学意义。对于以参照树为中心的空间结构单元,其相邻木可以由参照树的 Voronoi 多边形公共边唯一确定,解决了长期以来相邻木选取尺度模糊的问题。

本研究提出基于 Voronoi 图的格局分析方法,应用该方法分析林分的整体空间格局。与角尺度方法的对比研究显示, Voronoi 图变异系数和角尺度存在显著的正相关关系,表明基于 Voronoi 图的格局分析方法同样能有效刻画林木空间分布特征。进一步使用该方法从不同的时空尺度上描述了林分主要树种的空间格局动态,并结合林木生长特性阐释了格局动态变化的原因;在时间尺度上,林木的自然稀疏是引起种群格局动态的主要原因;在空间尺度上,自然稀疏的作用范围会因尺度的改变而相应改变,使得

小尺度上形成的格局会因尺度增大而复合成更大规模的格局分布,从而改变种群格局面貌。

研究林木空间关系的最终目的是采取合理的经营措施调控林分空间结构,而具体的营林效果可通过经营前后的林分 Voronoi 图体现出来。例如,择伐部分林木后,原本由被伐林木所占据的空间单元并入周边邻木,由此引发的空间格局变化可从林木 Voronoi 图变异系数上反映出来。对于整体呈聚集分布的林分,其中必然存在某些林木聚集区域和稀疏区域,根据林分 Voronoi 图的空间密度信息可以找出这些待调控区域并施加不同的经营措施(择伐或补植)。因此,本研究结果对于天然林空间结构重构及调控具有一定指导意义。

通过相邻木连线的垂直平分线来构造 Voronoi 图,所隐含的林学假设是彼此相邻的两株林木处在同等竞争地位,然而实际情况中这些林木多为不对称竞争状态。胸径粗大、根系发达的林木将处于优势地位,占据更多的资源及生存空间。为使所建模型能反映林分真实情况,后续研究可将胸径、冠幅等林木属性作为权值建立林分加权 Voronoi 图,给林木空间单元划分提供更多科学依据。

此外,还可深入挖掘森林的空间结构信息,建立更为完善的空间模型。例如,考虑林木对光能的利用,可引入树高因子,对林分三维空间进行 Voronoi 剖分;结合 GIS 等先进技术,建立更大研究尺度、多层次的森林空间模型。

References:

- [1] Shan Y, Bettinger P, Cieszewski C J, Li R T. Trends in spatial forest planning. *Mathematical and Computational Forestry & Natural Resource Sciences*, 2009, 1(2): 86-112.
- [2] Tang M P. Advances in study of forest spatial structure. *Scientia Silvae Sinicae*, 2010, 46(1): 117-122.
- [3] Zhang H R, Tang S Z. *Research of the Northeast Natural Forest Sustainable Management Technology*. Beijing: China Forestry Publishing House, 2011: 81-82.
- [4] Moeur M. Characterizing spatial patterns of trees using stem-mapped data. *Forest Science*, 1993, 39(4): 756-775.
- [5] Ripley B D. Modelling spatial patterns. *Journal of Royal Statistical Society. Series B*, 1977, 39(2): 172-212.
- [6] Zhang J T. Analysis of spatial point pattern for plant species. *Acta Phytocologica Sinica*, 1998, 22(4): 344-349.
- [7] Hui G Y, Von Gadow K, Alert M. The neighbourhood pattern-a new structure parameter for describing distribution of forest tree position. *Scientia Silvae Sinicae*, 1999, 35(1): 37-42.
- [8] Hui G Y, Von Gadow K, Hu Y B, Chen B W. Characterizing forest spatial distribution pattern with the mean value of uniform angle index. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(6): 1225-1229.
- [9] Charles D, Gilles G. Voronoi tessellation to study the numerical density and the spatial distribution of neurones. *Journal of Chemical Neuroanatomy*, 2000, 20(1): 83-92.
- [10] Skare Ø, Møller J, Jensen E B V. Bayesian analysis of spatial point processes in the neighbourhood of Voronoi networks. *Statistics and Computing*, 2007, 17(4): 369-379.
- [11] Kristensen L, Olsen J, Weiner J, Griepentrog H W, Nørremark M. Describing the spatial pattern of crop plants with special reference to crop-weed competition studies. *Field Crops Research*, 2006, 96(2/3): 207-215.
- [12] Brown G S. Point density in stems per acre. *New Zealand Forestry Service Research Notes*, 1965, 38: 1-11.
- [13] Tang M P, Chen Y G, Shi Y J, Zhou G M, Zhao M S. Intraspecific and interspecific competition analysis of community dominant plant populations based on Voronoi diagram. *Acta Ecologica sinica*, 2007, 27(11): 4707-4716.
- [14] Tang M P, Zhou G M, Chen Y G, *et al.* Mingling of evergreen broad-leaved forests in Tianmu mountain based on Voronoi diagram. *Scientia Silvae Sinicae*, 2009, 45(6): 1-5.
- [15] Zhao C Y, Li J P, Li J J. Quantitative analysis of forest stand spatial structure based on Voronoi diagram and Delaunay triangulated network. *Scientia Silvae Sinicae*, 2010, 46(6): 78-84.
- [16] Lü Y, Zhang H, Wang X Y, Deng Z A, Li J J. Storey structure study of *Cyclobalanopsis myrsinaefolia* mixed stand based on storey index. *Forest Resources Management*, 2012, (3): 81-84.
- [17] Li J J, Zhang H R, Wang C L, Zang H, Cao X P. Discussion on spatial optimization modelling of water resource conservation forests and management practice of forest functions. *Journal of Central South University of Forestry and Technology*, 2012, 32(3): 23-28.
- [18] Qin X W, Zhang S Q, Li X F, Na X D, Liu C Y. Spatial pattern of red-crowned crane nest-sites based on Voronoi diagram. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(12): 2118-2122.
- [19] Haase P. Spatial pattern analysis in ecology based on Ripley's K -function: Introduction and methods of edge correction. *Journal of Vegetation Science*, 1995, 6(4): 575-582.
- [20] Hui G Y, Gadow K, Hu Y B. *Structure-Based Forest Management*. Beijing: China Forestry Publishing House, 2007: 153-154.
- [21] Zhang H R, Tang M P, Shu Q T. *Theory and Practice of Forest Ecological Harvesting*. Beijing: Publishing House of China Forestry, 2006: 225-226.
- [22] Hu X B, Yu M J. Size structure and distribution pattern of *Cyclobalanopsis glauca* population in evergreen broad-leaved

forests. *Journal of Zhejiang University: Science Edition*, 2003, 30 (5): 574-579.

- [23] Tang Z Y, Qiao X J, Fang J Y. Species-area relationship in biological communities. *Biodiversity Science*, 2009, 17 (6): 549-559.

参考文献

- [2] 汤孟平. 森林空间结构研究现状与发展趋势. *林业科学*, 2010, 46(1): 117-122.
- [3] 张会儒, 唐守正. 东北天然林可持续经营技术研究. 北京: 中国林业出版社, 2011: 81-82.
- [6] 张金屯. 植物种群空间分布的点格局分析. *植物生态学报*, 1998, 22(4): 344-349.
- [7] 惠刚盈, Von Gadow K, Alert M. 角尺度——一个描述林木个体分布格局的结构参数. *林业科学*, 1999, 35(1): 37-42.
- [8] 惠刚盈, Gadow K V, 胡艳波, 陈伯望. 林木分布格局类型的角尺度均值分析方法. *生态学报*, 2004, 24(6): 1225-1229.
- [13] 汤孟平, 陈永刚, 施拥军, 周国模, 赵明水. 基于 Voronoi 图的群落优势树种种内种间竞争. *生态学报*, 2007, 27(11): 4707-4716.

- [14] 汤孟平, 周国模, 陈永刚, 赵明水, 何一波. 基于 Voronoi 图的天目山常绿阔叶林混交度. *林业科学*, 2009, 45(6): 1-5.
- [15] 赵春燕, 李际平, 李建军. 基于 Voronoi 图和 Delaunay 三角网的林分空间结构量化分析. *林业科学*, 2010, 46(6): 78-84.
- [16] 吕勇, 臧颢, 万献军, 邓志昂, 李建军. 基于林层指数的青桐混交林林层结构研究. *林业资源管理*, 2012, (3): 81-84.
- [17] 李建军, 张会儒, 王传立, 臧颢, 曹旭鹏. 水源涵养林多功能经营结构优化模型初探. *中南林业科技大学学报*, 2012, 32(3): 23-28.
- [18] 秦喜文, 张树清, 李晓峰, 那晓东, 刘春悦. 基于 Voronoi 图的丹顶鹤巢址空间格局分析. *生态学杂志*, 2008, 27(12): 2118-2122.
- [20] 惠刚盈, 克劳斯·冯佳多, 胡艳波. 结构化森林经营. 北京: 中国林业出版社, 2007: 153-154.
- [21] 张会儒, 汤孟平, 舒清态. 森林生态采伐的理论与实践. 北京: 中国林业出版社, 2006: 225-226.
- [22] 胡小兵, 于明坚. 青冈常绿阔叶林中青冈种群结构与分布格局. *浙江大学学报: 理学版*, 2003, 30(5): 574-579.
- [23] 唐志尧, 乔秀娟, 方精云. 生物群落的种-面积关系. *生物多样性*, 2009, 17(6): 549-559.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34, No.6 Mar., 2014 (Semimonthly)
CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Impacts of global warming on litter decomposition SONG Piao, ZHANG Naili, MA Keping, et al (1327)
- From system to landscape: the other orientation of regional material flow analysis ZHANG Xiaogang, ZENG Hui (1340)
- A multi-dimensional approach for wetland ecosystem service valuation SONG Yuqin, ZHANG Xiaolei (1352)
- Molecular mechanisms of the insect juvenile hormone JIN Minna, LIN Xinda (1361)
- Microbial deterioration in ancient cave and wall paintings LI Qiang, GE Qinya, PAN Xiaoxuan, et al (1371)
- Study on ecological safety evaluation and warning of wetlands in Tumen River watershed based on 3S technology
..... ZHU Weihong, MIAO Chengyu, ZHENG Xiaojun, et al (1379)
- A review of transboundary protected areas network establishment WANG Wei, TIAN Yu, CHANG Ming, et al (1391)

Autecology & Fundamentals

- Water consumption characteristics and water use efficiency of *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* and bamboo-willow
seedlings QIU Quan, PAN Xin, LI Jiyue, et al (1401)
- Three warming scenarios differentially affect morphological plasticity of an invasive herb *Alternanthera philoxeroides*
..... CHU Yanmei, YANG Jian, LI Jingji, et al (1411)
- The influence of meteorological factors and soil physicochemical properties on karst processes in six land-use patterns in summer
and winter in a typical karst valley LIU Wen, ZHANG Qiang, JIA Yanan (1418)
- Effects of nanocarbon application on nitrogen absorption and utilization of flue-cured tobacco
..... LIANG Taibo, YIN Qisheng, ZHANG Yanling, et al (1429)
- The stand spatial model and pattern based on voronoi diagram LIU Shuai, WU Shuci, WANG Hong, et al (1436)
- Dynamic analysis of spatial structure in a close-to-nature *Phyllostachys edulis* stands
..... QIU Jianxi, TANG Mengping, SHEN Lifan, et al (1444)
- Phenotypic diversity in natural populations of *Sapindus mukorossi* based on fruit and seed traits
..... DIAO Songfeng, SHAO Wenhao, JIANG Jingmin, et al (1451)
- Development of compatible biomass models for trees from different stand origin ... FU Liyong, LEI Yuancai, SUN Wei, et al (1461)

Population, Community and Ecosystem

- The impact of understory vegetation structure on growth of *Polygonatum cyrtoneura* in extensively managed *Phyllostachys edulis*
plantation FAN Yanrong, CHEN Shuanglin, YANG Qingping, et al (1471)
- Short-term effects of CO₂ concentration elevation, warming and transgenic *Bt* rice cropping on soil labile organic carbon and
nitrogen, and nematode communities CHEN Jing, CHEN Fajun, LIU Manqiang, et al (1481)
- Temporospatial variations in net ecosystem productivity in Northeast China since 1961
..... LI Jie, ZHANG Yuandong, GU Fengxue, et al (1490)
- Assessment of the habitat suitability for waterfowls in the Panjin, Liaoning with GIS and remote sensing
..... DONG Zhangyu, LIU Dianwei, WANG Zongming, et al (1503)
- Distribution of soil macropores and their influence on saturated hydraulic conductivity in the Huoditang forest region of the
Qinling Mountains LU Bin, ZHANG Shengli, LI Kan, et al (1512)

- Influences of phosphorus concentration on interactions among *Microcystis aeruginosa*, *Daphnia magna* and *Ceratophyllum demersum* ...
 MA Jianmin, JIN Ping, GUO Meng, et al (1520)
- Allelopathic inhibition and mathematical models of *Chara vulgaris* extracts on two freshwater algae species
 HE Zongxiang, LIU Lu, LI Cheng, et al (1527)
- Flora analysis of riparian vegetation in Yongding-Haihe river system, China XIU Chen, OUYANG Zhiyun, ZHENG Hua (1535)
- Stream habitat assessment of Dong River, China, using *River Habitat Survey* method
 WANG Qiang, YUAN Xingzhong, LIU Hong, et al (1548)
- Landscape, Regional and Global Ecology**
- Applying SWAT model to explore the impact of changes in land use and climate on the streamflow in a Watershed of Northern
 China GUO Junting, ZHANG Zhiqiang, WANG Shengping, et al (1559)
- Climate response of tree growth along an altitudinal gradient in the Changbai Mountains, Northeast China
 CHEN Li, YIN Yunhe, ZHAO Dongsheng, et al (1568)
- The dispersion of airborne pollen and its relationship with major climatic parameters in Shijiazhuang
 LI Ying, LI Yuecong, LÜ Suqing, et al (1575)
- The change of soil carbon and nitrogen under different grazing gradients in Hulunber meadow steppe
 YAN Ruirui, XIN Xiaoping, WANG Xu, et al (1587)
- Spatial distribution and influencing factors of farmland soil organic matter and trace elements in the nansihu region
 WU Jie, LI Yuhuan, LI Zengbing, et al (1596)
- Resource and Industrial Ecology**
- Transnational land use and its potential environmental consequence LU Xiaoxuan (1606)

《生态学报》2014 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 薛建辉 编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 34 卷 第 6 期 (2014 年 3 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 34 No. 6 (March, 2014)

编 辑 《生态学报》编辑部
地址:北京海淀区双清路 18 号
邮政编码:100085
电话:(010)62941099
www.ecologica.cn
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

主 编 王如松
主 管 中国科学技术协会
主 办 中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
地址:北京海淀区双清路 18 号
邮政编码:100085

出 版 科 学 出 版 社
地址:北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717

印 刷 北京北林印刷厂
发 行 科 学 出 版 社
地址:东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717
电话:(010)64034563
E-mail: journal@cspg.net

订 购 全国各地邮局
国外发行 中国国际图书贸易总公司
地址:北京 399 信箱
邮政编码:100044

广告经营 京海工商广字第 8013 号
许 可 证

Edited by Editorial board of
ACTA ECOLOGICA SINICA
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
Tel: (010)62941099
www.ecologica.cn
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

Editor-in-chief WANG Rusong
Supervised by China Association for Science and Technology
Sponsored by Ecological Society of China
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

Published by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

Printed by Beijing Bei Lin Printing House,
Beijing 100083, China

Distributed by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North
Street, Beijing 100717, China
Tel: (010)64034563
E-mail: journal@cspg.net

Domestic All Local Post Offices in China
Foreign China International Book Trading
Corporation
Add: P.O.Box 399 Beijing 100044, China



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元