

入侵植物空心莲子草春季沿纬度变化的群落特征

吴昊^{1,2,3}

(1. 信阳师范学院 生命科学学院, 河南 信阳 464000; 2. 中国科学院 武汉植物园, 湖北 武汉 430074;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 纬度和季节是影响生物入侵的重要环境因子。以往对入侵植物空心莲子草 *Alternanthera philoxeroides* 的研究多集中于秋季入侵旺盛期, 较少关注其春季的入侵表现(入侵态势、生物入侵-物种多样性关系等)。在中国 22°~30° N 范围内(广东、广西、湖南、湖北), 共设置 15 个入侵样地与 15 个对照样地, 探讨了春季陆生空心莲子草入侵群落沿纬度的变化特征及入侵对群落多样性(α 物种多样性指数)、稳定性(Godron 坐标值)的影响。结果表明: ①春季空心莲子草入侵态势随纬度上升而加剧; 入侵群落的 Simpson 多样性指数、Shannon 多样性指数和 Pielou 均匀度指数与纬度显著负相关($P < 0.05$), 而对照群落的这 3 个多样性指数与纬度显著正相关($P < 0.05$), 2 种群落的 Patrick 丰富度指数与纬度均无显著相关性。②在群落整体水平上, 空心莲子草入侵造成本土群落的 4 个多样性指数显著下降, 但小规模入侵(入侵盖度 < 25%)可以提高群落多样性; 群落多样性指数随空心莲子草盖度的增加呈现出先上升后下降的单峰变化趋势; 入侵样地和对照样地的 Godron 坐标值相接近, 表明春季空心莲子草入侵并未对群落稳定性产生较大影响。③入侵区共记录植物 45 种, 空心莲子草优势度最高; 对照区共记录植物 125 种, 优势种为结缕草 *Zoysia japonica*, 鹅观草 *Roegneria kamoji* 和葎草 *Humulus scandens*; 春季 2 种群落的植物在典型对应分析(CCA)排序图中沿纬度各自形成界限明显的 3 个分布区, 入侵群落中物种分布的斑块化程度更高; 空心莲子草靠近排序图的中心位置, 表明它拥有较为宽广的纬度适应性。这些研究结果有助于预测外来入侵植物的群落动态, 同时也有利于制定有效的入侵防治措施以保护本土生物多样性。图 5 表 1 参 27

关键词: 植物生态学; 生物入侵; 空心莲子草; 春季; 物种多样性; 群落稳定性; 纬度; 典范对应分析

中图分类号: Q948.15; S718.3

文献标志码: A

文章编号: 2095-0756(2017)05-0816-09

Variation characteristics of an invasive *Alternanthera philoxeroides* community along latitudinal gradients in spring

WU Hao^{1,2,3}

(1. College of Life Science, Xinyang Normal University, Xinyang 464000, Henan, China; 2. Wuhan Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430074, Hubei, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Latitude and season are the crucial environmental factors that affect biological invasions, such as *Alternanthera philoxeroides*, a malignant invasive weed native to South America and now widely found in several provinces of China. To explore variation characteristics of an *A. philoxeroides* community along latitudinal gradients and also to test its invasive effect on native plant diversity (α diversity indices) and community stability (Godron coordinate values) in spring, a latitudinal field survey was conducted in April with 15 invasive and 15 control plots selected in the 22°–30° N (spanning Guangdong, Guangxi, Hunan, and Hubei Provinces) terrestrial habitats of South China. Analysis included the ordination method of canonical correspondence analysis (CCA) based on species and environmental matrixes, as well as the curve regression between *A. philoxeroides* cover and α diversity indices (the Simpson, Shannon, Pielou, and Patrick indices). Results showed that: 1)

收稿日期: 2016-10-17; 修回日期: 2016-11-02

基金项目: 中国科学院武汉植物园知识创新工程项目(455437H05); 信阳师范学院博士科研启动基金项目

作者简介: 吴昊, 讲师, 博士, 从事入侵生态学与群落生态学研究。E-mail: wuhao868686@163.com

species cover of *Alternanthera philoxeroides* increased with increasing latitude from 22°–30° N of China with the Simpson, Shannon, and Pielou indices all significantly and negatively correlated ($P=0.012$, $r=-0.629$; $P=0.020$, $r=-0.591$; $P=0.024$, $r=-0.579$, respectively) to latitude in the invasive community but significantly and positively correlated ($P=0.041$, $r=0.533$; $P=0.020$, $r=0.591$; $P=0.010$, $r=0.641$, respectively) in the control community. The Patrick index had no significant correlation with latitude. 2) Invasion decreased species diversity at the whole community level ($t=7.811$, $P<0.001$). However, a slight invasion (*A. philoxeroides* cover < 25%) improved diversity, and with invasion cover increasing, species diversity indices were unimodal. In spring the Godron values between invasive and control communities were similar. 3) Invasive plots recorded 45 plant species; whereas, control plots recorded 125 plant species. Plant species of these two community types formed three separate distribution areas in the CCA two-dimensional diagrams with the invasive community having a higher distribution density. *A. philoxeroides* was near to the central position indicating it had a wider latitudinal adaptability. These findings would be helpful for predicting dynamics of an invasive plant community and also very important for biological invasion control and native biodiversity protection. [Ch, 5 fig. 1 tab. 27 ref.]

Key words: plant ecology; biological invasion; *Alternanthera philoxeroides*; spring; species diversity; community stability; latitude; canonical correspondence analysis (CCA)

生物入侵是当代社会面临的最严峻的生态问题之一, 给环境保护、生态系统功能维持及全球生物多样性造成巨大威胁^[1]。外来入侵植物通过资源竞争、干扰等途径影响本土生物群落物种分布、生物多样性及群落稳定性, 而诸多环境因子在生物入侵过程中起到重要作用^[2-3]。自然界中, 纬度包含了复杂的环境因素, 如温度、光周期、生长季长度等^[4], 纬度梯度引起的水、热条件非均衡性导致入侵植物区系分布、入侵生物群落结构、入侵效应等特征发生显著变化^[5-6]。吴晓雯等^[7]发现, 中国大陆低纬度地区入侵植物的组成以热带区系植物为主, 而高纬度地区的入侵植物则以温带区系植物为主; RICHARDSON 等^[8]发现, 在美国草原的低纬度区域, 入侵杂草能够快速生长并抑制本土植物建群, 而在高纬度地区, 随着环境压力增大, 入侵杂草反而可以作为先锋物种改善生境提高本土植物多样性。探讨纬度梯度对入侵物种群落特征的影响有助于深入理解外来生物入侵机理及预测其入侵态势。空心莲子草 *Alternanthera philoxeroides* 原产于南美洲, 强大的克隆能力及水陆两生属性使它在全球大纬度梯度范围内(42°S~37°N)广为分布^[9]。空心莲子草于 20 世纪 30 年代被引入中国, 现已入侵南北方 20 余省, 给当地生态环境和经济建设带来巨大危害^[10]。林金成等^[11]、郭连金等^[12-13]、蔡一村等^[14]、WU 等^[9]对不同区域空心莲子草群落特征、入侵-物种多样性关系进行了研究, 但这些调查多集中在入侵态势旺盛的秋季; 林金成等^[10]虽然探讨了春季空心莲子草入侵对本土群落的影响, 但其调查的纬度梯度较小(仅局限于南京市)。由于不同季节入侵植物的种群动态变化较大, 导致入侵群落的物种组成、多样性等特征差异显著^[15-16], 因此, 在春季(入侵初期)沿大尺度纬度变化的入侵植物空心莲子草的群落特征亟待研究。本研究基于纬度梯度(22°~30°N)的野外群落学调查, 对春季空心莲子草群落物种多样性沿纬度变化、入侵对群落多样性及稳定性的影响以及群落物种沿纬度的分布特征进行了探讨, 以期对空心莲子草入侵防治及本土生物多样性保护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 野外调查

于 2013 年 4 月下旬在中国南方 22°~30°N 纬度梯度范围内(广东、广西、湖南、湖北)对陆生空心莲子草群落进行野外调查。选择空心莲子草入侵面积超过 100 m² 的陆生区域布设调查样地(极少数延伸至水体中), 间隔 1°设置 1~3 个样地(10 m × 10 m, 间隔 10 km 以上)。同时, 采用同样方法在每个人入侵样地附近设置对样地(无空心莲子草入侵)进行群落调查, 并保证对样地与入侵样地周围的生境条件基本一致。共设置 15 个人入侵样地和 15 个对样地。研究样地处于中国亚热带季风气候区, 水热条件优越, 年平均气温为 21.0 °C, 年降水量为 1 500 mm。土壤质地以赤红壤和黄壤为主, 土层较厚, 质地黏重, 多呈酸性。空心莲子草在此区域内大量入侵的生境主要为远离城市的撂荒地、田埂、河岸带以及部

分林下空地,人为干扰程度较小。

在每个样地中央均匀布设2条10 m长的样带,每条样带均匀布设5个面积为0.5 m × 0.5 m的样方。调查时,记录各样方中植物物种名称。由于春季研究区内空心莲子草等植物处于生长初期,紧贴地面生长,其高度、个体数均难以准确测量,故采用盖度作为衡量群落中植物优势度的唯一指标。利用具有100分格的0.5 m × 0.5 m样方框精确计算每种植物的盖度。利用全球定位系统(GPS)定位仪(Garmin eTrex 20)记录各样地的地形因子(经度、纬度、海拔)。对于未知的植物,拍照或采标本带回实验室,使用在线中国植物志(Flora of China, <http://frps.eflora.cn/>)以及中国数字植物标本馆(Chinese Virtual Herbarium, <http://www.cvh.org.cn/>)进行物种鉴定。

1.2 数据计算

1.2.1 α 物种多样性^[17-18] 利用植物盖度计算草本群落物种多样性指数。Patrick 丰富度指数: $R=S$;

Simpson 多样性指数: $\lambda=1-\sum_{i=1}^n P_i^2$; Shannon-Wiener 多样性指数: $H=-\sum_{i=1}^n P_i \times \ln P_i$; Pielou 均匀度指数:

$E=H/\ln S$ 。其中: S 为样地内所有植物的物种数, P_i 为第 i 种植物的相对盖度。

1.2.2 群落稳定性 群落稳定性代表了生物群落耐性、持久性、恒定性以及弹性等抵抗外界干扰的特征。本研究利用 Godron 坐标值测度群落稳定性状况,具体计算方法为^[19]:将群落中所有植物频度(某一植物在样方中出现频次的总和)按从大到小顺序排列,并按其相对频度由大到小逐步累积,然后将植物种类百分数与累积相对频度对应画出散点图,并对散点进行曲线方程模拟[方程(1): $y=ax^2+bx+c$];在横、纵坐标轴100处连线,其直线方程为[方程(2): $y=100-x$]。将方程(2)代入方程(1)可得方程(3): $ax^2+(b+1)x+c-100=0$,方程(3)的2个解中一个远高于100,另一个为0~100,第2个解为稳定点横坐标值,将它代入方程(1)或(2)中即可得到群落稳定性纵坐标值。Godron 坐标值越接近(20, 80),则群落稳定性越高。

1.3 统计分析

用 SPSS 16.0 (SPSS Inc, Chicago, 美国)对纬度梯度与空心莲子草入侵盖度、入侵区和对照区群落的4个多样性指数分别进行回归分析。分析时,使用软件中“curve estimation”提供的2种曲线模拟方程(线性、二项式),选择回归显著且拟合系数最高者进行讨论。同时,也对空心莲子草入侵盖度与入侵区植物多样性进行回归分析。

为了检验春季空心莲子草入侵对本土群落多样性的影响,对入侵区、对照区的4个多样性指数分别进行“独立样本 t 检验”(independent-samples t test)。

分别计算入侵区、对照区群落的稳定性坐标点,并比较两者与理想稳定点的欧氏距离。

分别建立植物物种相对盖度矩阵、调查样地纬度梯度矩阵,利用数量生态学排序软件 CANOCO 4.5 (Microcomputer Power, 美国)提供的“典范对应分析”(canonical correspondence analysis, CCA),探讨春季空心莲子草入侵区及对照区植物物种沿纬度梯度的分布状况。

2 结果与分析

2.1 空心莲子草入侵态势及群落多样性沿纬度的变化

纬度与入侵样地的空心莲子草盖度回归拟合结果表明:两者之间具有显著的线性关系, $y=0.071x-1.172$ (y 为纬度, x 为盖度, $R^2=0.466$, $P=0.005$),即在 $22^\circ\sim 30^\circ\text{N}$ 范围内,随着纬度上升,春季空心莲子草入侵态势呈明显的上升趋势。

对纬度分别与入侵区、对照区样地的4个物种多样性指数进行回归拟合,结果如图1所示。由拟合结果可知,纬度并未对2种群落的 Patrick 丰富度指数产生显著影响(对照区 $P=0.084$, 入侵区 $P=0.872$);随着纬度上升,对照区的 Simpson 多样性指数($P=0.041$), Shannon 多样性指数($P=0.020$), Pielou 均匀度指数($P=0.010$)均呈直线上升;而随着纬度梯度上升,入侵区的 Simpson 多样性指数($P=0.012$)、Shannon 多样性指数($P=0.020$), Pielou 均匀度指数($P=0.024$)均呈直线下下降趋势。即在 $22^\circ\sim 30^\circ\text{N}$ 范围内,纬度上升削弱了空心莲子草入侵区群落多样性,提高了对照区群落多样性,2种群落的多样性水平沿纬度梯度呈现出相反的变化格局。

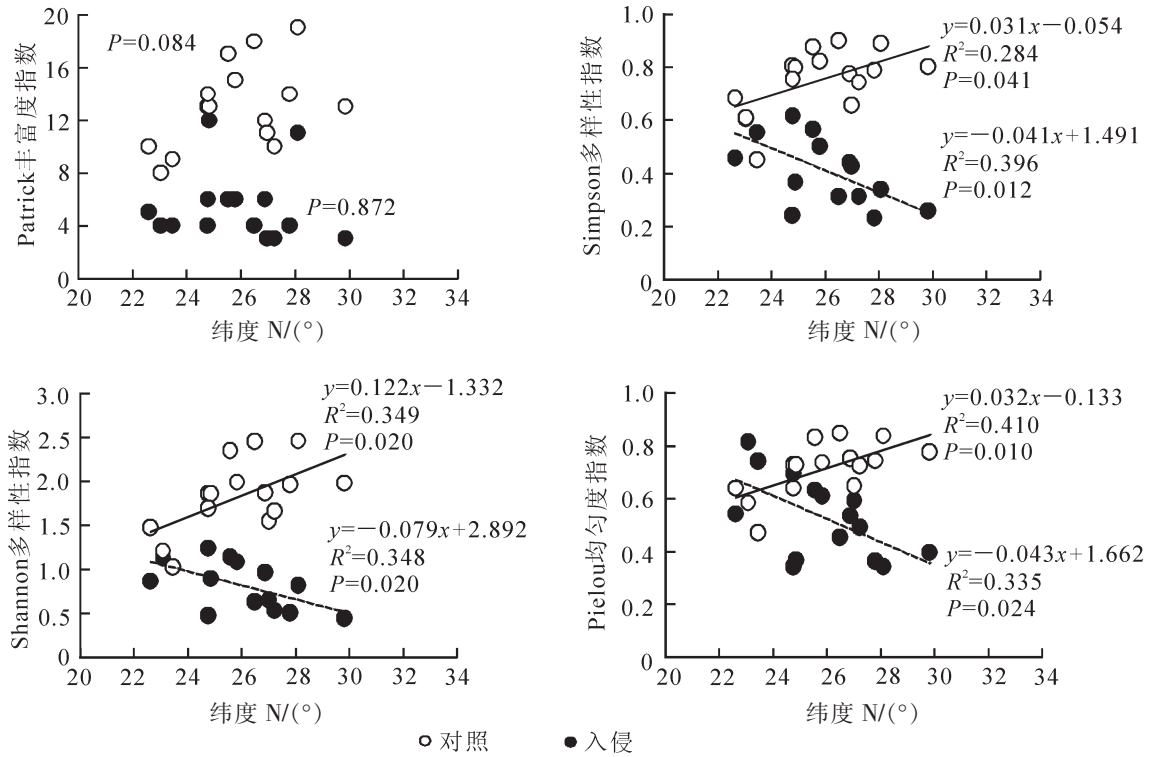


图 1 春季对照区和入侵区样地群落物种多样性沿纬度变化趋势

Figure 1 Variations of species diversity of control and invasive communities along latitudinal gradients in spring

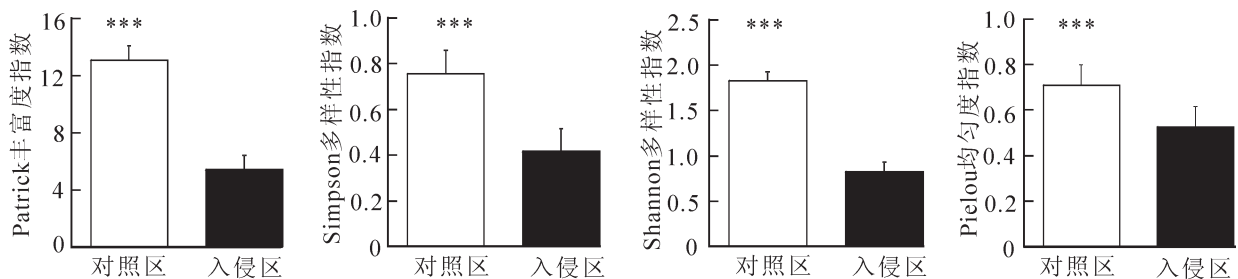
2.2 空心莲子草入侵对群落多样性和稳定性的影响

分别对入侵区和对照区的 4 个 α 物种多样性指数进行独立样本 t 检验，比较两者之间物种多样性的差异。由图 2 可知：对照区群落的 Patrick 丰富度指数 ($t=7.019$, $P<0.001$)，Simpson 多样性指数 ($t=7.429$, $P<0.001$)，Shannon 多样性指数 ($t=7.811$, $P<0.001$)，Pielou 均匀度指数 ($t=3.897$, $P=0.001$) 均显著高于空心莲子草入侵区的多样性指数，即对于群落整体而言，春季空心莲子草入侵会严重降低本土物种多样性水平。

对入侵区、对照区样地的群落稳定性进行分析，结果如图 3 所示。对照区群落稳定性坐标点为 (37.556, 62.444)，偏离理想稳定点 (20, 80) 的欧式距离为 24.828；入侵区群落稳定性坐标点为 (38.030, 61.970)，偏离 Godron 理想稳定点坐标值 (20, 80) 的欧式距离为 25.498。相对于对照区，空心莲子草入侵区的群落稳定性略微有所下降 (下降了 0.670 欧式距离)，但降幅较小，即春季空心莲子草入侵并未对本土群落稳定性产生较大破坏。

2.3 不同程度空心莲子草入侵与群落多样性的关系

对入侵区各样地中的空心莲子草入侵盖度与 4 个 α 多样性指数进行回归拟合，结果表明 (图 4)：入侵盖度与群落 Patrick 丰富度指数之间无显著关系 ($P=0.531$)，而与 Simpson 多样性指数 ($R^2=0.854$, $P<$



*** 表示在 $P=0.001$ 水平差异显著

图 2 春季对照区和入侵区样地物种多样性比较

Figure 2 Comparison of species diversity between control and invasive communities in spring

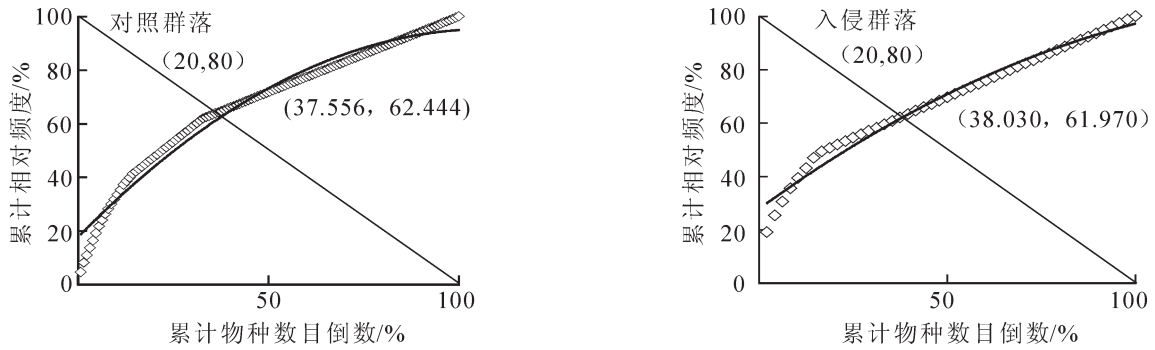


图3 春季对照区和入侵区样地群落稳定性比较

Figure 3 Comparison of community stability between control and invasive communities in spring

0.001), Shannon 多样性指数 ($R^2=0.658, P=0.002$), Pielou 均匀度指数 ($R^2=0.828, P<0.001$) 之间具有显著的二项式回归拟合关系。随着空心莲子草入侵态势的增加, 入侵区群落多样性及均匀度呈先上升后下降的单峰变化模式。即小规模空心莲子草入侵可以提高群落多样性及均匀度水平, 但当空心莲子草的入侵程度超过一定阈值, 则显著削弱群落多样性。各多样性指数所对应的空心莲子草入侵盖度阈值也不相同, 分别为 Simpson 多样性指数(入侵盖度 38%), Shannon 多样性指数(入侵盖度 41%)和 Pielou 均匀度指数(入侵盖度 25%), 其中 Pielou 指数对空心莲子草入侵盖度的耐受性最低, 表明在空心莲子草大量爆发的区域, 最先遭受入侵威胁的是群落均匀度。

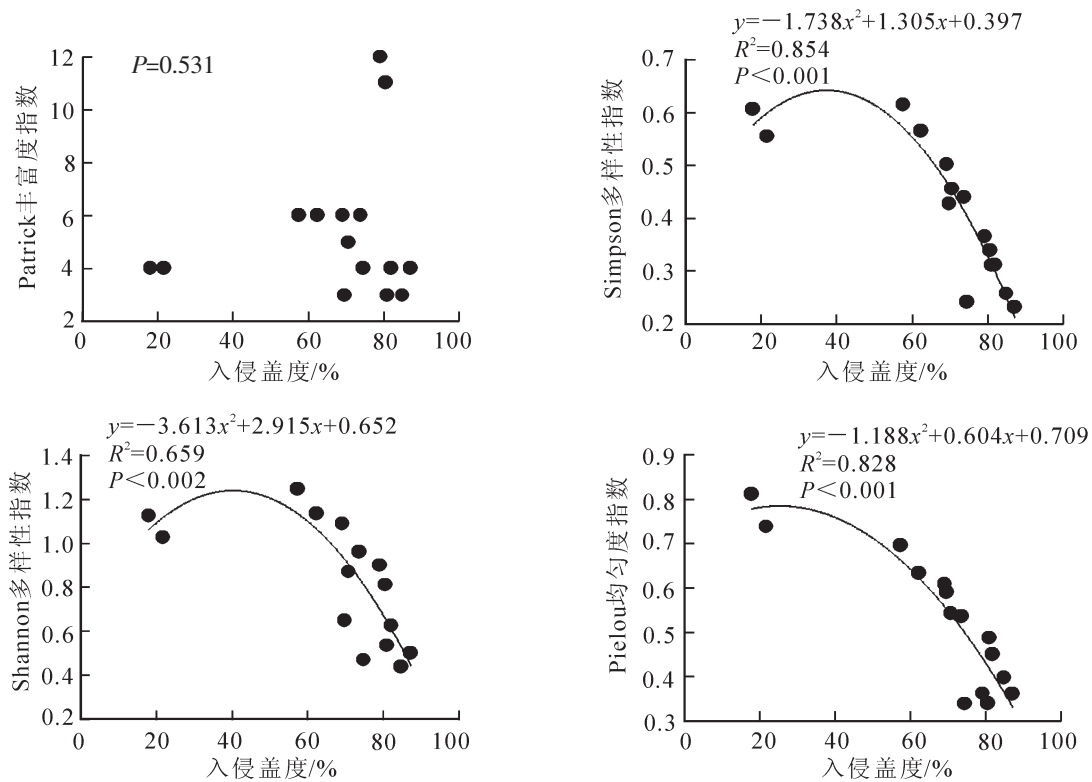


图4 春季空心莲子草入侵盖度与群落多样性指数的回归分析

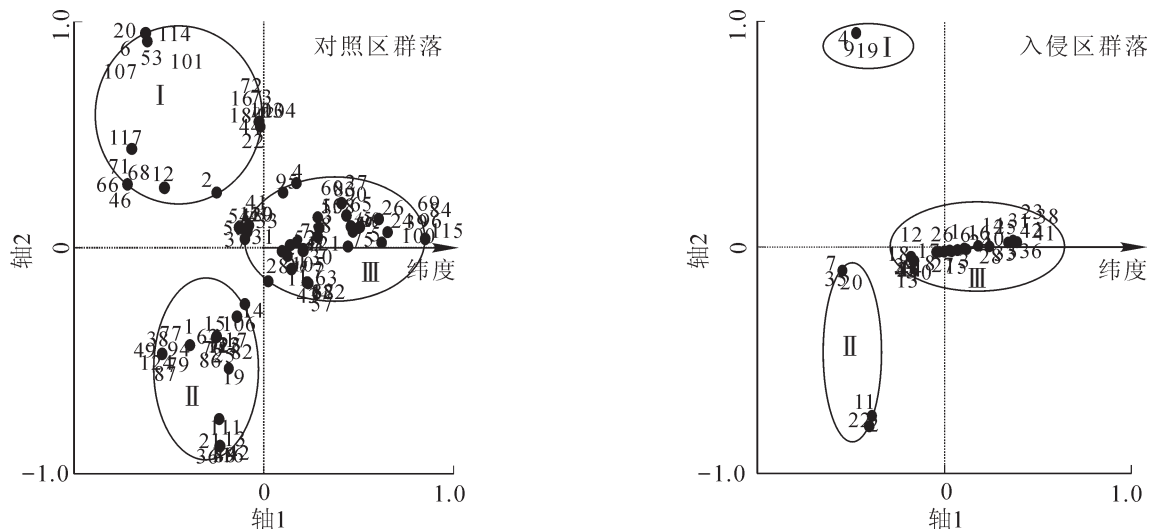
Figure 4 Regression analysis between cover of *Alternanthera philoxeroides* and species diversity in spring

2.4 群落物种分布沿纬度梯度的 CCA 排序

15 个入侵区样地共记录植物 45 种, 15 个对照区样地共记录植物 125 种, 2 种群落的主要植物物种如表 1 所示。入侵区样地总盖度前 20 名的植物分属于 10 科 19 属, 其中禾本科 Poaceae 9 属 9 种, 菊科 Asteraceae 2 属 2 种, 蓼科 Polygonaceae 1 属 2 种; 苋科 Amaranthaceae, 浮萍科 Lemnaceae, 桑科 Moraceae, 大戟科 Euphorbiaceae, 牻牛儿苗科 Geraniaceae, 野牡丹科 Melastomataceae 和酢浆草科 Oxalidaceae 均为 1 属 1 种。空心莲子草的优势度最高(总盖度为 10.265), 其他主要伴生植物为结缕草 *Pas-*

palum distichum (总盖度为 0.649), 李氏禾 *Leersia hexandra* (总盖度为 0.593) 和双穗雀稗 *Paspalum pas-paloide* (总盖度为 0.568)。对照区样地中, 总盖度前 20 名的植物分属于 11 科 18 属, 其中菊科 5 属 6 种, 禾本科 4 属 4 种, 莎草科 Cyperaceae 1 属 2 种; 桑科, 酢浆草科, 蓼科, 豆科 Leguminosae, 十字花科 Brassicaceae, 泽泻科 Alismataceae, 旋花科 Convolvulaceae 和牻牛儿苗科均为 1 属 1 种。结缕草 *P. distichum* (总盖度为 1.376), 鹅观草 *Roegneria kamoji* (总盖度为 0.883), 葎草 *Humulus japonicus* (总盖度为 0.652), 酢浆草 *Oxalis corniculata* (总盖度为 0.633), 苦苣菜 *Sonchus oleraceus* (总盖度为 0.597), 双穗雀稗 *P. paspaloide* (总盖度为 0.572), 艾蒿 *Artemisia argyi* (总盖度为 0.571) 和水蓼 *Polygonum hydropiper* (总盖度为 0.529) 的优势度较高, 为对照群落的主要组成物种。

以各样地所在地理位置的实测纬度数值建立环境因子矩阵(15 × 1), 以对照样地 125 种植物和入侵样地 45 种植物的相对盖度分别建立 2 个物种因子矩阵(15 × 125, 15 × 45), 利用 Canoco 4.5 软件对物种分布沿纬度梯度进行典范对应分析, 排序结果如图 5 所示。在对照区群落中, 125 种植物的分布沿纬度梯度呈界限明显的 3 个区域: 其中, I, II 区为低纬区, III 区为中高纬区。I 区的优势植物为鹅观草(2), 双穗雀稗(6), II 区的优势植物主要是结缕草(1), III 区包含的植物物种最多, 即沿着纬度上升的方向, 对照群落物种多样性呈现一定的上升趋势。在入侵区群落中, 45 种植物也沿着纬度梯度形成界限明显的 3 个分布区, 但 I 区距离 II 区和 III 区较远, 表明 I 区中的双穗雀稗(4), 葎草(9)和酢浆草(19)与其他分布区植物的资源生态位差异较大。空心莲子草位于 III 区中靠近 CCA 排序图的中心位置, 表明该入侵种的适应性强, 具有较为宽广的生态幅。III 区中的物种数目最多, 表明在春季有较多的植物与空心莲子草具有相似的生态习性并能与之伴生共存。



图中箭头表示纬度增大的方向, 阿拉伯数字代表各植物物种, 罗马数字代表不同的分布区

图 5 对照区和入侵区样植物物种沿纬度梯度的 CCA 二维排序

Figure 5 CCA ordination of plant species along latitudinal gradients within control and invasive community in spring

3 讨论

3.1 纬度对入侵群落的影响

空心莲草原产于南美洲, 共有 6 个种群, 其中位于 29°S 附近的 Santa Fé 种群极有可能是入侵中国的空心莲草的源种群^[20]。在研究区 22°~30°N 范围内, 随着纬度上升, 入侵盖度逐步增大, 这可能是由于研究区的亚热带生态环境和同处于该气候带 29°S 附近源种群的生境条件相似, 有利于空心莲草的大量入侵爆发。

由赤道到两极, 随着纬度上升, 物种多样性锐减, 这种“纬度多样性梯度”变化趋势(latitudinal diversity gradient, LDG)是全球生物多样性的基本特征^[8,21]。本研究发现春季空心莲草入侵群落物种多样性也符合 LDG 模式, 一方面是由于在研究区内随着纬度上升空心莲草入侵态势加剧, 只有禾本科

表1 春季对照区和空心莲子草入侵区群落的主要植物物种

Table 1 The main plant species of control and invasive *Alternanthera philoxeroides* community in spring

编号	对照区主要植物		编号	入侵区主要植物	
	植物	总盖度		植物	总盖度
1	结缕草 <i>Zoysia japonica</i>	1.376	1	空心莲子草 <i>Alternanthera philoxeroides</i>	10.265
2	鹅观草 <i>Roegneria kamoji</i>	0.883	2	结缕草 <i>Zoysia japonica</i>	0.649
3	葎草 <i>Humulus scandens</i>	0.652	3	李氏禾 <i>Leersiahexandra swartz</i>	0.593
4	酢浆草 <i>Oxalis corniculata</i>	0.634	4	双穗雀稗 <i>Paspalum paspaloides</i>	0.568
5	苦苣菜 <i>Sonchus oleraceus</i>	0.597	5	四叶萍 <i>Marsilea quadrifolia</i>	0.522
6	双穗雀稗 <i>Paspalum paspaloides</i>	0.572	6	葎草 <i>Humulus scandens</i>	0.317
7	艾蒿 <i>Artemisia argyi</i>	0.571	7	铁苋菜 <i>Acalypha australis</i>	0.199
8	水蓼 <i>Polygonum hydropiper</i>	0.529	8	鹅观草 <i>Roegneria kamoji</i>	0.194
9	车轴草 <i>Trifolium repens</i>	0.420	9	苅草 <i>Arthraxon hispidus</i>	0.183
10	碎米荠 <i>Cardamine hirsuta</i>	0.406	10	狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i>	0.155
11	苏门白酒草 <i>Conyza sumatrensis</i>	0.373	11	莠竹 <i>Microstegium nodosum</i>	0.121
12	慈菇 <i>Sagittaria trifolia</i>	0.371	12	鬼针草 <i>Bidens pilosa</i>	0.114
13	节节麦 <i>Aegilops tauschii</i>	0.342	13	酸模叶蓼 <i>Polygonum lapathifolium</i>	0.094
14	香附子 <i>Cyperus rotundus</i>	0.328	14	龙爪茅 <i>Dactyloctenium aegyptium</i>	0.091
15	牵牛 <i>Pharbitis nil</i>	0.263	15	水蓼 <i>Polygonum hydropiper</i>	0.090
16	苣荬菜 <i>Sonchus brachyotus</i>	0.259	16	艾蒿 <i>Artemisia argyi</i>	0.080
17	鬼针草 <i>Bidens pilosa</i>	0.253	17	老鹳草 <i>Geranium carolinianum</i>	0.075
18	豚草 <i>Ambrosia artemisiifolia</i>	0.242	18	地稔 <i>Melastoma dodecandrum</i>	0.070
19	老鹳草 <i>Geranium carolinianum</i>	0.241	19	酢浆草 <i>Oxalis corniculata</i>	0.068
20	莎草 <i>Cyperus microiria</i>	0.223	20	虻草 <i>Leptochloa panicea</i>	0.060

等耐受性较强的物种能够在受空心莲子草入侵的群落中继续维持较好的发育,如结缕草、李氏禾等,而某些耐受能力较弱的本土植物优势度则被削弱甚至丧失,如车轴草等,最终导致群落多样性严重下降;另一方面,纬度上升所带来热量和水分变化对物种分布均匀程度产生很大影响。随着纬度上升,太阳辐射量降低,水分条件有所改善^[22],这可能降低了本土植物与空心莲子草的可用性水资源竞争,本土种只需要消耗较少的能量来应对种间竞争,因此可以将更多的能量用于优化其生命进程和拓展生态位,在群落内形成多种类型的植物生态种组^[23],从而加剧物种空间分布的斑块化。相对于本土群落,入侵群落中不同习性物种间分布界限更为明显,群落均匀度随纬度上升而降低,导致入侵群落整体多样性下降。

本研究中,对照群落在 22°~30°N 范围内的植物多样性随纬度上升而增加,这与经典的全球物种多样性 LDG 模式相反,主要原因可能是研究区样地所处的气候带较为集中,均处于亚热带气候范围内,热季节性较为稳定,物种沿纬度梯度的种间替代速率降低^[24],使其无法呈现出完整的“热带—亚热带—温带”植物区系多样性随纬度上升而下降的特征。此外,本研究发现纬度并未显著影响春季入侵群落和对照群落的物种丰富度(Patrick 指数),可能是由于较多的植物在春季尚未萌发生长,导致群落物种数目对纬度变化不敏感。

3.2 不同季节入侵效应的比较

林金成等^[9]、郭连金等^[11]、WU 等^[13]均发现秋季小规模空心莲子草入侵能够提高群落物种多样性。本研究亦得出相似结论,即随着入侵盖度的增加,空心莲子草对本土群落多样性先促进后抑制的生态效应存在于其整个入侵进程。这可能是由于在入侵初期,空心莲子草优越的表型可塑性和生理适应性使它能作为先锋物种,改善土壤性能并优化小生境条件,有利于本土植物的定居与建群^[25],而当空心莲子草入侵爆发时,则可通过资源竞争、释放化感物质等途径严重削弱威胁本土群落多样性^[9,13,26]。但与前人研究结果不同的是,春季空心莲子草入侵并未对群落物种丰富度产生影响,这是由于受不同物候期影响,春、秋两季空心莲子草入侵群落植物组成存在较大差异^[9-10]。例如,在大纬度尺度上,秋季陆生空心莲子草的优势伴生种为植株高大的马唐 *Digitaria sanguinalis*^[9],但马唐出苗、抽穗时间较晚(一般为 5-6 月)^[27],物候期的差异使得在春季空心莲子草入侵初期,缺乏竞争力较强的马唐植物与之相抗衡,野外

样地中多为空心莲子草的单优势种群丛, 导致春季空心莲子草入侵对群落物种丰富度影响不显著。

郭连金等^[12]发现, 秋季空心莲子草入侵会导致本土植物群落稳定性严重下降, 是因为在入侵旺盛的秋季, 空心莲子草聚集成大量的斑块状群落镶嵌体, 并通过克隆生长迅速增加其盖度, 从而破坏群落中各植物之间稳定的平衡关系。本研究结果与之不同, 在春季, 空心莲子草入侵并未对本土群落稳定性造成威胁。一方面, 春季研究区本土物种多样性较高, 共记录 125 种植物, 且物种沿纬度梯度的分布较为均匀, 较高的群落多样性水平对于抵抗外来物种入侵及维持自身群落稳定性起到一定的缓冲作用; 另一方面, 生物入侵一般需要经历较长的滞后期, 而后才进入爆发性的扩展阶段。在春季, 空心莲子草还处于生长初期, 其无性分株数及分枝数比较少, 难以形成密集的斑块镶嵌体, 这削弱了它对本土植物的干扰、制约作用, 导致入侵、对照群落的稳定性无显著差异。

4 参考文献

- [1] HULVEY K B, ZAVALETA E S. Abundance declines of a native forb have nonlinear impacts on grassland invasion resistance [J]. *Ecology*, 2012, **93**(2): 378 – 388.
- [2] GEDAN K B, BERTNESS M D. Experimental warming causes rapid loss of plant diversity in New England salt marshes [J]. *Ecol Lett*, 2009, **12**(8): 842 – 848.
- [3] 吴昊, 丁建清. 入侵生态学最新研究动态[J]. 科学通报, 2014, **59**(6): 438 – 448.
WU Hao, DING Jianqing. Recent progress in invasion ecology [J]. *Chin Sci Bull*, 2014, **59**(6): 438 – 448.
- [4] FISCHER A G. Latitudinal variations in organic diversity [J]. *Evolution*, 1960, **14**(1): 64 – 81.
- [5] 冯建孟, 董晓东, 徐成东. 中国外来入侵植物区系成分的聚类分析和排序[J]. 大理学院学报, 2009, **8**(4): 58 – 63.
FENG Jianmeng, DONG Xiaodong, XU Chengdong. Cluster analysis and multi-factor ordination of floristic composition of invasive alien plants in China [J]. *J Dali Univ*, 2009, **8**(4): 58 – 63.
- [6] MARON J L. The relative importance of latitude matching and propagule pressure in the colonization success of an invasive forb [J]. *Ecography*, 2006, **29**(6): 819 – 826.
- [7] 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 Xiaowen, LUO Jing, CHEN Jiakuan, *et al.* Spatial patterns of invasive alien plants in china and its relationship with environmental and anthropological factors [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2006, **30**(4): 576 – 584.
- [8] RICHARDSON P J, MACDOUGALL A S, STANLEY A G, *et al.* Inversion of plant dominance-diversity relationships along a latitudinal stress gradient [J]. *Ecology*, 2012, **93**(6): 1431 – 1438.
- [9] WU Hao, CARRILLO J, DING Jiangqing. Invasion by alligator weed, *Alternanthera philoxeroides*, is associated with decreased species diversity across the latitudinal gradient in China [J]. *J Plant Ecol*, 2016, **9**(3): 311 – 319.
- [10] 林金成, 强胜. 空心莲子草对南京春季杂草群落组成和物种多样性的影响[J]. 植物生态学报, 2006, **30**(4): 585 – 592.
LIN Jincheng, QIANG Sheng. Influence of *Alternanthera philoxeroides* on the species composition and diversity of weed community in spring in Nanjing [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2006, **30**(4): 585 – 592.
- [11] 林金成, 强胜, 吴海荣. 外来入侵杂草空心莲子草对植物生物多样性的影响[J]. 农村生态环境, 2005, **21**(2): 28 – 32.
LIN Jincheng, QIANG Sheng, WU Hairong. Effect of *Alternanthera philoxeroides*, an invasive exotic weed, on plant biodiversity [J]. *Rural Eco-Environ*, 2005, **21**(2): 28 – 32.
- [12] 郭连金, 王涛. 空心莲子草入侵对乡土植物群落种间联结性及稳定性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2009, **17**(5): 851 – 856.
GUO Lianjin, WANG Tao. Impact of invasion of exotic plant *Alternanthera philoxeroides* on interspecies association and stability of native plant community [J]. *Chin J Eco-Agric*, 2009, **17**(5): 851 – 856.
- [13] 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 Lianjin, XU Weihong, SUN Hailing, *et al.* Impacts of the invasion of *Alternanthera philoxeroides* on the species

- composition and diversity of native vegetation community [J]. *Pratacult Sci*, 2009, **26**(7): 137 – 142.
- [14] 蔡一村, 宁泽倩, 刘美华, 等. 东苕溪喜旱莲子草群落研究[J]. 浙江农林大学学报, 2014, **31**(4): 583 – 588.
CAI Yicun, NING Zeqian, LIU Meihua, *et al.* *Alternanthera philoxeroides* community in the eastern Tiaoxi River [J]. *J Zhejiang A & F Univ*, 2014, **31**(4): 583 – 588.
- [15] 俞建, 丁炳扬, 于明坚, 等. 水盾草入侵沉水植物群落的季节动态[J]. 生态学报, 2004, **24**(10): 2149 – 2156.
YU Jian, DING bingyang, YU Mingjian, *et al.* The seasonal dynamics of the submerged plant communities invaded *Bycabomba caroliniana* gray [J]. *Acta Ecol Sin*, 2004, **24**(10): 2149 – 2156.
- [16] 郭晓辉, 任明迅, 丁建清, 等. 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, 2011, **29**(2): 149 – 155.
GUO Xiaohui, REN Mingxun, DING Jianqing, *et al.* Plant species diversity and its seasonal dynamics in woodland invaded by *Solidago canadensis* (Asteraceae) [J]. *Plant Sci J*, 2011, **29**(2): 149 – 155.
- [17] 武小钢, 杨秀云, 边俊, 等. 长治城市湿地公园滨岸区植物群落特征及其与土壤环境的关系[J]. 生态学报, 2015, **35**(7): 2048 – 2056.
WU Xiaogang, YANG Xiuyun, BIAN Jun, *et al.* Species composition and soil gradient analysis of plant communities in the waterside zone of Changzhi National Urban Wetlands Park [J]. *Acta Ecol Sin*, 2015, **35**(7): 2048 – 2056.
- [18] SMITH N G, SCHUSTER M J, DUKES J S. Rainfall variability and nitrogen addition synergistically reduce plant diversity in a restored tallgrass prairie [J]. *J Appl Ecol*, 2016, **53**(2): 579 – 586.
- [19] 郑元润. 森林群落稳定性研究方法初探[J]. 林业科学, 2000, **36**(5): 28 – 32.
ZHENG Yuanrun. Comparison of methods for studying stability of forest community [J]. *Sci Silv Sin*, 2000, **36**(5): 28 – 32.
- [20] 潘晓云, 梁汉钊, ALEJANDRO S, 等. 喜旱莲子草茎叶解剖结构从原产地到入侵地的变异式样[J]. 生物多样性, 2006, **14**(3): 232 – 240.
PAN Xiaoyun, LIANG Hanzhao, ALEJANDRO S, *et al.* Patterns of morphological variation of alligator weed (*Alternanthera philoxeroides*): from native to invasive regions [J]. *Biodivers Sci*, 2006, **14**(3): 232 – 240.
- [21] 贺金生, 陈伟烈, 李凌浩. 中国中亚热带东部常绿阔叶林主要类型的群落多样性特征[J]. 植物生态学报, 1998, **22**(4): 303 – 311.
HE Jinsheng, CHEN Weilie, LI Linghao. Community diversity of the main types of the evergreen broad-leaved forest in the eastern part of the middle subtropical China [J]. *Acta Phytoecol Sin*, 1998, **22**(4): 303 – 311.
- [22] 陈宏彬, 苏培玺, 严巧娣, 等. 河西走廊植物群落特征及其与气候的关系初探[J]. 西北植物学报, 2007, **27**(5): 0859 – 0863.
CHEN Hongbin, SU Peixi, YAN Qiaodi, *et al.* Preliminary study of plant community characteristics and their relationships with climate in the Hexi Corridor Region [J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 2007, **27**(5): 859 – 863.
- [23] CLARKE A, GASTON K J. Climate, energy and diversity [J]. *Proc Biol Sci*, 2006, **273**(1599): 2257 – 2266.
- [24] 吴征镒, 孙航, 周浙昆, 等. 中国种子植物区系地理[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 74 – 80.
- [25] CHEN Yue, ZHOU Ya, YIN Tanfeng, *et al.* The invasive wetland plant *Alternanthera philoxeroides* shows a higher tolerance to water logging than its native congener *Alternanthera sessilis* [J]. *PLoS One*, 2013, **8**(11): e81456. doi: 10.1371/journal.pone.0081456.
- [26] ZUO Shuping, MEI Hui, YE Liting, *et al.* Effects of water quality characteristics on the algicidal property of *Alternanthera philoxeroides* (Mart.) Griseb in an aquatic ecosystem [J]. *Biochem Syst Ecol*, 2012, **43**: 93 – 100.
- [27] 吕德滋, 白素娥, 李香菊, 等. 升马唐种群生态及其田间密度调控指标的研究[J]. 植物生态学报, 1995, **19**(1): 55 – 63.
LÜ Dezi, BAI Sue, LI Xiangju, *et al.* Study on the population ecology and control of ascendant crab grass in summer grain crops in Hebei Province [J]. *Acta Phytoecol Sin*, 1995, **19**(1): 55 – 63.