

基于 VOSviewer 文献计量的互花米草研究进展分析

梁嘉慧^{1,2}, 戴子熠^{1,2}, 左平^{1,2}, 钦佩³

(1. 南京大学地理与海洋科学学院 南京 210023;

2. 南京大学海岸与海岛开发教育部重点实验室 南京 210023;

3. 南京大学生命科学学院 南京 210023)

摘要:互花米草(*Spartina alterniflora*)为美国大西洋沿岸的本地种,在环太平洋沿岸被认为是入侵物种。互花米草作为本地种,被誉为“生态系统工程师”;作为外来物种,其入侵特性亦引起相关领域的高度关注。为加深对互花米草相关研究的认知,探索未来研究重点方向,文章基于文献计量学方法,以 Web of Science 数据库中发表于 1972—2020 年的互花米草英文文献为基础数据,使用 VOSviewer 软件定量分析互花米草的研究进展及发展趋势。研究结果表明:1972—2020 年互花米草领域的发文数量与被引频次均不断上升,2004 年后呈快速发展态势;研究领域涉及的学科有生态学、环境科学以及海洋与淡水生物等;美洲、亚洲、欧洲与大洋洲等区域发表论文较多,其中美国在该领域的研究实力最强,中国其次;互花米草领域的研究热点集中于其对盐沼湿地生态系统的影响、生物地球化学循环过程以及生理生态和种间相互作用等,未来的研究趋势则集中于其对蓝碳的贡献以及对全球气候变化的响应过程与机制等。

关键词:文献计量;互花米草;外来物种;盐沼湿地;气候变化

中图分类号:P76;X171.1

文献标志码:A

文章编号:1005—9857(2022)10—0072—08

DOI:10.20016/j.cnki.hykyfjgl.20220927.001

Research Analysis of *Spartina alterniflora* Based on Bibliometrics by VOSviewer

LIANG Jiahui^{1,2}, DAI Ziyi^{1,2}, ZUO Ping^{1,2}, QIN Pei³

(1. School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China;

2. Key Laboratory for Coast and Island Development of Ministry of Education, Nanjing University, Nanjing 210023, China;

3. School of Life Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: *Spartina alterniflora* is native to the Atlantic coast of the United States, which is recognized as an alien species along the Pacific coast. *S. alterniflora* has attracted much attention in related fields for many years. In order to deepen the understanding of *S. alterniflora* related research, and explore the future research priorities, the paper analyzed its research progress quantitatively and protracted visual knowledge graph by VOSviewer software with the key words of *S.*

收稿日期:2022-01-29;修订日期:2022-09-14

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0506506)。

作者简介:梁嘉慧,硕士研究生,研究方向为滨海湿地生态学与生物地球化学

通信作者:左平,副教授,博士,研究方向为陆海相互作用下的滨海湿地生态系统

alterniflora during 1972—2020 from Web of Science database by bibliometric analysis method. The number of published papers and citations of *S. alterniflora* has been rising during 1972—2020, and shown a rapid development trend since 2004. The research areas covered ecology, environmental science, marine and freshwater biology. The publications were mainly contributed by countries in America, Asia, Europe and Oceania, and the United States ranked the 1st followed by China. The topics of *S. alterniflora* focus on its effects on salt marsh ecosystem, biogeochemical cycle, physiology and interspecific interaction. *S. alterniflora*'s contributions to blue carbon and responses to global climate change is the current hot topic in coastal salt marshes.

Keywords: Bibliometrics, *S. alterniflora*, Alien species, Saltmarsh, Climate change

0 引言

滨海盐沼湿地是指分布在海岸或河口附近、受周期性潮水或咸淡水淹没的有草本植被覆盖的淤泥质滩涂^[1]。其位于海洋与陆地相互作用的过渡地带,具有动态性和复杂性,同时也是典型的生态敏感带和环境脆弱带^[2-3]。滨海盐沼具有减缓海岸侵蚀、为生物提供栖息地与食物来源、调节气候等多种生态服务功能^[4-5],对保护滨海盐沼湿地生物多样性和开展盐沼湿地生态修复具有重要的理论与实践意义。

互花米草是禾本科米草属多年生草本植物,耐盐耐淹,适宜在海滩高潮带下部至中潮带上部广阔滩面上生长^[6]。互花米草具有很高的初级生产力、环境适应性和抗风消浪能力,因此成为保滩护岸和促淤造陆的先锋种。20 世纪中后期,部分国家或地区出于促淤造陆、防风抗浪、保滩护岸、改良土壤、绿化海滩和净化污染物等方面的考虑引种互花米草^[7-12]。但同时互花米草因为自身的生理特性,如极强的繁殖能力等,能够以极快的速度蔓延并侵占本地种的生态位、改变生物多样性、影响水产养殖、淤塞港航通道等^[9-11],被视为盐沼湿地最具威胁的外来物种之一。2003 年互花米草被我国列为入侵物种之一。

经过数十年的争论与研究,学界对互花米草的认知和定位更加理性客观和全面系统。众多专家学者从不同角度对盐沼湿地互花米草的研究进展进行综述总结。解雪峰等^[13]总结互花米草入侵对滨海湿地生态系统的生物地球化学循环(碳、氮、磷循环及土壤重金属迁移)和入侵地生物群落(微生

物、植物和动物)的影响;栾兆擎等^[14]梳理互花米草对水文环境变化的生理生态和空间格局响应等方面的国内外研究进展;谢宝华等^[15]归纳低值化利用(肥料化、原料化、饲料化、燃料化及基料化)与高值化利用(药用价值和耐盐基因)的互花米草资源化利用方式;钦佩^[7]阐述互花米草提取物与人体健康的关联,并从互花米草中提取有益物质应用于慢性病防治;谢宝华等^[16]从物理防治、化学防治、生物防治、生物替代防治、综合防治和防控策略 6 个方面综述互花米草防治的最新研究进展并分析相关技术方法的不足;李富荣等^[17]总结互花米草对重金属的富集特性及其影响因素。已有文献大多以综述的方式总结互花米草相关领域的研究进展,鲜见文献计量学方法与可视化知识图谱的定量化研究。

为全面和深入了解盐沼湿地互花米草的研究历程、热点议题和发展趋势,本研究通过梳理 Web of Science 核心合集数据库收录的相关期刊论文,基于 VOSviewer 软件的文献统计处理功能,分析该领域的发文量与被引频次、主要涉及学科与期刊、研究力量、国际合作情况和研究热点,总结 1972—2020 年国内外对互花米草的研究进展,以期对相关领域的研究方向与热点问题等提供一定的参考。

1 数据来源与处理

1.1 数据来源

本研究以 Web of Science 核心合集数据库中的文献为数据来源,分析盐沼湿地外来物种——互花米草的研究热点与发展趋势。基于该数据库,以 $TS = (Spartina\ alterniflora * or\ biological\ invasion * or\ ecosystem\ engineer * or\ alien\ species *)$ 和 $TS =$

(salt marsh*)为检索式,以 Article 为文献类型,以 1900—2020 年为检索时间进行高级检索,共得到 2 299 篇英文文献(自 1972 年起有文献数据记录,检索时间截至 2021 年 9 月 29 日),将其全记录以文本格式导出,作为本研究的研究数据。

1.2 数据处理

根据搜集到的 2 299 篇文献,在 Excel 软件中整理并计算不同年份国内外发表的论文总篇数与被引频次,分析盐沼湿地互花米草研究的发展态势。根据 Web of Science 自带的分类体系,统计主要发文期刊、学科、开展研究的国家及机构。运用 VOSviewer 软件深入挖掘文献信息,对国际合作频次和主要关键词等进行共现分析。

2 文献计量分析

2.1 发文量与被引频次

发文量与被引频次在一定程度上可以体现某领域研究的发展速度和变化趋势。1972—2020 年盐沼湿地互花米草研究的发文量与被引频次整体呈上升趋势:发文量由 1972 年的 1 篇增加到 2020 年的 161 篇,共发文 2 299 篇,年均发文 47 篇;被引频次由 1973 年的 1 次增加到 2020 年的 8 578 次,总被引 80 546 次,年均被引 1 644 次。

从年份来看,1972 年起陆续有相关文献发表,1990 年前发文量增长缓慢,此后小幅波动上升,2004 年开始激增至今,在 35% 的时间内发表 71% 的论文。根据发文量与被引频次的时间变化特点及趋势,盐沼湿地互花米草研究可划分为 3 个阶段(图 1)。

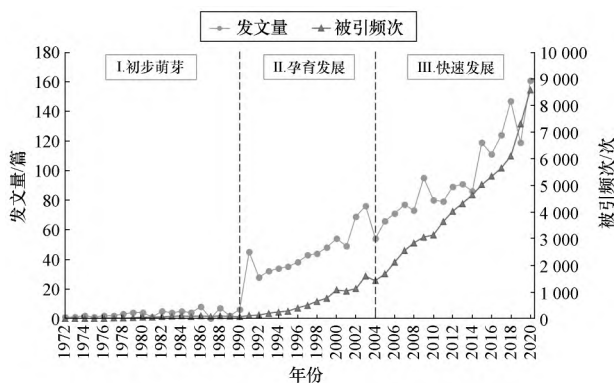


图 1 1972—2020 年盐沼湿地互花米草研究的发文量与被引频次

阶段 I (初步萌芽),1972—1990 年。发文量为 0~10 篇,年均发文 3 篇;被引频次为 0~110 次,年均被引 50 次;发文量与被引频次呈极缓慢增长态势。

阶段 II (孕育发展),1991—2004 年。发文量由 45 篇增加到 54 篇,年均发文 46 篇;被引频次由 118 次增加到 1 424 次,年均被引 680 次;发文量与被引频次明显增加,时有波动,整体呈稳定上升趋势。这可能是由于 20 世纪 90 年代生态学界逐渐兴起生物多样性保护和入侵生物学研究,而互花米草作为影响较大的外来物种开始备受关注^[7]。

阶段 III (快速发展),2005—2020 年。发文量由 66 篇增加到 161 篇,年均发文 99 篇;被引频次由 1 677 次增加到 8 578 次,年均被引 4 379 次;相关研究暴发式增长,发展速度较快。2000 年世界自然保护联盟(IUCN)公布全球最具威胁的 100 种外来入侵物种,互花米草被列入;2003 年我国公布首批外来入侵物种名单,互花米草作为唯一的盐沼植物名列其中^[15],在一定程度上提升学界对互花米草的关注与研究热度。

2.2 学科与发文期刊

根据 Web of Science 的学科分类统计,1972—2020 年共有 46 个学科领域涉及互花米草研究(表 1)。发文量超过 80 篇的有 10 个学科,以生态学、环境科学、海洋与淡水生物学占绝对优势,发文量分别占总发文量的 38.4%、37.5%和 35.8%。

表 1 发文量超过 80 篇的学科

学科	发文量/篇	学科	发文量/篇
生态学	882	与其他学科有关的	147
环境科学	862	地球科学	99
海洋与淡水生物学	823	环境工程	92
海洋学	380	微生物学	90
植物学	218	生物多样性保护	82
		地理物理学	82

出版盐沼湿地互花米草研究的期刊共 342 个,发文量排名前 5 名的期刊如表 2 所示。

生态系统食物链及食物网中的贡献等^[26-27]。

(2)互花米草在盐沼中的生物地球化学循环过程,代表关键词包括动态、氮、碳、磷、有机质、土壤、生物量、分解、堆积、富营养化、养分和重金属。聚焦互花米草对盐沼碳^[28]、氮^[29-30]、磷和硫^[31]等元素生物地球化学循环的影响,枯落物分解^[32-33]以及重金属富集^[34]等。

(3)气候变化对互花米草生理生态的影响,代表关键词包括生长、植被、湿地、盐度、恢复、气候变化、响应、海平面上升、生产力、光合作用和顶梢枯死。主要关注互花米草在应对全球气候变暖与海平面上升过程中在生理生态上的适应与响应^[35]。该部分研究内容较多,涉及互花米草的生理特性^[36-38],互花米草地理变异及扩张速率的影响因素^[39],互花米草生长策略对人工地形改变的适应^[40],以及季节性变化对互花米草光合作用的影响机制等^[41]。

(4)互花米草所在生态系统的种群间相互作用,代表关键词包括群落结构、生物多样性、竞争、入侵、植物分带性、扰动、演替、杂交和繁殖。研究主题包括种群演替及生态效应^[42-44]、种间相互作用^[45-47]以及生态系统的生物多样性^[19,48]等。

2.5 研究重点

根据上述研究热点的发展阶段,分时段对盐沼湿地互花米草相关文献的关键词进行共现分析,进而归纳和总结各发展阶段的研究重点。

(1)1972—1990 年共现统计的关键词主要包括碳、碎屑、枯落物分解、动力和氮,出现频次多为 1 次。该阶段成果主要由美国发表,对互花米草及其枯落物在盐沼湿地中生长与分解的动态过程和影响因素进行初步研究^[49-53]。

(2)1991—2004 年高频关键词大大增加,开始出现恢复、海平面上升、外来入侵物种、盐度、种群、分带性、捕食、丰度和稳定同位素等关键词。该阶段研究聚焦于互花米草对生态系统的影响及其生物地球化学循环过程。随着发文量的增加,研究区域也扩展到河口与海岸海湾地区,美国沿海地区开展大量相关研究。中国在此阶段共发表 13 篇英文文献,主题包括江苏盐沼互花米草的形成^[54]、互花

米草在滩涂围垦中的作用^[55]以及互花米草与本地植物的竞争作用及生态影响^[56]等。

(3)2005—2020 年高频关键词包括植被、生长、动力、湿地、氮、盐度、芦苇、海平面上升、沉积物、气候变化、恢复、生态系统、种群、长江口和竞争等。该阶段研究内容剧增且交叉融合显著,互花米草对生态系统的影响与生物地球化学循环过程等仍是热点主题;同时,学者更多地将互花米草与和其同为本地种和外来种的芦苇^[57]进行对比研究,涉及群落演替和生态修复^[58-60]、生物地球化学循环^[61-62]等方面。此外,海平面上升与气候变化的出现频次急剧升高,在全球气候变化背景下,互花米草对温室气体排放及碳储量的影响得到的关注日益增多。中国有关互花米草的研究在此期间发展迅速,共发文 442 篇,占总发文量的 27.83%,其中长江口^[63-64]为热点研究区域。

2.6 研究趋势

总体来看,近年来互花米草研究的发展趋势主要表现为 3 个方面。

(1)逐渐关注互花米草在生理生态、生物地球化学循环和种群结构等方面对全球气候变化的响应与耦合。自 20 世纪 90 年代起,海平面上升、种群、分带性和丰度等关键词开始出现。在 286 个关键词中,海平面上升(出现频次为 169 次)和气候变化(出现频次为 131 次)分别排在第十位和第二十一位。在全球气候变化的背景下,温室气体排放增加、海平面上升、海洋酸化、气候灾害频发以及生物多样性受损,互花米草的生理特性和扩张机制等在响应过程中的变化又将深刻影响盐沼湿地生态系统与环境。

(2)逐渐关注滨海盐沼湿地生态系统的恢复与修复。随着人类沿海开发围垦、自然资源掠夺性利用和环境污染等因素的加剧,滨海湿地生态系统受到严重威胁。据统计,全球约已有 50% 的盐沼、35% 的红树林和 29% 的海草丧失或退化^[65]。因此,评估人类活动及互花米草入侵造成的影响、恢复盐沼湿地的生态服务功能以及维护入侵地的生态平衡成为重要议题。

(3)逐渐关注互花米草的固碳效应与温室气体

的排放通量。互花米草具有较长的生长季、较大的叶面积指数、较高的净光合作用速率和较大的生物量,故其固碳作用非常明显^[9]。有研究认为,互花米草入侵增加甲烷温室气体的排放,在一定程度上影响区域气候变化^[66],亟须进一步科学评估互花米草在碳循环过程中对碳源和碳汇的贡献。

3 结语

本研究利用 VOSviewer 软件对 1972—2020 年盐沼湿地互花米草领域的英文文献进行文献计量分析,主要得出 4 点结论。①自 1972 年以来,互花米草受到的关注日益增加,发文量与被引频次都呈大幅上升趋势;②生态学、环境科学以及海洋与淡水生物学等是主要的学科领域,《Estuaries and Coasts》等是该领域的主要发文期刊;③美洲、亚洲、欧洲与大洋洲发表相关论文的国家或机构较多,美国的发文量和国际合作频次皆居世界首位,中国位居第二;④主要研究方向集中于互花米草对滨海湿地生态系统的影响、互花米草的生物地球化学循环过程、环境因子与互花米草的生理生态以及互花米草盐沼生态系统的种群间相互作用。

已有的众多研究表明,互花米草的入侵显著增加盐沼湿地的有机质含量与固碳能力^[13,67-69]。布乃顺等^[67]在长江口崇明东滩湿地的研究中得出,高潮滩互花米草群落植物的碳储量为 $(3.35 \pm 0.08)(\text{kg} \cdot \text{C})/\text{m}^2$,0~100 cm 深度土壤的总碳储量和有机碳储量分别为 $(18.05 \pm 0.15)(\text{kg} \cdot \text{C})/\text{m}^2$ 和 $(5.52 \pm 0.18)(\text{kg} \cdot \text{C})/\text{m}^2$,显著高于本地种群落。作为目前我国滨海盐沼湿地的典型植物,互花米草的碳储量和碳汇能力对于蓝碳缓解全球变暖具有重要意义^[69]。结合我国已有研究的探索实践以及生态文明建设战略,未来我国互花米草领域的研究重点应主要集中于 3 个方面。①互花米草的固碳效应和温室气体的排放通量;②开展应对气候变化的长时序监测,厘清滨海湿地生态系统对互花米草不同入侵阶段的响应差异;③推进米草产品的产业化,探索治理与利用相结合的生态管控方法与技术。

参考文献

[1] BOORMAN L A. Saltmarsh review: an overview of coastal salt-

marshes, their dynamic and sensitivity characteristics for conservation and management[R]. Peterborough: JNCC, 2003.

- [2] 曹磊, 宋金明, 李学刚, 等. 中国滨海盐沼湿地碳收支与碳循环过程研究进展[J]. 生态学报, 2013, 33(17): 5141—5152.
- [3] 侯立军, 刘敏, 许世远, 等. 潮滩生态系统中生源要素氮的生物地球化学过程研究综述[J]. 地球科学进展, 2004, 19(5): 774—781.
- [4] 李建国, 王文超, 濮励杰, 等. 滩涂围垦对盐沼湿地碳收支的影响研究进展[J]. 地球科学进展, 2017, 32(6): 599—614.
- [5] 李蕙, 袁琳, 张利权, 等. 长江口滨海湿地潮间带生态系统的多稳态特征[J]. 应用生态学报, 2017, 28(1): 327—336.
- [6] 沈永明, 杨劲松, 曾华, 等. 我国对外来物种互花米草的研究进展与展望[J]. 海洋环境科学, 2008, 27(4): 391—396.
- [7] 钦佩. 互花米草与人体健康关系研究进展[J]. 中国野生植物资源, 2019, 38(5): 70—73.
- [8] 杨东, 万福绪. 外来入侵种互花米草的研究进展[J]. 植物保护, 2014, 40(2): 5—10.
- [9] 钦佩, 李思宇. 互花米草的两面性及其生态控制[J]. 生物安全学报, 2012, 21(3): 167—176.
- [10] WAN S W, QIN P, LIU J, et al. The positive and negative effects of exotic *Spartina alterniflora* in China[J]. Ecological Engineering, 2009, 35(4): 444—452.
- [11] 李富荣, 陈俊勤, 陈沐荣, 等. 互花米草防治研究进展[J]. 生态环境, 2007, 16(6): 1795—1800.
- [12] 郭云文, 陈莉丽, 卢百灵, 等. 我国对互花米草的研究进展[J]. 草业与畜牧, 2007(9): 1—5, 12.
- [13] 解雪峰, 孙晓敏, 吴涛, 等. 互花米草入侵对滨海湿地生态系统的影响研究进展[J]. 应用生态学报, 2020, 31(6): 2119—2128.
- [14] 栾兆攀, 闫丹丹, 薛媛媛, 等. 滨海湿地互花米草入侵的生态水文学机制研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(4): 469—476.
- [15] 谢宝华, 路峰, 韩广轩. 入侵植物互花米草的资源化利用研究进展[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(12): 1870—1879.
- [16] 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.
- [17] 李富荣, 段琳琳, 王富华. 盐沼植物互花米草的重金属富集特性研究进展[J]. 生态环境学报, 2013, 22(7): 1263—1268.
- [18] 陆双龙, 张建兵, 蔡芸霜, 等. 基于文献计量学的我国入海河口营养盐研究状况分析[J]. 海洋环境科学, 2021, 40(2): 309—316.
- [19] GRANSE D, SUCHROW S, JENSEN K. Long-term invasion dynamics of *Spartina* increase vegetation diversity and geomorphological resistance of salt marshes against sea level rise[J]. Biological Invasions, 2021, 23(3): 871—883.
- [20] ZHANG H, LIU Y, XU Y, et al. Impacts of *Spartina alterni-*

- flora* expansion on landscape pattern and habitat quality: a case study in Yancheng coastal wetland, China[J]. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2020, 18 (3): 4669—4683.
- [21] GE B M, JIANG S H, LIU Q N, et al. Density, but not distribution pattern of *Assiminea latericea* varies on tidal flats with smooth cordgrass *Spartina alterniflora* invasion stage[J]. *Regional Studies in Marine Science*, 2019, 27: 100528.
- [22] 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.
- [23] MARCZAK L B, WIESKI K, DENNO R F, et al. Importance of local vs. geographic variation in salt marsh plant quality for arthropod herbivore communities [J]. *Journal of Ecology*, 2013, 101(5): 1169—1182.
- [24] LI Y X, LABORDA P, XIE X L, et al. *Spartina alterniflora* invasion alters soil microbial metabolism in coastal wetland of China [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2020, 245: 106982.
- [25] TANG Y, WANG L, JIA J, et al. Variability of soil microbial respiration under different vegetation succession stages in Jiuduansha wetland [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2012, 32(1-3): 1—283.
- [26] LIAO Y B, SHOU L, TANG Y B, et al. Effects of non-indigenous plants on food sources of intertidal macrobenthos in Yueqing Bay, China: combining stable isotope and fatty acid analyses [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2020, 241: 106801.
- [27] QUAN W M, HUANG D Q, CHU T J, et al. Trophic relationships in the Changjiang River estuarine salt marshes: preliminary investigation from $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ analysis [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2009, 28(3): 50—58.
- [28] YANG R M, YANG F. Impacts of *Spartina alterniflora* invasion on soil inorganic carbon in coastal wetlands in China [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2020, 84(3): 844—855.
- [29] MACY A, OSLAND M J, CHERRY J A, et al. Changes in ecosystem nitrogen and carbon allocation with Black Mangrove (*Avicennia germinans*) Encroachment into *Spartina alterniflora* salt marsh [J]. *Ecosystems*, 2021, 24(5): 1007—1023.
- [30] LI N, LI B, NIE M, et al. Effects of exotic *Spartina alterniflora* on saltmarsh nitrogen removal in the Yangtze River Estuary, China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 271: 122557.
- [31] ZHANG H B, LI Y, PANG M Y, et al. Responses of contents and structure of DOM to *Spartina alterniflora* invasion in Yanghe estuary wetland of Jiaozhou Bay, China [J]. *Wetlands*, 2019, 39(4): 729—741.
- [32] YAN J F, WANG L, TSANG Y F, et al. Conversion of organic carbon from decayed native and invasive plant litter in Jiuduansha wetland and its implications for SOC formation and sequestration [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, 20(2): 675—689.
- [33] DALEO P, MONTEMAYOR D I, FANJUL E, et al. Dominance by *Spartina densiflora* slows salt marsh litter decomposition [J]. *Journal of Vegetation Science*, 2020, 31: 1182—1192.
- [34] SUN Z G, LI J B, HE T, et al. Bioaccumulation of heavy metals by *Cyperus malaccensis* and *Spartina alterniflora* in a typical subtropical estuary (Min River) of Southeast China [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19(4): 2061—2075.
- [35] PERRY D C, MOSEMAN-VALTIERRA S, THORNER C. Greenhouse gas response and *Spartina alterniflora* resilience to macroalgal exposure [J]. *Aquatic Botany*, 2020, 162: 103185.
- [36] LIU W W, MAUNG-DOUGLASS K, STRONG D R, et al. Geographical variation in vegetative growth and sexual reproduction of the invasive *Spartina alterniflora* in China [J]. *Journal of Ecology*, 2016, 104(1): 173—181.
- [37] XIAO Y, TANG J B, QING H, et al. Effects of salinity and clonal integration on growth and sexual reproduction of the invasive grass *Spartina alterniflora* [J]. *Flora*, 2010, 206(8): 736—741.
- [38] KAMEL H, MOHAMED G, ALI A, et al. Biomass production, photosynthesis, and leaf water relations of *Spartina alterniflora* under moderate water stress [J]. *Journal of Plant Research*, 2008, 121(3): 311—318.
- [39] ZHANG D H, HU Y M, LIU M, et al. Geographical variation and influencing factors of *Spartina alterniflora* expansion rate in coastal China [J]. *Chinese Geographical Science*, 2020, 30(1): 127—141.
- [40] HONG H L, DAI M Y, LU H L, et al. Artificial topography changes the growth strategy of *Spartina alterniflora*, case study with wave exposure as a comparison [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 15768.
- [41] MORASH A J, CAMPBELL D A, IRELANG R J. Macromolecular dynamics of the photosynthetic system over a seasonal developmental progression in *Spartina alterniflora* [J]. *Canadian Journal of Botany*, 2007, 85(5): 476—483.
- [42] GE B M, JIANG S H, YANG L, et al. Succession of macrofaunal communities and environmental properties along a gradient of smooth cordgrass *Spartina alterniflora* invasion stages [J]. *Marine Environmental Research*, 2020, 156: 104862.
- [43] XU Y, YAO S L, SOETAERT K, et al. Effects of salt marsh

- restoration on eukaryotic microbenthic communities in the Yangtze Estuary[J]. Marine Ecology Progress Series, 2020, 638:39—50.
- [44] WU F R, TONG C F, TORKELOSON M, et al. Evolution of shoals and vegetation of Jiuduansha in the Changjiang River Estuary of China in the last 30 years[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2020, 39(8):71—78.
- [45] NUNES L S C, CAMARGO A F M. Effects of salinity on growth, competitive interaction and total nitrogen content of two estuarine macrophyte species cultivated on artificial substrate[J]. Aquatic Ecology, 2020, 54:973—983.
- [46] SHARP S J, ANGELINI C. Predators enhance resilience of a saltmarsh foundation species to drought[J]. Journal of Ecology, 2020, 109(2):975—986.
- [47] NOTO A E, HUGHES A R. Genotypic diversity weakens competition within, but not between, plant species[J]. Journal of Ecology, 2020, 108(6):2212—2220.
- [48] ZHANG Y, LI B, WU J, et al. Contrasting latitudinal clines of nematode diversity in *Spartina alterniflora* salt marshes between native and introduced ranges[J]. Diversity and Distributions, 2020, 26(5):623—631.
- [49] NEWELL S Y, FALLON R D, MILLER J D. Decomposition and microbial dynamics for standing, naturally positioned leaves of the salt-marsh grass *Spartina alterniflora* [J]. Marine Biology, 1989, 101(4):471—481.
- [50] HOWES B L, DACEY J W H, TEAL J M. Annual carbon mineralization and belowground production of *Spartina alterniflora* in a New England salt marsh[J]. Ecology, 1985, 66(2):595—605.
- [51] BERTNESS M D. Fiddler crab regulation of *Spartina alterniflora* production on a New England salt marsh[J]. Ecology, 1985, 66(3):1042—1055.
- [52] HOPKINSON C S, SCHUBAUER J P. Static and dynamic aspects of nitrogen cycling in the salt marsh graminoid *Spartina alterniflora*[J]. Ecology, 1984, 65(3):961—969.
- [53] KING G M, KLUG M J, WHINER R G, et al. Relation of soil water movement and sulfide concentration to *Spartina alterniflora* production in a Georgia salt marsh[J]. Science, 1982, 218:61—63.
- [54] ZHANG R S, SHEN Y M, LU L Y, et al. Formation of *Spartina alterniflora* salt marshes on the coast of Jiangsu Province, China [J]. Ecological Engineering, 2004, 23(2):95—105.
- [55] CHUNG C H, ZHUO R Z, XU G W. Creation of *Spartina* plantations for reclaiming Dongtai, China, tidal flats and offshore sands [J]. Ecological Engineering, 2004, 23(3):135—150.
- [56] CHEN Z Y, LI B, ZHONG Y, et al. Local competitive effects of introduced *Spartina alterniflora* on *Scirpus mariqueter* at Dongtan of Chongming Island, the Yangtze River estuary and their potential ecological consequences [J]. Hydrobiologia, 2004, 528(1):99—106.
- [57] 袁月, 李德志, 王开运. 芦苇和互花米草入侵性研究进展[J]. 湿地科学, 2014, 12(4):533—538.
- [58] HOWARD R J, RAFFERTY P S, JOHNSON D J. Plant community establishment in a coastal marsh restored using sediment additions[J]. Wetlands, 2020, 40(4):877—892.
- [59] BANG J H, BAE M, LEE E J. Plant distribution along an elevational gradient in a macrotidal salt marsh on the west coast of Korea[J]. Aquatic Botany, 2018, 147:52—60.
- [60] XUE L, LI X Z, YAN Z Z, et al. Native and non-native halophytes resiliency against sea-level rise and saltwater intrusion [J]. Hydrobiologia, 2018, 806(1):47—65.
- [61] WANG J X, WANG J S. *Spartina alterniflora* alters ecosystem DMS and CH₄ emissions and their relationship along interacting tidal and vegetation gradients within a coastal salt marsh in Eastern China[J]. Atmospheric Environment, 2017, 167:346—359.
- [62] MOSEMAN-VALTIERRA S, ABDUL-AZIZ O I, TANG J W, et al. Carbon dioxide fluxes reflect plant zonation and belowground biomass in a coastal marsh[J]. Ecosphere, 2016, 7(11):e01560.
- [63] AI J Q, GAO W, GAO Z Q, et al. Phenology-based *Spartina alterniflora* mapping in coastal wetland of the Yangtze Estuary using time series of GaoFen satellite no.1 wide field of view imagery [J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2017, 11(2):026020.
- [64] GE Z M, GUO H Q, ZHAO B, et al. Plant invasion impacts on the gross and net primary production of the salt marsh on eastern coast of China: insights from leaf to ecosystem [J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2015, 120(1):169—186.
- [65] 陈彬, 俞炜炜, 陈光程, 等. 滨海湿地生态修复若干问题探讨 [J]. 应用海洋学学报, 2019, 38(4):464—473.
- [66] 周在明, 杨燕明, 陈本清. 基于无人机遥感监测滩涂湿地入侵种互花米草植被覆盖度 [J]. 应用生态学报, 2016, 27(12):3920—3926.
- [67] 布乃顺, 杨晓, 黎光辉, 等. 互花米草入侵对长江口湿地土壤碳动态的影响 [J]. 中国环境科学, 2018, 38(7):2671—2679.
- [68] 刘金娥, 苏海蓉, 徐杰, 等. 互花米草对中国海滨湿地土壤有机碳库的影响 [J]. 生态环境学报, 2017, 26(6):1085—1092.
- [69] 于彩芬, 陈鹏飞, 刘长安, 等. 互花米草湿地碳储量及碳汇研究进展 [J]. 海洋开发与管理, 2014, 31(8):85—89.