

DOI: 10.20103/j.stxb.202311012366

肖永康, 何健霄, 隋晓青, 蔡新斌, 买尔燕古丽·阿不都热合曼, 周一凡, 阿马努拉·依明尼亚孜. 意大利苍耳入侵对本地植物群落物种多样性和稳定性的影响——以乌鲁木齐市为例. 生态学报, 2024, 44(13): 5717-5725.

Xiao Y K, He J X, Sui X Q, Cai X B, Abdurahman Maryamgul, Zhou Y F, Yimingniyazi Amanula. Effects of *Xanthium italicum* invasion on the diversity and stability of native plant communities: a case study of Urumqi, Xinjiang, China. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(13): 5717-5725.

意大利苍耳入侵对本地植物群落物种多样性和稳定性的影响

——以乌鲁木齐市为例

肖永康¹, 何健霄¹, 隋晓青¹, 蔡新斌^{2,3}, 买尔燕古丽·阿不都热合曼^{2,3}, 周一凡¹, 阿马努拉·依明尼亚孜^{4,*}

1 新疆农业大学草业学院, 乌鲁木齐 830052

2 新疆林科院森林生态研究所, 乌鲁木齐 830063

3 新疆博斯腾湖湿地生态系统国家定位观测研究站, 博湖 841400

4 新疆极端环境生物生态适应与进化重点实验室, 新疆农业大学生命科学学院, 乌鲁木齐 830052

摘要: 研究外来植物不同程度入侵对区域群落结构和植物群落物种多样性的影响对评价其对生态系统的危害具有重要意义。以入侵植物意大利苍耳 (*Xanthium italicum*) 为主要研究对象, 选择意大利苍耳危害较明显且分布面积较大的中国新疆乌鲁木齐市米东区为研究区域进行植物样方调查, 以意大利苍耳和其共生的本地植物为切入点, 以物种多样性指数、群落稳定性、群落可入侵性、影响程度指数、入侵植物的竞争优势和入侵强度来探究不同入侵程度下的本地植物群落物种多样性和群落稳定性的变化。结果表明: (1) 与未入侵地相比, 意大利苍耳轻度入侵显著增加了本地植物群落的物种多样性 ($P < 0.05$), 而重度入侵显著降低了本地植物群落的物种多样性 ($P < 0.05$)。 (2) 在意大利苍耳入侵的群落中, 群落稳定性由轻度入侵水平到重度入侵水平降低了 25%, 而群落可入侵性、意大利苍耳的竞争优势指数和入侵强度指数分别增加了 77%、79% 和 83%。 (3) 在轻度入侵水平下, 意大利苍耳对本植物群落物种多样性、群落稳定性和群落物种数的影响程度指数 < 0 , 产生了积极影响; 相反, 在轻中度和重度入侵水平下意大利苍耳对本植物群落物种多样性、群落稳定性和群落物种数的影响程度指数 > 0 , 产生了负面影响。 (4) 本地植物群落多样性与群落稳定性均呈正相关, 但与群落可入侵性呈负相关 ($P < 0.05$)。 (5) Shannon-Wiener 指数对群落的稳定性的直接通径系数最大, 为 0.828; Simpson's 指数对群落可入侵性的直接通径系数最大, 为 0.932。由此可见, 意大利苍耳在中度和重度入侵对植物群落结构产生巨大影响, 而作为“一带一路”的核心和枢纽地带的疆, 将会对其脆弱的生态系统和土著物种的多样性造成不可估量的影响。应在入侵初期对其进行控制与铲除, 防止意大利苍耳等有害外来入侵种的入侵和进一步扩散与蔓延。

关键词: 入侵植物; 物种多样性; 群落稳定性; 群落可入侵性; 入侵程度

Effects of *Xanthium italicum* invasion on the diversity and stability of native plant communities: a case study of Urumqi, Xinjiang, China

XIAO Yongkang¹, HE Jianxiao¹, SUI Xiaoqing¹, CAI Xinbin^{2,3}, ABDURAHMAN Maryamgul^{2,3}, ZHOU Yifan¹, YIMINGNIYAZI Amanula^{4,*}

1 College of Grassland Sciences, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China

2 Xinjiang of Academy of Forestry, Urumqi 830063, China

基金项目: 第三次新疆综合科学考察项目 (2022xjkk0401); 新疆森林、草原、湿地生态系统外来入侵野生植物普查项目 (XJLCRQSW-3)

收稿日期: 2023-11-01; **网络出版日期:** 2024-04-30

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: amanula.y@xjau.edu.cn

3 National Positioning Observation Station for Wetland Ecosystem of Bosteng Lake in Xinjiang, Bohu 841400, China

4 Xinjiang Key Laboratory for Ecological Adaptation and Evolution of Extreme Environment Biology, College of Life Sciences, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China

Abstract: Studying the impact of different degrees of invasive alien plants on regional community structure and plant species diversity is of great significance for evaluating their harm to ecosystems. *Xanthium italicum* is an invasive weed that is widely distributed in world. Its adaptability and competitive advantage over native species have led to agricultural loss and biodiversity reduction, yet its impact on local plant communities under different degrees of invasion has not been reported. In this study, we select the *X. italicum* as the main research object, the Midong District of Urumqi City, Xinjiang, China was selected as the research area for plant sampling investigation, which has obvious *X. italicum* hazards and a large distribution area. From the perspective of *X. italicum* and its symbiotic local plants, this study explored the changes in species diversity and community stability of local plant communities under different levels of invasion, using species diversity index, community stability, community invasibility, impact degree index, competitive advantage of invasive plants, and invasion intensity. The results showed that: (1) Compared with the uninvasive areas, the mild invasion of *X. italicum* significantly increased the species diversity of local plant communities ($P < 0.05$), while severe invasion significantly reduced the species diversity of local plant communities ($P < 0.05$). (2) In communities invaded by *X. italicum*, community stability decreased by 25% from low to heavy invasion levels, while the invasibility, competitive advantage index, and invasion intensity index of *X. italicum* increased by 77%, 79%, and 83%, respectively. (3) At a low invasion level, the impact index of *X. italicum* on species diversity, community stability, and community species number of this plant community was < 0 , which had positive impact. Conversely, the impact index of *X. italicum* under low to moderate and heavy invasion levels on species diversity, community stability, and community species number of the plant community was > 0 , which resulted in negative impacts. (4) The diversity and stability of local plant communities were positively correlated, but negatively correlated with community invasibility ($P < 0.05$). (5) The Shannon-Wiener index had the highest direct pathway coefficient (0.828) for community stability, whereas the Simpson's index had the highest direct pathway coefficient (0.932) for community invasibility. Our results show that moderate and heavy invasion by *X. italicum* has a huge impact on the structure of plant communities in Xinjiang, in addition to immeasurable impacts on the fragile ecosystem and indigenous species diversity of this area. We propose that *X. italicum* should be controlled and eradicated in the early stages of invasion to prevent irreversible and severe damage to plant communities in Xinjiang, as the core and hub of the "Belt and Road."

Key Words: invasive plant; species diversity; community stability; community invasibility; degree of invasion

外来入侵生物作为经济全球化的产物,对入侵地的生态系统的结构何功能造成了严重的影响^[1]。目前,外来入侵植物能够成功入侵的原因主要有四大因素,即外来物种本身入侵性、外来物种与本地植物的竞争、群落的可入侵性以及全球气候的变化^[2]。其中,群落的可入侵性是用于评价本地植物群落受到外来入侵物种入侵的难易程度^[3],其主要受本地群落物种多样性和群落稳定性的影响^[4-6]。对于外来入侵植物而言,能否入侵成功很大一部分取决于群落的可入侵性^[7]。相比外来植物其他入侵机制(如入侵植物本身的生物学特性,入侵植物的种间关系以及气候或环境变化对植物入侵的影响等),关于外来植物与群落可入侵性之间关系相关的研究较少。因此,研究植物群落可入侵性在理解外来植物入侵机制,进而对预防和控制外来植物入侵以及对被入侵群落的恢复方面具有理论和现实意义。

本地群落物种多样性的一个重要作用是它在群落可入侵性中已经广泛表明多样化的群落可以更好地抵御外来种^[8-9]。一般认为,本地群落物种多样性较高有助于本地植物与外来入侵植物竞争,因为更高的物种多样性被认为能够更好地利用资源^[10-12]。因此,有学者提出了多样性抗性假说,该假说认为相对于生物多样

性较高的生态系统而言,生物多样性较低生态系统群落稳定性更低,被入侵的概率较大,即群落的可入侵性较高^[13]。然而,由于外来植物入侵的过程中所处的阶段(传入、定居、潜伏、扩散和爆发)不同,外来入侵植物在不同入侵程度下本地群落物种多样性和群落稳定性也不同,从而导致不同入侵程度下群落可入侵性的差异^[14-15]。因此,探究外来入侵植物在不同程度下入侵对本地植物群落物种多样性和群落稳定性的影响对于理解本地植物群落可入侵性以及外来入侵植物的入侵机制至关重要。

意大利苍耳(*Xanthium italicum*)是菊科一年生入侵杂草,原产于北美洲,由于其具有较强的入侵能力,目前广泛分布于欧洲、亚洲和大洋洲的多个国家和地区^[16]。在我国,1991年首次在北京昌平区发现,现已扩散到山东、河北、深圳、新疆和辽宁等5个省区^[17]。在新疆,意大利苍耳目前已扩散至伊犁、博州、阿勒泰、塔城、石河子、昌吉和乌鲁木齐等地区,已占据了农田、草原、林缘、沟渠及水库浅水区等多种生境^[18]。由于意大利苍耳总苞表面有刺,很容易被人无意中携带扩散,或者传播在动物的皮毛上,短时间内入侵大面积区域^[19]。此外,意大利苍耳不仅生长繁殖能力强、种子产量大、萌发率高、扩散媒介多样和蔓延速度快等特性,从而迅速占据大面积的区域,抑制本土植物与农作物的生长、繁殖^[20]。由以上可见,意大利苍耳是在新疆分布广,且危害较严重的入侵植物之一。

目前国内外对意大利苍耳的研究主要集中在化学成分的分析^[21-22]、植食性昆虫取食对其竞争力的影响^[11]以及种子萌发对环境因子的响应^[23]等方面,而通过不同入侵程度下意大利苍耳对本地植物群落物种多样性、群落稳定性和群落可入侵性的影响未见相关报道。因此,本文以意大利苍耳为主要研究材料,选择意大利苍耳危害较明显且分布面积较大的中国新疆乌鲁木齐市米东区为研究区域,研究不同程度(即未入侵条件、轻度入侵、中度入侵和重度入侵)意大利苍耳入侵下本地植物群落物种多样性、群落稳定性和群落可入侵性的影响,为意大利苍耳的科学管理和当地生物多样性保护提供理论依据。拟解决以下科学问题有:(1)意大利苍耳不同入侵程度对本地植物群落多样性是否有影响?如果有,主要表现在哪些方面?(2)意大利苍耳不同入侵程度对本地植物群落稳定性和群落可入侵性有何影响?(3)在意大利苍耳不同入侵程度下本地植物群落多样性、群落稳定性以及群落可入侵性三者关系是怎么样的?

1 材料与方法

1.1 研究地概况

本研究采样区位于新疆乌鲁木齐市米东区(87°49'E,43°59'N),海拔为714m,生境类型为盐质荒漠,调查面积约为30hm²。该采样区属于温带大陆性气候,年平均温度约为8℃,月平均温度在7月达到最高34℃,1月达到最低-12℃;年均降水量约为294mm,年日照时间约2808h,年均蒸发量约为2709mm。采样区的植物群落为草本杂草群落,调查了采样区意大利苍耳和共存的本地植物样本,且群落中入侵植物只有意大利苍耳,无其他入侵植物。

1.2 研究设计

参考马筱等^[24]所用等级划分的方法,并结合采样区的实际情况,根据意大利苍耳在入侵地种群盖度来评估其入侵程度,并将其分为四个水平之一:未入侵(0%,CK)、低入侵(<35%,L)、中等入侵(35%—75%,M)和高入侵(>75%,H)。在每个人侵水平下调查了10个样方,根据最小面积法确定样方大小为2m×2m。实验于2023年9月进行,调查样方中所有草本植物种类,对草本样方中的每个植物种测量株数、均高,估算盖度。同样,每一物种各选取3株长势良好的个体进行植株功能性状的测定,并随机选取3片成熟且完整的叶片进行叶功能性状的测定。

1.3 数据统计与分析

功能性状的测定:参考Xiao^[25]等和Wang等^[26-27]的研究方法,测定了与入侵植物与本地植物生长竞争力 and 适合度密切相关的10种功能性状。使用精度为0.1cm的直尺测量植物的株高、叶长、叶宽和叶柄长度;使用精度为0.01mm的游标卡尺测量植物的地径、叶柄直径和叶片厚度;使用植物营养测定仪(TYS-3N;石家庄

泛胜科技有限公司)测定植物的叶绿素和叶氮;使用叶片图像分析仪(FS-leaf1000;石家庄泛胜科技有限公司)测定植物叶片的叶面积。

多样性指数的计算:本研究选用 α 物种多样性指数反映群落内物种组织化水平,具体选用指数及计算方法参考如下:Shannon-Wiener 指数(H' ,代表植物多样性)^[28]、Simpson's 指数(D ,表示植物优势度)^[29]、Pielou's 指数(J ,代表群落的均匀度)^[30]和 Margalef's 指数(F ;表示植物丰富度)^[31]。

影响程度指数的计算:为量化意大利苍耳对植物物种多样性和群落稳定性生态影响风险,本研究采用以下 6 个影响程度指数(Degree of influence index; DII)指标:意大利苍耳对物种数的影响程度指数(DII_S)、意大利苍耳对 Shannon-Wiener 指数的影响程度指数(DII_H)、意大利苍耳对 Simpson 指数的影响程度指数(DII_D)、意大利苍耳对 Pielou 指数的影响程度指数(DII_J)、意大利苍耳对 Margalef's 指数的影响程度指数(DII_F)和苍耳对群落稳定性的影响程度指数(DII_{ICV}),具体计算公式及方法参照 Wang 等^[32]。

群落稳定性和群落可入侵性的计算:群落稳定性指数(Community stability index, ICV)和群落可入侵指数(Community invasibility index, CII)表征;以上 2 个公式具体计算及方法参照 Wang 等^[33]。

入侵植物竞争优势和入侵强化的计算:利用竞争优势指数(Competitive advantage index of alien invasive plants, CAI)来表征意大利苍耳在不同入侵程度下的竞争优势;意大利苍耳在不同入侵程度下入侵强度以入侵强度指数(Invasion intensity index of invasive plant species, III)表征;以上 2 个公式具体计算及方法参照 Wang 等^[32-33]。

利用 Excel 2019 对数据进行整理,采用 SPSS 25.0 对各指标进行统计分析,并计算平均值和均值偏差(Mean \pm SD)通过单因素方差分析(One-way ANOVA),基于 LSD(最小显著差数法)分析方法确定不同入侵程度下本地植物物种多样性、群落稳定性和群落可入侵性的差异水平,显著差异水平设置为 $P<0.05$ 。使用皮尔森相关系数(Pearson)乘积矩相关系数进行相关分析,以确定不同程度意大利苍耳入侵植物群落的群落多样性和群落稳定性、群落可入侵性之间的关系;利用直接路径系数(P)和间接路径系数(P')评估在不同入侵水平下,植物群落多样性对群落稳定性和入侵性的贡献强度。通径分析可以评估因变量和两个或多个自变量之间因果关系的大小和显著性,这些因果关系通过对因变量产生直接和间接影响的部分或全部自变量来确定。作图均由 Origin 2021 完成。

2 结果与分析

2.1 群落多样性指数随入侵植物盖度的变化关系

不同程度意大利苍耳入侵能够显著影响本地植物群落多样性指数($P<0.05$)。随着入侵程度的增加,本地植物群落多样性指数均出现先增加再减小的趋势。Shannon's 指数和 Simpson's 指数在 4 种入侵水平下均有显著差异($P<0.05$),且在轻度入侵时最大,分别为 1.43 和 1.23。Pielou's 指数和 Margalef's 指数在轻度入侵水平下均高于其他 3 个入侵水平,分别为 0.80 和 1.17;而在未入侵水平下均显著高于重度入侵水平($P<0.05$)。说明意大利苍耳在轻度入侵时会使得本地植物群落多样性增加,而在重度入侵时降低了本地植物群落多样性(图 1)。

2.2 各指数随入侵植物盖度的变化关系

群落稳定性指数随着意大利苍耳入侵程度的增加而降低,与轻度入侵相比,重度入侵存在显著差异($P<$

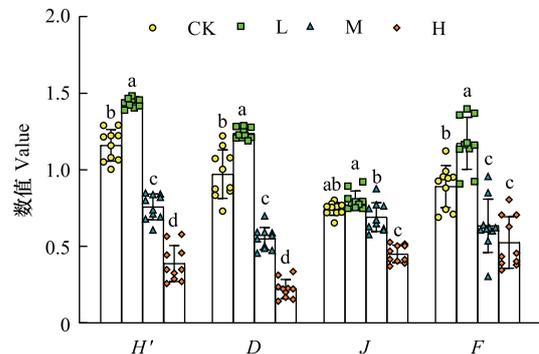


图 1 不同程度意大利苍耳入侵下本地植物群落多样性指数的变化趋势

Fig.1 The variation trend of local plant community diversity index under different degrees of *Xanthium italicum* invasion

CK:没有意大利苍耳入侵;L:意大利苍耳轻度入侵;M:意大利苍耳中度入侵;H:意大利苍耳重度入侵; H' :Shannon-Wiener 多样性指数; D :Simpson's 优势度指数; J :Pielou's 均匀度指数; F :Margalef's 丰富度指数;不同小写字母表示不同意大利苍耳入侵程度下物种多样性指数差异显著(Mean \pm SD, $P<0.05$)

0.05),且群落稳定性指数降低了 25%。群落可入侵性指数、意大利苍耳的竞争优势指数以及入侵强度指数均随着意大利苍耳入侵程度的增加而增加;群落可入侵性指数、意大利苍耳的竞争优势指数和入侵强度指数在 3 个入侵水平下均存在显著差异($P<0.05$),由轻度入侵到重度入侵分别增长了 77%、79%和 83%。说明随着意大利苍耳入侵强度的增加其竞争优势度和群落的可入侵性增加,但群落的稳定性降低(图 2)。

2.3 意大利苍耳对群落多样性指数的影响程度指数随入侵植物盖度的变化

不同程度意大利苍耳入侵对本地植物群落多样性的影响程度指数均发生变化。与意大利苍耳轻度入侵相比,中度和重度入侵下意大利苍耳对本地植物群落多样性的影响程度指数均为正(即中度和重度入侵抑制了本地植物群落的多样性指数)。而轻度入侵时意大利苍耳对本地植物群落多样性的影响程度指数均为负,其中对 Margalef's 指数的影响程度最大,为-0.35。说明意大利苍耳轻度入侵可使本地植物群落的多样性增加,特别是 Margalef's 指数($P<0.05$,图 3)。

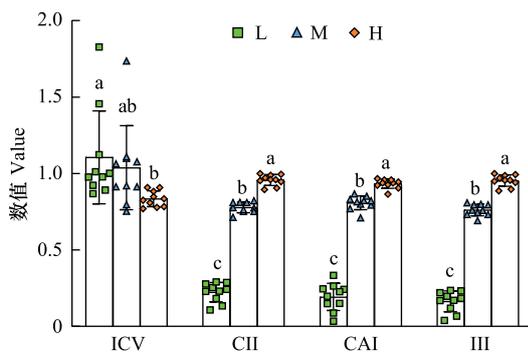


图 2 不同程度意大利苍耳入侵下本地植物群落稳定性、可入侵性与意大利苍耳竞争优势指数和入侵强度指数的变化

Fig.2 The changes of stability, invasiveness, competitive advantage index and invasion intensity index of local plant community under different degrees of *Xanthium sibiricum* invasion

CII: 群落可入侵性指数 Community invasibility index; CAI: 意大利苍耳竞争优势度指数 Competitive advantage index of alien invasive plants; III: 意大利苍耳入侵强度指数 Invasion intensity index of invasive plant species; 不同小写字母表示不同意大利苍耳入侵程度下差异显著 (Mean±SD, $P<0.05$)

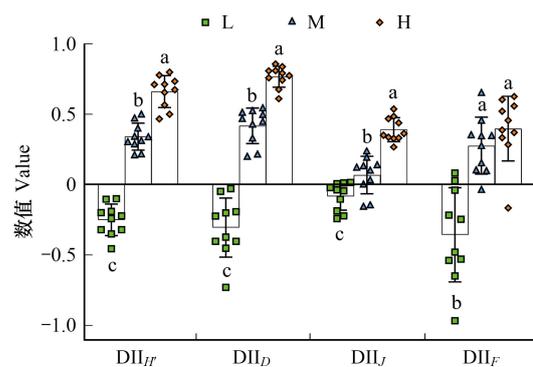


图 3 不同程度意大利苍耳入侵对本地植物群落多样性指数的影响程度

Fig.3 The influence of different degrees of *Xanthium italicum* invasion on the diversity index of local plant communities

DII_{H'}代表意大利苍耳对 Shannon-Wiener 多样性指数的影响程度指数; DII_D代表意大利苍耳对 Simpson's 优势度指数的影响程度指数; DII_J代表意大利苍耳对 Pielou's 均匀度指数的影响程度指数; DII_F代表意大利苍耳对 Margalef's 丰富度指数的影响程度指数; 不同小写字母表示不同意大利苍耳入侵程度下差异显著 (Mean±SD, $P<0.05$)

2.4 意大利苍耳对群落稳定性和物种数的影响程度指数随入侵植物盖度的变化

随着意大利苍耳入侵程度的增加,意大利苍耳对群落稳定性指数和群落物种数的影响程度指数呈上升趋势($P<0.05$)。在轻度入侵水平下意大利苍耳对群落稳定性指数和群落物种数的影响程度指数均 <0 ,但在重度入侵水平下意大利苍耳对群落稳定性指数和群落物种数的影响程度指数均 >0 。说明随着意大利苍耳入侵程度的增加,意大利苍耳破坏了本地群落稳定性,并降低了群落物种数(图 4)。

2.5 群落多样性指数与群落稳定性、群落可入侵性的相关性

本地植物群落多样性指数与群落稳定性、可入侵性相关性分析表明,群落多样性的 H、D 以及 J 均与 ICV 存在显著正相关关系($P<0.05$),其中 J 与 ICV 存在极显著正相关关系($P<0.001$),相关系数为 0.72,但 S 和 F 与 ICV 相关性不显著;群落多样性的 S、H'、D、J 以及 F 均与 CII、CAI 以及 III 呈极显著负相关($P<0.001$),其中 D 与 CII 的负相关系数最小为-0.99。说明群落多样性与群落稳定性呈正相关,而与群落可入侵性呈负相关(图 5)。

2.6 群落多样性指数与群落稳定性、群落可入侵性的通径分析

利用通径分析(仅有入侵群落的数据)分析不同意大利苍耳入侵程度下植物群落多样性对群落稳定性和

入侵性的贡献强度,各多样性指数对群落稳定性的贡献大小依次为 Shannon-Wiener 指数 ($H > \text{Margalef 丰富度指数}(F) > \text{Pielou's 指数}(J) > \text{Simpson's 优势度指数}(D) > \text{群落物种数}(S)$); Shannon-Wiener 指数 (H') 对群落稳定性的贡献最大 ($P = 0.828$); Shannon-Wiener 指数 (H') 通过 Simpson's 指数 (D) 对群落稳定性产生的间接贡献较大 ($P' = 0.817$)。各多样性指数对群落可入侵性的贡献大小依次为 Simpson's 指数 (D) $>$ 群落物种数 (S) $>$ Margalef 指数 (F) $>$ Pielou's 指数 (J) $>$ Shannon-Wiener 指数 (H'); Simpson's 指数 (D) 对群落可入侵性的贡献最大 ($P = 0.944$); Simpson's 指数 (D) 通过 Shannon-Wiener 指数 (H) 对群落可入侵性产生的间接贡献较大 ($P' = 0.932$) (表 1)。

3 讨论

研究结果表明,与未入侵地相比,意大利苍耳轻度入侵增加了本地植物群落多样性(即意大利苍耳对本地植物的影响程度为负),而中度和重度入侵则降低了本地植物群落多样性(即意大利苍耳对本地植物的影响程度为正),说明意大利苍耳在不同程度入侵下改变了本地植物群落多样性;随着入侵程度的增加,群落稳定性下降了 25%、群落可入侵上升了 77%,其中,对群落稳定性和群落可入侵性直接影响最大的分别是 Shannon-Wiener 指数和 Simpson's 指数;本地植物群落多样性与群落稳定性均呈正相关,但与群落可入侵性呈负相关。该结果说意大利苍耳在入侵初期的竞争能力和入侵强度不足以破坏本地植物群落的结构和多样性,但随着其入侵程度和竞争能力的增加,在中度和重度入侵过程中破坏了本地物种的多样性,导致群落稳定性和可入侵的变化,这对当地的生态环境有着重要影响。

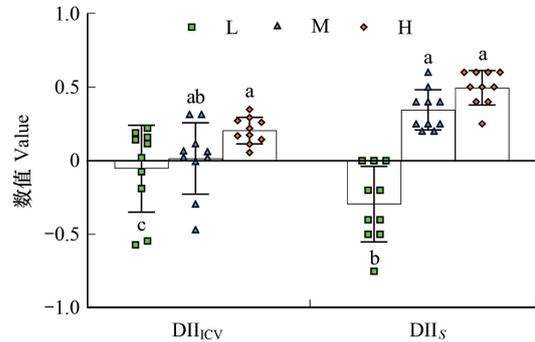


图 4 不同程度意大利苍耳入侵对本地植物群落物种数和稳定性指数的影响程度

Fig.4 The influence of different degrees of *Xanthium italicum* invasion on the species number and stability index of local plant communities

DII_{ICV} 代表意大利苍耳对群落稳定性指数的影响程度指数; DII_S 代表意大利苍耳对群落植物物种数的影响程度指数; 不同小写字母表示不同意大利苍耳入侵程度下差异显著 (Mean±SD, $P < 0.05$)



图 5 本地植物群落多样性指数与群落稳定性、可入侵性的相关性

Fig.5 The correlation between local plant community diversity index and community stability and invasiveness

* : $P < 0.05$; ** : $P < 0.01$; *** : $P < 0.001$

表 1 植物群落多样性对群落稳定性和入侵性的贡献

Table 1 The contribution of plant community diversity to community stability and invasiveness

	群落稳定性指数					群落可入侵性指数						
	P	P'				P	P'					
		S	H'	D	J		F	S	H'	D	J	F
S	0.008		0.007	0.007	0.005	0.007	-0.228		0.215	0.213	0.146	0.223
H'	0.828	0.782		0.817	0.695	0.741	-0.123	0.116		0.121	0.103	0.110
D	0.173	0.162	0.171		0.146	0.149	-0.944	0.881	0.932		0.797	0.816
J	0.539	0.345	0.453	0.455		0.298	0.142	0.090	0.119	0.120		0.078
F	-0.608	0.5955	0.5445	0.5255	0.336		0.192	0.188	0.172	0.166	0.106	

S: 群落植物物种数 Number of plant species in the community; H': Shannon-Wiener 多样性指数 Shannon-Wiener diversity index; D: Simpson's 优势度指数 Simpson's dominance index; J: Pielou's 均匀度指数 Pielou's evenness index; F: Margalef's 丰富度指数 Margalef's richness index; P: 直接通径系数 Direct path coefficient; P': 间接通径系数 Indirect path coefficient

群落的可入侵性是入侵植物能否成功入侵到新生境的主要因素之一^[34]。即当群落的可入侵性较低时,本地群落的入侵抗性较高,通过自身竞争占据更多的生态位以及利用绝大多数资源,导致外来入侵植物成功入侵的几率减少;而群落可入侵性较高时,外来入侵植物成功入侵的概率则增加^[35]。本实验结果表明,当群落可入侵性逐渐变大时,植物群落内意大利苍耳的盖度也随之增加,相反,植物群落多样性和群落稳定性呈下降趋势。这与贺俊英等^[36]牛膝菊(*Galinsoga parviflora*)入侵降低了植物多样性研究也得出了相同的结论。王坤芳等^[37]也发现随着少花蒺藜草(*Ageratina adenophora*)入侵程度的增加本地植物物种多样性降低。多样性阻抗假说认为,相对于生物多样性较低的生态系统,生物多样性较高的生态系统具有更高的稳定性和更小的可入侵性,即:在较高的生物多样性的生态系统中,入侵植物很难成功地入侵^[38-39]。但也有研究表明群落可入侵性较高的群落,其群落物种多样性也较高,即两者呈正相关关系,这可能是由于研究尺度大小不同所造成的^[40-41]。

本研究表明,随着意大利苍耳入侵程度的增加,本地植物群落可入侵性增加,而植物群落多样性和稳定性降低;植物群落可入侵性与植物群落多样性和稳定性的关系支持多样性阻抗假说。然而,不同入侵程度对本地植物群落多样性影响不同。与未入侵地相比,轻度入侵本地植物多样性指数均有所增加;但随着入侵程度以及意大利苍耳的竞争优势和入侵强度增加,本地植物多样性指数呈现下降趋势。这与 Wang 等^[32,42-43]加拿大一枝黄花(*Solidago canadensis*)的多篇研究结果一致。Wu 等^[44]也发现喜旱莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)轻度入侵会增加群落物种丰富度和均匀度,而随着入侵程度的增加则显著降低本地植物物种多样性。导致上述结果出现的原因可能是,外来入侵植物在入侵初期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^[45]。本研究结果表明,意大利苍耳轻度入侵可增加本地植物群落多样性。

外来入侵植物往往会因其强大的适应能力及竞争能力打破本地的生态系统平衡,导致当地植物多样性下降,严重时可能造成其他植物的灭绝^[46]。随着意大利苍耳入侵程度的增加,意大利苍耳对本地植物群落多样性和稳定性的影响程度也随之增加。这与 Wang 等^[32]在镇江市加拿大一枝黄花(*Solidago canadensis*)入侵程度的增加,对植物群落多样性和稳定性的影响程度也呈现上升趋势的结果一致。由于意大利苍耳的竞争优势和入侵强度随着意大利苍耳入侵程度的增加而增加,其通过自身竞争优势获取大量资源、占据更多生态位并释放化感物质破坏本地植物群落的结构和多样性,从而导致对本地植物群落多样性和稳定性的影响程度增加。随后,植物群落多样性和群落稳定性降低导致群落可入侵性的增加,因为群落可入侵性与植物群落多样性及群落稳定性呈负相关^[18]。

群落的可入侵性和群落稳定性与本地植物群落多样性有着密切关系^[4,47]。本实验研究表明 Shannon-Wiener 指数对群落稳定性的贡献高于其他多样性指数的贡献,这一结果与 Wang 等人的研究结果相同^[32],说明与 Shannon-Wiener 指数较低的群落相比,Shannon-Wiener 指数更高的群落其具备更高的群落稳定性,并对

植物入侵产生更大的抵抗力。此外,本实验研究表明 Simpson's 指数对群落可入侵性的贡献高于其他多样性指数的贡献,这与之前的研究结果不一致^[32]。说明随着意大利苍耳入侵程度的增加,使其成入侵群落的优势种,从而导致竞争优势和入侵强度的增加,对群落的可入侵性产生较大影响;这其中 Simpson's 指数产生重要作用。因此,Shannon-Wiener 指数对群落的稳定性至关重要,Simpson's 指数对群落的入侵性至关重要。

4 结论

意大利苍耳在轻度入侵水平下有利于本植物群落的物种多样性,对植物群落产生了积极影响;但在中度和重度入侵水平下均降低或减少了本地植物群落的多样性和群落稳定性,从而增加了群落的可入侵性,对植物群落产生了负效应。这将会对新疆脆弱的生态系统和土著物种的多样性造成不可估量的影响,应在入侵初期对其进行控制与铲除,防止意大利苍耳等有害外来入侵种的入侵和进一步扩散与蔓延。

参考文献(References):

- [1] The economics of biological invasions. *Biodiversity & Conservation*, 2002, 11(3): 553-556.
- [2] Gioria M, Hulme P E, Richardson D M, Pyšek P. Why are invasive plants successful? *Annual Review of Plant Biology*, 2023, 74: 635-670.
- [3] 郑景明, 马克平. 植物群落多样性与可入侵性关系研究进展. *应用生态学报*, 2006, 17(7): 1338-1343.
- [4] Levine J M, D'Antonio C M. Elton revisited: a review of evidence linking diversity and invasibility. *Oikos*, 1999, 87(1): 15.
- [5] 姚向阳, 李委涛, 郑玉龙. 群落组成及物种间相互作用对外来植物入侵的影响. *生态学杂志*, 2014, 33(7): 1953-1959.
- [6] 吴昊, 贾少奇, 朱亚星. 物种多样性及环境因子对入侵植物空心莲子草群落稳定性的影响. *生态学杂志*, 2022, 41(1): 33-41.
- [7] Fridley J D, Stachowicz J J, Naeem S, Sax D F, Seabloom E W, Smith M D, Stohlgren T J, Tilman D, Von Holle B. The invasion paradox: reconciling pattern and process in species invasions. *Ecology*, 2007, 88(1): 3-17.
- [8] Byun C, de Blois S, Brisson J. Plant functional group identity and diversity determine biotic resistance to invasion by an exotic grass. *Journal of Ecology*, 2013, 101(1): 128-139.
- [9] Yang L X, Callaway R M, Atwater D Z. Ecotypic diversity of a dominant grassland species resists exotic invasion. *Biological Invasions*, 2017, 19(5): 1483-1493.
- [10] Isbell F, Calcagno V, Hector A, Connolly J, Harpole W S, Reich P B, Scherer-Lorenzen M, Schmid B, Tilman D, van Ruijven J, Weigelt A, Wilsey B J, Zavaleta E S, Loreau M. High plant diversity is needed to maintain ecosystem services. *Nature*, 2011, 477: 199-202.
- [11] Park D S, Feng X, Maitner B S, Ernst K C, Enquist B J. Darwin's naturalization conundrum can be explained by spatial scale. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, 117(20): 10904-10910.
- [12] Cavieres L A. Facilitation and the invasibility of plant communities. *Journal of Ecology*, 2021, 109(5): 2019-2028.
- [13] Levine J M, Adler P B, Yelenik S G. A meta-analysis of biotic resistance to exotic plant invasions. *Ecology Letters*, 2004, 7(10): 975-989.
- [14] Levine J M, Vilà M, D'Antonio C M, Dukes J S, Grigulis K, Lavorel S. Mechanisms underlying the impacts of exotic plant invasions. *Proceedings Biological Sciences*, 2003, 270(1517): 775-781.
- [15] Huntly N, Bangert R, Hanser S E. Native and exotic plants of fragments of sagebrush steppe produced by geomorphic processes versus land use. *Plant Ecology*, 2011, 212(9): 1549-1561.
- [16] 何健霄, 肖永康, 阿马努拉·依明尼亚孜. 模拟植食性昆虫取食对 3 种苍耳属杂草竞争力的影响. *草业科学*, 2023, 40(7): 1802-1809.
- [17] 杜珍珠, 徐文斌, 阎平, 王少山, 郭一敏. 新疆苍耳属 3 种外来入侵新植物. *新疆农业科学*, 2012, 49(5): 879-886.
- [18] 徐怀秀, 马森. 意大利苍耳与乌拉尔甘草种间竞争能力比较. *生态学报*, 2021, 41(16): 6644-6653.
- [19] 塞依丁·海米提, 努尔巴依·阿布都沙力克, 迈迪娜·吐尔逊, 阿尔曼·解思斯, 阿腾古丽. 外来入侵植物意大利苍耳在新疆的潜在分布及扩散趋势. *江苏农业科学*, 2019, 47(13): 126-130.
- [20] 郭文超, 吐尔逊, 周桂玲, 刘忠军, 张祥林, 秦晓辉, 李晶, 张伟. 新疆农林外来生物入侵现状、趋势及对策. *新疆农业科学*, 2012, 49(01): 86-100.
- [21] Andreani S, Barboni T, Desjobert J M, Paolini J, Costa J, Muselli A. Essential oil composition and chemical variability of *Xanthium italicum* Moretti from Corsica. *Flavour and Fragrance Journal*, 2012, 27(3): 227-236.
- [22] Shao H, Huang X L, Wei X Y, Zhang C. Phytotoxic effects and a phytotoxin from the invasive plant *Xanthium italicum* Moretti. *Molecules*, 2012, 17(4): 4037-4046.
- [23] 何影, 马森. 入侵植物意大利苍耳种子萌发对环境因子的响应. *生态学报*, 2018, 38(4): 1226-1234.
- [24] 马筱, 王桔红, 罗娅婷, 崔现亮, 段富院. 不同入侵程度紫萼泽兰碳氮磷生态化学计量特征研究. *广西植物*, 2022, 42(12): 2064-2074.

- [25] Xiao H G, Wang C Y, Liu J, Wang L, Du D L. Insights into the differences in leaf functional traits of heterophyllous *Syringa oblata* under different light intensities. *Journal of Forestry Research*, 2015, 26(3): 613-621.
- [26] Wang C Y, Zhou J W, Liu J, Xiao H G, Wang L. Differences in functional traits and reproductive allocations between native and invasive plants. *Journal of Central South University*, 2018, 25(3): 516-525.
- [27] Wang C Y, Zhou J W, Liu J, Wang L, Xiao H G. Reproductive allocation strategy of TwoHerbaceous invasive plants AcrossDifferent cover classes. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2017, 26(1): 355-364.
- [28] Shannon CE, Weaver W. *The mathematical theory of communication*. University of Illinois Press, Urbana, Illinois, 1999:1-117.
- [29] Simpson E H. Measurement of diversity. *Nature*, 1949, 163: 688.
- [30] Pielou E C. The measurement of diversity in different types of biological collections. *Journal of Theoretical Biology*, 1966, 13: 131-144.
- [31] Margalef R. Diversidad de especies en las comunidades naturales. *Barcelona: Publicaciones del Instituto de Biología Aplicada*, 1951,6:59-72.
- [32] Wang C Y, Cheng H Y, Wang S, Wei M, Du D L. Plant community and the influence of plant taxonomic diversity on community stability and invasibility: a case study based on *Solidago canadensis* L. *Science of the Total Environment*, 2021, 768: 144518.
- [33] Wang C Y, Wei M, Wang S, Wu B D, Cheng H Y. *Erigeron annuus* (L.) Pers. and *Solidago canadensis* L. antagonistically affect community stability and community invasibility under the co-invasion condition. *Science of the Total Environment*, 2020, 716: 137128.
- [34] Kimbro D L, Cheng B S, Grosholz E D. Biotic resistance in marine environments. *Ecology Letters*, 2013, 16(6): 821-833.
- [35] Peng S J, Kinlock N L, Gurevitch J, Peng S L. Correlation of native and exotic species richness: a global meta-analysis finds no invasion paradox across scales. *Ecology*, 2019, 100(1): e02552.
- [36] 贺俊英,徐萌萌,张子义,史树德.入侵植物牛膝菊 (*Galinsoga parviflora* Cav.) 对植物多样性的影响. *干旱区资源与环境*, 2019, 33(07): 147-151.
- [37] 王坤芳,纪明山,彭爽.不同入侵程度下少花藜草对植物群落特征影响. *东北农业大学学报*, 2015, 46(11): 16-21.
- [38] Elton C S. *The ecology of invasions by animals and plants*. London: Methuen, 1958.
- [39] 韦梅.共同入侵下入侵植物和本地植物的共存机理和入侵植物对植物群落的影响与机理[D].镇江:江苏大学,2022.
- [40] Ohlemüller R, Walker S, Bastow Wilson J. Local vs regional factors as determinants of the invasibility of indigenous forest fragments by alien plant species. *Oikos*, 2006, 112(3): 493-501.
- [41] Souza L, Bunn W A, Simberloff D, Lawton R M, Sanders N J. Biotic and abiotic influences on native and exotic richness relationship across spatial scales; favourable environments for native species are highly invisable. *Functional Ecology*, 2011, 25(5): 1106-1112.
- [42] Wang C Y, Jiang K, Liu J, Zhou J W, Wu B D. Moderate and heavy *Solidago canadensis* L. invasion are associated with decreased taxonomic diversity but increased functional diversity of plant communities in East China. *Ecological Engineering*, 2018, 112: 55-64.
- [43] Wang C Y, Wu B D, Jiang K, Zhou J W, Du D L. Canada goldenrod invasion affect taxonomic and functional diversity of plant communities in heterogeneous landscapes in urban ecosystems in East China. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2019, 38: 145-156.
- [44] Wu H, Carrillo J, Ding J Q. Species diversity and environmental determinants of aquatic and terrestrial communities invaded by *Alternanthera philoxeroides*. *Science of the Total Environment*, 2017, 581/582: 666-675.
- [45] 李伟杰,朱珣之,罗会婷,黄犀,汤诗杰.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. *广西植物*, 2023, 43(8): 1488-1500.
- [46] 王宜凡,贺俊英.内蒙古外来入侵植物种类调查及相关分析. *生物安全学报*, 2021, 30(04): 256-262.
- [47] Mata T M, Haddad N M, Holyoak M. How invader traits interact with resident communities and resource availability to determine invasion success. *Oikos*, 2013, 122(1): 149-160.