



基于距离指数的空间分析 ——SADIE 的原理和应用进展*

景天忠**

(东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040)

摘要 SADIE (Spatial analysis by distance indices) 是一种探索性分析空间模式的方法和软件。自 1995 年提出后, SADIE 在昆虫学研究上得到了广泛的应用, 然而在中文文献中鲜有提及。SADIE 的理论基石是离匀距离, 该算法基于离匀距离检验空间随机性和度量空间关联性。本文详细介绍了离匀距离的算法以及空间随机性检验和空间关联性度量的基本原理, 并介绍了对空间斑块进行可视化的方法——红蓝图的绘制原理, 以及对空间点模式进行诊断分析的方法——始终图和经验分布函数图的绘制原理, 比较了 SADIE 与其他常用方法的区别, 最后对 SADIE 的应用场景进行了回顾。

关键词 空间模式; 离匀距离; 离挤距离; 集聚指数; 类聚指数; 红蓝图

A review of the principles and application of spatial analysis by distance indices (SADIE)

JING Tian-Zhong**

(School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract SADIE (Spatial analysis by distance indices) is a methodology and software for the exploratory analysis of spatial patterns. SADIE has been applied extensively since it was invented in 1995, especially in entomology. However, it has almost never been presented in the Chinese literature. The cornerstone of SADIE is distance to regularity, which is the basis for spatial randomness testing and association measurement. This article presents the algorithm for calculation of distance to regularity and the principles of spatial randomness testing, association measurement, and the red-blue plot for visualization of patchiness in detail. Methodologies for the diagnostics of aggregation, including IAF (initial and final) plot and EDF (empirical distribution function) plot are also included. Comparisons between SADIE and other traditional methods, and a review of the application of SADIE, are also provided.

Key words spatial pattern; distance to regularity; distance to crowding; aggregation index; cluster index; red-blue plot

传统上, 基于小样方 (Quadrat) 计数数据的空间模式分析采用对概率分布的假设检验或使用对均数-方差之间关系探索的方法。前者假设检验数据服从泊松分布、负二项分布、奈曼分布; 后者常采用一些数值指标, 如聚集度指标、Iwao 的 M^*-m 回归法、Taylor 幂法则、 $L\alpha-m$ 回归模型和 Z-V 模型等 (景天忠和齐凤慧, 2020)。

这些方法在昆虫生态学研究得到了广泛应用。例如, 近年来这些方法用于研究枣瘿蚊 *Dasineura jujubifolia* (曹东平等, 2025)、松果梢斑螟 *Dioryctria pryeri* (张立蓉等, 2025)、灰茶尺蠖 *Ectropis grisescens* (耿书宝等, 2025)、番茄潜叶蛾 *Tuta absoluta* (王海旭等, 2024)、马铃薯鳃金龟 *Amphimallon solstitiale* (陈毅君等,

*资助项目 Supported projects: 黑龙江省自然科学基金项目 (LH2022C014); 黑龙江省博士后科研启动金项目 (LBH-Q14012)

**第一作者和通讯作者 First author and corresponding author, E-mail: jingtianzhong@163.com

收稿日期 Received: 2025-01-17; 接受日期 Accepted: 2026-03-23

2024)、稻象甲 *Echinocnemus squameus* (李正飞等, 2024) 等昆虫的空间格局。然而这些方法基于样本均数与方差的比较(如扩散系数 $C=S^2/m$, 其中 S^2 为方差, m 为均值), 并未使用小样方的坐标信息, 因而其结果只能是对样本数据离散程度的度量, 而非对空间模式的度量, 尽管在有些情况下二者的结果相一致。Perry 等(1996)举过两个简单的例子很能说明问题。线截法取样的某种步甲陷阱中昆虫的个数为 {0, 0, 1, 1, 2, 2, 2, 2, 3, 3, 5}, 如果用概率分布假设检验, 可得到服从泊松分布(随机分布)的结论, 但从直观上就可以看出其线性趋势。而对明显不服从泊松分布的 6 个小样方计数数据 {0, 1, 4, 56, 484, 4095}, 其空间的排列可能是完全随机的。

SADIE (Spatial analysis by distance indices) 是专门针对小样方计数数据开发的空間格局度量方法, 它克服了上述传统方法的缺点。SADIE 算法于 1995 年提出 (Perry, 1995), 后来又开发了一款同名的软件 SADIE[®] (Perry *et al.*, 1996)。Winder 等 (2019) 对 SADIE 的使用情况进行了统计, 结果表明 1995-2017 年, 使用 SADIE 的论文数呈指数增长。尽管有国内研究者在使

用 SADIE (Dong *et al.*, 2020; Jing *et al.*, 2022), 但在中文文献中很少见, 相关教科书中也无提及。因而很有必要对 SADIE 算法作一介绍, 以备国内研究者借鉴。SADIE 使用集聚指数 (Index of aggregation) 来度量空间聚集性, 使用空间关联指数 (Spatial association index) 来度量空间关联性。本文先介绍这两个指数的算法, 然后介绍 SADIE 的不足之处以及 SADIE 与其他方法的比较。在计算空间集聚指数时, SADIE 引入了离匀距离 (Distance to regularity) 的概念。离匀距离是 SADIE 的基石, 因而本文从离匀距离的计算方法入手, 然后介绍 SADIE 如何利用离匀距离来计算空间集聚指数, 以及如何将结果进行可视化和如何对空间模式进行辅助诊断, 最后介绍了 SADIE 的应用场景和软件的获取途径。

1 SADIE 集聚指数及其算法

1.1 离匀距离的概念

SADIE 比较观测到的样本空间排列和从其衍生的其他空间排列, 即通过对观测到的样本进

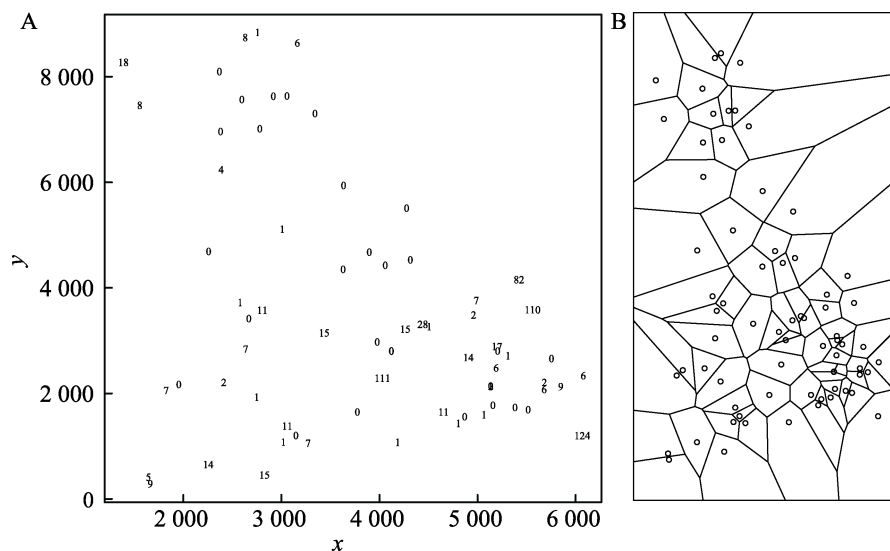


图 1 研究区域图及其沃罗诺伊镶嵌图

Fig. 1 Study area and its Voronoi diagram

A. 研究区域取样单元, 图中数字表示该样点上的个数, 使用 SADIEShell V2.0 自带的数据库绘制;

B. 对图 A 的数据使用 R 包 deldir 绘制的沃罗诺伊镶嵌图。

A. Sampling unit, digits represent counts built-in data in SADIEShell V2.0;

B. A voronoi diagram of the data in Fig. 1A, plotting with R package deldir.

行重排,使个体变得尽可能的拥挤、随机或均匀。SADIE 使用网格形式的计数数据,即观测小样方中昆虫的个数。在病害流行病学中,也可使用新发病数 (Incidence) 或发病程度 (Severity)。最大程度的均匀,是各小样方中昆虫个数相等。因此,为了将观测到的空间格局转变为完全规则 (均匀),昆虫个数 (c) 大于所有小样方昆虫均数 (\bar{c}) 的小样方[供体单元 (Donor unit)] 中的昆虫要移动到昆虫数小于均数的小样方[受体单元 (Receiver unit)]。那么应将一个供体单元中的昆虫数移到哪些受体单元呢? SADIE 采取的策略是移动的总距离要最小,这个最小的移动距离就是离匀距离。可以将离匀距离理解为最小的“运输成本”。研究区域中的昆虫越聚集,离匀距离相对越大。

1.2 离匀距离的计算

Perry (1995) 以线截法取 6 个等距 (2 ft) 相隔的 6 个小样方为例来说明离匀距离的计算原理。假设每个小样方中的观测个数分别为 2, 1, 2, 4, 5, 10, 则要达到均匀的话,每个小样方中的个数应均为 4,这样就很容易算出离匀距离,即 $D = \{(1 \times 4) + [(1 \times 5) + (3 \times 4) + (2 \times 3)]\} \times 2 = 54$ 。将观测的小样方中的个数随机重排,每重排一次,计算一次 D 值,最后求得 D 的平均值即为整个数据集的离匀距离。在本例中只有 6 个样方的情况下,就有 719 种重排方案,不可能全排列来计算。在实际应用中,样方数更多,通常将重排次数作为一个参数来设置。如在 epiphy 包中,默认重排次数为 100 次。

在研究工作中很少使用线截法等距取样,因而实际的计算方法要复杂一些。SADIE 软件使用转移算法 (Transportation algorithm) 来计算离匀距离 (Kennington and Helgason, 1980)。将处于初始位置 $(x_i, y_i), i=1, \dots, n$ 的个体同时、先后移动到矩形研究区域内的其他位置,使整个区域的均匀性增加。首先将每张图上的边界和点各向同性地缩放,如有必要还可进行旋转,使得工作矩形的 4 个顶点坐标分别为 $(0,0), (0,A), (1,A), (1,0)$, 其中 $0 < A < 1$ 。当算法运行到收敛后,再

进行逆运算,以便最后输出的结果适合于初始坐标。

转移算法的第一步是在工作矩形上为每个点画沃罗诺伊镶嵌 (Voronoi tessellation, 也称作沃罗诺伊图 Voronoi diagram, 狄利克雷镶嵌 Dirichlet tessellation)。本文中以 SADIEShell V2.0 中自带的数据为例 (图 1: A), 使用 R 包 deldir 绘制沃罗诺伊镶嵌图 (图 1: B)。许多已知的方法可实现此功能, SADIE 软件中采用的是 Sugihara & Iri 的算法 (Sugihara and Iri, 1994), 将每个单元的位置称为一个“生成器 (Generator)”。沃罗诺伊镶嵌将整个研究区域分成 n 个多边形, 每个生成器对应一个多边形。这样一来, 一个生成器的多边形中的任意点离该生成器的距离较离其他生成器的距离为近。

第二步是将生成器移动到新的位置。一个生成器的新位置位于其邻居位置的质心上, 并通过在每个邻居贡献进行加权将互作大小之间的差别考虑在内, 每个邻居的贡献由其与那个生成器之间共同的边长来体现。例如, 当前生成器的 q 个邻居的初始坐标为 $(x_j, y_j), j=1, \dots, q$, 该生成器与其邻居共同的边长分别为 $l_j, j=1, \dots, q$, 那么该生成器移动后的新坐标为 (x_k, y_k) , 其中

$$x_k = \frac{\sum_{j=1}^q l_j x_j}{\sum_{j=1}^q l_j}, \quad y_k = \frac{\sum_{j=1}^q l_j y_j}{\sum_{j=1}^q l_j},$$

这就保证了生成器被距其较远的邻居吸引, 远离那些离其最近的邻居, 整个过程以每个邻居的“影响力”作为权重进行加权运算。这里所有生成器的移动是同时进行的, 这样一来, 只有生成器的旧位置影响其邻居的新位置。移动后, 回到第一步, 重复沃罗诺伊多边形的建立。

第三步是评价生成器的当前排列是否达到了充分的均匀度 (Degree of regularity)。标准是 n 个多边形的面积之间的当前变异要小于事前给定的一个常数。在达到此标准前, 迭代在前三步间继续进行。一旦达到此标准, 认为迭代过程收敛, 结果被逆转到初始尺度和旋转前, 生成器的当前位置就是最终位置 $(x_f, y_f), f=1, \dots, n$ 。

设第 i 个供体单元的位置为 (x_i, y_i) , 它有 n_i 个

受体, 其中第 j 个受体单元的位置为 (x_j, y_j) , $j = 1, \dots, n_j$, 则该移动的距离为 $d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$ 。若移动的个体数量为 C_{ij} , 则供体单元 i 到所有受体单元的平均输出距离 (Average distance of outflow) 为 $\bar{d}_i = \frac{\sum_j d_{ij} C_{ij}}{\sum_j C_{ij}} = \frac{D_i}{c_i - \bar{c}}$, 而 $D = \sum_i D_i$

就是整个数据集的离匀距离。

而对受体单元 j , 到所有供体的平均距离 \bar{d}_j 与 \bar{d}_i 相似, 只是符号不同。

1.3 空间集聚指数及其显著性

在研究区域随机抽取 n 个相互独立的点, 基于这些点计算离匀距离 D_{rand} 。将此过程重复 S 次, 得到 S 个 D_{rand} , 其中 R 个小于由真实观测值计算得到的 D , 则在完全随机的 H_0 成立的情况下, 一个结果为集聚的概率为 $P_a = R/S$ 。如果概率值 $P_a < 0.025$, 则可以拒绝零假设 (随机分布), 并接受备择假设 (显著集聚)。如果概率值 $P_a > 0.975$, 则可以拒绝零假设, 并接受表征为显著均匀分布的备择假设。这种双尾检验用于判定事件发生偏离随机性的显著程度 (Perry, 1998; Huling and McGraw, 2025)。当 $R = 79, S = 80$ 时, $P_a = 0.988$, 则得出在 5% 水平上存在显著的均匀分布。

设 S 个 D_{rand} 的均值为 E_a , 则可定义一个集聚指数 $I_a = D / E_a$ 。然后根据 I_a 值的大小来判定集聚程度。 $I_a = 1$, 随机分布; $I_a < 1$, 均匀分布; $I_a > 1$, 集聚分布。基于同样的原理, SADIE 还计算一个离挤距离 (Distance to crowding) 指数, 称为 J_a 。

1.4 空间斑块可视化的方法

对供体单元, SADIE 计算一个标准化的无量纲的类聚指数 (Clustering index) $v_i = \frac{\bar{d}_i Y_o}{Y_i Y_c}$, 其

中, $Y_c = \frac{\sum_{k=1}^m \bar{d}_{ik}}{m}$, 代表在 m 次随机重排后观测计

数值 (c_i) 的平均输出距离; $Y_i = \frac{\sum_{k=1}^m |\bar{d}_{ik}|}{m}$, 代表 m 次随机重排后取样单元 (x_i, y_i) 的平均移动距离, Y_o 代表所有观测计数值的平均输出距离, 即 Y_c 绝对值的平均值, 也等于所有取样单元的 Y_i 的平均值。与对供体单元 v_i 的定义相似, SADIE 对受体单元定义 v_j 。 v_i 的符号为正, 而 v_j 的符号为负。类聚指数 v_i 大于 1.5, 可判定单元 i 位于斑块 (Patch); v_i 小于 -1.5, 意味着单元 i 位于斑块之间的缝隙 (Gap); $|v_i|$ 接近于 1 则代表着随机模式。需要注意的是, 这个阈值 1.5 不可用于对集聚程度的正式检验 (Perry *et al.*, 1999)。原因有两方面, 其一, 所有的 v_i 和 v_j 值都是彼此相关的, 检验不应聚焦于一个单一的值上; 其二, v_i 和 v_j 的极端值的期望大小依赖于数据集中抽样单元的数目。

基于相同的算法对受体单元算出 v_j 。然后, 可用二种颜色的轮廓图进行可视化 (图 2: A), 这种图一直用红蓝两种颜色绘制, 称为红蓝图 (Red-blue plot) (Perry *et al.*, 1999), 红色代表斑块, 蓝色代表缝隙。借助其他的软件, 红蓝图的数据可绘成等值线图 (图 2: B)。等值线的原理与地形图上的等高线一样, 线密的地方为斑块, 线疏的地方为间隙。

1.5 空间模式的辅助诊断分析

可绘制两类诊断图 (Diagnostic plots) 来辅助判断空间模式。第一类图称为“始终” (Initial and final, IAF) 图, 即用线段或箭头将发生移动了的每个个体的初始位置与最终位置连接起来 (图 3: A)。图 3 (A) 中的连接线长度较长, 变化大, 且呈明显方向性, 说明空间模式为集聚, 这与 $I_a = 1.122, P_a = 0.2616$ 相一致。如果连接线较短, 没有方向性, 且没有交叉, 则说明为均匀模式。

第二类图为经验分布函数 (Empirical distribution function, EDF) 图。EDF 对每个 Y_i 的观测值排序, 然后对其随机化后的期望值以相同的秩作图, 同时还可以在图上以相同的秩加上

随机化后 Y_i 值的 95%分位数 (也有加 2.5%和 97.5%分位数的)(图 3: B)。EDF 通过比较观测值线与期望值线来对斑块程度做出总体评价。如果观测线超过来自随机变异的期望值,并在任何值上超过 95%包络线,则可初步判定为存在斑块

分布。对所有单元进行绘图就避免了过度关注具有最高秩的值。跟包络线相比,这些具有最高秩的值更接近于具有中等秩的值 (Perry *et al.*, 1999)。而对于 Y_j 而言,观测线在负值方向上大于 5%的包络线则是存在间隙的强烈信号。

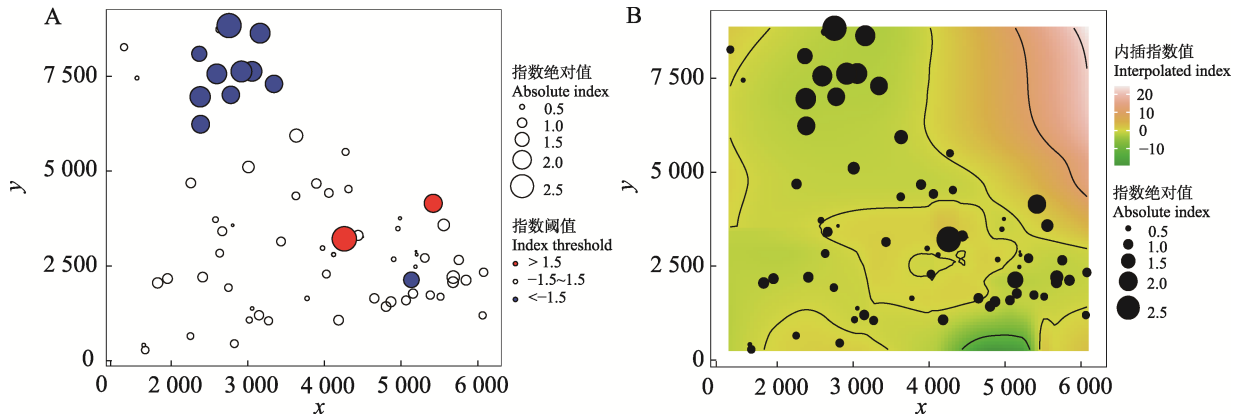


图 2 红蓝图 (A) 和等值线图 (B), 使用 SADIEShell V2.0 自带的数据库, 由 R 包 epiphy 绘制
Fig. 2 Red-blue plot (A) and isocline plot (B), using the data built-in SADIEShell V2.0

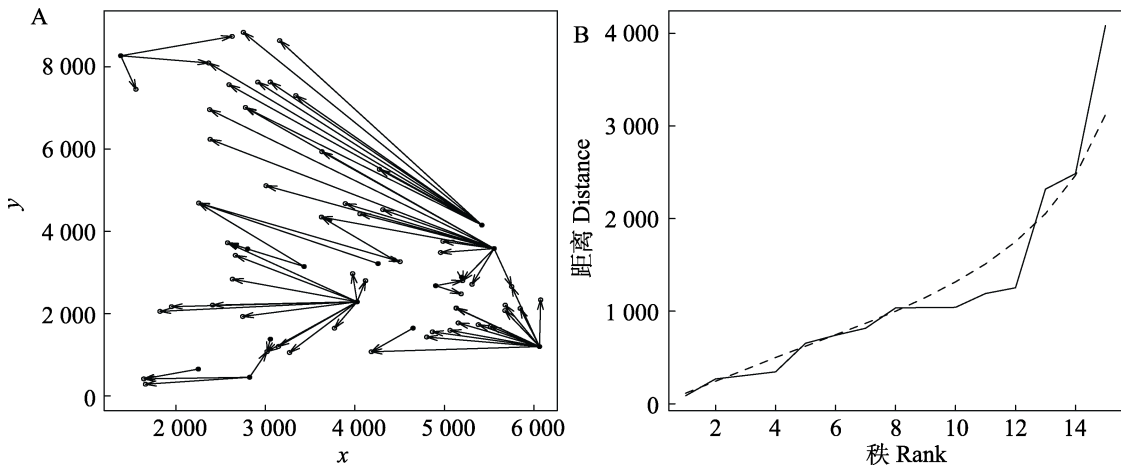


图 3 IAF 图 (A) 和 EDF 图 (B)
Fig. 3 IAF plot (A) and EDF plot (B)

图 A 中实心圆点表示供体单元, 空心圆点表示受体单元;
图 B 中实线为 Y_i 的观测值, 虚线为随机后的期望值 (平均值)。

In Fig. A, solid circles represent donor units while empty circles for receptor units; In Fig. B, solid lines represent the observed Y_i while dotted lines for expected values (means) after randomization.

遗憾的是, SADIEShell V2.0 并不提供随机化后 5%和 95%的分位数。因此本例中只绘出了观测值及随机化后的均值 (图 3: B)。图中有近 1/2 单元的观测值与期望值相接近 (秩 ≤ 8), 近 1/4 单元的观测值小于期望值, 近 1/4 单元的观

测值大于期望值。这与 I_a 接近 1 ($=1.122$), P_a 接近 0.25 ($=0.2616$) 相一致。尽管 SADIE 的作者反复强调 IAF 图和 EDF 图的重要意义 (Perry, 1995; Perry *et al.*, 1999), 但在实际应用中, 很少有研究者绘制这两个图。

2 SADIE 空间关联性度量

SADIE 还提供了一个度量局部空间关联性的工具。该关联性测度最早是 Perry 于 1996 年在第 20 届国际昆虫学大会上提出的 (Perry, 1996), 但 SADIE 最初采用的这个方法有很大的局限性。2002 年 Perry 又提出了一个新方法, 得到了广泛应用。SADIE 基于两个种群类聚指数来计算二者在每个位置上的相似性, 还以各局部值的均数作为一个全局空间关联指数 (Overall index of spatial association) (Perry and Dixon, 2002)。

SADIE 的空间关联性度量需要 2 个数据集, 对应的类聚指数 (不区分斑块和间隙) 分别为 v_{k1} 和 v_{k2} , 二者的均值分别为 q_1 和 q_2 , 则单元 k 的局部空间关联性为

$$\chi_k = n(v_{k1} - q_1)(v_{k2} - q_2) / \sqrt{\sum_k (v_{k1} - q_1)^2 \sum_k (v_{k2} - q_2)^2},$$

$$\text{全局空间关联性为 } X = \sum_i \chi_i / n。$$

可通过随机置换检验对 X 的显著性进行评估, 即将各组类聚指数随机重新分配给各空间单元, 得到随机化值 X_{rand} 并与观测值比较。检验统计量的临界值可由在没有关联的零假设成立的条件下随机化分布的 X_{rand} 的分位数来估计。该临界值乘以 \sqrt{n} 就可得到原假设下局部关联度测度 χ_k 的估计临界值。考虑到空间自相关性, 必要时应对每一数据集进行去趋势, 然后使用校正的自由度—— $M-2$ 来进行校正, 其中 M 为有效样本的大小。每个临界值通过乘以一个尺度因子 $1/\sqrt{(M-3)/(n-3)}$ 来膨胀, 随机化检验的显著性也随之进行调整。

3 SADIE 集聚指数的不足与完善

SADIE 假定研究区域为矩形, 因而对非规则形状的研究区域, 聚集性可能会被高估。在这种情况下, 可通过减小显著性水平的值来补偿, 如从 0.050 减小为 0.025 (Corley *et al.*, 2007)。

正如地统计学中的自相关, 根据 SADIE 方

法计算得到的 I_a 和 \bar{v}_i 不只受到抽样单元间相对位置的影响, 还受到计数的绝对抽样位置的影响 (Xu and Madden, 2003, 2004)。且计算 v_i 的方法并未针对计数值的效应及其抽样位置的效应做出调整 (Xu and Madden, 2005)。因此, 一个 v_i 可能不能正确地量化一个特定位置上的计数对整个空间模式的贡献。此外, SADIE 也未对 v_i 的显著性提出一个正式的统计量来检验。针对这些不足之处, Li 等 (2012) 提出了一个新的集聚指数。

对每一个取样点, 无论是供体单元还是受体单元, 进行 m 次重排, 或称为随机化 (Randomization)。在每次随机化中, 个数保持于其初始 (观测) 位置, 所有的 $n-1$ 个计数随机地指派于其它 $n-1$ 个取样点。然后计算 m 次随机化后的离匀距离的平均值, 定义 $\bar{D} = \left(D_i + \sum_{k=1}^m D_{i,k} \right) / (m+1)$, 其中 $D_{i,k}$ 为第 k 次随机化后点 i 的离匀距离。那么对于观测数据, 点 i 上计数值的新类聚指数为 $u_i = D_i / \bar{D}_i$ 。 u_j 的定义与 u_i 相似。同理, 可以计算第 k 次随机化后点 i 的新类聚指数 (计数值来自于其初始位置): $u_{i,k} = D_{i,k} / \bar{D}_i$ 。 u_i (u_j) 与 v_i (v_j) 一样的地方在于对应供体单元时为正, 对应受体单元时为负。不同之处在于对于一个给定的取样点上所有随机化 (包括观测数据) 的平均值被定义为 1.0,

$$\text{即 } \bar{u}_i = \frac{u_i + \sum_{k=1}^m u_{i,k}}{m+1} = \frac{D_i + \sum_{k=1}^m D_{i,k}}{(m+1)D_i} = 1。 \text{ 这是为检验}$$

统计显著性而制定的随机化原则。这样, 这个新的指数就描述了相对于在计数值之间空间独立性的假设成立时的期望模式, 一个给定的观测模式上一个特定点上的计数值对局部的间隙或斑块的贡献。

对每一个取样点, 我们可以计算得到 $m+1$ 个类聚指数: 1 个通过观测值 (u_i), m 个通过随机化重排 ($u_{i,k}$)。对 $m+1$ 个新类聚指数从大到小排序, 等价于对这个点的 $m+1$ 个离匀距离排序。对供体单元, 如果其观测的 D_i 排在第 k

位, 那么以 $1 - k / (m + 1)$ 为显著性水平, u_i 显著大于在 H_0 成立条件下的期望值。这里的 H_0 为不存在局部的集聚。这样, 就可以对 u_i 的显著性进行检验。对 u_j 的检验与此同理。

4 SADIE 与其他方法的比较

研究空间模式的方法可分为两大类, 探索性分析和统计推断。探索性的方法, 或称为汇总统计法, 描述空间点之间正(负)的、“吸引”(“排斥”)的联系。可按不同标准进行分类, 如数值法和函数法。数值型的汇总统计是用一个单一的数值来描述空间模式, 这些值称为指数(Index)。函数法是用点之间距离的函数来表示空间点模式。统计推断是用空间过程来描述空间模式。SADIE 属于探索性分析方法中的数值性汇总统计方法。

汇总分析方法又可根据其数据类型和算法分为三类: 基于距离、基于小样方和基于角度方法。基于角度的方法应用非常罕见(Szmyt, 2014), 常见的是前两类方法。在昆虫学研究中, 基于小样方的方法得到了更为广泛的应用, 而基于距离的方法应用较少, 这与昆虫学研究中的空间数据类型密切相关。对森林中的树木、地上的蚁穴, 可以给研究区域中的每个个体赋一个坐标 (x_i, y_i) , 这是典型的一类二维空间数据。但对树、草地(或麦田)上的昆虫, 无法给每个个体赋一个坐标, 只能使用小样方来统计其中昆虫的个数(Count), 采用适合小样方计数值分析方法来描述空间点模式, SADIE 属于该类方法。

基于距离的方法使用具有坐标 (x, y) 的空间数据, 常见的方法有 Clark-Evan 指数(Clark and Evans, 1954)、Hopkins-Skellam 指数(Hopkins and Skellam, 1954)、最近邻居距离的分布函数(G 函数)(Diggle, 1979)、空隙函数(F 函数)(Hansen *et al.*, 1999)和 J 函数(van Lieshout and Baddeley, 1996)等。这些方法计算最近邻居距离, 反映了空间点之间的间隔模式(Spacing pattern)(Baddeley *et al.*, 2016)。另一类基于距离的方法计算所有成对目标之间的距离, 并用这些距离的累积分布函数来描述点模

式, 常见的有 K 函数(Ripley's K-function (Ripley, 1976))和配对相关函数(O-ring 统计量), 它们可以发现诸如在近距离上离散远距离上聚集的混合模式(Wiegand and Moloney, 2004)。小样方计数数据不能用于基于距离的分析方法。

地统计学的方法也常应于生态学的研究(Liebhold *et al.*, 1993)。但变异函数使用连续性变量, 且要满足在一个较宽区域内平稳、方差结构稳定的条件。对于小样方计数数据, 特别是那些常常包含计数为 0 的数据, 地统计学方法的效果并不好。空间统计学中的 Moran's I (Moran, 1950)、Geary's c (Geary, 1954) 也是使用连续性数据。变异函数和 Moran's I 分析的是面数据, 均是对趋势的度量。这种趋势表现为空间距离相近样本之间的属性比相远样本之间更相近。地统计学方法的另一个重要用途是空间插值。当小样方中的计数不为 0, 且数值较大时, 也可用于变异函数和空间自相关的研究。但效果似乎不如 SADIE。例如, Sciarretta 等(2010)研究埃塞俄比亚两种舌蝇的空间模式时认为, 在发现和界定地图热点、测定斑块的形状和大小、排除低密度区域方面, SADIE 的效率要优于地统计学的方法。相反, 有研究者将连续性数据转换成整数, 然后使用 SADIE 来分析(Winder *et al.*, 2019)。如 Reay-Jones 等(2019)研究棉花地上蓟马的空间模式时, 用传感器测量棉花的反射谱, 计算植被指数 NDVI, 然后将其乘以 100, 取整数, 将 NDVI 转换成计数资料, 进行空间模式分析。Jing 等(2022)将寄主树木的胸径取整, 研究树木大小的空间格局以及树木大小与受害程度之间的空间关联性。

当然, 对空间模式研究来说, 每一种方法都有其优势和局限性, 因此结合多种方法进行研究是一个不错的选择(Perry *et al.*, 2006)。如 Ghahramani 等(2019)研究苜蓿地中蚜虫、蜻及天敌的时空分布及关联性时, 使用变异函数来研究空间自相关性, 然后对地统计学的结果使用 SADIE 验证。le Roux 和 McGeoch (2008) 用小样方中维管植物的盖度数据进行 SADIE 分析, 然后以 SADIE 指数为响应变量, 环境因子

为解释变量,建立广义线性模型来验证胁迫梯度假说(Stress-gradient hypothesis, SGH)。SADIE 还可以与空间点格局分析(Spatial point pattern analysis, SPPA)结合使用。SADIE 提供全局尺度上的空间格局,而 SPPA 提供不同距离尺度上的空间格局,二者的结合会有相得益彰的效果(Jing *et al.*, 2022; 景天忠等, 2023)。尽管 SADIE 提供全局尺度上的空间格局,但这种全局性完全依赖于研究区域的选择,即也是尺度依赖的。如在景观尺度上的结果与在林分尺度上的结果是不同的(Jing *et al.*, 2022)。

由于 SADIE 实际上也是尺度依赖的, Shi 等(2024)以单株树为圆心,以不同半径为圆心来划分研究区域,结合广义线性模型研究不同尺度上单株林木的受害概率与该林木所处区域的空间格局(聚集/均匀/随机)以及该林木所处位置的空间属性(斑块/间隙)之间的关系。

5 SADIE 的应用

SADIE 法在昆虫生态学研究得到了广泛的应用。研究的对象包括害虫、天敌,以及具有迁飞习性的昆虫。如来自山东省 102 个县的数据表明,亚洲玉米螟 *Ostrinia furnacalis* 和桃蛀螟 *Conogethes punctiferalis* 的发生在 2016 和 2017 年均呈集聚模式(Dong *et al.*, 2020)。Park 等(2018)研究了韩国 5 种迁飞性害虫的空间模式,结果表明 *Cnaphalocrocis medinalis* 和 *Mythimma separata* 表现出不同的分布模式, *Laodelphax striatellus* 和其他昆虫的初始空间分布随抽样地点和时间的不同而不同。近年来, SADIE 被用于辣椒象甲 *Anthonomus eugenii* (Adeleye *et al.*, 2024)、剑麻象甲 *Scyphophorus acupunctatus* (Acosta-Guadarrama *et al.*, 2024) 和柳蝙蛾 *Endoclita excrescens* (Jing *et al.*, 2022) 空间格局研究。

SADIE 通常使用真实的计数值进行分析,而 Tillman 等(2009)先用反距离加权法对未抽样地区进行了插值,然后使用 SADIE 研究了稻绿蝽 *Nezara viridula* 和褐蝽 *Euschistus servus* 在 6 块花生-棉花农田景观上的空间模式。昆虫生态

学研究中,还可以将诱捕器作为一个小样方。如 Shayestehmehr 等(2021)对苹果蠹蛾 *Cydia pomonella* 空间分布的研究,利用了以性信息素为诱芯的 Delta 形状诱捕器中雄蛾的个数。由于 SADIE 是基于小样方数据的,因而小样方的划分会影响到分析结果。对森林昆虫研究来说,可以将单株树看作一个小样方(可称作带标记的点数据),也可将研究区域划分成网格。点数据比小样方数据更容易发现空间聚集,且小样方划分得越细,其结果越接近点数据(景天忠等, 2023)。将研究区域划分成小样方时,需特别注意对不规则研究区域的划分。如果将非目标区域纳入小样方的划分,势必影响结果的准确性。借助 R 包 spatstat 可划出任意形状的研究窗口。

此外, SADIE 在植物病害流行病学(Xu and Madden, 2004)、植物生态学(Maestre *et al.*, 2003)、动物生态学(Spiridonov *et al.*, 2007)、以及其他 19 个研究领域都有应用(Winder *et al.*, 2019)。在植物生态学研究上, SADIE 多用于与种子果实、草等可用小样方计数来表示的空间数据。如蓝扇棕 *Brahea armata* 果实的数量(Wehncke *et al.*, 2009),每株槲寄生 *Tristerix sp.* 上的花朵数量、果实数量以及互惠动物来访次数(Vilches-Gómez *et al.*, 2025)。在植物病害流行病学方面,通过红蓝图可以看出,番茄褐色皱纹果病毒(Tomato brown rugose fruit virus, ToBRFV)接种体在疾病流行的初期类聚于温室的中央地带;而到了指数生长阶段,疾病扩展,分布于温室的中部和东部;到了减速生长阶段,疾病继续东扩(González-Concha *et al.*, 2021)。花生黑腐病 *Thecaphora frezzii* 在中等至较高发病率水平(>20%)时,倾向于呈现随机性空间分布格局;而在较低发病率水平(<6%)时,则呈现出局部聚集性分布格局(Paredes *et al.*, 2026)。可提供 SADIE 算法的 R 包——epiphy, 就是植物流行病学方面的数据分析包。在动物生态学方面, SADIE 多用来研究草地小样方中的线虫(Spiridonov *et al.*, 2007)、树上到访的鸟(Wehncke *et al.*, 2009)和鳄梨上的樟小爪螨 *Oligonychus punicae* (González-Dávila *et al.*,

2024) 等动物的空间模式。在土壤生态学方面, SADIE 被用来研究表层土壤特性(生物结皮、物理结皮、岩屑、蚓粪、细根和地下石)的空间模式(Maestre and Cortina, 2002)。

SADIE 不但用于度量空间聚集性,还可用于度量空间关联性。如两种舌蝇之间存在显著的空间正向关联性(Sciarretta *et al.*, 2010), 早熟禾象甲 *Listronotus maculicollis* 的幼虫和成虫在研究区域的某些区块的空间分布呈显著的空间关联性(McGraw and Kopenhagen, 2010), 茅草与蛴螬之间正的空间关联性影响了杀虫剂对蛴螬的药效(Huling and McGraw, 2025)。

6 软件获取

SADIE 软件最初是用 FORTAN 语言编写的。目前初始版很难找到。在 Winder 等(2019)发表于《Rethinking Ecology》期刊的论文中,以补充文件的形式上传了可运行于 Windows 平台的 7 个软件包,分别是:

SADIEShell V2.0, 可计算集聚指数 I_a 、红蓝指数 v_i 和 v_j , 以及关联的概率值。还能生成一个可用于关联分析的文件“cluster.data”。

N_AShell V1.0, 对成对的数据集依关联概率计算关联指数 X 。

AssocBatchSetup01, 当超过 2 个数据集时,可批次处理所有成对数据集之间的关联性。

AssocExtractor060 V0.6, 可提取包含局部关联指数的文件,等价于 SadieShell 模块中的 cluster.dat 文件。

ClusterShell V1.0, 度量由 SADIE 红蓝分析建立的斑块集群和间隙集群的特征。其目的是通过将每个单元判定为聚集或非聚集区域来鉴别出所有的斑块集群和间隙集群。该程序还能识别出位于网格边界上的单元,定义集群的质心,检查集群质心之间以及集群边界之间的最小距离。

Red-Blue Batch Runner V1.0, 是专门为进行大数据集的空间分析设计的程序。一般的分析使用 SADIEShell。

Results Collector V0.61, 提取包含汇总分析和置信区间的文件。

对熟悉 R 语言的研究者来说,使用 R 包 epiphy 可能更方便一些。该 R 包不但可以计算 SADIE 指数,还可以计算 Li 等(2012)提出的 Li-Madden-Xu 指数,以及绘制红蓝图。

无论是使用 SADIE 还是 epiphy, 输入数据只需相对坐标和虫数,可使用默认参数,操作简单方便。

参考文献 (References)

- Acosta-Guadarrama AD, Ramirez-Dávila JF, González-Andújar JL, Lara-Vazquez F, Figueroa-Figueroa DK, 2024. Study by spatial distance index analysis of the agave weevil *Scyphophorus acupunctatus* Gyllenhal in the state of Mexico. *Southwestern Entomologist*, 49(4): 1528–1547.
- Adeleye VO, Seal DR, Martini X, Meru G, Liburd OE, 2024. Characterization of the spatial distribution of the pepper weevil, *Anthonomus eugenii* Cano (Col.: Curculionidae), in pepper fields in South Florida. *Insects*, 15(8): 579.
- Baddeley RA, Rubak E, Turner R, 2016. *Spatial Point Patterns: Methodology and Applications with R*. Boca Raton: CRC Press. 255–296.
- Cao DP, Zhai YY, Gao YB, Zhang CY, Hong B, Zheng XL, Zhang F, 2025. Population dynamics, spatial distribution patterns and sampling techniques of *Dasineura jujubifolia* in jujube orchards in northern Shaanxi. *Shaanxi Journal of Agricultural Sciences*, 71(11): 77–81. [曹东平, 翟颖妍, 高艳波, 张成榆, 洪波, 郑晓琳, 张锋, 2025. 陕北枣园枣瘦蚊种群动态、空间分布型及抽样技术. *陕西农业科学*, 71(11): 77–81.]
- Chen YJ, Teng D, Fan Y, Wulazaha·Jiamaliding, Tuolikenur·Aydos, Yusun Murad Y, Deng T, Ren JL, Zhao L, 2024. Relationship between microtopography and spatial distribution patterns of summer chafer *Amphimallon solstitiale* (L.) in Xinjiang grasslands. *Journal of Plant Protection*, 51(5): 1179–1188. [陈毅君, 腾达, 范毅, 加马力丁·吾拉扎汗, 阿依多斯·托力肯努尔, 穆拉迪力·玉荪, 邓桃, 任金龙, 赵莉, 2024. 新疆草原马铃薯鳃金龟幼虫的空间分布型及其与微地形的关系. *植物保护学报*, 51(5): 1179–1188.]
- Clark PJ, Evans FC, 1954. Distance to nearest neighbor as a measure of spatial relationships in populations. *Ecology*, 35(4): 445–453.
- Corley JC, Villacide JM, Bruzzone OA, 2007. Spatial dynamics of a *Sirex noctilio* woodwasp population within a pine plantation in Patagonia, Argentina. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 125(3): 231–236.
- Diggle PJ, 1979. On parameter estimation and goodness-of-fit

- testing for spatial point patterns. *Biometrics*, 35(1): 87–101.
- Dong Z, Zhang Q, Li L, Lu Z, Li C, Ouyang F, Tschamtk T, Yu Y, Men X, 2020. Landscape agricultural simplification correlates positively with the spatial distribution of a specialist yet negatively with a generalist pest. *Scientific Reports*, 10(1): 344.
- Geary RC, 1954. The contiguity ratio and statistical mapping. *The Incorporated Statistician*, 5(3): 115–141.
- Geng SB, Chen L, Hou HL, Zhou GT, Huang XQ, Zhou Z, Qiao L, Chuleui J, 2025. Spatial distribution pattern and supercooling point of overwintering pupae of *Ectropis grisescens* in tea plantations. *Plant Protection*, 51(4): 235–242. [耿书宝, 陈磊, 侯贺丽, 周国涛, 黄晓庆, 周洲, 乔利, Jung Chuleui, 2025. 灰茶尺蠖越冬蛹在茶园的空间分布型及其过冷却点测定. 植物保护, 51(4): 235–242.]
- Ghahramani M, Karimzadeh R, Iranipour S, Sciarretta A, 2019. Does harvesting affect the spatio-temporal signature of pests and natural enemies in alfalfa fields? *Agronomy*, 9(9): 532.
- González-Concha LF, Ramírez-Gil JG, García-Estrada RS, Rebollar-Alviter Á, Tovar-Pedraza JM, 2021. Spatiotemporal analyses of tomato brown rugose fruit virus in commercial tomato greenhouses. *Agronomy*, 11(7): 1268.
- González-Dávila L, Lara-Vázquez F, Ramírez-Dávila JF, Figueroa-Figueroa DK, 2024. Spatial analysis of brown spider mite (*Oligonychus punicae* Hirst) damage in avocado using spatial analysis by distance indices (Sadie). *Agrociencia*, 58(6): 3054.
- Hansen MB, Baddeley AJ, Gill RD, 1999. First contact distributions for spatial patterns: Regularity and estimation. *Advances in Applied Probability*, 31(1): 15–33.
- Hopkins B, Skellam JG, 1954. A new method for determining the type of distribution of plant individuals. *Annals of Botany*, 18(2): 213–227.
- Huling A, McGraw BA, 2025. Investigating the spatial associations between thatch and white grub populations in imidacloprid-treated turfgrass. *Crop Science*, 65(1): e21382.
- Jing TZ, Cai XL, Lu HY, Dai LM, Liu LP, Bai L, Li X, Li MY, Wen Y, Han Q, 2022. Size and location of host-plant shape the spatial pattern of forest insect. *Ecological Entomology*, 47(6): 1051–1060.
- Jing TZ, Lu HY, Liu LP, Dai LM, Fan M, Cai XL, Bai L, Li X, Li MY, Wen Y, Han Q, 2023. Analysis of small-scale spatial pattern of *Endocrita excrescens* based on SADIE and SPPA. *Journal of Beijing Forestry University*, 45(9): 95–103. [景天忠, 陆华阳, 刘丽萍, 代丽敏, 范森, 蔡小林, 白丽, 李响, 李曼毓, 文艺, 韩勃, 2023. 基于 SADIE 和 SPPA 的柳蝙蛾小尺度空间格局分析. 北京林业大学学报, 45(9): 95–103.]
- Jing TZ, Qi FH, 2020. Early Warning of *Dendrolimus superans* Hazard. Harbin: Heilongjiang Science and Technology Press. 28–47. [景天忠, 齐凤慧, 2020. 落叶松毛虫灾害预警. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社. 28–47.]
- Kennington JL, Helgason RV, 1980. Algorithms for Network Programming. New York: Wiley. 1–299.
- le Roux PC, McGeoch MA, 2008. Spatial variation in plant interactions across a severity gradient in the sub-Antarctic. *Oecologia*, 155(4): 831–844.
- Li BH, Madden L, Xu X, 2012. Spatial analysis by distance indices: An alternative local clustering index for studying spatial patterns. *Methods in Ecology and Evolution*, 3(2): 368–377.
- Li ZF, Yang BY, Yang HQ, Long XM, He YY, Peng YJ, Hu YS, Chen B, Du GZ, 2024. Occurrence dynamic and spatial distribution pattern of *Echinocnemus squameus* Billberg adults in dry land high-quality rice field. *Journal of Southern Agriculture*, 55(8): 2454–2463. [李正飞, 杨宝云, 杨虎权, 龙晓明, 何艳艳, 彭跃进, 胡洋山, 陈斌, 杜广祖, 2024. 旱地优质稻田稻象甲成虫发生动态及空间分布型. 南方农业学报, 55(8): 2454–2463.]
- Liebhönd AM, Rossi RE, Kemp WP, 1993. Geostatistics and geographic information systems in applied insect ecology. *Annual Review of Entomology*, 38: 303–327.
- Maestre FT, Cortina J, 2002. Spatial patterns of surface soil properties and vegetation in a Mediterranean semi-arid steppe. *Plant Soil*, 241(2): 279–291.
- Maestre FT, Cortina J, Bautista S, Bellot J, Vallejo R, 2003. Small-scale environmental heterogeneity and spatiotemporal dynamics of seedling establishment in a semiarid degraded ecosystem. *Ecosystems*, 6(7): 630–643.
- McGraw BA, Koppenhöfer AM, 2010. Spatial distribution of colonizing *Listronotus maculicollis* populations: Implications for targeted management and host preference. *Journal of Applied Entomology*, 134(4): 275–284.
- Moran PAP, 1950. Notes on continuous stochastic phenomena. *Biometrika*, 37(1/2): 17–23.
- Paredes JA, Cazón LI, Conforto C, Monguillot JH, Asinari F, González NR, Rago AM, Pérez A, Camiletti BX, 2026. Analysis of the field-scale spatial pattern of peanut smut in Argentina. *European Journal of Plant Pathology*, 174(1): 205–223.
- Park T, Choe H, Jeong H, Jang H, Kim KH, Park JJ, 2018. Spatial pattern analysis for distribution of migratory insect pests at paddy field in Jeolla Province. *Korean Journal of Applied Entomology*, 57(4): 361–372.
- Perry GL, Miller BP, Enright NJ, 2006. A comparison of methods for

- the statistical analysis of spatial point patterns in plant ecology. *Plant Ecology*, 187(1): 59–82.
- Perry J, Bell E, Smith R, Woiwod I, 1996. SADIE: Software to measure and model spatial pattern. *Aspects of Applied Biology*, 46: 95–102.
- Perry JN, 1995. Spatial analysis by distance indices. *Journal of Animal Ecology*, 64(3): 303–314.
- Perry JN, 1996. Measures of spatial pattern and spatial association for counts of insects//Baumgartner J, Brandmayr P, Manly BFJ (eds.). *Population and Community Ecology for Insect Management and Conservation*. Balkema. 21–33.
- Perry JN, 1998. Measures of spatial pattern for counts. *Ecology*, 79(3): 1008–1017.
- Perry JN, Dixon PM, 2002. A new method to measure spatial association for ecological count data. *Ecoscience*, 9(2): 133–141.
- Perry JN, Winder L, Holland JM, Alston RD, 1999. Red-blue plots for detecting clusters in count data. *Ecology Letters*, 2(2): 106–113.
- Reay-Jones FPF, Greene JK, Bauer PJ, 2019. Spatial distributions of thrips (Thysanoptera: Thripidae) in cotton. *Journal of Insect Science*, 19(6): 3.
- Ripley BD, 1976. The second-order analysis of stationary point processes. *Journal of Applied Probability*, 13(2): 255–266.
- Sciarretta A, Getachew T, Baumgärtner J, Melaku G, Trematerra P, 2010. Spatial clustering and associations of two savannah tsetse species, *Glossina morsitans submorsitans* and *Glossina pallidipes* (Diptera: Glossinidae), for guiding interventions in an adaptive cattle health management framework. *Bulletin of Entomological Research*, 100(6): 661–670.
- Shayestehmehr H, Karimzadeh R, Feizizadeh B, Iranipour S, 2021. Spatial distribution of *Cydia pomonella* (Lepidoptera: Tortricidae) populations and its relation with topographic variables. *Applied Entomology and Zoology*, 56(2): 187–197.
- Shi YL, Gao XB, Jiang YX, Zhang JS, Qi FH, Jing TZ, 2024. Spatial pattern of host tree size, rather than of host tree itself, affects the infection likelihood of a fungal stem disease. *Biology*, 13(8): 616.
- Spiridonov SE, Moens M, Wilson M, 2007. Fine scale spatial distributions of two entomopathogenic nematodes in a grassland soil. *Applied Soil Ecology*, 37(3): 192–201.
- Sugihara K, Iri M, 1994. A robust topology-oriented incremental algorithm for Voronoi diagrams. *International Journal of Computational Geometry and Applications*, 4(2): 179–228.
- Szmyt J, 2014. Spatial statistics in ecological analysis: From indices to functions. *Silva Fennica*, 48(1): 1008.
- Tillman PG, Northfield TD, Mizell RF, Riddle TC, 2009. Spatiotemporal patterns and dispersal of stink bugs (Heteroptera: Pentatomidae) in peanut-cotton farmscapes. *Environmental Entomology*, 38(4): 1038–1052.
- van Lieshout MNM, Baddeley AJ, 1996. A nonparametric measure of spatial interaction in point patterns. *Statistica Neerlandica*, 50(3): 344–361.
- Vilches-Gómez V, Orellana JI, Amico GC, Fontúrbel FE, 2025. Temporal partitioning of pollination and seed dispersal interactions in two sympatric mistletoes. *Plant Biology*, 27(7): 1458–1467.
- Wang HX, Yuan L, Ding JX, Xue Y, Liu SY, Gu X, Wang XP, 2024. Spatial distribution patterns of *Tuta absoluta* eggs and larvae in greenhouses and open fields and sampling techniques for monitoring their abundance. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 61(4): 731–740. [王海旭, 袁玲, 丁嘉欣, 薛育, 刘思源, 顾欣, 王新谱, 2024. 番茄潜叶蛾卵和幼虫在温室大棚及露地的空间分布型及抽样技术. *应用昆虫学报*, 61(4): 731–740.]
- Wehncke EV, Medellín XL, Ezcurra E, 2009. Patterns of frugivory, seed dispersal and predation of blue fan palms (*Brahea armata*) in oases of northern Baja California. *Journal of Arid Environments*, 73(9): 773–783.
- Wiegand T, Moloney K, 2004. Rings, circles, and null-models for point pattern analysis in ecology. *Oikos*, 104(2): 209–229.
- Winder L, Alexander C, Griffiths G, Holland J, Woolley C, Perry J, 2019. Twenty years and counting with SADIE: Spatial analysis by distance indices software and review of its adoption and use. *Rethinking Ecology*, 4: 1–16.
- Xu XM, Madden LV, 2003. Considerations for the use of SADIE statistics to quantify spatial patterns. *Ecography*, 26(2): 821–830.
- Xu XM, Madden LV, 2004. Use of SADIE statistics to study spatial dynamics of plant disease epidemics. *Plant Pathology*, 53(1): 38–49.
- Xu XM, Madden LV, 2005. Interrelationships among SADIE indices for characterizing spatial patterns of organisms. *Phytopathology*, 95(8): 874–883.
- Zhang LR, Yang L, Li JQ, Cui JZ, 2025. The spatial distribution pattern and sampling technique of *Dioryctria pryeri* larvae before overwintering. *Forestry and Ecological Sciences*, 40(1): 26–32. [张立蓉, 杨丽, 李继泉, 崔建州, 2025. 越冬前松果梢斑螟幼虫的空间分布型及抽样技术. *林业与生态科学*, 40(1): 26–32.]