

DOI: 10.12357/cjea.20230377

葛结林, 熊高明, 毛江涛, 徐文婷, 秦晓琼, 谢宗强. 加拿大一枝黄花在江南休闲旅游乡村的入侵特征及其影响因素[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(12): 1932–1942

GE J L, XIONG G M, MAO J T, XU W T, QIN X Q, XIE Z Q. Invasion characteristics and influencing factors of *Solidago canadensis* in leisure-tourism villages in the south of the Yangtze River[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2023, 31(12): 1932–1942

加拿大一枝黄花在江南休闲旅游乡村的入侵特征及其影响因素*

葛结林¹, 熊高明¹, 毛江涛^{1,2}, 徐文婷¹, 秦晓琼³, 谢宗强^{1,2**}

(1. 中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室 北京 100093; 2. 中国科学院大学 北京 101408;
3. 重庆市丰都县七跃山林场 重庆 408200)

摘要: 外来入侵植物严重威胁着乡村地区植物多样性并削弱了其生态系统服务功能, 成为乡村振兴和美丽乡村建设中亟待解决的突出问题。本研究选择江南休闲旅游型乡村牌坊社区, 基于 127 个植物群落样地调查数据, 定量探究了外来入侵植物加拿大一枝黄花入侵特征及其影响因素。结果发现: 1) 加拿大一枝黄花的高度分布呈正态分布, 盖度呈明显正偏态分布, 其在乡村区域呈现出多点散状分布模式, 局部形成单优群落, 存在进一步扩散的趋势。2) 加拿大一枝黄花高度和盖度受到不同因素的制约, 其高度与群落中本地植物物种数量和盖度表现出显著负相关, 其中本地植物物种数量的相对作用最大; 其盖度随着距农田距离、本地植物物种数量和盖度的增加呈现减小趋势; 本地植物物种数量和盖度的交互作用显著抑制了加拿大一枝黄花的盖度, 本地植物盖度对加拿大一枝黄花盖度的抑制作用随着群落中本地植物物种数量的增加而增强。本研究发现本地植物的群落属性在抑制加拿大一枝黄花入侵乡村中起着关键作用, 拓宽了对外来植物在乡村景观中入侵机制的理解, 强调了发展休闲旅游迫切需要将来入侵植物的监测防控纳入乡村生态景观规划中, 为乡村外来入侵植物综合防治提供了科学依据。

关键词: 入侵植物; 乡村景观; 本地植物; 入侵程度; 生物多样性; 乡村生态规划

中图分类号: Q948

开放科学码(资源服务)标识码(OSID):



Invasion characteristics and influencing factors of *Solidago canadensis* in leisure-tourism villages in the south of the Yangtze River*

GE Jielin¹, XIONG Gaoming¹, MAO Jiangtao^{1,2}, XU Wenting¹, QIN Xiaoqiong³, XIE Zongqiang^{1,2**}

(1. State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China; 3. Qiyue Mountain Forest Farm, Fengdu County, Chongqing 408200, China)

Abstract: Invasive plants pose a serious threat to plant diversity in rural areas, weaken their ecosystem service functions, and have become a prominent issue that urgently needs to be addressed in rural revitalization and beautiful rural construction. In this study, based on survey data from 127 sampling sites, we aimed to explore the degree of invasion and influencing factors of the invasive plant *Solidago canadensis* in a leisure-tourism village located in south of the Yangtze River. The height of *S. canadensis* showed a normal

* 国家重点研发计划项目(2019YFD1100403)资助

** 通信作者: 谢宗强, 主要研究方向为森林动态与生态保护。E-mail: xie@ibcas.ac.cn

葛结林, 主要研究方向为森林动态与物质循环过程。E-mail: gejielin@ibcas.ac.cn

收稿日期: 2023-07-06 接受日期: 2023-09-06

* This study was supported by the National Key Research and Development Project of China (2019YFD1100403).

** Corresponding author, E-mail: xie@ibcas.ac.cn

Received Jul. 6, 2023; accepted Sep. 6, 2023

<http://www.ecoagri.ac.cn>

distribution, whereas its coverage showed a significantly positively skewed distribution. In rural areas, it displayed a multipoint scattered distribution pattern, forming a single optimal community locally and exhibiting a trend of further potential dispersal. We also found that the height and coverage of *S. canadensis* were significantly affected by various factors in rural environments. Specifically, the height of *S. canadensis* was negatively correlated with the species number and coverage of native plant species in the community, in which the number of native plant species played a more important role. In contrast, the coverage of *S. canadensis* showed a decreasing trend with increasing distance from the farmland, and the species number and coverage of native plant species. The interaction between the number of native plant species and coverage significantly suppressed the coverage of *S. canadensis*, and the inhibitory effect of native plant coverage on the coverage of *S. canadensis* increased with the increase in the number of native plant species in the rural community. In conclusion, leisure-tourism villages have been severely affected by the invasion and spread of *S. canadensis*. This study also identified the fundamental role of multiple community attributes of native plant species in resisting the invasiveness of single alien plant species and broadened our current understanding of the invasion mechanism of single invasive plants in rural landscapes. These findings emphasize the urgent need to incorporate the monitoring and prevention of invasive plant species into rural ecological landscape planning for the development of leisure tourism in the future, thus providing a solid scientific basis for the comprehensive prevention and control of invasive plants in different rural areas and the maintenance of rural biodiversity during the construction of beautiful rural areas.

Keywords: Invasive plant; Rural landscape; Native plant; Invasion degree; Biodiversity; Rural ecological planning and design

外来植物入侵是指植物由原产地通过自然或人为的途径迁移到新的生态环境, 通过适应、逃逸、归化, 在入侵地形成了具有自我再生能力的可繁殖种群, 对入侵地的生物多样性、农林牧渔业生产活动以及人类健康造成经济损失或生态灾难的现象^[1-3]。入侵中国乡村生态系统的外来植物已有 300 种以上^[4], 占中国所有外来入侵植物的 80% 以上, 给乡村农林牧渔业生产活动带来重大损失, 乡村已成为中国外来植物入侵的重点区域。城市化和乡村现代化快速推进, 加速了外来植物在乡村区域的入侵扩散。外来入侵植物威胁乡村生物多样性和生态安全的风险日益严重, 已成为乡村振兴过程中亟待解决的突出生态问题。

外来植物在群落中的入侵程度取决于其自身与入侵生境的特性以及其与其他生物和环境因素的相互作用过程。探究外来植物入侵机制, 除了考虑入侵植物本身具备的内禀优势、较强的植物可塑性和适应性特征外, 还需要考虑入侵地的本地物种群落特征和人为活动强度^[5-7]。大尺度上纬度是决定中国外来入侵植物分布的主导因子, 在局部尺度上人为因素对其分布影响较大^[8-10]。现有研究注重在全国或者区域尺度上对多个外来植物开展整体入侵分析^[11], 其结果能否适用于乡村景观尺度下的单一外来植物入侵规律存在较大的不确定性。现有研究中关于单个外来入侵植物在群落中的入侵程度较多采用入侵植物发生的点位信息, 难以全面体现单个外来植物的入侵特征及其在被入侵植物群落中的地位。特别是在乡村景观尺度上, 外来入侵植物和本地植物的关系

是否/如何受到乡村景观因素特别是人为活动因素的影响缺乏实证研究。

休闲旅游型乡村是中国美丽乡村建设十大模式之一^[12], 在乡村振兴和美丽宜居乡村建设中起着十分重要的作用。伴随着乡村休闲旅游的发展, 以休闲旅游为产业发展目标的乡村, 与周边地区的互通互联日益频繁, 为外来植物的定居、建群和入侵创造了有利条件, 额外增加了外来植物入侵的风险, 已成为外来植物入侵的潜在重灾区。然而, 过去对外来植物入侵的研究多关注以农业生产为目的的农田生境^[4,13], 对乡村其他区域如自然景观和乡村聚落关注不够, 极大地削弱了乡村对外来植物入侵监控预警和防控管理措施的针对性和有效性。

加拿大一枝黄花 (*Solidago canadensis*) 原产于北美, 属菊科 (Asteraceae) 一枝黄花属 (*Solidago*) 多年生外来物种, 20 世纪 30 年代左右作为观赏花卉被引种, 后逸生为入侵恶性杂草, 并已入侵全国 16 个省份, 成为中国重点管理外来入侵植物^[14]。目前对加拿大一枝黄花的研究较多, 主要集中在大尺度的入侵格局以及生物学特征、生态学、生物防治等方面^[15-18], 但目前其在乡村景观尺度的入侵特征及其影响因素仍然不明。

本文基于江南休闲旅游型乡村加拿大一枝黄花入侵群落数据, 试图回答以下几个方面的科学问题: 1) 休闲旅游型乡村加拿大一枝黄花入侵特征; 2) 乡村区域内加拿大一枝黄花入侵特征的主要影响因素。本研究定量评价了加拿大一枝黄花在乡村景观的入侵特征, 期待为休闲旅游型乡村外来入侵植物生态防控和预警管理提供科学依据。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域与研究地点概况

本研究区域为江宁区, 该区隶属华东地区江苏省南京市, 地处秦岭—淮河以南, 位于长江以南的平原丘陵区, 属于暖温带向北亚热带过渡的湿润季风气候, 是落叶阔叶林逐步过渡到落叶-常绿阔叶混交林地区。研究地点牌坊社区位于南京市江宁区江宁街道东南部 (31.7799°N、118.6913°E), 东临横溪龙山水库, 南邻朱门社区, 西与花塘社区毗邻, 北靠银杏湖高尔夫球场。该乡村地势东南高, 西北低, 境东边界南北两端分别为金山和蒋门山, 属于典型的丘陵山林景观。西部农业地区的农林灌溉主要依靠陂塘和小型水库蓄水, 形成了典型陂塘农业景观。该乡村占地面积约 8.2 km², 下设 20 个村民小组; 自 2013 年至今该社区重点打造茶文化旅游村, 是中国美丽乡村建设中休闲旅游型乡村的典型代表。

1.2 样点布设与调查

前期考察发现牌坊社区合计有 19 种外来入侵植物, 隶属 8 科 16 属, 主要有喜旱莲子草 (*Alternanthera philoxeroides*)、小蓬草 (*Conyza canadensis*)、加拿大一枝黄花、垂序商陆 (*Phytolacca americana*) 等 (附表 1, 见官网 <http://www.ecoagri.ac.cn/cn/article/doi/10.12357/cjea.20230377> 此文资源附件); 其中以加拿大一枝黄花入侵最为严重, 是威胁该乡村生物多

样性和生态安全的关键因素。因此, 本研究以加拿大一枝黄花入侵的植物群落为对象开展调查工作。海拔、道路、农田等均会影响入侵植物在群落中的分布, 因此研究区采样点布设根据加拿大一枝黄花在不同海拔、道路交通状况等因素设置, 尽量保证采样点的代表性, 每个采样点设置 1 个大小为 2 m×2 m 样方, 最终确定布设了 127 个采样点 (图 1)。

2021 年 10 月采用样方调查法和目测估计法相结合的方式^[18-20], 对各采样点加拿大一枝黄花群落特征开展调查。调查统计了各采样点内加拿大一枝黄花和其他本地植物的种类、盖度、平均高度及样方总盖度等群落学指标, 记录了采样点地理坐标和环境因子, 包括经纬度、海拔、植被类型、生境特征等。同时, 以现有的遥感影像图为基础, 结合实际调研, 对牌坊社区的居民点、道路、池塘 (含水库)、茶园等进行手工数字化, 根据这些矢量图提取并计算出各个采样点的人为活动因子, 主要指标包括距农田距离、距道路距离、距池塘距离、距茶园距离。这些环境因子主要反映乡村人为干扰情况。调查样点总体特征见表 1。

1.3 数据分析

采用加拿大一枝黄花高度和盖度表征其在群落中的入侵特征, 其中以采样点内所有加拿大一枝黄花个体的高度平均值来量化其在群落中的高度, 盖

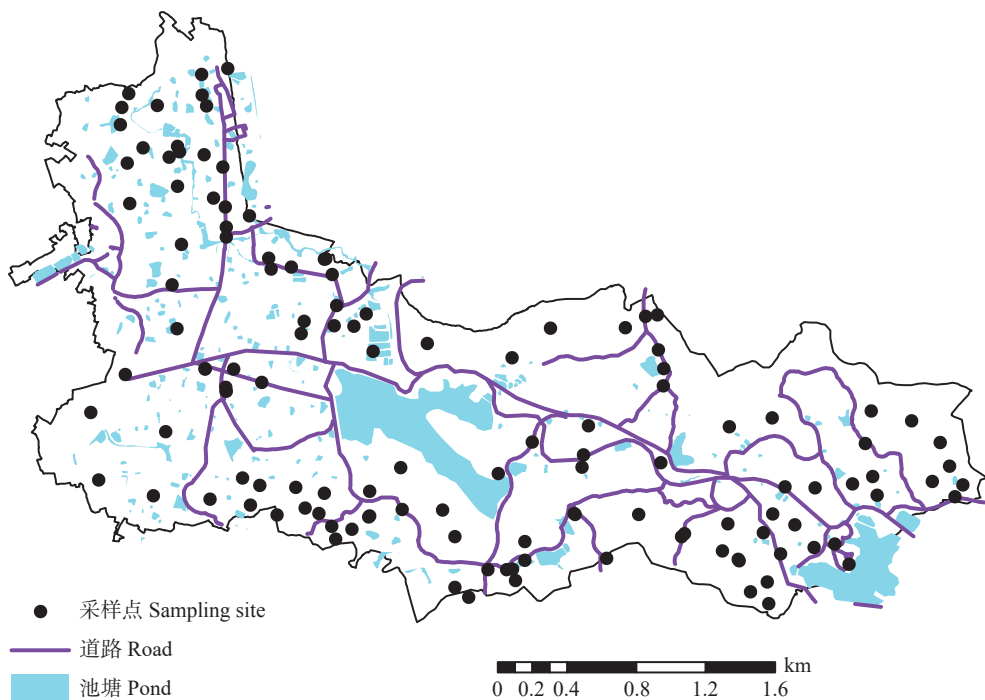


图 1 休闲旅游型乡村外来入侵植物加拿大一枝黄花采样点的空间分布示意图

Fig. 1 Spatial distribution of sampling sites of alien invasive plant *Solidago canadensis* at the leisure-tourism-type village

表 1 休闲旅游型乡村加拿大一枝黄花采样点总体特征
Table 1 Overall characteristics of sampling sites of *Solidago canadensis* at the leisure-tourism-type village

环境因子 Environmental factor	平均值 Mean	变化范围 Range
海拔 Altitude (m)	50.73	18.39~122.08
距居民点距离 Distance from residential area (m)	165.27	1.86~628.52
距道路距离 Distance from road (m)	74.49	0.04~498.83
距池塘距离 Distance from pond (m)	79.62	2.07~302.25
距茶园距离 Distance from tea garden (m)	616.30	0.00~1997.50
距农田距离 Distance from farmland (m)	1229.42	0.24~3898.92
本地植物高度 Native plant height (m)	1.37	0.15~8.35
本地植物盖度 Native plant coverage (%)	14.95	5.00~95.00
本地植物物种数量 Native plant species number	10.52	1.00~37.00

度则为采样点中所有加拿大一枝黄花个体的盖度总和。首先,对加拿大一枝黄花入侵特征开展描述性统计,获取其在乡村范围内数据分布情况及变异程度,并检查数据分布的正态性。其次,采用单因素方差分析和多重比较(Tukey 检验)的统计方法分析加拿大一枝黄花入侵特征在乡村不同植被类型和生境类型的差异。再次,采用 Pearson 相关性分析、多元线性回归和方差分解的分析方法探讨自然因素(海拔)、人为活动因素(距居民点距离、距道路距离、距池塘距离、距茶园距离和距农田距离)以及群落中本地植物群落特征(平均高度和盖度、物种数量)对加拿大一枝黄花入侵特征的影响,其中本地植物

的平均高度为每个采样点中所有本地植物高度的平均值,盖度则为每个采样点中所有本地植物个体的盖度总和。考虑到多元线性回归中不同变量之间的计量单位差异,统计分析前对所采用的自然和人为活动变量以及本地植物群落属性做标准化处理,并对这些变量开展相关性分析,明确其相关性不会影响多元线性回归模型的构建过程;同时采用向前和向后的方法筛选变量,并根据 AIC (Akaike information criterion) 信息准则确定并获取最终的最优多元线性回归模型。所有统计分析和绘图通过 R 4.1.2 软件实现。

2 结果与分析

2.1 加拿大一枝黄花入侵群落的本地植物组成与入侵特征

调查合计发现 211 种本地植物,每个调查点植物种类平均为 10.52 种,其中出现频率较高的种类有狗尾草(*Setaria viridis*)、构树(*Broussonetia papyrifera*)、蓬蘽(*Rubus hirsutus*)、艾(*Artemisia argyi*)、楝树(*Melia azedarach*)和朴树(*Celtis sinensis*)等。

所有采样点的加拿大一枝黄花高度和盖度的平均值分别为 1.56 m 和 25.33% (图 2),其高度和盖度之间未表现出显著相关性($P>0.05$)。不同植被类型中加拿大一枝黄花平均高度和平均盖度存在显著差异,平均高度表现为绿地植被>自然植被>农业植被,平均盖度表现为绿地植被>农业植被>自然植被,且绿地植被中的加拿大一枝黄花平均高度和平均盖度

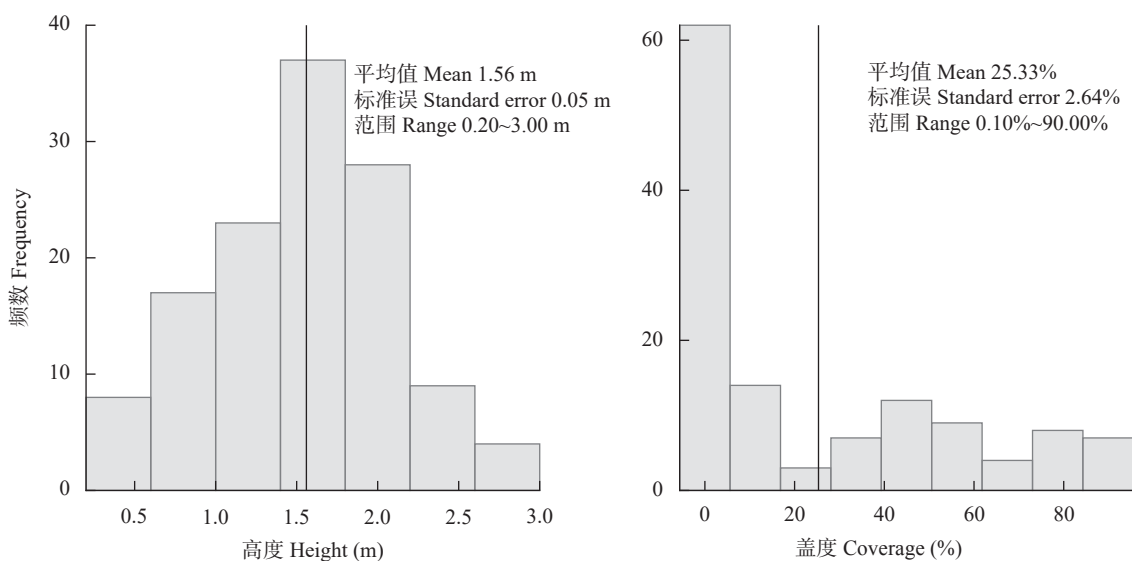


图 2 休闲旅游型乡村外来入侵植物加拿大一枝黄花高度和盖度的频率分布

Fig. 2 Frequency distribution of height and coverage of alien invasive plant *Solidago canadensis* at the leisure-tourism-type village

竖线表示加拿大一枝黄花高度和盖度的总体平均值。The vertical lines indicate the overall mean of height and coverage of *Solidago canadensis*.

均显著高于另外两种植被 ($P<0.05$), 3 种植被均受到不同程度加拿大一枝黄花的入侵, 在绿地植被中表现更为严重(图 3)。

2.2 不同生境下加拿大一枝黄花入侵特征

通过分析加拿大一枝黄花高度和盖度与生境类型之间的关系发现, 不同生境下加拿大一枝黄花高度和盖度呈现不同的特征。加拿大一枝黄花的平均

高度在洼地、宅基地、旱地、池塘和撂荒地显著高于其他生境 ($P<0.05$), 且洼地最高; 盖度在宅基地旁生境中显著高于其他生境 ($P<0.05$), 岗地生境平均高度和盖度在所有生境类型中均最低(图 4)。

2.3 加拿大一枝黄花入侵特征的主要影响因素

二元相关性分析结果表明, 加拿大一枝黄花的高度与采样点所处的海拔、距农田距离和本地植物

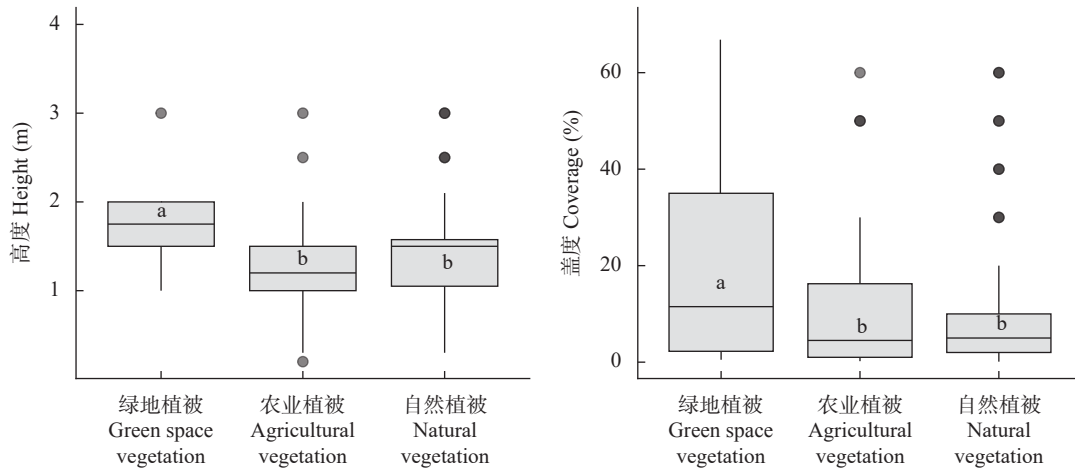


图 3 休闲旅游型乡村不同植被类型中外来入侵植物加拿大一枝黄花高度和盖度

Fig. 3 Height and coverage of alien invasive plant *Solidago canadensis* in different vegetations at the leisure-tourism-type village

不同小写字母表示不同植被类型间存在显著差异 ($P<0.05$)。Different lowercase letters indicate significant differences among different vegetations ($P<0.05$).

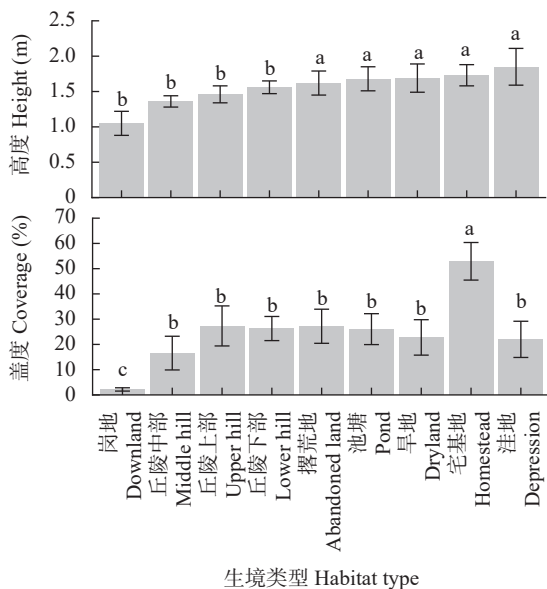


图 4 休闲旅游型乡村不同生境类型中外来入侵植物加拿大一枝黄花的高度和盖度

Fig. 4 Height and coverage of alien invasive plants *Solidago canadensis* in different habitats at the leisure-tourism-type village

不同小写字母表示不同生境间存在显著差异 ($P<0.05$)。Different lowercase letters indicate significant differences among different habitats ($P<0.05$).

物种数量呈显著负相关 ($P<0.05$), 与其他因素相关性不显著 ($P>0.05$); 加拿大一枝黄花盖度与采样点所处的海拔、距农田距离、本地植物盖度和物种数目呈显著负相关 ($P<0.05$), 与距茶园距离呈显著正相关 ($P<0.05$), 与本研究所关注的其他因素关系不显著 ($P>0.05$) (图 5)。

多元线性回归模型分析结果表明, 加拿大一枝黄花的高度和盖度分别受不同因素的制约(图 6)。具体而言, 加大一枝黄花的高度与群落中本地植物物种数量和盖度呈显著负相关 ($P<0.05$), 本地植物物种数量的影响较大(图 6A)。加大一枝黄花的盖度随着距农田距离、本地植物物种数量和盖度的增加而呈减小趋势 ($P<0.05$), 与本研究所选取的其他单因素关系不显著 ($P>0.05$), 其中本地植物盖度的相对贡献最大(图 6B); 本地植物物种数量和盖度与距农田距离的交互作用显著抑制了加拿大一枝黄花的盖度 ($P<0.05$) (图 6B), 且本地植物盖度对加拿大一枝黄花盖度的抑制作用随着群落中本地植物物种数量增加而增强(图 7)。

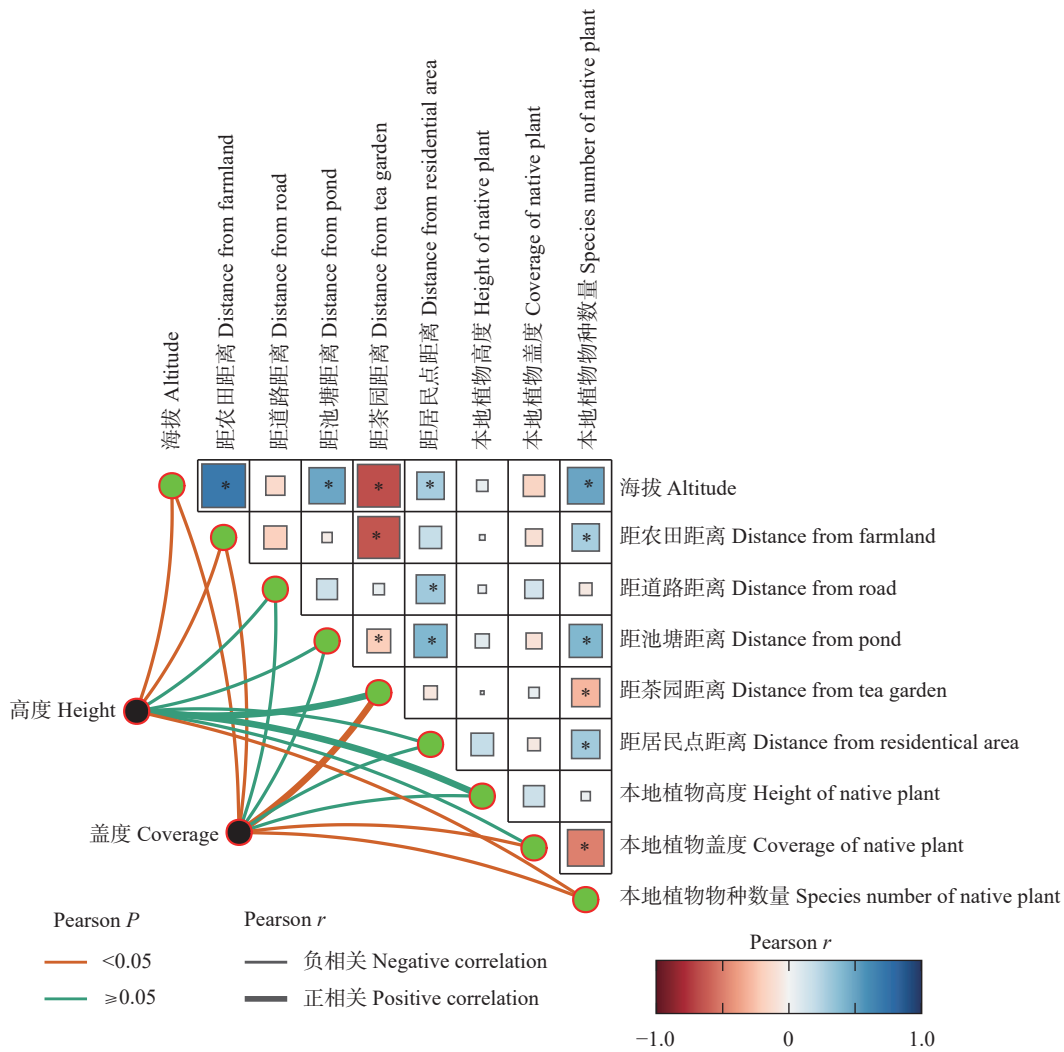


图 5 休闲旅游型乡村加拿大一枝黄花高度和盖度与自然和人为因素以及本地植物群落特征的相关性

Fig. 5 Correlations between height and coverage of alien invasive plant *Solidago canadensis* and natural and human activity factors and native plant attributes at the leisure-tourism-type village

图中右上半部分表示自然和人为活动因素彼此间的相关性, *表示相关性显著 ($P < 0.05$), 方块大小表示相关性强度。The upper right part of the figure shows the correlations among natural and human activity factors, and * indicates significant correlations ($P < 0.05$), while the size of the filled box indicates the strength of the correlations.

3 讨论

3.1 休闲旅游型乡村已成为外来植物加拿大一枝黄花入侵扩散蔓延的重灾区

充分认识外来植物入侵特征是开展外来入侵植物有效防控的前提^[21-22]。本研究在休闲旅游型乡村内入侵植物加拿大一枝黄花入侵地点大量设置代表性采样点, 以加拿大一枝黄花在群落中的高度和盖度为入侵特征指标, 定量分析了其在休闲旅游型乡村不同植被类型和生境的分布特征及其影响因素。结果发现, 加拿大一枝黄花高度分布表现出正态分布特征, 平均高度约 1.56 m, 与以往在其他地区研究结果一致^[13,23-24], 其盖度表现出明显正偏态分布特征。这些结果说明, 加拿大一枝黄花在休闲旅游型乡村

区域呈现出多点散状分布模式, 局部生境形成单优群落, 存在进一步扩散蔓延的趋势。绿地植被入侵较为严重; 宅基地是其重点入侵的对象, 其对加拿大一枝黄花定居和建群过程表现出较高的易感性, 该结果与前人在其他地区和其他菊科入侵植物的定性观测结果一致^[15,24-25]。

上述研究结果表明, 该乡村已成为加拿大一枝黄花入侵扩散蔓延的重灾区。造成该现象的原因主要包括 3 个方面: 一是加拿大一枝黄花在该地区入侵历史较为悠久。现有研究表明, 加拿大一枝黄花在 20 世纪 30 年代在南京地区作为园艺观赏花卉引进, 80 年代逃逸并开始入侵, 其种群在较长时间内内适应该地区的环境并不断分化形成较高的遗传多样性

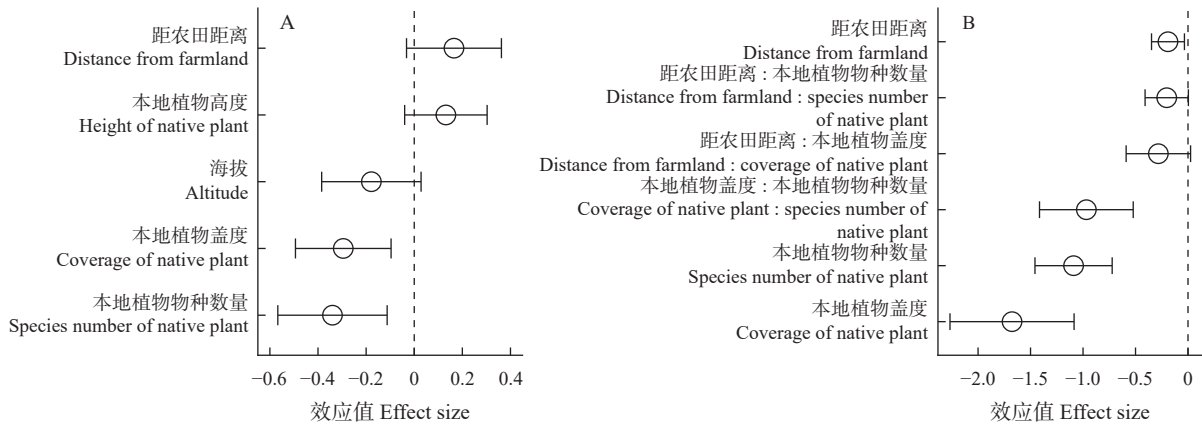


图 6 休闲旅游型乡村加拿大一枝黄花的高度 (A) 和盖度 (B) 与自然和人为活动因子的关系

Fig. 6 Relationships between height (A) and coverage (B) of alien invasive plant *Solidago canadensis* and natural and human activity factors at the leisure-tourism-type village

误差棒代表 95% 置信区间; 95% 置信区间不与 0 重叠表示统计学意义显著 ($P < 0.05$)。标准化回归系数绝对值越高, 因子相对影响作用越大; 两个自变量之间的冒号表示它们之间的交互作用。Error bars represent the 95% of confidence intervals (CI) of the parameter estimates. If 95% of CI do not overlap with 0, it indicates statistically significant ($P < 0.05$). The larger the absolute standardized coefficient, the larger effect of these factors. Colon between two independent variables indicates their interaction.

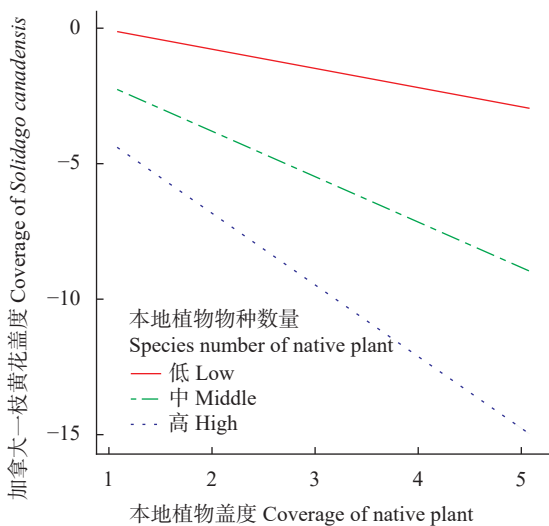


图 7 休闲旅游型乡村本地植物物种数量和盖度对加拿大一枝黄花盖度的交互影响

Fig. 7 Interactive effect of coverage and number of native plant species on coverage of alien invasive plant *Solidago Canadensis* at the leisure-tourism-type village

所有变量均做标准化处理, 采用标准离差方法对本地植物物种数量做离散化处理并划分为低中高 3 组。All variables are standardized. According to the standard deviation method, the variable species number of native plant is discretized and divided into three groups: low, medium and high.

和表型可塑性^[15,23,25], 积累了一定规模的种群和快速进化能力, 为其在该地区乡村区域定居扩散提供了良好的生物学基础。二是人为活动较为频繁, 尤其是发展休闲旅游以来, 助推了该外来植物在乡村地区的定居、入侵和扩散。该乡村属于中国长江以南平原丘陵区, 人口密度大; 随着乡村休闲旅游活动的

持续开展, 城乡人员交流更为密切, 特别是秋季旅游高峰期与该植物种子成熟期叠加重合, 为该入侵植物种子传播提供了重要契机。三是近年来城市化和乡村现代化过程中部分土地抛荒 (如农田) 和闲置 (如宅基地) 形成了生态位空缺, 加拿大一枝黄花具有适应性广、繁殖力强、易于扩散等特点, 与其生态位相近的本地植物对其没有竞争优势, 故其迅速定居扩散并在乡村部分地点暴发。调查还发现, 该乡村还存在 18 种外来入侵植物 (附表 1), 尽管尚未形成大规模暴发, 但部分外来入侵植物 (如喜旱莲子草) 有局部扩散的迹象, 这些外来植物可以通过种子和营养器官进行繁殖, 具有很强的入侵潜力, 对乡村景观完整性和人体健康带来更为严重的潜在威胁。因此, 发展乡村休闲旅游时, 需要高度警惕并积极实施外来入侵植物分类管理措施以提高管控成效。

3.2 本地植物群落特征是制约休闲旅游型乡村加拿大一枝黄花入侵特征的关键因素

查明外来植物入侵特征的影响因素一直是生态学关注的热点^[26-28]。影响外来入侵植物入侵强度的因素一般包括该地域群落中本地植物的互作关系和人为活动影响等多种因素^[17,29-30]。本地植物物种数量、高度和盖度是决定外来植物入侵程度的重要因素, 但先前研究很少同时探讨这些因素与外来植物入侵特征之间的相互关系^[6,31-32]。现有研究表明, 外来物种入侵特征部分程度上依赖于本地生物群落的抵抗力和稳定性, 本地植物丰富度越高的地方对入侵的抵抗力越强, 但也有研究发现本地植物对外来入侵

未发挥出抵抗作用^[6,25]。本研究结果发现, 加拿大一枝黄花高度与群落中本地植物群落属性(数量和盖度)关系显著, 与以前其他外来入侵植物, 如紫茎泽兰 (*Ageratina adenophora*)、喜旱莲子草的部分研究结果一致^[33-34]。例如陈旭等^[33]在云南松 (*Ageratina adenophora*) 群落中发现, 本地植物的盖度越高, 紫茎泽兰的入侵强度越低。这些结果共同表明, 入侵植物的高度变化在一定程度上与群落中本地植物群落属性相关, 支持前人提出的生物抵抗假说^[21,28]。一般而言, 外来入侵植物入侵特征与群落中本地植物的属性在局部尺度上呈负相关, 在区域尺度上则相反^[16,35]。然而, 也有研究发现, 不同空间尺度上, 两者始终保持着正相关关系, 或无相关关系或者同时存在多种相关关系。二者之间的关系还与所处的环境背景和干扰、群落自身结构的稳定性和功能属性、外来入侵植物的种类与组成、本地植物与外来物种之间的种间互作关系以及外来植物和本地植物之间的亲缘关系等多种因素密切关联, 且在外来植物入侵过程中对本地群落的结构与功能的影响也并非呈简单的线性变化趋势^[32-33,36]。这些截然不同的研究结果暗示, 外来植物入侵特征与群落中本地植物群落属性的关系存在多种关联, 且引起这些关联的内在机制不尽相同, 还需要进一步开展试验探讨与验证。

进一步研究发现, 加大一枝黄花的高度随着距农田距离、本地植物的高度和盖度的增加而呈现出减小的趋势, 与本研究中采用高度作为入侵特征指标的结果不完全一致。可能的原因在于: 加拿大一枝黄花高度和盖度两个指标反映了其获取资源方式、扩散方式及其在不同入侵阶段所扮演的角色。一般而言, 在自然环境条件下, 加拿大一枝黄花植株高度主要反映了其对光照资源的利用程度, 同时植株越高, 越有利于种子传播, 间接反映了其通过有性繁殖远距离扩散的能力, 在入侵早期和后期如定居和扩散阶段发挥了关键作用; 盖度主要表征地下根状茎的分蘖能力和对地下资源的利用能力, 反映其通过无性繁殖短距离蔓延的特性, 在入侵中期如建群阶段发挥着重要的作用。加拿大一枝黄花为强喜阳性植物, 对光能的捕获和利用效率是决定其能否定居并很好地建群扩散的关键因素。本研究结果说明, 在乡村不同生境条件下, 加拿大一枝黄花高度一定程度上反映了其在群落中的入侵程度, 能作为其在群落中入侵特征的补充判断指标。因此, 在研究外来入侵植物特征时, 需要充分考虑入侵植物的自身特点来合理辨别其入侵程度的指标。

本研究还发现, 本地植物物种数量和盖度的交互协同作用显著抑制了加拿大一枝黄花在群落中的盖度, 本地植物物种数量和盖度对加拿大一枝黄花盖度的影响与距农田距离的交互作用不显著(图 6B)。因此, 乡村局部尺度上的人为活动可能并未改变加拿大一枝黄花入侵盖度与本地植物群落属性之间的直接关系。该结果与前人在局部小尺度研究结论相似, 但与大尺度上的研究结果相反^[16,33]。这些不同结果进一步强调了外来入侵植物的盖度变化与本地植物群落的特征密切关联, 与研究尺度紧密相关, 突出了在乡村景观尺度本地植物不同群落属性之间的协同作用在抑制单个外来植物入侵过程中的重要性。

加拿大一枝黄花入侵特征与其在乡村区域内各个人入侵地点的入侵阶段(定居、建群、扩散和暴发)有关^[15,37]。本研究的尺度涉及整个乡村区域, 难以获取其扩散到乡村内不同调查地点的入侵时间记录, 在未来研究中需要通过对不同地点植物分子标记等手段将入侵时间因素考虑进来, 以便更好地认识其在乡村扩散的过程^[22,38-39]。同时, 本研究中尚未考虑本地植物抵抗单一外来植物入侵的关键功能性状, 在未来研究中有必要借助基于功能性状的研究手段开展控制性试验, 从群落性状谱的角度厘清加拿大一枝黄花入侵乡村区域的生态学机制。此外, 伴随着乡村休闲旅游的进一步发展, 各类新引入的外来植物发生的入侵现象可能会进一步加剧, 同时已入侵的外来植物同样存在全面暴发的风险(附表 1)。因此, 需要在乡村内设立外来入侵植物长期监测样点, 进一步厘清乡村旅游过程休闲活动对外来植物入侵的影响及其作用机制。

3.3 对休闲旅游型乡村防控外来入侵植物的启示

维护提升生物多样性是乡村生态振兴过程中构建稳定的生态系统和筑牢乡村生态安全屏障的重要方面, 有效防控外来入侵植物是维护乡村生物多样性的关键环节, 是实现美丽宜居乡村的基石^[4,40]。本研究发现, 休闲旅游乡村加拿大一枝黄花入侵各类生境的现象较为严重, 存在进一步扩散蔓延的风险, 因此为全过程精准化管控外来入侵植物, 亟需研发集乡村外来入侵植物监测和防控于一体的全链条生态综合管理技术。首先, 针对外来入侵植物管控开展前瞻性乡村生态景观规划, 构建乡村绿色基础设施。具体而言, 应针对外来入侵植物的有性繁殖远距离扩散和无性繁殖近距离蔓延同时进行协同防控, 需要有针对性地调整和改造乡村内不同生境类型, 恢复和复原乡村生态系统与栖息地生境, 构建小微

生态屏障; 识别并筛选出能够抵抗外来植物入侵的乡土植物种类、群落配置及其空间组合模式, 形成对外来植物入侵具有高抵抗力的乡土植物群落, 研发基于兼顾外来入侵植物替代控制和乡村本地生物多样性保护的前瞻性生态规划技术并应用到现有的乡村规划实践中, 以提高乡村不同生境抵抗外来植物入侵的能力。其次, 开展已入侵的外来植物监测评估和人工防控措施。充分发挥社区志愿者的作用, 定期监测外来入侵植物的种类分布及数量并实时掌握其动态变化, 有针对性地及时采取人工措施对其繁殖体(如种子和地下根状茎等)予以清除, 并采用多种形式加大对游客防控外来入侵植物知识的宣传。

4 结论

本研究通过对江南休闲旅游型乡村牌坊社区外来入侵植物加拿大一枝黄花入侵特征及其影响因素开展调查发现: 1) 加拿大一枝黄花在休闲旅游型乡村呈现出多散点状分布状态, 局部生境形成了单优群落, 存在着在乡村其他生境入侵扩散并威胁生物多样性的风险, 需要进一步高度警惕; 2) 乡村自然植被、农业植被和绿地植被均受到加拿大一枝黄花不同程度的入侵, 在绿地植被中表现更为严重, 宅基地是其重点入侵的生境类型; 3) 已入侵采样点的加拿大一枝黄花高度和盖度受到不同自然和人为活动因素以及如本地植物群落属性的制约, 其高度变化主要受到入侵群落中本地植物群落属性制约, 盖度则随着距农田距离、本地植物物种数量和盖度的增加而减小, 本地植物盖度对加拿大一枝黄花盖度的抑制作用随着群落中本地植物物种数量增加而增强。因此, 本地植物不同群落属性之间的协同作用在抑制单个外来植物入侵过程中扮演着重要作用。研究结果深化了对乡村小尺度单个外来植物入侵机制的科学认识, 为研发集外来入侵植物监测评估和防控于一体的全链条生态综合管理技术提供了科学依据, 对美丽乡村建设过程其他类型乡村外来植物入侵防控和生物多样性维护也具有重要的启迪作用。

致谢 感谢南京市江宁区牌坊社区在野外调查过程中提供的帮助。

参考文献 References

- [1] YANG Q, WEIGELT P, FRISTOE T S, et al. The global loss of floristic uniqueness[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 7290
- [2] DÍAZ S, MALHI Y. Biodiversity: concepts, patterns, trends, and perspectives[J]. *Annual Review of Environment and*

Resources, 2022, 47: 31–63

- [3] LIU D J, SEMENCHUK P, ESSL F, et al. The impact of land use on non-native species incidence and number in local assemblages worldwide[J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 2090
- [4] 陈宝雄, 孙玉芳, 韩智华, 等. 我国外来入侵生物防控现状、问题和对策[J]. *生物安全学报*, 2020, 29(3): 157–163
CHEN B X, SUN Y F, HAN Z H, et al. Challenges in preventing and controlling invasive alien species in China[J]. *Journal of Biosafety*, 2020, 29(3): 157–163
- [5] MONTESINOS D. Fast invasives fastly become faster: invasive plants align largely with the fast side of the plant economics spectrum[J]. *Journal of Ecology*, 2022, 110(5): 1010–1014
- [6] LEMOINE N P, BURKEPILE D E, PARKER J D. Quantifying differences between native and introduced species[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2016, 31(5): 372–381
- [7] BOSCUCCI F, SIGURA M, DE SIMONE S, et al. Exotic plant invasion in agricultural landscapes: a matter of dispersal mode and disturbance intensity[J]. *Applied Vegetation Science*, 2018, 21(2): 250–257
- [8] 吴晓雯, 罗晶, 陈家宽, 等. 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[J]. *植物生态学报*, 2006, 30(4): 576–584
WU X W, LUO J, CHEN J K, et al. Spatial patterns of invasive alien plants in China and its relationship with environmental and anthropological factors[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2006, 30(4): 576–584
- [9] 李惠茹, 严靖, 杜诚, 等. 中国外来植物入侵风险评估研究[J]. *生态学报*, 2022, 42(16): 6451–6463
LI H R, YAN J, DU C, et al. Current status and suggestions of research on invasive risk assessment of alien plants in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(16): 6451–6463
- [10] ZHOU Q L, WANG L X, JIANG Z Y, et al. Effects of climatic and social factors on dispersal strategies of alien species across China[J]. *The Science of the Total Environment*, 2020, 749: 141443
- [11] 张帅, 郭水良, 管铭, 等. 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[J]. *生态学报*, 2010, 30(16): 4241–4256
ZHANG S, GUO S L, GUAN M, et al. Diversity differentiation of invasive plants at a regional scale in China and its influencing factors: according to analyses on the data from 74 regions[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(16): 4241–4256
- [12] 中华人民共和国农业农村部. 中国美丽乡村十大创建模式[EB/OL]. 北京: 中华人民共和国农业农村部, 2014 (2014-02-24). http://www.moa.gov.cn/xw/tpxw/201402/t20140224_3794984.htm.
Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Top ten models for creating beautiful countryside in China[EB/OL]. Beijing: Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China, 2014 (2014-

- 02-24). http://www.moa.gov.cn/xw/tpxw/201402/t20140224_3794984.htm.
- [13] 吴竞仑, 李永丰, 王一专, 等. 苏南地区加拿大一枝黄花繁殖地的植物群落[J]. *江苏农业学报*, 2005, 21(3): 176-179
WU J L, LI Y F, WANG Y Z, et al. Plant community in growth areas of *Solidago canadensis* in southern Jiangsu Province[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2005, 21(3): 176-179
- [14] 中华人民共和国农业农村部, 中华人民共和国自然资源部, 中华人民共和国生态环境部, 等. 重点管理外来入侵物种名录 [EB/OL]. 北京. [2022-12-20]. https://www.moa.gov.cn/govpublic/KJJYS/202211/t20221109_6415160.htm.
Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China, Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, et al. List of alien invasive species under key management[EB/OL]. Beijing. [2022-12-20]. https://www.moa.gov.cn/govpublic/KJJYS/202211/t20221109_6415160.htm.
- [15] 葛结林, 何家庆, 孙晓方, 等. 入侵植物加拿大一枝黄花对土壤水分变化的生态学响应[J]. *西北植物学报*, 2010, 30(3): 575-585
GE J L, HE J Q, SUN X F, et al. Ecological responses of the invasive alien plant *Solidago canadensis* to changes of soil water content[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2010, 30(3): 575-585
- [16] DONG L J, YU H W, HE W M. What determines positive, neutral and negative impacts of *Solidago canadensis* invasion on native plant species richness?[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 16804
- [17] CZORTEK P, KRÓLAK E, BORKOWSKA L, et al. Effects of surrounding landscape on the performance of *Solidago canadensis* L. and plant functional diversity on heavily invaded post-agricultural wastelands[J]. *Biological Invasions*, 2023, 25(8): 2477-2494
- [18] 马宏燊, 王宏伟, 张庆费, 等. 上海崇明岛人工林群落对加拿大一枝黄花入侵的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2019, 35(6): 756-763
MA H Y, WANG H W, ZHANG Q F, et al. Effects of plantation community on the invasion of *Solidago canadensis* at Chongming Island, Shanghai[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2019, 35(6): 756-763
- [19] 中国生态系统研究网络科学委员会. 陆地生态系统生物观测规范[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2007
China Ecosystem Research Network Science Committee. Protocols for Standard Biological Observation and Measurement in Terrestrial Ecosystems[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2007
- [20] ZEEMAN B J, MINDEN V, MORGAN J W. Non-native plant cover and functional trait composition of urban temperate grasslands in relation to local- and landscape-scale road density[J]. *Biological Invasions*, 2018, 20(10): 3025-3036
- [21] CAPINHA C, ESSL F, PORTO M, et al. The worldwide networks of spread of recorded alien species[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2023, 120(1): e2201911120
- [22] ASCENSÃO F, LATOMBE G, ANADÓN J D, et al. Drivers of compositional dissimilarity for native and alien birds: the relative roles of human activity and environmental suitability[J]. *Biological Invasions*, 2020, 22(4): 1447-1460
- [23] 张中信, 张小平, 吴甘霖, 等. 入侵植物加拿大一枝黄花和本地一枝黄花的遗传多样性比较[J]. *生态与农村环境学报*, 2012, 28(2): 146-150
ZHANG Z X, ZHANG X P, WU G L, et al. Comparison in genetic diversity between invasive species *Solidago canadensis* and native species *S. decurrens*[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2012, 28(2): 146-150
- [24] 杨韶松, 郑凤萍, 申时才, 等. 加拿大一枝黄花在云南省的入侵现状及防控策略[J]. *中国农学通报*, 2022, 38(35): 83-89
YANG S S, ZHENG F P, SHEN S C, et al. Current invasion situation and control strategy of *Solidago canadensis* in Yunnan Province[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2022, 38(35): 83-89
- [25] 周治明. 南京市江宁区加拿大一枝黄花发生现状及建议[J]. *现代农业科技*, 2014(11): 139, 143
ZHOU Z M. Occurrence status and suggestions of *Solidago canadensis* in Jiangning District of Nanjing City[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2014(11): 139, 143
- [26] SAPSFORD S J, BRANDT A J, DAVIS K T, et al. Towards a framework for understanding the context dependence of impacts of non-native tree species[J]. *Functional Ecology*, 2020, 34(5): 944-955
- [27] IRL S D, SCHWEIGER A H, STEINBAUER M, et al. Human impact, climate and dispersal strategies determine plant invasion on islands[J]. *Journal of Biogeography*, 2021, 48(8): 1889-1903
- [28] DAWSON W, MOSER D, VAN KLEUNEN M, et al. Global hotspots and correlates of alien species richness across taxonomic groups[J]. *Nature Ecology & Evolution*, 2017, 1: 186
- [29] MOTTI R, ZOTTI M, BONANOMI G, et al. Climatic and anthropogenic factors affect *Ailanthus altissima* invasion in a Mediterranean region[J]. *Plant Ecology*, 2021, 222(12): 1347-1359
- [30] 黄小荣. 南宁老虎岭林区多种外来植物入侵程度与影响因子模型解释[J]. *植物研究*, 2020, 40(3): 339-346
HUANG X R. Modeling association among multispecies plant invasion and impact factors in Laohuling Forest, Nanning[J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2020, 40(3): 339-346
- [31] VAN KLEUNEN M, BOSSDORF O, DAWSON W. The ecology and evolution of alien plants[J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2018, 49: 25-47
- [32] 陈彤, 刘文莉, 张崇邦, 等. 加拿大一枝黄花入侵对本土植物群落动态的影响及其机制[J]. *植物生态学报*, 2012, 36(3):

- 253–261
CHEN T, LIU W L, ZHANG C B, et al. Effects of *Solidago canadensis* invadation on dynamics of native plant communities and their mechanisms[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2012, 36(3): 253–261
- [33] 陈旭, 王国严, 彭培好, 等. 四川攀西地区云南松群落物种多样性和谱系多样性对紫茎泽兰入侵的影响[J]. *生物多样性*, 2021, 29(7): 865–874
CHEN X, WANG G Y, PENG P H, et al. Effects of taxonomic and phylogenetic diversity of resident *Pinus yunnanensis* communities on *Ageratina adenophora* invasion in the Panxi region, Sichuan Province[J]. *Biodiversity Science*, 2021, 29(7): 865–874
- [34] 郭连金, 徐卫红, 孙海玲, 等. 空心莲子草入侵对乡土植物群落组成及植物多样性的影响[J]. *草业科学*, 2009, 26(7): 137–142
GUO L J, XU W H, SUN H L, et al. Impacts of the invasion of *Alternanthera philoxeroides* on the species composition and diversity of native vegetation community[J]. *Pratacultural Science*, 2009, 26(7): 137–142
- [35] BEAURY E M, FINN J T, CORBIN J D, et al. Biotic resistance to invasion is ubiquitous across ecosystems of the United States[J]. *Ecology Letters*, 2020, 23(3): 476–482
- [36] 罗文启, 符少怀, 杨小波, 等. 海南岛入侵植物的分布特点及其对本地植物的影响[J]. *植物生态学报*, 2015, 39(5): 486–500
LUO W Q, FU S H, YANG X B, et al. Distribution patterns of alien invasive plants and their influences on native plants of Hainan Island[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015, 39(5): 486–500
- [37] FUNK J L, NGUYEN M A, STANDISH R J, et al. Global resource acquisition patterns of invasive and native plant species do not hold at the regional scale in Mediterranean type ecosystems[J]. *Biological Invasions*, 2017, 19(4): 1143–1151
- [38] OMER A, FRISTOE T, YANG Q, et al. The role of phylogenetic relatedness on alien plant success depends on the stage of invasion[J]. *Nature Plants*, 2022, 8(8): 906–914
- [39] HUI C, PYŠEK P, RICHARDSON D M. Disentangling the relationships among abundance, invasiveness and invasibility in trait space[J]. *NPJ Biodiversity*, 2023, 2: 13
- [40] 毛江涛, 徐文婷, 葛结林, 等. 乡村生态景观生物多样性研究热点和趋势——基于文献计量研究[J]. *生态学报*, 2022, 42(9): 3869–3877
MAO J T, XU W T, GE J L, et al. Research hotspots and trends of rural ecological landscape biodiversity—Based on bibliometric research[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(9): 3869–3877