

## ◆综述类◆

## 中国红树林区互花米草入侵生态效应及防治策略\*

陈静云<sup>1,2</sup>, 黄昊<sup>1,2</sup>, 张宜辉<sup>1,2\*\*</sup>

(1. 厦门大学滨海湿地生态系统教育部重点实验室, 福建厦门 361102; 2. 厦门大学环境与生态学院, 福建厦门 361102)

**摘要:**红树林是滨海湿地生态系统的重要组成部分。外来物种互花米草(*Spartina alterniflora*)通过人工引种和自然传播,已扩散到我国包括红树林、盐沼和海草床等乡土植物群落以及光滩,对滨海湿地生态系统的健康和稳定造成了巨大的威胁。2022年以来,我国在全国范围开展大规模的互花米草除治工作,位于南方滨海湿地的红树林是清除互花米草的重点区域。然而,目前针对红树林区互花米草入侵机制的研究还不够系统深入,相关研究范式和防治策略大多借鉴于其他类型的滨海湿地生态系统。本文归纳了互花米草入侵中国红树林区后产生的主要生态效应,以及中国红树林区采取的几类主要互花米草防治策略,讨论了未来中国红树林区互花米草相关研究的空白和热点,以期为中国红树林区互花米草防治及红树林生态恢复和保护工作提供借鉴。

**关键词:**红树林;互花米草;生物入侵;防治策略

中图分类号:X176 文献标识码:A 文章编号:1002-7378(2024)03-0207-08

DOI:10.13657/j.cnki.gxkxyb.20241108.015

红树林是位于热带和亚热带潮间带的木本植物群落<sup>[1]</sup>,具有护岸护堤、净化水体、促淤造陆及固碳等作用,具有极高的单位面积生产力<sup>[2]</sup>。我国的红树林主要分布在东南沿海地区,其中天然红树林主要分布在海南、广西、广东、福建及港澳台地区,而浙江的红树林为人工引种<sup>[3]</sup>。20世纪50年代以来,受人类活动的干扰,我国红树林面积急剧下降。虽然后续开展了大规模的红树林管理和保护工作,成功遏制了红树林面积逐步减少的趋势,但是我国红树林仍存在结构简单、林分均质的问题<sup>[4,5]</sup>。在全球变化和人类活动

的影响下,生物入侵显著地威胁着红树林生态系统的健康稳定,影响了红树林生态系统的关键生态功能<sup>[6,7]</sup>。红树林系统植物物种较少,群落结构单一,系统稳定性较差,被入侵后难以恢复<sup>[8,9]</sup>。因此,关于红树林区外来物种的入侵机制和防治策略也越来越受到重视。

互花米草(*Spartina alterniflora*)原产北美洲大西洋沿岸,是一种多年生的禾本科植物,主要生长于受潮汐影响的滨海湿地滩涂,具有较强的环境适应能力,是重要的生态系统工程师<sup>[10]</sup>。互花米草有无性

收稿日期:2024-07-22

修回日期:2024-08-09

\* 国家自然科学基金项目(32025026,31971500)资助。

【第一作者简介】

陈静云(2000—),女,在读硕士研究生,主要从事群落生态学研究,E-mail:2219214158@qq.com。

【\*\*通信作者简介】

张宜辉(1975—),男,教授,主要从事红树林生态学与生物入侵研究,E-mail:zyh@xmu.edu.cn。

【引用本文】

陈静云,黄昊,张宜辉. 中国红树林区互花米草入侵生态效应及防治策略[J]. 广西科学院学报, 2024, 40(3): 207-213, 222.

CHEN J Y, HUANG H, ZHANG Y H. Ecological Effects and Control Strategies of *Spartina alterniflora* Invasion in Mangroves of China [J].

Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2024, 40(3): 207-213, 222.

和有性两种繁殖策略,无性繁殖主要通过根状茎克隆生长维持种群更新,而有性繁殖主要通过种子繁殖来实现长距离的传播和扩散<sup>[11]</sup>。经过自然传播和人工引种,互花米草已经扩散到全球多个河口与海岸地区,成为全球滨海湿地生态系统最典型的入侵植物<sup>[11,12]</sup>。我国于1979年从美国引入互花米草<sup>[13]</sup>,经过40多年的扩散,互花米草自北向南已经广泛入侵到我国东南沿海的红树林生境<sup>[14,15]</sup>,抑制了乡土红树林植物的自然更新,改变了红树林区的生境类型,对红树林生态系统的结构和功能造成了严重的威胁<sup>[16-18]</sup>。

2022年以来,我国在全国范围内开展了大规模的互花米草防治工作,引起广泛关注<sup>[19]</sup>。红树林作为我国滨海湿地的重要组成部分,互花米草入侵严重,成为清除互花米草的重点区域。然而目前针对红树林区互花米草入侵机制的研究还不够系统深入,相关研究范式和互花米草的防治策略大多借鉴于其他类型的滨海湿地生态系统。本文主要关注互花米草对中国红树林湿地关键组分及生态过程的影响,从乡土红树植物、动物群落和食物网、土壤微生物类群、土壤理化性质及生物地球化学循环过程几个主要方面,分析互花米草入侵中国红树林区后所造成的主要生态效应以及中国红树林区采取的几类主要互花米草防治策略,讨论相关研究空白,并提出未来中国红树林区互花米草的潜在研究热点,以期为互花米草大规模清除后的中国红树林区生态恢复和保护工作提供借鉴。

## 1 互花米草在红树林区的生态效应

### 1.1 互花米草对乡土红树植物的影响

互花米草对红树林区最直接的威胁是对乡土红树林植物的竞争排斥。互花米草和乡土红树林植物的适宜生境重合,并且相比于乡土红树林植物,互花米草在具备更快繁殖扩散能力的同时,兼具较强的耐水淹和盐胁迫的能力<sup>[17]</sup>。互花米草对红树林植物适宜生态位的抢占和对红树林植物幼苗地上部分的遮阴,是抑制乡土红树林植物幼苗自然更新和生长的主要因素<sup>[16,20]</sup>。然而互花米草与乡土红树林植物相互作用机制比较复杂,种间相互作用强度和方向可能会由于环境的不同而发生改变<sup>[21]</sup>。例如,互花米草在中国红树林区的入侵程度随纬度的降低而减缓<sup>[15]</sup>。沿纬度幼苗移植研究发现,互花米草对乡土红树林植物幼苗在不同纬度下的竞争强度存在差异,相比在中亚热带(福建宁德)

和热带北缘(广东雷州),互花米草在南亚热带(福建云霄)对红树林植物幼苗的抑制作用最大<sup>[22]</sup>。另外,盐度和潮位的变化也会影响互花米草与乡土红树林植物间的相互作用<sup>[16,17]</sup>,例如在漳江口中游的中盐度生境下,互花米草对乡土红树林植物秋茄(*Kandelia obovata*)幼苗表现出显著的竞争抑制作用,但在下游高盐度生境下却促进了秋茄幼苗的存活<sup>[16]</sup>。此外,红树林植物对互花米草的入侵也有一定的生物抵抗性,成年红树林植物的遮阴作用限制了互花米草向红树林生境内的扩张,但人类活动的干扰则可能削弱红树林对互花米草入侵的抵抗作用<sup>[23,24]</sup>。互花米草对乡土红树林植物的抑制还可能会促进其他外来红树林植物的入侵,例如在互花米草入侵和海平面上升的耦合作用下,存在外来速生红树林植物无瓣海桑(*Sonneratia apetala*)取代乡土红树林植物的风险<sup>[17,18]</sup>。

### 1.2 互花米草对红树林区动物群落及食物网的影响

互花米草的入侵不仅改变了红树林区不同动物类群的群落结构和行为模式,而且也改变了红树林群落的食物网结构。与红树林生境相比,互花米草生境中多毛类动物的丰度和优势种有显著的不同<sup>[25]</sup>。互花米草密集的地下根茎也改变了红树林蟹类挖掘洞穴的复杂程度,削弱了大型底栖动物对红树林生境的生物扰动作用<sup>[26]</sup>。互花米草的存在也可能降低红树林生态系统对鸟类的适宜性,Chen等<sup>[27]</sup>比较了湛江红树林湿地不同生境下鸟类的多样性,发现互花米草入侵可能会减少鸟类食物资源并增加鸟类栖息的难度,从而影响鸟类的多样性和丰度。入侵到中国红树林区后,互花米草也逐步成为红树林生态系统大型底栖动物新的食物来源,甚至是主要食物来源<sup>[28]</sup>。Feng等<sup>[29]</sup>调查了互花米草入侵对闽江口、湄洲湾和漳江口3个红树林区大型底栖动物食性的影响,结果发现互花米草的碎屑占据了互花米草群落优势大型底栖动物有机碳源的80%以上。在漳江口红树林湿地,互花米草对鱼类的营养贡献甚至高于底栖微型藻类、颗粒有机物和乡土红树林植物等主要食物来源<sup>[30]</sup>。

### 1.3 互花米草对红树林区土壤微生物的影响

在红树林区,互花米草通过改变植被类型和释放根际分泌物来影响土壤微生物群落结构。例如互花米草主要通过占据无植被光滩和取代原生红树林,改变了九龙江口微型真核生物的群落组成<sup>[31]</sup>。类似的研究发现,互花米草的入侵改变了漳江口红树林区土壤细菌群落结构,但没有改变红树林区微生物的多样性<sup>[32]</sup>。而郑洁等<sup>[33]</sup>研究闽江口红树林湿地不同生

境下根际土壤微生物时发现,互花米草入侵后的红树林群落土壤革兰氏阳性细菌、真菌等微生物含量增加,革兰氏阴性菌、放线菌等类群减少,并且红树林-互花米草混生群落中土壤微生物多样性低于红树林群落。

#### 1.4 互花米草对土壤理化性质及碳氮循环的影响

红树林土壤是支撑红树林生态系统基本功能的重要媒介和动力来源,不仅支撑了陆海交界面的物质循环,而且也承载了红树林湿地绝大部分的碳汇功能<sup>[34]</sup>。互花米草对红树林区的入侵,不仅显著改变了红树林区土壤的基本性质,而且还影响了红树林区物质循环的关键过程。张祥霖等<sup>[35]</sup>研究表明,互花米草的入侵降低了漳江口红树林湿地土壤有机碳、土壤微生物碳氮含量以及土壤蔗糖酶与磷酸酶的活性,导致红树林群落土壤的退化。郑洁等<sup>[33]</sup>也发现红树林生境的土壤质量优于互花米草入侵生境的土壤。但是在植物生产力较低的生境,如稀疏红树林湿地和光滩,互花米草凭借其密集的地表和地下生物学特征,可以拦截和吸附沉积物,增加土壤对有机碳和氮的富集,起到改善土壤质量的作用<sup>[36]</sup>。但从另一方面来看,互花米草对沉积物的拦截也加剧了红树林湿地土壤重金属的富集,增加了红树林湿地重金属污染的生态风险<sup>[37]</sup>。例如,黄央央等<sup>[38]</sup>发现漳江口互花米草群落沉积物中有机碳和总氮的含量远高于无植被光滩;陈权等<sup>[39]</sup>在湛江红树林湿地发现,互花米草的入侵显著增加了红树林湿地沉积物中 Cr、Cu、Ni、Zn 和 Mn 等重金属元素的含量。

碳、氮等营养物质的循环也一直是红树生态系统的研究热点<sup>[40,41]</sup>,互花米草的入侵显著改变了红树林湿地的碳、氮循环,影响了红树林湿地土壤的碳、氮固存能力。Gao 等<sup>[42]</sup>发现互花米草入侵会改变红树林土壤温室气体 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 的排放,从而影响红树林湿地的碳循环过程。陈桂香等<sup>[43]</sup>发现互花米草入侵降低了红树林湿地土壤有机碳含量和有机碳储量,增加了红树林湿地水溶性有机碳含量。Cui 等<sup>[44]</sup>也发现互花米草可能通过积累活性有机碳来改变土壤有机碳的稳定性,从而影响红树林的碳汇功能。红树林湿地的氮循环过程受互花米草入侵和氮负荷的共同调控<sup>[45]</sup>,但是互花米草的入侵显著改变了红树林湿地沉积物中的反硝化作用,因此表现出较低的氮保留和较高的氮损失<sup>[46]</sup>,严重威胁了红树林湿地氮库的稳定性。

在全球气候变化和人类活动加剧的背景下,互花

米草对中国红树林区的入侵深刻改变了红树林湿地的原生环境和关键生态过程,降低了红树林生态系统结构和功能的稳定性,削弱了红树林生态系统抵御各类生态风险的能力。因此,在红树林区开展互花米草的有效治理成为红树林保护和修复的重点任务。

## 2 中国红树林区互花米草的防治策略

互花米草的繁殖方式包括种子的有性繁殖和根茎或营养片段的无性繁殖<sup>[11]</sup>,因此防治和管控互花米草的基本原理是单一或同时控制互花米草的有性繁殖和无性繁殖<sup>[47,48]</sup>。目前治理互花米草的方法可以分为物理、化学、生物和综合防治四大类<sup>[49]</sup>。这四类方式在中国红树林区的互花米草防治中均有采用。

物理防治方法,如刈割和翻耕,其优点是直接且快速。但这类防治方式存在清除效率较低的问题,刈割和翻耕的时间和频率也会影响互花米草的防治效果<sup>[50,51]</sup>。谭芳林等<sup>[52]</sup>在福建泉州治理互花米草时发现,在互花米草抽穗期前后(6—7月)进行刈割可以显著降低互花米草株高和密度,但如果在成熟期对互花米草进行刈割反而能促进互花米草的再生。而黄丽<sup>[53]</sup>在漳江口红树林湿地开展的刈割实验则发现,多次刈割可能会提高互花米草根部的腋芽数量,促进互花米草根系的生长。因此,单一的物理防治方法更适合互花米草入侵红树区初期或在入侵程度较轻的区域使用<sup>[47,48]</sup>。

化学防治互花米草中较常采用的方法是施加草甘膦和咪唑烟酸等除草剂,并且这些方法也被证实对互花米草有除治效果<sup>[47,48]</sup>。莫雪等<sup>[54]</sup>在漳江口红树林湿地验证咪唑烟酸除草剂对互花米草的去除作用,结果发现施加 25%咪唑烟酸可以除治 90%的互花米草,但是短期内去除效果不理想。我国研究人员自主研发的“米草净”和“米草星”等除草剂也在除治红树林湿地互花米草中取得了较好的效果<sup>[55,56]</sup>。化学除草剂的残留可能对环境和非目标物种产生负面影响,但施用此类除草剂对红树林生态系统的综合影响还未有相关报道,需进一步深入研究。

生物防治可以分为天敌控制和生物替代<sup>[47]</sup>,利用天敌控制互花米草的研究相对较少,其中可以有效防治互花米草的生物主要有玉黍螺(*Littoraria irrorata*)和光蝉(*Prokelisia marginata*),但仅集中在互花米草的原产地美国<sup>[57,58]</sup>。中国红树林区的大型底栖动物蟹类和本土植食动物黄毛鼠(*Rattus losea*)对互花米草繁殖体更新及生长有一定的抑制作



用<sup>[23,24]</sup>,但是这类研究仅限于局域尺度,也并没有相关的应用研究。生物替代是在我国红树林区有一定代表性的互花米草防治手段,相关研究较多的是利用无瓣海桑对互花米草进行生物替代<sup>[59,60]</sup>。无瓣海桑生长迅速且株高高于互花米草,因此可以对互花米草形成竞争优势,并通过遮阴作用降低互花米草各项关键生长指标,从而除治互花米草<sup>[61]</sup>。陈玉军等<sup>[62]</sup>在珠海淇澳岛发现,外来红树植物无瓣海桑的种植密度越大,其对互花米草的抑制越明显,并且无瓣海桑比乡土红树植物更能抑制互花米草的生长<sup>[61]</sup>。但是无瓣海桑作为外来物种,除了可以抑制入侵物种互花米草的扩张外,还有可能通过化感作用影响乡土红树植物的生长<sup>[63]</sup>,因此需要长期监测和管理,以确保不会成为新的入侵者。

综合防治策略结合了上述多种方法的优点,通过阶段性和区域性的方法组合,可以实现对互花米草的有效控制。在美国和西班牙的相关研究中,采取刈割+除草剂的综合防治策略比只采取刈割或喷洒除草剂的方式更加有效<sup>[64,65]</sup>;在我国北方盐沼等滨海湿地生态系统中,刈割+水淹的措施也取得了非常好的除治效果<sup>[66]</sup>。我国红树林区一般在物理防治策略(如刈割或翻耕)的基础上联合生物替代防控互花米草入侵,而运用乡土红树植物综合防治互花米草具有造林难度大和恢复时间长等难点<sup>[67]</sup>。因此,综合防治策略只有结合长期的管护和因地制宜的乡土红树林重建技术<sup>[68,69]</sup>,才能有效地防治互花米草入侵并恢复红树林区的原生环境。

### 3 展望

近年来,关于互花米草对中国红树林区的入侵生态效应和互花米草防治策略的研究已经有了比较全面的进展<sup>[70]</sup>,但是由于红树林生态系统的独特性,关于互花米草入侵红树林湿地的相关研究,事实上落后于其他类型的滨海湿地生态系统<sup>[12]</sup>。在大规模清除互花米草的背景下<sup>[19]</sup>,深入理解互花米草在中国红树林区的入侵机制,因地制宜地制定红树林区互花米草防治策略和对互花米草治理进行长期的监测,对维护中国红树林生态系统的健康稳定至关重要。通过分析总结,笔者认为以下3点可能会成为未来中国红树林区防治互花米草和恢复红树林原生环境的关键。

#### 3.1 互花米草在红树林区的二次入侵机制

近年来,我国沿海各省份均进行了互花米草的治理和修复,但都出现了互花米草二次入侵的问题<sup>[12]</sup>。

关于互花米草除治后的二次入侵研究主要集中在北方盐沼滨海湿地生态系统。在黄河口和长江口,已从防治策略<sup>[66]</sup>、水动力和沉积动态<sup>[71,72]</sup>、生物地貌<sup>[73]</sup>等角度开展了大量的研究,如 Zhao 等<sup>[71]</sup>在对崇明东滩互花米草的研究中发现,潮水对互花米草种子的长距离传播以及除治区域内的沉积动态和水动力条件是引发互花米草二次入侵的关键。而在南方红树林生态系统,互花米草除治后二次入侵的时空格局及蔓延机理尚缺乏全面系统的研究;互花米草与红树植物形成的红树林-互花米草交错带,不仅阻碍了互花米草在红树林区的有效治理,而且也给研究互花米草的二次入侵机制带来了挑战。

#### 3.2 互花米草在红树林区的遗留效应

互花米草除治后的重点是对乡土红树植物的恢复,但互花米草在入侵以及大规模除治后对土壤理化性质、土壤微生物群落和水文等条件的改变极有可能对红树林区的土壤产生遗留效应(Legacy effects),影响后续红树植物的自然更新或红树林生态修复工程。目前已有研究探讨乡土盐沼植物产生的土壤遗留效应对互花米草的影响<sup>[74]</sup>,其他相关研究也仅关注互花米草在入侵过程中对土壤的修饰作用,对入侵产生的遗留效应以及关键植物-土壤反馈过程的认识仍然很匮乏。因此,研究互花米草入侵以及大规模除治产生的遗留效应并探究相关的植物-土壤反馈过程,可以为大规模清除互花米草后的红树林生态修复工程提供理论支持。

#### 3.3 互花米草除治背景下的多物种入侵问题

滨海湿地很少只受单一外来物种的影响<sup>[9,17,75]</sup>。在中国红树林区,外来速生红树植物无瓣海桑在红树造林和互花米草防治中取得了比较好的效果<sup>[47,48]</sup>,但也表现出明显的入侵特性。互花米草的除治和二次入侵过程可能会促进无瓣海桑的入侵扩散<sup>[17,18,20]</sup>,严重威胁乡土红树林的保护和修复。目前对于互花米草和无瓣海桑等多物种入侵问题的研究仍不够深入,因此对互花米草除治背景下的多物种入侵问题进行探讨,有助于深入理解中国红树林区的生物入侵问题,为中国红树林区乡土植被的重建提供科学依据。

#### 参考文献

- [1] 林鹏. 中国红树林研究进展[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2001, 40(2): 592-603.
- [2] LEE S Y, PRIMAVERA J H, DAHDOUNH-GUEBAS F, et al. Ecological role and services of tropical man-

- grove ecosystems: a reassessment [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2014, 23(7):726-743.
- [3] 王文卿, 王瑁. 中国红树林[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [4] CHEN L Z, WANG W Q, ZHANG Y H, et al. Recent progresses in mangrove conservation, restoration and research in China [J]. *Journal of Plant Ecology*, 2009, 2(2):45-54.
- [5] WANG W Q, FU H F, LEE S Y, et al. Can strict protection stop the decline of mangrove ecosystems in China? From rapid destruction to rampant degradation [J]. *Forests*, 2020, 11(1):55.
- [6] REN H, GUO Q F, LIU H, et al. Patterns of alien plant invasion across coastal bay areas in southern China [J]. *Journal of Coastal Research*, 2014, 30(3):448-455.
- [7] BISWAS S R, BISWAS P L, LIMON S H, et al. Plant invasion in mangrove forests worldwide [J]. *Forest Ecology and Management*, 2018, 429:480-492.
- [8] 陈权, 马克明. 红树林生物入侵研究概况与趋势[J]. *植物生态学报*, 2015, 39(3):283-299.
- [9] CHEN L Z. Invasive plants in coastal wetlands: patterns and mechanisms [M]// AN S Q, VERHOEVEN J T A. *Wetlands: ecosystem services, restoration and wise use*. 1st ed. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2019:97-128.
- [10] CROOKS J A. Characterizing ecosystem-level consequences of biological invasions: the role of ecosystem engineers [J]. *Oikos*, 2002, 97(2):153-166.
- [11] STRONG D R, AYRES D R. Ecological and evolutionary misadventures of *Spartina* [J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2013, 44(1):389-410.
- [12] 李博, 马志军, 吴纪华, 等. 植物入侵生态学: 互花米草案例研究[M]. 北京: 高等教育出版社, 2022.
- [13] AN S Q, GU B H, ZHOU C F, et al. *Spartina* invasion in China: implications for invasive species management and future research [J]. *Weed Research*, 2007, 47(3):183-191.
- [14] 刘文文, 陈欣淙, 王佳瑜, 等. 互花米草沿纬度梯度的生态适应性研究进展[J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2022, 61(5):739-749.
- [15] ZHANG Z, LI J, LI Y, et al. Spatially discontinuous relationships between salt marsh invasion and mangrove forest fragmentation [J]. *Forest Ecology and Management*, 2021, 499:119611.
- [16] ZHANG Y H, HUANG G M, WANG W Q, et al. Interactions between mangroves and exotic *Spartina* in an anthropogenically disturbed estuary in southern China [J]. *Ecology*, 2012, 93(3):588-597.
- [17] PENG D, CHEN L Z, PENNING S C, et al. Using a marsh organ to predict future plant communities in a Chinese estuary invaded by an exotic grass and mangrove [J]. *Limnology and Oceanography*, 2018, 63(6):2595-2605.
- [18] PENG D, ZHANG Y H, WANG J Y, et al. The opposite of biotic resistance: herbivory and competition suppress regeneration of native but not introduced mangroves in southern China [J]. *Forests*, 2022, 13(2):192.
- [19] STOKSTAD E. China battles alien weed at unprecedented scale [J]. *Science*, 2023, 379(6636):972.
- [20] 郭欣, 潘伟生, 陈粤超, 等. 广东湛江红树林自然保护区及附近海岸互花米草入侵与红树林保护[J]. *林业与环境科学*, 2018, 34(4):58-63.
- [21] CUI L N, DEANGELIS D L, BERGER U, et al. Global potential distribution of mangroves: taking into account salt marsh interactions along latitudinal gradients [J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 351:119892.
- [22] 方清. 中国东南沿海红树林和互花米草相互作用对纬度变化的响应[D]. 厦门: 厦门大学, 2013.
- [23] LI Z J, WANG W Q, ZHANG Y H. Recruitment and herbivory affect spread of invasive *Spartina alterniflora* in China [J]. *Ecology*, 2014, 95(7):1972-1980.
- [24] ZHANG Y H, MENG H Y, WANG Y, et al. Herbivory enhances the resistance of mangrove forest to cordgrass invasion [J]. *Ecology*, 2018, 99(6):1382-1390.
- [25] 陈昕韡, 蔡立哲, 吴辰, 等. 福建漳江口红树林和盐沼湿地的多毛类动物群落[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(4):931-938.
- [26] WANG M, GAO X Q, WANG W Q. Differences in burrow morphology of crabs between *Spartina alterniflora* marsh and mangrove habitats [J]. *Ecological Engineering*, 2014, 69:213-219.
- [27] CHEN Q, LIN G X, MA K M, et al. Determining the unsuitability of exotic cordgrass (*Spartina alterniflora*) for avifauna in a mangrove wetland ecosystem [J]. *Journal of Coastal Research*, 2019, 35(1):177-185.
- [28] CHEN Q, XU G R, ZHANG S, et al. Consumption of an exotic plant (*Spartina alterniflora*) by the macrobenthic fauna in a mangrove wetland at Zhanjiang, China [J]. *Wetlands*, 2018, 38(2):327-335.
- [29] FENG J X, HUANG Q, CHEN H, et al. Restoration of native mangrove wetlands can reverse diet shifts of

- benthic macrofauna caused by invasive cordgrass [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2018, 55(2):905-916.
- [30] FENG J X, HUANG Q, QI F, et al. Utilization of exotic *Spartina alterniflora* by fish community in the mangrove ecosystem of Zhangjiang estuary: evidence from stable isotope analyses [J]. *Biological Invasions*, 2015, 17(7):2113-2121.
- [31] YU Z, YANG J, YU X Q, et al. Aboveground vegetation influences belowground microeukaryotic community in a mangrove nature reserve [J]. *Wetlands*, 2014, 34(2):393-401.
- [32] CAO M M, CUI L N, SUN H M, et al. Effects of *Spartina alterniflora* invasion on soil microbial community structure and ecological functions [J]. *Microorganisms*, 2021, 9(1):138.
- [33] 郑洁, 刘金福, 吴则焰, 等. 闽江河口红树林土壤微生物群落对互花米草入侵的响应[J]. *生态学报*, 2017, 37(21):7293-7303.
- [34] ALONGI D M. Carbon cycling and storage in mangrove forests [J]. *Annual Review of Marine Science*, 2014, 6:195-219.
- [35] 张祥霖, 石盛莉, 潘根兴, 等. 互花米草入侵下福建漳江口红树林湿地土壤生态化学变化[J]. *地球科学进展*, 2008, 23(9):974-981.
- [36] WANG D B, HUANG W, LIANG R W, et al. Effects of *Spartina alterniflora* invasion on soil quality in coastal wetland of Beibu gulf of south China [J]. *PLoS One*, 2016, 11(12):e0168951.
- [37] HU C Y, SHUI B N, LI W T, et al. Assessing the ecological quality status of transplanted mangrove wetland in the Oujiang estuary, China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, 133:1-8.
- [38] 黄央央, 杨毕铖, 戴桂香. 互花米草入侵对漳江口红树林保护区的影响研究[J]. *海洋开发与管理*, 2023, 40(2):115-124.
- [39] 陈权, 马克明. 互花米草入侵对红树林湿地沉积物重金属累积的效应与潜在机制[J]. *植物生态学报*, 2017, 41(4):409-417.
- [40] ADAME M F, ZAKARIA R M, FRY B, et al. Loss and recovery of carbon and nitrogen after mangrove clearing [J]. *Ocean & Coastal Management*, 2018, 161:117-126.
- [41] LEWIS D B, JIMENEZ K L, ABD-ELRAHMAN A, et al. Carbon and nitrogen pools and mobile fractions in surface soils across a mangrove saltmarsh ecotone [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 798:149328.
- [42] GAO G F, LI P F, SHEN Z J, et al. Exotic *Spartina alterniflora* invasion increases CH<sub>4</sub> while reduces CO<sub>2</sub> emissions from mangrove wetland soils in southeastern China [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1):9243.
- [43] 陈桂香, 高灯州, 陈刚, 等. 互花米草入侵对我国红树林湿地土壤碳组分的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(6):249-256.
- [44] CUI L N, SUN H M, DU X H, et al. Dynamics of labile soil organic carbon during the development of mangrove and salt marsh ecosystems [J]. *Ecological Indicators*, 2021, 129:107875.
- [45] JIA D, QI F, XU X, et al. Co-regulations of *Spartina alterniflora* invasion and exogenous nitrogen loading on soil N<sub>2</sub>O efflux in subtropical mangrove mesocosms [J]. *PLoS One*, 2016, 11(1):e0146199.
- [46] WANG B, LIN X B. Exotic *Spartina alterniflora* invasion enhances sediment N-loss while reducing N retention in mangrove wetland [J]. *Geoderma*, 2023, 431:116362.
- [47] 谢宝华, 韩广轩. 外来入侵种互花米草防治研究进展[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(10):3464-3476.
- [48] 谢宝华, 韩广轩. 入侵植物互花米草防治: 理念、技术与实践[J]. *中国科学院院刊*, 2023, 38(12):1924-1938.
- [49] WANG S Y, MARTIN P A, HAO Y, et al. A global synthesis of the effectiveness and ecological impacts of management interventions for *Spartina* species [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2023, 17(11):141.
- [50] GAO Y, TANG L, WANG J Q, et al. Clipping at early florescence is more efficient for controlling the invasive plant *Spartina alterniflora* [J]. *Ecological Research*, 2009, 24(5):1033-1041.
- [51] TANG L, GAO Y, WANG J Q, et al. Designing an effective clipping regime for controlling the invasive plant *Spartina alterniflora* in an estuarine salt marsh [J]. *Ecological Engineering*, 2009, 35(5):874-881.
- [52] 谭芳林, 林贻卿, 肖华山, 等. 不同时期刈割对互花米草生长影响的研究[J]. *湿地科学*, 2010, 8(4):379-385.
- [53] 黄丽. 互花米草切割迹地红树林恢复效果试验[J]. *防护林科技*, 2007(5):26-28.
- [54] 莫雪, 吴博, 刘佳凯, 等. 施用咪唑烟酸除草剂去除漳江口红树林中互花米草的短期实验[J]. *湿地科学*, 2022, 20(2):277-284.
- [55] 杜文琴, 马丽娜, 刘建, 等. 红树林区内互花米草防除技术研究[J]. *中国生态农业学报*, 2006, 14(3):154-156.
- [56] 许珠华. 福建治理互花米草试验研究[J]. *海洋环境科学*, 2010, 29(5):767-769.
- [57] SILLIMAN B R, ZIEMAN J C. Top-down control of

- Spartina alterniflora* production by periwinkle grazing in a Virginia salt marsh [J]. Ecology, 2001, 82(10): 2830-2845.
- [58] GREVSTAD F S, STRONG D R, GARCIA-ROSSI D, et al. Biological control of *Spartina alterniflora* in Willapa Bay, Washington using the planthopper *Prokelisia marginata*: agent specificity and early results [J]. Biological Control, 2003, 27(1): 32-42.
- [59] 张留恩, 廖宝文. 珠海市淇澳岛红树林湿地的研究进展与展望[J]. 生态科学, 2011, 30(1): 81-87.
- [60] ZHU D H, HUI D F, HUANG Z J, et al. Comparative impact of light and neighbor effect on the growth of introduced species *Sonneratia apetala* and native mangrove species in China: implications for restoration [J]. Restoration Ecology, 2022, 30(3): e13522.
- [61] CHEN H, LIAO B W, LIU B E, et al. Eradicating invasive *Spartina alterniflora* with alien *Sonneratia apetala* and its implications for invasion controls [J]. Ecological Engineering, 2014, 73: 367-372.
- [62] 陈玉军, 郑松发, 廖宝文, 等. 红树植物控制互花米草技术[J]. 林业实用技术, 2009(12): 35-36.
- [63] 彭友贵, 徐正春, 刘敏超. 外来红树植物无瓣海桑引种及其生态影响[J]. 生态学报, 2012, 32(7): 2259-2270.
- [64] MAJOR W W, GRUE C, GRASSLEY J, et al. Mechanical and chemical control of smooth cordgrass in Willapa bay, Washington [J]. Journal of Aquatic Plant Management, 2003, 41: 6-12.
- [65] MATEOS-NARANJO E, CAMBROLLÉ J, LOMAS J, et al. Mechanical and chemical control of the invasive cordgrass *Spartina densiflora* and native plant community responses in an estuarine salt marsh [J]. Journal of Aquatic Plant Management, 2012, 50: 106-111.
- [66] YUAN L, ZHANG L Q, XIAO D R, et al. The application of cutting plus waterlogging to control *Spartina alterniflora* on saltmarshes in the Yangtze estuary, China [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2011, 92(1): 103-110.
- [67] 林秋莲, 顾肖璇, 陈昕韡, 等. 红树植物秋茄替代互花米草的生态修复评估: 以浙江温州为例[J]. 生态学杂志, 2020, 39(6): 1761-1768.
- [68] 冯建祥, 宁存鑫, 朱小山, 等. 福建漳江口本土红树植物秋茄替代互花米草生态修复效果定量评价[J]. 海洋与湖沼, 2017, 48(2): 266-275.
- [69] 谭芳林, 游惠明, 乐通潮, 等. 互花米草入侵滩涂乡土植被重建技术与实践[M]. 北京: 中国林业出版社, 2023.
- [70] 王文卿, 石建斌, 陈鹭真. 中国红树林湿地保护与恢复战略研究[M]. 北京: 中国环境出版集团, 2021.
- [71] ZHAO Z Y, YUAN L, LI W, et al. Re-invasion of *Spartina alterniflora* in restored saltmarshes: seed arrival, retention, germination, and establishment [J]. Journal of Environmental Management, 2020, 266: 110631.
- [72] ZHAO Z Y, ZHANG L Q, YUAN L, et al. Pinpointing stage-specific causes of recruitment bottlenecks to optimize seed-based wetland restoration [J]. Journal of Applied Ecology, 2022, 60(2): 330-341.
- [73] NING Z H, CUI B S, CHEN C, et al. Tidal channel meanders serve as stepping-stones to facilitate cordgrass landward spread by creating invasion windows [J]. Ecological Applications, 2024, 34(1): e2813.
- [74] CHENG C, LIU Z K, ZHANG Q, et al. Genotype diversity enhances invasion resistance of native plants via soil biotic feedbacks [J]. Ecology Letters, 2024, 27(3): e14384.
- [75] GROSHOLZ E D. Recent biological invasion may hasten invasional meltdown by accelerating historical introductions [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2005, 102(4): 1088-1091.

(下转第 222 页 Continued on page 222)

new monitoring technologies. Among them, environmental DNA (eDNA) technology has been widely used as a non-invasive method in biological resource assessment and biodiversity surveys. However, it may lead to false positive results and affect the accuracy of monitoring. In contrast, environmental RNA (eRNA) technology can more effectively distinguish living (metabolically active) organism or dead (dormant) organisms, reduce false positive results, and thus improve the reliability of monitoring. However, eRNA technology has not yet been well known, especially in China, where it is rarely used. The purpose of this paper is to review the research status of eRNA technology in biomonitoring, and compare it with traditional monitoring methods and eDNA technology to explore its advantages, limitations and existing problems. At the same time, the research progress of eRNA in different aquatic ecosystems is analyzed by bibliometrics, and the applicability and feasibility of eRNA technology in ecological monitoring in the future were prospected.

**Key words:** environmental RNA; environmental DNA; biological monitoring; biodiversity; methodological

责任编辑:米慧芝

(上接第 213 页 Continued from page 213)

## Ecological Effects and Control Strategies of *Spartina alterniflora* Invasion in Mangroves of China

CHEN Jingyun<sup>1,2</sup>, HUANG Hao<sup>1,2</sup>, ZHANG Yihui<sup>1,2\* \*</sup>

(1. Key Laboratory of Coastal and Wetland Ecosystems, Ministry of Education, Xiamen University, Xiamen, Fujian, 361102, China; 2. College of the Environment & Ecology, Xiamen University, Xiamen, Fujian, 361102, China)

**Abstract:** Mangroves are important parts of the coastal wetland ecosystem. The invasive plant *Spartina alterniflora* has spread to China including native plant communities such as mangroves, salt marshes and seagrass beds, as well as tidal flats through artificial introduction and natural spread, which poses a great threat to the health and stability of coastal wetland ecosystems. Since 2022, China has carried out large-scale *S. alterniflora* eradicate work throughout the country. Mangroves located in the southern coastal wetlands are the key areas for *S. alterniflora* removal. However, the current researches on the invasion mechanism of *S. alterniflora* in mangroves are not systematic and in-depth. Most of the relevant research paradigms and control strategies are based on other types of coastal wetland ecosystems. This article summarizes the main ecological effects of *S. alterniflora* invasion into China's mangrove areas, as well as several major *S. alterniflora* control strategies adopted in China's mangrove areas, and discusses the gaps and hotspots of *S. alterniflora* related research in China's mangrove areas in the future, in order to provide reference for the prevention and control of *S. alterniflora* in China's mangrove areas and the ecological restoration and protection of mangroves.

**Key words:** mangroves; *Spartina alterniflora*; biological invasion; control strategies

责任编辑:米慧芝,南 旭