



全林发, 董易之, 徐淑, 李文景, 陈炳旭. 荔枝园荔枝蒂蛀虫常规爆发期的种群空间分布格局 [J]. 环境昆虫学报, 2021, 43 (4): 950–958.

荔枝园荔枝蒂蛀虫常规爆发期的种群空间分布格局

全林发, 董易之, 徐淑, 李文景, 陈炳旭*

(广东省农业科学院植物保护研究所, 广州 510640)

摘要: 荔枝蒂蛀虫 *Conopomorpha sinensis* Bradley 是我国最重要的荔枝、龙眼蛀果类害虫之一。为了准确把握荔枝园中荔枝蒂蛀虫的分布规律, 以便对该虫的危害盛期进行预测预报和采取防治措施, 本文采用生物学统计方法和地理统计学方法对荔枝园中荔枝蒂蛀虫卵、蛹和成虫的空间分布特征进行了研究。结果显示: 2019年5月和6月, 无挂果荔枝树的有虫株率分别为67.74%和68.57%, 而挂果荔枝树的有虫株率达90.91%和91.67%。该时期荔枝园内荔枝蒂蛀虫蛹的半变异函数最佳拟合模型均为球型模型, 成虫均为指数模型, 而卵在5月和6月的拟合模型分别为球型模型和指数模型。不同时期荔枝蒂蛀虫各虫态的拟合变异函数模型虽存在一定差异, 但所指明的空间分布格局均为聚集分布。引起荔枝蒂蛀虫卵和蛹聚集分布主要由生境和自身生物学特性共同所致, 但当虫口密度降低时, 成虫的聚集分布仅由生境引起。另外, 用Kriging插值方法生成的空间分布图显示荔枝蒂蛀虫卵、蛹和成虫均明显趋向于以挂果荔枝树为中心的聚集分布, 聚集斑块由聚集中心区域向四周逐渐减小。5月至6月, 荔枝蒂蛀虫卵、蛹和成虫在荔枝园内趋向于以挂果荔枝树为中心的聚集分布, 不同时期荔枝园内荔枝蒂蛀虫的聚集分布成因随种群密度变化有所不同。

关键词: 荔枝蒂蛀虫; 空间分布格局; 生物学统计方法; 地理统计学; 聚集分布

中图分类号: Q968.1; S433

文献标识码: A

文章编号: 1674-0858(2021)04-0950-09

Spatial distribution patterns of *Conopomorpha sinensis* Bradley during its conventional population outbreak in litchi orchard

QUAN Lin-Fa, DONG Yi-Zhi, XU Shu, LI Wen-Jing, CHEN Bing-Xu* (Plant Protection Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510640, China)

Abstract: *Conopomorpha sinensis* Bradley (Lepidoptera: Gracilariidae) is the most destructive borer pest of *Litchi chinensis* and *Euphoria longan*. The spatial distribution pattern of *C. sinensis* population were analyzed using biostatistical and geostatistical methods in litchi orchard for forecasting and scientific management of *C. sinensis*. The results showed that the ratio of infected trees was 67.74% and 68.57% for the fruitless litchi trees in May and June, and that was 90.91% and 91.67% for the fruiting litchi trees. The semivariogram curve models of egg, larva and adult of *C. sinensis* in May and June were as follow: The pupae were both spherical models. The adults were both exponential models. Therefore, it was found that the spatial distribution patterns of all the models were aggregated, although their models had a little different in different periods. The reason for the aggregation of *C. sinensis* egg and pupae were mainly its bionomics and environment, while the adult aggregation was only caused by the environment when its

基金项目: 广东省农业科学院院长基金专项(201936); 广东省荔枝产业攻关示范项目(403-2018-XMZC-0002-90); 广东省荔枝产业技术体系(2020KJ107-4); 财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系

作者简介: 全林发, 女, 硕士, 助理研究员, 研究方向为果树害虫综合防治, E-mail: linfa_quan2016@126.com

*通讯作者 Author for correspondence: 陈炳旭, 博士, 研究员, 主要方向为果树害虫综合防治, E-mail: gzchenbx@163.com

收稿日期 Received: 2020-05-21; 接受日期 Accepted: 2020-10-14

population density decreased to some extents. As the maps with Kriging interpolation described, the *C. sinensis* aggregation exhibited an obvious spatial aggregation centered on the fruiting litchi trees and the aggregated plaques decreased slightly from the aggregation center to edges during May to June. The egg, pupa and adult of the *C. sinensis* tended to an obvious spatial aggregation centered on the fruiting litchi trees. The reason for the aggregation of *C. sinensis* in the litchi orchard varied with its population density, but mostly caused by its bionomics or and environment.

Key words: *Conopomorpha sinensis* Bradley; spatial distribution pattern; biostatistics; geostatistics; aggregated distribution

荔枝在我国具有悠久的栽植和食用历史。建国以来我国荔枝种植面积从 6 667 hm² 扩展到 551 746 hm², 增长了 82.7 倍, 产量和产值都得到了跨越式增长, 基本形成了海南特早熟优势区、粤西中晚熟优势区、粤中桂东南中晚熟优势区、粤东闽南晚熟优势区、长江上游特晚熟优势区和云南高原立体生产优势区六大产区 (陈厚彬和齐文娥, 2019)。荔枝蒂蛀虫 *Conopomorpha sinensis* Bradley 属鳞翅目 Lepidoptera 细蛾科 Gracillariidae, 以幼虫钻蛀为害荔枝、龙眼的果实、花穗、嫩梢和嫩叶, 尤其偏爱为害果实, 一年发生 9~12 代, 世代重叠严重 (Yao *et al.*, 2018)。随着荔枝、龙眼产业在中国的蓬勃发展, 荔枝蒂蛀虫已经取代荔枝蜡成为荔枝龙眼园内的第一大害虫 (李文景等, 2018)。一般年份被荔枝蒂蛀虫为害的荔枝、龙眼虫果率为 10%~20%, 严重时达 60%~90%, 使荔枝龙眼产业蒙受巨大损失 (李康, 2002; 陈炳旭等, 2011)。

空间格局是昆虫种群的重要特征之一, 它是由昆虫种群的生物学特性与特定生境条件相互作用协同进化的结果。研究昆虫的空间格局不仅可以揭示种群内和种群间的空间结构, 而且还可以为抽样设计、种群消长趋势和扩散范围的预测预报以及制订害虫防治策略提供较好的依据 (宗世祥等, 2006)。随着空间生态学理论和地理统计学方法的发展, 害虫种群的空间分布格局及种群扩散趋势能够得到精确的解析和计算 (丁岩钦, 1994; 宗世祥等, 2005)。地理统计学是在地质分析和统计分析互相结合的基础上形成的一套分析空间相关变量的理论和方法, 能最大限度地利用田间调查所提供的各种信息及空间数据, 相比经典的统计学方法更为精确, 且能有效避免系统误差 (Liebhold *et al.*, 1993; 周强等, 1998)。通过直接测定和分析变量而建立起的预测模型, 能有效解决昆虫种群的空间异质性问题 (Naranjo 和

Flint, 1995; 李建庆等, 2018)。目前, 荔枝蒂蛀虫的研究工作主要集中在生物学特性及防治技术上, 研究不深且涉及的领域较窄, 有关荔枝蒂蛀虫种群空间分布格局的研究尚未有报道 (李文景等, 2018)。笔者对广东省广州市天河区华南农业大学荔枝栽培试验基地荔枝园荔枝蒂蛀虫卵、蛹和成虫虫口密度及发生特点进行了调查, 采用生物学统计方法和地理统计学方法对荔枝园中荔枝蒂蛀虫卵、蛹和成虫常规爆发期的种群空间分布格局进行了较全面的研究, 为了解荔枝蒂蛀虫在荔枝园中的空间分布特征, 提高抽样技术及种群的监测与防控提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 样地设置与调查方法

1.1.1 样地基本情况

试验地位于广东省广州市天河区华南农业大学荔枝栽培试验基地 (E113°21', N23°09'), 该地区属于南亚热带海洋季风气候, 光热资源充沛, 年平均气温在 21.9~22.8℃ 之间, 霜日少。降水充足, 年平均降水量在 1 384.4~2 278.3 mm 之间。调查样地为人工栽植的荔枝园, 面积约为 120 m×70 m, 主栽荔枝中晚熟品种, 包括桂味、糯米糍等。荔枝树平均树龄为 27 年, 平均树高 3.2 m。为恢复调查样地的原生态性, 保证荔枝蒂蛀虫田间自然种群的稳定性, 本试验调查前三个月内未使用任何杀虫剂。

1.1.2 调查方法

由于该果园排列规律, 采用坐标法逐株系统调查, 把果园中的 200 多棵果树按 20 列×10 行网格法矩形排列, 以左下角第 1 棵树为坐标原点 (0, 0), 以北向和东向建立直角坐标系, 于坐标纸上将坐标系划分为同样大小的各个小栅格, 将调查荔枝树的位置标记在坐标纸上相对应的小栅

格内, 每个小栅格代表 1 个样本的实际观测值。依据荔枝蒂蛀虫的生物学特性及其田间预测预报结果, 在虫害发生的高峰期展开相关调查。

为了解中晚熟荔枝品种荔枝蒂蛀虫危害盛期种群的空间分布格局, 分别于 2019 年 5 月 8 至 12 日和 6 月 4 至 8 日, 在荔枝蒂蛀虫成虫发生高峰期, 对坐标原点为 (5, 2)、(5, 6)、(16, 2)、(16, 6) 四个样点处 12 列 × 5 行共 60 棵桂味和糯米糍荔枝树进行逐株系统调查 3 次, 每次调查间隔 1 d。每棵树按照东、南、西、北、中 5 个方位, 每个方位固定 2 个主枝 (即着生于中心骨干枝上的第 2 级骨干枝), 用目测法分别调查荔枝蒂蛀虫成虫和卵的数量; 成虫调查时采用目标枝条搜寻法, 必要时敲击或轻微摇晃目标枝条, 以枝为单位记录静栖及飞舞的荔枝蒂蛀虫成虫的数量, 并统计有成虫分布的荔枝树株数, 计算样方内荔枝树有虫株率及含不同成虫密度的荔枝树占比; 卵调查时在每个目标果枝上随机选取 10 颗荔枝果实, 采用手持双目镜调查并记录果实表面的着卵粒数, 将各组的计数结果综合在一起, 计算每棵树荔枝蒂蛀虫卵的平均密度。又分别于 2019 年 5 月 21–25 日和 6 月 16–20 日, 荔枝蒂蛀虫蛹期内, 在相同的样方内, 应用调查成虫和卵的方法, 以枝为单位, 逐枝、逐叶记录整个枝条上蛹的数量 (刘军和, 2009)。

另外, 在上述矩形样方内, 于 2019 年 5 月 8 日和 6 月 8 日, 采用坐标法逐株系统调查样方内荔枝树的挂果情况。调查方法为: 每棵树按照东、南、西、北、中 5 个方位, 每个方位随机选择 4 个结果枝 (即果树第 3~4 级枝), 共调查 20 个枝条的挂果情况。以正常挂果的枝条作为挂果枝, 统计每棵树挂果枝条的数量, 求得每棵树的挂果率, 计算公式为: 果树挂果率 (%) = 挂果枝条数 / 调查总枝条数 × 100。

1.2 空间格局的地统计学分析

当一个变量在空间上与其位置有关时称为区域化变量, 区域化变量在空间上因其相互间的位置关系或相关性而存在一定的规律性变化称为空间变异 (王其武, 2016)。半变异函数是研究区域化变量的主要工具, 被定义为变量 $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i + h)$ 增量平方的数学期。其计算公式为: $\gamma(h) = 1/2N(h) \sum [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2$, 式中, $i = 1, 2, \dots, N(h)$, $\gamma(h)$ 为相对距离的半变异函数值, $N(h)$ 是被 h 分割的数据对 $(x_i, x_i + h)$ 的对数,

$Z(x_i)$ 和 $Z(x_i + h)$ 分别是点 x_i 和 $x_i + h$ 处样本的测量值, h 为两样点间的距离 (李建庆等, 2016)。本研究中的变量值分别为荔枝蒂蛀虫卵 (粒/株)、蛹 (个/株) 和成虫 (头/株) 的密度。

半变异函数理论模型的拟合: 半方差 $\gamma(h)$ 是距离 h 的函数, 以距离 h 为横坐标、半方差 $\gamma(h)$ 为纵坐标构成的二维平面图称为半变异函数图。半变异函数曲线图的形状能反映变量空间分布的结构及相关类型, 以及空间相关范围的大小, 一般常用的模型有表征所研究种群为聚集分布的球型、指数型、高斯型, 以及表征种群呈随机分布或均匀分布的直线型 (胡瑜珩, 2015)。前者指半变异函数值未达到稳定状态之前, 空间依赖性的大小随采样距离增大而逐渐降低; 后者表明在抽样尺度下没有空间相关性 (汪文俊等, 2012; 胡瑜珩, 2015)。具体选择采用哪种理论模型主要依据决定系数 (R^2)、残差平方和 (RSS)、变程 (A) 和块金系数 (C_0) 的大小依次判断, 从而得到最优拟合模型 (孙鹏举等, 2015; 刘永华等, 2018)。其中块金系数 (C_0) 大小反映了变量的随机程度; 基台值 ($C + C_0$) 大小可反映变量变化幅度的大小; 空间结构比率 [$C / (C + C_0)$] 反映空间结构系数在样点变量差异中所占的比率, 以此值大小可判定系统内变量的空间相关程度: 介于 25%~75% 之间为中等程度的空间相关性, 大于 75% 则具有较强的空间相关性 (李建庆等, 2016)。

空间数据差值: 空间分布的区域化变量用 Kriging 插值法生成分布图, 可以反映调查样点之间区域化变量的分布状况。利用 Surfer 软件中 Grid 功能、Kriging 法对荔枝蒂蛀虫空间分布的区域化变量进行插值分析 (孙鹏举等, 2015; 胡瑜珩等, 2015), 通过 Surfer 12 软件生成空间分布等值线与矢量叠加图 (刘永华等, 2018)。

1.3 聚集成因分析

应用 Bliackith 聚集均数 (λ) 法 (丁岩钦, 1994), 分别分析荔枝蒂蛀虫卵、蛹和成虫的聚集原因。 $\lambda = \bar{x} / 2k \cdot \gamma$, 式中 \bar{x} 为平均虫口密度, k 为 Waters 指标 k 值; γ 是自由度为 $2k$ 时 0.5 概率值对应的 χ^2 。当 $\lambda \leq 2$ 时, 聚集由环境条件引起; 当 $\lambda > 2$ 时, 聚集由昆虫行为和环境条件共同引起。

1.4 数据统计

应用 Excel 2007 对基础数据进行统计分析, 依据相关统计学理论和方法将调查所得数据进行归

类整理。利用 GS + 9.0 软件实现半变异函数理论模型的拟合; 采用 Surfer 软件中 Grid 功能、Kriging 法对害虫种群空间分布的区域化变量进行插值分析, 并通过 Surfer 12 软件生成空间分布等值线与矢量叠加图。

2 结果与分析

2.1 不同时期荔枝蒂蛀虫成虫的密度分布

5 月份和 6 月份调查样地中挂果/无挂果荔枝

树荔枝蒂蛀虫成虫的密度分布情况见图 1 和图 2, 结果显示: 5 月, 无挂果树和挂果树的有成虫株率分别为 67.74% 和 91.67%, 其中成虫密度 > 5 头/株的样本比例分别为 16.13% 和 36.11%; 6 月, 无挂果树和挂果树的有成虫株率分别为 68.57% 和 90.91%, 其中成虫密度 > 5 头/株的样本比例分别为 8.57% 和 9.09%。比较挂果树和无挂果树上荔枝蒂蛀虫成虫密度发现, 挂果树成虫密度明显高于无挂果树 (见图 1、图 2)。

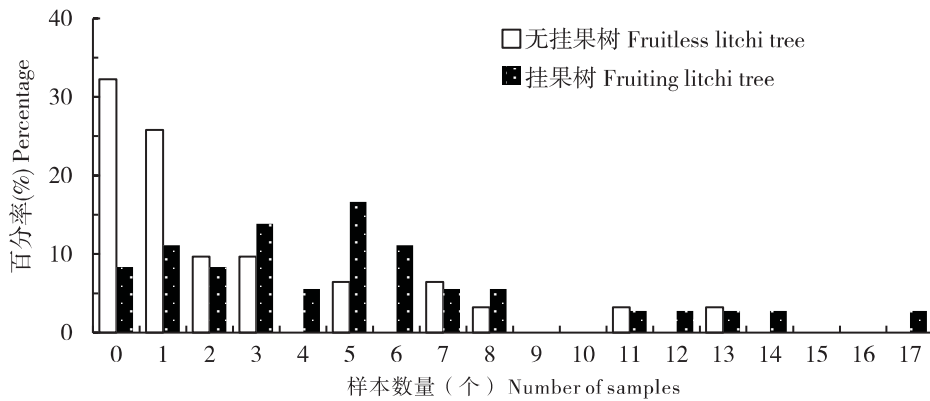


图 1 5 月份样方内荔枝蒂蛀虫成虫密度分布直方图

Fig. 1 Histogram of density for the *Conopomorpha sinensis* adults in quadrat in May

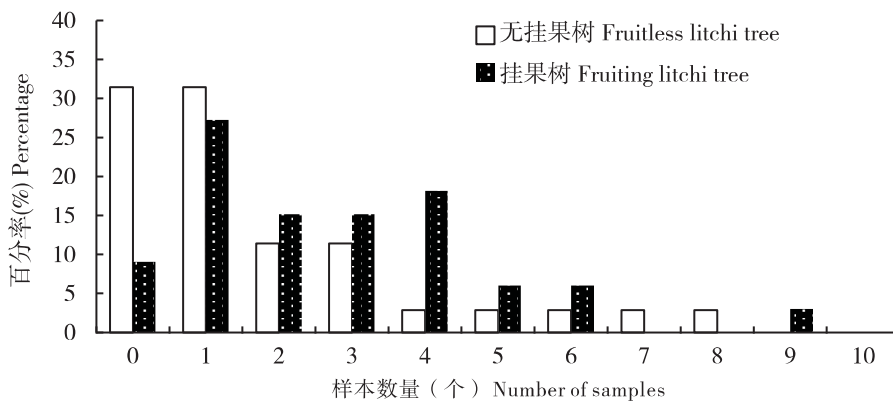


图 2 6 月份样方内荔枝蒂蛀虫成虫密度分布直方图

Fig. 2 Histogram of density for the *Conopomorpha sinensis* adults in quadrat in June

2.2 荔枝蒂蛀虫不同虫态的空间分布特征

采用种群密度等值线图可以直观显示荔枝蒂蛀虫发生程度在样地内的空间分布特征, 在样地中对坐标原点为 (5, 2)、(5, 6)、(16, 2)、(16, 6) 4 个样点处 12 列 × 5 行共 60 棵树调查的数据绘制等值线与矢量叠加图, 结果如图 3 所示。从 5 月中旬至 6 月中旬, 样方内荔枝树的挂果率有所下降, 而荔枝蒂蛀虫不同虫态的空间分布格局

也发生相应的变化。总体上, 样方内荔枝蒂蛀虫卵、蛹和成虫均呈现出不同程度的聚集分布特点: 样方内有 1 个或多个聚集斑块, 每个斑块的虫口密度由中心区域向四周逐渐减少, 反映了该虫在样地内的聚集强度、空间尺度和扩散方向。与成虫相比, 荔枝蒂蛀虫卵和蛹的聚集斑块少且集中, 聚集分布趋势更强, 成虫的聚集斑块较多且分散, 聚集程度不太强。另外, 对比荔枝树挂果率和虫

害密度的等值线图发现,荔枝蒂蛀虫卵和蛹的聚集斑块中心与荔枝树高挂果率聚集中心大同小异,

可见,该虫的田间空间分布与荔枝树挂果情况密切相关。

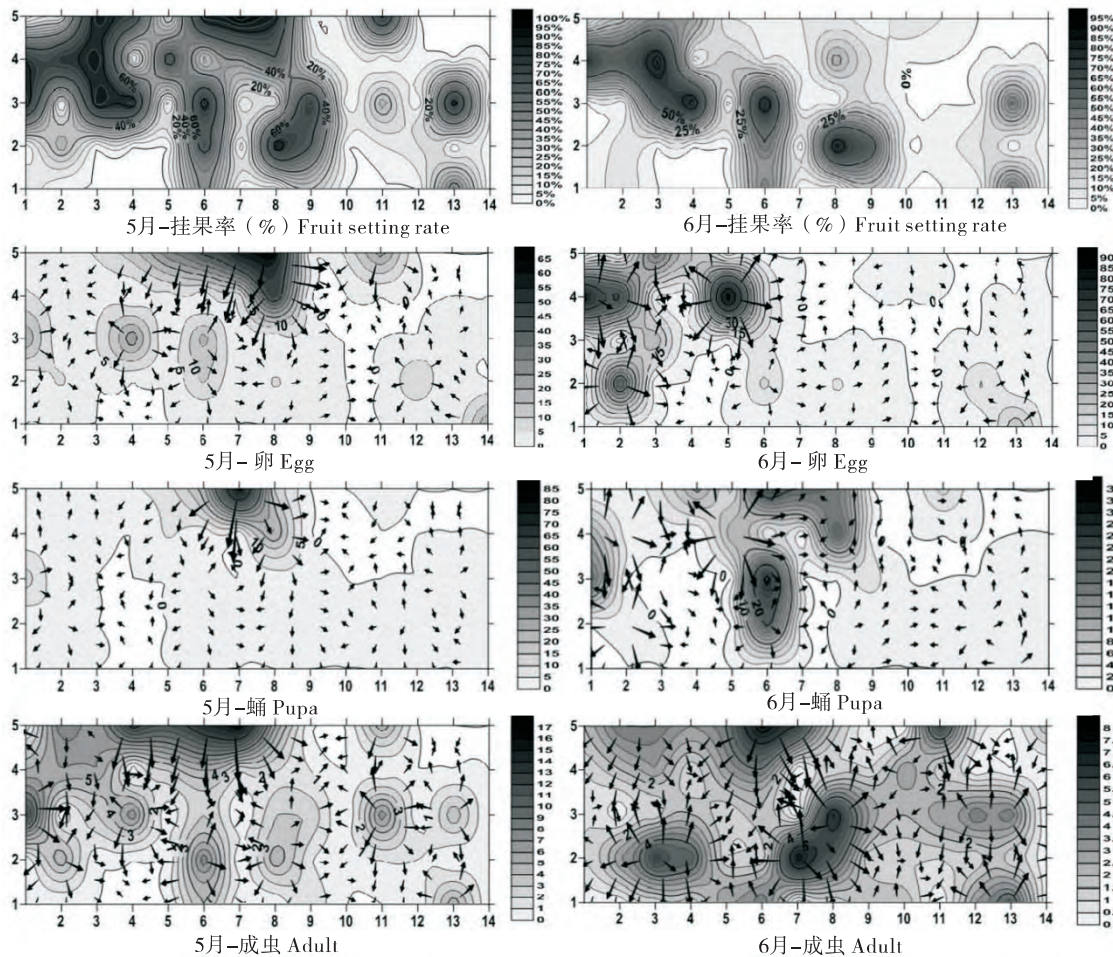


图3 荔枝蒂蛀虫不同虫态的等值线图与矢量叠加图

Fig. 3 Overlay maps of isoline and vector for *Conopomorpha sinensis* at different stages

2.3 荔枝蒂蛀虫不同虫态的空间分布型分析

荔枝园调查数据的基本统计参数见表1。利用GS+9.0软件对荔枝蒂蛀虫卵、蛹和成虫的空间分布情况进行处理,选取 R^2 最大、RSS最小的变异函数理论模型作为最佳拟合模型,各拟合参数及分布型见表2。结果表明:5月份,调查样地内荔枝蒂蛀虫卵、蛹和成虫的空间分布有明显空间结构,拟合模型分别球型模型、球型模型和指数模型,即3种虫态的空间分布型均为聚集分布。卵、蛹和成虫的半变异函数决定系数 R^2 分别为0.948、0.971和0.766,各模型的拟合程度较高。卵、蛹和成虫的变程在5.63~37.41 m之间,空间依赖范围未超出研究尺度,且在此距离范围内调查样地中任何两点卵、蛹和成虫的数量都各自存在一定的相关关系,空间相关性随着距离的增大而逐渐减小,空间结构比率在71.28%~91.53%之间,

均值为78.37%,大于75%,表明该月份荔枝蒂蛀虫在荔枝园内具有较强的空间相关性,具体到各虫态,卵和蛹均大于75%,空间相关性较强,成虫介于25%~75%之间,为中等程度的空间相关性。

相似的,6月份调查样地内荔枝蒂蛀虫卵、蛹和成虫的空间分布型均为聚集分布,拟合模型分别为指数模型、球型模型和指数模型, R^2 介于0.615~0.825之间,拟合程度较好。卵、蛹和成虫的变程在5.28~51.81 m之间,空间依赖范围未超出研究尺度,调查间隔距离均在其变程范围内,明显小于其变程,空间依赖型明显,空间结构比率在50.03%~60.93%之间,均值为54.77%,介于25%~75%之间,表明该月份调查样地具中等程度的空间相关性,具体到各虫态,卵、蛹和成虫均介于25%~75%之间,为中等程度的空间相关性。

表 1 荔枝园调查数据的基本统计参数
Table 1 Statistic parameters of investigation data in litchi orchard

月份 Month	统计指标 Statistic index	调查株数 (株) Number of trees	平均值 Mean	方差 Variance	标准差 SD	最小值 Min.	最大值 Max.	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis
5 月 May	卵 Egg	60	6.970	191.661	13.844	0	63.00	2.05	3.40
	蛹 Pupae	60	1.938	23.496	11.411	0	26.00	1.60	2.22
	成虫 Adult	60	4.015	15.707	3.963	0	17.00	1.26	1.14
6 月 June	卵 Egg	60	6.838	310.696	17.627	0	98.00	2.39	5.94
	蛹 Pupae	60	3.194	51.674	7.188	0	33.00	2.50	5.42
	成虫 Adult	60	2.224	4.207	2.051	0	8.00	1.03	0.45

表 2 荔枝蒂蛀虫不同虫态的变异函数理论模型、拟合参数及空间格局类型
Table 2 Parameters of variogram models and spatial distribution for *Conopomorpha sinensis* at different stages

调查时间 Survey time	虫态 Stage	理论模型 Theoretical model	块金值 Nugget C_0	基台值 Still ($C_0 + C$)	变程 Range (A)	残差平方和 Residual sum of squares RSS	决定系数 Coefficient of determination (R^2)	空间结构比率 Spatial variation [$C/C_0 + C$]%	分布格局 Spatial distribution pattern
5 月 May	卵 Egg	球型模型 Spherical	28.20	297.70	5.78	1493.00	0.948	90.53	聚集分布
	蛹 Pupae	球型模型 Spherical	9.43	33.58	5.63	6.35	0.971	71.92	聚集分布
	成虫 Adult	指数模型 Exponential	9.36	32.59	37.41	10.60	0.766	71.28	聚集分布
6 月 June	卵 Egg	指数模型 Exponential	82.80	165.70	9.78	570.00	0.615	50.03	聚集分布
	蛹 Pupae	球型模型 Spherical	31.60	67.76	5.28	110.00	0.802	53.36	聚集分布
	成虫 Adult	指数模型 Exponential	3.570	9.137	51.81	0.21	0.825	60.93	聚集分布

2.4 荔枝蒂蛀虫在荔枝树上聚集成因分析

根据 Bliackith 种群聚集均数公式 $\lambda = \bar{x} / 2k \cdot \gamma$ 计算分析荔枝蒂蛀虫卵、蛹和成虫的聚集原因见表 3。结果表明: 5 月份, 样地内空间分布格局为聚集分布的三种虫态的 λ 值均大于 2, 可知该时期

荔枝蒂蛀虫卵、蛹和成虫聚集均是由环境条件和昆虫本身聚集习性共同引起的。相类似的, 6 月份样地内聚集分布的荔枝蒂蛀虫卵和蛹的 λ 值均大于 2, 可见该虫卵和蛹该时期聚集分布仍是环境条件和昆虫本身聚集习性共同所致; 但随着成虫密

表 3 荔枝蒂蛀虫不同虫态的聚集原因分析
Table 3 Analysis of aggregation causes of *Conopomorpha sinensis* at different stages

调查时间 Survey time (yy-mm)	虫态 Stage	平均虫口数 Number of pests χ	$2k$ Waters index	γ	λ
2019-05	卵 Egg	6.97	0.607	0.455	5.49
	蛹 Pupae	1.94	0.418	0.455	4.68
	成虫 Adult	4.02	7.692	7.340	3.48
2019-06	卵 Egg	6.84	0.607	0.455	5.49
	蛹 Pupae	3.19	0.872	0.455	4.61
	成虫 Adult	2.22	25.813	24.34	1.48

度的下降,样地内聚集分布的成虫的 λ 值为 $1.48 < 2$,由此可见该时期成虫的聚集仅由环境条件引起。

3 结论与讨论

空间格局是昆虫种群的重要属性之一,由物种的生物学特性和环境条件所决定,其反映了昆虫在寄主植物和非生物环境影响下,空间需求的内在生物学特性(李哲等,2004;鄢铮和王正荣,2011)。了解昆虫的空间分布及动态变化对有效的进行虫害管理与防治具有重要意义(孙鹏举等,2015)。而昆虫种群的空间分布型不仅与昆虫自身密度、扩散活动能力、生活习性有关,而且与寄主物候期、栽培特点及其生长的地理环境有着密切的联系(贾楠等,2012;胡瑜珩等,2015;李建庆等,2018)。

田间调查发现,5月至6月,正值珠三角地区中晚熟荔枝品种果实膨大期至果实着色初期,是荔枝蒂蛀虫种群常规危害盛期及防控的关键期。为此深入掌握该危害阶段荔枝蒂蛀虫的种群数量动态和空间分布格局,对于揭示害虫的危害特性与发生发展规律,采取有效防治措施及精准施策控制虫害扩大化具有非常重要的意义。荔枝蒂蛀虫以幼虫蛀果为害,隐蔽性强,其危害的寄主树体较大,单株受害树虫口数量多,涉及相关种群数量调查时,多数以单株树木作为调查单位,单株树木即可看作是一个调查样方(李建庆等,2018)。此外,对地理统计学而言,每个样地30个样方即可达到数据统计要求,本研究设调查样本为60棵树,针对不同虫态发生高峰期动态重复调查3次,综合考虑调查成本和统计需要,能够反映调查种群数量统计需要。本研究首次利用地统计学方法对荔枝蒂蛀虫卵、蛹和成虫在荔枝品种园内的空间分布进行了分析,结果表明该虫3种虫态在荔枝园内的均呈现较明显的聚集分布,同时发现荔枝树挂果率对其卵、蛹和成虫在聚集上有很大的影响,这符合了荔枝蒂蛀虫的相关生物学特性。通过聚集指数 λ 分析也表明,荔枝蒂蛀虫卵和蛹在荔枝园的聚集的原因不仅受环境条件影响,还与自身生物学特性密切相关。

昆虫种群的空间分布状况与种群的扩散活动能力有着直接关系(曾凡勇等,2012)。荔枝蒂蛀虫主要以幼虫蛀食果实为害,田间成虫多在荔枝

果实而较少在叶片上产卵(刘少兰,2012;董易之等,2018)。由于荔枝蒂蛀虫卵本身没有迁移能力,所以荔枝蒂蛀虫卵空间格局主要依赖成虫的产卵场所,因此卵的空间格局与成虫的空间格局相近。另外,田间调查发现,荔枝蒂蛀虫成虫多产卵于果壳基部(果蒂),这样有利于幼虫孵化后钻入果实为害,从而造成挂果树成虫密度明显高于无挂果树,这也是引起荔枝蒂蛀虫成虫在挂果荔枝树上的聚集分布趋势的环境因素之一。而荔枝蒂蛀虫卵孵化后随即钻蛀进入植物组织中,至老熟化蛹前始终在寄主植物内部取食,幼虫老熟后咬穿植物爬出,就近叶片正面中脉近叶尖处或地面的枯枝落叶处结茧化蛹,这些都可能是荔枝蒂蛀虫蛹呈聚集分布的一个生物学原因(陈炳旭等,2011)。但是,本次调查发现,5月荔枝园内成虫口密度较高时,园内成虫聚集的原因主要是由于成虫自身生物学特性(成虫喜阴怕光、产卵选择行为等)及生境共同作用所引起的;但6月随着成虫口密度下降,荔枝园内成虫的聚集分布主要由生境引起。笔者推测,荔枝蒂蛀虫趋向于以挂果荔枝树为中心的聚集分布是“荔枝蒂蛀虫-寄主”高度协同进化的结果,同时反映了昆虫对植物的利用策略(钦俊德,1987;陆宴辉等,2008)。为此,通过可视化分析害虫聚集点及扩散方向可以有效指导害虫防治。另外,该虫的种群发生动态和空间分布格局同时受寄主植物的物候期、树势、果园郁闭程度、光照、温度、湿度及天敌昆虫等因素影响。

对种群分布格局进行可视化的定性分析是种群分布格局研究中常用的手段之一,并能形象描述害虫在特定空间结构上的分布状态,对更好地研究害虫的防治方法具有一定的指导意义(付园园等,2019)。荔枝蒂蛀虫是我国最重要的荔枝、龙眼蛀果类害虫之一,该虫在珠江三角洲中晚熟荔枝优势区,每年发生10~11代,成虫第一代始发于3月中旬前后,第3代开始世代重叠,5~7月发生危害最重,多以幼虫在荔枝冬梢或早熟品种花穗顶端轴内越冬(陈炳旭等,2017)。本研究应用种群分布特点及空间分布信息,针对荔枝蒂蛀虫常规爆发期(5~6月),阐明了该虫卵、蛹和成虫在荔枝园中空间分布格局,通过 Kriging 法获知害虫聚集点及扩散方向以便对园区内荔枝蒂蛀虫种群进行有效监测和防控。由于时间和其它条件的限制,本文仅对5月至6月中晚熟荔枝园内荔

枝蒂蛀虫的空间分布型进行了研究, 而不同品种、栽植模式果园、单一品种园与品种混种园等的虫害发生和种群空间布局是否存在差异, 对于不同虫态在果园内的最佳抽样技术该如何确定, 值得进一步研究。另外, 应用地理统计学对荔枝蒂蛀虫种群在时间上的连续性与依赖性的研究今后还需增加调查次数, 以获得更多资料进一步完善。

综上所述, 5 月至 6 月底, 荔枝蒂蛀虫卵、蛹和成虫在荔枝园内趋向以挂果荔枝树为中心的聚集分布, 聚集斑块由聚集中心区域向四周逐渐减小。该时期荔枝蒂蛀虫卵和蛹的聚集均是由生境和自身生物学特性 (幼虫蛀果为害和成虫产卵选择性等) 共同引起的, 但成虫在虫口密度降低时, 其聚集分布仅由生境引起。

参考文献 (References)

- Chen BX, Zhang YJ, Dong YZ, et al. Advances in research on biological control of *Conopomorpha sinensis* [J]. *Journal of Fruit Science*, 2011, 28 (3): 493-497. [陈炳旭, 张英杰, 董易之, 等. 荔枝蒂蛀虫生物防治研究进展 [J]. 果树学报, 2011, 28 (3): 493-497]
- Chen HB, Qi WE. Litchi and longan production in China [J]. *Longan & Litchi Industry Conference in China (Fuling, Chongqing) - 2009*, 2019: 1-2. [陈厚彬, 齐文娥. 我国荔枝龙眼产业生产形势分析 [J]. 2009 中国 (重庆涪陵) 龙眼荔枝产业大会, 2019: 1-2]
- Ding YQ. Entomological Mathematics Ecology [M]. Beijing: Science Press, 1994: 22-69. [丁岩钦. 昆虫数学生态学 [M]. 北京: 科学出版社, 1994: 22-69]
- Dong YZ, Yao Q, Chen BX, et al. Study on the oviposition preference of the litchi fruit borer, *Conopomorpha sinensis* Bradley (Lepidoptera: Gracillariidae) [J]. *Journal of Fruit Science*, 2018, 35 (2): 204-211. [董易之, 姚琼, 陈炳旭, 等. 荔枝蒂蛀虫的产卵选择性研究 [J]. 果树学报, 2018, 35 (2): 204-211]
- Fu YY, Jiang P, Liu AH, et al. Geostatistical analysis of the spatial distribution with different stand types of *Diaspidiotus slavonicus* [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2019, 34 (2): 187-193, 205. [付园园, 蒋萍, 刘爱华, 等. 不同受害程度林分杨盾蚧空间分布格局地统计学分析 [J]. 西北林学院学报, 2019, 34 (2): 187-193, 205]
- Hu YH. Spatial Distribution Analysis of *Batocera horsfieldi* (Hope) and Influence of the Replenishing Nutrition Plants [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2015. [胡瑜珩. 云斑天牛空间格局分析及补充营养植物对其的影响 [D]. 北京: 北京林业大学, 2015]
- Hu YH, Wu HW, Xu ZC. Geostatistical analysis on spatial distribution pattern of the larvae of *Batocera horsfieldi* [J]. *Journal of Northwest Forestry University*. 2015, 30 (5): 165-171. [胡瑜珩, 武海
- 卫, 许志春. 云斑天牛幼虫空间分布格局的地统计学分析 [J]. 西北林学院学报, 2015, 30 (5): 165-171]
- Jia N, Wang XQ, Liu WW, et al. Dynamics studies on spatial distribution pattern of *Carposina niponensis* eggs [J]. *Henan Journal of Agricultural Sciences*, 2012, 41 (12): 106-109. [贾楠, 王小奇, 刘薇薇, 等. 桃小食心虫卵的空间格局动态研究 [J]. 河南农业科学, 2012, 41 (12): 106-109]
- Liebold AM, Rossi RE, Kemp WP. Geostatistics and geographic information systems in applied insect ecology [J]. *Annual Review of Entomology*, 1993, 38 (1): 303-327.
- Li K. Occurrence and control of litchi fruit borer, *Conopomorpha sinensis* (Lepidoptera: Gracillariidae) [J]. *Guangxi Agricultural Sciences*, 2002, 5: 249-250. [李康. 荔枝蒂蛀虫的发生及防治 [J]. 广西农业科学, 2002, 5: 249-250]
- Li JQ, Mei ZX, Yang ZQ. Geostatistical analysis on spatial distribution of *Batocera horsfieldi* (Coleoptera: Cerambycidae) populations in different types of ash tree forests [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36 (14): 4540-4547. [李建庆, 梅增霞, 杨忠岐. 不同林分白蜡树云斑白条天牛种群空间格局地统计学分析 [J]. 生态学报, 2016, 36 (14): 4540-4547]
- Li JQ, Mei ZX, Yang ZQ, et al. Geostatistical analysis on spatial distribution pattern of *Batocera horsfieldi* (Coleoptera: Cerambycidae) populations in different poplar forest types [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2018, 54 (3): 83-90. [李建庆, 梅增霞, 等. 不同林分杨树云斑天牛种群空间格局地统计学分析 [J]. 林业科学, 2018, 54 (3): 83-90]
- Li WJ, Dong YZ, Yao Q, et al. Research progress in the litchi fruit borer, *Conopomorpha sinensis* (Lepidoptera: Gracillariidae) [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2018, 61 (6): 721-732. [李文景, 董易之, 姚琼, 等. 荔枝蒂蛀虫研究进展 [J]. 昆虫学报, 2018, 61 (6): 721-732]
- Li Z, Ji R, Xie BY, et al. Review on the insect spatial ecology [J]. *Entomological Knowledge*, 2004, 1: 1-6. [李哲, 季荣, 谢宝瑜, 等. 论昆虫空间生态学研究 [J]. 昆虫知识, 2004, 1: 1-6]
- Liu YH. Structure and Dynamics of Arthropod Community in Fruit-grass Complex Ecosystem: A Case Study of American Apricot Plum [D]. Gansu: Ningxia University, 2009. [刘军和. 果草复合生态系统节肢动物群落结构和动态研究——以美国杏李为例 [D]. 甘肃: 宁夏大学, 2009]
- Liu SL. Studies on Chemical Mechanism of Oviposition Preference of *Conopomorpha sinensis* Bradley in Litchi Fruit [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2012. [刘少兰. 荔枝蒂蛀虫对荔枝果实产卵选择的化学机制研究 [D]. 广州: 华南农业大学, 2012]
- Liu YH, Zheng YM, Yan XF, et al. Geostatistical analysis on the spatial distribution of *Trabala vishnou gigantina* Yang early stage larvae [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38 (15): 5595-5601. [刘永华, 郑羽墨, 阎雄飞, 等. 栎黄枯叶蛾低龄幼虫空间分布的地统计学分析 [J]. 生态学报, 2018, 38 (15): 5595-5601]
- Lu YH, Zhang YJ, Wu KM. Host plant selection mechanisms and behavioral manipulation strategies of phytophagous insects [J]. *Acta*

- Ecologica Sinica*, 2008, 28 (10): 5113 - 5122. [陆宴辉, 张永军, 吴孔明. 植食性昆虫的寄主选择机理及行为调控策略 [J]. 生态学报, 2008, 28 (10): 5113 - 5122]
- Naranjo SE, Flint HM. Spatial distribution of adult *Bemisia tabaci* (Homoptera: Aleyrodidae) in cotton and development and validation of fixed-precision sampling plans for estimating population density [J]. *Environmental Entomology*, 1995, 24 (2): 261 - 270.
- Qin JD. Relationship between Insects and Plants [M]. Beijing: Science Press, 1987: 38 - 61. [钦俊德. 昆虫与植物的关系 [M]. 北京: 科学出版社, 1987: 38 - 61]
- Sun PJ, Luo YQ, Yao DH, et al. Geostatistical analysis of the spatial distribution of *Leucoma salicis* larvae and pupae [J]. *Journal of Plant Protection*, 2015, 42 (4): 604 - 611. [孙鹏举, 骆有庆, 姚东华, 等. 柳毒蛾幼虫和蛹的空间分布的地统计学分析 [J]. 植物保护学报, 2015, 42 (4): 604 - 611]
- Yan Z, Wang ZR. Spatial distribution pattern of larva of *Prodenia litura* (Fabricius) in sweet potato fields [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2011, 26 (5): 812 - 817. [鄢铮, 王正荣. 甘薯田斜纹夜蛾空间格局及抽样技术研究 [J]. 福建农业学报, 2011, 26 (5): 812 - 817]
- Wang QW. The Temporal - spatial Dynamics and Sampling Techniques of Yellow Peach Borer Larvae Population on Corn in Wudi County [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2016. [王其武. 无棣县玉米田桃蛀螟幼虫时空动态和抽样技术研究 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2016]
- Wang WJ, Lin XF, Zou YD, et al. Quantitative dynamics of adult population and 3 - D spatial pattern of *Ceoporus variabilis* Baly [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 10: 3232 - 3237. [汪文俊, 林雪飞, 邹运鼎, 等. 李肖叶甲成虫数量及三维空间格局动态 [J]. 生态学报, 2006, 10: 3232 - 3237]
- Yao Q, Xu S, Dong YZ, et al. Characterization of vitellogenin and vitellogenin receptor of *Conopomorpha sinensis* Bradley and their responses to sublethal concentrations of insecticide [J]. *Frontiers in Physiology*, 2018, 9: 1250
- Zeng FY, Wang T, Zong SX. Damage characteristics and spatial distribution of *Sphenoptera* sp. larvae [J]. *Forest Research*, 2012, 25 (2): 223 - 226. [曾凡勇, 王涛, 宗世祥. 沙蒿尖翅吉丁幼虫危害特性和空间格局研究 [J]. 林业科学研究, 2002, 25 (2): 223 - 226]
- Zhou Q, Zhang RJ, Gu DX. Review of geostatistics in applied insect population spatial structure [J]. *Zoological Research*, 1998, 19 (6): 482 - 488. [周强, 张润杰, 古德祥. 地质统计学在昆虫种群空间结构研究中的应用概述 [J]. 动物学研究, 1998, 19 (6): 482 - 488]
- Zong SX, Luo QQ, Xu ZC, et al. Spatial distribution regularities of *Holcocerus hippophaecolus* pupae [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 10: 3232 - 3237. [宗世祥, 骆有庆, 许志春, 等. 沙棘木蠹蛾蛹的空间分布 [J]. 生态学报, 2006, 10: 3232 - 3237]
- Zong SX, Luo QQ, Xu ZC, et al. Geostatistical analysis on spatial distribution of *Holcocerus hippophaecolus* eggs and larvae [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 4: 831 - 836. [宗世祥, 骆有庆, 许志春, 等. 沙棘木蠹蛾卵和幼虫空间分布的地统计学分析 [J]. 生态学报, 2005, 4: 831 - 836]
- Chen BX, Xu HM, Dong YZ, et al. Pest Identification and Control Atlas of Lichee and Longan [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2017: 2 - 3. [陈炳旭, 徐海明, 董易之, 等. 荔枝龙眼害虫识别与防治图册 [M]. 中国农业出版社, 2017: 2 - 3]