

刘玉斌, 宋永东, 张建兴, 等. 黑石岛附近海域地形地貌及表层沉积物分布特征分析[J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(8): 60-69.

LIU Yubin, SONG Yongdong, ZHANG Jianxing, et al. The characteristics of topography and surface sediment distribution near Heishi Island, Shandong Peninsula[J]. Marine Geology Frontiers, 2023, 39(8): 60-69.

# 黑石岛附近海域地形地貌及 表层沉积物分布特征分析

刘玉斌<sup>1,3</sup>, 宋永东<sup>1,2</sup>, 张建兴<sup>1,2</sup>, 庄丽华<sup>1,2</sup>, 栾振东<sup>1,2,3\*</sup>, 阎军<sup>1,2</sup>

(1 中国科学院海洋研究所海洋地质与环境重点实验室, 青岛 266071; 2 中国科学院海洋大科学研究中心, 青岛 266071;  
3 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 黑石岛附近海域位于山东威海黑泥湾东部, 沉积环境复杂多变, 多种因素控制表层沉积物分布, 形成多种发育演化模式。利用单波束测深系统、浅地层剖面系统、表层沉积物取样、海流观测和实验室沉积物粒度测试、资料综合解释等方法, 于 2021 年 9—11 月对研究海域开展综合地质环境调查。通过调查数据分析研究区水深地形特征、浅地层结构特征以及表层沉积物分布特征, 并从多个角度揭示该海域沉积物分布特征的控制因素和成因。研究发现: 目标海域水深介于 3~24 m, 平均水深约 14 m, 西部浅、东部深, 存在陡坡, 随着水深的增加坡度逐渐变缓, 地貌类型主要以水下侵蚀岸坡为主; 海底浅地层声学反射界面清晰, 可全局跟踪, 淤积厚度为 0.5~2 m, 沉积层厚度东西存在差异但相对稳定; 表层沉积物类型多样, 大致围绕黑石岛呈环带状分布, 离岛方向上依次为粉砂、砾石、泥质砾; 自西向东表层沉积物粒度逐渐减小, 分选性变好。研究区表层沉积物分布受区域地形地貌和水动力条件的共同影响。

**关键词:** 黑石岛; 海底地形地貌; 表层沉积物; 分布特征; 影响因素

中图分类号: P736 文献标识码: A DOI: 10.16028/j.1009-2722.2022.071

## 0 引言

随着中国海洋强国战略的推进, 海洋工程建设与日俱增。综合地质环境评估是海洋工程建设过程中最基础的工作, 对保障安全和维护海洋环境稳定具有重要意义。黑石岛附近海域位于山东省威海市黑泥湾东部, 是中国北方重要的筏架式养殖基地。近年来, 筏架式养殖区和部分海上工程建设使得黑石岛附近海域的沉积动力环境(包括水动力条

件、地形地貌、海平面变化等)发生改变。很多学者对黑石岛附近海域的水下地貌形态成因、水动力机制、悬浮体质量浓度分布、沉积物粒度分布、沉积物中的重金属污染、环境效应等进行了广泛研究<sup>[1-7]</sup>, 但结合近岸岛礁周边海域地形地貌形态、水动力环境条件以及筏架式养殖区等综合因素探讨表层沉积物分布特征的研究相对较少。本文利用单波束测深系统、浅地层剖面系统、海流观测、表层沉积物取样和实验室筛析、激光粒度测试、资料综合解释等方法, 对研究海域地形、浅地层剖面、潮汐、海流、表层沉积物等地质环境要素进行综合调查。在前人研究成果的基础上, 结合近岸岛礁周边海域地形地貌形态、水动力环境条件等综合影响因素, 分析研究区水深地形特征、浅地层结构特征及表层沉积物分布特征, 从多个角度揭示该海域沉积物分布特征的控制因素和成因, 对认识黑石岛附近海域沉积动力特征以及海上工程开发、海洋牧场建

收稿日期: 2022-03-17

资助项目: 中国科学院关键技术人才项目(2018); 中国科学院科技服务网络计划(STS)区域重点项目(KFJ-STZ-QYZD-189)

作者简介: 刘玉斌(1998—), 男, 在读硕士, 主要从事基于 ROV 的声光集成探测技术方面的研究工作。E-mail: 1158200867@qq.com

\* 通讯作者: 栾振东(1976—), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事深海探测技术及海底地形地貌方面的研究工作。E-mail: luan@qdio.ac.cn

设具有一定的指导意义。

## 1 研究区概况

黑泥湾(36°55′—37°02′ N、122°31′—122°37′ E)是一个小型开敞海湾,位于石岛湾以北、桑沟湾以南(图 1),西为山东半岛陆地,东向濒临黄海,中部岸线向外突出。黑泥湾南部的镆铳岛和北部的楮岛 2 个巨大的连岛沙坝很大程度上影响了本海域的沉积作用,使其成为了一个相对独立的沉积单元<sup>[8]</sup>。从镆铳岛向北到楮岛,海岸堆积地貌较为发育,绝大部分海岸为砂质海岸,仅在镆铳岛、楮岛迎浪岸等几处岬角处为基岩海岸<sup>[9]</sup>。黑泥湾内基本没有河流汇入,仅在丘陵地带发育有小规模冲沟,长度较短,流域面积较小。湾内水下地形较为平缓,分布大量养殖筏架,且有黑石岛、老铁石岛等基岩礁石裸露,基岩礁石周围及南北侧岬角处水下岸坡坡度较大。

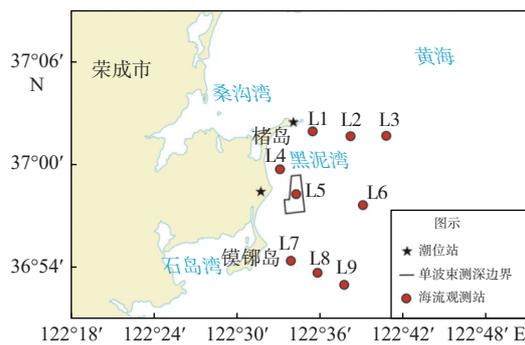


图 1 研究区所在地理位置和范围

Fig.1 Geographical locations of the study area

研究区海浪以风浪为主,全年风浪频率为 98%,涌浪频率占 26%;常浪向主要为 SW 向,年出现频率为 8%;次常浪向为 SSW 向、N 向,年出现频率为

7%;强浪向为 SSE 向,最大波高 6.8 m,次强浪向为 SE 向和 ESE 向,最大波高 6.3 m<sup>[10]</sup>。研究区内潮汐以不规则半日潮为主,潮流为往复流,自北向南有潮差增大、潮汐作用加强之势<sup>[11]</sup>。受季风影响,研究区海岸带气候有明显的季节变化。冬季盛行偏北风,气候干冷;夏季盛行东南风,是台风活动最频繁的季节,降水多;春秋两季为过渡季节,且春季是一年中大风最多的季节<sup>[12]</sup>。

## 2 资料来源与研究方法

为了解研究海域内地形地貌特征、浅地层特征、沉积物分布特征和水动力环境,中国科学院海洋研究所于 2021 年 9—11 月对研究区开展了声学测量、同步潮汐观测、表层沉积物取样和海流观测等工作(所采用的设备和软件见表 1)。

潮位站布设在楮岛和黑泥湾西岸(图 1),实时测量潮汐数据。单波束测深的主测线按垂直于等深线的方向布设,间距为 50 m,联络线垂直于主测线(图 2),间距为 500 m。获取调查海域精确水深地形数据后,利用 CARIS HIPS 11.2 等软件进行同步潮位数据改正和声速数据校正等数据处理,通过 Surfer、Global Mapper 等绘图软件进行水深地形形成图,展示研究区地形特征。浅剖测线以老铁石岛、黑石岛为中心向周围扩散(图 2),覆盖整个研究区。利用声学数据专业处理软件 Sonarwiz 7.0 通过频带宽门限设置、调整时变增益、去除水体和机械噪音、调整压缩比和平滑等精细化处理手段,对采集的 11 条浅地层剖面原始数据进行处理并成图。

在黑泥湾内选取 9 个站点点对海流进行同步观测(图 1),分别在大潮、中潮和小潮期间连续观测,

表 1 调查所采用的设备和软件

Table 1 The equipment and software used in the survey

声学探测设备及后处理软件	定位系统	美国 Trimble 差分 GPS 定位系统
	潮汐仪	日本 ALEC 潮汐仪
	导航系统	HYPACK 2020 导航系统
	声速剖面仪	加拿大 AML 声速剖面仪
	单波束测深系统	无锡海鹰 HY1601 单波束回声测深系统
	浅地层剖面系统	德国 Innomar SES-2000 参量阵浅地层剖面系统
海流观测设备	后处理软件	CARIS HIPS 11.2、Surfer、Global Mapper、Sonarwiz 7.0
	海流计	挪威阔龙海流计
	声学多普勒流速剖面仪	美国 RDI-300K 声学多普勒流速剖面仪
沉积物取样、分析设备	取样器	自制锚式取样器
	激光粒度仪	法国 CILAS 960L 激光粒度分析仪

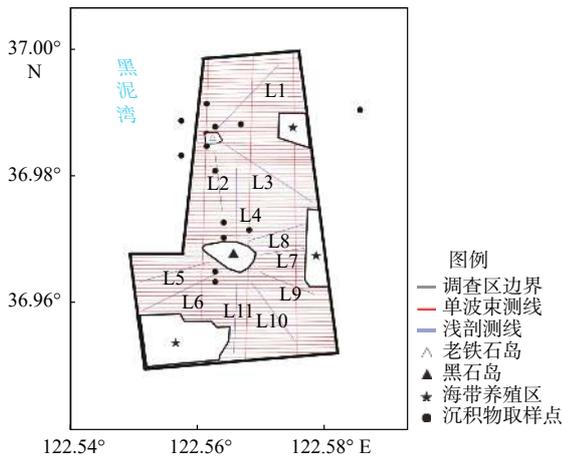


图2 研究区测线布设方案及沉积物取样点位

Fig.2 The survey line layout and sediment sampling sites in the study area

观测时间为 27 h, 每小时测量 1 次, 每个潮周期分别在涨急、涨憩、落急、落憩典型时刻加密观测 1 次。小潮观测时段为 2021 年 10 月 9 日 15 时—10 日 17 时; 中潮观测时段为 2021 年 10 月 17 日 12 时—18 日 14 时; 大潮观测时段为 2021 年 10 月 13 日 20 时—14 日 22 时。

根据浅地层剖面测量数据, 在黑石岛附近海域选取 14 个站位(图 2)进行表层沉积物取样并处理, 然后依据海洋调查规范(GB/T 12763.8—2007)采用筛析法和激光粒度法进行粒度分析。沉积物分类和命名方法采用 Folk 沉积物粒度三角图解法, 根据沉积物是否含砾, 将沉积物分别在 2 个三角形图解上进行分类<sup>[13]</sup>。表层沉积物粒级标准采用的是尤登-温德华氏等比制  $\Phi$  值粒级标准<sup>[14]</sup>。沉积物粒度参数(中值粒径、分选系数、峰态、稳态)依据 Folk-Ward 公式计算得到<sup>[15]</sup>。

### 3 地形地貌特征

#### 3.1 水深地形特征

研究区地形起伏较大, 最大水深处为 24 m, 最浅处不足 3 m, 平均 14 m。等深线沿 NE—SW 向延伸, 在东南角存在水深最大值。西部水深较浅, 最大水深不足 10 m, 海底地形表现为平缓的近岸缓坡, 整体地势平坦; 中部存在陡坡, 南部坡度较北部更大; 东部水体不断加深, 坡度逐渐变缓, 出现水深最大值。

研究区北部为老铁石岛附近海域, 其特点是等深线较稀疏, 自西向东水深均匀变化。西侧地形平

坦微有小规模起伏, 平均坡度约为 0.9%, 最深处约为 21 m。研究区南部为黑石岛附近海域, 等深线在中部存在密集区, 东西两侧微有地形起伏。中部存在陡坡, 坡度最高可达 7%。西部地形存在凹陷, 东部等深线稀疏, 地形趋于平坦。

根据研究区地貌的形态展布特征和几何参数, 将位于海岸地貌的研究区海底地貌细划分为水下侵蚀岸坡、海蚀阶地等三级地貌。在黑石岛和老铁石岛附近海域受到了较强的海洋动力高能侵蚀作用, 从而形成了水下侵蚀岸坡, 岸坡陡且窄, 沉积物主要由砂、砾质组成。在研究区的西部存在海蚀阶地地貌, 岛礁长期受携带泥沙的激浪磨蚀, 在低潮时部分出露海面, 高潮没于海面之下。

根据研究区的地形特征, 按照垂直于等深线的原则在研究区选取了 3 处地形剖面(图 3), 所选剖面(图 4)分别对应了研究区北部老铁石岛附近海底地形、研究区中部两岛中间位置的海底地形、研究区南部黑石岛附近海底地形。

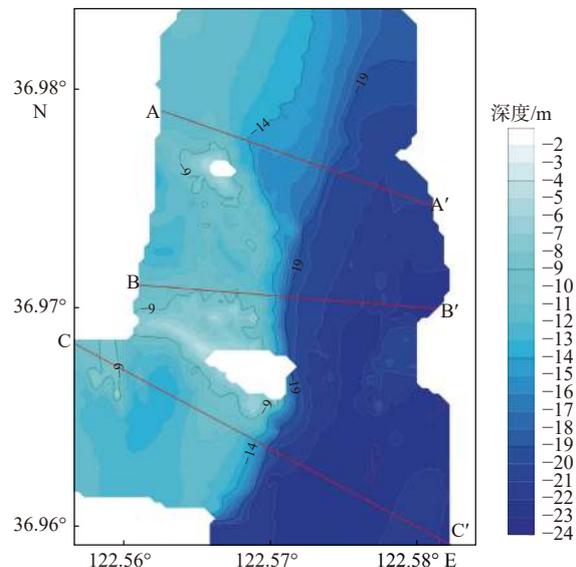


图3 研究区等深线图

Fig.3 Contour map of the study area

#### (1) AA'剖面

AA'剖面表示研究区北部老铁石岛附近海底地形, 整体表现为西高东低, 呈阶梯状分级递减。在西部水深不足 10 m, 地势平坦; 往东出现斜坡, 平均坡度约为 2.33%; 接下来相对平坦, 微有起伏; 之后出现斜坡, 平均坡度为 3.07%, 且呈现出先缓后陡的变化趋势; 达到最大水深处之后趋于平坦。

#### (2) BB'剖面

BB'是研究区中部的地形剖面。西部有较多的凸起和凹陷, 往东坡度逐渐变陡, 平均坡度约 3.99%,

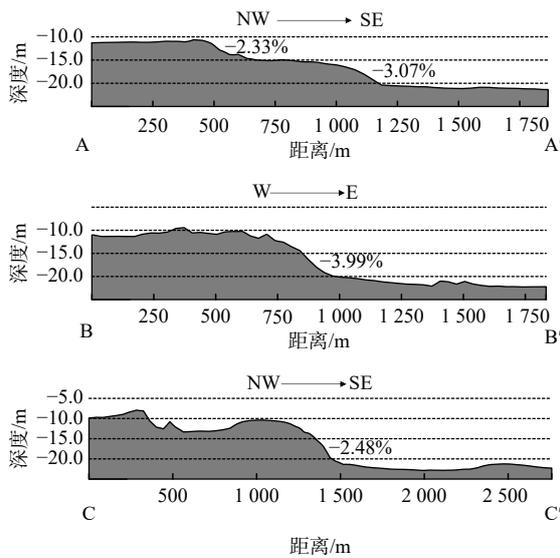


图 4 研究区典型地形剖面

Fig.4 Typical terrain profiles of the study area

在达到水深 20 m 之后坡度渐缓, 之后趋于平坦, 微有地形起伏。

### (3) CC'剖面

CC'是黑石岛附近的海底地形剖面。受黑石岛及其周边基岩的影响, 西部呈下凹状, 地形起伏不平, 最大变化可达 10 m; 中部存在平均坡度约为 2.48% 的陡坡, 直到水深为 20 m, 坡度逐渐变缓, 之后趋于平坦; 东部有较小的凸起, 发育有小型呈扁平状的海丘。

## 3.2 浅地层剖面特征

为了更好地选取表层沉积物取样站位, 利用高精度浅地层剖面系统对海底浅层沉积物的厚度及分布进行调查, 根据浅地层剖面数据分析结果, 将研究区浅地层剖面划分出 2 个声学反射层 R0 和 R1。其中, R0 声学反射层表示海底面, R1 声学反射层表示探测到的淤积层底界面, 识别出的 2 个声学反射界面都具有高振幅、强反射等声阻抗反射界面典型特征, 强反射界面在整个研究区都有明显分布, 易于识别, 可全局跟踪。

为表征黑石岛、老铁石岛周边的浅地层结构特征, 选取 L1、L2、L7、L8 共 4 条典型浅地层剖面进行分析(图 2)。其中, L1、L2 位于研究区北部老铁石岛附近的浅水区(图 5a、b), 剖面近 SN 走向; L7、L8 位于研究区南部黑石岛附近的深水区(图 5c、d), 剖面近 EW 走向。4 条浅地层剖面展示出 2 种不同特征的浅地层剖面结构(图 5)。根据浅地层剖面的解释结果, 结合水深地形、表层沉积物样品、海流观

测数据进行综合分析。分析结果表明, 老铁石岛附近的浅水区浅地层剖面显示水深范围为 10~12 m, 微有地形起伏, 沉积物厚度约为 1~1.5 m, 厚度局部分布不均, 反映该区具有较强的水动力环境; 南部黑石岛附近深水区浅地层剖面显示水深范围为 19~21 m, 海底相对平缓, 沉积物厚度约为 2 m 且均匀分布, 综合分析认为该区域沉积动力环境相对较弱。

## 4 表层沉积物分布特征

### 4.1 沉积物组分含量及命名

根据浅地层剖面数据资料选取研究区 14 个表层沉积物取样站位。其中, 5 个在黑石岛附近, 8 个在老铁石岛附近, 1 个在研究区东北部深水区(图 2、表 2)。通过 Folk 沉积物分类方法, 将所取的表层沉积物分为砾石、泥质砾、砾质泥、砾质泥质砂、砂质粉砂、粉砂 6 类, 其中砾石、砾质泥、砾质泥质砂、粉砂各有 3 处(表 2、图 6)。

临近黑石岛南北两侧取样点 HS02 和 HS01 的表层沉积物为粉砂, 再往南北扩展 HS05 和 HS03 表层沉积物为砾石, 在黑石岛东北方向上的取样点 HS04 为泥质砾。该区域沉积物类型大致围绕黑石岛呈环带状分布, 依次为粉砂、砾石、泥质砾。老铁石岛附近海域的沉积物类型复杂: 临近老铁石岛南侧的 LT01 和位于老铁石岛西北和西南方向上的 LT04、LT05 为砾质泥质砂; 老铁石岛北侧的 LT02 为砂质粉砂; 老铁石岛北部的 LT03 和 LT06 为砾质泥; 老铁石岛东北方向上水深较深处的 LT07 为粉砂; 老铁石岛南部的 LT08 为砾石。整体来看, 老铁石岛周围沉积物中大都含有少量砾石, 老铁石岛南部以砾石为主。

### 4.2 沉积物粒径参数空间分布

为了解研究区沉积物的分布特征, 对沉积物样品进行粒度参数分析。粒度参数主要有中值粒径、分选系数、偏态和峰度, 在研究区范围内的分布均有显著特征(图 7)。中值粒径可以反映沉积介质的平均动能, 一般来说粗粒沉积常见于高能环境, 细粒沉积常见于低能环境<sup>[16]</sup>。研究区内中值粒径主要表现为以黑石岛和老铁石岛的中部海域为中心向四周呈发散状减小, 局部表现为自西部高地形向

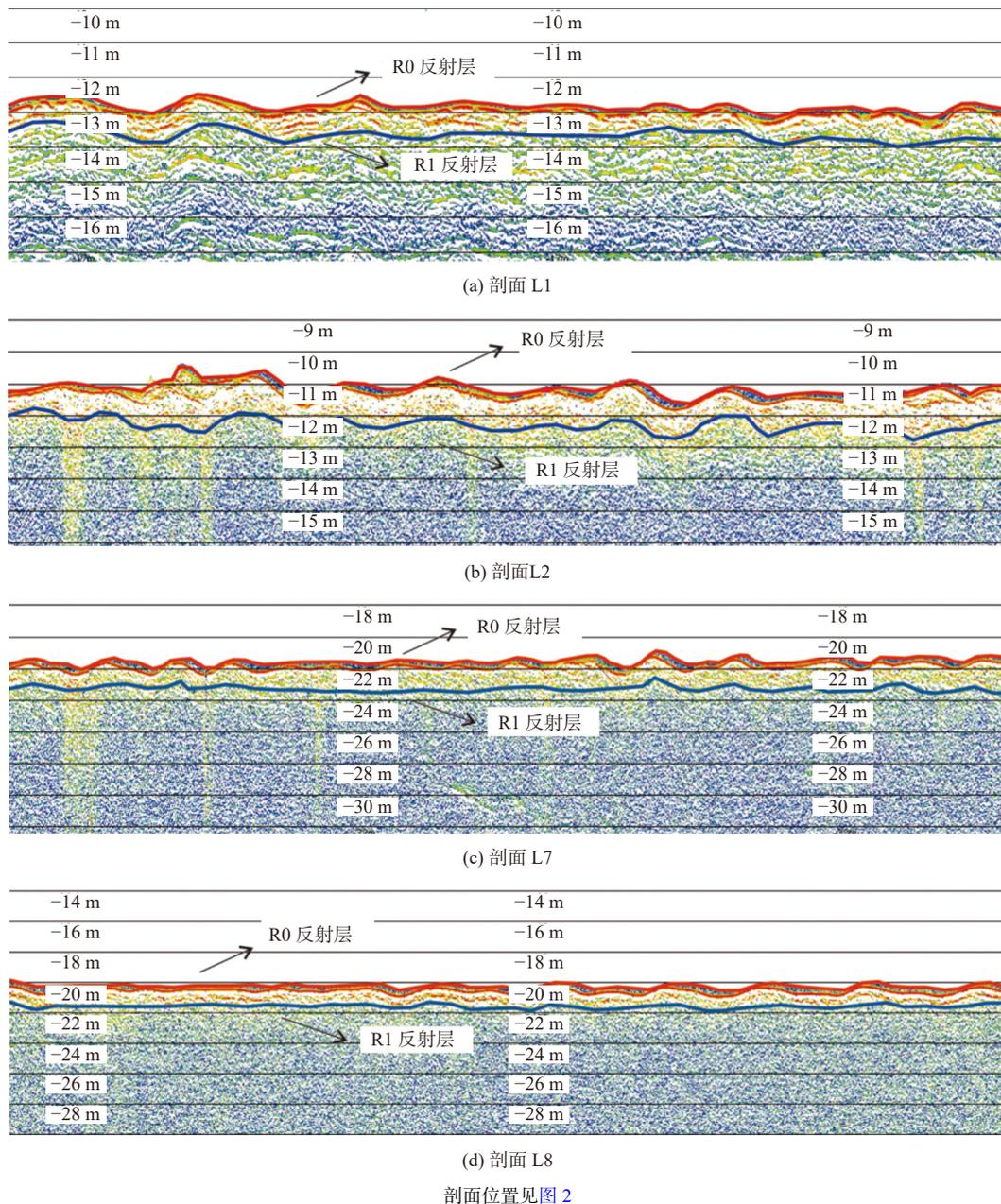


图 5 典型浅地层剖面探测声呐图

Fig.5 Sonar detection of typical sub-bottom profile

东部深水区逐渐降低。老铁石岛北侧中值粒径小于南侧，黑石岛的西北侧、南侧中值粒径小于北部。分选系数指示沉积物的分选程度，即颗粒大小的均匀性。研究区内分选系数以两岛中部海域为中心向四周呈发散状增高。若自老铁石岛向黑石岛作由北向南的投影，途经的海域出现中值粒径的最大值和分选系数的最小值，说明两岛的存在对沉积环境具有一定影响。偏态可以反映沉积物粒度频率曲线的不均匀程度，也可以指示沉积环境的灵敏程度<sup>[17]</sup>。研究区范围内主要为正偏态，且自西北向东南增大。峰态表现为自东向西逐渐增大，反映研究

区沉积物的粒度频率曲线自东向西逐渐陡峭，粒度更加集中<sup>[18]</sup>。

## 5 讨论

研究区海域底质沉积物以含砾沉积物为主，粒度不均，主要有砾石、砾质泥质砂、砾质泥和粉砂等类型。在黑石岛和老铁石岛周围沉积物由砂和含砾沉积物组成，粒度相对偏粗；在黑石岛和老铁石岛之间的海域主要为砾石，反映了强烈的水动力环境；在老铁石岛的北部、黑石岛的南部以及东部深

表 2 研究区表层沉积物组分含量及命名

Table 2 Analysis results of the content and grain size of surface sediment composition in the study area

区域	站位编号	纬度/N	经度/E	砾石/%	黏土/%	粉砂/%	砂/%	命名
黑石岛	HS01	36°05'02"	122°34'11"	0.00	14.32	85.50	0.18	粉砂
	HS02	36°05'04"	122°34'01"	0.00	16.63	83.31	0.07	粉砂
	HS03	36°05'10"	122°34'04"	80.35	0.12	0.68	18.84	砾石
	HS04	36°05'07"	122°34'15"	60.32	2.81	21.86	15.01	泥质砾
	HS05	36°05'45"	122°34'01"	80.66	0.05	0.37	18.91	砾石
老铁石岛	LT01	36°05'04"	122°33'57"	21.08	1.77	19.03	58.12	砾质泥质砂
	LT02	36°05'48"	122°33'57"	0.00	9.14	61.49	29.36	砂质粉砂
	LT03	36°05'51"	122°34'01"	12.82	8.77	71.67	6.75	砾质泥
	LT04	36°05'39"	122°33'04"	7.86	2.76	38.48	50.91	砾质泥质砂
	LT05	36°05'53"	122°33'04"	16.39	1.24	23.50	58.87	砾质泥质砂
	LT06	36°05'00"	122°33'57"	13.38	10.37	58.34	17.91	砾质泥
	LT07	36°05'52"	122°34'11"	0.00	9.68	85.84	4.48	粉砂
	LT08	36°05'32"	122°34'01"	80.66	0.05	0.37	18.91	砾石
深水区	RP01	36°05'58"	122°35'02"	7.55	17.06	71.96	3.43	砾质泥

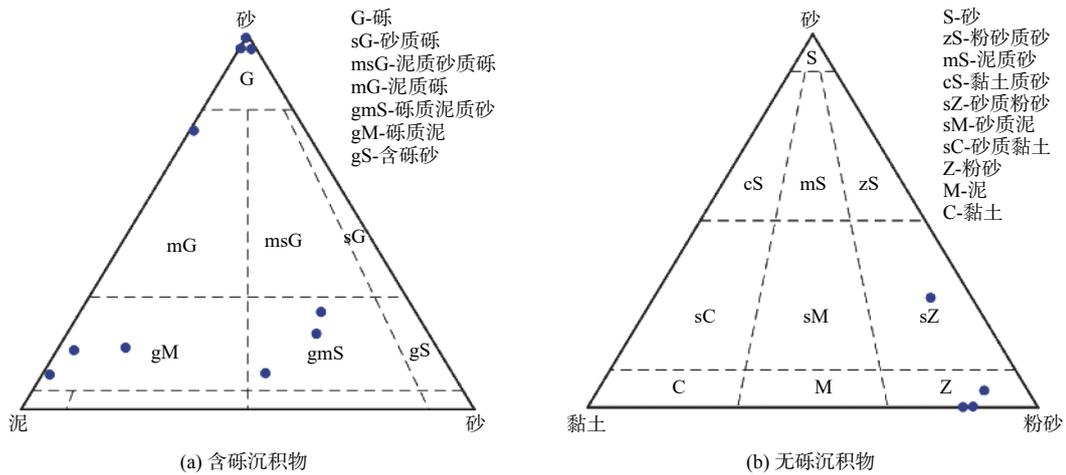


图 6 Folk 沉积物三角形分类图解

Fig.6 Illustration of the Folk classification of sediments

水区,尤其是海带养殖区沉积物粒度较小。

底质沉积物分布特征受物质来源、海洋水动力环境、海底地形、泥沙运移特征、人类活动等因素的影响<sup>[19]</sup>。本研究区岛礁、基岩分布广泛,水深变化较大,水动力环境强烈,且有大规模的海带养殖区,表层沉积物分布受多重因素控制。

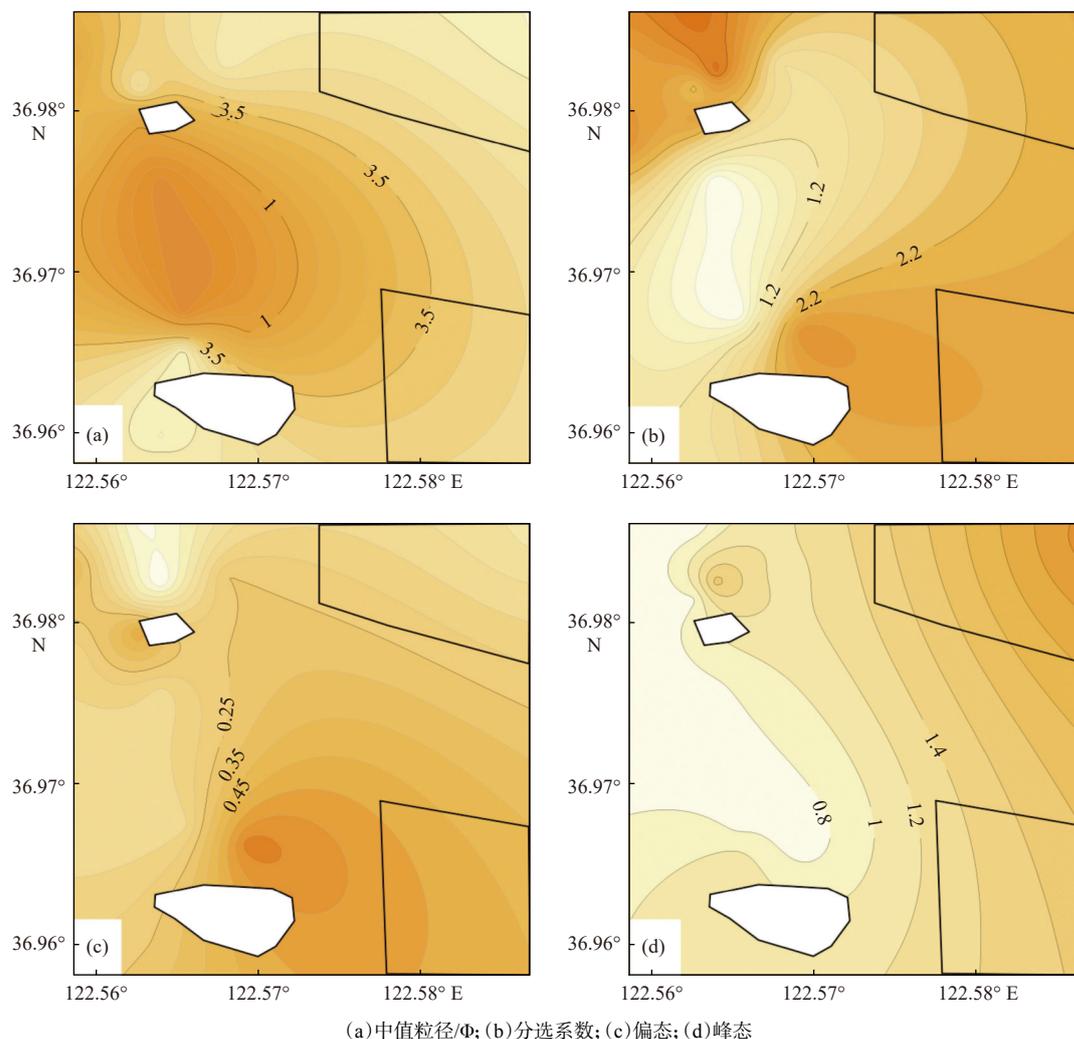
### 5.1 地形影响表层沉积物分布

研究区底质沉积物分布和海底地形起伏关系甚密<sup>[20-22]</sup>。在研究区的西北和西南部以及东部水深较大海域,地形起伏较为平缓,过渡平稳,多分布粉砂、砂质粉砂等沉积物,粒度较细,反映了较弱的水动力条件。在等深线较密集的海域水动力环境复杂,尤其是研究区中部海域及两岛周围的海域,

主要分布有砾石、泥质砾、砾质泥质砂等含砾沉积物。在黑石岛和老铁石岛之间的海域,受南北两岛高地形的影响,沉积物以砾石为主。此外,老铁石岛和黑石岛周围浅水区较东部深水区沉积物类型更复杂,且浅地层剖面显示深水区淤积层厚度大于浅水区,也和岛屿周围复杂的海底地形起伏有关。

### 5.2 水动力条件控制表层沉积物分布

波浪的机械分异作用可能是表层沉积物空间分布的重要影响因子<sup>[23]</sup>。老铁石岛和黑石岛周边海域是波浪作用的高能带<sup>[6]</sup>,波浪在岛礁和基岩处破碎后携带较粗颗粒的泥沙入海,然后带向外滨带海域。距离岛礁越远,波能减弱,较粗颗粒沉积物首先发生重力沉积,细粒物质经输运后再沉积。这



(a)中值粒径/ $\Phi$ ; (b)分选系数; (c)偏态; (d)峰态

图7 研究区表层沉积物粒度参数空间分布

Fig.7 Spatial distribution of grain size parameters of surface sediments in the study area

种由岛礁向西部深水区细化的趋势充分说明波浪条件对研究区表层沉积物空间分布具有控制作用<sup>[24]</sup>。

据长时间观测海流数据绘制研究区大潮、中潮、小潮垂线平均海流矢量图(图8)。各站实测海流均表现为较强的往复性流动,受岸线地形等因素影响,涨潮流偏SW向,落潮流偏NE向。潮流最大可能流速和潮流水质点最大可能运移距离按规则半日潮流海区的公式计算<sup>[25]</sup>,结果表明潮流最大可能流速的方向和潮流水质点最大可能运移方向主要为NW-NE向。测区水质点的最大可能运移距离为2 790.7~20 951.5 m。海流数据和沉积物分布特征相吻合,南北向的潮流为沉积物的南北向运移提供了动能<sup>[26]</sup>,运移方向可能为NW-NE向。潮流运动在老铁石岛和黑石岛的影响下造成了两岛之间强烈的水动力环境,可能是两岛之间沉积物以砾石为主的原因之一。

综上所述,波浪和潮流共同作用并控制着研究

区表层沉积物的空间分布格局,导致了表层沉积物由西部浅海向东部深海、由中部向南北粒度分异明显。

### 5.3 筏架式养殖区干预沉积环境

研究区内建设有大量筏式养殖区,对沉积物分布具有一定影响。表现为在养殖区内侧沉积物粒度出现细化,中值粒径减小,分选性变好。本文将从筏式养殖区导致的生物因素、水动力因素2方面分析造成这种现象的原因。

筏式养殖区内以海带养殖为主,大量的海带导致大量有机物的沉降,这种生物源物质包括生物碎屑沉积和海带孢子体的释放,是海底表层沉积物中有机质的重要来源<sup>[27]</sup>。研究表明,在潮间带和潮下带环境,生物源物质释放的有机质可占总有机质的65%以上<sup>[28]</sup>。此外,海带属于大型海藻,其具备捕

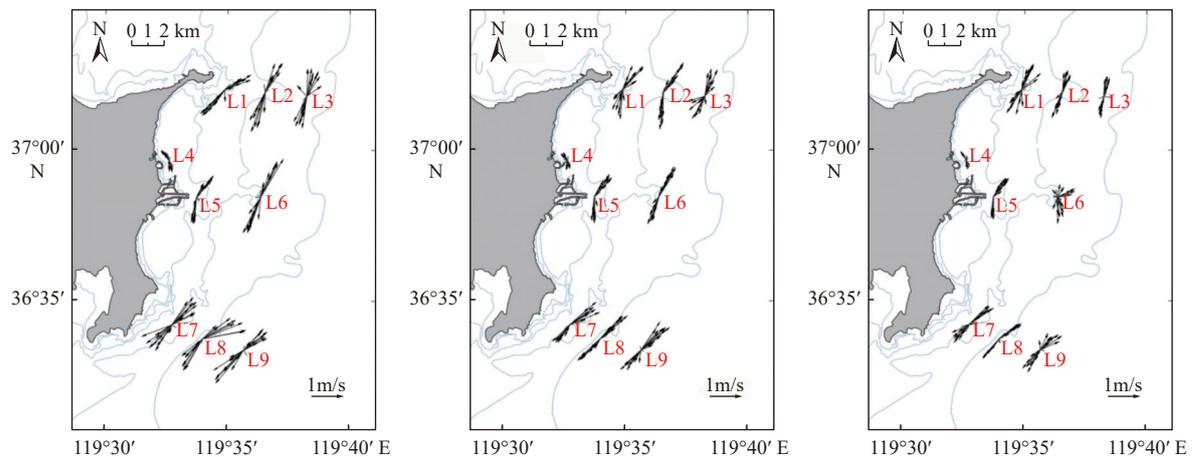


图 8 各站位垂线平均海流矢量图

Fig.8 Diagram of vertical average current vector at each station

获细粒沉积物的能力<sup>[29]</sup>,也可能对沉积物组分含量产生影响。

筏式养殖区的存在会对研究区水动力条件产生影响,是引起养殖区内沉积物组分变化的主要原因。在养殖区内侧,动力沉积过程主要受控于离岸的浅水波<sup>[30]</sup>。大规模海带筏架的存在减弱了水动力条件,较粗颗粒传输范围较小,悬浮态颗粒在离岸的波浪动力传输作用下,遇到架群后携沙能量迅速衰减,较细颗粒得以沉积,使架群内侧的表层沉积物有一定细化的趋势。悬浮泥沙随水流进入架群区后,由于阻流效应使原本正常载荷的悬浮泥沙因过载而沉降<sup>[31]</sup>。与此同时,在减弱的水动力场中,再悬浮作用相对较弱,两方面原因导致细粒物质更易沉降和保存。这种沉降会减少悬浮泥沙曝氧的时间和强度,底质一般处于缺氧的环境中,颗粒物中的有机物质更易储存,据此推测筏架式养殖区内侧沉积物有机质含量较高,具体数据还需补充调查。

## 6 结论

(1)研究区等深线沿 NE—SW 向延伸,地形具有西浅东深、存在陡坡的特点,地貌类型以水下侵蚀岸坡、海蚀阶地为主。淤积层厚度分布不均,深水区的淤泥层厚度更大。研究区表层沉积物有砾石、泥质砾、砾质泥、砾质泥质砂、砂质粉砂、粉砂等多种类型,底质复杂。自两岛之间海域向四周,表层沉积物的中值粒径减小,分选系数增大。

(2)研究区岛礁、基岩分布广泛,水深变化较大,水动力环境强烈且有大规模的筏架式养殖区,表层沉积物分布受多重因素控制。岛礁周边海域复杂

的地形起伏营造了复杂的水动力环境,从而使沉积物砾石含量增多,较为平坦的海域沉积物则以砂质为主;波浪的机械分异作用和南北向的潮流作用控制了海域内沉积物的空间分布格局;研究区大规模筏架式养殖区的存在导致架群内侧表层沉积物的细化及有机质含量的增多。

### 参考文献:

- [1] 严立文. 浅海区海带养殖的沉积环境效应及动力机制[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2008.
- [2] 张泽华, 黄海军, 刘艳霞, 等. 浅海筏式养殖对周边海域潮流和悬浮体特征影响研究[J]. 海洋科学进展, 2016, 34(1): 37-49.
- [3] 刘艳霞, 黄海军, 樊建勇, 等. 黑泥湾近岸悬沙分布与扩散变化监测[J]. 海洋科学, 2009, 33(1): 25-29.
- [4] 马立杰, 李新正, 毕海波, 等. 山东黑泥湾潮间带沉积物重金属分布及其环境效应[J]. 海洋环境科学, 2011, 30(1): 44-4.
- [5] 严立文, 黄海军, 刘艳霞. 基于GIS空间分析的海底表层沉积物粒度分布特征插值研究[J]. 海洋科学, 2010, 34(1): 58-64.
- [6] LIU Y X, HUANG H J, YAN L W, et al. Influence of suspended kelp culture on seabed sediment composition in Heini Bay, China[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2016, 181: 39-50.
- [7] 严立文, 黄海军, 陈纪涛, 等. 黑泥湾海带养殖区沉积物重金属分布特征与富集机制[J]. 应用基础与工程科学学报, 2010, 18(3): 398-407.
- [8] YAN L W, HUANG H J, LIU Y X. GIS-based analysis of spatial interpolations of sediments grain size in Heini Bay[J]. *Marine Sciences*, 2010, 34(1): 58-64.
- [9] 马立杰, 崔迎春, 王海荣. 运用因子分析评价山东黑泥湾沉积物重金属污染来源[J]. 海洋地质前沿, 2012, 28(4): 57-61.
- [10] LIU Y X, HUANG H J, LIU X, et al. Response of seafloor sediment composition to a strong storm event in the inner -shelf of Heini Bay, China[J]. *Continental Shelf Research*, 2019, 175: 1-11.
- [11] ZHANG Z H, HUANG H J, LIU Y X, et al. Numerical study of hydrodynamic conditions and sedimentary environments of the

- suspended kelp aquaculture area in Heini Bay[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2020, 232(5): 1-13.
- [12] 刘晓. 黑泥湾海域沉降颗粒物通量及其影响因子研究[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2012.
- [13] 王中波, 何起祥, 杨守业, 等. 谢帕德和福克碎屑沉积物分类方法在南黄海表层沉积物编图中的应用与比较[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2008, 28(1): 1-8.
- [14] 王建锋, 邱桔斐, 赵建丽, 等. MATLAB CFTool在图解沉积物粒度参数计算中的应用[J]. *海洋湖沼通报*, 2018, 163(4): 115-118.
- [15] 张炳炎. 我国海洋调查船的现状与未来[J]. *世界科技研究与发展*, 1998, 20(4): 36-43.
- [16] 种衍飞, 郝义. 日照海岸带沙滩侵蚀现状及沉积物粒度特征分析[J]. *海洋地质前沿*, 2020, 36(1): 19-29.
- [17] 赵东波. 常用沉积物粒度分类命名方法探讨[J]. *海洋地质动态*, 2009, 25(8): 41-44, 46.
- [18] 吕纪轩, 胡日军, 李毅, 等. 烟台北部近岸海域表层沉积物粒度分布及沉积动力环境特征[J]. *海洋地质前沿*, 2020, 36(4): 27-36.
- [19] MILLIMAN J D, MEADE R H. World-wide delivery of river sediment to the oceans[J]. *Journal of Geology*, 1983, 91: 1-21.
- [20] MACDONALD D D, INGERSOLL C G, BERGER T A. Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems.[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2000, 39(1): 20-31.
- [21] SCHROTTKE K, BECKER M, BARTHOLOM A, et al. Fluid mud dynamics in the Weser estuary turbidity zone tracked by high-resolution side-scan sonar and parametric sub-bottom profiler[J]. *Geo-Marine Letters*, 2006, 26(3): 185-198.
- [22] 杨慧良, 尉佳, 李攀峰, 等. 九州-帕劳海脊两侧深海盆地浅部地层结构特征与分析[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2021, 41(1): 14-21.
- [23] MEILIANDA E, ALFIAN D, HUHN K. Sediment grain-size distribution analysis at the shallow sandy shelf of the North Sea using multivariate geostatistics[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2011, 7(1): 317-322.
- [24] MOORE M, WILKIN J. Variability in the South Pacific Deep Western Boundary Current from current meter observations and a high-resolution global model[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103: 5439-5457.
- [25] 修日晨. 关于陆架海区潮流运动方向旋转的研究[J]. *海洋湖沼通报*, 1984(4): 8-17.
- [26] 金玉休, 曹志敏, 吴建政, 等. 辽东浅滩潮流运动特征与沉积物输运[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2015, 35(6): 33-40.
- [27] GONI M A, MONACCI N, GISEWHITE R, et al. Terrigenous organic matter in sediments from the Fly River delta-cliniform system (Papua New Guinea) [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113: 1-27.
- [28] ARNDT S, JØRGENSEN B, LAROWED D E, et al. Quantifying the degradation of organic matter in marine sediments: a review and synthesis[J]. *Earth-Science Reviews*, 2013, 123(4): 53-86.
- [29] JOHNSON M D, HUANG W, WEBER W J. A distributed reactivity model for sorption by soils and sediments 13. Simulated diagenesis of natural sediment organic matter and its impact on sorption/desorption equilibria.[J]. *Environmental Science and Technology*, 2001, 35(8): 1680-1687.
- [30] 尹超. 随机波浪作用下黑泥湾冲淤演变的数值模拟研究[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2013.
- [31] BURDIGE D J. Preservation of organic matter in marine sediments: controls, mechanisms, and an imbalance in sediment organic carbon budgets?[J]. *Chemical Reviews*, 2007, 107: 467-485.

## The characteristics of topography and surface sediment distribution near Heishi Island, Shandong Peninsula

LIU Yubin<sup>1,3</sup>, SONG Yongdong<sup>1,2</sup>, ZHANG Jianxing<sup>1,2</sup>, ZHUANG Lihua<sup>1,2</sup>, LUAN Zhendong<sup>1,2,3\*</sup>, YAN Jun<sup>1,2</sup>  
(1 Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2 Ocean Research Center, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The sea areas near Heishi Island are located in the east of Heini Bay, Weihai, Shandong Peninsular, East China. The sedimentary environment is complex and variable, and many factors control the distribution of surface sediments, forming a variety of developmental and evolutionary patterns. A comprehensive geological environment survey of the study area was carried out in Sep.–Nov., 2021 by using acoustic detection, surface sediment sampling, ocean current observation, laboratory sediment grain size testing, and comprehensive interpretation of data, based on which the characteristics of water depth topography, sub-bottom profile structure, and surface sediment distribution in the study area were analyzed and the controlling factors and causes of sediment distribution in the area were revealed from multiple perspectives. Results show that the water depth of the target area was between 3 m and 24 m, on average of about 14 m, shallower in the west and deeper in the east in a steep slope. With the increase of water depth, the slope gradually decreased, and the main landform type was underwater erosion bank slope. The acoustic reflection interface of seabed sub-bottom profile was clear and can be tracked globally. The siltation thickness was 0.5–2 m, and the thickness of sediment layer varied from east to west but relatively stable. The types of surface sediments varied, forming zones around the island, including silty sand, gravel, and muddy gravel away from the island. From west to east, the grain size of surface sediments decreased gradually and the sorting became better. It is concluded that the distribution of surface sediments in the study area is affected by regional topography and hydrodynamic conditions.

**Key words:** Heishi Island; submarine topography; surface sediment; distribution characteristic; influence factor