DOI: 10.20103/j.stxb.202407151645

韩村,张亚茹,胡聪月,李雪,王晓杰,赵明亮,韩广轩,宋维民.河道变迁对黄河三角洲不同湿地土壤有机碳来源的影响.生态学报,2025,45(10): 4818-4827.

Han C, Zhang Y R, Hu C Y, Li X, Wang X J, Zhao M L, Han G X, Song W M.Effects of river channel changes on the source of soil organic carbon in different wetlands in the Yellow River Delta. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(10);4818-4827.

河道变迁对黄河三角洲不同湿地土壤有机碳来源的 影响

韩 村^{1,2,3},张亚茹^{1,3,4},胡聪月^{1,3,4},李 雪^{1,3},王晓杰^{1,3},赵明亮^{1,3},韩广轩^{1,2,3}, 宋维民^{1,2,3,*}

1 中国科学院烟台海岸带研究所海岸带环境过程与生态修复重点实验室,烟台 264003

2 中国科学院大学,北京 100049

3 中国科学院黄河三角洲滨海湿地生态实验站,东营 257500

4 聊城大学地理与环境学院,聊城 252000

摘要:黄河三角洲河口湿地具有较强的碳汇能力,黄河频繁的河道变迁改变了水文条件和植被特征,这可能会对河口湿地土壤 有机碳的来源产生重要影响,但当前缺乏研究和认知。选取黄河 1996 年故道及现行河道作为研究对象,通过采集盐地碱蓬和 无植被光滩湿地土壤样品并利用稳定同位素技术,分析了废弃河道和现行河道不同河口湿地土壤的碳分布特征及其溯源特征。 结果表明,(1)两湿地土壤 C/N 比的变化范围为 26—54,其中废弃河道湿地土壤 C/N 比要显著高于现行河道土壤(P<0.05),而 不同土层间 C/N 比也存在显著差异(P<0.05);土壤有机碳 δ¹³C 值变化范围为-25.30% 至-22.03%,两河道无植被光滩土壤 δ¹³C值显著高于盐地碱蓬(P<0.05),同时土壤 δ¹³C 值整体呈现随土层深度增加逐渐降低的趋势。(2)贝叶斯混合模型计算结 果表明,黄河三角洲湿地土壤有机碳整体上主要来源于当地植物(40%—67%),其次是海洋浮游植物(23%—40%),而陆源颗 粒有机质(POM)相对贡献较小。(3)方差分析表明黄河三角洲河口湿地土壤有机碳来源受到河道变迁和植被类型变化的影 响;盐地碱蓬湿地土壤有机碳的当地植物贡献显著大于无植被光滩(P<0.05),海洋浮游植物贡献在两河道和两植被类型之间 均存在显著差异(P<0.05),而陆源 POM 贡献受到河道和植被类型的交互作用影响(P<0.05)。研究揭示了黄河三角洲河口湿 地土壤有机碳来源的整体特征以及驱动因素,这不仅增强了对该区域河口湿地土壤碳循环的理解,也为河口湿地碳汇管理提供 了重要的科学依据。

关键词:黄河三角洲;河道变迁;河口湿地;碳溯源;碳同位素

Effects of river channel changes on the source of soil organic carbon in different wetlands in the Yellow River Delta

HAN Cun^{1,2,3}, ZHANG Yaru^{1,3,4}, HU Congyue^{1,3,4}, LI Xue^{1,3}, WANG Xiaojie^{1,3}, ZHAO Mingliang^{1,3}, HAN Guangxuan^{1,2,3}, SONG Weimin^{1,2,3,*}

1 Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Restoration, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Yellow River Delta Research Station of Coastal Wetland Ecology, Chinese Academy of Sciences, Dongying 257500, China

4 School of Geography and the Environment, Liaocheng University, Liaocheng 252000, China

基金项目:国家重点研发计划(2022YFC3105402);国家自然科学基金委员会-山东联合基金项目(U1906220);国家自然科学基金(41706097) 收稿日期:2024-07-15; 网络出版日期:2025-03-25

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: wmsong@yic.ac.cn

Abstract: The estuarial wetlands of the Yellow River Delta possess significant carbon (C) sink capacity, influenced by frequent channel shifts of the Yellow River. These changes have altered the hydrological conditions and vegetation characteristics of estuarial wetlands in different rive channels, potentially impacting the source of soil organic carbon (SOC) in these wetlands. However, research examining the impact of river channel alterations on SOC sources in the Yellow River Delta remains scarce. This study aimed to investigate the distribution and traceability characteristics of SOC in a Suaeda salsa wetland and a mudflat in both the abandoned channel in 1996 and the current channel in the Yellow River Delta. The results indicated that (1) The soil C/N ratio in the two wetlands varied from 26 to 54, significantly higher in the abandoned channel wetland than in the active river channel (P < 0.05). Additionally, the soil C/N ratio varied significantly along the soil depth (P < 0.05). The natural ¹³C abundance (δ^{13} C) of SOC ranged from -25.30% to -22.03%, with the δ^{13} C values in the Mudflat of the two river channels being significantly higher than of S. salsa (P < 0.05). However, the δ^{13} C values showed a gradual decrease trend with the increase of soil depth. (2) Calculations from the Bayesian mixed model showed that overall, SOC in the wetlands of the Yellow River Delta originated mainly from local plants (40%-67%), followed by marine phytoplankton (23%-40%), while the relative contribution of terrestrial particulate organic matter (POM) was the smallest. (3) Statistical analysis showed that the sources of SOC in the wetlands of the Yellow River Delta were affected by both channel and plant type. Specifically, the contribution of local plants to SOC in the S. salsa was greater than that in the Mudflat (P < 0.05), the contribution of marine phytoplankton differed significantly between the two river channels and between the two plant types (P < 0.05), while the contribution of terrestrial POM was affected by the interaction between river channels and plant types (P < 0.05). This study revealed the traceability characteristics and driving factors of SOC in the estuarial wetlands in the Yellow River Delta, enhancing our comprehension of the soil carbon cycle in these wetlands and offering vital scientific insights for the management of blue carbon sinks.

Key Words: the Yellow River Delta; river channel change; estuarial wetland; carbon traceability; carbon isotope

河口三角洲湿地连通着河流流域和海域,是海洋生态系统与陆地生态系统间的过渡区域,在全球气候变 化和蓝色碳汇等方面发挥着重要作用^[1-2]。尽管河口三角洲湿地面积仅占全球湿地总面积的 3.4%,但其碳 储量占海洋沉积物碳储量的 46.9%^[3-4]。同时,河口三角洲湿地沉积埋藏速率高,具有很高的碳埋藏能力^[5]。 但由于受河流、海洋和地表径流的强烈相互作用影响,在发挥蓝色碳汇功能的同时,河口三角洲湿地也具有因 植物多样性低,群落结构相对简单带来的敏感度高和因日渐频繁的人类活动带来的脆弱性高的特点^[6-7]。因 此,在全球气候变化的背景下,理解海陆交互作用影响下的河口三角洲湿地碳存储和埋藏特征对于开展湿地 碳汇管理具有重要意义。

由于水文动力、沉积地貌和植被类型等的差异,河口三角洲湿地生态系统在碳存储和埋藏速率等方面常 呈现时空异质性^[8-9]。沉积物是河口三角洲湿地生态系统碳库的主要载体,其碳储量在盐沼中的占比可高达 98%^[10]。有机碳是河口湿地沉积物中碳的主要存在形式,其含量水平可以反映湿地的储碳能力^[11]。而河口 三角洲湿地土壤有机碳来源存在多样性,不同来源的有机碳具有不同的碳存储潜力,其分布在空间尺度上差 异也很大^[12-13]。鉴别土壤有机碳来源对阐释河口三角洲湿地的生物地球化学过程至关重要,同时不同来源 的有机碳的变化对河口和近海生态系统的总体碳收支产生重要影响^[14]。许多研究表明,河口三角洲土壤有 机碳的来源主要包括陆源、海源以及当地植物源等^[15],不同有机碳来源具有不同的端元特征^[16-17]。因此,碳 氮比值(C/N 比)和稳定同位素技术(如δ¹³C、δ¹⁵N)被广泛用于土壤有机碳来源解析^[18-19]。此外,当前已有 多种同位素混合模型可用于定量计算有机碳来源的相对贡献^[20]。例如,结合贝叶斯方法及同位素混合模型 分析方法不仅增加了端元范围的限定,而且还可减少同位素分馏带来的误差,当前被广泛运用^[21]。

黄河三角洲是我国三大河口三角洲之一,也是世界大河中海陆变迁最活跃的三角洲湿地之一^[22]。自 1885年改道汇入渤海,黄河共发生10余次大的河道变迁^[23-24]。废弃河道和现行河道由于受河流泥沙淤积 和潮汐水文作用影响差异,进而塑造出了不同的湿地生态系统^[25]。不同植被群落的植被生产力和物质拦截 能力的差异会改变土壤有机碳的输入和来源特征。目前,已进行一些对黄河三角洲附近海域及表层湿地土壤 有机碳溯源方面的研究^[26-28],但针对河道变迁下不同植被类型下的黄河河口三角洲湿地土壤碳来源特征罕 有研究。因此,本研究以选取黄河三角洲现行河道和废弃河道下的河口湿地为研究对象,利用稳定碳氮同位 素技术及碳氮元素比值对不同湿地及不同深度土壤有机碳来源进行分析,揭示并探讨河道变迁和植被类型差 异对黄河三角洲河口湿地土壤有机碳的来源特征影响,为准确评估河口三角洲湿地土壤有机碳动态变化以及 充分发挥其蓝碳固碳功能提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况与样品采集

黄河三角洲(37°35′—38°12′N,118°33′—119°21′E) 地处山东省东营市,北靠渤海湾,东邻莱州湾,是因黄河 泥砂冲积、填海造陆形成的复合型三角洲。该区域属于 暖温带大陆性季风气候,年均降水量为560 mm,年均气 温为12.9℃,四季温差明显^[29]。优势种植被有盐地碱 蓬(Suaeda salsa)、柽柳(Tamarix chinensis)和芦苇 (Phragmites australis)等^[30]。

研究区域位于黄河三角洲东部(图1),1976年黄 河在罗家屋子被人工截流而改道清水沟入海^[22],1996 年黄河被人工改道至清8汊入海并行水至今。现行河 道巨量泥沙的输入使近岸浅水区淤积出新的三角洲舌 状体,清水沟废弃河道和清8汊现行河道间的距离不断 增大,同时两河道间水文特征差异不断增大。

鉴于光滩和盐沼均为黄河三角洲河口湿地中重要的生态系统^[8],2022年10月,分别在清水沟废弃河道和清8汊现行河道所在的河口三角洲湿地,选择盐地碱



图 1 黄河三角洲地理位置和河口湿地采样点分布示意 Fig.1 Geographical location and the sampling sites in the estuarial wetlands of the Yellow River Delta

蓬和无植被光滩生态系统作为试验对象。在每个生态系统,随机设置 4 个 10 m×10 m 样方,每个样方间隔 50m 以上。在每个样方内采用"Z"字法随机设置 5 个小样方,小样方大小为1 m×1 m,使用半圆凿钻式土钻采 集土壤样品,在每个样方内,将 5 个小样方土壤按不同土层混合为一个样品。根据湿地土壤样品碳组分及好 氧土层和厌氧土层的差异,选取其中 3 层(0—10 cm、20—40 cm 和 80—100 cm)土壤样品进行溯源分析。其中, 0—10 cm 表层土壤易受环境因素影响;20—40 cm 中层土壤不仅处于好氧土层(0—40 cm)和厌氧土层(40—100 cm)过渡区域,而且处于有无盐地碱蓬根系影响的过渡区域;80—100 cm 底层土壤性质较为稳定,作为稳定层代 表土层。此外,为了进行溯源分析,本研究采集了该区域内芦苇,柽柳和盐地碱蓬植被样品。土壤样品和植被样 品采集后立即装入自封袋并排尽空气放入便携式保温箱,并快速转移至实验室进行相关指标测定。

1.2 样品室内分析与数据处理

土壤和植物样品经自然风干后过 100 目筛研磨后,利用元素分析仪(vario MACRO cube Elementar Analysensysteme GmbH,德国)进行总碳和总氮含量的测定。土壤有机碳(SOC)及植物样品的δ¹³C 丰度用 MAT253 同位素质谱仪(Thermo Fisher MAT253,美国)测定,公式如1所示:

$$\delta^{13} \mathcal{C}(\%) = \left[\frac{R_{\text{sample}}}{R_{\text{standard}}} - 1\right] \times 1000 \tag{1}$$

式中, R_{sample}和 R_{standard}分别是样品和标准品的重轻同位素比(¹³C/¹²C)。PeeDee Belemnite(PDB)用作碳的参考标准。

本研究通过开源 R 软件 MixSIAR^[31]的贝叶斯混合模型评进行 SOC 的溯源特征分析,并选取陆源颗粒有 机物(POM)、当地植物和海洋浮游植物作为模型中的潜在端元。MixSIAR 提供了观测到的源比例的不确定 性,该不确定性是基于先验分布获得的。可以表示为公式(2)和(3)。

$$X_{ij} = \sum_{k=1}^{K} p_k (S_{jk} + C_{jk}) + \varepsilon_{ij}$$
(2)

$$S_{jk}N(\boldsymbol{\mu}_{jk},\boldsymbol{\omega}_{jk}^2), C_{jk}N(\boldsymbol{\lambda}_{jk},\boldsymbol{\tau}_{jk}^2), \boldsymbol{\varepsilon}_{jk}N(\boldsymbol{0},\boldsymbol{\sigma}_{jk}^2)$$
(3)

式中, X_{ij} 为混合物的*i*同位素值*j*,(*i*=1,2,3,…,*N*;*j*=1,2,3,…,*J*); S_{μ} 为源*K*中同位素*j*(*k*=1,2,3,…,*K*),正 态分布,均值 μ_{kj} ,标准差 ω_{jk}^{2} ; p_{k} 为源*k*占比,由模型估算 C_{jk} 为源*k*中*j*同位素的分馏因子,均值 λ_{jk} ,标准差 τ_{jk}^{2} 正态分布; ε_{k} 为残余误差,表示各组分间的附加未量化变异,其均值为*O*,标准差为 σ_{k}^{2} ^[32]。

三个端元的 C/N 比和 δ^{13} C 是根据所采集的现场样品的测定(当地植物)并结合文献资料综合得出的^[33]。各端元使用的 C/N 比和 δ^{13} C 值均为平均值±标准差。海洋浮游植物 C/N 取值为 6.7±0.7, δ^{13} C 取值 为(-19.8±1.0)‰;陆源颗粒有机物 C/N 取值为 12.6±2.7, δ^{13} C 取值为(-23.7±1.3)‰;当地植物 C/N 取值为 44.6±22.0, δ^{13} C 取值为(-28.3±1.2)‰。

采用多因素方差分析(Multifactor ANOVA)分析河道、植被类型、土层以及三者潜在的交互作用对土壤 C/N 比和 δ¹³C 的影响。采用单因素(One-way ANOVA)方差分析来检验不同湿地生态系统土壤有机碳来源之间的差异水平(α=0.05)。采用双因素方差分析(Two-way ANOVA)分析河道、植被类型以及两者潜在的交互作用对土壤有机碳来源的影响。图表中数据为平均值±标准差。数据统计分析使用 SPSS 27 软件完成,图件使用 Origin 21 软件进行绘制。

2 结果

2.1 土壤碳氮比及碳同位素分布特征

总体来看,废弃河道和现行河道内两种河口湿地土壤的碳氮比值(C/N比)介于 26.36—54.00 之间,平均 值为 39.31(图 2)。C/N比的最大值和最小值分别出现在废弃河道盐地碱蓬 80—100 cm 和现行河道盐地碱 蓬 20—40 cm 层土壤。废弃河道和现行河道两种河口湿地土壤有机碳 δ¹³C 值变化范围为-25.30‰ 至 -22.03‰,平均值为-23.49‰(图 2)。δ¹³C 值最大值和最小值分别出现在现行河道无植被光滩 0—10 cm 和 废弃河道盐地碱蓬 20—40 cm 层土壤。



图 2 黄河三角洲不同河口湿地土壤有机碳碳氮比及同位素分布特征

Fig.2 Characteristics of soil organic carbon C/N and isotope distribution in the estuarial wetlands in the Yellow River Delta MF: 无植被光滩 Mudflats; Ss: 盐地碱蓬 Suaeda salsa; 图中数据为平均值±标准差(n=4)

http://www.ecologica.cn

方差分析表明河道和土层对湿地土壤 C/N 比存在显著影响(表1)。整体上,废弃河道土壤 C/N 比显著 高于现行河道,同时废弃河道和现行河道土壤 C/N 比随土层深度的增加呈现为先降低后升高的变化趋势 (P<0.01)。方差分析表明植被和土层对湿地土壤 δ¹³C 值存在显著影响(表1)。废弃河道和现行河道盐地碱 蓬湿地土壤 δ¹³C 值整体上显著低于无植被光滩;同时随着土壤深度的增加,两种湿地土壤 δ¹³C 值均呈现出逐 渐变负的趋势(P<0.01)。

表 1 多因素方差分析检验的 *F* 值显示了河道、植被类型和土层对 C/N 及 δ¹³C 的影响 Table 1 *F*-values of multifactorial ANOVA tests showing the effects of river channels, plant types and soil layers on C/N and δ¹³C

	碳氮比 C/N	碳同位素 δ ¹³ C		碳氮比 C/N	碳同位素 δ ¹³ C
河道 Channel	9.778 **	3.821	河道×土层 Channel×soil depth	1.582	0.601
植被类型 Plant type	0.526	15.923 **	植被类型×土层 Plant type×soil depth	1.017	1.112
土层 Soil depth	5.089 *	5.267 *	河道×植被×土层	1.24	0.279
河道×植被类型 Channel×plant type	0.967	1.471	Channel×plant type×soil depth		

数值为 F 值, * 和 ** 分别表示差异显著(P<0.05) 和极显著(P<0.01)

2.2 黄河三角洲河口湿地土壤有机碳来源解析

如图 3 所示,相较于废弃河道湿地土壤,现行河道湿地土壤有着相对较低的 C/N 比值及偏正的 δ¹³C 值, 来源也更倾向于陆源 POM 和海洋浮游植物。此外,同一 C/N 比值水平下,盐地碱蓬的 δ¹³C 值相较于无植被 光滩偏负,来源更倾向于当地植物。而不同土层间土壤有机碳 C/N 比值和 δ¹³C 值分布无明显差异,来源无明 显倾向。

通过 MixSIAR 模型计算出陆源 POM、海洋浮游植物和当地植物三个端元对湿地土壤有机碳的贡献 (图 3)。结果表明,整体上,黄河三角洲不同湿地土壤有机碳的来源主要以当地植物为主,海洋浮游植物次 之,陆源 POM 贡献最小。其中,当地植物贡献率最大值出现在废弃河道盐地碱蓬 80—100 cm 土层,为 67%; 最小值出现在废弃河道无植被光滩 20—40 cm,仅为 40%。海洋浮游植物贡献率最大值出现在废弃河道无植 被光滩 20—40 cm,为 40%;;而最小值出现在废弃河道盐地碱蓬 80—100 cm 土层,仅为 23%。陆源 POM 贡 献率最大值出现在废弃河道无植被光滩 20—40 cm,为 20%;最小值出现在废弃河道盐地碱蓬 80—100 cm 土 层,仅为 10%。总体上,当地植物贡献比例呈现随土层深度的增加而逐渐增加的趋势,海洋浮游植物贡献比 例呈现逐渐减少的趋势。

为了更好的理解土壤有机碳来源的影响特征,本研究以不同土层深度作为重复测量对不同河道和不同植 被类型下土壤有机碳来源进行双因素方差分析(表2)。结果表明,河道和植被类型对当地植物贡献率不存在 交互作用影响,废弃河道盐地碱蓬湿地当地植物贡献要显著高于无植被光滩(P<0.05,表3)。河道和植被类 型均对海洋浮游植物贡献率产生显著影响。整体上,现行河道有着更高的海洋浮游植物贡献率,同时无植被 光滩土壤有机碳的海洋浮游植物贡献率显著高于盐地碱蓬湿地。然而,不同处理之间比较表明仅废弃河道盐 地碱蓬中海洋浮游植物贡献与其他湿地土壤存在显著差异(P<0.05,表3)。河道和植被类型对陆源 POM 贡 献率存在显著交互作用。在废弃河道盐地碱蓬湿地中陆源 POM 贡献率显著低于无植被光滩(P<0.05),而在 现行河道中陆源 POM 贡献率在两个植被类型中没有显著差异(表3)。

Table 2 F-values of multifactorial ANOVA tests showing the effects of river channels and wetland types on SOC source					
端元	当地植物	海洋浮游植物	陆源 POM		
Source	Local plant	Marine phytoplankton	Terrestrial source POM		
河道 Channel	4.976	5.512*	3.465		
植被类型 Plant type	12.842 **	10.218 **	17.866 **		
交互 Interaction	4.814	1.897	15.34 **		

表 2 多因素方差分析检验的 F 值显示了河道、植被类型对土壤有机碳来源的影响

数值为 F值,*和**分别表示差异显著(P<0.05)和极显著(P<0.01);POM:颗粒有机碳 Particulate organic matter



图 3 黄河三角洲不同河口湿地土壤 C/N 比和 δ^{13} C 值关系图及不同土壤有机碳来源的贡献率

Fig.3 A plot of the relationship between soil C/N ratio and δ^{13} C values and the contribution characteristics of different SOC sources in the estuarial wetlands in the Yellow River Delta

POM: 颗粒有机碳 Particulate organic matter

売 3	不同来源对河口湿地土壤有机碳的贡献率
12 3	个内不际对内口应地上接自己吸的贝勒平

Table 3 Contribution characteristics of different SOC sources in the estuarial w	vetlands
--	----------

河道 Channel	枯祐米刑		贡献率 Contribution rate/%	
	Plant type	当地植物 Local plant	海洋浮游植物 Marine phytoplankton	陆源 POM Terrestrial source POM
废弃河道	MF	46±5.8 Ab	35±4.2 Ba	19±1.5 Ca
Abandoned channel	Ss	62±3.9 Aa	26±2.5 Bb	12±1.4 Cb
现行河道	MF	46±1.1 Ab	37±1.3 Ba	17±0.2 Ca
Current channel	Ss	50±3.1 Ab	34±2.0 Ba	16±1.2 Ca

MF:无植被光滩 Mudflat;Ss:盐地碱蓬 Suaeda salsa;不同的大写字母表示同一河道同一植被类型下不同来源贡献之间的差异性(P<0.05);不同的小写字母表示相同来源贡献之间的差异性(P<0.05);表中数据为平均值±标准差(n=3)

3 讨论

3.1 黄河三角洲河口湿地土壤有机碳来源特征

通过对土壤 C/N 比和 δ¹³C 值等进行分析,本研究分析了黄河河口三角洲不同河道和不同植被类型下土 壤有机碳的来源特征,并发现黄河三角洲河口湿地土壤有机碳来源以当地植物源的输入为主,海洋浮游植物 次之。先前的研究表明,C/N 比值在一定程度上可以反映沉积物中有机碳的来源,含有丰富蛋白质物质的海 洋有机碳的 C/N 比值通常小于 8,而富含无氮生物大分子,包括陆源 POM 来源和当地植物来源在内的陆地有 机碳的 C/N 比则大于 14^[34–35]。黄河三角洲河口湿地土壤碳氮比介于 26 —54,表现出十分明显的陆地有机 碳的特征。此外,相较于富含丰富蛋白质的海洋浮游植物来源的有机碳,芦苇、盐地碱蓬和柽柳作为黄河三角 洲典型的当地植被,其均具有较高的木质素等酚类物质^[16,36]。而由于当地植物源的有机碳木质素含量较高, 相较于海洋浮游植物源的有机碳更难被微生物降解,因此更易于在土壤中保存^[37],这也可能促进了当地植物 对湿地土壤有机碳的巨大贡献。

黄河三角洲河口湿地土壤有机碳来源表现出较高比例的海洋浮游植物特征。一般认为,底栖微藻是滨海 河口湿地的主要初级生产者,往往具有较高的生物量及初级生产力,因此常成为湿地土壤中有机碳的重要贡 献者^[11, 38-39]。例如,刘雨薇等^[11]在茅埏岛的研究中发现,由于底栖微藻的影响,海源有机碳成为无植被潮滩 土壤有机碳的主要来源,贡献率达到 50%。但已有研究表明黄河三角洲湿地底栖微藻含量相对较低^[38,40],同 时本研究发现黄河三角洲海洋浮游植物来源的贡献要低于当地植物源的贡献。已有研究发现由于陆源 POM 来源和本地植物来源的陆地有机碳在传输过程中可能受到颗粒物沉降速率的影响,以及海洋浮游植物有机碳 的持续供应的影响,陆地有机碳可能会发生明显损失或稀释^[41-42]。因此,本文推测这可能是土壤有机碳来源 表现出较高比例的海洋浮游植物源的贡献的原因,但当前本研究没有证据去证明此结论,故下一步本研究认 为应加强此方面的研究。

黄河是著名的高含沙量河流,且黄河三角洲的碳沉积埋藏和捕获速率很高^[43-44],因此本研究曾推测黄河 三角洲河口湿地土壤有机碳来源中陆源 POM 的贡献较高。但分析表明黄河三角洲盐地碱蓬和无植被光滩湿 地的陆源 POM 相对贡献较低。然而,Ding 等^[33]的研究发现陆源 POM 是黄河三角洲芦苇湿地土壤有机碳的 主要来源,平均贡献达到 45%,这个贡献率显著高于本研究结果。在黄河三角洲,与生产力高和生长密度高 的芦苇相比,盐地碱蓬的生产力和生长密度较低,可能难以对河流带来的陆源 POM 形成有效的拦截^[45-46];同 时,在黄河三角洲河口湿地,芦苇通常生长在中高潮滩,而盐地碱蓬和无植被光滩地处低潮滩,频繁和强的潮 汐水文扰动降低了陆源 POM 的沉积和封存,进而可能降低了陆源 POM 的贡献。

此外,随土层深度的增加,黄河三角洲河口湿地废弃河道土壤有机碳来源中当地植物贡献比例呈现较为 明显的逐渐增加的趋势。本研究推测出现这种趋势可能的原因是随着土层深度的增加,废弃河道土壤中粘土 含量逐渐增加,吸附有机碳的能力逐渐增强,进而可以更好地保存当地植物来源有机碳^[36,47-48]。但在现行河 道中,随土层深度的增加,土壤有机碳各来源贡献无明显变化趋势。可能原因是随土层深度增加,现行河道土 壤δ¹³C的变化梯度较小^[49]。而这种较小的变化梯度可能与土壤粘土含量低和周期性潮汐流造成的土壤物 理混合有关^[49-50]。

3.2 黄河三角洲湿地土壤有机碳来源受到河道和植被类型的影响

河道变迁会影响土壤有机碳输入动态,这会对土壤有机碳来源产生影响^[50-51]。在本研究中,现行河道土 壤和废弃河道土壤间的δ¹³C无显著差异,但现行河道土壤有机碳 C/N 比显著低于废弃河道,现行河道土壤有 机碳表现出更明显的海洋有机碳特征^[34-35],使得现行河道湿地土壤有机碳来源中海洋浮游植物贡献显著高 于废弃河道。此外,水文地貌环境是控制湿地土壤有机碳源相对贡献的重要因素^[33]。Ding 等^[33]的研究发 现,盐城滨海湿地土壤有机碳来源以海洋浮游植物源为主,并认为是由于辐射沙脊、潮汐通道等独特的地形和 富营养水体为海洋浮游植物聚集和生长提供了有利的水动力条件和充足的物质,从而提高了海洋浮游植物对 土壤有机碳来源的贡献。本研究中,由于河流入海对两河道水文条件的影响,使得现行河道附近海域的海洋 浮游植物丰度要高于废弃河道^[52-53]。这种海洋浮游植物丰度在两河道间的差异可能是现行河道湿地土壤有 机碳来源中海洋浮游植物贡献相对较高的原因。

在本研究中,湿地植被类型的变化对黄河三角洲河口湿地土壤有机碳来源存在显著影响。一般而言,滨海湿地植被群落结构和生产力等是影响土壤碳动态的关键驱动因素之一^[54-55]。湿地植被可促进植物凋落物 在土壤中的沉积^[51],这会影响湿地土壤有机碳的来源。Wang等^[50]研究发现,互花米草入侵到红树林后,改 变了红树林湿地土壤有机碳的来源,使得当地植物源在红树林表层土壤有机碳的贡献减少了 19%。通常,潮 间带光滩有没有植被覆盖,在潮汐作用下,其无法有效拦截植被残体和碎屑;而盐地碱蓬作为一年生植被,尽 管其群落结构较为稀疏,但其仍具有拦截植被残体和碎屑的能力,同时盐地碱蓬调落物特别是死根可有效保 存在土壤中^[46,56],使得盐地碱蓬土壤有机碳来源中当地植物的贡献要显著高于无植被光滩,这可能是本研究 中盐地碱蓬土壤有机碳来源中当地植物的贡献显著高于无植被光滩的原因。此外,盐地碱蓬和无植被光滩间 的 C/N 比无显著差异,但盐地碱蓬土壤δ¹³C 值显著低于无植被光滩。较低的δ¹³C 值表明盐地碱蓬土壤有机 碳来源更偏向于陆源 POM 和当地植物来源,这可能是盐地碱蓬土壤有机碳来源中海洋浮游植物贡献显著低 于无植被光滩的原因。而盐地碱蓬和无植被光滩土壤有机碳来源中当地植物贡献和海洋浮游植物贡献显

4 结论

本研究结果表明,黄河三角洲河口湿地土壤有机碳来源以当地植物源和海洋浮游植物的输入为主,陆源 POM 贡献较低。同时黄河三角洲河道变迁和植被类型显著影响着河口湿地土壤有机碳的来源;废弃河道有 着更明显的陆地有机碳特征,而现行河道有着更高的海洋浮游植物贡献率,同时无植被光滩土壤有机碳的海 洋浮游植物贡献率显著高于盐地碱蓬湿地。不同河道和不同湿地有机碳来源的差异可能与水文地貌环境的 变化、植被类型的差异有关。黄河三角洲河口湿地当地植物源的巨大贡献表明其对研究区域土壤碳沉积和埋 藏的重要性,因此需要加强植被保护以促进土壤碳库的增强。本研究结果有助于深入了解黄河三角洲河口湿 地碳埋藏和碳循环过程,并对河口湿地的碳汇管理和保护具有重要意义。

参考文献(References):

- [1] Pendleton L, Donato D C, Murray B C, Crooks S, Jenkins W A, Sifleet S, Craft C, Fourqurean J W, Kauffman J B, Marbà N, Megonigal P, Pidgeon E, Herr D, Gordon D, Baldera A. Estimating global "blue carbon" emissions from conversion and degradation of vegetated coastal ecosystems. PLoS One, 2012,7(9): e43542.
- Macreadie P I, Anton A, Raven J A, Beaumont N, Connolly R M, Friess D A, Kelleway J J, Kennedy H, Kuwae T, Lavery P S, Lovelock C E, Smale D A, Apostolaki E T, Atwood T B, Baldock J, Bianchi T S, Chmura G L, Eyre B D, Fourqurean J W, Hall-Spencer J M, Huxham M, Hendriks I E, Krause-Jensen D, Laffoley D, Luisetti T, Marbà N, Masque P, McGlathery K J, Megonigal J P, Murdiyarso D, Russell B D, Santos R, Serrano O, Silliman B R, Watanabe K, Duarte C M. The future of Blue Carbon science. Nature Communications, 2019, 10(1): 3998.
- [3] 侯利萍,夏会娟,孔维静,林岿璇,刘录三.河口湿地优势植物资源化利用研究进展.湿地科学,2019,17(5):593-599.
- McLeod E, Chmura G L, Bouillon S, Salm R, Björk M, Duarte C M, Lovelock C E, Schlesinger W H, Silliman B R. A blueprint for blue carbon: toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO₂. Frontiers in Ecology and the Environment, 2011, 9 (10): 552-560.
- [5] Kelleway J J, Saintilan N, Macreadie P I, Baldock J A, Heijnis H, Zawadzki A, Gadd P, Jacobsen G, Ralph P J. Geochemical analyses reveal the importance of environmental history for blue carbon sequestration. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2017, 122(7): 1789-1805.
- [6] Li X D, Liu G. Study on the change monitoring of typical estuarine wetland and its effect on ecological factors in Bohai Rim region, China. Frontiers in Ecology and Evolution, 2022, 10: 967593.
- [7] 高宇,黄晓荣,张婷婷,王妤,杨刚,庄平.中国滨海河口海湾湿地生态系统研究进展——以长江口为例.湿地科学与管理,2016,12(4): 59-63.
- [8] 王法明,唐剑武,叶思源,刘纪化.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,2021,36(3):241-251.

- [9] Feng J G, Liang J F, Li Q W, Zhang X Y, Yue Y, Gao J Q. Effect of hydrological connectivity on soil carbon storage in the Yellow River Delta wetlands of China. Chinese Geographical Science, 2021, 31(2): 197-208.
- [10] Johnson B J, Moore K A, Lehmann C, Bohlen C, Brown T A. Middle to late Holocene fluctuations of C3 and C4 vegetation in a Northern New England Salt Marsh, Sprague Marsh, Phippsburg Maine. Organic Geochemistry, 2007, 38(3): 394-403.
- [11] 刘雨薇,于培松,郑旻辉,赵政嘉,张偲,韩沉花.不同植被类型对淤泥质潮滩有机碳来源和储量的影响——以茅埏岛为例.海洋学研究, 2023,41(4):94-101.
- [12] Sasmito S D, Kuzyakov Y, Lubis A A, Murdiyarso D, Hutley L B, Bachri S, Friess D A, Martius C, Borchard N. Organic carbon burial and sources in soils of coastal mudflat and mangrove ecosystems. CATENA, 2020, 187: 104414.
- [13] Watanabe K, Kuwae T. How organic carbon derived from multiple sources contributes to carbon sequestration processes in a shallow coastal system? Global Change Biology, 2015, 21(7): 2612-2623.
- [14] Herrmann M, Najjar R G, Kemp W M, Alexander R B, Boyer E W, Cai W J, Griffith P C, Kroeger K D, McCallister S L, Smith R A. Net ecosystem production and organic carbon balance of U.S. east coast estuaries: a synthesis approach. Global Biogeochemical Cycles, 2015, 29(1): 96-111.
- [15] Sasmito S D, Sillanpää M, Hayes M A, Bachri S, Saragi-Sasmito M F, Sidik F, Hanggara B B, Mofu W Y, Rumbiak V I, Hendri, Taberima S, Suhaemi, Nugroho J D, Pattiasina T F, Widagti N, Barakalla, Rahajoe J S, Hartantri H, Nikijuluw V, Jowey R N, Heatubun C D, Zu Ermgassen P Z, Worthington T A, Howard J, Lovelock C E, Friess D A, Hutley L B, Murdiyarso D. Mangrove blue carbon stocks and dynamics are controlled by hydrogeomorphic settings and land-use change. Global Change Biology, 2020, 26(5): 3028-3039.
- [16] Meyers P A. Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic-matter. Chemical Geology, 1994, 114 (3/4): 289-302.
- [17] 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. Stocks and losses of soil organic carbon from Chinese vegetated coastal habitats. Global Change Biology, 2021, 27(1): 202-214.
- [18] Carneiro L M, do Rosário Zucchi M, de Jesus T B, da Silva J B Jr, Hadlich G M. δ¹³C, δ¹⁵N and TOC/TN as indicators of the origin of organic matter in sediment samples from the estuary of a tropical river. Marine Pollution Bulletin, 2021, 172: 112857.
- [19] Liu X J, Tang D H, Ge C D. Distribution and sources of organic carbon, nitrogen and their isotopic composition in surface sediments from the southern Yellow Sea, China. Marine Pollution Bulletin, 2020, 150; 110716.
- [20] 单森,齐远志,罗春乐,付文静,薛跃君,王旭晨.中国主要河流输送陆源碳的同位素特征及影响因素.地球科学进展,2020,35(9): 948-961.
- [21] Craven K F, Edwards R J, Flood R P. Source organic matter analysis of saltmarsh sediments using SIAR and its application in relative sea-level studies in regions of C₄ plant invasion. Boreas, 2017, 46(4): 642-654.
- [22] Zhao Q Q, Bai J H, Zhang G L, Jia J, Wang W, Wang X. Effects of water and salinity regulation measures on soil carbon sequestration in coastal wetlands of the Yellow River Delta. Geoderma, 2018, 319; 219-229.
- [23] Fu Y T, Chen S L, Ji H Y, Fan Y S, Li P. The modern Yellow River Delta in transition: causes and implications. Marine Geology, 2021, 436: 106476.
- [24] 吴晓,范勇勇,王厚杰,毕乃双,徐丛亮,张勇,刘京鹏,卢泰安. 三角洲废弃河道演化过程及受控机制——以黄河刁口废弃河道为例 海洋 地质与第四纪地质,2021,41(2): 22-29.
- [25] Zheng S, Wu B S, Wang K R, Tan G M, Han S S, Thorne C R. Evolution of the Yellow River Delta, China: impacts of channel avulsion and progradation. International Journal of Sediment Research, 2017, 32(1): 34-44.
- [26] 于广磊,李斌,李凡,齐占会,张明亮. 黄河口附近海域沉积物中碳氮元素地球化学特征及有机质来源研究. 海洋环境科学,2019,38(6): 862-867.
- [27] 党瑶,刘夙睿,王厚杰,卢泰安,吴晓,毕乃双,胡利民.水库调控下黄河口沉积有机碳的分布、来源与输运特征 海洋地质与第四纪地质, 2024,44(2): 120-130.
- [28] 王启栋,宋金明,李学刚.黄河口湿地有机碳来源及其对碳埋藏提升策略的启示. 生态学报,2015,35(2): 568-576.
- [29] 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. Effects of episodic flooding on the net ecosystem CO₂ exchange of a supratidal wetland in the Yellow River delta. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2015, 120(8): 1506-1520.
- [30] 胡鉴芳,宫兆宁,张成,邱华昌. 黄河三角洲典型盐沼植被时空分布数据集(1999—2020)研发 全球变化数据学报(中英文),2022,6(2): 217-224,389-396.
- [31] Stock B, & Semmens, B.. Mixsiar: V3.1.2 (3.1.2). Zenodo. 2016.
- [32] Angradi T R. Trophic linkages in the lower colorado river: multiple stable-isotope evidence. Journal of the North American Benthological Society, 1994,13(4): 479-495.
- [33] Ding Y, Wang D Q, Chen S, Deng H G, Yu Z J, Liu L J, Li Y, Yang D, Gao Y Y, Nie J Q, Chen Z L. Source identification and estimation of organic

carbon in the intertidal wetlands of the eastern coast of China. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2022, 127(6): e2022JG006822.

- [34] Goñi M A, Teixeira M J, Perkey D W. Sources and distribution of organic matter in a river-dominated estuary (Winyah Bay, SC, USA). Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2003, 57(5/6): 1023-1048.
- [35] Li Y, Zhang H B, Tu C, Fu C C, Xue Y, Luo Y M. Sources and fate of organic carbon and nitrogen from land to ocean: identified by coupling stable isotopes with C/N ratio. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2016, 181: 114-122.
- [36] Xia S P,Song Z L,Li Q,Guo L D,Yu C X,Singh B P,Fu X L,Chen C M,Wang Y D,Wang H L. Distribution, sources, and decomposition of soil organic matter along a salinity gradient in estuarine wetlands characterized by C:N ratio,δ¹³C-δ¹⁵N, and lignin biomarker. Global Change Biology, 2021,27(2): 417-434.
- [37] Schmidt M W I, Torn M S, Abiven S, Dittmar T, Guggenberger G, Janssens I A, Kleber M, Kögel-Knabner I, Lehmann J, Manning D A C, Nannipieri P, Rasse D P, Weiner S, Trumbore S E. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. Nature, 2011, 478(7367): 49-56.
- [38] 姚晓,山口一岩,邹立,高会旺,郭新宇.黄河三角洲南部潮间带沉积环境对底栖叶绿素 a 分布特征的影响. 生态学杂志, 2010, 29(9): 1762-1769.
- [39] 孙赛赛,王玉珏,刘东艳,张婷,田波.崇明东滩光滩带夏季有机质空间分布特征、来源组成及食物网作用海洋环境科学,2022,41(3): 408-415.
- [40] 王珊珊,刘东艳,王玉珏,袁子能. 渤海 3 个河口区底栖硅藻群落的时空变化特征. 海洋学报,2020,42(8): 101-114.
- [41] Bao R, McIntyre C, Zhao M X, Zhu C, Kao S J, Eglinton T I. Widespread dispersal and aging of organic carbon in shallow marginal seas. Geology, 2016,44(10): 791-794.
- [42] 高立蒙,姚鹏,王金鹏,赵彬. 渤海表层沉积物中有机碳的分布和来源. 海洋学报,2016,38(6): 8-20.
- [43] 赵广明,叶思源,丁喜桂,袁红明,王锦.黄河三角洲全新世以来沉积环境的划分及各环境中碳埋藏速率的评价.地球科学(中国地质大学 学报),2014,39(4):451-461.
- [44] 凡姚申,窦身堂,于守兵,王广州,吴彦,谢卫明. 黄河三角洲水文-地貌-生态系统演变与多维调控研究进展. 水科学进展, 2023, 34(6): 984-998.
- [45] Gao Y, Zhou J, Wang L M, Guo J M, Feng J X, Wu H, Lin G H. Distribution patterns and controlling factors for the soil organic carbon in four mangrove forests of China. Global Ecology and Conservation, 2019, 17: e00575.
- [46] 杨中元,娄厦,陈仕哲,Irina Fedorova Viktorovna,Dorzhievna Radnaeva Larisa,Elena Nikitina. 长江口滨海湿地有机碳循环过程及影响因素研 究进展. 同济大学学报:自然科学版,2024,52(2):303-312.
- [47] Wang X M. Analysis of soil organic carbon storage and influencing factors in the soil of Binhai wetland in Tianjin. Research of Environmental Sciences, 2011,24(11): 1276-1282.
- [48] 孟丽卫,王龙升,战超,刘现彬,王庆.现代黄河三角洲沉积物粒度端元特征及其对河道变迁和人类活动的响应.海洋地质前沿,2023,39 (9):16-24.
- [49] Acton P, Fox J, Campbell E, Rowe H, Wilkinson M. Carbon isotopes for estimating soil decomposition and physical mixing in well-drained forest soils. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2013, 118(4): 1532-1545.
- [50] Wang F F, Zhang N, Yang S C, Li Y S, Yang L, Cao W Z. Source and stability of soil organic carbon jointly regulate soil carbon pool, but source alteration is more effective in mangrove ecosystem following *Spartina alterniflora* invasion. Catena, 2024, 235: 107681.
- [51] Zhang J Q, Hao Q, Li Q, Zhao X W, Fu X L, Wang W Q, He D, Li Y, Zhang Z Q, Zhang X D, Song Z L. Source identification of sedimentary organic carbon in coastal wetlands of the western Bohai Sea. Science of the Total Environment, 2024, 913: 169282.
- [52] 冷宇,赵升,刘霜,刘一霆,李钦亮,刘旭东.黄河口海域夏季浮游植物的分布特征.水生态学杂志,2013,34(6):41-46.
- [53] 刘晓彤,刘光兴. 2009年夏季黄河口及其邻近水域网采浮游植物的群落结构. 海洋学报, 2012, 34(1): 153-162.
- [54] Tan L S, Ge Z M, Li S H, Zhou K, Lai D Y F, Temmerman S, Dai Z J. Impacts of land-use change on carbon dynamics in China's coastal wetlands. Science of the Total Environment, 2023, 890: 164206.
- [55] Yang C R, Li Z W, Wang S L, Ran F W, Nie X D, Liu Y J, Xiao T. Anthropogenic activities control the source dynamics of sediment organic carbon in the lower reach of an inland river. Water Research, 2023, 233; 119779.
- [56] 宋红丽,刘兴土,王立志,郁万妮,董彬.不同干扰程度下黄河三角洲植被群落有机碳分布特征 水土保持学报. 2018,32(1): 190-196,203.