

滨海湿地有机碳来源与通量估算研究进展

陈仕哲^{1,2}, 娄 厦^{1,3}, 杨中元¹, FEDOROVA Viktorovnag Irina⁴,
RADNAEVA Dorzhievna Larisa⁵, NIKITINA Elena⁵

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学国家海底科学观测系统项目办公室, 上海 200092; 3. 同济大学 长江水环境教育部重点实验室, 上海 200092; 4. 圣彼得堡大学, 圣彼得堡 199034, 俄罗斯; 5. 俄罗斯科学院西伯利亚分院贝加尔湖自然管理研究所, 乌兰乌德 670047, 俄罗斯)

摘要: 河口近岸地区是有机碳输运与埋藏的高度动态场所, 在全球碳循环中发挥着重要作用, 研究滨海湿地有机碳的动态变化对于评估滨海生态系统碳的“源/汇”效应具有重要意义。围绕河口地区的有机碳交换, 明确了滨海湿地有机碳的垂向埋藏机制及其与近海地区的横向传输过程, 梳理了当前有机碳来源示踪方法与有机碳通量估算方法。在长期野外观测和实验室测定有机碳的基础上, 探讨了遥感技术在河口有机碳反演和估算方面的应用, 并对国内外主要的滨海湿地生态系统碳循环模型研究成果进行了分析。建议未来研究进一步提高现有模型的适用性与稳定性, 结合长期野外观测、室内实验室测定、卫星遥感监测及碳循环模型模拟等技术手段, 对河口碳汇能力进行精准量化与高精度模拟预测。

关键词: 滨海湿地; 有机碳埋藏; 有机碳横向迁移; 监测与预测方法

中图分类号: X144

文献标志码: A

Review of Organic Carbon Sources and Flux Estimation of Coastal Wetlands

CHEN Shizhe^{1,2}, LOU Sha^{1,3}, YANG Zhongyuan¹,
FEDOROVA Viktorovnag Irina⁴, RADNAEVA Dorzhievna
Larisa⁵, NIKITINA Elena⁵

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Project Management Office of China National Scientific Seafloor Observatory, Shanghai 200092, China; 3. Key Laboratory of Yangtze River Water Environment of the Ministry of Education, Shanghai 200092, China; 4. StPetersburg University, St. Petersburg 199034, Russia; 5. Institute of Nature Management of Lake Baikal, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude 670047, Russia)

Abstract: Estuarine is a highly dynamic place for organic carbon transport and burial, which plays an important role in global carbon cycle. The organic carbon dynamics in coastal wetlands is important for assessing the “source/sink” effect of carbon in coastal ecosystems. This paper focuses on the organic carbon exchange in estuaries. First, it illustrates the vertical burial mechanism of organic carbon in coastal wetlands and its lateral transport process with offshore areas. Then, it summarizes the current methods of organic carbon source tracing and organic carbon flux estimation. Afterwards, it discusses the application of remote sensing technology in the inversion and estimation of organic carbon in estuaries, based on the generalization of field observation instruments and laboratory measurement techniques for determining organic carbon components. Finally, it conducts a comparison of the research of the carbon cycle models of coastal wetland ecosystems. It proposes that future research should focus on improving the applicability and stability of the models, and that the long-term field observations, laboratory techniques, satellite remote sensing monitoring and carbon cycle model simulations should be combined to accurately quantify and predict the carbon sink capacity of estuaries with high-precision simulations.

Key words: coastal wetland; organic carbon burial; lateral migration of organic carbon; monitoring and forecasting methods

2022年4月, IPCC第六次评估报告第三工作组报

收稿日期: 2023-03-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42072281, 41602244); 上海市科技创新行动计划(22ZR1464200, 22230712900); 同济大学第十九期实验教学改革专项基金(0200104492)

第一作者: 陈仕哲, 博士生, 主要研究方向为近岸水动力水环境和滨海湿地污染物输运。
E-mail: 2210374@tongji.edu.cn

通信作者: 娄 厦, 副教授, 博士生导师、工学博士, 主要研究方向为近岸水动力水环境和滨海湿地污染物输运。
E-mail: lousha@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

告《气候变化2022:减缓气候变化》正式发布。报告指出,2010—2019年全球温室气体年平均排放量处于历史上的最高水平,人类活动产生的温室气体引发了许多地区的气候极端事件^[1]。在这一背景下,基于推动构建人类命运共同体责任担当和实现可持续发展的内在要求,我国提出力争在2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和。实现双碳目标的基本途径主要有两个方面:“节能减排”与“固碳增汇”。尤其是要在控制碳排放的基础上,充分发挥自然生态系统的固碳作用^[2-3]。

滨海湿地是陆地和海洋之间物质交换的界面,具有巨大的经济价值^[4-5]和生态功能,如拦截从河流进入海洋的污染物,减缓风暴潮等灾害对海岸的侵袭^[6-7]。由于较高的初级生产力与缓慢的有机质分解速率,滨海湿地的固碳能力远高于陆地生态系统和海洋生态系统^[8-9],是缓解全球气候变暖的有效碳汇。盐沼、红树林、海草床等滨海生态系统面积仅占全球海洋面积的0.2%,但沉积物中埋藏的碳约可占到海洋沉积物碳储量的50%^[10],使其成为海岸带蓝碳^[11-13]的主要贡献者,也是海洋蓝色碳汇^[14]的重要组成部分。此外,滨海湿地还是有机碳运输与埋藏的高度动态场所,在全球碳循环中发挥重要作用。滨海生态系统的碳汇过程与增汇模式研究对双碳目标的实现具有重要意义^[2]。

滨海生态系统碳源/汇过程涉及河流-河口-近海等多界面碳素的迁移转化,具有较高的空间异质

性,因此,本文在已有研究成果的基础上,综述了滨海湿地有机碳循环过程及通量估算方法,总结了当前河口近岸地区有机碳监测模拟研究进展,并阐述了河口碳汇力量量化与预测技术的挑战及发展方向,以期能为增汇减排技术研究提供参考依据。本文通过文献检索网络平台,对已发表文献中的数据进行收集与分析。部分原始数据直接从文献表格或文本中获得。对于图形数据,则使用Origin(2021b, OriginLab)进行数字化提取后获得。

1 滨海湿地生态系统碳汇

在全球范围内,滨海蓝碳生态系统的面积约为 $20.3 \times 10^4 \text{ km}^2$,储碳量已达到了 $3.27 \times 10^4 \text{ Tg}$,预计每年可减少 $3.04 \times 10^5 \text{ Tg}$ 二氧化碳当量的排放^[15-16]。全球陆地森林与滨海蓝碳系统的年有机碳埋藏数据如表1所示,不同生态系统的固碳效率呈现较大差异。盐沼、红树林与海草床的面积之和约为陆地森林生态系统的1/120,但其有机碳年埋藏速率却远远高于以森林为代表的陆地“绿碳”生态系统。除缓解气候变化问题外,红树林等植被的存在还可促进渔业发展^[17-18]。由此可见,作为蓝碳系统的主体,滨海湿地发挥着极为重要的生态服务功能。

表1 全球滨海湿地与陆地森林生态系统的面积及有机碳埋藏

Tab. 1 Area and organic carbon burial in coastal wetlands and terrestrial forest ecosystems worldwide

生态系统	面积 / 10^4 km^2	年埋藏速率 / $(\text{g} \cdot \text{m}^{-2})$	年埋藏量 /Tg	数据来源
盐沼	4.2~6	168 ± 7	87.2 ± 9.6	文献[19-22]
红树林	8.1~13.8	194 ± 15	34.4 ± 5.4	文献[19-21, 23]
海草草甸	16.1~17	138 ± 38	48~112	文献[11]
温带森林	1 040	5.1 ± 1	53	
热带森林	1 962.3	4 ± 0.5	78.5	文献[24]
北方森林	1 370	4.6 ± 2.1	49.3	

中国滨海湿地面积约为 $5.1 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中盐沼湿地面积为 $2 980 \text{ km}^2$ ^[25],红树林面积为 328.34 km^2 ,主要分布在广东地区,中国现有海草床的总面积较小,约为 87.65 km^2 ^[26]。在河口地区水动力环境极易促进有机碳埋藏与河流沉积物可提供大量有机质的条件下,盐沼湿地的有机碳年埋藏速率约为 $34.2 \sim 72.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,每年可为滨海蓝碳生态系统的碳埋藏贡献80%,储碳和固碳能力远远高于红树林和海草床^[27]。目前,中国盐沼植被主要包括芦苇、碱蓬、海三棱藨草和互花米草,植被群落的总面积约为 $1 207 \sim 3 434 \text{ km}^2$ ^[13]。表2为中国盐沼湿地主要植被

生境的固碳能力,可以看出,空间格局的差异性与植被类型的不同均会影响植被的固碳能力。

2 滨海湿地有机碳的来源与埋藏

2.1 滨海湿地有机碳来源分析

河口近岸区域水体中的有机碳主要有两种形态,其中溶解态有机碳(dissolved organic carbon, DOC)占比约达到60%,其余40%则为颗粒态有机碳(particulate organic carbon, POC)。划分颗粒态与溶解态有机碳的临界值通常为 $0.45 \sim 0.70 \mu\text{m}$,即

表 2 中国盐沼湿地不同植被类型的固碳能力

Tab. 2 Carbon sequestration capacity of different vegetations in China's salt marsh wetlands

湿地	主要植被	植被面积 /km ²	年固碳能力 /(g·m ⁻²)	数据来源
辽河三角洲	芦苇	841.7	4212	文献[28]
黄河三角洲	芦苇	272	540-860	文献[29]
崇明岛湿地	芦苇	45.9	240±20	文献[30]
	海三棱藨草	25.4	280-380	
	互花米草	12.4	440±30	
杭州湾南岸	芦苇	28.4	1877	文献[3, 31]
	海三棱藨草	18.4	274.1	
	互花米草	11.3	1855	

可通过 0.45 ~ 0.7 μm 孔径滤膜的为 DOC, 而截留在滤膜上的有机碳则是 POC^[32]。在生物地球化学作用和潮汐的机械搬运作用下, 有机碳参与了滨海湿地碳的外部循环与内部循环, 包括有机碳的输入输出、土壤颗粒吸附与微生物降解等过程^[33-34]。其中有机碳的输入是湿地土壤中所积累有机物的主要来源, 有内源输入与外源输入两种形式。河口湿地植被类型多样且分布较为广泛, 浮游动植物与底栖的潮间带生物种类也极为丰富, 构成了土壤中有机的内源输入部分。同时, 河口地区受到地表径流和海洋水动力的剧烈影响, 大量营养物质随潮流涨落被往返搬运, 为湿地带来了强烈的外源有机质输入。此外, 随着社会经济的发展, 大量的合成化学品和碳氢化合物被释放到水域和海洋中, 组成了人为溶解有机碳 (anthropogenic dissolved organic carbon, ADOC), 其作为异位碳源, 最终会转化为二氧化碳并参与到滨海湿地的碳循环过程, 因此 ADOC 也是河口湿地有机质的重要来源^[35-36]。

2.2 有机碳来源示踪方法

湿地沉积物中有机质的来源影响着滨海湿地的碳埋藏效率, 并且不同的来源对湿地碳库的贡献也有所不同, 需综合利用多种检测手段与方法对端元信号进行准确判别。在追踪湿地沉积物有机碳来源的研究中, C/N 比值法、稳定同位素法 ($\delta^{13}\text{C}$ 与 $\delta^{15}\text{N}$) 以及生物标志物法 (脂类、糖类、氨基酸和氨基糖等) 应用较广。

(1) C/N 比值法

不同生物体内主要有机物的种类不同, 根据 C/N 比值的差异可区分沉积物中产生有机碳的植被类型。在藻类等水生植物内富含蛋白质、脂类等物质, 其 C/N 值通常在 5~8 之间; 陆生植物主要生产纤维素、木质素等有机物, 蛋白质含量较低, 其 C/N 值通常高于 15^[37]。然而, 农业活动中化肥的使用会导致河口地区滨海湿地土壤中总氮 (TN) 及总磷 (TP) 含量升高, 影响有机碳的来源判断。另一方面, 河口强风引起的底部物质的再悬浮会释放出沉积物中的溶解有机物, 进而提高

了水中的 DOC 含量, 这一因素也会对物源分析产生干扰。因此, 应进一步结合 C、N 稳定同位素丰度及多种方法来对有机碳来源进行细分。

(2) 碳氮稳定同位素法

由于不同植物在光合作用中的碳同化路径不同, 植物体内 $\delta^{13}\text{C}$ 与 $\delta^{15}\text{N}$ 丰度呈现较大差异。表 3 为典型植被类型中 C、N 同位素含量的研究结果, 通过沉积物中 C、N 稳定同位素丰度值可以区分滨海湿地沉积物中有机碳的内源及外源来源。此外, 在外源有机碳的来源判别中, 也可采用 $\delta^{13}\text{C}$ 为 -25 ‰ 和 -20 ‰ 的两个端元值作为陆源和海源有机质的大致区分, 当同位素含量不大于 -23 ‰ 时说明有机质以陆地来源为主^[42]。为进一步确定各潜在碳源的贡献比例, 在研究中通常根据 $\delta^{13}\text{C}$ 特征值构建端元混合模型, 利用 IsoSource、MixSIAR 等软件展开计算。

表 3 不同植被类型 C、N 同位素含量

Tab. 3 C and N isotope contents of different vegetations

植物类别	植被类型	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	$\delta^{15}\text{N}/\text{‰}$	数据来源
陆生植物	C3	-32~-21	0-11	文献[38-39]
	C4	-16~-10	—	文献[40-41]
水生植物	海草	-16~-10	6-12	文献[40-42]
	海藻	-16~-10	0-4	文献[40-42]

(3) 生物标志物法

在有机碳降解过程中, $\delta^{13}\text{C}$ 值与 C/N 比值相比变化较小, 但碳同位素特征的重叠使沉积物中有机碳来源不易识别。因此, 正构烷烃、木质素等生物标志物也被广泛用于碳的来源和转化特征研究, 其具有特定的生物来源, 并且在长时间埋藏后还能保持对原始生物母质特征的良好继承性^[43]。根据检测到的正构烷烃分布特征与碳数组成 CPI (carbon preference index), 可以辨别沉积物中不同生物来源的有机碳。例如, 陆生高等植物 CPI 高于 3, 藻类等浮游生物 CPI 低于 3, 而细菌等微生物 CPI 则接近于 1。木质素作为陆地维管植物细胞壁的重要组成成

分,分子结构相较于正构烷烃更加稳定,具有良好的抗降解能力。木质素单体包括香草基(V)、丁香基(S)和肉桂基(C)等,其组成与比值可用于判断沉积物有机质的植物来源。比如,S与V单体系列的比值区分被子植物和裸子植物($S/V > 0.6$; S/V 约为0),C与V单体系列的比值区分草本组织和木本组织($C/V > 0.2$; $C/V < 0.05$)。

当前研究显示,元素(碳和氮)与其稳定同位素($\delta^{13}C$ 与 $\delta^{15}N$)和木质素成分($S/V, C/V$)在反映植被有机碳埋藏或转化方面并不完全一致,这可能与凋落物输入、根系分布、盐度及微生物群落组成与活性等因素的差异有关。为准确解析滨海湿地沉积物中有机碳的来源及其转化过程,结合机器学习(随机森林、神经网络等),综合运用多种示踪方法与紫外吸收和荧光检测等光谱技术得到了越来越多的关注^[44]。

2.3 滨海湿地有机碳埋藏机制

碳埋藏是滨海湿地生态系统参与到全球碳循环中的关键环节,而植被作为固碳的初级生产者,也是滨海湿地植物-土壤系统碳循环的起点。通过光合作用,植物将大气中的 CO_2 固定,通过枝干输运并储存光合产物至叶片、茎及根中。大部分通过植物固定的碳被储存在地下生物量中,并通过根系的生产进入土壤碳库。滨海湿地土壤中埋藏的部分有机碳经生物生理代谢会生成二氧化碳和甲烷被重新排放到大气中,部分会以DOC、POC等形式被潮汐运输,剩余有机碳则因其处于厌氧环境中难以分解而被稳定地埋藏在沉积物中,成为滨海湿地土壤碳库的重要组成部分。

土壤碳库的碳储量可占到盐沼湿地生态系统碳库的80%以上,而湿地沉积物中存储的有机碳绝大部分来自于植物的生长。当前研究显示,盐沼湿地植被的地下生产力显著高于地上生产力,该现象在不同植被类型中普遍存在^[45]。通过植物根系生产的地下生物量不易向外输出,而是转化为有机质累积在土壤中,不断促使盐沼土壤垂直增长,有利于湿地土壤碳汇的形成。另一方面,在河口地区的潮汐搬运过程中,植被加强了潮水中悬浮颗粒物的沉积作用,进一步提高了滨海湿地的有效碳汇。

当前,气候变暖导致的海平面上升在一定程度上促进了滨海湿地植物的生产力,有利于盐沼增长。但高于一定限度后,海平面上升造成的潮汐基础水位的上升使滨海盐沼面临高盐环境和过度淹水的压力,盐沼植物的生产力随之降低,进而影响对沉积物与悬浮颗粒物的固定作用,这种负面反馈使盐沼滩面的演化受到相应限制,最终影响滨海湿地的有机

碳埋藏。此外,外来生物,如互花米草的入侵,也会改变滨海湿地的碳汇过程。其高生产力与凋落物会为湿地土壤带来新的有机碳积累,但大量入侵和快速扩散对本地物种产生威胁,在群落演替过程中也可能造成土壤碳汇的丧失。

2.4 滨海湿地生态系统垂向有机碳通量

来自内源和外源的部分有机碳在滨海湿地土壤中不断沉积并最终埋藏,对其埋藏通量的研究结果可为滨海蓝碳生态系统固碳能力的预测提供基础数据。碳沉积速率为湿地土壤有机碳埋藏计算过程中的一个关键参数,与沉积物平均有机碳密度结合可得到所研究湿地的碳埋藏通量,具体计算如下公式^[46]:

$$T_{AMAR} = W_{CC} \cdot V_{ASR} \cdot n_{BD} \cdot 10 \quad (1)$$

式中: T_{AMAR} 为沉积物中有机碳的埋藏通量, $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$; W_{CC} 为有机碳含量, $mg \cdot g^{-1}$; V_{ASR} 为沉积速率, $cm \cdot a^{-1}$; n_{BD} 为沉积物原位密度, $g \cdot cm^{-3}$ 。

用于测量河口海岸地区碳沉积速率的方法有很多,如河流输沙法、不同时期海图对比法、GIS(地理信息系统)空间信息法、放射性同位素测年法等,当前研究中以放射性同位素测年最为常用。通过核素的半衰期与其在沉积物垂直剖面中的分布特征,可对沉积物的年龄、沉积过程与来源等特征进行判断。例如, ^{210}Pb 的半衰期为22.3 a,定年上限为~150 a,则可得到其百年尺度内的平均沉积速率; ^{137}Cs 半衰期为30.17 a,Cs随着土壤剖面深度增加会显示出最大活度,该峰值可对应特定的核爆年份,对有机碳埋藏具有重要的纪年意义^[47]。

3 滨海湿地与近海地区的横向有机碳交换

滨海湿地一方面因其极高的生产力组成蓝碳系统的有效碳汇,另一方面滨海生态系统也在不断向近海地区输出有机碳,通过水沙运动实现溶解有机碳和颗粒有机碳的横向迁移。仝川等^[48]提出了广义的滨海湿地碳汇定义,指除了长期埋藏在生态系统自身的碳以外,还包括该系统通过横向传输过程输送到海洋生态系统并长期保存在海岸带底泥中的碳。基于“输出流假说”,研究者发现大多数滨海盐沼生态系统在潮汐等水文条件的作用下是碳输出的溢出系统。但由于物质通量受到潮汐不对称性的影响,滨海湿地碳源/汇的问题仍不能得出统一结论。因此滨海湿地与近海地区的横向有机碳通量估算在

海岸带与海洋蓝碳的定量研究中至关重要,目前主要是在野外监测潮位变化、实验室测定样品DOC与POC浓度的基础上进行估算。

3.1 DOC与POC的横向迁移

海岸地貌、水动力特性、植被生长状况及水质与土壤理化特性均会影响滨海湿地与近海地区的横向有机碳交换。在潮汐的影响下,滨海湿地会发生间歇性的淹水和裸露。在涨潮过程中,波浪从低潮滩向高潮滩传播时能量不断衰减,加之植物茎叶的阻挡,水动力作用逐渐减弱,垂向流速分布发生改变,进而改变边界层紊动的结构与强度,对悬沙运动产生影响。由于向河口上游地区水动力作用的减弱,粗颗粒物较难到达高潮滩,从而导致沉积物的粒度分布发生改变。此外,在涨落潮过程中,细颗粒沉积物极易发生再悬浮作用,粗颗粒物则在退潮过程中保留在潮间带^[49]。河口水体中的溶解有机碳(DOC)极易被细颗粒悬浮物吸附,进而转化为颗粒有机碳(POC)。而在颗粒物表面附着的POC随悬沙运动经历反复的沉降-再悬浮与吸附-解吸,部分POC重新悬浮到水体中并转化为DOC。这一系列过程使DOC与POC相互转化,从而影响滨海湿地有机碳的赋存规律。

滨海湿地与近岸水体横向有机碳交换频繁,被潮汐搬运的颗粒态有机物不断为湿地输入外源有机碳的同时,约有45%的盐沼生物量以凋落物形式输出到近岸水体,以支持其生物多样性与水体养分再生。孔隙水交换是土壤中溶解态有机质输出到相邻河口的主要方式。Lehman等^[50]的研究结果显示,通过潮汐输送到开放水域生境中的无机和有机物质通量约为90%以上,且潮汐的不对称性增加了湿地内部的物质输出。Wilson等^[51]的研究表明,大潮期间潮汐幅度的增长使孔隙水的交换量增加,此外,水体流速的显著增大又会导致DOC的大量输出。Tobias等^[52]对河口湿地生态系统DOC输出速率做出估算,最高可达到 $328 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。河口地区的时空高度动态变化使海岸地貌、水动力特性、植被生长状况及水质与土壤理化特性成为影响横向有机碳交换的关键因素,在估算河口湿地与临近水体的横向碳交换通量时需综合考虑。

3.2 滨海湿地与近海地区有机碳横向传输通量估算

通过有机碳平均浓度与水流数据可计算得到滨海湿地与近海地区间的有机碳通量,常用正负表示陆向或海向通量,总通量为陆向与海向通量绝对值之和(忽略方向),净通量则为考虑方向的陆向通量与海向通量相加(考虑方向)。目前,针对河口地区有机碳横向通量的研究方法主要是现场观测和模型

计算。现场观测方法常以水通量为基础参数对物质交换进行计算。模型计算法则是在现场实测有机碳浓度的基础上,通过水动力模型模拟水沙通量,从而实现碳通量的估算。

对于颗粒有机碳通量,杨靛青^[53]通过现场观测获取了崇明东滩高潮滩盐沼大小潮周期内的流速数据,采集了沉积物和悬浮泥沙样品,并对其中有机碳浓度进行测定,发现盐沼地区有机碳总通量值变化范围为 $1676 \sim 15114 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1}$,呈现稳定向岸积累趋势。光滩地区有机碳总通量值变化范围在 $1787 \sim 50391 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1}$ 之间,有机碳向岸和离岸输移交替变化频繁,但总体仍以向岸累积为主。单位时间的单宽横向颗粒有机碳通量 $f_{\text{POC}}(t)$ 计算式为

$$f_{\text{POC}}(t) = q(t) \cdot C_{\text{POC}}(t) \quad (2)$$

式中: t 为测流及采样时刻; $q(t)$ 为横向单宽流量, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$,表示为采样时刻流速的横向分量与水深乘积; C_{POC} 为有机碳浓度, $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,通过采集样品中悬沙含量与POC浓度关系计算得到。上述计算方法也可用于溶解态有机碳通量的估算,将 $f_{\text{DOC}}(t)$ 对时间求积分,并考虑断面位置,可获得采样时段内的单宽横向DOC通量。

4 河口有机碳监测模拟

河口近岸地区(含滨海湿地)有机碳循环包括内部各个碳库的垂向有机碳埋藏与横向碳通量两部分。当前已有多种技术用于监测有机碳传输过程中的动态变化过程。利用同位素等有机碳来源分析方法可对碳的来源与周转进行示踪。通过测定植被的地上与地下生物量来调查植被碳库的碳储量,对沉积物剖面取样可得到有机碳埋藏通量。野外监测水流运动和有机碳浓度可以实现横向有机碳通量的估算。然而,河口区域处于高度动态变化之中,实地调查与通量监测等方法存在观测样本有限、时间不连续以及空间代表性不足等问题,无法及时有效反映碳储量随时间的变化。因此,地面观测数据结合遥感技术与数学模型的方法得到了快速发展。

4.1 卫星遥感监测

水色卫星遥感可针对目标河口水域实现大面积、实时同步观测,获得高时空分辨率与光谱分辨率的观测数据。卫星传感器能够获取的水质参数主要有叶绿素(Chl-a)、总悬浮物(total suspended matter, TSM)与有色可溶性有机物(colored dissolved organic matter, CDOM)。经过生物地球化学过程,

本身不具有光学活性的有机碳可与叶绿素、悬浮泥沙等物质及其固有光学特性联系起来,作为光学遥感的基础,实现有机碳的遥感反演。目前Landsat、MODIS、GOCI、MERIS等卫星数据已被广泛用于水体组分的反演。

基于遥感反射率的经验算法与基于有色溶解有机物CDOM吸收系数的反演算法可被用于河口水域DOC浓度的估算。通过卫星遥感所得光谱反射率与水体表层DOC浓度之间的关系可以确定最佳反演波段组合,以此建立基于遥感反射率的经验算法。然而,在实际应用中,基于CDOM吸收系数的反演算法最为常用。CDOM作为溶解有机物中能吸收紫外光和可见光的部分,可以直接反映光谱信号,通过在某一特定波段的吸收系数实现对DOC浓度的反演。

目前,对POC浓度的遥感反演算法主要有两种形式:基于遥感反射率、漫衰减系数等表观光学量的经验算法和基于颗粒物光衰减系数、后向散射系数等固有光学量的半分析算法。对于同时受陆源和海源影响的复杂水体环境,需充分考虑颗粒物的来源以利用真实数据进行模型检验,在研究过程中可考虑引入同位素示踪技术解决POC来源反演问题。此外,将三维水动力模型与卫星遥感监测相结合,可有效评估河口区域有机碳横向通量。如Cui等^[54]基于区域海洋模型系统(ROMS)模型对东海边缘海域水通量进行模拟,结合表层DOC卫星监测数据,对东海边缘的横向DOC传输通量做出定量估算,发现DOC最大净输入来自台湾海峡东侧($30.65 \text{ Tg}\cdot\text{a}^{-1}$),DOC的净输出主要通过东海北部边界($-52.75 \text{ Tg}\cdot\text{a}^{-1}$)。Wang等^[55]基于有限体积海洋模型(FVCOM)模拟了长江口三维水流及水沙通量,与静止轨道海洋颜色成像仪(GOCI)监测的表层浓度数据相结合,确定了河口POC入海通量($1.29 \pm 0.11 \text{ Tg}\cdot\text{a}^{-1}$),并预测了长江口外POC的运输和沉积行为,经入海口后,35.2%的POC沉积在河口外的沙洲,52.9%的POC向南运移,少量POC进入东部陆架。

4.2 数学模型模拟

基于过程的数学模型在湿地生态系统碳循环模拟研究中较为常用。过程模型的建立以长序列的观测数据为基础,对生态系统碳循环的生物地球化学过程开展模拟研究,并对未来情景进行预测。气象因子、植被要素、水体性质等为湿地生态系统模型的主要驱动变量,通过改变输入参数,可实现系统碳收支与碳汇能力的定量描述。

滨海湿地生态系统碳循环模型的构建多参考森林与海洋生态系统,将类似系统的影响因子函数应

用到本模型中,并考虑海水涨落潮和盐水入侵的影响。例如,葛振鸣等^[56]考虑气候变化、水文条件、土壤性质与植被特征等要素,构建了中国东部滨海湿地碳循环模型。陆颖等^[57]以野外监测数据与气象观测数据为基础,将遥感反演模型与碳循环模型耦合,实现了对崇明东滩湿地潮间带芦苇群落碳收支时空动态的模拟。Morris等^[58]为定量预测盐沼湿地的固碳能力及其对海平面上升的响应,收集了超过5000个美国沿海地区湿地生态系统的样本,建立了MEM模型(marsh equilibrium model)。此外,基于STELLA(结构化思维实验动画实验室)的动态建模在模拟植被、水质等影响下的滨海湿地碳收支过程也有较为广泛的应用。但在碳收支过程模型的建立过程中,作为研究对象的生态系统常被看作一个均质系统,忽视了内部环境变化的影响,从而在模拟准确度方面有所欠缺。

在复杂水动力和水环境影响下,河口近岸地区有机碳循环涉及不同尺度的生物地球化学过程。植物的净初级生产力、土壤初始碳含量、水位变化等输入条件对模型的模拟精确具有重要影响。为估算河口生态系统中的有机碳交换,可建立水沙运动学与生物化学过程的耦合模型。Clark等^[59]针对美国切萨皮克湾河口建立了河口水动力与生物地球化学耦合模型,该模型以高时空分辨率模拟物理和生物地球化学过程,以此来探索滨海盐沼在河口碳氮循环中的作用。模拟结果显示切萨皮克湾河口每年接收河流输入的DOC为35.5 Mg,占其他外源和本地输入总量的12.3%,且河口DOC存量的56%来自河流的上游沼泽。Yao等^[60]构建了干旱、洪水等极端水文条件下墨西哥湾西北部海岸4个河口多年碳通量质量平衡模型,发现暴风雨引发的潮汐湿地淹水在短时间内使 CO_2 排放通量增加了2~10倍,干旱之后的淹水也会增加滨海湿地与近海地区的横向有机碳交换(从 -3.5 ± 4.7 到 $67.8 \pm 17.6 \text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)。河口区域碳收支的巨大差异凸显了不同水文条件下高分辨率时空模拟的重要性。然而,在模型建立过程中,对自然条件的简化处理、模型输入误差等均会为模拟过程带来不确定性。同时,又由于长序列碳通量观测数据的缺失,难以对模型进行率定与验证。河口碳循环数学模型的构建和应用依然面临着重大挑战。

5 结论与展望

(1)在全球气候背景下,滨海湿地碳汇功能备受

关注,有机碳通量与储量的监测预测结果对评估滨海湿地碳汇能力和潜力具有重要指导意义。目前针对滨海湿地碳循环过程与碳通量估算研究方面均取得了一定成果。多种示踪方法、光谱技术与机器学习的综合运用有助于准确解析滨海湿地沉积物中有机碳的来源及其转化。基于放射性同位素的测年方法可广泛用于碳沉积速率的估算,定量评估湿地有机碳的埋藏通量。将原位观测技术、水动力模型模拟与卫星遥感监测相结合,可系统研究滨海湿地与近海地区有机碳横向传输过程,在未来河口碳汇能力量化研究中具有较大潜力。

(2)通过卫星数据对河口近岸水体有机碳浓度进行反演采用经验或半分析算法,多针对单一类型水体且精度有限。表层DOC遥感反演算法应进一步考虑生物地球化学作用对有机碳浓度的影响,并在算法中做定量表达。表层POC浓度遥感反演算法需厘清颗粒有机物来源与水体组分,以及不同光学特性对计算模型的影响。因此,整合复杂环境下不同卫星遥感数据,改进反演方法以估算滨海湿地碳汇能力是未来的重点研究方向。

(3)当前滨海湿地有机碳循环监测与评估方面还没有统一的规范和标准,区域尺度下的生态系统碳循环模型模拟精度仍需进一步提高,且现有模型受到时空动态变化与长序列观测数据缺失的限制,很难扩展到全球。建议今后可将遥感技术、三维水沙动力模型与湿地生态系统过程模型进行耦合,并结合机器学习等方法弥补有限样本的系统偏差,以提高河口近岸地区的碳源汇估算精度。此外,在厘清滨海湿地有机碳动态变化及调控因素的基础上,建立融合“卫星遥感观测-地面定位观测-数学模型预测”为一体的监测预测体系,为制定减排政策、实现固碳增汇提供有效的技术支撑。

作者贡献声明:

陈仕哲:研究概念生成,数据分析,论文初稿撰写。

娄 厦:研究概念生成,研究资金获取,论文审阅与修订。

杨中元:实际调查研究。

FEDOROVA Viktorovna Irina:设计验证与核实。

RADNAEVA Dorzhievna Larisa:研究概念生成。

NIKITINA Elena:论文审阅与修订。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2022: Mitigation of climate change. Contribution of working group III to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[R]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2022.
- [2] 宋豫秦, 应验. 碳达峰与碳中和背景下蓝碳开发价值、理论与建议探讨[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2022, 54(3): 93. SONG Yuqin, YING Yan. The value, theory and suggestion concerning blue carbon development against the background of carbon peak and carbon neutrality[J]. Journal of South China Normal University(Natural Science Edition), 2022, 54(3): 93.
- [3] 王珊珊, 徐明伟, 韩宇, 等. 杭州湾南岸滩涂湿地多年蓝碳分析及情景预测[J]. 中国环境科学, 2022, 42(9): 4380. WANG Shanshan, XU Mingwei, HAN Yu, *et al.* Analysis and scenario prediction of multi-year blue carbon in intertidal wetland on the south bank of Hangzhou Bay[J]. China Environmental Science, 2022, 42(9): 4380.
- [4] CANUEL E A, CAMMER S S, MCINTOSH H A, *et al.* Climate change impacts on the organic carbon cycle at the land-ocean interface[J]. Annual Review of Earth and Planetary Science, 2012, 40: 685.
- [5] REGNIER P, FRIEDLINGSTEIN P, CIAIS P, *et al.* Anthropogenic perturbation of the carbon fluxes from land to ocean[J]. Nature Geoscience, 2013, 6: 597.
- [6] CINTIA A, RODRIGO K, THIAGO M, *et al.* Seasonal variability of carbonate chemistry and its controls in a subtropical estuary[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2022, 276: 108020.
- [7] DU M, ZHENG M G, LIU A F, *et al.* Effects of emerging contaminants and heavy metals on variation in bacterial communities in estuarine sediments[J]. Science of the Total Environment, 2022, 832: 155118.
- [8] 白军红, 刘玥, 赵庆庆, 等. 水盐变化对滨海湿地土壤有机碳累积与碳排放的影响综述[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2022, 58(3): 447. BAI Junhong, LIU Yue, ZHAO Qingqing, *et al.* Soil organic carbon accumulation and decomposition in coastal wetlands in the changing water and salinity conditions: a review[J]. Journal of Beijing Normal University(Natural Science), 2022, 58(3): 447.
- [9] 章海波, 骆永明, 刘兴华, 等. 海岸带蓝碳研究及其展望[J]. 中国科学: 地球科学, 2015, 45: 1641. ZHANG Haibo, LUO Yongming, LIU Xinghua, *et al.* Current researches and prospects on the coastal blue carbon[J]. Scientia Sinica Terrae, 2015, 45: 1641.
- [10] DUARTE C M, LOSADA I J, HENDRIKS I E, *et al.* The role of coastal plant communities for climate change mitigation and adaptation[J]. Nature Climate Change, 2013, 3: 961.
- [11] DOUGLAS T J, SCHUERHOLZ G, JUNIPER S K. Blue carbon storage in a northern temperate estuary subject to habitat loss and chronic habitat disturbance: Cowichan estuary, British Columbia, Canada[J]. Frontiers in Marine Science, 2022, 9: 857586.
- [12] 唐剑武, 叶属峰, 陈雪初, 等. 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[J]. 中国科学: 地球科学, 2018, 48: 661.

- TANG Jianwu, YE Shufeng, CHEN Xuechu, *et al.* Coastal blue carbon: Concept, study method, and the application to ecological restoration[J]. *Scientia Sinica(Terrae)*, 2018, 48: 661.
- [13] SANTOS I R, BURDIGE D J, JENNERJAHN T C, *et al.* The renaissance of Odum's outwelling hypothesis in "Blue Carbon" science[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2021, 255: 107361.
- [14] 段克, 刘峥延, 李刚, 等. 滨海蓝碳生态系统保护与碳交易机制研究[J]. *中国国土资源经济*, 2021, 34(12): 37.
- DUAN Ke, LIU Zhengyan, LI Gang, *et al.* Research on the coastal blue carbon ecosystem conservation and carbon trading mechanism[J], *Natural Resource Economics of China*, 2021, 34(12): 37.
- [15] MACREADIE P I, COSTA M D P, ATWOOD T B, *et al.* Blue carbon as a natural climate solution[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2021, 2(12): 826.
- [16] 王法明, 唐剑武, 叶思源, 等. 中国滨海湿地的蓝色碳汇功能及碳中和对策[J]. *中国科学院院刊*, 2021, 36(3): 241.
- WANG Faming, TANG Jianwu, YE Siyuan, *et al.* Blue carbon sink function of Chinese coastal wetlands and carbon neutrality strategy[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2021, 36(3): 241.
- [17] DAS S. Ecological restoration and livelihood: Contribution of planted mangroves as nursery and habitat for artisanal and commercial fishery[J]. *World Development*, 2017, 94: 492.
- [18] KIESEL J, SCHUERCH M, CHRISTIE E K, *et al.* Effective design of managed realignment schemes can reduce coastal flood risks[J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2020, 242: 106844.
- [19] MCOWEN C J, WEATHERDON L V, BOCHOVE J V, *et al.* A global map of saltmarshes[J]. *Biodiversity Data Journal*, 2017, 5: e11764.
- [20] BUNTING P, ROSENQVIST A, LUCAS R, *et al.* The global mangrove watch—A new 2010 global baseline of mangrove extent [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(10): 1669.
- [21] WANG F M, SANDERS C J, SANTOS I R, *et al.* Global blue carbon accumulation in tidal wetlands increases with climate change [J]. *National Science Review*, 2021, 8: nwaa296.
- [22] OUYANG X, LEE S Y. Updated estimates of carbon accumulation rates in coastal marsh sediments[J]. *Biogeosciences*, 2014, 11: 5057.
- [23] BREITHAUPT J L, SMOAK J M, SMITH T J, *et al.* Organic carbon burial rates in mangrove sediments: Strengthening the global budget [J]. *Glob Biogeochem Cycles*, 2012, 26: 2012GB004375.
- [24] MCLEOD E, CHMURA G L, BOUILLON S, *et al.* A blueprint for blue carbon: Toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO₂[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2011, 9(10): 552.
- [25] MAO D H, WANG Z M, DU B J, *et al.* National wetland mapping in China: A new product resulting from object-based and hierarchical classification of Landsat 8 OLI images [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2020, 164: 11.
- [26] 周晨昊, 毛覃愉, 徐晓, 等. 中国海岸带蓝碳生态系统碳汇潜力的初步分析[J]. *中国科学: 生命科学*, 2016, 46(4): 475.
- ZHOU Chenhao, MAO Qinyu, XU Xiao, *et al.* Preliminary analysis of C sequestration potential of blue carbon ecosystems on Chinese coastal zone[J]. *Scientia Sinica(Vitae)*, 2016, 46(4): 475.
- [27] 周金戈, 覃国铭, 张靖凡, 等. 中国盐沼湿地蓝碳碳汇研究及进展[J]. *热带亚热带植物学报*, 2022, 30(6): 765.
- ZHOU Jinge, QIN Guoming, ZHANG Jingfan, *et al.* Research progress of blue carbon sink in Chinese salt marshes[J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2022, 30(6): 765.
- [28] 索安宁, 赵冬至, 张丰收. 我国北方河口湿地植被储碳、固碳功能研究—以辽河三角洲盘锦地区为例[J]. *海洋学研究*, 2010, 28(3): 67.
- SUO Anning, ZHAO Dongzhi, ZHANG Fengshou. Carbon storage and fixation by wetland vegetation at the estuaries in northern China: A case of Panjin area, Liaohe Delta[J]. *Journal of Marine Sciences*, 2010, 28(3): 67.
- [29] 张绪良, 张朝晖, 徐宗军, 等. 黄河三角洲滨海湿地植被的碳储量和固碳能力[J]. *安全与环境学报*, 2012, 12(6): 145.
- ZHANG Xuliang, ZHANG Zhaohui, XU Zongjun, *et al.* On the relation between carbon storage and reinforced fixation of the coastal wetland vegetation in the Yellow River delta area [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2012, 12(6): 145.
- [30] GAO Y, PENG R H, OUYANG Z T, *et al.* Enhanced lateral exchange of carbon and nitrogen in a coastal wetland with invasive *Spartina alterniflora* [J]. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*, 2020, 125(5): e2019JG005459.
- [31] 邵学新, 李文华, 吴明, 等. 杭州湾潮滩湿地3种优势植物碳氮磷储量特征研究[J]. *环境科学*, 2013, 34(9): 3451.
- SHAO Xuexin, Li Wenhua, WU Ming, *et al.* Dynamics of carbon, nitrogen and phosphorus storage of three dominant marsh plants in Hangzhou Bay coastal wetland [J]. *Environmental Science*, 2013, 34(9): 3451.
- [32] 原一荃. 长江口典型潮沟系统有机碳累积与横向输移[D]. 上海: 华东师范大学, 2021.
- YUAN Yiquan. Organic carbon accumulation and its lateral transportation in a typical tidal creek system of the Yangtze river estuary[D]. Shanghai: East China Normal University, 2021.
- [33] OSBURN C L, RUDOLPH J C, PAERL H W, *et al.* Lingering carbon cycle effects of Hurricane Matthew in north Carolina's coastal waters[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(5): 2654.
- [34] LI Y L, GE Z M, XIE L N, *et al.* Effects of waterlogging and salinity increase on CO₂ efflux in soil from coastal marshes[J]. *Applied Soil Ecology*, 2022, 170: 104268.
- [35] ALHEIT J. Consequences of regime shifts for marine food webs [J]. *International Journal of Earth Science*, 2009, 98(2): 261.
- [36] BROTHERS S M, HILT S, ATTERMEYER K, *et al.* A regime shift from macrophyte to phytoplankton dominance enhances carbon burial in a shallow, eutrophic lake[J]. *Ecosphere*, 2013, 4(11): 1.
- [37] PAUL E A. The nature and dynamics of soil organic matter: Plant

- inputs, microbial transformations, and organic matter stabilization [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 98: 109.
- [38] BOUILLON S, CONNOLLY, R M, LEE S Y. Organic matter exchange and cycling in mangrove ecosystems: Recent insights from stable isotope studies[J]. *Journal of Sea Research*, 2008, 59: 44.
- [39] RANJAN R K, ROUTH J, RAMANATHAN A L, *et al.* Elemental and stable isotope records of organic matter input and its fate in the Pichavaram mangrove - estuarine sediments (Tamil Nadu, India)[J]. *Marine Chemistry*, 2011, 126(1/4): 163.
- [40] KENNEDY H, BEGGINS J, DUARTE C M, *et al.* Seagrass sediments as a global carbon sink: Isotopic constraints[J]. *Global Biogeochem Cycles*, 2010, 24(4): GB4026.
- [41] SASMITO S D, KUZYAKOV Y, LUBIS A A, *et al.* Organic carbon burial and sources in soils of coastal mudflat and mangrove ecosystems[J]. *Catena*, 2020, 187: 104414.
- [42] SAMPER-VILLARREAL J, LOVELOCK C E, SAUNDERS M I, *et al.* Organic carbon in seagrass sediments is influenced by seagrass canopy complexity, turbidity, wave height, and water depth[J]. *Limnology and Oceanography*, 2016, 61: 938.
- [43] 韩广轩, 王法明, 马俊, 等. 滨海盐沼湿地蓝色碳汇功能、形成机制及其增汇潜力[J]. *植物生态学报*, 2022, 46(4): 373.
HAN Guangxuan, WANG Faming, MA Jun, *et al.* Blue carbon sink function, formation mechanism and sequestration potential of coastal salt marshes[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2022, 46(4): 373.
- [44] 冯晓娟, 王依云, 刘婷, 等. 生物标志物及其在生态系统研究中的应用[J]. *植物生态学报*, 2020, 44: 384.
FENG Xiaojuan, WANG Yiyun, LIU Ting, *et al.* Biomarkers and their applications in ecosystem research[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2020, 44(4): 384.
- [45] SHIN W, OH M, HONG J S, *et al.* Early invasion of common cordgrass (*Spartina anglica*) increases belowground biomass and decreases macrofaunal density and diversity in a tidal flat marsh[J]. *Biological Invasions*, 2022, 24(11): 3615.
- [46] 陈皓, 何磊, 叶思源, 等. 渤海湾北部滦河三角洲晚更新世以来沉积环境划分及碳埋藏速率的评价[J]. *中国地质*, 2022, 49(5): 1555.
CHEN Hao, HE Lei, YE Siyuan, *et al.* Differentiation of sedimentary environment and its carbon sequestration rate since the Late Pleistocene in the Luanhe River Delta, northern Bohai Bay [J]. *Geology in China*, 2022, 49(5): 1555.
- [47] XIA P, MEENG X W, LI Z, *et al.* Sedimentary records of mangrove evolution during the past one hundred years based on stable carbon isotope and pollen evidences in Maowei, SW China [J]. *Journal of Ocean University of China*, 2016, 15: 447.
- [48] 全川, 罗敏, 陈鹭真, 等. 滨海蓝碳湿地碳汇速率测定方法及中国的研究现状和挑战[J]. *生态学报*, 2023, 43(17): 6937.
TONG Chuan, LUO Min, CHEN Luzhen, *et al.* Methods of carbon sink rate measurement of coastal blue carbon wetland ecosystems, current situation and challenges in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(17): 6937.
- [49] 申霞, 王鹏, 王为攀, 等. 滨海盐沼净碳汇能力研究方法综述[J]. *生态学杂志*, 2022, 41(4): 792.
SHEN Xia, WANG Peng, WANG Weipan, *et al.* Review on the estimation methods of net carbon sinks of coastal salt marshes[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2022, 41(4): 792.
- [50] LEHMAN P, MAYR S, MECUM L, *et al.* The freshwater tidal wetland Liberty Island, CA was both a source and sink of inorganic and organic material to the San Francisco Estuary [J]. *Aquatic Ecology*, 2010, 44:359.
- [51] WILSON A M, MORRIS J T. The influence of tidal forcing on groundwater flow and nutrient exchange in a salt marsh-dominated estuary[J]. *Biogeochemistry*, 2012, 108(1/3): 27.
- [52] TOBIAS C, NEUBAUER S, COASTAL Wetlands. Chapter 16- salt marsh biogeochemistry—An overview [M]. Amsterdam: Elsevier, 2019.
- [53] 杨靛青. 盐沼地区潮周期内有机碳的动力输移与通量研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2009.
YANG Liangqing. Organic carbon dynamic transport and flux changes within tidal cycles in salt marsh marginal zone [D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2009.
- [54] CUI Q F, HE X Q, LIU Q, *et al.* Estimation of lateral DOC transport in Marginal Sea based on remote sensing and numerical simulation[J]. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 2018, 123(8): 5525.
- [55] WANG Z H, BAI Y, HE X Q, *et al.* Estimating particulate organic carbon flux in a highly dynamic estuary using satellite data and numerical modeling [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 252: 112116.
- [56] 葛振鸣, 周晓, 王开运, 等. 长江河口典型湿地碳库动态研究方法[J]. *生态学报*, 2010, 30(4): 1097.
GE Zhenming, ZHOU Xiao, WANG Kaiyun, *et al.* Research methodology on carbon pool dynamics in the typical wetland of Yangtze River estuary[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(4): 1097.
- [57] 陆颖, 仲启铖, 王璐, 等. 滨海湿地碳源/汇模拟系统的构建与应用[J]. *计算机应用与软件*, 2015, 32(3): 69.
LU Ying, ZHONG Qicheng, WANG Lu, *et al.* Constructing simulations system of carbon source/sink in coastal wetlands and its application[J]. *Computer Applications and Software*, 2015, 32(3): 69.
- [58] MORRIS J T, BARBER D C, CALLAWAY J C, *et al.* Contributions of organic and inorganic matter to sediment volume and accretion in tidal wetlands at steady state[J]. *Earths Future*, 2016, 4: 110.
- [59] CLARK J B, LONG W, HOOD R R. A comprehensive estuarine dissolved organic carbon budget using an enhanced biogeochemical model [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2020, 125(5): e2019JG005442.
- [60] YAO H M, MONTAGNA P A, WEETZ M S, *et al.* Subtropical estuarine carbon budget under various hydrologic extremes and implications on the lateral carbon exchange from tidal wetlands[J]. *Water Research*, 2022, 217: 118436.