

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw202302057

李伟杰, 朱珣之, 罗会婷, 等, 2023. 南京市加拿大一枝黄花入侵地群落的物种组成与多样性特征研究 [J]. 广西植物, 43(8): 1488–1500.

LI WJ, ZHU XZ, LUO HT, et al., 2023. Species composition and diversity characteristics of invaded community of *Solidago canadensis* in Nanjing [J]. *Guihaia*, 43(8): 1488–1500.



南京市加拿大一枝黄花入侵地群落的物种组成与多样性特征研究

李伟杰^{1,2}, 朱珣之², 罗会婷², 黄 犀², 汤诗杰^{1,2*}

(1. 南京中医药大学 研究生院, 南京 210023; 2. 江苏省中国科学院植物研究所, 南京 210014)

摘 要: 为探究外来植物加拿大一枝黄花(*Solidago canadensis*)入侵与南京市本土植物多样性的关系, 该文采用踏查及样方调查对其入侵地群落的物种组成与多样性进行研究。结果表明:(1)入侵地群落中共有维管植物 200 种(含种下单元), 隶属于 62 科 156 属, 其中被子植物 195 种, 裸子植物 1 种, 蕨类植物 4 种; 数量最多的是菊科(Asteraceae)和禾本科(Poaceae)植物, 分别有 25 种和 24 种; 从生活型来看, 草本植物占多数, 有 133 种, 占有种的 66.50%; 此外, 群落内尚有其他外来植物 29 种。群落中重要值最大的是加拿大一枝黄花, 为 40.00%; 其次是救荒野豌豆(*Vicia sativa*), 为 7.00%。(2)从植物区系看, 非入侵地中植物科的区系分布型共 4 个, 而入侵地植物科的区系类型仅有 3 个, 其中泛热带分布、世界分布和北温带分布为两者均有, 东亚和北美间断分布型仅在非入侵地中存在。非入侵地植物科的区系以世界分布型为主, 有 13 科, 占该类型群落中所有科的 39.39%; 入侵地则以泛热带分布型为主, 有 16 科, 占总科数的 45.71%。非入侵地中植物属的区系分布型有 10 个, 而入侵地有 12 个, 两者区系成分相近, 旧世界热带型和热带亚洲至热带大洋洲分布型仅在入侵地中出现。北温带分布型和世界分布型同为两者中最主要成分。入侵地及非入侵地群落属的区系 R/T 值分别为 0.58 和 0.38, 种系分化度分别为 3.29 和 3.11。(3)重度入侵群落的 Margalef 指数(*E*)与非入侵及轻度入侵群落相比, 显著降低; 此外, 重度入侵群落的 Simpson 指数(*D*)、Shannon-Weiner (*H'*)指数和 Pielou 指数(*J*)均显著低于非入侵、轻度入侵、中度入侵群落。(4)不同生境之间加拿大一枝黄花群落的 *E*、*D*、*H'* 和 *J* 均无显著性差异。该研究可为南京地区的加拿大一枝黄花入侵地的治理防控和生态恢复, 以及进一步的科学研究提供强有力的理论支撑。

关键词: 加拿大一枝黄花, 入侵植物, 植物区系, 物种多样性, 群落特征

中图分类号: Q948 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2023)08-1488-13

Species composition and diversity characteristics of invaded community of *Solidago canadensis* in Nanjing

LI Weijie^{1,2}, ZHU Xunzhi², LUO Huiting², HUANG Xi², TANG Shijie^{1,2*}

(1. Graduate School, Nanjing University of Chinese Medicine, Nanjing 210023, China; 2. Institute of Botany, Jiangsu Province and Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210014, China)

收稿日期: 2023-07-21

基金项目: 江苏省自然资源发展专项资金(JSZRHYKJ202112)。

第一作者: 李伟杰(1993-), 硕士研究生, 研究方向为植物学, (E-mail) lwj16080@126.com。

*通信作者: 汤诗杰, 博士, 研究员, 研究方向为植物资源学, (E-mail) tangshijie69@aliyun.com。

Abstract: In order to investigate the relationship between the invasion of the exotic plant *Solidago canadensis* and diversity of native plants in Nanjing, the species composition and diversity of its community were studied by using the tracking and quadrat methods. The results were as follows: (1) A total of 200 vascular plant species, including varieties and subspecies classification, were found in the invaded communities, belong to 156 genera and 62 families, including 195 angiosperms, one gymnosperm, and four ferns. The species-richest families were Asteraceae and Poaceae, with 25 and 24 species respectively. In terms of their life forms, herbaceous plants accounted for the majority, with 133 species (66.50%). In addition, there were 29 other alien plant species in these communities. The most dominant species in the community was *Solidago canadensis*, with a high ecological important value of 40.00%, followed by *Vicia sativa* (7.00%). (2) There were four floristic types of flora families in uninvaded communities, and only three types in invaded communities. Pantropic type, cosmopolitan type and north temperate type existed in both communities, while East Asia and North America disjunct type only in uninvaded communities. In the uninvaded communities, the floristic types were mainly cosmopolitan, with 13 families, accounting for 39.39% of all families. Pantropic was the dominant species in the invaded communities, with 16 families, accounting for 45.71% of the total. There were 10 floristic types of flora genera in uninvaded habitats and 12 in invaded habitats, with similar floristic composition, but the old-world temperate type and tropical Asia to tropical Australasia type only appeared in invaded communities. The north temperate and cosmopolitan type were the most important components of both invaded and uninvaded communities. The R/T values of invaded and uninvaded communities of genera were 0.58 and 0.38, and the species differentiation were 3.29 and 3.11, respectively. (3) The Margalef index (E) of heavily invaded communities was significantly lower than that of uninvaded and lightly invaded communities. In addition, the Simpson index (D), Shannon Weiner index (H'), and Pielou index (J) of heavily invaded communities were significantly reduced compared to uninvaded, lightly invaded, and moderately invaded communities. (4) There were no significant differences in E , D , H' , and J in different habitats. This study can provide basic data for the management, prevention and control, and ecological restoration of the invaded areas of *S. canadensis* in Nanjing, as well as further scientific research.

Key words: *Solidago canadensis*, invasive plant, flora, species diversity, community characteristics

外来生物入侵可能导致本地生态系统结构和功能的剧烈变化,已成为全球最重要的环境问题之一(Driscoll, 2017)。外来植物入侵与群落生物多样性的关系一直是入侵生物学的重要科学问题(Elton, 1958; Levine & D'Antonio, 1999)。一般认为,植物群落的物种多样性与群落可入侵性密切相关,较高的本地物种多样性有助于提高群落稳定性,进而抵抗外来植物入侵(Byun et al., 2013; Wang et al., 2019a, b; Wang et al., 2019; Cavieres, 2021)。同时,入侵植物对生态系统的结构和功能具有显著的影响(Wang et al., 2019b),外来物种的入侵会降低或者破坏入侵地的物种多样性,进而影响群落的生态系统功能(Wang et al., 2019b)。总体而言,在小尺度上,外来入侵植物会显著降低植物群落的分类多样性,即本地物种多样性与外来入侵植物多样性呈显著负相关。但值得注意的是,在较大的尺度上,入侵与本地植物群落的多样性之间往往表现出正相关关系,也就是丰富度相对较高的群落更容易受到入侵者的威胁(Abella et al., 2012; Ellis et al.,

2012)。因此,关于外来物种与本地物种多样性的关系,在科学界引起了一系列争论(Dong et al., 2015; Wang et al., 2018)。

加拿大一枝黄花(*Solidago canadensis*)是菊科(Asteraceae)一枝黄花属(*Solidago* L.)的多年生草本植物,原产于北美,迄今已扩散至亚洲、欧洲大部分国家、澳大利亚以及新西兰等地,现已成为世界性的入侵植物(林榕和陈艺林, 1985; Schittko & Wurtsk, 2014)。其结实量多,种子萌发成活率高,除有性繁殖外,还能进行无性繁殖(Walck et al., 1998; 黄华和郭水良, 2005),这使得它能快速形成大量种群,在中国东部地区迅速扩散,成为华东地区常见杂草,随后传播到我国西部、北部和南部,是我国分布最广的外来入侵植物之一(董梅等, 2006)。加拿大一枝黄花的入侵挤占了本土物种的生态位,对入侵地的农林牧渔及相关产业造成了严重影响,现已成为威胁中国本土生物多样性与生态环境的重要因素之一,2014年被归为一级入侵植物(闫小玲等, 2014),现被收录在《重点管

理外来入侵物种名录》(中华人民共和国农业农村部,2022);在欧洲亦被认为是生物防治中经典的20大环境杂草之一(Zhu et al., 2022)。

有关加拿大一枝黄花的入侵生态学研究,涉及化学成分(Elshafie et al., 2019; Wandjou et al., 2020)、入侵机理(万凌云,2019;程继亮,2020)及防控方法(金红玉等,2019;Gala-Czekaj et al., 2021)等。加拿大一枝黄花可对入侵地微生物群落(Betekhtina et al., 2016;杨海君等,2022)、传粉昆虫群落结构(Lysenkov & Ustinova, 2020)等方面造成影响;关于植物群落生态学的研究,更多是关注其入侵后对本土植物所产生的化感作用(Wang et al., 2020;Zandi et al., 2020),以及其功能性状对环境的响应(周晓慧等,2019;高苑苑等,2021)。此外,加拿大一枝黄花入侵与植物群落结构改变之间的相关性也引起了部分学者关注,如陈友吾等(2009)评价了加拿大一枝黄花入侵对海岛植物多样性的影响,认为其造成海岛植物多样性降低;郭晓辉等(2011)和汤敏喆等(2012)发现加拿大一枝黄花不同季节对入侵地植物多样性下降程度的影响不同,并且可能引起郁闭度较高的林区植物多样性下降;马宏燊等(2019)探讨了森林群落对加拿大一枝黄花入侵性的影响;Wang等(2021)发现在不同程度加拿大一枝黄花入侵下,植物种类对群落稳定性的贡献最大;綦顺英等(2022)研究了加拿大一枝黄花入侵后土壤种子库的变化。

南京是我国综合性的工业城市之一,经济高速发展,城市化进程快,造成其原有的自然生态环境破坏严重(赵凯等,2009)。宁镇茅山低山丘陵是江苏省丘陵的主要组成,物种丰富,珍稀濒危植物较多,野生花卉资源丰富且是江苏省野生药用植物资源最为丰富的地区之一,该区包括南京、镇江等地(刘启新等,2015;张艳梅,2018;孙欣欣和董丽娜,2022)。加拿大一枝黄花因其观赏价值,早在20世纪30年代被引种至上海、南京等地,常生于田埂、路边、蔬果园和住宅四周,现已在南京泛滥成灾,造成难以评估的经济损失,为了治理加拿大一枝黄花,江苏省在2006年就花费了约1200多万元(刘启新,2015;周晓慧等,2019;程继亮,2020)。但是,关于南京市加拿大一枝黄花的发生状况,以及关于本土植物多样性影响的研究仍十分匮乏,目前仅见六合区、江宁区、浦口区有加拿大一枝黄花发生状况报道(张琴等,2011;周

治明,2014;吴承东等,2017),现状不清严重制约着外来入侵植物防控管理工作。因此,全面调查加拿大一枝黄花在整个南京市的发生状况及其对本土植物多样性的影响,对其管控有重要意义。本研究以南京市不同入侵程度及不同生境的加拿大一枝黄花群落为研究对象,分析并阐明其与本土植物群落的物种组成及植物多样性之间的关系,以期对加拿大一枝黄花的防控治理提供坚实的理论依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区域概况

南京市地处长江的中下游,位于中国东部、江苏省西南部,31°14'—32°37' N、118°22'—119°14' E,占地面积约6587.02 km²,是华东地区重要的交通枢纽。南京属北亚热带湿润气候区,四季分明,光照充足,气候温和,降雨充沛,年均降水量约1106 mm,年均气温约15.2℃(孙欣欣和董丽娜,2022)。

1.2 调查方法

野外调查工作于2021年10月—2023年4月进行,在前期踏查后,根据加拿大一枝黄花实际分布状况,以典型抽样法,在南京市的玄武区、栖霞区、江宁区、浦口区、六合区、溧水区、高淳区,各设置若干个5 m × 5 m 调查样地,在各样地的四个角落及中心各设置一个1 m × 1 m 的样方,调查加拿大一枝黄花入侵样地共52个,其中重度入侵25个、中度入侵16个、轻度入侵11个。52个样地分布在平地、山地、湿地、人工环境这4种不同的生境中,每种生境各13个样地,其中湿地指靠近池塘、溪流、河道等土壤湿度较高的陆地环境,人工环境指公园、马路旁、建筑废弃地或者废弃耕地等人为干扰强烈的环境。为观察加拿大一枝黄花入侵后对植物区系的影响,在其中9个样地附近相似生境下设置无加拿大一枝黄花的非入侵样地,调查样地分布概况见图1。入侵程度的界定根据现场观察,样地中加拿大一枝黄花覆盖度小于30%为轻度入侵;加拿大一枝黄花覆盖度30%~60%为中度入侵;加拿大一枝黄花覆盖度高于60%为重度入侵。

参照方精云等(2009)的植物群落调查方法,统计各样地内出现的所有植物物种,记录样方中草本植物的种类、株数和盖度,并采集标本用于分类鉴

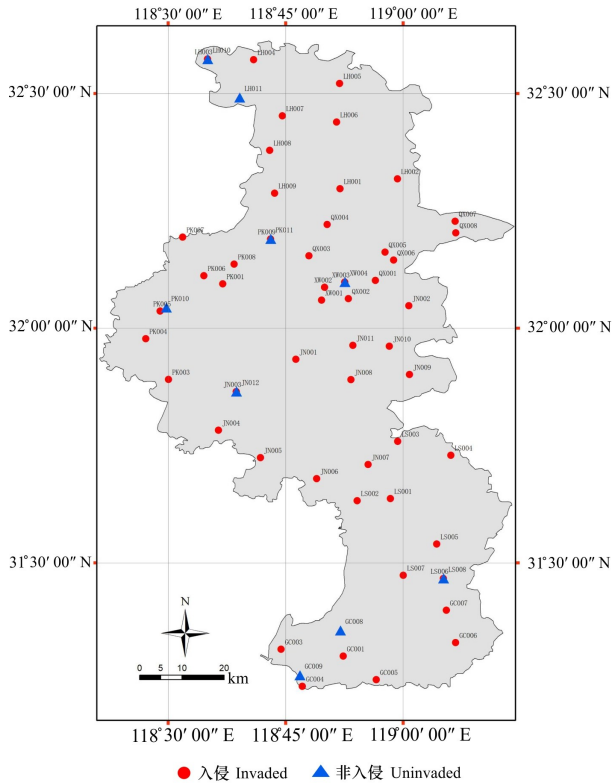


图 1 加拿大一枝花黄花调查样地分布概况

Fig. 1 Distribution of *Solidago canadensis* communities

定。本研究的株数统计中,克隆性植物统计无性分枝数,禾本科植物统计分蘖数,丛生性、匍匐及攀缘植物则统计分枝数,普通植物统计个体数。盖度采用网格法测定,即将 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的小样方分为 100 个 $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ 的小网格,并用目测法估算盖度。

1.3 数据处理

1.3.1 群落重要值 群落重要值 (important value, IV) 依据方精云等 (2009) 的计算方法进行统计,公式如下:

$$IV = (\text{相对多度} + \text{相对频度} + \text{相对盖度}) / 3$$

式中:相对多度为样方中某一物种的株数;相对频度为在所有样方中某一物种出现的频率;相对盖度是指某一物种地上植株的垂直投影面积在样方面积中所占的百分比。本研究仅统计样方内物种的重要值;对于在样地内有分布而样方内无分布的物种,只记录物种信息,不统计重要值。

1.3.2 植物区系地理分析 群落中植物科的区系类型按照李锡文 (1996)、植物属的区系类型则依据吴征镒 (1991) 的分布区类型进行统计划分。通

过属的 R/T 值 (黄健, 2013; 姬红利等, 2019), 即植物区系成分中热带性质成分属 (R) 与温带性质成分属 (T) 的数量比值, 比较加拿大一枝黄花入侵地、非入侵地以及邻近区域群落植物区系组成的性质。采用种系分化度 (species differentiation, SD) 表示该植物区系的种系分化程度; SD 值越大, 表示该区系的分化程度越高 (黄健, 2013)。

$$SD = N_g / N_f + N_s / N_g$$

式中: N_s 、 N_g 、 N_f 分别表示一个植物区系中种、属、科的数量。

1.3.3 群落多样性指数 本研究中加拿大一枝黄花入侵地植物群落的 α 多样性采用丰富度 Magarlef 指数 (E) (Magurran, 1988)、优势度 Simpson 指数 (D) (Simpson, 1949)、Shannon-Wiener 多样性指数 (H') (钱迎倩和马克平, 1994)、Pielou 均匀度指数 (J) (钱迎倩和马克平, 1994) 这 4 个指标进行分析, 计算公式如下:

$$\text{Magarlef 指数: } E = (S - 1) / \ln N;$$

$$\text{Simpson 指数: } D = 1 - \sum P_i^2;$$

$$\text{Shannon-Wiener 指数: } H' = -\sum P_i \ln P_i;$$

$$\text{Pielou 均匀度指数: } J = (-\sum P_i \ln P_i) / \ln S.$$

式中: S 为样方内统计所得植物种类总和; N 为样方内全部物种的个体数量总和; P_i 为物种 i 的个体数量占全部物种个体数量的比率。

1.3.4 数据统计与分析 植物群落数据整理、统计与分析在 Excel 2021 软件中完成, 群落多样性指数相关性分析, 在 SPSS 26.0 软件中利用单因素 ANOVA 检验完成。

2 结果与分析

2.1 加拿大一枝黄花入侵地群落的物种组成

加拿大一枝黄花入侵地群落的植物名录 (http://www.guihaia-journal.com/gxzw/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=230816&flag=1) 记录到维管植物共 200 种 (含种下分类单元, 下同), 分别隶属于 62 科 156 属, 其中绝大部分是被子植物, 有 195 种, 占有物种数的 97.50%, 而裸子植物和蕨类植物分别只有 1 种和 4 种。从生活型来看, 草本占多数, 共有 133 种, 占有种类的 66.50%, 其次是藤本及乔木, 分别有 28 种、22 种, 各占 14.00%、11.00%; 灌木种类最少, 只有 17 种。

此外, 在入侵地群落中发现除加拿大一枝黄

花外的其他外来植物 29 种 (http://www.guihaia-journal.com/gxzw/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=230816&flag=1), 外来植物占有种数的 15.00%, 包括鬼针草 (*Bidens pilosa*)、小蓬草 (*Erigeron canadensis*)、垂序商陆 (*Phytolacca americana*) 等常见恶性入侵杂草, 说明入侵地对外来植物有一定的普适性。

2.1.1 加拿大一枝黄花入侵地群落植物科的组成

加拿大一枝黄花入侵地群落中的优势科(科内物种数 ≥ 20) 是菊科 (*Asteraceae*) 植物和禾本科 (*Poaceae*), 两优势科共包含 40 属和 49 种(表 1); 含 10~19 种的科有豆科 (*Fabaceae*)、唇形科 (*Lamiaceae*)、蔷薇科 (*Rosaceae*), 分别含 9 属 13 种、8 属 11 种及 6 属 11 种; 含 5~9 种的中等科有 6 科, 其中蓼科 (*Polygonaceae*)、大戟科 (*Euphorbiaceae*)、车前科 (*Plantaginaceae*) 分别有 7 种、6 种、6 种, 紫草科 (*Boraginaceae*)、莎草科 (*Cyperaceae*) 和石竹科 (*Caryophyllaceae*) 则各含 5 种; 含 2~4 种的寡种科有 23 科, 所含属、种数在不同等级科中最多, 其中石竹科 (*Caryophyllaceae*)、桑科 (*Moraceae*) 各有 4 种, 而旋花科 (*Convolvulaceae*)、毛茛科 (*Ranunculaceae*)、杨柳科 (*Salicaceae*)、茄科 (*Solanaceae*) 各含 3 种; 此外, 群落中的单种科最多, 共 28 科。

2.1.2 加拿大一枝黄花入侵地群落植物属的组成

从属水平看, 加拿大一枝黄花入侵地群落中不含数量超过 6 种的较大属或大属, 藎草属 (*Carex*)、悬钩子属 (*Rubus*) 所含物种数最多, 均有 5 种, 两属共占总属数的 1.28%; 含 2~4 种的寡种属有 26 属, 共包含 62 种, 分别占总属数和总种数的 16.67% 和 31.00%, 其中野豌豆属 (*Vicia*)、婆婆纳属 (*Veronica*)、酸模属 (*Rumex*) 均含 4 种, 而蒿属 (*Artemisia*)、鬼针草属 (*Bidens*)、大戟属 (*Euphorbia*)、狗尾草属 (*Setaria*) 各有 3 种; 单种属在群落中最多, 共有 128 属, 包含 128 种, 占总属数的 82.05%, 包含群落中 64.00% 的物种。

2.1.3 加拿大一枝黄花入侵地群落植物的重要值

样方内植物共 133 种, 对样方内植物的重要值统计分析, 重要值大于 1.00% 的物种(表 2)。加拿大一枝黄花重要值为 40.00%, 在群落中最大; 其次是救荒野豌豆 (*Vicia sativa*), 为 7.00%, 其他物种的重要值均在 5.00% 以下, 说明加拿大一枝黄花在入侵地群落中占主要地位, 是入侵地群落的

表 1 加拿大一枝黄花群落中维管植物科内属、种组成
Table 1 Classification statistics of families in *Solidago canadensis* communities

等级 Grade	科数 No. of families (%)	所含属数 No. of genera (%)	所含种数 No. of species (%)
单种科(1种) Monotypic family (1 species)	28 (45.16)	28 (17.95)	28 (14.00)
寡种科(2~4种) Depauperate family (2-4 species)	23 (37.10)	47 (30.13)	54 (27.00)
中等科(5~9种) Medium family (5-9 species)	6 (9.68)	18 (11.54)	34 (17.00)
较大科(10~19种) Secondary large family (10-19 species)	3 (4.84)	23 (14.74)	35 (17.50)
大科(≥ 20 种) Large family (≥ 20 species)	2 (3.22)	40 (25.64)	49 (24.50)

优势种, 而救荒野豌豆、野老鹳草 (*Geranium carolinianum*) 则是主要伴生物种。

2.2 植物区系地理分析

2.2.1 非入侵地与加拿大一枝黄花入侵地群落的区系地理比较

对 9 个加拿大一枝黄花入侵地群落及 9 个非入侵地群落进行物种统计, 并分别对两者的植物区系进行分析(表 3)。从表 3 看出, 非入侵地共有种子植物 73 种, 隶属于 33 科 66 属; 入侵地种子植物共 90 种, 隶属于 35 科 70 属。

科的区系分析结果表明, 非入侵地植物科的区系分布型共 4 个, 而入侵地植物科的区系类型只有 3 个, 其中泛热带分布、世界分布和北温带分布为两者均有, 东亚和北美间断分布型仅在非入侵地中。非入侵地植物科的区系以世界分布型为主, 有 13 科, 占该类型群落中所有科的 39.39%; 入侵地则以泛热带分布型为主, 有 16 科, 占总科数的 45.71%。北温带分布型在两者中均有分布, 非入侵地中有 11 科, 占 33.33%, 而入侵地中有 6 科, 仅占总科数的 17.14%; 此外, 非入侵地中泛热带分布型及东亚和北美间断分布型科分别占总科数的 24.24% 和 3.03%; 入侵地中世界分布型占 37.14%。

属的区系分析结果表明, 非入侵地中植物属的区系分布型有 10 个, 而入侵地有 12 个, 两者区系成分相近, 旧世界热带型和热带亚洲至热带大

表 2 南京市加拿大一枝黄花入侵地植物群落物种组成及重要值分析 ($IV \geq 1.00\%$)
Table 2 Species compositions and important values of invaded communities of *Solidago canadensis* in Nanjing City ($IV \geq 1.00\%$)

物种名 Species	科名 Family name	属名 Genus name	重要值 IV(%)
加拿大一枝黄花 <i>Solidago canadensis</i>	菊科 Asteraceae	一枝黄花属 <i>Solidago</i>	40.00
救荒野豌豆 <i>Vicia sativa</i>	豆科 Fabaceae	野豌豆属 <i>Vicia</i>	7.00
野老鹳草 <i>Geranium carolinianum</i>	牻牛儿苗科 Geraniaceae	老鹳草属 <i>Geranium</i>	5.00
拉拉藤 <i>Galium spurium</i>	茜草科 Rubiaceae	拉拉藤属 <i>Galium</i>	4.00
小巢菜 <i>Vicia hirsuta</i>	豆科 Fabaceae	野豌豆属 <i>Vicia</i>	3.00
四籽野豌豆 <i>V. tetrasperma</i>	豆科 Fabaceae	野豌豆属 <i>Vicia</i>	3.00
一年蓬 <i>Erigeron annuus</i>	菊科 Asteraceae	飞蓬属 <i>Erigeron</i>	2.00
窃衣 <i>Torilis scabra</i>	伞形科 Apiaceae	窃衣属 <i>Torilis</i>	2.00
野艾蒿 <i>Artemisia lavandulifolia</i>	菊科 Asteraceae	蒿属 <i>Artemisia</i>	2.00
钻叶紫菀 <i>Symphotrichum subulatum</i>	菊科 Asteraceae	联毛紫菀属 <i>Symphotrichum</i>	2.00
广布野豌豆 <i>Vicia cracca</i>	豆科 Fabaceae	野豌豆属 <i>Vicia</i>	2.00
荻 <i>Miscanthus sacchariflorus</i>	禾本科 Poaceae	芒属 <i>Miscanthus</i>	1.00
雀麦 <i>Bromus japonicus</i>	禾本科 Poaceae	雀麦属 <i>Bromus</i>	1.00
刺儿菜 <i>Cirsium arvense</i> var. <i>integrifolium</i>	菊科 Asteraceae	蓟属 <i>Cirsium</i>	1.00
山东鹅观草 <i>Elymus shandongensis</i>	禾本科 Poaceae	披碱草属 <i>Elymus</i>	1.00
野胡萝卜 <i>Daucus carota</i>	伞形科 Apiaceae	胡萝卜属 <i>Daucus</i>	1.00
狗尾草 <i>Setaria viridis</i>	禾本科 Poaceae	狗尾草属 <i>Setaria</i>	1.00
蛇莓 <i>Duchesnea indica</i>	蔷薇科 Rosaceae	蛇莓属 <i>Duchesnea</i>	1.00
葎草 <i>Humulus scandens</i>	大麻科 Cannabaceae	葎草属 <i>Humulus</i>	1.00
喜旱莲子草 <i>Alternanthera philoxeroides</i>	苋科 Amaranthaceae	莲子草属 <i>Alternanthera</i>	1.00
爵床 <i>Justicia procumbens</i>	爵床科 Acanthaceae	爵床属 <i>Justicia</i>	1.00
小蓬草 <i>Erigeron canadensis</i>	菊科 Asteraceae	飞蓬属 <i>Erigeron</i>	1.00
天葵 <i>Semiaquilegia adoxoides</i>	毛茛科 Ranunculaceae	天葵属 <i>Semiaquilegia</i>	1.00
无心菜 <i>Arenaria serpyllifolia</i>	石竹科 Caryophyllaceae	无心菜属 <i>Arenaria</i>	1.00
艾 <i>Artemisia argyi</i>	菊科 Asteraceae	蒿属 <i>Artemisia</i>	1.00
芒 <i>Miscanthus sinensis</i>	禾本科 Poaceae	芒属 <i>Miscanthus</i>	1.00
阿拉伯婆婆纳 <i>Veronica persica</i>	车前科 Plantaginaceae	婆婆纳属 <i>Veronica</i>	1.00
忍冬 <i>Lonicera japonica</i>	忍冬科 Caprifoliaceae	忍冬属 <i>Lonicera</i>	1.00
南苜蓿 <i>Medicago polymorpha</i>	豆科 Fabaceae	苜蓿属 <i>Medicago</i>	1.00
白茅 <i>Imperata cylindrica</i>	禾本科 Poaceae	白茅属 <i>Imperata</i>	1.00

洋洲分布型仅在入侵地中出现。北温带分布型和世界分布型同为两者中最主要成分,其中在非入侵地中各有 20 属和 17 属,分别占非入侵群落中所有属的 30.30%和 25.76%,而入侵地中则分别有 22 属和 19 属,各占 31.43%和 27.14%。泛热带分布型属在非入侵地和入侵地分别占有属数的 12.12%和 14.29%;旧世界温带分布型属在非入侵

地和入侵地则分别占有属数的 10.61%和 7.14%;此外,非入侵地东亚分布属占有属数的 9.09%,其余各分布型均为 5 属以下。

2.2.2 与邻近城市植物区系属的分布区类型比较

将加拿大一枝黄花入侵地与非入侵地群落的种子植物区系与整个南京市的种子植物区系对比(赵凯等,2009),并与邻近的宜兴市(张文婷,2012)、

常州市(沈静静,2013)、徐州市(梁珍海等,2014)等地区的种子植物区系进行比较,计算其 R/T 值,比较各区域植物区系的性质,R/T 值越大,说明热带性越强,反之则温带性越强。由表 4 可知,6 个群落植物区系的 R/T 值均小于 1,说明以温带性质为主,这与江苏所处的地理位置及气候相符。加拿大一枝

黄花非入侵地群落的 R/T 值最小(0.38),温带性质最强,其次是徐州市(0.52),宜兴市植物区系的 R/T 值最大(0.68),热带性质最强。宜兴、常州、南京、徐州 4 个地区自南往北,随着纬度增加,温带成分逐渐增加。加拿大一枝黄花非入侵地群落的 R/T 值大于入侵地群落(0.58)。

表 3 加拿大一枝黄花入侵地与非入侵地群落中种子植物的区系分布类型

Table 3 Floristic distribution types in the invaded and uninvaded communities of *Solidago canadensis*

区系 代号 Floristic code	区系类型 Floristic type	非入侵地群落 Uninvaded community		入侵地群落 Invaded community	
		科数 No. of families	属数 No. of genera	科数 No. of families	属数 No. of genera
1	世界分布 Cosmopolitan distribution	13	17	13	19
2	泛热带分布 Pantropical distribution	8	8	16	10
3	热带亚洲和热带美洲间断分布 Tropical Asia & Tropical America disjunct distribution	—	1	—	1
4	旧世界热带分布 Old World Tropical distribution	—	—	—	2
5	热带亚洲至热带大洋洲分布 Tropical Asia to Tropical Australasia distribution	—	—	—	1
6	热带亚洲至热带非洲分布 Tropical Asia to Tropical Africa distribution	—	1	—	1
7	热带亚洲(印度-马来西亚)分布 Tropical Asia (Indo-Malaysia) distribution	—	3	—	3
8	北温带分布 North Temperate distribution	11	20	6	22
9	东亚和北美间断分布 East Asia & North America disjunct distribution	1	1	—	1
10	旧世界温带分布 Old World Temperate distribution	—	7	—	5
14	东亚分布 East Asia distribution	—	6	—	3
15	中国特有 Endemic to China	—	2	—	2
	总计 Total	33	66	35	70

参考南京市本土山脉老山(黄健,2013)及将军山(辛建攀等,2017)的种子植物区系组成,计算其植物区系的种系分化度,并与加拿大一枝黄花入侵地及非入侵地群落比较分析。由表 5 可知,加拿大一枝黄花入侵地群落的种系分化度(3.29)高于非入侵地群落(3.11),低于老山地区(5.71)和将军山地区(4.32),这与老山及将军山本身物种丰富度比较高有关。

2.3 物种多样性分析

2.3.1 不同入侵程度下加拿大一枝黄花群落的物种多样性比较 通过对不同入侵程度加拿大一枝黄花群落的物种多样性统计分析(表 6),发现重度入侵群落的 Margalef 指数(E)与中度入侵群落无显著差异($P \geq 0.05$),与非入侵及轻度入侵群落相比,显著降低;此外,重度入侵群落的 Simpson 指数(D)、Shannon-Weiner(H')指数和 Pielou 指数

表 4 加拿大一枝黄花与邻近城市植物区系属的分布区类型比较
Table 4 Comparison of distribution area type of floristic genera between *Solidago canadensis* communities and adjacent cities

类型/城市 Type/City	经度和纬度 Longitude and latitude	植物属的分布区类型 Floristic types of genus		
		热带分布 Tropical distribution	温带分布 Temperate distribution	R/T 值 R/T value
非入侵地群落 Uninvaded community	118°22'—119°14' E, 31°14'—32°37' N	13	34	0.38
入侵地群落 Invaded community	118°22'—119°14' E, 31°14'—32°37' N	18	31	0.58
南京 Nanjing	118°22'—119°14' E, 31°14'—32°37' N	183	282	0.65
宜兴 Yixing	119°31'—120°03' E, 31°07'—31°37' N	214	316	0.68
常州 Changzhou	118°58'—119°58' E, 31°37'—32°19' N	144	218	0.66
徐州 Xuzhou	116°22'—118°40' E, 33°43'—34°58' N	101	196	0.52

表 5 加拿大一枝黄花入侵地与非入侵地群落中
种子植物区系的种系分化度

Table 5 Species differentiation of seed plants in the
invaded and uninvaded communities
of *Solidago canadensis*

类型 Type	科数 No. of families	属数 No. of genera	种数 No. of species	种系分化度 SD
非入侵地群落 Uninvaded community	33	66	73	3.11
入侵地群落 Invaded community	35	70	90	3.29
老山 Lao mountain	109	433	751	5.71
将军山 Jiangjun mountain	95	274	394	4.32

(*J*) 与非入侵、轻度入侵、中度入侵群落相比,均显著降低($P < 0.05$),其余不同入侵程度的加拿大一枝黄花群落在同种多样性指标下差异均不显著。

轻度入侵群落的 *E* 平均值最高,说明该类型群落内的物种组成较为丰富;非入侵群落与轻度入侵群落相近,而重度入侵群落的 *E* 平均值明显低于其他三者,说明其群落中物种较少,群落组成更为单一。非入侵、中度入侵和轻度入侵群落三者的 *D* 平均值大小接近,均高于重度入侵群落,说明重度入侵群落中的物种数更少,各物种中个体分配更不均匀。*H'* 平均值大小排列为非入侵 > 轻度入侵 > 中度入侵 > 重度入侵,说明非入侵群落的物种多样性最高,群落更加稳定。非入侵、中度入

表 6 不同入侵程度下加拿大一枝黄花
群落的多样性指数

Table 6 Diversity index of *Solidago canadensis*
communities with different invasion degrees

入侵程度 Invasion degree	Margalef 指数 Margalef index (<i>E</i>)	Simpson 指数 Simpson index (<i>D</i>)	Shanon- Wiener 指数 Shannon- Wiener index (<i>H'</i>)	Pielou 指数 Pielou index (<i>J</i>)
非入侵 No invasion	2.15±0.22a	0.76±0.03a	1.82±0.13a	0.73±0.03a
轻度入侵 Light invasion	2.20±0.27a	0.73±0.03a	1.76±0.12a	0.71±0.03a
中度入侵 Moderate invasion	1.78±0.17ab	0.74±0.01a	1.67±0.08a	0.74±0.02a
重度入侵 Seriously invasion	1.28±0.13b	0.51±0.04b	1.11±0.10b	0.55±0.03b

注:表中指数值数据为平均值±标准误。各入侵程度样地数为 *n*,其中 *n*(非入侵)=9, *n*(轻度入侵)=11, *n*(中度入侵)=16, *n*(重度入侵)=25。同列不同字母表示显著性差异($P < 0.05$)。下同。

Note: Index data mean $\bar{x} \pm s$. Number of cases is *n*, where *n* (no invasion)=9, *n* (light invasion)=11, *n* (moderate invasion)=16, and *n* (seriously invasion)=25. Different letters in the same column indicate significant differences ($P \leq 0.05$). The same below.

侵、轻度入侵群落三者的 *J* 平均值大小接近,均高于重度入侵群落,说明重度入侵群落中的物种分布不均匀,反映了加拿大一枝黄花此时已占据群落的主要地位,严重挤占其他物种的生存空间,造

成其他物种数量减少,甚至消失。

2.3.2 不同生境下加拿大一枝黄花群落的物种多样性比较 通过对不同生境加拿大一枝黄花群落的物种多样性进行统计分析(表7),发现人工环境下加拿大一枝黄花群落的 D 、 H' 、 J 3项指数的平均值均最大,湿地环境下的各项指数值次之;而方差分析结果显示不同生境之间加拿大一枝黄花群落的 E 、 D 、 H' 和 J 均无显著性差异,反映了加拿大一枝黄花对4种生境的适应性无太大差异。

表7 不同生境下加拿大一枝黄花入侵地群落的多样性指数

Table 7 Diversity indexes of *Solidago canadensis* communities in different habitats

生境 Habitat	Margalef 指数 Margalef index (R)	Simpson 指数 Simpson index (D)	Shanon- Wiener 指数 Shannon- Wiener index (H')	Pielou 指数 Pielou index (J)
平地 Flat ground	1.47±0.15a	0.60±0.06a	1.33±0.13a	0.61±0.05a
山地 Mountainous region	1.70±0.20a	0.61±0.04a	1.38±0.12a	0.61±0.03a
湿地 Wetland	1.72±0.29a	0.63±0.06a	1.46±0.17a	0.66±0.05a
人工环境 Artificial environment	1.61±0.24a	0.67±0.05a	1.52±0.15a	0.68±0.03a

注:各生境样地数为 n , $n=13$ 。

Note: Number of cases is n , where $n=13$.

3 讨论与结论

綦顺英等(2022)研究表明加拿大一枝黄花在入侵后可能会影响土壤湿度,导致表层土壤水分含量增高,从而有利于多年生草本植物的生长。入侵地群落中多年生草本植物种类较丰富,反映了加拿大一枝黄花更为适生于无林冠遮挡的、较为开阔且阳光充足的生境,特别是受人为干扰严重的林缘荒地或废弃地。梅玲笑等(2005)在研究加拿大一枝黄花对本土植物的化感作用时,发现其对豆科植物的生长萌发无明显抑制或促进作用,綦顺英等(2022)发现本土植物群落在加拿大一枝黄花入侵后,野豌豆(*Vicia sepium*)的重要值增加,本研究与前两者的实验结果一致。外来植

物对入侵地有一定普适性,因此入侵地群落中外来植物种类一般较多(潘红丽等,2021)。Wang等(2018)通过对江苏省镇江市的加拿大一枝黄花的入侵群落调查发现,中度和重度入侵地的群落功能多样性指数显著升高。同时,他们还发现相较于轻度入侵群落,重度和中度入侵群落的 Shannon-Wiener 指数和 Margalef 指数显著降低,这与本研究的结果一致。Wang等(2019a)认为植物功能多样性对生态系统过程的驱动作用比植物分类多样性更重要。本研究尚未对群落的功能多样性指数进行计算,这可能是我们下一步的研究方向。Wang等(2019)对加拿大一枝黄花的调查发现,与邻近未受入侵的植物群落相比,重度入侵群落的植物多样性、优势度、丰富度和稳定性显著降低,而轻度入侵地的植物多样性和优势度比未入侵地显著提高。此外,本研究的调查范围集中在江苏省南京市一地,属于典型的城市生态系统,有研究显示城市生态系统的景观异质性可以通过改变植物群落的功能多样性,进而显著增加入侵植物的入侵程度(Wang et al., 2019a)。

植物区系是一个地区一定时期内所有植物分类单位的总和,是生态系统的重要组成部分,入侵植物的区系特征在一定程度上可反映自身的起源、生态适应性及入侵路线,对一个地区的入侵植物格局成因、防控管理等都有一定的意义(齐雪丹等,2016;殷根深等,2023)。虽然非入侵地群落植物科的区系特征与其所处区域的区系特征相同(黄健,2013;孙欣欣和董丽娜,2022),但入侵地群落的植物区系与非入侵地群落的组成不同,说明加拿大一枝黄花的入侵可能造成某些物种消失,从而引起群落中物种组成发生变化,导致其区系地理特征改变,这也可能是导致入侵地群落的R/T值以及种系分化度均高于非入侵地群落的原因。泛热带分布属占比最高可能与泛热带分布科下物种普遍适应性强、分布地域广有关(吴征镒,1991)。一般而言,随着地域面积的增大及地形的复杂化,区系的种系分化度水平会逐渐升高(黄健,2013)。本研究中调查区域较为破碎,因此种系分化度小于生境完整、物种丰富度较高的老山及将军山地区,结果与其分布区域、地理位置相吻合。

加拿大一枝黄花容易发生无性繁殖形成无性系丛植,而后形成种群,在此过程中,挤占其他物种的生存空间,使得这些植物失去竞争能力(郭水

良,2005)。研究表明,入侵植物对本土生态系统产生的影响依赖于其自身种群的规模,轻度入侵的外来植物可增加植物群落的物种丰富度,从而更有效利用空间及资源,使群落稳定性增强(黄红娟和叶万辉,2004;Panetta & Gooden, 2017)。重度入侵的外来植物由于自身种群规模优势,可造成本土物种丰富度及入侵地的物种多样性下降,Wang 等(2021)对镇江市加拿大一枝黄花入侵地群落的研究也得到了相同结论。中度、轻度入侵的加拿大一枝黄花群落可能由于未在群落中形成高度闭合的空间,对本土物种的挤占尚不明显,而表现出与非入侵地群落相似的物种多样性;其他外来入侵物种,如马缨丹(*Lantana camara*)、喜旱莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)等,在入侵后也呈现出相同的发展趋势(李玉霞等,2019;吴昊等,2019;潘红丽等,2021)。此外,加拿大一枝黄花分泌的次生代谢产物可对多种植物产生化感作用,显著抑制群落内本土物种的萌发与生长,使自身种群更容易扩张,加速入侵地群落物种多样性降低的进程(Wang et al., 2020)。

不同生境对入侵植物的影响不同,而生物入侵对原生境的生物多样性也能造成严重影响(张震等,2010)。陈菁等(2020)发现入侵植物刺萼龙葵(*Solanum rostratum*)在河滩、草原和荒地等不同生境条件下植株大小及聚集性有明显差异,但均呈现出有利于自身种群扩散的特征,以驱动其成功入侵;胜红蓟(*Ageratum conyzoides*)种群在不同生境条件下可调整自身的表型,增加对环境的适应性,并增强其入侵性(周兵等,2015)。本研究中4种不同生境下的加拿大一枝黄花入侵地群落的物种多样性无显著差异,但其功能性状对不同生境响应的差异性尚不明确,仍有待研究。

本次调查发现,南京地区加拿大一枝黄花入侵现状严重,特别是江宁区、浦口区的山地林缘、疏于管理的郊区及荒地;而人为干预较多,特别是耕地或水产养殖业发达的高淳区、溧水区、六合区的状况稍好;入侵地群落物种的种类虽较为丰富,但大多数物种植株数量较少,仅零星存在。本研究证实了加拿大一枝黄花入侵对中国东部地区植物分类多样性和群落组成具有重要影响。加拿大一枝黄花对野豌豆属植物抑制效果较弱,后续应多关注此类植物,其防御机制或可为加拿大一枝黄花的防控防治提供新思路。

参考文献:

- ABELLA SR, ENGEL EC, SPRINGER JD, et al., 2012. Relationships of exotic plant communities with native vegetation, environmental factors, disturbance, and landscape ecosystems of *Pinus ponderosa* forests, USA [J]. *For Ecol Manag*, 271: 65–74.
- BETEKHTINA AA, MUKHACHEVA TA, KOVALEV SY, et al., 2016. Abundance and diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in invasive *Solidago canadensis* and indigenous *S. virgaurea* [J]. *Russ J Ecol*, 47(6): 575–579.
- BYUN C, BLOIS S, BRISSON J, 2013. Plant functional group identity and diversity determine biotic resistance to invasion by an exotic grass [J]. *J Ecol*, 101(1): 128–139.
- CAVIERES LA, 2021. Facilitation and the invasibility of plant communities [J]. *J Ecol*, 109(5): 2019–2028.
- CHEN J, MA FZ, ZHANG YJ, et al., 2020. Spatial point pattern analysis of *Solanum rostratum* Dunal in different habitats [J]. *J S Agric*, 51(2): 342–349. [陈菁, 马方舟, 张彦静, 等, 2020. 不同生境中刺萼龙葵空间点格局分析 [J]. *南方农业学报*, 51(2): 342–349.]
- CHEN YW, LIN XJ, JI HT, et al., 2009. Infection and evaluation of vegetation diversity on island caused by invasion of *Solidago canadensis* [J]. *J Anhui Agric Sci*, 37(4): 1708–1709. [陈友吾, 林晓佳, 季宏铁, 等, 2009. 加拿大一枝黄花入侵对海岛植物多样性的影响及评价 [J]. *安徽农业科学*, 37(4): 1708–1709.]
- CHENG JL, 2020. Study on the mechanism of successful invasion of *Solidago canadensis* driven polyploidization [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University: 1–197. [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 [D]. 南京: 南京农业大学: 1–197.]
- DONG M, LU JZ, ZHANG WJ, et al., 2006. Canada goldenrod (*Solidago canadensis*): an invasive alien weed rapidly spreading in China [J]. *Acta Phytotax Sin*, 44(1): 72–85. [董梅, 陆建忠, 张文驹, 等, 2006. 加拿大一枝黄花——一种正在迅速扩张的外来入侵植物 [J]. *植物分类学报*, 44(1): 72–85.]
- DONG LJ, YU HW, HE WM, 2015. What determines positive, neutral, and negative impacts of *Solidago canadensis* invasion on native plant species richness? [J]. *Sci Rep*, 5: 16804.
- DRISCOLL DA, 2017. Disturbance maintains native and exotic plant species richness in invaded grassy woodlands [J]. *J Veg Sci*, 28(3): 573–584.
- ELLIS EC, ANTILL EC, KREFT H, 2012. All is not loss: plant biodiversity in the Anthropocen [J]. *PLoS ONE*, 7(1): e30535.
- ELSHAFIE HS, GRUL'OVÁ D, BARANOVÁ B, et al., 2019. Antimicrobial activity and chemical composition of essential oil extracted from *Solidago canadensis* L. growing

- wild in Slovakia [J]. *Molecules*, 24(7): 1206.
- ELTON CS, 1958. The ecology of invasions by plants and animals [M]. London: Methuen: 1-255.
- FANG JY, WANG XP, SHEN ZH, et al., 2009. Methods and protocols for plant community inventory [J]. *Biodivers Sci*, 17(6): 533-548. [方精云, 王襄平, 沈泽昊, 等, 2009. 植物群落清查的主要内容、方法和技术规范 [J]. *生物多样性*, 17(6): 533-548.]
- GALA-CZEKAJ D, SYNOWIEC A, DĄBKOWSKA T, 2021. Self-renewal of invasive goldenrods (*Solidago* spp.) as a result of different mechanical management of fallow [J]. *Agronomy*, 11: 1065.
- GAO YY, CHE LL, PENG PH, et al., 2021. Effects of warming and nitrogen-addition on the growth of F1 generation of *Solidago canadensis* [J]. *J NE For Univ*, 49(8): 51-55. [高苑苑, 车路璐, 彭培好, 等, 2021. 增温加氮对两种不同来源加拿大一枝黄花子一代生长的影响 [J]. *东北林业大学学报*, 49(8): 51-55.]
- GUO SL, 2005. *Solidago canadensis* niche and influences of its invasion on plant communities [J]. *J Biomath*, 20(1): 91-96. [郭水良, 2005. 加拿大一枝黄花的生态位及其入侵对植物群落的影响 [J]. *生物数学学报*, 20(1): 91-96.]
- GUO XH, REN MX, DING JQ, et al., 2011. Plant species diversity and its seasonal dynamics in woodland invaded by *Solidago canadensis* (Asteraceae) [J]. *Plant Sci J*, 29(2): 149-155. [郭晓辉, 任明迅, 丁建清, 等, 2011. 加拿大一枝黄花入侵林地对植物多样性的影响及其季节变化 [J]. *植物科学学报*, 29(2): 149-155.]
- HUANG H, GUO SL, 2005. Study on reproductive biology of the invasive plant *Solidago canadensis* [J]. *Acta Ecol Sin*, 25(11): 2795-2803. [黄华, 郭水良, 2005. 外来入侵植物加拿大一枝黄花繁殖生物学研究 [J]. *生态学报*, 25(11): 2795-2803.]
- HUANG HJ, YE WH, 2004. Exotic invasion and species diversity [J]. *Chin J Ecol*, 23(2): 121-126. [黄红娟, 叶万辉, 2004. 外来种入侵与物种多样性 [J]. *生态学杂志*, 23(2): 121-126.]
- HUANG J, 2013. Studies on flora and plant resources of Laoshan, Nanjing [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University: 1-91. [黄健, 2013. 南京老山地区植物区系与植物资源研究 [D]. 南京: 南京林业大学: 1-91.]
- JI HL, ZHAN XH, ZHANG L, et al., 2019. Diversity and biogeographical characteristics of lycophytes and ferns in Mufu Mountains, China [J]. *Biodivers Sci*, 27(11): 1251-1259. [姬红利, 詹选怀, 张丽, 等, 2019. 幕阜山脉石松类和蕨类植物多样性及生物地理学特征 [J]. *生物多样性*, 27(11): 1251-1259.]
- JIN HY, XIAO SY, YOU F, et al., 2019. Control efficacy of typical herbicide on *Solidago canadensis* with different stockble heights [J]. *Plan Prot*, 45(4): 271-281. [金红玉, 肖顺勇, 游芳, 等, 2019. 典型药剂对不同留茬高度加拿大一枝黄花的防效 [J]. *植物保护*, 45(4): 271-281.]
- LEVINE JM, D'ANTONIO CM, 1999. Elton revisited: A review of evidence linking diversity and invisibility [J]. *Oikos*, 87(1): 15-26.
- LI XW, 1996. Floristic statistics and analyses of seed plants from China [J]. *Acta Bot Yunnan*, 18(4): 363-384. [李锡文, 1996. 中国种子植物区系统计分析 [J]. *云南植物研究*, 18(4): 363-384.]
- LI YX, SHANG CQ, ZHU XZ, 2019. Progress on the research on the invasive west Indian Lantana (*Lantana camara*, Verbenaceae) [J]. *J Biosaf*, 28(2): 103-110. [李玉霞, 尚春琼, 朱珣之, 2019. 入侵植物马缨丹研究进展 [J]. *生物安全学报*, 28(2): 103-110.]
- LIANG ZH, JI YH, LI DL, et al., 2014. Analysis of seed plant flora of Xuzhou city in Jiangsu [J]. *J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed)*, 38(3): 65-70. [梁珍海, 季永华, 李冬林等, 2014. 江苏徐州种子植物区系分析 [J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 38(3): 65-70.]
- LIN R, CHEN YL. 1985. *Flora Reipublicae Popularis Sinicae: Vol. 74* [M]. Beijing: Science Press: 1-76. [林榕, 陈艺林, 1985. *中国植物志: 第 74 卷* [M]. 北京: 科学出版社: 1-76.]
- LIU QX, XU ZL, WANG Q, 2015. Natural environment and plant distribution in Jiangsu Province [M]//LIU QX. *Flora of Jiangsu: Vol. 1*. Nanjing: Phoenix Science Press: 5-10. [刘启新, 徐增莱, 汪庆, 2015. 江苏自然环境与植物分布 [M]//刘启新. *江苏植物志: 第 1 卷*. 南京: 江苏凤凰科学技术出版社: 5-10.]
- LIU QX, 2015. *Flora of Jiangsu: Vol. 4* [M]. Nanjing: Phoenix Science Press: 396-397. [刘启新, 2015. *江苏植物志: 第 4 卷* [M]. 南京: 江苏凤凰科学技术出版社: 396-397.]
- LYSENKOV S, USTINOVA E, 2020. Comparative study of the insect community visiting flowers of invasive goldenrods (*Solidago canadensis* and *S. gigantea*) [J]. *Arthropod-Plant Interact*, 14(6): 825-837.
- MAGURRAN AE, 1988. *Ecological Diversity and Its Measurement* [M]. New Jersey: Princeton University Press: 1-114.
- MA HY, WANG HW, ZHANG QF, et al., 2019. Effects of plantation community on the invasion of *Solidago canadensis* at Chongming island, Shanghai [J]. *J Ecol Rural Environ*, 35(6): 756-763. [马宏燊, 王宏伟, 张庆费, 等, 2019. 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*, 35(6): 756-763.]
- MEI LX, CHEN X, TANG JJ, 2005. Allelopathic effects of invasive weed *Solidago canadensis* on native plants [J]. *Chin J Appl Ecol*, 16(12): 2379-2382. [梅玲笑, 陈欣, 唐建军, 2005. 外来杂草加拿大一枝黄花对入侵地植物的化感效应 [J]. *应用生态学报*, 16(12): 2379-2382.]
- Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's

- Republic of China, 2022. Bulletin of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China [R]. Beijing: Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China; 53-55. [中华人民共和国农业农村部, 2022. 中华人民共和国农业农村部公报 [R]. 北京: 中华人民共和国农业农村部; 53-55.]
- PAN HL, LI HC, YU ZX, et al., 2021. Plant composition and diversity of invasive communities of *Lantana camara* in Panzhihua City [J]. *Ecol Environ Sci*, 30(6): 1177-1182. [潘红丽, 李慧超, 余志祥, 等, 2021. 攀枝花市入侵植物马缨丹群落的物种组成与多样性研究 [J]. *生态环境学报*, 30(6): 1177-1182.]
- PANETTA FD, GOODEN B, 2017. Managing for biodiversity: impact and action thresholds for invasive plants in natural ecosystems [J]. *Neo Biota*, 34: 53-66.
- QI SY, GONG ZF, YANG YH, et al., 2022. Effects of *Solidago canadensis* invasion on aboveground vegetation and soil seed banks [J]. *J Anhui Agric Univ*, 49(3): 476-482. [綦顺英, 宫志锋, 杨宇航, 等, 2022. 加拿大一枝黄花入侵对地上植被及土壤种子库的影响 [J]. *安徽农业大学学报*, 49(3): 476-482.]
- QI XD, YANG L, DENG HP, et al., 2016. Studies on flora alien invasive plants and disastrous mechanism in Beibei, Chongqing [J]. *J SW Chin Norm Univ (Nat Sci Ed)*, 41(1): 51-56. [齐雪丹, 杨柳, 邓洪平, 等, 2016. 重庆市北碚区入侵植物区系特征与成灾机制研究 [J]. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 41(1): 51-56.]
- QIAN YQ, MA KP, 1994. Theory and methods of biodiversity research [M]. Beijing: Chinese Science and Technology Press: 141-165. [钱迎倩, 马克平, 1994. 生物多样性研究的原理与方法 [M]. 北京: 中国科学技术出版社: 141-165.]
- SCHITTKO C, WURST S, 2014. Above-and below-ground effects of plant-soil feedback from exotic *Solidago canadensis* on native *Tanacetum vulgare* [J]. *Biol Invasions*, 16: 1465-1479.
- SHEN JJ, 2013. Study on diversity of vascular plants, forest communities and plant resources in the hilly mountainous area of Changzhou [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University: 1-91. [沈静静, 2013. 常州丘陵山区维管植物多样性、主要森林群落及其资源研究 [D]. 南京: 南京农业大学: 1-91.]
- SIMPSON EH, 1949. Measurement of diversity [J]. *Nature*, 163: 688.
- SUN XX, DONG LN, 2022. Investigation and analysis of wild herbal flowers resources in Nanjing [J]. *Chin Wild Plant Resour*, 41(5): 86-94. [孙欣欣, 董丽娜, 2022. 南京市野生草本花卉资源调查与分析 [J]. *中国野生植物资源*, 41(5): 86-94.]
- TANG MZ, REN MX, ZHENG JM, et al., 2012. Seasonal dynamics of plant diversity in woodland invaded by *Solidago canadensis* (Asteraceae) in Lushan Nature Reserve [J]. *Plant Sci J*, 30(4): 366-373. [汤敏喆, 任明迅, 郑景明, 等, 2012. 加拿大一枝黄花对庐山自然保护区林地植物多样性及其季节动态的影响 [J]. *植物科学学报*, 30(4): 366-373.]
- WALCK JL, BASKIN JM, BASKIN CC, 1998. A comparative study of the seed germination biology of a narrow endemic and two geographically-widespread species of *Solidago* (Asteraceae) [J]. *Seed Sci Res*, 8: 65-74.
- WAN LY, 2019. Competitive strategy of invasive plant *Solidago canadensis* L. for phosphorus [D]. Zhenjiang: Jiangsu University: 1-107. [万凌云, 2019. 入侵植物加拿大一枝黄花(*Solidago canadensis* L.)的磷资源竞争策略 [D]. 镇江: 江苏大学: 1-107.]
- WANDJOU JGN, QUASSINTI L, GUDŽINSKAS Z, et al., 2020. Chemical composition and antiproliferative effect of essential oils of four *Solidago* species (*S. canadensis*, *S. gigantea*, *S. virgaurea* and *S. × niedereideri*) [J]. *Chem Biodivers*, 17(11): 1-13.
- WANG CY, CHENG HY, WANG S, et al., 2021. Plant community and the influence of plant taxonomic diversity on community stability and invasibility: A case study based on *Solidago canadensis* L. [J]. *Sci Total Environ*, 768: 144518.
- WANG CY, WU BD, JIANG K, et al., 2019a. Canada goldenrod invasion affect taxonomic and functional diversity of plant communities in heterogeneous landscapes in urban ecosystems in East China [J]. *Urban For Urban Green*, 38: 145-156.
- WANG CY, WU BD, JIANG K, et al., 2019b. Canada goldenrod invasion cause significant shifts in the taxonomic diversity and community stability of plant communities in heterogeneous landscapes in urban ecosystems in East China [J]. *Ecol Eng*, 127: 504-509.
- WANG CY, JIANG K, LIU J, et al., 2018. Moderate and heavy *Solidago canadensis* L. invasion are associated with decreased taxonomic diversity but increased functional diversity of plant communities in East China [J]. *Ecol Eng*, 112: 55-64.
- WANG S, WEI M, WU BD, et al., 2019. Degree of invasion of Canada goldenrod (*Solidago canadensis* L.) plays an important role in the variation of plant taxonomic diversity and community stability in eastern China [J]. *Ecol Res*, 34: 782-789.
- WANG S, CHENG HY, WEI M, et al., 2020. Litter decomposition process dramatically declines the allelopathy of *Solidago canadensis* L. on the seed germination and seedling growth of *Lactuca sativa* L. [J]. *Int J Phytoremediat*, 22(12): 1295-1303.
- WU CD, JIANG F, LIN YQ, et al., 2017. Exploration and practice of socialized control of *Solidago canadensis* [J].

- Chin Plant Prot, 37(12): 90-91. [吴承东, 江丰, 林玉清, 等, 2017. 加拿大一枝黄花社会化防除探索实践 [J]. 中国植保导刊, 37(12): 90-91.]
- WU H, DU K, LI WT, et al., 2019. Influence of *Alternanthera philoxeroides* invasion on species diversity and stability in the herbaceous community in southern Henan Province [J]. Acta Pratac Sci, 36(2): 382-393. [吴昊, 杜奎, 李万通, 等, 2019. 空心莲子草入侵对豫南草本植物群落多样性及稳定性的影响 [J]. 草业科学 36(2): 382-393.]
- WU ZY, 1991. The areal-types of Chinese genera of seed plants [J]. Acta Bot Yunnan (Supp. IV): 1-139. [吴征镒, 1991. 中国种子植物属的分布区类型 [J]. 云南植物研究 (增刊 IV): 1-139.]
- XIN JP, SUN XX, TIAN RN, 2017. Floristic diversity and fundamental characteristics of seed plants on Mount Jiangjun, Nanjing [J]. J Zhejiang A & F Univ, 34(4): 629-636. [辛建攀, 孙欣欣, 田如男, 2017. 南京将军山种子植物区系多样性及基本特征 [J]. 浙江农林大学学报, 34(4): 629-636.]
- YAN XL, LIU QR, SHOU HY, et al., 2014. The categorization and analysis on the geographic distribution patterns of Chinese alien invasive plants [J]. Biodivers Sci, 22(5): 667-676. [闫小玲, 刘全儒, 寿海洋, 等, 2014. 中国外来入侵植物的等级划分与地理分布格局分析 [J]. 生物多样性, 22(5): 667-676.]
- YANG HJ, WANG Q, WAN ZX, et al., 2021. Structure and diversity of microbial communities in the rhizosphere and non-rhizosphere soil in areas with invasive *Solidago canadensis* L. [J]. J Biosaf, 30(4): 235-243. [杨海君, 王巧, 万自学, 等, 2021. 入侵地加拿大一枝黄花根际和非根际土壤微生物群落结构及多样性 [J]. 生物安全学报, 30(4): 235-243.]
- YIN GS, ZHANG SS, CHENG WL, et al., 2023. Analysis on the floristics and diversity of invasive alien plants in Yunnan Province [J]. J Biosaf, 32(1): 16-24. [殷根深, 张双双, 程文磊, 等, 2023. 云南省外来入侵植物的区系成分及多样性分析 [J]. 生物安全学报, 32(1): 16-24.]
- ZANDI P, BARABASZ-KRASNY B, STACHURSKA-SWAKOŃ A, et al., 2020. Allelopathic effect of invasive Canadian goldenrod (*Solidago canadensis* L.) on early growth of red clover (*Trifolium pratense* L.) [J]. Not Bot Horti Agrobot Cluj-Napoca, 48(4): 2060-2071.
- ZHANG Q, ZHU XY, ZHOU SC, et al., 2011. Occurrence status and control countermeasures of *Solidago canadensis* in Xiongzhou Street, Luhe District, Nanjing [J]. Sci Technol Rural Prosper, 278(2): 55-57. [张琴, 朱训永, 周升春, 等, 2011. 南京市六合区雄州街道加拿大一枝黄花发生现状及防控对策 [J]. 中国农村小康科技, 278(2): 55-57.]
- ZHANG WT, 2012. Study on the flora of vascular plants and main forest communities in Yixing [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University: 1-91. [张文婷, 2012. 宜兴地区维管植物区系及主要森林群落的研究 [D]. 南京: 南京农业大学: 1-91.]
- ZHANG YM, HANG YY, WANG QZ, 2018. Development status, problems and countermeasures of forest source medicinal plants in Jiangsu Province [J]. J Jiangsu For Sci Technol, 45(5): 52-56. [张艳梅, 杭悦宇, 王奇志, 等, 2018. 江苏林源药用植物发展现状、问题及对策 [J]. 江苏林业科技, 45(5): 52-56.]
- ZHANG Z, XU L, ZHU XM, 2010. Effect on species diversity of plant communities caused by invasion of *Alternanthera philoxeroides* in different habitats [J]. Acta Pratac Sin, 19(4): 10-15. [张震, 徐丽, 朱晓敏, 2010. 喜旱莲子草对不同生境植物群落多样性的影响 [J]. 草业学报, 19(4): 10-15.]
- ZHAO K, ZHANG BY, XU Y, et al., 2009. A preliminary analysis on the seed plants flora of Nanjing [J]. J Anqing Teach Coll (Nat Sci Ed), 15(2): 81-84. [赵凯, 张保卫, 许远, 等, 2009. 南京种子植物区系的初步分析 [J]. 安庆师范学院学报(自然科学版), 15(2): 81-84.]
- ZHOU B, YAN XH, XIAO YA, et al., 2015. Module biomass of *Ageratum conyzoides* populations in different habitats [J]. Acta Ecol Sin, 35(8): 2602-2608. [周兵, 闫小红, 肖宜安, 等, 2015. 不同生境下入侵植物胜红蓟种群构件生物量分配特性 [J]. 生态学报, 35(8): 2602-2608.]
- ZHOU XH, PENG PH, LI JJ, 2019. Simulated climate warming and nitrogen deposition influence leaf traits and leaf trait spectrum in *Solidago canadensis* from China and North America [J]. Acta Ecol Sin, 39(5): 1605-1615. [周晓慧, 彭培好, 李景吉, 2019. 模拟气候变暖和氮沉降对两种来源加拿大一枝黄花叶性状和性状谱的影响 [J]. 生态学报, 39(5): 1605-1615.]
- ZHOU ZM, 2014. Occurrence status and suggestions of *Solidago canadensis* in Jiangning District, Nanjing [J]. Mod Agric Sci Technol, 625(11): 139+143. [周治明, 2014. 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, 625(11): 139+143.]
- ZHU X, LI W, SHAO H, et al., 2022. Selected aspects of invasive *Solidago canadensis* with an emphasis on its allelopathic abilities: a review [J]. Chem Biodivers, 19(10): 1-16.

(责任编辑 李 莉 王登惠)