



# 海洋地质与第四纪地质

MARINE GEOLOGY & QUATERNARY GEOLOGY

## 黄河三角洲周边海域表层沉积物地球化学特征分布及影响因素

雷志宇, 刘荣波, 胡日军, 仇建东, 朱龙海, 朱峰, 张晓东

**Controlling factors and distribution of geochemical characteristics of the surface sediments in the Yellow River Delta**

LEI Zhiyu, LIU Rongbo, HU Rijun, QIU Jiandong, ZHU Longhai, ZHU Feng, and ZHANG Xiaodong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2022041301>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 全新世中国大河三角洲沉积演化模式转化及其对人类活动的响应

Changes of evolution models of China's large river deltas since Holocene and their responses to anthropogenic activities

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 77

#### 南海南部浅表层柱状沉积物孔隙水地球化学特征对甲烷渗漏活动的指示

Pore water geochemistry of shallow surface sediments in the southern South China Sea and its implications for methane seepage activities

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 112

#### 莱州湾表层沉积物重金属分布特征、污染评价与来源分析

Spatial distribution of heavy metals in the surface sediments of Laizhou Bay and their sources and pollution assessment

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 67

#### 福宁湾海域夏季大潮期悬浮泥沙输运特征及控制因素

Characteristics and controlling factors of suspended sediment transportation in summer spring tide in Funing Bay

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 53

#### 渤海湾西岸晚更新世以来的沉积环境演化及碳埋藏评价

Environmental evolution and carbon burial assessment of the west coast of Bohai Bay since Late Pleistocene

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 194

#### 特提斯构造域海底流体逃逸活动特征及其控制因素

Characteristics and controlling factors of submarine fluid escape in Tethys tectonic domain

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 27



关注微信公众号，获得更多资讯信息

雷志宇, 刘荣波, 胡日军, 等. 黄河三角洲周边海域表层沉积物地球化学特征分布及影响因素 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(6): 104-118.  
LEI Zhiyu, LIU Rongbo, HU Rijun, et al. Controlling factors and distribution of geochemical characteristics of the surface sediments in the Yellow River Delta[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2022, 42(6): 104-118.

# 黄河三角洲周边海域表层沉积物地球化学特征分布及影响因素

雷志宇<sup>1</sup>, 刘荣波<sup>2</sup>, 胡日军<sup>1,3</sup>, 仇建东<sup>4</sup>, 朱龙海<sup>1,3</sup>, 朱峰<sup>5</sup>, 张晓东<sup>1,3</sup>

1. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100

2. 潍坊市地下水及地质环境保护重点实验室, 潍坊 261021

3. 中国海洋大学海底科学与探测技术教育部重点实验室, 青岛 266100

4. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266237

5. 潍坊市土地储备中心, 潍坊 261045

**摘要:** 基于黄河三角洲周边海域 180 个站位的表层沉积物资料, 分析了 16 种地球化学元素的分布特征, 利用多元统计分析、数值模拟、元素比值等方法, 探讨了沉积物粒度、水动力环境以及物质来源等因素对于表层沉积物地球化学特征的影响。在地球化学元素分布的基础上, 运用聚类分析将研究区划分为 6 个地球化学区域。I-2 区、I-3 区、II-1 区和 II-2 区东部的大部分元素 ( $T\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{MnO}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{Cr}$ 、 $\text{Ni}$ 、 $\text{Cu}$ ) 含量较高, 沉积物粒度较细; I-1 区、II-3 区的  $\text{SiO}_2$  含量较高, 沉积物粒度较粗。潮流控制着沉积物的起动及迁移, 潮余流影响着细粒沉积物以及多数元素的富集, 水动力作用通过改变沉积物粒度空间格局进而控制这些元素的分布。研究区黄河物质输入以及人类活动影响的区域性差异明显, 黄河物质输入主要作用于现行黄河口海域, 人类活动对埕北老黄河口的  $\text{Cd}$ 、 $\text{Zn}$ 、 $\text{Pb}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$  影响最为显著。自然因素是控制研究区表层沉积物地球化学特征分布的主要原因, 人类活动则进一步改变了部分元素的空间分布规律。

**关键词:** 表层沉积物; 影响因素; 地球化学; 黄河三角洲

中图分类号: P736.4

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2022041301

## Controlling factors and distribution of geochemical characteristics of the surface sediments in the Yellow River Delta

LEI Zhiyu<sup>1</sup>, LIU Rongbo<sup>2</sup>, HU Rijun<sup>1,3</sup>, QIU Jiandong<sup>4</sup>, ZHU Longhai<sup>1,3</sup>, ZHU Feng<sup>5</sup>, ZHANG Xiaodong<sup>1,3</sup>

1. College of Marine Geoscience, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

2. Weifang Key Laboratory of Coastal Groundwater and Geological Environmental Protection and Restoration, Weifang 261021, China

3. Key Lab of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, Ministry of Education, Qingdao 266100, China

4. Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266237, China

5. Weifang City Land Reserve Center, Weifang 261045, China

**Abstract:** The distribution characteristics of 16 elements in the surface sediments from 180 sites in the Yellow River Delta were analyzed. The effects of sediment grain size, hydrodynamic environment, and material sources on geochemical characteristics of the surface sediments were analyzed using multivariate statistical analysis, numerical modelling, and element ratio; and the main controlling factors of geochemical characteristics of surface sediments in the study area were discussed. Based on the distribution of geochemical elements, the study area was divided into six geochemical regions by cluster analysis. Most of the elements ( $T\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{MnO}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{Cr}$ 、 $\text{Ni}$ 、 $\text{Cu}$ ) in Regions I-2, I-3, II-2, and the eastern part of II-1 are characterized by elevated concentrations, and the sediment grain size in these areas is fine. The contents of  $\text{SiO}_2$  are higher in Regions I-1 and II-3, and the sediment grain size is coarser. Results show that tidal current controlled the initiation and transport of sediment in the study area, and tidal residual currents affected the enrichment of fine-grained sediment and most elements. Local hydrodynamic environment controlled the spatial pattern of grain size in surface sediments. Obvious regional differences in material input from

资助项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20221724)

作者简介: 雷志宇(1997—), 男, 硕士研究生, 地质工程专业, E-mail: 1012665224@qq.com

通讯作者: 胡日军(1980—), 男, 教授, 主要从事海洋沉积动力研究, E-mail: hrj@ouc.edu.cn

收稿日期: 2022-04-13; 改回日期: 2022-07-05。 张现荣编辑

the Yellow River and human activities were revealed. The modern Yellow River estuary was strongly controlled by material input from the Yellow River. Human activities had a stronger impact on Chengbei Old Yellow River estuary, especially Cd, Zn, Pb and  $P_2O_5$ . Natural factors were the main factors on the geochemical distribution of surface sediments, while human activities further altered the spatial distribution of some elements.

**Key words:** surface sediments; controlling factors; geochemical characteristics; Yellow River Delta

研究海洋沉积物的地球化学元素含量及其分布规律不但可以指示沉积物的物质来源,还可以为物质搬运以及沉积过程提供依据<sup>[1]</sup>。黄河三角洲是中国的大型河口三角洲之一,河口及其邻近海域是陆源物质向海输运的关键区域<sup>[2]</sup>。大量研究表明,物质来源<sup>[3]</sup>、水动力环境<sup>[4]</sup>、沉积物粒度等是黄河三角洲周边海域表层沉积物地球化学特征重要的影响因素<sup>[5]</sup>。蓝先洪等<sup>[6]</sup>对整个渤海西部区域的地球化学研究发现,黄河为该区域主要的物质来源,水动力环境以及矿物分布对表层沉积物的元素分布具有重要影响。也有研究表明,研究区不同海域的影响因素类型及其作用强度差异明显<sup>[7-8]</sup>。黄河三角洲北部海域的黄河入海口水道在1976年由刁口河改道为清水沟后,黄河输入的泥沙只有少量向西北方向流入渤海湾南岸<sup>[9]</sup>。由于缺乏物质来源,废弃老黄河口海域在水动力环境的作用下受到强烈的侵蚀<sup>[10]</sup>,但该海域依然具有黄河物质特性<sup>[11]</sup>。位于黄河三角洲东部的现行黄河口海域具有沉积动力条件复杂、冲淤速度快等显著特征,黄河泥沙输入是该海域重要的物质来源<sup>[12]</sup>,入海泥沙量显著影响着元素的含量与分布<sup>[13]</sup>,这些物质同时也受潮

流、余流等海流作用的影响<sup>[14]</sup>。也有学者认为,由于黄河输沙量巨大,现行黄河口海域中人类活动的影响并不强烈<sup>[15]</sup>,因此研究区表层沉积物地球化学研究也常忽略人类活动的影响;然而,在埕北老黄河口海域,陆域工业农业<sup>[16]</sup>、海上养殖<sup>[17]</sup>、海上石油开采等人类活动所造成的污染也明显影响着该海域的底质环境<sup>[18]</sup>。

综上所述,研究区沉积动力环境复杂多变,人类活动明显增强,地球化学特征影响因素众多且不同区域差异明显。关于该区地球化学特征分布规律研究近年来取得了一定的成果,但对自然因素和人类活动共同作用的影响考虑不足,同时对不同区域影响因素的差异也缺乏系统性探讨。因此本文在前人工作的基础上研究并完善了黄河三角洲周边海域表层沉积物常微量元素分布规律及其影响因素。

## 1 材料与方法

### 1.1 资料来源

表层沉积物由山东省第四地质矿产勘查院

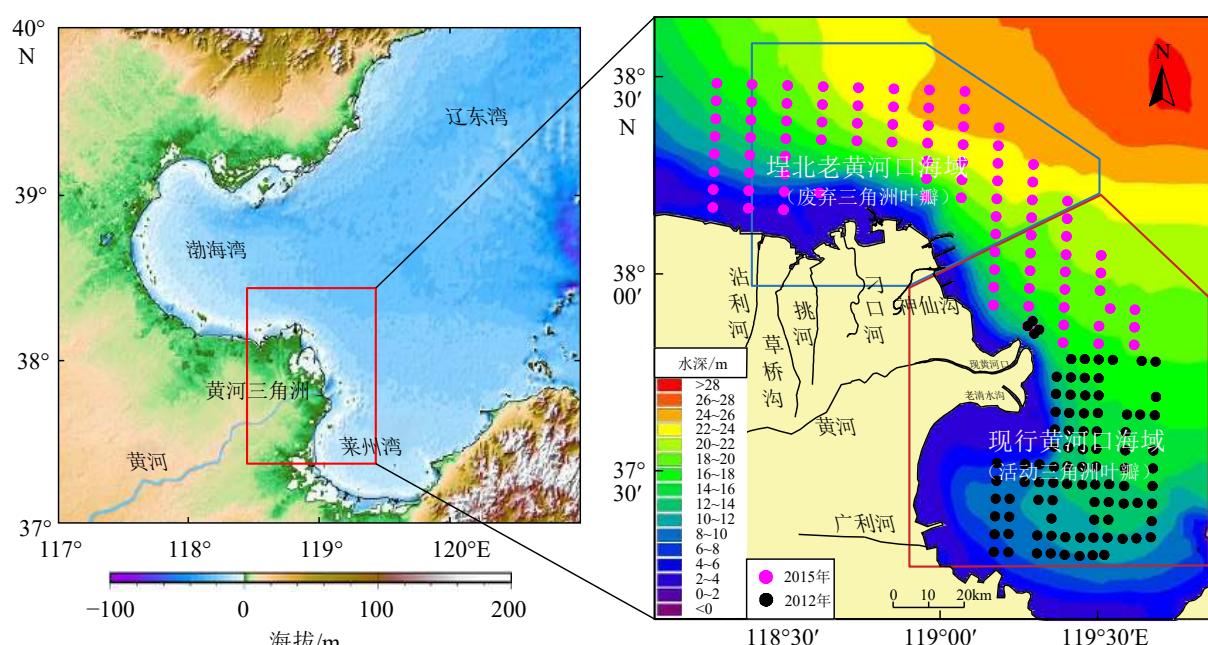


图 1 黄河三角洲周边海域表层沉积物采样站位图<sup>[19]</sup>

Fig.1 Sampling sites of surface sediments in the Yellow River Delta<sup>[19]</sup>

2015 年 9 月和青岛海洋地质研究所 2012 年 7 月所采集。海底表层沉积物采用蚌式取样器进行采集,所有站位样品的重量不少于 2 kg,少于 2 kg 时在原地附近重新采样,连续两次采集仍不达标时,移位再取。采集完毕后样品置于聚乙烯袋,做好标记并妥善放置以备实验室的粒度分析以及元素测定,共采集站位 180 个,具体站位见图 1。

## 1.2 粒度分析

粒度测试在砂粒级组分含量较高的条件下使用筛析法;在粉砂和黏土组分含量较高的条件下使用激光法。筛析法用 1/4  $\Phi$  间隔分级;激光法采用 Mastersizer-2000 型激光粒度分析仪(测量范围为 0.02~2 000  $\mu\text{m}$ ,偏差<1%,重现性  $\Phi 50 < 1\%$ )。本文对于沉积物的粒级划分采用乌顿<sup>[20]</sup>-温德华<sup>[21]</sup>(Udden-Wentworth)等比制  $\Phi$  粒级标准,粒度参数的计算采用 Folk 和 Ward 图解法计算<sup>[22]</sup>,采用 Folk 分类法进行沉积物的分类和定名。

## 1.3 元素分析

### 1.3.1 沉积物样品预处理

将 50.00 mg 烘干后的沉积物放置于聚四氟乙烯溶样内胆中,并加入少量高纯水以润湿样品。在内胆中加入 1.50 mL 的高纯  $\text{HNO}_3$  和 1.50 mL 的高纯 HF 后摇匀并烘干。冷却后取出内胆并置于电热板上蒸至湿盐状,再加入 1 mL 的  $\text{HNO}_3$  蒸干。加入 3 mL 高纯  $\text{HNO}_3$ (1:1),0.5 mL Rh 内标溶液( $1\,000 \times 10^{-9}$ ),加盖及钢套密闭,放入 150℃ 的烘箱

中保持 24 h。冷却后,将提取液转移至干净的聚酯瓶中,使用去离子水后定容待测<sup>[23]</sup>。

### 1.3.2 沉积物样品测试以及质量控制

常量元素以及 Cr、Zn、Zr 的测试使用 ICP-OES; Ni、Cu、Cd、Pb 的测试使用 ICP-MS。仪器采用 iCAP6300(电感耦合等离子体发射光谱仪)和 X series2(电感耦合等离子体质谱仪)。空白对照使用硝酸溶液(2%),将标准物质(GBW07311 和 GBW07313)作为标准溶液以绘制标准工作曲线。监控样品使用 GBW07309,用于质量控制的监控样品标准值与仪器所获得测定值之间的差值均不大于 5%,并且元素测试重复实验的分析结果也都在 10% 以内。

## 1.4 数值模拟

### 1.4.1 模型设置

数值模拟采用 MIKE21 中的 Flow Model FM HD 模块,使用标准 Galerkin 有限元法进行水平空间离散和非结构网格剖分计算域,时间上使用显示迎风差分格式离散动量方程与运输方程。

### 1.4.2 计算区域设置

本次数值模拟的计算范围如图 2 所示,计算坐标范围为  $36^{\circ}59'15.743''$ ~ $40^{\circ}59'21.417''$ N,  $177^{\circ}32'22.881''$ ~ $122^{\circ}39'30.992''$ E。模型采用三角网格进行计算,动边界的处理使用干、湿网格进行。模拟计算中将本次研究区及其周边海域的计算网格进行加密处理,计算三角单元共计 37 217 个,节点共计 20 827 个。

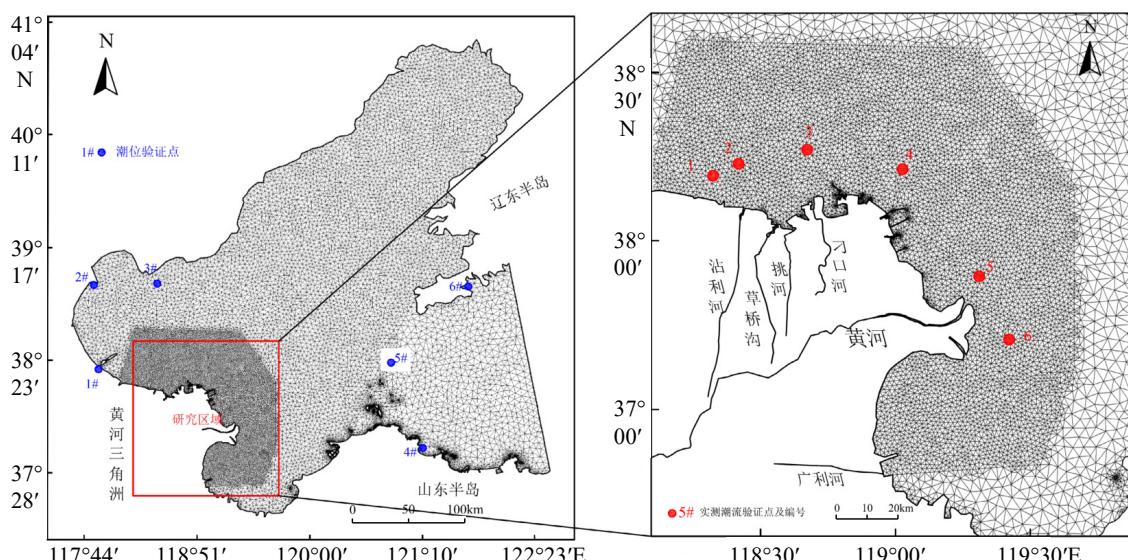


图 2 研究区计算网格图

Fig.2 Gridding of the study area

表 1 潮流潮位验证点概况  
Table 1 Information of tidal current and tidal level verified on site

潮流验证点	北纬	东经	潮流验证点	北纬	东经
1	38°11'51.84"	118°17'58.62"	大口河(1#)	38°15'	117°50'
2	38°14'04.20"	118°23'39.60"	塘沽(2#)	38°59'	117°45'
3	38°16'45.12"	118°39'06.54"	曹妃甸(3#)	38°57'	118°31'
4	38°13'30.48"	119°00'43.20"	八角(4#)	37°39'	121°08'
5	37°54'30.60"	119°18'12.60"	北隍城(5#)	38°22'	120°51'
6	37°43'17.76"	119°25'00.00"	大连港(6#)	38°56'	121°40'

### 1.4.3 模型验证

潮流潮位验证点概况见表 1, 潮流验证引用中国海洋大学于 2019 年 5 月 31 日 8 时至 2019 年 6 月 1 日 9 时在研究区附近海域的 6 个站位进行的 26 h 同步测流资料中底层流速流向对数值模拟计算结果进行验证。潮位验证基于大连、大口河、北隍城、八角、塘沽、曹妃甸 6 个潮位站的  $M_2$ 、 $S_2$ 、 $K_1$ 、 $O_1$  4 个分潮的调和常数进行调和分析, 预测结果用于数值模拟结果的验证。

### 1.5 数据分析

本文所进行的多元统计分析采用 SPSS22.0 软件, 包括相关性分析、聚类分析以及因子分析。聚类分析采用组间距离法, 距离系数的计算拟采用 Euclidean 距离平方; 因子分析采用 Kaiser-Meyer-Olkin 和 Bartlett 球度检验, 旋转采用最大方差法, 最后提取特征值大于 1 的因子。

## 2 结果

### 2.1 表层沉积物粒度分布特征

黄河三角洲周边海域的平均粒径 ( $Mz$ ) 范围为 3.14~8.64  $\Phi$  (图 3a), 均值为 5.91  $\Phi$ , 沉积物类型主要以砂质粉砂和粉砂为主 (图 3b)。埕北老黄河口海域中, 近岸的沾利河、草桥沟、挑河和刁口河河口及其沿岸海域的平均粒径  $\Phi$  值较小, 远岸海域的平均粒径  $\Phi$  值较大。该海域由近岸到远岸沉积物类型变化特征大致为粉砂质砂、砂质粉砂、粉砂、泥、粉砂。这些不同类型的沉积物总体来说在该海域以大致平行于岸线的条状带分布。现行黄河口海域中, 现黄河口、老清水沟河口及其沿岸海域的平均粒径  $\Phi$  值最小, 东部远岸海域的平均粒径  $\Phi$  值相对较高。莱州湾西部海域存在明显的  $\Phi$  值较高的区域, 研究区东南部的平均粒径  $\Phi$  值低于莱州湾

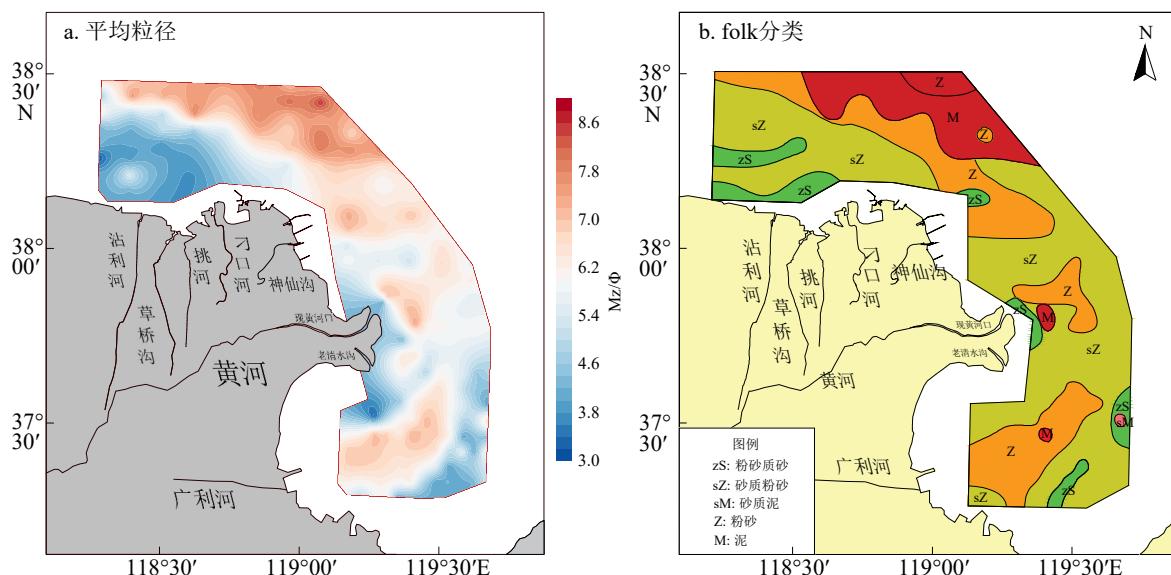


图 3 研究区表层沉积物分布图  
Fig.3 Distribution of surface sediments in the study area

西部海域。粉砂主要分布在现黄河口以东的 15 km 处, 以及莱州湾西部细粒沉积物富集的海域, 其他海域大部分属于砂质粉砂。

## 2.2 表层沉积物常微量元素分布特征

研究区内常量元素含量以  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  为主, 平均含量分别为 59.38% 和 12.30%, 其次是  $\text{CaO}$  和  $\text{TFe}_2\text{O}_3$ , 平均含量分别为 6.77% 和 4.46%;  $\text{MnO}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{MgO}$  的平均含量较低, 分别为 2.71%、2.52%、2.37%;  $\text{TiO}_2$  和  $\text{P}_2\text{O}_5$  的平均含量最低, 分别为 0.66% 和 0.09%。微量元素中 Zr 的平均含量最高, 为 273.10 mg/kg; 其次为 Zn 和 Cr, 分别为 79.60 mg/kg 和 67.45 mg/kg; Ni、Cu 和 Pb 的平均含量分别为 27.58、23.73 和 22.60 mg/kg; Cd 的平均含量最低, 为 0.13 mg/kg。常微量元素含量见表 2 和表 3, 元素空间分布特征见图 4。

## 2.3 地球化学分区

研究区不同海域的自然环境以及人类活动差异显著<sup>[7]</sup>, 其中物质输入<sup>[8]</sup>、水动力环境以及人为因素不仅会控制研究区沉积物的理化性质<sup>[3]</sup>, 而且也会影响多种元素的分布规律<sup>[24]</sup>。为了探讨黄河三角洲周边海域表层沉积物地球化学特征的区域性差异, 本文利用系统聚类法对研究区进行地球化学分区。聚类分析是常用于识别元素空间分布主要影响因素的一种多元统计方法, 其在地球化学的研究中能够指示各常微量元素相互的联系<sup>[25]</sup>。R 型聚类分析包括了本次研究的 16 种元素(图 5)。通过结果可知当选定的判别距离为 15 时, 各化学

表 2 研究区表层沉积物常量元素含量

Table 2 Contents of major elements of surface sediments in the study area

常量组分	$\text{SiO}_2$	$\text{TFe}_2\text{O}_3$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{TiO}_2$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{MnO}$	$\text{P}_2\text{O}_5$	%
平均值	59.38	4.46	12.30	0.66	6.77	2.37	2.52	2.71	0.09	
最大值	68.94	6.11	14.57	0.76	10.55	3.19	2.93	3.88	0.13	
最小值	45.73	2.84	8.89	0.45	4.16	1.43	2.06	1.83	0.05	

表 3 研究区表层沉积物微量元素含量

Table 3 Contents of trace elements of surface sediments in the study area

微量元素组分	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	Zr	mg/kg
平均值	67.45	27.58	23.73	79.60	0.13	22.60	273.10	
最大值	83.20	40.50	66.33	332.96	0.36	39.20	685.00	
最小值	36.80	14.80	4.18	34.70	0.07	6.56	113.79	

元素能够被归为 4 种元素组合。组合 1 包含  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{TFe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MnO}$ 、 $\text{Cu}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{Cr}$ 、 $\text{Ni}$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{Pb}$ ; 组合 2 包含 Zn、Cd; 组合 3 包含  $\text{P}_2\text{O}_5$ 、 $\text{TiO}_2$ ; 组合 4 包含  $\text{SiO}_2$ 、Zr。对于选择进行 Q 型聚类分析的元素, 结合 R 型聚类分析结果以及各元素组分代表意义后选择  $\text{TFe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{Cd}$ 、 $\text{Ni}$ 、 $\text{SiO}_2$  作为地球化学分区(Q 型聚类分析)的基础, 结果见图 6。

本次研究在地球化学分区结果的基础上将黄河三角洲北部的 I-1、I-2、I-3 三个区域归入埕北老黄河口海域, 黄河三角洲东部以及莱州湾内的 II-1、II-2、II-3 三个区域归入现行黄河口海域。埕北老黄河口海域中,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{TFe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MnO}$ 、 $\text{Cu}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{Cr}$ 、 $\text{Ni}$ 、 $\text{CaO}$  在 I-1 区含量相对较低, 在 I-2 区和 I-3 区含量相对较高;  $\text{SiO}_2$ 、Zr 的分布规律与上述元素相反, 主要富集于 I-1 区。现行黄河口海域中,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{TFe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MnO}$ 、 $\text{Cu}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{Cr}$ 、 $\text{Ni}$ 、 $\text{Pb}$ 、 $\text{Cu}$ 、Zn 高值区主要位于 II-1 区东部远岸海域以及 II-2 区;  $\text{SiO}_2$  高值区主要位于 II-3 区。

## 2.4 潮余流分布特征

研究区位于渤海西部, 虽然渤海内余流强度较弱, 但是渤海与黄海水交换的能力较差, 故潮流的往复运动是该区域物质输运的重要动力过程。潮流的非线性运动会产生潮致余流, 潮致余流的特征对研究区的物质运输、生态环境等有着重要影响<sup>[26]</sup>。

本文通过数值模拟提取了 2015 年 9 月研究区两个潮周期的潮余流平均值。根据研究区潮余流模拟结果分析可知(图 7), 在埕北老黄河口远岸海域的潮余流主要指向东北向, 近岸海域的余流较为复杂, 在沾利河、草桥沟、挑河河口处存在一个逆时针环流。现行黄河口海域中, 现黄河口以东的海域潮余流方向也表现为东北向, 莱州湾西部域内主要存在一个顺时针环流, 并且在老清水沟河口处的流速较大, 这与前人的研究结果一致<sup>[27]</sup>。

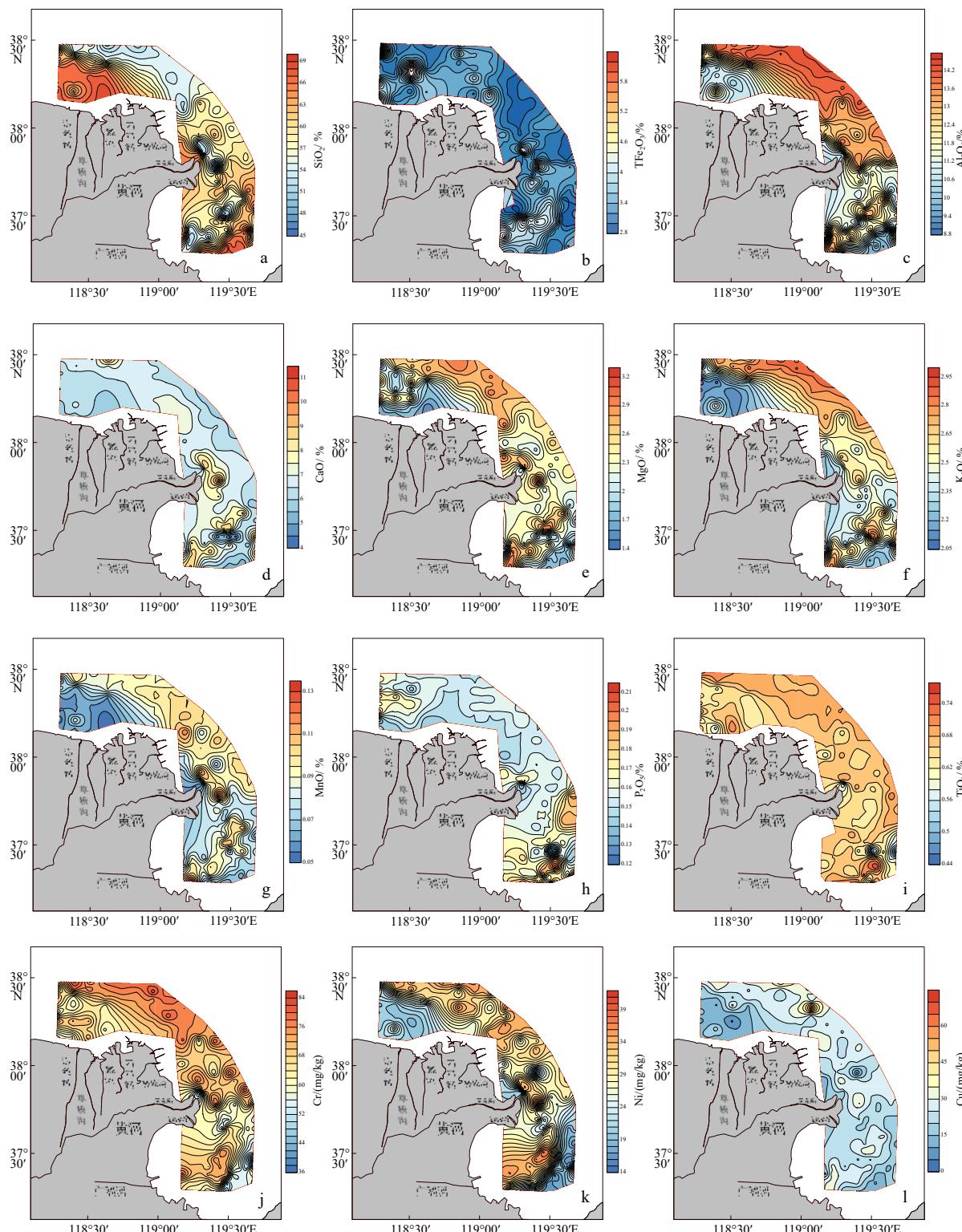
## 3 讨论

### 3.1 粒度对地球化学元素分布的影响

沉积物粒度是影响各元素分布的重要影响因素, 不同粒级沉积物对多种常微量元素的富集作用差异明显, 这种现象被称作“元素粒度控制规律”<sup>[5]</sup>。为了探讨研究区表层沉积物粒度对各元素组分的影响程度, 本文通过各元素与平均粒径的皮尔逊相

关性系数来进行分析(表 4 和表 5)。研究区的  $T\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MnO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{Cr}$ 、 $\text{Ni}$ 、 $\text{Cu}$  与平均粒径表现出较强的正相关性, 沉积物粒度是控制它们分布的重要因素。其分布规律主要表现为 I-3 区、II-2 区以及 II-1 区以东海域含量较高, 这些海域均具有细粒沉积物富集的特征。埕北老黄河口海域的  $\text{CaO}$ 、 $\text{TiO}_2$  和现行黄河口海域的  $\text{Zn}$ 、 $\text{Cd}$ 、

$\text{Pb}$  与上述元素具有相似的分布规律, 也受沉积粒度影响明显。 $\text{SiO}_2$  与上述元素的分布规律相反, 在 I-1、II-3 以及 II-1 区的河口沿岸海域含量较高, 这些区域主要富集粗粒沉积物。埕北老黄河口海域的  $\text{Zr}$  与  $\text{SiO}_2$  的分布规律也大致相同, 受沉积物粒度控制明显。 $\text{P}_2\text{O}_5$  在两个区域与平均粒径相关性都不明显, 表明研究区沉积物粒度并不是  $\text{P}_2\text{O}_5$  主要的



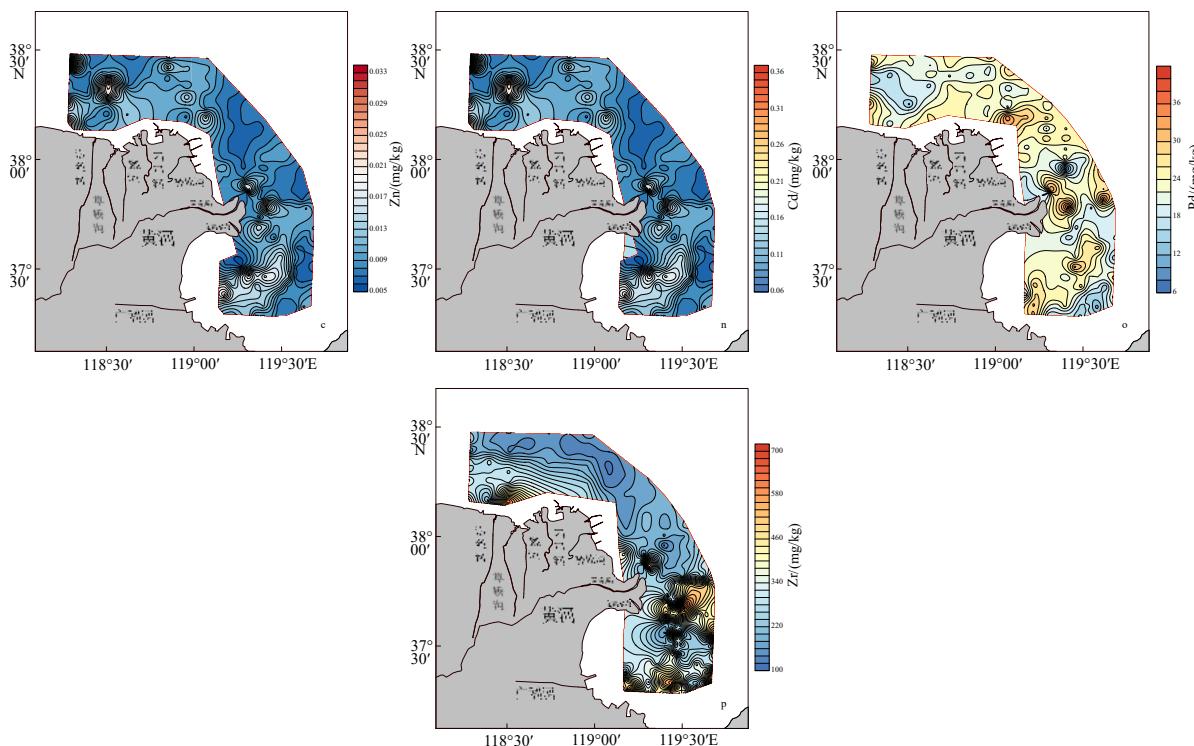


图 4 表层沉积物常微量元素含量分布图

Fig.4 Distribution in concentration of major and minor elements of the surface sediments

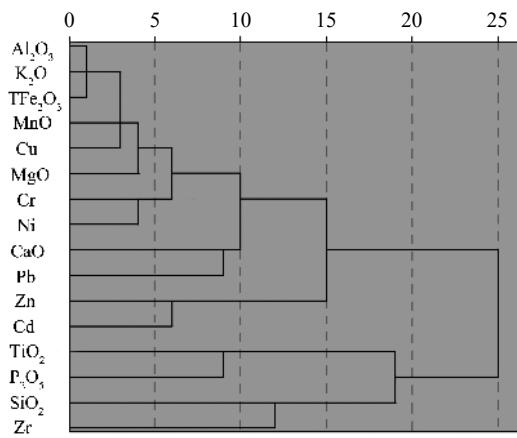


图 5 R 型聚类分析结果图

Fig.5 R-type cluster analysis results

影响因素。该结果表明研究区中大部分元素受沉积物粒度的影响明显。

### 3.2 水动力环境对地球化学元素分布的影响

前人研究表明, 研究区表层沉积物地球化学特征受水动力作用的控制明显。埕北老黄河口海域在1974年黄河改道后, 沉积物的主要物质来源消失, 在潮流的作用下海流会不断淘蚀废弃叶瓣, 因此I-1区主要规律表现为沉积物细粒组分被运移, 粗粒组分就地沉积<sup>[28]</sup>。在欧拉余流主要运输方向中, 悬浮物质的运输路径和余流方向大致一致<sup>[29]</sup>。

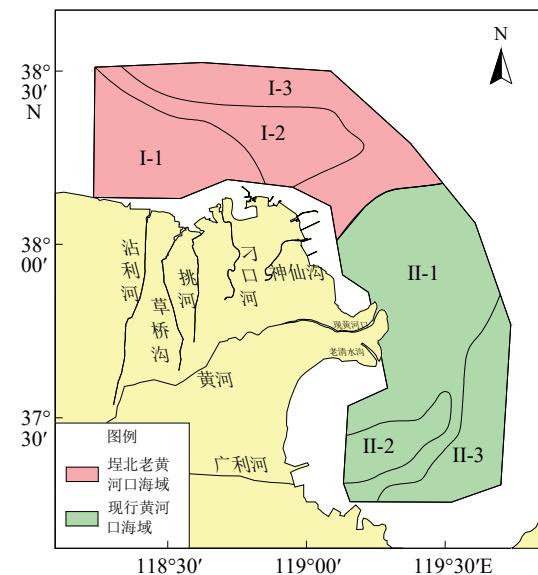


图 6 表层沉积物地球化学分区结果图

Fig.6 Geochemical division of surface sediments

通过本文潮致欧拉余流的模拟结果得出埕北老黄河口海域潮余流主要汇聚区为东北远岸海域(图7)。结合表层沉积物粒度分布特征以及各元素分布规律可以发现, 研究区内受沉积物粒度控制较为明显的  $T\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{MnO}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{Cr}$ 、 $\text{Ni}$ 、 $\text{Cu}$  均在 I-2 区和 I-3 区有明显富集。除此之外, 在余流流向较复杂的 I-1 区河口处也存在着逆时针余环流, 这些余流漩涡通常也会导致悬浮物质和其他物质

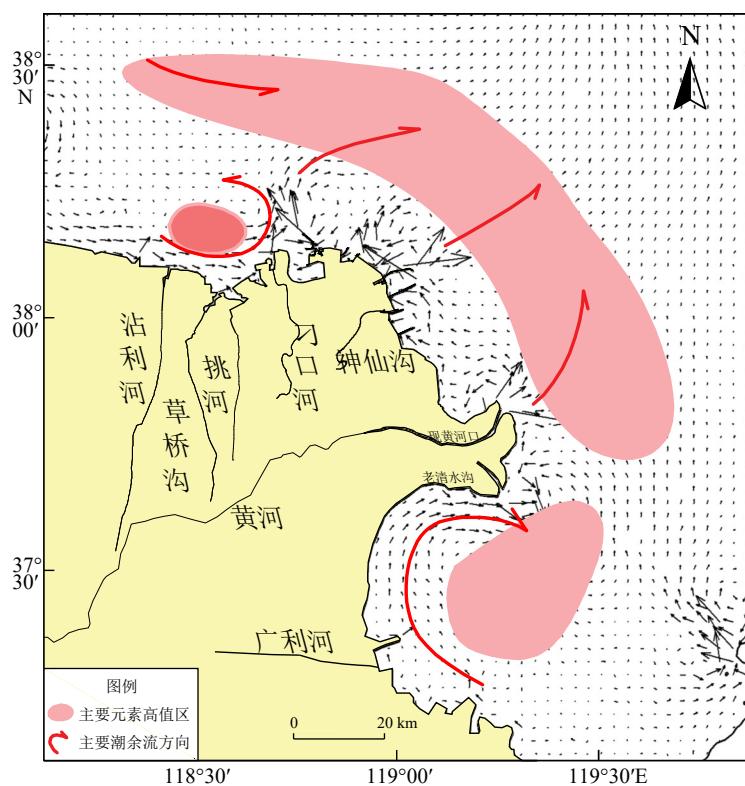


图 7 欧拉潮余流场分布

Fig.7 Distribution of tidal residual flow

表 4 埼北老黄河口海域表层沉积物元素相关性分析

Table 4 Correlation coefficients between values of elements and average particle size in Chengbei Old Yellow River estuary

	SiO <sub>2</sub>	TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	Zr	Mz
SiO <sub>2</sub>	1																
TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-0.99	1															
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-0.96	0.98	1														
TiO <sub>2</sub>	-0.57	0.58	0.50	1													
CaO	-0.57	0.44	0.41	0.33	1												
MgO	-0.81	0.81	0.72	0.58	0.38	1											
K <sub>2</sub> O	-0.96	0.99	0.99	0.49	0.36	0.75	1										
MnO	-0.94	0.94	0.93	0.55	0.47	0.75	0.91	1									
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.17	-0.19	-0.27	0.26	-0.07	0.16	-0.26	-0.15	1								
Cr	-0.84	0.84	0.78	0.70	0.45	0.84	0.80	0.88	-0.01	1							
Ni	-0.91	0.92	0.92	0.52	0.44	0.69	0.91	0.76	-0.24	0.75	1						
Cu	-0.78	0.78	0.77	0.40	0.39	0.57	0.76	-0.11	-0.24	0.60	0.74	1					
Zn	0.11	-0.10	-0.11	0.00	-0.01	-0.11	-0.13	-0.16	-0.07	0.16	-0.06	0.03	1				
Cd	0.12	-0.15	-0.17	-0.02	-0.07	-0.09	-0.17	0.36	0.13	0.18	-0.16	-0.01	0.98	1			
Pb	-0.22	0.23	0.21	0.26	0.12	0.11	0.21	0.27	0.10	0.17	0.38	0.25	0.48	0.37	1		
Zr	0.78	-0.77	-0.79	-0.08	-0.38	-0.64	-0.78	-0.73	-0.14	0.52	-0.68	-0.61	0.11	0.11	0.03	1	
Mz	-0.94	0.94	0.94	0.47	0.43	0.75	0.94	0.85	-0.20	0.75	0.86	0.77	0.10	0.14	0.13	-0.78	1

注: n=62。

表 5 现行黄河口海域表层沉积物元素相关性分析

Table 5 Correlation coefficients between values of elements and average particle size in modern Yellow River estuary

	SiO <sub>2</sub>	TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	Zr	Mz
SiO <sub>2</sub>	1																
TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-0.91	1															
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-0.78	0.84	1														
TiO <sub>2</sub>	-0.10	0.31	0.16	1													
CaO	-0.80	0.74	0.54	0.08	1												
MgO	-0.88	0.92	0.77	0.30	0.80	1											
K <sub>2</sub> O	-0.75	0.77	0.84	0.14	0.57	0.69	1										
MnO	-0.78	0.87	0.76	0.25	0.59	0.75	0.70	1									
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.11	-0.02	-0.27	0.71	0.06	0.06	0.34	-0.06	1								
Cr	-0.64	0.62	0.58	0.37	0.22	0.53	0.38	0.58	0.01	1							
Ni	-0.81	0.66	0.56	0.06	0.39	0.57	0.46	0.56	-0.2	0.78	1						
Cu	-0.87	0.90	0.79	0.20	0.70	0.80	0.76	0.81	-0.12	0.57	0.67	1					
Zn	-0.76	0.84	0.85	0.21	0.54	0.75	0.71	0.75	-0.19	0.59	0.61	0.82	1				
Cd	-0.68	0.50	0.21	0.01	0.41	0.49	0.26	0.36	0.02	0.54	0.80	0.46	0.39	1			
Pb	-0.81	0.78	0.70	0.10	0.66	0.74	0.71	0.72	-0.10	0.52	0.63	0.86	0.69	0.49	1		
Zr	0.19	-0.14	-0.34	0.08	0.02	-0.07	0.23	-0.13	0.38	0.29	-0.28	0.15	0.24	0.01	0.07	1	
Mz	-0.74	0.58	0.54	0.05	0.34	0.50	0.45	0.48	-0.20	0.69	0.90	0.58	0.54	0.71	0.52	-0.25	1

注: n=118。

的沉积<sup>[30]</sup>, 因此细粒沉积物以及上述元素在该区域也存在不同程度的富集。

现行黄河口海域中, 现黄河口处河流感潮段较短、河流潮差较小, 黄河水入海时仅在较小的范围与海水混合, 黄河所携带的泥沙大量地集中于河口及其附近海域。此外, 受河口沙坝的影响, 沉积物难以直接输送到远离河口的海域<sup>[31]</sup>, 入海泥沙粗粒级组分易堆积在河口附近<sup>[32]</sup>, 导致 II-1 区河口沿岸海域大部分元素含量较低。莱州湾海域沉积物的空间分布受潮流影响, 该海域涨潮的潮流流向在莱州湾南岸主要向西, 当潮流到达莱州湾西北岸时流向大致变为北向, 这将会与现黄河口南部的南西向涨潮流相顶托, 两种潮流相互影响导致部分细粒组分在 II-2 区落淤。同时莱州湾海域内落潮的潮流流向大致为东北向, 部分细粒沉积物会被落潮潮流往东北向运移<sup>[33]</sup>。结合潮致余流场的分布可以发现, II-2 区周边存在着顺时针余环流, 较好地指示了细粒物质运输规律。细粒沉积物富含亲黏土矿物且具有较强的元素吸附能力, 导致 II-2 区内表层沉积物中大部分元素含量较高。因此, 本文认为水动力环境主要通过改变研究区沉积物粒度的空间格

局进而控制表层沉积物地球化学特征。

### 3.3 物源输入对地球化学元素分布的影响

元素比值可以一定程度上消除沉积物粒度对各元素分布所造成的影响<sup>[34-35]</sup>。沉积物中 Al 含量随粒度的减小而增加, Al 的溶解度在天然水的环境下相对较低, 且迁移能力相对较弱, 因此, Al 常被用于元素比值的研究。本分析所选择的主要受粒度影响较弱以及受人类活动影响通常较为明显的元素 (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub><sup>[36]</sup>、CaO、Cd、Zn、Pb<sup>[31]</sup>)。P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Cd/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Pb/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Zn/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的比值结果如图 8 所示。

#### 3.3.1 黄河物质的影响

前人研究表明, 研究区内黄河是沉积物的主要来源<sup>[37]</sup>。现黄河口入海泥沙主要来自黄土高原, 由于方解石等碳酸盐矿物的含量较高, 黄土具有富 Ca 的特点<sup>[38]</sup>。因此本文根据 CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 结果(图 8a)来探讨黄河物质输入对研究区表层沉积物中元素分布的影响程度<sup>[39]</sup>。通过结果可以看到, 越靠近黄河三角洲 CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 比值越高, 具体表现为由黄河入海口为中心向南北扩散, 再向东北逐渐减弱。对

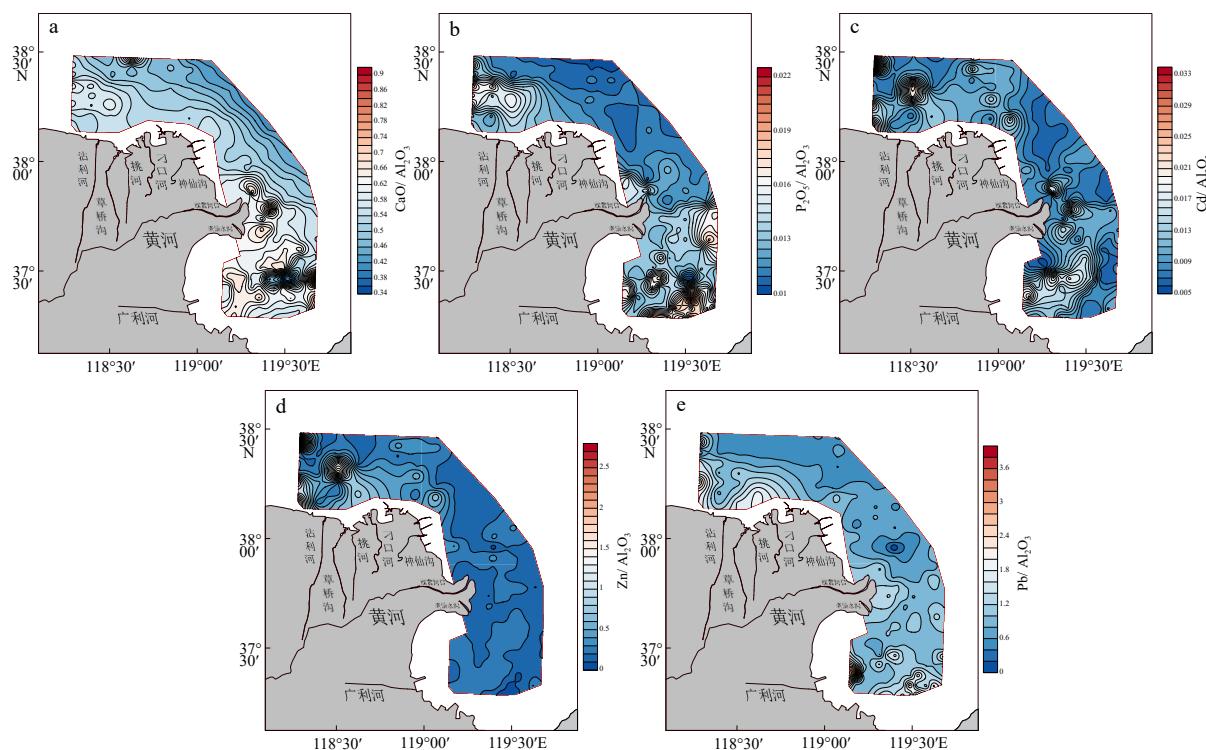


图 8 元素比值分布图  
Fig.8 Element ratio distribution

于埕北老黄河口海域来说,黄河三角洲河道从刁口河向清水沟河道迁移后黄河沉积物供应中断<sup>[40-41]</sup>,水动力不断对沉积物进行改造,导致废弃三角洲叶瓣遭受广泛的侵蚀<sup>[42]</sup>。虽然 I-1 区长期在水动力作用下被侵蚀,但其表层沉积物依然具有黄河沉积物的物质特性<sup>[11]</sup>。这表明沉积物的分布特征受水动力和黄河物质输入的共同影响。另外,CaO 的分布特征表明黄河物质输入对现行黄河口海域的影响明显大于埕北老黄河口海域。

### 3.3.2 人类活动的影响

黄河三角洲地处中国环渤海经济带之中,近年来工农业的发展、海上油气开采以及海上养殖等活动都对该海域的底质环境影响明显<sup>[41]</sup>。 $P_2O_5/Al_2O_3$  比值结果(图 8b)显示,现行黄河口海域莱州湾内与埕北老黄河海域西部的比值明显高于其他区域。有研究认为,渤海沉积物中自生钙结合磷与原生碎屑结合磷占有较大比重,这些含磷矿无法为生物所利用<sup>[43]</sup>。而黄河作为该区域主要物质来源,这些矿物主要通过黄河携带的大量泥沙进入莱州湾,导致莱州湾内表层沉积物中磷的含量较高<sup>[44]</sup>。埕北老黄河口海域受黄河物质的直接影响相对较弱,入海河流输入的污水中携带大量的活性磷酸盐通过初级生产力转化为颗粒态磷,最后不断向沉积物中沉积和矿化,造成 I-1 区表层沉积物中磷的含量较

高<sup>[45]</sup>。同时有研究认为,养殖区的贝类、鱼类等生物摄入的大部分含磷物质大都通过排泄的方式沉积于底质环境中,因此沿岸广泛分布的养殖区域(图 9)会导致表层沉积物磷含量偏高<sup>[46]</sup>。

$Pb/Al_2O_3$ 、 $Cd/Al_2O_3$ 、 $Zn/Al_2O_3$  的比值(图 8c—e)在埕北老黄河口海域中主要在 I-1 区较高,而东北部的 I-2 区和 I-3 区比值较低。I-1 区沿岸的挑河、沾利河、神仙沟等河流及其周边排污口是工业废水及生活废水的重要的排污途径。有研究认为,该区域的  $Pb$ 、 $Cd$  的废水主要来自医药、农药等化工企业及电子、电镀等工业<sup>[47]</sup>。根据调查,挑河、沾利河两侧分布着多家大型畜禽养殖基地,动物养殖业向饲料中添加含重金属的添加剂会造成养殖业废水中含有一定量的  $Zn$  等重金属,这些污染物随着河流运输入海并在河口沉积,导致 I-1 区表层沉积物中重金属含量偏高<sup>[48]</sup>。也有研究认为,埕北老黄河口海域中的海上油气开采所排放的污染物也会影响沉积物重金属的分布<sup>[49]</sup>。该区域海上分布大量钻井平台,油气开采所产生的废弃泥浆中常含有  $Pb$ 、 $Zn$ 、 $Cu$  等重金属元素<sup>[50]</sup>,结合埕北老黄河口海域的  $Cd/Al_2O_3$ 、 $Zn/Al_2O_3$  分布规律,它们在主要油气开采区也表现出高值,并且出现了部分点源污染现象。对于现行黄河口海域,除了来自黄河直接物质输入之外,莱州湾内部分元素也受湾内其他河

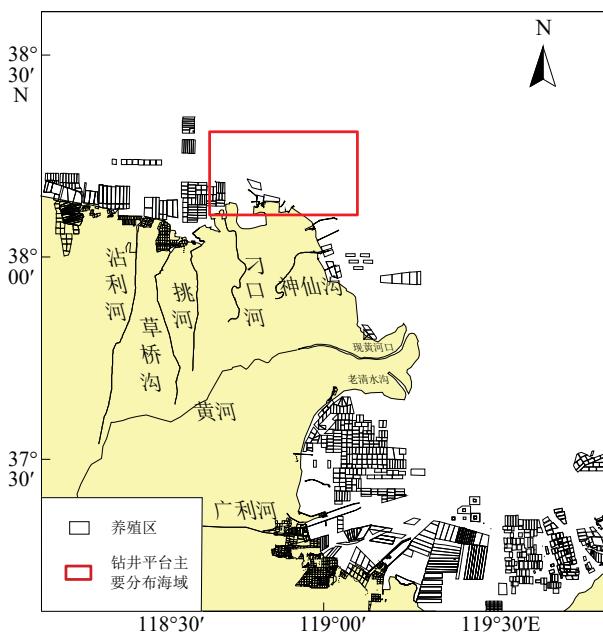


图 9 海上主要开发利用活动分布图

Fig.9 Distribution of major offshore development and utilization activities

流以及人类活动的共同影响<sup>[51]</sup>。相对于黄河的高输沙量,排放到该区域的污染物会被稀释导致人类活动的影响较弱<sup>[52]</sup>。

### 3.4 常微量元素分布主要的影响因素

因子分析方法可以从原始的高维数据中将有相同规律的参数进行整合并提取公因子<sup>[53]</sup>,在探讨表层沉积物地球化学特征分布的影响因素中有广泛的应用<sup>[54]</sup>。为了系统地划分研究区表层沉积物各化学元素分布的主要影响因素,本文基于 SPSS22.0 对各元素组分进行因子分析。埕北老黄河口海域中提取了 3 个主要影响因子,累积方差贡献为 80.25%;现行黄河口海域中提取了 4 个主要影响因子,累积方差为 86.70%。本文认为这些因子反映了研究区大部分元素含量信息(表 6)。

#### 3.4.1 埕北老黄河口海域常微量元素分布影响因素

埕北老黄河口海域的 F1 中,方差占比为 57.68%,其中  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{TFe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{MnO}$ 、 $\text{Cu}$ 、 $\text{Ni}$ 、 $\text{Cr}$  表现出了较高的正载荷,  $\text{CaO}$  表现出了一定的正载荷,  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Zr}$  表现出较高的负载荷。通过  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{TFe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{MnO}$ 、 $\text{Cu}$ 、 $\text{Ni}$ 、 $\text{Cr}$ 、 $\text{SiO}_2$  的相关性分析发现,这些元素之间相关系数较高且与平均粒径的相关性显著,说明这些元素分布的影响因素相似<sup>[55]</sup>。有研究表明,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{TFe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{MnO}$  易赋存于细颗粒黏土矿物中<sup>[56]</sup>,  $\text{SiO}_2$  主要富集于石英和长石含量较高的矿物。对

表 6 因子分析结果

Table 6 Results of factor analysis

元素组分	埕北老黄河口海域			现行黄河口海域			
	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F4
$\text{SiO}_2$	-0.988	0.007	-0.067	-0.829	-0.517	0.018	-0.079
$\text{TFe}_2\text{O}_3$	0.989	0.004	0.054	0.910	0.300	0.165	0.110
$\text{Al}_2\text{O}_3$	0.978	-0.013	-0.068	0.882	0.012	-0.020	0.385
$\text{TiO}_2$	0.544	0.094	0.674	0.163	-0.045	0.955	0.104
$\text{CaO}$	0.503	0.028	0.123	0.792	0.212	-0.011	-0.333
$\text{MgO}$	0.789	-0.049	0.407	0.875	0.274	0.181	-0.030
$\text{K}_2\text{O}$	0.973	-0.024	-0.048	0.855	0.068	-0.295	0.142
$\text{MnO}$	0.951	-0.001	0.066	0.836	0.188	0.135	0.161
$\text{P}_2\text{O}_5$	-0.237	0.011	0.835	-0.115	0.028	0.846	-0.393
$\text{Cr}$	0.833	-0.069	0.366	0.400	0.537	0.319	0.555
$\text{Ni}$	0.936	0.071	-0.026	0.446	0.776	-0.021	0.352
$\text{Cu}$	0.812	0.139	-0.103	0.882	0.292	0.040	0.114
$\text{Zn}$	-0.114	0.966	0.011	0.825	0.159	0.054	0.312
$\text{Cd}$	-0.168	0.924	0.050	0.243	0.933	0.007	-0.043
$\text{Pb}$	0.257	0.678	-0.002	0.808	0.334	-0.026	0.008
$\text{Zr}$	-0.784	0.089	0.195	-0.093	0.021	0.189	-0.806
方差贡献	57.68%	13.53%	9.04%	45.48%	19.86%	11.40%	9.96%
累积方差贡献	57.68%	71.21%	80.25%	45.48%	65.34%	76.74%	86.70%

于  $\text{Cu}$ 、 $\text{Ni}$ 、 $\text{Cr}$  来说,由于细粒沉积物具有表面积大、有机质含量高、黏粒结合能力强等特点,因此金属离子通常优先与细粒沉积物颗粒相结合。通过上述分析可以得出, F1 因子中正载荷代表细粒沉积, 负载荷表示粗粒沉积。

F2 中方差占比为 13.53%,其中  $\text{Zn}$ 、 $\text{Cd}$ 、 $\text{Pb}$  表现出了较强的正载荷,其他元素组分的载荷不明显。通过相关性分析可知,在埕北老黄河口海域粒度颗粒大小对于  $\text{Zn}$ 、 $\text{Cd}$ 、 $\text{Pb}$  的影响并不明显。通过  $\text{Zn}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Cd}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Pb}/\text{Al}_2\text{O}_3$  的分析结果得出, 陆域工农业污水<sup>[16]</sup>、生活废水以及海上油气开采等人类活动对其分布的影响明显<sup>[49]</sup>,因此本文将该因子划分为人类活动的影响。

F3 中方差占比为 9.04%,其中  $\text{P}_2\text{O}_5$  表现出较强的正载荷。前文已经通过  $\text{P}_2\text{O}_5/\text{Al}_2\text{O}_3$  的分布特征分析得到该海域受人类污染物质的输入以及生物作用的影响明显,因此本文将该因子归类于人类活动与生物作用的共同影响。

综上所述,埕北老黄河口海域元素组分分布主

要受沉积物粒度的影响, 水动力环境是改变沉积物粒度的主要动力因素, 沉积物粒度的改变同时又伴随着元素含量的变化, 人类活动则进一步改变了部分元素组分的空间分布规律。

#### 3.4.2 现行黄河口海域常微量元素分布影响因素

现行黄河口海域 F1 中, 方差占比 45.48%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{TFe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{MnO}$ 、 $\text{Cu}$ 、 $\text{Ni}$ 、 $\text{Zn}$ 、 $\text{Pb}$  表现出了较高正载荷,  $\text{SiO}_2$  表现为较高负载荷。这些元素大多与粒度相关性较为显著, 并且各元素组分相关性较高, 说明其来源和影响因素相似<sup>[57]</sup>。结合前文分析, 受黄河物质中含量较高的方解石等碳酸盐矿物的影响,  $\text{CaO}$  的分布规律受黄河物质的影响明显。因此本文根据上述结果将该因子的归类为受沉积物粒度和黄河物质输入的共同影响。

F2 中, 方差占比 19.86%,  $\text{Cd}$  和  $\text{Ni}$  具有较高的正载荷。通过元素的相关性分析可知, 该区域内  $\text{Cd}$ 、 $\text{Ni}$  与粒度的相关性显著, 因此本文将这些微量重金属元素归类于沉积物粒度的影响。 $\text{Cr}$  在 F1、F2、F4 中均有一定的正载荷, 这说明其影响构成复杂, 结合其与平均粒径以及其他元素之间的相关性可知, 其受沉积物粒度影响显著。

F3 中, 方差占比 11.40%, 其中  $\text{P}_2\text{O}_5$  和  $\text{TiO}_2$  的正载荷最高, 其他化学组分的载荷均不明显。通过  $\text{P}_2\text{O}_5/\text{Al}_2\text{O}_3$  的分布特征分析也得出, 该海域中表层沉积物的磷主要以黄河输入的碎屑为主。同时,  $\text{TiO}_2$  多存在于陆源碎屑重矿物中, 其中 Ti 以离子的形式迁移极少, 主要以重矿物钛铁矿、金红石的形式进行搬运<sup>[58]</sup>。也有研究表明, 磷在地壳中主要以  $\text{P}_2\text{O}_5$  的形式存在, 副矿物以榍石 ( $\text{CaTiSiO}_4\text{O}$ )、磷灰石和锆石等为主<sup>[59]</sup>。根据前文的元素相关性分析可知, 现行黄河口海域中  $\text{P}_2\text{O}_5$  与  $\text{TiO}_2$  的相关性显著, 说明它们具有相似的来源或行为。由此本文将该因子划分为主要受黄河输入的碎屑物质和重矿物分布的共同影响<sup>[6]</sup>。

F4 中, 方差占比为 9.96%, 载荷较高的主要是  $\text{Zr}$ 。 $\text{Zr}$  主要赋存于重矿物锆石中, 其具有极难溶解、迁移能力较弱的特征。此外,  $\text{Zr}$  在现行黄河口海域中与  $\text{P}_2\text{O}_5$  具有一定的正相关性, 说明  $\text{P}_2\text{O}_5$  也可能与锆石 ( $\text{ZrSiO}_4$ ) 形成含磷重矿物<sup>[59]</sup>, 因此本文认为  $\text{Zr}$  的分布受锆石等重矿物分布的影响。

现行黄河口海域大多数元素分布主要受沉积物粒度和黄河物质输入的共同控制, 其次部分元素还受重矿物等因素的影响。与埕北老黄河口海域相比, 现行黄河口海域受黄河物质的影响更为明显, 而人类活动的影响相对较弱。

## 4 结论

(1) 研究区可分为 6 个地球化学区域, 大部分元素 ( $\text{TFe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{MnO}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{Cr}$ 、 $\text{Ni}$ 、 $\text{Cu}$ ) 高值区主要位于埕北老黄河口远岸海域的 I-2 区、I-3 区以及现行黄河口海域南部的 II-2 区、东部的 II-1 区远岸海域。 $\text{SiO}_2$  高值区主要位于埕北老黄河口近岸海域的 I-1 区和现行黄河口海域东南部的 II-3 区。

(2) 大部分元素含量与平均粒径的相关性显著, 粒度是影响元素分布的直接因素。潮流控制着研究区沉积物的起动及运移, 潮余流的汇聚区和环流区既是细粒沉积物的聚集中心, 是大部分元素的高值区, 水动力环境主要通过改变表层沉积物粒度的空间格局进而控制元素的分布。

(3) 埕北老黄河口海域主要受沉积物粒度的影响, 其次为人类活动, 人类污染物的输入对  $\text{Cd}$ 、 $\text{Zn}$ 、 $\text{Pb}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$  的影响最为显著; 现行黄河口海域主要受沉积物粒度和黄河物质输入的共同控制, 黄河物质对  $\text{CaO}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$  的分布影响显著。自然因素是研究区表层沉积物地球化学特征分布的主要原因, 人类活动则进一步改变了部分元素组分的空间分布规律。

## 参考文献 (References)

- [1] 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.]
- [2] Li B W, Jia Y G, Liu J P, et al. The controlling factors of high suspended sediment concentration in the intertidal flat off the Huanghe River Estuary [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2020, 39(10): 96-106.
- [3] Bi N S, Yang Z S, Wang H J, et al. Sediment dispersion pattern off the present Huanghe (Yellow River) subdelta and its dynamic mechanism during normal river discharge period [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2010, 86(3): 352-362.
- [4] 吕成功, 陈真. 渤海表层沉积物地球化学分析 [J]. 青岛海洋大学学报, 1993, 23(3): 91-98. [LV Chenggong, CHEN Zhen. Geochemical analysis of the surface sediments of the Bohai Sea [J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 1993, 23(3): 91-98.]
- [5] 赵一阳, 鄢明才. 中国浅海沉积物地球化学 [M]. 北京: 科学出版社, 1994. [ZHAO Yiyang, YAN Mingcai. Geochemistry of Sediments of the China Shelf Sea [M]. Beijing: Science Press, 1994.]
- [6] 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.]
- [7] 赵玉玲, 冯秀丽, 宋渥, 等. 现代黄河三角洲附近海域表层沉积物地球化学分区[J]. *海洋科学*, 2016, 40(9): 98-106. [ZHAO Yuling, FENG Xiuli, SONG Sheng, et al. Geochemical partition of surface sediments in the seas near the modern Yellow River Delta [J]. *Marine Sciences*, 2016, 40(9): 98-106.]
- [8] Qiao S Q, Shi X F, Gao J J, et al. The distribution and variation of elements in sediments off the Huanghe (Yellow) River mouth [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2013, 31(4): 876-885.
- [9] Chu Z X, Sun X G, Zhai S K, et al. Changing pattern of accretion/erosion of the modern Yellow River (Huanghe) subaerial delta, China: Based on remote sensing images [J]. *Marine Geology*, 2006, 227(1-2): 13-30.
- [10] Li G S, Wang H L, Liao H P. Numerical simulation on seasonal transport variations and mechanisms of suspended sediment discharged from the Yellow River to the Bohai Sea [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2010, 20(6): 923-937.
- [11] 张连杰, 朱龙海, 张盼, 等. 渤海湾表层沉积物元素地球化学分布特征与影响因素[J]. *海洋科学*, 2019, 43(6): 78-87. [ZHANG Lianjie, ZHU Longhai, ZHANG Pan, et al. Geochemical distribution and its controlling factors of the surface sediments in the Bohai Bay [J]. *Marine Sciences*, 2019, 43(6): 78-87.]
- [12] 徐艳东, 高会旺, 魏潇, 等. 莱州湾表层沉积物中重金属污染特征和生态风险评估[J]. 中国海洋大学学报, 2021, 51(11): 74-85. [XU Yandong, GAO Huiwang, WEI Xiao, et al. Heavy metals and their ecological risk in the surface sediments of Laizhou Bay [J]. Periodical of Ocean University of China, 2021, 51(11): 74-85.]
- [13] Wang Z H, Guo X, Zhang K, et al. Environmental changes in Jiaozhou Bay of northern China during the past 90 years using metals and bioactive elements in sediments [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2017, 53: 301-312.
- [14] Zhang P, Hu R J, Zhu L H, et al. Distributions and contamination assessment of heavy metals in the surface sediments of western Laizhou Bay: Implications for the sources and influencing factors [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 119(1): 429-438.
- [15] Wei W H, Zhang J, Zeng H Z. Particulate element inventory of the Huanghe (Yellow River): A large, high-turbidity river [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1992, 56(10): 3669-3680.
- [16] Liu Q Q, Wang F F, Meng F P, et al. Assessment of metal contamination in estuarine surface sediments from Dongying City, China: Use of a modified ecological risk index [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, 126: 293-303.
- [17] 刘志杰, 李培英, 张晓龙, 等. 黄河三角洲滨海湿地表层沉积物重金属区域分布及生态风险评价[J]. *环境科学*, 2012, 33(4): 1182-1188. [LIU Zhijie, LI Peiying, ZHANG Xiaolong, et al. Regional distribution and ecological risk evaluation of heavy metals in surface sediments from coastal wetlands of the Yellow River Delta [J]. *Environmental Science*, 2012, 33(4): 1182-1188.]
- [18] Hu N J, Liu J H, Huang P, et al. Sources, geochemical speciation, and risk assessment of metals in coastal sediments: a case study in the Bohai Sea, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76(8): 309.
- [19] Liu L, Wang H J, Yang Z S, et al. Coarsening of sediments from the Huanghe (Yellow River) delta-coast and its environmental implications [J]. *Geomorphology*, 2022, 401: 108105.
- [20] Udden J A. Mechanical Composition of clastic sediments [J]. *GSA Bulletin*, 1914, 25(1): 655-744.
- [21] Wentworth C K. A scale of grade and class terms for clastic sediments [J]. *The Journal of Geology*, 1922, 30(5): 377-392.
- [22] 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.
- [23] 郑世雯, 范德江, 刘明, 等. 渤海中部现代黄河沉积物影响范围的稀土元素证据[J]. 中国海洋大学学报, 2017, 47(6): 95-103. [ZHENG Shiwen, FAN Dejiang, LIU Ming, et al. Rare earth element evidence for the Modern Yellow River Origin sediments in the middle Bohai Sea [J]. Periodical of Ocean University of China, 2017, 47(6): 95-103.]
- [24] Fu Y T, Chen S L, Ji H Y, et al. The modern Yellow River Delta in transition: Causes and implications [J]. *Marine Geology*, 2021, 436: 106476.
- [25] 林炳煌. 泉州湾沉积物粒度和元素组成特征及其沉积环境意义[D]. 厦门大学硕士学位论文, 2009. [LIN Binghuang. Characteristics of sediment granularity, element geochemistry and their significance for identifying sedimentary dynamic environment in the Quanzhou estuary [D]. Master Dissertation of Xiamen University, 2009.]
- [26] 王悦, 林霄沛. 地形变化下渤海M<sub>2</sub>分潮潮致余流的相应变化及其对污染物输运的影响[J]. 中国海洋大学学报, 2006, 36(1): 1-6. [WANG Yue, LIN Xiaopei. The variation of M<sub>2</sub> constituent corresponding to the change of topography in Bohai Bay and its effects on the transport of pollutants [J]. Periodical of Ocean University of China, 2006, 36(1): 1-6.]
- [27] 赵保仁, 庄国文, 曹德明, 等. 渤海的环流、潮余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] 李春雨. 黄河三角洲北部海域的冲淤演化与成因[J]. *海洋地质前沿*, 2014, 30(11): 17-21. [LI Chunyu. Erosional and depositional pattern to the northern offshore area of the Yellow River Delta [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2014, 30(11): 17-21.]
- [29] 刘鑫仓, 刘艳玲, 迟万清, 等. 胶州湾潮余流和物质输送之间的关系[J]. *海洋湖沼通报*, 2019, 40(2): 10-17. [LIU Xincang, LIU Yanling, CHI Wanqing, et al. Relationship between tidal residual current and mass transport in Jiaozhou bay [J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2019, 40(2): 10-17.]
- [30] Howarth M J, Huthnance J M. Tidal and residual currents around a Norfolk Sandbank [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1984, 19(1): 105-117.
- [31] 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.]
- [32] 袁萍, 毕乃双, 吴晓, 等. 现代黄河三角洲表层沉积物的空间分布特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2016, 36(2): 49-57. [YUAN Ping, BI Naishuang, WU Xiao, et al. Surface sediments at the subaqueous Yellow River Delta: classification and distribution [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2016, 36(2): 49-57.]
- [33] 任韧希子, 陈沈良. 黄河三角洲的沉积动力分区[J]. 上海国土资源, 2012, 33(2): 62-68. [REN Renxizi, CHEN Shenliang. Sediment dynamics in the littoral zone of the Yellow River delta [J]. *Shanghai Land & Resource*, 2012, 33(2): 62-68.]
- [34] 窦衍光. 长江口邻近海域沉积物粒度和元素地球化学特征及其对沉积环境的指示[D]. 国家海洋局第一海洋研究所硕士学位论文, 2007. [DOU Yanguang. Characteristics of sediment granularity, element geochemistry and their significance for identifying sedimentary environment in the contiguous sea areas of Changjiang River Estuary [D]. Master Dissertation of First Institute of Oceanography, MNR, 2007.]
- [35] 刘素美, 张经. 沉积物中重金属的归一化问题: 以Al为例[J]. 东海海洋, 1998, 16(3): 48-55. [LIU Sumei, ZHANG Jing. Normalization of heavy metals to aluminum in marine sediments [J]. *Donghai Marine Science*, 1998, 16(3): 48-55.]
- [36] 岳维忠, 黄小平, 孙翠慈. 珠江口表层沉积物中氮、磷的形态分布特征及污染评价[J]. 海洋与湖沼, 2007, 38(2): 111-117. [YUE Weizhong, HUANG Xiaoping, SUN Cuici. Distribution and pollution of nitrogen and Phosphorus in surface sediments from the Pearl River estuary [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2007, 38(2): 111-117.]
- [37] 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*, 2010, 93(3): 173-181.
- [38] 吴明清, 文启忠, 潘景瑜, 等. 中国黄土的平均化学成分: 上部大陆地壳的一种典型代表[J]. 岩相古地理, 1995, 15(2): 127-136. [WU Mingqing, WEN Qizhong, PAN Jingyu, et al. Average chemical composition of loess in China: as a good representative of the upper continental crust [J]. *Sedimentary Facies and Palaeogeography*, 1995, 15(2): 127-136.]
- [39] 乔淑卿, 方习生, 石学法, 等. 黄河口及邻近渤海海域表层沉积物中CaO和蒙皂石分布及其对黄河入海物质运移的指示[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2010, 30(1): 17-23. [QIAO Shuqing, FANG Xisheng, SHI Xuefa, et al. Distribution of CaO and smectite in surface sediments off the Yellow River mouth and in the nearby Bohai Sea and the implications for dispersion of the river sediments to the sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2010, 30(1): 17-23.]
- [40] Xing G P, Wang H J, Yang Z S, et al. Spatial and temporal variation in erosion and accumulation of the subaqueous Yellow River Delta (1976-2004) [J]. *Journal of Coastal Research*, 2016, 74(sp1): 32-47.
- [41] 柳后起. 黄河三角洲微量元素环境地球化学研究[D]. 中国科学技术大学博士学位论文, 2016. [LIU Houqi. Environmental geochemistry research of trace elements in the Yellow River Delta [D]. Doctoral Dissertation of University of Science and Technology of China, 2016.]
- [42] Bi N S, Wang H J, Wu X, et al. Phase change in evolution of the modern Huanghe (Yellow River) Delta: process, pattern, and mechanisms [J]. *Marine Geology*, 2021, 437: 106516.
- [43] 赵志梅, 秦延文. 渤海湾表层沉积物磷形态分析[J]. 海洋技术, 2006, 25(4): 51-53, 87. [ZHAO Zhimei, QIN Yanwen. The analysis of the phosphorus forms in the sediment of Bohai Bay [J]. *Ocean Technology*, 2006, 25(4): 51-53, 87.]
- [44] 江辉煌. 渤海沉积物中生源要素的研究[D]. 中国海洋大学硕士学位论文, 2012. [JIANG Huihuang. Study on biogenic elements in sediments of the Bohai Sea [D]. Master Dissertation of Ocean University of China, 2012.]
- [45] 李梦露. 磷观渤海: 由陆向海磷的输送和收支及其生态环境指示意义[D]. 自然资源部第一海洋研究所硕士学位论文, 2021. [LI Menglu. Insights into the Bohai Sea from the phosphorus dimension: A study of gluxes and budget of phosphorus from land to sea with implication for the environment change [D]. Master Dissertation of First Institute of Oceanography, MNR, 2021.]
- [46] 林建斌, 王剑锋. 水产养殖与生态营养[J]. 科学养鱼, 2009, 28(5): 65-66. [LIN Jianbin, WANG Jianfeng. Aquaculture and ecological nutrition [J]. *Scientific Fish Farming*, 2009, 28(5): 65-66.]
- [47] 张汉珍, 王菲菲, 姜磊, 等. 东营市挑河和神仙沟的河水重金属污染评价[J]. 安全与环境学报, 2017, 17(4): 1536-1542. [ZHANG Hanzhen, WANG Feifei, JIANG Lei, et al. Assessment of heavy metal pollution in the surface water of Tiaohu river and Shenxiangou Brook, Dongying City, Shandong [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2017, 17(4): 1536-1542.]
- [48] 刘群群, 孟范平, 王菲菲, 等. 东营市北部海域沉积物中重金属的分布、来源及生态风险评价[J]. 环境科学, 2017, 38(9): 3635-3644. [LIU Qunqun, MENG Fanping, WANG Feifei, et al. Spatial distribution, source and ecological risk assessment of heavy metals in the coastal sediments of northern Dongying City [J]. *Environmental Science*, 2017, 38(9): 3635-3644.]
- [49] 张亮, 叶芳, 王尽文, 等. 黄河口埕岛油田周边海域的生态环境特征及变化趋势[J]. 海洋学研究, 2015, 33(3): 75-83. [ZHANG Liang, YE Fang, WANG Jinwen, et al. The eco-environmental characteristics and variation trends around Chengdao Oilfield Sea areas in the Yellow River Estuary [J]. *Journal of Marine Sciences*, 2015, 33(3): 75-83.]
- [50] 卢芳. 胜利埕岛油田海洋石油勘探开发生态环境影响研究[D]. 中国海洋大学硕士学位论文, 2010. [LU Fang. Eco-environmental impact of Shengli Chengdao offshore oil exploration and development [D]. Master Dissertation of Ocean University of China, 2010.]
- [51] 刘金虎, 宋骏杰, 曹亮, 等. 莱州湾表层沉积物中重金属时空分布、污染来源及风险评价[J]. 生态毒理学报, 2015, 10(2): 369-381. [LIU Jinhu, SONG Junjie, CAO Liang, et al. Spatial and temporal distribution, sources and ecological risk assessment of heavy metals in the surface sediments of Laizhou Bay [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2015, 10(2): 369-381.]
- [52] Huang W W, Zhang J. Effect of particle size on transition metal concentrations in the Changjiang (Yangtze River) and The Huanghe (Yellow) River, China [J]. *The Science of the Total Environment*, 1990, 94(3): 187-207.

- [53] 石学法, 刘升发, 乔淑卿, 等. 中国东部近海沉积物地球化学: 分布特征、控制因素与古气候记录 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2015, 34(5): 883-894. [SHI Xuefa, LIU Shengfa, QIAO Shuqing, et al. Geochemical Characteristics, controlling factor and record of paleoclimate in sediments from Eastern China Seas [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2015, 34(5): 883-894.]
- [54] Kang X M, Song J M, Yuan H M, et al. Speciation of heavy metals in different grain sizes of Jiaozhou Bay sediments: Bioavailability, ecological risk assessment and source analysis on a centennial timescale [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, 143: 296-306.
- [55] Gao X L, Song J M, Li X G, et al. Sediment quality of the Bohai Sea and the northern Yellow Sea indicated by the results of acid-volatile sulfide and simultaneously extracted metals determinations [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, 155: 111147.
- [56] Kumar A, Singhal R K, Rout S, et al. Spatial geochemical variation of major and trace elements in the marine sediments of Mumbai Harbor Bay [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 70(7): 3057-3066.
- [57] Hossen M A, Chowdhury A I H, Mullick M R A, et al. Heavy metal pollution status and health risk assessment vicinity to Barapukuria coal mine area of Bangladesh [J]. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 2021, 16: 100469.
- [58] 尹秀珍, 刘万洙, 蓝先洪, 等. 南黄海表层沉积物的碎屑矿物、地球化学特征及物源分析 [J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2007, 37(3): 491-499. [YIN Xiuzhen, LIU Wanzhu, LAN Xianhong, et al. Detrital minerals and geochemistry of the surface soft sediments and their provenance south Yellow Sea, China [J]. *Journal of Jilin University:Earth Science Edition*, 2007, 37(3): 491-499.]
- [59] 张文博. P、Ti 的地球化学性质及其在深成岩中的含量与变化 [J]. 世界有色金属, 2016(19): 81-82. [ZHANG Wenbo. The geochemical properties of phosphorus, titanium and its content in the plutonic rock and changes [J]. *World Nonferrous Metals*, 2016(19): 81-82.]