

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

张 帅¹, 郭水良^{1,*}, 管 铭¹, 印丽萍², 张若轩¹

(1. 上海师范大学生命与环境科学学院, 上海 200234; 2. 上海出入境检验检疫局, 上海 200135)

摘要:以我国 74 个地理单位 282 种外来入侵植物的分布和环境数据为基础,应用除趋势对应分析、典范对应分析和回归分析方法,探讨了我国境内入侵植物区系组成、地理分布格局及其影响因素。主要结果如下:(1)我国 74 个地区共有 282 种外来入侵种,出现频率相对较高的外来入侵种是小飞蓬(*Conyza canadensis*)、刺苋(*Amaranthus spinosus*)、一年蓬(*Erigeron annuus*)、空心莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)、土荆芥(*Chenopodium ambrosioides*)、圆叶牵牛(*Pharbitis purpurea*)、曼陀罗(*Datura stramonium*)、皱果苋(*Amaranthus viridis*)、裂叶牵牛(*Pharbitis nil*)、反枝苋(*Amaranthus retroflexus*)、三叶鬼针草(*Bidens pilosa*)、凤眼莲(*Eichhornia crassipes*)等;(2)菊科(Compositae, 67, 种数)、禾本科(Gramineae, 32)、豆科(Leguminosae, 29)、苋科(Amaranthaceae, 23)、旋花科(Convolvulaceae, 13)是我国境内含入侵种最丰富的 5 个科,共计有 164 种,占我国入侵植物总数的 58.16%;(3)我国外来入侵植物主要源自于热带美洲、北美洲、欧洲、地中海-西亚和中亚、非洲和南亚;(4)外来入侵植物多样性在我国区域分异明显,热带-南亚热带、中(北)亚热带和温带三大区域的入侵种组成有较大差异:马缨丹(*Lantana camara*)、含羞草(*Mimosa pudica*)、胜红蓟(*Ageratum conyzoides*)、刺苋、小飞蓬、飞扬草(*Euphorbia hirta*)、五爪金龙(*Ipomoea cairica*)、空心莲子草、三叶鬼针草和金腰箭(*Synedrella nodiflora*)是热带-南亚热带区域中出现频率最高的前 10 种入侵植物;中亚热带和北亚热带区域出现频率最高的入侵种分别是一年蓬、小飞蓬、刺苋、土荆芥、北美独行菜(*Lepidium virginicum*)、美洲商陆(*Phytolacca americana*)、牛筋草(*Eleusine indica*)、紫茉莉(*Mirabilis jalapa*)、空心莲子草和三叶鬼针草;温带区域出现频率最高的是反枝苋、小飞蓬、圆叶牵牛、一年蓬、野西瓜苗(*Hibiscus trionum*)、杂配藜(*Chenopodium hybridum*)、苦苣菜(*Sonchus oleraceus*)、野燕麦(*Avena fatua*)、曼陀罗和皱果苋;(5)年降雨量、年均温度、年极端低温、无霜期和年均积温是影响我国外来入侵种空间分布格局的主要气象因素,年极端高温和年日照时数的影响相对较小;人口密度和交通密度对入侵种的地理分布也均有很大的影响;(6)随着年均温度、无霜期、人口密度、交通密度、年极端低温、年均降雨量和年积温的增加,外来入侵植物的种数呈线性增加,随着纬度的增加,种数则呈线性递减,种数与这 8 个环境因素间的关系达到极显著的水平;(7)不同地理来源的外来入侵种在我国的分布主要受纬度、年降雨量、年均无霜期、年均温度、交通密度、年极端低温和年均积温的影响。由于外来入侵种在我国分布呈现明显的区域分化,因此,应用建立具有区域特点的外来植物入侵风险评估系统。

关键词:外来入侵植物;地理分布格局;原产地;环境因素;统计分析

Diversity differentiation of invasive plants at a regional scale in China and its influencing factors: according to analyses on the data from 74 regions

ZHANG Shuai¹, GUO Shuiliang^{1,*}, GUAN Ming¹, YIN Liping², ZHANG Ruoxuan¹

¹ College of Life and Environmental Science, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China

² Shanghai Entry-Exit Inspection and Quarantine Bureau, Shanghai 200135, China

Abstract: A total of 282 invasive alien plants were recorded from 74 geographical units in China, and 11 environmental variables including climatic and social factors were also recorded. Based on the above data, the geographical distribution pattern of 282 invasive alien plants in the 74 geographical units and influencing factors were analyzed using Detrended Correspondence Analyses (DCA) and Canonical Correspondence Analysis (CCA). The main results are as follows: (1) In

基金项目:上海市科学技术技术标准专项(07DZ05020);国家质检总局科技计划项目(科研专项 08-03, 200810787);上海市教委创新项目(10ZZ81);上海市教委重点学科资助项目(J50401)

收稿日期:2009-07-26; **修订日期:**2010-03-02

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: guoshuiliang@163.com

the 74 geographical units, *Conyza canadensis*, *Amaranthus spinosus*, *Erigeron annuus*, *Alternanthera philoxeroides*, *Chenopodium ambrosioides*, *Pharbitis purpurea*, *Datura stramonium*, *Amaranthus viridis*, *Pharbitis nil*, *Amaranthus retroflexus*, *Bidens pilosa* and *Eichhornia crassipes* are widely distribution in mainland of China. (2) Compositae (67 species), Gramineae (32 species), Leguminosae (29 species), Amaranthaceae (23 species), Convolvulaceae (13 species) are five main families, accounting for 58.16% of the total invasive species in China. (3) Of the invasive alien plants, 43.97% originated from Tropical America, 18.44% from North America, 14.89% from Europe, 8.87% from the Mediterranean, West Asia to Central Asia, 4.26% from Africa and 3.55% from South Asia. (4) The geographical distribution of invasive plants in China were divided into three regions: the tropical-south subtropical region, central (north) sub-tropical region, and the temperate region. In the first region, the main invasive plants are *Lantana camara*, *Mimosa pudica*, *Ageratum conyzoides*, *Amaranthus spinosus*, *Conyza canadensis*, *Euphorbia hirta*, *Ipomoea cairica*, *Alternanthera philoxeroides*, *Bidens pilosa* and *Synedrella nodiflora*; in the second region, the main invasive plants are *Erigeron annuus*, *Conyza canadensis*, *Amaranthus spinosus*, *Chenopodium ambrosioides*, *Lepidium virginicum*, *Phytolacca americana*, *Eleusine indica*, *Mirabilis jalapa*, *Alternanthera philoxeroides* and *Bidens pilosa*; while in the third region, *Amaranthus retroflexus*, *Conyza canadensis*, *Pharbitis purpurea*, *Erigeron annuus*, *Hibiscus trionum*, *Chenopodium hybridum*, *Sonchus oleraceus*, *Avena fatua*, *Datura stramonium* and *Amaranthus viridis* are the ten main invasive plants. (5) The main meteorological factors influencing the distribution of invasive plants in China, if ranked as from high to low, are annual average precipitation, annual average temperature, annual extreme minimum temperature, frost-free days and annual accumulated temperature, while annual extreme maximum temperature and annual sunshine hours were of little influence. Human population density and transport density also play important roles on the distribution pattern. (6) The number of invasive plants increased almost linearly with the increase of annual average temperature, frost-free days, population density, transport density, annual extreme minimum temperature, annual average precipitation and annual accumulated temperature, and decreased linearly with the increase of latitude. The correlation between the number of invasive species and the eight environmental factors reached a highly significant level, while annual extreme maximum temperature, longitude and annual sunshine hours have little influences. (7) The main environmental factors influencing the distribution of different geographical elements of invasive plants in China are latitude, annual average precipitation, frost-free days, annual average temperature, transport density, annual extreme minimum temperature, population density and annual accumulated temperature, while annual extreme maximum temperature, longitude and annual sunshine hours have weaker influences than the former eight factors. As for the social and economic factors, population density and transport density both have distinctive influences on the distribution of geographical elements of invasive alien species. The assessment of invasive risk of alien plants should be conducted in regional level, for regional differentiation exists in the distribution of invasive species in China.

Key Words: invasive alien plants; geographical distribution pattern; origin; environmental factor; statistical analysis

中国是个生态系统、经济发展高度多样化的国家。外来入侵植物区系及数量状态在中国各省(自治区)差异极大,各省(自治区)的外来入侵种数从9至117个,比例从0.5%至3.8%不等^[1],这给外来植物入侵风险评估和入侵种的管理提出了新的问题。因此,揭示外来入侵植物在我国的地理分布格局及其影响因素,对于它们的综合管理有重要指导意义。

近年来,人们已开始关注我国不同地理区域的外来入侵植物分布格局及其影响因素^[2-5]。Lin等^[6]研究发现外来入侵种的增加与同期我国经济发展、与30个省(自治区)的经济规模有很强的关联性;Zhang等^[7]以省级行政单位为区域尺度,应用偏回归分析、主成分分析方法,探讨了经济、气象和土著种多样性这些指标对外来入侵种数分异的影响,发现引起区域尺度上外来物种多样性的原因中,30.3%归因于人为干扰,34.6%归

由于气象因素,26.4% 归因于土著物种的多样性;Liu^[4]等应用斯皮尔曼等级相关,也在省(自治区)级行政区域尺度上探讨影响外来入侵种多样性与各省的面积、人口、土著种多样性、GDP、经纬度等指标间的关系,发现各省区的地理位置、GDP、土著物种多样性是影响其入侵种丰富度的关键因素;吴晓雯等^[2]以中国省(区)为空间分布对象,根据外来入侵种在这些省(区)内的有无为指标,以包括人口密度、交通密度、生产总值、外来游客人数等社会经济因素以及纬度、经度、省区面积等地理因素和年降雨量、无霜期等气候因素为环境指标,通过聚类 and 排序,发现交通和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;Weber^[1]等以省(自治区)为地理单位开展的工作发现,土著种和特有种多样性与入侵种的数量呈正相关关系,并统计了主要科、不同生活型、不同经济价值、不同地理来源中的植物类群和不同生境中外来入侵种的比例。吴彤等^[3]对山东省外来植物的空间分布和区系特征进行了分析,发现温带成分为主,外来植物的来源地和分布均相对集中,温带性来源的外来植物较易在山东形成入侵种。另外,Huang 等^[8]基于文献数据,应用统计方法鉴定出我国境内恶性杂草共同的生态对策特点以及与原产地的关系,Xu 等^[9]综述了包括微生物、无脊椎动物、脊椎动物、海洋生物和植物中的外来入侵种在我国的分布及其起源,其中记录了 188 种外来入侵植物。

但是,先前这些学者均以省(区)、直辖市为空间分布单位开展的工作,涉及到的入侵种并不全面;其次,新疆、内蒙、甘肃等行政省区的东西南北跨度大,气候因素在同一省区内高度异质化,以外来物种在省级行政区域的分布数据探讨外来入侵种分布格局及其因素,所得结论有一定局限性;此外,最近的统计表明,中国境内的入侵植物远不止这一数目^[1]。近年来,由于人们对外来植物的关注,中国境内已有不少以某一城市、自然保护区或山地为地理单位的外来种调查报道,这为我们更加精细地研究我国外来植物入侵种空间分布特点及其影响因素提供了数据基础。

本文检索到了我国境内 74 个地理单位的外来入侵植物区系分布数据,收集了这些地区的地理坐标、气象数据以及包括人口密度和交通频度等人文环境数据,通过分析,以期更加客观地揭示我国外来植物的地理分布格局及其影响因素。

1 研究方法

1.1 数据来源

本研究中的外来入侵种参考李振宇等^[10],中国学术期刊网、代表性自然保护区考察集等文献数据,共收集到了以下 74 个地区外来入侵植物区系数据和环境因素(表 1),74 个地区包括 38 个市、地区和县,31 个自然保护区和森林公园和 5 个风景区(数据存查)。本文中的外来入侵种指原产地明确位于我国境外,在调查区域其种群能够自我更新的种类^[5]。74 个地区的环境因子包括纬度、经度、年均温度、年极端高温、年极端低温、年均降雨量、年积温、日照时数、无霜期、人口密度和交通密度这 11 个指标。人口密度和交通密度按以下方式赋值:

人口密度 根据原始文献中研究区域面积大小和人口数量统计,部分地区的人口数据来源于相关的网站,由于数据来源途径不同,人口密度没有使用绝对值,而是由高到低将人口密度划成 5 个等级。

交通密度 主要是根据研究区域所处的位置和与周围区域的物流情况,分成 5 级:5(东部、中部的省会城市和省级以上的交通枢纽、深圳、大连、澳门等对外交流活跃的沿海城市)、4(东部、中部的地区城市、西部省级城市)、3(东部、中部的县和中西部地区城市)、2(旅游性的国家级自然保护区和风景区)、1(自然保护区和西藏、甘肃等省区的一些地区)。

1.2 统计方法

1.2.1 外来入侵种的空间分布格局分析

74 个地理单位中共记录有外来入侵种 282 种。当第 i 个入侵种在第 j 个地理单位有分布时,则 X_{ij} 赋值 1,没有的,赋值 0,建立“0/1”形式的 282 个外来入侵种在 74 个地理单位分布的数据表,同时对应地建立 74 个地理单位包括 11 个环境因子的地区-环境因素数据表。借助于 PC-ORD 4.0 生态软件,应用除趋势对应分析方法,以地区-种类分布数据为基础,获得 74 个地区的二维排序图,分析 74 个地区外来入侵种的地理分布格

局。除趋势对应分析时,“Rescaling threshold”设置为 0,“number of segments”设置为 26,运算前环境数据均进行最大值标准化。

表 1 74 个地理单位及其数据来源^[11-80]

Table 1 List of 74 geographical units and their literatures

序号 No.	地区 Areas	参考文献 Reference	序号 No.	地区 Areas	参考文献 Reference
1	安徽省黄山	[11]	38	澳门	[46]
2	吉林省长白山自然保护区	[12]	39	山东省青岛市	[47]
3	四川省金佛山自然保护区	[13]	40	广东省惠州红树林自然保护区	[48]
4	广东省白云山	[14]	41	云南省瑞丽市	[49]
5	江西省庐山	[15]	42	海南岛石灰岩地区	[50]
6	山东省昆嵛山	[16]	43	辽宁省大连市	[51]
7	广西省十万大山自然保护区	[17]	44	广东省深圳市	[52]
8	贵州省大沙河自然保护区	[18]	45	吉林省长春市	[53]
9	湖南省南岳自然保护区	[19]	46	云南省红河流域	[54]
10	湖北省星斗山自然保护区	[20]	47	陕西省长青自然保护区	[55]
11	安徽省淮北市	[21]	48	西藏阿里地区	[56]
12	湖南省洞庭湖区	[22]	49	浙江省乌岩岭自然保护区	[57]
13	贵州省黔东南地区	[23]	50	广西省花坪自然保护区	[58]
14	海南省鹦哥岭	[24]	51	安徽省金寨马宗岭自然保护区	[59]
15	厦门大屿山白鹭自然保护区	[25]	52	安徽省猪头尖山区	[60]
16	上海市九段沙和崇明东滩自然保护区	[26]	53	浙江省金华山	作者调查
17	河南省开封市	[27]	54	江西省官山自然保护区	[61]
18	河北省衡水湖自然保护区	[28]	55	江西省三清山自然保护区	[62]
19	河南省豫东农区	[29]	56	浙江省龙王山自然保护区	[63]
20	香港东北角吉澳群岛	[30]	57	福建省武夷山自然保护区	[64]
21	浙江省杭州市	[31]	58	浙江省天目山自然保护区	[65]
22	浙江省金华市郊	[32]	59	安徽省岳西县多枝尖山区	[66]
23	广东省珠海市	[33]	60	浙江省淳安县	作者调查
24	辽宁省沈阳市	[34]	61	浙江省凤阳山自然保护区	[67]
25	广东省中山市	[35]	62	浙江省义乌市	[68]
26	重庆市	[36]	63	河北省老岭自然保护区	[69]
27	广西省宜州市	[37]	64	河北省驼梁自然保护区	[70]
28	新疆乌鲁木齐市	[38]	65	辽宁省白石砬子自然保护区	[71]
29	福建省厦门市	[39]	66	上海市	[72]
30	海南省铜鼓岭自然保护区	[40]	67	江苏省南京市	[73]
31	海南省东寨港自然保护区	[40]	68	山西省太原市	[74]
32	海南省大田自然保护区	[40]	69	湖北省武汉市	[75]
33	广东省广州市	[41]	70	甘肃省太子山	[76]
34	北京市	[42]	71	青海省西宁市	[77]
35	江西省南昌湖滨	[43]	72	宁夏盐池县	[78]
36	广西省桂林市	[44]	73	黑龙江省五大连池自然保护区	[79]
37	云南省西双版纳	[45]	74	内蒙古达里诺尔自然保护区	[80]

1.2.2 影响外来入侵种空间分布和丰富度的环境因素

以地区-种类分布数据和地区-环境因子数据为基础,借助于 PC-ORD 4.0 生态软件,应用典范对应分析方法,探讨影响这 74 个地区外来种区系组成和空间分布格局的环境因素。环境因素数据在参与运算前进行极差标准化处理。

为了解 74 个地区中外来入侵植物的种数与环境因素间的关系,以外来入侵种数为应变量,以环境因子为独立变量,应用 SPSS 15.0 统计软件的 Bivariate 分析程序,分析影响这 74 个地区外来入侵种数目的主要环境因素,同时分析经纬度与 7 个气象因素间的相关性,以探讨地理因素影响外来入侵种分布的可能原因。

1.2.3 影响不同来源的外来入侵植物在我国地理分布差异的环境因素分析

为揭示影响不同来源的外来入侵植物在我国地理分布差异的环境因素,根据入侵植物原产地的分布情况和资料的掌握情况,将 282 种外来入侵种分成以下 16 个地理来源类型(表 2)。在地理来源统计时,由于资料的局限性,部分原产地之间有重叠现象。统计这 16 个类型在 74 个地区的分布数据,结合 74 个地区的环境因素数据,应用典范对应分析探讨不同地理来源的入侵种分布与环境因素之间的关系。

表 2 外来入侵植物的原产地分布的统计^[81-82]
Table 2 Statistics of the distribution of origin of invasive alien plants in China

序号 No.	原产地类型 Type of origin	种数 Species number	百分比 Percentage/%	备注 Remark
D1	北美洲	52	18.44	
D2	北欧	2	0.71	
D3	大洋洲	2	0.71	
D4	地中海、西亚至中亚	25	8.87	
D5	东亚	5	1.77	
D6	非洲	12	4.26	
D7	南亚	10	3.55	主要指印度
D8	欧洲	42	14.89	
D9	欧洲和印度	1	0.35	
D10	欧洲及北美洲	1	0.35	
D11	热带亚洲	3	1.06	
D12	热带亚洲和热带澳洲	1	0.35	
D13	亚洲	3	1.06	
D14	亚洲和欧洲	1	0.35	
D15	热带美洲	120	43.97	南美 84,中美洲和南美洲 14,中美洲 22
D16	泛热带	2	0.71	热带亚洲、非洲和美洲

2 结果与分析

2.1 外来入侵种的区系特点分析

2.1.1 外来入侵种的种类构成

74 个地区共出现 282 种外来入侵种,出现频率最高的分别是小飞蓬(*Conyza canadensis*, 0.86)、刺苋(*Amaranthus spinosus*, 0.65)、一年蓬(*Erigeron annuus*, 0.65)、空心莲子草(*Alternanthera philoxeroides*, 0.57)、土荆芥(*Chenopodium ambrosioides*, 0.57)、圆叶牵牛(*Pharbitis purpurea*, 0.54)、曼陀罗(*Datura stramonium*, 0.53)、皱果苋(*Amaranthus viridis*, 0.51)、裂叶牵牛(*Pharbitis nil*, 0.51)、反枝苋(*Amaranthus retroflexus*, 0.50)、三叶鬼针草(*Bidens pilosa*, 0.50)、凤眼莲(*Eichhornia crassipes*, 0.50)、牛筋草(*Eleusine indica*, 0.47)、铜锤草(*Oxalis corymbosa*, 0.47)、紫茉莉(*Mirabilis jalapa*, 0.46)、北美独行菜(*Lepidium virginicum*, 0.46)、蓖麻(*Ricinus communis*, 0.46)、胜红蓟(*Ageratum conyzoides*, 0.43)、马缨丹(*Lantana camara*, 0.43)和飞扬草(*Euphorbia hirta*, 0.43)。

这 282 种外来入侵种隶属于 53 个科,其中含种数在 10 种以上的科有菊科(Compositae, 67)、禾本科(Gramineae, 32)、豆科(Leguminosae, 29)、苋科(Amaranthaceae, 23)、旋花科(Convolvulaceae, 13)、茄科(Solanaceae, 12)、大戟科(Euphorbiaceae, 10)。这 7 个科共有 182 种外来入侵种,占总数的 64.54%。以属为单位进行统计,发现含种数最多的属分别为苋属(*Amaranthus*, 13)、月见草属(*Oenothera*, 6)、茄属(*Solanum*,

6)、大戟属(*Euphorbia*,6)、黑麦草属(*Lolium*,6)。这5属共计有37种,占总入侵种数的20.33%。

2.1.2 外来入侵种的原产地来源分析

表2显示热带美洲(中美洲和南美洲)是我国境内外来入侵种的主要来源地,74个地区共计有120种,占282种的43.97%;其次是北美洲和欧洲,分别有52种和42种,占统计地区总种数的18.44%和14.89%,地中海、西亚和中亚地区来源的成分也占有一定比例,共有25种,占8.87%;再次是来自非洲和南亚的地理成分,分别有12和10种,占4.26%和3.55%,其他的则比较低。

2.2 外来入侵种的空间分布及影响因素分析

2.2.1 外来入侵种空间分布特点

以282种外来入侵种在74个地区分布数据,应用除趋势对应分析得到图1。图1中,前2个排序轴的累计方差贡献率分别为41.4%和53.8%,排序图较有效地反映了74个地区入侵种组成上的差异。

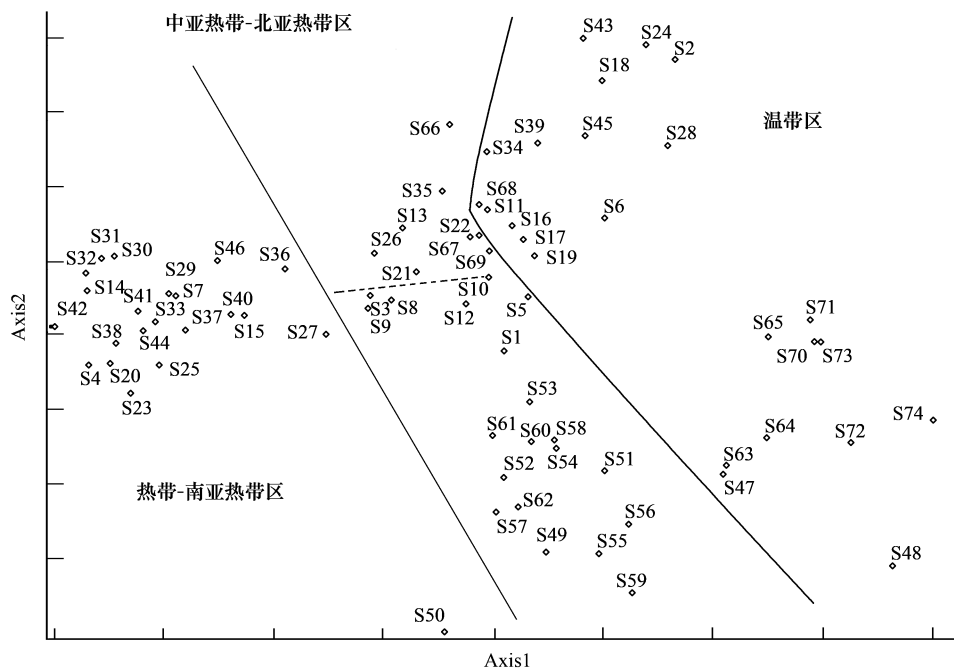


图1 基于外来入侵种组成分布数据的74个地区除趋势对应分析前二维排序图

Fig. 1 The first two dimensional ordination of 74 areas based species distribution data by using Detrended Correspondence Analyses

注:1—74所代表的地区见表1

图1中,74个地区可以区分出热带-南亚热带区域、中亚热带和北亚热带区域、温带区域3大区域,它们在外来入侵种的构成上有一定特点。

热带-南亚热带区域:包括广州白云山(4)、香港东北角吉澳群岛(20)、广东惠州市(40)、广西十万大山(7)、广西宜州市(27)、厦门大屿白鹭自然保护区(15)、海南鹦哥岭(14)、海南大田国家级自然保护区(32)、海南岛石灰岩地区(42)、海南铜鼓岭国家级自然保护区(30)、海南东寨港国家级自然保护区(31)、珠海市(23)、中山市(25)、广州市(33)、澳门(38)、深圳市(44)、厦门市(29)、云南西双版纳(37)、云南红河区域(46)、云南瑞丽市(41)、广西桂林(36)和广西花坪林区(50)。这22个地区处于我国华南热带、南亚热带区域,共出现187种外来入侵植物。

中亚热带和北亚热带区域:包括安徽黄山(1)、四川金佛山(3)、江西庐山(5)、贵州大沙河(8)、湖南南岳(9)、湖北星斗山(10)、湖南洞庭湖区(12)、贵州黔南地区(13)、浙江杭州(21)、浙江金华市郊(22)、重庆(26)、江西南昌(35)、浙江乌岩岭(49)、安徽金寨县马宗岭(51)、安徽猪头尖山区(52)、浙江金华北山(53)、江西官山(54)、江西三清山(55)、浙江龙王山(56)、福建武夷山(57)、浙江天目山(58)、安徽省岳西县(59)、

浙江淳安县(60)、凤阳山(61)、浙江义乌(62)、上海(66)、南京(67)和武汉(69)共有 28 个地区,共出现 191 种外来入侵植物。本区域中,位于虚线上部的多数为城市化区域,每个地区平均出现 56 种外来入侵植物;位于虚线下的多为自然保护区或人为干扰相对较小的山地,平均每个地区出现 39.6 个外来入侵种,人为干扰因素造成了同一气候带内外来入侵种空间分布上的差异。

温带区域:包括吉林长白山区(2)、山东昆嵛山(6)、安徽淮北(11)、河南开封(17)、河北衡水湖自然保护区(18)、河南豫东农区(19)、辽宁沈阳(24)、新疆乌鲁木齐(28)、北京(34)、山东青岛(39)、辽宁大连(43)、吉林长春(45)、陕西长青自然保护区(47)、西藏阿里地区(48)、河北老岭自然保护区(63)、河北驼梁自然保护区(64)、辽宁白石砬子自然保护区(65)、山西太原(68)、甘肃太子山(70)、西宁(71)、宁夏盐池县(72)、黑龙江五大连池自然保护区(73)和内蒙古达里诺尔自然保护区(74)和上海崇明东滩自然保护区(16)共 24 个地理单位,除了崇明东滩外,其余均位于温带区域,共出现 166 种外来入侵种。24 个地理单位中,位于排序图右上方的,多数为城市化区域,处于右下方的多数是自然保护区或城市化影响相对较小的区域。

以上 3 个区域主要的外来入侵种见表 3。

表 3 三大区域中主要的外来入侵种及其出现频率
Table 3 Main invasive plants in three regions and their frequencies

热带-南亚热带区域 Tropical-south subtropical region			中亚热带和北亚热带区域 Central (north) sub-tropical region		温带区域 Temperate region	
序号 No.	种类 Species	频度 Frequency	种类 Species	频度 Frequency	种类 Species	频度 Frequency
1	马缨丹 <i>Lantana camara</i>	0.95	一年蓬 <i>Erigeron annuus</i>	0.96	反枝苋 <i>Amaranthus retroflexus</i>	0.96
2	含羞草 <i>Mimosa pudica</i> 胜红蓟 <i>Ageratum conyzoides</i>	0.91	小飞蓬 <i>Conyza canadensis</i>	0.93	小飞蓬 <i>Conyza canadensis</i>	0.88
3	刺苋 <i>Amaranthus spinosus</i> 小飞蓬 <i>Conyza canadensis</i> 飞扬草 <i>Euphorbia hirta</i>	0.86	刺苋 <i>Amaranthus spinosus</i> 土荆芥 <i>Chenopodium ambrosioides</i> 北美独行菜 <i>Lepidium virginicum</i>	0.79	圆叶牵牛 <i>Pharbitis purpurea</i>	0.67
4	五爪金龙 <i>Ipomoea cairica</i>	0.82	美洲商陆 <i>Phytolacca Americana</i>	0.75	一年蓬 <i>Erigeron annuus</i> 野西瓜苗 <i>Hibiscus trionum</i>	0.63
5	空心莲子草 <i>Alternanthera philoxeroides</i>	0.77	牛筋草 <i>Eleusine indica</i> 紫茉莉 <i>Mirabilis jalapa</i>	0.71	杂配藜 <i>Chenopodium hybridum</i>	0.58
6	三叶鬼针草 <i>Bidens pilosa</i> 金腰箭 <i>Synedrella nodiflora</i>	0.73	水花生 <i>Alternanthera philoxeroides</i>	0.68	苦苣菜 <i>Sonchus oleraceus</i> 野燕麦 <i>Avena fatua</i> 曼陀罗 <i>Datura stramonium</i>	0.54
7	土荆芥 <i>Chenopodium ambrosioides</i> 假臭草 <i>Eupatorium catarium</i> 地毯草 <i>Axonopus compressus</i> 赛葵 <i>Malvastrum coromandelianum</i> 铜锤草 <i>Oxalis corymbosa</i>	0.68	三叶鬼针草 <i>Bidens pilosa</i> 裂叶牵牛 <i>Pharbitis nil</i> 野燕麦 <i>Avena fatua</i> 凤眼莲 <i>Eichhornia crassipes</i> 野老鹳草 <i>Geranium carolinianum</i>	0.64	皱果苋 <i>Amaranthus viridis</i>	0.50
8	三裂蟛蜞菊 <i>Wedelia trilobata</i> 蓖麻 <i>Ricinus communis</i>	0.64	皱果苋 <i>Amaranthus viridis</i> 野苘蒿 <i>Cynura crepidioides</i> 阿拉伯婆婆纳 <i>Veronica persica</i> 曼陀罗 <i>Datura stramonium</i>	0.61	王不留行 <i>Vaccaria segetalis</i> 裂叶牵牛 <i>Pharbitis nil</i>	0.46
9	野苘蒿 <i>Cynura crepidioides</i> 飞机草 <i>Eupatorium odoratum</i> 野甘草 <i>Scoparia dulcis</i> 望江南 <i>Cassia occidentalis</i>	0.59	圆叶牵牛 <i>Pharbitis purpurea</i> 野胡萝卜 <i>Daucus carota</i>	0.57	北美独行菜 <i>Lepidium virginicum</i> 斑地锦 <i>Euphorbia maculata</i>	0.42

2.2.2 影响外来入侵种的空间分布格局和种数的环境因素

基于 74 个地区 282 种外来入侵种的分布数据和 11 个环境数据,应用典范对应分析获得图 2。根据图 1 中除趋势对应分析的结果,图 2 中的 74 个地区也可以区别出三大区域。入侵种分布与环境因子之间的相关

性很高,分别为 0.965 和 0.919;典范对应分析第 1 轴的作用显著(特征值为 0.495, $P < 0.01$),第 2 轴的作用也显著(特征值为 0.179, $P < 0.01$),前 2 个排序轴的累计方差贡献率分别为 32.7% 和 44.5%,排序图提供了较为丰富的有关入侵种分布与环境因子间关系的信息^[2,83]。

从 CCA 排序图可以直观地看出入侵种空间分布与环境因子之间的关系。环境因子用带有箭头的线段(矢量线)表示,连线的长短表示入侵种分布与该环境因子关系的大小,箭头连线与排序轴的夹角表示该环境因子与排序轴相关性的程度,箭头所指的方向表示该环境因子的变化趋势^[83]。结合表 4 数据,排序图 2 中的第 1 轴主要反映了纬度及其与之相联系的年均温度、无霜期、年均积温、年极端低温、年均降雨量对外来入侵种空间分布的影响;第 2 轴则主要反映了经度这一空间位置对外来入侵种空间分布格局的影响,而第 3 轴则主要反映了交通密度和人口密度这两个社会经济因素对外来入侵种分布的影响。若以表 4 中前三维相关系数绝对值的平均值分析,影响我国外来入侵种空间分布格局的气象因素分别为年降雨量(0.509)、年均温度(0.380)、年极端低温(0.354)、无霜期(0.337)、年均积温(0.322),而年极端高温(0.164)和年日照时数(0.158)的影响明显小于前 5 个气象因素;就社会经济因素来分析,人口密度和交通密度均有很大的影响,在 11 个环境因素中也排在前列。但是就总体上分析,降雨量、经纬度和人口密度对 74 个地区外来入侵种空间分布具有最强烈的影响。

表 4 11 个环境因子与前三维排序轴的相关系数

Table 4 Correlation coefficients of 11 environmental factors with first three axes of CCA

环境因子 Environmental factors	第 1 轴 Axis1	第 2 轴 Axis2	第 3 轴 Axis3	前三维平均相关系数(绝对值) The average correlation coefficient of the first three-dimensional (absolute value)
年均降雨量 Annual average precipitation (R)	-0.604	0.384	0.538	0.509
经度 Longitude (E)	0.469	0.765	-0.095	0.443
纬度 Latitude (N)	0.948	-0.099	-0.213	0.420
人口密度 Population density (HD)	-0.207	0.242	-0.771	0.407
年均温度 Annual average temperature (T)	-0.948	0.128	-0.063	0.380
交通密度 Transport density (TD)	-0.260	0.093	-0.774	0.376
年极端低温 Annual extreme minimum temperature (LT)	-0.855	0.125	0.083	0.354
无霜期 Frost-free days (NF)	-0.874	0.044	-0.093	0.337
年积温 (>10℃) Annual accumulated temperature (AT)	-0.855	0.063	-0.048	0.322
年极端高温 Annual extreme maximum temperature (HT)	-0.072	0.046	-0.374	0.164
年均日照时数 Annual sunshine hours (L)	0.098	-0.351	0.025	0.158

表 5 纬度与 7 个气象因子间的相关性

Table 5 Correlation coefficients of 7 environmental factors with latitude

气象因子 Meteorological factors	年均温度 Annual average temperature	年极端高温 Annual extreme maximum temperature	年极端低温 Annual extreme minimum temperature	年均降雨量 Annual average precipitation	年积温 (>10℃) Annual accumulated temperature	年均日照时数 Annual sunshine hours	无霜期 Frost-free days
与纬度的线性相关系数 Pearson correlation	-0.885 **	-0.041	-0.850 **	-0.755 **	-0.811 **	0.365 **	-0.782 **

* *: 在 0.01 水平上极显著相关

从表 5 可以看出,纬度在解释外来入侵种地理分布格局中起着重要作用。纬度与外来入侵种的分布关系,可能更主要是通过气象因素发生关联。除了年极端高温外,其他 6 个气象因素与纬度呈极显著的相关性。经度与其他 7 个气象因素则并不是简单的线性相关关系。由于我国经济社会发展水平不同,对外开放有早晚之分,这些对外来入侵种在空间分布上的影响也是通过调查地区的地理位置这个因素体现出来。

就某一地区的外来入侵植物的种数与环境因素的关系来讲,随着年均温度、无霜期、人口密度、交通密度、年极端低温、年均降雨量和年积温的增加,外来入侵植物的种数呈线性增加,随着纬度的增加,种数则呈线性递减,种数与这 8 个环境因素间的关系达到极显著的水平,而与年极端温度、经度和日照时数则无明显的相关性(表 6)。

表 6 外来入侵植物种数与环境因素间的关系
Table 6 The relationship between the number of invasive alien plant and environmental factors

项目 Items	相关系数 Correlation coefficient	项目 Items	相关系数 Correlation coefficient	项目 Items	相关系数 Correlation coefficient
纬度	-0.325 **	年极端低温	0.342 **	无霜期	0.416 **
经度	0.190	年均降雨量	0.315 **	人口密度	0.462 **
年均温度	0.423 **	年积温(>10℃)	0.313 **	交通密度	0.392 **
年极端高温	0.091	年均日照时数	-0.164		

* *:在 0.01 水平上极显著相关

2.2.3 不同来源外来入侵种的地理分布与环境因素间的关系

对 74 个地区外来入侵植物 16 种地理成分与环境因素的典范对应分析结果见图 3 和表 7。图 3 中,种类分布与环境因子之间的相关性较高,分别为 0.919 和 0.602;典范对应分析第 1 轴的作用显著(特征值为 0.210, $P<0.01$),第 2 轴的作用也显著(特征值为 0.037, $P<0.01$),前 2 个排序轴的累计贡献率分别为 71.6% 和 84.02%,说明 CCA 分析的排序结果是可信的,仅前二个排序轴能够较好地反映我国外来入侵植物原产地与 11 个环境因素间的关系。

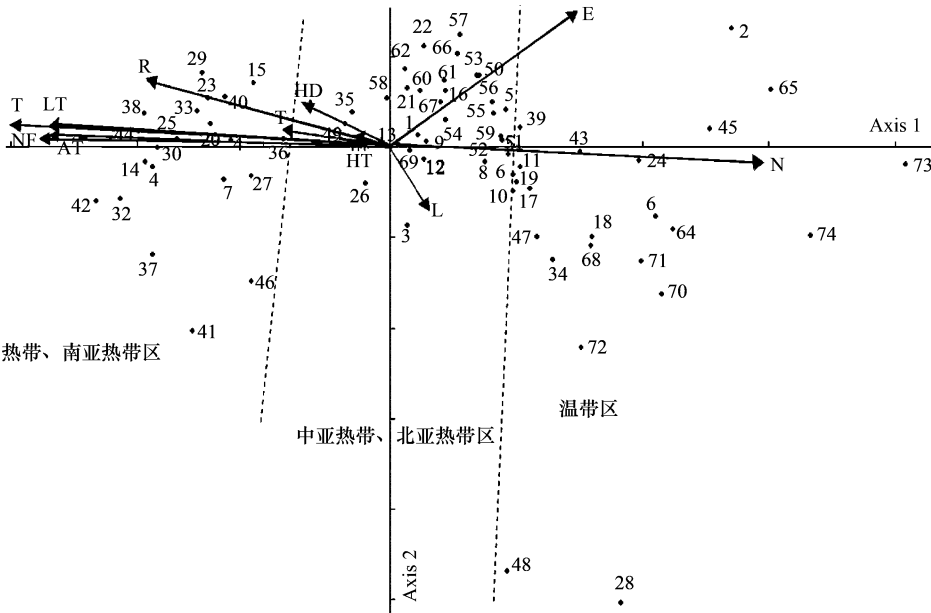


图 2 基于 74 个地区中 282 个外来入侵种分布和 11 个环境因子数据的典范对应分析前二维排序图

Fig. 2 The first two dimensional ordination based on distribution data of 282 alien invasive species and 11 environmental variables in 74 areas by using Canonical Correspondence Analysis

矢量线上的符号所代表的环境因子见表 4;图中 1—74 所代表的地区见表 1

结合表 7 数据,图 3 中的第 1 轴主要反映了年均温度、纬度、年均积温、无霜期和极端低温对 16 个地理成分在我国境内分布的影响,第 2 轴则反映了交通、人口密度这两个社会因素对外来入侵种地理成分分布的影响。总体上来讲,影响不同地理来源的外来入侵种在我国分布的环境因素主要是纬度(0.582)、年降雨量(0.569)、年均无霜期(0.494)、年均温度(0.479)、交通密度(0.477)、年极端低温(0.468)、人口密度(0.461)

温($>10^{\circ}\text{C}$)、年均日照时数和无霜期这些环境指标影响到外来入侵种的分布格局和丰富度。74 个地区的外来入侵种数与纬度呈极显著的负相关,这里除了随纬度增加,温度、降雨量下降从而影响到物种的丰富度外,我国对外开放由南向北推进,经济活跃程度也由南向北减弱,这也会影响外来入侵种的数量分布,先前也由不少学者注意到经济发展对生物入侵的影响^[9,86-88],

一些研究结果显示,人口密度、GDP 与外来种的数量显著相关^[1],交通线路的增加也与其有密切关系^[89],本文的定量研究显示人口密度是仅次于年降雨量的影响入侵种分布格局的环境因素,交通密度对外来入侵种影响程度与年均温度相近。在研究的 74 个地区中,澳门、中山、深圳、广州、上海、厦门、青岛、珠海、大连的外来入侵种数量远比那些内陆城市要多,这些恰恰是我国经济最发达的地区或国际贸易往来重要的窗口城市;同一区域内,城市化地区的入侵种数比保护区、森林公园等地区的入侵种数多,而云南西双版纳、黄山、广西桂林这些著名的风景胜地,其入侵种数又比自然保护区的多。随着城市化加快,物流增加、旅游人数的增加,必然会将外来种从口岸、中心城市向其他区域扩散。因此,要加强中心城市、贸易口岸、旅游景区外来入侵种的检疫,防止外来入侵的进一步扩散和传播。

不同地理来源的外来入侵种在我国的分布受到了空间地理位置的限制,这显然与入侵种传播途径和原产地的气候条件有关。例如北美洲、北欧、地中海-西亚至中亚、东亚、欧洲等来源的外来入侵植物容易在我国偏北地区分布,例如欧洲千里光、王不留行、田旋花等原产于欧洲温带,现在在我国华北、华中等地区有广泛的分布;而来源于大洋洲、非洲、南亚、热带亚洲、热带亚洲和热带澳洲、热带美洲和泛热带等地理成分的外来入侵植物则主要分布于我国低纬度、温暖潮湿的地理环境中,例如原产于热带美洲的马缨丹、飞扬草、铜锤草、含羞草等在我国华南的热带或亚热带地区分布广泛。当然,影响外来入侵种在我国境内的分布可能还有地质历史上的一些因素,例如我国的东部地区,种子植物区系有相当一部分为东亚-北美间断地理成分,反映出东亚地区和北美在地质历史上的相关性,因此,原产地北美的一些杂草很容易在传入我国东亚后变成入侵种^[81]。

对外来入侵种空间分布格局和区系地理学的理论研究,目的是服务于对外来入侵种的综合管理。随着我国对外交流的增加,新的外来植物入侵的机会在增加。因此,需要对新传入或拟引进的外来植物开展入侵风险评估工作。外来植物入侵风险综合评估法成功与否在于体系中包括尽可能多、但是相互独立、与入侵能力有显著相关的指标。从本文的分析情况看,可以将区系地理成分作为一个评估指标参与外来种入侵风险评估体系中。例如,在实际操作中,可以对原产地在热带美洲,同时又属于禾本科、豆科、苋科、大戟科等给予特别的关注,赋予相对较高的风险评估权重。我国幅员辽阔,地区之间环境气候差异巨大,本文的统计表明,我国不同地区外来入侵种在组成、地理来源上存在明显差异。用某一单一入侵风险评估系统评估不同地区外来植物的入侵风险,针对性不强。在欧洲,人们已注意到这一现象,分别建立了欧洲中部^[90]和意大利^[91]的外来植物入侵风险评估系统。近年来,国内已有学者注意这一问题,建立了针对厦门地区环境特点的外来植物入侵风险评估系统^[92]。但是,我国绝大部分地区尚没有建立具有区域特点的外来植物入侵性评估体系。本文结果表明,我国热带-亚热带、中亚热带-北亚热带和温带三大区域在外来入侵种组成、来源等方面存在较大差异,因此,针对这 3 大区域应分别建立具有区域特点的入侵风险评估系统。

另外,在有关典范对应分析的可信度方面,在 Ter Braak 第 1 篇介绍有关典范对应分析方法的文献中,他给出的第 4 个例子中的累计贡献率也不高,但 Ter Braak 认为,即使是排序图的累计贡献率较低,排序图中也能够提供相当丰富的信息^[83]。虽然图 1 中前 2 个排序轴的累计贡献率分别为 32.7% 和 44.5%,但是 Monte Carlo 随机排列检验结果显示,典范对应分析第 1 轴的作用显著(特征值为 0.495, $P < 0.01$),典范对应分析第 2 轴的作用也显著(特征值为 0.179, $P < 0.01$)^[2,83]。

为分析外来入侵种原产地对它们在我国地理分布上的影响,本文特地对 282 种外来入侵植物的原产地信息进行了统计,其依据主要是文献资料中关于它们原产地的记载,有 3 个种类的原始信息涉及到两个以上地区,故在统计时有重叠现象,但是仅占分析总种数 282 种的 1.04%,不会对分析结果有较大影响。

致谢: 美国密歇根大学 Eugene F. Stoermer 教授润色英文摘要,特此致谢。

References:

- [1] Weber E, Sun S G, Li B. Invasive alien plants in China: diversity and ecological insights. *Biological Invasions*, 2008, (10): 1411-1429.
- [2] Wu X W, Luo J, Chen J K, Li B. Spatial patterns of invasive alien plants in China and its relationship with environmental and anthropological factors. *Journal of Plant Ecology*, 2006, 30(4): 576-584.
- [3] Wu T, Li J X, Dai J, Wang R Q. Floristic characteristics and spatial distribution patterns of alien plants in Shandong Province. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(4): 489-494.
- [4] Liu J, Liang S C, Liu F H, Wang R Q, Dong M. Invasive alien plant species in China: regional and distribution patterns. *Diversity and Distributions*, 2005, (11): 341-347.
- [5] Xie Y, Li Z Y, Gregg W P, Li D M. Invasive species in China — an overview. *Biodiversity and Conservation*, 2001, (10): 1317-1341.
- [6] Lin W, Zhou G F, Cheng X Y, Xu R M. Fast economic development accelerates biological invasions in China. *PLoS ONE*, 2007, 2(11): 1-6.
- [7] Zhang Z B, Xie Y, Wu Y M. Human disturbance, climate and biodiversity determine biological invasion at a regional scale. *Integrative Zoology*, 2006, (1): 130-138.
- [8] Huang Q Q, Wu J M, Bai Y Y, Zhou L, Wang G X. Identifying the most noxious invasive plants in China: role of geographical origin, life form and means of introduction. *Biodiversity Conservation*, 2009, (18): 305-316.
- [9] Xu H G, Qiang S, Han Z M, Guo J Y, Huang Z G, Sun H Y, He S P, Ding H, Wu H R, Wan F H. The status and causes of alien species invasion in China. *Biodiversity and Conservation*, 2006, (15): 2893-2904.
- [10] Li Z Y, Xie Y. *Invasive Alien Species in China*. Beijing: China Forestry Publishing House, 2002.
- [11] Wang X F, Cheng Y H, Zhao C H, Wu Q G. Studies on alien plants in Huangshan City. *Journal of Jiangsu Forestry Science & Technology*, 2007, 34(6): 23-27.
- [12] Zhou Y. A preliminary study on the invasive plants in Changbai Mountains. *Journal of Capital Normal University(Natural Science Edition)*, 2003, 24(4): 55-58.
- [13] Lin M X, Han F, Liu Z Y, Ren M B, Liu X, Zhang J. A preliminary study of alien invasive plant in the Jinfoshan Nature Reserve. *Weed Science*, 2007, (4): 26-28.
- [14] Li H S, Zhong H L, Liu G, Liang L, Ning G S. A preliminary study on the alien invasive plant species in Baiyun Mountain, Guangzhou. *Journal of Guangdong Education Institute*, 2008, 28(3): 65-68.
- [15] Hu T Y, Jiang H W, Fang F, Guo S L. Preliminary survey on exotic invasive plants in Lushan Mountain Scenic Spot. *JiangXi Forestry Science and Technology*, 2007, (3): 19-23.
- [16] Zhao H, Dong C L. An investigation on the alien invasive plants in Kunyu Mountain, Shandong Province. *JiangXi Science*, 2007, 25(4): 390-396.
- [17] Wei Y L, Ye D, Wen Y G, Men Y Y. Invasive plant species in Shiwandashan Mountain National Natural Reserve, Guangxi, China. *China Forestry Science and Technology*, 2006, 20(6): 23-26.
- [18] Lin M X, Liu Z Y, Han F, Ren M B, Zhang J. Research of mien invasive plant species in the Dashahe Nature Reserve, Guizhou Province. *Weed Science*, 2008, (1): 31-32.
- [19] Xie H Y, Gong Y Z, Zuo J F. A preliminary research of invasive plants in Nanyue Nature Reserve. *Hunan Forestry Science & Technology*, 2007, 34(2): 22-24.
- [20] Lu S F, Liu S X, Fang Y P. A preliminary research of invasive species around Xingdoushan National Nature Reserve, Hubei. *Journal of Huanggang Normal University*, 2005, 25(3): 48-52.
- [21] Hu G, Zhang Z H, Dong J Y, Liang S C. A preliminary study on the alien invasive plants in Huaibei region of Anhui Province. *Journal of Hefei University(Natural Sciences)*, 2005, 15(2): 41-45.
- [22] Peng Y L, Wang Y, Zhou G Q, Zhou G F, Wang W L. Study on the species, distribution and damage of the invasive alien harmful plants in Dongting area. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008, 36(3): 1114-1116.
- [23] Wei M Y, Liu L P, Wen Z R. Growth and control of exotic plant in Qiannan areas of Guizhou. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2006, 34(2): 35-38.
- [24] Zhang R J, Xing F W, Wu S J, Ye Y S, Wang F G, Chen H Q. The alien plants and environment evaluation of Yinggeling Moutain, Hainan, China. *Ecology and Environment*, 2007, 16(3): 906-911.
- [25] Zhu K J, Wang B, Sun L, Chen J R. Invasive plants in Dayu Islet, Xiamen Egret Natural Reserve. *Xiamen Science & Technology*, 2006, (3): 38-41.

- [26] Qin W H, Yu S P, Jiang M K, Wang Z, Chen X Z, Xu W G. Investigation research on the intrusive alien species in national nature reserves of Shanghai, China. *Weed Science*, 2007, (1): 29-33.
- [27] Zhang G B. Study on the invasive alien plant in Kaifeng. *Journal of Henan University(Natural Science)*, 2004, 34(1): 56-59.
- [28] Li H X. A Preliminary study on invasive plants of Hebei Hengshui Lake Natural Reserve. *Wetland Science & Management*, 2008, 4(2): 51-53.
- [29] Zhang G B. Invasive alien plants and control in the farming region of Yudong. *Journal of Shangqiu Teachers College*, 2006, 22(2): 153-156.
- [30] Yan Y H, He Z X, Yu S S, Huang Z L, Xing F W. A survey on the invasive plants in Kap O Islands, Northeastern Hong Kong. *Bulletin of Botanical Research*, 2005, 25(2): 242-248.
- [31] Wang N X. Simple study on plants of adventitious invasion in Hanzhou City. *Forest Inventory and Planning*, 2008, 33(3): 125-128.
- [32] Ni L P, Guo S L, Huang H. On floral and geographical components and botanical traits of alien weeds in Jinhua suburban. *Journal of Zhejiang Normal University(Natural Sciences)*, 2007, 30(1): 80-87.
- [33] Huang H N, Li S L, Zhu Z H, Huang Y F, Liu L L. The external invasion plants in Zhuhai. *Guangdong Landscape Architecture*, 2005, 27(6): 24-27.
- [34] Qu B. Investigation on alien invasive injurious plant in Shenyang region. *Liaoning Agricultural Sciences*, 2003, (4): 29-31.
- [35] Jiang Q C, Lin Z M, Li L, He X Y. An investigation on the invasive plants in Zhongshan, Guangdong Province. *Forestry Science and Technology of Guangdong Province*, 2008, 24(2): 54-58.
- [36] Shi S Z, Tian M J, Liu Y C. Investigation and study on the alien invasive plants in Chongqing. *Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition)*, 2004, 29(5): 863-866.
- [37] Deng X C, Lu X. A preliminary study on the invasive plants in Yizhou City. *Journal of Hechi Normal College*, 2004, 24(2): 72-74.
- [38] Zhang Y. Investigation and analysis of alien weeds in Urumqi. *Journal of Fuyang Teachers College(Natural Science)*, 2007, 24(2): 52-55.
- [39] Zhang H B. The harmful exotic plants in Xiamen area. *Subtropical Plant Science*, 2005, 34(1): 50-55.
- [40] Qin W H, Wang Z, Xu W G, Jiang M K. Investigation and analysis on alien invasive plants in three national nature reserves in Hainan Province. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2008, 17(2): 44-49.
- [41] Wang Z, Dong S Y, Luo Y Y, Ouyang C J, Wang R J. Invasive plants in Guangzhou, China. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2008, 16(1): 29-38.
- [42] Jia C H, Yu G Y, Zhang F, Luo C, Qiu J Y, Zhang Z L. A preliminary report on the alien invasive species in Beijing. *Plant Protection*, 2005, 31(3): 38-41.
- [43] Zhu B H, Hu X Y. Status of harmfully exotic plants and control strategy in waterfront district of Nanchang. *JiangXi Plant Protection*, 2005, 28(3): 135-138.
- [44] Chen Q X, Wei C Q, Tang S C, Pu G Z, Pan Y M. The Alien Invasive Plants in Guilin City, Guangxi Zhuangzu Autonomous Region. *Subtropical Plant Science*, 2008, 37(3): 55-58.
- [45] Guan Z B, Deng W H, Huang Z L, Huang N Y, Ai L, Li C Y. A preliminary investigation on the alien invasive plants in Xishuangbanna. *Tropical Agricultural Science & Technology*, 2006, 29(4): 35-38.
- [46] Wang F G, Xing F W, Ye H G, Chen X Y, Tan G G, Mai B L. Preliminarily study on invasive alien species in Macau. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2004, 43(Suppl.): 105-110.
- [47] Luo Y, Liu A H. Preliminary research on alien invasive plants of Qingdao. *Shandong Science*, 2008, 21(4): 19-23.
- [48] Cao F, Song X L, He Y H, Qiang S, Qin W H, Jiang M K. Investigation of alien invasive plants in Huizhou Mangrove Natural Reserve. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2007, 16(4): 61-66.
- [49] Zhao J M. Study on the main exotic invasive plant species in Ruili, Yunnan. *Journal of Southwest Forestry College*, 2007, 27(1): 20-24.
- [50] Qin X S, Zhang R J, Chen H F, Yan Y H, Zheng X L, Xing F W. Alien plants in limestone regions of Hainan Island, China. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(11): 1861-1868.
- [51] Zhang S M, Han Q Z. Preliminary study on foreign plants in DaLian. *Journal of Liaoning Normal University (Natural Science)*, 1997, 20(4): 323-330.
- [52] Yan Y H, Xing F W, Huang X X, Fu Q, Qin X S, Chen H F. Exotic plants in Shenzhen, China. *Guihaia*, 2004, 24(3): 232-238.
- [53] Li B, Wang Y, He C G. Primary research on exotic plants in Changchun area. *Journal of Changchun Normal University(Natural Science)*, 2007, 26(5): 85-88.
- [54] Xu C D, Dong X D, Lu S G. Invasive plants in Honghe River Basin of Yunnan Province, China. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(2): 194-200.
- [55] Ren Y, Yang X Z, Wang X J, Zheng S F. *Animal and Plant Resources of Changqing National Nature Reserve*. Xi'an: Northwest University Press, 2002.

- [56] Qinghai Institute of Biology. Inspection Report of Plants and Animals in Ngari, Tibet. Beijing: Science Press, 1979.
- [57] Integrated Team of Wuyan Hill Nature Reserve. Integrated Inspection Report of Natural Resources in Wuyan Hill Nature Reserve. Wenzhou: Edited by Integrated Team of Wuyan Hill Nature Reserve, 1984.
- [58] Integrated Team of Huaping Forests, Guangxi. Integrated Inspection Report of Huaping Forests, Guangxi. Jinan: Shangdong Science and Technology Press, 1986.
- [59] Liu P. Study on the Flora of Mazongling Nature Reserve of Jinzhai County, Anhui Province. Shanghai: East China Normal University, 1989.
- [60] Zou L X, Wu G F. Study on the flora of Zhutoujian Mountainous Region of Shucheng County, Anhui Province. Journal of East China Normal University (Natural Science), 1997, (3): 78-84.
- [61] Chen L S. Initial exploration of botanical system in Guanshan nature protection district. Jiangxi Forestry Science and Technology, 2002, (1): 13-15.
- [62] Tang Y F, Wu G F. Study on the flora of Sanqingshan Mountainous Region, Jiangxi Province. Journal of East China Normal University (Natural Science), 1990, (1): 104-108.
- [63] Zhou Y, Feng Z J. A study on the flora of Longwangshan Mountain in Zhejiang Province. Journal of East China Normal University (Natural Science), 1993, (1): 88-94.
- [64] Lin L G, Lin Y R, Zhang Y T. A list of vascular plants from Wuyishan, north Fujian. Wuyi Science Journal, 1981, 1(Suppl.): 17-69.
- [65] Tianmushan Nature Reserve Authority. Comprehensive Investigation Report on Natural Resource of Tianmu Mountain Nature Reserve. Hangzhou: Zhejiang Science and Technology Publishing House, 1992.
- [66] Xie Z W. Study on the Flora of Duozhijian Mountainous Region of Yuexi County, Anhui Province. Shanghai: East China Normal University, 1990.
- [67] Hong Q P, Ding P, Ding B Y. Study and Research on the Natural Resources of Fengyang Mountainous Region. Beijing: China Forestry Publishing House, 2007.
- [68] Chen T B, Lou M L, Ye H S, Lou Z H, Chen X B. List of major plant and distribution in Yiwu County, Zhejiang Province. East China Forest Management, 2004, 18(suppl): 21-42.
- [69] Xu X Y, Wang T K, Meng X D, Zhang F J, Long R, Guo X M, Zhang B. A list of seed plants in Laoling Nature Reserve. Journal of Hebei Normal University of Science & Technology, 2008, 22(1): 6-20.
- [70] Zhao J C, Wu Y F, Guan W L. Scientific Survey and Study on Biodiversity in Hebei Tuoliang Nature Reserve. Beijing: Science Press, 2008.
- [71] Yuan Y X, Song C S. Scientific Survey of Baishilazi Nature Reserve. Beijing: China Forestry Publishing House, 1998.
- [72] Wang Y, Song G Y, Cao T, Guo S L. Determination on niche of early spring weeds in Shanghai suburb. Journal of Shanghai Jiaotong University (Agricultural Science), 2007, 25(1): 38-44.
- [73] Wu H R, Qiang S, Lin J C. Quantitative survey on spring exotic weeds and the niche characteristics of dominant species in Nanjing. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2004, 24(11): 2061-2068.
- [74] Shi Y, Xie S L, Wang H L. Study on the exotic invasive plants in Shanxi Province. Journal of Tianjin Normal University (Natural Science Edition), 2006, 26(4): 23-27.
- [75] Liu S X, Qin W. Study on the current status of invasive plants in Hubei Province. Journal of Central China Normal University(Natural Sciences), 2004, 38(2): 223-227.
- [76] Liu X J. Floristic Geography of the Taizi Mountains in Gansu Province. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2005.
- [77] Zhang Y, Yan L, Jiang X L. The species and damages of the main weeds in lawns in Xining City. Pratacul Tural Science, 2005, 22(7): 53-58.
- [78] Zuo Z, Wang F, Wen X F, Chen Y Y, Guo Y Z. The species of farmland weed and its prevention and cure actuality in MaoWuSu sand-desert in Ningxia Yanchi. Pratacul Tural Science, 2004, 21(8): 71-77.
- [79] Liu Y H. A Study on the Wild Plant Resources of theVolcano Reserve District of Wudalianchi. Yanji: Yanbian University, 2006.
- [80] Wu R G R L. Study on the Flora of the Vascular Plants in the Dalinor National Nature Reserve. Huhehaote: Inner Mongolia Agricultural University, 2008.
- [81] Xu H G, Wang J M, Qiang S, Wang C Y. Alien Species Invasion Biosafety Genetic Resources. Beijing: Science Press, 2004.
- [82] Xu H G, Qiang S. Inventory-Invasive Alien Species In China. Beijing: China Environmental Science Press, 2004.
- [83] Ter Braak C J F. Canonical correspondence analysis:a new eigenvector technique for multivariate direct gradient Analysis. Ecology, 1986, 67: 1167-1179.
- [84] Zeng B W. Biological Invasion. Beijing: Chemical Industry Press, 2004: 88.
- [85] Peng S L, Xiang Y C. The invasion of exotic plants and effects of ecosystems. Acta Ecologica Sinica, 1999, 19(4): 560-569.
- [86] Ding J Q, Mack R N, Lu P, Ren M X, Huang H W. China's booming economy is sparking and accelerating biological invasions. BioScience, 2008, 58(4): 317-324.

- [87] Lin W, Zhou G F, Cheng X Y, Xu R M. Fast economic development accelerates biological invasions in China. *PLoS ONE*, 2007, 2(11): 1-6.
- [88] Weber E, Li B. Plant invasions in China: What is to be expected in the wake of economic development. *BioScience*, 2008, 58(5): 437-444.
- [89] McKinney M L. Influence of settlement time, human population, park shape and age, visitation and roads on the number of alien plant species in protected areas in the USA. *Diversity and Distributions*, 2002, (8): 311-318.
- [90] Weber E, Gut D. Assessing the risk of potentially invasive plant species in central Europe. *Journal of Natural Conservation*, 2004, (12): 171-179.
- [91] Crosti R, Cascone C, Testa W. Towards a Weed risk assessment for the Italian peninsula: preliminary validation of a scheme for the Central Mediterranean region in Italy. *Proceedings of the MEDECOS XI Conference*, Perth, Western Australia, 2007, 53-54.
- [92] Ou J, Lu C Y, Toole Desmond K. A risk assessment system for alien plant bio-invasion in Xiamen, China. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, (20): 989-997.

参考文献:

- [2] 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.
- [3] 吴彤, 李俊祥, 戴洁, 王仁卿. 山东省外来植物的区系特征和空间分布. *生态学杂志*, 2007, 26(4): 489-494.
- [10] 李振宇, 解焱. 中国外来入侵种. 北京: 中国林业出版社, 2002.
- [11] 汪小飞, 程轶宏, 赵昌恒, 伍全根. 黄山市外来入侵植物分析. *江苏林业科技*, 2007, 34(6): 23-27.
- [12] 周繇. 长白山区外来入侵植物的初步研究. *首都师范大学学报(自然科学版)*, 2003, 24(4): 55-58.
- [13] 林茂祥, 韩凤, 刘正宇, 任明波, 刘翔, 张军. 金佛山自然保护区外来入侵植物初步研究. *杂草科学*, 2007, (4): 26-28.
- [14] 李海生, 钟化龙, 刘广, 梁磷, 宁国胜. 广州白云山外来入侵植物初步研究. *广东教育学院学报*, 2008, 28(3): 65-68.
- [15] 胡天印, 蒋华伟, 方芳, 郭水良. 庐山风景区的外来入侵植物. *江西林业科技*, 2007, (3): 19-23.
- [16] 赵宏, 董翠玲. 山东昆崙山外来入侵植物调查研究. *江西科学*, 2007, 25(4): 390-396.
- [17] 韦原莲, 叶铎, 温远光, 门媛媛. 广西十万大山自然保护区外来入侵植物研究. *林业科技开发*, 2006, 20(6): 23-26.
- [18] 林茂祥, 刘正宇, 韩凤, 任明波, 张军. 贵州大沙河自然保护区外来入侵植物种调查. *杂草科学*, 2008, (1): 31-32.
- [19] 谢红艳, 龚玉子, 左家哺. 南岳自然保护区外来入侵植物的初步研究. *湖南林业科技*, 2007, 34(2): 22-24.
- [20] 卢少飞, 刘胜祥, 方元平. 星斗山国家级自然保护区外来入侵植物初步研究. *黄冈师范学院学报*, 2005, 25(3): 48-52.
- [21] 胡刚, 张忠华, 董金延, 梁士楚. 安徽淮北地区外来入侵植物初步研究. *合肥学院学报(自然科学版)*, 2005, 15(2): 41-45.
- [22] 彭友林, 王云, 周国庆, 周国锋, 王文龙. 洞庭湖区外来有害植物种类、分布及危害的研究. *安徽农业科学*, 2008, 36(3): 1114-1116.
- [23] 韦美玉, 刘丽萍, 文治瑞. 贵州黔南地区外来植物逸生及危害调查. *贵州农业科学*, 2006, 34(2): 35-38.
- [24] 张荣京, 邢福武, 吴世捷, 叶育石, 王发国, 陈焕强. 海南鹦哥岭的外来植物与生态环境影响评价. *生态环境*, 2007, 16(3): 906-911.
- [25] 朱开建, 王博, 孙雷, 陈剑榕. 厦门大屿岛白鹭自然保护区外来入侵植物. *厦门科技*, 2006, (3): 38-41.
- [26] 秦卫华, 余水评, 蒋明康, 王智, 陈雪珍, 徐网谷. 上海市国家级自然保护区外来入侵植物调查研究. *杂草科学*, 2007, (1): 29-33.
- [27] 张桂宾. 开封地区主要外来入侵植物研究. *河南大学学报(自然科学版)*, 2004, 34(1): 56-59.
- [28] 李惠欣. 河北衡水湖自然保护区入侵植物及其管理. *湿地科学与管理*, 2008, 4(2): 51-53.
- [29] 张桂宾. 豫东农区外来入侵植物及其防控. *商丘师范学院学报*, 2006, 22(2): 153-156.
- [30] 严岳鸿, 何祖霞, 余书生, 黄忠良, 邢福武. 香港东北角吉澳群岛入侵植物调查. *植物研究*, 2005, 25(2): 242-248.
- [31] 王嫩仙. 杭州市外来入侵植物初步研究. *林业调查桂花*, 2008, 33(3): 125-128.
- [32] 倪丽萍, 郭水良, 黄华. 金华市郊外来杂草的区系地理及植物学性状分析. *浙江师范大学学报(自然科学版)*, 2007, 30(1): 80-87.
- [33] 黄辉宁, 李思路, 朱志辉, 黄永锋, 刘柳亮. 珠海市外来入侵植物调查. *广东园林*, 2005, 27(6): 24-27.
- [34] 曲波. 沈阳地区外来入侵有害植物的调查. *辽宁农业科学*, 2003, (4): 29-31.
- [35] 蒋谦才, 林正眉, 李荔, 何秀云. 中山市外来入侵植物调查研究. *广东林业科技*, 2008, 24(2): 54-58.
- [36] 石胜璋, 田茂洁, 刘玉成. 重庆外来入侵植物调查研究. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 2004, 29(5): 863-866.
- [37] 邓晰朝, 卢旭. 宜州市外来入侵植物的初步研究. *河池师专学报*, 2004, 24(2): 72-74.
- [38] 张源. 乌鲁木齐市外来杂草的调查与分析. *阜阳师范学院学报(自然科学版)*, 2007, 24(2): 52-55.
- [39] 张恒彬. 厦门地区的有害外来植物. *亚热带植物科学*, 2005, 34(1): 50-55.
- [40] 秦卫华, 王智, 徐网谷, 蒋明康. 海南省 3 个国家级自然保护区外来入侵植物的调查和分析. *植物资源与环境学报*, 2008, 17(2): 44-49.
- [41] 王忠, 董壮勇, 罗燕燕, 欧阳婵娟, 王瑞江. 广州外来入侵植物. *热带亚热带植物学报*, 2008, 16(1): 29-38.
- [42] 贾春虹, 虞国跃, 张帆, 罗晨, 裘季燕, 张芝利. 北京地区外来入侵生物种类调查初报. *植物保护*, 2005, 31(3): 38-41.
- [43] 朱碧华, 胡雪雁. 南昌湖滨地区外来有害植物的现状及防治对策. *江西植保*, 2005, 28(3): 135-138.
- [44] 陈秋霞, 韦春强, 唐赛春, 蒲高忠, 潘玉梅. 广西桂林外来入侵植物调查. *亚热带植物科学*, 2008, 37(3): 55-58.

- [45] 管志斌,邓文华,黄志玲,黄妮娅,艾力,李春云. 西双版纳外来入侵植物初步调查. 热带农业科技, 2006, 29(4): 35-38.
- [46] 王发国,邢福武,叶华谷,陈孝永,谭国光,麦保林. 澳门的外来入侵植物. 中山大学学报(自然科学版), 2004, 43(增刊): 105-110.
- [47] 罗艳,刘爱华. 青岛外来入侵植物的初步研究. 山东科学, 2008, 21(4): 19-23.
- [48] 曹飞,宋小玲,何云核,强胜,秦卫华,蒋明康. 惠州红树林自然保护区外来入侵植物调查. 植物资源与环境学报, 2007, 16(4): 61-66.
- [49] 赵见明. 瑞丽主要外来入侵植物. 西南林学院学报, 2007, 27(1): 20-24.
- [50] 秦新生,张荣京,陈红锋,严岳鸿,郑希龙,邢福武. 海南岛石灰岩地区的外来植物. 生态学杂志, 2008, 27(11): 1861-1868.
- [51] 张淑梅,韩全忠. 大连地区外来植物的初步研究. 辽宁师范大学学报(自然科学版), 1997, 20(4): 323-330.
- [52] 严岳鸿,邢福武,黄向旭,付强,秦新生,陈红锋. 深圳的外来植物. 广西植物, 2004, 24(3): 232-238.
- [53] 李斌,王咏,何春光. 长春地区外来植物的初步研究. 长春师范学院学报(自然科学版), 2007, 26(5): 85-88.
- [54] 徐成东,董晓东,陆树刚. 红河流域的外来入侵植物. 生态学杂志, 2006, 25(2): 194-200.
- [55] 任毅,杨兴中,王学杰,郑松峰. 长青国家级自然保护区动植物资源. 西安: 西北大学出版社, 2002.
- [56] 青海省生物研究所. 西藏阿里地区动植物考察报告. 北京: 科学出版社, 1979.
- [57] 乌岩岭自然保护区综合考察队. 乌岩岭自然保护区自然资源综合考察报告. 温州: 乌岩岭自然保护区综合考察队编, 1984.
- [58] 广西花坪林区综合考察队. 广西花坪林区综合考察报告. 济南: 山东科学技术出版社, 1986.
- [59] 刘鹏. 安徽金寨县马宗岭自然保护区植物区系的研究. 上海: 华东师范大学, 1989.
- [60] 邹联新,吴国芳. 安徽省舒城县猪头尖山区植物区系的研究. 华东师范大学学报(自然科学版), 1997, (3).
- [61] 陈利生. 官山自然保护区植物区系初探. 江西林业科技, 2002, (1): 13-15.
- [62] 汤艺峰,吴国芳. 江西三清山植物区系的研究. 华东师范大学学报(自然科学版), 1990, (1): 104-108.
- [63] 周毅,冯志坚. 浙江龙玉山植物区系的研究. 华东师范大学学报(自然科学版), 1993, (1): 88-94.
- [64] 林来官,林有润,张永田. 武夷山自然保护区维管束植物名录. 武夷科学, 1981, 1(增刊): 17-69.
- [65] 天目山自然保护区管理局. 天目山自然保护区自然资源综合考察报告. 杭州: 浙江科学技术出版社, 1992.
- [66] 谢中稳. 安徽省岳西县多枝尖山区植物区系的研究. 上海: 华东师范大学, 1990.
- [67] 洪起平,丁平,丁炳扬. 凤阳山自然资源考察与研究. 北京: 中国林业出版社, 2007.
- [68] 陈天宝,楼明林,叶洪寿,楼中华,陈小宝. 浙江省义乌市主要植物名录及分布. 华东森林经理, 2004, 18(增刊): 21-42.
- [69] 徐兴友,王同坤,孟宪东,张凤娟,龙茹,郭学民,张波. 老岭(祖山)自然保护区种子植物名录. 河北科技师范学院学报, 2008, 22(1): 6-20.
- [70] 赵建成,吴跃峰,关文兰. 河北驼梁自然保护区科学考察与生物多样性研究. 北京: 科学出版社, 2008.
- [71] 袁永孝,宋朝枢. 白石砬子自然保护区科学考察集. 北京: 中国林业出版社, 1998.
- [72] 王勇,宋国元,曹同,郭水良. 上海市郊早春杂草的生态位计测. 上海交通大学学报(农业科学版), 2007, 25(1): 38-44.
- [73] 吴海荣,强胜,林金成. 南京市春季外来杂草调查及生态位研究. 西北植物学报, 2004, 24(11): 2061-2068.
- [74] 石瑛,谢树莲,王惠玲. 山西外来入侵植物的研究. 天津师范大学学报(自然科学版), 2006, 26(4): 23-27.
- [75] 刘胜祥,秦伟. 湖北省外来入侵植物的初步研究. 华中师范大学学报(自然科学版), 2004, 38(2): 223-227.
- [76] 刘晓娟. 甘肃省太子山植物区系地理研究. 兰州: 甘肃农业大学, 2005.
- [77] 张英,严林,江小蕾. 西宁地区草坪主要杂草种类和危害情况调查及其防除对策. 草业科学, 2005, 22(7): 53-58.
- [78] 左忠,王峰,温学飞,陈芸芸,郭永忠. 宁夏盐池县农田杂草种类及防治技术. 草业科学, 2004, 21(8): 71-77.
- [79] 刘艳华. 五大连池火山保护区野生植物资源调查研究. 延吉: 延边大学, 2006.
- [80] 乌仁格日勒. 达里诺尔自然保护区维管植物区系研究. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2008.
- [81] 徐海根,王建民,强胜,王长永. 外来物种入侵生物安全遗传资源. 北京: 科学出版社, 2004.
- [82] 徐海根,强胜. 中国外来入侵种编目. 北京: 中国环境科学出版社, 科学出版社, 2004.
- [84] 曾北危. 生物入侵. 北京: 化学工业出版社, 2004: 88.