

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1787.2022.04.010

速生槐叶蘋入侵风险评估及管理措施分析

张岳, 张国良, 袁至立, 宋振, 王忠辉, 付卫东*
中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081

摘要:【目的】速生槐叶蘋是一种原产于巴西东南部的多年生漂浮型水生植物,广泛引种至世界各地后逃逸,侵入湖泊、河流和稻田等各种水生生境。通过开展速生槐叶蘋入侵风险评估,进而提出其管理措施,可为其检疫决策及防治提供科学依据。【方法】通过查阅梳理文献,分别对速生槐叶蘋的国内外分布、传播方式及入侵扩散历史、防治方法、生态适应性和抗逆性、生物学和遗传特性、危害性及利用价值等方面进行定性分析。并基于外来植物风险指标体系和判断标准,对4个指标层的17个指标和32个问题进行量化赋值,完成速生槐叶蘋的定量分析。【结果】速生槐叶蘋通过自然和人为传播方式已经入侵全世界57个国家地区,可通过无性繁殖快速分裂生长建立种群,其环境适应性和抗逆性强、竞争能力强、检疫鉴定和根除难度大,对经济、生态和社会造成巨大负面影响。速生槐叶蘋的入侵性 R_1 为72,适应性 R_2 为53,扩散性 R_3 为82,危害性 R_4 为81,风险值 R 为73.4,应归为严格禁止引入的植物。【结论】尽管速生槐叶蘋在中国的分布范围有限,但属于高入侵风险物种,其潜在的逃逸扩散风险和危害性不可忽视,应严格禁止引入。考虑到该种已经传入我国且有作为观赏植物的市场需求,应制定相应的风险管理制度,定期开展检疫、监测和灭除,防止其逃逸至野外定殖于其他还未发生的地区。

关键词: 速生槐叶蘋; 生态适应性; 防治策略; 无性繁殖; 定性风险评估; 定量风险评估; 管理措施



开放科学标识码
(OSID 码)

Invasive risk assessment and management measure analysis of *Salvinia molesta* D. S. Mitchell

ZHANG Yue, ZHANG Guoliang, YUAN Zhili, SONG Zhen, WANG Zhonghui, FU Weidong*
Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

Abstract: 【Aim】 *Salvinia molesta* D. S. Mitchell is a perennial, free-floating aquatic plant native to southeastern Brazil. It has been widely introduced and has escaped into the wild worldwide, invading various aquatic habitats, including lakes, rivers, and rice paddies. Assessing invasive risks and formulating management measures may provide the scientific basis for quarantine decision-making and prevention. 【Methods】 In this study, by searching and classifying relevant literature, we qualitatively analyzed the domestic and foreign distribution, means of movement and dispersal, invasion and spread history, control methods, ecological adaptability and stress resistance, biological and genetic characteristics, hazard and utilization values of *S. molesta*. Based on the alien plant risk index system and assignment criteria, 17 indices and 32 questions in four index layers were assigned to quantitatively analyze the risk of *S. molesta* invasion. 【Results】 We observed that *S. molesta* has invaded 57 countries and regions through natural and human movement. It undergoes rapid vegetative reproduction through growth and fragmentation to establish populations. *S. molesta* has strong ecological adaptability, stress resistance, and competitiveness, making quarantine identification and eradication difficult. Thus, it has a significant negative impact on the economy, ecology, and society. The invasibility (R_1), adaptability (R_2), diffusivity (R_3), and harmfulness (R_4) values were 72, 53, 82, and 81, respectively. The risk value for *S. molesta* was 73.4, indicating that it should be classified as a plant that is strictly prohibited from being introduced. 【Conclusions】 Despite its limited distribution range in China, *S. molesta* has a high invasive risk, and the possibility of escape, spread, and harm cannot be ignored. Its introduction is strictly prohibited. Considering that this species has been introduced into China and has market demand as an ornamental plant, a corresponding risk management system should be formulated for the regular implementation of quarantine, monitoring, and eradication activities, to prevent it from escaping to the wild and colonizing and spreading to pest-free areas.

Key words: *Salvinia molesta*; ecological adaptability; prevention and control strategy; vegetative propagation; qualitative risk

assessment; quantitative risk assessment; management measure

由外来植物引起的生物入侵已成为全球性的生态和经济问题(闫小玲等,2012)。入侵植物严重影响农业生产及其生态系统功能,并且破坏物种栖息地,影响生物多样性。建立外来植物入侵风险评估体系可对外来物种传入过程中产生的不确定事件进行识别、评估和处理,以最小的成本将各种不利后果减少到最低程度。完整的外来植物风险评估包括对外来入侵植物的各种特性、环境因素和人为因素进行分析,评价其传入、扩散的可能性,预测其对本地居民健康、经济活动、生态环境和社会生活等产生的影响,最后从社会、经济和政治等方面确认危害可以接受的程度,制定和实施降低风险措施(张瑞海等,2019; 张国良等,2020)。

速生槐叶蘋 *Salvinia molesta* D.S. Mitchell, 隶属于槐叶蘋科 *Salviniaceae* 槐叶蘋属 *Salvinia*, 又称人厌槐叶蘋、蜈蚣蘋、山椒藻(万方浩等,2012; 闫小玲等,2020), 是一种原产于巴西东南部的多年生漂浮型水生植物(Forno, 1983)。作为一种观赏和水族箱的造景植物,其被广泛引种至世界各地后逃逸至野外,侵入湖泊、河流和稻田等各种水生生境。基于对生物多样性和人类活动产生影响的严重性,以及能否阐明生物入侵的关键性问题等 2 个主要筛选标准(Lowe *et al.*, 2000), 速生槐叶蘋被列为“世界 100 种恶性外来入侵物种”之一,是仅次于水葫芦 *Eichhornia crassipes* (Martius) Solms 的世界第二大有毒水生植物(Luque *et al.*, 2013, 2014)。

速生槐叶蘋在中国的分布范围有限,但其潜在的高入侵风险及危害不可忽视(闫小玲等, 2020; 冼晓清等, 2022)。本文通过查阅梳理文献,对速生槐叶蘋开展定性和定量风险评估分析,建立风险评估体系,确定入侵我国的风险值,为其检疫决策及防治提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 文献资料收集

速生槐叶蘋的地理分布数据来源于全球生物多样性信息网络(global biodiversity information facility, GBIF) (<https://www.gbif.org/species/5274863>)、国际应用生物科学中心(centre agriculture bioscience international, CABI)的入侵物种大全(invasive species compendium, ISC) (<https://www.cabi.org/>

[isc/datasheet/48447](https://www.cabi.org/datasheet/48447)) 和《中国外来入侵植物名录》(马金双和李慧茹, 2018)。定性分析和定量分析的相关资料主要以“速生槐叶蘋”“人厌槐叶蘋”“*Salvinia molesta*”“kariba weed”为关键词检索中国知网和 web of science 数据库,并参考欧洲和地中海植物保护组织(European and Mediterranean Plant Protection Organization, EPPO)的 EPPO 全球数据库(EPPO global database) (<https://gd.eppo.int/taxon/SAVMO>)、《中国外来入侵植物志第一卷》(闫小玲等, 2020) 及《生物入侵:中国外来入侵植物图鉴》(万方浩等, 2012)。

1.2 风险评估方法

参照张国良等(2020)提出的外来植物风险指标体系和判断标准,分别对 4 个指标层(入侵性 R_1 、适应性 R_2 、扩散性 R_3 和危害性 R_4)的 17 个指标和 32 个问题进行量化赋值,并计算出某植物的风险值 R , 即 $R=0.40R_1+0.15R_2+0.20R_3+0.25R_4$

若 $R>61$, 则该植物应禁止引入;若 $29.5<R\leq 61$, 则应严格限制引入,因特殊需要引入后,必须有足够的措施限制其逃逸和扩散,并加强监测工作;若 $11<R\leq 29.5$, 则应适当限制引入的目的、区域、数量和次数;若 $R\leq 11$, 则该植物可以引入,但应记录在案。

2 速生槐叶蘋入侵风险的定性分析

2.1 速生槐叶蘋的入侵性

2.1.1 起源、入侵扩散历史及分布情况 速生槐叶蘋原产于巴西亚热带地区(McFarland *et al.*, 2004)。1943 年,斯里兰卡科伦坡大学植物系引入的速生槐叶蘋逃逸至野外,第一次在原产地之外建立野外种群(Oliver, 1993)。在澳大利亚,于 1952 年首次发现逃逸,至 1976 年暴发,其危害程度超过了包括水葫芦在内的其他水生植物(Cronk & Fuller, 2001)。1972 年引入巴布亚新几内亚后,在塞皮克河泛滥。在非洲主要发生在湖泊-河岸系统,1962 年在卡里巴湖其种群暴发,超过 1/4 的湖泊被其覆盖(McFarland *et al.*, 2004)。速生槐叶蘋于 1995 年在美国南卡罗来纳州的野外被监测到(Jacono & Pitman, 2001)。随后于 1998 年入侵德克萨斯州和路易斯安那州,1999 年入侵到佛罗里达州、阿拉巴马州、密西西比州、夏威夷州、亚利桑那州、加利福尼亚州和佐治亚州。

速生槐叶蘋目前已广泛分布于非洲(贝宁、博茨瓦纳、布基纳法索、喀麦隆、刚果、斯威士兰、肯尼亚、莱索托、马达加斯加、马拉维、马里、玛丽塔尼亚、毛里求斯、莫桑比克、纳米比亚、尼日利亚、塞内加尔、南非、坦桑尼亚、赞比亚、津巴布韦)、亚洲(印度、印度尼西亚、以色列、日本、马来西亚、巴基斯坦、菲律宾、新加坡、斯里兰卡、泰国)、欧洲(奥地利、比利时、法国、德国、以色列、意大利、荷兰、葡萄牙、西班牙、瑞士)、北美洲(墨西哥、美国、古巴、瓜德罗普、危地马拉、马提尼克、特立尼达和多巴哥)、南美洲(阿根廷、巴西、哥伦比亚、圭亚那)和大洋洲(澳大利亚、斐济、新西兰、巴布亚新几内亚)(EPPO, 2022)。

在我国,速生槐叶蘋作为观赏植物最早由台湾引入,后逸生于野外。目前已分布于江苏、台湾、浙江、海南等省及香港特别行政区,也常见于各地花卉市场、植物园与水族馆中(马金双和李慧茹, 2018)。

2.1.2 国外重要地位及管控措施 速生槐叶蘋于 2007 年被列入 EPPO 预警名单,在 2019 年被列入 EPPO A2 类检疫性有害生物名录(EPPO, 2022)。澳大利亚将其列入国家有毒杂草清单,各州都出台了相应的管控措施(Australian Weeds Committee, 2016)。2014 年,南非将其列为 1b 类入侵物种,即“必须受到管控,并在可能的情况下铲除和销毁。严禁任何形式的贸易或种植”(http://www.environment.gov.za)。美国将其列入联邦有害杂草名单(未经许可在美国各州之间进口或运输该植物是非法的),被亚利桑那州、加利福尼亚州、科罗拉多州、佛罗里达州等州政府列为入侵物种(McFarland *et al.*, 2004)。

2.1.3 传播方式及传入途径 速生槐叶蘋可通过风、水流和动物活动(鸟类、水豚、河马和水牛等)进行自然传播(Forno & Smith, 1999)。但主要通过人类有意引入(作为观赏植物或饲料)或无意引入(依附在船舶或掺杂在水生植物和鱼类的货物中)进行远距离传播(Gewertz, 1983; Parsons & Cuthbertson, 1992)。

2.1.4 检验鉴定难度 速生槐叶蘋隶属于美洲槐叶蘋复合体。该复合体包含 4 个物种,即速生槐叶蘋、耳形槐叶蘋 *S. auriculata* Aubl、*S. biloba* Raddi 和 *S. herzogii* de la Sota (Mitchell, 1972)。上述 4 个物种营养器官的形态特征极其近似,只能通过孢子

果等生殖器官的细微差异进行识别。另外,速生槐叶蘋与槐叶蘋 *S. natans* (Linnaeus) Allioni 也极为近似,但前者浮水叶表皮毛顶端的分叉在末端闭合,后者的分叉不闭合,是区分二者的主要特征(Booy *et al.*, 2015)。

2.1.5 防治难易程度 速生槐叶蘋的防治效率主要取决于入侵程度,当它处于低密度时,许多防治手段均可在短时间内有效根除(Koncki & Aronson, 2015),因此规范引种行为、早日发现逃逸的植株并及时处理是控制其泛滥最有效的方法。当该种已大面积泛滥时,化学、物理防治效果甚微且耗资巨大,目前防治效果最佳的仍是以槐叶蘋象甲 *Cyrtobagus salviniae* (Mart.) Solms 为代表的生物防治。

化学防治:速生槐叶蘋叶片上表面密被笼状结构的毛,可形成大多数除草剂无法穿透的屏障。只能通过添加润湿剂或表面活性剂来增强除草剂的渗透作用(Oliver, 1993)。目前已知有效的除草剂包括草甘膦(Nelson *et al.*, 2001)、2,4-二氯苯氧乙酸与十二烷基苯磺酸钙的混合制剂(Julian, 1984)、百草枯、利谷隆、敌草隆等(Wells *et al.*, 1986)。

物理防治:人工清除速生槐叶蘋可作为一种持续控制方法,但当其定殖且生物量达到 $8 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2}$,速生槐叶蘋将进入快速生长发育阶段,机械收割和人工清除的成本将远超化学防治。

生物防治:在目前已知的所有天敌性昆虫中,仅有一种原产于巴拉圭、巴西和玻利维亚的半水生甲虫——槐叶蘋象甲被证明有效,并且成本低于化学或物理防治(Chikwenhere & Keswani, 1997),已成功被引入 16 个国家进行生物防治(Julien & Griffiths, 1998; Julien *et al.*, 2002, 2009),包括南非、博茨瓦纳、印度(Cilliers, 1991; Creagh, 1991)、巴布亚新几内亚(Thomas & Room, 1986)、斯里兰卡(Room, 1990)等,使速生槐叶蘋的发生面积锐减至原发生面积的 1%~20%。但在澳大利亚新南威尔士州和北领地却引入失败,主要原因是槐叶蘋象甲对温度较敏感,水温过高或过低均不适合其生长发育(Oliver, 1993)。此外,槐叶蘋象甲的摄食量与水体含氮量呈正相关,在低氮水平下,槐叶蘋象甲无法维持自身种群数量(Room, 1990)。

2.2 速生槐叶蘋的适应性

2.2.1 气候适宜度 速生槐叶蘋的分布范围主要由海拔和最冷季的平均温度决定,全球气候变化将

有利于其逐渐向温带地区传播定殖 (Koncki & Aronson, 2015)。由此推测, 中国台湾以及华南的大部分地区都有遭受该种入侵的风险。

2.2.2 生存环境条件 速生槐叶蘋喜光照强、水温较高且营养丰富的水域 (Mitchell & Tur, 1975)。最佳生长发育 pH 值为 6.0~7.5, 水温为 20~30 ℃ (Cary & Weerts, 1983)。在富营养化栖息地, 如磷矿复垦湿地和池塘, 特别适合其生长发育 (Oliver, 1993)。

2.2.3 分布生境特点 自然生境中, 速生槐叶蘋喜静水或流动缓慢的水域, 如湖泊、河流或溪流、湿地、池塘等 (EPPO, 2022)。易在稻田、运河、泄洪渠、人工湖以及水利发电设施等扰动生境中定殖 (Forno & Harley, 1979)。

2.2.4 耐逆性 速生槐叶蘋的厚垫状结构, 可将其对霜冻的抵抗力提高到生理耐受性水平之上 (Harley & Mitchell, 1981), 如 Owens *et al.* (2004) 发现其可在 -3 ℃ 的试验池塘中存活 48 h 以上。而芽由于没有厚垫状结构的保护, 暴露在低于 -3 ℃ 或高于 43 ℃ 的温度中超过 2~3 h 后即死亡 (Whiteman & Room, 1991)。速生槐叶蘋对盐度的耐受性较低, 但可在盐度约为 20% 的低盐度海水中缓慢生长 (Harley & Mitchell, 1981)。

2.3 速生槐叶蘋的扩散性

速生槐叶蘋是五倍体, 因此减数分裂异常, 产生的孢子败育, 只能进行营养繁殖 (Mitchell, 1972), Barrett (1989) 推测速生槐叶蘋是由槐叶蘋属其他物种杂交产生的, 且入侵至全世界的所有速生槐叶蘋种群均是同一个遗传个体的克隆体。但目前尚未有相关的遗传学研究证明。

速生槐叶蘋可通过不断地生长和分裂进行快速增殖 (Oliver, 1993)。其生长发育主要经历 3 个阶段, 生长速度受拥挤程度、水流湍急程度及其他非生物因素影响 (Ashton & Mitchell, 1989; Oliver, 1993)。在理想生长条件下, 生物量可在 3~4 d 内翻倍 (Mitchell, 1979), 在 2~3 周内可达到生长旺盛期, 形成垫状结构 (Holm *et al.*, 1977)。

2.4 速生槐叶蘋的危害性

2.4.1 经济影响 速生槐叶蘋与水稻 *Oryza sativa* L. 争夺水分、养分和空间, 影响水稻带穗分蘖的数目, 从而导致水稻减产 12.5% (Azmi, 1988), 是印度、斐济、斯里兰卡等国家的主要稻田有害生物

(Sundaresan & Reddy, 1979; Thomas & Room, 1986)。

2.4.2 生态环境影响 速生槐叶蘋可在水面形成 1 m 厚的垫状物, 严重妨碍其他沉水植物的光合作用, 从而抑制本土根系植物和沉水生植物生长, 减少维管植物的多样性 (Sculthorpe, 1967)。垫状物可在较宽阔的水域中形成漂浮的小岛 (Thomas, 1981), 显著改变水生栖息地, 对本地动植物产生负面影响 (Carpenter & Lodge, 1986)。垫状物的形成还降低了水中溶解氧含量和 pH 值, 同时增加了 CO₂ 和 H₂S 含量, 导致底栖动物数量减少 (McFarland *et al.*, 2004; Mitchell, 1969)。在印度, 速生槐叶蘋已经侵入湿地并替代了本土的植物群落 (Gopal, 1988)。

2.4.3 对社会的影响 速生槐叶蘋是传播西尼罗病毒、圣路易型脑炎病毒、委内瑞拉马脑炎病毒和农村象皮病的曼蚊属蚊子的重要宿主植物 (Chow *et al.*, 1955; Lounibos *et al.*, 1990; Pancho & Soerjani, 1978; Ramachandran, 1960), 也为传播脑炎、疟疾和登革热的蚊子 (Creagh, 1991) 和传播血吸虫病的蜗牛 (Holm *et al.*, 1977) 提供了庇护场所。

速生槐叶蘋厚垫状结构使船只无法通过, 严重阻碍水路运输以及捕鱼业发展。同时还堵塞灌溉管道和排水渠 (Oliver, 1993; McFarland *et al.*, 2004)。在巴布亚新几内亚的塞皮克河沿岸, 速生槐叶蘋的入侵使当地居民的医疗卫生、教育和粮食安全等民生问题无法得到保障, 被迫整体搬迁 (Gewertz, 1983)。

2.5 速生槐叶蘋利用价值

一些研究利用速生槐叶蘋生产沼气 (Thomas & Room, 1986), 其能量生产潜力约为 $4.2 \times 10^5 \text{ J} \cdot \text{km}^{-2}$ (Abbasi *et al.*, 1990)。速生槐叶蘋能够有效富集水体中的磷、氮、钾、锰、铁、锌等富营养化物质 (Parsons & Cuthbertson, 1992; Shimada *et al.*, 1988) 及铬等重金属 (Gupta & Devi, 1995)。目前, 速生槐叶蘋已经广泛应用于矿山生态修复 (Sukumaran, 2013) 及污水处理 (Mustafa & Hayder, 2020, 2021)。此外, 速生槐叶蘋还是滞留空气层稳定性和减阻效应研究的仿生学模式材料 (郑亚雯, 2018; Barthlott *et al.*, 2010)。

3 速生槐叶蘋入侵风险的定量分析

根据外来植物风险指标体系和判断标准, 对速生槐叶蘋进行量化赋值 (表 1)。

表 1 速生槐叶殍定量风险评估的指标赋值
Table 1 Indicator assignment of quantitative risk analysis for *Sabina molesta*

准则层 Criteria layer (R_1)	指标层 Index layer (R_j)	指标的属性和参数 Attribute and parameter of index		判断标准(赋值) Criterion (assignment)				赋值的考虑因素 Considered factors for the assignment	赋值 Assignment
		A	B	C	D				
入侵性 Invasibility (R_1)	国外分布情况 Foreign distribution (R_{11})	极广(12) Extreme wide	广(9) Wide	局部(3) Limited	稀少(0) Rare	已广泛分布于非洲、亚洲、欧洲、北美洲、南美洲和大洋洲的 57 个国家和地区 Widely distributed in 57 countries and are- as including Africa, Asia, Europe, North America, South America, and Oceania	12		
		恶性杂草(8) Malignant weed	杂草(6) Weed	一般性植物(3) Common plants	有经济价值植物(0) Economically valuable plant	被列为“世界 100 种恶性外来入侵物种”之 一,被多个国家列为入侵物种并受到管控 List as the world's 100 most invasive species and regulated species in several countries	8		
	国内分布情况 Domestic distribu- tion (R_{12})	极广(12) Extreme wide	广(9) Wide	局部(3) Limited	稀少(0) Rare	局限分布于香港特别行政区、江苏省、台 湾省、浙江省、海南省 Limited distributed in Hong Kong, Jiangsu, Taiwan, Zhe- jiang, and Hainan	3		
		恶性杂草(9) Malignant weed	杂草(5) Weed	一般性植物(3) Common plants	有经济价值植物(0) Economically valuable plant	在我国常见于各地花卉市场、植物园与水 族馆,并未被列为管控物种 Commonly found in flower markets, botanical gardens and aquariums in China, which have not listed as regulated species	3		
传播方式 Propagation ways (R_{13})	自然传播 Natural propagation	传播距离远(6) Long spread distance	传播距离中等(4) Medium spread distance	传播距离近(2) Short spread distance	无法通过自然传播(0) Could not spread by nat- ural spread	可通过风、水流和动物活动近距离传播 Short spread distance by wind, water currents, and animals	2		
	人为传播 Artificial propagation	人为传播极易 (13) Anthropogenic spreading extremely easy	人为传播容易 (10) Anthropogenic spreading easy	人为传播难(7) Anthropogenic spreading difficult	无法通过人为传播(3) Could not spread by an- thropogenic spreading	通过人类有意引入(作为观赏植物或伺 料)或无意引入(依附在船舶或掺杂在 水生植物和鱼类的货物中)进行远距离 传播 Long spread distance by humans mov- ing plants intentionally (as ornamentals), or unintentionally as a hitchhiker on boats, or in shipments of aquatic plants and fish	10		
检验鉴定难度 Difficulty in inspec- tion and identifica- tion (R_{14})	检验鉴定难度 Difficulty in inspection and identification	我国有极其近似 物种分布、需专业 知识要求程度高 (8) Extremely simi- lar species distribu- ted in China, which requires high degree of professional kno- wledge	我国有近似物种 分布、需专业知识 要求程度中(5) Similar species dis- tributed in China, which requires me- dium degree of pro- fessional knowledge	我国有近似物种 分布但易区分、专 业知识要求程度 低(3) Similar and distinguished species distributed in China, which requires low degree of profession- al knowledge	我国无近似物种分布、 无需专业知识要求(0) Without similar species distributed in China, which does not require professional knowledge	近似种槐叶槭已广泛分布于我国,和速生 槐叶槭的形态差异极小,需要极高的专业 知识储备 The similar species <i>S. natanus</i> has widely distributed in China, with tiny mor- phological difference, which requires high degree of professional knowledge	8		

续表 1

准则层 Criteria layer (R_i)	指标层 Index layer (R_{ij})	指标的属性和参数 Attribute and parameter of index		判断标准(赋值) Criterion (assignment)				赋值的考虑因素 Considered factors for the assignment	赋值 Assignment
		A	B	C	D				
除害处理的难度 Difficulty of decontamination (R_{15})	Q8. 人工防除 Manual control	无效(8) Ineffective	有效、实施较难或成本高(5) Effective, implementation is difficult or costly	有效、容易实施、成本低(3) Effective, implementation is easy with low cost	无需防除(0) Unnecessary to control	消耗大量劳动力且成本极高 Very labour intensive and costly	8		
		无效(8) Ineffective	有效、实施较难或成本高(5) Effective, implementation is difficult or costly	有效、容易实施、成本低(3) Effective, implementation is easy with low cost	无需防除(0) Unnecessary to control	有效但需要持续多年防治,成本高昂 but require continuous control which is costly	5		
	Q10. 生物防除 Biological control	无效(8) Ineffective	有效、实施较难或成本高(5) Effective, implementation is difficult or costly	有效、容易实施、成本低(3) Effective, implementation is easy with low cost	无需防除(0) Unnecessary to control	可通过释放槐叶菊象甲使速生槐叶菊的发布面积锐减,成本远低于人工和化学防除 Could sharply reduce the areas of <i>S. molesta</i> by releasing the salvinia weevil (<i>Cyrtobagius salviniae</i>), which is much cheaper than manual control and chemical control	3		
		Q11. 根除难度 Eradicate difficulty	无效(10) Ineffective	有效、实施较难或成本高(5) Effective, implementation is difficult or costly	有效、容易实施、成本低(3) Effective, implementation is easy with low cost	无需防除(0) Unnecessary to control	很难根除,只能维持在低种群水平 Very difficult to eradicate which could maintain low population levels	10	
适应性 Adaptability (R_2)	气候适宜度 Climate suitability (R_{21})	Q12. 中国气候的适宜度 Climate suitability in China	50%以上地区适生(28) More than 50% potential suitable regions	20%~50%地区适生(16) 20%~50% potential suitable regions	10%~20%地区适生(4) 10%~20% potential suitable regions	无适生区域(0) None potential suitable regions	中国台湾及华南大部分地区均是其适生区域 Most areas in Taiwan and southern China are potential suitable regions	16	
	环境条件 Environmental condition (R_{22})	Q13. 生存环境条件 Living environment conditions	要求不严格(14) Optional	要求一般(9) Medium	要求较严格(6) Quite strict	要求严格(0) Strict	对生存环境条件要求一般 Living environment conditions is medium	9	
		Q14. 生境类型多样性 Habitat type diversity	多(18) Various	较多(11) Quite various	中等(6) Medium	少(3) Few	易于在稻田、运河、泄洪渠、人工湖以及水利发电设施等扰动生境中定殖,也能在泥滩和低盐度的海湾中生存 Easily colonizes disturbed habitats including rice paddies, flood canals, artificial lakes and hydro-electric facilities, which can also survive on mudbanks and bay with lower concentrations of salt	11	
	耐逆性 Stress tolerance (R_{24})	Q15. 耐逆性 Stress tolerance	极强(22) Extremely strong	强(14) Strong	一般(11) Medium	弱(4) Weak	芽暴露于低于-3℃或高于43℃的温度中超过2~3h后即死亡;对盐度的耐受性较低,但可在盐度约为20‰海水的低盐度条件下缓慢生长 Buds can be killed when they exposed to temperatures below -3℃ or above 43℃ more than 2-3 hours; could not tolerate high concentrations of salt and can survive in a salinity of around 20‰ of sea water with decreased growth rate	11	

续表 1

准则层 Criteria layer (R_i)	指标层 Index layer (R_{ij})	指标的属性和参数 Attribute and parameter of index	判断标准(赋值) Criterion (assignment)				赋值的考虑因素 Considered factors for the assignment	赋值 Assignment
			A	B	C	D		
扩散性 Diffusivity (R_3)	天敌分布情况 Distribution of natural enemies (R_{25})	Q16. 天敌分布情况 Distribution of natural enemies	国内有多种天敌自然分布且数量多 (18) Various natural enemies distributed in China with plenty numbers	国内有少数种类天敌自然分布且数量多 (15) Few natural enemies distributed in China with plenty numbers	国内有少数种类天敌自然分布但数量较少 (12) Few natural enemies distributed in China with few numbers	国内无天敌分布 (6) Without natural enemies distributed in China	国内无天敌分布 Without natural enemies distributed in China	6
	生活史 Life history (R_{31})	Q17. 生活周期 Life cycle	极短(16) Extremely short	短(12) Short	中等(8) Medium	长(4) Long	可通过不断地生长和分裂进行快速增殖,在 2~3 周内达到第三阶段 Could rapid vegetative reproduction by growth and fragmentation, which can reach the Tertiary Growth Phase in 2-3 weeks	16
	繁殖能力 Reproductive capacity (R_{32})	Q18. 传粉受精方式 Pollination and fertilization method	无性繁殖(8) Vegetative propagation	自花授粉结实(4) Self pollination	异花授粉结实(4) Cross pollination	单性结实(4) Parthenocarp	只能进行营养繁殖 Reproduction is exclusively vegetative	8
		Q19. 繁殖体数量 The number of propagulum	极多(18) Extremely plenty	多(12) Plenty	中(8) Medium	少(3) Few	可通过不断地生长和分裂进行快速增殖 Undergo rapid vegetative reproduction by growth and fragmentation	18
遗传特性 Genetic characteristics (R_{33})		Q20. 繁殖体休眠特性 Dormancy characteristics of propagulum	极强(16) Extremely strong	强(12) Strong	弱(7) Weak	无(3) None	侧芽在干旱等不良条件下呈休眠状态,在环境条件允许的条件下发芽 Lateral buds will be dormant under stress such as drought, and germinate when environmental conditions become ideal	12
		Q21. 成苗率大小 Seedling rate	极大(12) Extremely high	大(8) High	中(4) Medium	小(2) Low	极易存活 Extremely high seedling rate	12
		Q22. 遗传稳定性 Genetic stability	经过 10 代以上极稳定 (16) Extremely stable after 10 generations	经过 10 代以上稳定 (8) Stable after 10 generations	经过 10 代以上较稳定 (2) Quite stable after 10 generations	经过 10 代以上不稳定 (0) Unstable after 10 generations	无性繁殖,因此遗传极其稳定 Extremely genetic stability due to vegetative reproduction	16
		Q23. 杂交可能性 Hybrid possibility	可能性极大(14) Extremely high possibility	可能性大(8) High possibility	可能性小(4) Low possibility	无可能性(0) None possibility	是五倍体 ($2n=45$),无法杂交 Could not hybrid due to pentaploid ($2n=45$)	0
危害性 Harmfulness (R_4)	经济危害 Economic hazard (R_{41})	Q24. 危害对象的经济重要性 Economic importance of hazardous crops	种类多,非常重要 (11) Various Species and very important	种类有限,非常重要 (7) Limited Species and very important	种类有限,重要 (5) Limited Species and quite important	不多,一般 (2) Few Species and common	是印度、斐济、斯里兰卡等国家的主要稻田有害生物 Reported as a serious pest of rice paddy filed in India, Fiji, Sri Lanka, etc.	7

根据表 1,入侵性 R_1 为 72,适应性 R_2 为 53,扩散性 R_3 为 82,危害性 R_4 为 81。根据风险值计算公式 $R=0.40R_1+0.15R_2+0.20R_3+0.25R_4$,计算出风险值 R 为 73.4。因此,速生槐叶蕨应属于严格禁止引入的植物。

4 速生槐叶蕨管理措施建议

本文通过查阅梳理文献,对速生槐叶蕨开展定性和定量风险评估分析,建立风险评估体系,确定速生槐叶蕨入侵我国的风险值高。为防止其进一步扩散,建议相关管理部门采取如下措施加强管理。

(1)摸清速生槐叶蕨在我国入侵现状。目前只知道速生槐叶蕨已经逸生到香港、江苏、台湾、浙江、海南等省市自治区,其具体的发生区县乡镇范围、发生面积、生境、危害对象及危害程度等信息仍处于空白状态,因此,应尽快通过问卷调查、实地踏查、样地调查等方式,摸清其在我国的入侵现状。

(2)预测速生槐叶蕨在我国的潜在适生区范围。考虑到速生槐叶蕨在我国仍有作为观赏植物和水族箱造景植物的市场需求,应尽快开展我国潜在适生区范围的预测研究。基于其在我国的潜在适生区范围,规范引种制度,划分允许销售区域和禁止销售区域,并且严禁与禁止销售区域开展跨区贸易往来。

(3)加强速生槐叶蕨的检疫、监测和监管力度。由于速生槐叶蕨是无性繁殖,逃逸至野外的一株个体也足以在其适生区快速定殖、生长分裂并造成危害。因此,加强对可能携带速生槐叶蕨的载体,如水生植物、热带鱼和水族箱等其他相关产品进行检疫工作,仔细检查是否有速生槐叶蕨掺杂其中。考虑到速生槐叶蕨较小且近缘种较多,难以通过形态特征进行有效鉴定,建议开发适用于现场检测的分子鉴定试剂盒。另外,应加强适宜生存区域开展重点监测工作,如湖泊、河流、湿地、稻田、灌溉渠道、沟渠、池塘和运河、人工湖以及水利发电设施等区域,研发集成生物芯片传感和环境 DNA 技术的高通量、高灵敏度、实时精准监测技术,及时发现逃逸的植株。

(4)研发速生槐叶蕨应急处置技术。在速生槐叶蕨处于低密度时,可通过多种防治手段在短时间内有效根除,对低密度、零星发生区采用物理防治进行人工摘除或机械清除;对成片发生的区域可采用物理防治与化学防治相结合的方法开展根除工

作。目前仅有国外速生槐叶蕨的化学防治资料可供参考,考虑到不同国家的农药管理制度和允许使用的农药种类存在差异,建议在我国《农药管理条例》的框架下,使用已取得中国农药登记的农药组成成分,尽快研制适用于我国速生槐叶蕨化学防治的农药组合和有效剂量。

(5)建立速生槐叶蕨联防联控综合防治体系。在防控原则上,采取“预防为主,综合防治”的原则,在速生槐叶蕨的潜在发生区,加强风险评估、监测预警,强化植物检疫措施,防止其向未发生区传播扩散;在速生槐叶蕨的发生区以农业防治为基础,协调化学防治、物理防治、生物防治等措施,进行综合治理。目前,对于区域防治效果最佳的仍是以槐叶蕨象甲为代表的生物防治,但我国目前尚未开展相关研究,亟需因地制宜开展研究和评估。

参考文献

- 马金双,李慧茹,2018. 中国外来入侵植物名录. 北京:高等教育出版社.
- 万方浩,刘全儒,谢明,2012. 生物入侵:中国外来入侵植物图鉴. 北京:科学出版社.
- 冼晓青,王瑞,陈宝雄,张宏斌,李焱奎,万方浩,张桂芬,刘万学,2022. “世界 100 种恶性外来入侵物种”在我国大陆的入侵现状. 生物安全学报, 31(1): 9-16.
- 闫小玲,寿海洋,马金双,2012. 中国外来入侵植物研究现状及存在的问题. 植物分类与资源学报, 34(3): 287-313.
- 闫小玲,严靖,王樟华,李慧茹,2020. 中国外来入侵植物志:第一卷. 上海:上海交通大学出版社.
- 张瑞海,张国良,宋振,王忠辉,付卫东,2019. 印加孔雀草入侵生态风险评估及其管理措施. 生物安全学报, 28(1): 71-75.
- 张国良,付卫东,张宏斌,王忠辉,宋振,2020. 外来水生植物监测与评估. 北京:中国农业出版社.
- 郑亚雯,2018. 具水下空气层保持性的纤维基毛状表面的仿生构建. 博士学位论文. 上海:东华大学.
- ABBASI S A, NIPANEY P C, SCHAUMBERG G D, 1990. Bioenergy potential of eight common aquatic weeds. *Biological Wastes*, 34(4): 359-366.
- ASHTON P, MITCHELL D, 1989. Aquatic plants: pattern and modes of invasions, attributes of invading species and assessment of control programs// DRAKE J A, MOONEY H A, DI CASTRI F, GROVES R H, KRUGER F J, REJMANEK M, WILLIAMSSON M. *Biological invasions: a*

- global perspective. New York, USA: Wiley and Sons: 111–154.
- Australian Weeds Committee, 2016. *Noxious Weeds List*. [2016–04–17]. <http://www.weeds.org.au/noxious.htm>.
- AZMI M, 1988. Weed competition in rice production // *Proceedings of the National Seminar and Workshop on Rice Field Weed Management*. Malaysia: Rice Research Division: 141–152.
- BARRETT S C H, 1989. Waterweed invasions. *Scientific American*, 261(4): 90–97.
- BARTHOLOTT W, SCHIMMEL T, WIERSCH S, KOCH K, BREDE M, BARCZEWSKI M, WALHEIM S, WEIS A, KALTENMAIER A, LEDER A, BOHN H F, 2010. The *Salvinia paradox*: superhydrophobic surfaces with hydrophilic pins for air retention under water. *Advanced Materials*, 22(21): 2325–2328.
- BOOY O, WADE M, ROY H, 2015. *Field guide to invasive plants and animals in Britain*. London, UK: Bloomsbury Publishing.
- CARPENTER S R, LODGE D M, 1986. Effects of submersed macrophytes on ecosystem processes. *Aquatic Botany*, 26: 341–370.
- CARY P R, WEERTS P G, 1983. Growth of *Salvinia molesta* as affected by water temperature and nutrition I. Effects of nitrogen level and nitrogen compounds. *Aquatic Botany*, 16(2): 163–172.
- CHIKWENHERE G P, KESWANI C L, 1997. Economics of biological control of Kariba weed (*Salvinia molesta* Mitchell) at Tengwe in north-western Zimbabwe: a case study. *International Journal of Pest Management*, 43(2): 109–112.
- CHOW C Y, THEVASAGAYAM E S, WAMBEEK E G, 1955. Control of *Salvinia*: a host plant of *Mansonia* mosquitos. *Bulletin of the World Health Organization*, 12(3): 365–369.
- CILLIERS C J, 1991. Biological control of water fern, *Salvinia molesta* (Salviniaceae), in South Africa. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 37(1/2/3): 219–224.
- CREAGH C, 1991. A marauding weed in check. *ECOS*, 70: 26–29.
- CRONK Q C B, FULLER J L, 2001. *Plant invaders: the threat to natural ecosystems*. London, UK: Earthscan Publications.
- EPPO, 2022. *Salvinia molesta EPPO datasheets on pests recommended for regulation*. [2022–04–02]. <https://gd.eppo.int>.
- FORNO I W, 1983. Native distribution of the *Salvinia auriculata* complex and keys to species identification. *Aquatic Botany*, 17(1): 71–83.
- FORNO I W, HARLEY K L S, 1979. The occurrence of *Salvinia molesta* in Brazil. *Aquatic Botany*, 6(2): 185–187.
- FORNO I W, SMITH P A, 1999. Management of the alien weed, *Salvinia molesta*, in the wetlands of the Okavango, Botswana // STREEVER W. *An international perspective on wetland rehabilitation*. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers: 159–166.
- GEWERTZ D B, 1983. *Sepik river societies*. New Haven, Connecticut, USA: Yale University Press.
- GOPAL B, 1988. Wetlands: management and conservation in India. *Water Quality Bulletin*, 13: 3–6.
- GUPTA M, DEVI S, 1995. Uptake and toxicity of cadmium in aquatic ferns. *Journal of Environmental Biology*, 16(2): 131–136.
- HARLEY K L S, MITCHELL D S, 1981. The biology of Australian weeds, 6: *Salvinia molesta* DS Mitchell. *Journal of the Australian Institute of Agricultural Sciences (Australia)*, 47(2): 67–76.
- HOLM L G, PLUCKNETT D L, PANCHO J V, HERBERGER J P, 1977. *The world's worst weeds: distribution and biology*. Honolulu, Hawaii, USA: University Press of Hawaii.
- JACONO C C, PITMAN B, 2001. *Salvinia molesta*: around the world in 70 years. *Aquatic Nuisance Species Digest*, 4(2): 14–16.
- JULIAN A C, 1984. Control of water hyacinth and water lettuce by the use of new formulations and application ideas // *Proceedings of the International Conference on Water Hyacinth*. Kenya: United Nations Environment Programme: 887–898.
- JULIEN M H, GRIFFITHS M H, 1998. *Biological control of weeds: a world catalogue of agents and their target weeds*. Wallingford, UK: CAB International.
- JULIEN M H, CENTER T D, TIPPING P W, 2002. Floating Fern (*Salvinia*) // DRIESCHE V R. *Biological control of invasive plants in the Eastern United States*. Madison, USA: USDA Forest Service: 17–32.
- JULIEN M H, HILL M P, TIPPING P W, 2009. *Salvinia molesta* D. S. Mitchell (Salviniaceae), weed biological control with arthropods in the tropics. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- KONCKI N G, ARONSON M F, 2015. Invasion risk in a warmer world: modeling range expansion and habitat preferences of three nonnative aquatic invasive plants. *Invasive Plant Science and Management*, 8(4): 436–449.
- LOUNIBOS L P, LARSON V L, MORRIS C D, 1990. Parity, fecundity and body size of *Mansonia dyari* in Florida. *Journal of the American Mosquito Control Association*, 6(1): 121–126.
- LOWE S, BROWNE M, BOUDJELAS S, DE POORTER M, 2000. 100 of the world's worst invasive alien species: a selection from the global invasive species database. New Zealand:

Hollands Printing Ltd.

- LUQUE G M, BELLARD C, BERTELSMEIER C, BONNAUD E, GENOVESI P, SIMBERLOFF D, COURCHAMP F, 2013. Monster fern makes IUCN invader list. *Nature*, 498(7452): 37.
- LUQUE G M, BELLARD C, BERTELSMEIER C, BONNAUD E, GENOVESI P, SIMBERLOFF D, COURCHAMP F, 2014. The 100th of the world's worst invasive alien species. *Biological Invasions*, 16(5): 981–985.
- MCFARLAND D G, NELSON L S, GRODOWITZ M J, SMART R M, OWENS C S, 2004. *Salvinia molesta* D. S. Mitchell (Giant Salvinia) in the United States: a review of species ecology and approaches to management. Vicksburg, Mississippi, USA: US Army Corps of Engineers-Engineer Research and Development Center.
- MITCHELL D S, 1969. The ecology of vascular hydrophytes on Lake Kariba. *Hydrobiologia*, 34(3): 448–464.
- MITCHELL D S, 1972. The kariba weed: *Salvinia molesta*. *British Pteridological Society*, 10: 251–252.
- MITCHELL D S, 1979. *The incidence and management of Salvinia molesta in Papua New Guinea*. Waigani, Port Moresby: Office of Environment and Conservation.
- MITCHELL D S, TUR N M, 1975. The rate of growth of *Salvinia molesta* (*S. auriculata* Auct.) in laboratory and natural conditions. *Journal of Applied Ecology*, 12(1): 213–225.
- MUSTAFA H M, HAYDER G, 2020. Performance of *Pistia stratiotes*, *Salvinia molesta*, and *Eichhornia crassipes* aquatic plants in the tertiary treatment of domestic wastewater with varying retention times. *Applied Sciences*, 10(24): 9105.
- MUSTAFA H M, HAYDER G, 2021. Recent studies on applications of aquatic weed plants in phytoremediation of wastewater: a review article. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(1): 355–365.
- NELSON L S, SKOGERBOE J G, GETSINGER K D, 2001. Herbicide evaluation against giant salvinia. *Journal of Aquatic Plant Management*, 39: 48–53.
- OLIVER J D, 1993. A review of the biology of giant *Salvinia* (*Salvinia molesta* Mitchell). *Journal of Aquatic Plant Management*, 31: 227–231.
- OWENS C S, SMART R M, STEWART R M, 2004. Low temperature limits of giant *Salvinia*. *Journal of Aquatic Plant Management*, 42: 91–94.
- PANCHO J V, SOERJANI M, 1978. *Aquatic weeds of Southeast Asia: a systematic account of common Southeast Asian aquatic weeds*. Los Banos, Laguna, Philippines: University of the Philippines.
- PARSONS W T, CUTHBERTSON E G, 1992. *Noxious weeds of Australia*. Melbourne, Australia: Inkata Press.
- RAMACHANDRAN C P, 1960. The culture of *Mansonia* using an aquatic plant *Salvinia*. *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene*, 54(1): 6–7.
- ROOM P, 1990. Ecology of a simple plant-herbivore system: biological control of *Salvinia*. *Trends in Ecology & Evolution*, 5(3): 74–79.
- SCULTHORPE C D, 1967. *The biology of aquatic vascular plants*. London, UK: Edward Arnold Publications Limited.
- SHIMADA N, YAJIMA S, WATANABE Y, 1988. Improvement of water quality using *Salvinia molesta* (1): absorption of nitrogen and phosphorus by *Salvinia molesta*. *Technical Bulletin, Faculty of Horticulture, Chiba University*, 41: 15–21.
- SUKUMARAN D, 2013. Phytoremediation of heavy metals from industrial effluent using constructed wetland technology. *Applied Ecology and Environmental Services*, 1(5): 92–97.
- SUNDARESAN A, REDDY N, 1979. *Salvinia molesta* (Mitchell): a serious water weed in Fiji. *Fiji Agricultural Journal*, 41(2): 103–107.
- THOMAS K J, 1981. The role of aquatic weeds in changing the pattern of ecosystems in Kerala. *Environmental Conservation*, 8(1): 63–66.
- THOMAS P A, ROOM P M, 1986. Successful control of the floating weed *Salvinia molesta* in Papua New Guinea: a useful biological invasion neutralizes a disastrous one. *Environmental Conservation*, 13(3): 242–248.
- WELLS R, COFFEY B, LAUREN D, 1986. Evaluation of fluridone for weed control in New Zealand. *Journal of Aquatic Plant Management*, 24: 39–42.
- WHITEMAN J B, ROOM P M, 1991. Temperatures lethal to *Salvinia molesta* Mitchell. *Aquatic Botany*, 40(1): 27–35.

(责任编辑:陈晓雯)