



滨海蓝碳评估现状: 理论、方法及碳减排增汇途径

王继龙¹, 于贵瑞^{1,2,3*}, 丁虎¹, 刘婷婷⁴, 陈小刚⁵, 张心茹¹

1. 天津大学地球系统科学学院, 天津 300072

2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101

3. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049

4. 华东师范大学河口海岸学全国重点实验室, 上海 200241

5. 西湖大学工学院, 浙江省海岸带环境与资源研究重点实验室, 杭州 310030

* 通讯作者, E-mail: yugr@igsnr.ac.cn

收稿日期: 2024-05-12; 收修改稿日期: 2025-03-04; 接受日期: 2025-03-07; 网络版发表日期: 2025-04-15

国家自然科学基金基础科学中心项目(1988102)和国家自然科学基金重大项目(42293262)资助

摘要 滨海湿地具有强大的固碳速率和储碳功能, 明确滨海湿地碳汇的评价方法, 梳理其中存在的问题是实现滨海湿地蓝色碳汇的精准评估、理解陆地-滨海-海洋生态系统间碳平衡关系, 以及推动“双碳”目标的重要内容. 首先, 本文梳理了滨海湿地碳循环的精细过程, 总结了滨海湿地定义、面积和边界识别的难点和挑战. 通过构建“黑箱理论”概括了当下不同维度碳汇评价手段, 进而基于“白箱理论”构建了净生态系统碳平衡(Net Ecosystem Carbon Balance, NECB)碳汇评估模式, 为提升对滨海湿地碳汇的认知和理解, 以及优化滨海湿地蓝色碳汇功能的评价体系提供了理论依据. 其次, 本文系统总结了我国滨海湿地碳源汇现状, 并提出了“海岸带及滨海湿地综合治理”及“湿地关键生态过程调节”的减排增汇技术体系, 旨在提升蓝碳在减缓气候变化中的潜力. 最后, 根据目前研究的不足, 展望了未来滨海湿地蓝碳研究重点.

关键词 滨海湿地, 蓝碳, 碳汇评价体系, NECB, 减排增汇

1 引言

在全球变化日益显著的人类世, 各类复杂的人为扰动已经逐渐主导了自然过程, 并持续增加地球系统的突变风险(Wunderling等, 2021; Armstrong McKay等, 2022). IPCC第六次评估报告已经明确指出, 人类活动引发的温室气体浓度升高, 特别是化石燃料燃烧产生的CO₂无节制排放是引发全球变暖的根本原因(IPCC, 2021). 全球变暖将打破全球气候系统原有的物

质循环和能量平衡过程, 引发一系列异常或极端气候事件(Zhang等, 2020), 如海平面升高、极端干旱和洪涝灾害等(Fischer和Knutti, 2015), 进而威胁人类健康和社会福祉.

实现“双碳”目标不仅需要控制以CO₂为首的温室气体的减排, 也需要通过人为或自然途径增加对大气CO₂的固定(于贵瑞等, 2022). 在过去的几十年当中, 陆地生态系统(Piao等, 2009; Wang J等, 2020)和海洋生态系统(Nowicki等, 2022; Yun等, 2022)的碳汇研究

中文引用格式: 王继龙, 于贵瑞, 丁虎, 刘婷婷, 陈小刚, 张心茹. 2025. 滨海蓝碳评估现状: 理论、方法及碳减排增汇途径. 中国科学: 地球科学, 55(5): 1458–1473, doi: [10.1360/SSTe-2024-0129](https://doi.org/10.1360/SSTe-2024-0129)

英文引用格式: Wang J, Yu G, Ding H, Liu T, Chen X, Zhang X. 2025. Current status of coastal blue carbon assessment: Theory, methods, and carbon sequestration pathways. Science China Earth Sciences, 68(5): 1403–1418, <https://doi.org/10.1007/s11430-024-1542-8>

已受到了学界的广泛关注, 然而滨海湿地(如红树林、盐沼和海草床等)的碳循环研究才刚刚起步(廖丽蓉等, 2022). 滨海湿地是位于海洋和陆地缓冲带上的一种特殊生态系统, 是海洋蓝碳的重要组成部分. 虽然滨海湿地面积仅占海洋生态系统的0.2%, 却为海洋沉积物贡献了约50%的有机碳(Duarte等, 2013), 且每年可从大气中吸收约444Tg当量的 CO_2 (Rosentreter等, 2023), 单位面积的滨海湿地土壤碳埋藏速率是陆地生态系统的15倍, 是海洋生态系统的50倍(王法明等, 2021). 因此, 滨海湿地被认为是具有高碳吸收能力和强大碳埋藏速率的生态系统, 在吸收全球大气 CO_2 、缓解气候变化等方面起着至关重要的作用(Donato等, 2011; Fourqurean等, 2012; Duarte等, 2013; Wang F M等, 2021; Rosentreter等, 2023).

精准评估滨海湿地的碳汇功能及增汇潜力是发挥海洋蓝色碳汇功能的重要科技任务. 虽然目前已有研究在区域和全球尺度上评估了滨海湿地的碳汇速率(Duarte等, 2013; Rovai等, 2018)和碳汇能力(Fu等, 2021; Wang F M等, 2021), 但由于滨海湿地具有独特的人文、土壤和植被特征, 以及复杂的碳循环过程(光合固碳、碳沉积和埋藏以及横向碳交换), 滨海蓝色碳汇评估研究仍然面临许多挑战. 例如, 如何定义滨海湿地? 其边界如何划定? 滨海蓝碳评价方法和标准应从哪些维度来量化体现? 不同碳循环过程之间又存在什么样的关系? 如何提高滨海湿地的减排增汇潜力? 这些问题不仅关系到滨海蓝色碳汇的精准评估, 也对正确理解滨海蓝色碳汇形成的过程机制、推动蓝碳增汇等至关重要. 本文梳理了现阶段滨海湿地蓝色碳汇评估所面临的挑战, 深入探讨了滨海湿地的碳汇评价体系和面积识别等问题, 提出了减排增汇的技术措施, 最后对未来的研究重点进行了展望, 以期为滨海湿地碳循环研究和蓝色碳汇管理提供理论参考.

2 滨海湿地碳源汇的科学概念和碳循环过程

2.1 滨海湿地碳源汇科学概念

蓝色碳汇(简称“蓝碳”)概念是相对于“绿碳”的概念而提出的. 陆地森林等植被从大气中吸收的碳称为“绿碳”(Piao等, 2020). 一般意义的蓝碳概念则是指海洋生态系统从大气中捕获并埋藏于海洋中的碳汇作用和过程. 与陆地的绿碳相比, 海洋蓝碳具有单位面积固

碳速率高、碳埋藏时间长、固碳潜力大等特点(唐剑武等, 2018). 因此, 海洋蓝碳是减缓气候变化的自然解决方案的重要组成部分, 也被认为是加速实现全球碳中和的重要贡献者(Macreadie等, 2021).

滨海湿地是海洋生态系统的重要组成部分, 滨海蓝碳是指传统概念下的红树林、盐沼、海草床生态系统(唐剑武等, 2018; Wang等, 2023), 以及近来所新界定的泥滩、峡湾、珊瑚礁等沿海生态系统对大气 CO_2 吸收以及沉积物对有机碳的拦截和封存过程(James等, 2024). 滨海湿地的碳源-汇过程涉及植物、土壤、生物、海水、淡水、地下水、地表水等多个生态因子, 生态学过程和机制复杂多样. 具体来看, 滨海湿地的碳汇主要包括: (1) 滨海湿地植被通过光合作用吸收固定 CO_2 ; (2) 滨海湿地土壤通过自然沉积作用对植被有机碳进行封存; (3) 部分位于河口区域的红树林和盐沼等湿地对内陆输送的悬浮颗粒物和有机物拦截. 相反, 滨海湿地的碳源则主要包括: (1) 滨海湿地沉积物中有机碳在底栖生物分解作用下以 CO_2 和 CH_4 气体形式向大气重新释放; (2) 淡水河流和潮沟表层水体通过分子扩散和冒泡向大气排放 CO_2 和 CH_4 , 以及通过植物树干排放温室气体; (3) 在潮汐水文驱动下, 滨海湿地植被和土壤向周围环境外溢碳(Outwelling)并向海洋输送.

2.2 滨海湿地碳循环过程

滨海湿地碳汇的形成是沿海大气-植被-土壤-生物-水文耦合系统的多生态过程综合作用的结果(图1)(唐剑武等, 2018). 生态系统净碳交换是滨海湿地生态系统碳循环的起点, 决定了其碳汇的强度(Wang等, 2024). 红树林、盐沼和海草床均可通过从大气或周围水体中直接吸收 CO_2 进行光合作用并形成有机物, 即总初级生产力(GPP), 其中部分固定的碳被植物自身生长呼吸所消耗, 并以 CO_2 的形式重新释放于大气, 即自养呼吸(Hu等, 2020; Rosentreter等, 2023). 与此同时, 植被和土壤中附着或长期共生的动物和微生物呼吸代谢所消耗并释放于大气中的碳则为异养呼吸, 与自养呼吸共同称为生态系统呼吸(ER). 滨海生态系统的净生态系统生产力(NEP)实际上是初级生产力和生态系统呼吸长期平衡的结果($\text{NEP}=\text{GPP}-\text{ER}$)(Wang等, 2024). 与此同时, 植物依据自身生物学机制将一部分光合固定的碳分配至叶片、茎秆和根系等以维持养分

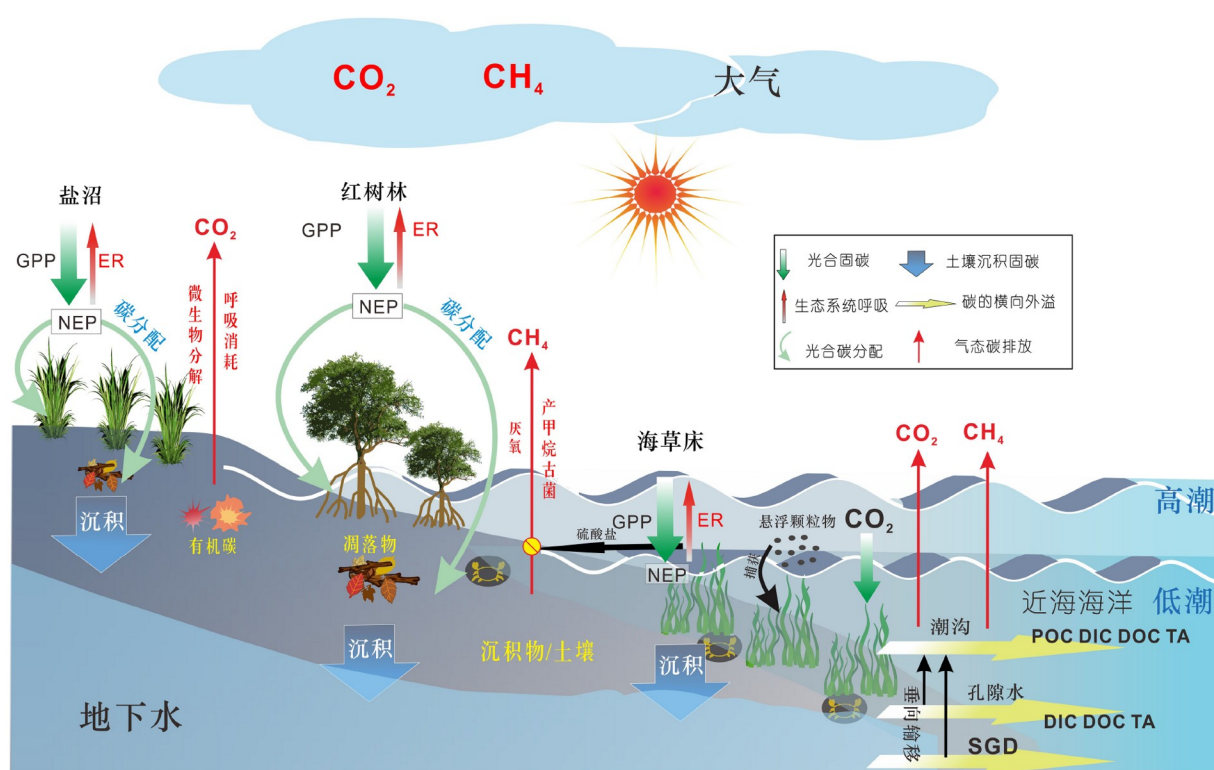


图1 滨海湿地碳循环及源汇平衡示意图

吸收与生长代谢的需求, 抵御环境胁迫和适应盐生环境(DeLaune和White, 2012; Alongi, 2014; Schuerch等, 2018), 另一部分通过根际分泌输入土壤中, 成为土壤碳库的一部分。

除了植被光合固碳外, 沉积物或土壤固碳也是滨海湿地碳汇的重要功能之一。一方面, 滨海植被凋落物碳以及死亡残体碳通过自然沉积进入土壤碳库中(Deegan等, 2012; Fourqurean等, 2012); 另一方面, 由于受到海水潮汐性淹没的影响, 土壤长期处于淹水或渍水状态, 有效地抑制了土壤中有机碳的矿化和分解, 从而达到对碳的封存和埋藏作用(Kathilankal等, 2008; Zhao等, 2020)。而且这种沉积过程可以长期运行, 封存在沉积物中的碳可以稳定保存数百年, 从而发挥长期固碳功能(Duarte等, 2013)。除此之外, 内陆河流水体在最终输入海洋之前需流经滨海湿地, 由于坡降变小, 水体流速减缓, 水体中携带的部分有机碳在河口地区沉积下来进入滨海湿地土壤碳库, 是滨海湿地碳库的一大外源性碳源(Yu等, 2021)。与此同时, 海洋端的潮汐作用会使部分大型植物残体被滨海植被地上枝干拦截, 这些被拦截的植物残体进而成为滨海湿地土壤碳

库的一部分, 也是滨海湿地外源碳的潜在来源(Alongi, 2014)。

土壤在淹水条件下有利于有机碳的厌氧转化而产生 CH_4 , 以气态碳的形式通过冒泡和扩散两种途径向大气逃逸(Santos等, 2019; Hu等, 2020)。但潮汐海水中携带的大量硫酸盐会与产甲烷菌竞争电子受体, 从而有效地抑制 CH_4 的产生(Komada等, 2016; La等, 2022)。而且当潮水退去后, 植物根际土壤的微好氧环境会促进 CH_4 氧化, 因此滨海湿地的 CH_4 排放较小(Zhao等, 2020; Cotovicz等, 2024)。此外, 红树林和盐沼湿地茎秆介导也会产生大量的 CH_4 排放(Jeffrey等, 2023; Zhao等, 2023)。除了植被土壤中的碳损失外, 土壤孔隙水中的 CO_2 和 CH_4 在“潮汐泵”的周期性冲刷下进入水体, 从水气界面进行排放, 也是滨海湿地碳的损失项之一(Santos等, 2019; Chen等, 2021)。孔隙水或地下水中的溶解态碳, 以及地表水中的颗粒态碳, 会随地表径流和潮汐表层水体的水文动力过程向海洋侧向输出, 这部分碳也是滨海湿地蓝碳碳汇的重要组成部分(Maher等, 2013; Santos等, 2021; Reithmaier等, 2023)。

3 滨海湿地蓝色碳汇评估现状

3.1 滨海湿地碳汇功能评估途径

滨海湿地碳循环及碳收支平衡研究是地球系统科学的重要内容. 滨海湿地生态系统是一个开放的复杂巨系统, 其碳循环涉及多个相互作用的子系统(陆地、海洋、河流等)和生态要素(土壤、水文、植被、动物、微生物等). 然而, 自蓝色碳汇概念提出以来, 学术界缺乏对碳汇评估手段的系统性综述. 本文通过建立“黑箱模型”来阐述在不同理论假设条件下的滨海蓝碳的评价技术途径, 进而构建基于白箱理论的净生态系统碳平衡(NECB)来优化滨海蓝碳的评价体系(图2).

3.1.1 黑箱理论下的蓝碳

现阶段, 滨海湿地的碳汇功能一般从生态系统光合固碳和土壤埋藏固碳这两个维度予以评估. 为了深

化对这两种碳汇的认知, 本文借助“黑箱模型”来抽象概括这些碳汇过程, 从而简化对这两种碳汇评价方式的理解.

生态系统光合固碳是将植被、土壤、水体等要素看作一个整体(第一种黑箱), 而不考虑生态要素间的相互作用, 仅关注大气和该箱体之间的碳交换过程(图2a). 通过总初级生产力GPP与生态系统呼吸ER之间差值来定量评价生态系统的净碳汇强度($NEP = GPP - ER$), 这种碳汇评价的科学理念是将对大气 CO_2 的直接吸收视作碳汇, 本质上是一种长周期的瞬时 CO_2 交换速率平均值(Han等, 2015; Cui等, 2018), 是全球变化生态学和生态系统生态学领域广泛应用的碳汇评估途径(Yu等, 2013; Yu等, 2014), 在局域尺度上可视为“自上而下”的碳汇功能评估的主要方法和技术.

第二种黑箱模型则是通过评估滨海湿地沉积物或土壤的碳埋藏速率来表征碳汇(图2b). 该方法将植

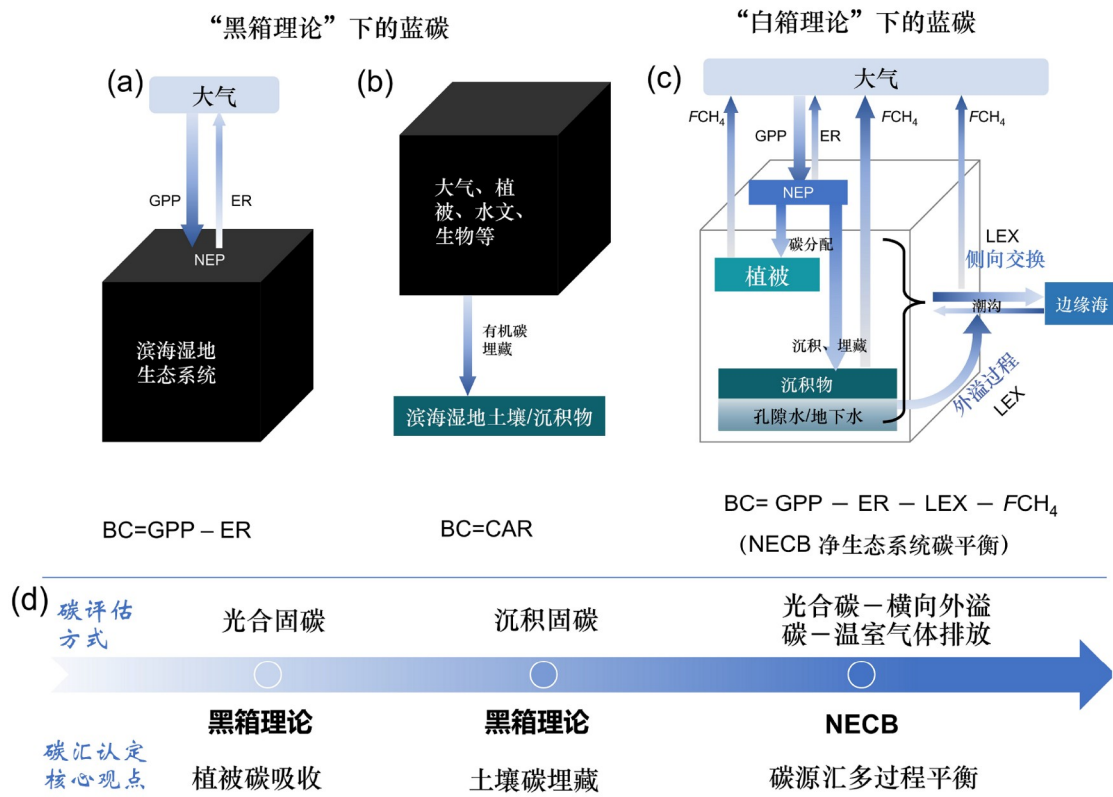


图2 不同理论下的滨海湿地蓝色碳汇

(a~c)展示了不同箱体理论的详细示意图; (d)展示了不同理论的假设依据以及碳汇认定的核心观点. BC代表滨海蓝色碳汇; GPP、ER、NEP分别代表总初级生产力、生态系统呼吸、净生态系统生产力; CAR代表碳埋藏速率; LEX是指滨海湿地与海洋横向碳交换的净通量; FCH_4 代表植物、沉积物和潮汐水体 CH_4 释放通量

被、水体、大气等要素视为整体系统, 并将它们封装于黑箱当中, 不考虑黑箱内大气、水文和植被间的相互作用, 仅关注湿地土壤的有机碳拦截和埋藏(Spivak等, 2019; Wang等, 2019). 这种碳汇评估理念认为只有沉积到土壤中的碳才不易遗失, 更强调沉积物的长期固碳效应, 将这部分碳视为可长期储存的最终碳汇(唐剑武等, 2018; Wang F M等, 2021). 该理念与陆地土壤碳库的评估模式类似(Jackson等, 2017), 且在蓝碳评估时应用最为广泛(Fu等, 2021; Wang F M等, 2021; Mossman等, 2022).

3.1.2 白箱理论下的“NECB”

生态系统碳源和碳汇的动态平衡过程构成了完整的碳循环. 在滨海湿地碳循环中, 碳的垂向排放和横向流失可以抵消其生态系统部分碳汇. 因此, 若忽视碳的多个源汇过程之间的平衡将造成对滨海湿地碳汇功能的高估. 然而, 在当前的蓝碳评估理论框架中有几个关键的碳源过程未受到重视, 例如潮汐往复冲刷下沉积物碳向海洋的横向外溢(Outwelling), 树干、沉积物和潮汐表层水体的CH₄释放, 以及内陆河流水体携带的外源碳沉积贡献. 这些过程或抵消或增强当前的碳汇功能, 导致碳汇评价结果存在不确定性, 也影响学界对不同生态系统间碳平衡模式的理解.

红树林和盐沼湿地沉积物中高度发育的螃蟹洞为“潮汐泵”的冲刷提供了更大的侵入面积(Xiao等, 2024), 加速地下孔隙水向地表潮汐海水的扩散和横向输移, 这部分外溢的碳主要来源于滨海湿地沉积物中固持的碳(Sadat-Noori等, 2017; Chen等, 2021). 据不完全统计, 全球红树林和盐沼湿地61%的水体溶解无机碳(DIC)和总碱度(TA)在落潮时高于涨潮时, 且分别可抵消植被净初级生产力NPP的63%和51%, 其中红树林湿地仅DIC的输出速率就已经超过其土壤碳埋藏速率的3倍(Reithmaier等, 2023). 海草床有机碳的外溢可占其NPP的79%, DIC外溢速率可达约114mmol m⁻² d⁻¹(Champanois和Borges, 2021; Majtényi-Hill等, 2023). 这些研究结果警示我们, 如果忽视了横向碳的外溢通量将造成对滨海湿地碳汇功能的高估. 然而, 全球尺度上的这部分碳的量化研究还十分缺乏. 截至2021年, 蓝碳横向外溢相关研究的文章发表数量不到蓝碳埋藏研究的7%(陈小刚等, 2022). 因此, 量化横向碳外溢速率是滨海蓝碳研究不可或缺的重要碳收支项, 在区域

蓝碳评估时理应予以重点关注.

CO₂和CH₄等温室气体垂向释放是抵消蓝碳输入, 影响蓝碳收支平衡的关键项. 滨海湿地温室气体主要来源于植被-土壤系统和潮汐表层水体的CO₂和CH₄释放(Liang等, 2024; Qin G M等, 2024a). 全球滨海湿地每年可排放约0.47~1.41Tg的CH₄, 是河口区域排放的3倍多, 包括N₂O在内的三种温室气体排放可抵消约23%~27%的植被光合碳吸收(Rosentreter等, 2023). 此外, 植物茎秆的CH₄排放量也不容忽视, 丰水季从茎秆排放的CH₄可为该季节贡献约50%~70%(Jeffrey等, 2023). 尽管海水中的硫酸盐可以有效地抑制CH₄的产生(La等, 2022), 但这部分碳排放量仍然可观, 加之CH₄强大的温室效应能力(CO₂的30倍左右), 在区域碳评估时也应该加以考虑(Ma等, 2023; Xiao等, 2024).

无论是与海洋的横向碳交换还是向大气的垂向碳释放, 均是对滨海湿地总碳汇(GPP)的抵消, 如果忽视这些碳源汇过程的平衡关系, 将影响滨海蓝碳评估结果的准确性. 因此, 本文认为应当在黑箱理论的基础上, 纳入上述未考虑到的几个重要碳收支过程, 建立NECB模式, 以优化滨海湿地碳汇评价体系(图2d). 该理论囊括了滨海湿地更多源汇项, 包括植被对大气CO₂的固定、水文冲刷下碳的横向外溢, 以及垂向以温室气体形式重返大气的碳(图2c). 这些过程的总和代表了生态系统尺度上的多系统多过程的净碳收支平衡, 可用以下方程进行统计:

$$\text{NECB} = \text{GPP} - \text{ER} - \text{LEX} - F\text{CH}_4, \quad (1)$$

其中, NECB代表净蓝碳总量; GPP和ER分别为总初级生产力和生态系统呼吸; LEX(Lateral Exchange)是指滨海湿地与海洋横向碳交换的净通量, 包括颗粒态碳、溶解态碳以及溶解态CH₄; FCH₄代表滨海湿地CH₄排放量, 包括土壤、植物和潮水等.

NECB碳汇核心是滨海湿地不同碳收支过程的平衡, 关注多个碳源汇过程的综合效应, 强调碳循环的整体性和动态性. 借助NECB评价碳汇可以有效降低对滨海蓝碳的高估, 该方法既适用于局域尺度上的蓝碳评估, 亦可为区域碳收支清单的编制提供理论依据.

3.2 外源有机碳是否属于滨海蓝碳范畴?

一般认为, 植被光合作用是某个特定生态系统碳循环的起点, 通常若不考虑其他外源碳的输入, 光合

固定的碳是该生态系统所有碳过程的唯一输入源(Yu等, 2013; Lu等, 2017), 它是各个子系统运作的初始驱动力, 包括植物代谢和生存、动物和微生物活动, 以及土壤碳库的发育(Xiong等, 2018; Wang等, 2024), 此时植被光合作用所固定的碳应当是滨海湿地碳汇的总输入速率. 然而, 不同于陆地生态系统, 滨海湿地是一个海陆缓冲区, 其碳的来源较为复杂. 据估算, 每年约有0.20Pg颗粒有机碳(POC)和0.25Pg溶解有机碳(DOC)由河口向海洋输出(Hedges等, 1997; Galy等, 2015), 而其中大部分有机碳都会积聚在河口和边缘海沉积物中, 碳的沉积率平均约为44%, 其中中国黄河输出的碳的沉积率高达80%, 位于世界之最(Keil等, 1997; Burdige, 2005). 最新研究表明, 中国滨海湿地沉积物外源有机碳的贡献率高达为50%~75%(Li等, 2023), 超过半数的沉积物碳来自外源输入, 全球河口红树林湿地有30%的有机碳由陆地贡献(Zhang等, 2024), 这意味着滨海湿地沉积物中碳的埋藏量远高于内源产生的理论值. 依据唐剑武等(2018)提出的海岸带蓝碳定义, 这部分由内陆河流搬运的碳是滨海湿地的外源碳, 故在区域碳核算时, 若未扣除该部分碳则会造成对滨海湿地沉积物碳汇速率和碳库的高估, 特别是河口湿地. 同时, 在传统陆地碳汇研究中, 河流携带的这部分碳从本质上来讲是陆地碳汇的迁移(Webb等, 2019; Chi等, 2020; Casas-Ruiz等, 2023), 因此如何认定这部分碳在陆地和水域生态系统碳平衡模式中的贡献, 是需要认真思考的重要问题.

从全球碳循环过程来看, 从河口输出的碳是属于内陆水体的横向碳迁移通量, 也是陆-水-气碳耦合过程的重要组成部分(Bauer等, 2013; Drake等, 2017). 大多数研究观点认为, 内陆水体水-气界面碳排放以及水体横向碳迁移是对陆地生态系统碳汇的抵消, 忽视这部分碳排放将造成对陆地碳汇的高估, 换言之是在区域碳核算中将这部分碳从陆地碳汇中扣除(Cole等, 2007; Jonsson等, 2007; Liu S D等, 2022). 因此, 越来越多的研究也尝试建立水陆碳平衡的新模式, 如净景观碳平衡(Net Landscape Carbon Balance), 进一步优化陆地碳汇评估(Duvert等, 2020; Ran等, 2022). 然而, 不同学者提出的滨海湿地碳汇的定义中均未包括河流输入的这部分外源碳, 从陆地-水体-近海耦合碳循环体系来看, 河流水体横向碳通量的最终归属未形成一定论(Webb等, 2019; Lauerwald等, 2020). 鉴于在陆地

碳平衡模式中已将这部分碳扣除, 同时考虑到蓝碳中外源有机碳的高贡献率(Qin G M等, 2024b; Zhang等, 2024)、海陆生态系统之间的碳平衡, 以及滨海湿地碳估算的复杂性, 所以我们认为, 在进行滨海蓝碳的区域碳核算时, 应当将这部分外源碳也视为滨海湿地的碳汇项.

3.3 滨海湿地的面积、定义和边界

滨海湿地的分布及面积数据关系着滨海蓝碳的精准尺度上推, 也是正确理解陆地-滨海湿地-海洋生态系统之间碳平衡的关键数据. 滨海湿地面积数据的获取主要通过以下几个途径: (1) 国际组织或者国家牵头地面清查计划(Siikamaki等, 2012; Liu等, 2014); (2) 文献和各类统计资料数据汇总(焦念志等, 2018; Liu C等, 2022); (3) 基于卫星遥感影像识别(Mao等, 2020; Wang X X等, 2021). 清查法获取的数据信息翔实、可信度高, 是目前采用最为广泛的滨海湿地面积来源, 也是遥感影像识别验证的基础数据, 但其数据获取需要大量的人力和物力投入, 成本高、耗时长. 基于文献资料汇总具有耗时短、成本低等优点, 但存在覆盖不完全、时期难以匹配等问题. 卫星遥感技术可以在大范围地获取同时期的各类数据. 然而, 水陆交互界面模糊, 水面以下难以识别是当下遥感识别过程比较棘手的问题. 特别是利用遥感技术识别生长于水面以下的海草床面积面临着极大的挑战.

这里, 我们汇集了不同研究者发表的中国滨海湿地面积数据, 从中可见, 不同研究结果之间的差异较大, 红树林、盐沼和海草床湿地面积分别在195~359、1031~3434和88~2271km²范围内(图3). 目前大多数研究中广泛采用的红树林和盐沼面积是Mao等(2020)和Wang X X等(2021)分别通过Landsat 2015和2018年的卫星遥感影像的制图结果, 其面积分别为220~259和1900~2979km². 基于湿地调查、船只走航、声呐以及遥感等综合技术调查结果显示, 中国海草床面积大致为265km²(周毅等, 2023).

滨海湿地定义是卫星遥感计算面积或制图的重要理论依据. 《拉姆萨尔公约》所规定的国际湿地定义为: 天然的或人工的, 永久的或临时的, 静止的或流动的, 淡水或咸水, 以及低潮时水深不超过6m的海水区域. 然而, 该定义是对所有湿地的广义概括, 在完整描述和规范滨海湿地边界方面具有很大的不确定性. 例

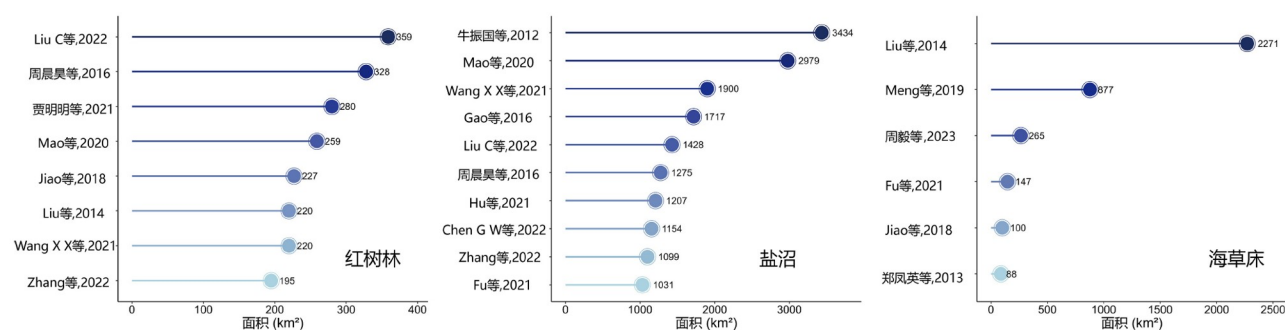


图3 中国滨海湿地面积数据汇总

数据来源: 牛振国等, 2012; 郑凤英等, 2013; Liu等, 2014; Gao等, 2016; 周晨昊等, 2016; 焦念志等, 2018; Meng等, 2019; Mao等, 2020; Fu等, 2021; Hu等, 2021; Wang X X等, 2021; 贾明明等, 2021; Chen G W等, 2022; Liu C等, 2022; Zhang等, 2022; 周毅等, 2023

如, 盐沼湿地的分布贯穿陆地和海洋, 从入海的淡水河流主导的潮上带到海水主导的潮下带均有分布, 但向陆地方向多远为边界却未知, 因此无法准确划分内陆湿地和滨海湿地的边界; 而且海草床分布在海水水面以下的最深深度可达20~60m, 与该定义所规定的6m以内标准有差别。实际上, 早在1996年, 陆健健(1996)就对中国滨海湿地作了如下定义: 陆缘为含60%以上湿生植物的植被区、水缘为海平面以下6m的近海区域, 包括江河流域中自然的或人工的、咸水的或淡水的所有富水区域(枯水期水深2m以上的水域除外), 不论区域内的水是流动的还是静止的、间歇的还是永久的。除此之外, 还将滨海湿地划分为了10种子类型, 并从水体盐度、底质类型、植被覆盖度等生态属性层面进行了量化界定。

尽管如此, 无论是传统基于形态和结构定义还是基于生态属性和功能的定义都很难支撑遥感影像对滨海湿地边界的准确划分。这主要是因为在使用遥感解译时, 大多使用的是光谱学的定量标准, 从而造成实际操作层面与理论层面脱耦。Wang X X等(2020)总结的边界为陆地方向DEM(数字高程模型)<5m且坡度<5°, 海洋方向50km的范围内; Mao等(2020)划定的边界则为向内陆方向15km, 海洋方向水深6m等深线以内; Liu Y等(2022)则认为受到潮水周期性淹没的区域为滨海湿地, 其余则均为内陆湿地。这些研究虽然都是在湿地定义的大框架下, 但在识别滨海湿地面积时使用的划分标准并不一致。除此之外, 从植被的显著物候节律、空间动态演变规律以及水文节律等植被-水文生态过程的角度来直接提取湿地植被面积是目前遥

感影像解译时使用最多的策略(Li和Liu, 2022; Liu Y等, 2022), 但海陆湿地边界的确定仍然棘手。我们认为未来应当结合土壤质地和水体盐度等各种量化的指标数据库, 基于各个子类型的详细生态属性特征来确定滨海湿地的边界, 从而将传统基于形态、结构以及功能的定义与遥感数据训练的量化结果相互融合, 总结出更科学和精准的滨海湿地的定义和面积。

4 中国滨海湿地碳源汇现状

基于中国蓝碳涡度通量塔观测结果, 中国红树林和盐沼生态系统尺度净碳吸收速率分别为781和448gC m⁻² a⁻¹(Wang等, 2024)。经过尺度上推后, 在不考虑海草床生态系统的情况下, 中国滨海湿地生态系统尺度光合固碳能力为1530GgC a⁻¹(表1)。相比之下, 红树林和盐沼生态系统土壤碳的沉积埋藏速率则分别为163和201gC m⁻² a⁻¹(Fu等, 2021), 仅为光合速率的20%~45%, 总体上的碳埋藏能力为641GgC a⁻¹, 仅为光合固碳能力的42%(表1)。这意味着光合作用固定碳的一大部分可能是通过横向交换过程向海洋输出, 或通过其他途径损失了。虽然海草床沉积埋藏速率与盐沼生态系统相当(202gC m⁻² a⁻¹)(Fu等, 2021), 但由于其面积分布有限, 碳埋藏能力仅为54GgC a⁻¹。

此外, CH₄和N₂O的排放强度分别为68~103GgC a⁻¹和0.49~1.41GgN a⁻¹(Hu等, 2020; Ma等, 2023)。若考虑CH₄的排放量, 仅从碳元素循环角度来看, 生态系统尺度上的净内源碳汇将降低至1428~1462GgC a⁻¹, 抵消了约4%~6%的碳汇。

表 1 中国滨海湿地碳源汇现状^{a)}

参数	红树林	盐沼	海草床	合计	数据来源
面积(km ²)	259	2979	265	3503	Mao等, 2020; 周毅等, 2023
净光合速率(gC m ⁻² a ⁻¹)	781	448	—	—	Wang等, 2024
光合碳汇能力(GgC a ⁻¹)	200 [*]	1330 [*]	—	1530 [*]	
土壤碳埋藏速率(gC m ⁻² a ⁻¹)	163	201	202	—	Fu等, 2021
土壤碳埋藏能力(GgC a ⁻¹)	42 [*]	599 [*]	54 [*]	695 [*]	
CH ₄ 排放速率(gC m ⁻² a ⁻¹)	—	—	—	19.3~29.2	Hu等, 2020; Ma等, 2023
CH ₄ 排放强度(GgC a ⁻¹)	—	—	—	68~102 [*]	
N ₂ O排放速率(gN m ⁻² a ⁻¹)	—	—	—	0.14~0.40	Hu等, 2020; Ma等, 2023
N ₂ O排放强度(GgN a ⁻¹)	—	—	—	0.49~1.40 [*]	

a) *, 本研究依据对应的湿地面积进行尺度上推算得出

然而, 由于关于蓝碳横向输出的研究结果十分有限, 目前还很难使用NECB来评估滨海蓝碳净碳汇, 未来需要更多研究来量化该过程的交换速率, 从而建立更加完备的碳汇评估体系.

5 巩固提升滨海湿地碳汇功能的技术途径

滨海湿地碳减排增汇是推动“双碳”目标的重要内容, 本研究提出了七种有效巩固和提升滨海蓝色碳汇的措施(图4). 一方面, 通过海岸带及滨海湿地综合治理来达到减排增汇的目的, 主要包括水文连通性修复, 建立入海河流污染物截留区, 建设生态海堤等技术措施; 另一方面, 通过调节滨海湿地关键生态过程及湿地生境来巩固提升碳汇功能, 包括生物多样性提升、群落物种多样性提升、人工栽种和播种、富碳生物质添加、盐度调节等技术措施.

5.1 海岸带及滨海湿地综合治理措施

5.1.1 水文连通性修复

修复湿地与海洋之间的水文连通是滨海湿地减排增汇过程应用最广泛的一种技术措施(Kroeger等, 2017; Iram等, 2022; Xiong等, 2022). 传统海水养殖、农田耕种以及其他人为活动修建的堤坝、涵洞以及挡水墙阻断了湿地和海水之间的连接, 导致原有滨海湿地的退化. 研究表明, 水文连通性的修复可以将退化湿地土壤碳的埋藏速率提升至修复前的2倍(Eagle等, 2022). 而且在恢复了湿地的潮汐水文连通后, CO₂和CH₄的排放都得到了有效的抑制, 其排放量显著低于

修复之前(Yang等, 2020; Arias-Ortiz等, 2021). 因此, 通过调节挡水阀、取消堤坝等方式人为恢复湿地与海洋之间的水文连通可以有效实现滨海湿地的减排增汇, 一般多适用于退化的红树林和盐沼湿地中(韩广轩等, 2022). 然而, 需要注意的是, 当水文状况恢复后, 土壤有机碳和无机碳则被海水冲刷, 可能导致短时间内土壤碳的快速释放(Ardón等, 2017). 此外, 原本施肥等农业活动遗留的营养物质会重新释放至水体中, 激发土壤碳的消耗, 也可能潜在地导致碳的损失(Ardón等, 2017). 因此, 修复后的湿地碳汇并非持续增加, 而是表现为最初很快, 然后逐渐减缓, 最终达到一个稳定的水平, 一般需要超过上百年的时间才能达到自然湿地状态(Burden等, 2019).

5.1.2 建立入海河流污染截留区

河流携带的大量陆源污染物在向海洋输送后容易造成沿海生态系统生境退化, 威胁滨海湿地植被的生存(Rabalais等, 2014). 特别是对于长期生存在海水中的海草床生态系统, 其生境脆弱程度高, 对海水环境的变化敏感(Larkum等, 2006; Liu等, 2017). 海水富营养化会促进藻类大量繁殖, 进而影响海草床的光合作用和生长, 而污染物则可直接毒害海草或破坏其生长环境, 导致海草减少甚至消失(Burkholder等, 2007; Waycott等, 2009). 因此, 在河流上游设置截留区, 建造人工湿地和植被带生态缓冲区, 构建生物-物理过滤系统, 可以有效地拦截从陆地流入海洋的污染物, 从而控制水体的富营养化趋势, 降低污染物对滨海湿地生态系统的直接影响, 提高滨海湿地生态系统的抗干扰能

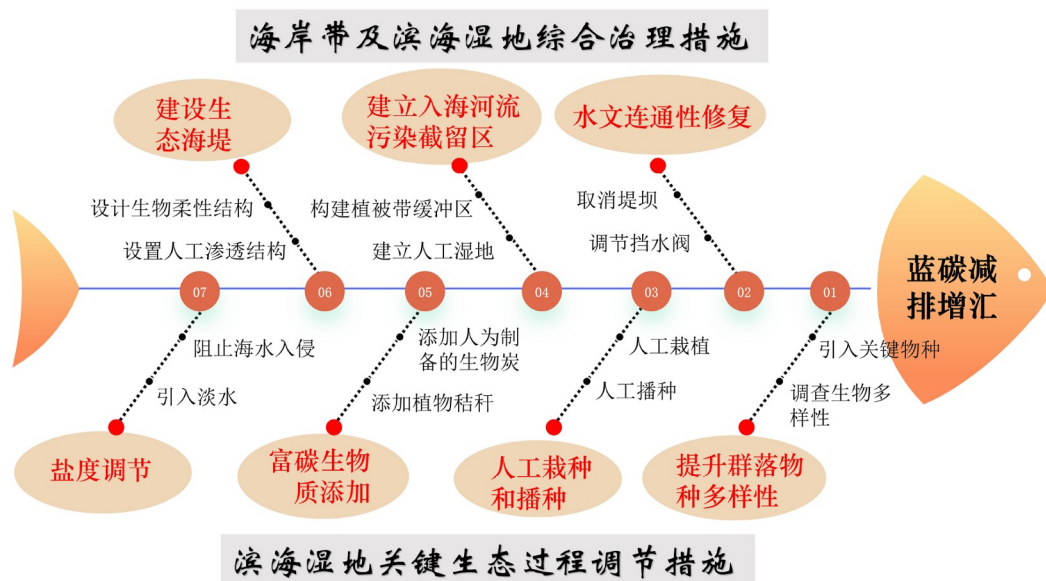


图4 滨海湿地减排增汇技术体系

力, 促进其生态恢复和稳定。

5.1.3 建设生态海堤

生态海堤是一种结合了生态工程和海岸防护的策略, 可以有效降低人工建造的硬质海堤带来的负面影响(Perkins等, 2015)。首先, 通过在海堤上部或外侧增设生态修复层, 如人工鱼礁、生态网袋等, 为生物提供栖息地, 吸引生物定居, 从而提升生物多样性(Pan等, 2022; LeFebvre等, 2024)。其次, 设计海堤表面为波浪吸能结构, 如波浪消能块或生物柔性结构, 以减少波浪能量, 降低海堤侧面的侵蚀和冲击力(Qin P等, 2024)。此外, 还可在海堤中设置人工潮汐通道或渗透结构, 促进水体和物质的交换, 增强水文连通性, 有助于降低陆源污染物在海岸带的积累, 可以有效保护滨海湿地的生物栖息地, 为巩固碳汇能力做保障(Zhao等, 2016; 韩广轩等, 2022)。

5.2 滨海湿地关键生态过程调节措施

5.2.1 提升群落物种多样性

在湿地修复的过程中, 生物多样性的恢复是一个至关重要的环节。生物多样性提高有助于提升群落结构稳定性, 增强群落的抗干扰能力, 从而提升碳汇能力。一般来说, 碳汇能力与植被生物多样性成正比(Rahman等, 2021)。有研究表明, 以芦苇、互花米草和

海三棱藨草组成的盐沼群落的净光合固碳速率是单个芦苇群落的2倍多(Wang等, 2024)。因此, 在开展湿地修复活动时, 关注物种多样性的提升可以有效增强蓝碳潜力。在具体实施过程中, 应基于前期调查的生物多样性评估结果, 包括当前的植物种类、数量和分布等, 因地制宜地引入对生态系统稳定性和功能至关重要的物种, 提升群落的稳定性, 最大程度发挥植被自身的修复能力。

5.2.2 人工栽种和播种

通过人工栽种或播种等直接修复方式可以在短时间内有效地恢复原始植被, 是滨海湿地人工修复措施中采用最广泛的修复手法之一, 也是红树林、海草床和盐沼三种生态系统均适用的手段。可根据当地的生态环境和土壤条件, 选择适宜的幼苗和种子, 通过人工栽植、播种以及插条等方式来重塑原生植被群落。目前, 中国已经开展了很多基于人工栽种、移植的滨海湿地修复项目, 例如, “红树林保护修复专项行动计划”“南红北柳生态项目”以及“全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划(2021~2035年)”等。

5.2.3 富碳生物质添加

通过添加植物秸秆以及基于植物残体制备的生物炭等富碳生物质向滨海土壤中添加是提升滨海土壤质

量, 改善植物和微生物生境状况的有效手段(Xie等, 2017; Zheng等, 2018; Chen G Z等, 2022). 添加秸秆可通过刺激微生物的发酵作用而促进土壤团聚体的形成, 并提升土壤孔隙度和保肥能力(Liu等, 2010). 生物炭添加可以改善土壤质量, 降低可交换钠离子胁迫和土壤盐碱化程度, 并有助于湿地植物生长和土壤碳的积累(Tang等, 2020; Zhao等, 2020). 研究表明, 在碱蓬盐沼湿地中添加芦苇秸秆和生物炭后, 其碳固定能力增加了133%和12%, 基于全生命周期评估, 每吨芦苇秸秆和生物炭的添加可以减少137~175kg的CO₂排放(Chen G Z等, 2022).

5.2.4 湿地盐度调节

海洋的高度盐水入侵严重影响湿地生态系统服务功能. 在一些淡水主导的滨海湿地中, 较高的盐度将对植物和微生物的生理生态过程产生盐分胁迫(Neubauer等, 2013; Herbert等, 2015). 随着咸水入侵, 淡水湿地的硫酸盐还原率升高后产生的大量的硫化物(H₂S)将对生物群落产生毒害作用(Hopfensperger等, 2014). 盐度升高也会增强沉积物碳的微生物分解速率, 导致沉积碳的损失增强(Dang等, 2019; Huang等, 2021). 因此, 通过微地貌改造来人为调控淡水输入或阻止海水入侵可以有效缓解盐分对淡水植物生长的胁迫, 提升植被的光合速率. 有研究表明, 在重新引入淡水后, 湿地土壤中的真菌相对丰度增加, 有助于表层植物残留物的分解和有机物的积累, 进而有利于土壤微生物的生长和群落的形成(Ma等, 2017). Zhao等(2018)在黄河三角洲的一项对比实验结果表明, 引入淡水后的湿地土壤总碳、土壤有机碳、易氧化有机碳和溶解有机碳的含量明显高于退化湿地. 此外, 淡水恢复也可以显著增加滨海湿地对营养物质的吸附能力, 缓解周边海水的富营养化作用(Xu等, 2022).

6 研究展望

滨海蓝碳研究尚处于初步发展阶段, 因此无论是从研究方向、理论还是方法上都存在各种问题. 基于本文的评述内容, 本研究建议应着重关注以下几个方面的研究.

(1) 加强滨海湿地沉积物与海洋之间横向碳交换研究. 横向碳交换过程在滨海湿地碳循环研究中扮演

重要角色, 相对于垂向碳埋藏过程的研究, 该过程尚显滞后, 且学术界的关注度匮乏. 未来的研究可借助水文模型(如达西定律和水文数值模拟等)、同位素示踪技术(放射性镭同位素)、稳定碳同位素以及机器学习等重要手段, 准确量化滨海蓝碳的横向传输速率, 深入探究其横向迁移机制, 并追溯不同形态碳的来源等. 这些研究对理解滨海湿地碳源汇过程和生态环境效应等方面至关重要. 因此, 在滨海湿地蓝碳循环研究以及区域和全球估算等方面应当给予横向碳交换过程充分关注.

(2) 推动滨海蓝碳涡度通量监测网络的建立. 目前中国乃至全球滨海湿地涡度通量塔数量相对于陆地生态系统来说较为稀少, 限制了在较大尺度上对滨海湿地光合固碳时空变化规律的认知. 因此, 未来需要针对更多典型生态系统(如海草床生态系统)建立更多的涡度通量塔, 并构建区域或全球滨海蓝碳涡度通量监测网络, 为滨海湿地蓝碳的长期监测、遥感模拟和模型预测积累宝贵的基础数据.

(3) 持续开展沉积物碳埋藏和碳存储的量化研究. 沉积物固碳和储碳功能是滨海蓝碳研究的热点领域, 尽管已有初步研究数据, 但滨海湿地的生境具有高度异质性, 目前的研究结果可能仍然存在很大的不确定性. 继续加强沉积物碳埋藏速率的研究, 特别是结合遥感模拟、机器学习等新手段对沉积物的蓝碳埋藏的时空特征进行模拟和预测, 以满足蓝碳对气候变化、海平面上升等全球性问题的响应或适应规律进行探索.

(4) 开展各类生态恢复工程和修复手段对滨海湿地蓝碳碳汇的影响机制和效果评价研究. 未来应当探究不同的生态恢复工程或修复手段对滨海湿地植被生长、水动力条件和沉积过程的影响, 结合NECB综合评估这些修复手段的生态系统净碳汇效应. 并进一步通过国际合作(例如VCS碳标准认证项目)和国际技术转移机制(例如REDD+), 将NECB和蓝碳增汇措施纳入全球碳中和战略, 可为应对气候变化提供有效解决方案, 进而提升蓝碳生态系统在全球碳中和战略中的重要地位.

(5) 关注滨海地区其他生态系统的碳源汇特征. 目前大部分研究主要聚焦于红树林、盐沼和海草床等生态系统, 然而, 滨海地区的其他生态系统, 如潮滩、潟湖、珊瑚礁以及养殖塘的碳源汇特征也需要更多关注. 尤其是广泛分布的潮滩, 其面积在海岸带占据主导

地位, 具有很强的蓝色碳汇潜力, 未来需加强其温室气体排放和碳埋藏潜力等碳汇过程的研究。此外, 潟湖和珊瑚礁, 以及养殖的贝类碳源汇特征一直存在争议, 亟需加强对这些生态系统的研究以扩大蓝碳生态系统的范畴, 提升蓝碳在碳中和目标的影响力。最后, 人工养殖池塘和其他受人为干扰湿地的碳源汇状态较为复杂, 有些生态系统可能在源汇之间频繁波动, 但在区域碳收支评估时往往被忽视, 长期监测和研究这些特殊的湿地的碳源汇状态有助于提升对滨海湿地碳汇功能的总体认知。

(6) 弥补蓝碳循环中的知识空白以及遥感方法学上的挑战。微生物在碳循环中的贡献和 CH_4 和 N_2O 排放通量仍然存在较大的未知性。未来不仅需要针对微生物类型、丰度、群落结构及其在有氧和厌氧条件下对碳的分解、储存和转化具体机制进行深入研究, 也亟需加强对生物地球化学过程相关的 CH_4 和 N_2O 排放量化研究, 以提高对滨海蓝碳评估的准确性。此外, 海草床生长于水下, 遥感识别和监测难度较大, 尤其是在海水浑浊或潮汐变化显著的地区。未来研究可探讨改进遥感技术, 结合高分辨率多光谱或超光谱图像, 克服这些因素带来的挑战, 实现海草床面积的解译突破。

参考文献

陈小刚, 李凌, 杜金洲. 2022. 红树林和盐沼湿地间隙水交换过程及其碳汇潜力. *地球科学进展*, 37: 881–898

韩广轩, 宋维民, 李远, 肖雷雷, 赵明亮, 初小静, 谢宝华. 2022. 海岸带蓝碳增汇: 理念、技术与未来建议. *中国科学院院刊*, 38: 492–503

贾明明, 王宗明, 毛德华, 黄春林, 路春燕. 2021. 面向可持续发展目标的中国红树林近50年变化分析. *科学通报*, 66: 3886–3901

焦念志, 梁彦韬, 张永雨, 刘纪化, 张瑶, 张锐, 赵美训, 戴民汉, 翟惟东, 高坤山, 宋金明, 袁东亮, 李超, 林光辉, 黄小平, 严宏强, 胡利民, 张增虎, 王龙, 曹纯洁, 罗亚威, 骆庭伟, 王南南, 党宏月, 王东晓, 张偲. 2018. 中国海及邻近区域碳库与通量综合分析. *中国科学: 地球科学* 48: 1393–1421

廖丽蓉, 武明月, 戴子熠, 梁嘉惠, 左平. 2022. 基于文献计量的滨海湿地碳收支研究进展分析. *海洋环境科学*, 41: 32–39, 58

陆健健. 1996. 中国滨海湿地的分类. *环境导报*, (1): 1–2

牛振国, 张海英, 王显威, 姚文博, 周德民, 赵魁义, 赵惠, 李娜娜, 黄华兵, 李丛丛, 杨军, 柳彩霞, 刘爽, 王琳, 李展, 杨镇钟, 乔飞, 郑姚闽, 陈炎磊, 盛永伟, 高小红, 朱卫红, 王文卿, 王红, 翁永玲, 庄大方, 刘纪远, 罗志才, 程晓, 郭子琪, 宫鹏. 2012. 1978–2008年中国

湿地类型变化. *科学通报*, 57: 1400–1411

唐剑武, 叶属峰, 陈雪初, 杨华蕾, 孙晓红, 王法明, 温泉, 陈少波. 2018. 海岸带蓝碳的科学概念、研究方法以及在生态恢复中的应用. *中国科学: 地球科学*, 48: 661–670

王法明, 唐剑武, 叶思源, 刘纪化. 2021. 中国滨海湿地的蓝色碳汇功能及碳中和对策. *中国科学院院刊*, 36: 241–251

于贵瑞, 郝天象, 朱剑兴. 2022. 中国碳达峰、碳中和行动方略之探讨. *中国科学院院刊*, 37: 423–434

郑凤英, 邱广龙, 范航清, 张伟. 2013. 中国海草的多样性、分布及保护. *生物多样性*, 21: 517–526

周晨昊, 毛覃愉, 徐晓, 方长明, 骆永明, 李博. 2016. 中国海岸带蓝碳生态系统碳汇潜力的初步分析. *中国科学: 生命科学*, 46: 475–486

周毅, 江志坚, 邱广龙, 张沛东, 徐少春, 张晓梅, 刘松林, 李文涛, 吴云超, 岳世栋, 顾瑞婷, 丁丽, 郑凤英, 黄小平, 范航清. 2023. 中国海草资源分布现状、退化原因与保护对策. *海洋与湖沼*, 54: 1248–1257

Alongi D M. 2014. Carbon cycling and storage in mangrove forests. *Annu Rev Mar Sci*, 6: 195–219

Ardón M, Helton A M, Scheuerell M D, Bernhardt E S, Zak D R, Peralta A L. 2017. Fertilizer legacies meet saltwater incursion: Challenges and constraints for coastal plain wetland restoration. *Elementa-Sci Anthropol*, 5: 41

Arias-Ortiz A, Oikawa P Y, Carlin J, Masqué P, Shahan J, Kanneg S, Paytan A, Baldocchi D D. 2021. Tidal and nontidal marsh restoration: A trade-off between carbon sequestration, methane emissions, and soil accretion. *J Geophys Res-Biogeophys*, 126: e2021JG006573

Armstrong McKay D I, Staal A, Abrams J F, Winkelmann R, Sakschewski B, Loriani S, Fetzer I, Cornell S E, Rockström J, Lenton T M. 2022. Exceeding 1.5°C global warming could trigger multiple climate tipping points. *Science*, 377: eabn7950

Bauer J E, Cai W J, Raymond P A, Bianchi T S, Hopkinson C S, Regnier P A G. 2013. The changing carbon cycle of the coastal ocean. *Nature*, 504: 61–70

Burden A, Garbutt A, Evans C D. 2019. Effect of restoration on saltmarsh carbon accumulation in Eastern England. *Biol Lett*, 15: 20180773

Burdige D J. 2005. Burial of terrestrial organic matter in marine sediments: A re-assessment. *Glob Biogeochem Cycle*, 19: GB002368

Burkholder J A M, Tomasko D A, Touchette B W. 2007. Seagrasses and eutrophication. *J Exp Mar Biol Ecol*, 350: 46–72

Casas-Ruiz J P, Bodmer P, Bona K A, Butman D, Couturier M, Emilson E J S, Finlay K, Genet H, Hayes D, Karlsson J, Paré D, Peng C, Striegl R, Webb J, Wei X, Ziegler S E, del Giorgio P A.

2023. Integrating terrestrial and aquatic ecosystems to constrain estimates of land-atmosphere carbon exchange. *Nat Commun*, 14: 1571
- Champanois W, Borges A V. 2021. Net community metabolism of a *Posidonia oceanica* meadow. *Limnol Oceanogr*, 66: 2126–2140
- Chen G W, Jin R J, Ye Z J, Li Q, Gu J L, Luo M, Luo Y M, Christakos G, Morris J, He J Y, Li D, Wang H W, Song L, Wang Q X, Wu J P. 2022. Spatiotemporal mapping of salt marshes in the intertidal zone of China during 1985–2019. *J Remote Sens*, 2022: 9793626
- Chen G Z, Bai J H, Yu L, Chen B, Zhang Y, Liu G Y, Wang W. 2022. Effects of ecological restoration on carbon sink and carbon drawdown of degraded salt marshes with carbon-rich additives application. *Land Degrad Dev*, 33: 2103–2114
- Chen X G, Santos I R, Call M, Reithmaier G M S, Maher D, Holloway C, Wadnerkar P D, Gómez-Álvarez P, Sanders C J, Li L. 2021. The mangrove CO₂ pump: Tidally driven pore-water exchange. *Limnol Oceanogr*, 66: 1563–1577
- Chi J S, Nilsson M B, Laudon H, Lindroth A, Wallerman J, Fransson J E S, Kljun N, Lundmark T, Ottosson Löfvenius M, Peichl M. 2020. The net landscape carbon balance—Integrating terrestrial and aquatic carbon fluxes in a managed boreal forest landscape in Sweden. *Glob Change Biol*, 26: 2353–2367
- Cole J J, Prairie Y T, Caraco N F, McDowell W H, Tranvik L J, Striegl R G, Duarte C M, Kortelainen P, Downing J A, Middelburg J J, Melack J. 2007. Plumbing the global carbon cycle: Integrating inland waters into the terrestrial carbon budget. *Ecosystems*, 10: 172–185
- Cotovicz Jr. L C, Abril G, Sanders C J, Tait D R, Maher D T, Sippo J Z, Holloway C, Yau Y Y, Santos I R. 2024. Methane oxidation minimizes emissions and offsets to carbon burial in mangroves. *Nat Clim Change*, 14: 275–281
- Cui X W, Liang J, Lu W Z, Chen H, Liu F, Lin G X, Xu F H, Luo Y Q, Lin G H. 2018. Stronger ecosystem carbon sequestration potential of mangrove wetlands with respect to terrestrial forests in subtropical China. *Agric For Meteorol*, 249: 71–80
- Dang C, Morrissey E M, Neubauer S C, Franklin R B. 2019. Novel microbial community composition and carbon biogeochemistry emerge over time following saltwater intrusion in wetlands. *Glob Change Biol*, 25: 549–561
- Deegan L A, Johnson D S, Warren R S, Peterson B J, Fleeger J W, Fagherazzi S, Wollheim W M. 2012. Coastal eutrophication as a driver of salt marsh loss. *Nature*, 490: 388–392
- DeLaune R D, White J R. 2012. Will coastal wetlands continue to sequester carbon in response to an increase in global sea level?: A case study of the rapidly subsiding Mississippi river deltaic plain. *Clim Change*, 110: 297–314
- Donato D C, Kauffman J B, Murdiyarso D, Kurnianto S, Stidham M, Kanninen M. 2011. Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics. *Nat Geosci*, 4: 293–297
- Drake T W, Raymond P A, Spencer R G M. 2017. Terrestrial carbon inputs to inland waters: A current synthesis of estimates and uncertainty. *Limnol Oceanogr Lett*, 3: 132–142
- Duarte C M, Losada I J, Hendriks I E, Mazarrasa I, Marbà N. 2013. The role of coastal plant communities for climate change mitigation and adaptation. *Nat Clim Change*, 3: 961–968
- Duvert C, Hutley L B, Beringer J, Bird M I, Birkel C, Maher D T, Northwood M, Rudge M, Setterfield S A, Wynn J G. 2020. Net landscape carbon balance of a tropical savanna: Relative importance of fire and aquatic export in offsetting terrestrial production. *Glob Change Biol*, 26: 5899–5913
- Eagle M J, Kroeger K D, Spivak A C, Wang F M, Tang J W, Abdul-Aziz O I, Ishtiaq K S, O’Keefe Suttles J, Mann A G. 2022. Soil carbon consequences of historic hydrologic impairment and recent restoration in coastal wetlands. *Sci Total Environ*, 848: 157682
- Fischer E M, Knutti R. 2015. Anthropogenic contribution to global occurrence of heavy-precipitation and high-temperature extremes. *Nat Clim Change*, 5: 560–564
- Fourqurean J W, Duarte C M, Kennedy H, Marbà N, Holmer M, Mateo M A, Apostolaki E T, Kendrick G A, Krause-Jensen D, McGlathery K J, Serrano O. 2012. Seagrass ecosystems as a globally significant carbon stock. *Nat Geosci*, 5: 505–509
- Fu C C, Li Y, Zeng L, Zhang H B, Tu C, Zhou Q, Xiong K X, Wu J P, Duarte C M, Christie P, Luo Y M. 2021. Stocks and losses of soil organic carbon from Chinese vegetated coastal habitats. *Glob Change Biol*, 27: 202–214
- Galy V, Peucker-Ehrenbrink B, Eglinton T. 2015. Global carbon export from the terrestrial biosphere controlled by erosion. *Nature*, 521: 204–207
- Gao Y, Yu G R, Yang T T, Jia Y L, He N P, Zhuang J. 2016. New insight into global blue carbon estimation under human activity in land-sea interaction area: A case study of China. *Earth-Sci Rev*, 159: 36–46
- Han G X, Chu X J, Xing Q H, Li D J, Yu J B, Luo Y Q, Wang G M, Mao P L, Rafique R. 2015. Effects of episodic flooding on the net ecosystem CO₂ exchange of a supratidal wetland in the Yellow River Delta. *J Geophys Res-Bioge*, 120: 1506–1520
- Hedges J I, Keil R G, Benner R. 1997. What happens to terrestrial organic matter in the ocean? *Org Geochem*, 27: 195–212
- Herbert E R, Boon P, Burgin A J, Neubauer S C, Franklin R B, Ardón M, Hopfensperger K N, Lamers L P M, Gell P. 2015. A global perspective on wetland salinization: Ecological consequences of a growing threat to freshwater wetlands. *Ecosphere*, 6: 1–43

- Hopfensperger K N, Burgin A J, Schoepfer V A, Helton A M. 2014. Impacts of saltwater incursion on plant communities, anaerobic microbial metabolism, and resulting relationships in a restored freshwater wetland. *Ecosystems*, 17: 792–807
- Hu M J, Sardans J, Yang X Y, Peñuelas J, Tong C. 2020. Patterns and environmental drivers of greenhouse gas fluxes in the coastal wetlands of China: A systematic review and synthesis. *Environ Res*, 186: 109576
- Hu Y K, Tian B, Yuan L, Li X Z, Huang Y, Shi R H, Jiang X Y, Wang L H, Sun C. 2021. Mapping coastal salt marshes in China using time series of Sentinel-1 SAR. *ISPRS J Photogramm Remote Sens*, 173: 122–134
- Huang L B, Zhang G L, Bai J H, Xia Z J, Wang W, Jia J, Wang X, Liu X H, Cui B S. 2021. Desalinization via freshwater restoration highly improved microbial diversity, co-occurrence patterns and functions in coastal wetland soils. *Sci Total Environ*, 765: 142769
- IPCC. 2021. The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Technical Report. Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, United States
- Iram N, Maher D T, Lovelock C E, Baker T, Cadier C, Adame M F. 2022. Climate change mitigation and improvement of water quality from the restoration of a subtropical coastal wetland. *Ecol Appl*, 32: e2620
- Jackson R B, Lajtha K, Crow S E, Hugelius G, Kramer M G, Piñeiro G. 2017. The ecology of soil carbon: Pools, vulnerabilities, and biotic and abiotic controls. *Annu Rev Ecol Evol Syst*, 48: 419–445
- James K, Macreadie P I, Burdett H L, Davies I, Kamenos N A. 2024. It's time to broaden what we consider a 'blue carbon ecosystem'. *Glob Change Biol*, 30: e17261
- Jeffrey L C, Moras C A, Tait D R, Johnston S G, Call M, Sippo J Z, Jeffrey N C, Laicher-Edwards D, Maher D T. 2023. Large methane emissions from tree stems complicate the wetland methane budget. *J Geophys Res-Biogeophys*, 128: e2023JG007679
- Jonsson A, Algesten G, Bergström A K, Bishop K, Sobek S, Tranvik L J, Jansson M. 2007. Integrating aquatic carbon fluxes in a boreal catchment carbon budget. *J Hydrol*, 334: 141–150
- Kathilankal J C, Mozdzer T J, Fuentes J D, D'Odorico P, McGlathery K J, Zieman J C. 2008. Tidal influences on carbon assimilation by a salt marsh. *Environ Res Lett*, 3: 044010
- Keil R G, Mayer L M, Quay P D, Richey J E, Hedges J I. 1997. Loss of organic matter from riverine particles in deltas. *Geochim Cosmochim Acta*, 61: 1507–1511
- Komada T, Burdige D J, Li H L, Magen C, Chanton J P, Cada A K. 2016. Organic matter cycling across the sulfate-methane transition zone of the Santa Barbara Basin, California Borderland. *Geochim Cosmochim Acta*, 176: 259–278
- Kroeger K D, Crooks S, Moseman-Valtierra S, Tang J. 2017. Restoring tides to reduce methane emissions in impounded wetlands: A new and potent blue carbon climate change intervention. *Sci Rep*, 7: 11914
- La W, Han X K, Liu C Q, Ding H, Liu M X, Sun F S, Li S L, Lang Y C. 2022. Sulfate concentrations affect sulfate reduction pathways and methane consumption in coastal wetlands. *Water Res*, 217: 118441
- Larkum A W D, Orth R J, Duarte C M. 2006. Seagrasses: Biology, Ecology and Conservation. Dordrecht: Springer Netherlands. 676
- Lauerwald R, Regnier P, Guenet B, Friedlingstein P, Ciais P. 2020. How simulations of the land carbon sink are biased by ignoring fluvial carbon transfers: A case study for the Amazon Basin. *One Earth*, 3: 226–236
- LeFebvre B, Saye P, Henkel J S. 2024. A report on the artificial reef use in Grenada, West Indies. *JMSE*, 12: 253
- Li X, Liu G. 2022. Study on the change monitoring of typical estuarine wetland and its effect on ecological factors in Bohai Rim region, China. *Front Ecol Evol*, 10: 967593
- Li Y, Fu C C, Hu J, Zeng L, Tu C, Luo Y M. 2023. Soil carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry and fractions in blue carbon ecosystems: Implications for carbon accumulation in allochthonous-dominated habitats. *Environ Sci Technol*, 57: 5913–5923
- Liang W Z, Chen X G, Chen Z L, Zhu P Y, Huang Z Y, Li J S, Wang Y T, Li L, He D. 2024. Unraveling the impact of *Spartina alterniflora* invasion on greenhouse gas production and emissions in coastal saltmarshes: New insights from dissolved organic matter characteristics and surface-porewater interactions. *Water Res*, 262: 122120
- Liu C, Liu G Y, Casazza M, Yan N Y, Xu L Y, Hao Y, Franzese P P, Yang Z F. 2022. Current status and potential assessment of China's ocean carbon sinks. *Environ Sci Technol*, 56: 6584–6595
- Liu E K, Yan C R, Mei X R, He W Q, Bing S H, Ding L P, Liu Q, Liu S, Fan T L. 2010. Long-term effect of chemical fertilizer, straw, and manure on soil chemical and biological properties in northwest China. *Geoderma*, 158: 173–180
- Liu H X, Ren H, Hui D F, Wang W Q, Liao B W, Cao Q X. 2014. Carbon stocks and potential carbon storage in the mangrove forests of China. *J Environ Manage*, 133: 86–93
- Liu S D, Kuhn C, Amatulli G, Aho K, Butman D E, Allen G H, Lin P, Pan M, Yamazaki D, Brinkerhoff C, Gleason C, Xia X H, Raymond P A. 2022. The importance of hydrology in routing terrestrial carbon to the atmosphere via global streams and rivers. *Proc Natl Acad Sci USA*, 119: e2106322119
- Liu S L, Jiang Z J, Wu Y C, Zhang J P, Arbi I, Ye F, Huang X P, Macreadie P I. 2017. Effects of nutrient load on microbial activities within a seagrass-dominated ecosystem: Implications of changes in

- seagrass blue carbon. *Mar Pollut Bull*, 117: 214–221
- Liu Y, Zhang H Q, Zhang M, Cui Z Y, Lei K X, Zhang J, Yang T D, Ji P. 2022. Vietnam wetland cover map: Using hydro-periods Sentinel-2 images and Google Earth Engine to explore the mapping method of tropical wetland. *Int J Appl Earth Obs Geoinf*, 115: 103122
- Lu W Z, Xiao J F, Liu F, Zhang Y, Liu C A, Lin G H. 2017. Contrasting ecosystem CO₂ fluxes of inland and coastal wetlands: A meta-analysis of eddy covariance data. *Glob Change Biol*, 23: 1180–1198
- Ma Z H, Lu M, Jin H, Sheng X J, Wei H, Yang Q, Qi L L, Huang J X, Chen L D, Dou X L. 2023. Greenhouse gas emissions and environmental drivers in different natural wetland regions of China. *Environ Pollut*, 330: 121754
- Ma Z W, Zhang M X, Xiao R, Cui Y, Yu F H. 2017. Changes in soil microbial biomass and community composition in coastal wetlands affected by restoration projects in a Chinese delta. *Geoderma*, 289: 124–134
- Macreadie P I, Costa M D P, Atwood T B, Friess D A, Kelleway J J, Kennedy H, Lovelock C E, Serrano O, Duarte C M. 2021. Blue carbon as a natural climate solution. *Nat Rev Earth Environ*, 2: 826–839
- Maher D T, Santos I R, Golsby-Smith L, Gleeson J, Eyre B D. 2013. Groundwater-derived dissolved inorganic and organic carbon exports from a mangrove tidal creek: The missing mangrove carbon sink? *Limnol Oceanogr*, 58: 475–488
- Majtényi-Hill C, Reithmaier G, Yau Y Y Y, Serrano O, Piñeiro-Juncal N, Santos I R. 2023. Inorganic carbon outwelling from a Mediterranean seagrass meadow using radium isotopes. *Estuar Coast Shelf Sci*, 283: 108248
- Mao D H, Wang Z M, Du B J, Li L, Tian Y L, Jia M M, Zeng Y, Song K S, Jiang M, Wang Y Q. 2020. National wetland mapping in China: A new product resulting from object-based and hierarchical classification of Landsat 8 OLI images. *ISPRS J Photogramm Remote Sens*, 164: 11–25
- Meng W Q, Feagin R A, Hu B B, He M X, Li H Y. 2019. The spatial distribution of blue carbon in the coastal wetlands of China. *Estuar Coast Shelf Sci*, 222: 13–20
- Mossman H L, Pontee N, Born K, Hill C, Lawrence P J, Rae S, Scott J, Serato B, Sparkes R B, Sullivan M J P, Dunk R M, Kim D. 2022. Rapid carbon accumulation at a saltmarsh restored by managed realignment exceeded carbon emitted in direct site construction. *PLoS ONE*, 17: e0259033
- Neubauer S C, Franklin R B, Berrier D J. 2013. Saltwater intrusion into tidal freshwater marshes alters the biogeochemical processing of organic carbon. *Biogeosciences*, 10: 8171–8183
- Nowicki M, DeVries T, Siegel D A. 2022. Quantifying the carbon export and sequestration pathways of the ocean's biological carbon pump. *Glob Biogeochem Cycle*, 36: GB007083
- Pan Y, Tong H H, Wei D Z, Xiao W Q, Xue D W. 2022. Review of structure types and new development prospects of artificial reefs in China. *Front Mar Sci*, 9: 853452
- Perkins M J, Ng T P T, Dudgeon D, Bonebrake T C, Leung K M Y. 2015. Conserving intertidal habitats: What is the potential of ecological engineering to mitigate impacts of coastal structures? *Estuar Coast Shelf Sci*, 167: 504–515
- Piao S L, Fang J Y, Ciais P, Peylin P, Huang Y, Sitch S, Wang T. 2009. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China. *Nature*, 458: 1009–1013
- Piao S L, Wang X H, Park T, Chen C, Lian X, He Y, Bjerke J W, Chen A, Ciais P, Tømmervik H, Nemani R R, Myneni R B. 2020. Characteristics, drivers and feedbacks of global greening. *Nat Rev Earth Environ*, 1: 14–27
- Qin G M, Lu Z, Gan S C, Zhang L L, Wu J T, Sanders C J, He Z L, Yu X L, Zhang J F, Zhou J G, Ding R Y, Huang X Y, Chen H, He H, Yu M X, Li H, Wang F M. 2024a. Fiddler crab bioturbation stimulates methane emissions in mangroves: Insights into microbial mechanisms. *Soil Biol Biochem*, 194: 109445
- Qin G M, Lu Z, Gan S C, Zhang L L, Zhang J F, Zhou J G, Ding R Y, Huang X Y, Chen H, He H, Yu M X, Li H, Lovelock C E, Wang F M. 2024b. Fate of soil organic carbon in estuarine mangroves: Evidences from stable isotopes and lignin biomarkers. *Catena*, 246: 108401
- Qin P, Jiang Y, Cheng C M. 2024. How do structural safety, ecological functions and social development influence construction of ecological seawalls for coastal protection and sustainability? *Water Resour Manage*, 38: 1807–1824
- Rabalais N, Cai W J, Carstensen J, Conley D, Fry B, Hu X, Quiñones-Rivera Z, Rosenberg R, Slomp C, Turner E, Voss M, Wissel B, Zhang J. 2014. Eutrophication-driven deoxygenation in the coastal ocean. *Oceanography*, 27: 172–183
- Rahman M M, Zimmer M, Ahmed I, Donato D, Kanzaki M, Xu M. 2021. Co-benefits of protecting mangroves for biodiversity conservation and carbon storage. *Nat Commun*, 12: 3875
- Ran L S, Wang X H, Li S L, Zhou Y Y, Xu Y J, Chan C N, Fang N F, Xin Z B, Shen H X. 2022. Integrating aquatic and terrestrial carbon fluxes to assess the net landscape carbon balance of a highly erodible semiarid catchment. *J Geophys Res-Bioge*, 127: e2021JG006765
- Reithmaier G M S, Cabral A, Akhand A, Bogard M J, Borges A V, Bouillon S, Burdige D J, Call M, Chen N W, Chen X G, Cotovicz Jr. L C, Eagle M J, Kristensen E, Kroeger K D, Lu Z Y, Maher D T, Pérez-Lloréns J L, Ray R, Taillardat P, Tamborski J J, Upstill-

- Goddard R C, Wang F M, Wang Z A, Xiao K, Yau Y Y Y, Santos I R. 2023. Carbonate chemistry and carbon sequestration driven by inorganic carbon outwelling from mangroves and saltmarshes. *Nat Commun*, 14: 8196
- Rosentreter J A, Laruelle G G, Bange H W, Bianchi T S, Busecke J J M, Cai W J, Eyre B D, Forbrich I, Kwon E Y, Maavara T, Moosdorf N, Najjar R G, Sarma V V S S, Van Dam B, Regnier P. 2023. Coastal vegetation and estuaries are collectively a greenhouse gas sink. *Nat Clim Change*, 13: 579–587
- Rovai A S, Twilley R R, Castañeda-Moya E, Riul P, Cifuentes-Jara M, Manrow-Villalobos M, Horta P A, Simonassi J C, Fonseca A L, Pagliosa P R. 2018. Global controls on carbon storage in mangrove soils. *Nat Clim Change*, 8: 534–538
- Sadat-Noori M, Santos I R, Tait D R, Reading M J, Sanders C J. 2017. High porewater exchange in a mangrove-dominated estuary revealed from short-lived radium isotopes. *J Hydrol*, 553: 188–198
- Santos I R, Maher D T, Larkin R, Webb J R, Sanders C J. 2019. Carbon outwelling and outgassing vs. burial in an estuarine tidal creek surrounded by mangrove and saltmarsh wetlands. *Limnol Oceanogr*, 64: 996–1013
- Santos I R, Burdige D J, Jennerjahn T C, Bouillon S, Cabral A, Serrano O, Wernberg T, Filbee-Dexter K, Guimond J A, Tamborski J J. 2021. The renaissance of Odum's outwelling hypothesis in 'Blue Carbon' science. *Estuar Coast Shelf Sci*, 255: 107361
- Schuerch M, Spencer T, Temmerman S, Kirwan M L, Wolff C, Lincke D, McOwen C J, Pickering M D, Reef R, Vafeidis A T, Hinkel J, Nicholls R J, Brown S. 2018. Future response of global coastal wetlands to sea-level rise. *Nature*, 561: 231–234
- Siikamäki J, Sanchirico J N, Jardine S, McLaughlin D, Morris D F. 2012. Blue carbon: Global options for reducing emissions from the degradation and development of coastal ecosystems. Technical Report. Blue Carbon. Washington
- Spivak A C, Sanderman J, Bowen J L, Canuel E A, Hopkins C S. 2019. Global-change controls on soil-carbon accumulation and loss in coastal vegetated ecosystems. *Nat Geosci*, 12: 685–692
- Tang J W, Zhang S D, Zhang X T, Chen J H, He X Y, Zhang Q Z. 2020. Effects of pyrolysis temperature on soil-plant-microbe responses to *Solidago canadensis* L.-derived biochar in coastal saline-alkali soil. *Sci Total Environ*, 731: 138938
- Wang F M, Lu X L, Sanders C J, Tang J W. 2019. Tidal wetland resilience to sea level rise increases their carbon sequestration capacity in United States. *Nat Commun*, 10: 5434
- Wang F M, Sanders C J, Santos I R, Tang J W, Schuerch M, Kirwan M L, Kopp R E, Zhu K, Li X Z, Yuan J C, Liu W Z, Li Z A. 2021. Global blue carbon accumulation in tidal wetlands increases with climate change. *Nat Sci Rev*, 8: nwa296
- Wang F M, Liu J H, Qin G, Zhang J F, Zhou J G, Wu J T, Zhang L L, Thapa P, Sanders C J, Santos I R, Li X Z, Lin G H, Weng Q H, Tang J W, Jiao N Z, Ren H. 2023. Coastal blue carbon in China as a nature-based solution toward carbon neutrality. *Innovation*, 4: 100481
- Wang J L, Yu G R, Han L, Yao Y, Sun M Y, Yan Z F. 2024. Ecosystem carbon exchange across China's coastal wetlands: Spatial patterns, mechanisms, and magnitudes. *Agric For Meteorol*, 345: 109859
- Wang J, Feng L, Palmer P I, Liu Y, Fang S X, Bösch H, O'Dell C W, Tang X P, Yang D X, Liu L X, Xia C Z. 2020. Large Chinese land carbon sink estimated from atmospheric carbon dioxide data. *Nature*, 586: 720–723
- Wang X X, Xiao X M, Zou Z H, Hou L Y, Qin Y W, Dong J W, Doughty R B, Chen B Q, Zhang X, Chen Y, Ma J, Zhao B, Li B. 2020. Mapping coastal wetlands of China using time series Landsat images in 2018 and Google Earth Engine. *ISPRS J Photogramm Remote Sens*, 163: 312–326
- Wang X X, Xiao X M, Xu X, Zou Z H, Chen B Q, Qin Y W, Zhang X, Dong J W, Liu D Y, Pan L H, Li B. 2021. Rebound in China's coastal wetlands following conservation and restoration. *Nat Sustain*, 4: 1076–1083
- Waycott M, Duarte C M, Carruthers T J B, Orth R J, Dennison W C, Olyarnik S, Calladine A, Fourqurean J W, Heck Jr. K L, Hughes A R, Kendrick G A, Judson Kenworthy W, Short F T, Williams S L. 2009. Accelerating loss of seagrasses across the globe threatens coastal ecosystems. *Proc Natl Acad Sci USA*, 106: 12377–12381
- Webb J R, Santos I R, Maher D T, Finlay K. 2019. The importance of aquatic carbon fluxes in net ecosystem carbon budgets: A catchment-scale review. *Ecosystems*, 22: 508–527
- Wunderling N, Donges J F, Kurths J, Winkelmann R. 2021. Interacting tipping elements increase risk of climate domino effects under global warming. *Earth Syst Dynam*, 12: 601–619
- Xiao K, Wu Y C, Pan F, Huang Y R, Peng H B, Lu M Q, Zhang Y, Li H L, Zheng Y, Zheng C M, Liu Y, Chen N W, Xiao L L, Han G X, Li Y S, Xin P, Li R L, Xu B C, Wang F M, Tamborski J J, Wilson A M, Alongi D M, Santos I R. 2024. Widespread crab burrows enhance greenhouse gas emissions from coastal blue carbon ecosystems. *Commun Earth Environ*, 5: 437
- Xie W J, Wu L F, Zhang Y P, Wu T, Li X P, Ouyang Z. 2017. Effects of straw application on coastal saline topsoil salinity and wheat yield trend. *Soil Tillage Res*, 169: 1–6
- Xiong J, Sheng X C, Wang M, Wu M, Shao X X. 2022. Comparative study of methane emission in the reclamation-restored wetlands and natural marshes in the Hangzhou Bay coastal wetland. *Ecol Eng*, 175: 106473
- Xiong Y M, Liao B W, Wang F M. 2018. Mangrove vegetation

- enhances soil carbon storage primarily through in situ inputs rather than increasing allochthonous sediments. *Mar Pollut Bull*, 131: 378–385
- Xu G, Ren Y X, Yue M Y, Lv Y C, Chen X B, Hui H B. 2022. Phosphorus sorption capacity in soils from freshwater restored coastal wetlands increased with restoration age. *Geoderma*, 422: 115926
- Yang H L, Tang J W, Zhang C S, Dai Y H, Zhou C, Xu P, Perry D C, Chen X C. 2020. Enhanced carbon uptake and reduced methane emissions in a newly restored wetland. *J Geophys Res-Biogeophys*, 125: JG005222
- Yu G R, Zhu X J, Fu Y L, He H L, Wang Q F, Wen X F, Li X R, Zhang L M, Zhang L, Su W, Li S G, Sun X M, Zhang Y P, Zhang J H, Yan J H, Wang H M, Zhou G S, Jia B R, Xiang W H, Li Y N, Zhao L, Wang Y F, Shi P L, Chen S P, Xin X P, Zhao F H, Wang Y Y, Tong C L. 2013. Spatial patterns and climate drivers of carbon fluxes in terrestrial ecosystems of China. *Glob Change Biol*, 19: 798–810
- Yu G R, Chen Z, Piao S I, Peng C H, Ciais P, Wang Q F, Li X R, Zhu X J. 2014. High carbon dioxide uptake by subtropical forest ecosystems in the East Asian monsoon region. *Proc Natl Acad Sci USA*, 111: 4910–4915
- Yu M, Eglinton T I, Haghipour N, Montluçon D B, Wacker L, Hou P, Ding Y, Zhao M. 2021. Contrasting fates of terrestrial organic carbon pools in marginal sea sediments. *Geochim Cosmochim Acta*, 309: 16–30
- Yun J, Jeong S, Gruber N, Gregor L, Ho C H, Piao S, Ciais P, Schimel D, Kwon E Y. 2022. Enhance seasonal amplitude of atmospheric CO₂ by the changing Southern Ocean carbon sink. *Sci Adv*, 8: eabq0220
- Zhang J F, Gan S C, Yang P J, Zhou J G, Huang X Y, Chen H, He H, Saintilan N, Sanders C J, Wang F M. 2024. A global assessment of mangrove soil organic carbon sources and implications for blue carbon credit. *Nat Commun*, 15: 8994
- Zhang P, Jeong J H, Yoon J H, Kim H, Wang S Y S, Linderholm H W, Fang K Y, Wu X C, Chen D L. 2020. Abrupt shift to hotter and drier climate over inner East Asia beyond the tipping point. *Science*, 370: 1095–1099
- Zhang Z, Xu N, Li Y F, Li Y. 2022. Sub-continental-scale mapping of tidal wetland composition for East Asia: A novel algorithm integrating satellite tide-level and phenological features. *Remote Sens Environ*, 269: 112799
- Zhao M, Han G, Li J, Song W, Qu W, Eller F, Wang J, Jiang C. 2020. Responses of soil CO₂ and CH₄ emissions to changing water table level in a coastal wetland. *J Cleaner Prod*, 269: 122316
- Zhao M L, Li P G, Song W M, Chu X J, Eller F, Wang X J, Liu J T, Xiao L L, Wei S Y, Li X G, Han G X. 2023. Inundation depth stimulates plant-mediated CH₄ emissions by increasing ecosystem carbon uptake and plant height in an estuarine wetland. *Funct Ecol*, 37: 536–550
- Zhao Q Q, Bai J H, Huang L B, Gu B H, Lu Q Q, Gao Z Q. 2016. A review of methodologies and success indicators for coastal wetland restoration. *Ecol Indic*, 60: 442–452
- Zhao Q Q, Bai J H, Zhang G L, Jia J, Wang W, Wang X. 2018. Effects of water and salinity regulation measures on soil carbon sequestration in coastal wetlands of the Yellow River Delta. *Geoderma*, 319: 219–229
- Zhao W, Zhou Q, Tian Z Z, Cui Y T, Liang Y, Wang H Y. 2020. Apply biochar to ameliorate soda saline-alkali land, improve soil function and increase corn nutrient availability in the Songnen Plain. *Sci Total Environ*, 722: 137428
- Zheng H, Wang X, Luo X X, Wang Z Y, Xing B S. 2018. Biochar-induced negative carbon mineralization priming effects in a coastal wetland soil: Roles of soil aggregation and microbial modulation. *Sci Total Environ*, 610–611: 951–960

(责任编辑: 石拓)