



• 研究报告 •

海岛型城市红火蚁发生程度空间格局及驱动因子——以福建海坛岛为例

陈宏¹, 冼晓青², 陈宜雪³, 林娜¹, 王苗苗¹, 李志鹏¹, 赵健^{1*}

1. 福建省农业科学院数字农业研究所, 福州 350001; 2. 中国农业科学院植物保护研究所, 北京 100193; 3. 平潭综合实验区农业农村发展服务中心, 福建平潭 350400

摘要: 红火蚁(*Solenopsis invicta*)是极具危险性的外来入侵物种, 研究海岛在城市化发展中红火蚁发生程度的空间格局及驱动因子, 对保护海岛生态安全具有重要意义。本研究以福建省东部的海坛岛为例, 运用核密度、空间自相关模型分析红火蚁发生程度空间格局, 进一步运用地理探测器揭示环境因子(8种)、社会经济因子(10种)以及两类因子交互作用对红火蚁发生程度的影响。结果显示: 研究区红火蚁发生程度空间密度表现为不均匀聚集特征, 农田发生程度最为严重(高-高聚集)、园林绿化用地次之(高-低聚集和低-低聚集)、居民区周边最轻, 且发生区域呈现正向空间自相关关系。18种影响因子对红火蚁发生程度空间分异解释度的 q 值范围为0.014–0.278。从整体上看, 两类因子对红火蚁发生程度的影响存在差异, 且社会经济因子 q 值平均数高于环境因子。对红火蚁发生程度影响最大的经济因子是农村人口数量($q = 0.278$), 其次为乡镇面积($q = 0.268$)。在环境因子中, 土壤类型($q = 0.172$)和年均降水量($q = 0.149$)的影响力较强。环境因子与社会经济因子两两叠加作用都将正向增强红火蚁的发生程度, 其中, 乡镇面积与邻近景区距离、年均降水量与邻近景区距离两组因子交互作用对红火蚁发生程度的影响力最大($q = 0.466$)。本研究结果表明农业耕作、城镇化建设中绿化苗木引种、道路交通运输对海岛型城市红火蚁发生程度的空间格局起到关键性作用。因此, 在防控中不仅要加强对调运苗木和往来货物的检疫, 还应采取因地制宜的防控措施, 有效抑制红火蚁种群数量和扩散速度。

关键词: 红火蚁; 海岛型城市; 空间格局; 地理探测器; 海坛岛

陈宏, 冼晓青, 陈宜雪, 林娜, 王苗苗, 李志鹏, 赵健 (2023) 海岛型城市红火蚁发生程度空间格局及驱动因子——以福建海坛岛为例. 生物多样性, 31, 22501. doi: 10.17520/biods.2022501.

Chen H, Xian XQ, Chen YX, Lin N, Wang MM, Li ZP, Zhao J (2023) Spatial pattern and driving factors on the prevalence of red imported fire ant (*Solenopsis invicta*) in island cities: A case study of Haitan Island, Fujian. Biodiversity Science, 31, 22501. doi: 10.17520/biods.2022501.

Spatial pattern and driving factors on the prevalence of red imported fire ant (*Solenopsis invicta*) in island cities: A case study of Haitan Island, Fujian

Hong Chen¹, Xiaqing Xian², Yixue Chen³, Na Lin¹, Miaomiao Wang¹, Zhipeng Li¹, Jian Zhao^{1*}

1 Institute of Digital Agriculture Research, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350001

2 Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193

3 Agricultural and Rural Development Service Center of Pingtan Comprehensive Experimental Area, Pingtan, Fujian 350400

ABSTRACT

Aims: The red imported fire ant (RIFA), *Solenopsis invicta*, is one of the world's worst invasive species, both environmentally and ecologically. In this study, we aim to analyze the spatial pattern of RIFA and the interactive mechanism of driving factors of its population density in island cities.

Methods: We used the Haitan Island as an example, the biggest island in Fujian Province, to analyze the spatial pattern of RIFA populations using Kernel density estimation and spatial autocorrelation models. We also used geographical

收稿日期: 2022-08-30; 接受日期: 2022-12-08

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFC2600403)、福建省农业科学院引导性科技创新项目(YDXM2021003)和福建省农业科学院科技创新团队建设项目(CXTD2021012-3)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: zhaojian@faas.cn

detector to elucidate the individual and interactive effects of both environmental factors (8 types) and socio-economic factors (10 types) on RIFA prevalence.

Results: The spatial density of RIFA populations in the study area was characterized by uneven distribution, with the highest population density occurring in farmland (high-high aggregation), followed by landscaping and greening land (high-low and low-low aggregation), and the lowest density around residential areas. There were positive spatial autocorrelations within the population range. The q value for the interpretation of 18 impact factors on the spatial differentiation ranged from 0.014 to 0.278. Overall, there were differences between the effects of the two types of factors on RIFA occurrence, and the mean q value of the socio-economic factors were higher than those of the environmental factors. The socio-economic factors that had the greatest impact on RIFA occurrence were rural population size ($q = 0.278$) and township area ($q = 0.268$). The soil classification ($q = 0.172$) and average annual precipitation ($q = 0.149$) were stronger than other environmental factors. The interaction between township area and distance to nearby scenic spot, and average annual precipitation and distance to nearby scenic spot, had the greatest impact on the occurrence of RIFA ($q = 0.466$). The combined effect of environmental and socio-economic factors positively enhanced the occurrence of RIFA.

Conclusion: Our study indicates that agricultural cultivation, seedling introduction in urban greening construction, and transportation significantly affect the spatial pattern of RIFA prevalence in island cities. As far as its prevention and control strategy is concerned, we should not only implement strict plant quarantine regulations on imported seedlings and cargo, but also take locally-appropriate measures to effectively reduce the population size and prevent the spread of RIFA.

Key words: *Solenopsis invicta*; island cities; spatial pattern; geographic detector; Haitan Island

中国是海洋大国,对海洋资源的开发利用是国家重要的发展战略。海岛作为海洋生态系统的重要组成部分,是实施海洋开发的重要依托^①。由于特殊的地理区位,海岛具有地貌类型和地域结构简单、生态系统的多样性指数小和稳定性弱等特点,加上稀缺的淡水资源造成海岛稀薄的土壤和不良的植被覆盖(赖华燕等, 2017; Zheng et al, 2020)。因此,海岛生态系统有限的自我调节能力使其更容易受到外来入侵物种的影响(Luo et al, 2022)。随着我国沿海地区经济高速发展,海岛城市化建设不断加速,人员、货物往来日益密切,外来有害生物入侵的风险正在加剧。此外,海岛比内陆地区拥有更多可入侵的途径,例如数量众多的港口,为入侵种提供了更多的便利(Seebens et al, 2017)。

红火蚁(*Solenopsis invicta*)作为最具破坏力的外来入侵物种之一,由于其极具侵略性的特性,能够对生态环境造成严重威胁(陆永跃和曾玲, 2015)。2003年,我国台湾地区最早发现红火蚁危害。台湾岛温暖湿润的气候为红火蚁提供了非常适合的栖息条件,红火蚁灾害在此能够全年发生。同时,海风的携带也扩大了红火蚁自然扩散的范围,加大了防控难度。自入侵以来,红火蚁不仅危及台湾岛生

态平衡,而且还破坏各种设施,并对人类健康和农业生产构成重大威胁(Liu et al, 2021)。由于与台湾岛拥有相似的地理环境和气候条件,我国其他位于长江口以南海域的海岛型城市,大部分都已发生红火蚁危害(陈宜雪, 2020; 韦丽逢等, 2021)。其中,位于福建省东部的海坛岛自2010年以来先后被确立为国际旅游岛、自由贸易试验区,城市建设热潮方兴未艾。与此同时,红火蚁对其危害也越发严重。2016年原农业部印发的《全国农业植物检疫性有害生物分布行政区名录(2016)》首次将海坛岛所属行政区列入红火蚁分布区(http://www.gov.cn/xinwen/2017-04/07/content_5183946.htm)。此后,红火蚁迅速蔓延至海坛岛各乡镇,对当地的农业生产和居民生活造成严重威胁。因此,开展海岛型城市红火蚁危害扩散研究,分析环境与社会经济发展相关因素对红火蚁发生的交互影响与制约,对制定海岛型城市红火蚁防控策略,促进海岛快速城市化进程与生态环境协调持续发展具有重要意义。

目前,国内外学者就红火蚁在各类生境及不同空间尺度下的适生分布、空间格局和种群扩散的分析、预测方法大致分为:回归模型、生态位模型和空间分析模型。回归模型是运用非线性回归模型(generalized additive model, GAM)、Iwao \ast -m回归分析法和Taylor \ast 幂模型等方法分析红火蚁分布范

① 李洋 (2017) 基于多要素的海岛型城市生态状况评价. 硕士学位论文, 福州大学, 福州.

围及差异性(李宁东等, 2006; 孙印兵, 2009^①; 许益鏊等, 2010)。生态位模型是基于CLIMEX、GARP等理论模型, 结合气候因子, 构建红火蚁分布模型, 预测其适生区域及入侵概率(薛大勇等, 2005; 陈林等, 2006; 沈文君等, 2008; 陈晓燕等, 2015)。空间分析模型是利用空间叠加、直线距离法、最近邻体法、Kriging空间插值、地理统计等方法研究红火蚁空间分布和种群扩散规律(陈晨等, 2006; 陆永跃等, 2008; 王磊等, 2012; 张翔等, 2015)。上述方法虽然从不同角度探讨了红火蚁的发生分布规律, 但是多数模型仅以统计学、气候学或地理学等单一因子为切入点, 且缺乏对社会经济因子的分析。海岛作为相对独立且特殊的生态系统, 红火蚁的发生分布是环境因子和社会经济因子共同驱动的结果。不同因子的影响力存在差异, 各类因子之间也存在着复杂的交互作用。因此, 研究环境因子和社会经济因子对海岛型城市红火蚁发生程度空间格局的影响及交互驱动机制, 能够更加全面、系统地揭示海岛在城市化发展中红火蚁的入侵、定殖和扩散规律以及背后的成因, 为海岛红火蚁防控提供科学依据。

1 研究区概况

研究区是位于福建省东部海域的海坛岛(25°16'–25°44' N, 119°32'–120°10' E)。海坛岛作为我国第五大岛、福建省第一大岛、平潭综合实验区主岛(图1), 南北长29 km, 东西宽19 km, 面积267.13 km², 东临台湾海峡, 夏长冬短、温热湿润, 年均气温19.6℃(高升等, 2018)。根据海坛岛地理位置和气候条件, 全岛均属于红火蚁适生范围(胡树泉等, 2008)。

2 研究方法

2.1 方法

2.1.1 红火蚁疫情调查及发生程度指标

本研究以红火蚁危害地块的蚁巢密度衡量红火蚁发生程度, 并参照国家标准《红火蚁疫情监测规程》(GB/T 23626-2009), 按蚁巢密度分级标准, 对危害地块的红火蚁发生程度进行分级(王福祥等,

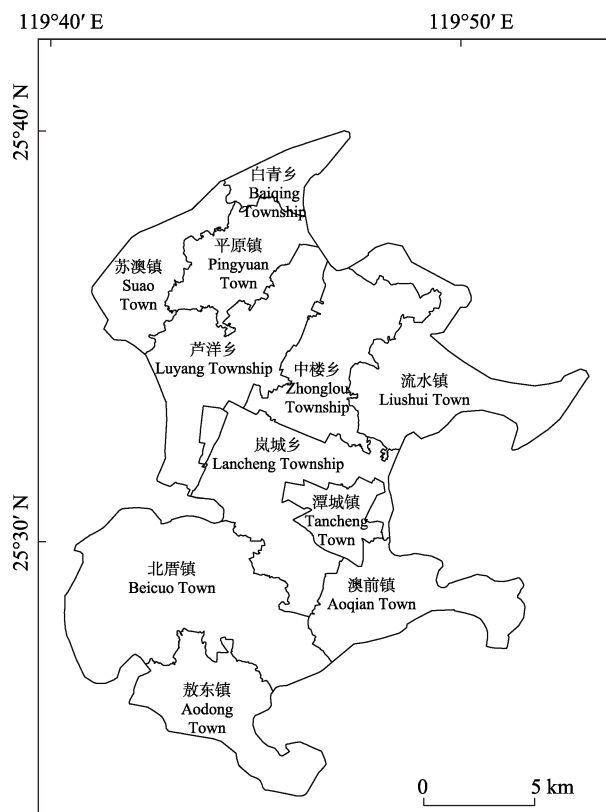


图1 研究区位置

Fig. 1 Location of study area

2009)。研究区红火蚁疫情数据来自于作者团队曾经参与的2017年平潭综合实验区主岛红火蚁疫情调查, 该调查数据是运用GIS空间分析技术, 基于调查人员采集的蚁巢定位数据, 依据红火蚁种群生活习性划定蚁巢周边30 m内的区域作为该蚁巢危害范围(陈宜雪, 2020; 陈宏等, 2021)。根据蚁巢空间分布形态划定的危害范围可以形成单个、多个甚至是连片的危害地块。蚁巢密度是通过危害地块大小以及包含的蚁巢数量进行测算, 其公式为:

$$\rho = m/s \quad (1)$$

式中, ρ 表示危害地块的蚁巢密度, m 表示危害地块内的蚁巢数量, s 表示危害地块面积。

2.1.2 核密度分析

核密度分析的理论基础是概率, 它基于地理事件可以发生在空间中的任何位置, 但发生的概率不一样(韩宗伟, 2017)。具体表现为红火蚁发生越密集的区域其周边发生红火蚁危害的概率也就越大, 红火蚁发生分布密集程度与核密度值呈正比, 其公式为:

① 孙印兵 (2009) 入侵红火蚁空间分布规律及监测技术研究. 硕士学位论文, 福建农林大学, 福州.

$$f(x, y) = \frac{1}{t^2} \sum_{i=1}^n \left[\frac{3}{\pi} \cdot \rho_i \left(1 - \left(\frac{d_i}{t} \right)^2 \right)^2 \right] \quad (2)$$

式中, $f(x, y)$ 是位于 (x, y) 位置红火蚁发生分布的核密度估计值, n 为红火蚁危害地块的数量, d_i 为 (x, y) 位置距离第 i 个红火蚁危害地块质心的距离, ρ_i 为第 i 个红火蚁危害地块的蚁巢密度, t 为核密度测算搜索半径的平滑参数。

2.1.3 空间自相关统计

空间自相关统计是用于衡量某位置上的属性与其他位置上属性之间的相互依赖程度(Anselin, 1995; 王琳和赵俊三, 2020)。本研究采用Moran指数来度量, 分为全局指数和局部指数。全局Moran指数 I 用于判断研究区内红火蚁整体发生程度是否存在聚集特征, I 绝对值越接近1, 表明红火蚁发生程度的空间相关性越明显, 其公式为:

$$I = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}} \times \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (\rho_i - \bar{\rho})(\rho_j - \bar{\rho})}{\sum_{i=1}^n (\rho_i - \bar{\rho})^2} \quad (i \neq j) \quad (3)$$

局部Moran指数 I_i 则表示地块 i 红火蚁发生程度与邻近红火蚁发生地块的聚集显著性, 其公式为:

$$I_i = \frac{n(\rho_i - \bar{\rho}) \sum_{j=1}^n W_{ij} (\rho_j - \bar{\rho})}{\sum_{i=1}^n (\rho_i - \bar{\rho})^2} \quad (i \neq j) \quad (4)$$

式中, n 为红火蚁危害地块的数量, ρ_i 、 ρ_j 分别为地块 i 和地块 j 的红火蚁发生密度, $\bar{\rho}$ 为所有地块红火蚁发生密度的均值, W_{ij} 为空间权重矩阵。

2.1.4 地理探测器分析

本研究运用地理探测器模型从空间分异性角度研究环境因子与社会经济因子对海岛型城市红火蚁发生程度空间格局的驱动机制, 其基本原理是: 假设研究区分为若干子区域, 如果子区域的红火蚁发生程度方差之和小于区域总方差, 则存在空间分异性; 如果影响因子两两之间的空间分布趋于一致, 则两者存在统计关联性(王劲峰和徐成东, 2017; 李志鹏等, 2019; 陈宽等, 2021)。本研究采用地理探测器的因子探测、生态探测和交互作用探测3种模型。模型分析所需样点是通过在红火蚁危害地块内进行200 m等间隔采样获得。影响因子的类型值均代

表样点所在空间位置的属性。模型分析的因变量为样点所在危害地块的蚁巢密度, 自变量为样点所在空间位置影响因子的类型值。

因子探测用于分析各影响因子对红火蚁发生程度空间分异的解释度, 用 q 值度量, 其公式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (5)$$

式中, L 表示被分析影响因子的分类数量或离散分级数量, N_h 和 σ_h^2 分别为类别 h 包含的红火蚁危害地块中样点的数量和蚁巢密度方差, N 和 σ^2 分别为研究区内所有红火蚁危害地块中样点的数量和蚁巢密度方差。 q 的值域为 $[0, 1]$, q 值越大则表示影响因子对红火蚁发生程度的影响力越强, 反之则越弱。

生态探测用于比较两个因子对红火蚁发生程度的影响是否有显著差异, 以 F 统计量来衡量, 其公式为:

$$F = \frac{N_{x1} (N_{x2} - 1) \sum_{h=1}^{L1} N_h \sigma_h^2}{N_{x2} (N_{x1} - 1) \sum_{h=1}^{L2} N_h \sigma_h^2} \quad (6)$$

式中, N_{x1} 和 N_{x2} 分别表示因子 $x1$ 和 $x2$ 红火蚁危害地块中样点的数量, $L1$ 和 $L2$ 分别表示因子 $x1$ 和 $x2$ 分类数量或离散分级数量, $\sum_{h=1}^{L1} N_h \sigma_h^2$ 和 $\sum_{h=1}^{L2} N_h \sigma_h^2$ 分别表示由因子 $x1$ 和 $x2$ 形成的分类中样点所在发生地块蚁巢密度的方差和。

交互作用探测可以识别不同影响因子之间的交互驱动作用, 即影响因子 $x1$ 和 $x2$ 共同驱动时是否会增加或减弱对红火蚁发生程度的影响力, 或这些因子对红火蚁发生程度的影响是否相互独立。两个影响因子之间的关系如表1所示。

2.2 数据来源与处理

2.2.1 数据来源

我们综合考虑了海坛岛自然气候条件, 以及特有的社会、经济、交通等状况, 选择影响红火蚁发生程度的18种因子。8种环境因子包括: 数字高程模型(digital elevation model, DEM)、坡度、地表覆盖、归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)、土壤类型、年均降水量、年积温和干燥度; 10种社会经济因子包括: 夜间灯光、乡镇面积、村庄数量、农村人口数量、路网密度、邻近道

路距离、邻近道路类型、邻近景区距离、邻近码头距离、离跨海大桥距离。影响因子数据来自网络公开数据、研究区遥感影像解析和统计年鉴资料(国家统计局农村社会经济调查司, 2019)。为保证研究结果准确, 影响因子数据均采用与红火蚁疫情调查时间相近年份的数据集。各影响因子数据来源如表2所示。此外, 海坛岛海岸边界数据来自国家基础地理信息中心(<https://www.webmap.cn>)。

2.2.2 数据处理

数据处理包括数据提取、数据离散化、数据采样和因子共线性检测。在数据提取中: 通过DEM地形分析生成坡度数据; 采用监督分类法对2017年4月2日的Landsat 8卫星遥感影像进行目视解译生成

地表覆盖数据; 通过对2017年4月2日的Landsat 8卫星遥感影像进行定量分析生成NDVI数据; 乡镇面积、村庄数量、农村人口数量3类数据是将研究区乡镇矢量数据与统计年鉴进行属性关联, 形成空间矢量专题图层; 路网密度是通过对研究区道路矢量数据进行网格化分析, 统计每公里网格内道路长度; 邻近道路距离和类型、邻近景区距离、邻近码头距离、离跨海大桥距离是通过对研究区道路矢量数据和相关要素空间位置数据进行邻近分析, 获得与样点邻近要素的距离。由于地理探测器要求输入的自变量必须为类型量, 综合运用自然间断点法和分位数法对连续型影响因子数据进行离散化处理, 从中选择因子影响力 q 值最大的离散分级结果。为消除影响因子之间的共线性问题, 对采集的样点变量与自变量进行多重共线性诊断, 保证各自变量的方差膨胀因子(variance inflation factor, VIF值)小于10。

本研究涉及的核密度分析、空间自相关统计以及分析结果的地图绘制使用ArcGIS Desktop软件完成, 影响因子共线性检测使用SPSS软件完成, 地理探测器分析使用Geodetector软件完成, 影响因子分析结果制图使用ChiPlot在线制图工具(<https://www.chiplot.online>)完成。

表1 影响因子交互关系及作用

Table 1 Interaction relationship and effect of impact factors

交互关系 Interaction relationship	交互作用 Interaction effect
$q(x1 \cap x2) < \min(q(x1), q(x2))$	非线性减弱 Nonlinear attenuation
$\min(q(x1), q(x2)) < q(x1 \cap x2) < \max(q(x1), q(x2))$	单因子非线性减弱 One-factor nonlinear attenuation
$q(x1 \cap x2) > \max(q(x1), q(x2))$	双因子增强 Two-factor enhancement
$q(x1 \cap x2) = q(x1) + q(x2)$	独立 Independence
$q(x1 \cap x2) > q(x1) + q(x2)$	非线性增强 Nonlinear enhancement

表2 红火蚁发生程度空间格局影响因子及数据来源

Table 2 Data sources for impact factors on spatial pattern of occurrence degree of *Solenopsis invicta*

类别 Category	影响因子 Impact factors	数据来源 Data sources
环境因子 Environmental factors	数字高程模型 Digital elevation model (DEM) (x1)	SRTM (https://srtm.csi.cgiar.org)
	坡度 Slope (x2)	通过分析DEM数据获得 Obtained by analyzing DEM data
	地表覆盖 Land cover (x3)	通过解析Landsat 8卫星影像获得 Obtained by analyzing Landsat 8 satellite images
	归一化植被指数 Normalized difference vegetation index (NDVI) (x4)	
	土壤类型 Soil classification (x5)	资源环境科学与数据中心 Resource and Environment Science and Data Center (www.resdc.cn)
	年均降水量 Average annual precipitation (x6)	
	年积温 Annual cumulative temperature (x7)	
	干燥度 Drought index (x8)	
社会经济因子 Socio-economic factors	夜间灯光 Night light (x9)	珞珈一号数据 LuoJia-1 Data (http://59.175.109.173:8888/)
	乡镇面积 Township area (x10)	中国县域统计年鉴(乡镇卷): 2018 China Statistical Yearbook (Township): 2018
	村庄数量 Number of villages (x11)	(国家统计局农村社会经济调查司, 2019)
	农村人口数量 Rural population size (x12)	
	路网密度 Road network density (x13)	通过分析OSM数据获得 Obtained by analyzing OSM data
	邻近道路距离 Distance to nearby road (x14)	
	邻近道路类型 Adjacent road type (x15)	
	邻近景区距离 Distance to nearby scenic spot (x16)	
	邻近码头距离 Distance to nearby wharf (x17)	
	离跨海大桥距离 Distance to the cross-sea bridge (x18)	

3 结果

3.1 红火蚁发生程度空间格局

3.1.1 红火蚁发生程度空间分布

根据2017年红火蚁疫情普查结果,海坛岛11个乡镇均有红火蚁危害发生,调查发现红火蚁活动蚁巢69,182个,危害面积2,826.88 ha,形成危害地块1,178个。红火蚁发生程度以轻度(一级)和中度(二级)为主,占总体危害面积的78%。未发现严重(五级)地块。在分布上,中偏重(三级)和重度(四级)发生地块主要集中在中北部芦洋乡、中楼乡和岚城乡。在生境类型上,以农田区域发生面积最大,其次为道路周边的园林绿化用地,居民区周边红火蚁发生面积最小,中偏重和重度发生地块主要集中在农田区域。在分布形态上,农田区域多呈片状分布,道路周边的园林绿化用地多呈条带状分布,居民区周边呈零星点状分布。海坛岛红火蚁发生分布状况如图2(a)所示。

3.1.2 红火蚁发生程度空间核密度

核密度函数预测结果表明,海坛岛红火蚁发生程度空间密度呈现显著的不均匀聚集特征:以岚城乡、北厝镇、芦洋乡、流水镇4个乡镇为中心呈现带状的高密度和中高密度区域,并以此为中心向周边辐射。与上述乡镇相邻的敖东镇、澳前镇、中楼乡、平原镇、潭城镇大部分区域为中密度区,而处

于海坛岛东北部的苏澳镇和白青乡为低密度区,如图2(b)所示。根据疫情普查结果,高密度区为海坛岛最早发现的红火蚁入侵点。结合地表覆盖和道路数据,高密度与中高密度区域主要集中在农田区域、新建城区和新建道路周边的新植绿化带。

3.1.3 红火蚁危害地块空间自相关性

海坛岛红火蚁危害地块全局Moran指数 I 为0.012376,运用 P 值和 z 值进行统计量检验: P 值为0.000086 ($P < 0.001$), z 得分为3.92826,统计量检验达显著水平。结果显示海坛岛红火蚁危害地块的发生程度呈现正空间自相关关系。进一步采用局部Moran指数 I_i 分析局部集聚特征,结合局部空间关联指标图(local indicators of spatial association, LISA)进行空间可视化展示。如图2(c)所示,红火蚁发生程度高-高聚集区域集中在北部中楼乡和平原镇的农田区域,发生程度高-低聚集区域和低-低聚集区域则零散分布于北厝镇、敖东镇、澳前镇和潭城镇主干道及新建城区周边,低-高聚集区域所占比例较少,零星分布于北部中楼乡和平原镇的居民区。空间自相关分析同样验证了海坛岛红火蚁发生程度空间格局特征表现为农田最为严重、城镇化建设中新植园林绿化用地次之、居民地周边最轻。

3.2 红火蚁发生程度影响因子及交互作用

3.2.1 因子影响力探测

18种影响因子对红火蚁发生程度空间分异解

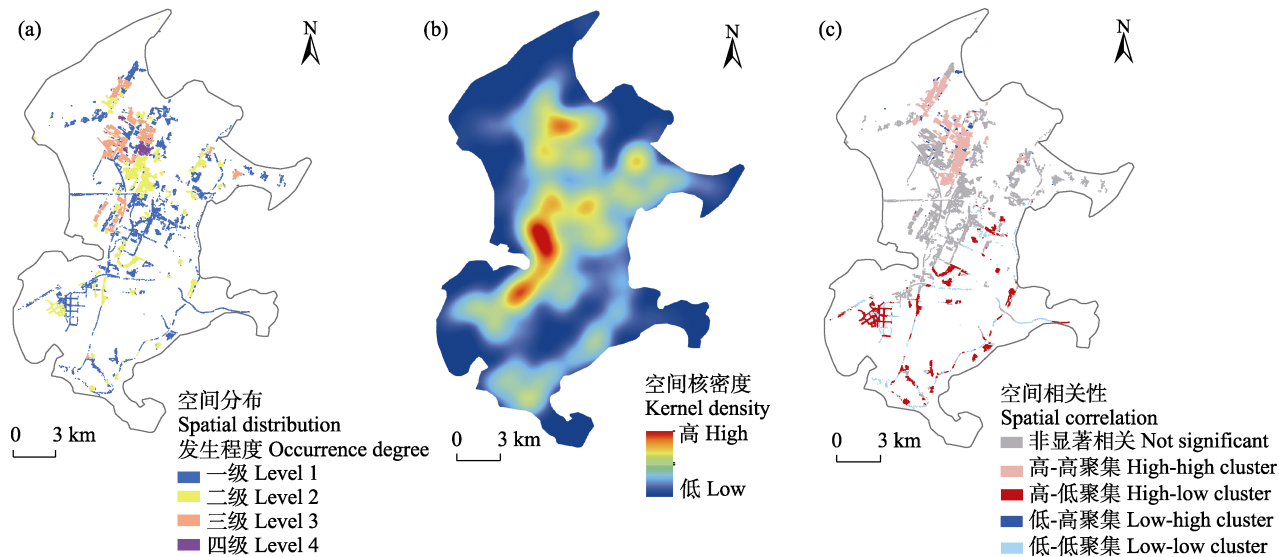


图2 海坛岛红火蚁发生程度空间格局

Fig. 2 Spatial pattern of occurrence degree of *Solenopsis invicta* in Haitan Island

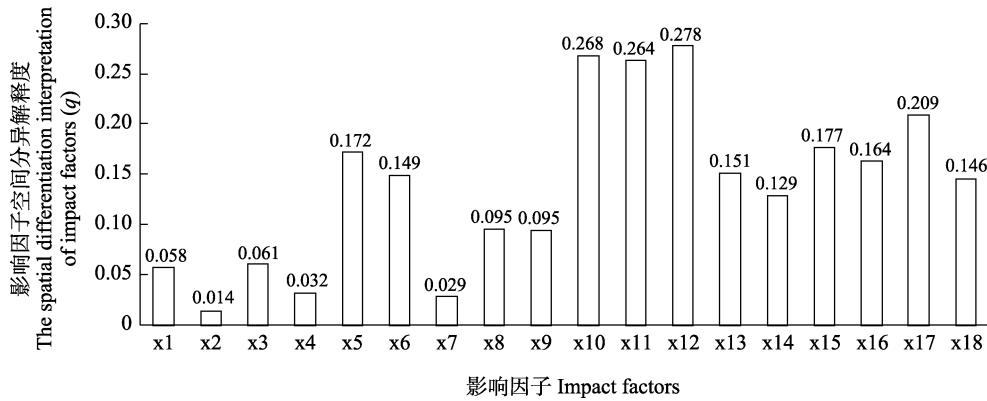


图3 红火蚁发生程度影响因子空间分异解释度探测结果。影响因子代号含义见表2。
Fig. 3 Detection results of spatial differentiation interpretation of factors affecting the occurrence degree of *Solenopsis invicta*. See Table 2 for the meanings of impact factor codes.

释度的 q 值范围为0.014–0.278, 所有影响因子满足 $P < 0.05$ 的显著验证(图3)。其中: 农村人口数量(x12) q 值最高(0.278), 坡度(x2) q 值最低(0.014)。社会经济因子影响力平均 q 值高于环境因子。影响力排名前三的因子均为社会经济因子, 且都与农业农村相关。排名4-5位的因子是与交通运输相关的邻近码头距离(x17)和邻近道路类型(x15)。在环境因子中, 土壤类型(x5)和年均降水量(x6)的影响力较强, q 值大于0.1; 其余环境因子的 q 值均低于0.1。结果显示, 研究区社会经济因子对红火蚁发生程度的影响力水平高于环境因子。

3.2.2 因子生态探测

生态探测模型分析表明, 社会经济因子相互之间对红火蚁发生程度的影响不存在显著差异(图4)。在环境因子中, 土壤类型(x5)和年均降水量(x6) 2个影响力较强的因子与地形、植被相关的因子存在显著的影响力差异, 其余环境因子之间不存在显著差异。就两类因子整体而言, 环境因子与社会经济因子对红火蚁发生程度的影响力存在差异。

3.2.3 因子交互作用探测

根据因子交互作用探测结果, 任意两种因子交互作用对红火蚁发生程度的影响力都大于单一因子的独立影响力, 不论是环境因子还是社会经济因子, 叠加作用都将正向增强红火蚁发生的程度(图5)。其中: 乡镇面积(x10)与邻近景区距离(x16)、年均降水量(x6)与邻近景区距离(x16)两组因子交互作用对红火蚁发生程度的影响力最大, q 值为0.466。同时, 在18种因子中, 坡度(x2)、NDVI指数(x4)、邻近

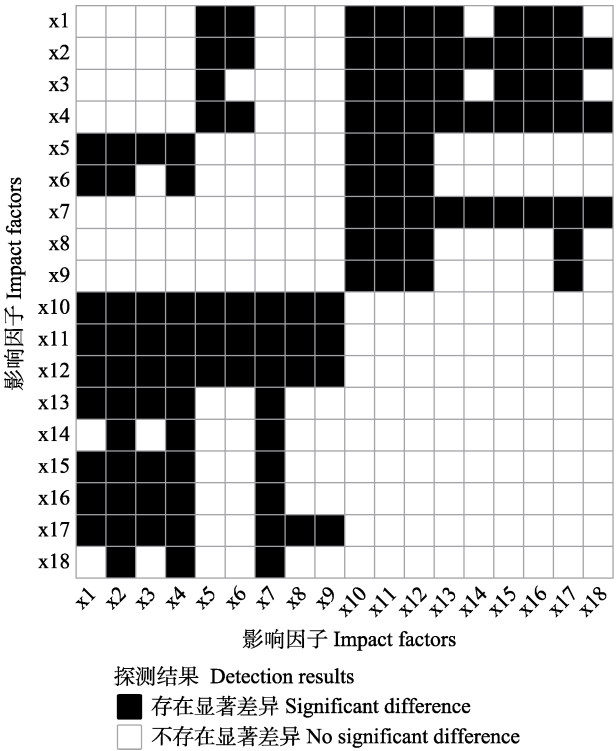


图4 红火蚁发生程度影响因子生态探测结果。影响因子代号含义见表2, F 检验显著性水平为0.05。
Fig. 4 Ecological detection results of the impact factors of occurrence degree of *Solenopsis invicta*. See Table 2 for the meanings of impact factor codes. The significance level of F test is 0.05.

景区距离(x16)、邻近码头距离(x17)、离跨海大桥距离(x18)容易受到其他因子的影响, 能够分别与8种以上不同因子交互作用后表现为非线性增强。因此, 海坛岛的地形、植被、旅游资源分布、码头分布、跨海大桥等特有条件与其他环境、社会经济因子叠

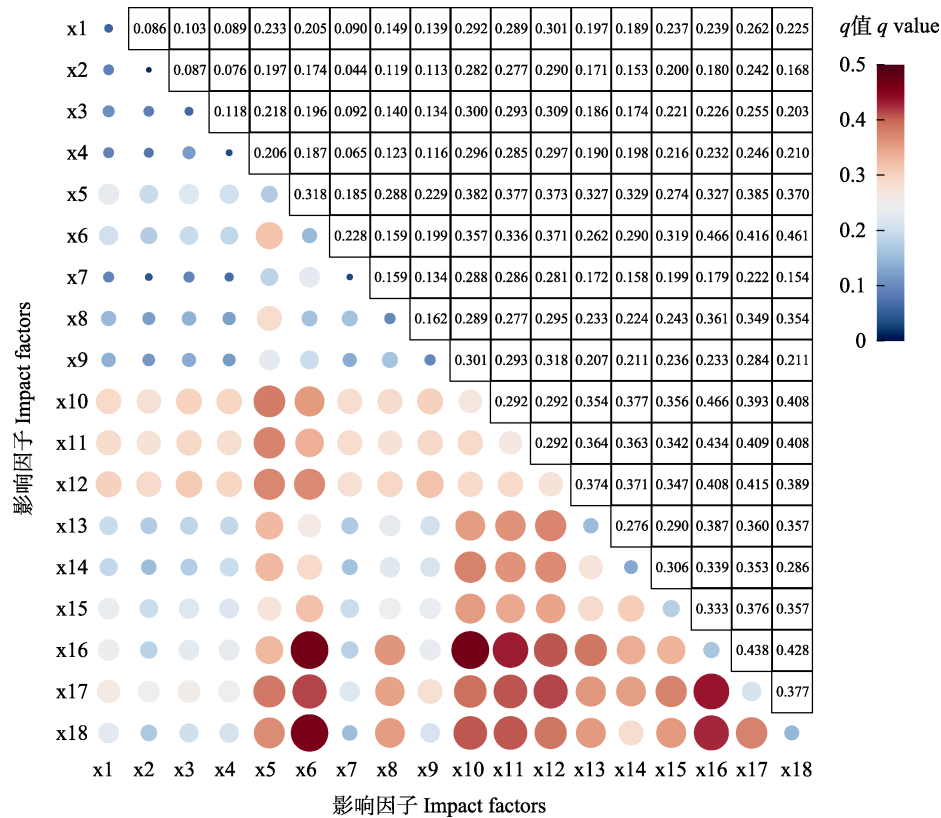


图5 红火蚁发生程度影响因子交互探测结果。影响因子代号含义见表2。
Fig. 5 Interactive detection results of the impact factors of occurrence degree of *Solenopsis invicta*. See Table 2 for the meanings of impact factor codes.

加作用后对红火蚁发生程度具有显著增强效果。

4 讨论

本研究以海坛岛为例,研究了红火蚁发生程度空间格局及其驱动因子的交互作用机制。研究结果显示海岛在城镇化建设过程中所引发的红火蚁发生程度空间格局呈现不均匀聚集,社会经济因子对红火蚁发生程度的影响力水平高于环境因子,农业耕作、城镇化建设中绿化苗木引种、道路交通运输在红火蚁入侵、定殖和扩散过程中起到关键性作用,防控时可采取针对性措施,提高防控效率。

4.1 海坛岛红火蚁入侵与扩散特征

海岛型城市脆弱的生态气候条件和频繁的人类活动使其相较于非海岛区域更容易遭受红火蚁的入侵(欧健, 2008; Seebens et al, 2017)。海坛岛红火蚁主要入侵方式是通过带有活体的草皮、绿化苗木、建筑材料的载体输入(陈宜雪, 2020)。这与非海岛型城市的红火蚁远距离入侵方式基本一致(陆永

跃等, 2008)。

在入侵后的短距离传播中,除了依靠载体的携带运输之外,海岛区域常年大风,极大促进了红火蚁的自然扩散。从2013年首次发现红火蚁到2017年扩散至全岛11个乡镇,如果以海坛岛南北长度进行测算,红火蚁扩散速度可达到每年7.2 km,高于华南地区非海岛区域红火蚁短距离传播的研究案例(陆永跃等, 2008)。但即使在这样的扩散速度下,红火蚁危害并未覆盖海坛岛每个角落,红火蚁发生程度核密度分析和空间自相关分析结果显示,扩散趋势在区域以及生境类型上存在差异。海坛岛红火蚁扩散是以多个高密度区域为中心向四周辐射。然而在北部君山和南部敖东镇的山地,受地形因素影响,红火蚁扩散趋势发生改变,出现局部小的低密度区域。

在海坛岛各类红火蚁发生生境中,农田红火蚁发生程度最为严重,新植园林绿化用地次之,居民区周边最轻。这与华南地区非海岛区域典型生境中

红火蚁发生状况(许益鏊等, 2010)基本一致。在危害地块发生程度聚集性上, 新植园林绿化用地表现为高-低聚集, 农田表现为高-高聚集。说明城镇化建设和道路周边的新植绿化地是红火蚁早期入侵生境。与周边生境相比, 这些区域红火蚁危害地块更为集中、发生程度也更高。当红火蚁入侵农田后, 种群迅速定殖、扩散, 在农田生境内形成较为稳定的大范围聚集形态。

4.2 多因子对海坛岛红火蚁发生程度的驱动效应

红火蚁通过飞行方式的自然扩散和定殖往往受到复杂环境的影响, 扩散距离和速度非常有限。由于绿化苗木、沙土、建材等常常是红火蚁扩散的载体, 因此人为传播很大程度上影响着红火蚁的筑巢(许益鏊等, 2006)。本研究结果同样印证了社会经济因子对海坛岛红火蚁发生程度的影响力大于环境因子。

在18种影响因子中, 排名前三的农村人口数量、乡镇面积和村庄数量都是与农业农村相关的因子。虽然, 绿化苗木引种是红火蚁长距离传入的主要因素, 且入侵后人为操作和经常性的绿化苗木栽植、移除能够促进红火蚁进一步传播扩散(陆永跃等, 2008)。但是, 在红火蚁进入农田后, 由于海坛岛农业用水匮乏, 农田以旱作为主, 加上适宜的气候、特有的农事耕作习惯、不规范防治处置, 导致红火蚁种群数量在短期内迅速扩大。在红火蚁疫情普查时, 有村民反映对于农田发现的红火蚁蚁巢经常采用火烧、铲除或使用触杀类农药喷洒等不规范防治措施。此外, 由于海坛岛水产资源丰富, 当地时有将海鲜壳、虾头等海鲜废料搅碎后回填农田以提升土壤肥力的耕作习惯, 这些海鲜废料为红火蚁种群提供了丰富的食物, 从而加剧了红火蚁的扩散, 促成了农田区域红火蚁种群密度的稳定, 导致海坛岛农田与田埂的红火蚁发生程度没有显著差异。另一方面, 农田区域充足的食物也降低了红火蚁对饵剂的取食性, 增加了防控难度。上述特征也表现出了海岛区域与非海岛区域农田生态系统的红火蚁发生程度空间分布特征的差异性(李宁东等, 2006)。

近年来, 城镇建设的大量投入促进海坛岛道路交通条件得到大幅度提升, 同时所引发的红火蚁危害也日益凸显。根据分析结果, 除了农业农村因子, 道路交通因子对海岛型城市红火蚁发生程度

也有着较大的影响。有研究指出在海岛区域农业用地、交通用地和土地利用变化地区发生红火蚁的概率大于自然覆盖土地, 以及在邻近道路150–350 m区域内的红火蚁发生概率大于其他地区(Lin et al, 2022)。而海坛岛红火蚁发生程度空间格局也验证了上述结论。

4.3 多尺度红火蚁发生程度空间格局及驱动因子研究的复杂性


在区域尺度上分析外来入侵物种的空间分布格局及其影响因子对预测生物入侵的影响及入侵种控制管理具有重要意义(王国欢等, 2017)。地理探测器已被运用于区域或更大空间尺度农林有害生物空间格局驱动力的研究(李志鹏等, 2019; 吴晓春和肖桂荣, 2020; 刘德庆等, 2022)。根据《中华人民共和国生物安全法》规定, 县级以上地方人民政府有关部门根据职责分工, 负责生物安全相关工作。本研究以县域尺度为切入点, 运用地理探测器探讨在新兴海岛型城市建设过程中影响红火蚁发生程度空间格局的驱动因子, 结果表明地理探测器同样适用于县域尺度红火蚁发生程度空间格局驱动因子的分析。但是, 在县域尺度上环境因子的空间异质性较小, 而社会经济因子则有可能因地域发展的不平衡而存在较大差异, 从而导致在红火蚁发生程度的影响力水平上, 社会经济因子大于环境因子。由于我国幅员辽阔、生境多样, 在不同区域尺度以及生境类型下就社会经济因子与环境因子对红火蚁发生程度影响力水平的差异化, 值得在后续的研究中进一步探讨。


4.4 海岛型城市红火蚁防控策略

在海岛型城市的红火蚁传入、定殖、扩散过程中, 输入性的绿化苗木引种是外因, 而农业耕作、道路交通运输、城镇化建设以及自然气候条件是内因。红火蚁传入扩散的主要原因之一就是在进境检疫中忽视了对红火蚁的检查、阻截和除害处理(陆永跃和曾玲, 2015)。根据本研究结果, 海岛型城市在红火蚁疫情防控中应加强对调运苗木、货物等载体的检疫。发现新发疫情点应及时灭杀。对于已经入侵的区域, 要结合入侵地的生境类型、地形以及耕作习惯, 采取规范药剂投放、改变耕作模式、加强防效追踪等措施。同时, 加强对农田、新植绿化地等易受红火蚁入侵区域的监测, 及时发现防控薄弱

环节, 避免防控遗漏。此外, 海岛型城市可以利用自身在地理区位上的封闭优势, 在码头、跨海大桥出入口设置检查关卡, 及时发现并拦截带有红火蚁的货物, 从源头上控制红火蚁的传入。

ORCID

陈宏  <https://orcid.org/0009-0008-5342-0195>

赵健  <https://orcid.org/0000-0003-2364-0687>

参考文献

- Anselin L (1995) Local indicators of spatial association—LISA. *Geographical Analysis*, 27, 93–115.
- Chen C, Gong WR, Hu BS, Zhou GL, Bao YX, Liu FQ (2006) Potential establishment areas of *Solenopsis invicta* in China: A prediction based on GIS. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 17, 2093–2097. (in Chinese with English abstract) [陈晨, 龚伟荣, 胡白石, 周国梁, 包云轩, 刘凤权 (2006) 基于地理信息系统的红火蚁在中国适生区的预测. *应用生态学报*, 17, 2093–2097.]
- Chen H, Chen YX, Lin N, Li ZP, Chi MX, Zhao J (2021) Construction and application of *Solenopsis invicta* Buren epidemic investigation system based on mobile location based service. *Plant Quarantine*, 35(1), 55–60. (in Chinese with English abstract) [陈宏, 陈宜雪, 林娜, 李志鹏, 池美香, 赵健 (2021) 基于移动LBS服务的红火蚁疫情调查系统构建与应用. *植物检疫*, 35(1), 55–60.]
- Chen K, Yang CC, Bai LG, Chen Y, Liu R, Chao LM (2021) Effects of natural and human factors on vegetation normalized difference vegetation index based on geographical detectors in Inner Mongolia. *Acta Ecologica Sinica*, 41, 4963–4975. (in Chinese with English abstract) [陈宽, 杨晨晨, 白力嘎, 陈瑜, 刘锐, 潮洛濛 (2021) 基于地理探测器的内蒙古自然和人为因素对植被NDVI变化的影响. *生态学报*, 41, 4963–4975.]
- Chen L, Korzukhin MD, Cheng DF, Lu QG, Wang FX (2006) The analysis for the red imported fire ant *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae) distribution in China based on 3S technology, climate model and colony dynamic model. *Journal of Plant Protection*, 33, 384–390. (in Chinese with English abstract) [陈林, Michael D. Korzukhin, 程登发, 陆庆光, 王福祥 (2006) 基于GIS和气候、种群动态模型的红火蚁适生性分析. *植物保护学报*, 33, 384–390.]
- Chen XY, Ma P, Li YC, Hu HF, Li ZY, Gui FR (2015) The prediction on potential distribution of *Solenopsis invicta* in Yunnan Province based on CLIMEX and ArcGIS. *Plant Quarantine*, 29(3), 34–39. (in Chinese with English abstract) [陈晓燕, 马平, 李永川, 胡慧芬, 李正跃, 桂富荣 (2015) 基于CLIMEX和ArcGIS预测红火蚁在云南的潜在适生区. *植物检疫*, 29(3), 34–39.]
- Chen YX (2020) Investigation of *Solenopsis invicta* Buren on

- the main island of Pingtan Comprehensive Experimental Area. *Plant Quarantine*, 34(2), 77–80. (in Chinese with English abstract) [陈宜雪 (2020) 平潭综合实验区主岛红火蚁疫情调查. *植物检疫*, 34(2), 77–80.]
- Department of Rural Socio-Economic Survey, National Bureau of Statistics (2019) *China Statistical Yearbook (Township): 2018*. China Statistics Press, Beijing. (in Chinese) [国家统计局农村社会经济调查司 (2019) *中国县域统计年鉴—2018*. 中国统计出版社, 北京.]
- Gao S, Cao GX, Hong T, Zhao L, Xu M (2018) Dynamic evaluation of ecological security and its driving factors in the process of urbanization of Islands: A case study of Pingtan Island. *Acta Ecologica Sinica*, 38, 2503–2511. (in Chinese with English abstract) [高升, 曹广喜, 洪滔, 赵林, 徐敏 (2018) 海岛城市化过程中的生态安全动态评价与驱动力分析——以平潭岛为例. *生态学报*, 38, 2503–2511.]
- Han ZW (2017) Geographical distribution and affecting factors of the important agricultural heritage systems in China. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 38(2), 97–104. (in Chinese with English abstract) [韩宗伟 (2017) 中国农业文化遗产的空间分布特征及影响因素分析. *中国农业资源与区划*, 38(2), 97–104.]
- Hu SQ, Xu XR, Zhou WC, Zhang H, Ning ZY (2008) Potential geographical distribution model of *Solenopsis invicta* Buren in China. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition)*, 37, 205–209. (in Chinese with English abstract) [胡树泉, 徐学荣, 周卫川, 张辉, 宁昭玉 (2008) 红火蚁在中国的潜在地理分布预测模型. *福建农林大学学报(自然科学版)*, 37, 205–209.]
- Lai HY, Huang BQ, Wu PF (2017) Analysis of the main impact factors on soil erosion in island city—An example of Pingtan Island, Fujian Province. *Research of Soil and Water Conservation*, 24(1), 12–17. (in Chinese with English abstract) [赖华燕, 黄博强, 吴鹏飞 (2017) 海岛型城市的土壤侵蚀状况及主要影响因子分析——以福建省平潭岛为例. *水土保持研究*, 24(1), 12–17.]
- Li ND, Lu YY, Zeng L, Liang GW, Xu YJ (2006) Study on types of environment, spatial distribution and sampling of red imported fire ant *Solenopsis invicta* Buren active mounds in Wuchuan, Guangdong Province. *Journal of Huazhong Agricultural University (Natural Science Edition)*, 25, 31–36. (in Chinese with English abstract) [李宁东, 陆永跃, 曾玲, 梁广文, 许益鏊 (2006) 广东省吴川红火蚁生境类型、空间分布和抽样技术的研究. *华中农业大学学报*, 25, 31–36.]
- Li ZP, Zhao J, Chen YB, Chen H, Lin N, Qiu RZ (2019) Spatial variation and driving factors of invasive plants in Fujian Province, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 30, 2682–2690. (in Chinese with English abstract) [李志鹏, 赵健, 陈业滨, 陈宏, 林娜, 邱荣洲 (2019) 福

- 建省主要入侵植物空间分异及其影响因素. 应用生态学报, 30, 2682–2690.]
- Lin CH, Liu YH, Huang RN, Lin CC, Liu HKH, Wen TH (2022) Modeling geographical invasions of *Solenopsis invicta* influenced by land-use patterns. Scientific Reports, 12, 11733.
- Liu DQ, Zhang TY, Zhang XL, Zong SX, Huang JX (2022) Spatial stratified heterogeneity and driving force of *Anoplophora glabripennis* in North China. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 53(1), 215–223, 369. (in Chinese with English abstract) [刘德庆, 张天媛, 张晓丽, 宗世祥, 黄季夏 (2022) 华北地区光肩星天牛空间分异性及驱动因素研究. 农业机械学报, 53(1), 215–223, 369.]
- Liu YS, Huang SA, Lin IL, Lin CC, Lai HK, Yang CH, Huang RN (2021) Establishment and social impacts of the red imported fire ant, *Solenopsis invicta*, (Hymenoptera: Formicidae) in Taiwan. International Journal of Environmental Research and Public Health, 18, 5055.
- Lu YY, Liang GW, Zeng L (2008) Study on expansion pattern of red imported fire ant, *Solenopsis invicta* Buren, in South China. Scientia Agricultura Sinica, 41, 1053–1063. (in Chinese with English abstract) [陆永跃, 梁广文, 曾玲 (2008) 华南地区红火蚁局域和长距离扩散规律研究. 中国农业科学, 41, 1053–1063.]
- Lu YY, Zeng L (2015) 10 years after red imported fire ant found to invade China: History, current situation and trend of its infestation. Plant Quarantine, 29(2), 1–6. (in Chinese with English abstract) [陆永跃, 曾玲 (2015) 发现红火蚁入侵中国10年: 发生历史、现状与趋势. 植物检疫, 29(2), 1–6.]
- Luo MX, Xiao LF, Chen XH, Lin KQ, Liu B, He ZM, Liu JF, Zheng SQ (2022) Invasive alien plants and invasion risk assessment on Pingtan Island. Sustainability, 14, 923.
- Ou J (2008) Study on Risk Assessment for Alien Species in Xiamen. PhD dissertation, Xiamen University, Xiamen. (in Chinese with English abstract) [欧健 (2008) 厦门外来物种入侵风险评估研究. 博士学位论文, 厦门大学, 厦门.]
- Seebens H, Blackburn TM, Dyer EE, Genovesi P, Hulme PE, Jeschke JM, Pagad S, Pyšek P, Winter M, Arianoutsou M, Bacher S, Blasius B, Brundu G, Capinha C, Celesti-Grapo L, Dawson W, Dullinger S, Fuentes N, Jäger H, Kartesz J, Kenis M, Kreft H, Kühn I, Lenzner B, Liebhold A, Mosena A, Moser D, Nishino M, Pearman D, Pergl J, Rabitsch W, Rojas-Sandoval J, Roques A, Rorke S, Rossinelli S, Roy HE, Scalera R, Schindler S, Štajerová K, Tokarska-Guzik B, van Kleunen M, Walker K, Weigelt P, Yamanaka T, Essl F (2017) No saturation in the accumulation of alien species worldwide. Nature Communications, 8, 14435.
- Shen WJ, Wang YN, Wan FH (2008) Application of analogy deviation to predict potential distribution of *Solenopsis invicta* Buren (Hymenoptera: Formicidae) and its invasion probability in China. Scientia Agricultura Sinica, 41, 1673–1683. (in Chinese with English abstract) [沈文君, 王雅男, 万方浩 (2008) 应用相似离度法预测红火蚁在中国适生区域及其入侵概率. 中国农业科学, 41, 1673–1683.]
- Wang FX, Wang L, Li XN, Zeng L, Lu YY, Wu SH, Zhu JQ (2009) Guidelines for Quarantine Surveillance of *Solenopsis invicta* Buren. Standards Press of China, Beijing. (in Chinese) [王福祥, 王琳, 李小妮, 曾玲, 陆永跃, 吴仕豪, 朱景全 (2009) 红火蚁疫情监测规程. 中国标准出版社, 北京.]
- Wang GH, Bai F, Sang WG (2017) Spatial distribution of invasive alien animal and plant species and its influencing factors in China. Plant Science Journal, 35, 513–524. (in Chinese with English abstract) [王国欢, 白帆, 桑卫国 (2017) 中国外来入侵生物的空间分布格局及其影响因素. 植物科学学报, 35, 513–524.]
- Wang JF, Xu CD (2017) Geodetector: Principle and prospective. Acta Geographica Sinica, 72, 116–134. (in Chinese with English abstract) [王劲峰, 徐成东 (2017) 地理探测器: 原理与展望. 地理学报, 72, 116–134.]
- Wang L, Lu YY, Zeng L, He XF (2012) Nest distribution and dynamics of colony movement of red imported fire ant in lawn. Journal of South China Agricultural University, 33, 149–153. (in Chinese with English abstract) [王磊, 陆永跃, 曾玲, 何晓芳 (2012) 草坪生境中红火蚁蚁巢空间关系和蚁群迁移动态规律研究. 华南农业大学学报, 33, 149–153.]
- Wang L, Zhao JS (2020) Spatiotemporal distribution pattern of the COVID-19 epidemic and geographical detection. Acta Ecologica Sinica, 40, 6788–6800. (in Chinese with English abstract) [王琳, 赵俊三 (2020) 城市群新冠疫情时空分布格局与分异机制的地理探测. 生态学报, 40, 6788–6800.]
- Wei LF, Li QY, Liu JY, Zhu L (2021) A preliminary investigation on the epidemic of *Solenopsis invicta* in Haikou. Plant Quarantine, 35(3), 72–76. (in Chinese with English abstract) [韦丽逢, 李黔勇, 刘佳莹, 朱麟 (2021) 海口市红火蚁疫情初步调查. 植物检疫, 35(3), 72–76.]
- Wu XC, Xiao GR (2020) Spatio-temporal distribution patterns of *Fusarium* interception in coastal areas of China. Ecological Science, 39, 175–183. (in Chinese with English abstract) [吴晓春, 肖桂荣 (2020) 中国沿海地区镰刀菌属口岸截获时空分布格局分析. 生态科学, 39, 175–183.]
- Xu YJ, Lu YY, Zeng L (2010) Spatial distribution characteristics of the nests of newly invaded red imported fire ants. Guangdong Agricultural Sciences, 37(8), 16–19. (in Chinese) [许益鏖, 陆永跃, 曾玲 (2010) 新入侵地红火蚁蚁巢的空间分布特征. 广东农业科学, 37(8), 16–19.]
- Xu YJ, Lu YY, Zeng L, Xi YB, Huang J (2006) Study on

- location expansion of *Solenopsis invicta*. Journal of South China Agricultural University, 27(1), 34–36. (in Chinese with English abstract) [许益镬, 陆永跃, 曾玲, 席银宝, 黄俊 (2006) 红火蚁局域扩散规律研究. 华南农业大学学报, 27(1), 34–36.]
- Xue DY, Li HM, Han HX, Zhang RZ (2005) A prediction of potential distribution area of *Solenopsis invicta* in China. Chinese Bulletin of Entomology, 42, 57–60. (in Chinese with English abstract) [薛大勇, 李红梅, 韩红香, 张润志 (2005) 红火蚁在中国的分布区预测. 昆虫知识, 42, 57–60.]
- Zhang X, Chen YX, Hou YM, Xie YX (2015) Expansion of *Solenopsis invicta* Buren in Fujian Province. Chinese Journal of Applied Entomology, 52, 1376–1384. (in Chinese with English abstract) [张翔, 陈艺欣, 侯有明, 谢毅璇 (2015) 福建省入侵红火蚁扩散规律研究. 应用昆虫学报, 52, 1376–1384.]
- Zheng WH, Cai F, Chen SL, Zhu J, Qi HS, Zhao SH, Liu JH (2020) Ecological suitability of island development based on ecosystem services value, biocapacity and ecological footprint: A case study of Pingtan Island, Fujian, China. Sustainability, 12, 2553.
- (责任编辑: 乔慧捷 责任编辑: 闫文杰)