

DOI: 10.5846/stxb202103030577

柳晓燕, 朱金方, 李飞飞, 赵彩云. 豚草入侵对新疆伊犁河谷林下本地草本植物群落结构的影响. 生态学报, 2021, 41(24): 9613-9620.

Liu X Y, Zhu J F, Li F F, Zhao C Y. Effect of invaded *Ambrosia artemisiifolia* on understory native plant community structure in Yili River Valley of Xinjiang. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(24): 9613-9620.

豚草入侵对新疆伊犁河谷林下本地草本植物群落结构的影响

柳晓燕, 朱金方, 李飞飞, 赵彩云*

中国环境科学研究院, 北京 100012

摘要:为探究外来入侵植物豚草(*Ambrosia artemisiifolia*)对本地植物群落结构的影响,结合区内林下草本植物调查和室内分析方法,分析了豚草不同入侵压力下(无入侵、轻度入侵、中度入侵、重度入侵)本地草本植物丰富度、盖度等特征,探讨了地形、气候、土壤、光照、人口密度等外部因素与豚草种群特征、本地植物群落结构之间的关系。结果表明:豚草种群盖度与其高度、密度、生物量显著正相关。与对照相比,轻度入侵下本土草本植物 Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数显著增加,丰富度、盖度未出现显著差异。随着豚草入侵程度加剧,本地草本植物物种丰富度、盖度极显著降低,样方 Shannon-Wiener 多样性指数先升高再降低,本土草本植物 Pielou 均匀度指数差异不显著。冗余分析(RDA)表明,土壤全氮、与道路距离、土壤全磷、郁闭度对研究区植物群落结构影响最大,土壤全氮含量随豚草盖度和生物量增加而减少,距道路越近或光照越强,豚草盖度和生物量越高。增强伊犁河谷地区交通往来货物豚草检验检疫力度、增加林内植被郁闭度或是抑制区内豚草入侵的有效手段。

关键词:伊犁河谷;豚草;本地物种;物种多样性;冗余分析

Effect of invaded *Ambrosia artemisiifolia* on understory native plant community structure in Yili River Valley of Xinjiang

LIU Xiaoyan, ZHU Jinfang, LI Feifei, ZHAO Caiyun*

Chinese Research Academy of Environment Sciences, Beijing 100012, China

Abstract: To explore the effects of invasive species on understory native plant community structure, individual abundance, coverage of native plant species were investigated under different invasion pressures (no invasion, low invasion, medium invasion, and high invasion) of invasive species *Ambrosia artemisiifolia* with field investigation and analysis. The relationship between the external factors such as topography, climate, soil, light, and population density and the population characteristics of *A. artemisiifolia* and the local plant community structure was discussed. The results showed that *A. artemisiifolia* coverage was positively correlated with invasion height, invasion density, and aboveground biomass. Compared with the control no contain *A. artemisiifolia*, under the low invasion pressure, Shannon-Wiener diversity index and Pielou evenness index of native plant were significantly increased, while there were no significant change of native species richness and coverage. With increase in invasion cover, native species richness and coverage were decreased gradually, the native plant Shannon-Wiener diversity index showed a downward tendency after initially rising, and no significant differences in Pielou evenness index of native plant. Redundancy Analysis (RDA) analysis showed that soil total nitrogen, distance to the road, soil total phosphorus, and canopy density were the main factors influencing relationships between the success of invasive plants and native plant diversity. The soil total nitrogen content decreased with increase of *A. artemisiifolia* coverage

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC1201100);生态环境部生物多样性调查评估项目(2019HJ2096001006)

收稿日期:2021-03-03; 采用日期:2021-07-02

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhaocy@craes.org.cn

and biomass. The closer to the road or at higher light intensity, the higher coverage and biomass of *A. artemisiifolia*. While intensify inspection of invasive species in traffic flow and increasing canopy density could inhibit *A. artemisiifolia* spread.

Key Words: Yili River Valley; *Ambrosia artemisiifolia*; native plant; diversity; RDA

生物入侵作为影响全球生物多样性的第二大因素,严重威胁入侵地区生物多样性和生态安全^[1-2]。一般来说,外来物种成功入侵取决于三方面因素:物种入侵性、繁殖体压力和群落可入侵性^[3],群落可入侵性与群落结构稳定性关系密切,生态系统群落结构越稳定,其对外来物种入侵的抵抗力越高。群落物种组成和物种多样性是影响群落可入侵性的重要因素之一^[4-5],也是各专家学者开展外来入侵植物与本地植物间相互作用研究的主要着力点^[6]。大量研究表明,外来入侵物种与本地物种多样性呈线性、驼峰状等多种复杂关系^[7-8],物种间作用的大小和方向与外部环境因素密切相关^[9],本地植物物种多样性除受外来物种入侵和人类干扰等生物因素影响外,土壤、地形、气候等非生物因素在外来物种入侵过程中作用明显^[10]。此外,外来入侵物种从成功定殖到扩散的不同阶段,其盖度、数量、高度、生物量等入侵特性与本地物种的关系也会发生变化^[11]。探讨外来物种不同入侵程度下本地物种对其抵御作用,并分析其外部制约因素对预防和管理外来入侵物种具有重要现实意义。

豚草(*Ambrosia artemisiifolia*)又名艾叶破布草或豕草,一年生草本植物,是一种世界公认的恶性入侵杂草,被许多国家列为检疫对象或有害杂草^[12],2003年,豚草被列入原国家环境保护总局公布的《中国第一批外来入侵物种名单》。豚草原产北美洲,于20世纪30年代初传入中国,现已蔓延至黑龙江、广东、新疆等20余个省市^[13-14]。豚草入侵后极易形成单优群落,抑制本地植物,并威胁农业、林业、牧业生产和人类健康。新疆维吾尔自治区伊犁河谷作为中国5个陆生生物多样性关键地区之一^[15],2010年首次记录豚草分布^[16],2014年豚草发生面积11 hm²^[17],2016年豚草发生面积1015 km²^[16],2017年豚草发生面积增至1322 km²^[14],豚草发生面积呈逐年上升趋势。目前,新疆地区豚草研究主要围绕豚草面积、豚草扩散速度等方面开展,如董合干^[14,16]对比分析了伊犁河谷豚草和三裂叶豚草的入侵速度和扩散特征,发现与三裂叶豚草等外来入侵物种相比,豚草扩散速度较快、适生境更丰富、对生态威胁更大。伊犁河谷地区豚草入侵对本地植物群落影响机制尚不清楚,自然环境和社会经济等外部因素在伊犁河谷地区豚草入侵过程中的作用仍不明确。

本研究以伊犁河谷地区遭受豚草不同程度入侵的人工林生态系统为研究对象,通过豚草种群特征和本地植物调查,分析豚草入侵对本地植物盖度、物种丰富度、生物多样性和均匀度的影响,同时,结合地形、土壤、气候、社会经济等外部因素调查,基于冗余分析(RDA)探讨豚草种群特征、本地植物群落结构与外部因素的关系,以期为该地区豚草防控和植被恢复提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

伊犁河谷位于新疆天山西部,准噶尔盆地西南缘,地理位置为80°09'—84°56'E,42°14'—44°50'N,属于温带大陆性半湿润荒漠气候区,年平均气温10.4℃,年平均降水量200—500 mm,是新疆最湿润的地区^[18]。该地区豚草主要集中在新源县则克台镇至那拉提镇沿218国道沿线的绿化带、沟渠边缘、田间地头及林场内,豚草种群呈辐射状和带状分布。区内乔木以杨树(*Populus* sp.)、榆树(*Ulmus* sp.)等为主,树种比较单一,几乎无灌木,草本植物以香薷(*Elsholtzia ciliata*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、老鹳草(*Geranium wilfordii*)、牛筋草(*Eleusine indica*)等为主。

1.2 样地设置与调查

于2017年9月进行调查和样品采集,采样地位于新疆伊犁河谷地区新源县则克台镇至那拉提镇218国道沿线人工林生态系统。依据豚草种群盖度划分豚草入侵等级^[19-21],依次划分为无入侵区(No invasive, NI; 盖

度为 0%), 轻度入侵区 (Low invasive, LI; $0% < \text{盖度} \leq 20%$), 中度入侵区 (Medium invasive, MI; $20% < \text{盖度} \leq 50%$), 重度入侵区 (High invasive, HI; $\text{盖度} > 50%$), 各入侵等级间距 50 m 左右。每个入侵等级设置 3 个 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 大样方, 大样方间距 1000 m 以上。每个 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 大样方内设置 3 个 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 的小样方。小样方调查草本层植物种类、植株密度、平均高度、盖度, 用天平测量豚草地上生物量, 记录每个样方经纬度、海拔、郁闭度、至交通主干道距离。

1.3 外部影响因素获取

1.3.1 土壤样品采集与测定

土壤采集深度为 0—20 cm, 在每个 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 大样方内采用十字交叉法采集 5 个土壤样品并混合成一个混合土壤样品, 每个入侵程度下采集 3 个混合土样。将土壤样品带回实验室, 避光风干后过 2 mm 筛, 用于土壤理化指标测定。土壤样品主要测定土壤全氮、全磷含量。土壤全磷采用碱熔-钼锑抗分光光度法测定, 土壤全氮采用凯氏法测定^[22]。

1.3.2 气候和人口密度数据获取

人口密度数据源于资源环境科学与数据中心 (<http://www.resdc.cn/>), 数据年份为 2015 年。年均温、年均降水源于国家地球系统科学数据中心 (<http://www.geodata.cn/>), 数据年份为 2017 年。

1.4 群落多样性指数计算

通过统计分析获得每个小样方草本物种丰富度指数、生物多样性指数和均匀度指数。用 Margalef 物种丰富度指数表征物种丰富度 (D); 用 Shannon-Wiener 指数表征物种多样性 (H'); 用 Pielou 均匀度指数表征物种分布的均匀程度 (J)^[23-24]。具体如下:

$$D = (S - 1) / \ln N$$

$$P_i = N_i / N$$

$$H' = \sum_{i=1}^s P_i \times \ln P_i$$

$$J = H' / \ln S$$

式中, S 为样方内物种数目; N 表示样方内所有物种个体总数; N_i 为样方中第 i 个物种的个体数; P_i 为物种 i 个体数占所有物种个体总数的比例。

1.5 数据处理及分析

利用 Excel 2016 软件对数据进行整理, 采用 SPSS 18.0 软件对豚草高度、密度、生物量和本土植物 Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数、物种丰富度指数及盖度等指标进行单因素方差分析和相关分析, 基于 LSD (最小显著差数法) 分析方法检验豚草不同入侵梯度下种群特征及其对本地植物群落结构差异性, 显著性水平设置为 $P < 0.05$ 。采用 Origin 8.5 软件作图。

利用 Canoco 5.0 软件对环境因素与物种多样性的对应关系进行冗余分析 (RDA)。将豚草盖度、豚草生物量、本地物种盖度、本地物种丰富度、本地物种多样性指数、本地物种均匀度指数定义为样方群落结构指标。将海拔、年均温、年均降水、土壤全氮、土壤全磷、郁闭度、至交通主干道距离、人口密度定义为外部环境因素指标。构成样方群落结构指标矩阵 (6×12) 和环境变量数据矩阵 (8×12)。

2 结果与分析

2.1 豚草种群入侵特征分析

如图 1 显示, 豚草植株高度、种群密度、地上生物量均随豚草盖度升高呈增加趋势。随着豚草盖度增加, 种群密度、地上生物量呈极显著增加趋势 ($P < 0.01$)。豚草在轻度入侵区平均高度、平均密度、平均地上生物量依次为 (84.0 ± 16.3) mm、(21.8 ± 11.7) 株/ m^2 、(127.8 ± 27.1) g/ m^2 , 豚草中度入侵区豚草平均高度、平均密度、平均地上生物量为 (87.7 ± 9.2) mm、(43.9 ± 5.3) 株/ m^2 、(422.2 ± 17.9) g/ m^2 , 与豚草轻度入侵相比, 豚草中度入

侵入区植株高度升高 4.37%, 豚草密度增加了 1 倍, 地上生物量增加了 3 倍。豚草重度入侵区平均高度、平均密度、平均生物量为 (105.9±16.3) mm、(183.4±36.1) 株/m²、(872.2±44.0) g/m², 与轻度入侵区相比, 豚草高度升高幅度为 26.06%, 豚草密度提高了 7 倍, 豚草生物量提高了 6 倍。

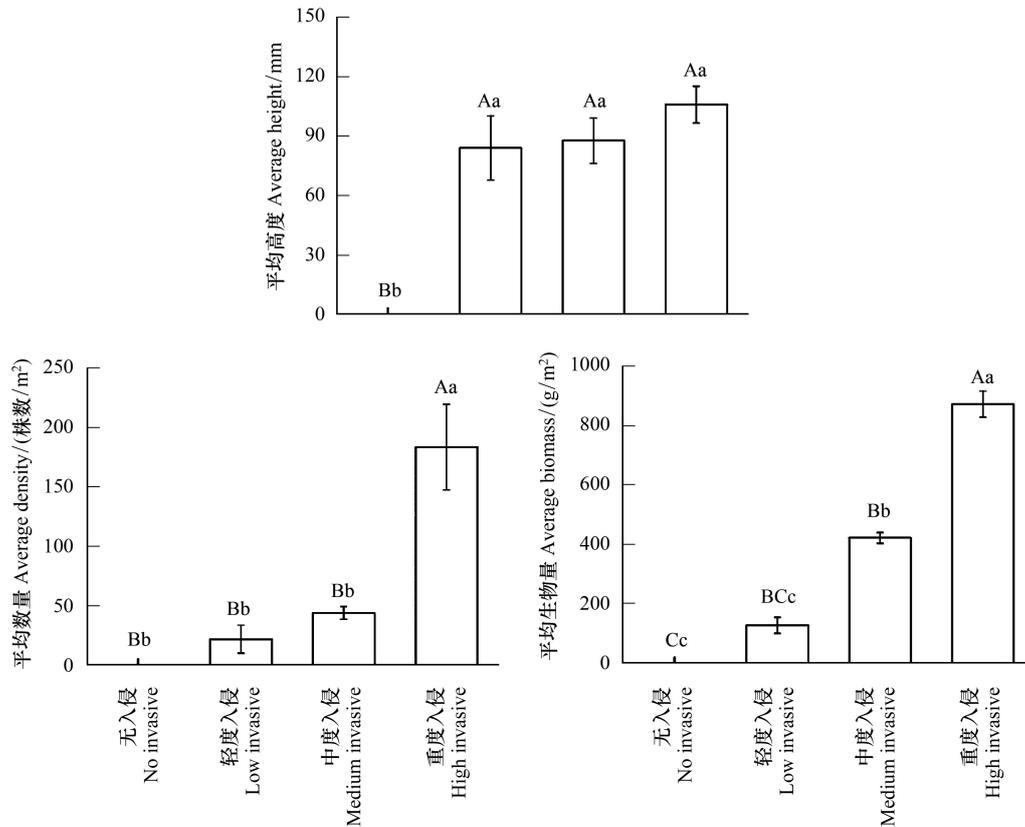


图 1 豚草入侵等级下种群特征指标

Fig.1 The population characteristic indexes of *A. artemisiifolia* in different invasive degrees

不同大写字母表示极显著差异 ($P < 0.01$); 不同小写字母表示显著差异 ($P < 0.05$)

2.2 豚草入侵对本地草本植物群落结构影响

利用单因素方差分析对比了豚草入侵等级下本土草本植物丰富度、盖度、Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数差异。结果表明, 豚草不同入侵等级下本土草本植物丰富度存在极显著差异 ($F = 5.0, P < 0.01$), 多重比较结果显示, 豚草轻度入侵区本土草本物种数最多, 随着豚草入侵程度加重, 区内本土草本植物丰富度呈降低趋势, 豚草重度入侵区内本土草本植物丰富度极显著低于轻度入侵区和中度入侵区 ($P < 0.01$) (图 2); 豚草不同入侵等级下本土草本植物盖度存在极显著差异 ($F = 9.79, P < 0.01$), 随着豚草入侵程度加重, 本土植物盖度呈降低趋势, 豚草扩张显著压制了本土草本植物生长空间。豚草重度入侵区本土草本植物盖度极显著低于对照区和轻度入侵区 ($P < 0.01$), 豚草中度入侵区本土草本植物盖度极显著低于对照区 ($P < 0.01$), 显著低于轻度入侵区 ($P < 0.05$) (图 2); 豚草不同入侵程度下本土草本植物 Shannon-Wiener 多样性指数存在极显著差异 ($F = 4.18, P < 0.05$), 随着豚草入侵程度增加, Shannon-Wiener 多样性指数呈先升高后降低趋势, 对照区本土草本植物 Shannon-Wiener 多样性指数极显著低于豚草轻度入侵区 ($P < 0.01$), 显著低于豚草中度入侵区 ($P < 0.05$), 豚草轻度入侵显著增加了本土草本植物多样性, 豚草定殖成功后, 随着豚草入侵程度不断增加, 本土草本植物多样性持续下降 (图 2); 豚草轻度入侵时本土草本植物 Pielou 均匀度指数显著升高, 随着豚草盖度增加, 本土草本植物 Pielou 均匀度指数差异不显著 (图 2)。

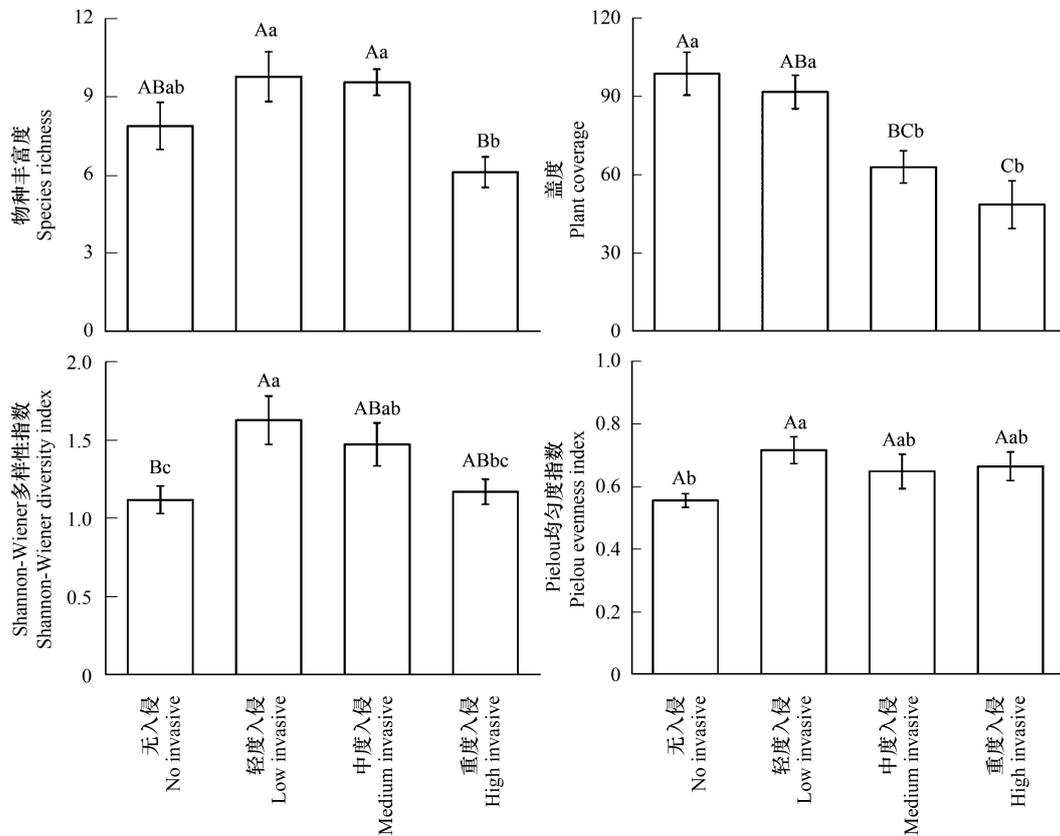


图 2 豚草入侵对本地植物群落结构和物种多样性的影响

Fig.2 The effect of *A. artemisiifolia* invasion on community structure and species diversity of native plant species

不同大写字母表示极显著差异 ($P < 0.01$); 不同小写字母表示显著差异 ($P < 0.05$)

2.3 植物群落与外部环境冗余分析

如图 3 所示,植物群落结构与环境因子在第一排序轴和所有排序轴均显著相关 ($P < 0.05$),表明分析结果可靠,能较好的解释植物群落结构与环境因子间的关系。第一轴和第二轴分别解释了植物群落结构和环境因子关系的 85.82%和 9.03%,累积解释量为 94.85%, 占总解释量的 99.81%,前两轴能包含绝大部分信息,且主要由第一轴决定。采用前两轴绘制植物群落结构-环境因子二维空间排序图(图 3),发现各排序轴与植物群落结构和环境因子呈现一定的相关关系(表 1),第一排序轴基本反映了豚草入侵背景下,土壤全氮、至交通主

表 1 环境因子与冗余分析(RDA)排序轴的相关性、解释量和贡献率

Table 1 The correlation coefficients, explanatory quantity and contribution rate of environment variable and ordination axes of Redundancy analysis (RDA)

因子 Factor	第 1 轴 Axis1	第 2 轴 Axis2	第 3 轴 Axis3	第 4 轴 Axis4	解释量 Explanatory ability/%	贡献率 Contribution/%
TN	-0.498	0.4091	0.0404	0.3418	23.9	25.2
DR	-0.4009	-0.1166	-0.0204	0.3428	21.6	22.7
TP	0.322	0.1743	-0.001	0.1538	18.1	19.1
CD	-0.3137	0.1618	0.1754	0.3216	11.6	12.2
MP	0.0855	0.069	0.0996	-0.5032	9.3	9.7
MT	-0.0589	-0.022	-0.0523	0.5198	4.6	4.8
PD	-0.0248	-0.1879	0.2324	0.3998	3.4	3.5
ELE	0.1642	0.1485	-0.1864	-0.2965	2.6	2.8

TN: 土壤全氮 Soil total nitrogen; DR: 至交通主干道距离 Distance to the road; TP: 土壤全磷 Soil total phosphorus; CD: 郁闭度 Canopy density; MP: 降水 Mean Precipitation; MT: 气温 Mean Temperature; PD: 人口密度 Population density; ELE: 海拔 Elevation

干道距离、土壤全磷和郁闭度的变化梯度。土壤全氮、至交通主干道距离、郁闭度与第一排序轴负相关,相关系数依次为 0.50、0.40、0.31,土壤全磷与第一排序轴正相关,相关系数为 0.32。即沿第一轴从左到右,豚草盖度和生物量逐渐升高,本地草本物种盖度和本地草本物种数逐渐减少,土壤全氮含量逐渐降低,样方与主干道逐渐接近,周边环境光照逐渐增强,土壤全磷含量逐渐增加。

进一步分析外部环境对植物群落结构影响解释能力(表 1),发现土壤全氮、至交通主干道距离、土壤全磷、郁闭度为对植物群落变化解释量最大的 4 个因子,解释量分别为 23.9%、21.6%、18.1%、11.6%。贡献率依次为 25.2%、22.7%、19.1%、12.2%。降水、气温、人口密度、海拔等影响因子解释量和贡献率均低于 10%,且在图 1 中位置接近原点,说明降水、气温、人口密度、海拔对该地区林下草本植物物种多样性影响较小。

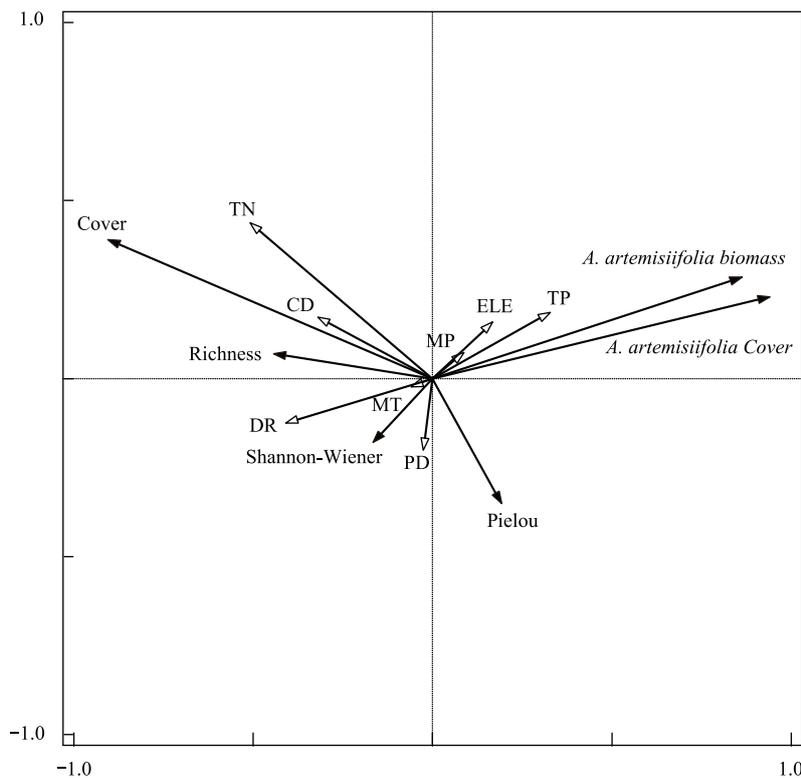


图 3 林下植物物种多样性与环境因子冗余分析(RDA)排序图

Fig.3 Redundancy analysis(RDA) ordination diagram among environment variable of understory vegetation biodiversity

TN: 土壤全氮 Soil total nitrogen; DR: 至交通主干道距离 Distance to the road; TP: 土壤全磷 Soil total phosphorus; PD: 人口密度 Population density; MT: 气温 Mean Temperature; CD: 郁闭度 Canopy density; MP: 降水 Mean Precipitation; ELE: 海拔 Elevation; Cover: 本地草本植物覆盖度 Plant coverage; Richness: 本地草本植物丰富度 Plant richness; Pielou: Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index; Shannon-Wiener: Shannon-Wiener 多样性指数 Shannon-Wiener diversity index; *A. artemisiifolia* biomass: 豚草生物量; *A. artemisiifolia* Cover: 豚草盖度

3 讨论

当前,外来植物入侵已成为威胁本地生物多样性和生态环境的重要问题^[25],掌握外来植物入侵机制和生态影响是有效控制其入侵和扩散的前提^[26]。众多学者围绕生物多样性与群落可入侵的关系开展研究^[27-28],多数控制实验认为本地物种丰富度高的群落能更充分的利用资源,外来植物会因入侵地可利用资源和空间减少导致入侵成功率降低^[29-30]。而诸多调查类研究却发现群落中物种丰富度与其可入侵性呈正相关关系^[31-32],大尺度调查跨越了诸多环境梯度,进而影响本地和外来物种的多样性,忽略环境异质性、人类扰动和可利用资源不稳定或许是造成不同尺度下研究结果迥异的主要原因^[11,33-34]。本研究基于统计分析探讨了伊犁河谷地区豚草入侵与本土草本植物群落结构和物种多样性的关系,发现随着豚草入侵程度增加,本土草本

植物丰富度和 Shannon-Wiener 多样性指数均呈先升高后降低趋势,豚草入侵初期具有较高的本地物种多样性。研究结果不完全符合前述学者的解释,但与 Wu 等^[35]发现的喜旱莲子草轻度入侵会增加本地植物物种丰富度和均匀度,而入侵严重时显著降低本地植物物种多样性结论基本一致。物种多样性与群落可入侵性的关系是一个复杂的过程,可能会随外部环境及外来物种入侵程度的变化产生明显的差异^[8,11,36]。当生态系统遭受强烈干扰后,本地群落物种大量消失,群落产生空余生态位,进而导致外来入侵物种的入侵成功率增加。在新疆伊犁河谷地区,豚草主要分布在农田地头、人工林等生境,区内不定期有割草、放牧等人类干扰行为,频繁干扰往往导致物种更新变化较快,可能会生长较多种类的本地植物,同时也容易被外来物种入侵^[37],进而导致豚草入侵初期本地物种多样性较高。豚草定殖成功后,随着豚草平均高度、种群密度和生物量逐渐增加,覆盖度逐渐增大,林下草本植物群落种间资源竞争关系逐步显现。与本地植物相比,豚草具有较高争夺有限资源的能力^[14],豚草入侵成功后持续入侵会降低林下本土草本物种多样性。

为进一步探讨伊犁河谷地区豚草、本地植物及环境因素关系,研究综合考虑地形、气候、土壤、光照、人口密度等因素构建了环境因子矩阵,开展了林下植物物种多样性与环境因素冗余分析,结果表明,土壤全氮、与道路距离、土壤全磷、郁闭度对林下植物群落结构变化影响较大。土壤养分变化或是影响伊犁河谷地区豚草和本地草本植物分布的重要环境因素。一般来说,土壤养分含量因大气矿物质沉降和腐殖质分解而增加,因土壤淋溶和生物吸收而减少^[38],在外部环境相差不大的情况下,植物捕获和利用土壤养分的能力是决定其竞争能力的重要因素^[39],相对于本地物种,豚草对全氮的吸收能力更强^[39-40],增加氮素会提高豚草生长和种群扩张^[41],在野外环境异质性无明显差异的情况下,豚草入侵越严重土壤全氮含量则越低。此外,道路是植物入侵的主要通道,路网及周边生境特征影响豚草入侵动态,交通要素是影响豚草和本地草本植物分布格局的主要环境因素^[42]。有研究表明,豚草快速扩张与沿道路开展的人类活动密切相关^[43],伊犁河谷地区豚草可能由货物运输无意引进,并通过旅游人员、车辆长距离传播^[16],这与研究发现的伊犁河谷地区豚草沿道路点状分布、林下豚草多沿道路边缘向林内传播等分布特征基本相符。豚草作为典型的喜光植物,当光照强度降低时,营养生长和生殖生长均会受到抑制^[44],林下郁闭度越高,植物生长所需的阳光越少,豚草植物生长越受限。这也与本调查发现的林缘光强地区豚草入侵盖度普遍较高基本一致。朱金方等^[45]对广西喜光外来入侵物种飞机草进行了替代修复研究,发现本地灌木植物的快速生长可有效遮蔽飞机草所需阳光,进而抑制飞机草生长。从实际意义上讲,增强乔木层、灌木层覆盖度或是防控喜光类外来入侵草本植物的有效手段。

4 结论

伊犁河谷地区人工林下极易被豚草等外来植物入侵,随着豚草种群持续扩张,本土植物生长被显著抑制。土壤养分、交通、光照是影响豚草与本地植物相互关系的主要因素。加强伊犁河谷地区交通干道人员、货物、车辆豚草检疫检测力度,重点清除林缘豚草优势群落,增加林内乔木层、灌木层植被抚育强度并增加其覆盖度,或是抑制伊犁河谷地区林下豚草扩散和蔓延的重要方式之一。

参考文献 (References):

- [1] Sala O E, Chapin III F S, Armesto J J, Berlow E, Bloomfield J, Dirzo R, Huber-Sanwald E, Huenneke L F, Jackson R B, Kinzig A, Leemans R, Lodge D M, Mooney H A, Oesterheld M, Poff N L, Sykes M T, Walker B H, Walker M, Wall D H. Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science*, 2000, 287(5459): 1770-1774.
- [2] D'Antonio C M, Kark S. Impacts and extent of biotic invasions in terrestrial ecosystems. *Trends in Ecology and Evolution*, 2002, 17(5): 202-204.
- [3] Guido A, Hoss D, Pillar V D. Competitive effects and responses of the invasive grass *Eragrostis plana* in Río de la Plata grasslands. *Austral Ecology*, 2019, 44(8): 1478-1486.
- [4] Levine J M, D'Antonio C M. Elton revisited: a review of evidence linking diversity and invasibility. *Oikos*, 1999, 87(1): 15-26.
- [5] 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.
- [6] Stohlgren T J, Binkley D, Chong G W, Kalkhan M A, Schell L D, Bull K A, Otsuki Y, Newman G, Bashkin M, Son Y. Exotic plant species invade hot spots of native plant diversity. *Ecological Monographs*, 1999, 69(1): 25-46.
- [7] 赵彩云, 赵相键, 柳晓燕, 李俊生. 云南省六个国家级自然保护区外来入侵草本植物与本地植物的关系. *植物保护学报*, 2019, 46(1):

- 122-129.
- [8] Tarasi D D, Peet R K. The native-exotic species richness relationship varies with spatial grain of measurement and environmental conditions. *Ecology*, 2017, 98(12): 3086-3095.
- [9] Scott Z R, Terhorst C P. The effect of an invasive foundation species on diversity is due to increased habitat availability. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*. 2020, 528: 151384.
- [10] Dimitrakopoulos P G, Koukoulas S, Galanidis A, Delipetrou P, Gounaridis D, Touloumi K, Arianoutsou M. Factors shaping alien plant species richness spatial patterns across Natura 2000 Special Areas of Conservation of Greece. *Science of the Total Environment*, 2017, 601-602: 461-468.
- [11] Hooper D U, Dukes J S. Functional composition controls invasion success in a California serpentine grassland. *Journal of Ecology*, 2010, 98(4): 764-777.
- [12] 刘延, 董合干, 刘彤, 王寒月, 王瑞丽, 马倩倩, 赵文轩, 李秋霞. 豚草和三裂叶豚草不同植株部位种子萌发与入侵扩散关系. *生态学报*, 2019, 39(24): 9079-9088.
- [13] 柳晓燕, 李俊生, 赵彩云, 全占军, 赵相健, 宫璐. 基于 MAXENT 模型和 ArcGIS 预测豚草在中国的潜在适生区. *植物保护学报*, 2016, 43(6): 1041-1048.
- [14] Dong H G, Song Z L, Liu T, Liu Z Q, Liu Y, Chen B X, Ma Q Q, Li Z G. Causes of differences in the distribution of the invasive plants *Ambrosia artemisiifolia* and *Ambrosia trifida* in the Yili Valley, China. *Ecology and Evolution*, 2020, 10(23): 13122-13133.
- [15] 陈灵芝. 中国的生物多样性——现状及其保护对策. 北京: 科学出版社, 1993: 194-197.
- [16] 董合干, 周明冬, 刘忠权, 郝晓云, 刘延, 艾尼瓦尔·阿不都瓦依提, 刘彤. 豚草和三裂叶豚草在新疆伊犁河谷的入侵及扩散特征. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(11): 175-180.
- [17] 梁巧玲, 陆平, 洪智强. 豚草在伊犁河谷的现况及生物学特性观察. *中国植保导刊*, 2015, 35(8): 67-68.
- [18] 颜瑜严, 杨辽, 王伟胜, 方晖, 庄庆威. 伊犁河谷景观生态风险时空变化及其地形梯度分析. *生态科学*, 2020, 39(4): 125-136.
- [19] 张修玉, 许振成, 宋巍巍, 黎忠, 赵晓光, 胡习邦. 紫茎泽兰 (*Eupatorium adenophorum*) 入侵地的生物多样性. *生态环境学报*, 2010, 19(7): 1525-1531.
- [20] 牛红榜, 刘万学, 万方浩. 紫茎泽兰 (*Ageratina adenophora*) 入侵对土壤微生物群落和理化性质的影响. *生态学报*, 2007, 27(7): 3051-3060.
- [21] 胡朝臣, 刘学炎, 类延宝, 谭运洪, 张鹏, 董玉平, 刘丛强. 西双版纳外来入侵植物及其共存种叶片氮、磷化学计量特征. *植物生态学报*, 2016, 40(11): 1145-1153.
- [22] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 146-187.
- [23] 马克平. 生物群落多样性的测度方法 I α 多样性的测度方法(上). *生物多样性*, 1994, 2(3): 162-168.
- [24] 马克平, 刘玉明. 生物群落多样性的测度方法 I α 多样性的测度方法(下). *生物多样性*, 1994, 2(4): 231-239.
- [25] Mack R N, Simberloff D, Lonsdale W M, Evans H, Clout M, Bazzaz F A. Biotic invasions: causes, epidemiology, global consequences, and control. *Ecological Applications*, 2000, 10(3): 689-710.
- [26] 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.
- [27] Baruch Z, Pattison R R, Goldstein G. Responses to light and water availability of four invasive Melastomataceae in the Hawaiian Islands. *International Journal of Plant Sciences*, 2000, 161(1): 107-118.
- [28] Zheng Y L, Feng Y L, Lei Y B, Liao Z Y. Comparisons of plastic responses to irradiance and physiological traits by invasive *Eupatorium adenophorum* and its native congeners. *Journal of Plant Physiology*, 2012, 169(9): 884-891.
- [29] Elton C S. *The Ecology of Invasions by Animals and Plants*. London: Methuen, 1958.
- [30] Fargione J E, Tilman D. Diversity decreases invasion via both sampling and complementarity effects. *Ecology Letters*, 2005, 8(6): 604-611.
- [31] Ohlemüller R, Walker S, Wilson J B. Local vs regional factors as determinants of the invasibility of indigenous forest fragments by alien plant species. *Oikos*, 2006, 112(3): 493-501.
- [32] 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 invasible. *Functional Ecology*, 2011, 25(5): 1106-1112.
- [33] Kellner J B, Hastings A. A reserve paradox: introduced heterogeneity may increase regional invasibility. *Conservation Letters*, 2009, 2(3): 115-122.
- [34] Stohlgren T J, Barnett D T, Jarnevich C S, Flather C, Kartesz J. The myth of plant species saturation. *Ecology Letters*, 2008, 11(4): 313-322.
- [35] 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.
- [36] 刘丽娟, 吴琛璐, 薛杨璐, 王一暖, 王江. 草地物种多样性对群落可入侵性影响的研究进展. *广西植物*, 2014, 34(4): 473-477, 551-551.
- [37] MacDonald A A M, Kotanen P M. The effects of disturbance and enemy exclusion on performance of an invasive species, common ragweed, in its native range. *Oecologia*, 2010, 162(4): 977-986.
- [38] 罗雪晶, 石青, 贾月月, 张凤娟. 3 种菊科入侵植物不同生长时期的土壤酶活性和养分变化. *生物安全学报*, 2017, 26(4): 293-300.
- [39] 魏子上, 陈新微, 杨殿林, 皇甫超河. 辽宁地区两种菊科入侵植物与本地植物光合特性比较. *中国生态农业学报*, 2017, 25(7): 975-982.
- [40] Ehrenfeld J G. Effects of exotic plant invasions on soil nutrient cycling processes. *Ecosystems*, 2003, 6(6): 503-523.
- [41] 王晋萍, 董丽佳, 桑卫国. 不同氮素水平下入侵豚草与本地种黄花蒿、蒙古蒿的竞争关系. *生物多样性*, 2012, 20(1): 3-11.
- [42] Lemke A, Buchholz S, Kowarik I, Starfinger U, von der Lippe M. Interaction of traffic intensity and habitat features shape invasion dynamics of an invasive alien species (*Ambrosia artemisiifolia*) in a regional road network. *NeoBiota*, 2021, 64: 155-175.
- [43] Lemke A, Kowarik I, von der Lippe M. How traffic facilitates population expansion of invasive species along roads: the case of common ragweed in Germany. *Journal of Applied Ecology*, 2019, 56(2): 413-422.
- [44] 杨毅, 郭文源. 不同光照强度对豚草生长发育的影响. *湖北大学学报: 自然科学版*, 1991, 13(2): 175-177.
- [45] 朱金方, 赵彩云, 李飞飞, 柳晓燕, 李俊生. 不同替代修复年限对飞机草种群和本土植物群落结构的影响. *环境科学研究*, 2020, 33(12): 2848-2855.