

重要外来入侵植物随南水北调工程传入 京津冀受水区的风险评估

郑志鑫^{1,2}, 王 瑞^{1*}, 张风娟², 冼晓青¹, 万方浩¹

¹中国农业科学院植物保护研究所植物病虫害国家重点实验室, 北京 100193;

²河北大学生命科学学院, 河北 保定 071002

摘要:【目的】外来物种在入侵地的扩张蔓延是其造成危害的关键。南水北调工程可为已入侵外来物种的进一步扩张蔓延提供通道和驱动力。风险评估可为预防入侵植物通过该途径的扩散蔓延提供依据。【方法】以国家重点管理外来入侵物种名录中的入侵植物为研究对象, 根据生物入侵的发生过程(传入、定殖、扩散、危害)构建了包括4个层次29个指标的外来物种入侵综合风险评估的指标体系, 规范了风险指数的计算方法, 系统评估了24种入侵植物沿南水北调输水通道向北扩散而入侵京津冀受水区的风险。【结果】紫茎泽兰和互花米草的入侵风险值(R)相对较低($R < 0.6$), 其余22种入侵植物的风险值均较高($R > 0.6$), 其中, 喜旱莲子草、凤眼莲和大藻3种外来水生植物的入侵风险等级最高($R > 0.8$)。【结论】南水北调工程可能会促进入侵植物向北扩张蔓延并最终入侵京津冀受水区。建议尽早开展监测预警工作, 以控制入侵物种随南水北调工程的扩张蔓延, 进而阻止或降低其对京津冀尤其是华北最大水源地——白洋淀和雄安新区生态环境的威胁。

关键词: 南水北调; 入侵植物; 风险评估; 扩散; 指标体系

Invasion risk assessment of major invasive alien plant species in the South-to-North Water Division project in Beijing-Tianjin-Hebei region

ZHENG Zhixin^{1,2}, WANG Rui^{1*}, ZHANG Fengjuan², XIAN Xiaoqing¹, WAN Fanghao¹

¹State Key Laboratory for Biology and Plant Diseases and Insect Pests, Institute of Plant Protection,

Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China; ²College of Life Sciences,

Hebei University, Baoding, Hebei 071002, China

Abstract:【Aim】The range expansion of alien species causing ecological problems in newly invaded regions is of great concern for managers. The South-to-North Water Division project can provide new channels leading to the spread of invasive species.【Method】The study analyzed the potential of invasion of plants found in the shortlist of alien invasive species under national key management. An index was developed for comprehensive risk assessment of invasive alien species. The systematic risk assessment of 24 invasive plants spreading northward along the South-to-North Water transfer channel in the Beijing-Tianjin-Hebei region was carried out.【Result】Except for *Ageratina adenophora* and *Spartina alterniflora* with relatively low value of risk ($R < 0.6$), the risk values of the remaining 22 invasive plants are all high ($R > 0.6$), among which three invasive aquatic plants, *Alternanthera philoxeroides*, *Eichhornia crassipes* and *Pistia stratiotes*, have the highest risk levels ($R > 0.8$).【Conclusion】The project may promote the spread of invasive plants to the north and eventually invade the Beijing-Tianjin-Hebei water receiving area. It is recommended that early monitoring and warning measures should be taken to prevent and control the spread of invasive species along with the project.

Key words: The South-to-North Water Diversion project; invasive plant; risk assessment; spread; index system

外来物种入侵已成为全球性的环境问题, 中国是遭受外来入侵生物危害最为严重的国家之一。随着全球变化加剧以及我国对外贸易、旅游和交通等

的发展, 外来植物入侵发生的频度和危害的程度都在迅速增加, 特别是一些有毒或恶性的杂草的入侵和蔓延不仅导致巨大的经济损失, 而且导致严重的

收稿日期(Received): 2018-10-01 接受日期(Accepted): 2018-11-01

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC1200800); 国家自然科学基金(31471827); 河北省自然科学基金(C2015201241); 国家科技支撑计划(2015BAD08B03)

作者简介: 郑志鑫, 女, 硕士研究生。研究方向: 入侵植物时空扩散与风险评估。E-mail: zhixinzhengzxx@163.com

* 通信作者(Author for correspondence), E-mail: wangrcas@163.com

生态灾难(桑卫国等,2006; 万方浩等,2010; Pimentel *et al.*, 2000)。当前,我国外来有害生物入侵的形势异常严峻,这表现在2个方面:新的物种正在不断地通过贸易、旅游等途径传入;已入侵的物种还在不断地扩散蔓延。因此,预防新的外来物种的入侵以及控制已入侵生物的进一步扩散蔓延是当前面临的主要任务。通过风险评估明确外来物种传入与扩散的风险、制定早期监测预警措施是控制有害生物入侵、抑制其扩散蔓延的最有效途径(万方浩等,2010)。

人类活动是影响外来物种扩散的关键因素(Horvitz *et al.*, 2017),特别是一些大的跨区域的工程会促进外来物种的扩张蔓延。南水北调是中国21世纪的一项巨大输水工程,目的是把长江流域的水引入华北地区,以缓解华北地区的水资源匮乏问题,改善受水区的生态环境,促进该地区的可持续发展。南水北调工程有中线、东线和西线3条调水线路。其中,中线和东线工程分别从汉江上游的丹江口水库和长江中下游的江都引水,供给黄淮海平原大部分地区。2016年底,中线和东线工程已完工并开始输水。

我国的外来物种分布总体上呈现沿海多于内陆的特点,内陆地区呈现出由南向北、由东向西递减的趋势(何志恒和张全发,2007)。南水北调工程全程干渠大多为露天开放性管道,在调水的同时为物种的跨区域扩散提供了通道和动力,尤其一些已在水源地分布的外来有害生物可能会借助这一通道跨越地理屏障从长江流域向北扩散蔓延。因此,系统评估外来有害生物随南水北调工程(中线和东线)入侵和扩散的风险,明确高风险的有害种类及其风险等级对南水北调工程途经地和受水区生态环境建设及外来物种防控具有重要意义。近年来,已有学者研究了南水北调工程及其输水通道对物种传播的影响(何志恒和张全发,2007; 吕培茹等,2010; Liu *et al.*, 2017),但其主要是评估水源地的土著植物(大藻 *Pistia stratiotes* L.除外)随该输水工程扩散的风险。杂草风险评估方法是基于植物的生物生态学特性等指标评估其入侵后的危害风险。生物入侵是一个动态的过程,其入侵的风险应该由传入、定殖、扩散与危害等综合决定。水源地广泛分布的重要入侵植物能否随南水北调工程扩散、扩散后能否定殖并造成危害等问题并不清楚。因此,本研究以南水北调水源地分布的危险性入侵植物为评估对象,通过构建基于生物入侵过程中不同阶

段(传入、定殖、扩散、危害等)的综合风险评估指标体系,并结合入侵物种传入、定殖、扩散与危害相关因子的特性,系统评估它们随南水北调工程入侵京津冀受水区的风险,为制定有害生物的早期监测预警措施及控制和预防外来物种对京津冀受水区的危害、保障南水北调工程区的生态安全提供依据。

1 材料与方法

1.1 风险评估对象

据统计,目前已入侵我国的外来植物有286种,其中33种已被列入国家重点管理外来入侵物种名录(农业部外来物种管理办公室,2013),它们均已在我国长江流域定殖并正在进一步扩散蔓延。本研究以这33种危险性入侵植物为候选评估对象,通过查阅文献资料、标本信息及实地考察等明确它们在南水北调水源地的分布、发生危害特性等信息;然后,基于风险识别程序,通过比较当前分布点距水源地距离及植物的繁殖体或种子随风、水流等的扩散距离等方法筛选出能够随南水北调工程扩散的外来入侵植物,并按照构建的风险评估指标体系对其随南水北调工程进入京津冀受水区的风险进行评估。

1.2 风险评估体系构建

外来生物入侵是一个由复杂链式过程构成的风险事件,一般可以分为传入、定殖、扩散与危害4个阶段(鞠瑞亭和李博,2012; 张从,2003; Benke *et al.*, 2011)。理论上,外来植物随南水北调工程传入京津冀受水区的风险是由入侵过程中不同阶段的多重因素所决定。基于此,本研究通过综合分析影响外来物种入侵的生物学和生态学特征及环境和人为活动等因素,以入侵植物的繁殖体能否进入水源地为起点,提取南水北调工程促进外来物种入侵风险形成的因子,建立了风险评估指标体系(表1)。

该风险评估指标体系分为4个层次:第1层次为目标层,即评价的目标,以综合风险指数(R)表达,描述的是被评估入侵植物随南水北调工程传入受水区风险评估的最终结果;第2层次为项目层,根据外来物种入侵的一般过程,即“传入→定殖→扩散→危害”,将所有影响物种入侵的因素分为四大类,包括传入风险(I)、定殖风险(E)、扩散风险(D)和危害风险(P);第3层次为因素层,即每个项目层的风险由哪些因素决定;第4层次为指标层,即每一个评价因素由哪些具体指标来描述。

表 1 重要入侵植物随南北水北调工程传入京津冀受水区风险评估指标体系及指标赋值参考标准

Table 1 Risk assessment index system and indicator assignment reference standards of important invasive plants introduced into the down-reaches water receiving area of the South-to-North Water Division (SNWD) project in Beijing-Tianjin-Hebei region

项目层 Project level	因素层 Factor level	指标层 Index level	0~0.25	0.25~0.50	0.50~0.75	0.75~1.00
传入风险 Introduction risk (I_1)	繁殖体进入水源地的风险 Risk of propagule entering the source of SNWD (I_1)	水源地分布范围与丰度 Abundance and distribution range in the source of SNWD (I_{11})	稀少/100 km 范围内无分布 Sparsely and no occurrence within the distance of 100 km from source of SNWD	局部/50 km 范围内无分布 Local distribution and occurrences mainly located in the area far from 50 km of SNWD	较广/10 km 范围内无分布 Widely distributed but no occurrences within the 10 km from the SNWD	广泛分布 Widely distributed
		生殖生长物候期 Reproductive phenophase (I_{12})	生殖期较短(小于 1 个月) Reproductive phase is less than 1 month and cannot produced large number of viable seeds	生殖期短(1~2 个月) Reproductive phase is 1~2 months	生殖期较长(2~3 个月) Reproductive phase is 2~3 months	生殖期长(大于 3 个月) Reproductive phase is more than 3 months
		繁殖体进入水源地的途径 Pathway for the propagule to reach the source of SNWD (I_{13})	自然扩散能力较弱或无法判断 Cannot dispersed with natural vectors or unable to judge dispersal vector	可随人为无意携带等进入水源地 Able to be dispersed into the source of SNWD with human activities	能够自然扩散进入水源地 Able to be dispersed into the branches of SNWD with natural vectors	能够自然扩散进入水源地核心区 Able to be dispersed into the source of SNWD with natural vectors
运输风险 Transportation risk (I_2)	繁殖体随水流传播的能力 Dispersal ability of propagule with water current (I_{21})	弱(陆生植物种子较大且不能漂浮) Weak, the seed of terrestrial plants is big and cannot float	中等(陆生植物种子不能漂浮) Moderate, the seed of terrestrial plants cannot float	强(繁殖体具特殊结构,易于漂浮) High, the seed of terrestrial plants has special structure to promote its water dispersal	极强(水生植物繁殖体可随水流扩散) Very high, the seed and vegetative propagule of aquatic plant can be easily dispersed with water	
		繁殖体扩散途中存活率 Survival rate of propagule in the water dispersal process (I_{22})	0~10%	10%~20%	20%~50%	50%~100%
		繁殖体传入量 Propagule pressure into SNWD (E_{11})	较小(量小、频率低) Low with low propagule pressure and frequency	中等(量小、频率高) Moderate with low propagule pressure and high frequency	强(量大、频率低) High with high propagule pressure but low frequency	极强(量大、频率高) Very high with high propagule pressure and frequency
定殖风险 Colonization ability (E_1) (E)	种子萌发率 Seed germination rate (E_{12})	0~10%	10%~20%	20%~50%	50%~100%	
		出苗率 Seedling emergence rate (E_{13})	0~10%	10%~20%	20%~50%	50%~100%
		气候条件 Climatic conditions (E_2)	不适合 Unsuitable	低 Low	中 Moderate	高 High
气候条件 Climatic conditions (E_2)	物种分布模型预测的气候 Climatic suitability predicted by species distribution modeling (SDM) (E_{21})	物种分布模型预测的气候 Climatic suitability predicted by species distribution modeling (SDM) (E_{21})	不适合 Unsuitable	低 Low	中 Moderate	高 High

续表 1

项目层 Project level	因素层 Factor level	指标层 Index level	指标赋值参考标准 Indicator assignment reference standards			
			0~0.25	0.25~0.50	0.50~0.75	0.75~1.00
扩散风险 Diffusion risk (D)	基质条件 Substrate conditions (E ₃)	土壤类型或酸碱度等对植物生存适合度 Survival suitability in varied soil or pH (E ₃₁)	0~10%	10%~50%	50%~80%	>80%
	抗性 Tolerance to stresses (E ₄)	植物对逆境抗性能力 Tolerance to adverse conditions (E ₄₁)	弱 Weak	中等 Moderate	较强 High	极强 Very high
繁殖增长能力 Growth and reproductive ability (D ₁)	繁殖方式 Reproduction mode (D ₁₁)	/	无性繁殖 Vegetative reproduction	有性繁殖或无性繁殖 Vegetative or sexual reproduction	具有性和无性双重繁殖 Vegetative and sexual reproduction	
		/	多年 1 次 1 time in several years	1 年 1 次 One time in one year	1 年 2 次及以上 Two or more times in one year	
		≤10	10~1000	1000~10000	>10000	
		弱(种子重,且不具冠毛或其他有助于其随风、水流、动物等多种途径扩散的能力) Weak, seed cannot be easily dispersed with wind, water and animals etc	中等(种子能够随风、水流、动物等单一途径进行短距离扩散传播) Moderate, seed can be dispersed by wind, water or animals in a short distance	较强(种子较轻,能够随风、水流、动物等 2 种以上途径进行扩散传播) High, seed is light and can be dispersed with more than one vectors	极强(种子较轻,具有冠毛或倒钩刺等结构,促使其随风、水流、动物、人类活动等多重媒介长距离扩散且存在交互作用) Very high, seeds have special structure and prone to be dispersed with multiple vectors in a long distance	
生活型 Life form (D ₁₅)	繁殖体随交通、旅游等人为因素无意传播的频率 The frequency of propagule dispersed with human activities e.g. transportation, tourism etc (D ₁₆)	生长较慢的木本 Wood	半灌木、速生灌木、速生乔木 Semi-shrub, fast-growing shrub and tree	速生木质藤本 Fast-growing woody vine	草本、草质藤本 Herbal, herbaceous vine	
	有效 Effective	低 Low	中等 Moderate	较高 High	极高 Very high	
	容易 Easy	容易 Easy	中等 Moderate	较差 Low	差 Very low	
控制作用 Control effect (D ₂)	生物因子的控制作用 Effects of biological factors (D ₂₁)	容易 Easy	容易 Easy	中等 Moderate	较差 Very difficult	
		容易 Easy	容易 Easy	中等 Moderate	较差 Very difficult	
		容易 Easy	容易 Easy	中等 Moderate	较差 Very difficult	

续表 1

项目层 Project level	因素层 Factor level	指标层 Index level	指标赋值参考标准 Indicator assignment reference standards			
			0~0.25	0.25~0.50	0.50~0.75	0.75~1.00
危害后果 Damage effect (P)	社会风险 Social risk (P_1)	对政治、文化、宗教等活动的 影响 Impacts on politics, culture and religions etc (P_{11})	低 Low	中等 Moderate	大 High	极大 Very high
		对人、野生动物、家养动物 健康的影响 Impacts on human health, wild and domestic animals etc (P_{12})	低 Low	中等 Moderate	大 High	极大 Very high
		对居民生活和工作秩序的影响 Impacts on resident life and sequence work (P_{13})	低 Low	中等 Moderate	大 High	极大 Very high
	生态风险 Ecological risk (P_2)	对土著物种及当地生物多样性 的影响 Impacts on interspecific inter- action of native species and biodiversity (P_{21})	低 Low	中等 Moderate	大 High	极大 Very high
		对土壤、地表和地下水、小 气候等造成的影响 Impacts on soil, surface and ground water, microclimate (P_{22})	低 Low	中等 Moderate	大 High	极大 Very high
		携带其他重要有害生物的能力 Ability to act as vectors carry- ing with other pests (P_{23})	低 Low	中等 Moderate	大 High	极大 Very High
经济风险 Economic risk (P_3)		对林业、旅游业带来的经济 损失 Economic loss to forest, tourism (P_{31})	低 Low	中等 Moderate	大 High	极大 Very high
		对农产品带来的经济损失 Economic loss to agricultural products (P_{32})	低 Low	中等 Moderate	大 High	极大 Very high
		对贸易及其他方面带来的 经济损失 Economic loss to trade and others (P_{33})	低 Low	中等 Moderate	大 High	极大 Very high

为便于统一计算,根据模糊数学原理,参考已有的风险评估案例(鞠瑞亭和李博,2012;王瑞等,2015),将各参评指标划分为5个等级。每个等级设一个概念阈值,依次为0.25、0.50、0.75、1.00。对于可以定量的指标,设定了打分可参考的定量范围;对于不能定量的指标,由专家根据自身经验评估打分。

1.3 风险指数的计算

根据已构建的风险评估指标体系及指标赋值标准(表1),由专家对评估对象的各项指标逐一打分;然后筛选出评分记录完整的打分表,统计出各项指标的综合值;最后,根据层次分析法—模糊综合评价模型计算出指标的权重以及最终的风险指数。

1.3.1 目标层计算 入侵植物沿南水北调工程扩散的综合风险由传入、定殖、扩散和危害的风险共同决定。它们之间的逻辑关系符合乘法原理,计算公式为 $R = \sqrt[4]{I \times E \times D \times P}$, R 值应在 $[0, 1]$ 之间。

1.3.2 项目层计算 通过分析入侵物种沿南水北调工程扩散的风险构成条件,判定因素层与项目层之间的逻辑关系,确定由因素层计算相对应的项目层的方法。

I 与因素层(I_i)之间符合乘法原理,计算公式为 $I = \sqrt[i]{\prod I_i}$ ($i=2$); E 与因素层(E_i)之间符合乘法原理,计算公式为 $E = \sqrt[i]{\prod E_i}$ ($i=4$); D 与因素层(D_i)之间符合乘法原理,计算公式为 $D = \sqrt[i]{\prod D_i}$ ($i=2$); P 与因素层(P_i)之间符合替代关系,计算公式为 $P = \max(P_i)$ 。

1.3.3 因素层计算 繁殖体进入水源地的风险(I_1)与参评指标(I_{11} 、 I_{12})之间符合加法原理,它们的结果与 I_{13} 之间符合乘法关系。因此,计算公式为 $I_1 = \sqrt[2]{(w_{11}I_{11} + w_{12}I_{12}) \times I_{13}}$ (w_{11} 、 w_{12} 为权重值)。

运输风险(I_2)与参评指标(I_{21} 、 I_{22})之间符合乘法关系,计算公式为 $I_2 = \sqrt{I_{21} \times I_{22}}$ 。

定殖能力(E_1)与参评指标(E_{11} 、 E_{12} 、 E_{13})之间符合乘法关系,计算公式为 $E_1 = \sqrt[3]{E_{11} \times E_{12} \times E_{13}}$ 。

气候条件(E_2)、基质条件(E_3)、抗性(E_4)均只有1项评价指标,其值可直接得出。

繁殖增长能力(D_1)与参评指标(D_{1i})之间符合加法关系,计算公式为 $D_1 = \frac{\sum_{i=1}^6 w_{1i} D_{1i}}{\sum w_{1i}}$ 。其中, w_{1i} 为各指标对应权重, D_{1i} 为指标。

控制作用(D_2)与参评指标(D_{2i})之间符合加法原理,计算公式为 $D_2 = \frac{\sum_{i=1}^3 w_{2i} D_{2i}}{\sum w_{2i}}$ 。

社会风险(P_1)、生态风险(P_2)、经济风险(P_3)与参评指标(P_{1i} 、 P_{2i} 、 P_{3i})之间均符合替代关系,它们的计算公式分别为 $P_1 = \max(P_{1i})$ 、 $P_2 = \max(P_{2i})$ 、 $P_3 = \max(P_{3i})$ 。

1.3.4 指标权重设置 综合专家意见,并采用层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)确定符合加法原理的指标权重(鞠瑞亭和李博,2012;王瑞等,2015)。

首先,构建因子权重矩阵。参考各指标的综合评分值确定因子间的重要性(相同、稍强、强、明显强、绝对强),分别设置因子间对风险贡献权重先验值(1或2、3或4、5或6、7或8、9),从而构建因子间重要性判断矩阵。

其次,计算权重向量并做一致性检验。计算指标层对准则层的组合权重向量,并根据公式做组合一致性检验。若检验通过,特征向量(归一化后)即为权重向量;若不通过,则需要重新构建一致性比率较大的成对比较矩阵,并进行一致性检验,直至检验通过。最后计算得出各指标的权重系数值。

2 结果与分析

2.1 评估对象识别

经资料查询和实地考察,从33种候选评估对象中筛选出24种在南水北调中线和东线工程水源区(与水源地相连的主要河流)和途经地有分布的入侵植物,对其随南水北调工程扩散的风险进行评估。被评估的24种入侵植物分属于菊科、禾本科、苋科、雨久花科等9科(表2)。刺苍耳 *Xanthium spinosum* L.、飞机草 *Chromolaena odorata* (L.) R. M. King & H. Robinson、假臭草 *Praxelis clematidea* R. M. King & H. Robinson、薇甘菊 *Mikania micrantha* Kunth、长刺蒺藜草 *Cenchrus longispinus* (Hack.) Fernald、节节麦 *Aegilops tauschii* Coss、长芒苋 *Amaranthus palmeri* Watson、少花蒺藜草 *Cenchrus pauciflorus* Bentham、刺萼龙葵 *Solanum rostratum* Dunal等9种入侵植物的分布区距离水源地较远,其繁殖体很难进入水源地及其连接的河流,或与其有关的资料较少,缺少相关信息,故未评估其随南水北调工程扩散的风险。

表 2 重要入侵植物沿南水北调工程入侵京津冀受水区的风险评估指标权重系数和综合风险值 (R)

Table 2 Index weight coefficients and integrated risk (R) values for the major invasive plants with invasion potential into the Beijing-Tianjin-Hebei receiving area with the South-to-North Water Diversion project

物种 Species	科 Family	符合加法原理指标的权重系数											R
		The index weight coefficient value in line with additive principle											
		I_{11}	I_{12}	D_{11}	D_{12}	D_{13}	D_{14}	D_{15}	D_{16}	D_{21}	D_{22}	D_{23}	
凤眼莲 <i>Eichhornia crassipes</i> (Mart.) Solms.	雨久花科 Pontederiaceae	0.50	0.50	0.16	0.23	0.18	0.14	0.19	0.08	0.33	0.41	0.26	0.8065
大藻 <i>Pistia stratiotes</i> L.	天南星科 Araceae	0.58	0.42	0.16	0.22	0.25	0.12	0.14	0.09	0.54	0.30	0.16	0.8096
喜旱莲子草 <i>Alternanthera philoxeroides</i> (Mart.) Griseb.	苋科 Amaranthaceae	0.50	0.50	0.19	0.21	0.24	0.13	0.15	0.07	0.33	0.41	0.26	0.8126
反枝苋 <i>Amaranthus retroflexus</i> L.	苋科 Amaranthaceae	0.67	0.33	0.24	0.20	0.12	0.16	0.19	0.08	0.33	0.41	0.26	0.7815
刺苋 <i>Amaranthus spinosus</i> L.	苋科 Amaranthaceae	0.75	0.25	0.31	0.18	0.12	0.14	0.13	0.11	0.54	0.30	0.16	0.7637
毒麦 <i>Lolium temulentum</i> L.	禾本科 Poaceae	0.67	0.33	0.21	0.21	0.14	0.19	0.19	0.05	0.33	0.41	0.26	0.7238
互花米草 <i>Spartina alterniflora</i> Loiseleur	禾本科 Poaceae	0.50	0.50	0.16	0.24	0.15	0.15	0.16	0.12	0.40	0.40	0.20	0.5860
假高粱 <i>Sorghum halepense</i> (L.) Pers.	禾本科 Poaceae	0.67	0.33	0.20	0.24	0.14	0.16	0.19	0.06	0.33	0.41	0.26	0.6951
蒺藜草 <i>Cenchrus echinatus</i> L.	禾本科 Poaceae	0.67	0.33	0.23	0.21	0.13	0.16	0.15	0.11	0.54	0.30	0.16	0.7442
豚草 <i>Ambrosia artemisiifolia</i> L.	菊科 Composite	0.67	0.33	0.25	0.23	0.11	0.13	0.18	0.08	0.33	0.41	0.26	0.7621
三裂叶豚草 <i>Ambrosia trifida</i> L.	菊科 Composite	0.67	0.33	0.18	0.23	0.16	0.16	0.18	0.07	0.33	0.41	0.26	0.7365
加拿大一枝黄花 <i>Solidago canadensis</i> L.	菊科 Composite	0.75	0.25	0.20	0.24	0.12	0.16	0.18	0.08	0.33	0.41	0.26	0.7516
黄顶菊 <i>Flaveria bidentis</i> (L.) Kuntze.	菊科 Composite	0.75	0.25	0.21	0.23	0.12	0.18	0.19	0.07	0.33	0.41	0.26	0.7393
三叶鬼针草 <i>Bidens pilosa</i> L.	菊科 Composite	0.75	0.25	0.25	0.14	0.15	0.18	0.16	0.10	0.33	0.41	0.26	0.7402
小蓬草 <i>Erigeron canadensis</i> L.	菊科 Composite	0.50	0.50	0.25	0.23	0.11	0.13	0.18	0.08	0.40	0.40	0.20	0.7771
钻形紫菀 <i>Aster subulatus</i> Michx.	菊科 Composite	0.75	0.25	0.25	0.23	0.11	0.13	0.16	0.09	0.40	0.40	0.20	0.7459
一年蓬 <i>Erigeron annuus</i> (L.) Pers.	菊科 Composite	0.75	0.25	0.23	0.23	0.11	0.14	0.16	0.11	0.40	0.40	0.20	0.7548
苏门白酒草 <i>Conyza sumatrensis</i> (Retz.) Walker.	菊科 Composite	0.75	0.25	0.25	0.23	0.12	0.11	0.18	0.09	0.33	0.41	0.26	0.7012
银胶菊 <i>Parthenium hysterophorus</i> L.	菊科 Composite	0.67	0.33	0.35	0.17	0.13	0.11	0.14	0.08	0.54	0.30	0.16	0.7023
紫茎泽兰 <i>Ageratina adenophora</i> (Sprengel) R.M. King & H. Robinson	菊科 Composite	0.50	0.50	0.16	0.24	0.15	0.15	0.16	0.12	0.40	0.40	0.20	0.5960
圆叶牵牛 <i>Pharbitis purpurea</i> (L.) Voigt.	旋花科 Convolvulaceae	0.67	0.33	0.21	0.18	0.21	0.20	0.13	0.06	0.49	0.31	0.20	0.7288
土荆芥 <i>Chenopodium ambrosioides</i> L.	藜科 Chenopodiaceae	0.75	0.25	0.19	0.19	0.18	0.18	0.19	0.06	0.33	0.41	0.26	0.6842
落葵薯 <i>Anredera cordifolia</i> (Tenore) Steenis.	落葵科 Basellaceae	0.67	0.33	0.18	0.23	0.18	0.15	0.18	0.07	0.33	0.41	0.26	0.7316
马缨丹 <i>Lantana camara</i> L.	马鞭草科 Verbenaceae	0.67	0.33	0.35	0.17	0.13	0.11	0.14	0.08	0.54	0.30	0.16	0.7121

2.2 风险评估结果

本研究中被评估对象的权重系数值见表 2。根据被评估对象各指标的评分及风险指数算法,计算出 24 种入侵植物随南水北调工程入侵京津冀受水区的综合风险值(表 2)。结果显示,紫茎泽兰 *Ageratina adenophora* (Sprengel) R.M. King & H. Robinson 和互花米草 *Spartina alterniflora* Loiseleur 的入侵风险值相对较低 ($R < 0.6$),其余 22 种入侵植物的风险值均较高 ($R > 0.6$),其中,喜旱莲子草 *Alternanthera philoxeroides* (Mart.) Griseb.、凤眼莲 *Eichhornia*

crassipes (Mart.) Solms. 和大藻 3 种外来水生植物的入侵风险值最高 ($R > 0.8$)。

3 讨论

由于外来生物具有极强的繁殖能力,一旦成功入侵就很难被根除。因此,外来入侵物种管理中预防比治理更为经济、可行 (Waage & Reaser, 2001)。风险评估是制定有害生物早期监测预警措施、预防与控制外来有害生物入侵与扩散的关键环节,是外来物种研究的重要内容 (丁晖等, 2006; 王瑞等, 2015; Benke et al., 2011; Pheloung et al., 1999; Pol-

lino *et al.*, 2012; Weber & Gut, 2004)。已开展的外来物种风险评估主要集中在其入侵性、入侵过程中某一阶段的风险,如传入风险、扩散风险、适生性风险、经济危害风险等方面(万方浩等, 2010)。由于生物入侵是一个动态的过程,单一阶段的风险评估有时并不能满足早期管理的需求。近年来,基于外来物种入侵过程的综合风险评估方法逐渐被用来评估外来物种在特定地区的潜在入侵风险(鞠瑞亭和李博, 2012)。基于生物入侵发生的动态过程与先验知识,判定影响入侵风险发生的关键因素及其逻辑关系是构建综合风险评估体系的主要方法。

理论上,南水北调工程可促进外来物种突破自然地理屏障实现进一步扩散蔓延。我国外来入侵物种的发生与危害总体上呈现从东部、南部沿海向西部、北部地区递减的趋势,如江苏、湖北、河南、山东等南水北调中线和东线工程的水源区和途经地是我国外来入侵物种的高发区,其外来入侵植物约有 190 种,约占已确认的全国外来入侵植物(286 种)的 66%(储嘉琳等, 2016; 寿海洋等, 2014; 章承林等, 2012; 张绪良等, 2010; Huang *et al.*, 2011), 而京津冀地区外来入侵植物共 99 种(石青等, 2017)。本研究以评估危险性入侵植物随南水北调工程进入京津冀受水区的风险为目标,以外来有害生物的动态入侵过程为基础,通过分析影响外来植物入侵过程不同阶段的不同因素间的逻辑关系,建立了入侵物种的综合风险评估指标体系。基于该体系,以南水北调水源地和途经地区分布的国家重点管理入侵植物为对象,通过分析其地理分布、扩散动态、适生区等筛选出 24 种外来入侵植物,对其随南水北调工程入侵京津冀受水区的风险进行了评估。结果表明,22 种外来入侵植物随南水北调工程入侵京津冀受水区的风险较高。其中,喜旱莲子草、大藻、凤眼莲 3 种水生植物随南水北调工程向北扩散的风险极高,应该予以重点关注。Liu *et al.* (2017)已经在山东、河北南水北调的输水通道发现了喜旱莲子草向北扩散种群;同时,研究表明,京津冀受水区存在其广阔的适生区,且适生区会随着全球变暖而增大。另外,2018 年笔者在河北省保定市南水北调工程附近白洋淀流域的河道已发现喜旱莲子草的新入侵种群。因此,建议在关注南水北调带来便利的同时,应该意识到其可能促进外来有害生物向北入侵的风险,加强入侵物种的早期监测预

警,降低外来生物入侵的风险。本研究主要是基于与评估对象相关的生物生态学、发生危害、适生性和扩散动态预测等信息做出的风险判断,评估结果会存在一定的不可预知性,这些外来植物能否对京津冀受水区的生态系统造成危害尚需进一步研究。

参考文献

- 储嘉琳, 张耀广, 王帅, 郭建宇, 李家美, 2016. 河南省外来入侵植物研究. 河南农业大学学报, 50(3): 389-395.
- 丁晖, 石碧清, 徐海根, 2006. 外来物种风险评估指标体系和评估方法. 生态与农村环境学报, 22(2): 92-96.
- 何志恒, 张全发, 2007. 南水北调中线工程对具入侵性植物传播的潜在影响评估. 武汉植物学研究, 25(4): 335-342.
- 鞠瑞亭, 李博, 2012. 城市绿地外来物种风险分析体系构建及其在上海世博会管理中的应用. 生物多样性, 20(1): 12-23.
- 吕培茹, 田家怡, 闫永利, 田静, 于祥, 2010. 南水北调东线工程山东段生态安全问题及预警控制对策. 湖北农业科学, 49(5): 1248-1251.
- 农业部外来物种管理办公室, 2013. 国家重点管理外来入侵物种综合防控技术手册. 北京: 中国农业出版社.
- 桑卫国, 朱丽, 马克平, 2006. 外来种入侵现象、问题及研究重点. 地球科学进展, 21(3): 305-312.
- 石青, 陈雪, 罗雪晶, 陈凤新, 任晓鸿, 2017. 京津冀外来入侵植物的种类调查与分析. 生物安全学报, 26(3): 215-223.
- 寿海洋, 闫小玲, 叶康, 马金双, 2014. 江苏省外来入侵植物的初步研究. 植物分类与资源学报, 36(6): 77-88.
- 万方浩, 彭德良, 王瑞, 2010. 生物入侵: 预警篇. 北京: 科学出版社.
- 王瑞, 赵健, 尤民生, 2015. 入境台湾果蔬病虫害风险评估. 北京: 中国农业出版社.
- 张从, 2003. 外来物种入侵与生物安全性评价. 环境保护(6): 29-30, 50.
- 张绪良, 李永科, 徐宗军, 张朝晖, 郑伟, 2010. 山东省的外来有害植物入侵及防治对策. 湖北农业科学, 49(1): 82-86.
- 章承林, 肖创伟, 李春民, 曹克丽, 袁宇明, 2012. 湖北省外来入侵植物研究. 湖北林业科技(3): 40-43.
- BENKE K K, STEEL J L, WEISS J E, 2011. Risk assessment models for invasive species: uncertainty in rankings from multi-criteria analysis. *Biological Invasions*, 13(1): 239-253.
- HORVITZ N, WANG R, WAN F H, NATHAN R, 2017. Pervasive human-mediated large-scale invasion: analysis of spread patterns and their underlying mechanisms in 17 of

China's worst invasive plants. *Journal of Ecology*, 105(1): 85-94.

HUANG Q Q, WANG G X, HOU Y P, PENG S L, 2011. Distribution of invasive plants in China in relation to geographical origin and life cycle. *Weed Research*, 51: 534-542.

LIU D S, WANG R, GORDON R D, SUN X H, CHEN L, WANG Y W, 2017. Predicting plant invasions following China's water diversion project. *Environmental Science and Technology*, 51: 1450-1457.

PHELOUNG P C, WILLIAMS P A, HALLOY S R, 1999. A weed risk assessment model for use as a biosecurity tool evaluating plant introductions. *Environmental Management*, 57: 239-251.

PIMENTEL D, LACH L, ZUNIGA R, MORRISON D, 2000. Environmental and economic costs of nonindigenous species in the United States. *BioScience*, 50: 53-65.

POLLINO C A, THOMAS C R, HART B T, 2012. Introduction to models and risk assessment. *Human & Ecological Risk Assessment*, 18(1): 13-15.

WAAGE J K, REASER J K, 2001. A global strategy to defeat invasive species. *Science*, 292: 1486.

WEBER E, GUT D, 2004. Assessing the risk of potentially invasive plant species in central Europe. *Journal for Nature Conservation*, 12(3): 171-179.

(责任编辑:杨郁霞)

《生物安全学报》入选“2018 年度中国高校优秀科技期刊”



2018 年 7 月,本刊参加中国高校科技期刊研究会组织的“2018 年度中国高校杰出·百佳·优秀科技期刊遴选活动”,荣获“2018 年度中国高校优秀科技期刊”称号。

《生物安全学报》编辑部