



农业机械学报

Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery

ISSN 1000-1298, CN 11-1964/S

《农业机械学报》网络首发论文

题目：华北地区光肩星天牛空间分异性及驱动因素研究
作者：刘德庆，张天媛，张晓丽，宗世祥，黄季夏
收稿日期：2020-08-23
网络首发日期：2021-12-16
引用格式：刘德庆，张天媛，张晓丽，宗世祥，黄季夏. 华北地区光肩星天牛空间分异性及驱动因素研究[J/OL]. 农业机械学报.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1964.S.20211215.1209.006.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

华北地区光肩星天牛空间分异性及驱动因素研究

刘德庆^{1,2} 张天媛³ 张晓丽^{1,2} 宗世祥¹ 黄季夏^{1,2}

(1. 北京林业大学森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 北京林业大学精准林业北京市重点实验室, 北京 100083; 3. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875)

摘要: 光肩星天牛作为林木的主要害虫, 在我国分布极为广泛, 且分布区呈不断扩大的趋势。在地理空间尺度上, 研究虫灾的空间相关性, 并分析影响其分布的因素对于防控光肩星天牛灾害有重要意义。以 2008 年中国华北地区光肩星天牛虫灾发生情况为研究对象, 收集气象因子、社会经济因子以及植被因子, 借助于地理探测器分析环境因素对光肩星天牛灾害发生的影响。结果表明, 光肩星天牛受害严重的地区集中在山西北部, 河南、山东及河北南部地区发病率较低。影响光肩星天牛发病率空间分布的主要气象因素为降水和气温, 主要社会经济因素为人口和地区 GDP。气温和第一、二产业值的作用力较其他因子有显著差异。经济发展水平高对当地病虫害防治有明显的积极作用。交互作用探测显示, 任何两种变量结合作用都能更有效地解释光肩星天牛灾害的空间分异性。降雨量和防治率交互作用后对发病率的解释力提升最为显著。

关键词: 光肩星天牛; 空间分异; 地理探测器; 空间自相关
中图分类号: S431 (植物病虫害的预测预报) **文献标识码:** A

OSID:



Study on the Spatial Differentiation and Driving Force of *Anoplophora glabripennis* in North China

LIU Deqing^{1,2} ZHANG Tianyuan³ ZHANG Xiaoli^{1,2} ZONG Shixiang¹ HUANG Jixia^{1,2}

(1. The Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2. Precision Forestry Key Laboratory of Beijing, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

3. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: *Anoplophora glabripennis* is widely distributed in China as the main pest of forest trees, and the distribution area is constantly expanding. It is important to study the spatial correlation of insect infestation and analyze the factors that affect its distribution. Using Geodetector, we analyzed the effects of environmental factors on the *Anoplophora glabripennis* disaster. The results showed that the most seriously damaged areas were in the northern part of Shanxi Province, while the incidence rates in Henan, Shandong, and southern Hebei were relatively low. The main meteorological factors affecting the spatial distribution of the incidence rate were precipitation and

收稿日期: 2020-08-23 修回日期: 2021-10-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31870534), 科技部重点研发项目 (2019YFA0606600)

作者简介: 刘德庆 (1986-), 男, 博士生, 主要从事森林资源遥感监测研究, E-mail: 554161783@qq.com

通信作者: 黄季夏 (1985-), 男, 副教授, 博士, 主要从事森林灾害空间分析研究, E-mail: huangjx@bjfu.edu.cn

temperature, and the main social and economic factors were population and regional GDP. The effect of temperature on the value of the first and second industries was significantly different from that of other factors. Economic development has a significant positive effect on the control of local insect pests. The interaction detection shows that the combination of any two variables can explain the spatial heterogeneity of *Anoplophora glabripennis* disaster more effectively. The interpretation ability of incidence rate increased significantly after interaction between precipitation and control rate.

Key words: *Anoplophora glabripennis*; spatial stratified heterogeneity; geodetector; spatial autocorrelation

0 引言

光肩星天牛 (*Anoplophora glabripennis*) 属鞘翅目、天牛科害虫, 最早发现于我国和朝鲜半岛, 在英国、澳大利亚, 美国的纽约、芝加哥、新泽西及加拿大的渥太华等地区也发现有分布^[1]。我国的光肩星天牛分布范围比较广泛, 东经 100°~127°, 北纬 21°~43°为我国东部光肩星天牛分布区^[2], 且近年来呈现向西扩展的趋势^[2-3]。

光肩星天牛主要危害柳树、杨树、桑树、榆树等树种, 是制约我国林业发展的重要因子之一^[4]。其幼虫蛀食寄主植物主干木质部, 在树木内部形成永久性空洞和缺损, 严重影响林木的生长, 直至整株枯死^[5]。光肩星天牛幼虫生活隐蔽、蛀孔复杂, 成虫体壁、鞘翅厚而坚硬、耐药力强, 世代较长并参差不齐, 生殖力强, 因而难以对其进行有效防控^[6]。我国每年因包括光肩星天牛在内的杨树天牛而造成的经济损失多达 20 亿元^[7]。光肩星天牛也给北美、欧洲多个国家与地区带来了巨大的经济损失^[8]。美国、俄罗斯均将光肩星天牛及其寄主植物作为重点检疫对象^[3], 光肩星天牛已经引起国内外的高度重视^[3,8-9]。

对于陆地生存的光肩星天牛而言, 其分布受多种因素的影响, 诸如气候、地理环境, 寄主树种, 人类活动以及其本身的适应性。光肩星天牛的分布区呈现不断扩大的趋势, 因此研究影响或决定其分布的生态因子具有重要意义^[3]。郎杏茹^[10]分别测定其生长进度、环境物候和有效积温, 得出在一定条件下, 害虫的卵、蛹期与温度呈负相关关系。Kappel 等^[11]将美国作为研究区域发现, 温度较高、寄主物种丰富的地区光肩星天牛发生风险较大; 光肩星天牛适应于人类活动地区, 交通和工业有利于虫害的传播和蔓延^[12-13]; 此外, 光肩星天牛的数量随着植被覆盖率的提高而减少^[14]。而提升公众防治虫害意识、在虫害发生初期进行大范围监测和根除工作是控制虫害的有效途径^[13,15-19]; 针对天牛种群寄生与扩散的有关研究发现, 光肩星天牛倾向于选择树干直径较大的树木寄生, 种群扩散距离较长, 扩散密度随距离增加而下降, 随时间的延长而减小, 扩散方向与盛行风有关, 在一定范围内风速增大有利于种群扩散^[20-21]。

目前, 对光肩星天牛的研究多从传统角度出发, 集中于森林保护、实验室分析观测、遥感监测等手段, 防治方法多集中于生物、化学、农业等领域^[22]。基于光肩星天牛灾害发生的空间关联性特征, 从地理空间分析的角度出发的研究较少, 对影响虫害发生的各因素之间的联系和交互作用研究也极少涉及。

空间分层异质性是空间数据的一大特性, 表示层内方差小于层间方差的地理现象^[23]。为探测光肩星天牛虫害的空间分层异质性, 本文采用地理探测器模型进行分析。地理探测器是一种用于探测地理事物空间异质性及其驱动机制的空间统计模型。其思想假设为, 如果某驱动因子对因变量具有重要影响, 则驱动因子和因变量的空间分布应具有相似性^[23]。相比于其他模型, 地理探测器模型可以解释地理现象的空间分异规律, 刻画分异特征, 在小样本

量基础上统计精度更高^[23]。地理探测器可以探测分区的驱动机制。地理探测器模型运用简便，假设条件较少，可以处理数值型数据和定性数据，并可探测两因子交互后的影响^[23-24]。

本文在现有研究的基础上，明确灾害和社会经济、自然气象等影响因素在华北地区的空间分布特征，研究各影响因素的空间相关性，分析不同影响因素对光肩星天牛的交互作用，运用地理探测器分析环境因子对虫害发生的解释力，以期对光肩星天牛的控制和预防提供理论依据。

1 研究区域与数据来源

本研究的区域范围以我国华北地区为主，包括北京、天津、河北、山东、山西、陕西、安徽、河南等 8 个省市的下辖县市，地理空间尺度为区县级行政单元，共计 666 个区县，这些地区为光肩星天牛危害程度严重的地区^[2]。华北地区夏季高温多雨，冬季寒冷干燥，属温带季风气候，以太行山为界，西部为黄土高原，东部为华北平原。相比于其他年份，2008 年的光肩星天牛虫害相关数据较为完备，故本研究采用 2008 年各区县光肩星天牛发病率及环境因子数据。其中，2008 年发病率和 2008 年防治率数据由我国国家林业局森防总站提供；2008 年气象数据来源于国家气象科学数据共享服务平台（data.cma.cn）。2008 年的社会经济数据由《中国县市社会经济数据统计年鉴》、《中国城市统计年鉴》、《中国区域经济统计年鉴》等年鉴整理并相互补充而来；2008 年 NDVI 数据为基于 SPOT/VEGETATION 以及 MODIS 等卫星遥感影像得到的数据，计算方法为取每年 1—12 月份的月 NDVI 数值最大值，该数据由中国科学院地理科学与资源研究所资源环境科学与数据中心（[https://www.resdc.cn/](http://www.resdc.cn/)）提供，经过 ArcGIS 分区统计取各区总和，作为该区县的 NDVI 值。

此前研究表明，光肩星天牛虫害容易受到气候条件^[3,10,20]、植被覆盖^[14]和社会发展^[12-13]方面的影响^[25]。因此本研究以光肩星天牛发病率为因变量，选取了可能对光肩星天牛灾害发生有影响的 11 个因子（图 1）。所选取的气象因素包括降雨量、日照时数、平均气温、气温距平和风速；NDVI 数据（归一化植被指数）作为地区植被覆盖的指标而列入考察因素；社会经济因素中，地区生产总值代表某一地区的经济发展水平，第一、二产业值与农林业的发展密切相关，而第三产业值与农林业关联不大，故不采用。年末人口数作为人口统计学的指标加入到研究当中。防治率用以表示地区防治虫害的水平。最终选取地区生产总值、第一产业值、第二产业值、年末总人口数和防治率作为社会经济指标。

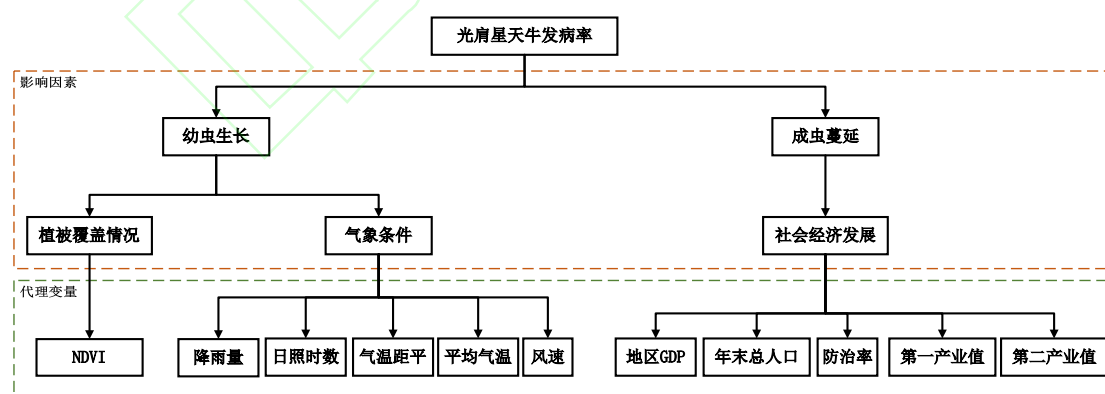


图 1 光肩星天牛发病率的影响因素及其代理变量

Fig.1 Determinants of incidence rates of *Anoplophora glabripennis* and their proxies

2 研究方法

2.1 空间相关性分析

本研究采用空间自相关指数来描述地理事务的发生规律对空间位置的依赖性。主要包括全局空间自相关指数和局部空间自相关指数。全局空间自相关指数用于研究整个区域的空间关联模式,分析在整个研究范围内指定的属性是否具有自相关性,检验邻近地区间的相似性或独立性。局部空间自相关指数用于揭示空间参考单元属性特征值之间的相似性或相关性,识别空间集聚和空间孤立,探测空间异质等^[26]。Moran 指数是用来衡量空间自相关的指数,反映空间邻接或邻近的区域单元属性值的相似程度,分为全局指标和局部指标两种。Moran 指数绝对值越接近 1,空间相关性越明显。全局和局部 Moran 指数计算公式分别为^[27]

$$I = \frac{n}{S_0} \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{i,j} z_i z_j}{\sum_{i=1}^n z_i^2} \quad (1)$$

其中:

$$S_0 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{i,j} \quad (2)$$

$$z_i = x_i - \bar{x} \quad (3)$$

$$I_i = \frac{(x_i - \bar{x})}{S^2} \sum_j w_{ij} (x_j - \bar{x}) \quad (4)$$

式中, x_i , x_j 分别表示 i 和 j 单元的人口密度值, w_{ij} 表示空间权重矩阵, S^2 表示方差。空间相关性分析利用 GeoDa 软件实现。

2.2 地理探测器

不同地理位置上光肩星天牛发病率有显著不同,可能存在的环境影响因素随着地理空间的变化而改变^[23,28]。假设在地理空间上,如果某种环境因素能够影响光肩星天牛的发病率,那么该因素与光肩星天牛发病率在地理空间上的分布应具有相似性^[29]。通过分析影响因素控制发病率发生的空间统计学特征,可以获得影响光肩星天牛发生的规律。地理探测器模型无线性假设,能够探测光肩星天牛的空间分异性,分析不同分层内驱动因子对虫害的解释力度,并可进一步探测因子交互作用后的解释力。地理探测器的具体公式为^[23]

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

式中, h 表示变量 Y 或因子 X 的分层,即分类或分区; q 为发病率空间分异影响因素探测力指标; N_h 为分层 h 内样本单元数; N 为整个区域样本单元数; L 为分层个数; σ^2 为整个区域的方差; σ_h^2 为分层 h 的总方差; q 的取值区间为 $[0, 1]$, q 值越大,说明分区因素对发病率的影响越大^[23,28]。

地理探测器的机理^[29]如图 2 所示, Ω 表示整个地理空间, H 表示光肩星天牛发病率的

分布，且 H 为均匀的格点数据； C 和 D 表示影响光肩星天牛发病率的因子的分布。叠加发病率和影响因子的分布， q 值越大，因子对发病率的解释力越强，即发病率的空间分布由影响因子的空间分布控制。

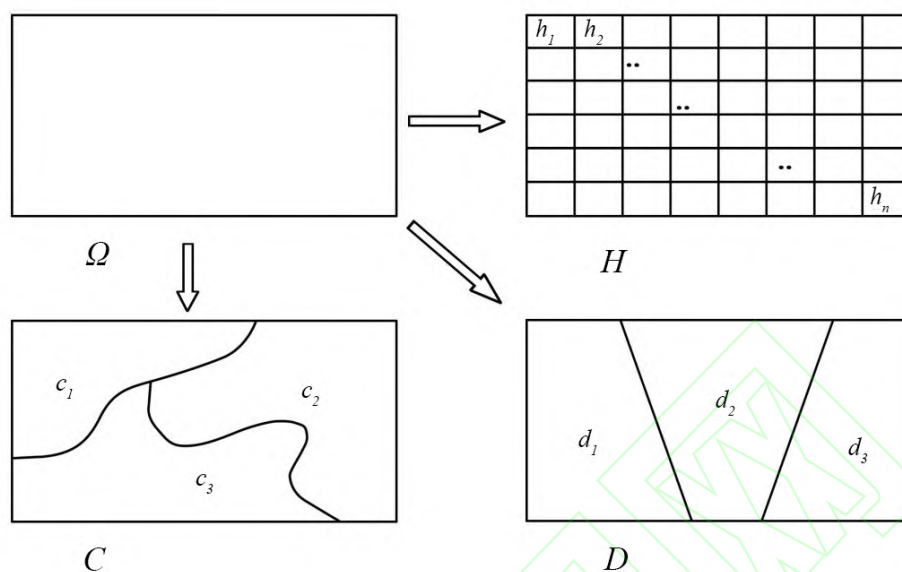


图 2 地理探测机理示意图

Fig. 2 The principle of geographical detector

地理探测器主要由 4 个方面组成：风险探测，判断两个分层之间的属性值差别是否显著，用 t 统计量来检验；因子探测，探测因变量的空间分异性以及某影响因素在多大程度上解释了因变量的空间分异，用 q 值度量；生态探测，用于比较两影响因素对因变量的空间分布的影响是否有显著的差异，以 F 统计量来衡量；交互探测，探究两个影响因子之间的交互作用，当两个自变量共同作用时是否增强或减弱了对因变量的解释能力，或是相互独立的解释研究对象^[23]。

由于地理探测器要求输入数据为离散值，进行探测之前首先在研究区域矢量数据的基础上构建 $5\text{ km} \times 5\text{ km}$ 渔网增加样本点，均匀分布在研究区内部，共 18930 个点。采用模拟退火算法对因变量数据进行分级，并设置分级数为 5、6、7，当分级数为 6 时，得到的各因子解释力最强，故将各连续型数值因子离散化为 6 个等级。

3 结果与分析

3.1 光肩星天牛发病率及影响因子空间分布

研究区域内光肩星天牛发病率和自然、社会经济指标的空间分布如图 3 所示，发病率较高的地区主要分布在河北北部、山西、陕西等省份，河北南部、河南中南部及山东地区的发病率较低且防治力度强（图 3a、3g）。降雨量呈现出从西北到东南逐渐增多的趋势，陕西、山西和河北三省的北部日照充足，日照时数向南逐渐减少（图 3b、3c）；环渤海地区风速较大，山东烟台、威海地区风力强劲，研究区中南部风速较小（图 3d）；从河南安徽地区向西北年平均气温逐渐降低，河北和山西交界的区域年均气温波动较大（图 3e、3f）。经济指标当中，研究区中东部的第一产业值普遍高于西部（图 3i），地区生产总值和第二产业值的空间分布基本一致（图 3h、3j）。人口较多的地区集中在安徽北部和河南东部（图 3k），陕西、河南和安徽地区的植被覆盖水平比较高（图 3l）。可以看出，研究所选取的影响因素具有明显的空间分布特征。

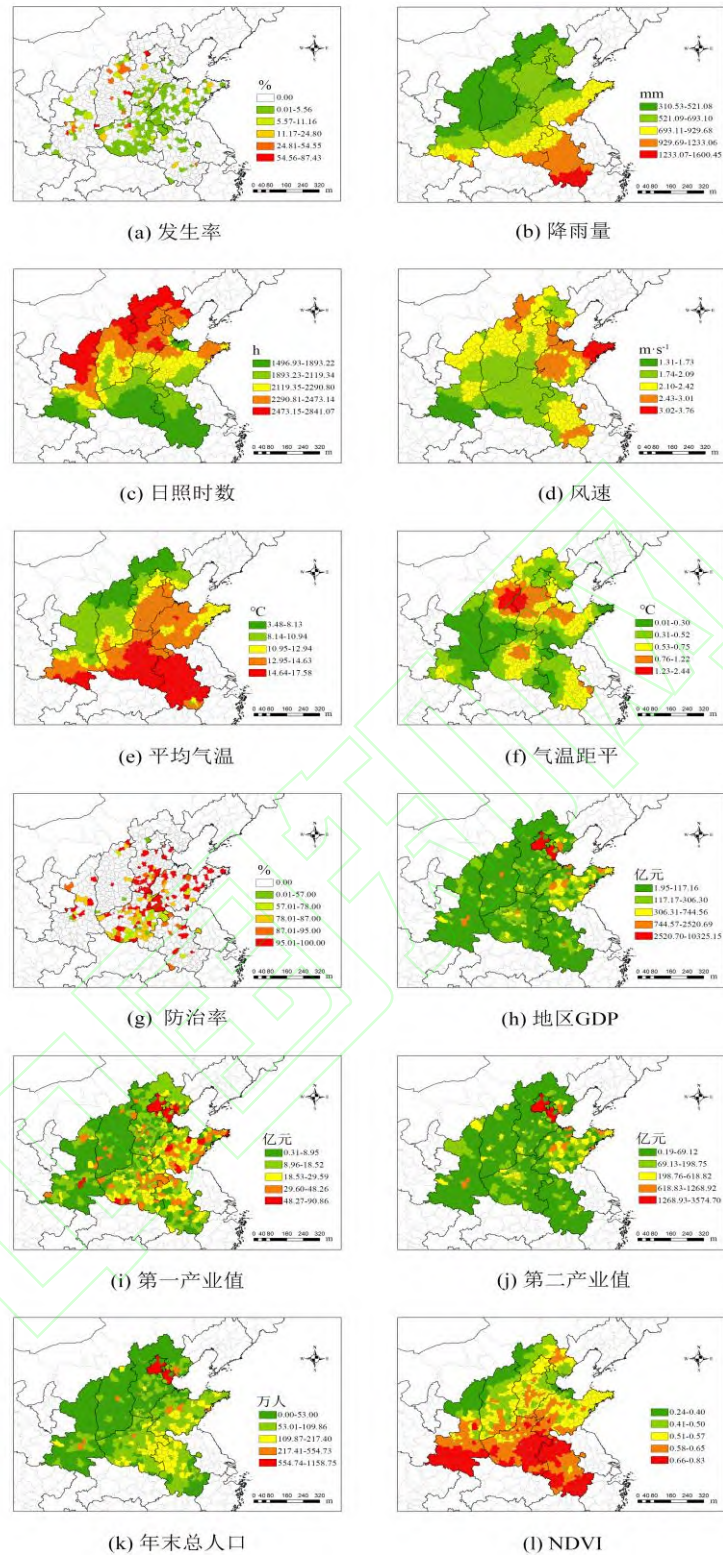


图3 华北地区（北京、天津、河北、山东、山西、陕西、安徽、河南八省市）光肩星天牛发病率与各自然社会经济指标空间分布图

Fig.3 Spatial distribution of the incidence rate and natural socio-economic indicators

研究区域内光肩星天牛发病率及各影响因子的数学分布特征如表 1 所示。研究区域的经济
发展水平不平衡，标准差相对来说较大（地区 GDP 标准差为 510.30 元），最小年末总人

口数 (3.30×10^4 人) 和最大值 (1.159×10^7 人) 相差悬殊; 考虑实际地理位置, 气象因素的数据变化在合理范围内, 各地区降水 (标准差为 233.69 mm) 和日照条件 (标准差为 283.81 h) 有明显的差异。

表 1 光肩星天牛发病率和自然、社会经济指标的描述性统计

Tab.1 Descriptive statistics of the incidence rate and natural socio-economic indicators

变量	最小值	25%	50%	75%	最大值	平均值	标准差
发生率 / %	0.00	0.00	0.00	0.77	87.43	2.39	9.00
降雨量 / mm	310.53	507.86	581.13	765.81	1600.45	659.29	233.69
日照时数 / h	1496.93	1941.59	2187.12	2362.32	2841.07	2156.48	283.81
风速 / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	1.31	1.94	2.11	2.33	3.76	2.17	0.37
平均气温 / $^{\circ}\text{C}$	3.48	11.22	13.49	14.58	17.58	12.77	2.65
气温距平 / $^{\circ}\text{C}$	0.01	0.29	0.51	0.70	2.44	0.54	0.35
年末总人口 / 万人	3.30	30.85	50.02	77.00	1158.75	64.45	70.82
防治率 / %	0.00	0.00	0.00	67.00	100.00	23.48	40.08
地区 GDP (亿元)	1.95	35.03	73.19	135.96	10325.15	158.18	510.30
第一产业值 (亿元)	0.31	5.78	11.73	21.22	90.86	14.82	12.47
第二产业值 (亿元)	0.19	14.31	34.40	76.60	3574.70	82.93	212.20
NDVI	0.24	0.50	0.56	0.63	0.83	0.56	0.17

光肩星天牛发病率及各影响因子全局自相关系数如表 2 所示。从表中可以看出, 各指标的 Moran 指数均为正值, 说明这些指标存在正的空间自相关性。各气象指标的 Moran 指数很高, 在 0.89 以上, 显著性水平为 0.001, 具有统计意义, 表现出显著的空间聚集性。通过局部 Moran 指数判别集聚类型 (图 4) 可以看出: 山西北部发病率聚集程度较高, 聚集模式以“高发病率-高发病率”聚集为主; 山东、安徽等地主要集聚模式为“高发病率-低发病率”聚集; 山西、陕西和河北地区多出现“低发病率-高发病率”聚集。防治率高的地区集中在河南南部以及河南和山东交界地带, 聚集模式以“高发病率-高发病率”聚集为主, 周边则多为“低发病率-高发病率”聚集模式。结合发生率的空间分布可以看出这些区域的发病率普遍较低 (图 4a), 初步判断防治措施可以有效控制光肩星天牛虫害。

表 2 光肩星天牛发病率与各影响因素的全局 Moran 指数及检验结果

Tab.2 Global Moran's I and significance test results

变量	Moran 指数	P
发生率 / %	0.04	0.055
降雨量 / mm	0.97	0.001
日照时数 / h	0.93	0.001
风速 / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	0.89	0.001
平均气温 / $^{\circ}\text{C}$	0.93	0.001
气温距平 / $^{\circ}\text{C}$	0.91	0.001
年末总人口 / 万人	0.29	0.002
防治率 / %	0.21	0.001
地区 GDP (亿元)	0.18	0.003
第一产业值 (亿元)	0.30	0.001
第二产业值 (亿元)	0.21	0.002
NDVI	0.86	0.001

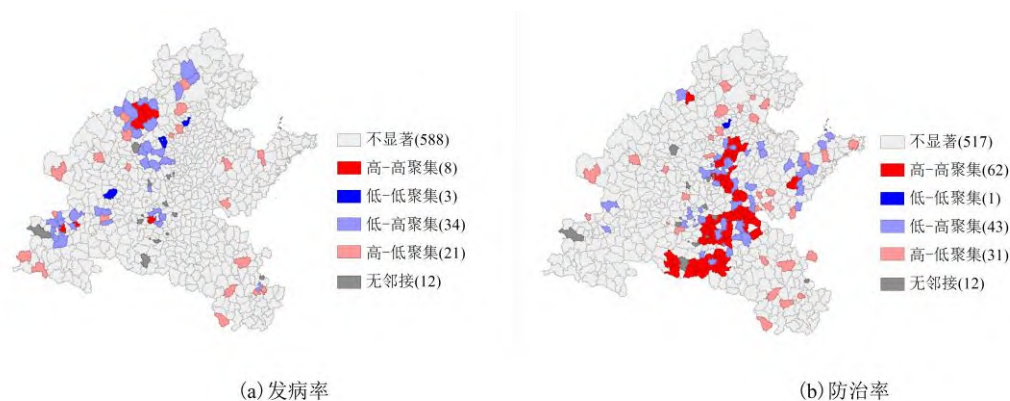


图 4 光肩星天牛发病率与各影响因素的 LISA 集聚图
Fig.4 LISA diagram of incidence rate and influencing factors

3.2 风险探测

采用风险探测器探究不同的自变量对灾害发生率的影响后，得到风险探测结果，如表 3 所示。从表 3 中可以看到，在 4.49~6.27 °C 这一气温区间中，风险探测得分较高，发病风险较大；风速在 1.7m/s 左右光肩星天牛发病最为聚集。当降雨量达到 475 mm 左右，平均发病率保持在较高水平，为 70%。较高时长的日照容易引发灾害，日照时间过长或过少，发病率相应维持在低水平；气温距平在 0.115~0.116 °C 区间内灾害发生最为聚集。各社会经济因素与发病率取值之间的关系呈双峰态势。以第二产业值为例，当区间分别为 $0.70 \times 10^8 \sim 0.81 \times 10^8$ 元和 $2.42 \times 10^8 \sim 2.44 \times 10^8$ 元时，发病率分别为 50%和 87.43%，在其他区间发病率处于低水平状态。

表 3 风险探测结果

Tab.3 Results of risk detection

影响因素		分类及得分					
平均气温 / °C	分类	3.48~3.51	3.51~4.49	4.49~4.67	4.67~6.16	6.16~6.27	6.27~17.58
	得分	0	0	47.5	5.83	50	1.8
风速 / m · s ⁻¹	分类	1.3~1.51	1.51~1.53	1.53~1.780	1.780~1.781	1.781~1.88	1.88~3.76
	得分	0.22	5.25	0.83	81.82	1.1	2.3
降雨量 / mm	分类	310~475	475~476	476~502	502~529	529~5230	5230~1600
	得分	0.79	70	1.54	9.12	42.09	1.35
日照时数 / h	分类	1497~1537	1537~1681	1681~2005	2005~2006	2006~2627	2627~2841
	得分	0	0.74	1.22	81.82	2.75	0.35
气温距平 / °C	分类	0.01~0.044	0.044~0.053	0.053~0.115	0.115~0.116	0.116~0.131	0.131~2.44
	得分	0.11	7.43	0.28	70	0	2.1
年末总人口 / 万人	分类	3.3~14.4	14.4~14.5	14.5~21.6	21.6~34.6	34.6~34.8	34.8~1158.75
	得分	1.96	54.65	4.15	1.65	80	1.54
地区 GDP (亿元)	分类	1.95~5.6	5.6~5.64	5.64~12.07	12.07~12.19	12.19~25.76	25.76~10325.15
	得分	1.09	50	0.57	87.43	4.24	1.53
第一产业值 (亿元)	分类	0.31~1.03	1.03~1.76	1.76~1.81	1.81~7.92	7.92~7.97	7.97~90.86
	得分	0.17	0.46	45	2.99	70	1.58
第二产业值 (亿元)	分类	0.19~0.59	0.59~0.70	0.70~0.81	0.81~2.42	2.42~2.44	2.44~3574.70
	得分	0	0.15	50	1.05	87.43	1.88

影响因素		分类及得分					
防治率 / %	分类	0~14	14~33	33~55	55~84	84~86	86~100
	得分	0.8	70	47.47	5.05	51.07	4.67
NDVI	分类	0.24~0.35	0.35~0.368	0.368~0.373	0.373~0.464	0.464~0.465	0.465~0.83
	得分	0.02	2.41	50	3.23	80	1.79

3.3 因子探测

利用因子探测器得到各影响因子对灾害发生率的解释力，按照 q 值从小到大排序如下：防治率（0.37）、人口（0.29）、地区 GDP（0.28）、第二产业值（0.26）、降雨量（0.22）、NDVI（0.20）、第一产业值（0.12）、平均气温（0.10）、气温距平（0.07）、日照时数（0.06）、风速（0.05）。结果显示，地理分区解释力最强的是防治率，人口、地区 GDP 和第二产业值等社会经济指标对发病率的解释能力比较强。在气象因素中，降水和气温两个影响因素对光肩星天牛发病率的分布差异解释力最强，分别为 22% 和 10%，说明这两个因子对于光肩星天牛发病有一定的影响意义。

3.4 生态探测

利用生态探测器分析各影响因子解释发生率时是否存在显著差异，其结果如表 4（其中 Y 表示存在显著差异，N 表示不存在显著差异）所示。防治率对发病率的影响与其他所有影响因子都有显著的不同；除降雨量与气温和风速之间在解释力上具有显著差异之外，气象因素之间没有明显的解释差异。社会经济因素中，第一产业值与第二产业值有显著差异，人口数、地区 GDP 分别与第一或第二产业值对光肩星天牛发病率的影响无显著差异。从风险探测的结果来看，按照解释力的显著性聚类的思想，可将平均气温、风速、第一产业值和第二产业值划分为影响显著的一类，剩下的因子则划分为影响不显著的一类。综合生态探测器和因子探测器的结果，平均气温、第一产业值和第二产业值对光肩星天牛发生率影响显著。

表 4 不同影响因子对发生率的统计显著性差异

Tab.4 Significance difference between different influencing factors on incidence rate											
影响因子	平 均 风	降 雨	日 照	气 温 距	人 口	地 区	第 一 产	第 二 产	防 治		
	气 温	速	量	时 数	平	数	GDP	业 值	业 值	率	
风速	N										
降雨量	Y	Y									
日照时数	N	N	N								
气温距平	N	N	N	N							
人口数	Y	Y	Y	Y	Y						
地 区	Y	Y	Y	Y	Y	N					
GDP											
第一产业	Y	Y	N	Y	Y	N	N				
值											
第二产业	Y	Y	Y	Y	Y	N	N	Y			
值											
防治率	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y		
NDVI	Y	Y	N	Y	Y	N	N	Y	N	N	

3.5 交互探测

利用交互探测器可以获得两个不同的影响因子对发病率的交互影响（表 5）。平均气温单独对光肩星天牛发生率的解释力为 10%，地区 GDP 单独作用于发生率时解释力为 28%，交互作用之后的解释力变为 35%，两者共同作用的结果要高于各自单独作用的结果。进一步分析，因子交互的解释力增强可分两种情况：①某两种影响因子交互作用后非线性增强，即两者共同作用的 q 值大于分别作用的 q 值加和。结合表 5，降雨量（ $q=0.22$ ）和人口数（ $q=0.29$ ）交互作用后 q 值（0.56）要大于两者单纯加和，作用力非线性增强。非线性增强说明两个因子结合会产生单独作用之外的影响。类似地，平均气温、降雨量、防治率、人口数 4 个因素两两之间交互作用后解释力均呈非线性增强；人口数和第一产业值、防治率和风速之间交互作用也出现非线性增强的现象。②两种影响因子相互独立作用，即两者共同作用的 q 值等于分别作用的 q 值加和。观察探测结果可以得出，相比其他因子，平均气温和日照时数参与交互作用时更有利于提高对发生率的解释力；地区 GDP、防治率和降雨量对交互解释的提高程度相对较低。

表 5 两种因子对灾害发生率影响的交互作用

Tab.5 Interaction between two factors affecting disaster incidence

参数	平均气温	风速	降雨量	日照时数	气温距平	人口数	地区 GDP	第一产业值	第二产业值	防治率	NDVI
平均气温	0.10										
风速	0.16	0.06									
降雨量	0.28	0.27	0.22								
日照时数	0.17	0.07	0.27	0.06							
气温距平	0.17	0.12	0.22	0.13	0.07						
人口数	0.44	0.35	0.56	0.35	0.36	0.29					
地区 GDP	0.35	0.34	0.42	0.34	0.35	0.44	0.28				
第一产业值	0.23	0.19	0.23	0.19	0.14	0.50	0.39	0.13			
第二产业值	0.33	0.32	0.41	0.32	0.33	0.42	0.28	0.39	0.26		
防治率	0.49	0.49	0.65	0.54	0.37	0.51	0.52	0.47	0.49	0.37	
NDVI	0.28	0.26	0.36	0.26	0.27	0.35	0.45	0.33	0.42	0.50	0.20

4 讨论

本研究中对生态因子的探测与目前研究发现的结果基本一致^[3,10,30-32]。光肩星天牛漫长的幼虫期需有足够的积温指标，才能完成其各龄期的生长发育，而且在短期内光肩星天牛难以向低温地区扩散^[30]。实验室分析研究表明，在温度超过发育起点温度 7.44℃ 的条件下，卵蛹期的长短与温度呈负相关关系^[10,31-32]。王志刚^[3]归纳出光肩星天牛危害猖獗地区的年均气温在 3.9℃ 以上，年均湿度 44.9% 以上。这与本研究中风险探测出的结果保持一致：当年平均气温在 4.49~6.27℃ 这一区间中、降雨量达到 475 mm 左右时，发病率保持在较高水平。生态因子在种群扩散方面也起到了到一定作用。温俊宝^[20]在标记回捕试验中发现天牛的扩散与温度有关，一般随温度升高而下降，并且在一定范围内（0.3~1.8m/s）风速的增大有利于天牛的扩散，这是天牛长期适应自然界的結果。本研究发现，风速在 1.8m/s 以下平均发

病率聚集, 高于 1.8m/s 则几乎没有虫害发生, 而当温度超过 7°C 后发生率显著减少, 说明光肩星天牛对温度的条件要求应处于一定的范围内。

社会经济方面, 地区 GDP 水平较低的地区发病率高, 第一、二产业和农林业密切相关。风险探测结果表明, 第一产业值低于 8 亿元、第二产业值低于 3 亿元的地区光肩星天牛发病普遍聚集; 人口数较少的地区平均发病率聚较高, 可从侧面反映该地区社会经济发展水平较低。而在经济发展水平高的地区, 发病率被控制在 2% 以内。人为因素对于光肩星天牛灾害的防治起到关键的作用。因子探测发现, 防治率对灾害发生率的解释力最高, P 值达到了 0.37。风险探测表明当防治率大于 86% 时发病率显著减少。目前已有研究也有类似的发现, 但均没有做到系统化。郭秋月等^[15]发现在养护管理水平较高的地区柳树受害率为 10.09%。而缺乏专业养护管理的地区柳树受害率最高, 可达 83.19%, 可见防治率较高的区域发病率显著降低。树种引进也可导致光肩星天牛的发生。近年来城市绿化工作广泛开展, 苗木调运过程中容易出现检疫欠缺、引种疏忽等问题, 导致引入虫害。刘辉芳等^[33]发现, 幼龄柳树栽植年限少, 发病严重, 因此认为苗木带虫可能性极大。NDVI 的风险探测结果说明植被覆盖度高、绿化水平好的地区不容易受到虫害的干扰。综上所述, 光肩星天牛的发生与当地发展水平、绿化程度、病虫害防治措施和管理意识等有直接的联系^[34]。地区经济发展水平越高, 对农林业病虫害的控制能力也会提高到一定的水平。

与目前已有研究相比, 本文在影响因子的交互作用方面有了新的研究成果。从交互探测结果来看, 导致光肩星天牛发病更为重要的原因是影响因子之间的叠加交互, 而单一因子的解释力不足以说明问题。研究表明, 当降雨量和防治率共同作用时对发病率的解释力非线性增强并达到最大。通过研究交互作用后解释力非线性增强的因子, 对病虫害的防治可以从多个角度共同入手。同时, 本研究还发现部分影响因子对发生率影响呈双峰或多峰态势。降雨量和平均气温影响下的发病率虽然整体来说集中在一定指标范围内, 但是在特定的区间内, 发病率却非常低, 比如平均气温区间分别为 4.49~4.67°C、6.16~6.27°C 时平均发病率都比较集中, 分别达到 50% 左右, 这两个区间间隔都比较小, 但是 4.67~6.16°C 这一区间内的发病率却只有 6%。各社会经济指标、NDVI 值、防治率都出现了类似的现象。

5 结束语

以中国北方地区 666 个县市的相关指标为样本, 首先分析了光肩星天牛发病率及其影响因素的空间分布, 之后采用地理探测器的方法分析光肩星天牛发病率空间分布及其影响因素。结果显示, 发病率在山西北部地区表现为高-高聚集, 受灾情况严重; 在山东、安徽等地多出现高-低聚集的现象。地理探测的结果表明, 所选的气象和社会经济因素对光肩星天牛发病率都有一定的影响。从对发病率的解释力来看, 经济因素中人口数和地区生产总值的解释能力较高, 自然气象因素中降雨量和平均气温能够较好地解释发病率。从风险探测的结果来看解释力显著的因子, 在相对温暖、降水多的地区, 光肩星天牛灾害比较容易发生; 而人口较多、GDP 较高的地区社会经济发展情况较好, 光肩星天牛灾害发生率相应的维持在低水平。采用高效的防治措施可以有效缓解灾情。在分析各因素如何独自影响发病率基础上, 通过探讨各因素的交互作用, 发现气象要素和社会经济要素交互后可以提高解释力。相关地区可根据本地各气象和社会经济发展指标大体预测本地光肩星天牛发病情况。

参考文献

- [1] 王嘉冰. 3 种无公害药剂对光肩星天牛的防治技术研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2017.
WANG Jiabing. Control technology of three nuisanceless insecticides on *Anoplophora glabripennis*[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2017.
- [2] 阎浚杰. 中国东部光肩星天牛分布区的研究[J]. 东北林学院学报, 1985(1): 62-69.

- YAN Junjie. Research on distribution of basicosta whitespotted longicorn in Eastern China [J]. Journal of North-Eastern Forestry College, 1985(1): 62-69.
- [3] 王志刚. 中国光肩星天牛发生动态及治理对策研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2004.
- WANG Zhigang. Study on the occurrence dynamics of *Anoplophora glabripennis*(Coleoptera: Cerambycidae) and its control measures [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2004.
- [4] 陈立学. 杨树天牛发生规律及综合防治[J]. 安徽林业, 2008(1): 53.
- CHEN Lixue. The occurrence regularity and comprehensive control of poplar longhorn beetle [J]. Anhui Forestry, 2008(1): 53.
- [5] 骆有庆, 黄竞芳, 李建光. 我国杨树天牛研究的主要成就、问题及展望[J]. 昆虫知识, 2000(2): 116-122.
- LUO Youqing, HUANG Jingfang, LI Jianguang. The main achievements, problems and prospects of the research on poplar longhorn beetle in China [J]. Insect knowledge, 2000(2): 116-122.
- [6] 周琳, 马志卿, 冯岗, 等. 天牛性信息素、引诱植物和植物性引诱剂的研究与应用[J]. 昆虫知识, 2006(4): 433-438.
- ZHOU Lin, MA Zhiqing, FENG Gang, et al. Research and application of longhorn beetle sex pheromone, attracting plants and botanical attractants [J]. Insect knowledge, 2006(4): 433-438.
- [7] 安榆林. 光肩星天牛分子遗传多样性及 PCR 鉴定技术的研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2004.
- AN Yulin. Sino-America joint study on genetic varieties and PCR identification of *Anoplophora glabripennis*[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2004.
- [8] 王哲, 苑克英, 王喜明. 内蒙古包头市光肩星天牛危害情况及年生活史[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2016, 37(1): 87-96.
- WANG Zhe, YUAN Keying, WANG Ximing. Harmful situation and annual life history of *Anoplophora glauca* in Baotou, Inner Mongolia [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University(Natural Science Edition), 2016, 37(1): 87-96.
- [9] 高宇, 赵红盈, 遇文婧, 等. 光肩星天牛检疫检验技术[J]. 中国农学通报, 2016, 32(25): 96-101.
- GAO Yu, ZHAO Hongying, YU Wenjing, et al. The quarantine and inspection technology of *Anoplophora glauca* [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(25): 96-101.
- [10] 郎杏茹, 魏佳宁, 董丽芬, 等. 光肩星天牛发生期测报的研究[J]. 陕西林业科技, 1996(4): 45-49.
- LANG Xingru, WEI Jianing, DONG Lifan, et al. Study on the forecast of the occurrence period of *Anoplophora glabripennis* [J]. Shaanxi Forestry Science and Technology, 1996(4): 45-49.
- [11] KAPPEL A P, TROTTER R T, KEENA M A, et al. Mapping of the Asian longhorned beetle's time to maturity and risk to invasion at contiguous United States extent[J]. Biological Invasions, 2017, 19(7): 1999-2013.
- [12] SHATZ A J, ROGAN J, SANGERMANO F, et al. Characterizing the potential distribution of the invasive Asian longhorned beetle (*Anoplophora glabripennis*) in Worcester County, Massachusetts[J]. Applied Geography, 2013, 45: 259-268.
- [13] SHATZ A J, ROGAN J, SANGERMANO F, et al. Modeling the risk of spread and establishment for Asian longhorned beetle (*Anoplophora glabripennis*) in Massachusetts from 2008-2009[J]. Geocarto International, 2016, 31(8): 813-831.
- [14] 刘月芳, 魏国玲, 魏国英, 等. 杨树林光肩星天牛数量分布影响因子分析[J]. 内蒙古林业科技, 2012, 38(4): 60-61+64.
- LIU Yuefang, WEI Guoling, WEI Guoying, et al. Influencing factors of quantity distribution of *Anoplophora glabripennis* in poplar forest [J]. Journal of Inner Mongolia Forestry Science & Technology, 2012, 38(4): 60-61, 64.
- [15] 郭秋月. 天津地区光肩星天牛的发生规律与防治技术[J]. 农业科技与信息(现代园林), 2010(10): 66-68.
- GUO Qiuyue. Occurrence and control techniques of *Anoplophora glabripennis* in Tianjin area [J]. Modern

- Landscape Architecture, 2010(10): 66-68.
- [16] HÉRARD F, CIAMPITTI M, MASPERO M, et al. Anoplophora species in Europe: infestations and management processes 1[J]. EPPO Bulletin, 2006, 36(3): 470-474.
- [17] BARLOW L A, CECILE J, BAUCH C T, et al. Modelling interactions between forest pest invasions and human decisions regarding firewood transport restrictions[J]. PloS one, 2014, 9(4): e90511.
- [18] BROWN N, VAN DEN BOSCH F, PARNELL S, et al. Integrating regulatory surveys and citizen science to map outbreaks of forest diseases: acute oak decline in England and Wales[J]. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 2017, 284(1859): 20170547.
- [19] HOSTETLER A E, ROGAN J, MARTIN D, et al. Characterizing tree canopy loss using multi-source GIS data in Central Massachusetts, USA[J]. Remote Sensing Letters, 2013, 4(12): 1137-1146.
- [20] 温俊宝, 李友常, 夏乃斌, 等. 杨树光肩星天牛成虫扩散格局的研究[J]. 生态学报, 1998, 18(3): 47-55.
WEN Junbao, LI Youchang, XIA Naibin, et al. Study on the diffusion patterns of adult amphitheatr in populus sylvestris [J]. Acta Ecologica Sinica, 1998, 18(3): 47-55.
- [21] HULL-SANDERS H, PEPPER E, DAVIS K, et al. Description of an establishment event by the invasive Asian longhorned beetle (*Anoplophora glabripennis*) in a suburban landscape in the northeastern United States[J]. PLoS One, 2017, 12(7): e0181655.
- [22] 遇文婧, 赵红盈. 光肩星天牛防控技术研究进展[J]. 中国农学通报, 2016, 32(10): 114-119.
YU Wenjing, ZHAO Hongying. Research progress on the prevention and control technology of *Astragalus glabra* [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(10): 114-119.
- [23] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器:原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
WANG Jinfeng, XU Chengdong. Geodetector: principles and prospects [J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116-134.
- [24] 杨永侠,张函,郭雅萍,张丽红,桑婧.基于地理探测器的山区作物生产潜力指数修正研究[J].农业机械学报,2019,50(7):267-274.
YANG Yongxia, ZHANG Han, GUO Yaping, et al. Correction of Crop Production Potential Index in Mountainous Area Based on Geodetector[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 267-274.
- [25] HUANG J, QU B, FANG G, et al. The drivers of the Asian longhorned beetle disaster show significant spatial heterogeneity[J]. Ecological Indicators, 2020, 117: 106680.
- [26] 路昌,耿昊,刘蕊,等.山东省耕地多功能耦合协调度时空格局分析[J].农业机械学报,2021,52(3):265-274.
LU Chang, GENG Hao, LIU Rui, et al. Spatial-temporal Pattern Analysis of Cultivated Land Multi-functional Coupling Coordination Degree in Shandong Province[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(3):265-274.
- [27] 王法辉. 基于 GIS 的数量方法与应用[M]. 北京: 商务印书馆, 2009: 205-232.
- [28] 李佳泓, 陆大道, 徐成东, 等. 胡焕庸线两侧人口的空间分异性及其变化[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 148-160.
LI Jiaming, LU Dadao, XU Chengdong, et al. The spatial differentiation and changes of the population on both sides of the Hu Huanyong line [J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 148-160. (in Chinese)
- [29] Huang J X., Wang J F., Bo Y C., et al. Identification of health risks of hand, foot and mouth disease in China using the geographical detector technique. Int.J.Environ.Res.Public Health 2014,11.doi:10.3390/ijerph110303407.
- [30] 关喆. 哈尔滨市光肩星天牛发生危害调查研究[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2010.
GUAN Zhe. Investigation on the hazards of Long-shoulder beetles in Harbin City[D]. Harbin: Heilongjiang University, 2010.

- [31] STRAW N A, TILBURY C, FIELDING N J, et al. Timing and duration of the life cycle of Asian longhorn beetle *Anoplophora glabripennis* (Coleoptera: Cerambycidae) in southern England[J]. *Agricultural and Forest Entomology*, 2015, 17(4): 400-411.
- [32] KEENA M A, MOORE P M. Effects of temperature on *Anoplophora glabripennis* (Coleoptera: Cerambycidae) larvae and pupae[J]. *Environmental Entomology*, 2010, 39(4): 1323-1335.
- [33] 刘辉芳. 河北省及北京市区柳树光肩星天牛和桑天牛的调查及防治策略[J]. *安徽农业科学*, 2009, 37(14): 6485-6487,6624.
- LIU Huifang. Investigation and control strategy of *Achaeus sylvestris* and *Ceratophyllum sibiricum* in Hebei province and Beijing districts [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2009, 37(14): 6485-6487,6624.
- [34] CIAMPITTI M, CAVAGNA B. Public awareness: a useful tool for the early detection and a successful eradication of the longhorned beetles *Anoplophora chinensis* and *A. glabripennis*[J]. *EPPO Bulletin*, 2014, 44(2): 248-250.