

薇甘菊入侵扩散机制研究进展与改进思考

吴卉晶¹, 曾 辉^{1*}, 咎启杰²

(1. 北京大学深圳研究生院城市人居环境科学与技术重点实验室, 广东 深圳 518055; 2. 深圳市羊台山森林公园管理处, 广东 深圳 518033)

摘要: 从薇甘菊(*Mikania micrantha* H. B. K.)的入侵分布、入侵能力以及群落可侵入性等方面对其入侵机制研究进展进行了分析和总结。以往的研究工作没有重视对薇甘菊入侵过程的整体性研究、对入侵扩散影响因素分析、空间尺度约束影响分析,以及分析方法和手段的缺陷。因此,未来应重点开展薇甘菊入侵扩散过程重建及潜在危害区域预测、景观结构对薇甘菊入侵危害的影响等研究,并完善薇甘菊入侵扩散的动态监测网络及风险评估体系。

关键词: 薇甘菊; 入侵机制; 多时空尺度; 景观结构; 模型预测

中图分类号: Q948

文献标识码: A

文章编号: 1005-3395(2010)01-0101-08

Considerations on Some Issues in Research of the Invasion Mechanisms of the Exotic Weed, *Mikania micrantha*

WU Hui-jing¹, ZENG Hui^{1*}, ZAN Qi-jie²

(1. Key Laboratory for Environment and Urban Sciences, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055, China;

2. Yangtai Mountain Forest Park Administration of Shenzhen City, Shenzhen 518033, China)

Abstract: The research progresses in the invasion mechanisms of *Mikania micrantha* H. B. K. were summarized, including its distribution and damage, the invasiveness of this weed and the invasibility of native community. It was not pay attention to some areas in previous studies, such as the integrated research of its invasion process, analysis of influencing factors of the invasive spread, the effects of spatial scales, and the defects of analytical methods and technical means. Therefore, in the future, it should focus on the reconstruction of the invasion process and prediction of the potential regional spread, the influence of landscape structure in the invasion, as well as the improvement of the monitoring network and risk assessment system.

Key words: *Mikania micrantha*; Invasion process; Multiple temporal-spatial scales; Landscape structure; Modeling prediction

薇甘菊(*Mikania micrantha* H. B. K.)是原产于热带美洲的多年生草质或稍木质藤本^[1],属危害极强的世界性恶草。20世纪末,薇甘菊对内伶仃岛植被的严重危害引起国内各界对其入侵扩散能力的广泛关注^[2-3]。目前,薇甘菊已经迅速扩张至我国华南大部分省区,导致当地农田、果园受到严重危害,人工林系统持续减产,自然生态系统的稳定性和生物多样性遭受巨大威胁^[4]。

目前的研究不仅关注薇甘菊的化学及生物防

除^[5-6],还深入探讨薇甘菊的入侵及扩散机制,但并不系统,导致近十年来,尽管持续采取防治措施,投入大量治理资源,在薇甘菊入侵危害严重地区仍无法有效控制其快速蔓延的势头,难以扭转防除工作的被动局面。为此,本文综述薇甘菊入侵机制的研究进展,分析当前研究中存在的主要问题,提出未来研究的改进思路,为合理开展薇甘菊扩散机理及防除策略研究提供参考。

收稿日期: 2009-02-23

接受日期: 2009-07-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(40830747); 深圳市科技局“百人计划”及北京大学深圳研究生院院长科研基金项目(2007011)资助

* 通讯作者 Corresponding author, email: zengh@szpku.edu.cn

1 薇甘菊入侵机制研究

1.1 薇甘菊的入侵与扩散

薇甘菊在东南亚及太平洋地区的快速入侵与扩散,对当地的生物多样性构成严重威胁,造成社会、经济效益的巨大损失^[7]。薇甘菊最初作为橡胶园的土壤覆盖植物从原产地引入印尼,随后入侵到东南亚地区的各类农业生态系统中,并迅速波及到当地的自然植被生态系统;现今,薇甘菊已危及澳大利亚北部的狭窄海岸带,并在太平洋诸岛屿间扩散开来^[8]。

薇甘菊在我国大陆地区的入侵源于香港^[2]。19 世纪末香港进行引种栽培,到 20 世纪 80 年代,薇甘菊从香港逸生至广东等邻近区域,现已在我国珠江三角洲地区迅速传播扩散,且有进一步向周边蔓延的趋势^[3,7]。近期的实地调查表明,薇甘菊已扩散至广东以外的海南、云南等地^[7,9],台湾省中南部也受其侵害^[10]。薇甘菊已在香港广泛蔓延,常见于荒田、鱼塘周边、道路两旁以及低地树林边缘,分布面积约 $0.5 \sim 0.7 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。广东已在 35 个县市地区有发现,集中分布在深圳、珠海、东莞、惠州、中山等地,分布于海拔 50~200 m 的山谷、河溪两侧湿润地带,对多种生境类型均构成危害,如农田、果园、灌丛、人工林、次生林等,分布面积约 $4.7 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。云南的德宏州(潞西市、瑞丽市,梁河县、盈江县、陇川县)、保山市等 6 个县市有分布,以瑞丽市的危害较为典型,对柠檬、甘蔗、橡胶、麻竹、香蕉等作物的危害最为严重,郊野村庄周边的次生林、丢弃地也常出现成片死亡,分布面积 $0.88 \times 10^4 \text{ hm}^2$,危害面积 $0.35 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。海南的海口市、文昌县等地有分布,以小面积零星危害为主,主要危害丢弃地,特别是灌草丛、粗放式管理的农田、果园等,分布面积约 $0.20 \times 10^4 \text{ hm}^2$,危害面积约 $0.07 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。台湾全岛的 17 个县市均有分布,对疏于管理的果园、杂林、新造林地、农舍、棚架、清渠及道路两侧的植物均有危害,分布面积约 $5.6 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。

1.2 薇甘菊的入侵能力

薇甘菊具有强烈的入侵性,容易形成单优群落,这与其特殊的生物学特性及生态适应能力有关,并且在种间竞争中占据优势地位。

生物学特性及生态适应性 薇甘菊既能进行有性生殖,也能进行营养繁殖,极强的繁殖能力是其成功入侵扩散的基础。薇甘菊的果实能够借

助风力实现长距离扩散^[11];实生苗生长到一定阶段就迅速分枝并攀援缠绕周围植物,若无支持物则伏地生长形成地表覆盖^[12]。入侵环境不同,在维持种群繁衍的前提下,薇甘菊可以根据环境调整自身的繁殖策略^[13-14]。

薇甘菊的入侵能力还体现在生理及形态结构的适应性方面。薇甘菊属阳生植物,但弱光下有较高的光合量子利用效率和较低的光补偿点,其枝叶的形态及空间布局有利于获取更多的光能^[15-18]。此外,薇甘菊还通过根部形态的可塑性变化,在不同水分生境下扩张蔓延^[19]。

从种群动态变化来看,薇甘菊的入侵能力存在阶段性差异。薇甘菊通过土壤种子库实现种群补充,活力种子的数量分布特征及萌发能力对其种群更新有重要意义^[20];幼苗的定居和生长发育是薇甘菊种群维持过程的重要阶段,幼苗生长结构、生物量分配以及出生和死亡特征反映出其种群成熟过程中对环境的敏感程度^[17,21]。

从分子生态学角度探索薇甘菊的入侵能力也是当前的研究热点之一,一般认为丰富的遗传多样性是物种入侵扩张能力的有效标识^[22],但薇甘菊种间遗传多样性相对贫乏^[23],并受环境影响较大^[24]。其遗传物质的变异或表型性状的分化尚需深入论证^[8,23]。

种间竞争及化感作用 薇甘菊原产地为中、南美洲,由于大量昆虫、真菌类天敌的存在,未造成较大危害^[25]。但在入侵地区,薇甘菊生长迅速,通过阻挡其它植物的光照并缠绕植株,影响植物光合作用导致生长不良甚至死亡;且经常同其它伴生藤本通过盖幕作用危害附主植物。而且薇甘菊对土壤水分和营养也有很强的竞争能力,一旦定居成功,尤其是在适宜生境下,薇甘菊能通过营养繁殖提高资源利用效率,实现局地的大规模扩散^[15,26],致使入侵地区的本地植物难以获取必需的生存资源^[27-28]。

薇甘菊在种间竞争中,可向周围环境释放化感物质,通过雨水淋溶、根系分泌、枯枝叶分解而作用于其它植物,从而抑制它们的生长,为自身的生长创造更好的条件^[29]。薇甘菊的不同生长部位、枯枝叶提取液以及挥发油中都存在化感物质,对邻近植物、微生物均有抑制能力^[25,28,30]。对于一些潜在化感物质的危害作用还有待于进一步证实。

1.3 群落的可侵入性

可侵入性反映了群落抵抗外来物种定居和扩散的能力^[31-32],已有一些研究从生境与群落结构、干扰与胁迫的角度探讨本地群落抵抗薇甘菊入侵的能力。

薇甘菊入侵常发生于人为干扰明显的路边或丢荒地;多侵害低海拔山谷地段的次生群落和疏于管理的未成林地、幼林地或林相较差的疏林地。首先在路边、沟边的林缘或林窗,而后逐渐向林内侵蚀^[16]。薇甘菊入侵的植物群落中几乎所有的植物都受到不同程度的危害^[33],通常以小乔木和灌木为优势种组成的郁闭度很小,并有大量藤本植物伴生的群落危害最为严重。相反,群落越高,片层越丰富,盖度越小;物种越丰富,群落密度越大,个体受害就越小^[34-35]。

不仅地上植物群落结构对薇甘菊的入侵有影响,土壤微生物群落可能也有作用^[36-37]。薇甘菊入侵能够明显改变土壤微生物群落的结构和功能属性,包括微生物生物量、呼吸作用、碳源利用及养分供应,使土壤化学性质发生变化,以更有利于其生长传播,而本地物种对这种变化并不敏感。土壤微生物群落功能属性的改变程度可能是影响薇甘菊能否入侵成功的重要因素。

不同的干扰类型、频率以及强度都会对薇甘菊的入侵产生影响。经砍伐和火烧的休耕地上,可以明显地观测到薇甘菊对火干扰的适应以及火烧对其入侵的促进作用^[38]。而干扰同样增强群落抵抗入侵的能力,有研究表明,人为干扰下本地物种与薇甘菊在资源(光、水、养分等)分配的竞争中重新占据优势,群落的可侵入性随之降低^[39-40]。

此外,干扰及气候条件的变化,使水分、光照等资源要素的可利用性也呈现波动,对本地物种和薇甘菊的生长均产生重大影响。有学者曾研究水分和光照胁迫对薇甘菊生长的限制作用^[21,41],但忽略了同等条件下本地伴生和/或近源种对资源的获取能力,因而不足以判断资源胁迫对薇甘菊入侵成败的影响。胁迫作用还体现在本地物种释放化感物质抑制薇甘菊生长。已有研究表明,本地植物不适应薇甘菊的化感作用可能是其快速入侵成功的重要原因之一。同样的,本地植物在长期共存中,彼此已形成一定的适应性,某些物种释放的化感物质也会对作为外来物种的薇甘菊的生存造成胁迫^[42]。这对通过生态改造以提高本地群落抵抗薇甘菊入

侵的能力具有重大意义。

2 薇甘菊入侵机制研究中存在的主要问题

2.1 整体入侵过程研究薄弱

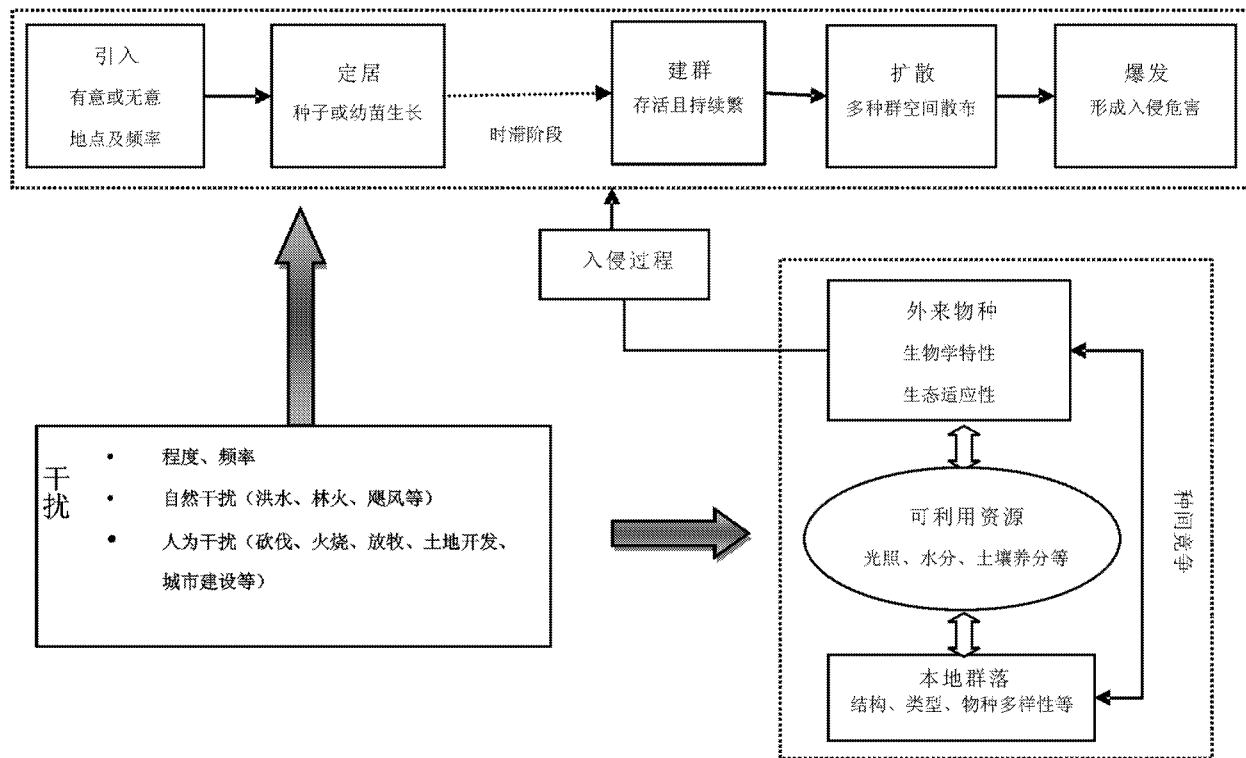
大多数外来植物引入后不易成活,少数能存活,只有极少数成为入侵物种,对本地生物多样性及生态系统功能造成消极影响^[43]。因此,外来物种入侵是一个复杂的生态过程^[8],需要经过引入、定居、建群、扩散、爆发等阶段^[44-45](图1)。外来物种从驯化到侵害性传播通常要经历较长的时滞阶段^[46],薇甘菊的入侵过程同样经历了这些阶段。时滞阶段可能涉及其对新生境的进化适应,包括入侵性的生活史特征进化,或者需要累积足够的遗传多样性以克服近交衰退对成功入侵的限制作用^[8]。进入到扩散、爆发阶段,涉及到本地群落可侵入性、远距离与区域间的迁移以及频繁的人类活动的交叉影响,入侵过程变得更为复杂。

现有的研究工作多从单一环节入手,研究薇甘菊的生物学特性或群落易感性对其入侵扩散的影响,缺乏对整体入侵过程的全盘把握。一方面,目前虽然能够追溯薇甘菊入侵扩散的发源地以及基本的传播路线,但对薇甘菊入侵初始阶段的基本情况尚不了解,这限制了对薇甘菊入侵成功关键因素的判别,导致其爆发机制难以明晰。另一方面,大量的研究工作集中于生化治理手段的论证,却忽视了预防措施对防止入侵危害扩大化的重要性。近年来,薇甘菊扩散蔓延的势头难以得到有效遏制,这与预防策略的不完善直接相关。薇甘菊入侵属于复杂的链式过程,今后的研究重点有必要向过程的两头延伸,为深入理解扩散机制并制定防除策略提供科学支持。

2.2 扩散影响因素研究的时空尺度涵盖不全

外来物种入侵过程与多时空尺度紧密相连,从基因流到全球气候变化,不同尺度的时空动态都会对入侵扩散过程产生影响^[47]。从种群及群落生态学分析薇甘菊的入侵能力、被入侵群落的易感性以及可利用资源(光、水、养分等)对二者的影响(图1),是当前薇甘菊入侵机制研究的核心思路。目前无论是更微观的分子生态,还是更宏观的景观生态都少有涉及,对薇甘菊入侵扩散影响因素分析不足。

从分子水平看,薇甘菊较广的生态适应性到底归因于同一基因型对不同环境应答产生的表型可

图 1 外来植物入侵过程及影响因素概念框图^[44-45]Fig. 1 A conceptual framework of plan invasion process and influencing factors^[44-45]

塑性,还是基于遗传变异的自然选择分化还有待于确证。由于薇甘菊的遗传多样性并不丰富,推测表型可塑性可能在其成功入侵和扩散中起关键作用,而且不同性状的表型可塑性可能以不同的机制影响入侵过程的不同阶段^[48]。从景观水平看,景观结构及变化同样对薇甘菊入侵的各阶段产生不同的影响。景观要素(斑块、廊道、基质)因为数量比例及空间配置的差异性形成多样的景观结构,它们直接作用于薇甘菊的扩散传播或通过影响本地群落特征间接加速或减缓其入侵进程^[45]。在薇甘菊危害严重的珠江三角洲地区,城市化过程引发的景观碎裂化及土地利用方式的持续变化是区域景观结构的显著特征,探讨这种特征结构对薇甘菊入侵扩散的影响无疑更具现实指导意义。

2.3 空间整体性研究没有受到关注

目前的管理措施主要是利用生化手段对薇甘菊危害严重地区进行跟踪清除,但是收效甚微。原因主要有两个方面:其一,对薇甘菊在局地尺度上的分布扩散、危害现状以及发展动态认识不足,空间信息的缺失导致地方管理资源的投入和分配不明确,难以形成体系完整的防除策略。其二,对于薇甘菊适宜或难以入侵的生境特征分析不够,大范

围的观察分析仅能提供定性描述,而实验研究多局限于薇甘菊入侵严重的典型地段,其结论很难推广至更大的空间尺度,无法预测薇甘菊的潜在入侵分布,限制了预防入侵蔓延的可能性。薇甘菊的入侵过程同时作用于多个空间尺度,而鉴于生态系统内不同尺度上各组分间非线性关系和反馈作用的普遍性,将大尺度的空间格局与过程和现有积累丰富的小尺度研究整合起来已成必然。

空间尺度选择的局限性同样不利于揭示薇甘菊快速扩散的发生机制。不同的空间尺度上占主导地位的格局与过程是不同的,小范围的观察着重研究薇甘菊的生物学特性、种间相互作用以及环境资源分配所造成的微环境差异对其入侵的影响;但是在更大的空间尺度上,地形、水文、气候因子的差异,尤其是人类活动持续作用的土地利用方式变化及环境污染造成的资源分配格局的变动都可能更好地解释薇甘菊的入侵扩散过程。

2.4 研究方法与技术手段单一

薇甘菊入侵机制的研究成果主要来源于野外观察与控制实验的结论。但是,对于多时空尺度上的薇甘菊入侵过程,现有的研究方法和技术手段难以有效监控。首先,对薇甘菊入侵初始阶段的认识

不足,无法准确反映薇甘菊的入侵过程;其次,观察及实验方法只能对薇甘菊的入侵现状进行解释,获得的结论所包含的深层信息尚未应用到扩散预测的研究中去。

薇甘菊分布面积较广且年际变化明显,可以借助高空间分辨率或高光谱分辨率的遥感影像数据,探讨薇甘菊覆盖地区空间制图的可行性。目前已有利用高分辨率遥感影像成功进行物种识别^[49-50],而且香港地区已经开展了薇甘菊的遥感制图尝试^[51]。对于薇甘菊的潜在分布预测,有必要将经验数据和空间模型有效的结合起来,以弥补当前研究方法在大尺度操作上的不足。有关薇甘菊入侵扩散机制的研究积累直接为模型设计提供支持;与此同时,模型操作的可重复性以及准确性评价又进一步加深对发生机制的理解。

3 入侵扩散机制研究的改进思考

3.1 入侵扩散过程的重建

入侵物种在入侵区域的种群扩散是其带来风险的最根本问题,也是其造成危害的最主要原因^[52],而薇甘菊的分布区域一直处于变化当中。因此,重建薇甘菊的入侵扩散过程,有助于掌握其在不同时空尺度上的扩散模式,并为深入理解其危害爆发机制创造条件。由于人们对薇甘菊危害的关注时间不长,研究积累不多,野外观测数据不足以反映薇甘菊入侵的历史过程,但以下两种途径有望突破:(1)从分子水平分析薇甘菊种群遗传多样性地区差异的成因,其入侵不同阶段的遗传特征可能存在显著不同,因而可以从基因流反推入侵的发生时间、各阶段持续时间、初始引入的频率特征以及地区间的传播路径;(2)从景观水平结合农林部门的调查数据,整理历史时期的高精度航空影像以及高光谱遥感影像,发掘薇甘菊分布区域的空间纹理或光谱特征,提取其空间覆盖信息,实现入侵区域的时序重建。

在实现薇甘菊入侵扩散过程重建的同时,从生物地理学研究其入侵扩散的加速机制^[53]。天敌逃避、入侵能力进化、空白生态位、资源波动等有关外来植物入侵成功的假说在特定的影响要素组合条件下各具解释性,可通过实验设计定量对比薇甘菊在原产地与引入地的分布与危害状况,为筛选出更具针对性的影响机制提供一种可能的途径。

3.2 强化景观与区域尺度上的时空分异研究

景观结构能够同时影响薇甘菊的扩散进程以及本地群落抵御入侵的能力,并在入侵的不同阶段发挥不同作用。景观结构对外来物种扩散的影响是当前入侵生态研究的热点。未来应着重考虑几个方面:(1)景观结构对薇甘菊潜在传播扩散的影响,通常认为景观碎裂化会加速外来物种入侵,不同的景观连接度水平可能会对薇甘菊的种子散布及个体攀援扩散产生不同的加速度;(2)景观结构对薇甘菊扩散能力的影响,入侵植物种子的长距扩散方式虽然成功概率很低,但对其区域入侵成功产生决定作用^[54-55],因此适宜生境的空间组合方式可能对薇甘菊的种子散布及随后定居产生重大影响;(3)人类活动导致的景观结构变化对薇甘菊入侵扩散的影响,人类活动既包括土地利用方式的长期变化,也包括离散的干扰事件,不同强度的人类活动导致的景观结构变化必然会对薇甘菊入侵的分布格局产生复杂的作用,从而影响其入侵危害的发展趋势。

3.3 加强薇甘菊潜在危害区域的预测研究

为保护本地生物多样性并维持生态系统功能的正常运转,必须对薇甘菊的入侵危害进行有效控制。面对薇甘菊的快速入侵,当前管理工作的最大挑战就在于如何实现人力、物力、财力等防除资源的合理分配。相对于末端治理的清除措施,若能对薇甘菊潜在危害区域进行预测,则可以制定出优先排序的防除策略,不仅可以优化资源配置,还可以重点保护入侵威胁较大的多样性热点地区以防止危害扩大化。因此,对薇甘菊危害严重区域,在整合野外采样数据及以往研究的基础上,进行空间建模研究已成当务之急。而要把空间模型的预测结果作为决策依据,就必须重点关注其有效性问题:(1)空间模型作为薇甘菊入侵过程的抽象表达,参数设置应该体现薇甘菊与各种生物、非生物因素的相互作用;(2)用于建模及参数估计的观测数据应该与模型验证数据相独立,预测结果的置信度不能脱离模型的前提假设,应明确其适用范围;(3)如果模型结果很好地符合观测实际,应加大野外观察及实验的投入,揭示隐藏在统计相关性背后的因果关系,最终明确薇甘菊入侵的发生机理。

3.4 薇甘菊入侵扩散的动态监测及风险评估

在积极推进理论和方法研究的同时,对薇甘菊

入侵扩散的动态监测和风险评估不能放松。模型预测方法对于优化防除策略有着重要意义, 准确度高的模型能够直观地反映出薇甘菊入侵危害的发生范围及危害程度。影响薇甘菊入侵的各种因素处于动态变化中, 建模过程中还存在各种不确定因素, 因此模型研究无法完全取代实际的监测网络体系建设。模型的预测结果也只能说明薇甘菊入侵的发生风险, 在整个防除体系中, 风险评估还需考虑更多的实际因素, 如化学药剂投放的环境风险、释放天敌或进行菟丝子绞杀的生态风险等等, 具体的防除方案必然是风险与效益相互权衡的结果。

薇甘菊入侵危害日益严重, 必须尽快制定出更加行之有效的防除策略, 充分认识到薇甘菊的入侵扩散是发生于多时空尺度的复杂动态过程, 深化和拓展已有的研究思路, 从而为科学管理决策提供支撑。薇甘菊入侵过程具有整体性和阶段性, 入侵的初始阶段是当前研究的薄弱环节, 实现薇甘菊入侵过程重建将有助于揭示最终爆发危害形成的原因; 影响薇甘菊入侵成功的因素具有多尺度特征, 有必要引入分子生态学和景观生态学研究; 为了落实具体的防除措施, 区域空间尺度的选择更为重要, 因而需要集中探讨景观结构对薇甘菊入侵成功的影响; 利用模型手段有效预测薇甘菊潜在危害区域, 并采取防治措施是控制其扩散蔓延的重要途径。但模型应用具有诸多不确定因素加上风险预测结论尚不完全, 因此薇甘菊入侵扩散的动态监测网络以及风险评估体系仍有待于进一步完善。

参考文献

- [1] Zhang L L(张玲玲), Han S C(韩诗畴), Li L Y(李丽英), et al. Progress in studies on the control of invasive weed *Mikania micrantha* H. B. K. [J]. *J Trop Subtrop Bot(热带亚热带植物学报)*, 2006, 14(2): 162-168.(in Chinese)
- [2] Wang B S(王伯荪), Liao W B(廖文波), Zan Q J(曾启杰), et al. The spreads of *Mikania micrantha* in China [J]. *Acta Sci Nat Univ Sunyatseni(中山大学学报: 自然科学版)*, 2003, 42(4): 47-50.(in Chinese)
- [3] Zhang L Y, Ye W H, Cao H L, et al. *Mikania micrantha* H. B. K. in China — An overview [J]. *Weed Res*, 2004, 44: 42-49.
- [4] Feng H L(冯慧玲), Cao H L(曹洪麟), Liang X D(梁晓东), et al. The distribution and harmful effect of *Mikania micrantha* in Guangdong [J]. *J Trop Subtrop Bot(热带亚热带植物学报)*, 2002, 10(3): 263-270.(in Chinese)
- [5] Cock M J W. Potential biological control agents for *Mikania micrantha* H.B.K. from the Neotropical region [J]. *Trop Pest Manag*, 1982, 28: 242-245.
- [6] Liang Q Y(梁启英), Zan Q J(曾启杰), Wang Y J(王勇军), et al. Integrated control techniques of the invasive species *Mikania micrantha* [J]. *For Pest Dis ease(中国森林病虫害)*, 2006, 25: 26-30.(in Chinese)
- [7] Zan Q J(曾启杰), Wang Y J(王勇军), Wang B S(王伯荪), et al. The distribution and harm of the exotic weed *Mikania micrantha* [J]. *Chin J Ecol(生态学杂志)*, 2000, 19(6): 58-61.(in Chinese)
- [8] Wang B S(王伯荪), Wang Y J(王勇军), Liao W B(廖文波), et al. The Invasion Ecology and Management of Alien Weed *Mikania micrantha* H. B. K. [M]. Beijing: Science Press, 2004: 76-113.(in Chinese)
- [9] Du F(杜凡), Yang Y M(杨宇明), Li J Q(李俊清), et al. A review of *Mikania* and the impact of *M. micrantha* (Asteraceae) in Yunnan [J]. *Acta Bot Yunnan(云南植物研究)*, 2006, 28: 505-508.(in Chinese)
- [10] Jiang M Y(蒋慕琰), Xu L M(徐玲明), Chen F Y(陈富永). Confirmation on the presence of *Mikania micrantha* Kunth in Taiwan [J]. *Plant Protect Bull(植物保护学会会刊)*, 2002, 44: 61-65.(in Chinese)
- [11] Hu Y J(胡玉佳), But P P-H(毕培曦). A study on life cycle and response to herbicides of *Mikania micrantha* [J]. *Acta Sci Nat Univ Sunyatseni(中山大学学报: 自然科学版)*, 1994, 33(4): 88-95.(in Chinese)
- [12] Zhang W Y(张炜银), Li M G(李鸣光), Wang B S(王伯荪), et al. Seed production characteristics of an exotic weed *Mikania micrantha* [J]. *J Wuhan Bot Res(武汉植物学研究)*, 2003, 21(2): 143-147.(in Chinese)
- [13] Hu Y J(胡玉佳), But P P-H(毕培曦). Morphological and structural features of *Mikania micrantha* flower [J]. *Acta Sci Nat Univ Sunyatseni(中山大学学报: 自然科学版)*, 2000, 39(6): 123-125.(in Chinese)
- [14] Yang Q H(杨期和), Feng H L(冯惠玲), Ye W H(叶万辉), et al. An investigation of the effects of environmental factors on the flowering and seed setting of *Mikania micrantha* H. B. K. (Compositae) [J]. *J Trop Subtrop Bot(热带亚热带植物学报)*, 2003, 11(2): 123-126.(in Chinese)
- [15] Wen D Z(温达志), Ye W H(叶万辉), Feng H L(冯惠玲), et al. Comparison of basic photosynthetic characteristics between exotic invader weed *Mikania micrantha* and its companion species [J]. *J Trop Subtrop Bot(热带亚热带植物学报)*, 2000, 8(2): 139-146.(in Chinese)
- [16] Huang Z L(黄忠良), Cao H L(曹洪麟), Liang X D(梁晓东), et al. The growth and damaging effect of *Mikania micrantha* in different habitat [J]. *J Trop Subtrop Bot(热带亚热带植物学报)*, 2000, 8(2): 131-138.(in Chinese)
- [17] Zhang W Y(张炜银), Wang B S(王伯荪), Li M G(李鸣光), et al. The branching pattern and biomass of *Mikania micrantha* shoot modules in *Acacia confuse* community and *Miscanthus sinensis* community [J]. *Acta Phytoecol Sin(植物生态学报)*, 2002, 26: 346-350.(in Chinese)
- [18] Zu Y G(祖元刚), Zhang Z H(张衷华), Wang W J(王文杰), et al. Different characteristics of photosynthesis in stems and leaves of

- Mikania micrantha* [J]. J Plant Ecol(植物生态学报), 2006, 30: 998-1004.(in Chinese)
- [19] Hong L(洪岚), Pan X P(潘小平), Hu X Y(胡晓颖), et al. A comparison study on the root structure of the weeds *Mikania micrantha* [J]. J Chin Electron Microsc Soc(电子显微学报), 2006, 25: 259-260.(in Chinese)
- [20] Zhang W Y(张炜银), Li M G(李鸣光), Zang R G(臧润国), et al. Dynamics of seeds bank of *Mikania micrantha* populations [J]. J Wuhan Bot Res(武汉植物学研究), 2005, 23(1): 49-52.(in Chinese)
- [21] Yang F J(杨逢建), Zhang Z H(张衷华), Wang W J(王文杰), et al. The effect of water stress on the growth yield of invasion plants *Mikania micrantha* of seedlings [J]. Chin Bull Bot(植物学通报), 2005, 22: 673-679.(in Chinese)
- [22] Hamrick J L, Godt M J W. Allozyme diversity in plant species [M]// Plant Population Genetics, Breeding and Genetic Resources. Sunderland, MA: Sinauer, 1990: 43-63.
- [23] Chen G P(陈国培). The molecular ecology of the exotic weed *Mikania micrantha* [D]. Guangzhou: Sun Yat-Sen University, 2005: 80-82.(in Chinese)
- [24] Li J M(李钧敏), Dong M(董鸣), Zhong Z C(钟章成). Population genetic differentiations in the invasive plant *Mikania micrantha* in China [J]. J Plant Ecol(植物生态学报), 2007, 31(4): 680-688.(in Chinese)
- [25] Shao H, Peng S L, Wei X Y, et al. Potential allelochemicals from an invasive weed *Mikania micrantha* H. B. K. [J]. J Chem Ecol, 2005, 31(7): 1657-1668.
- [26] Swamy P S, Ramakrishnan P S. Weed potential of *Mikania micrantha* H. B. K. and its control in fallows after slash-and-burn agriculture (jhum) in northeastern India [J]. Weed Res, 1987, 27: 397-403.
- [27] Ismail B S, Mah M S. Effects of *Mikania micrantha* H. B. K. on germination and growth of weed species [J]. Plant Soil, 1993, 157: 107-113.
- [28] Zhang M X(张茂新), Ling B(凌冰), Kong C H(孔垂华), et al. Allelopathic potential of volatile oil from *Mikania micrantha* [J]. Chin J Appl Ecol(应用生态学报), 2002, 13: 1300-1302.(in Chinese)
- [29] Ismail B S, Kumar A. Effects of aqueous extracts and decomposition of *Mikania micrantha* H. B. K. debris on selected agronomic crops [J]. Weed Biol Manag, 2002, 2: 31-38.
- [30] Shao H(邵华), Peng S L(彭少麟), Zhang C(张弛), et al. Allelopathic potential of *Mikania micrantha* [J]. Chin J Ecol(生态学杂志), 2003, 22(5): 62-65.(in Chinese)
- [31] Xu K Y(许凯扬), Ye W H(叶万辉). Community invisibility and environmental stress [J]. J Trop Subtrop Bot(热带亚热带植物学报), 2003, 11(1): 75-82.(in Chinese)
- [32] Mandryk A M, Wein R W. Exotic vascular plant invasiveness and forest invisibility in urban boreal forest types [J]. Biol Invasions, 2006, 8: 1651-1662.
- [33] Zan Q J(詹启杰), Wang B S(王伯荪), Wang Y J(王勇军), et al. The harm caused by *Mikania micrantha* and its control by *Cuscuta campestris* [J]. Acta Phytoecol Sin(植物生态学报), 2003, 27: 822-828.(in Chinese)
- [34] Zhou X Y(周先叶), Wang B S(王伯荪), Li M G(李鸣光), et al. Correlation analysis on the damage of *Mikania micrantha* to plant communities in Neilingding Island of Guangdong Province, China [J]. Chin J Appl Ecol(应用生态学报), 2005, 16: 350-354.(in Chinese)
- [35] Shao Z F(邵志芳), Zhao H B(赵厚本), Qiu S S(邱少松), et al. Study on the most harmful exotic plants in Shenzhen city [J]. Ecol Environ(生态环境), 2006, 15: 587-593.(in Chinese)
- [36] Li W H, Zhang C B, Jiang H B, et al. Changes in soil microbial community associated with invasion of the exotic weed, *Mikania micrantha* H. B. K. [J]. Plant Soil, 2006, 281: 309-324.
- [37] Li W H, Zhang C B, Gao G J, et al. Relationship between *Mikania micrantha* invasion and soil microbial biomass, respiration and functional diversity [J]. Plant Soil, 2007, 296: 197-207.
- [38] Swamy P S, Ramakrishnan P S. Effect of fire on growth and allocation strategies of *Mikania micrantha* under early successional environments [J]. J Appl Ecol, 1988, 25: 653-658.
- [39] Li X C(李小川), Yin Z Y(殷作云), He L P(何立平), et al. The effect of intervening artificially *Mikania micrantha* population [J]. J Fujian Coll For(福建林学院学报), 2003, 23(3): 214-218.(in Chinese)
- [40] Lian J Y, Ye W H, Cao H L, et al. Effects of periodic cutting on the structure of the *Mikania micrantha* community [J]. Bot Stud, 2006, 47(2): 185-190.
- [41] Liao F Y(廖飞勇), Xie Y(谢瑛), He P(何平), et al. The effect of different light intensity on the growth and photosystem of *Mikania micrantha* Kunth [J]. Life Sci Res(生命科学研究), 2003, 7: 355-359.(in Chinese)
- [42] Zhao H B(赵厚本), Shao Z F(邵志芳), Yang Y B(杨义标), et al. Allelopathy of several common plants in south China on *Mikania micrantha* [J]. Ecol Environ(生态环境), 2007, 16: 130-134.(in Chinese)
- [43] Mack R N. Cultivation fosters plant naturalization by reducing environmental stochasticity [J]. Biol Invasions, 2000, 2: 111-122.
- [44] Andow D A, Kareiva P M, Simon A, et al. Spread of invading organisms [J]. Landscape Ecol, 1990, 4: 177-188.
- [45] With K A. The landscape ecology of invasive spread [J]. Conserv Biol, 2002, 16(5): 1192-1203.
- [46] Novak S J. The role of evolution in the invasion process [J]. PANS, 2007, 104(10): 3671-3672.
- [47] Mooney H, Hobbs R J. Invasive species in a changing world [M]. Washington, DC: Island Press, 2000: 115-140.
- [48] Geng Y P(耿宇鹏), Zhang W J(张文驹), Li B(李博), et al. Phenotypic plasticity and invasiveness of alien plants [J]. Biodiv Sci(生物多样性), 2004, 12: 447-455.(in Chinese)
- [49] Underwood E, Ustin S, Dipietro D. Mapping nonnative plants using hyperspectral imagery [J]. Remote Sens Environ, 2003, 86: 150-161.
- [50] Pengra B W, Johnston C A, Loveland T R. Mapping an invasive

- plant, *Phragmites australis*, in coastal wetlands using the EO-1 Hyperion hyperspectral sensor [J]. *Remote Sens Environ*, 2007, 108: 74–81.
- [51] Shi W Z, Liu K F. A fuzzy topology of computing the interior, boundary, and exterior of spatial objects quantitatively in GIS [J]. *Comput Geosci*, 2007, 33: 898–915.
- [52] Wang R(王瑞). Historical reconstruction of invasion and expansion and potential spread of some threatening invasive alien species in China [D]. Beijing: Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, 2006: 1–45.(in Chinese)
- [53] Hierro J L, Maron J L, Callaway R M. A biogeographical approach to plant invasions: The importance of studying exotics in their introduced and native range [J]. *J Ecol*, 2005, 93: 5–15.
- [54] Nehrbass N, Winkler E, M Ilerov J, et al. A Simulation model of plant invasion: Long-distance dispersal determines the pattern of spread [J]. *Biol Invasions*, 2007, 9: 393–395.
- [55] Pande A, Williams C L, Lant C L, et al. Using map algebra to determine the mesoscale distribution of invasive plants: the case of *Celastrus orbiculatus* in Southern Illinois, USA [J]. *Biol Invasions*, 2007, 9: 419–431.