

吴晓春, 肖桂荣. 中国沿海地区镰刀菌属口岸截获时空分布格局分析[J]. 生态科学, 2020, 39(4): 175-183.

WU Xiaochun, XIAO Guirong. Spatio-temporal distribution patterns of *Fusarium* interception in coastal areas of China[J]. Ecological Science, 2020, 39(4): 175-183.

# 中国沿海地区镰刀菌属口岸截获时空分布格局分析

吴晓春<sup>1,2,3</sup>, 肖桂荣<sup>1,2,3,\*</sup>

1. 福州大学空间数据挖掘与信息共享教育部重点实验室, 福州 350108
2. 卫星空间信息技术综合应用国家地方联合工程研究中心, 福州 350108
3. 数字中国研究院(福建), 福州 350108

**【摘要】**生物入侵形势愈加严峻, 口岸检疫作为维护生物安全的第一线, 分析口岸截获时空格局对于物种入侵防控具有重要意义。从口岸点和市域单元两个尺度结合时空局部异常值分析和空间自相关分析方法, 揭示2009—2018年我国沿海地区镰刀菌属入侵截获时空分布格局, 并引入地理探测器模型探寻影响其分布格局的因素。结果表明: (1) 镰刀菌属截获口岸数与截获频次在时间和空间上大致呈现先增后减趋势, 在时空异常值分析中以长三角、珠三角一带口岸的强时空聚类与多模式状态为主。(2) 镰刀菌属市域入侵截获具有显著的空间自相关性( $P < 0.05$ ), 空间集聚特征先增强后减弱, 局部空间关联结构中空间分异性逐渐减小, 高-高值区域的集聚规律明显, 且逐渐集中在江苏省境内。(3) 镰刀菌属市域入侵截获空间格局的最主要影响因素是进口商品总额, 其次是市域内口岸数、入境人数和邮政业务总量, 且双因子间的交互作用对其分布格局均具有显著的增强效果。综上, 我国沿海地区镰刀菌属入侵截获受进口贸易影响具有明显的时空分异格局特征。

**关键词:** 镰刀菌属; 口岸截获; 自相关分析; 地理探测器; 中国沿海地区;

doi:10.14108/j.cnki.1008-8873.2020.04.022 中图分类号: Q938 文献标识码: A 文章编号: 1008-8873(2020)04-175-09

## Spatio-temporal distribution patterns of *Fusarium* interception in coastal areas of China

WU Xiaochun<sup>1,2,3</sup>, XIAO Guirong<sup>1,2,3,\*</sup>

1. Key Laboratory of Spatial Data Mining and Information Sharing of Ministry of Education, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China
2. National & Local Joint Engineering Research Center of Satellite Geospatial Information Technology, Fuzhou 350108, China
3. The Academy of Digital China (Fujian), Fuzhou 350108, China

**Abstract:** The situation of biological invasion is becoming more and more serious. Port quarantine, as the first line of maintaining biological security, is of great significance to the prevention and control of species invasion by analyzing the temporal and spatial pattern of port interception. The temporal and spatial distribution pattern of *Fusarium* invasion and interception in China coastal areas in 2009-2018 was revealed from the two scales of port point and city area unit combined with the analysis of local spatiotemporal outliers and spatial autocorrelation, and the geographic detector model was introduced to explore the influencing factors of the pattern. The results showed that: (1) The number and frequency of *Fusarium* interceptions increased first and then decreased in time and space. In the analysis of temporal and spatial outliers, the strong temporal and spatial clustering and multi-mode state of ports in Yangtze River Delta and Pearl River Delta were the main ones. (2) There was a significant spatial autocorrelation in the invasion and interception of *Fusarium* ( $P < 0.05$ ). The spatial clustering characteristics

收稿日期: 2019-11-06; 修订日期: 2020-01-01

基金项目: 福建省科技重大专项专题(2017NZ0003-1-5); 中国科学院战略性先导科技专项课题(XDA23100500)

作者简介: 吴晓春(1995—), 女, 河南信阳人, 硕士研究生, 主要从事地理信息工程研究, E-mail:wuxiaochun\_wxc@163.com

\*通信作者: 肖桂荣, 男, 博士, 研究员, 主要从事地理信息系统、空间信息网络服务方面的研究, E-mail:xiaogr@fzu.edu.cn

first increased and then weakened. The spatial differentiation in the local spatial correlation structure gradually decreased, the clustering rule of high-high value areas was obvious, and gradually concentrated in Jiangsu Province. (3) The main influencing factors of the spatial pattern of *Fusarium* invasion interception were the total imported commodities, followed by the number of ports, the number of inbound persons and the total postal business, and the interaction between the two factors had significant enhancement effect on its distribution pattern. In a word, the invasion of *Fusarium* in the coastal areas of China is affected by the import trade with obvious spatial-temporal differentiation pattern.

**Key words:** *Fusarium*; port interception; autocorrelation analysis; geographical detector; coastal areas of China

## 0 前言

生物入侵严重危害入侵地的生态系统与社会经济,已成为本世纪所面临最为棘手的环境问题之一<sup>[1-2]</sup>。全球化进程使得人类活动不断打破生物原有地理分布格局,加速入侵物种的空间扩散,为外来物种的引入提供条件,使得生物入侵的防控愈加复杂<sup>[3-5]</sup>。沿海地区具有临海的区位优势,是人口承载力高、对外经贸发达地区,也是外来物种入侵的高危区<sup>[6]</sup>。口岸检疫作为预防生物入侵的直接门槛,以镰刀菌属(*Fusarium*)为代表的入侵生物截获量逐年显著递增<sup>[7]</sup>。镰刀菌属起源于印度<sup>[8]</sup>,是最难防治的植物病原真菌之一,可侵染香蕉、小麦、水稻等作物引起大面积枯萎减产,造成严重经济损失,且真菌毒素被人畜食用后会造食物中毒、器官衰竭甚至死亡<sup>[9, 10]</sup>,因此迫切需要对镰刀菌属入侵机制与分布格局展开研究。

当前针对镰刀菌属的入侵机制研究多集中在生物学特性,对其分布规律及自然经济因素分析很少。综合入侵生物分布特征与影响因素研究发现,学者们在国家<sup>[11]</sup>、省市<sup>[12]</sup>、路网<sup>[13]</sup>等不同空间尺度上运用样方调查、聚类分析<sup>[14]</sup>、主成分分析<sup>[15]</sup>、传统回归分析<sup>[16]</sup>等方法,对入侵生物实测调查数据的绝对分布研究居多,较少通过区域间入侵分布的相关性研究扩展分析入侵生物空间集聚特征<sup>[17]</sup>,而空间相关性分析更能直观表现其分布格局与影响因素分布的一致性。现有研究多针对单因子的作用影响,并不满足现实环境中多因素交互对生物入侵作用的认知基础<sup>[12]</sup>,因此本文引入地理探测器模型<sup>[18]</sup>,其核心思想是基于空间异质性探测自变量与因变量的空间分布相似性,较传统回归分析方法受假设条件限制少,且可对因子间交互作用及显著性差异进行补充分析,分析结果更为可靠<sup>[19]</sup>。

综上,本文基于 2009—2018 年口岸截获数据,在口岸点与市域两个尺度上综合时空模式挖掘与

GIS 空间分析方法揭示镰刀菌属入侵截获时空格局,并通过地理探测器模型测定其产生格局的影响因素,以期为今后镰刀菌属入侵扩散的防控预警及国门生态安全研究提供理论依据。

## 1 研究区域与实验数据

### 1.1 研究区概况

《中国海洋统计年鉴》定义沿海地区是指有海岸线(包括大陆岸线和岛屿岸线)的地区,本研究中因海南省及港澳台地区截获镰刀菌属数据缺失,又考虑到北京作为首都的位置特殊性与生物入侵防治必要性,因此,本文研究区具体包含辽宁省、河北省、北京市、天津市、山东省、江苏省、上海市、浙江省、福建省、广东省、广西壮族自治区 11 个地域范围(图 1),涵盖 132 个截获镰刀菌属的口岸点位(十年间统计去重)。截止 2018 年底,研究区陆地面积约占全国 13.19%,但其常住人口约占全国 41.68%,

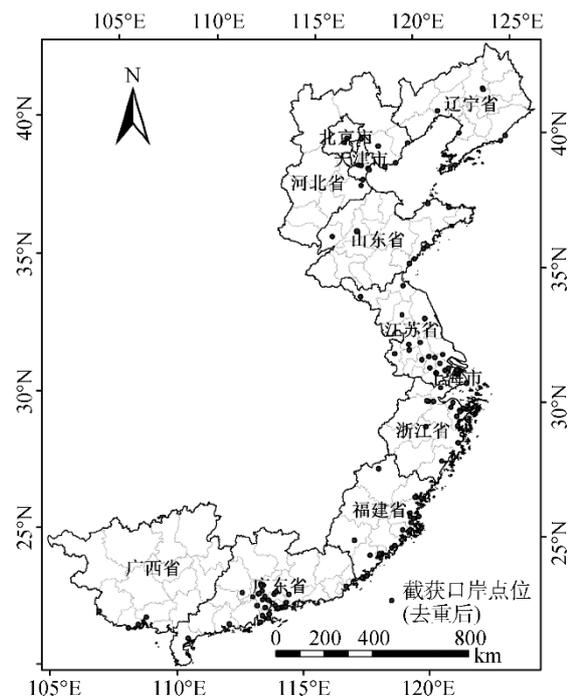


图 1 研究区概况

Figure 1 Overview of the study area

全年货物进出口总额约占全国 81.21%, 由中国出入境检验检疫局提供全国口岸(不含港澳台琼)年检数据计算得到, 该区域内镰刀菌属年累计口岸截获频次约占全国口岸检疫的 85.47%, 较高的人员活动强度与经贸发展水平使得区域内生物入侵风险大大增加。

## 1.2 数据来源

制图底图数据来源于国家基础地理信息中心 (<http://www.ngcc.cn/>) 下载的全国 1:100 万市级行政区划矢量地图数据。口岸检疫截获镰刀菌属数据来源于生物安全关键技术研发——主要入侵生物的动态分布与资源库建设项目, 经过数据筛选汇总得到 2009 年—2018 年研究区 653 个入境口岸对进境人员及其行李物品、对外贸易的货物、邮件包裹等检疫得到共计 3643 条镰刀菌属截获数据, 累计截获 69932 频次, 包括截获口岸名, 截获时间(以年计), 截获频次, 来源地。

入侵生物口岸截获情况主要与其人为引入活动密切相关, 包括跨境电商包裹、进口贸易、入境交通等人类活动<sup>[7, 20-21]</sup>, 基于数据的可获得性, 选取影响因子数据如下表 1。

## 1.3 数据预处理

首先, 对全国 1:100 万行政区划矢量地图进行裁剪、投影变换处理, 得到沿海地区市级矢量图层; 因在空间自相关分析中数据需满足正态分布假设, 对口岸截获原始数据做对数变换处理; 然后, 通过批量地理编码得到镰刀菌属截获口岸的经纬度坐标, 将其地理位置空间化, 整理汇总得到十年间各口岸截获频次数据; 将市域行政区划矢量图层与口岸截获信息表属性连接, 整理得到十年间各市域汇总口岸截获频次数据; 最后, 因地理探测器模型对因子自变量要求为类型量<sup>[18]</sup>, 采用 Jenks 自然间断点法对各影响因子分级, 进行离散化处理。

表 1 影响因子指标说明

Table 1 Index description of influencing factors

影响因子	数据来源
口岸货运量( $X_1$ )	
口岸入境人员数( $X_2$ )	中国口岸年鉴
口岸入境运输工具数( $X_3$ )	
市进口商品总额( $X_4$ )	
市邮政业务总量数据( $X_5$ )	各省市统计年鉴及统计公报
市口岸数目( $X_6$ )	

## 2 研究方法

### 2.1 时空局部异常值分析

时空立方体模型是时空模式挖掘的基础, 其本质是将具有关联时空属性的事件点设定距离阈值与时间步长, 将相同间隔的事件点聚合到同一像元网格, 生成时空条柱并通过 Mann-Kendall 趋势统计, 构建 NetCDF 数据立方体<sup>[22]</sup>。以时空立方体为输入, 确定其格网间空间关系的概念化, 查找时空维度上与其邻域存在统计差异的位置, 时空局部异常值分析是局部 Anselin Local Moran's I 统计<sup>[23]</sup>在时空立方体载体上的显著聚类 and 异常值体现, 输出为二维地图, 共有 6 种检测结果类型见下表 2。

### 2.2 空间自相关

对时空序列的异常值分析可得到多模式类型, 表现在个别时间片中条柱属性有所波动, 影响该位置点位时空聚类或异常值模式判别, 现通过时间切片利用 Moran's I 空间自相关反映该时间截面下一个区域单元上事件属性与邻近单元的集聚程度。

全局 Global Moran's I 测度整个研究区内所有事件对象的总体关联程度及其显著性分布模式, 计算公式为:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sigma^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \quad (1)$$

全局空间自相关在空间同质的假设基础上, 不能反映局部集聚特征, 因此使用局部空间关联指标 (Local Indicators of Spatial Association, LISA) 反映每个市域单元与其相邻单元的空间关联程度, 并在 Z 检验基础上 ( $P < 0.05$ ) 绘制 LISA 图进一步揭示事物的局部分异特征, 计算公式如下:

表 2 时空异常值检测结果类型

Table 2 Types of Spatiotemporal abnormal value detection results

模式名称	定义
不相关	从未具有统计显著性聚类类型的位置
高一高	统计显著性类型始终仅为高一高聚类的位置
高一低	统计显著性类型始终仅为高一低聚类的位置
低一高	统计显著性类型始终仅为低一高聚类的位置
低一低	统计显著性类型始终仅为低一低聚类的位置
多模式	曾经为多种统计显著性聚类类型和异常值类型的位置

$$I_i = \frac{(x_i - \bar{x}) \sum_{j \neq i}^n w_{ij} (x_j - \bar{x})}{\sigma^2} \quad (2)$$

式中,  $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ ,  $\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$ ,  $x_i$ 、 $x_j$  为市域单元 i、j 的截获频次, n 为市域数量,  $w_{ij}$  是基于空间邻接规则建立的空间权重矩阵元素。

### 2.3 地理探测器

通过因子探测中的 q 值度量因子对沿海地区市域镰刀菌属入侵截获频次的空间分异影响程度<sup>[24]</sup>, 计算如下:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (3)$$

式中: h = 1, ..., L 为影响因子的分层或分类数, 本文将影响因子离散化处理为 5 类;  $N_h$  和 N 分别为第 h 类和全区的市域单元数;  $\sigma_h^2$  和  $\sigma^2$  分别是第 h 类和全区的 Y 值的方差。SSW 和 SST 分别为市域方差之和和全区总方差。q 的值域为 [0, 1], 表示影响因子 X 解释了 100×q% 的 Y 值, 值越大说明其影响越强, 反之越弱。

与传统因子分析方法相比, 地理探测器的另一大优势是可通过交互探测解释多因子的交互作用对因变量的作用强度, 即评估不同因子对因变量的影响是否独立或多因子交互作用于因变量的增强或减弱影响<sup>[25-26]</sup>, 结果类型见下。

地理探测器模型中的生态探测用来比较双因子对市域镰刀菌属截获频次分布的影响是否有显著差异, 以 F 统计量衡量:

$$F = \frac{N_{X1}(N_{X2} - 1) \sum_{h=1}^{L1} N_h \sigma_h^2}{N_{X2}(N_{X1} - 1) \sum_{h=1}^{L2} N_h \sigma_h^2} \quad (4)$$

表 3 双因子对因变量交互作用的类型

判据	交互作用
$q(X_1 \cap X_2) < \min(q(X_1), q(X_2))$	非线性减弱
$\min(q(X_1), q(X_2)) < q(X_1 \cap X_2) < \max(q(X_1), q(X_2))$	单因子非线性减弱
$q(X_1 \cap X_2) > \max(q(X_1), q(X_2))$	双因子增强
$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$	独立
$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$	非线性增强

式中:  $N_{X1}$  与  $N_{X2}$  分别表示两个因子  $X_1$  和  $X_2$  的样本量,  $L_1$  和  $L_2$  分别为因子  $X_1$  和  $X_2$  分层数目。其中零假设  $H_0: \sum_{h=1}^{L1} N_h \sigma_h^2 = \sum_{h=1}^{L2} N_h \sigma_h^2$ 。如果在  $\alpha$  的显著性水平上拒绝  $H_0$ , 表明两因子  $X_1$  和  $X_2$  对市域镰刀菌属入境截获空间分布的影响存在显著的差异。

## 3 结果与分析

### 3.1 入侵截获情况趋势分析

镰刀菌属累计口岸截获频次和口岸数量随时间变化大致呈现出先增后减趋势(图 2)。2009 年镰刀菌属入侵截获频次较低, 至 2010 年截获频次增长近一倍, 截获口岸数却反而有所下降, 表明期间镰刀菌属口岸入侵范围有所缩减, 但在主要口岸的引入程度开始加深; 2010 年至 2014 年镰刀菌属截获频次和口岸数均逐渐增长, 其中, 2013 年至 2014 年截获频次与截获口岸数呈现明显扩张趋势; 2014 年至 2016 年截获频次显著增长, 截获口岸数量居高不下, 至 2016 年镰刀菌属在沿海地区口岸呈现截获范围最广、截获频次最高状态; 2016 年至 2018 年二者均显著减少, 其入侵截获态势逐渐放缓。

与研究区总计镰刀菌属截获口岸数与频次的逐年变化趋势相对应, 市域截获频次空间分布变化见图 3, 镰刀菌属引入范围逐渐扩张后缩减, 高截获强度地区前期主要集中在深圳、南京、珠海、广州、大连、福州, 中后期逐渐新增宁波、泰州、南通、东莞等地; 地区截获频次显著递增后有所降低, 2009 年截获频次峰值地区为深圳, 达到 799 频次, 而到 2016 年深圳地区已达到 6112 频次, 至 2018 年峰值地区宁波降为 2432 频次。

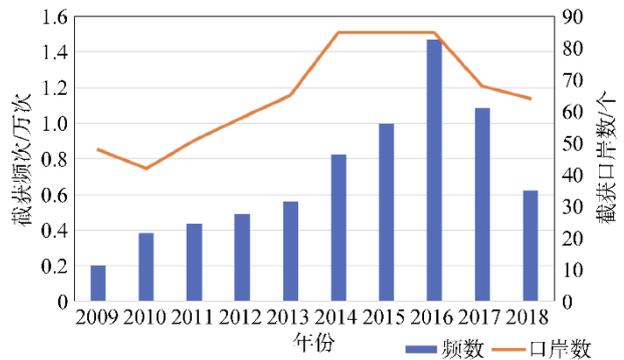


图 2 2009—2018 年口岸截获情况

Figure 2 Port interception in 2009-2018

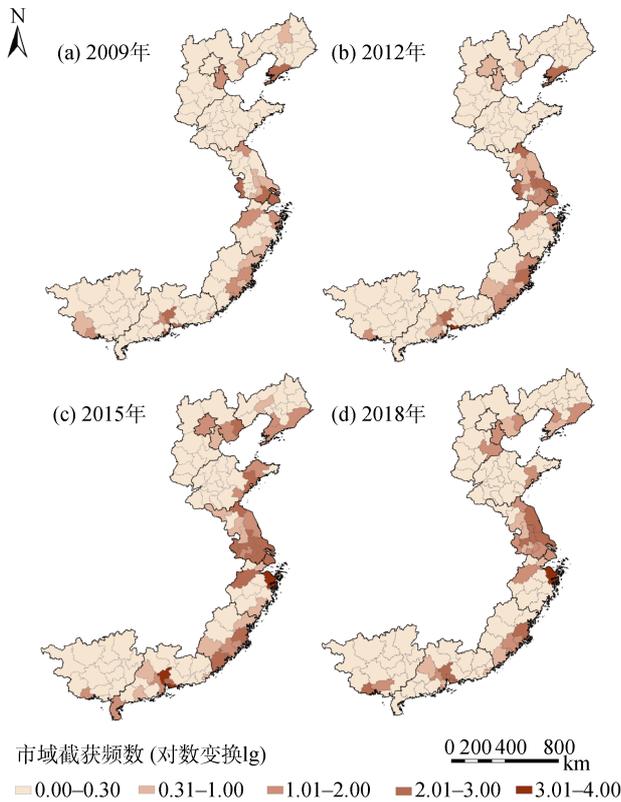


图 3 镰刀菌属入侵截获时空分布变化  
 Figure 3 Spatiotemporal distribution change of *Fusarium* invasion interception

### 3.2 入侵截获频次时空分布格局

#### 3.2.1 口岸截获时空局部异常值分析

以 2009—2018 年沿海地区口岸截获镰刀菌属时空点数据为样本构建时空立方体, 时间步长间隔 1 年, 包括 10 个时间步长, 根据时空点数据的增量自相关确定距离阈值, 聚合事件点并将其时间序列通过 Mann-Kendall 统计, 显示总体口岸计数与截获频次趋势递增。以该时空立方体为输入, 计算十年间非零格网位置上各条柱的 Anselin Locan Moran'I 统计, 发现口岸截获的时空聚类与异常值模式以强时空聚类模式(高高聚类与低低聚类)和多模式状态为主。

如下图 4, 广州局、东莞局、深圳机场局、盐田局、南海局等口岸与江苏南京局、镇江局、扬州局、泰州局、南通局、上海吴淞局、浦东局、杭州机场局、宁波大树局一带始终处于高一高聚类状态, 表明这些口岸在时空范围内高截获频次上的相似性, 而这些口岸正位于我国沿海地区对外贸易交流的热点地区; 长三角与珠三角高一高聚类区域的周边口岸存在低一高异常值模式, 与高值区域相比该模式

口岸在研究时段内经常处于较低值水平; 仅有防城港口岸处于高一低异常值模式, 反映了防城港口岸在西南口岸低值水平下的异常检测, 这可能与防城港口岸在西南沿海口岸中显著的口岸流量与对外贸易水平相关; 山东、辽宁大部分口岸与天津邮件办、河北京唐港口岸基本处于低一低聚类状态, 表明区域内口岸截获频次一直维持在相对较低的水平; 而京津冀中部核心功能区、大连、营口、秦皇岛、苏锡常沪都市圈与潮汕、中山、珠海等地区口岸呈现出多模式状态, 即不同时期可能存在高值/低值模式主导状态, 不能简单归类为某种时空聚类模式。

#### 3.2.2 市域截获空间自相关分析

基于 Queen 邻接规则构建空间权重矩阵, 对 2009 年—2018 年沿海地区 113 个市域单元镰刀菌属截获频次数据做全局空间自相关分析(图 5), 2009 年 Global Moran's I 值接近于 0, 表现为当年市域镰刀菌数入侵截获趋近于随机分布, 2010 年—2018 年 Moran's I 值均大于 0, 且从 2011 年开始在  $p < 0.05$  显著性水平下逐渐增长后略微回落, 2015 年 Moran's I 值最高, 表明市域镰刀菌属入侵截获在 0.05 显著性水平下呈现出正向聚集状态且随时间变化愈加显著, 至 2015 年达到最强集聚状态, 随后市域镰刀菌属入侵截获频次的空间依赖性有所降低。

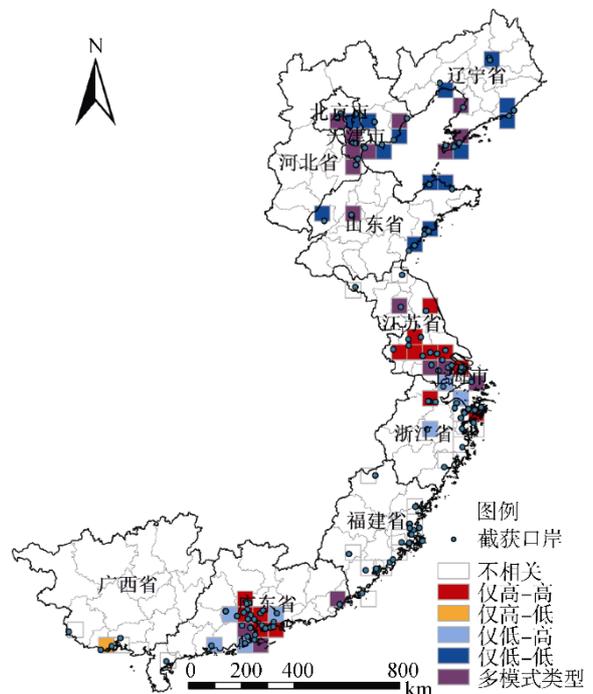


图 4 口岸截获局部异常值分析  
 Figure 4 Analysis of local abnormal value of port interception

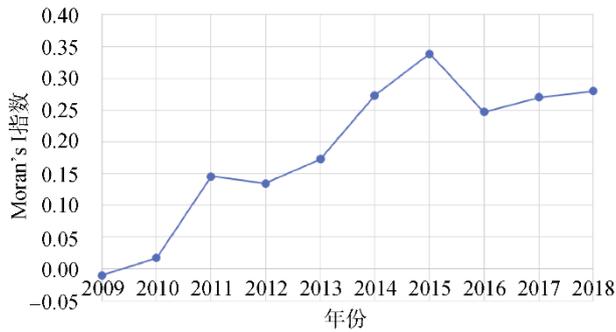


图5 2009-2018年市域镰刀菌属入境截获 Global Moran's I  
Figure 5 Global Moran's I of urban port interception in 2009-2018

对2009年、2012年、2015年、2018年沿海地区市域截获频次绘制空间LISA聚类图(图6),反映各时段下镰刀菌属入侵截获的局部空间关联类型,表现为空间聚集(高高聚集与低低聚集)和空间异质(低高异质与高低异质)。

2009年镰刀菌属入侵截获整体空间分布不存在明显趋势,但各市域单元存在局部空间关联模式,其LISA图中(图6a)高-高聚集区域位于福建莆田,表现为莆田与其邻域范围都呈现出较高值的聚类状态;高-低值区域主要分布在大连、秦皇岛、天津、连云港、南京、宁波、杭州、汕头、珠海、深圳,表现为沿海主要港口城市、省会城市较周围邻居的明显高值分布特征;低-高值区域表现为与上述高值区域对应的低值包围状态。2012年、2015年、2018年镰刀菌属入侵截获频次的空间正相关性随时间发生显著变化(图6b~6d),在2015年空间局部集聚性最强,表现为高高聚集区域与低低聚集区域数量最多;高高聚集区域主要分布在江苏省东部地区(盐城、南通、泰州、苏州、镇江)及福建南部沿海(泉州、厦门、莆田)、广东东莞等地,且逐渐集中在江苏境内;低低聚集区域在2012年位于广西梧州,2015年扩展到来宾、山东济南、德州、淄博、泰安、辽宁沈阳、锦州,2018年又缩减为广西梧州;空间分异性逐渐减小,表现为高-低值、低-高值区域数量逐渐减小。

### 3.3 镰刀菌属市域入侵截获空间格局影响因素分析

#### 3.3.1 影响因素探测

以沿海地区113个市域单元镰刀菌属入侵截获频次为因变量 $Y$ ,口岸流量数据与各市域外贸往来数据共6个重分类后的变量为因子 $X$ ,使用因子探测模型对市域镰刀菌属入侵截获空间分布格局的影

响因素进行分析,结果见下表4,其中进口商品总额( $X_4$ ) $q$ 值最高(0.82),其次为市域内口岸数( $X_6$ ,  $q$ 值0.60)、入境人数( $X_2$ ,  $q$ 值0.47)、邮政业务总量( $X_5$ ,  $q$ 值0.39),表明地区进口贸易、检疫口岸分布、人员迁移与邮政业务对镰刀菌属入境截获空间分布格局有着重要影响,其余因子(货运量 $X_1$ 和入境运输工具数 $X_3$ ) $q$ 值大致在0.10左右,对空间分布格局的解释程度相对较小。

使用生态探测器比较两因子对镰刀菌属入侵截获空间分布格局的影响是否有显著差异(表5),发现进口商品总额与其余任一因子之间存在显著差异,结合因子探测结果证明进口商品总额较其他因子是影响镰刀菌属入侵截获空间格局的最主要驱动因素。

#### 3.3.2 不同影响因子的交互作用分析

使用交互作用探测模型评估不同因子之间的交互作用(表7),货运量与入境人数、货运量与入境运

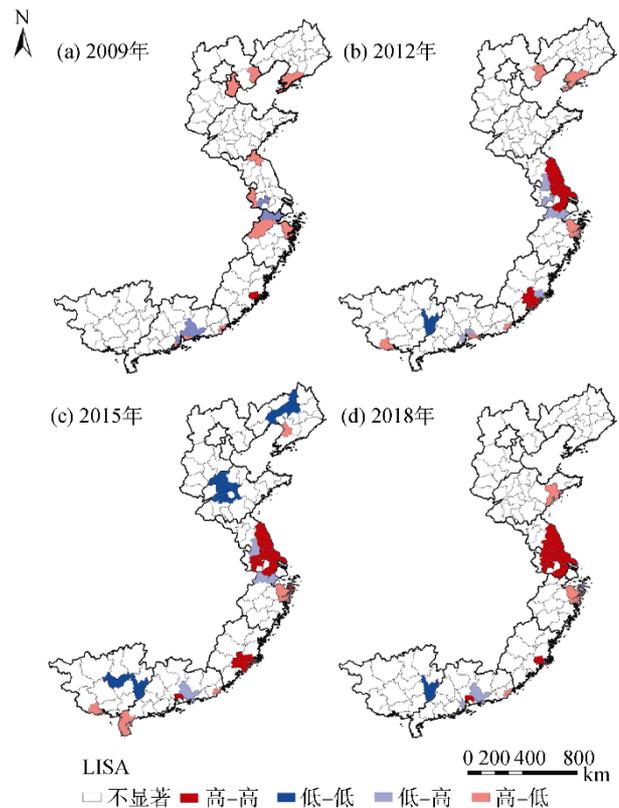


图6 市域截获频次局部LISA图

Figure 6 Local LISA of urban interception frequency

表4 因子探测结果

Table 4 The result of factor detection

因子	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$
$q$ statistic	0.14	0.47	0.11	0.82	0.39	0.60

注:计算结果保留两位有效数字。

表 5 生态探测结果

Table 5 The result of ecological detection

	货运量	入境人数	入境运输工具	进口商品总额	邮政业务总量	口岸数
货运量						
入境人数	Y					
入境运输工具	N	Y				
进口商品总额	Y	Y	Y			
邮政业务总量	N	N	N	Y		
口岸数	Y	N	Y	Y	N	

注: 显著性水平为 0.05 的 F 检验, Y: 两种因子在对镰刀菌属入侵截获空间分布影响上存在显著性差异; N: 无显著性差异。

表 6 交互探测结果

Table 6 The result of interaction detection

	货运量	入境人数	入境运输工具	进口商品总额	邮政业务总量	口岸数
货运量	0.14					
入境人数	0.99	0.47				
入境运输工具	0.91	0.89	0.11			
进口商品总额	0.89	0.98	0.87	0.82		
邮政业务总量	0.99	0.57	0.91	0.89	0.39	
口岸数	0.98	0.98	0.89	0.93	0.92	0.60

注: 计算结果保留两位有效数字。

输工具、货运量与邮政业务总量、货运量与口岸数、入境人数与入境运输工具、入境运输工具与邮政业务总量、入境运输工具与口岸数为非线性增强, 表现为双因子间交互作用对镰刀菌属入侵截获空间分布格局的解释力明显大于两者解释力之和, 其余因子间为双因子增强, 表现为双因子间交互作用对镰刀菌属入侵截获空间分布格局的解释力大于两者解释力的最大值。总体而言, 不同因子的交互作用对沿海地区镰刀菌属入侵截获频次空间分布均具有显著的增强效果, 表明经贸往来与人类活动可正向强化各因子的解释力<sup>[12]</sup>。

#### 4 讨论

基于口岸截获数据展开对镰刀菌属的入侵截获分布格局研究, 不可避免会带来一定程度的指向性引导, 我国沿海地区口岸以长三角和珠三角一带聚集状态分布为主, 而镰刀菌属的空间截获格局也是符合这一特征。镰刀菌属入侵截获分布以深圳、广州、宁波为主要热点地区, 表现为个别口岸在多时段的极高截获频次, 但此区域间的局部关联较弱, 而江苏省境内区域虽在镰刀菌属的截获数量上不占优势, 却由其多地区多口岸截获频次的高相似性表现出其局部高空间集聚性。在四个时间节点的空间

自相关分析中, 镰刀菌属入侵截获的空间局部集聚性随时间发生变化, 可对应互补解释连续时空序列中时空聚类与异常值分析的多模式类型, 环渤海城市区域大致由高-低值主导向低-低值主导过渡, 这是由于天津、大连、秦皇岛等地口岸相对于周边的显著截获高值逐渐缩减, 长三角城市区域个别城市由低-高值分布慢慢融入高-高值聚集区, 逐渐表现为江苏省境内市域口岸截获的高度集聚。

生物入侵是外来物种分布动态变化的漫长过程, 包括传入、定殖、扩散、爆发、危害等环节。现实环境中影响入侵生物分布格局的因素纷杂多样, 地理纬度、地形、土地类型、气温、降水等自然环境因子与交通条件、经贸水平、人口密度等人类活动因子被广泛认为影响外来物种的入侵分布<sup>[15-16]</sup>。外来物种的定殖、扩散等环节多受环境适生性影响和人为活动共同作用, 而在传入环节中截获分布格局多考虑与区域入境检疫口岸的数量分布及流量统计有关, 也与市域外贸、交通条件等其他人为活动因子密切相关<sup>[27]</sup>。我国沿海地区镰刀菌属入侵截获分布的最主要影响因素是进口商品总额, 与此前 Castello 关于进口贸易与截获入侵生物数据呈正相关的研究结果一致<sup>[28]</sup>, 同时入境人员数、邮政货物流动比货运量、入境交通对于镰刀菌属的入侵截获

分布影响具有更高的相关性。而顾及生物入侵影响机制的复杂性,利用地理探测器模型探测到不同因子交互影响下对镰刀菌属入侵的推动作用,在经济全球化的大发展背景下,区域间贸易交流的频繁增加会引起更严重的生物入侵现象,应敦促相关部门针对贸易往来热点地区,如长三角、珠三角一带的外来入侵生物开展更为合理严密的检疫、销毁工作。

## 5 结论

本文基于 2009—2018 年沿海地区镰刀菌属口岸截获数据,综合运用时空异常值分析、空间自相关与地理探测器模型等方法深入研究镰刀菌属入侵截获时空格局及其影响因素,得到以下结论:

从镰刀菌属入侵截获的绝对分布趋势来看,其总体截获频次和截获口岸数量在时间和空间上总体均呈现出先增后减趋势,在 2016 年达到峰值,之后其入侵截获态势逐渐放缓,且空间引入范围逐渐扩张后缩减,截获频次峰值地区绝大多数位于深圳。

从镰刀菌属入侵截获的空间相关性分析来看,通过口岸点尺度和市域尺度分析,均可证明长三角与珠三角一带口岸始终处于高高聚类模式,十年间其全局空间正相关性先增强后减弱,在 2015 年达到最强集聚状态。局域自相关分析中其空间分异性逐渐减小,表现为高-低值、低-高值区域数量逐渐减小,而空间集聚性在江苏省内逐渐显著。

综合运用因子探测与生态探测模型测定影响因素,本研究中较其他贸易指标,进口商品总额是镰刀菌属市域截获空间格局的最主要影响因素,其次是市域内口岸数、入境人数和邮政业务总量,符合跨境电商发展与人员流动对外来生物的引入规律<sup>[20]</sup>;且不同因子间的交互作用对镰刀菌属市域截获分布格局均具有显著的增强效果。

## 参考文献

- [1] 张顺合, 张志华, 陈冬东. 外来有害植物入侵对我国生态安全的影响[J]. 植物检疫, 2015, 29(04): 4-7.
- [2] SHACKLETON C M, SHACKLETON R T. Knowledge, perceptions and willingness to control designated invasive tree species in urban household gardens in South Africa[J]. *Biological Invasions*, 2016, 18(6): 1599-1609.
- [3] 潘绪斌, 王聪, 严进, 等. 经济全球化与气候变化对生物入侵的影响浅析[J]. 中国植保导刊, 2018, 38(04): 65-69.
- [4] 郭世学, 李娟娟, 谷青. 国际贸易及人员流动对生物入侵的影响及防范[J]. 口岸卫生控制, 2015, 20(03): 35-37.
- [5] XU Han, CHEN Ke, OUYANG Zhiyun, et al. Threats of Invasive Species for China Caused by Expanding International Trade[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(13): 7063-7064.
- [6] HUANG Dingcheng, ZHANG Runzhi, Kim K C, et al. Spatial pattern and determinants of the first detection locations of invasive alien species in mainland China.[J]. *PLoS One*, 2012, 7(2).
- [7] 袁立, 齐润姿, 施露璐, 等. 2015—2017 年全国邮路口岸科研微生物菌种检出情况及影响因素分析[J]. 中国国境卫生检疫杂志, 2018, 41(03): 162-165.
- [8] O'DONNELL K, CIGELNIK E, NIRENBERG H I. Molecular Systematics and Phylogeography of the *Gibberella fujikuroi* Species Complex[J]. *Mycologia*, 1998, 90(3): 465-493.
- [9] 马玉彤, 刘太国, 文才艺, 等. 我国不同麦区小麦镰刀菌毒素检测及毒素污染分析[J]. 植物保护学报, 2019, 46(02): 266-273.
- [10] 李敏慧, 苑曼琳, 姜子德, 等. 香蕉枯萎病菌致病机理研究进展[J]. 果树学报, 2019, 36(06): 803-811.
- [11] 龚世平, 杨江波, 葛研, 等. 外来物种红耳龟在中国野外分布现状及扩散路径研究[J]. 野生动物学报, 2018, 39(02): 373-378.
- [12] 李志鹏, 赵健, 陈业滨, 等. 福建省主要入侵植物空间分异及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2019, 30(08): 2682-2690.
- [13] 董合干, 周明冬, 刘忠权, 等. 豚草和三裂叶豚草在新疆伊犁河谷的入侵及扩散特征[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(11): 175-180.
- [14] BAI Fan, CHISHOLM Ryan, SANG Weiguang, et al. Spatial risk assessment of alien invasive plants in China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(14): 7624-7632.
- [15] 王国欢, 白帆, 桑卫国. 中国外来入侵生物的空间分布格局及其影响因素[J]. 植物科学学报, 2017, 35(04): 513-524.
- [16] 朱枫, 王四海, 陈剑, 等. 外来入侵植物肿柄菊在云南的分布特征及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2018, 37(09): 2573-2580.
- [17] 边振兴, 果晓玉, 于淼. 下辽河平原不同生境土壤节肢动物分布及空间自相关格局[J]. 生态学杂志, 2018, 37(08): 2384-2393.
- [18] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器:原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(01): 116-134.
- [19] JU Hongrun, ZHANG Zengxiang, ZUO Lijun, et al. Driving forces and their interactions of built-up land expansion based on the geographical detector - a case study of Beijing, China[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2016, 30(11):

- 2188–2207.
- [20] 李新实, 张顺合, 刘晗. 新常态下国门生物安全面临的挑战和对策[J]. 中国国境卫生检疫杂志, 2017, 40(04): 229–233
- [21] LEVINE J M, D'ANTONIO C M. Forecasting Biological Invasions with Increasing International Trade[J]. *Conservation Biology*, 2010, 17(2): 322–326.
- [22] 朱艳丽, 靖常峰, 伏家云, 等. 时空立方体的抢劫案件时空特征挖掘与分析[J]. 测绘科学, 2019(09): 132–138.
- [23] ANSELIN L. A Local Indicator of Multivariate Spatial Association: Extending Geary's  $c$ [J]. *Geographical Analysis*, 2019, 51(2).
- [24] WANG Jinfeng, ZHANG Tonglin, FU Bojie. A measure of spatial stratified heterogeneity[J]. *Ecological Indicators*, 2016, 67: 250–256.
- [25] REN Yin, DENG Luying, ZUO Shudi, et al. Geographical modeling of spatial interaction between human activity and forest connectivity in an urban landscape of southeast China[J]. *Landscape Ecology*, 2014, 29(10): 1741–1758.
- [26] ZHANG Na, JING Yongcai, LIU Chengyu, et al. A cellular automaton model for grasshopper population dynamics in Inner Mongolia steppe habitats[J]. *Ecological Modelling*, 2016, 329.
- [27] XU Han, PAN Xubin, SONG Yun, et al. Intentionally introduced species: more easily invited than removed[J]. *Biodiversity & Conservation*, 2014, 23(10): 2637–2643.
- [28] CAROL McAusland, COSTELLO C. Avoiding invasives: trade-related policies for controlling unintentional exotic species introductions[J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2004, 48(2): 954–977.