

DOI: 10.5846/stxb202107282055

赵彩云, 柳晓燕, 李飞飞, 朱金方, 郭朝丹, 李俊生. 我国国家级自然保护区主要外来入侵植物分布格局及成因. 生态学报, 2022, 42(7): 2532-2541.
Zhao C Y, Liu X Y, Li F F, Zhu J F, Guo C D, Li J S. The distribution pattern and determinant factors of the main invasive alien plants in national nature reserves in China. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(7): 2532-2541.

我国国家级自然保护区主要外来入侵植物分布格局及成因

赵彩云¹, 柳晓燕¹, 李飞飞¹, 朱金方¹, 郭朝丹^{1,2}, 李俊生^{1,*}

¹ 中国环境科学研究院, 北京 100012

² 兰州大学生命科学学院, 兰州 730000

摘要:自然保护区在生物多样性保护中起着关键作用,然而也面临外来物种入侵等诸多压力。基于 72 个已调查国家级自然保护区外来入侵植物数据,重点分析生态环境部发布的四批外来入侵物种名单中已有分布的 35 种外来入侵植物分布格局及其影响因素。研究发现 72 个国家级自然保护区平均记录有 (7.78 ± 0.47) 种外来入侵植物,MaxEnt 模型预测结果表明 98.69% 的国家级自然保护区面临外来植物入侵风险。低纬度地区 (8.07 ± 0.73) 和中纬度地区 (9.64 ± 0.56) 国家级自然保护区外来入侵植物数量显著高于高纬度地区 (4.53 ± 0.88) ,且不同类型国家级自然保护区外来入侵植物差异不显著。温度和降雨量是影响外来入侵植物在自然保护区分布的关键因素,且影响不同生活型外来入侵植物分布格局的关键因素不同;温度对一年生草本、藤本和灌木的分布解释量极为显著,保护区建立时间、温度、降雨量和海拔共同影响多年生草本植物在国家级自然保护区的分布。研究结果表明国家级自然保护区外来入侵植物调查与监测还存在很大的空白,未来需要进一步加强自然保护区外来入侵植物研究,并提升外来入侵植物的监管能力。

关键词:国家级自然保护区;外来入侵物种名单;外来入侵植物;分布格局

The distribution pattern and determinant factors of the main invasive alien plants in national nature reserves in China

ZHAO Caiyun¹, LIU Xiaoyan¹, LI Feifei¹, ZHU Jinfang¹, GUO Chaodan^{1,2}, LI Junsheng^{1,*}

¹ Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

² School of Life Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

Abstract: Nature reserves play a key role in biodiversity conservation. However, they confront numerous pressures including the invasion of alien species. The understanding of distribution pattern of invasive alien species in Nature reserves has been limited by inadequacy of distribution data. Here, we compiled distribution data of 72 national nature reserves in China for 35 invasive alien plants (IAPs), which issued by Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. The distribution pattern and potential distribution pattern of 35 IAPs were explored, then related the species patterns with environmental and human activity factors. The results indicated that: 1) 7.78 ± 0.47 IAPs were recorded in 72 national nature reserves, moreover, 98.69% of national nature reserves in China all were faced with the invasion of IAPs based on prediction of MaxEnt model. 2) The largest number of IAPs was observed in national nature reserves located in low latitude region (8.07 ± 0.73) and mid-latitude region (9.64 ± 0.56) , which distinguished more than those in high latitude regions. No difference of IAPs richness was found among the types of national nature reserves. 3) Analysis of CCA

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0506200);生态环境部生物多样性调查评估项目(2019HJ2096001006)

收稿日期:2021-07-28; **网络出版日期:**2021-12-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lijsh@craes.org.cn

(canonical correspondence analysis) showed that temperature and precipitation jointly dominated spatial patterns of IAPs in national nature reserves in China, whereas, human activities such as length of the road and population density in natural reserves showed little effect. Moreover, the main factors varied among different life forms of IAPs; temperature explained most of distribution of annual IAPs, vine and shrubs. On the other hand, temperature, precipitation, altitude and build time of protected areas were all related with the distribution of perennial IAPs. We concluded that a lack of investigation and monitoring data of IAPS limited the understanding the invasiveness of IAPs in nature reserves. In the future, in order to reveal the underlying invasion mechanism of IAPs and improve the effectiveness of management, more studies should be conducted in national nature reserves.

Key Words: National nature reserves; the lists of invasive alien species; invasive alien plants; distribution pattern

自然保护区是全球生物多样性保护的重要场所^[1],在维持自然生态系统功能方面发挥着巨大的作用^[2]。然而全球范围内增加的外来入侵物种^[3],也成为自然保护区的主要威胁因素之一^[4]。全球外来入侵物种项目报道世界上 106 个国家 487 个保护地受到外来入侵物种的影响^[5]。全球 894 种外来入侵动物的研究表明 520 种已经在自然保护区建立种群,基于生态位模型预测发现 95% 以上的保护区都具有适合这些外来动物建立种群的生境^[6]。更多研究关注自然保护区外来入侵植物分布,如环境科学问题委员会对全球自然保护区的 24 个案例分析结果发现 1874 种外来入侵维管植物,欧洲对 93 个自然保护区问卷调查发现平均每个自然保护区有 11 种以上的外来入侵植物^[7],中国已调查的 53 个自然保护区中发现外来入侵植物 176 种^[8]。然而,目前大多数调查研究主要是外来入侵植物分布种类、数量的描述,缺乏对自然保护区外来入侵植物潜在风险分布格局,以及区域性或者全球性自然保护区外来入侵植物分布格局研究。

外来入侵物种对保护区内外都会造成影响,但是由于自然保护区是全球生物多样性保护的关键区域,其对保护区的影响后果更为严重^[9],也需要付出巨大的人力、物力和财力进行管理^[10]。预防外来物种是最有效的管理方法^[11],分析自然保护区外来入侵物种空间分布格局并探讨其影响因素是预先防范的重要基础之一。国外已有研究表明保护区的道路和居民数量影响外来入侵植物的发生^[12],我国国家级自然保护区人类活动普遍存在,以农业用地和居民占绝对优势^[13]。人类活动为外来入侵植物进入自然保护区提供可能,并且增加外来入侵植物的繁殖体压力^[14]。此外保护区土地利用类型、气候等也会影响外来入侵植物分布,欧洲研究表明位于山区自然保护区外来入侵物种比较少,湿地自然保护区外来入侵物种比较多^[15]。我国已有研究表明气候因素是影响中国归化植物^[16-17]和入侵植物^[18]在省级尺度的分布的主要因素之一,然而气候因素是否影响外来入侵植物在不同自然保护区的分布还知之甚少。自然保护区与其它区域不同,拥有丰富的生物多样性,相对较少的人类活动,其分布格局与影响因素可能与保护区外大相径庭。然而由于自然保护区数据不足,还未有研究分析我国自然保护区外来入侵植物分布格局。

近年来我国自然保护区外来入侵植物调查工作逐步受到重视,如生态环境部为推动自然生态系统外来入侵物种管理,联合中科院发布四批外来入侵物种名单,共计 71 种,包括 40 种外来入侵植物和 31 种外来入侵动物,并组织开展西南地区国家级自然保护区调查工作,获取了自然保护区外来入侵植物分布数据。且国内自然保护区调查数据和文章陆续发表^[19-22],为探讨我国自然保护区外来入侵植物分布格局提供了可能。本文结合自然保护区多年野外调查数据和文献资料数据,以生态环境部发布并已记录分布数据的 35 种外来入侵植物为研究对象,分析了 72 个国家级自然保护区主要外来入侵植物分布格局以及造成不同自然保护区外来入侵植物分布差异的影响因素,并运用 MaxEnt 模型预测 35 种主要外来入侵植物在国家级自然保护区的潜在分布,旨在探讨:1) 外来入侵植物在我国国家级自然保护区的分布及潜在分布格局;2) 影响自然保护区外来入侵植物分布格局驱动因素。

1 材料与方法

1.1 外来入侵植物筛选和分布数据

生态环境部联合中科院发布了四批外来入侵物种名单,旨在推动自然生态系统外来入侵物种的管理,共计 71 个物种,包括 40 种外来入侵植物和 31 种外来入侵动物。

基于公开发表的参考文献以及实地调查结果的数据收集整理国家级自然保护区外来入侵植物数据,并从中提取列入生态环境部四批名单中的外来入侵植物数据。

1) 参考文献:在“中国知网”(http://cnki.net/)中以“外来”、“物种”和“国家级自然保护区”为关键词进行文献搜索,筛选出符合国家级自然保护区外来入侵物种的相关文献和研究论文 27 篇;同时参考图书《沿海地区自然保护区外来入侵物种调查与研究》^[23]。

2) 实地调查:此部分数据来自本研究组的实地调查结果,涉及云南哀牢山、大围山、金平分水岭、纳板河流域、无量山、西双版纳、轿子山、元江、贵州习水、赤水桫欏、麻阳河、梵净山、广西山口红树林、雅长兰科、元宝山、猫儿山、九万山、十万山、大明山、岑王老山、北仑河口、恩城、弄岗、金花茶国家级自然保护区的外来入侵物种数据。

通过仔细核对每个物种的分布信息和分类学信息的准确性,确定了已有分布记录的 35 种外来入侵植物(表 1)及其在 72 个国家级自然保护区的分布状况。将外来入侵植物按照生活型分为一年生草本植物、多年生草本植物和其他类群(包括藤本和灌木)。所有外来入侵植物丰富度和不同生活型的外来入侵植物丰富度通过统计每个自然保护区已经建立种群的外来入侵植物数量获得。

表 1 中国国家级自然保护区主要外来入侵植物名单
Table 1 The list of alien invasive plants in national nature reserves in China

物种 Species	生活型 Life form	原产地 Origin
垂序商陆 <i>Phytolacca americana</i>	多年生草本	北美
刺苋 <i>Amaranthus spinosus</i>	一年生草本	热带美洲
大狼把草 <i>Bidens frondosa</i>	一年生草本	北美洲
大藻 <i>Pistia stratiotes</i>	多年生草本	南美洲
毒麦 <i>Lolium temulentu</i>	一年生草本	欧洲地中海地区
反枝苋 <i>Amaranthus retroflexus</i>	一年生草本	美洲
飞机草 <i>Eupatorium odoratum</i>	多年生草本	中美洲
凤眼莲 <i>Eichhornia crassipes</i>	多年生草本	南美洲
光荚含羞草 <i>Mimosa bimucronata</i>	灌木	热带美洲
互花米草 <i>Spartina alterniflora</i>	多年生草本	美国东南部
黄顶菊 <i>Flaveria bidentis</i>	一年生草本	南美
藿香蓟 <i>Ageratum conyzoides</i>	一年生草本	热带美洲
蒺藜草 <i>Cenchrus echinatus</i>	一年生草本	美洲的热带、亚热带地区
加拿大一枝黄花 <i>Solidago Canadensis.</i>	多年生草本	北美
假臭草 <i>Praxelis clematidea</i>	一年生草本	南美洲
假高粱 <i>Sorghum halepense</i>	多年生草本	地中海
喀西茄 <i>Solanum aculeatissimum</i>	多年生草本	南美洲
空心莲子草 <i>Alternanthera philoxeroides</i>	多年生草本	南美洲
落葵薯 <i>Anredera cordifolia</i>	藤本	南美热带和亚热带地区
马缨丹 <i>Lantana camara</i>	灌木	热带美洲
三裂叶豚草 <i>Ambrosia trifida</i>	一年生草本	北美洲
三叶鬼针草 <i>Bidens pilosa</i>	一年生草本	热带美洲
苏门白酒草 <i>Conyza bonariensis var. leiotheca</i>	一年生草本	南美洲

续表

物种 Species	生活型 Life form	原产地 Origin
土荆芥 <i>Chenopodium ambrosioides</i>	一年生草本	中、南美洲
豚草 <i>Ambrosia artemisiifolia</i>	一年生草本	北美洲
薇甘菊 <i>Mikania micrantha</i>	多年生草本或稍木质藤本	中美洲
五爪金龙 <i>Ipomoea cairica</i>	多年生草质藤本	热带美洲
小蓬草 <i>Conyza canadensis</i>	一年生草本	北美洲
野燕麦 <i>Avena fatua</i>	一年生草本	欧洲及地中海沿岸
一年蓬 <i>Erigeron annuus</i>	一年生草本	北美洲
银胶菊 <i>Parthenium hysterophorus</i>	一年生草本	美国
圆叶牵牛 <i>Ipomoea purpurea</i>	一年生草本	南美洲
长芒苋 <i>Amaranthus palmeri</i>	一年生草本	美国西南部
紫茎泽兰 <i>Eupatorium Adenophorum</i>	多年生草本	中美洲
钻形紫菀 <i>Aster subulatus</i>	一年生草本	北美洲

1.2 已建立种群的自然保护区解释变量

环境因子和人类活动因子会潜在影响外来入侵植物在国家级自然保护区的建群,本文分析了国家级保护区建立时间、保护区面积、保护区道路长度、平均人口密度、平均海拔、最高海拔、年均降雨量、年均温、年积温、最冷月最低温和最热月最高温 11 个因子与保护区外来入侵植物丰富度之间的关系。保护区建立时间和保护区面积数据依据生态环境部发布的全国自然保护区名录。道路长度源于开源地图 (<https://www.openstreetmap.org/>)。人口密度、年均降雨量源于资源环境科学与数据中心 (<http://www.resdc.cn/>)。海拔数据源于 GTOPO (<http://edcftp.cr.usgs.gov/pub/data/gtopo30/global/>)。年均温、最冷月最低温和最热月最高温源于 WorldClim 2.1 (<http://www.worldclim.org/>)。年积温源于国家科技基础条件平台-国家地球系统科学数据中心 (<http://www.geodata.cn>)。运用 ArcGIS 的分区统计 (Zonal Statistics) 功能统计各因子在保护区内的参数范围 (最大值、最小值、平均值和标准差)。

1.3 自然保护区潜在外来入侵植物分布

为量化国家级自然保护区对已建立种群的外来入侵植物的生境适宜性,采用生态预测模型 MaxEnt 分析 35 个外来入侵植物潜在分布区。研究使用 19 个气候变量、3 个高程数据及衍生变量和 1 个土地利用类型数据,气候因子源于 WorldClim 2.1 (<http://www.worldclim.org/>),包括生物气候因子 (bio1—bio19),分辨率为 30arc-sec (1km×1km),数据年份为 1970—2000 年。海拔源于 GTOPO (<http://edcftp.cr.usgs.gov/pub/data/gtopo30/global/>),基于 GIS 技术衍生为坡度 (slope) 及坡向 (aspect)。土地利用类型数据来源于中国科学院数据共享服务系统 (<http://data.casearth.cn/>),数据年份为 2020 年。

基于多重共线性分析,对相关度绝对值高于 0.8 的环境变量进行筛选^[24]。筛选后环境变量和外来入侵植物地理分布数据导入 MaxEnt 3.4.1,随机选取 75% 的点建模,25% 的点验证模型,环境参数设置中选择刀切法 (Jackknife),分析结果以 Logistic 格式、ASCII 类型文件输出。基于受试者工作特征曲线与横坐标围成的面积 AUC 值评价模型预测结果精准度^[25]。选择 10% 训练数据集阈值把每个外来入侵植物潜在分布概率图转为二值图^[26],0 值代表该区域不适合外来入侵植物生存,1 值代表该区适宜外来入侵植物生存。基于 ArcGIS 栅格计算器 (Raster Calculator) 实现 35 种外来入侵植物二值图叠加。运用 ArcGIS 分区统计功能确定其在国家级自然保护区内的参数范围。

1.4 外来入侵植物分布格局影响因素的主成分分析

运用主成分分析 (canonical correspondence analysis, CCA) 检验不同保护区中外来入侵植物群落组成及其与环境因子的关系。运用 Canoco 4.5 软件分别对所有外来入侵植物、一年生外来入侵植物、多年生外来入侵植物和其他外来入侵植物的物种 (0,1) 数据与 10 个环境因子进行 CCA 分析,并输出外来入侵物种群落组成

排序图和影响因素的主成分分析图。外来入侵草本植物每个物种在每个环境因子直线上的投影表明此物种与该环境因子的关系。

1.5 其他数据分析

利用单因素方差分析对比不同地区和不同类型国家级自然保护区外来入侵植物丰富度之间的差异,利用 HSD 检验法对不同地区和不同类型国家级自然保护区的外来入侵植物丰富度进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 自然保护区已建群外来入侵植物及其潜在风险

研究结果发现已有 72 个国家级自然保护区已开展过外来入侵植物调查,生态环境部四批名单中 35 种外来入侵植物已在这些保护区定殖且平均丰富度为 (7.78 ± 0.47) (图 1)。MaxEnt 模型预测发现这些保护区外来入侵植物丰富度 (21.97 ± 0.70) 约是实际观测丰富度的 3 倍且差异显著 (t 检验, $P < 0.0001$)。其中小蓬草分布最广泛,在 56 个国家级自然保护区均有分布,占已调查保护区的 77.78%,其次为一年蓬,分布在 45 个国家级自然保护区,三叶鬼针草分布在 38 个国家级自然保护区;黄顶菊、蒺藜草和微甘菊分布较少,分别仅在 1 个国家级自然保护区记录。MaxEnt 模型预测分析结果显示 98.69% 国家级自然保护区 (共 458 个) 都面临不同程度的入侵风险,预测国家级自然保护区外来入侵植物预测丰富度为 (14.41 ± 0.42) (图 2),意味着这些外来入侵植物还有可能进一步在自然保护区扩散蔓延。

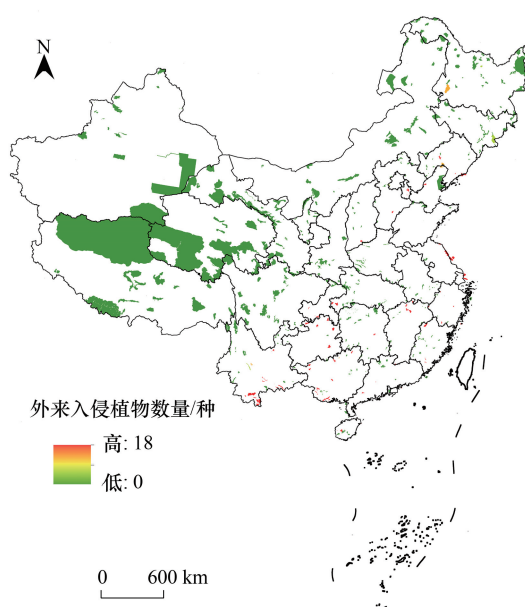


图 1 中国国家级自然保护区 35 种外来入侵植物分布图

Fig.1 The distribution pattern of 35 main invasive alien plants in national nature reserves

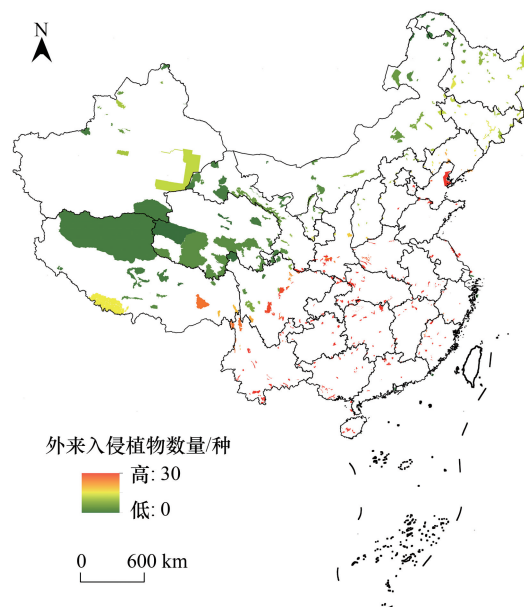


图 2 中国国家级自然保护区 35 种外来入侵植物潜在分布图

Fig.2 The potential distribution pattern of 35 main invasive alien plants in national nature reserves

生态环境部四批名单中 35 种外来入侵植物中包括一年生草本、多年生草本和藤本、乔木等类群,进一步分析发现一年生草本植物在自然保护区的入侵更为常见,平均每个自然保护区有 (5.43 ± 0.31) 种一年生草本;多年生草本植物入侵到 76.39% 的已调查国家级自然保护区内,平均每个自然保护区有 (1.83 ± 0.18) 种多年生草本;仅有 37.50% 国家级自然保护区有其他类群 (包括藤本和木本) 入侵,平均入侵植物数量为 (0.51 ± 0.09) 种。

2.2 自然保护区外来入侵植物空间格局及其变化

35 种外来入侵植物无论是已定殖分布格局(图 1)还是潜在分布格局(图 2)主要分布在中低纬度地区,其中云南纳板河国家级自然保护区外来入侵植物数量最多,记录有 18 种,其次为广西雅长兰科和河南鸡公山,各记录 15 种;北京百花山和成山头海滨地貌外来入侵植物最少,仅记录 1 种。按照吴晓雯等^[27]进一步将 72 个已调查的国家级自然保护区分为南部高纬度、中部中纬度区和北部高纬度区三个不同地区,分析不同区域外来入侵植物分布格局,单因素方差分析结果表明三个地区间的外来入侵植物差异显著($P < 0.001$),多重比较分析发现高纬度地区自然保护区外来入侵植物数量最少(4.53 ± 0.88),显著低于低纬度地区($P = 0.004$)和中纬度地区($P < 0.001$),而中纬度地区自然保护区外来入侵植物数量(9.64 ± 0.56)和低纬度地区自然保护区(8.07 ± 0.73)差异不显著($P = 0.236$)(图 3)。

中国自然保护区分类标准将自然保护区分为森林生态、野生动物、野生植物、内陆湿地、地质遗迹、海洋海岸、古生物遗迹、草原草甸、荒漠生态 9 种类型,72 个已调查外来入侵的国家级自然保护区可归为森林生态、海洋海岸、野生动物、野生植物、内陆湿地和地质遗迹 6 种类型,其中仅成山头海滨地貌国家级自然保护区属于地质遗迹类,也仅分布 1 种入侵植物,对比分析其他 5 种类型的国家级自然保护区发现外来入侵植物丰富度差异不显著($P = 0.241$)(图 3)。

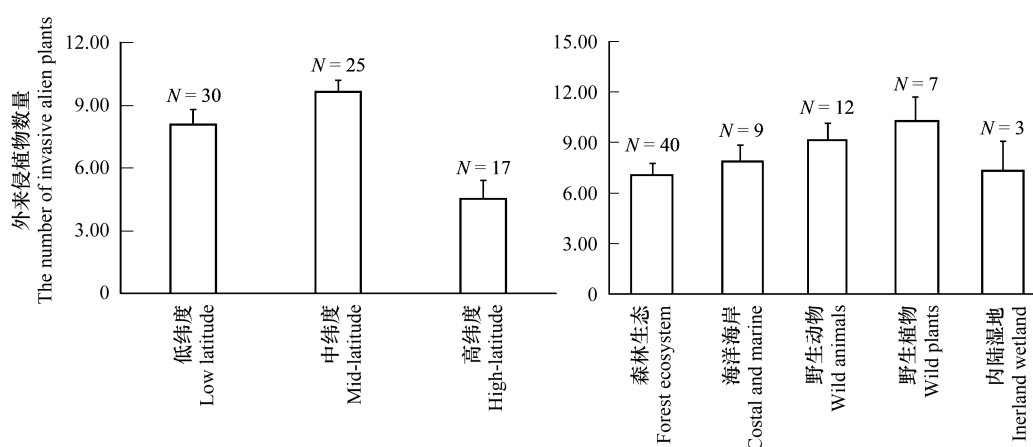


图 3 不同纬度地区和不同保护区类型外来入侵植物丰富度的分布差异分析

Fig.3 The difference of 35 alien invasive species in different region or different kinds of nature reserves

N 代表不同纬度地区/不同类型自然保护区的数量

2.3 自然保护区外来入侵植物分布格局驱动力分析

基于 CCA 分析环境因子变量(最冷月最低温、最热月最高温、年均降雨量、年均温、年积温、保护区平均海拔、最高海拔)和人类活动因子(保护区建立时间、保护区内道路长度、保护区内人口密度、保护区面积)对外来入侵植物分布格局的影响,结果表明最冷月最低温($F = 6.33, P = 0.001$)、平均海拔($F = 3.81, P = 0.001$)、最热月最高温($F = 2.65, P = 0.001$)、年均降雨($F = 1.63, P = 0.025$)和年均温($F = 2.38, P = 0.003$)是影响所有外来入侵植物分布格局的关键因素,轴一和轴二共同解释了 52.5%(图 4)。影响不同生活型的外来入侵植物分布格局的关键因素不同,温度是解释一年生草本的关键环境因子,其中最冷月最低温($F = 7.04, P = 0.001$)、年均温($F = 2.76, P = 0.001$)和最热月最高温($F = 2.83, P = 0.001$)对一年生草本在自然保护区分布影响显著,轴一和轴二共同解释 39.3%。温度、降雨、海拔和保护区建立时间共同影响多年生草本分布,其中平均海拔($F = 7.33, P = 0.001$)、年均温($F = 7.54, P = 0.001$),年均降雨($F = 2.68, P = 0.003$),最热月最高温($F = 2.65, P = 0.005$),最冷月最低温($F = 2.22, P = 0.023$)和保护区建立时间($F = 2.19, P = 0.028$)都是解释多年生草本的关键环境因子,轴一和轴二共同解释 84.2%;仅年均温($F = 4.13, P = 0.002$)对藤本、灌木等其他入侵植物分布格局影响显著,轴一和轴二共同解释 83.8%。

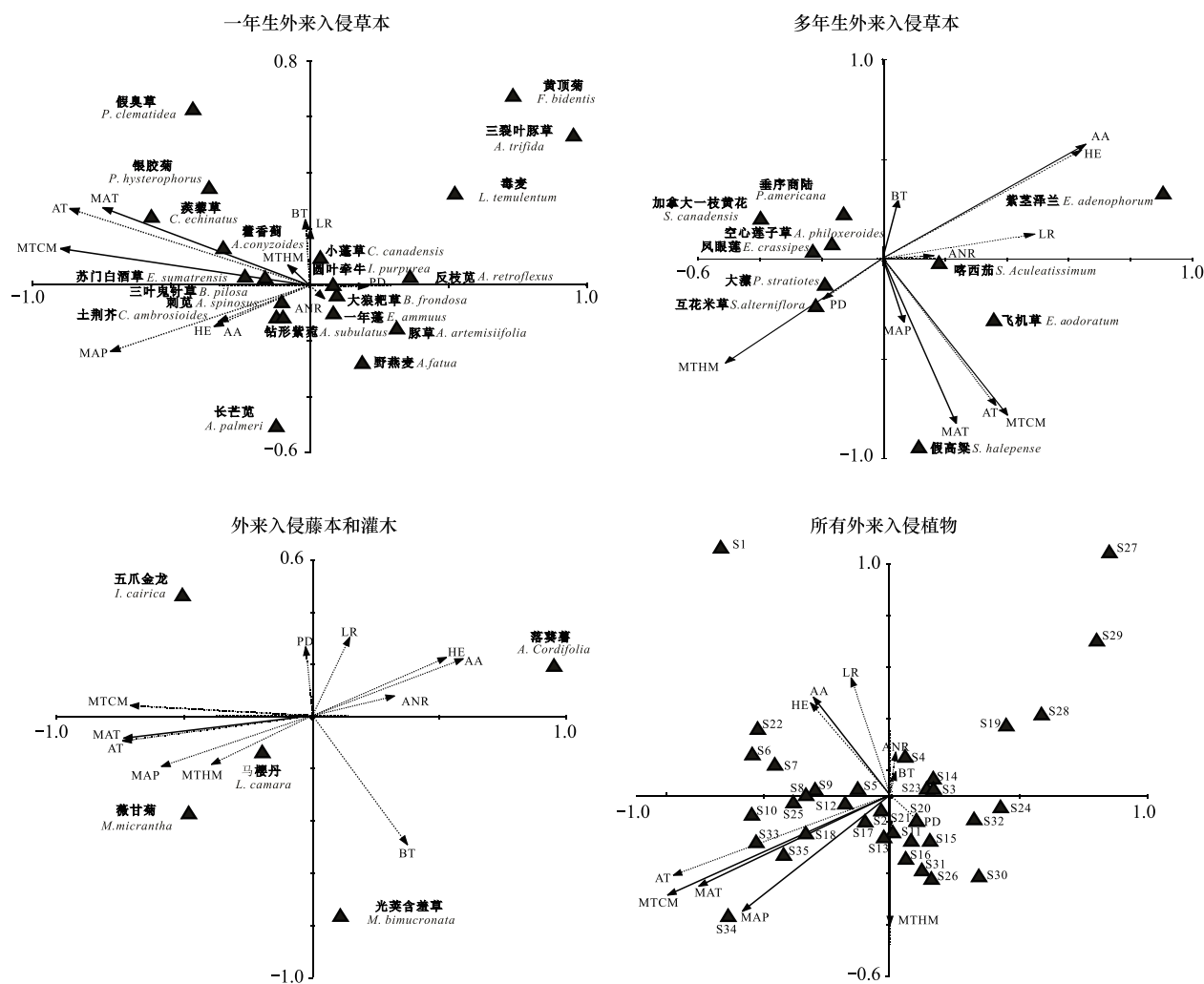


图4 外来入侵植物与环境因子的主成分分析

Fig.4 CCA analysis on the relationship between species density of different form invasive alien plants and environmental factors

其中线段表示环境因子: AA (Average altitude) 平均海拔, HE (The highest altitude) 最高海拔, LR (Length of the road in natural reserves) 保护区内道路长度, BT (Build time of natural reserves) 保护区建设时间, PD (population density) 人口密度, ANR (Area of natural reserves) 保护区面积, MTHM (maximum temperature of the hottest month) 最热月最高温, MAP (mean annual precipitation) 年均降雨量, MAT (mean temperature) 年均温, MTCM (Minimum temperature of the coldest month) 最冷月最低温, AT (Annual accumulated temperature) 年积温; 三角形表示物种, 图4D中各物种表示如下: S1 紫茎泽兰 *Eupatorium adenophorum*, S2 土荆芥 *Chenopodium ambrosioides*, S3 一年蓬 *Erigeron annuus*, S4 小蓬草 *Conyza canadensis*, S5 三叶鬼针草 *Bidens pilosa*, S6 飞机草 *Eupatorium odoratum*, S7 银胶菊 *Parthenium hysterophorus*, S8 藿香蓟 *Ageratum conyzoides*, S9 喀西茄 *Solanum aculeatissimum*, S10 五爪金龙 *Ipomoea cairica*, S11 空心莲子草 *Alternanthera philoxeroides*, S12 苏门白酒草 *Erigeron sumatrensis*, S13 刺苋 *Amaranthus spinosus*, S14 圆叶牵牛 *Ipomoea purpurea*, S15 风眼莲 *Eichhornia crassipes*, S16 大藻 *Pistia stratiotes*, S17 落葵薯 *Anredera cordifolia*, S18 马樱丹 *Lantana camara*, S19 反枝苋 *Amaranthus retroflexus*, S20 垂序商陆 *Phytolacca americana*, S21 钻形紫菀 *Aster subulatus*, S22 假臭草 *Praxelis clematidea*, S23 大狼把草 *Bidens frondosa*, S24 豚草 *Ambrosia artemisiifolia*, S25 光荚含羞草 *Mimosa bimucronata*, S26 互花米草 *Spartina alterniflora*, S27 三裂叶豚草 *Ambrosia trifida*, S28 毒麦 *Lolium temulentum*, S29 黄顶菊 *Flaveria bidentis*, S30 加拿大一枝黄花 *Solidago canadensis*, S31 长芒苋 *Amaranthus palmeri*, S32 野燕麦 *Avena fatua*, S33 假高粱 *Sorghum halepense*, S34 蒺藜草 *Cenchrus echinatus*, S35 薇甘菊 *Mikania micrantha*

3 讨论

基于生态环境部联合中科院发布的外来入侵物种名单, 本研究首次报道了 35 种主要外来入侵植物在国家级自然保护区的分布状况。不容乐观的是我国已调查国家级自然保护区都存在不同程度的外来植物入侵, 且我国中低纬度的国家级自然保护区外来入侵植物丰富度显著高于高纬度地区, 这之前我国外来入侵植物

分布格局沿着纬度梯度分布的结果相似^[18, 27-30]。这主要是由于 35 种外来入侵植物原产地主要分布与南美洲、热带美洲等地区(表 1),我国中低纬度与原产地气候条件相似,一旦传入更容易获得生存、蔓延和扩散的机会^[31]。其中,小蓬草、一年蓬、三叶鬼针草在一半以上的国家级自然保护区均有分布,这与王有兵等^[32]对自然保护区外来入侵植物统计发现的一半以上的入侵种都是一、二年生草本,且小蓬草、一年蓬和三叶鬼针草在自然保护区分布频率最高相吻合。与 Liu 等^[6]对全球自然保护区入侵动物发现的 90%未发现外来入侵动物不同,这主要是由于无论全球尺度还是在区域尺度外来植物入侵都比动物更为普遍。对 35 种主要外来入侵植物潜在入侵风险分析发现 98.69%国家级自然保护区都存在适合外来入侵植物的生境,其分布目前还远未达到饱和。人类活动干扰增加了外来入侵植物扩散风险^[17],已有研究表明农田和人工林林缘是自然保护区内外来入侵植物数量最多的区域^[21]。而我国国家级自然保护区人类活动普遍存在,且以农业用地和居民点占绝对优势^[13],这无疑增加了外来入侵植物扩散风险。

与以往对全国尺度的外来入侵植物分布影响因素结果相似,自然因素尤其年均温是影响外来入侵植物在国家级自然保护区分布格局的关键因素,这主要是由于与本地植物一样,外来入侵植物更倾向于分布在水热条件好的环境中^[33-34],对中国归化植物大尺度空间分布格局研究结果也表明气候是归化的主要筛选因素^[18, 33]。其次最冷月最低温和最热月最高温也是影响外来入侵植物分布的关键因素,该结论与对全国省级尺度^[27]和县域尺度^[34]外来入侵物种植物研究分布格局相似。

外来入侵植物的生活型不同其分布格局及影响因素也不同^[29],本研究发现最冷月最低温、最热月最高温和平均温是影响一年生草本植物的关键环境因子,这与张帅等^[35]和 Zhou 等^[18]研究结果相似。这主要是由于一年生草本具有繁殖能力强、繁殖方式多样的特点,在环境适宜的地区一旦有空生态位很容易成功定殖^[36]。与一年生草本不同,除温度外,海拔和降雨量两个环境因子也影响多年生外来入侵草本在自然保护区的分布格局。沿着海拔梯度外来入侵物种分布种类和数量都会有差异^[37],而且不同物种分布的海拔区间也不同^[19],如紫茎泽兰 *Eupatorium adenophorum* 可以分布到海拔 2450m 的高海拔地区,本文研究也发现其分布与海拔显著正相关(图 4),很多外来入侵植物不能适应高海拔的气候条件难以定殖,如喀西茄 *Solanum aculeatissimum* 主要分布在海拔 600—1000m 区域^[19]。

人类活动因子中本研究仅发现保护区建设时间影响多年生草本在自然保护区的分布,自然保护区面积、人口密度和道路长度在自然保护区外来入侵植物分布格局中并未发现有显著作用,这与以往研究认为导致我国外来入侵植物密度格局变化的主要因素是交通密度、人口密度、GDP^[18, 27-29]略有不同。这主要是由于本文研究区域主要在国家级自然保护区,自然保护区内的人口密度和交通密度与其他地区而言较低,以往研究也表明同一区域城市化地区的入侵种数比自然保护区多,风景名胜区比自然保护区多^[28],这进一步说明国家级自然保护区在一定程度上能够削弱由于人类活动导致的入侵植物的影响。虽然以往研究表明道路会便于外来入侵植物扩散^[38],但对于自然保护区而言道路对外来入侵植物入侵影响很低,且不同级别道路对入侵植物影响也不同^[39]。由于国家级自然保护区拥有丰富的本地物种多样性,具有较高的抵御能力,即使外来入侵植物沿着道路扩散到保护区内,没有合适的受干扰生境或者空生态位,外来入侵植物也很难定殖。另一方面,由于本文关注的外来入侵植物都是入侵风险高的物种,人类活动影响对这些物种影响相对较小,如 Zhou 等^[18]的研究结果表明对于入侵风险高的外来入侵植物其社会因素的影响低于环境因子的影响。

总之,已有调查的国家级自然保护区均有外来入侵植物分布,且大多数国家级自然保护区都面临外来植物入侵风险。保护区外来入侵植物分布格局呈随着纬度增加降低的趋势,其中气候因子尤其是温度是决定国家级自然保护区外来入侵植物分布的关键因素,人类活动对其影响较小,也表明保护区发挥着抵御外来植物入侵的作用。然而由于还有大量的国家级自然保护区还缺乏基础数据,对于全国所有国家级自然保护区外来入侵植物分布格局还有很多问题有待解决,比如保护区周边区域外来入侵物种是如何扩散进入自然保护区?全球气候变暖是否会促进外来入侵植物向高海拔扩散?外来入侵植物如何影响本地物种多样性?未来不仅需要进一步加强对自然保护区外来入侵植物的调查研究,还需要深入开展自然保护区外来植物入侵机制研究。

参考文献 (References):

- [1] Rodrigues A S L, Andelman S J, Bakarr M I, Boitani L, Brooks T M, Cowling R M, Fishpool L D C, da Fonseca G A B, Gaston K J, Hoffmann M, Long J S, Marquet P A, Pilgrim J D, Pressey R L, Schipper J, Sechrest W, Stuart S N, Underhill L G, Waller R W, Watts M E J, Xie Y. Effectiveness of the global protected area network in representing species diversity. *Nature*, 2004, 428: 640-643.
- [2] Watson J E M, Dudley N, Segan D B, Hockings M. The performance and potential of protected areas. *Nature*, 2014, 515: 67-73.
- [3] Seebens H, Blackburn T M, Dyer E E, Genovesi P, Hulme P E, Jeschke J M, Pagad S, Pysek P, van Kleunen M, Winter M, Ansong M, Arianoutsou M, Bacher S, Blasius B, Brockerhoff E G, Brundu G, Capinha C, Causton C E, Celesti-Grampow L, Dawson W, Dullinger S, Economo E P, Fuentes N, Guenard B, Jager H, Kartesz J, Kenis M, Kuhn I, Lenzner B, Liebhold A M, Mosena A, Nentwig W, Nishino M, Pearman D, Pergl J, Rabitsch W, Rojas-Sandoval J, Roques A, Rorke S, Rossinelli S, Roy H E, Scalera R, Schindler S, Stajerova K, Tokarska-Guzik B, Walker K, Ward D F, Yamanaka T Y, Essl F. Global rise in emerging alien species results from increased accessibility of new source pools. *PNAS*, 2018, 115: E2264-E2273.
- [4] Geldmann J, Joppa L N, Burgess N D. Mapping change in human pressure globally on land and within protected areas. *Conservation Biology*, 2014, 28: 1604-1616.
- [5] INVASIVE SPECIES SPECIALIST GROUP (ISSG). Invasive Alien Species and Protected Areas: A Scoping Report I [EB/OL]. 2016, http://www.issg.org/pdf/publications/GISP/Resources/IAS_ProtectedAreas_Scoping_I.pdf.
- [6] Liu X, Blackburn T M, Song T J, Wang X Y, Huang C, Li Y M. Animal invaders threaten protected areas worldwide. *Nature communications*, 2020, 11: 1-9.
- [7] Braun M, Schindler S, Essl F. Distribution and management of invasive alien plant species in protected areas in Central Europe. *Journal for Nature Conservation*, 2016, 33(2016): 48-57.
- [8] 宫璐, 李俊生, 柳晓燕, 赵相健, 赵彩云. 我国部分国家级自然保护区外来入侵物种的分布概况. *生态科学*, 2017, 36(4): 210-216.
- [9] Foxcroft L C, Pyšek P, Richardson D M, Genovesi P. *Plant Invasions in Protected Areas: Pattern, Problems and Challenges*. 2013. Dordrecht, The Netherlands: Springer Science Business Media.
- [10] Iacona G D, Price F D, Armsworth P R. Predicting the invadedness of protected areas. *Diversity and Distribution*, 2014, 20(4): 430-439.
- [11] Sitzia T, Campagnaro T, Kowarik I, Trentanovi G. Using forest management to control invasive alien species: helping implement the new European regulation on invasive alien species. *Biological Invasions*, 2016, 18(1): 1-7.
- [12] Nath A, Sinha A, Lahkar B P, Brahma N. In search of aliens: factors influencing the distribution of *Chromolaena odorata* L. and *Mikania micrantha* Kunth in the Terai grasslands of Manas National Park, India. *Ecological Engineering*, 2019, 131: 16-26.
- [13] 刘晓曼, 付卓, 闻瑞红, 靳川平, 王雪峰, 王超, 肖如林, 候鹏. 中国国家级自然保护区人类活动及变化特征. *地理研究*, 2020, 39(10): 2391-2402.
- [14] Eschtruth A, Battles A J. Acceleration of exotic plant invasion in a forested ecosystem by a generalist herbivore. *Conservation Biology*, 2008, 23(2): 388-399.
- [15] Braun M., Schindler S., Essl F. Distribution and management of invasive alien plant species in protected areas in Central Europe. *Journal for Nature Conservation*, 2016, 33: 48-57.
- [16] Wu S H, Sun H T, Teng Y C, Rejmanek M, Chaw S M, Yang T Y A, Hsieh C H. Patterns of plant invasions in China: Taxonomic, biogeographic, climatic approaches and anthropogenic effects. *Biological Invasion*, 2010, 12: 2179-2206.
- [17] Jiang H, Fan Q, Li J T, Shi S, Li S P, Liao W B, Shu W S. Naturalization of alien plants in China. *Biodiversity conservation*, 2011, 20: 1545-1556.
- [18] Zhou Q L, Wang Y C, Li X H, Liu Z M, Wu J, Musa A, Ma Q, Yu H B, Cui X, Wang L X. 2020. Geographical distribution and determining factors of different invasive ranks of alien species across China. *Science of the Total Environment*, 722: 1-8.
- [19] 高珂晓, 李飞飞, 柳晓燕, 熊韞琦, 李俊生, 赵彩云. 广西九万山国家级自然保护区外来入侵和本地草本植物多样性垂直分布格局. *生物多样性*, 2019, 27(10): 1047-1055.
- [20] 杨春玉, 梁有发, 李芳念. 贵州雷公山保护区外来入侵植物分布格局. *中国环境监测*, 2019, 35(2): 83-89.
- [21] 赵彩云, 李俊生, 刘峰. 云南省纳板河流域国家级自然保护区不同生境对外来入侵草本植物分布的影响. *植物保护学报*, 2019, 46(1): 114-121.
- [22] 周艳, 魏志琴, 张仁波, 邓坦. 罩子山自然保护区外来入侵植物的现状调查. *贵州农业科学*, 2019, 47(5): 36-42.
- [23] 王智, 蒋明康, 强胜, 秦卫华. 沿海地区自然保护区外来入侵物种调查与研究[M]. 北京: 中国环境出版社, 2014.
- [24] Yang X Q, Kushwaha S P S, Saran S, Xu J C, Roy P S. Maxent modeling for predicting the potential distribution of medicinal plant, *Justicia*

- adhatoda L. in Lesser Himalayan foothills. *Ecological Engineering*, 2013, 51: 83-87.
- [25] Swets J. A. Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science*, 1988, 240(4857): 1285-1293.
- [26] 柳晓燕, 赵彩云, 李飞飞, 朱金方, 高柯晓, 胡妍玢. 基于 MaxEnt 模型预测红火蚁在中国的适生区. *植物检疫*, 2019, 33(6): 70-76.
- [27] 吴晓雯, 罗晶, 陈家宽, 李博. 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. *植物生态学报*, 2006, 30(4): 576-584.
- [28] 许光耀, 李洪远, 莫训强, 孟伟庆. 中国归化植物组成特征及其时空分布格局分析. *植物生态学报*, 2019, 43(7): 601-610.
- [29] Chen C, Wang Q H, Wu J Y, Huang D, Zhang W H, Zhao N, Li X F, Wang L X. Historical introduction, geographical distribution, and biological characteristics of alien plants in China. *Biodiversity Conservation*, 2017, 1-10.
- [30] 罗文, 何澍然, 周平, 赵平, 陈军文. 云南昆明地区常见农田杂草种类组成与原产地研究. *杂草学报*, 2016, 34(1): 36-42.
- [31] Weber E, Sun SG, Li B. Invasive alien plants in China: diversity and ecological insights. *Biological Invasion*, 2008, 10:1411-1429.
- [32] 王有兵, 杨建军, 李子光, 徐丕聪. 我国自然保护区入侵植物种类概况. *杂草学报*, 2020, 38(3): 1-6.
- [33] Wang C, Liu J, Xiao H, Zhou J, Du D. Floristic characteristics of alien invasive seed plant species in China. *An. Acad. Bras. Cienc.* 2016, 88: 1791-1797.
- [34] Li Y Y, Shen Z H. Roles of Dispersal limit and environmental filtering in shaping the spatiotemporal patterns of invasive alien plant diversity in China. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2020, 8: 1-14.
- [35] 张帅, 郭水良, 管铭, 印丽萍, 张若轩. 我国入侵植物多样性的区域分异及其影响因素——以 74 个地区数据为基础. *生态学报*, 2010, 30(16): 4241-4256.
- [36] Fumanal B, Chauvel B, Sabatier A, Bretagnolle F. Variability and cryptic heteromorphism of *Ambrosia artemisiifolia* seeds: what consequences for its invasion in France? *Ann. Bot.* 2007, 100: 305-313.
- [37] 孙燕. 庐山自然保护区不同海拔公路路域外来植物的研究. *科学技术与工程*, 2012, 12(16): 3910-3914.
- [38] Nentwig, W. eds. *Biological Invasion; Section III. Patterns of Invasion and Invasibility*. 2007. Berlin; Springer- Verlag, 145-214
- [39] Daniels M K, Iacona G D, Armsworth P R, Larson E R. Do roads or streams explain plant invasions in forested protected areas? *Biological Invasion*, 2019, 21: 3121-3134.