

# 扩展点格局分析方法在灌木种群空间分布格局研究中的应用<sup>\*</sup>

陈 丽<sup>1</sup> 王 炜<sup>2\*\*</sup> 王东波<sup>1</sup> 王永利<sup>3</sup>

(<sup>1</sup>内蒙古呼伦贝尔市环境监测中心站, 内蒙古呼伦贝尔 021008; <sup>2</sup>内蒙古大学生命科学学院, 呼和浩特 010021;

<sup>3</sup>内蒙古气象局, 呼和浩特 010051)

**摘 要** 当研究对象个体差异很大或者研究尺度与植物大小属于一个数量级时, 传统的以种群空间分布的坐标点图为基础的点格局分析方法存在局限性。本文引入一种在传统点格局分析方法基础上发展起来的以栅格数据为分析对象的新方法——扩展点格局分析方法, 用以分析具有一定面积和形状对象的空间格局和生态过程, 该方法适用于灌木研究对象。以狭域特有种四合木(*Tetraena mongolica*)种群的空间分布格局分析为例, 采用摄影定位法, 用图像处理软件及地理信息系统软件将样地信息数字化后, 利用扩展点格局分析方法分析了群落中四合木单种的空间分布格局及其与群落中霸王(*Zygophyllum xanthoxylum*)种群的关系, 四合木种群在 69~99 cm 尺度上表现为均匀分布, 四合木与霸王在 350~570 cm 尺度上表现出显著的负关联关系。结果揭示了灌木种群的空间结构特征。

**关键词** 扩展点格局分析方法; 种群格局; 四合木

**中图分类号** Q14 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2011)12-2700-06

**Application of extending point pattern analysis in the research of shrub population's spatial pattern.** CHEN Li<sup>1</sup>, WANG Wei<sup>2\*\*</sup>, WANG Dong-bo<sup>1</sup>, WANG Yong-li<sup>3</sup> (<sup>1</sup>Monitoring Station for Eco-environment of Hulunbeir, Hulunbeir 021008, Inner Mongolia, China; <sup>2</sup>College of Life Sciences, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, Inner Mongolia, China; <sup>3</sup>Inner Mongolia Weather Bureau, Hohhot 010051, Inner Mongolia, China). Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(12): 2700–2705.

**Abstract:** The traditional point pattern analysis based on species mapped points has its limitation when the plant individual difference is very large or the scale of the interest is of the same order of magnitude as the size of plant individual. This paper introduced a grid-based approach, extending point pattern analysis, to analyze the spatial distribution pattern and ecological process of some objects with special shape and area. Taking the spatial pattern of endemic *Tetraena mongolica* population with narrow area distribution in west Erdos of Inner Mongolia as a case, a community block of 30 m × 30 m was randomly selected, and divided into 1600 sub-blocks of 75 cm × 75 cm. All the photos of the study site were obtained by photography orientation method, and then processed and digitized by image processing software and GIS software. All the analyses were done by the software Programita. By using the extending point pattern analysis to analyze the spatial pattern of *T. mongolica* and its relationships with *Zygophyllum xanthoxylum* in the community, it was shown that there was a uniform distribution for the *T. mongolica* population at a scale of 69–99 cm, and a negative correlation between *T. mongolica* and *Z. xanthoxylum* at a scale of 350–570 cm. The grid-based method was a better way to understand the spatial pattern of shrub population.

**Key words:** extending point pattern analysis; population pattern; *Tetraena mongolica*.

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(3033120)资助。

<sup>\*\*</sup> 通讯作者 E-mail: weiwang686@sina.com

收稿日期: 2011-05-17 接受日期: 2011-08-09

植物种群的空间分布格局是植物种群生物学特性对环境条件长期适应和选择的结果,是植物种群的基本数量特征之一,是研究种群特征、种群间相互作用及种群与环境关系的重要手段(Greig-Smith, 1983;张金屯,1995)。种群生态学研究,传统的样方取样和分析方法所采用的样方大小都不能全面反映一个种在空间的分布特点和种间的相互关系。自张金屯(1998)将点格局分析方法引入我国,对研究种群特征、种群间相互作用及种群与环境关系方面起了重要的推动作用。但是,当遇到研究对象的个体大小差异很大或者所感兴趣的尺度与植物大小属于一个数量级时,将植物近似为点的点格局分析方法就存在很大的局限性(Wiegand *et al.*, 2006)。本文引入一种突破这种局限的研究方法——扩展点格局分析方法,它是以植物在空间中的真实位置、大小、形状等要素的分布图为基础进行格局分析。

本文以古老的蒺藜科残遗植物四合木为研究对象,将摄影定位法与扩展点格局分析法相结合,探讨扩展点格局分析方法在灌木种群空间分布格局及灌木种间关系中的应用,从而得出种群的空间分布格局所能反映出来的潜在的生态学过程和理论。

四合木是荒漠旱生灌木,西鄂尔多斯-东阿拉善特有的单种属,古地中海残遗成分(刘果厚等, 2001),它的分布区是亚洲中部一批古老残遗植物的“避难所”。四合木和它所形成的群落,目前在亚洲中部荒漠区只有极为有限的分布区。它主要分布在鄂尔多斯高原西北部、库布齐沙漠以南,桌子山的山麓地带,少量的延伸到相邻的乌达低山残丘区。除此以外,整个亚洲中部荒漠,甚至阿拉善戈壁荒漠的其他地区都再也不见其分布(中国科学院内蒙古宁夏综合考察队, 1985),使得四合木成为狭域特有种。

在四合木群落中有许多个体较大的灌木,受植物个体大小形状及空间分布的影响,在空间格局分析中若将群落中的四合木和其他灌木视为点的话,会丢失掉很多生态信息或者夸大了种群作用,传统的点格局假设方法并不适合本研究对象,因此,本文引入能够分析有一定面积和形状对象格局的扩展点格局分析方法(Wiegand *et al.*, 2006)。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 自然概况

研究在内蒙古鄂尔多斯市杭锦旗巴拉贡镇开展

(107°11'44.7", 40°14'40.2"N),海拔 1212 m。属于温带大陆性气候,年平均气温 7.7 °C ~ 8.3 °C, ≥10 °C 的积温 2800 °C ~ 3200 °C,年日照时数 3040 ~ 3300 h,无霜期 138 ~ 144 d,年平均降雨量 130 ~ 180 mm,降水条件对植物生长需水保证率低,在植被-气候区上属于草原化荒漠区。土壤组成砂粒占主要部分,为少砾沙质土。

研究区域以草原化荒漠植被为主,生长有旱生灌木、半灌木及旱生多年生禾本科植物。实验样地群落中四合木与古老荒漠残遗植物霸王种群共存,其他的物种主要有灌木层片的长叶红沙(*Reaumuria trigyna*)、红砂(*R. soongorica*)和矮脚锦鸡儿(*Caragana brachypoda*);半灌木层片的驼绒藜(*Ceratoides latens*)和猫头刺(*Oxytropis aciphylla*);多年生草本植物层片的沙生针茅以及 1、2 年生植物层片的猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)、画眉草(*Eragrostis pilosa*)、锋芒草(*Tragus berteronianus*)、蒙古虫实(*Corispermum mongolicum*)、雾冰藜(*Bassia dasphylla*)和猪毛菜(*Salsola laricifolia*)等,生境类型为覆沙的沙砾质戈壁。

### 1.2 研究方法

**1.2.1 取样及数据处理** 根据王鑫厅等(2006)的研究结果,通过威尔柯克森符号秩检验方法对于草本植物利用摄影定位法测得的植物坐标与实测坐标值无显著差异,本研究也采用摄影定位法(王鑫厅等, 2006),在实验样地选取群落外貌均匀的 30 m × 30 m 的样方,用红色竹筷将其分割成 1600 个 75 cm × 75 cm 的亚样方,将 Nikon D100 数码相机镜头与地面方向垂直向下架在固定在距离地面垂直高度 1.75 m 的云台上,用数码相机依次拍完所有亚样方。将拍完的具有一定顺序的 1600 张 75 cm × 75 cm 的亚样方照片导入计算机,并按行列进行编号,以便室内处理。

将实验样地拍摄的 1600 张亚样方照片先在 Photoshop 7.0 图像处理软件中进行预处理,裁去竹筷周围多余的部分,然后在 R2V 数字化软件中输入控制点(4 个顶点),将样方转化到坐标系中,按不同的植物种群建立不同的图层,勾画每种植物的轮廓即得出数字化的矢量图层。在 CorelDraw 12.0 图像处理软件中进行处理拼接,将样地中的所有亚样方拼合在一起,最终得到一张完整的群落片段图。运用地理信息系统软件 ArcGIS 8.3 和 ERDAS 8.7,对矢量图层进行格式转化得到描述群落图及种群个体

形状大小的二元数据集用于格局分析中。本文所有的分析都是在 Programita 软件中完成的 (Wiegand & Moloney, 2004)。

1.2.2 扩展点格局分析方法理论

1) 基本思想 扩展点格局分析方法的研究对象是具有一定面积和形状的事物。以植物为例, 扩展点格局空间分析方法就是在一个研究区域中用比植物个体小的单元组成的分类栅格图代表植物。根据植物的面积和形状, 一株植物可以用一个或者多个相邻的单元组合来表示, 在一幅图中用不同的分类标识分别代表裸地、植物 a、植物 b 等 (图 1)。

密度( $\lambda$ )和协方差( $K$ )是二维数集的一次和二次特征结构。 $\lambda$  是单位面积上的平均点数,  $K(r)$  是点间距离分布的测定指标, 也就是 Ripley  $K$  函数。该函数统计学理论是 Ripley (1977) 首先提出来的, 经 Diggle 等 (1983) 发展完善。 $g$  函数 (Stoyan & Stoyan, 1994) 是由  $K$  函数推导而来, 在  $g$  函数中是用圆环来取代传统格局分析中的圆。 $g$  函数与  $K$  函数的关系是:

$$g(r) = \frac{1}{2\pi r} \frac{dK(r)}{dr}$$

式中,  $r$  为空间尺度。随机分布情况下, 在所有尺度  $r$  下  $g(r) = 1$ , 当  $g(r) > 1$ , 表明在尺度  $r$  下种群为聚集分布, 当  $g(r) < 1$ , 则为均匀分布。

Wiegand 和 Moloney (2004) 提出了可用于基于栅格数据的对于任意形状的研究区可以进行估计的二元  $g$  函数:

$$\lambda_2 \hat{g}_{12}(r) = \frac{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n_1} Point\ s_2[R_{1,k}^w(r)]}{\frac{1}{n_1} \sum_{k=1}^{n_1} Area[R_{1,k}^w(r)]}$$

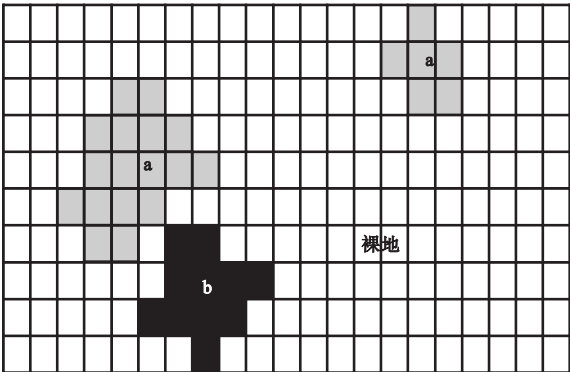


图 1 栅格分类示意图  
Fig. 1 A categorical raster sketch map  
浅灰色: 植物 a; 黑色: 植物 b; 白色: 裸地。

二元的成对相关函数  $g_{12}(r)$  也是由  $K$  函数派生来的; 二者之间的关系是  $g_{12}(r) = K_{12}(r)/(2\pi r)$ 。它的含义是以格局 1 中的所有  $k$  个点为中心,  $r$  为半径的圆环中出现的格局 2 中点的期望数。其中,  $\lambda_2 = n_2/A$ , 是格局 2 的点密度; 分子项的含义是研究区内半径为  $r$  (以格局 1 中的点为圆心) 的圆环中格局 2 点的平均数; 分母项是这些圆环的平均面积;  $n_1$  是研究区内格局 1 中所有点的数量, 这里  $R_{1,k}^w(r)$  是以格局 1 中第  $k$  个点为中心,  $r$  为半径, 宽度为  $w$  的圆环。当  $g_{12}(r) = 1$  表明 2 个植物种在  $r$  尺度下无关联, 当  $g_{12}(r) > 1$  表明二者为正关联, 当  $g_{12}(r) < 1$  表明二者为负关联。

2) 备择模型

用备择假设来检验某个植物种的个体在所研究区域内是否是随机分布的或者 2 个种之间关系是正关联、负关联还是没关联并且这些关系是否显著。这里列举 2 个常用的备择模型以做参考。

备择模型 1: CSR (complete spatial random)

广泛用于单种空间格局分析的备择模型是空间完全随机模型 (CSR)。假设条件: 在一定面积的平面区域中, 事件的发生符合普阿松分布; 在该区域中给定  $n$  个事件, 这些事件都是独立随机样本, 也就是格局中的任何一个点在研究区域中的任何位置出现的概率都相等, 并且一个点发生的位置与其他任何一个点都无关 (不存在相互作用)。有一定面积和不规则形状的植物按照 CSR 模型被随机分布。这种备择模型是为了检验种群的均匀性或者聚集性。

备择模型 2: HP (heterogeneous Poisson)

当空间格局的介质不均一时, CSR 备择模型就不适合检测格局的二阶特征, 我们利用异质普阿松模型 (HP) 来揭示格局真正的二阶效应。如果格局表现出了一阶效应时, HP 只是 CSR 的一个简单变换, 用一个随位置变化的密度函数来代替均质普阿松过程中的密度常量, 但是任何点的出现与其他点的出现都是相互独立的。

$K$  函数与  $g$  函数之间最重要的不同之处就是  $K$  函数是累加性质的; 也就是它计数以格局 1 中的点为中心的整个圆中的格局 2 中点的数量, 而  $g$  函数不是累加的只是涉及某一距离  $r$  处的点数。因此, 如果偏离了备择模型, 用  $K$  函数就很难估计出点与点之间在某一尺度上的重要关系, 这是因为小尺度上的  $K$  值会影响在更大尺度上的  $K$  值。相反, 成对相关函数  $g(r)$  能够评价出点与点之间发生重要相



相互作用的尺度。

备择模型的置信区间

用蒙特卡罗拟合方法在特定备择假设模型下进行随机模拟来构建置信区间,检验偏离随机分布的显著性。对于每一次模拟都会生成一个 $g(r)$ 。重复这一过程直到达到实现确定的次数,具体是通过100次模拟随机分布空间格局,(拟合次数对95%的置信水平应为20次,99%的置信水平就为100次),利用模拟产生的函数的最大和最小值构成的包迹线为纵坐标绘图, $r$ 为横坐标。用种群或群落实际分布数据计算得到不同距离 $r$ 处的 $g(r)$ 或 $g_{12}(r)$ 值。若在包迹线以内,则符合随机分布或种间相互独立,若在包迹线以外,则显著偏离了备择假设模型。本研究中选用CSR作为四合木种群的空间格局分析的备择模型,HP作为四合木与霸王种间关联分析的备择模型。

2 结果与分析

2.1 群落中建群种四合木与霸王的平面分布

在该群落中霸王在900 m<sup>2</sup>的样地内有128丛,投影面积范围156~20572 cm<sup>2</sup>,分盖度5.6%;四合木则只有29丛,投影面积范围38~37703 cm<sup>2</sup>,分盖度3.4%。灌木种四合木与霸王在30 m×30 m样地中的个体平面分布见图2。

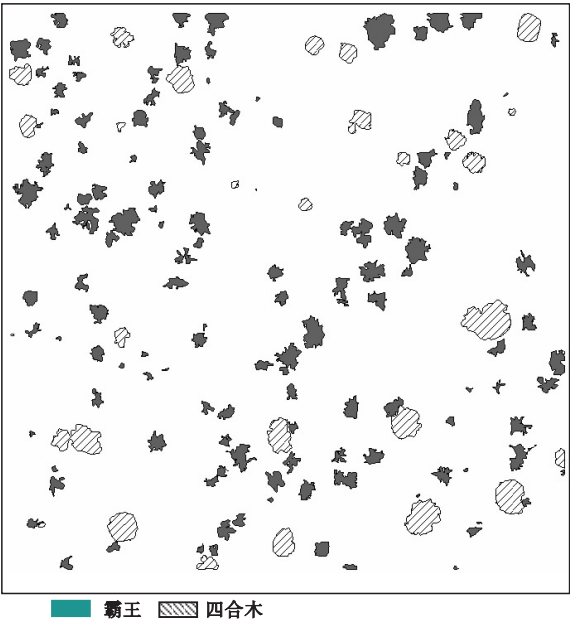


图2 四合木和霸王在样地中的分布(30 m×30 m)  
Fig.2 Plane figure of *Tetraena mongolica* and *Zygophyllum xanthoxylum* in the investigation site

2.2 四合木种群格局

从图3可以看出,四合木种群在尺度69~99 cm上显著的偏离随机分布,呈现均匀化的特征。我们认为这个群落中大部分四合木的直径多数都在70~100 cm左右,这与现场测量的四合木直径大小分布是一致的。因此,两丛相邻灌木的中心连线距离至少70 cm以上。在这个尺度上,灌木并未表现出完全随机的格局而是避免彼此靠得更近,这就是因为在种内可能存在对资源的竞争,种群有一个自疏的过程。这种效应一直持续到1 m左右。不同种群之间是在一定的空间范围内发生作用的,在更大的尺度上,超过了作用范围,其间的直接相互作用必将逐渐消失而使种群表现出随机分布(孙学刚等,1998)。综合种群在样地中的分布图也可以看到这种效应,相邻的灌木体之间总会有一段比较大的距离,彼此不会离的太近。四合木在研究尺度范围内(并且在作用范围内)并没有表现出聚集的特征,这为四合木的生存繁衍带来问题,这种随机或是均匀分布方式不利于种群个体间的传粉与基因交流,也不利于种群对不良环境的适应,降低了种群在群落内的竞争能力,给种群拓殖增加了阻力。

2.3 四合木与霸王种间关联分析

从图4可以看出,霸王与四合木之间存在负关联关系,在0~350 cm的尺度上,二者负关联关系并不显著,这主要是由于这个样地中四合木与霸王的个体都很大并且彼此之间间距大造成的。350~570 cm的尺度上,二者表现出显著的负相关,二者之间的距离至少会维持在这一范围内,同为较大型肉质叶灌木,这种负关联在荒漠地区很可能是受到资源

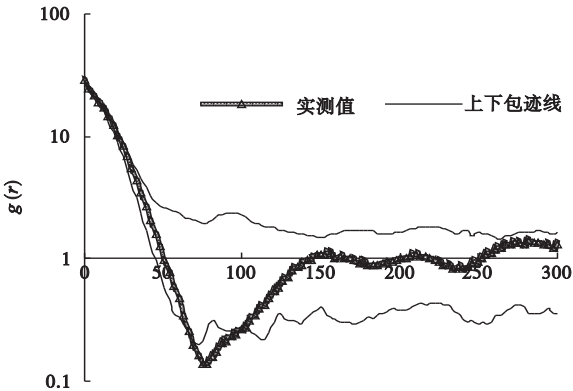


图3 四合木种群的格局  
Fig.3 Spatial pattern of *Tetraena mongolica* population  
虚线为用实际数据计算的 $g(r)$ 值,实线为用蒙特卡罗拟合的上下包迹线。

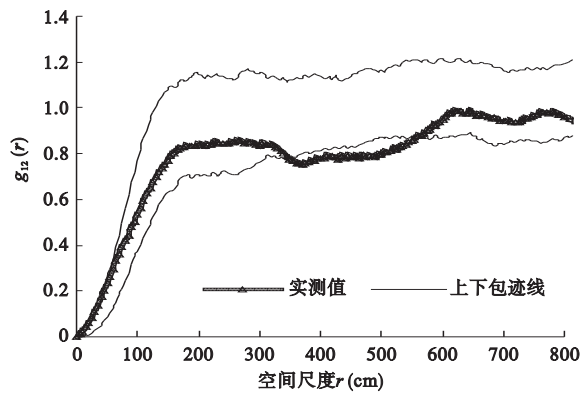


图 4 四合木与霸王的种间关联  
Fig.4 Spatial associations of *Tetraena mongolica* with *Zygophyllum xanthoxylum*

竞争作用特别是对水分的竞争而产生的。在>570 cm 的更大尺度上,负关联关系变得又不显著。

3 讨 论

点格局分析方法在研究一些种群特征等方面有很好的效果,但传统的点格局分析的局限就在于将植物理想化为一个点,这种近似在植物体的大小相对于研究尺度可以忽略时有效,但可能会弱化小尺度上的空间关系。在  $g$  函数的基础上,我们利用栅格数据(图形分类数据)分析有一定丛幅的种群空间分布格局及种间关系,精确地用矩阵与分类图表示植物在研究样地中的位置与面积的空间分布并用于运算。它充分考虑到了植物有限的面积以及植物不规则的形状,可以真实的反映实地状况,不会丢失重要的信息。该方法是在 Ripley  $K$  函数基础上发展起来的,根据方法的原理和思想,运用栅格数据表述研究对象,凡是具有一定大小和面积的物种均可以用相应的灰度值表示。改进方法的应用可以更好的解释空间过程,并利用蒙特卡罗多次模型拟和检验,除了具有传统点格局分析方法的优点,同样也适合于灌木研究对象。但本方法的局限表现在研究丛幅较大的物种如较高大的乔木等,使用数码相机获取形状的精确信息是需要耗费大量时间和人力资源的。

从本研究数据的获得、识别及处理过程中发现采用摄影定位法获得与本研究植被类型、结构组成相似的草原化荒漠区植物群落的基础数据是非常简便、易行并且精准可靠的。吕志伟等(2008)利用 CCD 数码相机进行高精度定位实验,结果证明可以

实现较高的定位精度。利用该方法可以大大缩短野外工作时间并能够获得更多的数据信息,便于长期的分析利用。摄影定位法在本研究前均是应用在对草本植物生态学过程研究中的采样方法(相对比较狭义),其实,将此方法延伸扩展,在当前发达科技支撑下,航拍等获取信息的手段均可被视为摄影定位法的高级手段。因此,摄影定位法对于乔木、灌木、草本等各生活型的植物均适用。本文为研究者提供了分析灌木群落物种格局的新方法。在新方法的探讨应用过程中,群落片段大小的选择以及便捷的室内处理方式等,本研究并未深入研究,今后有待加强和探索并将优化成果应用于采样与分析的全过程。

利用扩展点格局方法分析的霸王+四合木群落中,霸王和四合木二者关系密切,虽然共处于同一群落,但通过扩展点格局方法分析后发现二者在一定尺度上存在竞争关系,在漫长的历史演变进程中,二者成为群落的共建种。从样地二者的分布来看,四合木与霸王个体数悬殊,四合木大型个体较多而霸王的小个体较多,结合 2 种植物的生物学特性与张永明等(2005)研究来看,它们同属极其耐旱的物种,都具有长期进化而来的肉质叶、发达的主根及分枝多等的生物抗旱机制,当同处于干旱的环境中时,水分成为了决定生物能否发展生存的必要与限制因素,必然促成有着相似特征的处于同一群落中四合木与霸王的竞争关系。张永明等(2005)研究表明,四合木与霸王在群落中共存时能分别利用不同深度与范围内的水资源,但从测定结果来看,四合木与霸王侧根水平分布范围是相似的,二者主侧根深度分布存在重叠,而霸王处于强势地位,在一定空间范围内有限资源分配的条件下,竞争成为必然,这一点在本研究的格局分析结果中也得到很好的体现。

在全球气候变暖的大背景下,狭域特有种四合木的生存环境会变得更加不适宜其生存、繁衍和发展,期待今后在对四合木群落及物种特性的研究中能够获得更多的生物学信息,为有效植物保护措施

参考文献

刘果厚, 高润宇, 赵培英. 2001. 珍稀濒危植物沙冬青、四合木、绵刺和半日花等四种旱生灌木在环境胁迫下的生存

- 对策分析. 内蒙古农业大学学报, **22**(3): 66–69.
- 吕志伟, 郝金明, 龚真春, 等. 2008. CCD 校差摄影定位的原理及静态结果. 测绘科学技术学报, **25**(4): 260–262.
- 孙学刚, 肖 雯, 贾恢先. 1998. 疏勒河中游刚毛柽柳盐漠的群落结构、种群空间格局及种间联结性的研究. 草业学报, **7**(2): 10–17.
- 王鑫厅, 王 炜, 刘佳慧, 等. 2006. 植物种群空间分布格局测定的新方法: 摄影定位法. 植物生态学报, **30**(4): 571–575.
- 张永明, 高润宏, 金 洪. 2005. 西鄂尔多斯荒漠四种灌木根系生态特性研究. 内蒙古农业大学学报, **26**(3): 39–43.
- 张金屯. 1995. 植被数量生态学方法. 北京: 中国科学技术出版社.
- 张金屯. 1998. 植物种群空间分布的点格局分析. 植物生态学报, **22**: 344–349.
- 中国科学院内蒙古宁夏综合考察队. 1985. 内蒙古植被. 北京: 科学出版社.
- Diggle PJ. 1983. Statistical Analysis of Spatial Point Patterns. New York: Academic Press.
- Greig-Smith P. 1983. Quantitative Plant Ecology (3rd ed.). London: Blackwell Scientific Publications.
- Ripley BD. 1977. Modelling spatial pattern. *Journal of the Royal Statistical Society, Series B*, **39**: 17–212.
- Stoyan D, Stoyan H. 1994. Fractals, Random Shapes and Point Fields. Methods of Geometrical Statistics. Wiley & Sons, Chichester.
- Wiegand T, Kissling WD, Cipriotti PA, *et al.* 2006. Extending point pattern analysis for objects of finite size and irregular shape. *Journal of Ecology*, **94**: 825–837.
- Wiegand T, Moloney KA. 2004. Rings, circles, and null models for point pattern analysis in ecology. *Oikos*, **104**: 209–229.
- 
- 作者简介 陈 丽,女,1982年5月生,工程师,主要从事草地生态与环境保护工作。E-mail: 15335607767@189.cn
- 责任编辑 王 伟
-