

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1787.20240098

四川省青川县外来入侵植物现状及风险评估

华茹婷¹, 单凯歌¹, 张太红¹, 冷焕琨¹, 杨建^{1*}, 杨孔^{1*}, 杨阳², 李汶泽³, 任晓¹
¹西南民族大学草地资源学院, 四川成都 610225; ²西藏大学生态环境学院青藏高原生物多样性
与生态环境保护教育部重点实验室, 西藏拉萨 850000; ³青川县林业局, 四川广元 628100

摘要:【目的】摸清四川省青川县外来入侵植物的现状并评估入侵风险, 为青川县外来入侵植物防控和生态安全的保护提供科学依据。【方法】采用样线法、样方法, 结合文献资料和官方公布名单, 开展青川县外来入侵植物调查, 对入侵植物科属种的组成、原产地、植物生活型、分布情况进行统计分析; 采用层次分析法, 共筛选出 44 个指标, 以传入定殖风险、扩散风险、潜在危害与影响、危害控制这 4 个方面为切入点, 构建青川县外来入侵植物风险评估体系, 同时, 对青川县外来入侵植物进行风险等级划分。【结果】青川县共有 32 种外来入侵植物, 分属于 12 科 25 属, 以菊科为最多, 有 13 种, 占总种数的 40.6%, 禾本科和茄科次之, 均为 3 种, 占总种数的 9.4%; 原产地为美洲的外来入侵植物占总种的 62.5%; 外来入侵植物中一年生草本植物最多, 有 14 种, 占总种数的 43.8%; 根据入侵等级将外来入侵植物分为极高风险类(I 级)3 种(加拿大一枝黄花、喜旱莲子草和土荆芥)、高风险类(II 级)6 种、中风险类(III 级)10 种、低风险类(IV 级)13 种。外来入侵植物主要分布在车流量大的高速公路、各乡镇间必经的车道两侧、人类活动频繁的居住地, 而在崎岖小路两侧和管理严格的保护区内外来入侵植物少。【结论】青川县外来入侵植物分布范围较广, 风险水平不同, 需针对外来入侵植物的入侵风险等级进行分类施策和分区分级管理, 科学防控, 最大限度保护青川县生物多样性和生态安全。

关键词: 青川县; 外来入侵植物; 风险评估; 风险等级



开放科学标识码
(OSID 码)

Current status and risk assessment of invasive alien plants in Qingchuan County, Sichuan Province, China

HUA Ruting¹, SHAN Kaige¹, ZHANG Taihong¹, LENG Huankun¹, YANG Jian^{1*},
YANG Kong^{1*}, YANG Yang², LI Wenzhe³, REN Xiao¹

¹ College of Grassland and Resources of Southwest Minzu University, Chengdu, Sichuan 610225, China; ² Key Laboratory of Biodiversity and Environment on the Qinghai-Xizang Plateau, Ministry of Education, School of Ecology and Environment, Xizang University, Lhasa, Xizang 850000, China; ³ Qingchuan County Forestry Bureau of Sichuan Province, Guangyuan, Sichuan 628100, China

Abstract: 【Aim】 In this study, we sought to ascertain the invasibility of Qingchuan County, Sichuan Province, China, to provide a scientific foundation for preventing and controlling exotic invasive species and safeguarding ecological security within the region. 【Method】 The investigation into alien invasive plants in Qingchuan County was conducted utilizing the sample line and quadrat methods, augmented by a review of pertinent literature and officially published lists. Statistical analyses were performed on invasive plant families and genera, their regions of origin, types of plant life, and distribution levels. Subsequently, by applying the analytic hierarchy process, 44 indicators were identified to formulate a risk assessment system for invasive alien plants in Qingchuan County, focusing on the four dimensions of incoming colonization risk, dispersal risk, potential hazards and impacts, and hazard control. The invasive alien plants in Qingchuan County were classified into distinct risk categories. 【Result】 The results revealed 32 species of invasive alien plants in Qingchuan County, representing 12 families and 25 genera. The Asteraceae family was the most significant, comprising 13 species, which accounts for 40.6% of the total species, followed by the Poaceae and Solanaceae families, each contain-

收稿日期(Received): 2024-07-11 接受日期(Accepted): 2024-09-25

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项基金项目(自科)(ZYN2022090); 四川省自然科学基金项目(2022NSFSC1693); 四川省国际科技合作与交流项目(2020YFH0107); 四川省留学归国人员择优资助项目

作者简介: 华茹婷, 女, 硕士研究生。研究方向: 动物生态学。E-mail: 1207870403@qq.com

* 通信作者(Author for correspondence), 杨建, E-mail: yjian_1210@163.com; 杨孔, E-mail: lx-yk@163.com

ning three species and contributing 9.4% of the total species. Analysis of the invasive alien plant origins revealed that most of these invasive alien plant species were native to the Americas, accounting for 62.5% of the total species. Annual herbs exhibited markedly higher adaptability than other invasive types, with 14 species accounting for 43.8% of the total species. Based on the invasion severity, three species were identified as belonging to the very high-risk category (Level I): *Solidago canadensis*, *Alternanthera philoxeroides*, and *Dysphania ambrosioides*. Additionally, six species were classified as high-risk (Level II), ten as medium-risk (Level III), and 13 as low-risk (Level IV). The distribution profile indicated that invasive alien plants proliferated along major traffic intersections of highways, flanking roads linking different towns, and in areas characterized by frequent human activities, such as residential zones. Conversely, they are less prevalent along winding paths and within strictly protected areas. 【Conclusion】 The presence of numerous invasive alien plants in Qingchuan County, each exhibiting varying levels of risk, necessitates the implementation of classified policies alongside zoning and hierarchical management strategies tailored to these differing invasion risk levels. Scientific prevention and control must be conducted, thereby maximizing biodiversity conservation and ecological security in Qingchuan County.

Key words: Qingchuan County; invasive alien plants; risk assessment; risk level

四川省广元市青川县位于四川盆地北部边缘,区域内生物资源丰富,森林覆盖面积大,有典型山地垂直带,植被类型丰富多样,生态系统稳定,拥有国家级保护区和多个省级保护区,是国家重点生态功能区(李峰,2021)。近年来,青川县开启全域旅游发展的快车道后,游客接待人数年年攀升,促进青川县经济发展的同时,也无形中加大了外来入侵植物成功侵入的机会(李华方,2021)。党辉(2021)对青川县草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* J.E.mith 进行了研究,探讨其发生规律与防治方法。目前,鲜有对青川县的外来物种入侵问题的研究,缺乏对青川县外来入侵植物种类、范围及其风险等级的系统性研究。

本研究通过样线法、样方法对青川县外来入侵植物的入侵现状进行全面调查。同时,采用有害生物风险评估体系(pest risk analysis, PRA)和层次分析法(the analytic hierarchy process, AHP)(蒋青等,1995;李惠茹等,2022;王铁梅等,2020),全面分析青川县外来入侵植物的概况,划分入侵等级,对其进行科学有效的入侵风险评估,并提出针对青川县外来入侵植物的管控建议和措施,从而为青川县外来入侵植物分级监测策略和防控措施的制定提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

青川县(32°12'—32°56'N, 104°36'—105°38'E)隶属于四川省广元市,地处四川盆地北部边缘,白龙江下游,为川、甘、陕三省结合部。青川县属于亚热带湿润季风气候,全年平均温度为13.7℃,全

年平均降雨量为1027 mm,平均蒸发量为727.9 mm;全县森林面积达234765 hm²,森林覆盖率达71.8%,海拔梯度大植被类型丰富且分布复杂(李峰,2021)。青川县拥有国家级生态旅游示范区、国家级和省级保护区等共计60多个旅游景点,同时还是国家大熊猫公园建设的重点区域,境内交通设施建设完善,公路通车总里程4000 km,交通条件便利(李华方,2021)。

1.2 资料收集

根据《全国森林、草原、湿地调查监测技术规程》(国家林业和草原局森林资源管理司,2022)、中国外来入侵物种名单、《中国外来入侵植物名录》(马金双和李惠茹,2018)、《中国植物志》(中国科学院中国植物志编辑委员会,2016)、《四川植物志》(四川植物志编辑委员会,1981—2017)、《中国外来入侵植物图鉴》(万方浩等,2012)等资料确定拟调查植物名单。

1.3 外来入侵植物调查方法

2023年1—9月开展野外调查。在青川县的每个乡镇布设调查点位和样线,包含了乔木林地、灌木林地、河流水面、湖泊水面、坑塘水面、内陆滩涂、公园绿地、荒地等主要生境类型,共63个调查点位和219条样线,其中每条样线长3~4 km,宽20 m,基本覆盖整个青川县[图1,底图下载自国家地理信息公共服务平台 <https://www.tianditu.gov.cn/>,审图号GS(2024)0650号]。记录样线上外来入侵植物的种类、生境、海拔和经纬度,并设置样方来记录其高度、优势度和种群面积。样方规格分别为乔木10 m×10 m,灌木5 m×5 m,草本1 m×1 m。

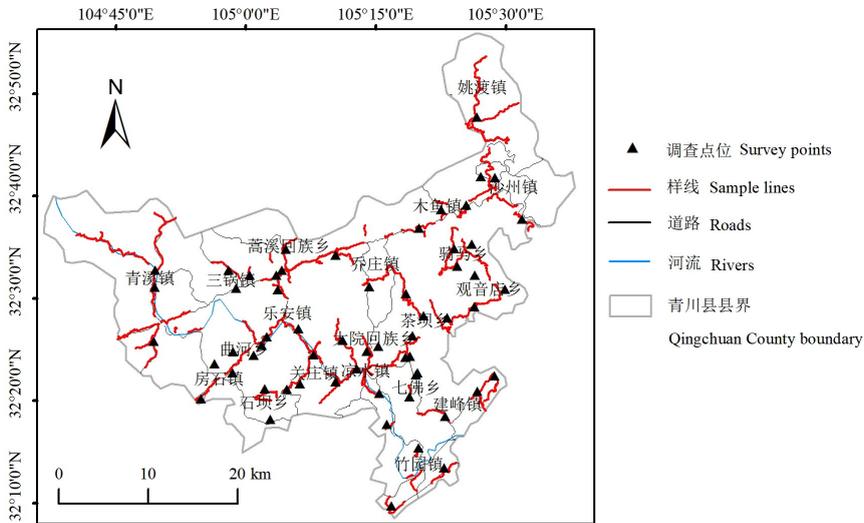


图 1 青川县外来入侵植物调查点位和样线图

Fig.1 Survey points and sample lines map of alien invasive plants of Qingchuan County

1.4 建立外来入侵植物风险评估体系

在调查的基础上,结合文献资料,针对外来入侵植物的传入、扩散、危害及控制 4 个阶段的关键特性,收集文献中普遍关注的指标,根据青川县自身环境的特殊性,筛选出适用于青川县外来入侵植物风险评估的指标(李惠茹等,2022; Pheloung *et al.*, 1999),并根据专家建议补充部分指标。基于指标重要性和隶属关系确定 4 个一级指标,然后根据每个阶段的关键性构建 14 个二级指标,再细化成为可操作性高的三级指标,并对其进行详细的描述。评估系统总分为 100 分,遵循科学系统性原则、重要实用性原则、可操作性、独立性及层次性等原则,对各指标进行综合分析,构建判断矩阵,确定风险评估体系中各指标的权重,根据权重分配分值,用等权法和手动赋权的方法确立三级指标的分值,最终得出各外来入侵植物的相应总分值(刘莹昕等,2014)。

1.5 数据分析

1.5.1 绘制热力图 将野外调查中收集到的外来入侵植物的全部分布点位经 Excel 软件处理后,保存为 csv 格式,导入 Arcgis 10.8.1 软件中,作投影处理后进行核密度可视化分析。

1.5.2 指标获取方法 用两步路 APP 实时定位,记录海拔、经纬度;用精度为 0.1 cm 的钢尺测量植物高度,超过 1 m 的植物用卷尺测量;种群面积即样方内外来入侵植物冠层部分的投影面积,采用垂直投影法,依据植物在样方内 100 个 10 cm×10 cm 网格中的投影面积估算;采用综合优势度指标

(synthetic dominance index, SDR) 衡量入侵植物的优势度(Zhao *et al.*, 2022),即用植物的相对盖度、相对高度和相对密度三者平均值表示。

1.5.3 构建风险评估模型 根据有害生物风险评估体系和层次分析(蒋青等,1995; 刘莹昕等,2014),将青川县外来植物入侵风险评估体系分为 4 层,分别为目标层、准则层、指标层、操作层。目标层为统领目标,准则层为一级指标有 4 个关键指标,指标层为二级指标有 14 个细分指标,操作层为三级指标有 44 个操作性强的指标。目标层是最高层次结构,准则层、指标层、操作层依次为上层级的分解。

1.5.4 建立判断矩阵 基于结构模型和层次分析法构建判断矩阵,进一步明确准则层 4 个指标间的重要性关系,以及同一准则层下不同指标层的重要性关系。对目标层和准则层中传入定殖风险和扩散风险构建四阶矩阵,潜在危害与影响和危害控制构建三阶矩阵。运用 5 分位比例标度进行评判打分,矩阵中 2 个指标重要性一致为 1,前者重要性比后者重要性稍高、明显高、强烈高以及极端高分别从 2 到 5 递增。

1.5.5 计算各指标权重 对判断矩阵中各指标重要性评判赋值后,运用方根法计算各级指标权重 W_i ,步骤如下:

(1) 计算判断矩阵中每一行指标所赋值的乘积 M_i :

$$M_i = \prod_{j=1}^n a_{ij}, (i, j = 1, 2, 3, \dots, n).$$

(2) 计算 M_i 的 n 次方根 N_i :

$$N_i = \sqrt[n]{M_i}, (i=1, 2, 3, \dots, n)。$$

(3) 计算各指标权重 W_i :

$$W_i = \frac{N_i}{\sum_{i=1}^n N_i}, (i=1, 2, 3, \dots, n)。$$

1.5.6 计算一致性检验 构建的判断矩阵中,对各层次指标赋的评判分值需要经过一致性的检验来规范其科学性(刘莹昕等,2014)。具体步骤如下:

(1) 计算判断矩阵的最大特征值 λ_{\max} :

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{W_i}, (i=1, 2, 3, \dots, n)$$

式中, $(AW)_i$ 表示向量 AW 的第 i 个分量,需要将矩阵 A 与矩阵 W 相乘得到矩阵 AW ,进而获得 AW 的第 i 个分量。

(2) 计算一致性指标 CI :

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1)。$$

(3) 计算随机一致性检验 CR :

$$CR = CI / RI。$$

式中, RI 的值根据矩阵的阶数确定,三阶矩阵 RI 值为 0.52,四阶矩阵 RI 值为 0.89(王宜凡,2022),通常情况下,当 $CR < 0.1$ 时,说明通过一致性检验,具有科学性和准确性。

2 结果与分析

2.1 外来入侵植物物种组成及其原产地

青川县现有外来入侵植物 32 种,隶属 12 科 25 属。按照多种科(≥ 10 种)、中等种科(5~9 种)、寡

种科(2~4 种)、单种科(1 种)的标准划分子科类型(王友国等,2021),结果显示,12 科外来入侵植物中,菊科为多种科,有 13 种;禾本科、茄科(各 3 种),苋科、豆科、伞形科和旋花科(各 2 种)均为寡种科;黎科、紫茉莉科、葡萄科、商陆科、玄参科为单种科,共 5 科 5 种(附表 1,扫描本文 OSID 码查看详情)。

通过中国外来入侵物种信息系统确定外来入侵植物的原产地。根据青川县外来入侵植物种属特征,对比青川县和原产地的气候类型,进行外来入侵植物原产地的统计,对部分植物的多个原产地进行二次统计。结果发现,青川县外来入侵植物的原产地为美洲的最多,有 20 种,占总种数的 62.5%;原产地为欧洲的有 7 种,占总种数的 21.9%;原产地为亚洲的有 5 种,占总种数的 15.6%;原产地为非洲的有 4 种,占总种数的 12.5%;原产地为墨西哥、地中海沿岸的植物各有 1 种,各占总种数的 3.1%;有 1 种植物原产地来自巴西、巴拉圭、乌拉圭、阿根廷,占总种数的 3.1%。

2.2 外来入侵植物生活型

如表 1 所示,青川县外来入侵植物的生活型共有 7 种类型,其中,草本型植物最多,有 30 种,占总种数的 93.8%,尤其是一年生草本植物,有 14 种,占总种数的 43.8%;一年生或二年生草本排第二,有 8 种,占外来入侵植物总种数的 25.0%;多年生草本排第三,有 6 种,占总种数的 18.8%;最后,二年生草本、一年生草本或亚灌木、多年生藤本、灌木均为 1 种,占总种数的 3.1%。

表 1 青川县外来入侵植物生活型组成

Table 1 composition of invasive alien plants of life type of in Qingchuan County

生活型 Lifestyle	物种数量 Number of species	占总种数的比例 Percent of total species/%
一年生草本 Annual herb	14	43.8
二年生草本 Biennial herb	1	3.1
一年生或二年生草本 Annual or biennial herb	8	25.0
多年生草本 Perennial herb	6	18.8
一年生草本或亚灌木 Annual herbaceous or subshrub	1	3.1
多年生藤本 Perennial vine	1	3.1
灌木 Shrub	1	3.1

2.3 外来入侵植物分布图

如图 2 所示,总体上青川县外来入侵植物处于入侵中期阶段,且各区域受危害程度不同。以姚渡镇、蒿溪回族乡和青溪镇 3 个乡镇为例,外来入侵植物分布较多的地方,主要集中在交通较发达、人流量大的区域,例如:兰海高速和 212 国道的公路交汇处,现代茶叶旅游景区以及青溪客运站附近;

而在道路少且不便利,人为干扰小,以及自身稳定性又较高的阔叶林区域,外来入侵植物分布较少,例如:毛寨省级自然保护区、东阳沟省级自然保护区以及唐家河国家级自然保护区。

2.4 外来入侵风险评估

各层次指标的权重值经过一致性检验后,结果如下:准则层传入定殖风险、扩散风险、潜在危害与

影响、危害控制指标的权重值分别为0.346、0.383、0.152、0.119。传入定殖风险下环境因子适宜度、食物因子适宜度、生长繁殖特性、天敌情况指标的权重值分别为0.167、0.333、0.333、0.167；扩散风险下分布情况、现有管理措施、传播扩散能力、适生生境指标的权重值分别为0.311、0.127、0.281、0.281；潜

在危害与影响下对生态环境的影响、对社会经济的影响和危害对象重要程度指标的权重值分别为0.540、0.163、0.297；危害控制下检验鉴定识别难度、监测调查难度和控制管理难度指标的权重值分别为0.413、0.327、0.260。

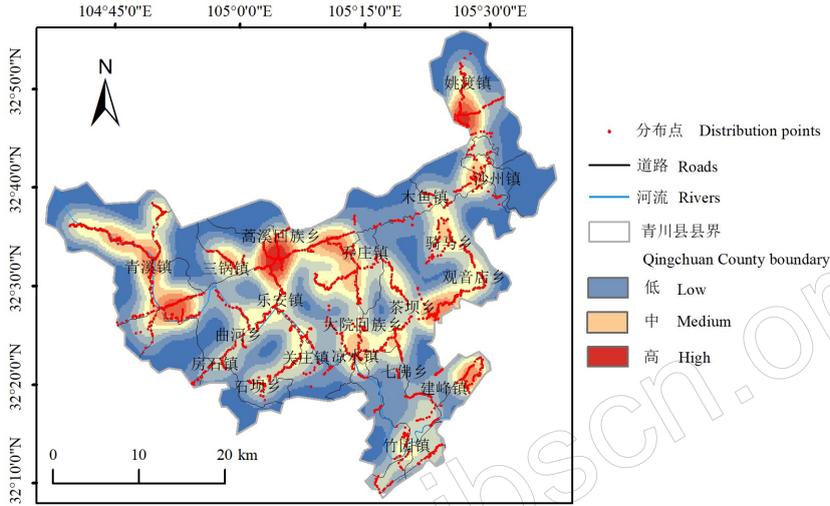


图 2 青川县外来入侵植物物种数量热力图

Fig.2 Heat map of the number of invasive alien plant species in Qingchuan County

2.5 青川县外来植物入侵风险评估体系的建立

根据上述判断矩阵中计算得出各指标的权重值,采用百分制原则对各指标进行赋分,基于准则层中 4 个指标的分值,采用等权法和手动赋权法对下属指标赋值,最终构建青川县外来植物入侵风险评估体系(表 2)。

2.6 青川县外来入侵植物风险评估分析

运用青川县外来入侵植物风险评估体系,对青川县外来入侵植物名录中的 32 种外来入侵植物进行风险评估,得分介于 33~86。通过查阅《中国外来入侵植物名录》中植物的入侵等级,结合本次调查现状及各植物风险评估的赋分,将青川县外来入侵植物划分为 4 个入侵等级: $R \geq 80$,为 I 级,极高风险水平; $60 \leq R < 80$,为 II 级,高风险水平; $40 \leq R < 60$,为 III 级,中风险水平; $R < 40$,为 IV 级,低风险水平。

统计可得,加拿大一枝黄花 *Solidago canadensis* L.、喜旱莲子草 *Alternanthera philoxeroides* (Mart.) Griseb.和土荆芥 *Dysphania ambrosioides* (L.) Mosyakin & Clemants 属极高风险水平,隶属于 3 科 3 属,占总种数的 9.4%。处于高风险水平的有 6 种,包括一年蓬 *E-rigeron annuus* L.、苏门白酒草 *Conyza sumatrensis* L.、垂

序商陆 *Phytolacca americana* L.、毛果茄 *Solanum viarum* Dunal、小蓬草 *Conyza canadensis* L.、白车轴草 *Trifolium repens* L.,隶属于 4 科 5 属,占总种数的 18.8%。处于中风险水平的有 10 种,如圆叶牵牛 *Ipomoea purpurea* (L.) Roth、大狼把草 *Bidens frondose* L.、钻叶紫菀 *Symphyotrichum subulatum* (Michx.) G. L. Nesom、白花鬼针草 *Bidens alba* L.、野莴苣 *Lactuca serriola* L.、细叶旱芹 *Cyclosporum leptophyllum* (Pers.) Sprague ex Britton & P. Wilson、野胡萝卜 *Daucus carota* L.、春飞蓬 *Erigeron philadelphicus* L.、粗毛牛膝菊 *Galinsoga quadriradiata* Ruiz & Pavon、黑麦草 *Lolium perenne* L.,隶属于 4 科 9 属,占总种数的 31.2%。处于低风险水平的有 13 种,变色牵牛 *Ipomoea indica* (J.Burman) Merrill、紫茉莉 *Mirabilis jalapa* L.、野燕麦 *Avena fatua* L.、五叶地锦 *Parthenocissus quinquefolia* L. Planch.、野苘蒿 *Crass-occephalum crepidioides* (Benth.) S. Moore、棕叶狗尾草 *Setaria palmifolia* (J. Konig) Stapf、少花龙葵 *Solanum americanum* Mill.、苦苣菜 *Sonchus oleraceus* L.、草木樨 *Melilotus officinalis* (L.) Pall.、阿拉伯婆婆纳 *Veronica persica* Poir.、婆婆针 *Bidens bipinnata* L.、珊瑚樱 *Solanum pseudocapsicum* L.、绿穗苋 *Amaranthu hybridus* L.,隶属于 9 科 12 属,占总种数的 40.6% (表 3)。

表2 青川县外来植物入侵风险评估体系

Table 2 Risk assessment system of alien plant invasion in Qingchuan County

目标层 Target layer	准则层 Criterion layer	指标层 Index layer	操作层 Operational layer			
四川省青川县外来入侵植物风险评估 Risk assessment of invasive alien plants in Qingchuan County, Sichuan Province, China	传入定殖风险 Risk of afferent colonization (35)	环境因子适宜度 Suitability of environmental factors (8.5)	气候环境、水环境的适宜度低 The suitability of the climatic environment and water environment is low (0.5) 气候环境、水环境的适宜度一般 The suitability of the climatic environment and water environment is average (4.5) 气候环境、水环境的适宜度高 The suitability of the climatic environment and water environment is average (8.5)			
		食物因子适宜度 Suitability of food factors (8.5)	动物、昆虫、微生物以及土壤因子不适宜植物生存 Animals, insects, microbes and soil nutrient factors are not suitable for plant survival (0.5) 动物、昆虫、微生物以及土壤因子一般适宜植物生存 Animals, insects, microbes and soil nutrient factors are moderately suitable for plant survival (4.5) 动物、昆虫、微生物以及土壤因子非常适宜植物生存 Animals, insects, microbes and soil nutrient factors are very much suitable for plant survival (8.5)			
		生长繁殖特性 Growth and reproduction characteristics (12)	繁殖能力弱 Weak reproduction capacity (4) 繁殖能力一般 Average reproduction capacity (8) 繁殖能力强 High reproduction capacity (12)			
	天敌情况 Natural enemies (6)	天敌控制能力强 Strong natural enemy control (2) 其它介于二者之间 Somewhere in between (4) 无有效天敌 No effective natural enemies (6)	天敌控制能力强 Strong natural enemy control (2) 其它介于二者之间 Somewhere in between (4) 无有效天敌 No effective natural enemies (6)			
				扩散风险 Proliferation risk (38)	分布情况 Distribution (12)	出现乡镇的个数 < 5 Number of townships less than 5 (3)
						出现乡镇的个数 5 ~ 10 Number of townships present between 5 and 10 (6)
	出现乡镇的个数 10 ~ 15 Number of townships present between 10 and 15 (9)					
	现有管理措施 Existing management measures (5)	传播扩散能力 Dissemination and diffusion capacity (10.5)	没有相应的管理措施或管理办法 No corresponding management measures or management practices (1) 被省级列为检疫或重点管理对象 Listed as quarantine or key management objects by the provincial level (3) 被国家列为检疫或重点管理对象 Classified by the state as quarantine or key management objects (5)			
				适生生境 Habitat suitable for living (10.5)	仅能通过自然传播方式进行短距离传播扩散或迁徙 Can only spread or migrate short distances by natural means of dispersal (1) 仅可通过人为活动进行传播 Can only be transmitted through human activities (5.5) 可以通过自然传播方式, 以及生物携带, 运输工具、包装携带等人为传播方式进行传播扩散 Spread can occur through natural means of transmission, as well as man-made modes of transmission such as bio-carriage, transportation, packaging, etc. (10.5)	
						潜在危害与影响 Potential Hazards and Impacts (15)
对社会经济的影响 Socio-economic impact (2)	未造成明显经济损失 No apparent economic loss (0) 已对当地造成较大经济损失 Has caused significant local economic damage (1) 已在分布地区造成了极大的经济损失 Has caused significant economic damage in the area of distribution (2)					

续表 2

目标层 Target layer	准则层 Criterion layer	指标层 Index layer	操作层 Operational layer
		危害对象重要程度 The importance of the hazard object (5)	危害对象经济价值低,对社会和生态环境的影响小 Low economic value of hazardous objects and low impact on society and ecosystems (1) 危害对象经济价值,以及对社会和生态环境的影响一般 The economic value of the object of the hazard, as well as the impact on society and the ecosystem in general (2) 危害对象经济价值高,对社会和生态环境的影响大 High economic value of hazardous objects and high social and ecological impacts (5)
	危害控制 Hazard control (12)	检验鉴定识别难度 Difficulty in inspection and identification (5)	检验方法可靠、快捷 Reliable and fast test methods (1) 其它介于二者之间 Somewhere in between (2.5) 现有检验方法可靠性很差,花费时间长 Existing test methods are very unreliable and time consuming (5)
		监测调查难度 Difficulty of monitoring investigations (4)	监测方法简单,易于掌握种群发生发展动态、危害趋势等 Simple monitoring methods, easy to grasp the dynamics of population development, hazard trends, etc. (1) 其它介于二者之间 Somewhere in between (2) 监测调查难度大 Difficulty in monitoring surveys (4)
		控制管理难度 Control the difficulty of management (3)	现有防治方法简单有效,控制率 85% 以上 Existing control methods are simple and effective, with more than 85% control rate (0.5) 现有方法控制率一般,在 30% ~ 85% Existing methods have average control rates, ranging from 30% to 85% (1.5) 现有防治方法复杂控制率较低,在 30% 以下 Complex control rates of existing prevention and treatment methods are low, below 30% (3)

表 3 青川县外来入侵植物风险评估结果

Table 3 Risk assessment results of alien invasive plants in Qingchuan County

物种 Species	分值 Score/分	风险等级 Grade
加拿大一枝黄花 <i>Solidago canadensis</i>	86.0	I 级 Level I
喜旱莲子草 <i>Alternanthera philoxeroides</i>	83.0	I 级 Level I
土荆芥 <i>Dysphania ambrosioides</i>	80.0	I 级 Level I
一年蓬 <i>Erigeron annuus</i>	73.0	II 级 Level II
苏门白酒草 <i>Conyza sumatrensis</i>	72.0	II 级 Level II
垂序商陆 <i>Phytolacca americana</i>	67.0	II 级 Level II
毛茛菪 <i>Solanum viarum</i>	62.0	II 级 Level II
小蓬草 <i>Conyza canadensis</i>	61.0	II 级 Level II
白车轴草 <i>Trifolium repens</i>	60.0	II 级 Level II
圆叶牵牛 <i>Ipomoea purpurea</i>	56.0	III 级 Level III
大狼把草 <i>Bidens frondosa</i>	53.0	III 级 Level III
钻叶紫菀 <i>Symphyotrichum subulatum</i>	47.0	III 级 Level III
白花鬼针草 <i>Bidens alba</i>	44.0	III 级 Level III
野苣荬 <i>Lactuca serriola</i>	44.0	III 级 Level III
细叶旱芹 <i>Cyclosporum leptophyllum</i>	43.5	III 级 Level III
野胡萝卜 <i>Daucus carota</i>	41.0	III 级 Level III
春飞蓬 <i>Erigeron philadelphicus</i>	41.0	III 级 Level III
粗毛牛膝菊 <i>Galinsoga quadriradiata</i>	41.0	III 级 Level III
黑麦草 <i>Lolium perenne</i>	41.0	III 级 Level III
变色牵牛 <i>Ipomoea indica</i>	36.5	IV 级 Level IV
紫茉莉 <i>Mirabilis jalapa</i>	36.0	IV 级 Level IV
野燕麦 <i>Avena fatua</i>	35.5	IV 级 Level IV
五叶地锦 <i>Parthenocissus quinquefolia</i>	35.0	IV 级 Level IV
野苣荬 <i>Crassocephalum crepidioides</i>	35.0	IV 级 Level IV
棕叶狗尾草 <i>Setaria palmifolia</i>	35.0	IV 级 Level IV
少花龙葵 <i>Solanum americanum</i>	35.0	IV 级 Level IV
苦苣菜 <i>Sonchus oleraceus</i>	35.0	IV 级 Level IV
草木樨 <i>Melilotus officinalis</i>	34.5	IV 级 Level IV
阿拉伯婆婆纳 <i>Veronica persica</i>	34.0	IV 级 Level IV
婆婆针 <i>Bidens bipinnata</i>	33.0	IV 级 Level IV
珊瑚樱 <i>Solanum pseudocapsicum</i>	33.0	IV 级 Level IV
绿穗苋 <i>Amaranthus hybridus</i>	33.0	IV 级 Level IV

3 讨论与结论

3.1 青川县外来入侵植物现状分析

菊科、禾本科是世界性分布大科,同时也是中国外来入侵植物的主要构成种类(闫小玲等,2014),本研究中调查统计得到青川县外来入侵植物共有32种,其中菊科最多,有13种,占总种数40.6%,与陕西、内蒙古等省的调查结果一致(李象钦等,2019; 栾晓睿等,2016; 宋兴江等,2021; 苏亚拉图等,2007; 郑宝江和潘磊,2012),可能与菊科植物的特性有关。菊科植物多为一年生草本,有生态适应性广、种子数量多、个体小、传播途径多等特点。同时,生长过程中自身竞争能力强,在遭遇恶劣环境时,可通过休眠来应对(郝建华,2008; 刘延等,2019),上述生存繁殖策略保证了菊科植物的传播及定殖成功率。其次为禾本科和茄科,禾本科植物多为一年生草本,容易传播和成活,其植株对环境适应能力强,生长速度快;茄科植物植株高大,分枝多且结果量大,种子繁殖力强,且具有休眠机制,能抵抗不良环境(马晨晨等,2023)。这2科植物对多种环境的适应性保证了其在传播中占据优势。

青川县外来入侵植物的原产地比较集中,主要为美洲地区,这也符合全国外来入侵植物原产地分布的特点(何家庆和葛结林,2008)。气候因素是造成这一现象的主要原因之一,植物更容易在同本土气候相似的生境上生长,美洲与亚洲有着相同的纬度范围,气候条件与生境相似,易定殖成功(赵彩云等,2022)。此外,美洲与亚洲距离较远,且有海洋相隔,物种的隔离程度较高,故物种入侵后在新生境中缺少天敌和资源竞争者,能迅速生长繁殖入侵当地的生态系统(郝丽芬等,2022)。

青川县外来入侵植物中草本植物具有较大的种类数量优势,其中一年生草本植物占总种数的43.8%。调查发现,这类植物在道路两旁、农田边、荒地等生境中均广泛分布,主要与草本植物本身适应特点有关,首先相比木本植物,草本植物木质茎有较强的进化优势,繁衍后代和环境适应能力更强(刘冰等,2022; 魏小兰和张蕴薇,2009);其次,草本植物具有生活史短、生长快、种子小而多、容易扩散的特点,在竞争中有较强优势,入侵概率高(张斯和肖宜安,2013; Zhao *et al.*, 2021)。本次调查结果也得出类似的结果。

外来入侵植物常被划分为“伴人植物”的范

畴,本研究结果也显示,人类活动的频繁程度与外来入侵植物的入侵有一定的关联性。如蒿溪回族乡是青川县“七佛贡茶”的核心产区,建有现代农业生态示范园,茶产量大贸易多,旅游业发展顺利(段禹农和杜扬,2013);促进通往各村的道路四通八达,游客络绎不绝,对于自身抗逆性强,易随之传播的外来入侵植物其穗子或瘦果冠毛会随着车辆行驶蔓延到新生境中,如加拿大一枝黄花、小蓬草、一年蓬等,实地调查中亦印证了这一点;乔庄镇距离蒿溪回族乡较近,为县城所在地,乡镇面积大设施完善,进一步增加了游客的来往,同时促使乔庄镇的外来入侵植物的种类和数量的增多;此外,对于开花植物,如喜旱莲子草、春飞蓬、白花鬼针草等处于初花期和盛花期时,植物外形美丽,游客或折枝带走或站在草丛里拍照,促进了种子传播,也进一步影响周围生境;同一调查样线上在人工养殖的坑塘附近,外来入侵植物的种类、数量及分布面积远大于样线上其他区域。

姚渡镇与甘肃省接壤,跨省高速公路在此为出入口,人类活动频繁,加之建设用地的的发展,生境破碎化较为严重,外来入侵植物更易定殖扩散,尤其是入侵杂草类,如加拿大一枝黄花(张楠等,2018)。与之相反的是,在研究区域内的常绿阔叶林下,外来入侵植物的数量和种类明显减少,如七佛乡的大多数样线上主要外来入侵植物为苏门白酒草、白车轴草和小蓬草。这表明生态系统稳定的区域抗外来植物入侵能力较强,故在部分荒地上合理种植本土阔叶树种将是一种有效防治外来植物入侵的手段。

3.2 外来入侵植物评估体系及风险水平分析

目前,外来入侵植物风险评估已有很大进展,如,澳大利亚杂草风险评估系统,通过回答外来入侵植物的现状、植物生物学和生态学特征、以及地理分布特征等方面的问题,最后基于得分情况确定是否引种。评估系统操作性强,可跨境管理外来入侵植物;然而,该方法常被用于引进新植物时确定是否为杂草,对已经入侵的外来植物的生境,评价结果的正确率较低(尹涵,2022)。南非外来植物专家系统,针对南非硬叶灌木生境中的外来入侵种,用流程图形式展示外来入侵植物入侵过程,该评估系统可对尚未引进植物或者已经引进但入侵迹象还未显现的外来植物进行评估,但是其主要围绕南非硬叶灌木进行,设置的规则不具有普适性。蒋青

等(1995)建立的综合指标评估体系,针对分布情况、潜在危害性以及危害对象重要性等方面,运用逻辑关系和数学表达式优化,最终确定评判标准,量化分析评估指标;后来随着国内学者的不断改进,完善了无权重和指标重复的方面,增加了对社会和生态影响方面的更多考虑。诸多文献表明,研究区域不同,同一外来入侵植物的生长状况不同,研究人员评估侧重点不同,风险评估结果亦不同,如落葵薯 *Anredera cordifolia* (Tenore) Steenis 在湖南省常德地区为四级风险水平,而在广东省深圳地区为一级风险水平(杜云安,2023;李建等,2024),故需要根据研究区域内实际调查情况,设置独特的评估指标,开展对外来入侵植物风险评估工作,方能实现对该区域外来入侵植物的准确评估。

本研究构建了青川县外来入侵植物的风险评估系统,该系统是针对区域性的风险评估,有较为全面的本底调查基础,研究对象是已经入侵的植物,使用了现阶段较为成熟的层次分析法,在选取评估指标时,沿用了繁殖、扩散方式等部分指标来体现入侵植物自身的生物学特性,以及可表征对生态、经济及人类危害性的指标(王铁梅等,2020),此外,充分结合青川县区域实际概况,相应补充了更能反应其入侵植物特性的指标,如,青川县海拔梯度大,生境类型多,生物多样性丰富,植物生存和种群扩散受气候和其他植食性动物、微生物等制约较大,在评估指标添加了外来入侵植物对环境因子适宜度以及食物因子适宜度这 2 方面指标;还增加了表征其扩散情况的指标,如“出现的乡镇个数”。与此同时增加“检验鉴定识别难度”“监测调查难度”“控制管理难度”反应区域内入侵植物危害控制情况的评估指标,体现了评估结果的客观性和合理性。

青川县 3 种极高风险水平外来入侵植物均被列入重点管理外来入侵物种名单,有极强繁殖能力和扩散能力,生存范围广泛,极易破坏青川县原有的生态系统平衡。其中,加拿大一枝黄花兼具有性繁殖和无性繁殖,高的种子结实量、萌发率以及根茎的快速延伸加上抗逆生长的特性,可促使其迅速占领入侵生境(程继亮,2020;董梅等,2006),同时根和茎自身强烈的化感作用更易使其形成单优势种,扩大生长空间降低生物多样性(占丽梅,2013;周凯和郭维明,2005)。喜旱莲子草在中国为无性繁殖,根和茎均能延伸生长,应对不同温度、不同水

热条件和不同盐含量的生境时,可改变根茎的生长形态、数量、体内资源分配方式和酶活性来适应环境(翁伯琦等,2006;许凯扬等,2004;Guo & Hu, 2012);在水体中,喜旱莲子草具有草植毡层,容易聚集水体垃圾,进而滋生蚊虫影响人类日常生活(Saintu *et al.*, 1997);在稻田农田中,引起作物减产对当地经济造成损失(尹仁国,1992)。土荆芥靠种子繁殖,种子萌发早植株生长快,果实、茎和气味均有毒(雷杰,2012);在恶劣环境中,初生根和胚芽有应急增效反应,使自身的抗旱性增强,加之细胞中的 α -萜品烯增多,产生更强烈的化感作用,为自身生长争取资源(阿的鲁骥,2018;崔现亮等,2020)。

高风险水平的有 6 种,其中,一年蓬、苏门白酒草、小蓬草在中国都是广泛分布的物种,入侵时间已经超过百年之久,在调查范围内经常以单优势群落出现,且种群密度较高,发生面积大,缩小了本土植物的生存空间;垂序商陆、毛茛苕起初作为药用植物而被引入,由于早期管理防范意识不强,其种子被鸟类和食果动物传播,逐渐逃逸野外,二者均有毒(董周焱等,2014;魏莹等,2020),人或畜性误食会有生命危险;白车轴草早期作为牧草被引入,后被用于公园绿化带等地方,如今发生面积较大,竞争本土植物资源。处于中风险水平的有 10 种,有扩散的能力但尚未扩散造成明显危害;处于低风险水平的有 13 种,分布面积小,人为控制多,未造成明显伤害。

3.3 不同风险等级外来入侵植物管理建议

深入了解区域内外来入侵植物现状和入侵等级是有效防控外来入侵植物的前提,全过程管理是有效防控的必要手段(杨皖乔等,2017),分级、分类管理能提高管控成效和管控资源的分配效益(Vilizzi *et al.*, 2022)。青川县 3 种极高风险和 6 种高风险水平的外来入侵植物应列为重点治理对象,针对加拿大一枝黄花(作为观赏植物引进)、喜旱莲子草、土荆芥 3 种分布面积大、清除难度高的外来入侵植物,应基于现有调查结果全盘考虑,一方面依据各自的生长繁殖和危害特性,探索“一种一策”的最佳防治方法,加强治理、定期监测和长期防控(Clements *et al.*, 2019)。如针对加拿大一枝花最佳防治方法有机械割除联合化学防治和机械翻耕联合生物竞争作用 2 种,在生命旺盛期且成片分布时,割除地上部分,待保留的茬长出部分新叶后喷除草剂,对地下根茎的伤害高,比整株施药更节约

成本,对非靶标生物和环境伤害小;荒地上成片的加拿大一枝黄花可进行大规模的机械翻耕,相应种植大豆 *Glycine max* (Linn.) Merr.、玉米 *Zea mays* L. 等抗逆能力强的竞争作物或者种植本地菟丝子 *Cuscuta chinensis* Lam. (李小刚和张立关,2024)。

对于垂序商陆、毛果茄这类起初作为药用植物而被引入,现已扩大入侵倾向的外来植物,需加强采收管理,以防进一步扩散;针对中等风险水平的外来入侵植物,如圆叶牵牛、黑麦草等,应密切监测发生状况和发生动态,防止其进一步扩散,若发现有扩散迹象,应及时进行人工清除等有效防控手段。低风险水平外来入侵植物大多是人为有意引进作为观赏绿化等用途,如紫茉莉、五叶地锦等植物被用于城市园林绿化中,这些外来入侵植物虽然目前对青川县生态和经济的影响不显著,但是与本地植物在资源方面同样存在竞争关系,应防止其扩散到新的自然生境中,尤其是农田、茶园和保护区中。

在蒿溪回族乡、乔庄镇、姚渡镇和青溪镇客运站附近的外来入侵植物物种数量丰富,多成片分布且面积大,这4个区域中的各个等级均应高度重视,对风险等级为极高和高的外来入侵植物加强防治力度,对中等和低风险等级的外来入侵植物时刻密切监控种群动态,防止逸散到已清除高风险等级入侵植物的生境中;竹园镇和观音店乡均有高速路口收费站,车辆来往多,人为活动频繁,故应提高这两个区域内外来入侵植物的野外调研和综合评判的频次,科学防控。

综上所述,需要对青川县外来入侵物种进行全面调查,提前做好风险评估和防控工作预案准备,并做好后期的监测和防控管理,采取切实有效的防控措施,对不同入侵程度、不同传播方式及不同扩散能力的外来入侵物种进行防控,最大限度减少外来入侵植物带来的生态和经济方面的影响,保护青川县本土植物的生物多样性和生态安全。

参考文献

阿的鲁骥,周健,李洁,马丹炜,2018. 土荆芥化感胁迫下蚕豆叶绿体超微结构和光合关键基因表达的变化. 西南农业学报, 31(12): 2527-2532.

程继亮,2020. 多倍化驱动加拿大一枝黄花成功入侵的机制研究. 博士学位论文. 南京:南京农业大学.

崔现亮,王桔红,罗娅婷,2020. PEG-6000 模拟干旱对土荆

芥种子萌发的影响. 现代农业科技 (14): 165, 171.

党辉,2021. 青川县草地贪夜蛾发生规律与防治药剂初探. 四川农业科技 (1): 45-47.

董梅,陆建忠,张文驹,陈家宽,李博,2006. 加拿大一枝黄花——一种正在迅速扩张的外来入侵植物. 植物分类学报, 44(1): 72-85.

董周焱,柏新富,张靖梓,侯玉平,卜庆梅,2014. 入侵植物美洲商陆对光环境的适应性. 生态学杂志, 33(2): 316-320.

杜云安,陈林芳,谢嘉婧,刘皓然,向国红,2023. 常德地区外来入侵植物调查分析. 生物安全学报, 32(2): 146-152.

段禹农,杜扬,2013. 对灾后乡镇景观建设的思考——访青川蒿溪回族乡. 生态经济 (10): 178-180.

国家林业和草原局森林资源管理司,2022. 2022 年全国森林、草原、湿地调查监测技术规程. (2022-05-09) [2024-09-10]. <https://ljy.ah.gov.cn/ahhq/slyz/40558892.html>.

郝建华,2008. 部分菊科入侵种的有性繁殖特征与入侵性的关系. 博士学位论文. 南京:南京农业大学.

郝丽芬,韩雨轩,吴乾美,王瑞,林克剑,2022. 中国草地外来生物入侵现状与防控建议. 植物保护, 48(4): 10-20.

何家庆,葛结林,2008. 安徽省外来入侵植物现状及与其他地区比较. 安徽大学学报(自然科学版), 32(4): 82-89.

蒋青,梁忆冰,王乃扬,姚文国,1995. 有害生物危险性评价的定量分析方法研究. 植物检疫, 9(4): 208-211.

雷杰,2012. 土荆芥锰富集特性及耐性机制研究. 硕士学位论文. 长沙:中南大学.

李峰,2021. 川北盆周山区生态环境遥感动态监测与评价——以青川县为例. 硕士学位论文. 成都:成都理工大学.

李华方,2020. 青川县全域旅游发展问题与对策研究. 硕士学位论文. 雅安:四川农业大学.

李惠茹,严靖,杜诚,闫小玲,2022. 中国外来植物入侵风险评估研究. 生态学报, 42(16): 6451-6463.

李建,庄春晓,杨芳芳,卢世君,邱礼杉,赵娟娟,2024. 深圳市建成区入侵植物特点及其对植物多样性的影响. 生态学杂志, 43(8): 2295-2303.

李象钦,唐赛春,韦春强,潘玉梅,王云波,2019. 广西中越边境的外来入侵植物. 生物安全学报, 28(2): 147-155.

李小刚,张立关,2024. 肥东县加拿大一枝黄花发生现状与防除对策探析. 基层农技推广, 12(5): 130-132.

林秦文,肖翠,马金双,2022. 中国外来植物数据集. 生物多样性, 30(5): 22127.

刘冰,向晓媚,谭璐,王志成,杨含茹,陈功锡,2022. 湖南省德夯峡谷生境种子植物功能性状多样性. 西北植物学报, 42(9): 1591-1599.

刘延,董合干,刘彤,王寒月,王瑞丽,马倩倩,赵文轩,李秋霞,2019. 豚草和三裂叶豚草不同植株部位种子萌

- 发与入侵扩散关系. *生态学报*, 39(24): 9079-9088.
- 刘莹昕, 刘飒, 王威尧, 2014. 层次分析法的权重计算及其应用. *沈阳大学学报(自然科学版)*, 26(5): 372-375.
- 栾晓睿, 周子程, 刘晓, 岳明, 2016. 陕西省外来植物初步研究. *生态科学*, 35(4): 179-191.
- 马晨晨, 吴雪惠, 赵廖成, 赵尊康, 蔡军火, 周春火, 唐明, 2023. 外来入侵植物喀西茄的危害特点与分布现状. *生物灾害科学*, 46(2): 121-126.
- 马金双, 李惠茹, 2018. 中国外来入侵植物名录. 北京: 高等教育出版社.
- 四川植物志编辑委员会, 1981—1983. *四川植物志*: 第 1、2 卷. 成都: 四川人民出版社.
- 四川植物志编辑委员会, 1985—2017. *四川植物志*: 第 3、4、5、6、21 卷. 成都: 四川科学技术出版社.
- 宋兴江, 张文刚, 陈晓艳, 刘芮伶, 姚鑫, 马婧昊, 王佳宁, 史岩, 冉俊杰, 安玉霞, 刘刚, 2021. 陕西省外来植物组成与分布现状. *生态学杂志*, 40(12): 3800-3809.
- 苏亚拉图, 金凤, 哈斯巴根, 2007. 内蒙古外来入侵植物的初步研究. *内蒙古师范大学学报(自然科学汉文版)*, 36(4): 480-483.
- 万方浩, 刘全儒, 谢明, 2012. 生物入侵: 中国外来入侵植物图鉴. 北京: 科学出版社.
- 王铁梅, 平晓燕, 林长存, 2020. 外来牧草入侵风险评估体系研究. *草地学报*, 28(3): 727-733.
- 王宜凡, 2022. 内蒙古外来入侵植物现状分析及风险评价. 硕士学位论文. 呼和浩特: 内蒙古师范大学.
- 王友国, 庄华蓉, 张庆刚, 臧德奎, 2021. 重庆市入侵植物种类组成及分布格局分析. *中国野生植物资源*, 40(5): 84-90.
- 魏小兰, 张蕴薇, 2009. 草本植物的非典型性应用. *草业科学*, 26(9): 34-39.
- 魏莹, 李倩, 李阳, 毛祝新, 王宇超, 岳明, 2020. 外来入侵植物反枝苋的研究进展. *生态学杂志*, 39(1): 282-291.
- 翁伯琦, 林嵩, 王义祥, 2006. 空心莲子草在我国的适应性及入侵机制. *生态学报*, 26(7): 2373-2381.
- 许凯扬, 叶万辉, 段学武, 苏新国, 徐志防, 2004. PEG 诱导水分胁迫下喜旱莲子草的生理适应性. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 30(3): 271-277.
- 闫小玲, 刘全儒, 寿海洋, 曾宪锋, 张勇, 陈丽, 刘滨, 马海英, 齐淑艳, 马金双, 2014. 中国外来入侵植物的等级划分与地理分布格局分析. *生物多样性*, 22(5): 667-676.
- 杨皖乔, 郑世群, 刘梦昕, 刘金福, 何中声, 徐道炜, 2017. 晋江灵源山外来入侵植物调查分析与管理对策的探讨. *林业资源管理* (5): 86-92.
- 尹涵, 2022. 澳大利亚防控外来生物入侵法律制度研究. 硕士学位论文. 湘潭: 湘潭大学.
- 尹仁国, 1992. 蔬菜地空心莲子草的发生及危害. *杂草科学* (1): 13.
- 占丽梅, 2013. 加拿大一枝黄花根水提取物的化感作用研究. 硕士学位论文. 杭州: 浙江大学.
- 张楠, 董丽, 王璇, 王阔, 2018. 北京城市生态廊道草本植物组成及分布格局. *中国园林*, 34(6): 94-99.
- 张斯斯, 肖宜安, 2013. 中国外来入侵植物生活型与性系统多样性. *植物研究*, 33(3): 351-359.
- 赵彩云, 柳晓燕, 李飞飞, 朱金方, 郭朝丹, 李俊生, 2022. 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*, 42(7): 2532-2541.
- 郑宝江, 潘磊, 2012. 黑龙江省外来入侵植物的种类组成. *生物多样性*, 20(2): 231-234.
- 中国科学院中国植物志编辑委员, 2016. *中国植物志*: 第 1 卷. 北京: 科学出版社.
- 周凯, 郭维明, 2005. 加拿大一枝黄花根系和根际土壤水浸液对萝卜和白菜种子萌发及幼苗生长的影响. *西北植物学报*, 25(1): 174-178.
- CLEMENT D R, DAY M D, OEGGERLI V, SHEN S C, WESTON L A, XU G F, ZHANG X, 2019. Site-specific management is crucial to managing *Mikania micrantha*. *Weed Research*, 59(3): 155-169.
- GUO W, HU Z H, 2012. Effects of stolon severing on the expansion of *Alternanthera philoxeroides* from terrestrial to contaminated aquatic habitats. *Plant Species Biology*, 27(1): 46-52.
- PHILOUNG P C, WILLIAMS P A, HALLOY S R, 1999. A weed risk assessment model for use as a biosecurity tool evaluating plant introductions. *Journal of Environmental Management*, 57(4): 239-251.
- VILIZZI L, HILL J E, PIRIA M, COPP G H, 2022. A protocol for screening potentially invasive non-native species using weed risk assessment-type decision-support tools. *Science of the Total Environment*, 832: 154966.
- ZHAO W X, LIU T, LIU Y, WANG H Y, WANG R L, MA Q Q, DONG H G, BI X Y, 2021. The significance of biomass allocation to population growth of the invasive species *Ambrosia artemisiifolia* and *Ambrosia trifida* with different densities. *BMC Ecology and Evolution*, 21: 175.
- ZHAO Y F, ZHAO C Y, ZHU J F, LI F F, YANGX Q, GUO C D, 2022. Distribution pattern of alien invasive plants in typical parks in Beijing. *Acta Ecologica Sinica*, 42(9): 3656-3665.