

中国外来入侵植物的分布格局及其与环境因子和人类活动的关系

吴晓雯 罗 晶 陈家宽 李 博*

(生物多样性与生态工程教育部重点实验室、复旦大学生物多样性科学研究所,上海 200433)

摘 要 认识区域尺度上外来入侵植物的分布格局及其成因对预测入侵的影响和入侵种的管理具有重要意义。该文采用聚类分析和排序的方法分析了我国外来入侵植物的空间格局,并利用多元线性逐步回归和典范对应分析探讨了自然环境因子和人类活动强度对中国 32 个省级空间单位(省、市、自治区,不包括香港和澳门)中外来入侵植物分布的影响。结果表明,中国各省外来入侵植物物种数从南到北逐渐减少,导致这一格局的主要因子为无霜期;各省外来入侵植物物种密度由东南海岸向内陆递减,造成这一趋势的主要影响因素为交通密度,纬度是解释中国各省外来入侵植物物种组成变异的主要因子,因此中国 32 个省区可归为低、中、高纬度区 3 大类型。在此基础上预测中国东南部地区有遭受更多外来植物入侵的可能,此外,交通发达的区域也将成为外来植物入侵的热点区,应该引起有关部门的重视。

关键词 交通密度 空间格局 人类活动 纬度 无霜期 植物入侵

SPATIAL PATTERNS OF INVASIVE ALIEN PLANTS IN CHINA AND ITS RELATIONSHIP WITH ENVIRONMENTAL AND ANTHROPOLOGICAL FACTORS

WU Xiao-Wen LUO Jing CHEN Jia-Kuan and LI Bo*

(Ministry of Education Key Laboratory for Biodiversity Science and Ecological Engineering, Institute of Biodiversity Science, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract Background and Aims Biological invasions, one of the three most pressing environmental problems, is an important component of global change and causes considerable environmental damage and economic losses to the invaded regions. Although China is a country heavily infested with invasive alien plants, factors influencing regional spatial patterns of these species are largely unknown.

Methods In order to explore the relationship between spatial patterns of invasive alien plants and environmental and anthropological factors, this study used multiple stepwise regression and canonical correspondence analysis to determine the effects of seven environmental variables (including area, latitude, longitude, mean temperature in January, mean temperature in July, annual precipitation, frost-free days) and seven anthropological factors (including number of foreign tourists, GDP, transport density, value of imported goods, area of nature conserve, rate of nature conserve, population density) on the number, density and spatial distribution of invasive alien plants in 32 provinces of China.

Key Results It was found that the number of invasive alien plant species decreased from the south to the north, which was largely determined by the frost-free days. The density of invasive plant species declined from the southeast coast inland to the northwest, which was best explained by transport density. In addition, about 50% of the variation in invasive alien species composition across provinces was accounted for by latitude.

Conclusions Our results suggest that both natural conditions and anthropological factors play important roles in shaping the patterns of plant invasions in China. These findings may help to understand ecosystem invasibility, and predict plant invasions on a regional scale, and hence have important implications for the management of invasive species.

Key words Frost-free days, Human impacts, Latitudinal gradient, Plant invasion, Spatial pattern, Transport density

生物入侵是全球变化的重要组分(Vitousek *et al.* , 1997 ; Mooney & Hobbs , 2000) ,已在区域和全球尺度上造成了严重的生态后果(Mack & D 'Antonio , 1998 ; Christian , 2001 ; Ehrenfeld *et al.* , 2001 ; Lyons & Schwartz , 2001 ; Ehrenfeld , 2003)和经济损失(Wilcove *et al.* , 1998 ; Pimentel *et al.* , 2000 ; Pimentel *et al.* , 2001)。入侵生态学正逐渐发展成为当代生态学的一个重要分支(Lodge , 1993 ; Ludsins & Wolfe , 2001)。中国作为一个纬度跨度大、地形复杂、生态系统类型多样化程度高、经济发展迅速的世界大国,其生物多样性和自然生态系统不断遭受到外来入侵种的严重威胁(Xie *et al.* , 2001) ,每年由外来入侵种所造成的经济损失超过 70 亿美元(范晓虹和李尉民 , 2001)。由此可见,深入了解外来物种成功入侵的机制,有效地预测、预防和管理入侵种已经成为科学研究者和政府管理人员亟待解决的重要生态环境问题,而分析区域尺度上物种入侵的空间格局并探索其形成的主要原因正是认识生物入侵问题的重要基础之一。

决定外来入侵种分布的因素除了其生物学特性(即物种入侵力)之外,主要有两大类:第一是被入侵生态系统的环境特性,外来物种是否能够定居、扩散以至最终在新抵达的生态系统中成功入侵有赖于新生境的环境是否适合该物种的生长和繁衍(Williamson , 1996) ,目前运用基于气候因子的 GIS 拟合模型是预测外来入侵植物分布的重要手段之一(Weber , 2001 ; Rouget *et al.* , 2004) ;第二是人类活动的强度(Hodkinson & Thompson , 1997 ; Vila & Pujadas , 2001 ; Ruiz & Carlton , 2003) ,人类活动作为物种入侵的重要媒介,不仅增加了物种到达新生境的机会(Elton , 1958 ; Lonsdale & Lane , 1994) ,也为外来物种创建了能够定居的受干扰生境(Hobbs & Huenneke , 1992 ; Smith & Knapp , 1999)。综合考虑自然环境和人类活动因子对外来入侵种分布格局的影响,将有助于对入侵的预测(Higgins *et al.* , 1999 ; McKinney , 2001 ; Dark , 2004 ; Gido *et al.* , 2004)。

然而,以往有关外来入侵种的分布格局及其成因的分析主要集中在欧洲、北美等国家,亚洲区域包括中国的研究比较薄弱,区域范围的入侵格局和自然环境及人类活动因子的关系更是少有定量分析。本文应用外来入侵植物数据库、以省为空间单位揭示中国外来入侵植物的分布格局,分析环境因子和人类活动与中国外来入侵植物物种数、密度和物种组成格局的关系,以期为入侵种管理提供理论依据。

1 研究方法

1.1 数据来源

中国外来入侵植物分布数据来源于李振宇和谢焱(2002) ,从外来入侵植物在中国各省的分布现状中总结出的数据包括:外来入侵植物物种数(Number of invasive alien plant species , *NIS*)、外来入侵植物物种密度(Density of invasive alien plants , *ID*)和各省外来入侵植物物种组成(32×90 的 0/1 矩阵,行表示省,列表示物种,物种在该省存在与否用 1 或 0 表示)。本文采用变量的名称、缩写代码、单位等说明见表 1。其中:

外来入侵植物物种密度(*ID*) =

$$\frac{\text{外来入侵植物物种数(} NIS \text{)}}{\text{面积(} PAR \text{)}}$$

中国各省环境因子的资料主要来源于朱大仁(2000)的文献,书中获得的变量有:年降水量、1 月平均气温、7 月平均气温、面积、中心经度、中心纬度。

中国各省人类活动影响因子的数据主要来源于中华人民共和国国家统计局官方网站公布的统计资料(NBSC , 2000)。从网上数据库中筛选出的变量有(均选取 2000 年年度数据):人口密度、年度生产总值、进口货物总额、外来游客人数。交通密度取自朱大仁(2000)的文献。另外,外来物种的多度也和省内自然保护区的面积有关,所以各省自然保护区面积和自然保护区比率也被考虑为可能影响中国植物入侵格局的因素,其资料来源于 SEPAC(2002)。其中:

$$\text{人口密度(} PLD \text{)} = \frac{\text{人口总数}}{\text{面积(} PAR \text{)}}$$

$$\text{交通密度(} TPD \text{)} =$$

$$\frac{\text{公路线里程} + \text{铁路线里程} + \text{水路线里程}}{\text{面积(} PAR \text{)}}$$

$$\text{省内保护区面积比例(} PAP \text{)} =$$

$$\frac{\text{自然保护区面积(} ANR \text{)}}{\text{面积(} PAR \text{)}}$$

1.2 分析方法

全国 34 个行政区(包括省、自治区、直辖市和行政特区)被用作本文研究中的空间单位。由于香港和澳门的特殊性,收集其相关数据相对困难且其可比性较差,所以在文章的统计分析中剔除了这两个空间单位。

应用 ArcView 软件对中国各省外来入侵植物物种数和密度作图,从地图上直观显示中国 34 个省级

表 1 反映中国各省环境因子和人类活动的变量
Table 1 Variables reflecting environmental features and the intensity of human activities in province, China

变量 Variables	单位 Units	数据转换 Data transformation
环境变量 Environmental factors		
纬度 Latitude (<i>LTD</i>)	度 (°)	—
经度 Longitude (<i>LGD</i>)	度 (°)	—
省面积 Area of province (<i>PAR</i>)	万平方公里 (10^4 km^2)	对数转换 ln
1 月平均气温 Mean temperature in January (<i>MT1</i>)	摄氏度 (°C)	—
7 月平均气温 Mean temperature in July (<i>MT7</i>)	摄氏度 (°C)	—
年降雨量 Annual precipitation (<i>APP</i>)	毫米 (mm)	—
无霜期 Frost-free days (<i>FFD</i>)	天 Days	—
人类影响 Anthropological factors		
人口密度 Population density (<i>PLD</i>)	个数/平方公里 $\text{Persons} \cdot \text{km}^{-2}$	平方根转换 Square root
交通密度 Transport density (<i>TPD</i>)	线路长/万平方公里 $\text{km} \cdot 10^4 \text{ km}^{-2}$	—
省内年度生产总值 Values of annual gross production (<i>GDP</i>)	亿元 (10^8 RMB)	对数转换 ln
进口货物总额 Values of imported goods (<i>VIC</i>)	万美元 (10^4 US dollars)	对数(平方根转换) ln (Square root)
外来游客人数 Number of foreign tourists (<i>NFT</i>)	万人 (10^4 persons)	对数转换 ln
省内自然保护区面积 Area of nature reserves (<i>ANR</i>)	平方公里 (km^2)	对数转换 ln
省内保护区的面积比例 Percentage of areas protected (<i>PAP</i>)	百分比 (%)	对数转换 ln

单位(此时包括香港和澳门)中外来入侵植物的分布情况。结合排序和聚类分析显示中国 32 个省级单位(不包括香港和澳门)外来入侵植物的分布格局,这样较为客观地反映出省际外来入侵植物物种组成的相似程度。

应用 Statistics 6.0 软件进行统计分析。第一步:利用 Kolmogorov-Smirnov 方法检测变量的正态分布性,当 $p < 0.02$ 时对变量进行合理的数据转换,其数据转换方法见表 1;第二步:检测变量间的相关性;第三步:应用向前逐步回归在 14 个变量中筛选出重要的变量,纳入多元线性逐步回归方程,分析影响外来入侵植物物种数和密度的关键因子;第四步:对于多元线性回归的结果进行残差分析,检测是否存在例外点并分析去除最显著因子的影响后,应变量的残差与其它因子的回归显著性。

应用 PC-ORD 软件进行典范对应分析,确定外来入侵植物在中国各省的分布格局与环境及人类活动因子的关系。典范对应分析是一项用于探索物种组成梯度和其它变量因子相关关系的技术(ter Braak, 1986),文中进入典范对应分析的两个数据矩阵分别为:一是中国所有外来入侵植物种(共 90 种)在各省(共 32 省)有无入侵的 0/1 矩阵;二是环境因子和人类活动因子在各省的数据矩阵。

2 研究结果

2.1 外来入侵植物的空间分布格局

90 种外来入侵植物在中国境内的分布存在很

大的空间变异(图 1a),宁夏、内蒙古、新疆、青海的入侵物种较少(宁夏最少,仅有 10 种);福建、广东、广西、云南、台湾这 5 个省中包含的入侵植物较多(广东最多,68 种),总体趋势显示中国各省的外来入侵植物数量从南到北逐渐减少。而外来入侵植物物种的密度以中国东南部和大城市(北京、天津、上海、重庆)居高(图 1b),由东南海岸向西北内陆递减。研究同时检验了外来入侵植物物种数和面积的关系,结果显示中国各省外来入侵植物物种数和省面积没有显著相关关系($p > 0.05$)。

根据外来入侵植物的组成分布,图 2 用树状图的形式反映出中国 32 个省聚类分析的结果。图中虚线将 32 个省重新划分为 3 大类型,据此在图 3 中标出 3 个区域:I 区为我国南部低纬度区,II 区为我国中部中纬度区,III 区为我国北部高纬度区。由此可见,外来入侵植物在各省的分布格局与纬度梯度关系明显。图 3 中点与点之间的距离表示省与省之间外来入侵植物组成分布的相似程度。

2.2 外来入侵植物物种数和密度与环境条件及人类活动的关系

对外来入侵植物物种数和密度与环境及人类活动变量之间的相关分析表明,许多变量之间存在明显的相关性(表 2),各个变量间相关性的显著程度也各不相同。纬度在很大的程度上综合反映了诸多环境因子的变化规律,一般来说,随着纬度增加,1 月平均气温和降雨量呈下降趋势,而无霜期逐渐增加。人口密度和交通密度的相关性很高

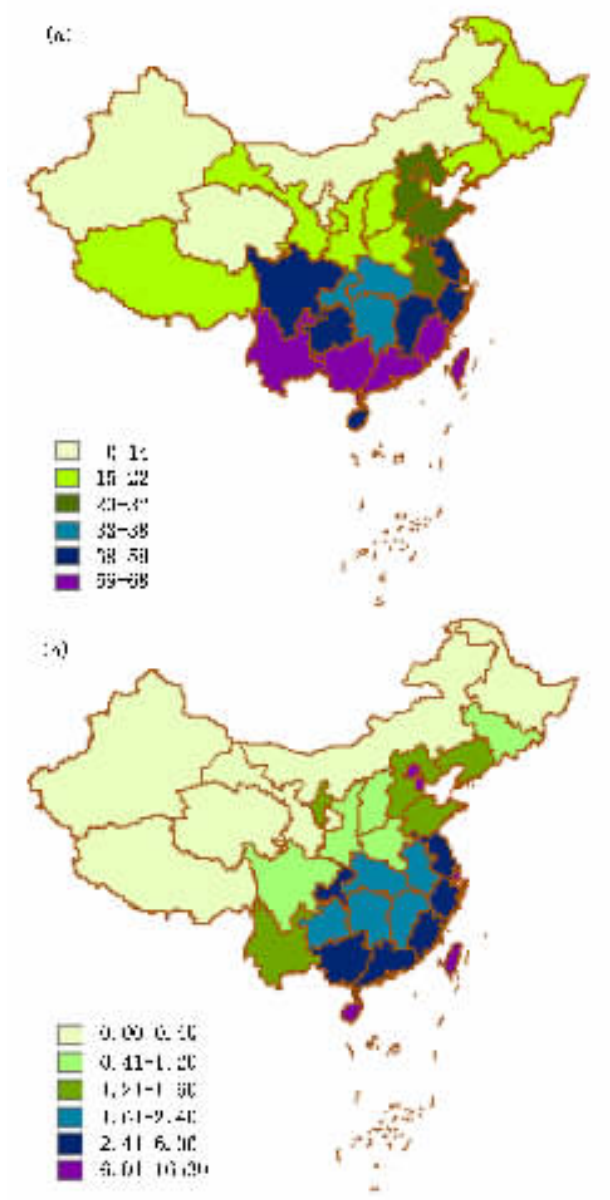


图 1 中国外来入侵植物的分布格局

Fig.1 Distribution of invasive alien plants in China

a : 外来入侵植物物种数的空间变异 Number of invasive alien plant species in each province b : 外来入侵植物物种密度的空间变异 Density of invasive alien plants in each province

($r^2 = 0.85$, $p < 0.001$),反映了人口密度高,则活动频率高,需要的交通密度也相应偏高。经度和自然保护区面积呈现负相关关系($r^2 = -0.70$, $p < 0.001$)表明了东部地区省内自然保护区面积小于西部地区。

第一次多元回归分析的结果见表 3,经向前逐步回归筛选后有 5 个变量进入回归模型,这些变量共解释了省间外来入侵植物物种数变异的92.0%。其中,无霜期是决定外来入侵植物物种数的主要因子,无霜期长的地区入侵植物物种数多,其次为年降

雨量。残差分析的结果显示,去除无霜期对外来入侵植物物种数的影响之后,年降雨量和残差项的正相关趋势不显著($p > 0.05$)。

第二次多元线性回归的应变量是外来入侵植物物种密度,经向前逐步回归筛选后有 6 个变量进入回归模型,这些变量共解释了省间外来入侵植物物种密度差异的 96%(表 4)。交通密度是决定中国各省植物入侵密度最重要的因子,单个因子能够解释变异的 80.4%,说明单位面积交通线路多的地区,其外来入侵植物物种密度也高,其次是 1 月平均气温。残差分析的结果显示,在去除交通密度对外来入侵植物物种密度的影响之后,1 月平均气温和残差项的正相关趋势不显著($p > 0.05$)。

2.3 中国各省外来入侵植物物种组成格局与环境及人类活动因子的关系

典范对应分析结果显示,第一、二、三轴能解释外来入侵植物在中国各省物种组成变异的 46.9%。Monte Carlo 随机排列检验结果显示,典范对应分析轴一的作用显著(特征值为 0.404, $p < 0.01$),典范对应分析轴二的作用也显著(特征值为 0.123, $p < 0.01$)。与轴一最相关的 3 个变量为:1 月平均气温($r^2 = -0.883$)、无霜期($r^2 = -0.893$)、纬度($r^2 = 0.943$);与轴二最相关的 3 个变量为:自然保护区面积($r^2 = -0.742$)、7 月平均气温($r^2 = 0.727$)、人口密度($r^2 = 0.806$)。图 4 所示为 13 个环境因子及人类活动因子一、二轴的关系,箭头表示自变量因子,箭头连线的长短表示因子对各省外来入侵植物物种组成变异的影响强度,箭头连线在排序中的斜率表示自变量与排序轴的相关性大小,箭头所处象限表示因子与排序轴之间相关性的正负。由图 4 可见,纬度是所有因子中对入侵植物物种组成影响最大的因子。

3 结论和讨论

中国地域辽阔,从南至北跨越 50 个纬度及 5 个气候带(热带、亚热带、暖温带、温带和寒温带),这种自然特征使得来自世界各地的外来种都可能在中国找到合适的栖息地,致使中国很容易遭受外来入侵种的侵害(李振宇和谢焱,2002)。中国各省外来入侵植物物种数在南部数量较多,而北部地区较少(图 1)。由聚类分析(图 2)将各省外来植物物种分布划分为 3 大类型(图 3)可见:不同类型间的主要区别在于其纬度区的差异。这种趋势可以从两个角度分析解释:1)符合纬度与物种多样性呈负相关的生态

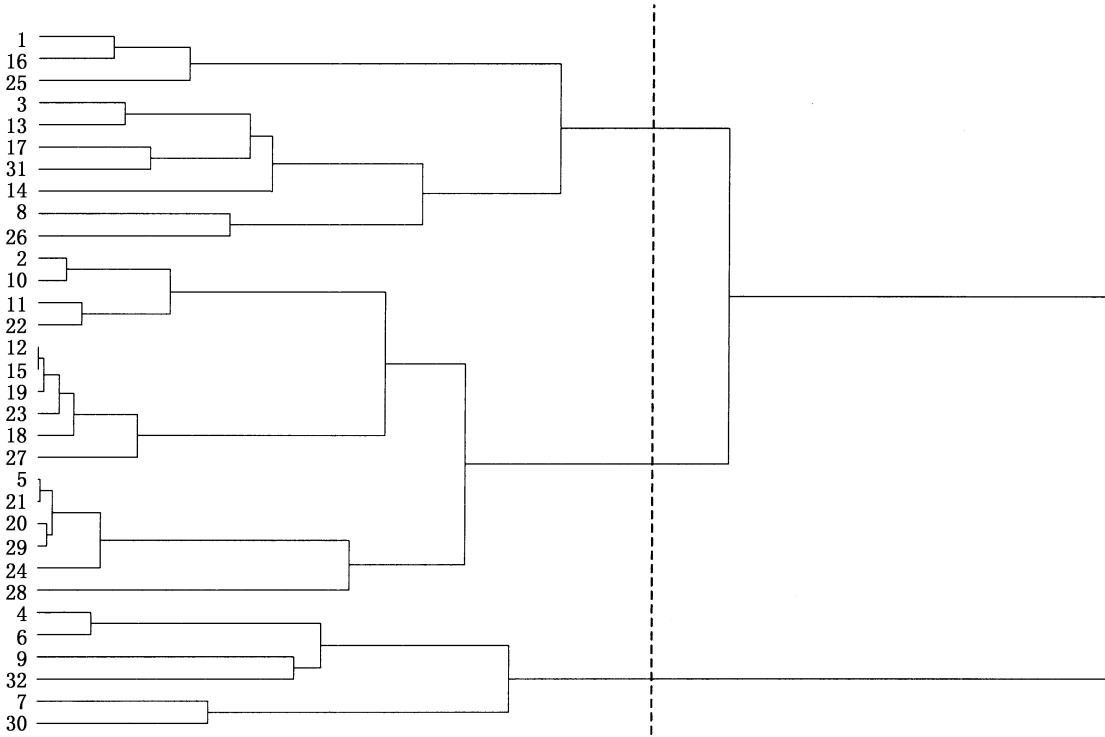


图 2 32 个省市的聚类分析图(虚线将 32 个省市划分为 3 组)

Fig.2 Dendrogram of the 32 provinces based on the distribution patterns of invasive alien plants (Dashed line divides 32 provinces into 3 types)

1. 安徽 Anhui 2. 北京 Beijing 3. 重庆 Chongqing 4. 福建 Fujian 5. 甘肃 Gansu 6. 广东 Guangdong 7. 广西 Guangxi 8. 贵州 Guizhou 9. 海南 Hainan 10. 河北 Hebei 11. 河南 Henan 12. 黑龙江 Heilongjiang 13. 湖北 Hubei 14. 湖南 Hunan 15. 吉林 Jilin 16. 江苏 Jiangsu 17. 江西 Jiangxi 18. 辽宁 Liaoning 19. 内蒙古 Neimenggu 20. 宁夏 Ningxia 21. 青海 Qinghai 22. 山东 Shandong 23. 山西 Shanxi 24. 陕西 Shaanxi 25. 上海 Shanghai 26. 四川 Sichuan 27. 天津 Tianjin 28. 西藏 Xizang 29. 新疆 Xinjiang 30. 云南 Yunnan 31. 浙江 Zhejiang 32. 台湾 Taiwan

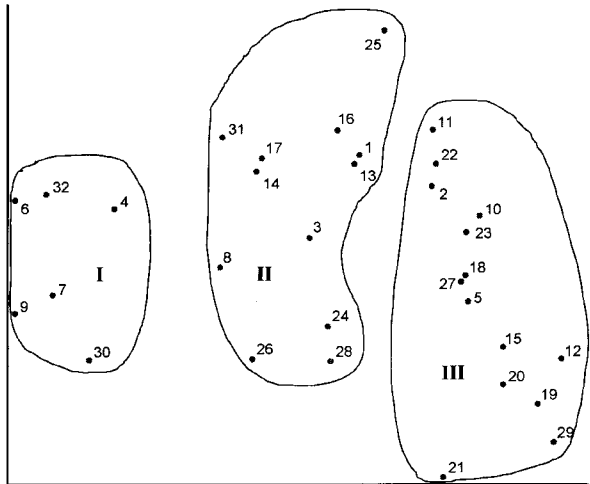


图 3 32 个省市在典范对应分析二维空间的排序图

Fig.3 Results of CCA ordination of 32 provinces

1 ~ 32 同图 2 See Fig. 2

学规律,即纬度低的地区物种数目较多(Rohde , 1992) 外来入侵植物的分布也同样符合这样的规律 2)外来入侵植物的物种数和经济发展存在一定

关系(Vila & Pujadas , 2001) ,由于我国经济发达的南部区域受到人类活动影响较大 ,有意或无意引入外来植物的频率较高 ,导致外来入侵植物物种数较高 (Jenkins , 1996 ; McKinney , 2001 ; Levine & D ' Antonio , 2003) 。 所以 ,在区域水平分析入侵植物的分布格局应该同时考虑环境因子及人类活动的共同影响 (Rose & Hermanutz , 2004) 。 同样 ,Alpert 等(2000)的综述显示了环境胁迫(例如水分和温度)和人类干扰(例如火灾和放牧)强度是决定生境可入侵性的重要因子 ,它们之间也可能相互作用影响植物入侵。

本研究中外来入侵植物物种数随着省面积增加呈现下降趋势 ,但是经统计检验并无显著相关。区域面积较大的中国西北部各省 ,由于经济发达程度较低 ,交通密度较低 ,环境条件相对恶劣 ,所以外来入侵植物入侵该区域的可能性降低 ,导致其物种数较少(图 1) 。 由此可见 ,决定外来入侵植物物种数更重要的因子可能是气候特性及人类活动的强度 ,其作用远大于区域面积对外来入侵植物物种数的影响。 同样 ,McKinney (2001)和 Weber(1997)在美国及

表 2 中国各省外来入侵植物物种数和密度与环境因子及人类活动因子的关系

	<i>NIS</i>	<i>ID</i>	<i>PAR</i>	<i>LTD</i>	<i>LGD</i>	<i>MT1</i>	<i>MT7</i>	<i>APP</i>	<i>FFD</i>	<i>PLD</i>	<i>TPD</i>	<i>GDP</i>	<i>VIC</i>	<i>NFT</i>	<i>ANR</i>	<i>PAP</i>
<i>NIS</i>	1.00															
<i>ID</i>	–	1.00														
<i>PAR</i>	– 0.34 ^{ns}	–	1.00													
<i>LTD</i>	– 0.86 ^{***}	– 0.19 ^{ns}	–	1.00												
<i>LGD</i>	0.13 ^{ns}	0.30 ^{ns}	–	0.14 ^{ns}	1.00											
<i>MT1</i>	0.82 ^{***}	0.32 ^{ns}	–	– 0.87 ^{***}	0.17 ^{ns}	1.00										
<i>MT7</i>	0.45 [*]	0.30 ^{ns}	–	– 0.34 ^{ns}	– 0.49 ^{**}	0.55 ^{**}	1.00									
<i>APP</i>	0.85 ^{***}	0.22 ^{ns}	–	– 0.87 ^{***}	0.14 ^{ns}	0.81 ^{***}	0.37 [*]	1.00								
<i>FFD</i>	0.87 ^{***}	0.63 ^{***}	–	– 0.83 ^{***}	0.12	0.86 ^{***}	0.64 ^{***}	0.74 ^{***}	1.00							
<i>PLD</i>	0.10 ^{ns}	0.91 ^{***}	–	– 0.09 ^{ns}	0.40 [*]	0.25 ^{ns}	0.41 [*]	0.14 ^{ns}	0.34	1.00						
<i>TPD</i>	0.39 [*]	0.82 ^{***}	–	– 0.29 ^{ns}	0.54 ^{**}	0.53 ^{**}	0.60 ^{***}	0.37 [*]	0.44 [*]	0.85 ^{***}	1.00					
<i>GDP</i>	0.41 [*]	0.22 ^{ns}	– 0.28 ^{ns}	– 0.28 ^{ns}	0.37 [*]	0.37 [*]	0.32 ^{ns}	0.41 [*]	0.42 [*]	0.26 ^{ns}	0.46 ^{**}	1.00				
<i>VIC</i>	0.42 [*]	0.37 [*]	– 0.30 ^{ns}	– 0.29 ^{ns}	0.28 ^{ns}	0.40 [*]	0.23 ^{ns}	0.38 [*]	0.36 [*]	0.32 ^{ns}	0.53 ^{**}	0.88 ^{***}	1.00			
<i>NFT</i>	0.50 ^{**}	0.16 ^{ns}	– 0.16 ^{ns}	– 0.32 ^{ns}	0.18 ^{ns}	0.36 [*]	0.25 ^{ns}	0.30 ^{ns}	0.50 ^{**}	0.20 ^{ns}	0.38 [*]	0.41 [*]	0.62 ^{***}	1.00		
<i>ANR</i>	– 0.28 ^{ns}	– 0.21 ^{ns}	0.83 ^{***}	0.13 ^{ns}	– 0.70 ^{***}	– 0.43 [*]	– 0.76 ^{***}	– 0.15 ^{ns}	– 0.27	– 0.32 ^{ns}	– 0.51 ^{**}	– 0.26 ^{ns}	– 0.15 ^{ns}	– 0.12 ^{ns}	1.00	
<i>PAP</i>	– 0.29 ^{ns}	– 0.03 ^{ns}	–	0.14 ^{ns}	– 0.52 ^{**}	– 0.31 ^{ns}	– 0.78 ^{***}	– 0.15 ^{ns}	– 0.23	– 0.15 ^{ns}	– 0.35 ^{ns}	– 0.12 ^{ns}	0.00 ^{ns}	– 0.15 ^{ns}	–	1.00

显著性检验结果 Significance test ^{ns}: $p > 0.05$ ^{*}: $p < 0.05$ ^{**}: $p < 0.01$ ^{***}: $p < 0.001$
NIS: 外来入侵植物物种数 Number of invasive alien plant species *ID*: 外来入侵植物物种密度 Density of invasive alien plants *PAR*, *LTD*, *LGD*, *MT1*, *MT7*, *APP*, *FFD*, *PLD*, *TPD*, *GDP*, *VIC*, *NFT*, *PCA*, *PCR*: 同表 1 See Table 1

表 3 外来入侵植物物种数和环境因子及人类活动因子的逐步回归分析结果

	回归系数 Regression coefficient	标准化系数 Standardized coefficient	<i>F</i> 值 <i>F</i> -value	显著性水平 Significance	累积解释方差 Accumulative variance explained (%)
所有的变量 All variables $r = 0.96$, $p < 0.001$					
截距 Intercept	18.53			$p < 0.01$	
无霜期 <i>FFD</i>	0.064	0.28	95.37	$p < 0.001$	91.1
年降雨量 <i>APP</i>	0.002	0.06	18.02	$p < 0.001$	85.2
外来游客人数 <i>NFT</i>	3.590	0.27	6.79	$p < 0.05$	88.1
人口密度 <i>PLD</i>	– 0.479	– 0.26	7.12	$p < 0.05$	90.6
纬度 <i>LTD</i>	– 1.440	– 0.58	4.44	$p < 0.05$	91.2

FFD, *APP*, *NFT*, *PLD*, *LTD*: 同表 1 See Table 1

表 4 外来入侵植物物种密度和环境因子及人类活动因子的逐步回归

	回归系数 Regression coefficient	标准化系数 Standardized coefficient	<i>F</i> 值 <i>F</i> -value	显著性水平 Significance	累积解释方差 Accumulated variance explained (%)
所有的变量 All variables $r = 0.98$, $p < 0.001$					
截距 Intercept	– 4.420			$p < 0.05$	
交通密度 <i>TPD</i>	0.000	0.200	123.18	$p < 0.001$	80.41
1 月平均气温 <i>MT1</i>	0.057	0.398	20.59	$p < 0.001$	88.55
外来游客人数 <i>NFT</i>	– 0.320	– 0.286	7.50	$p < 0.05$	90.97
经度 <i>LGD</i>	0.004	0.027	5.00	$p < 0.05$	92.39
年度生产总值 <i>GDP</i>	– 0.600	– 0.447	1.83	$p < 0.05$	94.49
进口货物总额 <i>VIC</i>	0.390	0.455	3.25	$p < 0.05$	96.00

TPD, *MT1*, *NFT*, *LGD*, *GDP*, *VIC*: 同表 1 See Table 1

欧洲 的类似研究中均未发现外来植物物种数和面积有显著的相关关系。

外来入侵植物的物种数和密度是两个不同的衡量指标。前者表示固定空间单位内(各省)入侵物种的多少,对于中国今后的入侵种管理有重要意义,而

后者表示单位面积入侵物种的多少,用该指标预测的结果可以推广到世界其它各国。多元线性回归模型的结果显示预测中国各省外来入侵植物物种数的最有效因子是无霜期(表 3)。气候是决定物种数量的重要因子,一般而言,热带生态系统比温带生态系

统包含更多的物种(Rohde , 1992) ,对于外来入侵植物亦是如此。所以中国南部各省必然包含更多的外来入侵植物种。而预测外来入侵植物物种密度的最有效因子是交通密度(表 4)。目前已有大量研究表明入侵种的分布和交通的关系密切(Tyser & Worley , 1992 ; McKinney , 2001 ; Gelbard & Belnap , 2003)。这种关系可以从两方面进行解释 : 1) 交通道路的生态学效应在于其造成生境破碎化并导致生境扰动(Spellerberg , 1998) , 所形成的空生态位为外来植物的入侵创造了机会(Trombulak & Frissell , 2000) , 对于自然生态系统具有极大的威胁 ; 2) 因为交通道路是外来物种传播的重要途径之一 , 频繁的交通运输增加了植物种子或其它类型的繁殖体扩散的机会(Hourdequin , 2000 ; Trombulak & Frissell , 2000)。所以 , 人类活动强度较高的省份 , 通常具有较高的交通

密度 , 其外来入侵植物物种密度也较高。

中国各省外来入侵植物物种组成格局主要受到纬度的影响 , 这说明在决定大尺度(即区域尺度) 入侵物种组成格局的所有因子中 , 纬度起了决定性的作用(图 4)。除了纬度之外 , 入侵植物也受到其所在省份其它环境因子及交通密度和人口密度的影响 , 但是作用相对较小。纬度变异作为反映各种环境因子的综合梯度 , 它的变化直接导致其它环境因子的变异 , 因此在分析入侵植物物种组成格局与其它因子的关系时 , 如果将纬度作为环境因子之一参与分析 , 就会因纬度这一主导因子的存在 , 而弱化其它因子的影响程度。因此当从区域尺度上分析外来入侵植物的组成格局时 , 主导因子显然是纬度梯度 ; 而在较小的尺度上进行分析时 , 其它因子 , 如人口密度、交通密度等 , 才可能显示出各自的影响。

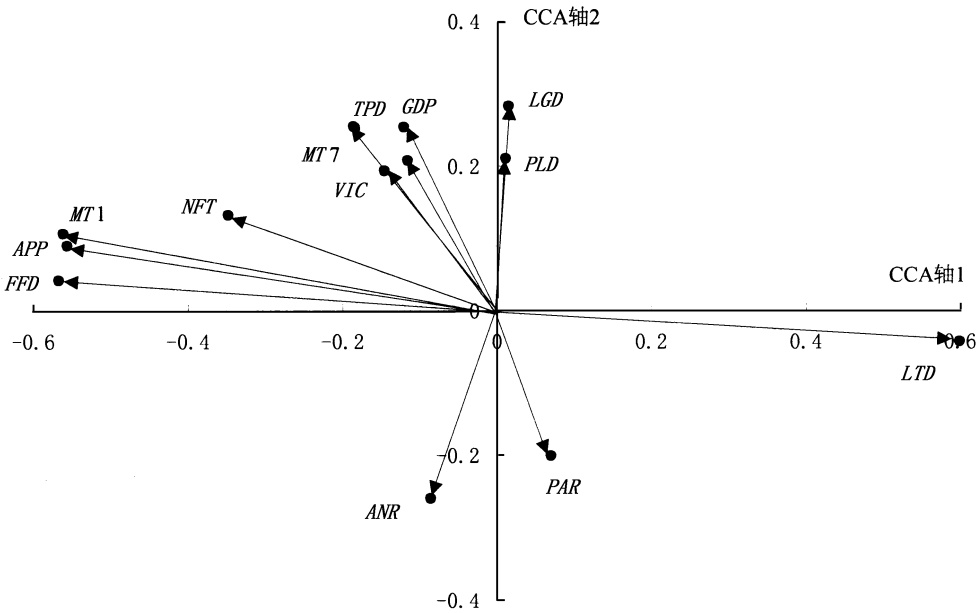


图 4 中国各省环境和人类活动因子在典范对应分析(CCA)二维轴上的排序图

Fig. 4 CCA ordination for environmental and anthropological factors

PAR , LTD , LGA , MT1 , MT7 , APP , FFD , PLD , TPD , GDP , VIC , NFT , PCA 同表 1 See Table 1

4 对入侵种管理的意义

1) 决定中国各省外来入侵植物物种数的关键因子为无霜期 , 其次是年降雨量。这暗示无霜期长、年降雨量丰富的地区 , 其外来入侵植物物种数较多 , 即中国东南部各省(低纬度地区及沿海区域) 不仅现在是外来入侵植物的重灾区 , 以后还将有接受更多入侵物种的潜在可能 , 所以应该受到政府决策部门

的重视 , 且应积极采取措施以降低新外来入侵植物成功入侵的可能性。

2) 决定中国各省外来入侵植物物种密度的关键因子为交通密度 , 其次是 1 月平均温度。这暗示政府管理部门在不断加强交通道路建设的同时 , 也应考虑到交通道路对生态系统的影响以及由此而可能导致的植物入侵。

3) 决定中国各省外来入侵植物物种组成的主

要因子是纬度。当研究其它因子对入侵植物组成格局的影响时,则需要缩小研究的空间尺度。

4) 本研究基于行政管理划分的省级空间单位,由于中国各省面积不同,省内地形复杂、气候变异大,采用均值难以反映环境因子的自然变异,所以我们建议以后的研究可以采用其它方式划分空间单位,如气候区等。从新的角度分析问题可以为揭示生物入侵规律提供新的思路。

参 考 文 献

- Alpert P, Bone E, Holzapfel C (2000). Invasiveness, invisibility and the role of environmental stress in the spread of non-native plants. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 3, 52 – 66.
- Christian CE (2001). Consequences of a biological invasion reveal the importance of mutualism for plant communities. *Nature*, 413, 635 – 639.
- Dark SJ (2004). The biogeography of invasive alien plants in California: an application of GIS and spatial regression analysis. *Diversity and Distributions*, 10, 1 – 9.
- Ehrenfeld JG (2003). Effects of exotic plant invasions on soil nutrient cycling processes. *Ecosystems*, 6, 503 – 523.
- Ehrenfeld JG, Kourtev P, Huang WZ (2001). Changes in soil functions following invasions of exotic understory plants in deciduous forests. *Ecological Applications*, 11, 1287 – 1300.
- Elton CS (1958). *The Ecology of Invasions by Animals and Plants*. Methuen, London.
- Fan XH (范晓虹), Li WM (李尉民) (2001). Research on quarantine strategy for biosafety protection in China. *Biodiversity Science* (生物多样性), 9, 439 – 445. (in Chinese with English abstract)
- Gelbard JL, Belnap J (2003). Roads as conduits for exotic plant invasions in a semiarid landscape. *Conservation Biology*, 17, 420 – 432.
- Gido KB, Schaefer JF, Pigg J (2004). Patterns of fish invasions in the Great Plains of North America. *Biological Conservation*, 118, 121 – 131.
- Higgins SI, Richardson DM, Cowling RM, Trinder-Smith TH (1999). Predicting the landscape-scale distribution of alien plants and their threat to plant diversity. *Conservation Biology*, 13, 303 – 313.
- Hobbs RJ, Huenneke JF (1992). Disturbance, diversity and invasion: implications for conservation. *Conservation Biology*, 6, 324 – 337.
- Hodkinson DJ, Thompson K (1997). Plant dispersal: the role of man. *Journal of Applied Ecology*, 34, 1484 – 1496.
- Hourdequin M (2000). Special section: ecological effects of roads-introduction. *Conservation Biology*, 14, 16 – 17.
- Jenkins PT (1996). Free trade and exotic species introductions. *Conservation Biology*, 10, 300 – 302.
- Levine JM, D'Antonio CM (2003). Forecasting biological invasions with increasing international trade. *Conservation Biology*, 17, 322 – 326.
- Li ZY (李振宇), Xie Y (谢焱) (2002). *Invasive Alien Species in China* (中国外来入侵种). China Forestry Publishing House, Beijing. (in Chinese)
- Lodge DM (1993). Biological invasions – lessons for ecology. *Trends in Ecology & Evolution*, 8, 133 – 137.
- Lonsdale WM, Lane AM (1994). Tourist vehicles as vectors of weed seeds in Kakadu National Park, Northern Australia. *Biological Conservation*, 69, 277 – 283.
- Ludsin SA, Wolfe AD (2001). Biological invasion theory: Darwin's contributions from *The Origin of Species*. *BioScience*, 51, 780 – 789.
- Lyons KG, Schwartz MW (2001). Rare species loss alters ecosystem function-invasion resistance. *Ecology Letters*, 4, 358 – 365.
- Mack MC, D'Antonio CM (1998). Impacts of biological invasions on disturbance regimes. *Trends in Ecology & Evolution*, 13, 195 – 198.
- McKinney CL (2001). Effects of human population, area, and time on non-native plant and fish diversity in the United States. *Biological Conservation*, 100, 243 – 252.
- Mooney HA, Hobbs RJ (2000). *Invasive Species in a Changing World*. Island Press, Washington, DC.
- Pimentel D, Lach L, Zuniga R, Morrison D (2000). Environmental and economic costs of nonindigenous species in the United States. *BioScience*, 50, 53 – 65.
- Pimentel D, McNair S, Janecka J, Wightman J, Simmonds C, O'Connell C, Wong E, Russel L, Zern J, Aquino T, Tsomondo T (2001). Economic and environmental threats of alien plant, animal, and microbe invasions. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 84, 1 – 20.
- Rohde K (1992). Latitudinal gradients in species-diversity: the search for the primary cause. *Oikos*, 65, 514 – 527.
- Rose M, Hermanutz L (2004). Are boreal ecosystems susceptible to alien plant invasion? Evidence from protected areas. *Oecologia*, 139, 467 – 477.
- Rouget M, Richardson DM, Nel JL, Le Maitre DC, Ego B, Mgid T (2004). Mapping the potential ranges of major plant invaders in South Africa, Lesotho and Swaziland using climatic suitability. *Diversity and Distributions*, 10, 475 – 484.
- Ruiz GM, Carlton JT (2003). *Invasive Species: Vectors and Management Strategies*. Island Press, Washington.
- SEPAC (国家环境保护总局自然生态保护司) (2002). *Nature Reserves in China* (全国自然保护区名录). Chinese Environmental Science Press, Beijing. (in Chinese)
- Smith MD, Knapp AK (1999). Exotic plant species in a C₄-dominated grassland: invasibility, disturbance and community structure. *Oecologia*, 120, 605 – 612.
- Spellerberg IF (1998). Ecological effects of roads and traffic: a literature review. *Global Ecology and Biogeography*, 7, 317 –

333.

ter Braak CJF (1986). Canonical correspondence analysis: a new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis. *Ecology*, 67, 1167 – 1179.

Trombulak SC, Frissell CA (2000). Review of ecological effects of roads on terrestrial and aquatic communities. *Conservation Biology*, 14, 18 – 30.

Tyser RW, Worley CA (1992). Alien flora in grasslands adjacent to road and trail corridors in Glacier National-Park, Montana (USA). *Conservation Biology*, 6, 253 – 262.

Vila M, Pujadas J (2001). Land-use and socio-economic correlates of plant invasions in European and North African countries. *Biological Conservation*, 100, 397 – 401.

Vitousek PM, D'Antonio CM, Loope LL, Rejmanek M, Westbrooks R (1997). Introduced species: a significant component of human-caused global change. *New Zealand Journal of Ecology*, 21, 1 – 16.

Weber E (2001). Current and potential ranges of three exotic goldenrods (*Solidago*) in Europe. *Conservation Biology*, 15, 122 – 128.

Weber EF (1997). The alien flora of Europe: a taxonomic and biogeographic review. *Journal of Vegetation Science*, 8, 565 – 572.

Wilcove DS, Rothstein D, Dubow J, Phillips A, Losos E (1998). Quantifying threats to imperiled species in the United States. *BioScience*, 48, 607 – 615.

Williamson M (1996). *Biological Invasions*. Chapman and Hall, London.

Xie Y, Li ZY, Gregg WP, Li DM (2001). Invasive species in China-an overview. *Biodiversity and Conservation*, 10, 1317 – 1341.

Zhu DR (朱大仁) (2000). *Atlas of China (分省中国地图集)*. China Map Press, Beijing. (in Chinese)

责任编辑: 张大勇 责任编辑: 张丽赫