



应用生态学报

Chinese Journal of Applied Ecology

ISSN 1001-9332, CN 21-1253/Q

《应用生态学报》网络首发论文

题目：福建省主要外来入侵植物空间分异及其影响因素
作者：李志鹏，赵健，陈业滨，陈宏，林娜，邱荣洲
DOI：10.13287/j.1001-9332.201908.010
收稿日期：2019-02-18
网络首发日期：2019-05-22
引用格式：李志鹏，赵健，陈业滨，陈宏，林娜，邱荣洲. 福建省主要外来入侵植物空间分异及其影响因素[J/OL]. 应用生态学报.
<https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.201908.010>



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。

福建省主要外来入侵植物空间分异及其影响因素

李志鹏¹ 赵 健^{1✉} 陈业滨² 陈 宏¹ 林 娜¹ 邱荣洲³

(¹福建省农业科学院数字农业研究所, 福州 350001; ²武汉大学资源与环境科学学院, 武汉 430079; ³福建省农业科学院植物保护研究所, 福州 350012)

✉通信作者 Corresponding author. E-mail: zhaojian@faas.cn

摘要 在实地调查数据的基础上, 本研究结合 GIS 空间分析技术和地理探测器模型, 分析福建省外来入侵植物空间分布情况, 以及地理与社会环境因子及其交互作用对外来入侵植物分布的影响。结果表明: 福建省共记录入侵植物 82 种, 其中, 优势科为菊科, 小蓬草、藿香蓟和空心莲子草出现频次最高。沿海区域的入侵植物物种数量多于内陆区域, 福州和厦门为福建省外来入侵植物的两大热点地区。入侵植物在不同海拔均有分布, 但入侵植物的种类随着海拔的升高总体呈下降趋势。地理探测器分析显示, 自然环境因子中降水和社会经济因子中路网密度、人口密度是入侵植物的空间分布的主要影响因子。各因子的空间交互作用会正向影响入侵植物的空间分布, 这反映出入侵植物空间分布影响要素的复杂性。综上, 将地理探测器应用到入侵植物研究领域是可行的, 筛选出的环境指示因子可用于监测福建省入侵植物的适生区, 从而为采取有效的防控措施提供科学依据。

关键词 入侵植物; 空间分布; 地理探测器; 空间交互; 福建省

DOI: 10.13287/j.1001-9332.201908.010

Spatial differences and driving factors of invasive alien plants in Fujian Province, China.

LI Zhi-peng¹, ZHAO Jian^{1✉}, CHEN Ye-bin², CHEN Hong¹, LIN Na¹, QIU Rong-zhou³

(¹Institute of Digital Agriculture Research, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350001, China; ²School of Resource and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430079, China; ³Institute of Plant Protection, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350012, China)

Abstract Based on the field data, the distribution of invasive plants, and the effects of geographical and social environmental factors and their interaction on distribution of the invasive plants were analyzed by integrated GIS spatial methods and geographical detector model in Fujian Province, China. The results showed that a total of 82 invasive species were recorded, and Compositae was the dominant family. *Conyza canadensis*, *Ageratum conyzoides* and *Alternanthera philoxeroides* were universally observed with the highest frequencies. There were more invasive species in coastal areas compared with those in inland areas, and Fuzhou and Xiamen were considered to be the hot areas invaded by alien plant species. The invasive plants widely distributed at different altitudes, and the species reduced with the increasing altitude. The geographical detector analysis showed that the rainfall of natural environment factors and the road density and people density of socio-economy factors were the major influencing factors that could affect the distribution of invasive plant species. The multi-factor interaction had a positive effect on the spatial distribution of invasive plants, and this implied the complexity of impact factors on the distribution of invasive plant species. In a word, the geographical detector could be used in the study of invasive plants, and environmental factors could be also applied for monitoring the suitable establishment areas of invasive plants in Fujian Province, and it provided a scientific basis for effective management of invasive plants.

Key words invasive plant; spatial distribution; geographical detector; spatial interaction; Fujian Province.

生物入侵是 21 世纪重要的生态问题之一, 它对地方生态系统风险性^[1]、生物多样性、物种均匀性^[2-3]、人类健康^[4]和社会经济^[5-6]等均具有深远影响。随着国际经济贸易的飞速发展, 人类将物种转

基金项目: 本文由福建省科技重大专项(2017NZ0003-1)、国家重点研发计划项目(2016YFC202105, 2017YFC1200600)和福建省农业科学院青年人才创新基金项目(A2017-35, YC2018-1)资助 This work was supported by the Fujian Province Science and Technology Major Project (2017NZ0003-1), the National Key R&D Program of China (2016YFC202105, 2017YFC1200600), and the Youth Talent Innovation Fund of Fujian Academy of Agricultural Sciences (A2017-35, YC2018-1).

作者简介: 李志鹏, 男, 1990 年生, 硕士, 助理研究员。主要从事外来入侵及农业地理信息研究。E-mail: lzp1117@zju.edu.cn

网络首发时间: 2019-05-22 10:51:19 网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1253.Q.20190521.1043.005.html>

移到原生地之外的速度大幅增加,植物群和动物群的同质化问题愈加突出^[7-10],这使得被入侵地所面临的生态问题日益严峻。入侵植物是生物入侵的主要形式之一,深入了解地区入侵植物的空间分布特征、驱动因子,探讨区域入侵植物的宏观分布情况、自然环境因素和社会经济因素对入侵植物空间分布格局的影响,能够有效地辅助提升区域入侵植物防控水平。

入侵植物的种类组成、空间分布及其与环境和人类活动的关系一直是入侵生态学的热点问题。在现有的研究中,外来入侵植物的空间格局研究涵盖了全国^[11-12]、省级^[13-14]、城市^[15]等多种尺度。在方法上,聚类分析法^[16]、回归分析法^[17]、统计分析^[18]、冗余分析(RDA)^[15]等传统经典统计学模型被大量应用到植物入侵研究中。在入侵植物影响因素研究方面,研究者普遍认为,入侵植物的空间分布主要受入侵物种本身的生物学特性、自然环境与人类活动的影响^[2,17,19]。地形因子、年均温度、年均降雨量、年积温等环境指标会影响到外来入侵植物的分布与丰度^[16-17,20],增加植物入侵的风险^[21-22]。人口数量、经济发展、道路密度、农业活动、对外交流等对外来入侵植物的扩散和分布等呈现显著的正相关^[3,23]。目前,对于植物入侵的空间尺度、研究方法及影响因素等方面均有关关注,但更多考虑的是单一因素对入侵物种空间格局的影响,而入侵植物的空间扩张并非是单一因素作用的结果,而是多因素交互作用的产物,因此不能忽略因素间交互作用的影响。此外,基于实际调查数据及数据的完整性、实效性、整体性角度全面阐述植物入侵的空间特征,对于自然环境与社会经济因素对植物入侵的系统性作用机制的分析有待深入研究。

福建省作为改革开放最早的沿海省份,对外往来贸易频繁,生物入侵风险远高于我国内陆其他省份,已成为我国遭受外来物种入侵最严重的省份之一^[9,11]。但现有的文献中缺少全面系统地对福建省外来入侵植物种类、空间分布及其影响因子的研究。地理探测器属于空间统计学的一种方法,突破了经典统计学的独立同分布的假设前提^[24-25]。其核心思想基于地理学的空间分异规律,其假设如果自变量对因变量存在重要影响,那么二者在空间分布上存在相似性^[25-26],而且不同的2个影响因子在空间分布的一致性比传统的一维曲线的一致性更难,即应用地理探测器所测度的相关性比传统经典统计学中的回归更为可靠^[24-25]。该模型被广泛应用在公共健康^[25-27]、社会科学^[28]、环境科学^[29]等领域。因此,本研究在实地调查数据的基础上,运用地统计学方法以及地理探测器模型分析福建省入侵植物空间分布情况及其与自然环境因子、社会环境因子之间的相互关系,以期对福建省外来入侵植物扩散的防控、生物多样性保护与生态安全相关研究提供参考。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

福建省地处我国东南沿海,处亚热带气候区域,水热资源充足,适宜人类聚居以及多种作物生长。福建省自然条件优越、交通便捷且对外贸易发达,于2014年设立了中国(福建)自由贸易试验区,对外贸易往来愈加频繁,大大增加了外来植物物种的入侵风险,入侵物种严重危害当地原有的自然生态环境。

1.2 数据来源与调查方法

1.2.1 入侵植物数据来源

数据来源于生物安全关键技术研发专项——主要入侵生物的动态分布与资源库建设项目,时间跨度为2016—2017年。根据福建省地形图和道路交通系统,对山体不同海拔、坡向、坡度进行线路调查,以道路系统(高速、国道、省道、铁路)、风景区、加工厂、农产品集散地为加密调查点,形成覆盖全省的调查网络,共设145个调查点(图1)。利用自主研发的“云采集”调查软件详细记录调查区域的入侵植物种类、生境类型、地理位置(经纬度)、海拔、物候期、坡度、坡位、枯枝落叶层成分、土壤特点、种群数量(多度)、土壤特点,以及入侵植物的平均高度和覆盖度等特征。

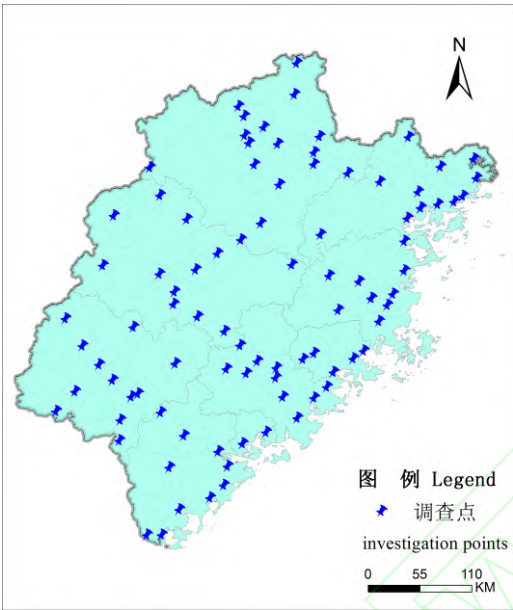


图 1 调查样点空间分布
Fig.1 Distribution of survey sites.

1.2.2 入侵植物空间分布的影响因素选取及来源

结合实地调查以及相关文献^[2,16-17,19,21-23]，选取了 15 种影响因素，包括 8 种地理环境因子和 7 种社会经济环境因子(表 1)。

表1 影响因素及数据来源
Table 1 Impact factor and data source

影响因子 Impact factor	数据来源 Data source
高程 Elevation (x_1)	中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn)2016 年数据
年均温 Annual mean emperature (x_2)	
年降水量 Annual rainfall (x_3)	
植被类型 Vegetation type (x_4)	
粉砂土 Silty (x_5)	
黏土 Clay (x_6)	
砂土 Sandy (x_7)	
坡度 Slope (x_8)	
土地利用 Land use (x_9)	《2017 年福建省省统计年鉴》 ^[30] 各市相应年份统计年鉴及统计公报
人均国民生产总值 Average GDP (x_{10})	
农作物播种面积 Grain are (x_{11})	
路网密度 Density of road network (x_{12})	
人口密度 Density of population (x_{13})	
社会消费品总额 Total social consumer goods (x_{14})	
人口流动 Migrant population (x_{15})	

1.2.3 入侵植物物种确定

2016—2017 年在福建省野外调查的基础上，根据以下 5 类条件确定福建省外来入侵植物名单。第一类为中华人民共和国生态环境部公布的 4 批中国外来入侵物种名单^[31-34]；第二类为国家质量监督检验检疫总局公布的《中华人民共和国进境植物检疫性有害生物名录》^[35](截止 2017 年 6 月)中外来入侵植物物种；第三类为原农业部公布的《国家重点管理外来入侵物种名录》(第一批)^[36]；第四类为中国外来入侵物种数据库中收录的植物名录(<http://www.chinaias.cn/wjPart/index.aspx>)；第五类为世界

自然保护联盟 IUCN 公布的《全球 100 种最具有破坏力的入侵物种名单》^[37]。

1.3 研究方法

1.3.1 地理探测器

采用地理探测器中的因子探测、交互探测和风险探测 3 部分内容分析自然环境与社会经济因素对福建省县域单元入侵植物空间分布的影响。

1) 利用因子探测分析测度不同的因子对入侵植物空间分布格局的解释程度。其核心思想是如果入侵植物存在于特定的空间位置上,若某因子与入侵植物在空间上的变化具有一致性,则说明这个因子对入侵植物空间分布的变化具有重要作用^[31-36]。其表达式如下:

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

式中: $h=1, \dots, k$ 为县域数量; L 为入侵植物总数 Y 或者候选因子 X 的区域样本数; N_h 为第 h 个子区域的样本数; σ_h^2 和 σ^2 分别为全省县域入侵植物数量的方差和全区的 Y 值的方差; q 的值域为 $[0, 1]$, 值越大说明 Y 的空间分异性越明显(即 q 值越大表示该因子对入侵物种空间分布影响越大, 反之影响越小)。

2) 利用交互探测来解释不同候选因子是独立起作用还是具有交互作用。与传统统计分析方法相比交互探测能够同时分析 2 个或者多个变量之间的交互作用对入侵植物空间分布的影响, 其结果类型见表 2。

表 2 交互探测结果类型
Table 2 Types of interaction between two covariates

交互关系 Interaction relationship	交互作用 Interaction
$q(X_1 \cap X_2) < \min(q(X_1), q(X_2))$	非线性减弱 Weaken, nonlinear
$\min(q(X_1), q(X_2)) < q(X_1 \cap X_2) < \max(q(X_1), q(X_2))$	单因子非线性减弱 Weaken, single factor
$q(X_1 \cap X_2) > \max(q(X_1), q(X_2))$	双因子增强 Enhance, two-factor
$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$	独立 Independent
$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$	非线性增强 Enhance, nonlinear

用 T 统计量来检验 2 个子因子对入侵植物空间分布的影响是否有显著差别^[26], 其公式如下:

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

式中: N_{x1} 和 N_{x2} 为不同的 2 个因子 x_1 、 x_2 的采样点总量; L_1 和 L_2 分别为变量 x_1 、 x_2 区域样本数

目。其中, 零假设 F_0 : $\sum_{h=1}^{L1} N_h \sigma_h^2 = \sum_{h=1}^{L2} N_h \sigma_h^2$ 。如果在 α 的显著性水平上拒绝 F_0 , 表明两因子 x_1 、 x_2 对入侵植物空间分布的影响存在显著的差异。

1.3.2 热点分析

通过对调查数据中所有调查要素来计算空间位置上高值或低值的聚类情况, 热点分析能够很清晰、直观地了解相关调查要素的聚类及其聚集程度。其公式如下:

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij} x_j - \bar{x} \sum_{j=1}^n w_{ij}}{S \sqrt{\frac{n \sum_{j=1}^n w_{ij}^2 - (\sum_{j=1}^n w_{ij})^2}{n-1}}} \quad (3)$$

式中: x_j 为要素 j 的属性值; w_{ij} 为要素 i 和 j 直接的空间权重; n 为要素总数。

1.4 数据处理

各因子数据空间化处理的基本步骤为: 1) 统一数据的地理坐标系; 2) 利用栅格分析、表面分析

等空间分析工具得到各类自然环境因子与社会经济因子数据；3) 格网化行政区，提取各格网对应的影响因素值；4) 采用 Jenks 自然断点法对样本点各属性值分层。以上空间化操作在 ArcGIS 10.1 中完成，离散化操作在 SPSS 中进行。

2 结果与分析

2.1 福建省入侵植物物种分析

本次调查共采集入侵生物分布数据 4317 条，调查到植物物种 163 种，根据上述 5 类条件，确定福建省现有外来入侵植物 82 种，具体详见表 3。其中，符合第一类入侵物种共 25 种，其中野燕麦(*Avena fatua*)、假高粱(*Sorghum halepense*)、喀西茄(*Solanum aculeatissimum*)、苏门白酒草(*Conyza sumatrensis*)、毒麦(*Lolium temulentum*)5 种在本次调查中未发现，这可能是因为福建省粮食作物主要以水稻为主，几乎没有高粱和小麦的种植。符合第二类检疫检疫公布的有害物种共 2 种，包括飞机草(*Eupatorium odoratum*)和豚草(*Ambrosia artemisiifolia*)。符合第三类的入侵物种有 9 种。符合第五类的有 8 种。调查的数据中也有同时符合 2 类以上条件的物种。

从入侵物种的地理起源来看，源自南美洲的种数(38)最多，其次是北美洲(23)、非洲(7)、欧洲(5)、亚洲(4)和大洋洲(2)，有 3 种植物的地理起源不详。进一步调研发现，上述入侵物种隶属于 30 个科，其中菊科 27 种，苋科 8 种，大戟科 5 种，禾本科 5 种，含羞草科 4 种，均为主要入侵植物科属，占总数的 60.9%。

表 3 福建省外来植物
Table 3 Invasive alien species in Fujian

科 Family	物种 Species	科 Family	物种 Species
大戟科 Euphorbiaceae	蓖麻 ⁴ <i>Ricinus communis</i>	菊科 Compositae	熊耳草 ⁴ <i>Ageratum houstonianum</i>
	飞扬草 ⁴ <i>Euphorbia hirta</i>		野苘蒿 ⁴ <i>Gynura crepidioides</i>
	木薯 ⁴ <i>Manihot esculenta</i>		一年蓬 ¹⁴ <i>Erigeron annuus</i>
	通奶草 ⁴ <i>Euphorbia hypericifolia</i>		银胶菊 ¹⁴ <i>Parthenium hysterophorus</i>
	猩猩草 ⁴ <i>Euphorbia cyathophora</i>		羽芒菊 ⁴ <i>Tridax procumbens</i>
蝶形花科 Papilionaceae	白车轴草 ⁴ <i>Trifolium repens</i>	藜科 Chenopodiaceae	钻叶紫菀 ¹⁴ <i>Aster subulatus</i>
	田菁 ⁴ <i>Sesbania cannabina</i>		小蓬草 ⁴ <i>Conyza canadensis</i>
含羞草科 Mimosaceae	巴西含羞草 ⁴ <i>Mimosa invisa</i>		土荆芥 ¹ <i>Chenopodium ambrosioides</i>
	含羞草 ⁴⁵ <i>Mumosa pudica</i>	蓼科 Polygonaceae	虎杖 ⁵ <i>Reynoutria japonica</i>
	含羞草决明 ⁴ <i>Cassia mimosoides</i>	落葵科 Basellaceae	落葵薯 ¹⁴ <i>Anredera cordifolia</i>
	望江南 ⁴ <i>Cassia occidentalis</i>	麻黄科 Casuarinaceae	木麻黄 ⁴ <i>Casuarina equisetifolia</i>
	银合欢 ⁴ <i>Leucaena leucocephala</i>	马鞭草科 Verbenaceae	马缨丹 ¹⁴⁵ <i>Lantana camara</i>
豆科 Leguminosae	光荚含羞草 ¹ <i>Mimosa bimucronata</i>	蔓马缨丹 ⁴ <i>Lantana montevidensis</i>	
禾本科 Gramineae	白茅 ⁴⁵ <i>Imperata cylindrica</i>	马齿苋科 Portulacaceae	土人参 ⁴ <i>Talinum paniculatum</i>
	红毛草 ⁴ <i>Rhynchelytrum repen</i>	牻牛儿苗科 Geraniaceae	野老鹳草 ⁴ <i>Geranium carolinianum</i>
	棕叶狗尾草 ⁴ <i>Setaria palmifolia</i>	茜草科 Rubiaceae	阔叶丰花草 ⁴ <i>Borreria latifolia</i>
	互花米草 ¹³⁴ <i>Spartina alterniflora</i>	茄科 Solanaceae	颠茄 ⁴ <i>Atropa belladonna</i>
	蒺藜草 ¹⁴ <i>Cenchrus echinatus</i>		假烟叶树 ⁴ <i>Solanum verbascifolium</i>
夹竹桃科 Apocynaceae	长春花 ⁴ <i>Catharanthus roseus</i>		水茄 ⁴ <i>Solanum torvum</i>

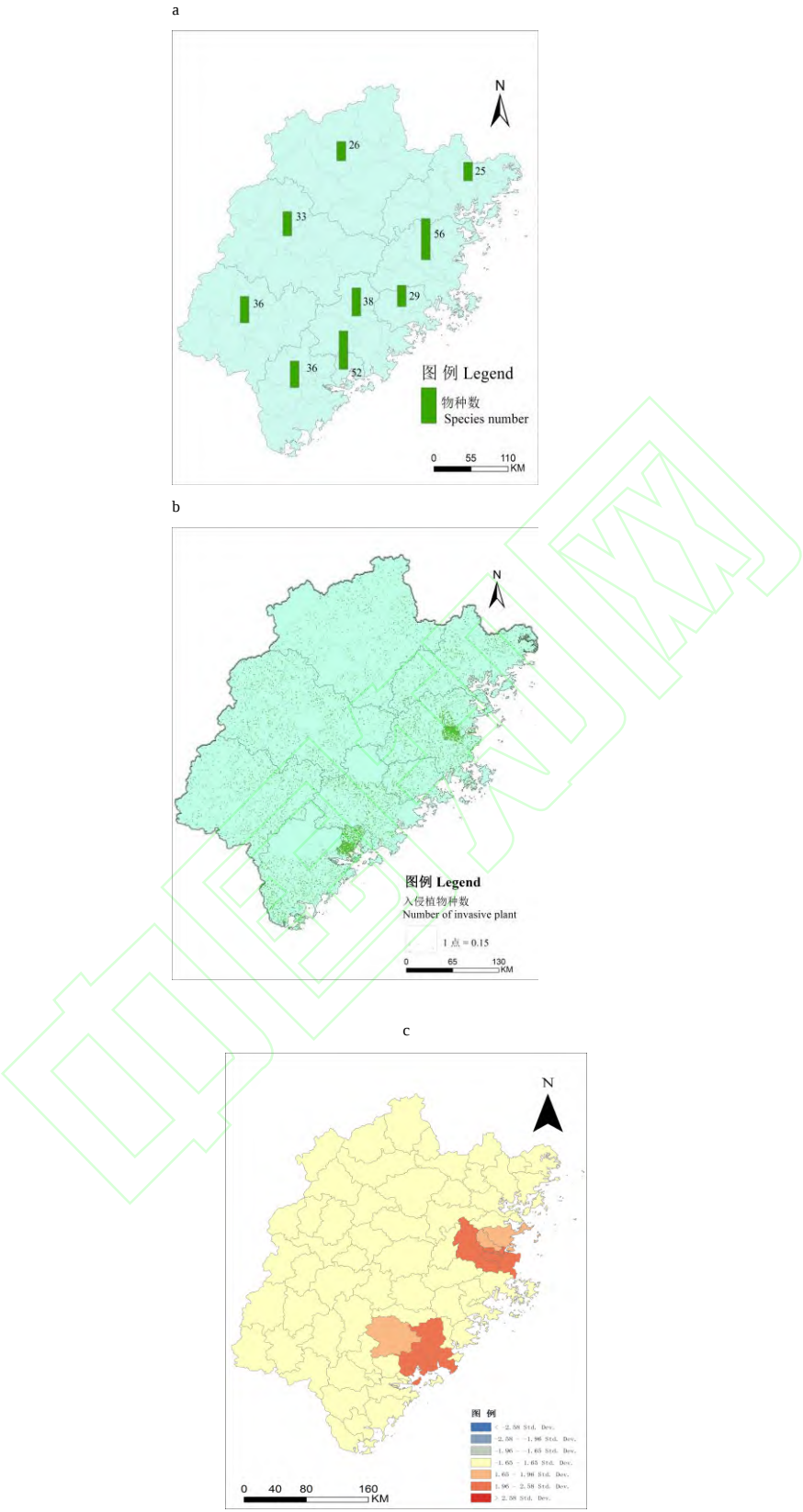
锦葵科 Malvaceae	赛葵 ⁴ <i>Malvastrum coromandelianum</i>	商陆科 Phytolaccaceae	垂序商陆 ¹⁴ <i>Phytolacca americana</i>
景天科 Crassulaceae	落地生根 ⁴ <i>Bryophyllum pinnatum</i>	十字花科 Brassicaceae	臭芥 ⁴ <i>Coronopus didymus</i>
菊科 Compositae	白花鬼针草 ⁴ <i>Bidens alba</i>	桃金娘科 Myrtaceae	番石榴 ⁴ <i>Psidium guajava</i>
	苍耳 ⁴ <i>Xanthium sibiricum</i>	天南星科 Araceae	大藻 ¹³⁴ <i>Pistia stratiotes</i>
	春飞蓬 ⁴ <i>Erigeron philadelphicus</i>	苋科 Amaranthaceae	凹头苋 ⁴ <i>Amaranthus lividus</i>
	飞机草 ¹²³⁴⁵ <i>Eupatorium odoratum</i>		北美苋 ⁴ <i>Amaranthus blitoides</i>
	鬼针草 ¹⁴ <i>Bidens pilosa</i>		刺苋 ¹³⁴ <i>Amaranthus spinosus</i>
	牛膝菊 ⁴ <i>Galinsoga parviflora.</i>		反枝苋 ¹⁴ <i>Amaranthus retroflexus</i>
	藿香蓟 ¹⁴ <i>Ageratum conyzoides</i>		空心莲子草 ¹³⁴ <i>Alternanthera philoxeroides</i>
	加拿大一枝黄花 ¹³⁴ <i>Solidago canadensis</i>		青葙 ⁴ <i>Celosia argentea</i>
	假臭草 ¹³⁴ <i>Eupatorium catarium</i>		苋 ⁴ <i>Amaranthus tricolor</i>
	菊芋 ⁴ <i>Helianthus tuberosus</i>		皱果苋 ⁴ <i>Amaranthus viridis</i>
	孔雀草 ⁴ <i>Tagetes patula</i>	玄参科 Scrophulariaceae	阿拉伯婆婆纳 ⁴ <i>Veronica persica</i>
	苦苣菜 ⁴ <i>Sonchus oleraceus</i>		野甘草 ⁴ <i>Scoparia dulcis</i>
	大狼把草 ¹⁴ <i>Bidens frondosa</i>		三裂叶薯 ⁴ <i>Ipomoea triloba</i>
	裸柱菊 ⁴ <i>Soliva anthemifolia</i>	旋花科 Convolvulaceae	五爪金龙 ¹⁴ <i>Ipomoea cairica</i>
	南美蟛蜞菊 ⁵ <i>Sphagneticola trilobata .</i>		圆叶牵牛 ¹⁴ <i>Lpomoea purpurea</i>
	牛膝菊 ⁴ <i>Galinsoga parviflora</i>	荨麻科 Urticaceae	小叶冷水花 ⁴ <i>Pilea microphylla</i>
	秋英 ⁴ <i>Cosmos bipinnata</i>	雨久花科 Pontederiaceae	凤眼莲 ¹³⁴⁵ <i>Eichhornia crassipes</i>
	豚草 ¹²³⁴ <i>Ambrosia artemisiifolia</i>	紫茉莉科 Nyctaginaceae	紫茉莉 ⁴ <i>Mirabilis jalapa</i>
	微甘菊 ⁴⁵ <i>Mikania micrantha</i>	紫葳科 Bignoniaceae	猫爪藤 ⁴ <i>Macfadyena naunguis-cati</i>
	小飞蓬 ¹⁴ <i>Conyza canadensis</i>	酢浆草科 Oxalidaceae	红花酢浆草 ⁴ <i>Oxalis corymbosa</i>

1) 中华人民共和国生态环境部公布的 4 批中国外来入侵物种名单^[31-34]Ministry of Ecology and Environment of the People’s Republic of China promulgated four batch lists of invasive alien species in China^[32-34]; 2) 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局公布的《中华人民共和国进境植物检疫有害生物名录》^[35] *List of Entry Phytosanitary Pests of the People’s Republic of China* published by General Administration of Quality Supervision and Quarantine of the People’s Republic of China^[35]; 3) 中华人民共和国农业与农村部公布的《国家重点管理外来入侵物种名录》^[36] *National Key Management List of Invasive Alien Species* published by Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People’s Republic of China^[36]; 4) 中国外来入侵物种数据库 Database of invasive alien species in China; 5) IUCN 公布的《全球 100 种最具有破坏力的入侵物种名单》^[37] *100 of the world’s worst invasive alien species* published by International Union for Conservation of Nature^[37].

2.2 福建省入侵植物空间格局分析

2.2.1 福建省主要入侵植物水平分布格局

如图 2 所示，在城市尺度下，福州和厦门是福建省植物入侵的高风险城市，入侵植物种类最多。在县域尺度下，厦门同安区是外来入侵物种的最高风险地区，累计发现入侵植物 49 种，其次为福州的仓山区 38 种，呈现出入侵植物“沿海区域高、内陆区域低”的特征，这与市级尺度的研究结果相互印证。上述外来入侵植物分布集聚区域人口集中、经济发达，尤其是外贸经济繁荣、道路密集的区域。入侵植物物种的热点区域主要分布在福州、厦门两地，这与县级和市级尺度的研究结果相互验证。



小蓬草(*Conyza canadensis*, 60 个)分布的最广, 分布于全省 50 个县区以上的入侵植物物种有藿香蓟(*Ageratum conyzoides*, 54 个)、空心莲子草(*Alternanthera philoxeroides*, 53 个)、野茼蒿(*Gynura crepidioides*, 50 个)和钻叶紫菀(*Aster subulatus*, 50 个)。另外, 飞机草、凤眼莲(*Eichhornia crassipes*)、马缨丹(*Lantana camara*)等恶性入侵植物的分布范围也较广泛。

2.2.2 福建省主要入侵植物垂直分布格局

如图 3 所示, 福建省入侵植物主要分布在海拔 950 m 以下区域, 其中海拔 0~100 m 区域的入侵植物种类最多, 随着海拔的升高, 入侵植物的种类总体呈下降趋势。

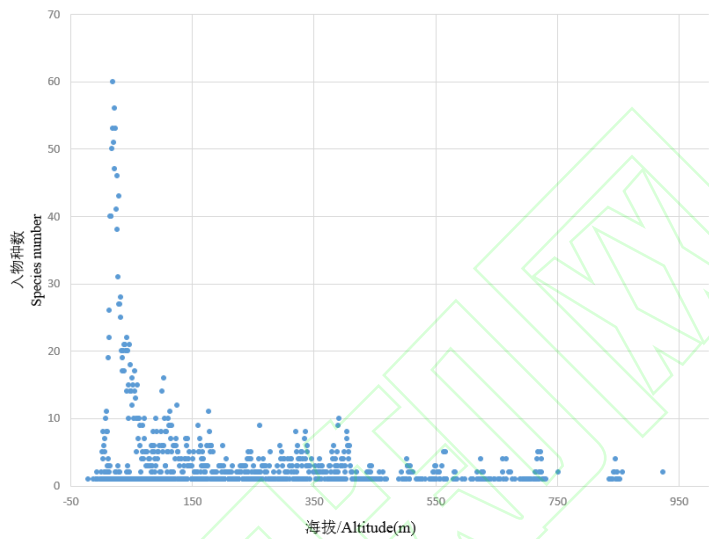


图 3 福建省入侵植物物种与海拔关系
Fig.3 Relationship of species number of alien invasive plants with altitude in Fujian Province.

2.3 福建省主要入侵植物的生态系统分布

福建省主要入侵植物在耕地、灌木丛、果园及苗圃、集散地、建筑工业用地、居民地、湿地、公园、海岸和河岸均有分布。其中: 耕地是入侵植物的主要目标生态场所, 入侵植物总数达 68 种; 其次是公园、湿地、河流沿岸、果园、集散地等, 入侵植物种数均达 30 种以上。此外, 飞扬草(*Euphorbia hirta*)、藿香蓟、假臭草(*Eupatorium catarium*)、空心莲子草、小蓬草、钻叶紫菀、鬼针草(*Bidens pilosa*)的入侵生境最广泛, 在耕地、灌木丛、果园及苗圃、集散地、建筑工业用地、居民地、湿地、公园、海岸和河岸均有分布。

2.4 福建省入侵植物空间分布驱动因素

如表 4 所示, 所选的候选因子对入侵植物的空间分布存在显著差异, 在自然环境因子中, 降水(0.407)、海拔(0.344)的 q 值处于最高水平, 表明降水和海拔是影响入侵植物分布的主要驱动因子, 对入侵植物的空间分布影响最大, 其余自然环境因子的 q 值均小于 0.1, 不足以解释入侵植物的空间分布。而在社会经济环境因子中, 路网密度(0.297)对福建省外来入侵植物空间分布的解释力最大, 对福建省外来入侵植物的空间分布具有显著影响, 其次为人口流动(0.240)、社会消费品总额(0.128), 表明交通的便捷程度和人口的迁移扩散, 对入侵植物的空间分布有重要影响。

表 4外来入侵植物空间分布影响因素
Table 4 Impact factors spatial distribution of alien invasive plants

指标	Index	q	指标	Index	q
x ₁		0.344	x ₉		0.016
x ₂		0.061	x ₁₀		0.066
x ₃		0.407	x ₁₁		0.084
x ₄		0.023	x ₁₂		0.297
x ₅		0.015	x ₁₃		0.021
x ₆		0.015	x ₁₄		0.128
x ₇		0.018	x ₁₅		0.240
x ₈		0.020			

2.5 不同因子交互作用对入侵植物空间分布的影响

表 5 显示，不同自然环境因子和社会经济因子的交互作用对福建省入侵植物空间分布具有显著增强效果，如降水(0.407)与粮食播种面积(0.084)的解释力为 0.624，显著大于两者解释力之和(0.491)。进一步分析发现，当任意 2 个影响因子交互后对入侵植物空间分布的解释力均会明显提升，明显强于原来单个影响因子，即对于福建省入侵植物总数的空间分布的综合作用具有明显增强效果，如人均 GDP(0.066)与路网密度(0.297)交互后的值为(0.561)。当自然环境因子与社会经济因子交互作用后提升尤为明显。如海拔(0.344)与路网密度(0.297)交互后的值为(0.617)。尤其是降水、路网密度和人口流动与其他因子叠加时解释力明显提升。这表明福建省入侵植物的空间分布受到多个影响因素的共同作用，不同自然环境、社会经济因素对福建省入侵植物空间格局分布影响的交互作用，正向强化了各因素的影响力，同时也说明了外来入侵植物影响因子的复杂性和多样性。

表5 交互作用对入侵植物空间分布的影响
Table 5 Effects of interaction on the spatial distribution of alien invasive plants

	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	x ₆	x ₇	x ₈	x ₉	x ₁₀	x ₁₁	x ₁₂	x ₁₃	x ₁₄	x ₁₅
x ₁	0.344														
x ₂	0.434	0.061													
x ₃	0.613	0.482	0.407												
x ₄	0.464	0.172	0.468	0.138											
x ₅	0.420	0.174	0.478	0.023	0.015										
x ₆	0.450	0.174	0.478	0.138	0.018	0.015									
x ₇	0.536	0.195	0.487	0.124	0.029	0.029	0.018								
x ₈	0.463	0.196	0.502	0.136	0.122	0.122	0.135	0.019							
x ₉	0.449	0.196	0.492	0.099	0.113	0.113	0.135	0.137	0.016						
x ₁₀	0.549	0.208	0.558	0.147	0.155	0.155	0.160	0.149	0.176	0.066					
x ₁₁	0.595	0.269	0.624	0.217	0.180	0.180	0.167	0.260	0.208	0.404	0.084				
x ₁₂	0.617	0.437	0.566	0.381	0.375	0.375	0.393	0.371	0.459	0.561	0.559	0.297			
x ₁₃	0.383	0.109	0.435	0.089	0.065	0.065	0.078	0.055	0.081	0.122	0.138	0.237	0.021		
x ₁₄	0.553	0.200	0.498	0.194	0.251	0.251	0.247	0.208	0.199	0.271	0.256	0.300	0.181	0.128	
x ₁₅	0.551	0.362	0.582	0.324	0.321	0.321	0.317	0.433	0.432	0.498	0.456	0.467	0.285	0.357	0.240

对风险因素两两之间进行差异显著性分析，发现降水、路网密度与其他因子之间存在显著差异(表 6)。

表6 生态分析探测结果
Table 6 Result of ecological detector

	<i>x</i> ₁	<i>x</i> ₂	<i>x</i> ₃	<i>x</i> ₄	<i>x</i> ₅	<i>x</i> ₆	<i>x</i> ₇	<i>x</i> ₈	<i>x</i> ₉	<i>x</i> ₁₀	<i>x</i> ₁₁	<i>x</i> ₁₂	<i>x</i> ₁₃	<i>x</i> ₁₄	<i>x</i> ₁₅
<i>x</i> ₁															
<i>x</i> ₂	N														
<i>x</i> ₃	Y	Y													
<i>x</i> ₄	N	N	Y												
<i>x</i> ₅	N	N	Y	N											
<i>x</i> ₆	N	N	Y	N	N										
<i>x</i> ₇	N	N	Y	N	N	N									
<i>x</i> ₈	N	N	Y	N	N	N	N								
<i>x</i> ₉	N	N	Y	N	N	N	N	N							
<i>x</i> ₁₀	N	N	Y	N	N	N	N	N	N						
<i>x</i> ₁₁	N	N	Y	N	N	N	N	N	N	N					
<i>x</i> ₁₂	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	N				
<i>x</i> ₁₃	N	N	Y	N	N	N	N	N	N	N	N	Y			
<i>x</i> ₁₄	N	N	Y	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N		
<i>x</i> ₁₅	N	N	Y	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	
N: <i>P</i> >0.05; Y: <i>P</i> <0.05.															

3 讨论

研究入侵植物的空间格局不仅要考虑入侵物种本身的特性还要考虑自然环境因子、社会经济因子等。本研究引入地理探测器原理从自然环境因子和社会经济因子角度出发，研究影响入侵植物空间分布格局的驱动因子。社会经济因子探测结果表明，人类活动对外来植物入侵具有重要作用。在城市尺度下，福州和厦门是福建省植物入侵的高风险城市，入侵植物种类最多；在县域尺度下，厦门同安区是外来入侵物种的最高风险地区，入侵植物的分布呈“沿海区域高、内陆区域低”的特征，这与沿海地区人类活动频繁、道路密度高等有关。交通密度、人口流动对外来物种的入侵具有一定的促进作用^[2,23]、道路通达、人口流动频繁的地区对环境的干扰更大。从垂直分布格局看，入侵植物主要分布在海拔 950 m 以下区域。其中，0~100 m 的垂直地带是入侵植物的空间分布热点。随着海拔的升高，入侵植物种类总体呈下降趋势，这与人类活动导致的土地利用和土壤变化有一定的关系。另有研究表明，土壤^[38]、土地利用^[39]对入侵植物有显著的影响。

自然环境是影响入侵植物空间分布的重要因素。众多研究表明，地形因素、气候因素(气温、降水、光)是影响入侵植物空间分布的重要因素^[40-42]。有研究表明，地形因素主要通过影响太阳辐射、土壤和繁殖体散布等对植物的盖度和多度产生作用^[20]；降水对植物的花期有重要影响，是影响植物生长发育的主要生态因子^[43]；温度是影响植物物候的重要气候因子，对植物的生长发育有重要影响^[44]。本研究表明，海拔、降水对入侵植物空间格局的解释力最大，属于主导的驱动因子，且与其他自然因素互相叠加时其正向推动作用增强。这与地形因素(海拔、坡度坡向)导致太阳辐射不同而造成温度和降水的变化有一定的关系。

从地理起源来看，入侵物种大多源自美洲，其次是非洲、欧洲、亚洲和大洋洲。这与现有的研究较为一致^[15,22]，不同之处在于与全国入侵植物的地理起源地相比，来自非洲的入侵种多于欧洲。这可能与地理环境有关，从纬度上看，福建与非洲更接近；从气候角度看，欧洲大部分区域属于温带季风气候，而福建属于典型的亚热带季风气候带，整体上福建的气候(温度、湿度)与非洲更相似。地理探测器的结果表明，气候因素(气温、降水)和人口流动是影响入侵植物空间分布的重要因素，这与其他相关研究较为一致^[38-39]。

本研究根据野外调查数据,整理、分析得到福建省外来入侵植物的空间分布情况,并综合利用GIS空间分析、地理探测器模型等方法探测地理环境风险因子和社会经济因子对福建省县域外来入侵植物物种空间格局的影响。研究表明,入侵植物空间分布受自然环境和社会经济因素的综合影响,因素间的互相叠加对入侵植物空间分布具有明显的正向强化作用。这说明了影响外来入侵植物影响因子的复杂性和多样性。研究结果对于福建省外来入侵植物扩散的防控、生物多样性保护与生态安全研究具有一定的参考意义。

此外,本研究仅考虑了人类活动和自然环境因子的影响,没有考虑物种的生物学特性如遗传效应、生活型、生活对策等生物因素的影响。现有的很多研究表明,生物种自身的生物学特性对入侵有很重要的影响,如有研究认为,入侵生物种的表型可塑性与本地物种相比更为显著^[45];Gioria等^[46]研究认为,入侵植物对资源利用的竞争与本地物种相比更具有优势。以后的研究中应对这些要素加以分析。

李志鹏,赵健,陈业滨,等.福建省主要外来入侵植物空间分异及其影响因素.应用生态学报,2019,30(8)

Li Z-P, Zhao J, Chen Y-B, et al. Spatial differences and driving factors of invasive alien plants in Fujian Province, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(8) (in Chinese)

参考文献

- [1] David P, Thibault E, Anneville O, et al. Impacts of invasive species on food webs: A review of empirical data. *Advances in Ecological Research*, 2017, 56: 1-60
- [2] Montserrat V, Jos  LE, Hejda M, et al. Ecological impacts of invasive alien plants: A meta-analysis of their effects on species, communities and ecosystems. *Ecology Letters*, 2011, 14: 702-708
- [3] Bellard C, Thuiller W, Leroy B, et al. Will climate change promote future invasions? *Global Change Biology*, 2013, 19: 3740-3748
- [4] Schindler S, Staska B, Adam M, et al. Alien species and public health impacts in Europe: A literature review. *Neobiota*, 2015, 27: 1-23
- [5] Shackleton CM, Shackleton RT. Knowledge, perceptions and willingness to control designated invasive tree species in urban household gardens in South Africa. *Biological Invasions*, 2016, 18: 1599-1609
- [6] Valerie TE, Sarah AH, Christine VH. Ecosystem impacts of exotic plants can feed back to increase invasion in western US rangelands. *Rangelands*, 2010, 32: 21-31
- [7] Tittensor DP, Walpole M, Samantha LL, et al. A mid-term analysis of progress toward international biodiversity targets. *Science*, 2014, 346: 241-244
- [8] Winter M, Schweiger O, Klotz S, et al. Plant extinctions and introductions lead to phylogenetic and taxonomic homogenization of the European flora. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106: 21721-21725
- [9] Wan F-H (万方浩), Xie B-Y (谢丙炎), Chu D (褚栋), et al. Biological Invasion: Legislations and Management Strategies. Beijing: Science Press, 2008 (in Chinese)
- [10] Seebens H, Blackburn M, Dyer EE, et al. No saturation in the accumulation of alien species worldwide. *Nature Communications*, 2017, 8: 14435, doi: 10.1038/ncomms14435
- [11] Ning Z-Y (宁昭玉), Hu S-Q (胡树泉), Wei Y-Z (魏远竹), et al. Present situation of alien species invasion and its effects on economy society and ecology in Fujian Province. *Journal of Biological Safety* (生物安全学报), 2007, 16(4): 304-309 (in Chinese)
- [12] Yan X-L (闫小玲), Liu Q-R (刘全儒), Shou H-Y (寿海洋), et al. The categorization and analysis on the geographic distribution patterns of Chinese alien invasive plants. *Biodiversity Science* (生物多样性), 2014, 22(5): 667-676 (in Chinese)
- [13] Huang X-R (黄小荣), Pang S-L (庞世龙), Shen W-H (申文辉), et al. Herb diversity and its affecting factors of community invaded by *Praxelis clematidea* in karst mountainous area of Guangxi Province, China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2016, 27(3): 815-821 (in Chinese)
- [14] Yan J (严靖), Yan X-L (闫小玲), Wang Z-H (王樟华), et al. Distribution pattern and rating of alien invasive plants in Anhui Province. *Plant Science Journal* (植物科学学报), 2017, 35(5): 679-690 (in Chinese)
- [15] Ou J (欧健). Study on Risk Assessment for Alien Species in Xiamen. PhD Thesis. Xiamen: Xiamen University, 2008 (in Chinese)
- [16] Wu X-W (吴晓雯), Luo J (罗晶), Chen J-K (陈家宽), et al. Spatial patterns of invasive alien plants in China and its relationship with environmental and anthropological factors. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2006, 30(4): 576-584 (in Chinese)
- [17] Zhang S (张帅), Guo S-L (郭水良), Guan M (管铭), et al. Diversity differentiation of invasive plants at a regional scale in China and its influencing factors: According to analyses on the data from 74 regions. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2009, 30(16): 4241-4256 (in Chinese)
- [18] Ren Y (任颖), He P (何萍), Xu J (徐杰), et al. Distribution pattern of riparian invasive plants in Luanhe Basin, North China and its relationship with environment. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2017, 28(6): 1843-1850 (in Chinese)
- [19] González-Moreno P, Diez JM, Ibáñez I, et al. Plant invasions are context-dependent: Multiscale effects of climate, human activity and habitat. *Diversity and Distributions*, 2014, 20: 720-731

- [20] Lu Z-J (卢志军), Ma K-P (马克平). The influence of topographical factors on the invasion of the alien species *Eupatorium adenophorum*. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 2004, 28 (6): 761-767 (in Chinese)
- [21] Webber BL, Le Maitre DC, Kriticos DJ. Comment on "Climatic niche shifts are rare among terrestrial plant invaders". *Science*, 2012, 338: 193
- [22] Dullinger I, Wessely J, Bossdorf O, *et al.* Climate change will increase the naturalization risk from garden plants in Europe. *Global Ecology and Biogeography*, 2017, 26: 43-53
- [23] Ding J, Mack RN, Lu P, *et al.* China's booming economy is sparking and accelerating biological invasions. *Bioscience*, 2008, 58: 317-324
- [24] Lyu C (吕晨), Lan X-T (蓝修婷), Sun W (孙威). A Study on the relationship between natural factors and population distribution in Beijing using geographical detector. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报), 2017, 32 (8): 1385-1397 (in Chinese)
- [25] Wang J-F (王劲峰), Xu C-D (徐成东). Geodetector: principle and prospective. *Acta Geographica Sinica* (地理学报), 2017, 72 (1): 116-134 (in Chinese)
- [26] Wang JF, Li XH, Christakos G, *et al.* Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, 24: 107-127
- [27] Huang JX, Wang JF, Bo YC, *et al.* Identification of health risks of hand, foot and mouth disease in China using the geographical detector technique. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2014, 11: 3407-3423
- [28] Wang XG, Xi JC, Yang DY, *et al.* Spatial differentiation of rural touristization and its determinants in China: A geo-detector-based case study of Yesanpo Scenic Area. *Journal of Resources and Ecology*, 2016, 7: 464-471
- [29] Tong L-G (通拉嘎), Xu X-L (徐新良), Fu Y (付颖), *et al.* Impact of environmental factors on snail distribution using geographical detector model. *Progress in Geography* (地理科学进展), 2014, 33 (5): 625-635 (in Chinese)
- [30] Fujian Provincial Bureau of Statistics (福建省统计局). Fujian Statistical Yearbook in 2017 [EB/OL]. (2017-09-04) [2018-12-12]. <http://tjj.fujian.gov.cn/xxgk/ndsj/> (in Chinese)
- [31] Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China (中华人民共和国生态环境部). Notice on the Publication of the List of the First Invasive Alien Species in China [EB/OL]. (2003-01-10) [2019-04-10]. http://www.mee.gov.cn/gkml/zj/wj/200910/t20091022_172155.htm (in Chinese)
- [32] Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China (中华人民共和国生态环境部). Notice on the Publication of the List of the Second Invasive Alien Species in China [EB/OL]. (2010-01-07) [2019-04-10]. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201001/t20100126_184831.htm (in Chinese)
- [33] Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China (中华人民共和国生态环境部). Notice on the Publication of the List of the Third Invasive Alien Species in China [EB/OL]. (2014-08-20) [2019-04-10]. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201408/t20140828_288367.htm (in Chinese)
- [34] Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China (中华人民共和国生态环境部). Notice on the Publication of the List of the Fourth Invasive Alien Species in China [EB/OL]. (2016-12-20) [2019-04-10]. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201612/t20161226_373636.htm (in Chinese)
- [35] General Administration of Quality Supervision and Quarantine of the People's Republic of China (国家质量监督检验检疫总局). Plant Quarantine Pests People's Republic of China Entry List [EB/OL]. (2017-06-14) [2019-04-10]. http://www.aqsiq.gov.cn/xxgk_13386/zvfg/gfxwj/dzwjy/201706/t20170614_490858.htm (in Chinese)
- [36] Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China (中华人民共和国农业农村部). National Key Management List of Invasive Alien Species (first batch) [EB/OL]. (2013-03-20) [2019-04-10]. http://www.moa.gov.cn/nybg/2013/dsanq/201712/t20171219_6119282.htm (in Chinese)
- [37] International Union for Conservation of Nature. National Key Management List of Invasive Alien Species (first batch). 100 of the World's Worst Invasive Alien Species [EB/OL]. (2000-12) [2019-04-10]. <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/2000-126.pdf>
- [38] Milbau A, Stout JC, Graae BJ, *et al.* A hierarchical framework for integrating invisibility experiments incorporating different factors and spatial scales. *Biological Invasions*, 2009, 11: 941-950
- [39] Montserrat V, Pujadas J. Land-use and socio-economic correlates of plant invasions in European and North African countries. *Biological Conservation*, 2001, 100: 397-401
- [40] Ross KA, Fox BJ, Fox MD. Changes to plant species richness in forest fragments: Fragment age, disturbance and fire history may be as important as area. *Journal of Biogeography*, 2002, 29: 749-765
- [41] Wang X-H (王晓红), Ji M-S (纪明山). Photosynthetic characteristics of an invasive plant *Conyza canadensis* and its associated plants. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2013, 24 (1): 71-77 (in Chinese)
- [42] Gao M (高末), Hu R-Y (胡仁勇), Chen X-X (陈贤兴), *et al.* Effects of disturbance, topography, and soil conditions on the distribution of invasive plants in Wenzhou. *Biodiversity Science* (生物多样性), 2011, 19 (4): 424-431 (in Chinese)
- [43] Wang L-X (王连喜), Chen H-L (陈怀亮), Li Q (李琪), *et al.* Research advances in plant phenology and climate. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2010, 30 (2): 447-454 (in Chinese)
- [44] Li R-P (李荣平), Zhou G-S (周广胜), Zhou H-L (张慧玲). Research advances in plant phenology. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2006, 17 (3): 541-544 (in Chinese)
- [45] Shi G-R (史刚荣), Ma C-C (马成仓). Biological characteristics of alien plants successful invasion. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2006, 17 (4): 727-732 (in Chinese)
- [46] Gioria M, Osborne BA. Resource competition in plant invasions: Emerging patterns and research needs. *Frontiers in Plant Science*, 2014, 5: 1-21