



## 渤海湾唐山港海域表层沉积物粒度和黏土矿物分布特征及其物源指示

杨娅敏, 张礼中, 沈睿文, 褚宏宪, 姜正龙, 冯永财, 姜文钦, 殷学博, 李佳林, 王鹏飞, 颜宏伟

### Characteristics of grain size and clay mineral distribution of surface sediments and their provenance implication in Tangshan Harbor, Bohai Bay

YANG Yamin, ZHANG Lizhong, SHEN Ruiwen, CHU Hongxian, JIANG Zhenglong, FENG Yongcai, JIANG Wenqin, YIN Xuebo, LI Jialin, WANG Pengfei, and YAN Hongwei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2023073102>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 渤海西部表层沉积物中黏土矿物分布特征及物源指示

CLAY MINERALS DISTRIBUTION PATTERN IN SURFACE SEDIMENTS OF WESTERN BOHAI AND THEIR PROVENANCE IMPLICATIONS

海洋地质与第四纪地质. 2017, 37(1): 51

#### 渤海湾西岸全新世以来沉积物地球化学与黏土矿物特征及其对环境和气候的响应

Geochemical and clay mineral characteristics of the Holocene sediments on the west coast of Bohai Bay and their implications for environmental and climatic changes

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(2): 75

#### 雅浦海沟南缘海底表层矿物碎屑粒度特征及其物源指示

Grain-size characteristics of the surface clastic sediments on the southern margin of the Yap Trench and their provenance implications

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(5): 46

#### 环渤海湾盆地主要河流碎屑锆石U-Pb年龄特征及其物源示踪意义

U-Pb age characteristics of major fluvial detrital zircons in the Bohai Bay Basin and their provenance implications

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(2): 136

#### 曹娥江沉积物黏土矿物与磁性特征及其指示意义

Magnetic properties and clay mineralogy of the surface sediments of Cao'e River basin and implications

海洋地质与第四纪地质. 2018, 38(1): 108

#### 长江与黄河黏土粒级沉积物地球化学特征及其物源指示意义

Geochemical characteristics of clay-sized sediments of the Yangtze and Yellow Rivers and their implications for provenance

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(3): 109



关注微信公众号，获得更多资讯信息

杨娅敏, 张礼中, 沈睿文, 等. 渤海湾唐山港海域表层沉积物粒度和黏土矿物分布特征及其物源指示 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2023, 43(5): 136-147.

YANG Yamin, ZHANG Lizhong, SHEN Ruiwen, et al. Characteristics of grain size and clay mineral distribution of surface sediments and their provenance implication in Tangshan Harbor, Bohai Bay[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2023, 43(5): 136-147.

# 渤海湾唐山港海域表层沉积物粒度和黏土矿物分布特征及其物源指示

杨娅敏<sup>1,2,3</sup>, 张礼中<sup>1</sup>, 沈睿文<sup>1</sup>, 褚宏宪<sup>2</sup>, 姜正龙<sup>3</sup>, 冯永财<sup>2</sup>, 姜文钦<sup>2</sup>, 殷学博<sup>4</sup>, 李佳林<sup>2</sup>, 王鹏飞<sup>1</sup>, 颜宏伟<sup>1</sup>

1. 中国地质调查局自然资源综合调查指挥中心, 北京 100055

2. 中国地质调查局烟台海岸带地质调查中心, 烟台 264004

3. 中国地质大学(北京), 北京 100083

4. 中国科学院海洋研究所, 青岛 266071

**摘要:**通过对取自渤海湾唐山港海域的 161 个站位的表层沉积物进行粒度和黏土矿物组成及分布特征分析, 探讨不同区域沉积物物质来源及其控制因素。研究表明, 唐山港海域表层沉积物平均粒径 ( $M_z$ ) 为  $1.4 \sim 7.7 \Phi$ , 主要由粉砂质砂、砂质粉砂以及少量的砂和黏土组成。根据粒度参数特征和端元模型分析, 研究区沉积物可以分为 3 个区和 EM1—EM4 四个端元: 东北部以 EM3 端元砂和粉砂质砂为主, 分选较差、正偏态, 沉积环境动力强; 中部曹妃甸深槽区以 EM4 端元砂质粉砂和粉砂质砂为主, 分选差、正偏态, 沉积环境动力强; 南部和北部唐山港附近区域以 EM1 和 EM2 端元粉砂为主, 分选中等—较差, 沉积动力环境较弱。黏土矿物组成主要是伊利石 (72%) 和蒙脱石 (12%), 其次是绿泥石 (8%) 和高岭石 (8%)。物源分析表明, 渤海湾唐山港海域表层沉积物中细颗粒组分来源主要是黄河-海河混合来源的陆源碎屑物质, 研究区东北部和曹妃甸深槽区可能有部分古滦河三角洲粗颗粒物质的加入。渤海环流和潮余流控制着本区细颗粒沉积物主要向南部和唐山港附近运移, 粗颗粒物质向东北部和中部曹妃甸区搬运沉积。

**关键词:** 沉积物; 粒度; 黏土矿物; 河流; 物源; 渤海湾

中图分类号: P736.2

文献标识码: A

DOI: [10.16562/j.cnki.0256-1492.2023073102](https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2023073102)

## Characteristics of grain size and clay mineral distribution of surface sediments and their provenance implication in Tangshan Harbor, Bohai Bay

YANG Yamin<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Lizhong<sup>1</sup>, SHEN Ruiwen<sup>1</sup>, CHU Hongxian<sup>2</sup>, JIANG Zhenglong<sup>3</sup>, FENG Yongcai<sup>2</sup>, JIANG Wenqin<sup>2</sup>, YIN Xuebo<sup>4</sup>, LI Jialin<sup>2</sup>, WANG Pengfei<sup>1</sup>, YAN Hongwei<sup>1</sup>

1. Command Center of Integrated Natural Resources Survey Center, China Geological Survey, Beijing 100055, China

2. Yantai Coastal Zone Geological Survey Center, China Geological Survey, Yantai 264004, China

3. China University of Geosciences, Beijing 100083, China

4. Institute of Oceanography, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China

**Abstract:** The grain size and clay composition and distribution of 161 samples taken from surface sediments in the Tangshan Harbor, Bohai Bay were analyzed to explore the provenance and the controlling factors. Results show that the average grain size ( $M_z$ ) of the surface sediments was from  $1.4 \sim 7.7 \Phi$ , and mainly consists of silty sand, sandy silt, and a small amount of sand and clay. According to the characteristics of grain size parameters and end-member modelling analysis, the sediments can be divided into three zones and four end-members (EM1 to EM4). The

**资助项目:**中国地质调查局自然资源综合调查指挥中心科技创新基金“构建海洋自然资源分层分类模型——以海南岛东南海域为例”(KC20220012); 中国地质调查局地质调查项目“陆海统筹基础地质调查成果融合表达关键技术”(DD20230416), “渤海曹妃甸海域 1:5 万海洋区域地质调查”(DD20211553), 1:25 万威海幅海洋区域地质调查(DD20230412)

**作者简介:** 杨娅敏 (1990—), 女, 博士, 海洋地质专业, 主要从事海洋沉积研究, E-mail: [yangyamin@mail.cgs.gov.cn](mailto:yangyamin@mail.cgs.gov.cn)

**通讯作者:** 张礼中 (1969—), 男, 研究员, 主要从事水工环地质研究, E-mail: [zhanglizhong@mail.cgs.gov.cn](mailto:zhanglizhong@mail.cgs.gov.cn)

褚宏宪 (1973—), 男, 正高级工程师, 主要从事海洋地质调查研究, E-mail: [chx-8@163.com](mailto:chx-8@163.com)

收稿日期: 2023-07-31; 改回日期: 2023-09-27. 文凤英编辑

northeastern part of the area is dominated by EM3 (sand and silty sand), with poor sorting, positive skew, and strong dynamics of depositional environments. The central Caofeidian Deep Trough area is dominated by EM4 (sandy silt and silty sand), with poor sorting, positive skew, and strong dynamics of depositional environments. The southern part and the Tangshan Harbor area is dominated by EM1 and EM2 (silt), with moderate-poor sorting and weak depositional dynamics. The clay minerals are relatively high in illite (72%) and smectite (12%), followed by chlorite (8%) and kaolinite (8%). The provenance analysis shows that the source of surface sediments in Tangshan Harbor is mainly the mixed detrital materials from Yellow River and Haihe River, while the northeastern part of the study area and the Caofeidian Deep Trough may have some coarse-grained materials from the ancient Luanhe Delta. The Bohai Sea circulation and tidal currents control the transport of fine-grained sediments mainly to the south and near Tangshan Harbor, while coarse-grained materials are transported and deposited to the northeastern and central Caofeidian area.

**Key words:** sediments; grain size; clay minerals; river; provenance; Bohai Bay

作为我国东部陆架海, 渤、黄海因其复杂的海洋动力学特征、丰富的沉积物来源一直以来都是国内外海洋学者研究的重点区域。唐山港位于渤海湾和辽东湾之间的交界处, 靠近渤海湾北部的海岸带一侧<sup>[1-2]</sup>, 其南部为走向近 EW 向的曹妃甸深槽, 是渤海湾最深的水域。该区海陆相互作用频繁, 发育沙质海岸和泥质海岸, 第四纪沉积演化过程十分复杂, 再加上近年来开展的围填海工程导致潮流系统和滩海地貌发生巨大变化<sup>[1]</sup>, 严重影响了唐山港及其周边海域的沉积环境。前人在渤海湾唐山港及其附近海域开展了大量的研究工作, 主要集中在海侵过程<sup>[3-5]</sup>、海平面变化与海岸变迁<sup>[2, 6]</sup>、潮流通道变化<sup>[7]</sup>以及第四纪沉积演化等方面<sup>[3, 8]</sup>, 而对于该区沉积物沉积过程与搬运机制等学者较为关注的问题的研究则相对有限。

河流物质的输入是海底沉积物的重要来源<sup>[9-10]</sup>, 渤海湾三面环陆, 入海河流众多, 有清河、海河、蓟运河、黄河、辽河以及滦河等。其中, 海河、黄河以及滦河是渤海湾西部地区沿岸径流量相对较大的 3 条河流, 是该区最主要的沉积物来源。前人通过元素地球化学、黏土矿物等方法对渤海湾西岸的沉积物源进行了示踪<sup>[11-14]</sup>, 但目前针对渤海湾西缘表层沉积物的来源研究仍存在争议, 主要存在以下两种观点: 一种观点认为渤海湾西缘唐山港附近靠近海河入海口, 沉积物主要是海河来源的陆源碎屑物质<sup>[13]</sup>, 可能部分也受到滦河的影响<sup>[15]</sup>; 另一种观点则认为由于受到渤海湾环流的影响, 唐山港附近海域主要是黄河-海河混合来源的陆源碎屑物质<sup>[11-12, 14]</sup>。唐山港附近海域是否有黄河和滦河来源物质的加入, 黄河携带的物质在渤海湾地区的分布范围及特征等问题尚未解决。因此, 渤海湾西缘唐山港附近海域沉积物来源问题亟需可靠的物源指标来进一步的分析和研究。

沉积物粒度受物源区性质、沉积作用以及沉积

动力学过程等多种因素影响, 导致不同沉积环境中沉积物粒度特征明显不同, 因此常被用来作为判断沉积物来源、水动力条件以及重建古气候和古环境演化的重要参数, 广泛应用于海洋、河流以及湖泊沉积环境的研究中<sup>[13, 16]</sup>。黏土矿物是地表母岩经风化作用形成的产物, 是海洋陆源碎屑中重要的组成成分, 是示踪海洋沉积物来源以及指示沉积环境演化等内容的重要指标<sup>[17-19]</sup>。本文通过对研究区沉积物粒度、黏土矿物等指标开展测试分析, 同时与周围河流输运的沉积物中粒度和黏土矿物特征进行对比, 以期揭示渤海湾唐山港海域附近表层沉积物粒度和黏土矿物分布特征, 初步探讨渤海湾西缘现代沉积物物质来源及其控制因素。

## 1 区域地质背景

唐山港位于渤海湾北部唐山市东南部沿海, 包含京唐港区和曹妃甸港区。唐山港海域水深较浅, 平均水深 18 m, 最大水深为 36 m, 位于研究区曹妃甸深槽处(图 1)。曹妃甸深槽走向近 EW 向, 沟槽北陡南缓, 是在地质构造和水下河谷的双重作用下发育形成的<sup>[1]</sup>, 是全新世滦河向海输送泥沙的入海处<sup>[20]</sup>, 岬角地貌和特殊地形特征使得附近海域水动力增强, 对深槽冲刷作用较为严重, 是深槽长期维持水深的重要因素<sup>[1]</sup>。研究区地形和地貌类型较为复杂, 内侧为古滦河三角洲发育的冲积-海积平原, 外侧为曹妃甸-东坨坨沙质岸线<sup>[1]</sup>。深槽附近的地貌自西向东可划分为南堡海岸地貌、曹妃甸深槽和老龙沟潟湖 3 个体系单元<sup>[1, 21]</sup>。近年来由于大规模的围填海工程, 深槽附近出现了新的侵蚀洼地和海底滑塌等地貌类型。从曹妃甸向渤海海峡有条 27 m 深的天然水道, 深槽和水道使得唐山港具备成为渤海沿岸的大型泊位港址的天然优势。

黄河是中国第二大河流, 平均径流量为  $3.16 \times$

$10^{10} \text{ m}^3/\text{a}$ , 约占渤海河流输入的 90%, 每年向边缘海输送约  $1.4 \times 10^8 \text{ t}$  的沉积物<sup>[22]</sup>, 其中 30%~40% 的沉积物堆积在河口处<sup>[23]</sup>, 其搬运的物质覆盖渤海湾、渤海海峡南部以及莱州湾以北的渤中海域, 是渤海湾最主要的沉积物来源<sup>[24]</sup>。海河的平均径流量为  $2.15 \times 10^{10} \text{ m}^3/\text{a}$ <sup>[25]</sup>, 输沙量约  $6.0 \times 10^6 \text{ t/a}$ <sup>[14]</sup>。虽然蓟运河的径流量和输沙量远小于海河, 但对渤海湾地区沉积物也有一定的贡献。滦河平均径流量为  $4.6 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{a}$ , 平均输沙量约为  $2.0 \times 10^7 \text{ t/a}$ , 沉积物相对较

粗, 主要是沉积在滦河河口到曹妃甸沿岸区域<sup>[26]</sup>。渤海环流体系主要是由渤海沿岸流和外海来的黄海暖流余脉组成, 具有北进南出的特征(图 1a)。冬季黄海暖流余脉流自渤海海峡北部进入渤海并延伸至渤海西岸, 同时由于受到沿岸的阻挡导致其分为南北两支, 其中南支在进入渤海湾后沿岸转折南下, 流经莱州湾后从渤海海峡逆时针方向流出渤海; 北支则是沿着辽东湾西岸向北运移, 与辽东湾低盐水的沿岸流形成顺时针环流<sup>[24, 27]</sup>。渤海沿岸流

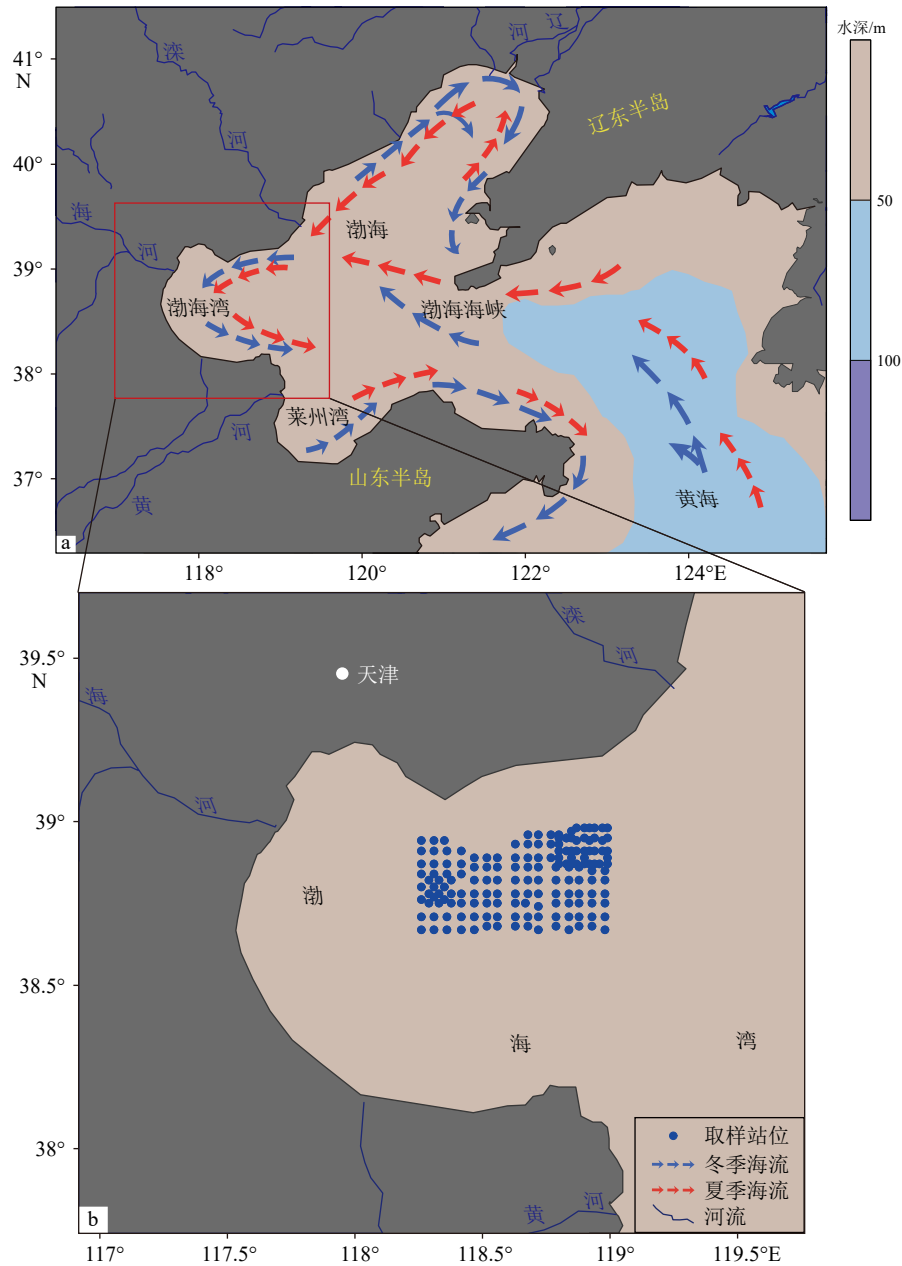


图 1 渤海湾唐山港海域表层沉积物取样站位及海流示意图  
a: 渤海湾季节性环流系统(海流方向据文献 [27-30] 修改), b: 渤海湾唐山港海域表层沉积物取样站位。

Fig.1 Surface sediment sampling stations and currents in Tangshan Harbor, Bohai Bay  
a: Seasonal current system in Bohai Bay (currents direction modified after references [27-30]), b: Surface sediment sampling stations in Tangshan Harbor, Bohai Bay.



和黄海暖流共同构成渤海南部顺时针、北部逆时针方向的双环流体系结构<sup>[24, 27-28]</sup>。夏季的环流流型与冬季相近,也是北部顺时针、南部逆时针的双环流结构,除了黄海暖流产生的北向分支,会沿着辽东湾东岸北上。渤海潮流以半日潮流为主,流速 0.5~1.0 m/s,老铁山水道附近潮流最强为 1.5~2.0 m/s<sup>[27]</sup>。渤海潮余流从黄河三角洲向北-东北方向流动,受辽东湾西岸阻隔向右转向,沿着辽东湾沿岸向辽东半岛南部流动,在渤海中部和辽东湾附近形成顺时针的余环流<sup>[27]</sup>,对渤海湾中部环流具有重要的贡献。

## 2 材料与方法

### 2.1 样品来源

2021 年中国地质调查局烟台海岸带地质调查中心依托中国地质调查局 1:5 万海洋区域地质调查项目对渤海湾曹妃甸地区进行表层沉积物系统取样(图 1b)。参照《海洋区域地质调查规范(1:50000)》(DZ/T 0255-2014),取样站位按照 1 km×1 km 网格间距进行设计,利用抓斗取样器采集 0~2 cm 表层沉积物。取回的沉积物被放置在密封的无菌袋中,并 4℃ 避光储存。

### 2.2 测试方法

取 0.5 g 的样品于离心管中,加入 30% 的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 和 10% 的 HCl 去除沉积物中的有机质和碳酸盐。上机前加入 0.5 M 的六偏磷酸钠(NaPO<sub>3</sub>)<sub>6</sub> 并经超声波完全分散,利用奥地利 Anton Paar PSA1190 激光粒度分析仪进行粒度分析测试,仪器的测量范围为 0.04~2500 μm,同一样品进行两次平行测量,重复测量相对误差<1%<sup>[31]</sup>,分析测试精度<3%。表层沉积物粒度数据由中国地质调查局烟台海岸带地质调查中心项目组提供<sup>[31]</sup>,部分数据已发表。粒度参数的计算和等级划分采用 Folk 和 Ward 分类方案<sup>[32]</sup>,依据粒径<4 μm、4~63 μm 和>63 μm 将粒度分为黏土、粉砂和砂<sup>[33]</sup>。

黏土矿物分析测试采用 X 射线衍射方法(X-ray Diffraction, XRD)在中国海洋大学海洋地球科学学院黏土矿物分析实验室完成。取适量样品于离心管中,加入少量 10% 的过氧化氢溶液以除去沉积物中的有机质,然后加纯水离心清洗三次,后再加入 50% 的醋酸以除去沉积物中的碳酸盐,再用水将样品洗至中性。取上层浊液于离心管中加入 2 滴饱和 NaCl 溶液,利用 Stoke 沉降原理提取出粒度小于

2 μm 的悬浮液,制成涂片自然风干后用乙二醇蒸汽饱和制成乙二醇饱和片<sup>[34]</sup>,将其置于德国布鲁克 AXS 公司生产的 Bruker D8 ADVANCE 型 X 射线衍射仪中进行测试分析,仪器分析参数为 Cu 靶、管电压 40 kv、管电流 80 mA、扫描范围 3°~30°(2θ)、扫描步进长度(2θ)0.02°,仪器峰位精度≤0.01°2θ。依据 Biscaye<sup>[18]</sup>方法选取乙二醇饱和片图谱上的蒙脱石(17 Å, (1 Å=10<sup>-10</sup> m))、伊利石(10 Å)、绿泥石(7 Å)和高岭石(7 Å)4 种黏土矿物的 3 个特征衍射峰的峰面积为基础数据进行计算,按照 1:4:2 的权重因子换算获得蒙脱石、伊利石、绿泥石和高岭石的相对含量。随后以 25°(2θ)左右 3.5 Å 附近的衍射峰高比值换算获得高岭石(3.57 Å)和绿泥石(3.53 Å)的相对含量。经均一化处理 4 种黏土矿物的总含量为 100%。为保证实验结果的准确性,实验过程中每批样品设置 10% 平行样,平行样合格率为 100%。

## 3 结果

### 3.1 粒度分布特征

#### 3.1.1 粒级组分分布特征

分析结果表明,渤海湾唐山港附近海域表层沉积物主要是由粉砂质砂(zS)、砂质粉砂(sZ)、粉砂(Z)以及少量的砂(S)和黏土等组成(图 2)<sup>[31]</sup>。黏土粒级组分相对含量为 0.52%~51.11%,平均含量为 21.45%;粉砂粒级组分含量为 0.87%~79.05%,平均含量为 50.38%;砂质粒级组分含量为 0~98.61%,平均含量为 28.17%。根据粒度组成特征,以砂含量 65% 和 25% 等值线作为划分的标准,将研究区可以划分为 3 个区域,研究区东北部以砂和粉砂质砂为主,沉积物颗粒偏粗;唐山港海域曹妃甸深槽处以砂质粉砂和粉砂质砂为主;南部和唐山港附近区域沉积物粒度相对偏细,主要以粉砂为主(图 3b-d)。

#### 3.1.2 粒度参数分布特征

渤海湾唐山港附近海域表层沉积物平均粒径(Mz)为 1.4~7.71 Φ,平均值为 5.72 Φ,整体沉积物粒度中等偏粗。研究区东北部由沿岸向海(由北向南)沉积物粒度整体呈现出逐渐变细的趋势(图 4a)。粒度分选系数变化 δ 值为 0.67~2.91,平均值为 2.0,绝大部分沉积物属于分选较差—差。研究区东北部和中部曹妃甸深槽区 δ 值为 2~3,分选系数较高;南部和唐山港附近海域分选系数较低,δ 值一般小于 2(图 4b)。表层沉积物粒度偏态 S<sub>k</sub> 为 -0.22~0.72,平均值为 0.33,绝大多数属于正偏。研究区东

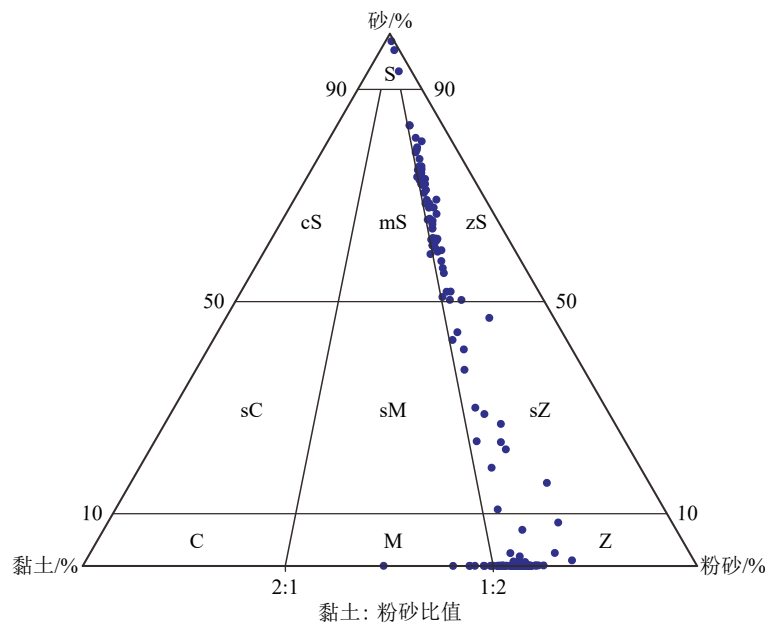


图 2 渤海湾唐山港海域表层沉积物三角分类图

S-砂, C-黏土, M-泥, Z-粉砂, sC-砂质黏土, sM-砂质泥, sZ-砂质粉砂, cS-黏土质砂, mS-泥质砂, zS-粉砂质砂。

Fig.2 Ternary classification of surface sediments in Tangshan Harbor, Bohai Bay

S-sand, C-clay, M-mud, Z-silt, sC-sandy clay, sM-sandy mud, sZ-sandy silt, cS-clayey sand, mS-muddy sand, zS-silty sand.

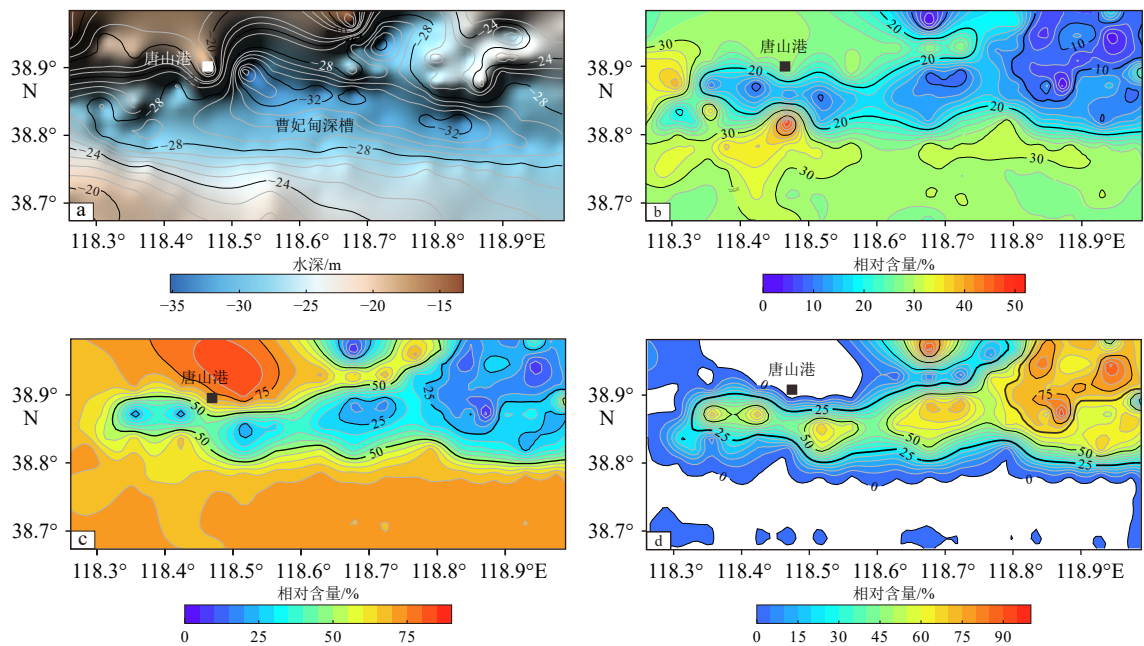


图 3 渤海湾唐山港海域水深和表层沉积物粒度分布图

a: 水深, b: 黏土, c: 粉砂, d: 砂。

Fig.3 Bathymetric map and the distribution patterns of grain size of surface sediments in Tangshan Harbor, Bohai Bay

a: Water depth, b: clay, c: silt, d: sand.

北部和中部曹妃甸深槽处为偏度高值区,  $S_k$  为 0.6~0.72; 南部和唐山港附近海域附近  $S_k$  值均小于 0.2, 为负偏态(图 4c)。粒度峰态  $Ku$  变化范围为 0.66~2.36, 平均值为 0.98, 除了研究区东部局部区域出现

很尖锐峰态外, 整体变化不大, 为中等峰态(图 4d)。

### 3.2 粒度端元分析

利用粒度端元模型 (End-member modelling

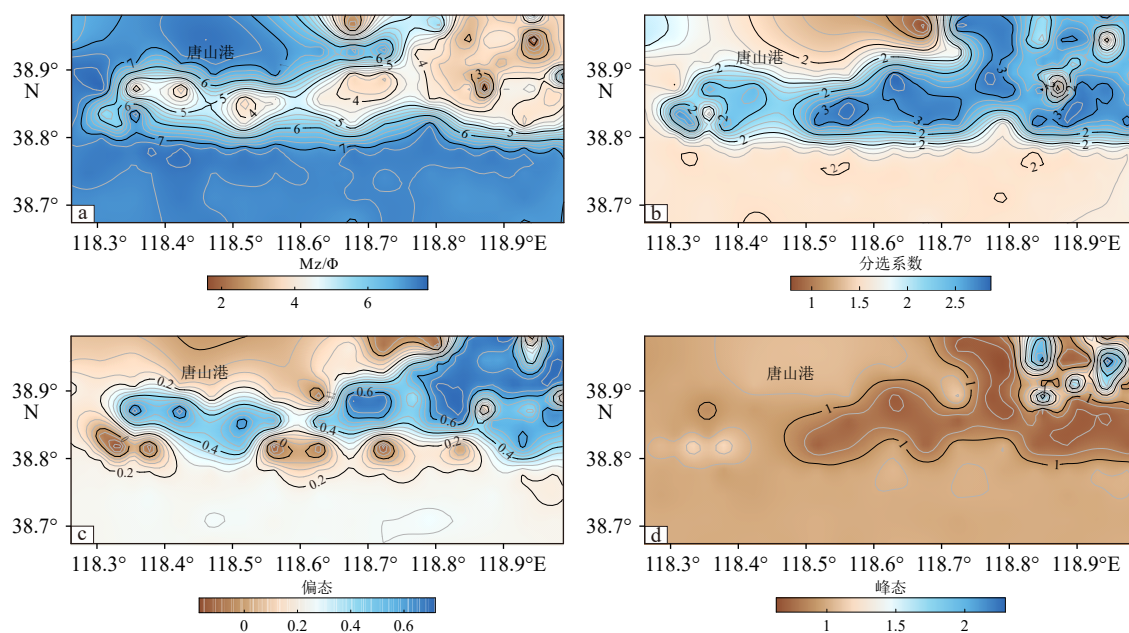


图 4 渤海湾唐山港海域表层沉积物粒度参数分布图

a: 平均粒径, b: 分选系数, c: 偏态, d: 峰态。

Fig.4 Distribution patterns of grain size parameters of surface sediments in Tangshan Harbor, Bohai Bay

a: Mean grain size, b: sorting coefficient, c: skewness, d: kurtosis.

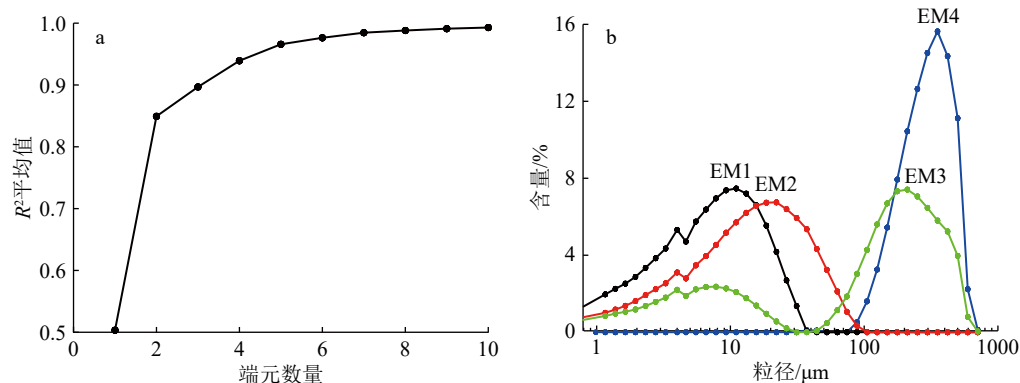


图 5 渤海湾唐山港海域表层沉积物粒度端元分析结果

a: 粒度端元数-复相关系数平均值, b: 4 个端元 (EM1-EM4) 粒度频率分布曲线。

Fig.5 End-member analysis of surface sediments in Tangshan Harbor, Bohai Bay

a: End member-mean coefficient of determination, b: frequency curves of four end-members (EM1-EM4).

analysis, EMMA) 计算研究区表层沉积物粒度端元值, 复相关系数 ( $R^2$ ) 代表粒度实测数据被端元拟合的程度<sup>[35]</sup>。为较好地获取拟合粒度数据的最小端元数, 假设端元数是 2~10 的情况下, 对各粒径复相关系数和所有粒径复相关系数平均值进行计算。结果显示端元数为 2、3 时, 平均复相关系数分别为 0.85 和 0.90 (图 5a), 但 26~125  $\mu\text{m}$  拟合程度较差, 不能满足粒径拟合的需要。当端元数为 4 时, 大部分粒径拟合程度大于 0.8, 平均复相关系数为 0.95 (图 5a), 说明 4 个端元满足拟合的需要。根据端元分析方法选取端元应遵循尽量少的原

则<sup>[36]</sup>, 选取 4 个端元 (EM1—EM4) 对该区粒度数据进行拟合。

端元粒度频率分布曲线显示 4 个端元中 EM1、EM2 和 EM4 都具有一个明显的主峰, 分布形态接近正态分布, EM1 到 EM4 粒径增大, 分选变好 (图 5b)。端元 EM1 粒径众数值为 10  $\mu\text{m}$ , 为细粉砂; EM2 粒径众数值为 20  $\mu\text{m}$ , 为中粉砂; EM3 粒径众数值为 200  $\mu\text{m}$ , 为中砂, 在细颗粒组分 6~7  $\mu\text{m}$  处可见次峰, 为细砂。端元 EM4 粒径众数值为 300  $\mu\text{m}$ , 为粗砂 (图 5b)。

在沉积物粒度 4 端元相对含量平面等值线图



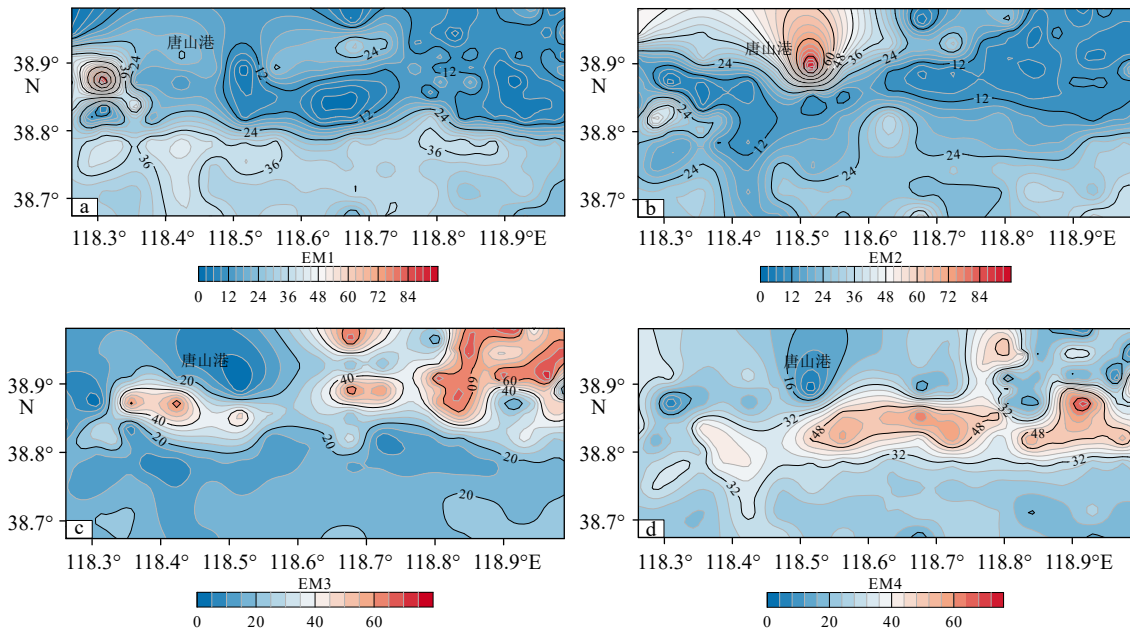


图 6 渤海湾唐山港海域表层沉积物 4 个端元相对含量平面分布

Fig.6 Distribution of relative contents of four end-members of surface sediments in Tangshan Harbor, Bohai Bay

上, EM1 含量为 0~97.77%, 平均含量为 22.28%, 在研究区均有分布, 高值区主要是在研究区西部靠近海河区域, 并有从近岸向外海方向递减的趋势(图 6a)。EM2 含量为 0~100%, 平均含量为 19.60%, 在渤海湾全区均有分布, 主要集中在唐山港附近海域, 并有从近岸向外海方向递减的趋势(图 6b)。EM3 含量为 0~74.07%, 平均含量为 28.77%, 主要分布在研究区东北部、北部以及中部曹妃甸深槽区域(图 6c)。EM4 含量为 0~72.58%, 平均含量为 29.34%, 主要分布在中部曹妃甸深槽区域(图 6d)。

### 3.3 黏土矿物分布特征

渤海湾唐山港附近海域表层沉积物中黏土矿物主要是由大量的伊利石(66%~86%, 平均含量 72%)、少量的蒙脱石(2%~18%, 平均含量 12%)、绿泥石(4%~11%, 平均含量 8%)以及高岭石(5%~15%, 平均含量 8%)组成。唐山港附近伊利石含量相对较高(75%以上), 蒙脱石含量 12%左右, 而高岭石、绿泥石含量相对较低, 为 6%左右(图 7)。研究区东北部为蒙脱石相对高值区, 伊利石、高岭石以及绿泥石低值区; 曹妃甸深槽处则出现蒙脱石、高岭石以及绿泥石相对高值区、伊利石低值区; 南区域总体呈现出蒙脱石和高岭石相对高值区、伊利石和绿泥石相对低值区, 局部存在蒙脱石和高岭石相对低值区、伊利石和绿泥石的局部高值区; 唐山港海域附近则整体表现为蒙脱石和伊利石相对高值区、高岭石和绿泥石的相对低值区(图 7)。

## 4 讨论

### 4.1 物源判别

渤海沉积物来源主要是河流作用携带的陆源碎屑物质、外海物质、大气沉降物质以及周围基岩侵蚀风化形成的物质<sup>[10,24]</sup>。其中, 渤海湾周围河流入海物质贡献量较大, 占渤海沉积物的 90%左右, 以黄河、海河和滦河等为主。了解沉积物潜在物源区和迁移过程是进行物源判别的前提<sup>[19,37]</sup>。尽管中国大陆的风尘颗粒在太平洋深海碎屑物质通量中贡献较大<sup>[38-39]</sup>, 但在大陆边缘海沉积物中风尘物质含量较低, 大量河流来源的碎屑物质将风尘物质信息掩盖<sup>[40]</sup>, 可忽略不计。

由于受到流域气候条件的影响, 不同来源沉积物中粒度和黏土矿物相对含量具有明显的差别(表 1)。滦河平均年输沙量 20.1 Mt, 流经中酸性的岩浆岩、古中新生代的砂页岩和灰岩等沉积岩以及前古生代变质岩的蚀变源区<sup>[41]</sup>, 沉积物粒度相对较粗, 主要是中细砂等粗粒级为主, 细粒级的物质相对较少。黏土矿物呈现出伊利石含量相对较低而高岭石+绿泥石、蒙脱石含量相对较高的特征; 海河沉积物粒度较细, 主要是以黏土质粉砂为主<sup>[42]</sup>。沉积物中黏土矿物含量特征则与滦河相反, 呈现出伊利石含量相对较高、而蒙脱石和高岭石+绿泥石含量较低的特征; 黄河流经黄土高原, 携带大量的泥沙入

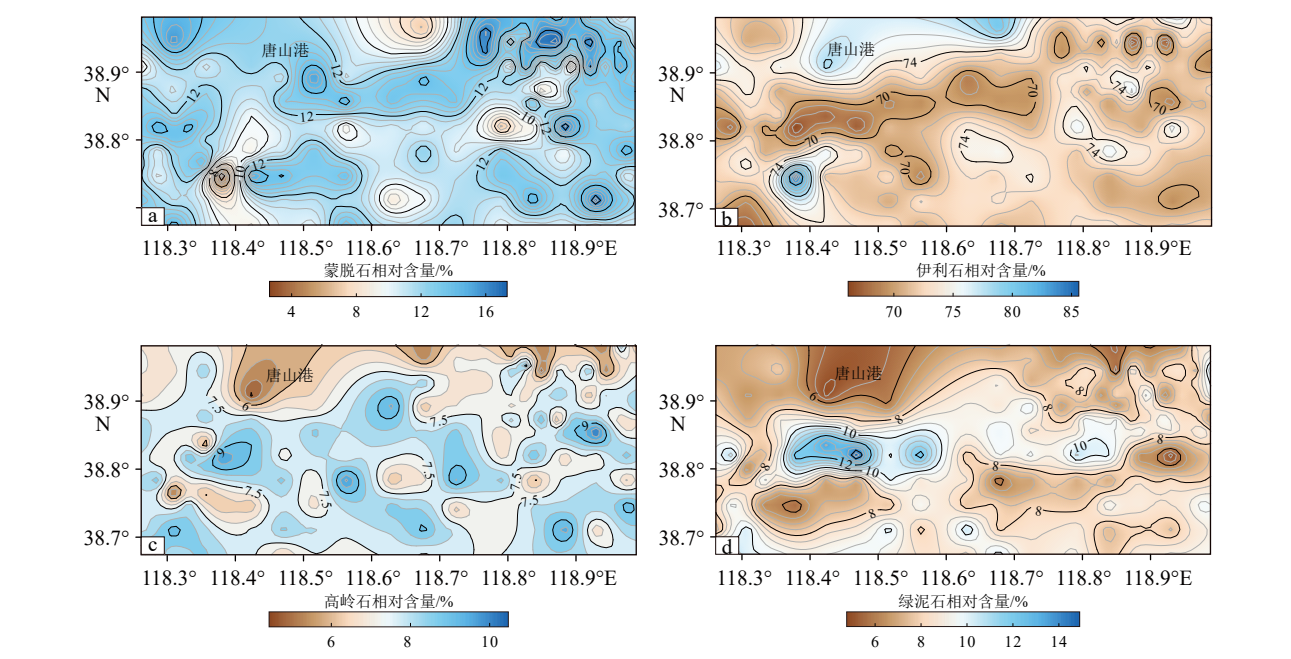


图 7 渤海湾唐山港海域表层沉积物黏土矿物相对含量分布图

Fig.7 Distribution of the relative content of clay minerals in surface sediments in Tangshan Harbor, Bohai Bay

表 1 渤海湾唐山港附近海域及周围河流表层沉积物中黏土矿物相对含量

Table 1 Relative content of clay minerals in surface sediments of the Tangshan Harbor and surrounding rivers in the Bohai Bay

| 样品位置  | 样品数量/个 | 蒙脱石/%      | 伊利石/%      | 高岭石/%   | 绿泥石/%     | 伊利石结晶度 | 数据来源     |
|-------|--------|------------|------------|---------|-----------|--------|----------|
| 唐山港海域 | 161    | 12         | 72         | 8       | 8         | 0.43   | 本文       |
| HH-1  |        | 23.0       | 58.0       | 12.0    | 7.0       |        | 引自文献[43] |
| HH-2  |        | 23.2       | 59.0       | 8.5     | 9.3       |        | 引自文献[44] |
| HH-3  |        | 13.0       | 67.0       | 8.0     | 12.0      |        | 引自文献[45] |
| HH-4  |        | 16.0       | 62.0       | 10.0    | 12.0      |        | 引自文献[46] |
| HH-5  |        | 15.2       | 62.5       | 9.7     | 12.5      |        | 引自文献[47] |
| HH-6  |        | 10.0       | 60.0       | 12.0    | 18.0      |        | 引自文献[48] |
| HH-7  |        | 12.0       | 62.0       | 10.0    | 16.0      |        | 引自文献[49] |
| HH-8  |        | 21.0       | 61.0       | 9.0     | 9.0       |        | 引自文献[42] |
| HH-9  | 16     | 29 (11~44) | 54 (39~69) | 7 (5~9) | 10 (9~14) | 0.33   | 引自文献[50] |
| LR-1  |        | 22         | 48         | 16      | 14        | 0.45   |          |
| LR-2  |        | 15         | 54         | 16      | 16        | 0.43   |          |
| LR-3  |        | 24         | 46         | 16      | 14        | 0.47   | 引自文献[19] |
| LR-4  |        | 27         | 50         | 12      | 12        | 0.48   |          |
| LR-5  |        | 26         | 47         | 14      | 13        | 0.43   |          |
| HR-1  |        | 7          | 63         | 14      | 19        | 0.36   |          |
| HR-2  |        | 9          | 64         | 14      | 14        | 0.35   | 引自文献[19] |

注: HH1-9: 黄河表层沉积物中黏土矿物; LR1-5: 滦河表层沉积物中黏土矿物; HR1-2: 海河表层沉积物中黏土矿物。

海, 每年大概 2/3 的泥沙沉积物堆积在黄河三角洲地区, 其余的则被带到三角洲滨海区外<sup>[41]</sup>。其沉积物颗粒主要是由黏土质粉砂和少量的黏土组成, 粒度相对较细<sup>[42]</sup>, 黏土矿物含量则介于海河与滦河之间, 且更接近于海河<sup>[42]</sup>(表 1)。

为确定渤海湾物源区, 利用粒度组分、蒙脱石-

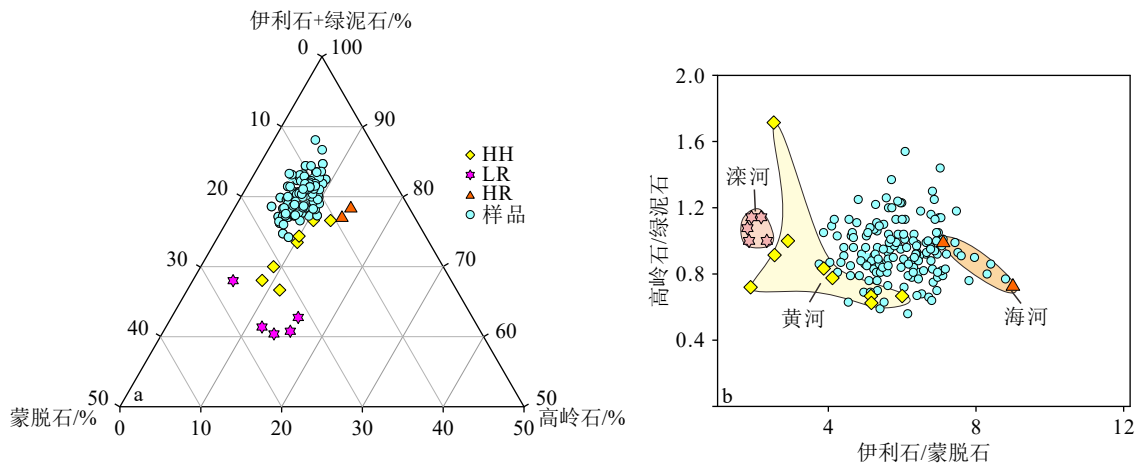


图 8 渤海湾唐山港附近海域及周围河流表层沉积物黏土矿物组合三角图和比值散点图

a: 黏土组合蒙脱石-(伊利石+绿泥石)-高岭石三角图, b: 伊利石/蒙脱石-高岭石/绿泥石比值散点图; HH-黄河; LR-滦河; HR-海河。

Fig.8 Triangle and scatter diagram of the clay minerals of surface sediments in Tangshan Harbor and surrounding rivers

a: Triangle diagram of clay minerals assemblages smectite-(illite+chlorite)-kaolinite, b: Scatter plot of illite/smectite-kaolinite/chlorite ratios; HH-Yellow River; LR-Luan River; HR-Hai River.

(伊利石+绿泥石)-高岭石三角图和高岭石/绿泥石-伊利石/蒙脱石的比值进行判别(图 8a-b),并与周围潜在的河流沉积物中黏土矿物相对含量进行对比分析,发现唐山港海域表层沉积物黏土矿物主要落在黄河和海河之间的区域,指示细颗粒沉积物主要来源于黄河-海河混合的陆源碎屑物质。这与粒度端元组分 EM1 在研究区均有分布,并由近岸向外海方向递减的趋势相一致(图 6a),代表悬浮搬运的现代陆源细颗粒物质,因此认为细颗粒沉积物来源主要是黄河-海河混合的陆源碎屑物质,与前人的研究较为一致<sup>[11-12, 14]</sup>。此外,粒度分布特征显示研究区东北部和唐山港南部曹妃甸深槽处对应的沉积物类型主要是粉砂质砂和砂质粉砂,粒度相对偏粗(图 4a),而海河径流输入泥沙中值粒径为 5~20  $\mu\text{m}$ ,颗粒很细,黄河来源的物质主要是黏土质粉砂,粒度也相对较细<sup>[42]</sup>,如果只依靠来自海河和黄河携带的泥沙供应无法形成粉砂质砂等较粗的沉积物类型,因而对于研究区东北部和中部曹妃甸深槽区粗颗粒沉积物来源问题,还需要结合粒度特征对沉积物做进一步的物源分析。李从先等研究认为唐山港曹妃甸海区位于古滦河三角洲的发育区<sup>[20]</sup>,全新世晚期以来由于海平面下降,滦河改道向北迁移,泥沙供应不足才导致三角洲停止发育,使得该区处于废弃的三角洲沉积环境<sup>[1]</sup>。因此,我们认为曹妃甸深槽区还可能有一部分古滦河物质的加入<sup>[15]</sup>。

#### 4.2 沉积动力环境分析

沉积物粒度数据保存大量与沉积物输运和沉

降有关的信息,可以揭示研究区水动力特征以及沉积物输运过程。粒度端元 EM1 对应沉积物类型主要是细粉砂,一般对应弱的潮流场,在唐山港西部出现高值区,且含量自沿岸向渤海湾逐渐递减(图 6a),与该区的潮流走向<sup>[27]</sup>大致相当,代表了形成现代泥质沉积区的动力组分;粒度端元 EM2 在研究区北部存在高值区,且向中部曹妃甸深槽处呈现出逐渐减少的趋势(图 6b),对应沉积物类型主要是砂质粉砂、中粉砂,可能代表水动力条件中等;粒度端元 EM3 主要分布在研究区东北部和中部曹妃甸深槽(图 6c);端元 EM4 高值区有中部曹妃甸深槽和北部部分区域,分别对应的沉积物类型为粉砂质砂和砂,代表该区域水动力环境较强(图 6d)。

除了受沉积物物源的影响外,渤海湾唐山港海域表层沉积物的粒度和黏土矿物分布特征还大致与渤海湾的环流体系和潮流场密切相关<sup>[10, 14, 24]</sup>,显示出潮流场对黄河、滦河以及海河物质的搬运和扩散影响<sup>[27, 51]</sup>。夏季波浪作用相对较弱,黄河、海河以及滦河入海沉积物绝大部分沉积在河口处,少部分通过环流向远端扩散迁移沉积。冬季风浪较强,沉积在河口三角洲处的沉积物在海流和波浪作用下,发生侵蚀再悬浮作用向远端扩散迁移。根据渤海湾潮流数值动力学模型<sup>[52]</sup>,潮流流沿渤海湾北岸的滦河口附近流向唐山港东北部,然后一分为二,分为洋流 A 和洋流 B 两条路线。洋流 A 通过港口时流速减慢,使得悬浮颗粒物质沉积。进入研究区域后,洋流 B 转向东南,呈逆时针方向环流,随后悬浮的细颗粒沉积物在港口东南部沉积。洋流



A 从研究区域流出在天津塘沽北部永定新河口附近分为两股, 一条分支洋流 C, 携带着海河口沉积物沿着海岸向北进入渤海湾西北部海域, 沿岸河流中的悬浮细颗粒物质由于流速降低, 沉积在港口西部。另一股洋流 D 沿西部海岸向南移动到南部海岸, 然后沿南部海岸向东移动, 其中一部分可能向北进入研究区。黄河中的泥沙入海后其沉积物在渤海环流的作用下向东北、东南和西北 3 个方向扩散<sup>[5]</sup>, 其中向东北方向迁移的环流和洋流 D 共同作用将黄河细颗粒沉积物迁移至研究区。洋流 C 和洋流 D 在港口附近与洋流 A 汇合, 使得研究区细颗粒组分主要是海河-黄河混合的沉积物质。此外, 少量的滦河三角洲(包括古滦河三角洲)入海泥沙和粗颗粒物质在渤海湾反时针环流和波浪的共同作用下由滦河口北部沿岸向研究区东北部和中部曹妃甸深槽搬运沉积(图 9), 形成曹妃甸的离岸沙坝。渤海湾唐山港海域受到环流和潮流体系的影响, 接受来自周围的黄河-海河物质以及部分的滦河物质的供应。

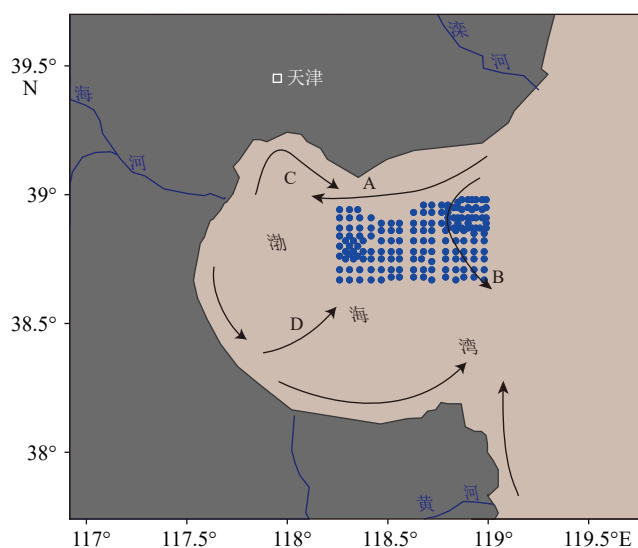


图 9 渤海湾唐山港附近沉积物迁移模式图

Fig.9 Sediment transport pattern in Tangshan Harbor area, Bohai Bay

## 5 结论

(1) 唐山港海域表层沉积物有 5 种类型, 主要以粉砂质砂和砂质粉砂为主。各组分中以粉砂含量最高, 平均值为 50.38%, 其次是砂, 平均含量为 28.17%, 黏土含量最低, 平均含量为 21.45%。

(2) 根据粒度参数特征, 研究区大致可以分为

3 个区: 东北部以粉砂质砂为主, 分选较差, 正偏态; 中部曹妃甸深槽区以砂质粉砂为主, 分选差, 正偏态; 南部和西北部以粉砂为主, 分选中等—较差。

(3) 粒度端元模型显示, 唐山港海域表层沉积物粒度可分离 EM1—EM4 四个端元, 其众数值分别为 10、20、200 和 300  $\mu\text{m}$ , 平均含量分别为 22.28%、19.60%、28.77% 和 29.34%。EM1 和 EM2 反映了沉积动力环境弱, EM3 和 EM4 则反映沉积动力环境强, 可能会对沉积物冲刷改造。

(4) 利用蒙脱石-(伊利石+绿泥石)-高岭石矿物组合和高岭石/绿泥石-伊利石/蒙脱石比值识别出沉积物细颗粒组分来源主要是黄河-海河混合的陆源碎屑物质。曹妃甸深槽区可能有部分古滦河三角洲粗颗粒物质的加入。

(5) 渤海环流和潮余流控制着本区细颗粒沉积物主要向南部和唐山港附近迁移沉积, 粗颗粒物质向东北部和中部曹妃甸区搬运沉积。

**致谢:** 衷心感谢编辑和审稿专家在论文修改过程中的指导和帮助, 感谢渤海曹妃甸海域 1:5 万海洋区域地质调查的全体出海人员采集的表层沉积物样品。

## 参考文献 (References)

- [1] 褚宏宪, 史慧杰, 宗欣, 等. 渤海湾曹妃甸深槽海区地形地貌特征及控制因素 [J]. 海洋科学, 2016, 40(3): 128-137. [CHU Hongxian, SHI Huijie, ZONG Xin, et al. Characteristic geomorphology and controlling factors of Caoifeidian Channel in the Bohai Bay [J]. Marine Sciences, 2016, 40(3): 128-137.]
- [2] 王强, 李凤林. 渤海湾西岸第四纪海陆变迁 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 1983, 3(4): 83-89. [WANG Qiang, LI Fenglin. The changes of marine-continental conditions in the west coast of the Bohai gulf during Quaternary [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1983, 3(4): 83-89.]
- [3] Liu J, Wang H, Wang F F, et al. Sedimentary evolution during the last ~1.9 Ma near the western margin of the modern Bohai Sea [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2016, 451: 84-96.
- [4] 庄振业, 许卫东, 刘东生, 等. 渤海南部  $S_3$  孔晚第四纪海相地层的划分及环境演变 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 1999, 19(2): 27-35. [ZHUANG Zhenye, XU Weidong, LIU Dongsheng, et al. Division and environmental evolution of late Quaternary marine beds of  $S_3$  hole in the Bohai Sea [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1999, 19(2): 27-35.]
- [5] Yi L, Deng C L, Xu X Y, et al. Paleo-megalake termination in the Quaternary: paleomagnetic and water-level evidence from south Bohai Sea, China [J]. Sedimentary Geology, 2015, 319: 1-12.
- [6] 吴越, 杨文波, 王琳, 等. 曹妃甸填海造地时空分布遥感监测及其影



- 响初步研究[J]. *海洋湖沼通报*, 2013(1): 153-158. [WU Yue, YANG Wenbo, WANG Lin, et al. Primary study on the spatial-temporal changes and the effect of sea reclamation in caofeidian based on remote sensing[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2013(1): 153-158.]
- [7] 张宁, 殷勇, 潘少明, 等. 渤海湾曹妃甸潮汐汉道系统的现代沉积作用[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2009, 29(6): 25-34. [ZHANG Ning, YIN Yong, PAN Shaoming, et al. Modern sedimentation of tidal inlet-tidal basin system in Caofeidian coastal area, Bohai bay, northeastern China[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2009, 29(6): 25-34.]
- [8] Yao Z Q, Guo Z T, Xiao G Q, et al. Sedimentary history of the western Bohai coastal plain since the late Pliocene: implications on tectonic, climatic and sea-level changes[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 54-55: 192-202.
- [9] Yang Z S, Ji Y J, Bi N S, et al. Sediment transport off the Huanghe (Yellow River) delta and in the adjacent Bohai Sea in winter and seasonal comparison[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2011, 93(3): 173-181.
- [10] 乔淑卿, 石学法, 王国庆, 等. 渤海底质沉积物粒度特征及输运趋势探讨[J]. *海洋学报*, 2010, 32(4): 139-147. [QIAO Shuqing, SHI Xuefa, WANG Guoqing, et al. Discussion on grain-size characteristics of seafloor sediment and transport pattern in the Bohai Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2010, 32(4): 139-147.]
- [11] 蓝先洪, 李日辉, 王中波, 等. 渤海西部表层沉积物的地球化学记录[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2017, 37(3): 75-85. [LAN Xianhong, LI Rihui, WANG Zhongbo, et al. Geochemical records of surface sediments in the western Bohai sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2017, 37(3): 75-85.]
- [12] 虞义勇, 王永红, 李日辉, 等. 渤海西部表层沉积物中黏土矿物分布特征及物源指示[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2017, 37(1): 51-58. [YU Yiyong, WANG Yonghong, LI Rihui, et al. Clay minerals distribution pattern in surface sediments of western Bohai and their provenance implications[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2017, 37(1): 51-58.]
- [13] 冯秀丽, 魏飞, 刘杰, 等. 渤海湾西部表层沉积物粒度及黏土矿物特征分析[J]. *海洋科学*, 2015, 39(8): 70-77. [FENG Xiuli, WEI Fei, LIU Jie, et al. The sediment grain size characteristics and analysis of sources in the western Bohai Bay[J]. *Marine Sciences*, 2015, 39(8): 70-77.]
- [14] 韩宗珠, 张军强, 邹昊, 等. 渤海湾北部底质沉积物中黏土矿物组成与物源研究[J]. *中国海洋大学学报*, 2011, 41(11): 95-102. [HAN Zongzhu, ZHANG Junqiang, ZOU Hao, et al. Characteristics and provenance of clay mineral assemblage of sediments from the Northern Part of the Bohai Bay[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2011, 41(11): 95-102.]
- [15] 乔淑卿, 石学法, 方习生, 等. 渤海—北黄海沉积物黏土矿物特征及其环境意义[J]. *海洋科学进展*, 2020, 38(2): 253-262. [QIAO Shuqing, SHI Xuefa, FANG Xisheng, et al. Distribution and composition of clay minerals in seafloor surface sediments of the Bohai Sea and North Yellow Sea and their implications for sedimentary environment[J]. *Advances in Marine Science*, 2020, 38(2): 253-262.]
- [16] 襄衍光, 陈晓辉, 李军, 等. 东海外陆架-陆坡-冲绳海槽不同沉积单元底质沉积物成因及物源分析[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2018, 38(4): 21-31. [DOU Yanguang, CHEN Xiaohui, LI Jun, et al. Origin and provenance of the surficial sediments in the subenvironments of the East China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2018, 38(4): 21-31.]
- [17] 杨娅敏, 曾志刚, 殷学博, 等. 700年以来冲绳海槽南部黏土矿物来源及其对沉积环境的响应[J]. *海洋科学*, 2021, 45(11): 42-53. [YANG Yamin, ZENG Zhigang, YIN Xuebo, et al. Sediment provenance and its response to the paleoenvironment in the southern Okinawa Trough over the past 700 years[J]. *Marine Sciences*, 2021, 45(11): 42-53.]
- [18] Biscaye P E. Mineralogy and sedimentation of recent deep-sea clay in the Atlantic Ocean and adjacent seas and oceans[J]. *GSA Bulletin*, 1965, 76(7): 803-832.
- [19] Dou Y G, Li J, Zhao J T, et al. Clay mineral distributions in surface sediments of the Liaodong Bay, Bohai Sea and surrounding river sediments: sources and transport patterns[J]. *Continental Shelf Research*, 2014, 73: 72-82.
- [20] 李从先, 陈刚, 王利. 滦河废弃三角洲和砂坝: 泻湖沉积体系[J]. *沉积学报*, 1983, 1(2): 60-72. [LI Congxian, CHEN Gang, WANG Li. The abandoned deltas of the Luanhe river and the barrier-lagoon sedimentary systems[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1983, 1(2): 60-72.]
- [21] 冯永财, 曹斌华, 褚宏宪, 等. 渤海湾曹妃甸深槽断面监测研究进展[J]. *海洋地质前沿*, 2023, 39(8): 78-83. [FENG Yongcai, CAO Binhua, CHU Hongxian, et al. Research progress on monitoring of trough section in Caofeidian, Bohai Bay[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2023, 39(8): 78-83.]
- [22] Milliman J D, Meade R H. World-wide delivery of river sediment to the oceans[J]. *The Journal of Geology*, 1983, 91(1): 1-21.
- [23] Li G X, Wei H L, Han Y S, et al. Sedimentation in the Yellow River delta, part I: flow and suspended sediment structure in the upper distributary and the estuary[J]. *Marine Geology*, 1998, 149(1-4): 93-111.
- [24] 中国科学院海洋研究所海洋地质研究室. 渤海地质[M]. 北京: 科学出版社, 1985. [Marine Geology Research Office, Institute of Oceanography, Chinese Academy of Sciences. *Geology of Bohai*[M]. Beijing: Science Press, 1985.]
- [25] 韩雁, 张士锋. 海河流域径流变异特征及其影响因素研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2021, 32(1): 7-13. [HAN Yan, ZHANG Shifeng. Characteristics of runoff variations and their influencing factor in Haihe River Basin[J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2021, 32(1): 7-13.]
- [26] 刘振夏. 现代滦河三角洲的影响因素和沉积物分区[J]. *黄渤海海洋*, 1989, 7(4): 55-64. [LIU Zhenxia. The influential factors and zoning of the modern Luanhe River Delta[J]. *Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas*, 1989, 7(4): 55-64.]
- [27] 赵保仁, 庄国文, 曹德明, 等. 渤海的环流、潮流及其对沉积物分布的影响[J]. *海洋与湖沼*, 1995, 26(5): 466-473. [ZHAO Baoren, ZHUANG Guowen, CAO Deming, et al. Circulation, tidal residual currents and their effects on the sedimentations in the bohai sea[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1995, 26(5): 466-473.]
- [28] Yuan P, Wang H J, Wu X, et al. Grain-size distribution of surface sediments in the Bohai Sea and the northern Yellow Sea: sediment supply

- and hydrodynamics[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2020, 19(3): 589-600.
- [29] 张剑, 李日辉, 王中波, 等. 渤海东部与黄海北部表层沉积物的粒度特征及其沉积环境 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2016, 36(5): 1-12. [ZHANG Jian, LI Rihui, WANG Zhongbo, et al. Grain size characteristics of surface sediments in the east Bohai sea and the northern Yellow sea and their implications for environments[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2016, 36(5): 1-12.]
- [30] 赵保仁, 曹德明. 渤海冬季环流形成机制动力学分析及数值研究 [J]. *海洋与湖沼*, 1998, 29(1): 86-96. [ZHAO Baoren, CAO Deming. Dynamic analysis and numerical modeling of forming mechanisms of winter circulations in the Bohai Sea[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1998, 29(1): 86-96.]
- [31] Jiang W Q, Chu H X, Liu Y Y, et al. Distribution of heavy metals in coastal sediments under the influence of multiple factors: a case study from the south coast of an industrialized harbor city (Tangshan, China)[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 889: 164208.
- [32] 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.
- [33] Folk R L, Ward W C. Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1957, 27(1): 3-26.
- [34] Holtzapffel T, Bonnot-Courtois C, Chamley H, et al. Héritage et diagenèse des smectites du domaine sédimentaire nord-atlantique (Crétacé, Paléogène)[J]. *Bulletin de la Société géologique de France*, 1985, 1(1): 25-33.
- [35] Weltje G J, Prins M A. Muddled or mixed? Inferring palaeoclimate from size distributions of deep-sea clastics[J]. *Sedimentary Geology*, 2003, 162(1-2): 39-62.
- [36] Weltje G J. End-member modeling of compositional data: numerical-statistical algorithms for solving the explicit mixing problem[J]. *Mathematical Geology*, 1997, 29(4): 503-549.
- [37] Steinke S, Hanebuth T J J, Vogt C, et al. Sea level induced variations in clay mineral composition in the southwestern South China Sea over the past 17, 000 yr[J]. *Marine Geology*, 2008, 250(3-4): 199-210.
- [38] Jardine G E, Crocker A J, Bailey I, et al. The imprint of windblown dust from the North American Southwest on the California Channel Islands and Pacific Ocean sediments[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2021, 261: 106934.
- [39] Nakai S, Halliday A N, Rea D K. Provenance of dust in the Pacific Ocean[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1993, 119(1-2): 143-157.
- [40] Diekmann B, Hofmann J, Henrich R, et al. Detrital sediment supply in the southern Okinawa Trough and its relation to sea-level and Kuroshio dynamics during the late Quaternary[J]. *Marine Geology*, 2008, 255(1-2): 83-95.
- [41] 张义丰, 李凤新. 黄河、滦河三角洲的物质组成及其来源 [J]. *海洋科学*, 1983, 7(3): 15-18. [ZHANG Yifeng, LI Fengxin. The characteristics of material component and the material resources in Huanghe (Yellow) River, Luanhe River[J]. *Marine Sciences*, 1983, 7(3): 15-18.]
- [42] 刘建国. 全新世渤海泥质区的沉积物物质组成特征及其环境意义 [D]. 中国科学院研究生院 (海洋研究所) 博士学位论文, 2007. [LIU Jianguo. Material compositions of sediments in the Bohai Sea mud area during the Holocene and their environmental implications[D]. Doctor Dissertation of Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2007.]
- [43] Li Y, Li A C, Huang P, et al. Clay minerals in surface sediment of the north Yellow Sea and their implication to provenance and transportation[J]. *Continental Shelf Research*, 2014, 90: 33-40.
- [44] 赵全基. 渤海表层沉积物中粘土矿物研究 [J]. *黄渤海海洋*, 1987, 5(1): 78-84. [ZHAO Quanji. A study of the clay minerals of the surficial deposit in the Bohai Sea[J]. *Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas*, 1987, 5(1): 78-84.]
- [45] Ren M E, Shi Y L. Sediment discharge of the Yellow River (China) and its effect on the sedimentation of the Bohai and the Yellow Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 1986, 6(6): 785-810.
- [46] 杨作升. 黄河、长江、珠江沉积物中粘土的矿物组合、化学特征及其与物源区气候环境的关系 [J]. *海洋与湖沼*, 1988, 19(4): 336-346. [YANG Zuosheng. Mineralogical assemblages and chemical characteristics of clays from sediments of the Huanghe, Changjiang, Zhujiang Rivers and their relationship to the climate environment in their sediment source areas[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1989, 19(4): 336-346.]
- [47] 范德江, 杨作升, 毛登, 等. 长江与黄河沉积物中粘土矿物及地化成分的组成 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2001, 21(4): 7-12. [FAN Dejiang, YANG Zuosheng, MAO Deng, et al. Clay minerals and geochemistry of the sediments from the Yangtze and Yellow Rivers [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2001, 21(4): 7-12.]
- [48] Yang S Y, Jung H S, Choi M S, et al. The rare earth element compositions of the Changjiang (Yangtze) and Huanghe (Yellow) river sediments[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 201(2): 407-419.
- [49] Yang S Y, Jung H S, Lim D I, et al. A review on the provenance discrimination of sediments in the Yellow Sea[J]. *Earth-Science Reviews*, 2003, 63(1-2): 93-120.
- [50] Zhang J, Wan S M, Clift P D, et al. History of Yellow River and Yangtze River delivering sediment to the Yellow Sea since 3.5 Ma: tectonic or climate forcing?[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2019, 216: 74-88.
- [51] Jiang W S, Pohlmann T, Sun J, et al. SPM transport in the Bohai Sea: field experiments and numerical modelling[J]. *Journal of Marine Systems*, 2004, 44(3-4): 175-188.
- [52] Li Y Y, Feng H, Yuan D K, et al. Mechanism study of transport and distributions of trace metals in the Bohai Bay, China[J]. *China Ocean Engineering*, 2019, 33(1): 73-85.
- [53] Qiao S Q, Shi X F, Zhu A M, et al. Distribution and transport of suspended sediments off the Yellow River (Huanghe) mouth and the nearby Bohai Sea[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2010, 86(3): 337-344.