

豚草入侵新疆伊犁河谷的时空分布格局 及扩散途径

孙明明^{1,2}, 刘彤^{1,2*}, 赵文轩^{1,2}, 王寒月^{1,2}, 刘雪莲^{1,2}, 粟培^{1,2}, 李金霞³

¹绿洲城镇与山盆系统生态兵团重点实验室, 新疆石河子 832003; ²石河子大学生命科学学院, 新疆石河子 832003; ³新源县农产品质量安全监测中心, 新疆伊犁 835800

摘要:【目的】豚草是世界范围内广泛入侵的植物,对入侵地经济发展、人体健康和生态安全产生严重危害。研究分析其入侵扩散媒介、切断其扩散来源对有效防控意义重大。【方法】通过对新疆伊犁河谷全境调查,分析豚草空间分布特征;采用空间代替时间的方法,结合地统计学,定量分析豚草不同入侵时间及生境的传播扩散特征,总结其扩散媒介和途径。【结果】豚草在伊犁河谷分布种群共计 186 个,其分布具有明显生境偏好,主要分布在道路两侧、河道和林下。道路两侧分布种群最多,占总分布种群点的 32.34%,河道两侧分布面积最大,占伊犁河谷分布面积的 69.01%。新源县是豚草的主要发生区,已形成 4 个严重入侵区和多个扩散源区。【结论】豚草早期扩散具有随机性,在不同生境内种群呈集中分布。不同生境中扩散媒介各有侧重,以农牧物资运输和牛羊携带为主。因此,道路和河道两侧是防控的重点,同时要加强对农牧产品调运和动物活动的监管,减少动物辅助扩散传播。研究为豚草在伊犁河谷的防控研究提供中烟基础数据。

关键词: 豚草; 生物入侵; 伊犁河谷; 生境偏好; 地统计学



开放科学标识码
(OSID 码)

Spatio-temporal distribution patterns and diffusion pathways of *Ambrosia artemisiifolia* L. invaded the Yili Valley, Xinjiang

SUN Mingming^{1,2}, LIU Tong^{1,2*}, ZHAO Wenxuan^{1,2}, WANG Hanyue^{1,2},

LIU Xuelian^{1,2}, SU Pei^{1,2}, LI Jingxia³

¹Xinjiang Production and Construction Corps Key Laboratory of Oasis Town and Mountain-basin System Ecology, Shihezi, Xinjiang 832003, China; ²College of Life Sciences, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003, China; ³Agricultural Product Quality and Safety Monitoring Center, Xinyuan County, Yili, Xinjiang 835800, China

Abstract: 【Aim】 *Ambrosia artemisiifolia* is a widely invasive plant that causes serious harm to economic development, human health, and ecological security of the invaded areas. For effective prevention and control, it is essential to study its invasion patterns and proliferation medium, and to cut off its diffusion sources. 【Method】 In this study, using the whole territory of the Yili River Valley in Xinjiang and the method of space instead of time, combined with geostatistics, we investigated the propagation and diffusion characteristics of *A. artemisiifolia* at different invasion times and in different habitats. These characteristics were quantitatively analyzed, and the diffusion media and pathways were summarized. 【Result】 A total of 186 populations *A. artemisiifolia* were distributed in the Yili River Valley, and their distribution had clear habitat preferences: both sides of roads, river channels, and under-forests. Population distribution on both road sides was the most frequent, accounting for 32.34% of the total population points distribution, and the distribution area on both river sides was the largest, accounting for 69.01% of the distribution area of the Yili River Valley. Xinyuan County is the main occurrence area of *A. artemisiifolia*, which has four severely invaded areas and multiple diffusion source areas. 【Conclusion】 The early dispersal distribution of *A. artemisiifolia* was random, and the populations were concentrated in different habitats. Diffusion media in different habitats have different characteristics, mainly agricultural and animal husbandry material transportation of cattle and sheep. Therefore, both sides of roads and rivers should be the focus of prevention and control meas-

收稿日期(Received): 2023-02-23 接受日期(Accepted): 2023-05-29

基金项目: 新疆维吾尔自治区重大科技专项(2023A02006); 兵团科技局重点领域科技攻关计划项目(2022AB010)

作者简介: 孙明明, 男, 硕士研究生。研究方向: 入侵生态学。E-mail: 1419847053@qq.com

* 通信作者(Author for correspondence), 刘彤, E-mail: 469004509@qq.com

ures. Simultaneously, it is necessary to strengthen the supervision of the transportation of agricultural and animal husbandry products and animal activities to reduce animal-assisted diffusion. This study provides important data for the prevention and control of *A. artemisiifolia* in the Yili River Valley.

Key words: *Ambrosia artemisiifolia*; biological invasion; Yili Valley; habitat preferences; geostatistics

入侵生物适应范围广、繁殖能力强,一旦入侵则很难根治。生物入侵一般经历引入、定居(建立)、传播扩散这几个重要阶段(Mohanty *et al.*, 2019),所以早期入侵源头和扩散途径的控制对防控入侵至关重要。由于生物入侵新生境的随机性大,缺乏监测记录(Puth & Post, 2005),因此全面普查入侵生物的空间分布特征、剖析生物入侵的传播扩散途径,成为了解入侵特征、探索防控技术措施的有效途径。

扩散途径是外来入侵植物传播扩散的通道,通道大小和通畅性决定入侵植物占领新栖息地的速率和程度(Wang *et al.*, 2011),也是外来种入侵防控的重点。扩散途径可分为与人类活动密切相关的人为传播途径(Essl *et al.*, 2015),与重力沉降、风、动物、水流以及其他植物相关的自然扩散途径(Taylor *et al.*, 2012; Vergara-tabares *et al.*, 2016),也可能是二者的交互作用(Montagnani *et al.*, 2017; Zhou *et al.*, 2021)。

空间分布格局分析是研究种群分布特征、了解种群间相互作用以及种群与环境关系的重要手段。在一定时间内,一个物种种群的空间分布格局能反映该物种对本地生境的适应性。植物种群的空间分布格局可分为聚集、随机和均匀分布,能反映物种的资源利用及体现其生存能力(张金屯, 1998; Dale & Powell, 2001)。种群大小一定程度上能反映该物种进入本地环境的时间长短,因此种群空间分布大小可作为分析时间变化的重要依据。

豚草 *Ambrosia artemisiifolia* L. 为菊科 Asteraceae 一年生草本植物,在世界范围内入侵危害严重(Makra *et al.*, 2015; Montagnani *et al.*, 2017)。自1930年首次入侵我国以来,豚草已扩散至东北、华北、华南等大部分地区,在23个省(市、自治区)发生(冯莉等, 2012; 曾珂等, 2010; 周忠实等, 2021; Qin *et al.*, 2014),是我国公布的第一批入侵物种。

2010年豚草大面积入侵伊犁河谷,到2016年分布面积已达1015 km²,增长了10150倍(董合干等, 2017),严重影响当地畜牧业、农业发展和人体健康(Zhou *et al.*, 2017),而且有在新疆进一步蔓延

的风险。伊犁河谷也成为我国豚草危害面积最大的地区。豚草是危害农业生产的农田检疫性杂草(吕燕等, 2021),而伊犁河谷是我国“一带一路”倡议的对外开放出口,如不对其加以控制,势必严重影响我国出口,防控形势非常严峻。

豚草主要靠种子重力沉降和风传播,远距离扩散主要依靠人类介导的交通、机械运输等相关媒介(Lemke *et al.*, 2019, 2021; Montagnani *et al.*, 2017)。因此,豚草的入侵扩散途径具有复杂性。本文采用空间代替时间的方法,根据豚草分布种群面积的大小,构建豚草在伊犁河谷的时空分布格局,总结其传播途径和扩散媒介。为此,本文主要进行以下工作:(1)对伊犁河谷全境进行调查,确定豚草的空间分布位置和种群面积,结合地统计学与调查结果,定量分析豚草种群整体分布及在不同生境的分布格局,明确传播途径和扩散媒介;(2)研究入侵群落物种丰富度与豚草盖度(入侵力)的关系,探讨本地植物群落物种丰富度对豚草入侵的阻抗效应,进而明确本地群落的可入侵性。

1 研究区概况及方法

1.1 研究区概况

伊犁河谷(42°14'—44°53' N, 80°09'—84°56' E)位于欧亚大陆腹地,远离海洋,在中国新疆的最西面。河谷地区北、东、南三面环山,是新疆农牧业重要生产基地,也是著名旅游景区和对外开放贸易区,G218国道以及多条省道贯穿全境。河谷地区河网密布,河道众多,年均降水量417.6 mm,属半干旱气候区。独特的地理气候环境形成典型的“湿岛”(An *et al.*, 2020)。

豚草入侵的主要分布区新源县(43°01'—43°40' N, 82°28'—84°57' E)位于伊犁河谷最东边,县城三面环山,东西长,南北窄。年均降水量达480 mm,年均温度8.5℃,年平均日照时数2700 h,无霜期达169 d。县域内生境类型丰富,有草原、丘陵、农田、河道和山地森林等。

1.2 豚草种群分布现状调查

2019—2021年的7—9月,在多年持续调查研

究的基础上,采用资料收集和实地走访踏查相结合的方法,对伊犁河谷全境开展调查。以目标取样,对豚草已入侵区域进行重点调查。

首先,收集现有豚草在伊犁河谷分布的文献及记录数据,总结豚草的入侵分布位置、分布区域、生境类型,初步掌握其分布范围。其次,通过现有分布数据制定普查路线并开展实地踏查,结合访问调查,从已知分布点向周边辐射,调查分布区域。走访调查是向熟悉当地情况的农牧民、检疫工作人员、果农、菜农等进行咨询,了解豚草的入侵区域、危害情况、传入时间、来源和方式等信息。在线路调查中发现的疑似植株,先进行鉴定,确定后进行标准地调查和追踪定点调查。

标准地调查:对于豚草入侵的区域,使用手持 GPS 仪记录分布种群的经纬度坐标,记录种群发生具体行政区位置,用皮尺和 GPS 面积测定功能计算入侵区域种群分布面积,详细记录豚草的分布生境特征类型。

追踪定点调查:对于豚草入侵的林带、苗圃、种羊场、贸易往来频繁的调运场所、草料集中收发中心、重点农牧区通道等,进行重点跟踪调查,一旦发现入侵种,参照标准地调查方法进行记录。

1.3 豚草入侵群落特征调查

以豚草分布为中心,以连续或间断的 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 的样方单元,全覆盖调查豚草群落,观测豚草及所有伴生种种类、密度、株数、株高、盖度(样方中物种冠幅大小)信息,对于不能进行现场鉴定的植物,拍照标记后采集标本保存,带回实验室参考《新疆植物志》和植物科学数据中心(<https://www.plantplus.cn/cn>)进行鉴定。

1.4 数据处理与分析

1.4.1 豚草入侵程度的分类 根据野外调查数据,分别计算每一种物种的相对频度、相对盖度、相对密度、相对高度、重要值(importance value, IV)。再根据样方豚草重要值大小划分不同入侵程度[轻度入侵($0 < IV \leq 25$),中度入侵($25 < IV \leq 50$),重度入侵($50 < IV \leq 100$)](朱金芳等,2021)对应的不同行政区。

根据豚草种群入侵程度的不同,将豚草已入侵区域中达到中、重度入侵程度,且入侵生境广的区域划分为严重入侵区;根据豚草种群的入侵分布面积,将豚草种群入侵面积大、入侵程度高、入侵时间

长、同一种群分布生境广的区域划为扩散源区,用以分析豚草的空间分布格局。

1.4.2 豚草不同入侵时间种群大小的分类 采用空间代替时间的方法(Thomaz *et al.*, 2012),根据豚草实际分布面积大小确定入侵时间的早晚。种群类型 1~6 依次表示从最早入侵种群至近年入侵新的种群,近似表示不同入侵时间序列的早晚(Williamsom *et al.*, 2009)。

1.4.3 地统计学分析 半方差分析是研究空间分布格局的有效方法,半方差函数中块金值 C_0 、基台值 C_0+C 、块基比 $C_0/(C_0+C)$ 、变程值 A_0 、分维数 D 和各向异性等参数具有较强的生态学意义(李哈滨等,1998),可以定量分析空间异质性大小(随机性)、程度、组成和格局(王政权等,2000), R^2 为决定系数,表征理论模型较好地反映值的空间分布特征, RSS 为残差。

为定量分析不同入侵时间下豚草的传播扩散特征,对 6 种入侵时间(阶段)进行半方差分析(semi-variance analysis)。根据 6 种不同生境[农田边(田埂、边缘生境)、草场(自然山地草场及人工草场)、道路两侧(各种类型道路)、居民区、林下(主要为杨树、榆树为主要树种的人工和自然林带)和河道]分别分析豚草不同入侵时空尺度的扩散传播特征。

半方差函数计算公式为:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{x_i=1}^N [Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2$$
$$\gamma(h) = \frac{h^{(4-2D)}}{2}$$

式中, $\gamma(h)$ 为 h 距离尺度上的半方差函数, h 为样点间的滞后距离, $Z(x_i)$ 代表点 x_i 的值, $Z(x_i+h)$ 代表与 x_i 间距为 h 的点的值, $N(h)$ 是滞后距离 h 时的相比较的所有点对数目, D 为分维数,由变异函数 $\gamma(h)$ 和间隔距离 h 之间的关系确定,间接表示空间自相关性的大小,以及不同尺度之间空间异质性的自相似关系(王政权,2000)。

1.4.4 数据分析方法 根据种群分布面积和坐标点,将种群面积进行对数转化。使用 GS+9.0 对数数据进行地统计分析,并用 Origin 2018 作图。利用 SPSS 19.0 对豚草入侵各样点内群落物种丰富度与入侵种盖度进行相关性检验($p < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 豚草在伊犁河谷的空间分布格局

对伊犁河谷全境调查结果显示,豚草主要入侵到新源县、察布查尔县、尼勒克县,其中在新源县 的入侵最为严重。目前已广泛入侵到农区(农田边、田埂)、林区(林下、林带边缘)、农牧交错区、居民区 周边、道路两侧和路基、河道、水渠两侧等生境中。

新源县内豚草分布种群呈 4 个严重入侵区和

多个扩散源区(表 1、2)。按照行政区划分,第一个 严重入侵区位于则克台镇、71 团、别斯托别乡;第二 个在吐尔根乡和阿勒玛勒镇;第三个在阿热勒托别 镇、坎苏镇和那拉提镇西部区域;第四个在肖尔布 拉克镇及种羊场附近区域。4 个严重入侵区入侵面 积分别依次达到了 6.53、16.68、27.91 和 5.37 km²。 主要扩散源区位于严重入侵区内,均位于巩乃斯河 流域及国道两侧生境中。

表 1 豚草不同入侵程度分布种群数目				单位 Unit:个
Table 1 The number of <i>A. artemisiifolia</i> populations with different degrees of invasion				
行政区 Administrative region	轻度入侵 Mild invasion	中度入侵 Moderate invasion	重度入侵 Heavy invasion	总分布种群点 Total distribution populations potits
别斯托别乡 Bestobe Township	2	2	3	7
则克台镇 Zeketai Town	5	11	11	27
吐尔根乡 Turgen Township	1	7	2	10
阿勒玛勒镇 Almale Town	0	13	2	15
阿热勒托别镇 Areletobe Town	1	15	7	23
坎苏镇 Kansu Town	1	18	6	25
那拉提镇 Nalati Town	1	8	2	11
塔勒德镇 Taled Town	2	11	3	16
71 团 71 st regiment	4	18	7	29
72 团 72 nd regiment	6	1	0	7
79 团 79 th regiment	6	1	0	7
喀拉布拉镇 Kalabura Town	4	0	0	4
尼勒克县-木斯乡 Nilek County-Muth Township	2	3	0	5
总计 Total	35	108	43	186

表 2 不同入侵豚草种群大小(时间年限序列)分类			
Table 2 Classification of different invasive <i>A. artemisiifolia</i> population size (time series)			
种群类型 Population types	种群面积(A) Population area/m ²	种群密度范围/(株·m ⁻²) Population density range	种群数量/个 Population size
类型 1 Type-1	≥150000	156~552	19
类型 2 Type-2	150000>A≥100000	104~176	12
类型 3 Type-3	100000>A≥10000	65~152	17
类型 4 Type-4	10000>A≥3500	40~91	41
类型 5 Type-5	3500>A≥1500	20~77	45
类型 6 Type-6	1500>A≥10	3~55	50

豚草入侵生境具有明显偏好性,研究发现,道 路两侧分布的种群点最多(图 1),占总分布种群点 的 32.34%,其次是林下 22.84%,农田边 14.98%。 在居民区、河道和草场生境记录到分布点相对较 少,分别占 8.82%、9.27%、11.75%。河道生境主要 由河滩-水渠形成,其种群分布面积最大,占伊犁河 谷总分布面积的 69.01%,此生境种群多呈现沿河 道两侧廊道的连续带状分布。除以上 6 种生境外, 其他生境几乎很少发现豚草分布。

除河道生境外,其他各类生境中种群总面积大 小占比与分布点占比呈正相关,即分布点越多,种

群面积占比越大。综上所述,豚草分布具有明显生 境偏好,河道、道路两侧、林下是其主要分布区。在 各生境中种群均为集中分布。

2.2 豚草种群分布的空间异质性程度和组成

对河谷整体入侵豚草种群按照时间年限进行 分类,作半方差函数分析,拟合半方差函数模型分 析可得:整体上分布区豚草种群拟合最适空间模型 为指数模型和球状模型(表 3)。块基比显示,在种 群类型 1、4、6 中随机因素占总空间异质性的比值 大于等于 0.5,分别为 0.621、0.500 和 0.500,说明其 种群的形成中,随机效应起到重要作用,其他时间

序列种群块基比均小于 0.34,表明豚草在入侵初期随机扩散到生境中。

本研究中,变程(A_0)作为描述空间异质性尺度的有效参数,表明在本研究尺度内的种群间具有强烈的空间自相关性。不同时间序列的入侵种群中,种群变程值大小不同,种群类型 1 (表示最早入侵种群)~4 其空间自相关距离为 60~90 m,说明在此范围内,早期豚草种群间存在相互扩散传播的影响。种群类型 5 和 6 的空间自相关距离达到了 1500 和 650 m,说明豚草种群远距离扩散具有随机性。

由分数维 D 值可看出,由空间自相关部分引起的空间异质性程度均较高。从入侵种群的时间序列看, D 值呈先升高再降低的变化趋势,主要受生境偏好的影响。

将豚草分布种群按照入侵生境类型划分,做半方差分析拟合半方差函数模型(表 4)。农田边和居民区生境变程值分别为 50 和 30 m;道路两侧和草场变程值相对较大,为 620 和 520 m,其次是林下(410 m)和河道(270 m)生境。说明种群分布格局形成受自身远近距离扩散特征和生境共同决定。结合调查结果,不同生境中扩散媒介差异是促进种

群现有分布格局形成的原因。农田边与居民区变程值最小,是由于 2 个生境中农业机械作业和农牧物资调运使得种子转移扩散;而道路两侧和草场生境中扩散主要依靠动物活动和物资调运携带扩散;林下和河道生境中牛羊活动及水流是重要的扩散媒介。不同传播途径及相互作用促进现有分布格局形成。

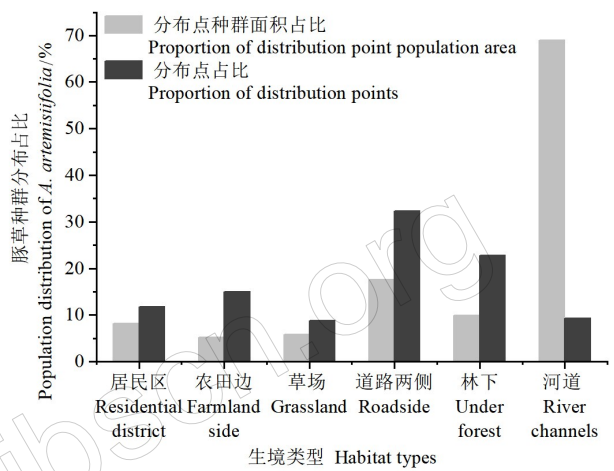


图 1 不同生境中豚草分布点及种群面积占比
Fig.1 Distribution points and population area proportion of *A. artemisiifolia* in different habitats

表 3 伊犁河谷入侵豚草依据种群大小分类的半方差分析

Table 3 Semi-variance analysis of different populations of invasive <i>A. artemisiifolia</i> in Yili River Valley									
种群类型 Population types	半方差函数 $\gamma(h)$	块金值 C_0	基台值 C_0+C	块基比 $C_0/(C_0+C)$	变程值 A_0/km	决定系数 R	分维数 D	残差 RSS	
类型 1 Type-1	指数模型 Exponential model	0.441	0.710	0.621	0.08	0.106	1.926	0.723	
类型 2 Type-2	球状模型 Spherical model	0.001	0.264	0.004	0.09	0.138	1.952	0.111	
类型 3 Type-3	球状模型 Spherical model	0.003	1.336	0.002	0.07	0.100	1.995	3.100	
类型 4 Type-4	指数模型 Exponential model	1.054	2.109	0.500	0.06	0.181	1.951	1.230	
类型 5 Type-5	指数模型 Exponential model	1.360	5.502	0.247	1.50	0.291	1.913	2.810	
类型 6 Type-6	指数模型 Exponential model	2.856	5.713	0.500	0.65	0.329	1.935	3.570	

表 4 不同生境豚草种群的半方差分析

Table 4 Semi-variance analysis of <i>A. artemisiifolia</i> population in different habitats									
生境类型 Habitat types	半方差函数 $\gamma(h)$	块金值 C_0	基台值 C_0+C	块基比 $C_0/(C_0+C)$	变程值 A_0/km	决定系数 R	分维数 D	残差 RSS	
农田边 Farmland side	球状模型 Spherical model	0.420	2.737	0.153	0.050	0.280	1.949	5.23	
草场 Grassland	高斯模型 Gaussian model	1.370	11.749	0.116	0.520	0.684	1.555	22.50	
道路两侧 Roadside	球状模型 Spherical model	1.447	3.110	0.465	0.620	0.669	1.874	1.08	
居民区 Residential district	指数模型 Exponential model	0.900	5.091	0.176	0.030	0.046	1.969	15.70	
林下 Under forest	球状模型 Spherical model	1.702	4.306	0.395	0.410	0.258	1.892	19.10	
河道 River channels	指数模型 Exponential model	0.890	4.348	0.204	0.270	0.766	1.794	1.95	

2.3 入侵群落物种丰富度对豚草入侵的影响

对所有入侵群落物种丰富度与豚草盖度(入侵程度)进行相关分析,结果显示,豚草入侵样方的盖度[(0.23±0.13)%]与入侵群落物种丰富度相关性

(-0.009)水平低,无显著差异($p>0.05$)。表明豚草入侵能力与群落中物种多样性无关,可以入侵伊犁河谷的各类生境。

3 讨论

3.1 豚草分布格局的形成主要由其生境偏好和扩散路径共同作用,远距离扩散具有随机性

豚草种群分布具有明显的生境偏好特性。Essl *et al.* (2009) 和 Skalova *et al.* (2017) 分别研究了奥地利和捷克的豚草种群时空分布格局,发现早期豚草的偏好生境为铁路廊道和居民区,后期其在道路两侧的分布频率升高。Okimura *et al.* (2016) 通过试验证明,豚草幼苗的定居离不开充足的水分,但成株耐旱性较强,在中度和极度干旱条件下仍能正常生长。本研究发现,伊犁河谷的豚草分布具有明显的生境偏好,主要为道路两侧、河道和林下。而此类生境均存在积水现象。因此,水分条件是豚草扩散后成功入侵的重要因素,入侵后种群分布也表现出生境偏好的特征。

伊犁河谷虽然属于半干旱区,但由于道路两侧、河道两岸和林下生境良好的水分条件,促进豚草在这些地点高密度分布,且随水流和牲畜的活动传播到更远的区域。入侵生境偏好和扩散路径的共同作用促进了豚草在伊犁河谷分布格局的形成。

另外,通过对物种多样性与群落可入侵性关系研究发现,本地物种对豚草入侵几乎不具阻抗作用。即在伊犁河谷多种生境中,一旦其种子扩散进入,即有可能形成入侵分布。

豚草主要依靠种子传播,受重力和风作用,扩散距离一般为 0.47~2.00 m (An *et al.*, 2020), 这种近距离扩散方式为其高密度聚集分布奠定了基础。研究发现,豚草种子能通过牲畜毛皮粘附和取食排泄进行扩散 (Montagnani *et al.*, 2017; Vergara-tabares *et al.*, 2016)。而在伊犁河谷,九月中下旬,牲畜进行转场,其在觅食过程中可衔带豚草,发生近距离的转运,也可能误(混)食部分豚草植株及种子,发生远距离扩散,同时具有多个扩散源区(王瑞等, 2018)。另外,豚草远距离扩散具多种媒介。种子能随疫区农牧产品的调运、河渠水流和交通运输等媒介随机传播扩散。例如 2020 年在察布查尔锡伯自治县苗圃发现的豚草种群,其种子随苗木和土壤转运从新源县扩散到 200 km 外。这种远距离扩散往往具有随机性。

本研究发现,豚草在道路两侧分布种群最多,占总分布种群点的 32.34%,林下占 22.84%,农田边占 14.98%。而在河道两侧分布面积最大,占伊犁

河谷分布面积的 69.01%,分布种群呈带状连续分布。所以伊犁河谷豚草远距离扩散可通过动物辅助携带、农产品调运、河流流水和交通运输工具等多种媒介,加速了豚草在道路两侧、林下和河道生境的大量发生。

相较于董合干等(2017)的研究,本研究结合多年连续调查,调查数据更详细具体,大量的数据分析为豚草的传播扩散媒介和路径总结提供基础,也为入侵豚草种群的防治提供重要的基础数据。

3.2 加强对豚草发生区农牧产品外运的监管,减少牛羊等动物辅助扩散是防止豚草进一步蔓延的重点

豚草对农牧业危害巨大,已造成严重经济损失。对入侵种进行早期监测并掌握其扩散通道和传播媒介,对豚草有效防控意义重大。

通过本研究调查,总结提出以下防控重点:对严重入侵区的豚草种群进行集中重点管理和根除;加强对已有豚草分布区域内农牧物资调运、牛羊转场牧道、往来贸易产品的监管和检疫,严禁对豚草已发生区域农牧产品外运;对必要的区域实施围栏禁牧,减少牛羊等牲畜活动从而减少动物的辅助扩散;对道路两侧和河道生境分布的豚草及时采取严格防控措施,在有条件的地段设置过滤网,防止豚草种子通过水流扩散。此外,伊犁河谷作为重要的旅游区域,要加强对车辆、道路两侧以及可能的游客携带传播豚草种子加强监测管理。

参考文献

董合干,周明冬,刘忠权,郝晓云,刘延,刘彤,2017. 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, 31(11): 175-180.

吕燕,郭立新,张慧丽,段维军,2021. 2009—2019 年中国进口大豆中检疫性有害生物截获情况分析. 大豆科学, 40(2): 257-264.

冯莉,岳茂峰,田兴山,齐国君,吕利华,2012. 豚草在广东的分布及其生长发育特. 生物安全学报, 21(3): 210-215.

李哈滨,王政权,王庆成,1998. 空间异质性定量研究理论与方法. 应用生态学报, 9(6): 93-99.

王瑞,周忠实,张国良,郭建英,高尚宾,孙玉芳,付卫东,张付斗,万方浩,2018. 重大外来入侵杂草在我国分布危害格局与可持续治理. 生物安全学报, 27(4): 317-320.

王政权,1999. 地统计学及在生态学中的应用. 北京: 科学出版社.

王政权,王庆成,李哈滨,2000. 红松老龄林主要树种的空

- 间异质性特征与比较的定量研究. 植物生态学报, 24(6): 718–723.
- 曾珂, 朱玉琼, 刘家熙, 2010. 豚草属植物研究进展. 草业学报, 19(4): 212–219.
- 张金屯, 1998. 植物种群空间分布的点格局分析. 植物生态学报, 22(4): 57–62.
- 周忠实, 王韧, 万方浩, 2021. 邱式邦院士在恶性入侵杂草豚草治理上的学术贡献——纪念邱式邦院士诞辰 110 周年. 中国生物防治学报, 37(4): 636–639.
- 朱金方, 柳晓燕, 李俊生, 李飞飞, 赵彩云, 2021. 不同入侵程度下飞机草对喀斯特地区土壤理化性质的影响. 生态学报, 41(24): 9630–9636.
- AN L X, HAO Y H, YE H T C, ZHANG B J, 2020. Annual to multidecadal climate modes linking precipitation of the northern and southern slopes of the Tianshan Mts. *Theoretical and Applied Climatology*, 140(1/2): 453–465.
- DALE M R T, POWELL R D, 2001. A new method for characterizing point patterns in plant ecology. *Journal of Vegetation Science*, 12(5): 597–608.
- ESSL F, BACHER S, BLACKBURN T M, BOOY O, BRUNDU G, BRUNEL S, CARDOSO A C, 2015. Crossing frontiers in tackling pathways of biological invasions. *BioScience*, 65(8): 769–782.
- ESSL F, DULLINGER S, KLEINBAUER I, 2009. Changes in the spatio-temporal patterns and habitat preferences of *Ambrosia artemisiifolia* during its invasion of Austria. *Preslia*, 81(2): 119–133.
- KIRICHENKO N, HAUBROCK P J, CUTHBERT R N, AKULOV E, KARIMOVA E, SHNEYDER Y, LIU C L, ANGULO E, DIAGNE C, COURCHAMP F, 2021. Economic costs of biological invasions in terrestrial ecosystems in Russia. *Neobiota*, 67: 103–130.
- LEMKE A, BUCHHOLZ S, KOWARIK I, STARFINGER U, VON DER LIPPE M, 2021. Interaction of traffic intensity and habitat features shape invasion dynamics of an invasive alien species (*Ambrosia artemisiifolia*) in a regional road network. *Neobiota*, 64: 155–175.
- LEMKE A, KOWARIK I, VON DER LIPPE M, 2019. How traffic facilitates population expansion of invasive species along roads: the case of common ragweed in Germany. *Journal of Applied Ecology*, 56(2): 413–422.
- MAKRA L, MATYASOVSKY I, HUFNAGEL L, TUSNADY G, 2015. The history of ragweed in the world. *Applied Ecology and Environmental Research*, 13(2): 489–512.
- MOHANTY N P, MEASEY J, 2019. Reconstructing biological invasions using public surveys: a new approach to retrospectively assess spatio-temporal changes in invasive spread. *Biological Invasions*, 21(2): 467–480.
- MONTAGNANI C, GENTILI R, SMITH M, GUARINO M F, CITTERIO S, 2017. The worldwide spread, success, and impact of ragweed (*Ambrosia* spp.). *Critical Reviews in Plant Sciences*, 36(3): 139–178.
- OKIMURA T, KOIDE D, MORI A S, 2016. Differential processes underlying the roadside distributions of native and alien plant assemblages. *Biodiversity and Conservation*, 25(5): 995–1009.
- PUTH L M, POST D M, 2005. Studying invasion: have we missed the boat? *Ecology Letters*, 8(7): 715–721.
- QIN Z, DITOMMASO A, WU R S, HUANG H Y, 2014. Potential distribution of two *Ambrosia* species in China under projected climate change. *Weed Research*, 54(5): 520–531.
- SKALOVA H, GU W Y, WILD J, PYSEK P, 2017. *Ambrosia artemisiifolia* in the Czech Republic: history of invasion, current distribution and prediction of future spread. *Preslia*, 89(1): 1–16.
- TAYLOR K, BRUMMER T, TAPER M L, WING A, REW L J, 2012. Human-mediated long-distance dispersal: an empirical evaluation of seed dispersal by vehicles. *Diversity and Distributions*, 18(9): 942–951.
- THOMAZ S M, AGOSTINHO A A, GOMES L C, SILVEIRA M J, REJMANEK M, ASLAN C E, CHOW E, 2012. Using space-for-time substitution and time sequence approaches in invasion ecology. *Freshwater Biology*, 57(11): 2401–2410.
- VERGARA-TABARES D L, BADINI J, PELUC S I, 2016. Fruiting phenology as a "triggering attribute" of invasion process: do invasive species take advantage of seed dispersal service provided by native birds? *Biological Invasions*, 18(3): 677–687.
- WANG R, WANG J, QIU Z J, MENG B, WAN F H, WANG Y Z, 2011. Multiple mechanisms underlie rapid expansion of an invasive alien plant. *The New phytologist*, 191: 828.
- ZHOU Z S, WAN F H, GUO J Y, 2017. *Common ragweed Ambrosia artemisiifolia* L. biological invasions and its management in China. Singapore: Springer.
- ZHOU Q L, WU J, CUI X, LI X H, LIU Z M, MUSA A, MA Q, YU H B, LIANG W, JIANG S Y, WANG Y C, 2021. Geographical distribution of the dispersal ability of alien plant species in China and its socio-climatic control factors. *Scientific Reports*, 11: 7178.