



# 山东日照滨海湿地沉积物 有机碳储量特征及影响因素

张昊<sup>1,2</sup>, 孙家森<sup>3</sup>, 杨春丽<sup>1,2</sup>, 冯英明<sup>1,2</sup>, 肖倩文<sup>1,2</sup>, 姚强<sup>1,2\*</sup>

(1. 山东省煤田地质局第一勘探队, 山东 青岛 266427; 2. 日照海洋地质院士工作站, 山东 日照 276800;  
3. 日照市生态环境局, 山东 日照 276800)

**摘要:**本研究通过对日照市中部傅疃河口滨海湿地 2 个剖面共 42 个沉积物容重、粒径、有机碳含量等测试结果的分析, 探讨了日照市中部傅疃河口滨海湿地沉积物有机碳储量特征及影响因素。结果表明: 0~100 cm 深柱状沉积物有机碳含量为 0.17%~0.72%, 平均值为 0.22%。不同湿地类型的沉积物有机碳含量因生境不同差异显著, 表现为浅海水域>河流滩涂>沙质滩涂, 单位面积平均碳储量表现为浅海水域>河流滩涂>沙质滩涂。各湿地类型有机碳储量为浅海水域>河流滩涂>沙质滩涂, 傅疃河口自然湿地地表至 100 cm 深度沉积物总碳储量约为  $11.24 \times 10^4 \text{ MgC}$ , 有机碳储量受粒度、容重控制明显。

**关键词:**滨海湿地; 沉积物; 有机碳储量; 沉积物粒度; 傅疃河口; 山东日照

中图分类号:P951

文献标识码:A

doi:10.12128/j.issn.1672-6979.2025.09.006

## 0 引言

近年来, 滨海湿地的碳汇能力愈加被重视, 已成为实现国家“碳达峰、碳中和”目标的重要区域, 其区位特征不仅为多种生态系统的形成提供了有利条件, 也为碳库的积累带来了丰富的物源<sup>[1-2]</sup>。沉积物作为滨海湿地碳捕获并储存的重要载体, 在海水中  $\text{SO}_4^{2-}$  的抑制作用下, 可以更加高效的埋藏有机碳并减少甲烷气体的排放<sup>[3-5]</sup>, 这使滨海湿地固碳能力及碳埋藏速率远高于陆地生态系统<sup>[6]</sup>, 滨海湿地单位面积固碳能力是陆地生态系统的 6~10 倍, 碳埋藏速率是陆地森林系统的几十到上千倍<sup>[7-8]</sup>。因此, 滨海湿地是人类目前应对所面临的气候变化问题的重要资源, 探究滨海湿地碳储量具有重要意义。

前人对滨海湿地的碳储能力研究主要集中在黄河口、盐城、长江口、杭州湾、双台子河口等湿地<sup>[9-16]</sup>, 而对山东东部沿海沙质滩涂及浅海水域沉

积物的碳埋藏能力、碳储量等研究较少, 仅在大沽河口区域开展过少量研究<sup>[17-19]</sup>。山东半岛南部日照地区区域位置特殊, 以日照南部的绣针河口为界, 以南为江浙沿海的大面积泥质滩涂, 以北则为绵延数百千米的砂质岸线<sup>[20]</sup>, 此区域的碳储量特征研究对于评估我国东部典型砂质岸线上的滨海湿地碳储功能, 研究南北地区不同类型滨海湿地碳储能力差异具有重要意义。本文以日照市傅疃河口滨海湿地为研究对象, 利用不同湿地类型的实地调查数据, 系统研究傅疃河口滨海湿地沉积物有机碳的含量、密度和储量特征及影响因素, 为未来傅疃河口滨海湿地修复和碳汇潜力评估提供本底数据和科学支撑。

## 1 研究区地质背景

傅疃河是日照市最大的河流, 也是鲁南地区最大的独流入海河流, 流域面积  $1\,060 \text{ km}^2$ <sup>[21]</sup>, 河口宽约  $800 \text{ m}$ <sup>[22]</sup>。傅疃河口岸线为典型的砂质海岸, 傅

收稿日期: 2025-02-12; 修订日期: 2025-03-22; 编辑: 陶卫卫

基金项目: 山东省煤田地质局 2022 年度局重点科研项目, 日照市滨海湿地蓝色碳汇功能研究(鲁煤地科字〔2022〕1 号); 日照市生态环境局 2022 年度市财政项目—日照市滨海蓝碳生态系统碳汇潜力调查(SDGP371100000202202000946)

作者简介: 张昊(1991—), 男, 山东济南人, 工程师, 主要从事海洋地质与地球化学方面的研究工作; E-mail: 894945622@qq.com

\* 通信作者: 姚强(1966—), 男, 山东宁阳人, 高级政工师, 主要从事地质勘查及管理工作; E-mail: 1585699531@qq.com

疃河-岚山头段发育我国北方典型的砂坝——潟湖体系。傅疃河口三角洲地区受海洋沉积作用和河流冲洪积作用双重影响,地势平坦,属于河口三角洲和滨浅海相沉积,为第四纪旭口组,岩性多为灰黄色、灰白色含砾混粒砂、中细砂及淤泥,厚度在 1~5 m 不等<sup>[23~25]</sup>。

按照第二次全国湿地资源调查的分类标准,研究区湿地类型包括近海与海岸湿地、河流湿地和人工湿地,涵盖河口水域、浅海水域和砂石海滩等。其中,近海与海岸湿地面积最大,主要包括河口水域、沙洲、砂石海滩和浅海水域,位于傅疃河入海口处;河流湿地次之,主要包括永久性河流傅疃河、崮河以及洪泛湿地;人工湿地面积最小,主要为水产养殖池塘。近年来,随着海水养殖的发展、人工设施建设影响,原有的盐沼退化<sup>[26]</sup>,湿地面积减小,并呈现分散、破碎化。本次研究以人为破坏较小的河流湿地、近海与海岸湿地为主(沙质滩涂、浅海水域),范围北至日照港南侧,南至龙王河入海口,西至新修测海岸线,东至 6 m 等深线,面积约 33 km<sup>2</sup>。

## 2 研究材料与方法

### 2.1 样品采集

2023 年 5 月,在研究区利用断面法采集了柱状沉积物 7 钻,每站同时采取平行样 3 个。其中河流滩涂采取 2 站(HL01 和 HL02)、沙质滩涂光滩采取 3 站(GT01、GT02 和 GT03)、浅海水域采集 2 站(HY01 和 HY02)(图 1)。使用外径 72 mm,内径 70 mm 的 PVC 管及特制钻头(提高采取率)进行采样,采样方式为人工捶击法,按照《滨海盐沼生态系系统碳储量调查与评估技术规程》<sup>[27]</sup>的要求,取样深度为 100 cm,采样过程中,在 50 cm 和 100 cm 深度测量 PVC 管内外与水平地面的高差,用于计算沉积物压缩比,利用压缩系数校正人为造成的样品压实,压缩系数计算结果如表 1。

表 1 压缩系数计算结果

序号	编号	压缩校正系数
1	HL01	0.85
2	HL02	0.79
3	GT01	0.86
4	GT02	0.87
5	GT03	0.84
6	HY01	0.83
7	HY02	0.85

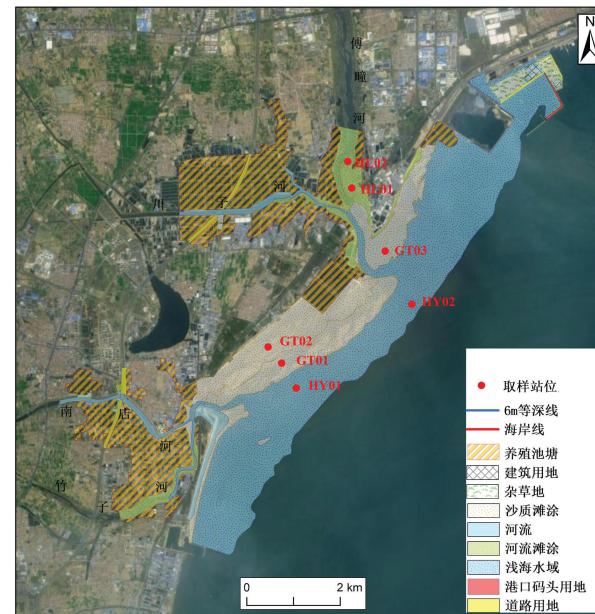


图 1 日照市傅疃河入海口周边取样站位及遥感解译图

每站柱状沉积物分 6 个层位取样,自上而下分别采集 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm、40~50 cm、50~100 cm 的样品。用预期分层厚度(10 cm)乘以压缩校正系数,以确定各层样品切割厚度,每个层位的沉积物均采集粒度、有机碳和容重样。

### 2.2 粒度与容重分析

沉积物容重样品采用体积 60 cm<sup>3</sup> 不锈钢材质的环刀进行采集,容重子样采用烘干法进行含水率测试。粒度分析采用 Mastersizer 2000 激光粒度分析仪(英国 Malvern 公司)进行分析,重复测量误差 <1%,粒度分析在中国海洋大学海底科学与探测技术教育部重点实验室完成。取样品 1 g 依次加入 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>、HCl 去除有机质和碳酸钙,待反应完全后用蒸馏水洗至中性,超声震荡 2 min 使之充分分散,粒度参数采用 Folk 等提出的方法<sup>[28]</sup>进行计算。

### 2.3 遥感解译

遥感解译范围以修测岸线至浅海水域 6 m 等深线之间区域,涉及到河口、滩涂、浅海水域以及监测范围内的其他地物类型。采用国产资源三号卫星影像数据,数据空间分辨率 2.1 m,成像时间分别为 2013 年、2017 年和 2022 年 6 月,无云,植被覆盖率高,影像质量较好。结合 2022 年日照市滨海湿地高分辨率遥感影像,采用人机交互方式开展典型地物类型遥感信息提取,对于潮间带和浅海水域界线,参

考第三次国土调查数据 0 m 等深线,结合卫星低潮时拍摄影像和现场调查,修正提取了潮间带和浅海水域边界线。

根据解译结果(图 1),将傅疃河口滨海湿地类型分为三类:河流滩涂、沙质滩涂光滩、浅海水域三大类,面积分别为 165.96 hm<sup>2</sup>、620.73 hm<sup>2</sup>、2 059.33 hm<sup>2</sup>。

## 2.4 有机碳分析与碳储量计算

沉积物有机碳分析测试在山东省物化探勘查院完成,实验依据中华人民共和国国家标准《地质样品有机地球化学分析方法第 2 部分:有机质稳定碳同位素测定同位素质谱法》(GB/T 18340.2—2010)进行,样品的处理和测试过程大体如下<sup>[29~30]</sup>:

(1) 将样品冻干后研磨至 200 目,取约 1 g 粉末原样。加入 1 mol 的盐酸至过量,搅拌摇匀充分反应 24 h 去除无机碳酸盐;

(2) 将样品离心后去除上清液,用去离子水充分搅拌清洗后再离心,重复洗酸至中性,用 60℃ 烘箱烘干,备用;

(3) 分别称取 2.5~3.0 mg 和 35~30 mg 前处理后的样品,用锡杯包样后上机,分别测定沉积物中 TOC 和  $\delta^{13}\text{C}$  的值。

测试仪器为元素分析仪—稳定同位素质谱仪联机(Flash EA 1112 HT—Delta VAdvantages),相对标准偏差 RSD<5%,同位素测定的重复误差为±0.2‰。

沉积物有机碳储量按照彭修强、叶思源<sup>[11,23]</sup>等方法计算。计算公式(1)~(3):

$$\text{TOCD}_i = \text{BD}_i \times \text{Corg}_i \quad (1)$$

$$\text{LC}_i = \text{TOCD}_i \times H_i \quad (2)$$

$$\text{LC}_{\text{总}} = (\text{LC}_1 + \text{LC}_2 + \text{LC}_3 + \dots + \text{LC}_n) \times S \times 100 \quad (3)$$

式中:TOCD<sub>i</sub> 为第 i 层沉积物有机碳密度(g/cm<sup>3</sup>);BD<sub>i</sub> 为第 i 层沉积物容重(g/cm<sup>3</sup>);Corg<sub>i</sub> 为第 i 层沉积物有机碳含量(%);LC<sub>i</sub> 为第 i 层沉积物碳储量(g/cm<sup>2</sup>);H<sub>i</sub> 为第 i 层沉积物取样间隔厚度(cm);LC<sub>总</sub> 为某一类型滨海湿地的沉积物有机碳储量(MgC, 1 Mg=10<sup>6</sup> g);S 为每种滨海湿地类型面积(hm<sup>2</sup>),面积取值根据遥感解译结果确定,沉积物采集深度为 100 cm,n 取值为 6。3 种滨海湿地类型沉积物有机碳储量之和,即为研究区沉积物总

碳储量。

## 3 结果与分析讨论

### 3.1 沉积物有机碳含量分布特征

#### 3.1.1 沉积物有机碳含量空间分布特征

研究区沉积物有机碳含量统计结果显示(表 2),0~100 cm 深度各层沉积物平均有机碳含量为(0.22±0.13)%,其中河流滩涂沉积物平均有机碳含量为(0.27±0.10)%;沙质滩涂沉积物平均有机碳含量为(0.16±0.05)%;浅海水域沉积物平均有机碳含量为(0.28±0.19)%。沉积物平均有机碳含量整体呈现出浅海水域略高于河流滩涂,高于沙质滩涂的现象。

表 2 研究区沉积物有机碳含量统计表

湿地类型	河流滩涂	沙质滩涂	浅海水域	研究区整体
样品数/件	12	18	12	42
最大值/%	0.42	0.31	0.72	0.72
最小值/%	0.10	0.11	0.14	0.10
平均值/%	0.27	0.16	0.28	0.22
标准差	0.10	0.05	0.19	0.13
变异系数/%	0.37	0.34	0.71	0.60

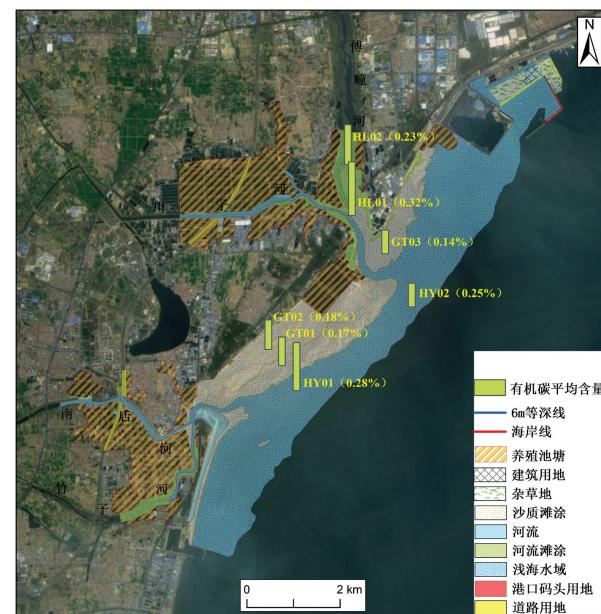


图 2 研究区沉积物有机碳含量水平分布柱状图

在垂直于海岸线方向(图 2),由河流滩涂至浅海水域沉积物有机碳含量先降低后升高,最高值位于河流滩涂的 HL01 站位,最低值位于河口北部沙质滩涂的 GT03 站位。在平行于海岸线方向,沉积

物平均有机碳含量表现出河口北部沙质滩涂略低于河口南部沙质滩涂, 河口北部浅海水域略低于河口南部浅海水域。

### 3.1.2 沉积物有机碳含量垂向变化特征

从不同深度沉积物有机碳含量来看(图 3), 层位 1(0~10 cm)、层位 2(10~20 cm)、层位 3(20~30 cm)、层位 4(30~40 cm) 沉积物有机碳含量均表现为河流滩涂(HL01、HL02) 最高, 浅海水域(HY01、HY02) 次之, 沙质滩涂最低(GT01、GT02、GT03); 层位 5(40~50 cm) 沉积物有机碳含量表现为河流滩涂最高, 浅海水域次之, 沙质滩涂最低; 层位 6(50~100 cm) 沉积物有机碳含量表现为浅海水域最高, 沙质滩涂次之, 河流滩涂最低。从垂向变化特征来看, 河流滩涂沉积物有机碳含量自上而下总体呈降低趋势, 沙质滩涂沉积物有机碳含量自上而下无明显变化, 在底部略有上升; 浅海水域沉积物有机碳含量自上而下总体呈上升趋势。

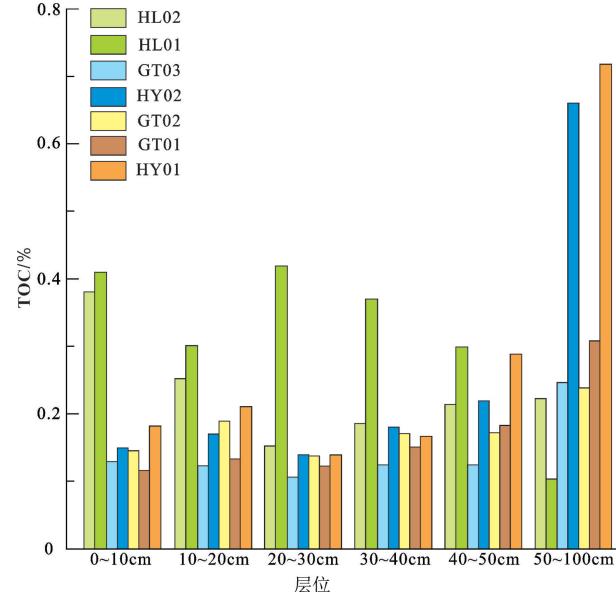


图 3 研究区沉积物有机碳含量垂向变化图

## 3.2 沉积物有机碳密度与有机碳储量特征

### 3.2.1 沉积物有机碳密度特征

研究区沉积物有机碳密度因不同湿地类型而存在显著区别。其中, 河流滩涂沉积物样品的有机碳密度为  $0.001 \sim 0.007 \text{ g/cm}^3$ , 平均值为  $0.004 \text{ g/cm}^3$ ; 沙质滩涂沉积物样品有机碳密度为  $0.001 \sim 0.005 \text{ g/cm}^3$ , 平均值为  $0.002 \text{ g/cm}^3$ ; 浅海水域沉积物样品有机碳密度为  $0.001 \sim 0.008 \text{ g/cm}^3$ , 平均值为  $0.003 \text{ g/cm}^3$ 。结果显示,

河流滩涂沉积物样品的有机碳密度高于沙质滩涂和浅海水域。研究区沉积物有机碳密度总体较低, 平均为  $0.003 \text{ g/cm}^3$ , 各层有机碳密度无明显差异, 其垂向分布规律基本与有机碳含量垂向变化趋势类似(图 4)。河流滩涂沉积物样品中, 表层 0~10 cm 有机碳密度最高,  $20 \sim 100 \text{ cm}$  呈减小趋势, 呈现明显的表聚性; 沙质滩涂总体变化幅度较小, 底部  $50 \sim 100 \text{ cm}$  的沉积物样品有机碳密度略有增加; 浅海水域沉积物有机碳密度表现为底部  $50 \sim 100 \text{ cm}$  的样品远高于表层 0~10 cm 的样品。

### 3.2.2 沉积物有机碳储量特征

如图 5、表 3 所示, 各层位的沉积物样品有机碳储量分布特征在不同湿地类型中表现为: 3 种湿地类型的上部( $0 \sim 50 \text{ cm}$ )沉积物样品的有机碳储量占总有机碳储量( $0 \sim 100 \text{ cm}$ )的  $2.22\% \sim 20.20\%$ , 平均为  $7.47\%$ 。下部( $50 \sim 100 \text{ cm}$ )沉积物样品的有机碳储量占总有机碳储量( $0 \sim 100 \text{ cm}$ )的  $21.55\% \sim 80.87\%$ , 平均为  $62.66\%$ 。河流滩涂、沙质滩涂和浅海水域沉积物上部沉积物有机碳储量平均占比分别为  $60.13\%$ 、 $32.47\%$  和  $19.86\%$ 。

表 3 研究区沉积物各层碳储量统计表

层位/cm	河流滩涂 / ( $\text{g}/\text{cm}^2$ )		沙质滩涂 / ( $\text{g}/\text{cm}^2$ )		浅海水域 / ( $\text{g}/\text{cm}^2$ )		
	HL01	HL02	GT01	GT02	GT03	HY01	HY02
0~10	0.070	0.053	0.019	0.017	0.020	0.010	0.009
10~20	0.043	0.038	0.018	0.018	0.024	0.018	0.015
20~30	0.061	0.024	0.015	0.016	0.018	0.014	0.013
30~40	0.054	0.028	0.018	0.019	0.022	0.019	0.021
40~50	0.044	0.037	0.014	0.027	0.023	0.029	0.022
50~100	0.075	0.225	0.183	0.248	0.169	0.382	0.304
总计	0.346	0.404	0.268	0.346	0.277	0.472	0.383

根据 2022 年高分 2 号遥感影像解译结果(图 1, 表 4), 估算日照中部傅疃河入海口附近不同湿地类型沉积物样品中的有机碳储量。其中, 河流滩涂以 HL01、HL02 为代表, 地表至  $100 \text{ cm}$  深度沉积物碳储量分别为  $34.58 \text{ MgC}/\text{hm}^2$ 、 $40.40 \text{ MgC}/\text{hm}^2$ , 平均为  $37.49 \text{ MgC}/\text{hm}^2$ , 河流滩涂面积为  $165.96 \text{ hm}^2$ , 总碳储量约为  $6222 \text{ MgC}$ ; 沙质滩涂以 GT01、GT02、GT03 为代表, 地表至  $100 \text{ cm}$  深度沉积物碳储量分别为  $26.75 \text{ MgC}/\text{hm}^2$ 、 $34.57 \text{ MgC}/\text{hm}^2$ 、 $27.67 \text{ MgC}/\text{hm}^2$ , 平均为  $29.66 \text{ MgC}/\text{hm}^2$ , 沙质滩涂面积为  $620.73 \text{ hm}^2$ , 总碳储量约为  $18411 \text{ MgC}$ ; 浅海水域以 HY01、HY02 为代表, 地表至  $100 \text{ cm}$  深度沉积物碳

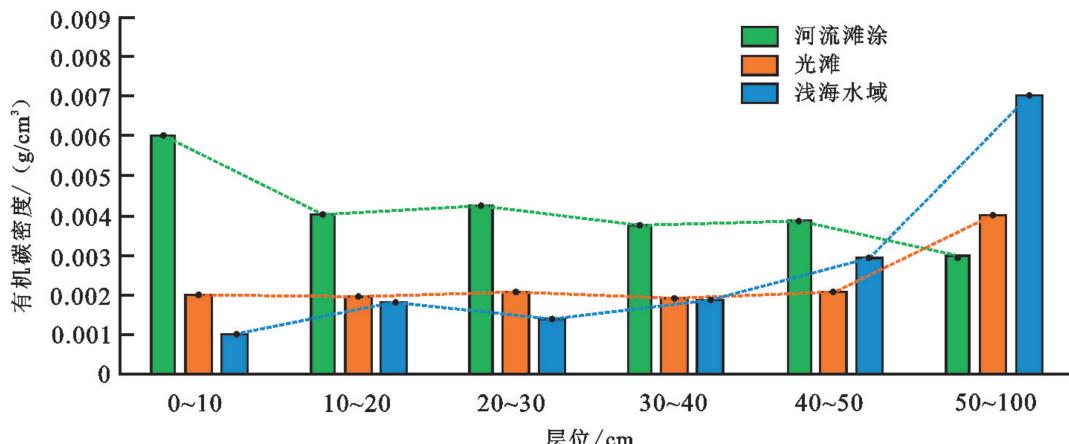


图 4 研究区不同湿地类型各分层沉积物有机碳密度

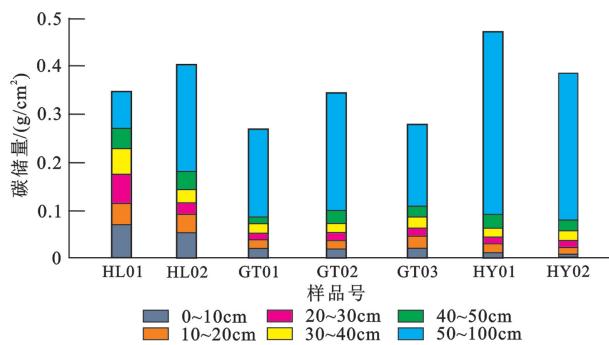


图 5 研究区沉积物各层有机碳储量

储量分别为  $47.23 \text{ MgC}/\text{hm}^2$ 、 $38 \text{ MgC}/\text{hm}^2$ ，平均为  $42.61 \text{ MgC}/\text{hm}^2$ ，浅海水域面积为  $2059.33 \text{ hm}^2$ ，总碳储量约为  $87748 \text{ MgC}$ 。综上，日照中部傅疃河入海口附近自然湿地地表至  $100 \text{ cm}$  深度沉积物总碳储量约为  $11.24 \times 10^4 \text{ MgC}$ 。

表 4 研究区自然湿地各类型面积统计表

序号	湿地类型	面积/ $\text{hm}^2$	备注
1	沙质滩涂光滩	620.73	
2	浅海水域	2059.33	$0 \sim 6 \text{ m}$ 等深线
3	河流滩涂	165.96	
合计		2846.02	

### 3.3 沉积物有机碳储量影响因素分析

3.3.1 湿地类型对沉积物有机碳储量的影响分析  
有机碳的积累是由于持续的初级生产力输入和较少的分解，以及碎屑的残留，湿地沉积物有机碳储量与生物（植物）种类及生物量密切相关<sup>[31~32]</sup>。根据研究区沉积物有机碳储量分布特征，浅海水域单位面积平均有机碳储量高于河流滩涂，沙质滩涂最低。浅海水域沉积物有机碳含量在下部（ $50 \sim 100 \text{ cm}$ ）具有明显增大的趋势，这可能与傅疃河周

边长期建有养殖池塘有关，养殖废水排放入海，使海水营养盐充足，浮游生物初级生产力较高，有机碳来源丰富，由表层逐渐向深层迁移，且浅海水域沉积物处于淹没状态，由表层向深层内部缺氧或厌氧愈加明显，有机碳分解缓慢，故底部有机碳含量较高。河流滩涂表层及上部沉积物（ $0 \sim 50 \text{ cm}$ ）有机碳含量高于下部（ $50 \sim 100 \text{ cm}$ ），傅疃河流滩涂植被较茂密，生长有芦苇、碱蓬、蒲、大米草等植被<sup>[33]</sup>，表层土壤有机碳含量显著高于其他 2 种湿地类型，随着植被生长年限的增加，表层腐殖质经淋溶作用不断向深层机械迁移<sup>[34]</sup>，同时，表层有大量植被根系，植物死亡后根系随之腐解，为沉积物提供了丰富的有机碳碳源<sup>[35]</sup>。沙质滩涂沉积物有机碳储量最低， $0 \sim 50 \text{ cm}$  无明显变化， $50 \sim 100 \text{ cm}$  略有升高，沙质滩涂本身极少生长植物<sup>[8,36]</sup>，但上部沉积物在频繁的海水冲刷下较难保存，随着深度增加，氧气含量降低导致有机碳分解缓慢，有利于底部有机碳的累积且逐渐趋向饱和状态<sup>[37]</sup>。

#### 3.3.2 沉积物理化因子对有机碳储量的影响分析

为了进一步分析沉积物有机碳储量影响因素，运用 SPSS 26.0 软件对沉积物的理化性质进行相关性分析（表 5）。沙质滩涂、浅海水域沉积物有机碳储量与粉砂、黏土含量呈显著正相关；均与砂含量呈显著负相关，说明沙质滩涂、浅海水域沉积物有机碳含量受粒度控制明显，细颗粒沉积物对有机碳吸附能力更强，河流滩涂由于湿地植被的存在改变了其沉积物的粒度组成，尤其是表层沉积物的粒度，使其颗粒更细，有机质含量更高，这与河流滩涂上部（ $0 \sim 50 \text{ cm}$ ）有机碳含量高于底部（ $50 \sim 100 \text{ cm}$ ）相吻合。

沉积物容重不仅可以较准确地反映沉积物物理

性状的整体状况,还可有效指示沉积物质量和生产力<sup>[11]</sup>,沉积物容重的主要因素是沉积物中的主要矿物成分、有机质含量和孔隙度<sup>[38]</sup>。在本研究区,河流滩涂、沙质滩涂、浅海水域沉积物有机碳储量均与土壤容重呈显著正相关,河流滩涂上部有机碳储量高,沉积物容重较大,这可能是河流滩涂上部由于植

被改造,沉积物粒度细,孔隙度小,从而增加有机碳的吸附,有机碳持续的积累。而沙质滩涂和浅海水域上部沉积物有机碳储量较少,容重较小,这可能是因为表层沉积物粒度较粗<sup>[39]</sup>,孔隙度较大,不利于有机碳的积累。

表 5 沉积物有机碳储量与沉积物理化因子相关系数

沉积物	碳储量/(g/cm <sup>2</sup> )	TOC/%	土壤容重/(g/cm <sup>3</sup> )	砂	粉砂	黏土
碳储量/(g/cm <sup>2</sup> )	河流滩涂	1				
	沙质滩涂	1				
	浅海水域	1				
TOC/%	河流滩涂	-0.046	1			
	沙质滩涂	0.914 **	1			
	浅海水域	0.980 **	1			
土壤容重/(g/cm <sup>3</sup> )	河流滩涂	0.756 **	-0.191	1		
	沙质滩涂	0.528 *	0.387	1		
	浅海水域	0.333	0.314	1		
砂	河流滩涂	-0.460	-0.658 *	-0.264	1	
	沙质滩涂	-0.754 **	-0.801 **	-0.459	1	
	浅海水域	-0.807	-0.790	-0.099	1	
粉砂	河流滩涂	-0.041	0.729 **	-0.222	-0.756 **	1
	沙质滩涂	0.764 **	0.807 **	0.467	-0.999 **	1
	浅海水域	0.951 **	0.974 **	0.342	-0.819 *	1
黏土	河流滩涂	-0.048	0.648 *	-0.285	-0.752 **	0.953 **
	沙质滩涂	0.686 **	0.740 **	0.534 *	-0.946 **	0.941 **
	浅海水域	0.968 **	0.975 **	0.316	-0.822 *	1.000

注: \*\* 在 0.01 级别, 相关性显著; \* 在 0.05 级别, 相关性显著。

### 3.4 不同地区滨海湿地沉积物碳储量比较

据表 6 显示,在不考虑取样深度的条件下,沙质滩涂沉积物平均碳储量表现为日照傅疃河口滨海湿地略高于闽东滨海湿地,远低于胶州湾滨海湿地,主要由于胶州湾滨海湿地植被类型多样(芦苇、白茅、碱蓬、大米草等)<sup>[18]</sup>,为沙质滩涂区域提供了丰富的有机物质来源;浅海水域沉积物平均碳储量表现为日照傅疃河口滨海湿地远高于闽东滨海湿地,这是由于傅疃河口滨海湿地入海河流周边养殖池塘较多(图 1),为浅海水域提供了较为丰富的营养盐,使得海域浮游生物生产力较高,固碳能力较强,有机碳更容易积累,同时,这与南北方海域水温、地形、水动力环境差异也存在一定关系<sup>[40]</sup>;日照傅疃河口滨海湿地河流滩涂(植被以大米草为主)沉积物平均碳储量高于崇明东滩湿地(互花米草盐沼),低于胶州湾滨海湿地(盐地碱蓬湿地),主要原因包括:受湿地生态系统影响,不同植被类型固碳能力不同,进而影响沉

积物碳储量。

表 6 日照傅疃河口湿地与其他湿地沉积物碳储量比较

滨海湿地	生态系 统类型	平均碳储量/ (MgC/hm <sup>2</sup> )	深度/ cm	资料 来源
闽东滨 海湿地	浅海水域	26.9	0~60	廖小娟等 <sup>[41]</sup>
	沙质滩涂	21.1		
胶州湾 滨海湿地	沙质滩涂	59.2	0~60	訾园园等 <sup>[18]</sup>
	盐地碱蓬湿地	49.9		
崇明东滩湿 地	互花米草盐沼	22.6	0~50	张天雨 <sup>[14]</sup>
	沙质滩涂	29.66		
日照傅疃 河口湿地	浅海水域	42.61	0~100	本研究
	河流滩涂	37.49		

## 4 结论

(1) 日照中部傅疃河入海口附近湿地因植被稀少且多为裸滩,沉积物样品中的有机碳含量整体处于较低水平,0~100 cm 深柱状沉积物有机碳含量为 0.17%~0.72%,平均值为 0.22%。不同湿地类别的沉积物有机碳含量因生境不同有明显差异,表

现为浅海水域(0.28%)>河流滩涂(0.27%)>沙质滩涂(0.16%)。在垂向上,沉积物有机碳含量与有机碳密度的变化趋势基本一致。河流滩涂有机碳含量总体呈降低趋势;沙质滩涂自上而下无明显变化,底部略有上升;浅海水域总体呈升高趋势。

(2)有机碳储量分布特征在不同湿地类型中分布表现出不同特征,河流滩涂、沙质滩涂和浅海水域沉积物上部沉积物有机碳储量平均占比分别为60.13%、32.47%和19.86%。河流滩涂总碳储量约为6 222 MgC;沙质滩涂总碳储量约为18 411 MgC;浅海水域总碳储量约为87 748 MgC,日照中部傅疃河入海口附近自然湿地地表至100 cm深度沉积物总碳储量约为 $11.24 \times 10^4$  MgC。

(3)据研究区沉积物有机碳储量分布特征,浅海水域单位面积平均有机碳储量高于河流滩涂,沙质滩涂最低。沙质滩涂、浅海水域沉积物有机碳含量受粒度控制明显,河流滩涂由于湿地植被的存在改变了其沉积物的粒度组成,粒度对有机碳储量的控制不明显。河流滩涂、沙质滩涂、浅海水域沉积物有机碳储量均与土壤容重呈显著正相关,主要是通过沉积物孔隙度的大小影响有机碳的积累。

## 参考文献:

- [1] 蔡爱军,马随随.中国滨海湿地蓝色碳汇研究进展[J].湿地科学,2022,20(6):846-851.
- [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):241-251.
- [3] 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 CO<sub>2</sub>[J]. Frontiers in Ecology and the Environment,2011,9(10):552-560.
- [4] 韩广轩,宋维民,李培广,等.长期生态学研究为滨海湿地保护提供科技支撑[J].中国科学院院刊,2020,35(2):218-228.
- [5] CHOI Y, WANG Y. Dynamics of carbon sequestration in a coastal wetland using radiocarbon measurements[J]. Global Biogeochemical Cycles,2004,18:401.
- [6] 陈一宁,陈鹭真.滨海蓝碳生态系统的碳库间相互作用研究进展及展望[J].海洋学研究,2023,41(1):3-13.
- [7] 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[J].生态学报,2015,35(2):568-576.
- [8] 王玉莲,张坤,王振兴,等.山东威海滨海新城北部海域潮流数值模拟研究[J].山东国土资源,2023,39(3):96-101.
- [9] 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):145-149.
- [10] 董洪芳,于君宝,孙志高,等.黄河口滨岸潮滩湿地植物—土壤系统有机碳空间分布特征[J].环境科学,2010,31(6):1594-1599.
- [11] 彭修强,闫玉茹,孙祝友,等.江苏盐城滨海盐沼湿地沉积物有机碳含量及碳储量研究[J].海洋通报,2023,42(4):407-417.
- [12] 许鑫,王豪,赵一飞,等.盐城滨海湿地表层沉积物有机碳特征[J].自然资源学报,2014,29(11):1957-1967.
- [13] 荷富刚.长江古河谷早中全新世沉积物碳埋藏通量与来源解析[J].海洋学报,2023,45(4):95-108.
- [14] 张天雨.崇明东滩湿地沉积物有机碳和总氮储量动态研究[D].上海:华东师范大学,2016.
- [15] 邵学新,杨文英,吴明,等.杭州湾滨海湿地土壤有机碳含量及其分布格局[J].应用生态学报,2011,22(3):658-664.
- [16] 宋鑫,李微,刘洪洋,等.双台子河口盐地碱蓬地上和地下生物量分配格局及其异速生长模型[J].湿地科学,2018,16(6):771-775.
- [17] 谢文霞,朱鲲杰,崔育倩,等.胶州湾河口湿地土壤有机碳及氮含量空间分布特征研究[J].草业学报,2014,23(6):54-60.
- [18] 訾园园,郗敏,孔范龙,等.胶州湾滨海湿地土壤有机碳时空分布及储量[J].应用生态学报,2016,27(7):2075-2083.
- [19] 侯雪景,印萍,丁旋,等.青岛胶州湾大沽河口滨海湿地的碳埋藏能力[J].海洋地质前沿,2012,28(11):17-26.
- [20] 李忠涵,王惠,宋萍,等.基于Landsat影像的日照市海岸线时空变化特征[J].山东国土资源,2024,40(12):8-14.
- [21] 郭建和,安丰敬,秦兰香,等.傅疃河流域综合治理与湿地恢复保护研究[J].湿地科学与管理,2016,12(3):32-34.
- [22] 杨士雄.日照市志[M].济南:齐鲁书社,1994.
- [23] 张昊,郝义,王惠,等.日照市海岸带海滩沉积物粒度特征及物源分析[J].山东国土资源,2020,36(3):50-58.
- [24] 郝义,王光栋,张启慧,等.日照市海岸带古河道分布特征研究[J].山东国土资源,2020,36(5):20-26.
- [25] 冯英明,许丙彩,郝义,等.日照市海洋牧场示范区人工鱼礁选址适宜性分析[J].山东国土资源,2020,36(1):44-50.
- [26] 孔范龙,郗敏,李悦,等.山东日照傅疃河口湿地脆弱性特征与生态恢复[J].湿地科学,2015,13(3):322-326.
- [27] 叶思源,赵广明,裴邵峰,等.滨海湿地固碳能力评价技术与方法[M].北京:中国地质大学出版社,2016.
- [28] FOLK R L, ANDREWS P B, LEWIS D W. Detrital sedimentary rock classification and nomenclature for use in New Zealand[J]. New Zealand Journal of Geology and Geophysics, 1970,13(4):937-968.
- [29] 杨春丽.3.4万年以来南极斯科舍海冰海沉积环境及古生产力演变[D].青岛:自然资源部第一海洋研究所,2020.
- [30] 宋乐慧.末次冰盛期以来罗斯海西部沉积环境重建[D].南京:南京大学,2019.
- [31] 贾瑞霞,全川,王维奇,等.闽江河口盐沼湿地沉积物有机碳含量及储量特征[J].湿地科学,2008,6(4):492-499.
- [32] 于彩芬,陈鹏飞,刘长安,等.互花米草湿地碳储量及碳汇研究进展[J].海洋开发与管理,2014,31(8):85-89.
- [33] 王松涛.山东日照海岸带地质[M].青岛:中国海洋出版社,

2014.

- [34] 曹磊. 山东半岛北部典型滨海湿地碳的沉积与埋藏[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2014.
- [35] JOBBAGY E G, JACKSON R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation [J]. Ecological Applications, 2002(10): 423–436.
- [36] XIONG Y, LIAO B, WANG F. Mangrove vegetation enhances soil carbon storage primarily through *in situ* inputs rather than increasing allochthonous sediments[J]. Marine Pollution Bulletin, 2018, 131(JUN): 378–385.
- [37] 张艳艳. 胶州湾滨海湿地土壤溶解性有机碳淋溶特征研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2016.
- [38] 薛成凤, 盛辉, 魏东运, 等. 沉积物干容重分析及其沉积学意义: 以东海内陆架海区为例[J]. 海洋与湖沼, 2020, 51(5): 1093–1107.
- [39] 姚强, 卫石印, 杨春丽, 等. 日照近岸海域表层沉积物粒度特征及沉积环境分析[J]. 山东国土资源, 2024, 40(4): 33–43.
- [40] HNTORIA C, RODRIGUEZ-MURILLO J C, SAA A. Relationship between soil organic carbon and site characteristics in Peninsular Spain[J]. Soil Science Society of America Journal, 1999(63): 614–621.
- [41] 廖小娟, 何东进, 王韧, 等. 闽东滨海湿地土壤有机碳含量分布格局[J]. 湿地科学, 2013, 11(2): 192–197.

## Characteristics and Influencing Factors of Organic Carbon Storage in Sediments of Typical Coastal Wetlands in Rizhao City

ZHANG Hao<sup>1,2</sup>, SUN Jiasen<sup>3</sup>, YANG Chunli<sup>1,2</sup>, FENG Yingming<sup>1,2</sup>, XIAO Qianwen<sup>1,2</sup>, YAO Qiang<sup>1,2</sup>  
 (1. No. 1 Prospecting Brigade of Shandong Coal Geology Bureau, Shandong Qingdao 266427, China; 2. Rizhao Marine Geology Academician Workstation, Shandong Rizhao 276800, China; 3. Rizhao Ecological Environment Bureau, Shandong Rizhao 276800, China)

**Abstract:** Through analyzing the test results of bulk density, particle size and organic carbon content of 42 sediments in two sections of Futuan river coastal wetland in central Rizhao city, characteristics and influencing factors of organic carbon storage in sediments in this area have been discussed. It is showed that organic carbon content of 0~100cm deep columnar sediments is 0.17%~0.72%, and the average value is 0.22%. The content of organic carbon in sediments of different wetland types is significantly different due to different habitats, which is expressed as shallow sea water>river beach>bare flat. The average carbon storage per unit area is expressed as shallow sea water>river beach>bare flat. The organic carbon storage of each wetland type is shallow sea water>river beach>bare flat. The total carbon storage of sediments at 100cm depth in Futuan Estuary natural wetland is about  $11.24 \times 10^4$  MgC. Organic carbon storage is obviously controlled by particle size and bulk density.

**Key words:** Coastal wetlands; sediments; organic carbon storage; sediment grain size; Futuan river mouth; Rizhao city in Shandong province