

张旭, 田元, 王建强, 等. 海湾地质碳汇网格化计算——以三门湾为例[J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(6): 46-54.

ZHANG Xu, TIAN Yuan, WANG Jianqiang, et al. Grid calculation of geological carbon sink capacity in coastal bays: a case study of Sanmen Bay[J]. Marine Geology Frontiers, 2023, 39(6): 46-54.

# 海湾地质碳汇网格化计算

## ——以三门湾为例

张旭<sup>1,2</sup>, 田元<sup>2</sup>, 王建强<sup>3</sup>, 张鹏辉<sup>1</sup>, 陈彬<sup>2</sup>, 田雨晴<sup>2</sup>, 董超<sup>2</sup>, 印萍<sup>2\*</sup>

(1 河海大学海洋学院, 南京 210024; 2 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266237;

3 浙江省水文地质工程地质大队, 宁波 315012)

**摘要:**河口海湾地区因沉积物富含有机质和高沉积速率成为地球上重要的碳汇区, 在专题性碳汇调查不足情况下, 如何更好地发掘前人地质调查数据资源, 科学计算河口海湾地质碳埋藏能力, 是科学评价海洋碳汇能力支撑双碳目标的重要挑战。以浙江省三门湾海域表层沉积物和沉积柱状样品为研究对象, 综合运用粒度分析、有机地球化学分析、<sup>210</sup>Pb 和 <sup>137</sup>Cs 测年等测试手段, 充分考虑海湾地区海底地形复杂、海陆交互强烈、人类活动活跃等典型特征, 探索海湾碳汇网格化计算方法, 建立了海湾地质碳汇评估模型。计算表明: 三门湾有机碳年埋藏速率为  $64.04 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , 有机碳年埋藏量达  $89.71 \text{ GgC}$ , 河口和潮滩区有机碳埋藏速率高, 为  $74.02 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , 海湾中部和深水区为  $52.93 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

**关键词:** 三门湾; 地质碳汇; 网格化; 有机碳埋藏速率

中图分类号: P736.2

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2022.303

## 0 引言

大气 CO<sub>2</sub> 浓度上升导致的全球气候变暖逐渐对人类的生存环境安全产生威胁。海洋占地球表面积的 71%, 对调节大气中 CO<sub>2</sub> 的浓度具有举足轻重的地位, 在碳汇方面的作用和功能巨大<sup>[1]</sup>。大河影响下的边缘海(RiOMar)是全球海洋碳通量的关键组成部分, 从全球尺度来看, 边缘海沉积物有机碳的堆积速率是大洋的 8~30 倍, 约 40%~50% 的有机碳垂向通量以及约 80% 的沉积物有机碳埋藏发生于此<sup>[2-6]</sup>。其中, 在海陆交互作用较为强烈的海

岸带区域, 碳的生物地球化学作用十分活跃, 具有高生产力、高陆源输入和高沉积速率的特点, 有机质埋藏效率很高, 往往比大洋高出一个数量级, 在全球碳循环过程中扮演十分重要的角色, 是全球海洋碳汇相关研究的热点区域<sup>[7-8]</sup>。

与陆地和淡水生态系统碳汇不同, 海岸带生态系统的沉积物可随海平面的上升而不断发生垂向上的累积, 持续接受来源于海洋初级生产力的有机质和河流输入的土壤碳、岩石碳及植被贡献<sup>[9]</sup>, 因此, 在长期尺度内, 海湾的碳汇潜力巨大<sup>[10]</sup>。目前, 国内外诸多学者针对陆架边缘海开展了大量碳通量和碳储量计算工作, 对中国边缘海的有机碳输送和埋藏过程已有较为系统的认识<sup>[8,11-17]</sup>。总的来说, 现阶段针对陆架区地质碳埋藏的研究工作已经较为充分, 但对于海底地形复杂、海陆交互强烈、人类活动活跃的海湾研究仍然较少。在采样数据量有限的情况下, 依靠常规的插值计算方法可能导致忽略海湾中不同水动力条件和地貌单元下的沉积环境差异, 难以对其碳汇能力给出准确的评估。本文尝试结合水深地形的分布, 对海湾的有机碳埋藏速率进行分区域网格化运算, 对比不同的网格赋值方

收稿日期: 2022-11-05

资助项目: 国家重点研发计划政府间/港澳台重点专项“河口三角洲生态环境地球观测应用研究”(SQ2019YFE012389); 中国地质调查局项目“浙江中部海岸带综合地质调查”“重要河口湿地滩区生态地质调查”(DD20190276, DD20221775)

作者简介: 张旭(1997—), 男, 在读硕士, 主要从事海洋地质方面的研究工作。E-mail: 1154107657@qq.com

\* 通讯作者: 印萍(1971—), 女, 博士, 研究员, 主要从事海洋地质与海岸带环境地质方面的研究工作。E-mail: pingyin@fio.org.cn

法, 探索适用于具有复杂沉积环境海湾地区的地质碳汇计算方法。

三门湾是浙江省第二大海湾, 港汊和淤泥滩交错分布的半封闭式海湾<sup>[18]</sup>。本文以中国地质调查局青岛海洋地质研究所 2019 年在三门湾开展的海岸带调查获得的表层和沉积柱状沉积物样品为研究对象, 建立海湾地质碳汇网格化计算方法和海湾地区地质碳汇评估模型, 计算海湾地质碳汇速率和总量, 分析不同区域地质碳汇能力的影响因素, 以期为中国东部沿海河口海湾及临近海域的地质碳汇能力评估和海岸带蓝碳计算研究提供新的思路。

## 1 研究区域地质背景

三门湾位于浙江省东部 (28°57′–29°22′N、121°25′–121°58′E), 呈 NW–SE 走向, 海域面积为 775 km<sup>2</sup><sup>[19]</sup>。湾内岸线曲折且港汊纵横, 深嵌内陆, 有白礁水道、胡陈港、力洋港、蛇蟠水道、石浦水道和健跳港等 6 个深水港汊, 各港汊间以舌状淤泥岸滩分隔, 多呈指状展开, 海湾全新世沉积层厚度一般为 20~25 m<sup>[20]</sup>。本研究将三门湾南部的浦坝港也包含在内, 连同采样站位分布的邻近海域, 总面积为 1 410 km<sup>2</sup>(图 1)。

三门湾的潮波由外海传入引起的振动胁迫为主, 潮流运动以往复流为主, 潮汐类型为正规半日潮, 平均潮差较大, 能够达到 4 m 以上, 最大潮差可达 7.8 m<sup>[18]</sup>, 从湾口到湾顶逐渐增大。落潮流速显

著高于涨潮流速, 这一现象与三门湾特殊的地形和水动力条件直接相关<sup>[21]</sup>。沿湾河流均为山溪型河流, 径流量小, 输沙量低<sup>[19]</sup>, 湾内沉积物以长江径流携带泥沙来源为主<sup>[22]</sup>。三门湾海底表层沉积物的分布格局受潮流、水团交换等区域海洋动力环境因素影响<sup>[13]</sup>, 主控因素为潮流<sup>[21]</sup>。涨潮时水流沿漫滩缓慢扩散, 落潮时受地形约束滩水快速归槽, 沉积物滞留潮滩发生堆积, 同时也使水道维持较深的水深<sup>[23]</sup>。在围涂工程影响下, 海湾全潮流速降低, 纳潮量减少, 风暴沉积残留增多<sup>[24-27]</sup>。

## 2 研究材料与方法

三门湾表层沉积物样品利用蛤式取样器采集, 共布设 84 个采样点, 样品分布均匀, 具有良好的代表性。

柱状样使用 DDC-Z-2 型震动取样器进行取样, 采集 9 个站位, 取样水深范围 7.5~12.2 m。柱状样 0~20 cm 以 4 cm 为间隔分样, 20~130 cm 以 10 cm 为间隔分样, 共取样 113 个, 封装于聚乙烯样品袋, 送至实验室进行<sup>210</sup>Pb 和<sup>137</sup>Cs 测年。

表层沉积物和柱状沉积物样品的粒度和地球化学分析测试均在自然资源部海洋地质实验检测中心完成, 中心严格按照相关国家标准方法进行测试, 采用国家一级标准物质及密码样品的双份分析进行质量监控, 测试结果均依据 DZ/T 0130-2006《地质矿产实验室测试质量管理规范》的要求进行质量审核, 所测数据全部合格并满足质量管理规范

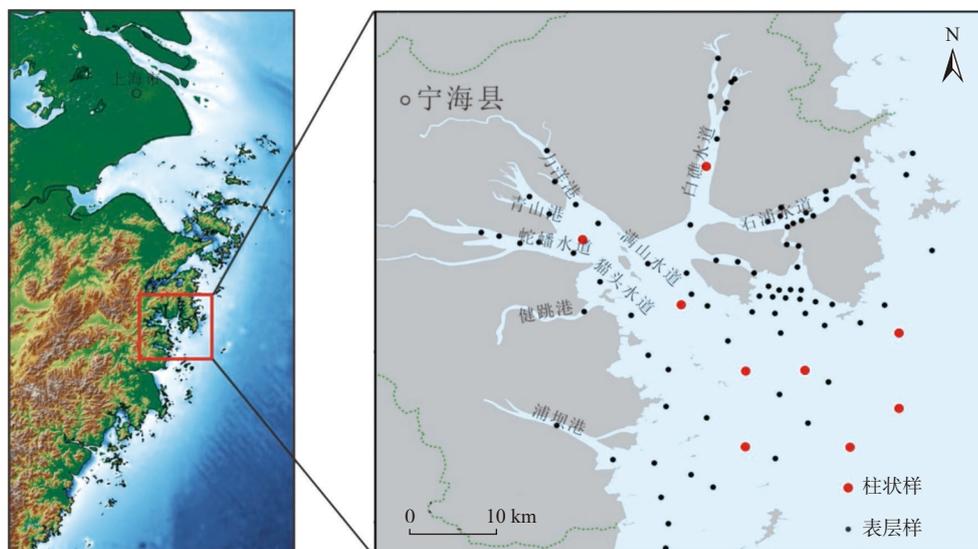


图 1 三门湾地理位置和取样站位分布

Fig.1 Geographical location of the Sanmen Bay and distribution of sampling stations

要求。

沉积速率根据<sup>210</sup>Pb和<sup>137</sup>Cs年龄与深度关系求得。根据样品干容重、总有机碳含量(TOC)和沉积速率计算该样品所在地区的有机碳埋藏速率<sup>[13,28]</sup>,其中,样品干容重根据东海陆架沉积区的粒径-干容重经验公式计算<sup>[29]</sup>。

研究区水深根据大比例尺海图数字化和最新水深调查数据整理集成,导入 Sufer 软件中进行插值,绘制岸线轮廓并导入 Arcmap 软件中,坐标系为 WGS-1984,采用 UTM 投影。在研究区域范围创建网格,设置网格大小为 200 m×200 m,结合实测数据讨论网格的赋值方法计算有机碳埋藏速率。

### 3 结果

#### 3.1 海湾沉积物粒度

海湾表层沉积物的粒度组成以粉砂为主,其次是黏土,砂的含量最低(图 2、表 1)。沉积物类型主要为粉砂和泥,含少量砂质粉砂和砂质泥。从分布上看,三门湾及湾外海域的砂含量较低,最高值仅有 16.57%,平均含量为 6.00%,在蛇蟠水道、青山港、力洋港、白礁水道和浦坝港等区域存在显著的低值

分布(图 2a)。粉砂含量较高,最高值 77.71%,最低值 56.36%,平均含量为 66.30%,2 处高值区分布于湾口和湾外海域,湾内则相对较低(图 2b);黏土含量最高值为 37.72%,最低值为 11.55%,平均含量为 27.7%,高值区主要分布于湾顶港汊和水道区域(图 2c)。海湾整体上呈由湾内向湾外粒度组分逐渐变粗的分布趋势(图 2d)。这样的分布趋势主要是由于三门湾沉积物的主要来源为长江入海输送的泥沙沉积,而沿湾河流的净流量和输沙量极小的缘故<sup>[19,22]</sup>。泥沙向湾内输送的过程中,伴随潮流动力的逐渐减弱,粗颗粒组分率先沉降在湾外至湾口区域,而细颗粒组分直至潮流继续向湾顶腹地运动、流速很低时才发生沉降,故形成了这种湾顶为淤泥质/粉砂-淤泥质潮滩,而湾口至湾外以粉砂质沉积为主的分布格局。

#### 3.2 总有机碳含量

在三门湾及湾口海域的表层沉积物中,TOC 值范围为 0.27%~1.02%,平均含量为 0.5%,湾顶 TOC 值显著高于湾口和湾外海域(图 3)。与前人研究对比,三门湾表层沉积物 TOC 值与黄东海陆架表层沉积物 TOC 值(0.1%~1.3%)相当<sup>[16]</sup>,与杭州湾表层沉积物 TOC 值(0.53%)也基本一致<sup>[30]</sup>,但低于泰

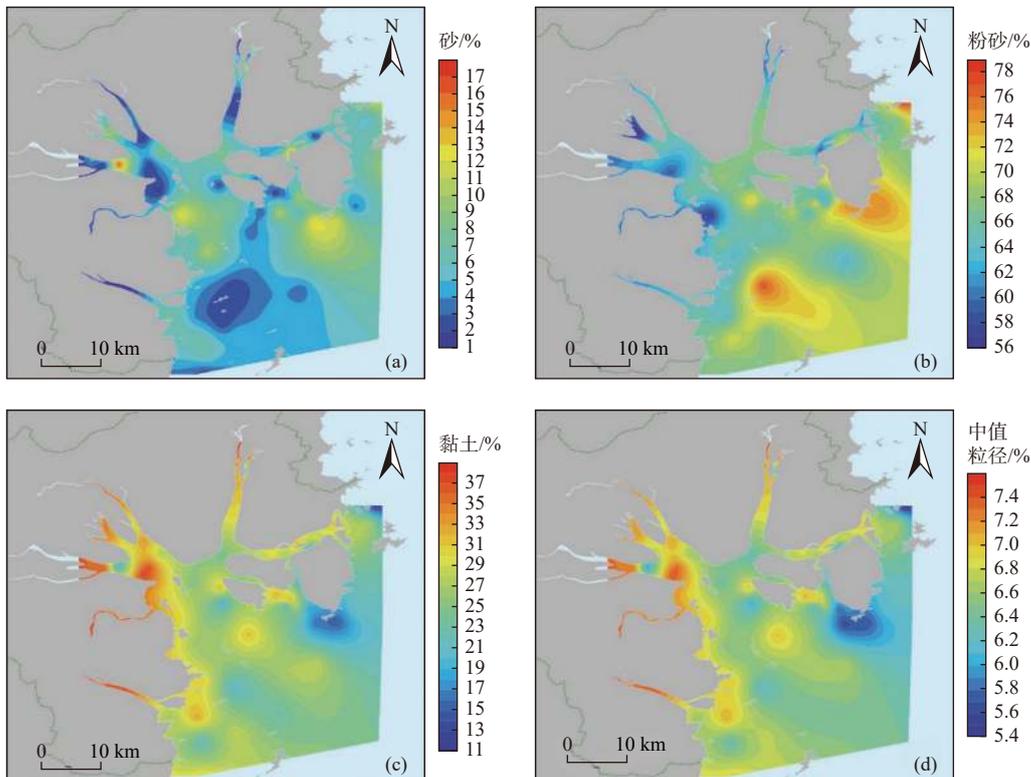


图 2 三门湾不同粒度组分含量和中值粒径分布

Fig.2 Grain components and median grain size distribution in the Sanmen Bay

表 1 三门湾表层沉积物中值粒径和各组分含量

Table 1 Median grain size and component content of surface sediments in the Sanmen Bay

	中值粒径/ $\Phi$	砂/%	粉砂/%	黏土/%
最大值	7.57	16.57	77.71	37.72
最小值	5.65	1.34	56.36	11.55
平均值	6.87	6.00	66.30	27.70

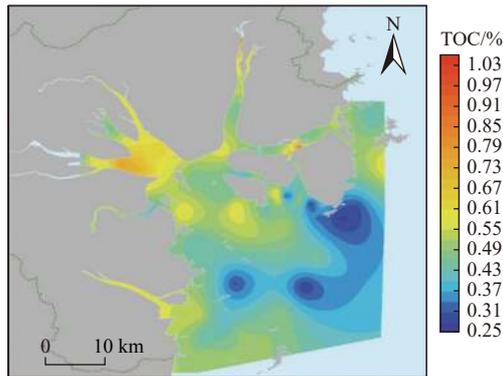


图 3 三门湾表层沉积物总有机碳含量分布

Fig.3 Distribution of TOC in surface sediments in the Sanmen Bay

国湾(2.02%)和密西西比河口(1.41%)<sup>[9,31]</sup>。由于三门湾表层沉积物以细粒组分为主,中值粒径分异度较小,因此,TOC 值和中值粒径的相关性并不显著(表 2)。此外,三门湾海水养殖分布广,有潮上带围涂池塘养殖,也有滩涂底播养殖,更有大面积的网箱水产养殖,受养殖尾水排放、网箱养殖投饵以及河流陆源输入等因素影响,进一步降低了沉积物中细颗粒组分吸附有机质对整体 TOC 分布情况的影响,使得 TOC 值与粒度参数的相关性偏低。

表 2 三门湾表层沉积物粒度和 TOC 值 Pearson 相关性分析

Table 2 The Pearson correlation between grain size and TOC content of surface sediments in the Sanmen Bay

	中值粒径	TOC	砂	粉砂	黏土
中值粒径	1				
TOC	0.389**	1			
砂	-0.545**	0.065	1		
粉砂	-0.758**	-0.520**	-0.118	1	
黏土	0.991**	0.403**	-0.530**	-0.780**	1

注:\*\*代表 $p < 0.01$ ; \*代表 $p < 0.05$ 。

### 3.3 沉积速率

根据测年结果对柱状样沉积速率进行线性拟合,获得 9 个站位的沉积速率数据(图 4)。结合收集的研究区利用<sup>210</sup>Pb 法测年获得的其他沉积速率

资料<sup>[20,22]</sup>,计算可知三门湾现代沉积速率介于 0.6~2.6 cm/a,平均值为 1.63 cm/a(图 5)。

三门湾的沉积物主要来源于长江入海物质的沿岸搬运,被进入海湾的潮流带入湾区,1964 年以前三门湾海域人类活动较少,海湾总体上处于缓慢淤积的状态<sup>[22]</sup>;但近 40 a 来人类活动日益频繁,特别是海湾围涂造地,湾内全潮平均流速显著减小,对潮滩和水道的冲淤平衡产生巨大影响,海湾淤积速率不断加快(图 4)。以湾内典型潮滩三山涂和典型水道猫头水道为例,1994—2006 年,三山涂 2 m 水深线年均外移 72 m,2006—2013 年 0 m 等高线年均外移 68 m;猫头水道 1994—2013 年 5 m 水深线内移 150~250 m,两者均呈现快速且加速淤积的趋势<sup>[22-23]</sup>。对 2003—2006 和 2006—2013 年三门湾海床的冲淤分布进行的观测和模拟表明,三门湾海床处于淤积状态,最大淤积可达 2 m 以上<sup>[32]</sup>。总体上,三门湾海域现代沉积速率的空间分布特征明显,湾顶沉积速率高于湾口和湾外,高值区分布于三山涂附近潮滩和猫头水道(图 5)。

## 4 沉积分区和网格化计算

### 4.1 沉积分区

目前,国内外学者针对陆架海、湖泊和滨海湿地的碳通量评估多利用 Kriging 插值法获取栅格,或采用具有代表性的样本为特征区域赋值的方法进行运算<sup>[12,13,28,33-36]</sup>。以往的评估方法可较为直观地反映整片研究区的有机碳沉积速率分布,但在潮滩港交错分布、沉积环境复杂多变、人类活动影响强烈、涨落潮强度显著不对称的三门湾地区难以适用。

三门湾岛屿罗列,外海波浪受岛屿阻挡难以进入,湾内波浪相对较弱,潮流是塑造三门湾地貌的主要控制力量<sup>[21-22]</sup>,水下地形地貌能够直观地反映湾内的潮流特征,揭示沉积动力条件。尽管近年来在大规模围填海工程的影响下,湾内总纳潮量和全湾平均流速有所降低<sup>[27]</sup>,但在湾内的深水水道这一特殊地形对潮流的约束作用下,水流在落潮时加速向水道内集中聚拢,使得水道内部的流速在落潮时仍然较大,和潮滩等浅水区域的水动力环境存在较为显著的差异。除此之外,浙江沿海时有受到台风天气影响<sup>[26]</sup>,因此,不仅需要常规涨落潮对海湾的塑造效果,也有必要探讨台风引起的风暴潮对

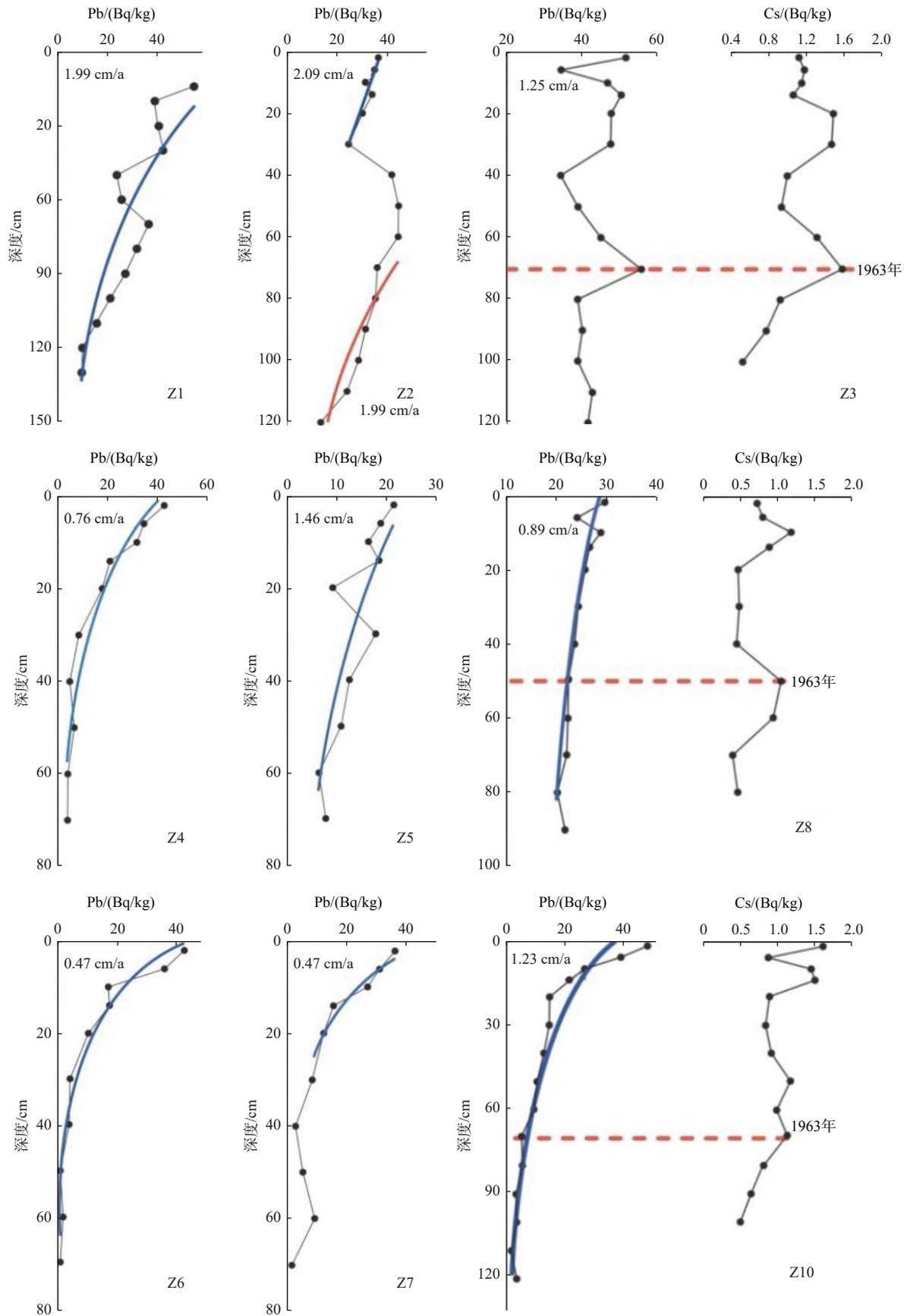
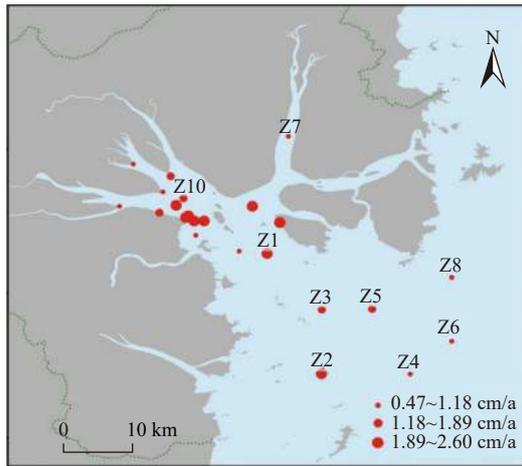


图4 三门湾柱状样  $^{210}\text{Pb}$  和  $^{137}\text{Cs}$  放射性活度垂向分布

Fig.4 Vertical distribution of  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{137}\text{Cs}$  radioactivity in the Sanmen Bay columnar samples



部分数据来自文献 [20]  
图 5 三门湾沉积速率分布

Fig.5 Distribution of sedimentation rate in the Sanmen Bay

湾内表层沉积物的扰动情况。风暴潮会使三门湾内的表层沉积物冲淤状态发生短暂而显著的变化, 且由于风暴浪基面的深度相对固定, 因此不同水深条件的海底沉积物对风暴潮的冲淤响应截然不同。杨辉等<sup>[25]</sup>通过分析猫头深潭及附近海域冲淤演变规律及动力机制认为, 风暴潮引起的骤淤是猫头水道的主要淤积方式。以 2021 年 7 月登陆浙江省的超强台风“烟花”的影响为例, 在台风过后 3 天, 大片滩涂发生了轻微的冲刷, 而猫头深潭和附近深水区却发生明显淤积, 最大淤积达 15 cm<sup>[26]</sup>。由此可知, 潮滩等浅水区域与深水水道区域之间的沉积环境存在显著差异。因此, 在进行海底沉积物的有关统计和计算时, 有必要结合水深地形条件加以区分, 避免因使用过于平滑的插值方式而难以反映沉积环境在空间上的变化。考虑以上因素, 结合三门湾水下地貌, 主要依据湾顶 6 m 等深线及湾口 10 m 等深线等将海湾划分为浅水区、深水水道和湾口水下岸坡 3 类分区(图 6)。其中, 浅水区符合滨海湿地的定义(包括滩涂湿地和浅海湿地)<sup>[37]</sup>, 6~10 m 的区域主要位于港湾水道的深水区 and 海岛之间的海域, 水下岸坡区则与陆架岸坡区相连, 相对平缓且与外海水动力和沉积物交换更为频繁。

为检验分区的合理性, 使用 SPSS 软件对全海湾和落在海湾不同分区内数据点的 TOC 含量分别进行正态分布检验, 采用方法为 Kolmogorov-Smirnov 单一样本检验法<sup>[38-39]</sup>, 结果见表 3。

由正态分布检验结果可知, 全海湾总的 TOC 值并不符合正态分布规律, 而分区后分布于各区域的采样点的 TOC 值则能够通过 Kolmogorov-Smirnov

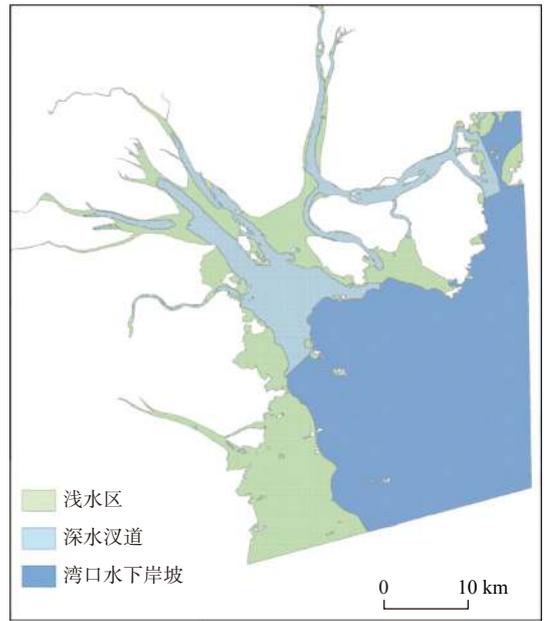


图 6 三门湾 3 类沉积碳汇分区

Fig.6 Division of three types of carbon sink in the Sanmen Bay

表 3 三门湾表层沉积物 TOC 含量正态分布检验结果

Table 3 Test of normal distribution of TOC content in surface sediments of the Sanmen Bay

区域	平均值	标准差	显著性	决策
全海湾	0.50	0.119 35	0.018 <sup>a</sup>	非正态分布
浅水区	0.50	0.091 72	0.200 <sup>ab</sup>	正态分布
深水水道	0.55	0.096 52	0.137 <sup>a</sup>	正态分布
湾口水下岸坡	0.42	0.106 01	0.200 <sup>ab</sup>	正态分布

注: a为里氏修正后; b为真显著性的下限。

单一样本检验(表 3), 表明这一海湾分区方式使得表层沉积物参数具有统计意义和合理性。

#### 4.2 网格化数值运算

在 Arcmap 软件中导入海湾分区和相应数据点, 创建由研究区域轮廓为掩膜裁剪的 200 m×200 m 网格。网格化方法可有效整合采样密度不一致的多种参数, 有利于统计并直观地展示海湾沉积物的粒度参数、TOC 值、沉积速率、沉积物类型和有机碳沉积通量等重要信息的分布情况。由于分类后的分区数据点相较于全海湾数据点已经具备了更利于统计的正态分布特性, 基于地理学第一定律“相近相似”的原则<sup>[40]</sup>, 本文利用 IDW(反距离加权)空间插值算法将离散点的测量数据转换为连续的数据曲面。该方法认为任何一个观测值都对邻近的区域有影响, 且影响的大小随距离的增大而减小, 运算简便, 适用范围广, 是一种准确预测的算法模

型<sup>[41]</sup>。基于该插值方法,在三门湾网格中分别计算了浅水区、深水水道和湾口水下岸坡区的有机碳埋

藏速率,并进行了汇总,进而求得整个三门湾的有机碳埋藏速率,具体结果见图7和表4。

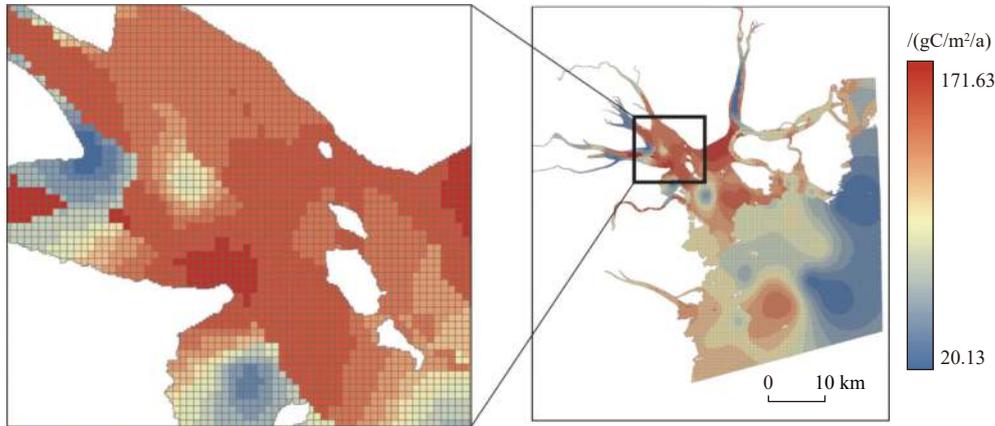


图7 三门湾有机碳埋藏速率

Fig.7 Organic carbon deposition flux in the Sanmen Bay

表4 基于海湾分区的有机碳埋藏速率

Table 4 Organic carbon deposition flux in each bay division in the Sanmen Bay

区域	面积/km <sup>2</sup>	单位面积有机碳沉积通量/(gC·m <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	区域有机碳沉积通量/(GgC/a)
浅水区	413.89	74.02	30.79
深水水道	230.93	80.48	18.72
湾口水下岸坡	762.51	52.93	40.21
三门湾全区	1 407.33	64.04	89.71

计算结果显示,研究区总的单位面积有机碳埋藏速率为  $64.04 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ,结合区域面积可计算区域有机碳年沉积量  $89.71 \text{ GgC}$ (表4)。其中,湾内浅水区和深水水道区域单位面积有机碳埋藏速率较高,分别为  $74.02$  和  $80.48 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ,显著高于湾口水下岸坡区域(图7、表4)。

## 5 结论

本文基于2019年在浙江省三门湾开展的海岸带综合地质调查获得的表层沉积物粒度、TOC含量和沉积速率数据,探索了一种适用于典型海湾地区的地质碳汇网格化计算方法,形成主要认识如下:

(1)三门湾表层沉积物类型呈现出由湾内向湾外粒度变粗的趋势,中值粒径分布范围  $5.65\Phi\sim 7.57\Phi$ ,平均值为  $6.87\Phi$ ; TOC值分布范围为  $0.27\%\sim 1.02\%$ ,平均含量为  $0.5\%$ ,两者的 Pearson 相关系数为  $0.389$ ,体现出一定的相关性,但分异度较小的粒度和沿岸人类活动的影响使其相关性有所下降。海湾沉积速率范围  $0.47\sim 2.60 \text{ cm/a}$ ,湾内高于湾外。

影响沉积速率的主要因素为潮流主控的泥沙输送、围垦导致的海床淤积以及台风引起的风暴骤淤。

(2)基于潮流为三门湾内水下地貌的主控因素这一认识,依据水深地形将沉积环境复杂多变的海湾划分为浅水区、深水水道和湾口水下岸坡3类区域,各区参数符合正态分布规律。通过分区的反距离权重插值方法较好地解决了海湾地区常规空间插值运算的精确度问题。

(3)海湾分区的地质碳汇网格化数值运算结果表明,研究区单位面积有机碳埋藏速率为  $64.04 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ,区域有机碳年沉积量为  $89.71 \text{ GgC}$ 。湾内浅水区和深水水道区域单位面积有机碳埋藏速率较高,分别为  $74.02$  和  $80.48 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ,湾口水下区域为  $52.93 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。

### 参考文献:

- [1] SABINE C L, FEELY R A, GRUBER N J. The oceanic sink for anthropogenic CO<sub>2</sub>[J]. *Science*, 2004, 305(5682): 367-371.
- [2] BOYD P W, CLAUSTRE H, LEVY M, et al. Multi-faceted particle pumps drive carbon sequestration in the ocean[J]. *Nature*, 2019, 568(7752): 327-335.
- [3] CAI W J. Estuarine and coastal ocean carbon paradox: CO<sub>2</sub> sinks

- or sites of terrestrial carbon incineration?[J]. *Annual Review of Marine Science*, 2011, 3(1): 123.
- [4] CHEN T A C, HUANG T H, CHEN Y T, et al. Air-sea exchanges of coin the world's coastal seas[J]. *Biogeosciences*, 2013, 10: 6509-6544.
- [5] JIAO N Z, TANG K, CAI H Y, et al. Increasing the microbial carbon sink in the sea by reducing chemical fertilization on the land. [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2010, 9(1): 75.
- [6] HEDGES J I, KEIL R G. Sedimentary organic matter preservation: an assessment and speculative synthesis[J]. *Marine Chemistry*, 1995, 49(2/3): 123-126.
- [7] 戴民汉, 翟惟东, 鲁中明, 等. 中国区域碳循环研究进展与展望[J]. *地球科学进展*, 2004, 19(1): 120-130.
- [8] 赵美训, 丁杨, 于蒙. 中国边缘海沉积有机质来源及其碳汇意义[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2017, 47(9): 70-76.
- [9] 白亚之, 乔淑卿, 吴斌, 等. 泰国湾百年来有机碳埋藏记录及环境响应[J]. *沉积学报*, 2022, 40(2): 484-493.
- [10] 邢庆会, 于彩芬, 廖国祥, 等. 浅析我国海岸带蓝碳应对气候变化的发展研究[J]. *海洋环境科学*, 2022, 41(1): 1-7.
- [11] 焦念志, 梁彦韬, 张永雨, 等. 中国海及邻近区域碳库与通量综合分析[J]. *中国科学: 地球科学*, 2018, 48(11): 1393-1421.
- [12] 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.
- [13] 胡利民. 大河控制性影响下的陆架海沉积有机质的“源—汇”作用[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
- [14] 张明宇, 常鑫, 胡利民, 等. 东海内陆架有机碳的源—汇过程及其沉积记录[J]. *沉积学报*, 2021, 39(3): 593-609.
- [15] HU L M, SHI X F, BAI Y Z, et al. Recent organic carbon sequestration in the shelf sediments of the Bohai Sea and Yellow Sea, China[J]. *Journal of Marine Systems*, 2016, 155: 50-58.
- [16] DENG B, ZHANG J, WU Y. Recent sediment accumulation and carbon burial in the East China Sea[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2006, 20(3): 1-12.
- [17] 石学法, 胡利民, 乔淑卿, 等. 中国东部陆架海沉积有机碳研究进展: 来源、输运与埋藏[J]. *海洋科学进展*, 2016, 34(3): 313-327.
- [18] 许建平, 杨士瑛. 三门湾海洋生态环境概述[J]. *能源工程*, 1992(2): 28-30.
- [19] 刘晓凤, 段晓勇, 田元, 等. 三门湾水体营养盐变化及其对人类活动的响应[J]. *海洋地质前沿*, 2021, 37(5): 46-56.
- [20] 夏小明. 三门湾潮汐汉道系统的稳定性[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [21] 胡方西, 曹沛奎. 三门湾潮波运动特征及其与地貌发育的关系[J]. *海洋与湖沼*, 1981(3): 225-234.
- [22] 杨士瑛. 三门湾自然环境特征与资源可持续利用[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2018.
- [23] 穆锦斌. 三门核电3、4号机组海域使用论证岸滩稳定性分析和数值计算专题之一: 岸滩稳定性分析报告[R]. 杭州: 浙江省水利河口研究院, 2014.
- [24] 谢钦春, 马黎明, 李伯根, 等. 浙江三门湾猫头深潭风暴快速沉积研究[J]. *海洋学报*, 2001, 23(5): 78-86.
- [25] 杨辉, 谢钦春, 李伯根, 等. 三门湾猫头深潭及附近海域底床冲淤演变及其动力机制[J]. *东海海洋*, 2003, 21(2): 13-22.
- [26] 应超, 王乐乐, 黄世昌. 三门湾猫头深潭对“烟花”台风的冲淤响应[J]. *水利水电工程学报*, 2021(6): 43-50.
- [27] 姚炎明. 三门湾海洋环境容量及污染物总量控制研究[M]. 北京: 海洋出版社, 2015.
- [28] 鲁青原. 辽河滨海芦苇湿地有机碳的埋藏过程及控制因素[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- [29] 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.
- [30] 章伟艳, 金海燕, 张富元, 等. 长江口—杭州湾及其邻近海域不同粒级沉积有机碳分布特征[J]. *地球科学进展*, 2009, 24(11): 1202-1209.
- [31] 赵军. 长江口与密西西比河口沉积有机碳生物地球化学比较研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
- [32] 陈培雄, 张鹤, 周鑫, 等. 三门湾近期围填海工程对海洋环境综合影响分析[J]. *绿色科技*, 2018(4): 104-109.
- [33] KASTOWSKI M, HINDERER M, VECSEI A. Long-term carbon burial in European lakes: analysis and estimate[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2011, 25(3): 1-12.
- [34] XU H, LAN J, LIU B, et al. Modern carbon burial in Lake Qinghai, China[J]. *Applied Geochemistry*, 2013, 39: 150-155.
- [35] 宋以龙, 陈敬安, 杨海全, 等. 云南抚仙湖沉积物有机质来源与时空变化特征[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2016, 35(4): 618-624, 607.
- [36] 张凤菊, 薛滨, 姚书春. 中全新世以来呼伦湖沉积物碳埋藏及其影响因素分析[J]. *湖泊科学*, 2018, 30(1): 234-244.
- [37] 陆健健. 中国滨海湿地的分类[J]. *环境导报*, 1996(1): 1-2.
- [38] 刘庆武, 胡志艳. 如何用SPSS、SAS统计软件进行正态性检验[J]. *湘南学院学报*, 2005, 7(3): 56-58.
- [39] 杨斌. 正态性检验的几种方法比较[J]. *统计与决策*, 2015(14): 72-74.
- [40] TOBLER W R. A computer movie simulating urban growth in the Detroit Region[J]. *Economic Geography*, 1970, 46(2): 234-240.
- [41] 李新, 程国栋, 卢玲. 空间内插方法比较[J]. *地球科学进展*, 2000, 15(3): 260-265.

## Grid calculation of geological carbon sink capacity in coastal bays: a case study of Sanmen Bay

ZHANG Xu<sup>1,2</sup>, TIAN Yuan<sup>2</sup>, WANG Jianqiang<sup>3</sup>, ZHANG Penghui<sup>1</sup>,  
CHEN Bin<sup>2</sup>, TIAN Yuqing<sup>2</sup>, DONG Chao<sup>2</sup>, YIN Ping<sup>2\*</sup>

(1 College of Oceanography, Hohai University, Nanjing 210024, China; 2 Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266237, China; 3 Zhejiang Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Ningbo 315012, China)

**Abstract:** The burial rate of organic carbon in a bay is closely related to its geological carbon sink capacity. It is an important challenge to evaluate the ocean carbon sink capacity to support the “dual carbon” goal (carbon peaking and carbon neutrality). Taking the surface sediments and sediment core samples collected in 2019 in the Sanmen Bay, Zhejiang Province as the research object, the typical characteristics of the complex seabed topography, strong sea-land interaction, and active human activities in the bay area were studied comprehensively using particle size analysis, organic geochemical analysis, and <sup>210</sup>Pb and <sup>137</sup>Cs dating methods. A carbon sink grid calculation method based on the division of bathymetric topographic in the study area was explored, and the bay was divided into shallow tidal flat, deep-water channels, and underwater plain. In addition, the burial rates of organic carbon in different sedimentary environments were obtained. Therefore, a geological carbon sink evaluation model of the Sanmen Bay was established by using inverse distance weighted spatial interpolation. The calculation results show that the burial rate of organic carbon in the study area was 64.04 gC/m<sup>2</sup>·a. The annual buried amount of organic carbon was 89.71 GgC. Among them, the burial rate of organic carbon in the shallow tidal flat and deep-water channel areas was relatively high at 74.02 and 80.48 gC/m<sup>2</sup>·a, respectively, and that in the underwater plain area was 52.93 gC/m<sup>2</sup>·a.

**Key words:** Sanmen Bay; geological carbon sink; gridding; burial rate of organic carbon