

滨海盐沼湿地生态修复研究进展*

孙乾照^{1,2)} 林海英^{2)†} 张美琦³⁾ 焦乐²⁾ 张玥²⁾ 杨薇²⁾ 孙涛²⁾

(1)新疆农业大学,水利与土木工程学院,830052,新疆乌鲁木齐;

2)北京师范大学环境学院水环境模拟国家重点实验室,100875,北京;

3)北京师范大学图书馆,100875,北京)

摘要 利用 CNKI 和 Web of Science 数据库进行检索,结合 Cite Space 和 VOS viewer 等信息可视化软件,对国内外滨海盐沼湿地退化及修复研究现状进行系统性分析. 研究表明,目前滨海盐沼湿地修复多集中在水、土、生等单一要素层面,主要体现在生境修复和生物种群保育 2 方面,存在修复效果维持时间有限等问题. 近些年来,利用环境与生物间多时空尺度交互作用下系统自组织过程机制,实现生态系统层面的修复理论和实践应用逐步引起重视,在自组织斑图形成的早期阶段通过景观格局调整,实施人工干预可以发挥修复技术在不同时空尺度上的优势. 全球气候变化和高强度人类活动等多重胁迫影响下,探索面向系统稳定性维持的保护、修复、调控及监测体系成为变化环境下滨海盐沼湿地保护与修复研究的重要方向.

关键词 盐沼湿地;生态修复;环境修复;文献计量学

中图分类号 X826

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2020430

盐沼是滨海湿地的一种重要类型,广泛分布在中、高纬度地区^[1],在陆海交互作用下,盐沼具有垂直岸线方向上的水盐、高程梯度变化以及相应植被条带状分布的格局,相应发挥着独特的生境提供、固碳释氧、水质改善及生态调节等功能^[2-6],在为社会经济发展直接提供丰富自然资源的同时,也对维持物种多样性等生态效益方面具有重要意义^[7-8]. 近年来,受到高强度人类活动和气候变化的影响,包括盐沼在内的滨海湿地面临着严重威胁. 全球约 80% 的滨海湿地资源丧失或退化,干扰了湿地生态服务功能的发挥^[9]. 有学者预测,到 2100 年,若海平面上升 110 cm,全球丧失约 78% 的盐沼^[10]. 我国在近 40 年来已有 60% 的滨海湿地(滩涂、盐沼)面积萎缩,促使滨海湿地属性和格局发生改变,并且使滨海湿地资源加速衰竭. 在人类活动的影响下,海堤、道路、港口码头等人工建筑修建对滨海盐沼的自然环境造成了破坏,导致湿地景观趋向破碎化,弱化了海洋和陆地的水文循环,影响地区生态环境和生物多样性.

为科学认识盐沼生态退化机制并提出针对性修复措施,盐沼生态修复理论和技术也得到快速发展,

取得了一系列研究成果. 本文在系统总结了滨海盐沼生态修复技术相关文献发表趋势、研究热点基础上,分析了目前相关生态修复技术优势和面临的挑战,探讨了面向稳定性维持的系统生态修复研究中面临的理论与技术问题,为盐沼及近海生态系统保护提供切实依据.

1 数据与方法

1.1 数据来源 盐沼湿地保护与修复检索文献主要来源于 CNKI 数据库和 WoS 核心合集平台的 SCI、CPCI-S、ESCI 3 个自然科学子库. 中文文献分析于 2019 年 12 月 2 日共检索到 1981—2020 年发表的 474 篇论文. 国际文献分析于 2019 年 10 月 22 日共检索到 636 篇论文,时间分布范围为 1952—2019 年.

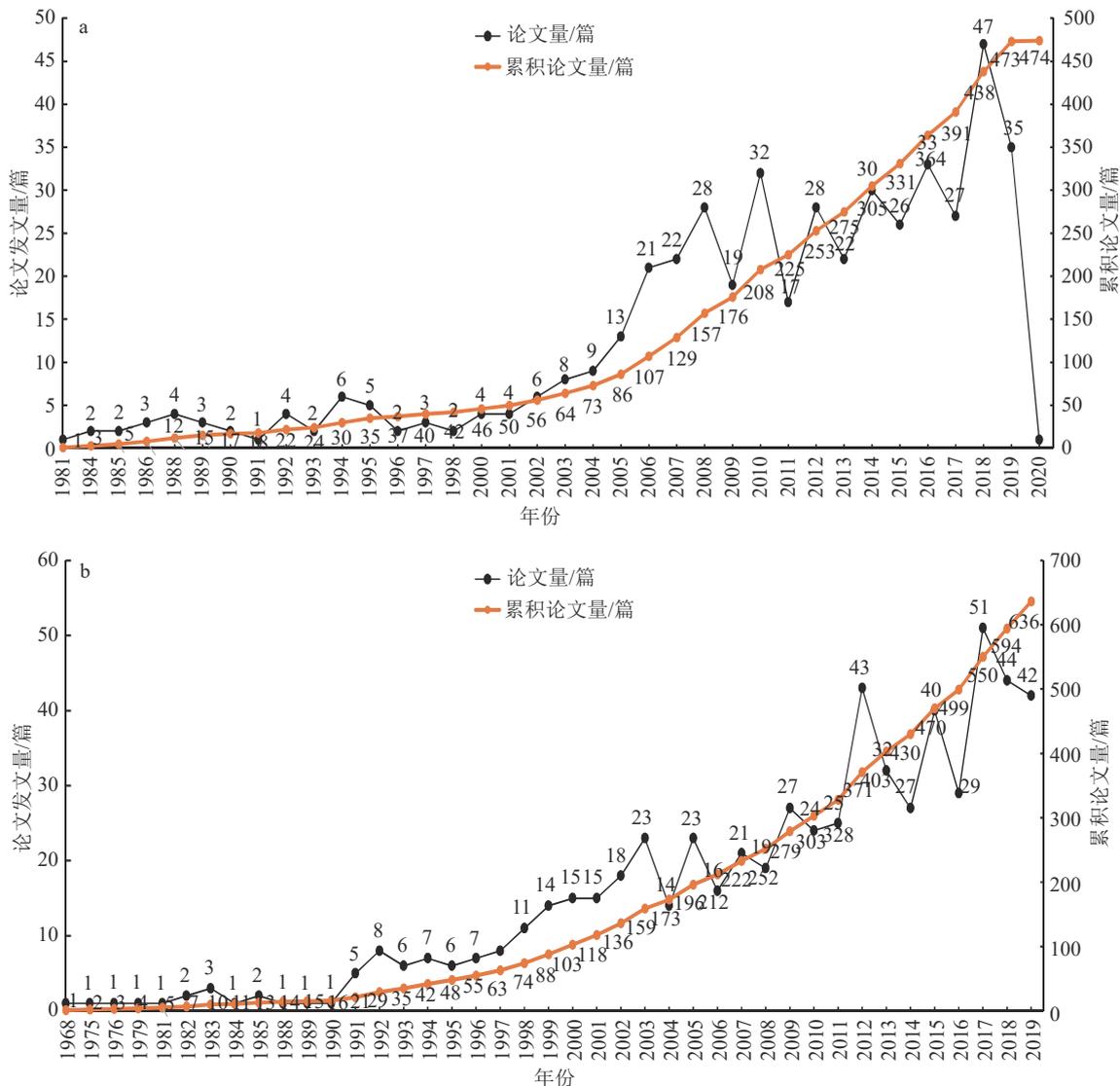
国内研究有关盐沼保护与修复论文从 2004 年开始呈现明显上升趋势,在 2018 年达到最高值 47 篇,中间年份大部分在 26 篇上下波动(见图 1). 国际研究从 1991 年开始呈现显著上升趋势,在 2017 年达到最高值 51 篇,期间只在 2012、2014、2016 年有较大波动,整体增速平缓.

1.2 数据分析方法 本研究使用 Cite Space 和 VOS

* 国家自然科学基金资助项目(U1806217);中国工程院咨询研究资助项目(2018-XZ-14-01);国家重点研发计划资助项目(2018YFC1406400);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2020NTST14)

† 通信作者:林海英(1982—),女,博士,工程师.研究方向:环境生态效应及反馈. E-mail:linhaiying@bnu.edu.cn

收稿日期:2020-10-22



a. 基于 CNKI 数据库；b. 基于 WoS 核心数据库。

图 1 盐沼湿地生态保护与修复论文发表时间分布

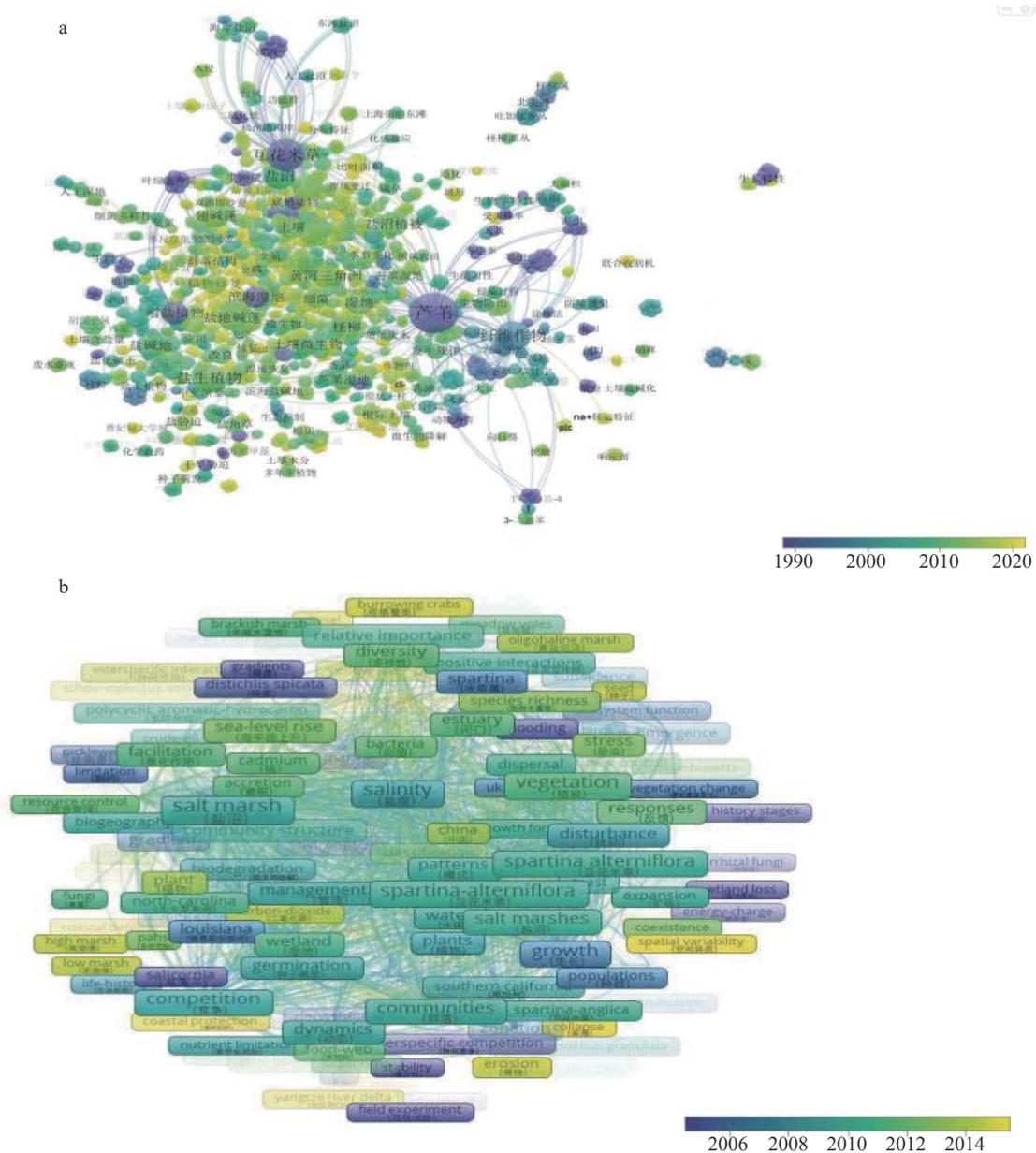
viewer 等文献计量学软件进行数据分析与处理。选取高频关键词统计分析和高频关键词关联可视化功能分析国内外盐沼湿地生态保护与修复情况。论文的关键词是作者在撰写论文时选择的、能够高度反映论文主题的词汇。通过对论文关键词的分析,能够识别相关研究关注点与整体态势的变化。

高频关键词通过对关键词的频率界定,判断研究领域热点问题,能直观反映研究趋势。高频关键词关联可视化通过对不同文章共同出现的关键词进行统计,显示关键词之间的内在关系。根据关键词出现频率的大小将关键词图示分成不同大小,并按照出现时间分成不同颜色,同时出现在一篇文章的关键词用线连接,线的颜色同样表示相同的年份含义。相邻关键词表示出现在一篇文章里的次数多,关键词联系紧密。

文献分析高频关键词关联可视化结果(图 2)表明,与生境恢复技术关联度较高的关键词主要有“抑制试验”“改良”“沉积物”“修复 Cd”以及“community structure”“management”。关键物种保育技术关联度较高的关键词主要有“生物防治”“空间竞争”“涂抹法”“天敌”“微生物”;“water”“growth form”“dispersal”“responses”“populations”“spatial variability”“coastal protection”“deposition”“dynamics”“interspecific competition”等。

2 盐沼湿地生境环境要素修复

2.1 水文情势调控 水文条件决定了湿地的生物多样性和生产力,是滨海盐沼湿地生态修复的基础^[1]。盐沼水文过程修复主要是通过生态补水等技术,实现盐沼水文过程保障,发挥单一修复措施的多重生



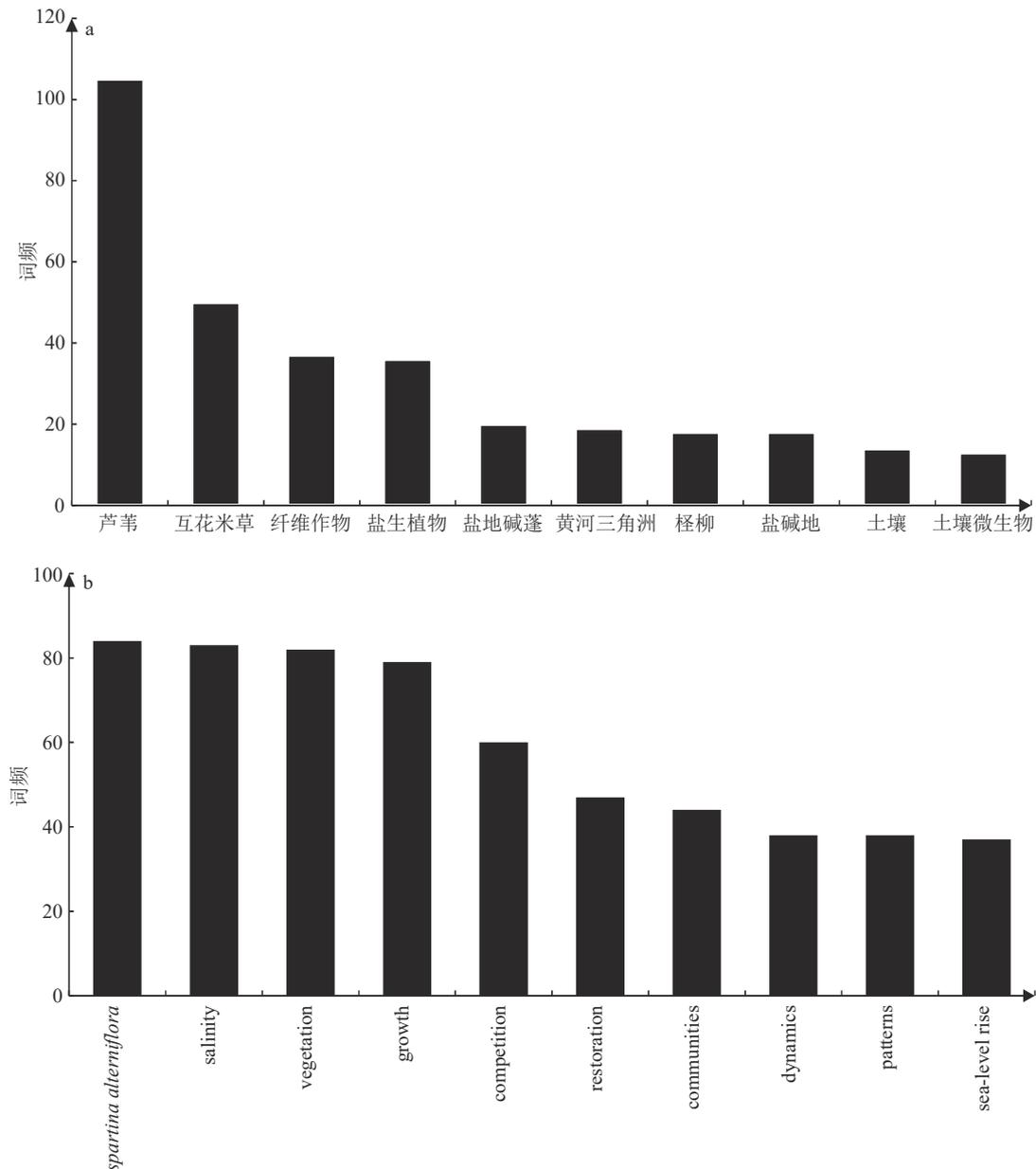
a. 基于 CNKI 数据库; b. 基于 WoS 核心数据库。

图 2 盐沼湿地生境修复高频关键词及共现图谱

态修复效应,并且发展了一系列河口生态需水评估技术^[12],相关文献检索关键词主要有 water、plants、management、patterns(图 2),重点关注生态补水与植被种群恢复的关系.近年来,在流域生产生活用水量增加影响下,我国主要河口均面临着淡水入流减少和水文情势变异的威胁,也促进了一系列河口生态需水理论方法研究和调控实践工作的开展.为缓解黄河三角洲湿地面积缩小和盐碱程度加剧的问题,结合黄河流域调水调沙过程,开展了三角洲湿地淡水补充,以达到洗碱脱盐和修复湿地植被的目的,对缓解短期局域生境破碎化和生物种群恢复起到了积极作用^[13].上海南汇东滩鸟类栖息地营造工程通

过建造隔断、暗堤等手段调控湿地水位^[14].水文过程影响下的生物群落建立需要较长的时间^[15].大量研究表明,环境因素(潮汐、水分和盐度等)以及生物过程(扩散能力、萌发条件和耐盐性等)是自然盐沼湿地植被发育的重要因素,这也使得关于不同物种的建群特性及其在破碎化环境中的适应性研究显得更为重要^[16-17].

近些年来,恢复海向潮汐水文条件成为国际滨海盐沼生态修复的重点,针对不同生物适宜生境要求,构筑不同高程盐沼,利用天然潮沟恢复潮流^[18].结合溢洪道、涵洞、水闸、潮门或自流井等工程结构对潮汐系统进行调节,成为当前欧美一些国家发



a. 基于 CNKI 数据库文献; b. 基于 WoS 核心数据库文献.

图 3 文献高频关键词统计

展的水文连通修复模式^[19]. 比利时斯海尔德河口通过恢复盐沼湿地潮汐干扰频率, 实现潮间带栖息地的生态修复^[20]. 日本大阪港湿地恢复工程采用引入海水的方式恢复湿地^[21].

此外, 近年来一些研究工作将水文调控与微地形、微生境构建相结合, 从景观尺度上的植被覆盖和鸟类栖息地恢复角度, 开始强调退化盐沼湿地多要素的协同修复^[22-23].

2.2 水体及土壤污染治理 盐沼水质质量治理技术主要针对水产养殖、工业等人类活动所导致的水体污染、富营养化及土壤污染等展开. 传统的通过人为地改造污染区域, 比如污染物移除, 退养还湿等形

式, 从而达到改善污染区域水环境目的的物理修复, 以及利用化学制剂或者化学改良剂播撒在湿地表面, 并与污染物发生氧化还原等反应, 进而降解污染物的化学修复方式, 在治理费用及治理效果持续性方面的局限性逐渐显现^[24]. 近些年来, 利用底栖生物、盐沼植物对环境要素的吸收降解能力, 控制氮磷营养盐、积累重金属、降低石油烃等污染物生物修复技术发展迅速^[24]. 文献分析高频关键词主要包括了 crude-oil、pickleweed、facilitation、cadmium、polycyclic aromatic-hydrocarbon (图 2), 研究热点包括了原油溢油导致的多环芳烃和镉累积造成的水体污染及对海蓬子造成的危害, 目前国际溢油污染问题通常采用

微生物修复的方法进行治理。2010年4月20日在美国洛杉矶发生钻井平台爆炸,随后发生的溢油事故极大地影响了路易斯安那州的沿海生态系统,Boopathy等^[25]评估了污染地区微生物修复的效果,结果表明在厌氧细菌的作用下石油发生了显著降解。

湿地污染修复的生物修复技术发展和应用的重点在于发挥环境与生物过程间的交互作用机制,一方面利用湿地植物与土壤微生物共同作用对污染物质的吸收,另一方面保障修复植物个体及种群对污染胁迫的耐受和适应范围。Almeida等^[26]和李九龙等^[27]的研究发现微生物群落对石油烃有一定的修复能力,但是当污染物浓度超过一定范围会破坏微生物结构,而在栽种了翅碱蓬后能改善水溶性盐,增加微生物数量和土壤总孔隙度,二者交互作用下修复效果更为可观。

盐沼湿地水体及土壤污染的生物修复研究多处于基础研究阶段,特别是高盐分条件下,超累积植物和高效降解微生物的筛选及搭配、植物与微生物联合修复技术研究逐渐深入^[28],协调环境与生物过程交互作用下的生物多样性维持及系统结构完整性与功能提升相关内容成为进一步研究关注的重点,其中正反馈循环能够增加系统稳定性,例如盐沼植物与土壤盐度的反馈关系,促进植被生长同时改变盐度累计量^[29-30]。

3 盐沼湿地关键物种保育

滨海盐沼湿地集聚了丰富的动物种类,不仅是鱼类、贝类等动物的栖息场所,也是鸟类迁徙的中转站。特别是盐沼植被作为盐沼关键组成部分,具有为鸟类、底栖动物、鱼类等生物提供天然的饵料场和繁殖场的关键生物栖息地功能,对维持盐沼栖息地完整、生物多样性及发挥生态服务功能起关键支撑作用,也成为盐沼生态修复的重要内容^[31-32]。

我国盐沼湿地生物种群修复实践中,北方以翅碱蓬、怪柳等为主,南方以芦苇、海三棱藨草等为主,从CNKI数据库关键词分析中可以看出,主要包括芦苇、互花米草、纤维作物、盐生植物、盐地碱蓬等关键词(图3),与之相关的修复技术关键词有生物学特性、防治、生物防治、涂抹法、微生物、改良、修复Cd、植物修复等(图2),体现出国内盐沼湿地植被修复研究针对植被生物防治及土壤修复与植被恢复之间的相互作用关系。植被修复技术手段主要是各种生境条件下的植被种植与防治以及对外来入侵物种的控制。我国在2012年12月启动了“上海崇明东滩鸟类国家级自然保护区互花米草控制和鸟

类栖息地优化工程”,采用传统物理和化学修复技术对崇明东滩的9 km²互花米草进行了治理,完工时对互花米草灭除率达到95%以上^[33]。针对互花米草入侵问题,国内外因地区条件差异而采取不同措施,目前国外主要采取化学修复的方法,而国内以物理修复为主要技术手段^[34]。

WoS核心数据库相关关键词包括了 *Spartina alterniflora*、vegetation、growth、competition、communities、dynamics等(图3),与之相关的修复技术关键词包括 salinity、water、management、patterns、stability(图2),体现出国际研究重点关注植被分布及种群结构对盐度变化的响应、种间竞争影响下,群落结构的动态响应和稳定性也是关注重点。典型生物种群保护与群落结构恢复治理是关注的重点,包括互花米草入侵的防治以及互花米草入侵扰动下的植被响应机制等。生物过程修复主要关注种群之间的种间作用及其对修复效果的影响。通过恢复本土植物来消灭入侵种,美国 California State Coastal 通过移栽了超过30万株的本地植物,使入侵米草减少96%以上(净面积从323减少到12 hm²)^[35-36]。

目前盐沼湿地生态修复技术主要针对面积破碎化、水文连通受阻、环境污染、关键物种退化、外来物种入侵等问题展开,相应的修复技术主要包括生境质量修复和关键生物种群保护2种类型。其中:生境质量修复的目标是通过恢复和改善物理和化学条件,为生物个体生长和种群分布提供适宜环境条件;关键生物保育技术主要针对关键植物种群恢复、外来物种入侵控制、病虫害防治方面展开,多体现为水、土壤、生物要素的结构修复^[37-40]。修复目标也更多关注结构完整性,而对生态系统过程 and 功能的修复以及考虑过程连通性和功能系统性目标的修复实践相对较少。

4 面向系统稳定性维持盐沼湿地生态及格局修复

盐沼格局破碎、过程阻断与环境污染胁迫间已形成交互作用下的生态系统退化的累积效应,大量滨海盐沼面临的已不仅是水、土、生物要素的退化问题,相应产生的生态系统结构-过程失衡及其叠加效应下的服务功能退化问题和系统性生态修复问题等日益凸显。对于单一位置、单一组分或者单一生态系统类型的孤立“点状”修复,在解决滨海湿地大范围退化生境负面影响的局限性也逐渐显现。如何从系统层面阐释盐沼湿地生态退化驱动机制,进一步通过促进生态系统自组织过程发展系统保护与修

复措施,提升系统应对变化环境的弹性适应能力成为生态保护与修复理论研究关注的重点.例如,盐沼植被与泥沙输运沉降过程间的交互作用是维持河口整体地貌演化稳定的关键驱动机制^[41],也成为滨海盐沼适应及应对海平面上升扰动的关键^[42-45].

环境要素与生物过程正反馈是维持系统稳定性的关键驱动机制.一方面,盐沼湿地环境要素对生物种群分布有显著影响,另一方面,沿环境梯度方向上的生物种间竞争/促进关系作用下,通过对环境要素的反馈,形成了对环境胁迫的适应机制.生物过程与环境过程间不同尺度的交互作用是维持生态系统稳定和提升抵御外界扰动能力的关键机制.基于环境、生物要素层面作用关系,阐释盐沼湿地生态系统保护和退化机制,在局域尺度水分和盐度变化对盐沼植物生理生态指标影响及生物种群对环境要素反馈适应及调节基础上,在空间格局上揭示盐沼植被与生境环境要素组合之间的关系,仍有待进一步研究^[46].在技术研发层面,如何将局地要素层面的修复和养护技术拓展为系统生境格局调整与生物种群保育协同的修复技术,形成系统格局过程协同下的功能提升成为未来发展的趋势.景观格局的演变是环境过程与生物过程交互作用后的结果,同时景观格局的变化又能影响生物过程,通过对景观格局的优化,最大限度发挥生物种间关系对环境胁迫的调节适应效应,促进生物自组织过程的形成.生物自组织过程形成的斑图也被认为是生态系统应对外界扰动后的稳定性表征,李蕙等^[46]的研究表明,盐沼存在因为泥沙淤积导致的“盐沼”和“光滩”2种稳态,可以为生态修复提供指导^[47-51].在生物自组织斑图形成的早期阶段,通过连通孤立斑块、提升生境异质性等人工干预手段优化空间格局,并在斑块内部通过控制物种分布密度、改良物种组成结构等手段提升斑块品质,充分发挥生物自组织优势.

系统自组织过程的形成受到不同时间和空间尺度环境与生物相互作用关系的影响.时间尺度上,生物修复手段对环境条件的改造作用时间相对较短,比如植被生长提供的遮阴环境和吸盐作用反馈调节过程交互下,水盐修复以及微生物-植物交互作用对污染的修复,因此常被用来处理石油溢油等突发生物安全事件,并能在相对较短时间内取得良好的修复效果.而水沙过程与植被格局交互作用下的湿地地貌格局演变及其对气候变化的调节适应时间尺度相对较长.在空间尺度上形成的大小生物斑图能直接反映多时空尺度下的盐沼修复效应,因此应当建立与之对应的动态监测来实施系统性生态修复

的适应性管理.

5 结论

1)检索到的国内文献最早发表时间晚于国际文献最早发表时间 29 a,随后的上升点时间差距缩小到 11 a,之后国内外文献发文以基本相同的速率增长.

2)根据关键词统计结果:国内外文献集中在关键物种保育,主要是对植被种群恢复以及外来物种与种间竞争的控制;生境恢复主要关注盐沼土壤修复以及盐度梯度的恢复.根据关键词关联可视化结果:盐沼湿地水文调控技术常被用来对退化盐沼湿地进行修复;针对原油泄漏导致的盐沼水和土壤污染,常采用微生物修复技术;植被恢复的主要技术手段主要是植被种植相关技术与防治技术以及互花米草控制技术;盐沼植被分布受盐度梯度和种间竞争作用的双重影响,因此对盐度梯度恢复有利于盐沼植被恢复,通过对种间关系等生物过程的控制能提高恢复效果.

3)当前盐沼修复技术应当重点关注环境生物交互作用下的系统自组织过程效应的发挥.景观空间格局的演变是环境过程与生物过程交互作用后的结果,由此产生的生物自组织斑图能够抵御一定程度的生态扰动,被认为是稳定性的表征,因此在斑图形成的前期进行一定人工干预下的格局调整,能够提高生态系统稳定性.在考虑环境与生物交互作用下的修复技术时,应当注意不同时空尺度下的交互作用,发挥部分反馈调节修复技术可以在短期内起作用的优势,并在长时间尺度上考虑格局演变应对全球变化的调节适应.因此有必要建立长时间和大空间尺度的退化及修复效应监测对修复技术的实施效果进行长期评估,以此应对湿地多时空尺度上的退化.

6 参考文献

- [1] 贺强,安渊,崔保山.滨海盐沼及其植物群落的分布与多样性[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(3): 657
- [2] HE Q, ALTIERI A H, CUI B S. Herbivory drives zonation of stress tolerant marsh plants[J]. *Ecology*, 2015, 96(5): 1318
- [3] WILSON A M, EVANS T, MOORE W, et al. Groundwater controls ecological zonation of salt marsh macrophytes[J]. *Ecology*, 2015, 96(3): 840
- [4] 陈琳,任春颖,王灿,等. 6个时期黄河三角洲滨海湿地动态研究[J]. *湿地科学*, 2017, 15(2): 179
- [5] BARBIER E B, HACKER S D, KENNEDY C, et al. The value of estuarine and coastal ecosystem services[J].

- Ecological Monographs, 2011, 81(2): 169
- [6] 曹磊, 宋金明, 李学刚, 等. 中国滨海盐沼碳收支与碳循环过程研究进展[J]. 生态学报, 2013, 33(17): 5141
- [7] 李荣冠, 王建军, 林和山. 中国典型滨海湿地[M]. 北京: 科学出版社, 2015
- [8] 林光辉. 滨海湿地生态修复技术及其应用[M]. 北京: 海洋出版社, 2014
- [9] 窦勇, 唐学, 玺王悠. 滨海湿地生态修复研究进展[J]. 海洋环境科学, 2012, 31(4): 616
- [10] SPENCER T, SCHUERCH M, NICHOLLS R J. Global coastal wetland change under sea-level rise and related stresses: the DIVA Wetland Change Model[J]. *Global and Planetary Change*, 2016, 139: 15
- [11] 韩大勇, 杨永兴, 杨杨, 等. 湿地退化研究进展[J]. 生态学报, 2012, 32(4): 289
- [12] 孙涛, 徐静, 刘方方, 等. 河口生态需水研究进展[J]. 水科学进展, 2010, 2: 282
- [13] SUN T, ZHANG H Y, YANG Z F, et al. Environmental flow assessments for transformed estuaries[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 520: 75
- [14] 陈万逸, 张利权, 袁琳. 上海南汇东滩鸟类栖息地营造工程的生境评价[J]. 海洋环境科学, 2012, 31(4): 561
- [15] YANG W, LI X X, PEI J, et al. Bioavailability of trace metals in sediments of a recovering freshwater coastal wetland in China's Yellow River Delta, and risk assessment for the macrobenthic community[J]. *Chemosphere*, 2017, 189: 661
- [16] FRIESS D A, KRAUSS K W, HORSTMAN E M, et al. Are all intertidal wetlands naturally created equal? Bottlenecks, thresholds and knowledge gaps to mangrove and salt marsh ecosystems[J]. *Biological Reviews*, 2012, 87(2): 346
- [17] REZEK R J, LEBRETON B, STERBA-BOATWRIGHT B, et al. Ecological structure and function in a restored versus natural salt marsh[J]. *PLoS One*, 2017, 12(12): e0189871
- [18] MARCUS L. Restoring tidal wetlands at Sonoma Baylands, San Francisco Bay, California[J]. *Ecological Engineering*, 2000, 15(3): 373
- [19] 吉云秀, 丁永生, 丁德文. 滨海湿地的生物修复[J]. 大连海事大学学报, 2005, 31(3): 47
- [20] COX T, MARIS T, VLEESCHAUWER P, et al. Flood control areas as an opportunity to restore estuarine habitat[J]. *Ecological Engineering*, 2006, 28(1): 55
- [21] NATUHARA Y, KITANO M, GOTO K, et al. Creation and adaptive management of a wild bird habitat on reclaimed land in Osaka Port[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2005, 70: 283
- [22] KONAR M, TODD M J, MUNEEPEERAKUL R, et al. Hydrology as a driver of biodiversity: Controls on carrying capacity, niche formation, and dispersal[J]. *Advances in Water Resources*, 2013, 51(1): 317
- [23] 任葳. 基于微地形营造的黄河三角洲退化滨海湿地修复模式研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2017
- [24] 李纯厚, 王学锋, 王晓伟, 等. 中国海水养殖环境质量及其生态修复技术研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(增刊1): 310
- [25] BOOPATHY R, SHIELDS S, NUNNA S. Biodegradation of Crude Oil from the BP Oil Spill in the Marsh Sediments of Southeast Louisiana, USA[J]. *Applied Biochemistry & Biotechnology*, 2012, 67(6): 1560
- [26] ALMEIDA R, MUCHA A, TEIXEIRA C, et al. Biodegradation of petroleum hydrocarbons in estuarine sediments: metal influence[J]. *Biodegradation*, 2013, 24(1): 111
- [27] 李九龙, 田兵, 华跃进. 耐辐射奇球菌对受损湿地土壤的生态修复研究[J]. 核农学报, 2017, 31(7): 1397
- [28] 卢晋晶, 郜春花, 武雪萍. 植物-微生物联合修复技术在Cd污染土壤中的研究进展[J]. 山西农业科学, 2019, 47(6): 1115
- [29] JIANG J, GAO D, DEANGELIS D L. Towards a theory of ecotone resilience: coastal vegetation on a salinity gradient[J]. *Theoretical Population Biology*, 2012, 82(1): 29
- [30] 齐曼. 环境胁迫下黄河三角洲盐沼植物种间关系及群落稳定性驱动机制[D]. 北京: 北京师范大学, 2018
- [31] 赵魁义. 中国沼泽志[M]. 北京: 科学出版社, 1999
- [32] 中国湿地植被编辑委员会. 中国湿地植被[M]. 北京: 科学出版社, 1999
- [33] 顾燕飞. 崇明东滩互花米草生态控制的施工技术及其效果[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2019, 37(5): 83
- [34] 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
- [35] DEBRA R, KATHERINE Z, CHRISTINA M. Sexual reproduction of cordgrass hybrids (*Spartina foliosa* x *alterniflora*) invading tidal marshes in San Francisco Bay[J]. *Diversity & Distributions*, 2008, 14(2): 187
- [36] DREW W K, INGRID B H, BRIAN S O, et al. A review of 15 years of *Spartina* management in the San Francisco Estuary[J]. *Biological Invasions*, 2016, 18(8): 2247
- [37] 崔保山, 杨志峰. 湿地学[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 2006
- [38] 崔保山, 刘兴土. 湿地恢复研究综述[J]. 地球科学进展, 1999, 14(4): 358
- [39] 贾中华, 罗纨, 王文焰, 等. 对湿地定义和湿地水文特征的探讨[J]. 水土保持学报, 2001, 6(15): 117
- [40] 赵魁义. 地球之肾: 湿地[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002

- [41] PAOLA C, TWILLEY R R, EDMONDS D A, et al. Natural processes in delta restoration: application to the Mississippi Delta[J]. *Annual Review of Marine Science*, 2011, 3(1): 67
- [42] FAGHERAZZI S, KIRWAN M L, MUDD S M, et al. Numerical models of salt marsh evolution: ecological, geomorphic, and climatic factors[J]. *Reviews of Geophysics*, 2012, 50(1): 1002
- [43] KIRWAN M L, MEGONIGAL P J. Tidal wetland stability in the face of human impacts and sea-level rise[J]. *Nature*, 2013, 504(7478): 53
- [44] TEMMERMAN S, KIRWAN M L. Building land with a rising sea[J]. *Science*, 2015, 349(6248): 588
- [45] CORNACCHIA L, VAN D K J, BOUMA T J, et al. Landscapes of facilitation: how self-organized patchiness of aquatic macrophytes promotes diversity in streams[J]. *Ecology*, 2018, 99(4): 832
- [46] 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
- [47] SCHEFFER M, BASCOMPTE J, BROCK W A, et al. Early-warning signals for critical transitions[J]. *Nature*, 2009, 461(7260): 53
- [48] BONACHELA J A, PRINGLE R M, SHEFFER E, et al. Termite mounds can increase the robustness of dryland ecosystems to climatic change[J]. *Science*, 2015, 347(6222): 651
- [49] RIETKERK M, VAN D K J. Regular pattern formation in real ecosystems[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2008, 23(3): 169
- [50] DEBLAUWE V, COUTERON P, LEJEUNE O, et al. Environmental modulation of self-organized periodic vegetation patterns in Sudan[J]. *Ecography*, 2011, 34(6): 990
- [51] LIU Q X, HERMAN P M, MOOIJ W M, et al. Pattern formation at multiple spatial scales drives the resilience of mussel bed ecosystems[J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 5234

Ecological restoration of coastal salt marsh

SUN Qianzhao^{1,2)} LIN Haiying²⁾† ZHANG Meiqi³⁾ JIAO Le²⁾
ZHANG Yue²⁾ YANG Wei²⁾ SUN Tao²⁾

(1) College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, 830052, Urumqi, Xinjiang, China;

2) State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China;

3) Beijing Normal University Library, 100875, Beijing, China)

Abstract CNKI and Web of Science databases were subject to analysis with information visualization softwares (Cite Space and VOS viewer), for comprehensive analysis of current degradation and restoration research status. Current restoration was found mostly concentrated on single elements of water, soil, and biology, as reflected by habitat restoration and biological population conservation. The use in recent years of system self-organizing process under environment-organisms interaction at multiple spatiotemporal scales to achieve restoration theoretically and in practical application at ecosystem level has gradually attracted attention. Artificial intervention by landscape pattern adjustment in the early stage of self-organizing pattern formation could take full advantage of restoration technology at different spatial and temporal scales. Protection, restoration, regulation and monitoring to maintain system stability under the influence of multiple stresses is important for the protection and restoration of coastal salt marsh.

Keywords salt marsh; ecological restoration; environmental restoration; bibliometric analysis