

基于Ripley's K 函数和Taylor幂法则的江西省豚草种群空间分布的点格局分析

王 平¹ 李 芳¹ 杨清培² 王福升^{1*}

(1. 南京林业大学竹类研究所, 南方现代林业协同创新中心, 南京 210037; 2. 江西农业大学林学院, 南昌 330045)

摘要: 为了解豚草 *Ambrosia artemisiifolia* L. 的入侵机制和传播规律, 选取江西省南昌市新建县上罗村一块 5 m×5 m 样地为研究区域, 分析不同距离尺度下该研究区内豚草的空间分布格局, 并采用 Ripley's K 函数和 Taylor 幂法则对该研究区内豚草的分布类型进行定量分析。结果表明: 在研究区内, 豚草强度出现一个黄色区域, 其值超过 0.025 株/cm²; 豚草种群在 0~1.2 m 空间距离尺度上呈极强的聚集性分布, 且随着距离尺度的增大, 聚集程度增强; 泰勒幂指数 b 的估计值为 1.5477, 大于 1.0000, 说明研究区豚草呈现明显的聚集性分布。

关键词: 聚集性分布; 入侵物种; 线性回归; Ripley's K 函数; Taylor 幂法则

Point pattern analysis of spatial distribution of ragweed population in Jiangxi Province based on Ripley's K function and Taylor's power law

Wang Ping¹ Li Fang¹ Yang Qingpei² Wang Fusheng^{1*}

(1. Co-Innovation Center for the Sustainable Forestry in Southern China, Bamboo Research Institute, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu Province, China; 2. College of Forestry, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, Jiangxi Province, China)

Abstract: In order to understand the invasion mechanism and propagation law of ragweeds, a 5 m×5 m plot in Shangluo Village, Xinjian County, Nanchang City, Jiangxi Province was selected as the research area; the spatial distribution pattern of ragweeds in the research area was analyzed at different distance scales, and the distribution types of ragweeds were quantitatively analyzed with Ripley's K function and Taylor's power law. The ragweeds showed a yellow region with an intensity exceeding 0.025 plants/cm². The ragweed population showed a strong clustering distribution at the given distance scales (from 0 to 1.2 m with an increment of 0.1 m), and the aggregation degree increased with increasing distance scale. The estimated value of Taylor's power law exponent b was 1.5477, greater than 1.0000, and ragweeds showed obvious aggregation distribution in the research area.

Key words: aggregated distribution; alien invasive species; linear regression; Ripley's K function; Taylor's power law

生物入侵是当前世界范围内的生态环境问题, 是导致区域物种多样性降低的第二大因素(郑景明和马克平, 2010)。我国地域辽阔, 生态系统复杂多样, 来自世界各地的外来物种几乎都可能在我国找

到适合生存的栖息地, 这也是我国容易受外来种入侵的原因之一(马金双, 2014)。2003年豚草 *Ambrosia artemisiifolia* L. 被列入中国第1批外来入侵物种名单。豚草隶属于菊科豚草属, 又名艾叶破布草, 一

年生草本植物,原产于北美洲,20世纪30年代初传入我国并很快在各地蔓延(董闻达,1989)。豚草具有较强的生命力和生态可塑性,容易形成单一优势群落,导致“生态暴发”;豚草吸水、吸肥能力强,远高于普通农作物,严重抑制农作物的生长甚至导致其死亡;豚草还能分泌化感物质,抑制本土植物的生长发育,从而破坏生物的多样性;豚草是很多病菌的寄主,也是很多害虫的寄主,影响人类身体健康(刘静玲等,1997)。此外,豚草在生长过程中产生的花粉是主要过敏源,容易引起过敏反应,也是诱发支气管哮喘、过敏性鼻炎和荨麻疹的主要致病因子(曾珂等,2010;Smith et al.,2013)。国内外对豚草的研究主要集中在生物学特性、危害及控制管理措施等方面(刘绍芹和吕国忠,2005;Fumanal et al.,2007;张顺合等,2015),而对豚草空间分布的研究较少。

种群空间格局分析是研究种群特征、种群间相互作用以及种群与环境关系的重要手段(Greig-Smith,1983;张金屯,2004;Baddeley et al.,2016),是数学生态学的新兴领域。植物种群在群落中的主要分布类型有随机分布、集群分布和均匀分布,这些分布类型与空间尺度密切相关(Greig-Smith,1983;Sewart & Rose,1990),而传统的格局分析方法很难全面反映种群分布类型和空间尺度的关系(Miyadokoro et al.,2003)。点格局分析中的多距离空间聚类分析(Ripley's K 函数)首先由Ripley(1977)提出,后经Diggle(2014)和Baddeley et al.(2016)等学者的发展而逐步形成一种种群空间格局分析的经典方法,能够最大限度地利用空间点信息来分析植物种群由小到大一系列连续尺度上的空间分布格局(张金屯,2004)。

江西省与豚草原产地北美洲部分地区属于同纬度带,气候类型相同,均属于热带亚热带地区,而且根据大陆漂移假说,东亚和北美洲的植物有相似的遗传背景(龙连娣等,2015)。这些因素导致豚草在江西省蚕食大片土地,形成单种优势群落,威胁本土植物的生存空间,严重破坏了当地农业发展和生态系统的平衡。为防止豚草不良影响的进一步加剧,本研究拟对江西省豚草的种群数量进行调查,运用空间点格局方法和泰勒幂法则对其种群进行分析,从宏观角度探索豚草的空间分布特征,明确其传播特点和扩散规律,了解豚草在江西省的入侵状况和扩散趋势,以期制定合理的防治和控制措施提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料

研究区概况:研究地点位于江西省南昌市新建县上罗村(28°45'N,115°49'E)。南昌市属于亚热带季风气候,雨水充沛,光照充足,季节特征明显。依据1981—2013年的气候资料(来自国家气象科学数据共享服务平台),南昌市年平均降水量1 606.2 mm,年平均气温18.0℃,年平均最高气温22.0℃,年平均最低气温15.1℃,平均相对湿度75.5%,年平均日照时数1 834.7 h。

1.2 方法

1.2.1 研究区内豚草空间分布的调查方法

点格局分析需要选取一块样地,样地面积要适当的大,能够体现种群的各种格局(张金屯,1998)。2007年6月初,在江西省南昌市新建县上罗村长满豚草的撂荒地中,选取5 m×5 m的正方形样地进行调查。以样地一角为坐标原点,南北方向为 X 轴,东西方向为 Y 轴,测量每株豚草距 X 轴、 Y 轴的距离,将其转换为样地的坐标值。为便于测量和记录,调查时将5 m×5 m的样地分成25个1 m×1 m的小样方,共测得1 137株豚草,即1 137个点。空间分布在某一点上的强度是可测的,一般通过研究区域中单位面积上的事件数量来计算。

1.2.2 基于Ripley's K 函数的豚草种群分布定量分析

研究区域由位于二维空间的点构成点事件,用 $K(r)$ 函数来反映点事件对空间布局的依赖程度, $\lambda K(r)=E(N)$, λ 表示研究区域内单位面积上点事件的数量; E 表示在一定距离尺度下点事件数量的期望; N 表示研究区域内距离任意一点的距离小于等于 r 点事件的数量; r 表示给定的距离尺度。如果在一定距离尺度下点事件分布是稳定的、同向的,即满足完全空间随机化假设,则有 $K(r)=\pi r^2$ 。当点事件为聚集分布时, $K(r)$ 的观测值将大于 πr^2 ;若 $K(r)$ 的观测值小于 πr^2 ,则表明事件更倾向均匀分布。 $K(r)$

估计式 $\hat{K}(r) = \frac{A}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n \frac{I_r(r_{ij})}{w_{ij}}$ (Ripley, 1981; Diggle, 2014; Baddeley et al., 2016), A 表示研究区域面积; n 为样地点事件的数量; r_{ij} 为第 j 株豚草和第 i 株豚草之间的距离;当 $r_{ij} \leq r$ 时, $I_r(r_{ij})=1$,当 $r_{ij} > r$ 时, $I_r(r_{ij})=0$; w_{ij} 为权重,以点 i 为圆心、 w_{ij} 为半径的圆落在研究区域的弧长与整个圆周的比值,用于消除边缘效应的影响。

采用R 3.4.2统计软件和spatstat程序包进行点

格局分析。利用蒙特卡罗方法随机模拟产生上下包迹线,模拟的数据点数量与实际的观测点数量一致,模拟过程如下:在样方中随机产生 1 137 个点,使这些点在样方中呈泊松分布,对样方中模拟的数据点的 $K(r)$ 函数的估计值进行计算,令为 $\hat{K}_1(r)$;模拟了 1 000 次,依次为 $\hat{K}_2(r)$ 、 $\hat{K}_3(r)$ 、 $\cdots$ 、 $\hat{K}_{1000}(r)$,设置不同的距离尺度 r ,在不同距离尺度下重复此过程;把在不同距离尺度下模拟的 1 000 个 $\hat{K}(r)$ 的最大值和最小值定为上下包迹线。然后以 r 作为横坐标轴,以上下包迹线为纵坐标轴作图。若实际 $K(r)$ 值位于 2 条包迹线之间,则豚草种群符合随机分布;若位于上包迹线上,则豚草种群为聚集分布;若位于下包迹线下,则豚草种群呈均匀分布。

1.2.3 基于 Taylor 幂法则的豚草种群分布定量分析

采用 Taylor 幂法则定量分析和研究种群分布类型。通过对大量昆虫种群资料的统计分析, Taylor (1961) 发现在样地中许多昆虫分布数量均值 M 和方差 V 之间存在幂函数关系,即 $V = aM^b$, b 被称为泰勒幂指数,其值介于 1~2 之间 (Shi et al., 2016), 等式两边同时取对数,则有 $\ln(V) = \ln(a) + b\ln(M)$, 参数 a 取决于样方大小和计算方法,受环境异质性的影响;参数 b 则是用于描述种群内在性质的聚集指标,不受环境异质性的影响 (Taylor, 1984)。当 b 接近 1 时,种群为随机分布;当 $b > 1$ 时,种群为聚集分布 (Horne & Schneider, 1995)。

为利用 $\ln(V) = \ln(a) + b\ln(M)$ 线性方程对豚草

种群进行拟合,将 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ 的研究区域依次划分成 2^2 、 3^2 、 4^2 、 $\cdots$ 、 12^2 个相同面积的子区域,根据研究区的豚草分布点图分别计算每个子区域的豚草数量,如当整个研究区域被划分为 2^2 个相同面积的子区域时,可计算每个子区域的豚草数量,得到 1 个均值和方差,在均值和方差的平面坐标系上就形成 1 个数据点,以此类推,11 种研究区划分方法便可形成 11 个数据点,用这 11 个数据点估计泰勒幂指数 b 。

2 结果与分析

2.1 研究区内豚草的空间和强度分布

研究区域豚草的空间分布如图 1-A 所示。在样地横轴 0~300 cm 范围内,由于点的重叠,部分区域颜色较深,表明这些区域豚草密度较大,数量较多;在样地横轴 300~500 cm 范围内,豚草分布稀疏,数量较少 (图 1-A)。研究区域豚草强度分布图显示,大部分区域呈蓝色,强度小于 0.005 株/cm²,表明豚草强度较小;在横轴 100~300 cm 范围内出现 2 个聚集区域,该聚集区域呈现黄色,其强度超过 0.025 株/cm²;在横轴 0~300 cm 范围内出现了较明显的聚集区域,即红色至黄色 (图 1-B)。

2.2 基于 Ripley's K 函数的豚草种群分布结果

当距离尺度为 0~1.2 m 时, $\hat{K}(r)$ 均在上包迹线的上方,表明研究区域豚草呈聚集分布;从总体上看,随着距离尺度的增大,研究区域豚草的聚集分布程度增强 (图 2)。

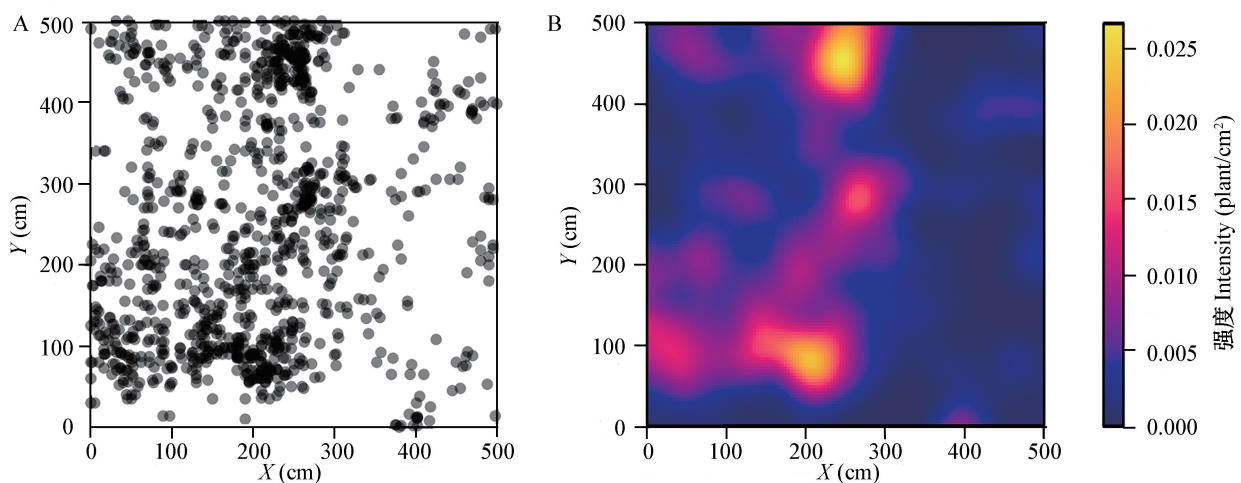


图 1 研究区域内豚草的空间分布(A)和强度分布(B)

Fig. 1 Spatial (A) and intensity (B) distribution of ragweeds in the study area

图 A 中每个点都代表 1 株豚草。Each point in (A) represents a ragweed.

2.3 基于 Taylor 幂法则的豚草种群分布结果

将研究区域划分为 5^2 个相同面积的子区域,计

算此子区域内豚草数量的均值和方差,构成 1 个数据点,则 11 种研究区不同划分方法在均值-方差的

坐标系统中形成 11 个数据点。对这 11 个数据点进行线性拟合, 则决定系数 R^2 为 0.9972, 说明泰勒幂法则成立, 则泰勒幂指数 b 的估计值为 1.5477, 大于 1.0000, 表明研究区域豚草呈明显的聚集分布(图3)。

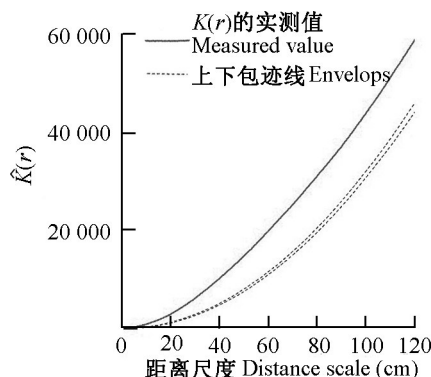


图2 基于Ripley's K 函数的研究区域豚草种群分布类型

Fig. 2 Distribution pattern of ragweeds in the study area based on Ripley's K function

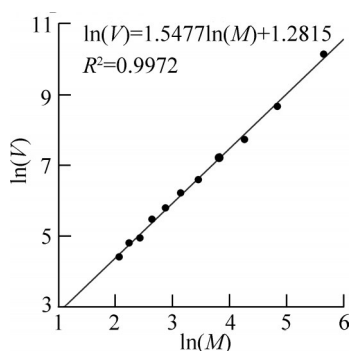


图3 研究区域豚草分布数量均值与方差对数的拟合

Fig. 3 Fitting between logarithm of the mean and variance of the distribution numbers of ragweeds in the study area
 V : 方差; M : 均值. V : Variance; M : mean.

3 讨论

外来植物的入侵是威胁全球环境的主要因素之一, 对全球的生物多样性造成了严重影响(孙娟等, 2009)。江西省的豚草自 20 世纪 40 年代中后期侵入, 80 年代迅猛发展(董闻达, 1989)。豚草的快速入侵一方面由于当地适宜的生态环境, 一方面依赖于强大的适应机制。豚草的入侵主要分为 3 个阶段: 第一是入侵阶段, 呈单株散生或小丛生; 第二是定居阶段, 呈小斑块或大斑块分布; 第三是稳定阶段, 通常呈大群分布(李建东等, 2009)。近年来, 很多学者对不同外来入侵种的传播规律和种群分布特点进行研究, 如徐燕云和郭水良(2011)以盖度为指标对加拿大一枝黄花 *Solidago canadensis* 种群分布格局进行了研究, 结果表明加拿大一枝黄花呈明显

的集群分布; 袁月(2014)对上海崇明岛的互花米草 *Spartina alterniflora* Loisel. 进行研究, 发现在 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 尺度下, 互花米草呈现聚集分布, 本研究结果表明豚草也呈现聚集分布, 且这些入侵种均来自于北美洲。

空间格局研究是种群生态研究的重要部分, 其内容主要包括判定植物种群的空间分布类型和空间关联性(张金屯, 2004)。尤海舟等(2009)对点格局分析和其它格局分析方法进行了比较, 指出只有点格局分析法能够分析各种尺度下的种群格局。种群的空间格局具有一定的尺度依赖性。Legendre et al. (2009)通过对浙江省古田山亚热带天然阔叶林树种分布的研究发现, 样地面积的大小决定了环境因素的相对重要性, 环境因素的相对重要性随着样地面积的缩小而变小, 而随机因素的相对重要性增大。Chase(2014)提出如果不考虑尺度效应去研究物种分布和群落多样性维持机制可能是无意义的。本研究考虑到尺度效应, 在很小的区域内豚草的数量就很大, 故所选择的 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ 样地对于研究豚草的空间分布已足够大。王国严等(2010)利用 Ripley's K 函数研究了雅鲁藏布江砂生槐树 *Sophora moorcroftiana* (Benth.) Baker 的种群空间分布类型。空间点格局使用范围广泛, 可以对生境异质性的物种进行空间分布类型的分析, 如时培建等(2010)利用空间点格局分析对空间异质性环境中的毛竹 *Phyllostachys edulis* (Carrière) J. Houz. 分布类型进行分析, 发现毛竹呈现随机分布。点格局分析方法还可用于调查珍稀濒危保护植物的空间格局和格局特征分析, 如李伟等(2014)运用点格局法分析南方红豆杉 *Taxus wallichiana* Zucc. var. *mairei* (Lemée et H. Lév.) L. K. Fu et Nan Li 迁地保护种群的空间分布格局, 结果显示, 从总体上看南方红豆杉迁地种群的分布格局呈现集群分布, 随着龄级的增加, 该种群有从集群分布向随机分布转换的趋势。本研究未在豚草样地中发现其它草本植物, 但临近区域有白茅 *Imperata cylindrica* (L.) Beauv. 优势种群存在, 交界区域二者很有可能存在竞争, 在今后的研究中可对 2 物种空间竞争、空间分离程度、空间相关性展开研究。

绝大多数已调查的植物的分布类型均为聚集分布, 只有少量植物在小尺度上呈现随机分布。本研究发现豚草的空间聚集性极强, 这就使其在对其它物种竞争时具有密度优势, 在豚草聚集的区域, 鲜见与其它优势草本植物的出现, 豚草通过似 Allee 效应分区占据优势(周淑荣和王刚, 2002; 周淑荣等,

2004),但少数根系较强的植物如白茅,有可能凭借更强的竞争力再占据豚草侵占的区域(Nee & May, 1992;时培建等,2011)。种群的空间格局并不是一成不变的,会随着时间发生植被演替,改变以往的格局。在下一步研究中可以尝试对豚草进行定点跟踪调查,探究豚草在不同时间尺度下的分布特征。

致谢:感谢江西农业大学林学院郭世权、李赞、杨青在数据调查中给予的帮助,感谢中国农业大学赵紫华副教授在稿件写作中给予的帮助,特此致谢!

参 考 文 献 (References)

- Baddeley A, Rubak E, Turner R. 2016. Spatial point patterns: methodology and applications with R. Boca Raton: CRC Press
- Chase JM. 2014. Spatial scale resolves the niche versus neutral theory debate. *Journal of Vegetation Science*, 25(2): 319–322
- Diggle PJ. 2014. Statistical analysis of spatial and spatio-temporal point patterns (3rd edition). Boca Raton, Florida: CRC Press
- Dong WD. 1989. Distribution and biology of common ragweed in Jiangxi Province. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 11(40): 49–56 (in Chinese) [董闻达. 1989. 江西豚草分布和生物学的研究. 江西农业大学学报, 11(40): 49–56]
- Fumanal B, Chauvel B, Sabatier A, Bretagnolle F. 2007. Variability and cryptic heteromorphism of *Ambrosia artemisiifolia* seeds: what consequences for its invasion in France? *Annals of Botany*, 100(2): 305–313
- Greig-Smith P. 1983. Quantitative plant ecology. New York: Academic Press
- Horne JK, Schneider DC. 1995. Spatial variance in ecology. *Oikos*, 74(1): 18–26
- Legendre P, Mi XC, Ren HB, Ma KP, Yu MJ, Sun IF, He FL. 2009. Partitioning beta diversity in a subtropical broad-leaved forest of China. *Ecology*, 90(3): 663–674
- Li JD, Yin PP, Sun B, Sun JN, Wang GJ, Yan XF. 2009. The process and mechanism of ambrosia invasion. *Ecology and Environmental Sciences*, 18(4): 1560–1564 (in Chinese) [李建东, 殷萍萍, 孙备, 孙佳楠, 王国骄, 燕雪飞. 2009. 外来种豚草入侵的过程与机制. 生态环境学报, 18(4): 1560–1564]
- Li W, Wang RX, Zhang GF, Pan C. 2014. Point pattern analysis of *ex-situ* population of *Taxus wallichiana* var. *mairei*. *Chinese Journal of Ecology*, 33(1): 16–22 (in Chinese) [李伟, 王瑞雪, 张光富, 潘辰. 2014. 南方红豆杉迁地保护种群的点格局分析. 生态学杂志, 33(1): 16–22]
- Liu JL, Feng SD, Mu Y. 1997. Ecological characteristics of the ragweeds and countermeasure of the biological weed control. *Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition)*, 15(3): 61–67 (in Chinese) [刘静玲, 冯树丹, 慕颖. 1997. 豚草生态学特性及生防对策. 东北师大学报(自然科学版), 15(3): 61–67]
- Liu SQ, Lü GZ. 2005. *Ambrosia* and its comprehensive administration. *Journal of A&F University (Natural Science Edition)*, 33(S): 237–241 (in Chinese) [刘绍芹, 吕国忠. 2005. 豚草及豚草的综合治理. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 33(S): 237–241]
- Long LD, Miu SY, Tao WQ. 2015. Analysis on the characteristics and the present status of three lists of alien invasive plant species published in China. *Ecological Science*, 34(3): 31–36 (in Chinese) [龙连娣, 缪绅裕, 陶文琴. 2015. 中国公布的3批外来入侵植物种类特征与入侵现状分析. 生态科学, 34(3): 31–36]
- Ma JS. 2014. The survey reports on Chinese alien invasive plants. Beijing: Higher Education Press (in Chinese) [马金双. 2014. 中国外来入侵植物调研报告. 北京: 高等教育出版社]
- Miyadokoro T, Nishimura N, Yamamoto S. 2003. Population structure and spatial patterns of major trees in a subalpine old-growth coniferous forest, central Japan. *Forest Ecology and Management*, 182(1/2/3): 259–272
- Nee S, May RM. 1992. Dynamics of metapopulations: habitat destruction and competitive coexistence. *Journal of Animal Ecology*, 61(1): 37–40
- Ripley BD. 1977. Modelling spatial pattern. *Journal of the Royal Statistical Society (Series B)*, 39: 17–212
- Ripley BD. 1981. Spatial statistics. New York: John Wiley & Sons
- Sewart GH, Rose AB. 1990. The significance of life history strategies in the developmental history of mixed beech (*Nothofagus*) forests, New Zealand. *Vegetatio*, 87(2): 101–114
- Shi PJ, Ge F, Yang QP. 2011. Iterative algorithm for analyzing the influence of the proportion of permanently destroyed sites on the equilibrium abundances of species. *Acta Ecologica Sinica*, 31(15): 4327–4333 (in Chinese) [时培建, 戈峰, 杨清培. 2011. 栖息地永久性破坏的比例对物种多度稳定值影响的迭代算法. 生态学报, 31(15): 4327–4333]
- Shi PJ, Guo SQ, Yang QP, Wang B, Yang GY, Fang K. 2010. Inhomogeneous spatial point pattern analysis of moso bamboo (*Phyllostachys edulis*). *Acta Ecologica Sinica*, 30(16): 4401–4407 (in Chinese) [时培建, 郭世权, 杨清培, 王兵, 杨光耀, 方楷. 2010. 毛竹的异质性空间点格局分析. 生态学报, 30(16): 4401–4407]
- Shi PJ, Sandhu HS, Reddy GVP. 2016. Dispersal distance determines the exponent of the spatial Taylor's power law. *Ecological Modelling*, 335: 48–53
- Smith M, Cecchi L, Skj  th CA, Karrer G, Šikoparija B. 2013. Common ragweed: a threat to environmental health in Europe. *Environment International*, 61: 115–126
- Sun J, Yang GF, Chen YC, Teng YQ, Yan D, Yi SR. 2009. Exotic plants in the Jinfo Mountain Nature Reserve: species ascertain and their distribution. *Acta Prataculturae Sinica*, 18(3): 34–42 (in Chinese) [孙娟, 杨国锋, 陈玉成, 滕永青, 颜伟, 易思荣. 2009. 金佛山自然保护区外来入侵植物种及其分布情况. 草业学报, 18(3): 34–42]
- Taylor LR. 1961. Aggregation, variance and the mean. *Nature*, 189(4766): 732–735

- Taylor LR. 1984. Assessing and interpreting the spatial distribution of insect populations. *Annual Review of Entomology*, 29: 321–357
- Wang GY, Fang JP, Xu XY, Nima QZ, Zhong X, Zhao K. 2010. Population structure and spatial point pattern of *Sophora moorcroftiana* in arid sandy land in the middle reaches of Yarlung Zangbo River, Tibet. *Journal of Desert Research*, 30(5): 1092–1098 (in Chinese) [王国严, 方江平, 许新勇, 尼玛曲珍, 钟蕊, 赵旷. 2010. 雅鲁藏布江中游干旱沙地砂生槐种群结构与点格局分析. *中国沙漠*, 30(5): 1092–1098]
- Xu YY, Guo SL. 2011. Study on population distribution pattern of the invasive plant *Solidago canadensis*. *Hubei Agricultural Sciences*, 50(18): 3732–3734 (in Chinese) [徐燕云, 郭水良. 2011. 外来入侵植物加拿大一枝黄花种群分布格局研究. *湖北农业科学*, 50(18): 3732–3734]
- You HZ, Jia C, Fan H, He F, Ma QY, Liu XL. 2009. The latest method of pattern analysis: spatial point pattern analysis. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 30(6): 198–235 (in Chinese) [尤海舟, 贾成, 樊华, 何飞, 马钦彦, 刘兴良. 2009. 格局分析的最新方法——点格局分析. *四川林业科技*, 30(6): 198–235]
- Yuan Y. 2014. Interspecific interactions of *Spartina alterniflora* and *Phragmites australis* and related factors in Chongming Dongtan Wetland. Ph. D Thesis. Shanghai: East China Normal University, pp. 119–129 (in Chinese) [袁月. 2014. 崇明东滩湿地芦苇与互花米草种群间关系格局与影响因素研究. 博士学位论文. 上海: 华东师范大学, pp. 119–129]
- Zeng K, Zhu YQ, Liu JX. 2010. Research progress on ragweed (*Ambrosia*). *Acta Prataculturae Sinica*, 19(4): 212–219 (in Chinese) [曾珂, 朱玉琼, 刘家熙. 2010. 豚草属植物研究进展. *草业学报*, 19(4): 212–219]
- Zhang JT. 1998. Analysis of spatial point pattern for plant species. *Acta Phytocologica Sinica*, 22(4): 344–349 (in Chinese) [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(4): 344–349]
- Zhang JT. 2004. *Quantitative ecology*. Beijing: Science Press, pp. 289–302 (in Chinese) [张金屯. 2004. *数量生态学*. 北京: 科学出版社, pp. 289–302]
- Zhang SH, Zhang ZH, Chen DD. 2015. The impact of alien invasive plants on the national ecological safety. *Plant Quarantine*, 29(4): 4–7 (in Chinese) [张顺合, 张志华, 陈冬东. 2015. 外来有害植物入侵对我国生态安全的影响. *植物检疫*, 29(4): 4–7]
- Zheng JM, Ma KP. 2010. *Invasive ecology*. Beijing: Higher Education Press (in Chinese) [郑景明, 马克平. 2010. *入侵生态学*. 北京: 高等教育出版社]
- Zhou SR, Liu YF, Wang G. 2004. The symmetric competitive dynamics of metapopulations subject to an Allee-like effect. *Acta Prataculturae Sinica*, 13(3): 40–46 (in Chinese) [周淑荣, 刘亚峰, 王刚. 2004. 集合种群水平上的抽彩式竞争. *草业学报*, 13(3): 40–46]
- Zhou SR, Wang G. 2002. Allee-like effects in metapopulation. *Journal of Biomathematics*, 17(3): 324–328 (in Chinese) [周淑荣, 王刚. 2002. 集合种群的似 Allee 效应. *生物数学学报*, 17(3): 324–328]

(责任编辑: 张俊芳)