

· 专题:双清论坛“湿地保护和修复的基础理论及关键技术问题” ·

地球系统科学观下的滨海湿地生态系统保护和恢复科学*

郎赟超^{1, 2†} 丁虎^{1, 2†} 韩晓昆^{1, 2} 刺伟¹ 刘丛强^{1, 2**}

1. 天津大学 地球系统科学学院/表层地球系统科学研究院,天津 300072

2. 天津大学 天津市环渤海地球关键带科学与可持续发展重点实验室,天津 300072

[摘要] 滨海湿地生态系统是地球上生产力、生物多样性和生态服务价值最高的生态系统之一,也是对气候变化响应极为敏感、受人类强烈干扰的生态系统。因此,滨海湿地生态系统的加速退化和消失正受到科学界和社会的高度关注,世界各国积极实施了对滨海湿地生态系统保护和恢复的研究与管理行动。但是,滨海湿地生态系统的保护和恢复仍存在较多方面问题,总体保护和恢复成效不足。本文建议,对滨海湿地生态系统的成功保护和修复需要在地球系统科学观的框架下进行,以恢复生态学的理论和方法为基础,充分融合其他地球科学学科,研究受不同程度人类活动干扰下退化的湿地生态系统动力学特征与演变规律,并认识这些自然规律与滨海社会经济系统发展之间的关系。本文最后提出有关未来滨海湿地生态系统保护和恢复科学研究的四个重要方面,对未来湿地系统科学研究具有重要借鉴意义。

[关键词] 滨海湿地;生态系统保护和恢复;区域可持续发展;地球系统科学

滨海湿地生态系统作为一个多圈层、多地带强烈交互的复杂关键地带,是地貌、地球流体和生物地球化学过程相互作用频繁的区域,在减缓和适应气候变化以及服务人类社会方面发挥着重要作用^[1, 2]。全球超过 60% 的人口居住在滨海地区,随着全球变化与人类活动影响的加剧,自 1970 年以来,滨海湿地以三倍于森林的速度在消退^[3]。滨海湿地系统是一种脆弱的生态系统,对气候变化和人类活动的干扰很敏感,极易发生景观破碎化、外来物种入侵、生物多样性减少和生态功能减退,直至大面积滨海湿地丧失,严重削弱人类社会生存发展的健康生态环境。

滨海湿地因具有极高的生态服务价值而被视为维持地球系统平衡的重要稳定器,其保护和修复日益受到重视。1971 年通过的《湿地公约》(Ramsar Convention),其宗旨为“合理利用、保护湿地”,美国于



刘丛强 天津大学地球系统科学学院院长/教授,中国科学院院士,中国地理学会会士,国际地球化学学会会士,爱丁堡皇家学会外籍院士,矿物岩石地球化学学会名誉理事长。主要从事地表地球化学和表层地球系统科学研究。



郎赟超 天津大学地球系统科学学院副院长/教授。主要从事流域物质循环与生态环境效应,湿地生物地球化学循环研究。主持国家自然科学基金、国家重点研发计划课题等多项国家级科研项目。



丁虎 天津大学地球系统科学学院副教授,贵州省“千层次人才”计划入选者。主要从事地表碳循环及其关键过程研究,主持国家自然科学基金项目、国家重点研发计划专题、国际原子能机构国际合作项目等。

收稿日期:2022-02-28;修回日期:2022-05-27

* 本文根据第 289 期“双清论坛”讨论的内容整理。

† 共同第一作者

** 通信作者,Email:liucongqiang@tju.edu.cn

本文受到国家自然科学基金项目(41971123)和科技部项目(2021FY101000)的资助。

1972年在海岸带综合管理方面首次立法,我国在“十三五”规划期间也加大了湿地保护,其保护率达50%以上,2025年力争达到55%^[4],并于2022年6月1日正式实施《中华人民共和国湿地保护法》,这是我国首次专门针对湿地生态系统进行立法保护。近二十年,基于国内外湿地保护过程中的成功经验和失败教训,我国滨海湿地保护和恢复的科学研究和实践开始向系统性、综合性、交叉性、国际化的方向发展,但第二次全国湿地资源调查仍然显示我国湿地保护缺乏长效机制,科技支撑湿地生态保护的力度不够,对湿地生态系统的综合管理能力待提高^[5,6]。总体上,现阶段的滨海湿地生态系统,乃至一般的生态环境保护和恢复缺乏地球系统科学思维,没有很好地把握保护与恢复、恢复科学与实践、科学保护与综合管理及可持续利用等辩证关系,导致保护和恢复的科学目标不明确、生态系统的功能恢复不够、缺乏对保护恢复生态系统的后续综合管理以及建立科学生态环境保护与科学家和社会利益相关者之间的紧密关系。因此,湿地生态系统保护和恢复需要全面统筹湿地资源合理利用与开发,从地球系统科学理论的角度做好战略规划,强化湿地科学基础理论研究和科技支撑,加强滨海湿地地球关键带的结构、过程和功能的系统基础科学研究,多学科交叉进行以完整健康湿地生态系统构建为目标的生态恢复,提升湿地保护和恢复的科学管理水平,建立健全部门间的协作保护机制及应急响应机制,实现湿地生态系统健全服务功能保护和恢复以及区域可持续发展目标。

1 全球变化背景下的滨海湿地系统演变

滨海湿地生态系统受到气候变化和人类活动的严重影响。气候变化引起的海平面上升将会导致目前全球范围内20%~90%的滨海湿地消失,并造成湿地生态系统生物多样性减少和生态系统服务功能退化^[7-9]。例如,利用综合情景方法预测发现,受海平面上升影响,美国环太平洋地区大量潮汐湿地将在本世纪消失,其中加利福尼亚州和俄勒冈州损失面积最大(~100%)、华盛顿州次之(68%)^[10]。在海平面上升时,流量衰减会改变湿地干湿状态和淹没深度,进而影响湿地植被类型并使植被脆弱性增加^[11]。此外,海平面上升时海水入侵会导致湿地水体盐度增加,沉积物孔隙水中电子受体硫酸盐浓度升高,进而影响沉积物中有机碳矿化过程^[12]。除海平面上升之外,温度和降雨量等变化也会严重影响

滨海湿地生态系统结构和功能^[13-15]。最近研究表明,温度增加使全球湿地CH₄和CO₂排放通量增大,其CH₄通量还显著受控于湿地水深^[16]。此外,Wei等^[15]研究发现极端降雨事件削弱了黄河三角洲湿地的年碳汇(CO₂沉降)强度。

城镇化及其他土地利用变化造成滨海湿地面积减少,降低湿地生态系统生物多样性,并导致湿地生态功能退化^[17-19],全球约有50%的滨海湿地由于农业和渔业开发而丧失^[20]。我国因开垦造成滨海湿地面积每年减少37 735公顷(1985—2010年数据)^[21]、水产养殖池塘每年增加327 km²(1984—2018年数据)^[22],滨海湿地退化形势较为严峻。Yuan等^[23]通过测量稻田和螃蟹水产养殖池塘的CH₄、CO₂和N₂O通量,研究发现稻田转变为水产养殖之后CH₄排放量显著增加。因此,中国沿海地区水产养殖面积的增加可能进一步加快CH₄排放。由此可见,随着滨海地区城市化发展、土地利用发生变化,滨海湿地面积不断降低,这将严重影响湿地生态系统生物多样性和生态功能。

人类还可通过采矿、水产养殖、排放生活污水以及工业和农业污水等活动致使滨海湿地及其近海水体污染和富营养化,进而使得滨海湿地生态功能逐步退化^[24-27]。研究显示,酸性矿山废水排放、农业生产活动、水产养殖和石油加工等人为活动均可不同程度导致滨海湿地重金属污染^[17, 28, 29],可对滨海湿地生态系统中的生物造成不同程度危害。基于细菌、古菌和微真核生物的群落特征的分析显示,渔业养殖和工业发展导致滨海湿地富营养化和生态功能退化^[30],进一步加速了CH₄温室气体排放^[31, 32]。城市排污和海水入侵可降低滨海湿地CO₂和CH₄排放,但是增加了N₂O排放^[33]。

综上,人类活动(包括湿地开垦、农业生产、工业活动、污水排放和水产养殖等)可造成滨海湿地面积减少,改变湿地生物多样性和稳定性以及沉积物和水文结构连通性,造成湿地不同类型污染,对滨海地区可持续发展造成严重威胁^[26]。

2 从地球系统科学观认识滨海湿地生态过程与功能

2.1 滨海/海岸带地球系统的结构及其变化

滨海地球系统是指由滨海地质圈(岩石—土壤—水—大气)、生物圈和人类圈构成的整体系统。受频繁发生的海平面变动、诸多高能动力(波浪、潮汐等)之间的相互强烈作用以及高强度人类干扰的

影响,滨海系统是一个地质结构、地理格局、过程(物理、化学、生物和社会)、生态功能和服务机制复杂的地球系统。

地球板块运动决定了滨海系统大尺度上的结构及其演变趋势,大陆边缘的地质性质决定了滨海系统陆架宽窄、陆坡的大小以及海岸地貌景观^[34],形成不同构造地貌类型的海岸带。气候通过影响冰川形成和消融控制了地史时期海平面升降变动进而驱动滨海系统的长期演化,并使处于不同气候带的滨海系统的海岸线特征、生物及其多样性、水、泥沙、营养物质的通量等与气候相关的物理胁迫的显著差异而存在地带性特征^[35]。除构造运动和气候以外,潮汐和波浪为主的海水运动、生物作用及建港、修堤、围海、养殖、采矿、捕捞活动等人类作用也对滨海地球系统特征有重要影响,决定了海岸地貌和形态的复杂性和现代海岸的演变。

在滨海系统中,滨海湿地的成因和结构类型的差异也明显受到地球内外营力的影响,如发育于地震和火山活动活跃的丘陵和山区或北半球高纬度冰后期地壳抬升地区的基岩质滨海湿地(也称岩滩),其陆缘主要以坚硬岩石为主,具有岛屿众多、岬湾相间等特点。发育于背负山地或丘陵的狭窄平原地区的沙砾质滨海湿地(也称海滩),其在源远流急的河流或在波浪和激浪作用下发育而成。形成于泥沙来源丰富、潮汐作用较强的河口附近和隐蔽的海湾内的淤泥质滨海湿地(也称潮滩),由河流沉积作用或冰水沉积作用形成。处于浅海的湿地,也由于构造制约下的陆架宽窄、陆坡大小、气候影响下的近岸海流、陆源泥沙供给等具有不同的组成和生境特征,并影响其生物生态类型。

综上所述,滨海湿地是滨海地球系统的重要组成部分之一,其时空格局、地貌特征以及其生态功能受控于海岸带地质、气候、近岸海陆过程和人类活动,对滨海地球系统的结构及其变化的控制因素及其控制规律的认识是理解滨海湿地系统结构、过程和功能的关键。

2.2 基于地球系统科学理论的湿地生态系统过程和功能研究

生态过程指驱动生态系统形成和演化的所有物理(物质和能量流动)、化学(元素循环)和生物(代谢等)过程。不同层次的滨海地球系统结构和丰富、活跃而动态的生态过程使滨海湿地除了具有调节径流、产氧、养分循环、有机质生产、固碳/氮、调节气候、净化环境、维系生物多样性、拦截陆源物质等

湿地的一般功能外,还具有能量流动、供给海岸带营养物质、稳定气候(温度和湿度)、为部分珍稀濒危物种提供栖息地和繁衍场所、保护沿海居民免受洪水、风暴潮和/或海啸的侵袭等特有功能。滨海湿地中水生植物发达的湿地系统(红树林、海草床、大型海藻、盐沼等)碳吸收能力强,碳汇功能极强^[36]。

滨海地区陆地和海洋过程作用,通过陆地水文影响湿地和海岸带整体系统的能量和物质流动。陆地和海洋过程的综合平衡产生了区域和局部的物理和生态结构的异质性,维持了滨海湿地生态系统功能的生物地球化学循环,这是滨海湿地系统为人类提供高价值生态服务和产品的关键要素^[37]。过去几十年在研究特定滨海湿地生态系统变化的结构、关键过程和功能等方面取得显著进展,但在研究滨海不同生态系统之间物理、化学和生物物质交换过程和通量变化及其与湿地生态系统的功能和服务的关系存在不足,对滨海生态系统功能在区域和全球尺度上的变化的理解还非常有限,难以评估跨空间尺度的滨海湿地生态过程和功能。从地球关键带科学角度看,过去我们的研究主要关注生态系统的过程和功能,缺乏对地下系统的地质结构和物质能量传输过程对地表生态系统过程和功能的影响的系统研究认识。生态系统提供服务的能力及其大小除了受地表生态过程影响外,从根本上受土壤形成、地下水补给、水文分区等地质过程的限制^[38]。特别是对于滨海系统而言,地下水对系统具有非常重要的作用,地表水文隔离的湿地景观,其在地下却可能由于地下水的交换而使不同景观单元联系在一起^[39]。因此,我们并不清楚地下水活动导致湿地在景观单元外更大空间上的物理、化学和生物过程如何影响滨海湿地的功能。此外,滨海湿地系统在不同尺度上和社会经济系统中存在协同和反馈等错综复杂的相互作用,如何判别人为引起的变化和自然胁迫的变化仍然是目前研究的挑战^[37]。这些问题和挑战的解决,超越了传统湿地科学、甚至自然科学和社会科学之间的界限,需要开展跨自然和人文社会科学领域的学科交叉融合的科学研究。

地球系统科学理论为解决上述问题和挑战提供了可能。从地球系统科学的视角,滨海湿地过程和功能变化由滨海系统在不同时空尺度上自然(地质、地貌、气候、生态等)—社会经济系统间复杂的动态相互作用驱动(图1)。理解滨海湿地功能机制,不仅要考虑湿地本身生态过程,更要关注湿地所在的

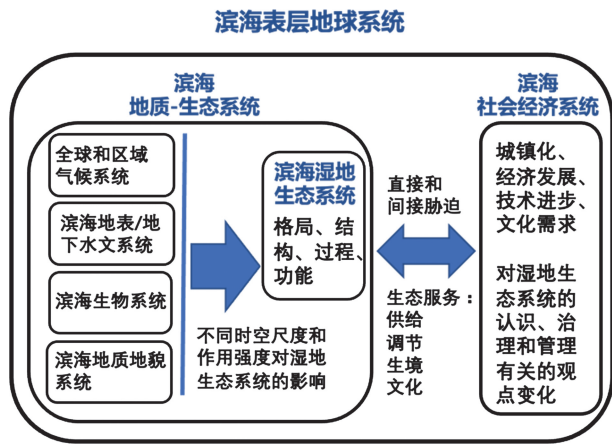


图 1 滨海湿地生态系统格局、结构、过程和功能变化与滨海表层地球系统其他子系统之间关系的概念图

滨海地球系统(滨海地质圈—生物圈和人类圈)及其所在流域甚至更大尺度空间的物理、化学、生物和社会作用过程。要从多个时间尺度、特别是长时间尺度上理解滨海湿地的演化机制,解析和区分自然胁迫和人为引起的变化,从而为滨海湿地生态系统管理提供理论支撑。

3 服务区域可持续发展的滨海湿地功能保护

稳定健康的湿地生态系统是社会与经济可持续发展的重要基础。滨海湿地不仅为野生动物提供重要栖息地,在维持全球生态系统功能和生物多样性方面也发挥着重要作用^[40, 41]。维持湿地生态结构稳定性和生态功能协调性是湿地保护的核心问题,然而因人类社会对滨海湿地生态系统服务的非理性获取等人类社会经济活动严重影响着滨海湿地生态系统空间格局、结构、过程和服务功能。因此,滨海湿地以至其他生态系统的保护和恢复首先要研究和构建生态系统健康保护和恢复与区域可持续发展之间的协同发展关系。

生态系统保护的目的是使受损生态系统进行自然恢复,而生态系统恢复则是通过自然、人工辅助和生态系统重建方式恢复生态系统的自然结构、过程和服务功能,因此保护和恢复都需要我们对生态系统恢复的生态学机制的理解。然而,湿地保护和恢复过程中仍面临很多问题和不足,调查评估发现世界上大多数国家的滨海湿地生态系统的健康管理都是失败的^[42]。除了因滨海湿地生态系统的复杂性导致外,管理目标和策略不当(如追求产品价值最大化,忽略其负面效应及其他功能)、管理

对象单一也是主要原因。我国在滨海湿地保护管理方面,早期存在法制体系和管理体系不完善、滨海湿地产权机制和评价体系不健全、缺少生态补偿制度、湿地保护宣传教育工作薄弱、资金投入和国际交流与合作略显不足、管理体制机制不顺、管理职能交叉重叠、部门政策冲突等问题^[6, 43]。迫切需要加深对滨海地球系统可持续发展科学的研究,并让更广泛的全球社区以及特定人群(如政策制定者和管理者)保持高效的知识交流或成果共享,促进研究与管理融合。

2014年,联合国提出了17个全球可持续发展目标(Sustainable Development Goals, SDGs),其中75项指标可以通过湿地的生态服务功能来实现。不同可持续发展目标之间存在协同和均衡的复杂相互关系,从科学角度来定量不同SDGs之间的关系以及探索协同实现途径成为现阶段的重要科学问题^[44]。2022年1月,中国盐城举办的全球滨海论坛上通过了《关于建立全球滨海论坛的倡议》^[45],其愿景在于推动滨海生态保护,落实联合国《2030年可持续发展议程》,建立滨海保护国际交流合作平台。此外,国际海岸带陆海相互作用计划及国际未来地球海岸计划也坚持致力于海岸带地区的可持续发展。《中国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划(2021—2035年)》针对以海岸带生态保护和修复重大工程的主攻方向,提出应以该生态系统结构恢复和服务功能提升为导向,全面保护自然岸线,改善近岸海域生态质量,恢复退化的典型生境,加强候鸟迁徙路径栖息地保护,提升海岸带生态系统结构完整性和功能稳定性。因此,加强滨海湿地保护是维持国家生态安全、区域社会经济发展和构建人类命运共同体的重要组成部分,是推进生态文明建设和实现可持续发展的重要保障。在湿地利用和发展的同时,要兼顾湿地的生态效益、社会效益、经济效益协同发展,尤其是滨海湿地所独特的丰富生态水资源、人文景观资源、海产品及相关物产资源,这与滨海湿地系统的服务功能密切相关。湿地保护还需建立受损湿地的恢复和生态补偿程序和政策,科学管理好湿地健康发展中的人类活动,全面落实“零损失”的生态红线政策,着重发挥好社会人文科学作用,充分调动公众参与的积极性,协调推进社会经济发展与环境保护。

4 滨海湿地恢复和保护中的未来科学研究

滨海湿地生态系统因受到气候变化和人类活动

干扰的双重胁迫而发生的退化和面积大幅度减少引起了社会和科学界的高度关注,对湿地生态系统和保护的科学研究和实践都取得了显著进展。但是,由于对湿地保护和恢复科学问题以及解决问题的科学方案的欠缺,导致目前世界和我国对湿地,特别是滨海湿地的保护和恢复都未获得显著成功^[46, 47],问题应归结于我们对湿地生态系统和恢复的基础科学问题的认识不足,对湿地保护管理和社会以及个人作用的认识不足。从研究哲学思维上讲,根本问题是缺乏系统科学哲学指导,最终表现为我们研究的系统孤立分散,缺乏整体性和综合性的研究。因此,本文建议对湿地、特别是滨海湿地生态系统的保护和恢复的科学研究应该特别关注以下四个方面:

(1) 对退化、恢复和重建湿地的生态过程和功能现状进行科学诊断和评估,确定造成退化或恢复和重建湿地生态系统功能不健康的内在过程和结构因素以及外在干扰影响因素,并从系统生态学角度明确湿地整体生态系统恢复的科学目标。

(2) 突出地球关键带科学的研究理论和方法,将湿地生态系统作为滨海地球系统的一单元,综合滨海地质系统、生态系统和社会经济系统为一整体系统,以气候变化和人类活动胁迫下的滨海湿地系统格局、结构、过程和功能变化及其机制为科学核心,重点研究流域—湿地系统水文与地貌和生物地球化学循环,滨海湿地生态系统的脆弱性、韧性和可恢复性以及滨海湿地—社会生态系统动力学与湿地生态系统保护和可持续利用等科学问题。

(3) 以地球系统科学理论为指导,重点突出流域—湿地系统或流域湿地景观层面的系统保护和恢复为目的,充分考虑湿地系统本身内部及其与流域或景观尺度上其他湿地和生态系统之间联系,从系统科学观点和应用地球关键带科学研究理论和方法研究认识湿地生态系统结构、过程和功能的变化及其与外部系统之间耦合关系,从系统科学角度认识滨海湿地生态系统的生态功能和服务,并指导对生态系统的科学评估。

(4) 加强研究滨海社会经济系统和环境系统之间的相互作用及其与实现可持续发展目标之间的关系。滨海湿地生态的保护和恢复面临多重挑战,需要对滨海湿地以及其他生态系统动力学,特别是其中空间格局、结构、过程和功能变化规律的自然科学研究的同时,目前更需要对滨海

地区社会经济系统动力学的研究,研究探索实现可持续发展的滨海湿地生态系统服务的可持续利用模式。

参 考 文 献

- [1] Koebsch F, Winkel M, Liebner S, et al. Sulfate deprivation triggers high methane production in a disturbed and rewetted coastal peatland. *Biogeosciences*, 2019, 16 (9): 1937—1953.
- [2] 陈一宁, 陈鹭真, 蔡廷禄, 等. 滨海湿地生物地貌学进展及在生态修复中的应用展望. *海洋与湖沼*, 2020, 51(5): 1055—1065.
- [3] Simpson M, Stroud D, McInnes R, et al. The global wetland outlook: special edition 2021. Gland, Switzerland: Secretariat of the Convention on Wetland, 2021.
- [4] 国家林业局. 第二次全国湿地资源调查结果. *国土绿化*, 2014(2): 6—7.
- [5] 国家林业和草原局, 国家发展和改革委员会. “十四五”林业草原保护发展规划纲要. (2021-8-19)/[2022-02-26]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-08/19/content_5632036.htm.
- [6] 于秀波, 张立. 中国沿海湿地保护绿皮书—2019. 北京: 科学出版社, 2020.
- [7] Crosby SC, Sax DF, Palmer ME, et al. Salt marsh persistence is threatened by predicted sea-level rise. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2016, 181: 93—99.
- [8] Mehvar S, Filatova T, Sarker MH, et al. Climate change-driven losses in ecosystem services of coastal wetlands: a case study in the west coast of Bangladesh. *Ocean & Coastal Management*, 2019, 169: 273—283.
- [9] Spencer T, Schuerch M, Nicholls RJ, et al. Global coastal wetland change under sea-level rise and related stresses: the DIVA wetland change model. *Global and Planetary Change*, 2016, 139: 15—30.
- [10] Thorne K, MacDonald G, Guntenspergen G, et al. U. S. Pacific coastal wetland resilience and vulnerability to sea-level rise. *Science Advances*, 2018, 4: eaao3270.
- [11] Rodriguez JF, Saco PM, Sandi S, et al. Potential increase in coastal wetland vulnerability to sea-level rise suggested by considering hydrodynamic attenuation effects. *Nature Communications*, 2017, 8: 16094.
- [12] Luo M, Huang JF, Zhu WF, et al. Impacts of increasing salinity and inundation on rates and pathways of organic carbon mineralization in tidal wetlands: a review. *Hydrobiologia*, 2019, 827(1): 31—49.

- [13] Gabler CA, Osland MJ, Grace JB, et al. Macroclimatic change expected to transform coastal wetland ecosystems this century. *Nature Climate Change*, 2017, 7(2): 142—147.
- [14] Osland MJ, Enwright NM, Day RH, et al. Beyond just sea-level rise: considering macroclimatic drivers within coastal wetland vulnerability assessments to climate change. *Global Change Biology*, 2016, 22(1): 1—11.
- [15] Wei SY, Han GX, Chu XJ, et al. Prolonged impacts of extreme precipitation events weakened annual ecosystem CO₂ sink strength in a coastal wetland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 310: 108655.
- [16] Chen HY, Xu X, Fang CM, et al. Differences in the temperature dependence of wetland CO₂ and CH₄ emissions vary with water table depth. *Nature Climate Change*, 2021, 11(9): 766—771.
- [17] Li Y, Zhang HB, Chen XB, et al. Distribution of heavy metals in soils of the Yellow River Delta: concentrations in different soil horizons and source identification. *Journal of Soils and Sediments*, 2014, 14(6): 1158—1168.
- [18] Rojas C, Munizaga J, Rojas O, et al. Urban development versus wetland loss in a coastal Latin American City: lessons for sustainable land use planning. *Land Use Policy*, 2019, 80: 47—56.
- [19] Xu CY, Pu LJ, Zhu M, et al. Ecological security and ecosystem services in response to land use change in the coastal area of Jiangsu, China. *Sustainability*, 2016, 8(8): 816.
- [20] Pendleton L, Donato DC, Murray BC, et al. Estimating global “blue carbon” emissions from conversion and degradation of vegetated coastal ecosystems. *PLoS One*, 2012, 7(9): e43542.
- [21] Tian B, Wu WT, Yang ZQ, et al. Drivers, trends, and potential impacts of long-term coastal reclamation in China from 1985 to 2010. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2016, 170: 83—90.
- [22] Ren CY, Wang ZM, Zhang YZ, et al. Rapid expansion of coastal aquaculture ponds in China from Landsat observations during 1984–2016. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2019, 82: 101902.
- [23] Yuan JJ, Xiang J, Liu DY, et al. Rapid growth in greenhouse gas emissions from the adoption of industrial-scale aquaculture. *Nature Climate Change*, 2019, 9(4): 318—322.
- [24] Boesch DF. Barriers and bridges in abating coastal eutrophication. *Frontiers in Marine Science*, 2019, 6: 123.
- [25] Deegan LA, Johnson DS, Warren RS, et al. Coastal eutrophication as a driver of salt marsh loss. *Nature*, 2012, 490(7420): 388—392.
- [26] Newton A, Icelly J, Cristina S, et al. Anthropogenic, direct pressures on coastal wetlands. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2020, 8: 144.
- [27] Pan K, Wang WX. Trace metal contamination in estuarine and coastal environments in China. *Science of the Total Environment*, 2012, 421/422: 3—16.
- [28] Idaszkin YL, Carol E, Maria del Pilar A. Mechanism of removal and retention of heavy metals from the acid mine drainage to coastal wetland in the Patagonian marsh. *Chemosphere*, 2017, 183: 361—370.
- [29] Lu QQ, Bai JH, Zhang GL, et al. Effects of coastal reclamation history on heavy metals in different types of wetland soils in the Pearl River Delta: Levels, sources and ecological risks. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 272: 122668.
- [30] Niu LH, Zou GH, Guo YT, et al. Eutrophication dangers the ecological status of coastal wetlands: a quantitative assessment by composite microbial index of biotic integrity. *Science of the Total Environment*, 2022, 816: 151620.
- [31] Gelesh L, Marshall K, Boicourt W, et al. Methane concentrations increase in bottom waters during summertime *Anoxia* in the highly eutrophic estuary, Chesapeake Bay, U. S. A. *Limnology and Oceanography*, 2016, 61: S253—S266.
- [32] Sepulveda-Jauregui A, Hoyos-Santillan J, Martinez-Cruz K, et al. Eutrophication exacerbates the impact of climate warming on lake methane emission. *Science of the Total Environment*, 2018, 636: 411—419.
- [33] Doroski AA, Helton AM, Vadas TM. Greenhouse gas fluxes from coastal wetlands at the intersection of urban pollution and saltwater intrusion: a soil core experiment. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 131: 44—53.
- [34] Viles H, Spencer T. *Coastal problems: geomorphology, ecology and society at the coast*. London: Routledge, 2014.
- [35] Scott DB, Frail-Gauthier J, Mudie PJ. *Coastal wetlands of the world*. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [36] Macreadie PI, Costa MDP, Atwood TB, et al. Blue carbon as a natural climate solution. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2021, 2(12): 826—839.
- [37] Crossland CJ, Kremer HH, Lindeboom HJ, et al. *Coastal Fluxes in the Anthropocene*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005.

- [38] Field JP, Breshears DD, Law DJ, et al. Critical zone services: expanding context, constraints, and currency beyond ecosystem services. *Vadose Zone Journal*, 2015, 14(1): 1–7.
- [39] Cohen MJ, Creed IF, Alexander L, et al. Do geographically isolated wetlands influence landscape functions? *PNAS*, 2016, 113(8): 1978–1986.
- [40] 吕宪国, 邹元春. 中国湿地研究. 长沙: 湖南教育出版社, 2017.
- [41] Zollitsch B, Stelk M, Schiller S, et al. Healthy wetlands, healthy watersheds: leveraging state wetland restoration and protection programs to improve watershed health. Windham, Maine: Association of State Wetland Managers, 2019.
- [42] Perillo GME, Wolanski E, Cahoon D, et al. Coastal wetlands: an integrated ecosystem approach (2nd edition). Amsterdam: Elsevier, 2018.
- [43] 韩秋影, 黄小平, 施平, 等. 华南滨海湿地的退化趋势、原因及保护对策. *科学通报*, 2006, 51(S3): 102–107.
- [44] Wang M, Janssen ABG, Bazin J, et al. Accounting for interactions between sustainable development goals is essential for water pollution control in China. *Nature Communications*, 2022, 13: 730.
- [45] 盐城市委宣传部. 携手构建人与自然生命共同体: 全球滨海论坛在盐城成功举办. [2022-01-11]/[2022-02-26]. http://www.js.xinhuanet.com/2022-01/11/c_1128253733.htm.
- [46] Taylor NG, Grillas P, Hreisha HA, et al. The future for Mediterranean wetlands: 50 key issues and 50 important conservation research questions. *Regional Environmental Change*, 2021, 21(2): 33.
- [47] 张安峰. 基于 Web of Science 滨海湿地恢复研究态势分析. *山东林业科技*, 2020, 50(3): 36–39.

Ecosystem Protection and Restoration Science in Coastal Wetlands from the Perspective of Earth System Science

Lang Yunchao^{1, 2†} Ding Hu^{1, 2†} Han Xiaokun^{1, 2} La Wei¹ Liu Cong-Qiang^{1, 2*}

1. School of Earth System Science/Institutes of Surface Earth System Science, Tianjin University, Tianjin 300072

2. Tianjin Key Laboratory of Earth Critical Zone Science and Sustainable Development in Bohai Rim, Tianjin University, Tianjin 300072

Abstract Coastal wetlands are among the most productive, biologically diverse and valuable ecosystems on Earth, yet are extremely sensitive to climate change and human disturbances. The serious degradation and disappearance of coastal wetland ecosystems is gaining great attention from society and the scientific community. Ecosystem management and research have been actively implemented to protect and restore coastal wetlands in many countries around the world. However, there are still many deficiencies in the management of wetland ecosystems, and the overall effects are insufficient. We propose in this paper that the successful protection and restoration of coastal wetland ecosystems needs to be guided by the framework of Earth System Science. This is alongside having a deep understanding of ecosystem dynamics and evolution of the coastal wetlands and their relationships with the social-economic system development under different human disturbances, based on theory, methods and outcomes of restoration ecology and other integrated disciplines in Earth science. This work has presented four directions in the protection and restoration of coastal wetland ecosystems, which are of significance in the study of wetland system science in the future.

Keywords coastal wetland; ecosystem protection and restoration; regional sustainable development; earth system science

(责任编辑 吴征天)

* Corresponding Author, Email: liucongqiang@tju.edu.cn

† Contributed equally as co-first authors.