

长江口滨海湿地有机碳循环过程及影响因素研究 进展

杨中元¹, 娄 厦^{1,2}, 陈仕哲¹, Irina Fedorova Viktorovna³,
Dorzhiyeva Radnaeva Larisa⁴, Elena Nikitina⁴

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学长江水环境教育部重点实验室, 上海 200092; 3. Institute of Earth Sciences, Saint Petersburg State University, 199034, 7-9 Universitetskaya Embankment, St Petersburg, Russia; 4. Laboratory of Chemistry of Natural Systems, Baikal Institute of Nature Management of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude 670047, Republic of Buryatia, Russia)

摘要: 滨海湿地是“蓝碳生态系统”的重要组成部分。综述了长江口滨海湿地土壤有机碳时空分布及含量、碳汇速率、有机碳横向输入输出通量及量化方法、有机碳循环定量分析模型以及有机碳储量和组分对不同影响因素所做出的动态响应规律,发现在土壤有机碳水平空间分布上,崇西湿地>崇明东滩>九段沙>南汇潮滩;有机碳通量和浓度变化主要受到植物生物量和结构、水和土壤的理化性质、陆源输入和潮汐动力、孔隙水交换以及人类活动和全球气候变化的影响。未来应加强长江口湿地土壤碳库和有机碳输运通量统一观测,准确量化各主要因素对有机碳的贡献,这对研究盐沼湿地的碳循环机理和碳汇评估具有重要意义。

关键词: 长江口湿地;有机碳时空分布;垂向埋藏速率;横向输送通量;影响因素;碳汇评估

中图分类号: P76

文献标志码: A

Advances in Organic Carbon Cycle Processes and Influencing Factors of Coastal Wetlands in the Yangtze River Estuary

YANG Zhongyuan¹, LOU Sha^{1,2}, CHEN Shizhe¹, Irina Fedorova Viktorovna³, Dorzhiyeva Radnaeva Larisa⁴, Elena Nikitina⁴

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Yangtze Water Environment of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai

200092, China; 3. Institute of Earth Sciences, Saint Petersburg State University, 199034, 7-9 Universitetskaya Embankment, St Petersburg, Russia; 4. Laboratory of Chemistry of Natural Systems, Baikal Institute of Nature Management of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude 670047, Republic of Buryatia, Russia)

Abstract: Coastal wetlands are an important part of the “blue carbon ecosystem”. The spatiotemporal distribution and content of soil organic carbon of the coastal wetlands in the Yangtze River Estuary, the carbon sequestration rate, the lateral input and output fluxes of organic carbon and the quantification methods, and organic carbon circulation quantitative analysis model are summarized. The dynamic response of organic carbon storage and composition to different influencing factors is analyzed. It is found that the horizontal distribution of soil organic carbon ranks as Chongxi Wetland > Chongming Dongtan > Jiuduansha > Nanhui tidal flat; Organic carbon flux and concentration changes are mainly affected by water and soil physicochemical properties, terrestrial inputs and tidal dynamic, porewater exchange, human activities and global climate change. In the future, the uniform observation of the soil carbon pools and organic carbon transportation in wetlands of the Yangtze River Estuary should be strengthened, to accurately quantify the contribution of the main factors to organic carbon, which is of great significance to the study of the carbon circulation mechanism and carbon

收稿日期: 2022-08-24

基金项目: 上海市科技创新行动计划(22230712900; 22ZR1464200; 20230742500); 国家自然科学基金资助项目(42072281, 41602244); 土木工程 I 类高峰学科建设项目(2022-3-YB-03); 中央高校基本科研业务费专项(22120210576); 同济大学海洋交叉平台项目(2022-2-YB-01)

第一作者: 杨中元, 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: yzytj@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

sink assessment of saltmarsh wetlands.

Keywords: Yangtze River Estuary wetland; spatiotemporal distribution of organic carbon; vertical burial rate; lateral transport fluxes; influencing factors; carbon sink assessment

工业革命以来,化石燃料的燃烧和土地利用方式的变化破坏了生态系统和大气环境间的平衡,加剧碳排放趋势。大气二氧化碳浓度在过去50年急剧上升,达到现在的 410×10^{-6} 左右,并呈现逐年上升的趋势^[1]。二氧化碳浓度上升导致全球温室效应,海洋酸化、海平面上升、极端天气等灾害频发。增加碳汇被认为是缓解二氧化碳增加和全球温室效应的有效且成本低的方法之一。滨海湿地是海、陆生态系统之间的物质输送的重要纽带,具有高初级生产力、沉积率、碳埋藏率和低甲烷排放的特点,储存了大量的“蓝碳”,单位面积的碳固存率是陆地生态系统的15倍,约为海洋生态系统的50倍^[2]。红树林、盐沼和海草床通过光合作用或利用其复杂的根系捕获泥沙和自然碎屑储存大量碳,在陆地-海洋生态系统结构和功能中发挥着重要作用。

长江口是我国最大的河口,滨海湿地面积约2500 km²,是上海最重要的生态屏障。崇明东滩湿地、九段沙湿地、南汇东滩等都是长江口盐沼植被重要的分布区,具有重要的碳汇功能,是区域碳循环的重要组成部分。由于特殊的地理位置,受到上游陆域季节性陆源输入、海域周期性潮汐与波浪水动力的影响,长江口湿地土壤和水质空间异质性明显,形成了以芦苇、海三棱藨草、互花米草为主的生物量和有机碳库。当前长江口滨海湿地植被和土壤有机碳来源、转化、积累和储存能力以及横向碳交换被大多学者关注^[3-4]。本文综述了长江口滨海湿地有机碳空间分布、垂向埋藏、横向输送以及影响因素等方面的研究进展,总结了河口湿地有机碳循环过程的主控因素,相关内容可以为海洋生态系统“蓝碳”预测和固碳增汇技术提供理论基础,对双碳战略目标实现具有重要意义。

1 长江口滨海湿地有机碳时空分布

长江口滨海湿地中,实施生态修复工程后的崇西湿地土壤有机碳高于崇明东滩、九段沙等湿地,其中淡水潮滩优势种的芦苇表层土壤有机碳含量为 $(12.21 \pm 1.52) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 至 $(15.55 \pm 1.47) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。在水平空间分布上,受高潮滩芦苇凋落物、根系分泌物输入影响,

随高程增加不同季节间均表现为高潮滩>中潮滩>低潮滩^[5]。在时间尺度上相同高程土壤有机碳含量总体趋势为夏秋高于春冬,这与芦苇的生长周期以及土壤有机碳累积、消耗平衡有关。

由于崇明东滩南北侧土壤理化性质的差异形成不同植被分布特征,表层0~30 cm深度土壤有机碳含量空间变异性较大,变化范围为 $1.67 \sim 14.15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,平均值为 $7.29 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,土壤有机碳储量为 $1.15 \times 10^8 \text{ kg}$ 。相比东滩南部海三棱藨草等生物量较小的植被,北部的芦苇、互花米草等植被地上生物量较大、高土壤盐度、土壤矿化分解速率更慢等因素,导致高有机碳输入低有机碳输出,土壤有机碳含量呈现北高南低趋势。高潮滩主要发育互花米草和芦苇等优势植被,且受到潮汐扰动频率小,土壤有机碳容易滞留,呈高潮滩高而低潮滩低的趋势^[6]。崇明东滩不同潮滩区域从春季(植物生长期)到冬季期间(植物枯萎期)土壤有机碳储量逐渐积累,同时受到芦苇长期沉积作用和互花米草高生物量的影响,总体大小分布特征为芦苇植被带>互花米草植被带>海三棱藨草>光滩,其中北部土壤有机碳储量最高,中部次之,南部最小^[7]。

九段沙湿地发育时间较短,与东滩湿地相比,土壤碳储量整体较低^[8]。土壤碳储量50 cm深度土壤中储存的有机碳为 $2.28 \times 10^8 \text{ kg}$ 。中下沙芦苇植被带茎中含有大量难分解的木质素,且靠近东海,受高盐度潮汐水作用,土壤微生物呼吸减弱,因此有利于有机碳积累,最高 $(7.66 \pm 0.74) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;相比之下,由于江亚南沙生长地上生物量低的海三棱藨草,接受上游有机污染物和较低的含盐量,这些因素促进了土壤呼吸,造成海三棱藨草植被带土壤有机碳含量最低 $(3.92 \pm 0.25) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,其含量差异性显著,整体呈现中/高潮滩>低潮滩^[9]。

南汇潮滩受到各种人类活动的干扰,可分为自然湿地、促淤湿地和人工修复湿地,其中以互花米草为主的自然湿地植物生物量最高,淹水时间长,土壤呼吸低,导致0~40 cm平均土壤有机碳含量最高 $(13.39 \pm 0.92) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[10]。南汇南滩互花米草通过加快有机碎屑埋藏速率显著提高了生境沉积物总有机碳含量,年平均值 $(4.60 \pm 2.19) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 显著大于海三棱藨草 $(2.74 \pm 0.13) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和光滩 $(0.88 \pm 0.4) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。季节上,春夏季海三棱藨草、互花米草、光滩表层土壤有机碳消耗支出大于输入导致有机碳含量显著低于秋冬季^[11]。

2 长江口滨海湿地有机碳垂向埋藏及其速率

湿地固碳主要是指有机碳的垂向输送,即有机碳通过植物吸收、微生物作用等垂向沉积于土壤中的过程。滨海湿地有机碳主要有两个来源,①是内源有机碳,指湿地植被凋落物和根系的累积;②是外源有机碳,指潮汐和河流运输带来的悬浮颗粒物、有机质等,包括各种藻类和生物残体^[12]。滨海湿地的碳埋藏率因不同植被类型而变化,在全球尺度上,盐沼湿地和红树林系统的平均碳埋藏速率分别为 $164 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{年}^{-1}$ 和 $194 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{年}^{-1}$ ^[13]。长江口崇明东滩湿地互花米草和芦苇的碳埋藏速率为 $(0.66 \pm 0.08) \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{年}^{-1}$ 和 $(0.42 \pm 0.05) \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{年}^{-1}$ ^[14]。

盐沼湿地碳汇速率通常通过沉积物堆积速率和土壤碳密度相乘得出,见公式(1)。放射性核素(^{210}Pb 、 ^{137}Cs 、 ^{228}Th 、 ^7Be)同位素测年法和水平标志层法(长石粉、沙子标记法)常被用来测定河口、海岸及陆架区域沉积物沉积速率、沉积物年龄等。例如,段凌云等^[15]利用过剩 ^{210}Pb 测定横沙岛和南汇潮滩沉积速率($1.03\sim 1.94 \text{ cm}\cdot\text{年}^{-1}$)。吴绽蕾^[16]利用长石标记计算短时间尺度(1年)崇明东滩沉积速率为 $11.6 \text{ cm}\cdot\text{年}^{-1}$,有机碳埋藏速率为 $760.19 \text{ t C}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{年}^{-1}$,有机碳埋藏通量为 $0.34 \text{ Mt}\cdot\text{年}^{-1}$ ($1 \text{ Mt}=10^6 \text{ t}$),显著高于我国东海($14.7 \text{ t C}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{年}^{-1}$)、黄渤海陆架有机碳埋藏速率($13.5 \text{ t C}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{年}^{-1}$)。由于河水的搬运作用、复杂水动力环境、湿地植被消浪促淤等多重因素影响,大量颗粒物在河口沉积下来,决定了长江河口湿地较高的碳汇能力。

$$V_{\text{C, seq}} = \rho_{\text{SCD}} \cdot V_{\text{SAR}} \quad (1)$$

式中: $V_{\text{C, seq}}$ 为碳汇速率, $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{年}^{-1}$; ρ_{SCD} 为土壤碳密度, $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$; V_{SAR} 为沉积物堆积速率, $\text{cm}\cdot\text{年}^{-1}$ 。

3 长江口滨海湿地有机碳横向输送及其通量

3.1 径流输入

每年河流流入全球边缘海的溶解有机碳(dissolved organic carbon, DOC)通量约为 $(219.5 \pm 54.36) \text{ Tg C}\cdot\text{年}^{-1}$, $1 \text{ Tg}=10^{12} \text{ g}$ 。颗粒有机碳(particulate organic carbon, POC)通量为 $(204 \pm 21.73) \text{ Tg C}\cdot\text{年}^{-1}$ ^[17]。有机碳输入输出与径流介导的水文过程密切相关,全球河流输送的有机碳总量

约占大陆或海洋净碳累积量的17%^[18]。河口-海洋碳交换通量可以通过连续地测量碳浓度和流量直接计算,或者箱式模型^[19]、遥感-水动力模型^[20]等间接估计。长江口是中等强度的潮汐河口,处于上游河流排泄与潮水、盐淡水交汇的双向流动特殊位置,陆地碳库与海洋碳库紧密相连,同时还受到波浪及口外陆架环流等因素的影响,横向碳交换强烈。每年长江输送数百万吨有机碳到长江口^[21]。在大通水文站观测的POC通量范围从1998年 $0.9 \text{ Tg C}\cdot\text{年}^{-1}$ ^[22]到2009年 $1.52 \text{ Tg C}\cdot\text{年}^{-1}$ ^[21]。由于季节、气候和潮汐差异,河口有机碳收支具有高度时空异质性,其垂直、水平和时间变化增加了通量监测和估算的难度。因此,对于水动力条件复杂的长江口地区,除了直接测量河口-海洋碳交换的方法以外,常通过高分辨率的遥感数据结合数值模拟方法连续估算碳浓度。刘东^[17]利用多源遥感和实测资料估算了2000—2013年长江大通长时间序列的DOC月通量范围为 $3.88 \times 10^4 \sim 42.78 \times 10^4 \text{ t C}$, POC为 $1.4 \times 10^4 \sim 52.04 \times 10^4 \text{ t C}$,基本相同。Wang等^[23]提出一种结合卫星数据(the geostationary ocean color imager)和数值模拟(the finite volume community ocean model)的新方法确定了2011年7月至2018年6月大通、徐六泾水文站和长江口外长时间序列的年均POC通量分别为 $(1.16 \pm 0.16) \text{ Tg C}\cdot\text{年}^{-1}$, $(1.29 \pm 0.11) \text{ Tg C}\cdot\text{年}^{-1}$ 和 $(1.17 \pm 0.11) \text{ Tg C}\cdot\text{年}^{-1}$ 。在河口地区沉积 $0.12 \text{ Tg C}\cdot\text{年}^{-1}$ 。以上研究成果定量描述长江口每年陆源有机碳运输通量,其中采用某年或某月碳浓度乘流量的计算方法不可避免地出现误差,而遥感卫星结合数值模拟的长时间序列建模方法可以更准确地评估有机碳运输通量,分析季节性差异特征。

3.2 潮汐运动

潮汐运动可以驱动海洋和湿地生态系统间进行能量和质量横向交换,悬浮物和POC在涨潮期间进入河口水环境,落潮时从海岸盐沼横向输送出去。DOC、溶解无机碳(dissolved inorganic carbon, DIC)、POC是盐沼湿地横向碳交换的主要形态。Yuan等^[24]发现2017年7月到2018年4月不同季节的崇明东滩潮沟系统大多表现为近海有机碳源,并且潮周期内通量范围为 $-12.65\sim 4.04 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}$,结合文献^[25],计算出2017年东滩潮间带湿地冬季和夏季DOC输入输出通量见图1,表明侧向交换是河口碳循环过程的重要途径且存在季节差异。

目前,针对盐沼湿地横向碳交换的主要方法包

括数学模型、现场观测和遥感反演。数学模型大多结合水沙通量和实测水体碳浓度估算碳通量^[24]。比如,河口有机碳稳态质量方程被用于计算DIC和总有机碳(total organic carbon, TOC)^[26]。遥感反演通过有色溶解有机物吸收系数和叶绿素浓度遥感反

演算法获得DOC浓度结合流场计算DOC侧向运输通量^[27]。除了对碳通量的数量进行定量化分析外,部分学者还通过沉积物碳同位素、碳氮比值等方法分析有机碳来源及组分^[28-29]。

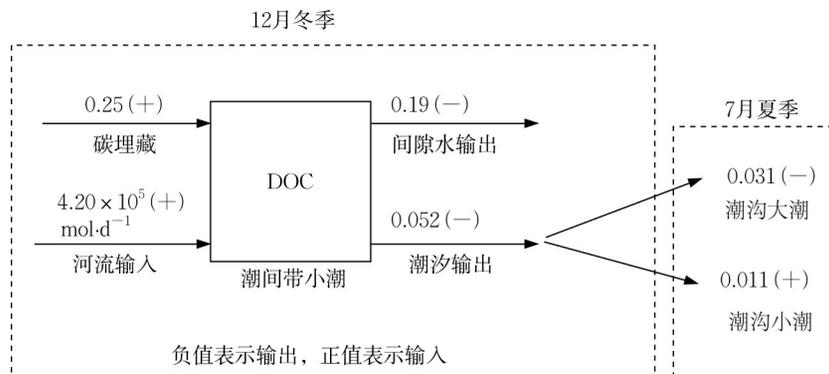


图1 2017年东滩盐沼潮间带DOC收支概念模型(单位: $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)

Fig. 1 Conceptual model of DOC budget in Dongtan saltmarsh intertidal area in 2017(unit: $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)

4 有机碳循环定量分析模型

滨海湿地生态系统有机碳循环定量分析模型根据其模拟对象分为机理模型和光能利用效率模型。常用的机理模型有TECO (terrestrial ecosystem model)、AVIM (atmosphere-vegetation interaction model)等几种模型^[30]。Huang等^[31]将详细观测数据与TECO模型结合,预测泥炭地在气候和环境变化下的土壤温度和碳动态。与机理模型相比,光能利用效率模型集中于碳循环中的光合作用,计算植物固碳量,考虑影响因素更少。常见的有CASA (carnegie-ames-stanford approach)、VPM (vegetation photosynthesis model)等^[22]。原一荃等结合野外观测与CASA模型反演的方法,探讨了崇明东滩南部盐沼湿地净初级生产力和时空变化^[32]。由于长江口滨海湿地同一环境因子时空变异显著,以及水-土-植物等间相互作用和周期性潮汐水文过程,滨海湿地碳循环模型简化了各影响因素的交互关系,但无法解释和表达植物季节动态变化、优势物种选择等动态过程,可以通过现场监测和物理模型实验结合遥感反演识别影响有机碳的主控因素,厘清土-植物-水多相碳循环规律,构建潮汐水文过程、植物季节动态变化等子模型并组合水文、生物地球化学和植被等关键模块使拟合效果更优。

5 长江口滨海湿地有机碳影响因素

5.1 植物群落

在大多数滨海湿地生态系统中,湿地超过90%净初级生产力以植物输入(死亡的植物残体、凋落物和根系)形式回到土壤,并构成土壤有机碳的重要外部物质来源。植物群落的组成、结构、生物量以及凋落物都与有机碳赋存、输入及输出密切相关,是影响碳存储效率的重要因素。

长江口滨海湿地主要分布3种本地物种:芦苇、海三棱藨草、藨草,以及外来物种互花米草。目前,国内外学者对长江口滨海湿地有机碳循环过程中植物群落作用研究主要集中于植物对湿地沉积物固碳贡献及POC、DOC输入输出等方面产生的影响。吴统蕾等^[33]通过建立碳同位素质量平衡混合模型计算出长江口崇明东滩秋冬季海三棱藨草输入到沉积物中有机碳为 $2.06\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,约占有机碳库含量的31.20%。顿佳耀等^[28]基于 $\delta^{13}\text{C}$ 线性混合模型计算出崇明东滩盐沼表层沉积物有机碳主要来源于悬浮颗粒物($43.53\% \pm 22.44\%$)和植被($43.29\% \pm 24.82\%$),底栖微藻贡献率较低($13.20\% \pm 8.40\%$)。

盐沼植物生物量与种类对湿地碳输入具有显著影响。长江口南汇滩涂互花米草湿地有3种类型:自然湿地、促淤湿地和人工恢复湿地。其中,自然湿地单位面积植物生物量最高($6.92 \pm 0.01\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$),其次是人工恢复湿地和促淤湿地($6.55 \pm 0.91\text{ kg}\cdot$

m^{-2} 和 $(5.66 \pm 0.36) \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,对应的地下土壤(0~40 cm)有机碳密度分别为 23.26 、 17.95 和 $12.21 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \text{ CO}_2^{[10]}$ 。在崇明东滩湿地,互花米草群落的总生物量 $(5,750.7 \pm 813.1) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 显著大于海三棱藨草群落 $(812.7 \pm 127.4) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,其垂向最大土壤碳储量 $(179.2 \pm 16.7) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 也高于海三棱藨草群落 $(109.9 \pm 12.6) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2[34]}$ 。然而这并不意味着植物生物量越高,对土壤中的有机碳贡献量就越大。在崇明东滩盐沼中南部芦苇带和北部互花米草带覆盖下的沉积物中,尽管互花米草初级生产力很大,但由于建群时间短、生长周期长、凋落物分解速率快和矿化度高等因素,导致互花米草带沉积物中的植物绝对贡献率(7.70%)远小于芦苇带(60.43%)^[28]。

植物生物量的50%往往分布在根茎叶或凋落物中,这些因素也对土壤有机质输入输出产生影响。原一荃等^[4]研究发现有机碳在盐生植物地下根系密集的区域最大,有机碳与地下生物量呈正相关。混合植被群丛和芦苇植被群丛沉积物有机碳变化趋势与地下生物量分别表现为极显著正相关、显著正相关。李钰^[35]设计与二氧化碳和甲烷同位素仪相连接的圆柱形密闭培养罐进行了湿地土壤有机碳矿化的室内培养实验,选取长江口崇明东滩、启东等滩湿地的三种典型植被枯落物添加后,发现其分解对土壤有机碳含量与无添加土壤相比显著提高,且添加海三棱藨草后的增幅明显大于互花米草和芦苇,添加芦苇叶枯落物的增幅大于添加其茎枯落物。

此外,湿地植被还通过枝条降低水速,产生阻力,减少冠层内的动量以及将沉积物与其根茎结合等方式,创造一个弱水动力和高沉积率的环境,加速有机碳和陆相有机物质沉降。较弱的水动力环境通常会促进含有细颗粒和低体积密度的沉积物积累,而这些沉积物与POC、DOC的富集有关。费蓓莉等^[36]经过崇明东滩湿地不同群落潮沟的对比,发现各季节涨、落潮周期后,水平和垂直冠层结构稠密的Poaceae群落(芦苇为主)拦截泥沙和植物碎屑的效果较冠层低矮的Cyperaceae群落(海三棱藨草和糙叶藨草为主)要好,表现为POC净输入趋势。然而,冠层低密度和根茎死亡会直接导致土壤黏聚力降低,导致落潮时泥沙和相关的POC输出到近海^[37]。

互花米草入侵上海崇明东滩湿地后主要通过改变进入土壤的凋落物和根系的数量和质量来提高土壤有机碳库,与九段沙湿地研究结果一致^[38-39]。由于互花米草群落根茎和根系生物量高,植物残体分解率高,初级生产力在 $2800 \sim 3889 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,有机碳浓

度较高。有研究表明,与高潮滩芦苇 $(4.74 \pm 0.24) \text{ kg C} \cdot \text{m}^{-2}$ 、低潮滩海三棱藨草 $(2.80 \pm 0.16) \text{ kg C} \cdot \text{m}^{-2}$ 土著植物土壤有机碳库相比,互花米草的入侵显著增加了植物净初级生产力,高潮滩和低潮滩互花米草的土壤(0~100 cm)有机碳库,分别为 $(5.52 \pm 0.18) \text{ kg C} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $(4.10 \pm 0.15) \text{ kg C} \cdot \text{m}^{-2[38]}$ 。同时入侵后植物群落结构的变化增加了横向物质交换中的沉降,使得互花米草盐沼中植物和土壤的碳氮库显著高于芦苇^[14]。

5.2 水质理化性质

河口湿地的水质理化性质变化直接影响陆域-河口-海域间的有机碳循环。盐度变化是河口盐沼湿地特有的环境因子。盐度不仅是淡水-盐水混合的指标,也影响着生物化学过程。长江口表、底层DOC均与盐度呈显著负相关,这与世界诸多河口研究结果一致。但随着颗粒态向溶解态转化和海水的稀释作用平衡的变化,DOC并不完全在长江口具有保守性下降行为^[40]。POC与盐度关系也不会完全随着盐度的增加而降低,其浓度分布还受到流速、涡动扩散叠加生物作用等其他方面的影响^[41]。河口湿地盐度的变化还显著制约湿地土壤有机碳的输入、矿化过程。薛莲^[42]通过单因素盆栽控制实验指出淹水盐度带来的土壤盐度升高会显著降低长江口潮滩植物芦苇、互花米草生长末期土壤有机碳储量。同时盐度增加会对有机碳矿化进程中的微生物生理机能造成影响,转变矿化路径^[43]。

叶绿素(Chl-a)可以反映河口地区的生物活性,也与有机碳循环密切相关。在长江河口秋冬季节,DOC与叶绿素呈现正相关,反映了浮游植物现场生产是区域内有机碳的重要来源^[40]。5月和8月随水温升高,生物活动的增强,温度也成为显著的影响因素。长江口地区POC以陆源有机碳为主,POC分布与悬浮颗粒物含量、浊度呈显著正相关关系。但是,长江口有机碳的质量分数POC%却随悬浮物含量增加而下降。随着悬浮物含量的增加,水体的透光性减弱,浮游植物对颗粒有机碳的贡献降低^[41]。此外,随着盐度、温度、溶解氧、浊度等驱动因子的消长导致水体化学环境的变化,进而影响到水体有机碳与无机碳的迁移转化过程。

5.3 土壤理化性质

土壤盐分含量主要通过控制植物生长和微生物活性,从而对碳输入和转化产生影响。长江口崇明东滩土壤全盐量与土壤有机碳含量呈显著正相关,是影响土壤有机碳含量的首要因子。崇明东滩北部高盐度区域相比南部低盐度南区域,具有较多地上生物量大的互花米草和更高的有机碳输入,也具有更慢的土壤矿

化速率^[6]。研究表明,过量的盐分会抑制土壤微生物过程(碳矿化、有机质分解、微生物活动)。九段沙下沙区域高潮滩土壤盐度较高,导致较低的土壤微生物呼吸和土壤呼吸,促进有机土壤物质的固存^[44]。同时,土壤盐分也会降低植物生产力和碳输入从而影响土壤碳积累。薛莲等^[45]采用单因素盆栽实验发现随着土壤盐度增加,芦苇、互花米草和海三棱藨草地上部分、总体碳储量与土壤盐度均呈显著线性负相关关系。

温度是影响湿地沉积物有机碳积累和分解的主要因素。温度升高可以一定程度上提高土壤有机碳矿化速率。低温条件可以抑制微生物活性,减弱了土壤呼吸速率,从而有利于土壤有机物质的积累。土壤水分主要通过改变土壤需氧和厌氧条件从而影响外源输入以及土壤有机碳矿化速率。但根据目前研究土壤水分与土壤有机碳储量的关系较为复杂,不同研究存在不同结论。长江口南汇潮滩3种植物生境沉积物(光滩、海三棱藨草和互花米草)含水率与沉积物总碳、总有机碳含量呈显著正相关^[11]。含水量增加时,氧气可利用性下降,有机质矿化分解速率减慢,土壤有机碳易发生积累^[46]。同时总有机碳含量增加,吸附大量水分子并存留在沉积物间隙中,提高沉积物含水率。然而,由于崇明东滩光滩土壤中有机质输入量远低于芦苇、互花米草盐沼植被带,导致含水率较高的光滩区域的有机碳储量低于盐沼植被带,土壤含水量与碳储量呈负相关^[7]。

土壤pH、容重及粒径对土壤有机碳稳定性具有重要影响。土壤pH主要通过影响土壤微生物活性从而影响有机碳积累。pH在一定范围内(7.68~8.13)与长江口崇明东滩湿地有机碳储量呈正相关^[7]。当pH高于8.5或低于5.5时,强酸或强碱都会抑制土壤微生物活性,降低有机质分解转化作用。土壤容重和粒径对土壤溶质迁移、吸附能力、矿化速率等有很大影响。崇明东滩湿地有机碳储量与土壤容重呈负相关,与中值粒径呈显著负相关^[6-7]。粒径大小影响土壤有机碳的吸附能力。颗粒物越细,比表面积越大,越容易吸附有机质。在东滩湿地盐沼和光滩两个测点,悬浮泥沙中颗粒态有机碳浓度与粘土和细粉砂之间存在正相关,与中粉砂和粗粉砂间存在负相关^[47]。李艳丽等^[48]通过分析崇明东滩两种湿地类型发现:南部地区芦苇型砂壤土孔隙较大,含水量和含盐量均较低,有利于微生物生长和有机碳分解;东北地区芦苇/米草型粘土含水量和含盐量均高,微生物活性弱,有机碳汇聚能力高。

此外,进入河口湿地的外源氮等营养物质也对土

壤碳库、可溶性有机碳释放、有机碳分解等过程产生重要影响。首先,氮素短期内输入促进植物生长,提高生物量,增加了土壤碳含量。长江口崇明东滩湿地土壤总氮储量与有机碳储量具有极显著关系^[7]。九段沙湿地中下沙硝态氮含量与有机碳含量显著相关^[39]。长期氮输入可能造成湿地生态系统饱和,制约土壤“蓝碳”功能^[49]。其次,外源氮的输入能促进植物凋落物和根系分泌物增加或影响土壤pH,从而促进土壤溶解态有机碳的形成和释放^[49]。不仅如此,土壤碳/氮(C/N)变化会改变土壤微生物生物量和活性,导致有机质组分分解的变化。崇西湿地C/N在15以下10左右(适合微生物活动的碳氮比约为25),说明土壤有机碳腐殖化程度较高,有利于土壤碳积累^[5]。

5.4 陆源输入和海域水动力作用

长江径流携带大量物质进入河口地区,对河口海岸的生态、环境具有重要影响,也直接影响着长江口湿地有机碳循环。2012年,长江口DOC入海通量呈现夏季>秋季>春季>冬季的趋势,与长江径流量的季节变化趋势基本一致,表明径流量是影响DOC入海通量的重要因素。沉积物是POC在水环境中的主要载体,POC入海通量呈现夏季>春季>秋季>冬季的趋势,与长江输沙量的季节变化趋势基本相同,表明POC入海通量与长江输沙量相关性最强^[50]。

长江口潮汐呈现半月和半日变化,内支发生不对称涨落潮变化,这对流速和泥沙动力有很大影响。因此,在不同潮汐周期和潮汐阶段,有机碳会表现出不同的分布、变化和行。崇明东滩湿地盐沼地区和光滩大潮小潮之间有机碳总通量相差1个数量级,且输移过程表现为涨潮初期向岸输移,涨落潮后期离岸输移的正弦曲线变化规律^[47]。首先,潮汐运动引起的地表径流控制着水位和水流速度,直接影响盐沼湿地碳的迁移速率和输移量。东滩湿地盐沼和光滩测点各潮次有机碳总通量与平静天气条件下最大水深的三次方呈显著正相关^[47]。潮差较大的长江河口(年平均2.66 m),相比涨潮,退潮的持续时间更长并且流速更大,更多的有机碳被输出^[24]。其次,潮汐不仅改变水动力条件,还会改变水体和土壤化学性质,如盐度、pH、氧化还原电位,影响到有机碳运移、沉降和储存。在周期性潮汐作用下,盐沼湿地水体和土壤盐度的变化从海到陆表现梯度差异,例如东滩湿地半月周期内,大潮期低潮滩土壤含水量、盐度和硫酸盐的增加幅度大于高潮滩,低潮滩土壤氧化还原电位降低幅度则小于高潮滩,进而影响到有机碳的运移和沉降^[51]。

5.5 地下水-地表水交换作用

除了径流、潮汐等地表水体对有机碳动态变化产生影响,地表水-地下水间碳交换也是滨海湿地碳循环中非常重要且又容易被忽视的过程。地下水-地表水交换过程包括间隙水交换和海底地下水排放。地下水和地表水可以通过对流与扩散作用及底栖动物洞穴发生密集的间隙水交换,从而影响水体中有机碳浓度。目前间隙水交换量化的研究方法主要有直接测量法、水文模型和同位素示踪等3种方法^[52]。根据镭同位素估算,崇明东滩盐沼湿地近岸水体中间隙水源DOC通量为 $(9.97 \pm 6.96) \times 10^5 \text{ mol} \cdot \text{d}^{-1}$,占总碳输入量的35.6%,是近岸水体DOC的主要来源^[25]。此外,海底地下水碳(DOC和DIC)排放通量随降雨改变会造成不同程度的流失,湿季大于干季,根据氡(²²²Rn)质量平衡模型估算DOC通量在湿季和干季分别为 (0.31 ± 0.30) 和 $(0.25 \pm 0.23) \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,DIC通量在湿季和干季分别为 (0.70 ± 0.82) 和 $(0.25 \pm 0.24) \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,碳通量超过当地河流的输入^[19]。由此可见,在地下水与地表水交换过程中间隙水排放和海底地下水排泄两种途径都会影响地表水体DOC和DIC浓度,并且通量随降雨和潮汐的变化而变化。这些变化可以影响盐沼等蓝碳生态系统的潜在碳汇能力和评估,应该被考虑到滨海湿地碳收支平衡中,但是同时也加大了湿地碳库评价的不确定性。

5.6 人类活动和全球气候变化

河口湿地通常位于经济发达地区,受到高坝和港口建设、滩涂围垦、污染物排放等人类活动的严重干扰。与此同时,在全球气候变化的背景下,海洋热浪、特大暴雨洪水、干旱极端水文条件和气候事件频发,对河口地区水环境造成影响。

河口地区碳埋藏和矿化速率受到当地和全球环境变化的影响。极端水文天气条件下,径流、降雨和风的异常变化会影响滨海湿地植物群落结构、生态系统功能以及碳循环过程。气候变暖通过土壤盐分增加,提升耐盐物种优势度,降低植物群落冠层,从而导致在极端事件发生时植被抵抗力与恢复力降低,减弱了总初级生产力、净生态系统CO₂交换、土壤甲烷排放等多个碳循环过程的碳通量^[53]。根据2021年 Intergovernmental Panel on Climate Change 第六次报告^[1],由于南极冰盖消融过程的深度不确定性,2100年全球平均海平面将会上升接近2.0 m。海平面上升条件下,风暴潮发生的频率和强度均会增加,导致滨海湿地将直接受到更为严重的洪水侵袭。尤其在夏秋季的风暴潮期间,大量的有机质

(5~6倍)从盐沼湿地中输出,输出的碳可能促进河口微生物代谢,推动二氧化碳排放到大气中^[24]。

人类活动极大地改变了河口地区的水沙运动和物质运输规律。与三峡大坝筑坝前期(1953—1985年)相比,长江口沉积物中陆地有机碳的埋藏量减少了约97.3%,泥沙和颗粒有机碳通量分别减少了72.7%和82.7%。随着大坝建设和海平面上升,三角洲侵蚀可能会进一步改变河口的有机碳循环过程和埋藏模式^[54]。大量污染物(Cu、Cr、Zn、Mn、As、Pb、Cd)通过物理吸附和化学螯合反应等形成金属-有机络合物而富集到长江口潮间带沉积物中。研究发现,TOC均与7种重金属呈显著正相关^[55],从而对有机碳空间分布产生重要影响。

6 结论与展望

本文从有机碳循环及其时空分布、垂向埋藏及其速率、横向输送及其通量、有机碳循环定量分析模型和影响因素5个方面综述了长江口有机碳循环特点和影响因素的相关研究。主要结论如下:

(1) 在土壤有机碳水平空间分布上,崇西湿地>崇明东滩>九段沙>南汇潮滩。且中/高潮滩>低潮滩。总体上表现为芦苇植被带、互花米草植被带有机碳含量高于海三棱藨草和光滩。时间尺度上,崇西湿地夏秋高于春冬,崇明东滩湿地和南汇潮滩春夏低于秋冬,这与植物的生长周期以及土壤有机碳累积、消耗平衡有关。

(2) 每年长江通过径流输入数百万吨陆源有机碳到长江口,导致河口湿地有机碳埋藏速率为 $760.19 \text{ t C} \cdot \text{km}^{-2}$,形成较高的碳汇能力。遥感卫星结合数值模拟的长时间序列监测方法可以更准确地评估有机碳运输通量变化,分析季节性差异特征。

(3) 长江口滨海湿地环境因子时空异质性强,以及水-土-植物等间相互作用和周期性潮汐水文过程,滨海湿地有机碳循环模型还需厘清土-植物-水多相碳循环规律,构建潮汐水文过程、植物季节动态变化等子模型并组合水文、生物地球化学和植被等关键模块使拟合拟合效果更优。

(4) 盐沼植物生物量与种类对湿地碳输入具有显著影响,冠层结构稠密的植物,如芦苇,能减缓水流并捕获更多的有机碳。DOC、POC和盐度、温度、叶绿素、浊度等水质指标密切相关。土壤盐度等理化性质以及外源氮输入对土壤有机碳稳定性产生不同影响。径流输入、海域水动力作用、地下水与地表水交互作用这些水动力因素会导致水平有机碳通量发生动态变化,其

中间隙水交换是一个不可忽视的溶解碳来源。大坝、污染物排放等人类活动和气候变暖、风暴潮等全球气候变化因素也会影响有机碳循环过程。

基于上述结论和存在问题,提出对未来工作的展望:

(1) 加强对崇明岛、九段沙等长江口滨海湿地土壤碳库和长江口有机碳输运通量进行大范围 and 长时间序列动态观测,同时结合流量、水位等水文数据和遥感卫星数据建立数据库,这对在未来极端气候条件下,及时准确了解河流和湿地有机碳物质的响应和建立有机碳预测模型具有重要意义。(2) 不断优化滨海湿地有机碳循环定量分析模型,开展长江口植被区和非植被区植物-土壤-水动力-水质-有机碳耦合机理相关工作,明确不同季节不同因子,如植物碳,对有机碳源汇转化产生的影响及其规律,建立有机碳循环过程表征公式,以期在已有的基础上得到精度更高的模拟结果。(3) 根据长江口湿地水体各类端元的碳、镭同位素特征,提高量化植物碳埋藏、径流输入、海域水动力作用、地下水-地表水交换作用对有机碳通量贡献的准确性,探索人类活动驱动下,滨海湿地重金属、有机碳等复合物质通量输运特征,有利于准确评估盐沼生态系统固碳能力。

作者贡献声明:

杨中元:构思框架,撰写、修改文稿。

娄 厦:构思框架,论文思路,文本修改、确定文稿。

陈仕哲:全文审阅。

Irina Fedorova Viktorovna:全文审阅。

Dorzhievna Radnaeva Larisa:全文审阅。

Elena Nikitina:全文审阅。

参考文献:

- [1] IPCC. Summary for policymakers[M]//Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York: Cambridge University Press, 2021:3-32.
- [2] 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.
- [3] YUAN Y Q, LI X Z, JIANG J Y, *et al.* Distribution of organic carbon storage in different salt-marsh plant communities: A case study at the Yangtze Estuary China[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2020, 243: 106900.
- [4] 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.
- [5] 张海燕.长江口典型潮滩湿地——西沙湿地的土壤有机碳分布格局及生态工程对其影响研究[D].上海:华东师范大学,2013.
ZHANG Haiyan. Yangtze estuary typical tidal wetlands—Chongxi wetland soil organic carbon distribution and research of ecological engineering influence [D]. Shanghai: East China Normal University, 2013.
- [6] 姜俊彦.崇明东滩土壤有机碳汇聚能力及影响因素分析[D].上海:华东师范大学,2015.
JIANG Junyan. Soil organic carbon sequestration and relationship with physicochemical factors in East Chongming Headland[D]. Shanghai: East China Normal University, 2015.
- [7] 陈怀璞.崇明东滩湿地土壤有机碳及总氮储量研究[D].上海:华东师范大学,2016.
CHEN Huaipu. Study on soil organic carbon and nitrogen storage in East Chongming wetland[D]. Shanghai: East China Normal University, 2016.
- [8] 席雪飞,贾建伟,王磊,等.长江口九段沙湿地土壤有机碳及微生物陆向分布[J].农业环境科学学报,2009,28(12):2574.
XI Xuefei, JIA Jianwei, WANG Lei, *et al.* Landward distribution of soil organic carbon and soil of Jiuduansha wetland of Yangtze River Estuary[J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, 28(12): 2574.
- [9] QIAN L W, YAN J F, Hu F, *et al.* Spatial distribution patterns of annual soil carbon accumulation and carbon storage in the Jiuduansha wetland of the Yangtze River estuary [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2019, 191(12): 750.
- [10] DONG H Y, QIAN L W, YAN J F, *et al.* Evaluation of the carbon accumulation capability and carbon storage of different types of wetlands in the Nanhui tidal flat of the Yangtze River estuary[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2020, 192(9): 585.
- [11] 李泽渊.长江口南汇边滩不同生境营养盐分布与影响因素[D].上海:华东师范大学,2022.
LI Zeyuan. The distribution of nutrients and the affecting factors in different habitats in Nanhui tidal flat of Yangtze River[D]. Shanghai: East China Normal University, 2022.
- [12] XIONG Y M, LIAO B W, WANG F M, *et al.* Mangrove vegetation enhances soil carbon storage primarily through in situ inputs rather than increasing allochthonous sediments[J]. Marine Pollution Bulletin, 2018, 131: 378.
- [13] 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(9): nwa296.
- [14] 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.
- [15] 段凌云,王张华,李茂田,等.长江口沉积物²¹⁰Pb分布及沉积环境解释[J].沉积学报,2005(3):514.
DUAN Lingyun, WANG Zhanghua, LI Maotian, *et al.* ²¹⁰Pb distribution of the Changjiang estuarine sediment and the implications to sedimentary environment[J]. *Acta Sedimentologica*

- Simica*, 2005(3): 514.
- [16] 吴旋蕾. 长江河口湿地沉积物中有机碳及微量元素的沉积埋藏特征[D]. 上海: 华东师范大学, 2015.
WU Zhanlei. Sedimentary and buried characteristics of organic carbon and trace elements in the sediments at Yangtze Estuarine Wetland[D]. Shanghai: East China Normal University, 2015.
- [17] 刘东. 基于遥感与实测资料的河流有机碳通量估算研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
LIU Dong. Estimation of riverine organic carbon flux based on remote sensing and in-situ data [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [18] AUFDENKAMPE A K, MAYORGA E, RAYMOND P A, *et al.* Riverine coupling of biogeochemical cycles between land, oceans, and atmosphere [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2011, 9(1): 53.
- [19] CHEN X G, ZHANG F F, LAO Y L, *et al.* Submarine groundwater discharge-derived carbon fluxes in mangroves: An important component of blue carbon budgets? [J]. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 2018, 123(9): 6962.
- [20] MANNINO A, SIGNORINI S R, NOVAK M G, *et al.* Dissolved organic carbon fluxes in the Middle Atlantic Bight: An integrated approach based on satellite data and ocean model products[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2016, 121(2): 312.
- [21] WANG X C, MA H Q, LI R H, *et al.* Seasonal fluxes and source variation of organic carbon transported by two major Chinese Rivers: The Yellow River and Changjiang (Yangtze) River[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2012, 26: GB2025.
- [22] DUAN S W, LIANG T, ZHANG S, *et al.* Seasonal changes in nitrogen and phosphorus transport in the lower Changjiang River before the construction of the Three Gorges Dam[J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2008, 79(2): 239.
- [23] 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.
- [24] YUAN Y Q, LI X Z, XIE Z L, *et al.* Annual lateral organic carbon exchange between salt marsh and adjacent water: A case study of east headland marshes at the Yangtze Estuary [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2022, 8: 809618.
- [25] LIU J N, YU X Q, CHEN X G, *et al.* Utility of radium quartet for evaluating porewater-derived carbon to a saltmarsh nearshore water: Implications for blue carbon export[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 764: 144238.
- [26] YAO H M, MONTAGNA P A, WETZ 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.
- [27] 崔倩芳. 遥感与数模结合的东海有机碳侧向输运通量研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2019.
CUI Qianfang. Study of lateral organic carbon transport in the East China Sea based on remote sensing and numerical simulation[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2019.
- [28] 顿佳耀, 王初, 姚东京, 等. 崇明东滩盐沼表层沉积物有机碳空间分布特征及其来源示踪研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(1): 157.
DUN Jiayao, WANG Chu, YAO Dongjing, *et al.* Spatial distribution characteristics and source tracing of organic carbon in surface sediments of salt marsh in Dongtan of Chongming [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(1): 157.
- [29] 吴丹丹, 葛晨东, 高抒, 等. 长江口沉积物碳氮元素地球化学特征及有机质来源分析[J]. *地球化学*, 2012, 41(3): 207.
WU Dandan, GE Chendong, GAO Shu, *et al.* Carbon, nitrogen geochemical character and source analyses in Changjiang estuarine sediments[J]. *Geochimica*, 2012, 41(3): 207.
- [30] 陈雅文, 韩广轩, 蔡延江. 氮输入影响滨海湿地碳循环过程的模拟研究: 进展与展望[J]. *浙江农林大学学报*, 2021, 38(5): 883.
CHEN Yawen, HAN Guangxuan, CAI Yanjiang. Simulation research on the effects of nitrogen input on carbon cycle process in a coastal wetland: Review and prospects[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2021, 38(5): 883.
- [31] HUANG Y Y, JIANG J, MA S, *et al.* Soil thermal dynamics, snow cover, and frozen depth under five temperature treatments in an ombrotrophic bog: Constrained forecast with data assimilation [J]. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*, 2017, 122(8): 2046.
- [32] 原一荃, 薛力铭, 李秀珍. 基于CASA模型的长江口崇明东滩湿地植被净初级生产力与固碳潜力[J]. *生态学杂志*, 2022, 41(2): 334.
YUAN Yiqian, XUE Liming, LI Xiuzhen. Net primary productivity and carbon sequestration potential of salt marsh vegetation in Chongming Dong-tan of the Yangtze River Estuary based on CASA model [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2022, 41(2): 334.
- [33] 吴旋蕾, 王东启, 李杨杰, 等. 长江口崇明东滩海三棱藨草对沉积物有机碳库的贡献研究[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(11): 3639.
WU Zhanlei, WANG Dongqi, LI Yangjie, *et al.* The contribution of *Scirpus mariqueter* to sediment carbon storage of Chongming east tidal flat wetland in Yangtze River Estuary [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(11): 3639.
- [34] 严格, 葛振鸣, 张利权. 崇明东滩湿地不同盐沼植物群落土壤碳储量分布[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(1): 85.
YAN Ge, GE Zhenming, ZHANG Liqian. Distribution of soil carbon storage in different saltmarsh plant communities in Chongming Dongtan wetland [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(1): 85.
- [35] 李钰. 植物枯落物对长江口潮间带湿地二氧化碳和甲烷产生的贡献和影响[D]. 上海: 华东师范大学, 2020.
LI Yu. Contribution and effect of plant litter on carbon dioxide and methane production in intertidal wetland of Yangtze estuary [D]. Shanghai: East China Normal University, 2020.
- [36] 费蓓莉, 解丽娜, 李诗华, 等. 长江口滨海湿地植物群落潮沟水体有机碳动态及其影响因素[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2019(1): 156.

- FEI Beili, XIE Lina, LI Shihua, *et al.* Variations in organic carbon and its impact on tidal creeks within vegetation communities in the coastal wetlands of the Yangtze Estuary[J]. *Journal of East China Normal University(Natural Science)*, 2019(1): 156.
- [37] COLEMAN D J, KIRWAN M L. The effect of a small vegetation dieback event on salt marsh sediment transport[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2018, 44(4): 944.
- [38] 布乃顺, 杨骁, 黎光辉, 等. 互花米草入侵对长江口湿地土壤碳动态的影响[J]. *中国环境科学*, 2018, 38(7): 2671.
- BU Naishun, YANG Xiao, LI Guanghui, *et al.* Effects of *Spartina alterniflora* invasion on soil carbon dynamics in wetlands of the Yangtze River estuary[J]. *China Environmental Science*, 2018, 38(7): 2671.
- [39] 龙孟苓. 入侵植物互花米草对九段沙湿地有机碳库的影响研究[D]. 上海: 上海大学, 2017.
- LONG Mengling. The impact of invasive smooth cordgrass (*Spartina alterniflora* Loisel.) on organic carbon stock in Jiuduansha wetland[D]. Shanghai: Shanghai University, 2017.
- [40] 邢建伟, 线薇薇, 绳秀珍. 2012年长江口水域溶解有机碳分布特征及其与环境因子的关系[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2014, 44(8): 74.
- XING Jianwei, XIAN Weiwei, SHENG Xiuzhen. Distribution characteristics of dissolved organic carbon and influence factors in the Yangtze River Estuary during 2012[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2014, 44(8): 74.
- [41] 张立娟. 长江口及其邻近水域碳、氮、磷的时空分布[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
- ZHANG Lijuan. Temporal and spatial distributions of carbon, nitrogen and phosphorus in the Changjiang Estuary and adjacent sea [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009.
- [42] 薛莲. 盐度和淹水对长江口盐沼植被土壤有机碳累积的影响[D]. 上海: 华东师范大学, 2017.
- XUE Lian. Effects of salinity and flooding on organic carbon accumulation of plant-soil system in the salt marsh of the Yangtze River Estuary[D]. Shanghai: East China Normal University, 2017.
- [43] 朱文凤. 盐水入侵对河口潮汐沼泽湿地有机碳矿化速率和途径的影响[D]. 福州: 福建师范大学, 2019.
- ZHU Wenfeng. Effects of saltwater incursion on rates and pathways of organic carbon mineralization in tidal marsh wetlands of Min River Estuary, East China Sea[D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2019.
- [44] HU Y, WANG L, FU X H, *et al.* Salinity and nutrient contents of tidal water affects soil respiration and carbon sequestration of high and low tidal flats of Jiuduansha wetlands in different ways[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 565: 637.
- [45] 薛莲, 李秀珍, 闫中正, 等. 盐度和淹水对长江口潮滩盐沼植物碳储量的影响[J]. *生态学报*, 2018, 38(9): 2995.
- XUE Lian, LI Xiuzhen, YAN Zhongzheng, *et al.* Effects of salinity and inundation on carbon storage of halophytes in the tidal salt marsh of the Yangtze River Estuary, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(9): 2995.
- [46] 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.
- [47] 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.
- [48] 李艳丽, 肖春玲, 王磊, 等. 上海崇明东滩两种典型湿地土壤有机碳汇聚能力差异及成因[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(6): 1310.
- LI Yanli, XIAO Chunling, WANG Lei, *et al.* Difference and its formation cause in soil organic carbon accumulation capability of two typical tidal wetlands at Dongtan of Chongming Island in Shanghai[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(6): 1310.
- [49] 韩广轩, 李隽永, 屈文笛. 氮输入对滨海盐沼湿地碳循环关键过程的影响及机制[J]. *植物生态学报*, 2021, 45(4): 321.
- HAN Guangxuan, LI Juanyong, QU Wendi. Effects of nitrogen input on carbon cycle and carbon budget in a coastal salt marsh[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2021, 45(4): 321.
- [50] 邢建伟. 长江口有机碳的时空分布、变化及输运特征研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- XING Jianwei. The spatial-temporal distribution and transportation characters of dissolved and particulate organic carbon in the Yangtze River Estuary[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.
- [51] 布乃顺, 王坤, 侯玉乐, 等. 半月周期的潮汐对滨海湿地土壤理化性质的影响[J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(11): 1898.
- BU Naishun, WANG Kun, HOU Yule, *et al.* Effects of semi-lunar tidal cycling on soil physical and chemical properties in coastal wetlands[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(11): 1898.
- [52] 陈小刚, 李凌, 杜金洲. 红树林和盐沼湿地间隙水交换过程及其碳汇潜力[J]. *地球科学进展*, 2022, 37(9): 881.
- CHEN Xiaogang, LI Ling, DU Jinzhou. Porewater exchange and the related carbon sink potential in mangroves and saltmarshes[J]. *Advances in Earth Sciences*, 2022, 37(9): 881.
- [53] SUN B Y, JIANG M, HAN G X, *et al.* Experimental warming reduces ecosystem resistance and resilience to severe flooding in a wetland[J]. *Science Advances*, 2022, 8(4): eabl9526.
- [54] ZHAO B, YAO P, LI D, *et al.* Effects of river damming and delta erosion on organic carbon burial in the Changjiang Estuary and adjacent East China Sea inner shelf[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 793: 148610.
- [55] 张诺, 刘其根, 陈丽平, 等. 长江口盐沼湿地沉积物重金属空间分布特征及其潜在生态风险评价[J]. *大连海洋大学学报*, 2021, 36(1): 135.
- ZHANG Nuo, LIU Qigen, CHEN Liping, *et al.* Spatial distribution and ecological risk assessment of sediment heavy metals from salt marsh of Yangtze River estuary[J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2021, 36(1): 135.