

DOI:10.11913/PSJ.2095-0837.2017.40513

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(4): 513~524

Wang GH, Bai F, Sang WG. Spatial distribution of invasive alien animal and plant species and its influencing factors in China[J]. *Plant Science Journal*, 2017, 35(4): 513~524

# 中国外来入侵生物的空间分布格局及其影响因素

王国欢<sup>1,2</sup>, 白帆<sup>1</sup>, 桑卫国<sup>1,3\*</sup>

(1. 中国科学院植物研究所, 中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中央民族大学生命与环境科学学院, 北京 100086)

**摘要:** 不同地理区域影响生物分布格局的因子不同, 对外来入侵物种也是如此。在区域尺度上分析外来入侵生物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的控制管理具有重要意义。本研究应用中国外来入侵物种数据库、自然环境数据库和社会人文环境数据库, 分析了我国外来入侵动植物的空间格局; 并运用主成分分析(PCA)和典范对应分析(CCA)探讨了自然环境和人类活动等因素对外来入侵动植物分布格局的影响; 同时研究了外来入侵物种多样性与本地物种多样性之间的关系。结果表明, 我国现有外来入侵动物 138 种、入侵植物 384 种, 其数量和密度都呈现出由东南沿海向西北内陆减少的趋势, 且入侵动物和入侵植物空间格局基本一致; 降水(MAP)是决定我国外来入侵动植物分布格局的主要自然环境因子, 国民生产总值(GDP)是主要社会经济影响因子。在全国尺度上, 外来入侵物种多样性与本地物种多样性之间呈显著的正相关关系, 但地域间存在较大差异。不同区域外来入侵物种与本土物种多样性的相关关系表现出不同, 与研究尺度有密切关系。

**关键词:** 生物入侵; 入侵物种; 空间格局; 防治对策; 人类活动; 物种多样性

中图分类号: Q948

文献标识码: A

文章编号: 2095-0837(2017)04-0513-12

## Spatial distribution of invasive alien animal and plant species and its influencing factors in China

Wang Guo-Huan<sup>1,2</sup>, Bai Fan<sup>1</sup>, Sang Wei-Guo<sup>1,3\*</sup>

(1. State Key Lab of Vegetation and Environment Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Science, Beijing 100093, China; 2. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;  
3. College of Life and Environmental Sciences, Minzu University of China, Beijing 100086, China)

**Abstract:** The distribution of invasive alien species is influenced by abiotic and biotic factors. Understanding distribution patterns is crucial for prediction, risk prevention, and management of invasive alien species. Based on invasive alien species, environmental conditions, and anthropological factors, we used principal component analysis (PCA) and canonical correspondence analysis (CCA) to explore the spatial distribution patterns and densities of invasive alien species and their determining factors in China. Furthermore, we analyzed the relationship between diversity of invasive alien and native species at both country and regional scales. Results showed that the number and density of invasive alien species (138 animal species; 384 plant species) decreased from the southeast coast to inland northwest China and invasive animals and plants showed the same pattern. Our results indicated that mean annual precipitation (MAP) and gross domestic product (GDP) are key factors shaping the

收稿日期: 2016-12-07, 退修日期: 2017-01-05。

基金项目: 环境保护部环境保护生态公益项目(201409061); 国家自然科学基金项目(31470569)。

This work was supported by grants from the Environmental Ecological Protection Public Welfare Project of Ministry of Environmental Protection(201409061) and National Natural Science Foundation of China (31470569).

作者简介: 王国欢(1990-), 女, 硕士研究生, 从事生物入侵研究(E-mail: wangguohuan@ibcas.ac.cn)。

\* 通讯作者(Author for correspondence. E-mail: bjs@ibcas.ac.cn)。

distribution patterns of invasive alien species in China. Invasive alien species diversity and native species diversity were significantly positively correlated with each other, though correlations differed in different regions, depending on the study scale.

**Key words:** Biological invasion; Invasive alien species; Spatial pattern; Prevention and control strategies; Human activities; Species diversity

大量生物从自然分布区通过有意或无意的人类活动被引入到新的区域,其中一部分外来物种建立种群、扩大分布区域<sup>[1,2]</sup>,对入侵地的生态环境和人类活动产生危害<sup>[3-5]</sup>。由于地形复杂、生态系统类型多样、经济发展迅速,我国不断遭受外来入侵物种的严重威胁<sup>[6,7]</sup>,每年由入侵物种所造成的经济损失高达 1198.76 亿美元<sup>[8]</sup>。由此可见,对外来入侵物种成功入侵机制、风险防范及控制管理的深入研究迫在眉睫<sup>[9,10]</sup>,而分析外来入侵物种的空间分布格局并探究其主要影响因素是控制管理生物入侵问题的基础<sup>[11,12]</sup>。

外来入侵物种成功入侵新环境除了与其生物学特性有关之外<sup>[13-15]</sup>,同时还受被入侵生态系统的环境特性和人类活动的影响<sup>[16]</sup>。Williamson 和 Fitter<sup>[17]</sup>研究发现,外来物种能否在新的环境中成功入侵,有赖于新生境是否适合该物种的生长繁衍。人为干扰是影响生物入侵的主要外在因素,大多数生态系统被人类干扰后,抵抗入侵能力减弱,新引入生物的入侵风险不断加大,现有人侵种定居扩散概率增加、暴发趋势严重<sup>[18]</sup>,入侵速度进一步加快<sup>[19]</sup>。近几十年来,中国经济处于快速发展期,高强度的劳动生产和经济活动,以及与世界各国不同区域的贸易和人员交流不断增多,给外来物种的传入和扩散创造了有利条件<sup>[20]</sup>。Ding 等<sup>[21]</sup>研究发现,公路铁路的新建增加了人为干扰,导致生态环境不稳定,同时交通运输的便捷让更多外来物种可以入侵到通过自然扩散而到达不了的地区,这些因素使我国外来种入侵数量和发生频率增加<sup>[22-24]</sup>。外来入侵物种与本地物种之间的关系存在一定的争议,有学者认为本地物种多样性丰富的地区由于物种间的相互竞争、共生等原因,具有较强的抵抗能力,外来入侵物种丰富度较低<sup>[25]</sup>;但是也有学者认为本地物种丰富度高的地区,外来入侵物种丰富度也高<sup>[26]</sup>。因此,有关外来入侵物种与本地物种之间的关系尚需要进一步的探讨。

入侵物种种类、生物属性、地理分布的详细调

查与研究是认识不同区域入侵物种丰富度的一个直接有效方法<sup>[27,28]</sup>,也是制定入侵物种防治和管理的基础数据。近年来利用大尺度的物种分布信息探讨生态问题已成为一种趋势。以往研究多集中在小尺度上,如以单个省(州、自治区、直辖市和特区)为研究尺度探讨外来物种多样性、空间格局以及影响因素<sup>[29-31]</sup>,且研究多集中分析入侵植物分布模式<sup>[32,33]</sup>,而对入侵动物空间分布格局研究较少。从数据的完整性和时效性来看,有关我国外来入侵多样性分布格局有待进一步深入研究。本研究利用全国的外来入侵物种分布信息,探讨目前中国外来入侵动物和植物分布格局以及主要影响因素;并探究外来入侵物种多样性与本土物种多样性之间的关系。

## 1 研究方法

### 1.1 数据来源

外来入侵物种的分布信息,主要通过广泛收集资料,包括相关专著<sup>[34,35]</sup>、期刊、会议文献资料<sup>[36-39]</sup>、中国外来入侵物种名单和中国外来入侵物种数据库<sup>[40]</sup>,将其中的入侵物种名录及空间分布信息进行整理和归类,在此基础上建立中国外来入侵物种空间分布数据库(28 × 522 的 0/1 矩阵,行表示地理区域,列表示物种在该地理区域存在与否,分别用 1 或 0 表示)。由于北京、天津、重庆和上海面积较小,故将其归并入相邻的省份,其中北京和天津归入河北省;上海归入江苏省;重庆归入四川省;香港和澳门收集其相关数据相对困难且其可比性较差,故在数据分析中将香港和澳门剔除。据此,本研究将我国划分为 28 个省行政区。同时根据外来入侵物种空间分布信息,以我国六大地理区(东北 NE、华北 NC、西北 NW、东南 SE、中南 SC、西南 SW)为研究单位,进行整理和归类,探讨各区域外来入侵动、植物分布格局。根据中国外来入侵物种分布矩阵统计外来入侵植物丰富度 (Invasive alien plant species richness) 和密度

(Density of invasive alien plant species), 外来入侵动物丰富度 (Invasive alien animal species richness) 和密度 (Density of invasive alien animal species)。其中: 外来入侵物种丰富度 (Invasive alien species richness), 为入侵到某个生态系统或群落的物种数; 本文定义为入侵到某个省内的物种数。外来入侵物种密度 (Density of invasive alien species) = 外来入侵物种丰富度 (Invasive alien species richness) / 面积 (RAR)。本文采用变量的名称、缩写代码、单位等详见附表 1。

中国自然环境数据收集了全国 1814 个气象台站月平均气温、降水、日照时数、极端最高温和极端最低温的数据, 其中 740 个站台数据是 1971–2000 年的记录, 其他站台数据是 1981–1990 年孟婷婷<sup>[41]</sup>的记录。利用以上气象台站数据计算年均气温 (Mean annual temperature, MAT)、年均降水 (Mean annual precipitation, MAP)、年均日照百分比 (Mean annual sunshine percentage)。将以上逐月气候数据运用 ANUSPLIN version 4.36 软件进行 1 km × 1 km 的插值, 每个栅格的插值数据根据该栅格中心的海拔计算。然后将插值数据输入 BIOME3 模型, 计算出每个栅格对应一系列与生物生长关系密切的生物气候指标, 如最热月平均气温 (Mean temperature of the warmest month, MTWA)、基于 0℃ 的生长季积温 (Growing degree days on a 0℃ basis, GDD0)、有效日照时数 (Photosynthetically active radiation, PAR0)、6–8 月平均降水 (Mean precipitation in June, July and August, PJJA)、湿润指数 (Moisture index, MI) 和表现植物所面临干旱胁迫的干旱指数 (alpha), 以及各省中心纬度 (Latitude, Lat) 各省中心经度 (Longitude, Long)。其中:

湿润指数 (MI) = 年均降水 (MAP) / 年均蒸散量 (EET);

干旱指数 (alpha) = 实际年蒸散 (AET) / 潜在年蒸散 (PET)。

中国各省人类活动因子的数据资料主要来自中国统计年鉴<sup>[42]</sup>和中国经济社会发展统计数据库<sup>[43]</sup> (选取 2009 年度数据)。基于反映社会经济发展水平、国际贸易往来等 8 个变量: 人口密度 (Density)、各省年度生产总值 (GDP)、各省进口货物总额 (VIC)、各省外来游客人数 (NFT)、铁路

里程 (Train)、等级公路里程 (Road)、内河航道里程 (River) 以及年货运量 (Cargo)。根据以上数据建立我国各省自然环境因子和人类活动因子数据矩阵 (见附表 2, 其中行表示各省数据, 列表示各个因子)。

## 1.2 分析方法

(1) 全国 6 个地理区域和 28 个省被用作本研究中的空间单位来探讨各区域外来入侵动、植物分布格局。入侵动、植物的区域分布图采用 ArcGIS 9.2 绘制, 依据各省的入侵动、植物物种丰富度, 将入侵物种丰富度的值域区间 (最大值和最小值之间), 以等差值 (Equal Interval) 原则采用手动 (Manual) 分割方式将全国入侵物种丰富度划分为 6 个等级, 从而形象直观地显示各地理区域内各省份入侵物种空间分布格局。

(2) 数据正态分布性检验与数据转化: 应用 SPSS 14.0 软件中的 P-P 概率图 (P-P Probability Plot) 对自然环境和人类活动影响变量数据分别进行正态分布检验, 对非正态分布的人口密度、进口贸易总额和接待入境旅游人数变量数据进行自然对数转换 (Natural log transform)。

(3) 主成分分析 (PCA): 用 Canoco for Windows 4.5 软件分别对各省自然环境和人类活动影响数据进行主成分分析 (PCA), 筛选出决定我国自然和人类活动的主要因子, 同时生成自然和人类活动主要因子在各省的环境、社会数据矩阵。

(4) 典范对应分析 (CCA): 对中国外来入侵动、植物种省分布矩阵和各省的环境、社会数据矩阵进行典范对应分析 (CCA), 确定外来入侵物种在中国各省的分布格局与自然环境及人类活动影响因子的关系。

## 2 结果与分析

### 2.1 外来入侵动植物空间分布格局

384 种外来入侵植物和 138 种入侵动物在我国境内空间分布存在很大的差异 (图 1、图 2、图 3), 从纬度梯度来看, 入侵物种主要集中在南方地区, 北方地区相对较少; 从经度梯度来看, 入侵物种主要集中在东部地区, 西部区相对较少。在全国尺度上, 宁夏、青海、西藏和内蒙入侵物种较少 (宁夏最少, 植物 64 种; 动物 13 种); 河北、广西、台

湾、广东和云南5省份外来入侵物种较多,云南最严重(植物240种;动物48种)。我国外来入侵植物丰富度总体呈现从南到北逐渐减少,主要集中在南方及东部沿海地区。外来入侵动植物密度与丰

富度空间分布格局几乎一致,西北、东北地区物种丰富度和密度空间分布格局存在差异(图1和图2),其原因可能是西北地区处于内陆,地域广阔,入侵物种少而密度相对较小。

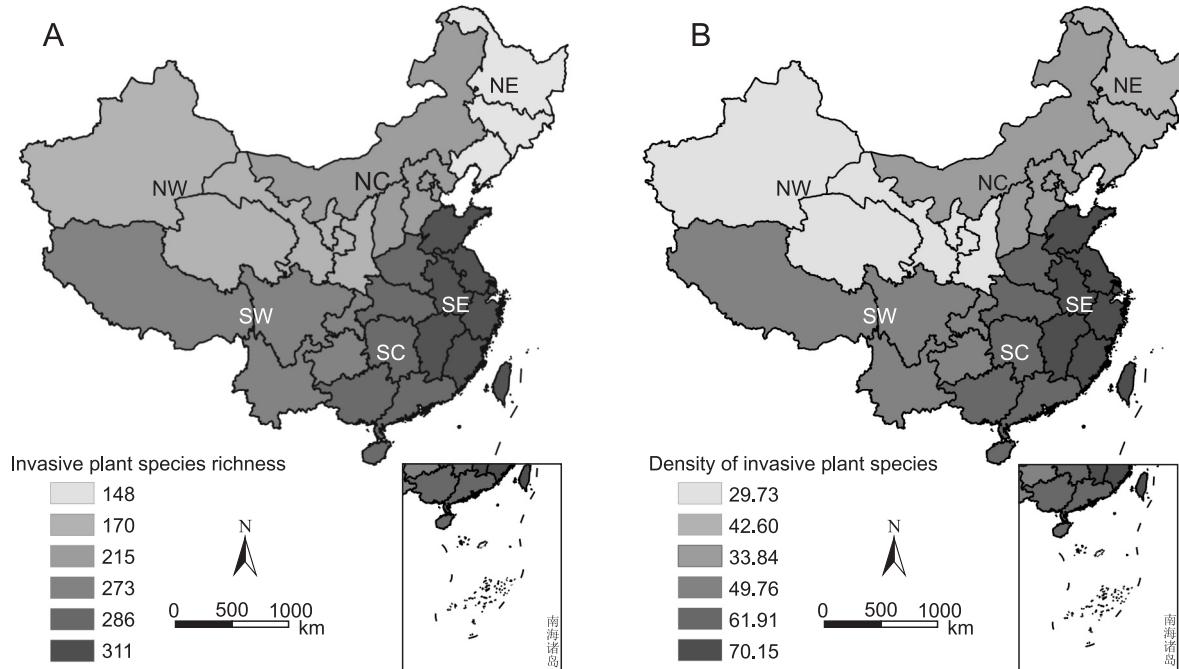


图1 中国外来入侵植物物种地理区域分布格局  
Fig. 1 Geographical distribution of invasive plants species in China

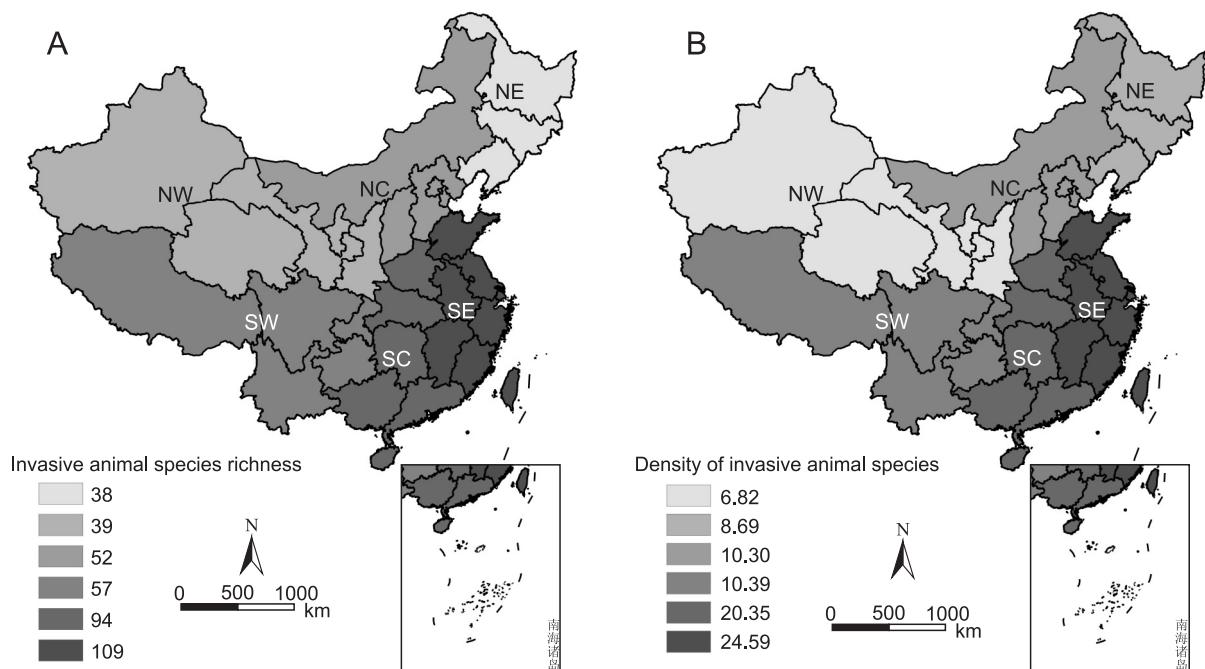


图2 中国外来入侵动物物种地理区域分布格局  
Fig. 2 Geographical distribution of invasive animal species in China

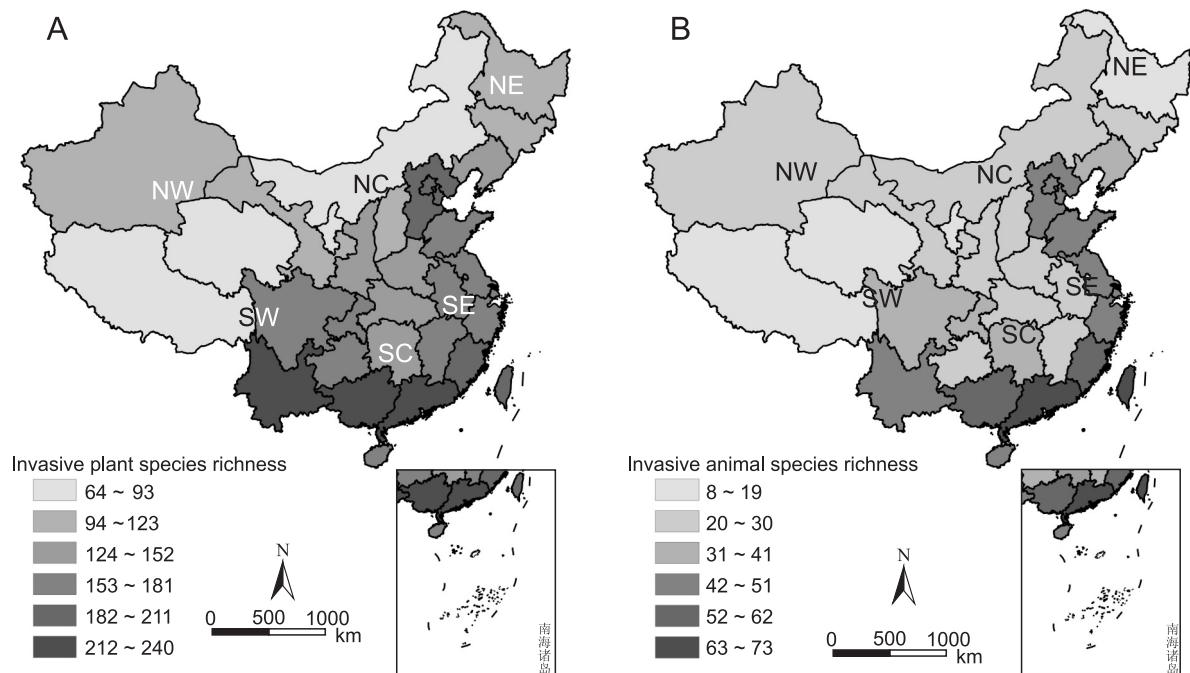


图3 中国外来入侵物种省级分布格局  
Fig. 3 Distribution of invasive species in Chinese provinces

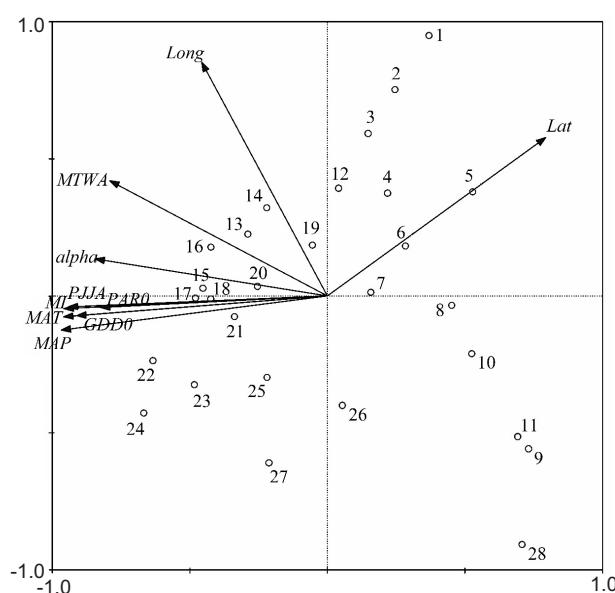
## 2.2 中国外来入侵动、植物分布格局的影响因素

### 2.2.1 影响动植物入侵关键因子的选择

对各省中心点地理纬度(Lat)、经度(Long)、年均气温(MAT)、年均降水(MAP)、最热月平均温度(MTWA)、基于0℃的生长季积温(GDD0)、有效日照时数(PAR0)、6-8月平均降水(PJJA)、湿润指数(MI)以及干旱度指数(alpha)

10个自然环境变量和国民生产总值(GDP)、人口密度(Density)、进口贸易总额(ln\_VIC)、接待入境旅游人数(ln\_NFT)、铁路里程(Train)、等级公路里程(Road)、内河航道里程(River)以及年货运量(Cargo)8个社会人文环境变量分别进行主成分分析(图4、图5)。

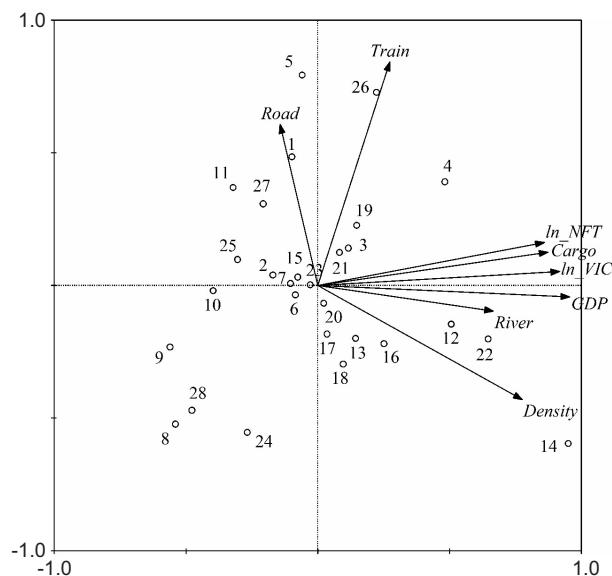
对10个自然环境变量进行主成分分析结果显



Lat: 纬度; Long: 经度; MAT: 年均气温; MAP: 年均降水; MTWA: 最热月平均温度; GDD0: 基于0℃的生长季积温; PAR0: 有效日照时数; PJJA: 6-8月平均降水; MI: 湿润指数; alpha: 干旱度指数。

1. 黑龙江(Heilongjiang); 2. 吉林(Jilin); 3. 辽宁(Liaoning); 4. 河北(Hebei); 5. 内蒙古(Inner Mongolia); 6. 山西(Shanxi); 7. 陕西(Shaanxi); 8. 宁夏(Ningxia); 9. 甘肃(Gansu); 10. 青海(Qinghai); 11. 新疆(Xinjiang); 12. 山东(Shandong); 13. 安徽(Anhui); 14. 江苏(Jiangsu); 15. 江西(Jiangxi); 16. 浙江(Zhejiang); 17. 福建(Fujian); 18. 台湾(Taiwan); 19. 河南(Henan); 20. 湖北(Hubei); 21. 湖南(Hunan); 22. 广东(Guangdong); 23. 广西(Guangxi); 24. 海南(Hainan); 25. 贵州(Guizhou); 26. 四川(Sichuan); 27. 云南(Yunnan); 28. 西藏(Xizang)。下同(Same below)。

图4 中国自然环境变量主成分分析  
Fig. 4 PCA ordination diagram of natural environment variables in China



GDP: 国民生产总值; Density: 人口密度; In\_VIC: 进口贸易总额; In\_NFT: 接待入境旅游人数; Train: 铁路里程; Road: 等级公路里程; River: 内河航道里程; Cargo: 年货运量。下同 (Same below)。

图 5 中国社会人文变量主成分分析

Fig. 5 PCA ordination diagram of socio-cultural variables in China

示(图 4), PCA 轴 1 对我国自然条件变化的解释量高达 73.44%, 其中年均气温 ( $-0.9584$ ) 和年均降水 ( $-0.9672$ ) 得分最高; PCA 轴 2 的解释量为 12.88%, 且得分最高的为纬度 (0.8525)。但纬度与年均气温、降水均有显著相关性 ( $P < 0.001$ ), 因此本研究只选择年均气温和年均降水作为关键自然因子。

对 8 个社会人文环境变量进行主成分分析结果显示(图 5), PCA 轴 1 和轴 2 对我国社会经济变化的解释量分别为 55% 和 16.5%, 其中国民生产总值 (0.9559) 和铁路里程 (0.8424) 在第 1、2 轴上分别得分最高, 同时它们之间相关性不显著 ( $P = 0.238$ )。GDP 可以反映研究区域经济发展整体水平, 而铁路里程反映研究区域交通运输业的发展和受到人类活动干扰的程度, 因此选择这两个因子作为关键社会因子。

## 2.2.2 中国外来入侵物种组成格局与环境及人类活动因子的关系

典范对应分析 (CCA 分析) 结果显示(表 1), 第 1、2 轴能解释外来入侵物种在中国各省物种组成变异的 79.07%。决定其分布的首要环境变量 (第 1 轴) 是气候, 其中降水 ( $r = -0.9311$ ) 较温度

表 1 中国外来入侵物种分布 CCA 分析  
Table 1 Canonical correspondence analysis of invasive species distribution in China

环境因子 Environmental factors	第 1 物种轴 AX1	第 2 物种轴 AX2
物种百分比变化率 PV (%)	59.43	19.64
年均气温 MAT	-0.8890	0.1407
年均降水 MAP	-0.9311	-0.0085
国民生产总值 GDP	-0.1072	0.8989
铁路里程 Train	0.5413	0.3493

( $r = -0.8890$ ) 与物种第 1 轴的相关系数更高(表 1)。次要环境变量(第 2 轴)是经济发展水平, GDP 的相关系数最高( $r = 0.8989$ )。

本研究通过分析外来入侵物种各省空间分布格局与关键环境因子和人类活动影响因子的关系, 发现决定外来入侵物种空间分布格局的首要环境变量是气候, 主要是年均降水 (MAP) 和年均气温 (MAT)。其次是经济发展水平, 主要为国民生产总值 (GDP) 和铁路里程 (Train) (图 6)。

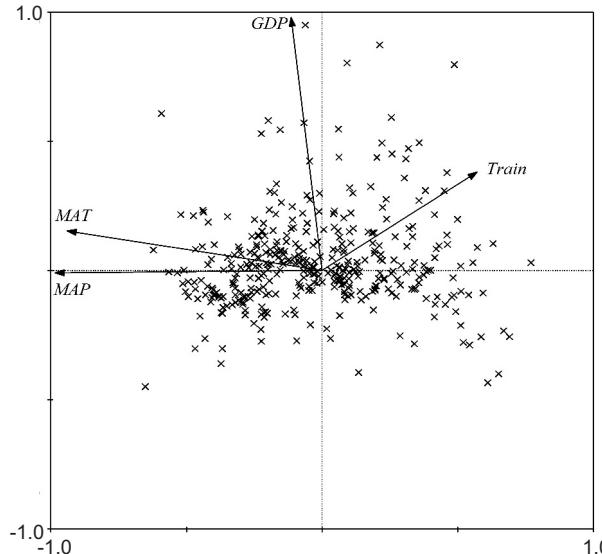
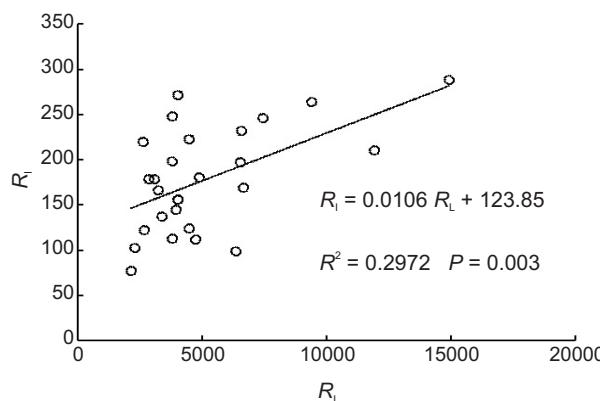


图 6 中国外来入侵物种与各省环境、社会因子典范对应分析

Fig. 6 Correlation between invasive alien species distribution and environmental and socio-cultural factors in China

## 2.3 中国外来入侵物种与本地种丰富度的关系

对中国 28 个省区的物种丰富度进行统计, 与各省的入侵物种丰富度采用二元相关分析方法进行研究, 发现我国入侵物种与本地物种的丰富度呈显著性正相关(图 7, 表 2,  $P = 0.003$ )。但在不同区域尺度比较外来入侵物种与本地区域物种丰富度的关系时, 发现虽然有些区域入侵物种与当地物种



$R_i$ : 入侵物种丰富度 (Invasive species richness);  $R_L$ : 本土物种丰富度 (Native species richness)。下同 (Same below)。

图 7 中国外来入侵物种与当地物种丰富度回归分析  
Fig. 7 Relationship between invasive alien species diversity and native species diversity in China

表 2 中国外来入侵物种与本土物种丰富度线性回归方程 ( $R_i = bR_L + a$ )

Table 2 Linear regression between invasive alien species diversity and native species diversity in China

区域 Region	df	$R^2$	F	P	Coefficient a	Coefficient b
全国 Total	27	0.297 **	10.571	0.003	0.011	123.849
东南区 Southeast	6	0.001	0.004	0.952	0.001	217.963
中南区 Central South	4	0.289	1.221	0.350	0.008	155.005
西南区 Southwest	3	0.681	4.273	0.175	0.014	63.620
东北区 Northeast	2	0.023	0.023	0.904	-0.008	158.189
华北区 Central North	2	0.762	3.206	0.324	0.030	8.292
西北区 Northwest	4	0.688 *	6.605	0.047	0.015	37.745

Notes: \*\*,  $P < 0.01$ ; \*,  $0.01 < P < 0.05$ .

丰富度相关系数较高, 但统计意义却不显著 ( $P > 0.05$ )。

### 3 讨论

#### 3.1 外来入侵物种空间分布格局及其影响

我国地域辽阔, 从南至北跨越了 50 个纬度和 5 个气候带 (热带、亚热带、暖温带、温带和寒温带), 这种自然特征使我国生态系统复杂多样, 来自世界各地的外来种几乎都可能在我国找到合适生存的栖息地, 这是我国很容易遭受外来入侵种侵害的原因之一<sup>[35]</sup>。在我国, 各区域外来入侵物种种类和数量变化较大<sup>[33]</sup>, 外来入侵物种分布格局呈现出很大的差异, 这种空间分布差异受自然环境和人类活动两方面的共同影响。一方面, 年均气温及年均降水是影响物种生存和分布最主要环境因子, 影响我国入侵物种丰富度从南到北递增。研究表明物种多样性与纬度相关, 低纬度地区较高纬度地区物种种类多<sup>[44]</sup>, 而实际入侵物种也符合这一规律。因为影响物种生存和分布的年均气温及年均降水与纬度相关, 随着纬度的升高气温和降水量都逐渐降低。气温降低导致生物有效积温减少, 而降水量是影响生物生存的关键因素, 两者共同影响了入侵物种的分布格局。

从全国尺度上来看, 热带地区比温带地区入侵物种多<sup>[34]</sup>, 南部地区比北方地区必然包含更多的外来入侵物种。另一方面, 是人类活动影响因子, 近年来大量的研究发现人类活动对外来物种的影响越来越大<sup>[30]</sup>。我国南方经济发展较快, 当地交通便利加大了不同地区间物种流动, 对外频繁贸易往来更是增加了外来物种入侵的机会<sup>[45,46]</sup>。目前已有大量研究表明入侵种的分布与交通密切相关<sup>[6,47]</sup>。因为交通道路导致本土物种生存的生境破碎化, 从而对生态系统产生干扰<sup>[48]</sup>形成了空生态位, 这给外来物种入侵创造了机会; 同时频繁的交通运输给植物种子或其它类型的繁殖体扩散增加了机会<sup>[49]</sup>, 对自然生态系统构成极大的威胁。东南地区人口密度较大, 人类活动对生物影响强度较大, 有意或无意引入外来物种的频率较高, 导致外来入侵物种数在南方地区较高; 而西部地区地广人稀、经济发展水平较低、人类活动频率低, 外来入侵物种数相比南方地区较少。例如在北方的各省中, 除河北省外其他省的入侵物种丰富度都比南方低。河北省入侵物种数高的主要原因是, 本研究将北京和天津两个直辖市纳入了河北省, 而北京和天津由于特殊的历史因素、地理位置

以及政治和经济因素，特别是经济核心区和国际国内贸易的枢纽地，致使河北省入侵物种丰富度较高。

### 3.2 外来入侵物种与本地物种丰富度的关系

外来入侵物种与本地物种丰富度的关系在大尺度研究上具有统计意义，国外研究和我国的同类研究结果一致<sup>[33, 50, 51]</sup>，即在大尺度上，本地物种多样性越丰富，外来入侵物种多样性也会越丰富，这意味着本地物种丰富度较高的地区相比丰富度降低的地区可能会更容易遭受外来物种的入侵。从入侵物种本身特性考虑，我国外来入侵物种主要来自美洲，特别是热带美洲，外来入侵物种更趋于入侵到与其原生存环境相一致的地区，我国南方热带地区正好是本地物种丰富度和外来入侵物种丰富度较高的地区；而我国西北、东北地区生存环境对本地物种和外来入侵物种都不适宜，因而本地物种多样性和入侵物种多样性都较低。从入侵地特征来看，决定我国入侵物种分布格局的主要因素是气候环境条件(图6)，而我国本土物种多样性的决定因素也是气候条件。我国本土物种没有发挥生物抵抗作用，与外来入侵物种呈正相关(表1)，和外来入侵物种共同分享生存资源，在一定程度上促进了生物入侵，这种现象在环境条件恶劣的西北地区更为明显，外来入侵物种和本地物种多样性呈显著相关( $P < 0.05$ )。

### 3.3 外来入侵物种与生态系统可入侵性

生态系统的可入侵性不仅与本地物种数量有关，还与影响可入侵性的其他因素有关，往往这些因素交织在一起，致使生态系统中本地种丰富度和被入侵地的可入侵性表现出不确定性。我国西南地区，入侵物种与本地物种丰富度线性正相关系数较高，但是统计意义不显著( $P > 0.05$ )，入侵物种数量虽然多但是西南地区生态位未饱和，外来入侵物种仍然在生态系统可容纳范围内，表现为入侵程度尚不严重。西北和东北地区的入侵物种和本地物种的丰富度都不高，西北地区入侵物种与本地物种丰富度表现为正相关而东北为负相关(Coefficient  $a < 0$ )，其原因是西北和东北不适于本地种的环境同样也不适于外来入侵种。我国中东部及纬度较高的沿海地区，发达经济和人类高频率干扰导致了入侵生物较多，入侵程度较严重，有可能成为国内其他地区的入侵物种源<sup>[52]</sup>，更应该采取相关措施及

时预防物种入侵。

## 4 入侵物种的分区管理建议

由于我国地域辽阔，各地区自然环境以及经济发展水平存在差异，导致当地生物入侵的主要原因以及影响因子也不同，在生物入侵防控管理方面，应该考虑地区差异，将全国划分为不同区域，分析各区域外来入侵物种的分布特征与主要入侵途径，明确各区域的管理目标与策略、重点监控对象，建议实行区域分级管理。

(1) **华北地区** 华北地区外来入侵物种数量和密度分布大致呈现出由东部依次向内陆递减的趋势。华北的北京、天津是人口密度非常高的地区，单位面积上人类活动比较频繁，增加了该地区与外界之间的联系，导致有意或无意地带入外来物种几率增加，因此要做好控制人口流动过程中无意或有意引入外来入侵物种的相关工作。适宜的温度对外来入侵物种的生长和繁衍十分重要<sup>[53]</sup>，因而华北地区外来入侵物种的预防和控制中要做好对该区域入侵物种的生物生态学研究，特别是加强有害物种生活史特征的详细研究和对温度等特征的长期监测。

(2) **西北地区** 我国西北地区环境恶劣、人口稀少、经济发展水平落后、森林覆盖率低等原因使得在该地区外来物种难以入侵，即使入侵成功也不能迅速扩散和繁衍，因而西北地区总体上外来入侵物种数量和密度分布都相对较少。在西北地区外来入侵物种的防控工作中，对人口密度高、降水量高的地区要加大监督力度；同时要特别注意该地区与其他区域的经济活动，尽量减少外来入侵物种的传入。

(3) **东北地区** 我国东北地区由于纬度较高，年均气温(MAT)、1月平均气温(MT1)和有效积温(GDD0)都相对较低，使生物生长受限，影响了外来入侵物种的生长和繁衍。但是，东北三省距离海洋较近，周围邻国较多，这些都是影响该地区入侵物种的重要因素。因而东北地区在外来入侵物种的预防和控制工作中，应加大对本地物种和外来入侵物种的生物研究工作；其次尽量避免与周围邻国的经济、文化、旅游等交流过程中外来入侵物种传入该地区的机会。

(4) **西南地区** 我国西南地区海拔较高、气温

相对较低、森林覆盖率较高, 因而在预防和控制外来入侵物种中, 要加大林业有害物种生活史特征的研究, 同时还要加强对森林覆盖率高的地区以及周边地区的长期监测。

**(5) 东南地区** 我国东南地区经济发展水平较高、交通发达, 与其他地区交流比较频繁, 因而外来入侵物种较多, 因此东南地区在外来入侵物种防控管理中要特别注意交通运输过程中外来物种的入侵。

**(6) 中南地区** 我国中南地区的广东、香港、澳门经济发展水平较高, 与国外交流频繁, 环境条件适宜, 这些因素导致了该地区的外来入侵物种数量和密度比其他区域都较高。因而在该地区外来入侵物种的防控管理中, 要重视与人类活动有关的因素对外来物种入侵的影响。而河南、湖南、湖北三省南北纬度跨度大, 年均降水、年均气温对外来入侵物种影响较大, 因而在该地区外来入侵物种的防控管理工作中, 要注重地区生态环境的长期监测, 了解入侵物种的生物特性, 避免外来入侵物种的入侵。

**致谢:** 感谢环境保护部南京环境科学研究所徐海根教授、马方舟博士提供帮助, 感谢“外来入侵动植物分级控制与管理研究”项目组成员提出的建议!

## 参考文献:

- [1] Vilà M, Espinar JL, Hejda M, Hulme PE, Jarošík V, Maron JL, Pergl J, Schaffner U, Sun Y, Pyšek P. Ecological impacts of invasive alien plants: a meta-analysis of their effects on species, communities and ecosystems [J]. *Ecol Lett*, 2011, 14(7): 702–708.
- [2] 郭晓辉, 任明迅, 丁建清, 郑景明. 加拿大一枝黄花入侵林地对植物多样性的影响及其季节变化 [J]. 植物科学学报, 2011, 29(2): 149–155.
- Guo XH, Ren MX, Ding JQ, Zheng JM. Plant species diversity and its seasonal dynamics in woodland invaded by *Solidago canadensis* (Asteraceae) [J]. *Plant Science Journal*, 2011, 29(2): 149–155.
- [3] Xu HG, Qiang S, Genovesi P, Ding H, Wu J, Meng L, et al. An inventory of invasive alien species in China [J]. *Neobiota*, 2012, 15: 1–26.
- [4] Rejmánek M, Richardson DM. Trees and shrubs as invasive alien species-2013 update of the global database [J]. *Divers Distrib*, 2013, 19(8): 1093–1094.
- [5] 陈宝明, 彭少麟, 吴秀平, 王鹏龙, 马建霞. 近 20 年外来生物入侵危害与风险评估文献计量分析 [J]. 生态学报, 2016, 36(20): 6677–6685.
- Chen BM, Peng SL, Wu XP, Wang PL, Ma JX. A bibliometric analysis of researches on topics related to the ecological damage caused by and risk assessments of exotic invasive species from 1995 to 2014 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(20): 6677–6685.
- [6] 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(4): 4–7.
- Zhang SH, Zhang ZH, Chen DD. The impact of alien invasive plants on the national ecological safety [J]. *Plant Quarantine*, 2015, 29(4): 4–7.
- [7] 蒋舟遥. 外来植物入侵对生态安全的威胁 [J]. 湖南林业科, 2016, 43(2): 137–140.
- Jiang ZY. Threats to the ecological security from exotic plant invasions [J]. *Hunan Forestry Science & Technology*, 2016, 43(2): 137–140.
- [8] 刘婷婷, 张洪军, 马忠玉. 生物入侵造成经济损失评估的研究进展 [J]. 生态经济, 2010(2): 173–175, 178.
- Liu TT, Zhang HJ, Ma ZY. Assessment of economic damage from biological invasion [J]. *Ecological Economy*, 2010(2): 173–175, 178.
- [9] Ehrenfeld JG. Ecosystem consequences of biological invasions [J]. *Annu Rev Ecol Evol S*, 2010, 41: 59–80.
- [10] Butchart SH, Walpole M, Collen B, van Strien A, Scharlemann JP, Almond RE, et al. Global biodiversity: Indicators of recent declines [J]. *Science*, 2010, 328: 1164–1168.
- [11] Rands MRW, Adams WM, Bennun L, Butchart SHM, Clements A, Coomes D, et al. Biodiversity conservation: Challenges beyond 2010 [J]. *Science*, 2010, 329: 1298–1303.
- [12] Pan XB, J Zhang JQ, Xu H, X Zhang XL, Zhang W, Song HH, Zhu SF. Spatial similarity in the distribution of invasive alien plants and animals in China [J]. *Nat Hazards*, 2015, 77(3): 1751–1764.
- [13] 王磊, 张彤, 卢训令, 王晓辉, 谷艳芳. 河南省鸡公山国家级自然保护区外来入侵植物 1994–2014 年间的变化 [J]. 植物科学学报, 2016, 34(3): 361–370.
- Wang L, Zhang T, Lu XL, Wang XH, Gu YF. Changes in alien invasive plants in Jigong Mountain National Nature Reserve of Henan Province from 1994–2014 [J]. *Plant Science Journal*, 2016, 34(3): 361–370.
- [14] Yu H, Wan FH, Guo JY. cDNA cloning of heat shock protein genes and their expression in an indigenous cryptic species of the whitefly *Bemisia tabaci* complex from China [J]. *J Integr Agr*, 2012, 11(2): 293–302.
- [15] 杨清培, 杨光耀, 宋庆妮, 施建敏, 欧阳明, 祁红艳, 方向民. 竹子扩张生态学研究: 过程、后效与机制 [J]. 植物生态学报, 2015, 39(1): 110–124.
- Yang QP, Yang GY, Song QN, Shi JM, Ouyang M, Qi HY, Fang XM. Ecological studies on bamboo expansion:

- process, consequence and mechanism [ J ]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015, 39(1): 110–124.
- [ 16 ] Wu H, Ding JQ. Recent progress in invasion ecology [ J ]. *Chinese Sci Bull*, 2014, 59: 438–448.
- [ 17 ] Williamson MH, Fitter A. The characters of successful invaders [ J ]. *Biol Conserv*, 1996, 78(1–2): 163–170.
- [ 18 ] Catford JA, Vesk PA, Richardson DM, Pyšek P. Quantifying levels of biological invasion: towards the objective classification of invaded and invasible ecosystems [ J ]. *Global Change Biol*, 2012, 18(1): 44–62.
- [ 19 ] Liu J, Chen H, Kowarik I, Zhang YR, Wang RQ. Plant invasions in China: an emerging hot topic in invasion science [ J ]. *Neobiota*, 2012, 15: 27–51.
- [ 20 ] 鞠瑞亭, 李慧, 石正人, 李博. 近十年中国生物入侵研究进展 [ J ]. 生物多样性, 2012, 20(5): 581–611.
- Ju RT, Li H, Shi ZR, Li B. Progress of biological invasions research in China over the last decade [ J ]. *Biodiversity Science*, 2012, 20(5): 581–611.
- [ 21 ] Ding J, Mack RN, Lu P, Ren M, Huang H. China's booming economy is sparking and accelerating biological invasions [ J ]. *BioScience*, 2008, 58(4): 317–324.
- [ 22 ] Xu H, Pan X, Song Y, Huang Y, Sun M, Zhu S. Intentionally introduced species: more easily invited than removed [ J ]. *Biodivers Conserv*, 2014, 23(10): 2637–2643.
- [ 23 ] Xu H, Chen K, Ouyang Z, Pan X, Zhu S. Threats of invasive species for China caused by expanding international trade [ J ]. *Environ Sci Technol*, 2012, 46(13): 7063–7064.
- [ 24 ] 李博, 马克平. 生物入侵: 中国学者面临的转化生态学机遇与挑战 [ J ]. 生物多样性, 2010, 18(6): 529–532.
- Li B, Ma KP. Biological invasions: opportunities and challenges facing Chinese ecologists in the era of translational ecology [ J ]. *Biodiversity Science*, 2010, 18(6): 529–532.
- [ 25 ] Gurvich DE, Tecco PA, Díaz S. Plant invasions in undisturbed ecosystems: The triggering attribute approach [ J ]. *J Veg Sci*, 2005, 16(6): 723–728.
- [ 26 ] Palmer MW, Pyšek, Kaplan Z, Richardson DM. Scale dependence of native and alien species richness in North American floras [ J ]. *Preslia*, 2006, 78(4): 427–436.
- [ 27 ] Anzara K, Zafara R, Akhtara M, Ewald W, Irfan R, Dar GH. Alien flora of India: taxonomic composition, invasion status and biogeographic affiliations [ J ]. *Biol Invasions*, 2012, 14(1): 99–113.
- [ 28 ] 黄乔乔, 沈奕德, 李晓霞, 程汉亭, 宋鑫, 范志伟. 外来入侵植物在中国的分布及入侵能力研究进展 [ J ]. 生态环境学报, 2012, 21(5): 977–985.
- Huang QQ, Shen YD, Li XX, Cheng HT, Song X, Fan ZW. Research progress on the distribution and invasiveness of alien invasive plants in China [ J ]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(5): 977–985.
- [ 29 ] Zhang S, Guo S, Guan M, Yin L. Diversity differentiation of invasive plants at a regional scale in China and its influencing factors: according to analyses on the data from 74 regions [ J ]. *Acta Ecol Sin*, 2010, 30(16): 4241–4256.
- [ 30 ] Wu SH, Sun HT, Teng YC, Rejmánek M, Chaw SM, Yang TY, Hsieh CF. Patterns of plant invasions in China: taxonomic, biogeographic, climatic approaches and anthropogenic effects [ J ]. *Biol Invasions*, 2010, 12(7): 2179–2206.
- [ 31 ] Murray BR, Philips ML. Temporal introduction patterns of invasive alien plant species to Australia [ J ]. *Neobiota*, 2012, 13: 1–14.
- [ 32 ] Huang QQ, Wang GX, Hou YP, Peng SL. Distribution of invasive plants in China in relation to geographical origin and life cycle [ J ]. *Weed Res*, 2011, 51(5): 534–542.
- [ 33 ] Bai F, Chisholm R, Sang W, Dong M. Spatial risk assessment of alien invasive plants in China [ J ]. *Environ Sci Technol*, 2013, 47(14): 7624–32.
- [ 34 ] 马金双. 中国入侵植物名录 [ M ]. 北京: 高等教育出版社, 2013.
- [ 35 ] 马金双. 中国外来入侵植物调研报告 [ M ]. 北京: 高等教育出版社, 2014.
- [ 36 ] 李国平, 林盛, 张剑, 胡永乐, 杨鹭生. 武夷山市入侵植物的调查与分析 [ J ]. 热带作物学报, 2014, 35(4): 794–800.
- Li GP, Lin S, Zhang J, Hu YL, Yang LS. Alien invasive plants in Wuyishan City, China [ J ]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2014, 35(4): 794–800.
- [ 37 ] 闫小玲, 刘全儒, 寿海洋, 曾宪锋, 张勇, 陈丽, 刘演, 马海英, 齐淑艳, 马金双. 中国外来入侵植物的等级划分与地理分布格局分析 [ J ]. 生物多样性, 2014, 22(5): 667–676.
- Yan XL, Liu QR, Shou HY, Zeng XF, Zhang Y, Chen L, Liu Y, Ma HY, Qi SY, Ma JS. The categorization and analysis on the geographic distribution patterns of Chinese alien invasive plants [ J ]. *Biodiversity Science*, 2014, 22(5): 667–676.
- [ 38 ] 杨忠兴, 陶晶, 郑进烜. 云南湿地外来入侵植物特征研究 [ J ]. 西部林业科学, 2014, 43(1): 54–61.
- Yang ZX, Tao J, Zheng JX. Study on the characteristics of alien invasive plants of wetland in Yunnan [ J ]. *Journal of West China Forestry Science*, 2014, 43(1): 54–61.
- [ 39 ] 张杰. 鄱阳湖南矶山湿地自然保护区的外来入侵植物调查与分析 [ J ]. 热带亚热带植物学报, 2015, 23(4): 419–427.
- Zhang J. Investigation on the Invasive plants in Nanjishan Nature Reserve of Poyang Lake [ J ]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2015, 23(4): 419–427.
- [ 40 ] 中国外来入侵物种数据库 [ DS/OL ]. <http://www.chinaias.cn/wjPart/index.aspx>. 2016.
- [ 41 ] 孟婷婷. 中国和澳大利亚植物形态性状与气候的关系及性状间的相关性 [ D ]. 北京: 中国科学院植物研究所, 2010.

- [42] National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2009.
- [43] 中国经济与社会发展统计数据库[DS/OL]. <http://tongji.cnki.net/kns55/index.aspx>. 2015.
- [44] 许玥, 李鹏, 刘晔, 张婉君, 秦思雨, 沈泽昊. 怒江河谷入侵植物与乡土植物丰富度的分布格局与影响因子[J]. 生物多样性, 2016, 24(4): 389–398.
- Xu Y, Li P, Ye Liu Y, Zhang WJ, Qin SY, Shen ZH. Spatial patterns and determinants of species richness of alien and native plants in the Nujiang River valley[J]. *Biodiversity Science*, 2016, 24(4): 389–398.
- [45] Pyšek P, Jarošík V, Hulme PE, Kühn I, Wild J, Arianoutsou M, et al. Disentangling the role of environmental and human pressures on biological invasions across Europe [J]. *PNAS*, 2010, 107(27): 12157–12162.
- [46] Jeschke JM, Genovesi P. Do biodiversity and human impact influence the introduction or establishment of alien mammals? [J]. *Oikos*, 2011, 120(1): 57–64.
- [47] Wang RL, Zeng RS, Peng SL, Chen BM, Liang XT, Xin XW. Elevated temperature may accelerate invasive expansion of the liana plant *Ipomoea cairica*[J]. *Weed Res*, 2011, 51: 574–580.
- [48] Lippe MVD, Kowarik I. Interactions between propagule pressure and seed traits shape human-mediated seed dispersal along roads [J]. *Perspect Plant Ecol*, 2012, 14(2): 123–130.
- [49] Essl F, Dullinger S, Rabitsch W, Hulme PE, Hülber K, Jarošík V, et al. Socioeconomic legacy yields an invasion debt[J]. *PNAS*, 2011, 108(1): 203–207.
- [50] Bradley BA, Early R, Sorte CJB. Space to invade? Comparative range infilling and potential range of invasive and native plants[J]. *Global Ecol Biogeogr*, 2015, 24(3): 348–359.
- [51] Herben T, Mandák B, Bímová K, Münzbergová Z. Invasibility and species richness of a community: A neutral model and a survey of published data[J]. *Ecology*, 2004, 85(12): 3223–3233.
- [52] Huang D, Zhang R, Kim KC, Suarez AV. Spatial pattern and determinants of the first detection locations of invasive alien species in mainland China[J]. *PLoS One*, 2012, 7(2): e31734.
- [53] Costanza R, D'Arge R, Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital (Reprinted from *Nature*, 1997, 387 (6630): 253–260) [J]. *Ecol Econ*, 1998, 25(1): 3–15.

附表 1 中国各省环境因子和人类活动的变量

Appendix 1 Environmental factors and human activity variables in different Chinese provinces

环境因子 Environmental factors	单位 Units	数据转化 Data transformation
年均气温 MAT	°C	/
年均降水 MAP	mm	/
最热月平均气温 MTWA	°C	/
基于 0°C 的生长季积温 GDD0	°C	/
有效日照时数 PAR0	h	/
6–8 月平均降水 PJJJA	mm	/
湿润指数 MI		/
干旱指数 Alpha		/
纬度 Lat	°	/
经度 Long	°	/
区域面积 RAR	10 <sup>4</sup> km <sup>2</sup>	对数转化 ln
人类变量 Anthropological factors		/
人口密度 Density	人/km <sup>2</sup>	对数转化 ln
各省年度生产总值 GDP	亿元/10 <sup>8</sup> RMB	/
进口货物总额 VIC	万美元	对数转化 ln
外来游客人数 NFT	万人	对数转化 ln
铁路里程 Train	万 km	/
等级公路里程 Road	万 km	/
内河航道里程 River	万 km	/
年货运量 Cargo	10 <sup>7</sup> kg	/

附表2 中国各省环境因子与人类活动因子的关系  
Appendix 2 Half-matrix of Pearson correlation coefficients among environmental and anthropological variables

因子 Factors	Lat	Long	MAT	MAP	MTWA	GDD0	PAR0	PJJA	alpha	MI	Density	Train	Rive	Road	In_NFT	GDP	Cargo	In_VIC
Lat	1.000																	
Long	0.091 <sup>ns</sup>	1.000																
MAT	-0.788 <sup>**</sup>	0.326 <sup>ns</sup>	1.000															
MAP	-0.842 <sup>**</sup>	0.356 <sup>ns</sup>	0.892 <sup>**</sup>	1.000														
MTWA	-0.340 <sup>ns</sup>	0.622 <sup>**</sup>	0.836 <sup>**</sup>	0.666 <sup>**</sup>	1.000													
GDD0	-0.761 <sup>**</sup>	0.352 <sup>ns</sup>	0.987 <sup>**</sup>	0.904 <sup>**</sup>	0.839 <sup>**</sup>	1.000												
PAR0	-0.672 <sup>**</sup>	0.299 <sup>ns</sup>	0.914 <sup>**</sup>	0.711 <sup>**</sup>	0.775 <sup>**</sup>	0.887 <sup>**</sup>	1.000											
PJJA	-0.776 <sup>**</sup>	0.437 <sup>*</sup>	0.846 <sup>**</sup>	0.931 <sup>**</sup>	0.614 <sup>**</sup>	0.853 <sup>**</sup>	0.684 <sup>**</sup>	1.000										
alpha	-0.619 <sup>**</sup>	0.560 <sup>**</sup>	0.677 <sup>**</sup>	0.850 <sup>**</sup>	0.548 <sup>**</sup>	0.673 <sup>**</sup>	0.458 <sup>*</sup>	0.898 <sup>**</sup>	1.000									
MI	-0.769 <sup>**</sup>	0.386 <sup>*</sup>	0.786 <sup>**</sup>	0.964 <sup>**</sup>	0.589 <sup>**</sup>	0.789 <sup>**</sup>	0.552 <sup>**</sup>	0.907 <sup>**</sup>	0.919 <sup>**</sup>	1.000								
Density	-0.335 <sup>ns</sup>	0.382 <sup>*</sup>	0.487 <sup>**</sup>	0.372 <sup>ns</sup>	0.477 <sup>*</sup>	0.449 <sup>*</sup>	0.505 <sup>**</sup>	0.420 <sup>*</sup>	0.439 <sup>*</sup>	0.307 <sup>ns</sup>	1.000							
Train	0.681 <sup>**</sup>	0.292 <sup>ns</sup>	-0.229 <sup>ns</sup>	-0.351 <sup>ns</sup>	0.065 <sup>ns</sup>	-0.267 <sup>ns</sup>	-0.286 <sup>ns</sup>	-0.251 <sup>ns</sup>	-0.171 <sup>ns</sup>	-0.278 <sup>ns</sup>	-0.146 <sup>ns</sup>	1.000						
Rive	-0.275 <sup>ns</sup>	0.236 <sup>ns</sup>	0.349 <sup>ns</sup>	0.418 <sup>*</sup>	0.388 <sup>ns</sup>	0.330 <sup>ns</sup>	0.245 <sup>ns</sup>	0.420 <sup>*</sup>	0.521 <sup>**</sup>	0.481 <sup>**</sup>	0.510 <sup>**</sup>	-0.052 <sup>ns</sup>	1.000					
Road	-0.131 <sup>ns</sup>	-0.383 <sup>*</sup>	-0.046 <sup>ns</sup>	0.022 <sup>ns</sup>	-0.213 <sup>ns</sup>	0.074 <sup>ns</sup>	-0.149 <sup>ns</sup>	0.048 <sup>ns</sup>	0.099 <sup>ns</sup>	0.140 <sup>ns</sup>	-0.221 <sup>ns</sup>	0.161 <sup>ns</sup>	0.151 <sup>ns</sup>	1.000				
In_NFT	-0.249 <sup>ns</sup>	0.552 <sup>**</sup>	0.536 <sup>**</sup>	0.538 <sup>**</sup>	0.589 <sup>**</sup>	0.541 <sup>**</sup>	0.479 <sup>**</sup>	0.649 <sup>**</sup>	0.604 <sup>**</sup>	0.534 <sup>**</sup>	0.556 <sup>**</sup>	0.316 <sup>ns</sup>	0.501 <sup>**</sup>	-0.036 <sup>ns</sup>	1.000			
GDP	-0.052 <sup>ns</sup>	0.427 <sup>*</sup>	0.318 <sup>ns</sup>	0.211 <sup>ns</sup>	0.433	0.288 <sup>ns</sup>	0.322 <sup>ns</sup>	0.308 <sup>ns</sup>	0.291 <sup>ns</sup>	0.190 <sup>ns</sup>	0.751 <sup>**</sup>	0.230 <sup>ns</sup>	0.620 <sup>**</sup>	0.156 <sup>ns</sup>	0.739 <sup>**</sup>	1.000		
Cargo	0.029 <sup>ns</sup>	0.419 <sup>*</sup>	0.303 <sup>ns</sup>	0.141 <sup>ns</sup>	0.485 <sup>**</sup>	0.250 <sup>ns</sup>	0.313 <sup>ns</sup>	0.238 <sup>ns</sup>	0.260 <sup>ns</sup>	0.142 <sup>ns</sup>	0.640 <sup>**</sup>	0.367 <sup>ns</sup>	0.487 <sup>**</sup>	-0.092 <sup>ns</sup>	0.659 <sup>**</sup>	0.838 <sup>**</sup>	1.000	
In_VIC	-0.078 <sup>ns</sup>	0.630 <sup>**</sup>	0.466 <sup>*</sup>	0.376 <sup>*</sup>	0.624 <sup>**</sup>	0.611 <sup>*</sup>	0.484 <sup>**</sup>	0.456 <sup>*</sup>	0.394 <sup>*</sup>	0.388 <sup>ns</sup>	0.599 <sup>**</sup>	0.313 <sup>ns</sup>	0.489 <sup>**</sup>	-0.219 <sup>ns</sup>	0.855 <sup>**</sup>	0.873 <sup>**</sup>	0.792 <sup>**</sup> 1.000	

Notes: Significance test, ns:  $P > 0.05$ ; \*:  $0.01 < P < 0.05$ ; \*\*:  $P < 0.01$ .  
Lat, Long, MAT, MAP, MTWA, GDD0, PAR0, PJJA, alpha, MI, Density, Train, Rive, Road, In\_NFT, GDP, Cargo, In\_VIC. See Appendix 1.

(责任编辑: 张平)