

# 渤海湾表层沉积物元素地球化学分布特征与影响因素

张连杰<sup>1</sup>, 朱龙海<sup>2</sup>, 张盼<sup>1</sup>, 赵博<sup>1</sup>, 王鹏<sup>1</sup>

(1. 国家海洋环境监测中心, 辽宁 大连 116023; 2. 中国海洋大学, 山东 青岛 266100)

**摘要:** 对取自渤海湾的 307 个表层沉积物进行了元素测试和粒度分析。渤海湾表层沉积物的常微量元素呈现 4 种组合: 富集于粗粒沉积区的 SiO<sub>2</sub>、Na<sub>2</sub>O 亲碎屑元素组合; 富集于细粒沉积区的以 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和重金属元素为代表的亲黏土元素组合; 与缺氧环境有关的 MnO、V、TOC 元素组合和与河流输入有关的陆源 CaO、TiO<sub>2</sub> 元素组合。粒度粗细主导了渤海湾元素含量分布的整体格局; 海域河流物源供应不同较大影响了渤海湾南部(富 Na<sub>2</sub>O、CaO 和 SiO<sub>2</sub>)和北部(富 Ba 和 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)在元素含量上的差异; 高流速潮流对海底的冲刷再分配导致曹妃甸南侧 Sr、Ca 元素的条带状富集异常; 有机质在细粒沉积区的富集导致缺氧环境的形成和 K<sub>2</sub>O、Mn、V、自生黄铁矿的海洋自生化学沉积; 人类活动导致以 Pb 为代表的重金属污染在河流入海口、港口及沿岸海域的元素分布异常; 曹妃甸沙坝内侧的泻湖(海洋钙质生物沉积)与沙坝外侧水下岸坡(陆源碎屑沉积)的截然不同的物源, 导致了独特地貌沉积环境下元素分布的局部差异。

**关键词:** 渤海湾; 元素地球化学; 因子分析; 自生化学沉积; 缺氧环境

中图分类号: P736.41 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2019)06-0078-10

DOI: 10.11759/hyxx20190122004

沉积物中元素的丰度受沉积物的粒度大小的强烈影响, 被称作“元素的粒度控制律”<sup>[1]</sup>。粒度对元素丰度的控制作用是普遍存在的也是最主要的因素。事实上, 由于从源到汇沉积过程的复杂性, 沉积物的元素丰度及其空间分布与物质来源、沉积动力、海洋环境、气候等均有密切联系<sup>[2-5]</sup>。

渤海湾位于渤海的西部(图 1), 沿岸密布现代三角洲和古三角洲堆积体, 是陆地与海洋强烈相互作用的典型海湾。渤海湾沿岸有黄河、滦河和海河三条大型河流注入, 其中黄河年输沙量高达  $11 \times 10^8 \text{ m}^3$ <sup>[3]</sup>, 是渤海湾最主要的物质来源; 滦河和海河贡献相对较少, 年输沙量均不足黄河的 1/30。在渤海湾海域, 粒度大小和物源差异已被证实是影响沉积物元素丰度及其分布的重要因素。渤海湾粗粒沉积区富硅贫铝, 细粒沉积区富铝贫硅<sup>[6]</sup>, 沉积物元素含量受粒度特征的明显控制; 由于黄河中游流经黄土高原地区, 黄土中富含碳酸盐, 黄河泥沙以高含量的 CaO 为主要特征<sup>[7]</sup>, 渤海湾南部由于靠近入海口而呈现较高的 CaO 含量<sup>[8]</sup>。这些发现在物源分析<sup>[9]</sup>和物质扩散<sup>[10]</sup>的研究中已得到成功应用。然而, 近年来有学者提出, 渤海湾沉积中的某些元素具有特殊规律, 如刘建国等提出渤海湾沉积的 Mn 元素与海洋自生作用有关<sup>[11]</sup>, 河口外侧沉积物中有机质丰富, P 在渤海湾南部含量偏高<sup>[6]</sup>等。近些年由

于水库建设、用水增加以及人为调水调沙等原因, 河流输沙量逐年下降, 河流输送入海的大部分物质堆积在河口, 物质的运移再分配成为渤海湾沉积物平衡过程中的重要部分, 也必然对元素分布产生一定作用, 但尚未有相关研究。因此对渤海湾沉积物元素地球化学特征及影响因素的认识并不全面, 有待研究。本文对渤海湾沉积的元素地球化学特征的研究, 对于认识渤海湾沉积物的源-汇、物质运移和再分配, 了解沉积作用的空间差异和关键因素具有重要科学意义, 同时也可对海湾开发利用等人类活动提供科学指导。

## 1 研究区背景

渤海湾三面环陆, 沿岸有黄河、滦河、海河三条大型河流流入, 堆积形成了北侧的古滦河三角洲, 西侧的海河三角洲及南侧的黄河三角洲。渤海湾的中部和西部地势较平坦, 北岸和东南岸坡度较大, 曹妃甸南侧的深槽最大水深可达 -40 m(图 1)。渤海

收稿日期: 2019-01-22; 修回日期: 2019-03-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(51809052)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 51809052]

作者简介: 张连杰(1988-), 山东东营人, 助理研究员, 博士, 主要从事海洋地质研究, E-mail: ljzhang@nmemc.org.cn; 王鹏, 通信作者, 副研究员, 博士, 主要从事海域使用管理技术与政策研究, E-mail: pwang@nmemc.org.cn

湾潮流为不正规或正规半日潮流，运动形式主要是往复流，南岸和北岸潮流主流向近乎平行于海岸，西岸的潮流主流向则垂直于海岸。渤海湾存在两个强潮流区，其中曹妃甸南侧深槽的涨潮最大流速可达 1.24 m/s<sup>[12]</sup>；黄河口附近存在半日潮无潮区，6~20 m 等深线之间的强流带最大流速可达 120 cm/s<sup>[13]</sup>。

## 2 资料和方法

资料来源于中国海洋大学与国家海洋环境监测中心 2009 年利用抓斗在渤海湾采集的 307 个表层沉积物样品(图 1)，粒度和化学测试在中国海洋大学海

底科学与探测技术教育部重点实验室完成，粒度测试使用 Malvern Mastersizer 2000 型激光粒度仪，常量元素测试利用 SPECTRO XEPOS 台式偏振 X 射线荧光光谱仪，测试采用平行样，并通过标准样 (GSMS-2) 进行质量控制，多次重复测试的相对标准偏差平均为 2% 左右。有机碳(TOC)和 CaCO<sub>3</sub> 含量测定在广州地球化学研究所有机地球化学重点实验室完成，采用元素分析仪(Vario EL-III Elemental Analyzer)，在碳酸盐去除前、后进行两次测试并计算获得，测定采用平行样，并通过标准样和空白样进行质量控制，多次重复测试的误差为 0.02%。

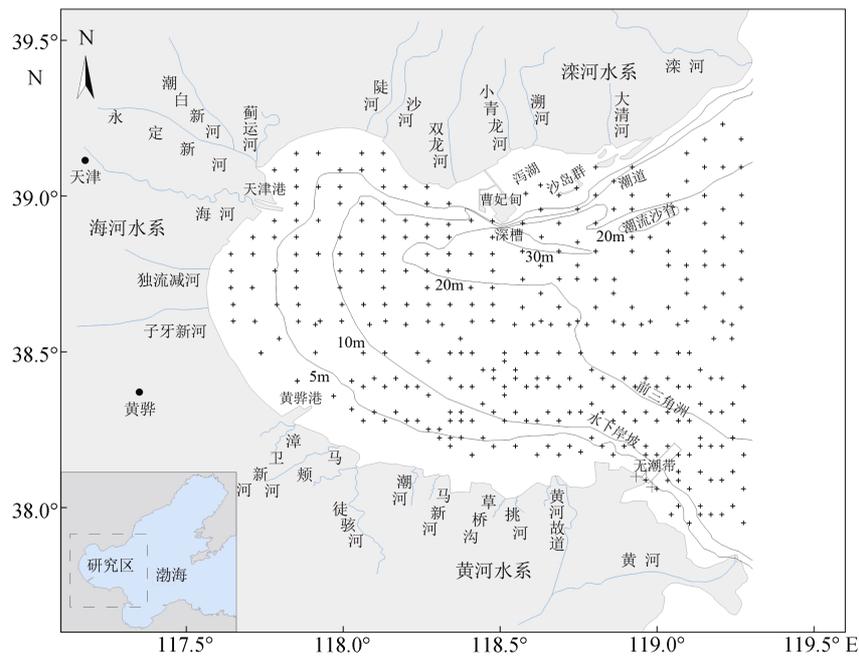


图 1 渤海湾表层沉积物采样站位  
Fig. 1 Surface sediments sampling sites in the Bohai Bay

## 3 结果

常量、微量元素含量分析统计情况如表 1 所示，常量元素含量分布如图 2 所示，微量元素含量分布如图 3 所示。

### 3.1 常量元素含量

渤海湾表层沉积物的常量元素以 SiO<sub>2</sub>(平均 54.3%)和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(平均 13.1%)为主，最高值分别可达 74.1%和 15.5%。随后是 CaO、TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>，平均含量分别为 5.7%和 4.8%；Na<sub>2</sub>O、MgO 和 K<sub>2</sub>O 含量接近，平均含量分别为 2.1%、2.5%和 2.7%；TiO<sub>2</sub>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、MnO、TOC 含量最低，均不足 1%。

### 3.2 微量元素含量

渤海湾表层沉积物的已测试的微量元素以 Ba(平均 585.0 μg/g)和 Sr(平均 212 μg/g)含量最高，分别可达 1743.0 μg/g 和 373.0 μg/g。其次为 V、Zn 和 Cr 的平均含量依次为 74.5 μg/g、73.7 μg/g 和 51.8 μg/g；Ni 和 Pb 含量最低，平均含量分别为 35.7 μg/g 和 23.9 μg/g。

## 4 讨论

### 4.1 元素组合分布规律

对常、微量元素进行 R 型聚类，结果(图 4)显示，当判定距离小于 4 时，呈现出以下几类元素组合。

表 1 渤海湾表层沉积物常量元素和微量元素含量

Tab. 1 Contents of major elements and trace elements of the surface sediments in the Bohai Bay

常量元素/%	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	MnO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TOC
最小值	41.2	6.8	0.7	0.3	0.0	1.0	0.9	2.0	0.1	0.1	0.0
最大值	74.1	15.5	6.6	3.2	0.2	12.4	3.5	3.4	0.7	0.3	1.0
平均值	54.3	13.1	4.8	2.5	0.1	5.7	2.1	2.7	0.6	0.2	0.4

微量元素/(μg/g)	Cu	Ni	Pb	Zn	Cr	Sr	Ba	V
最小值	2.9	7.9	6.8	17.9	10.2	156.8	358.0	7.0
最大值	38.6	54.0	43.6	126.0	93.6	373.0	1743.0	111.8
平均值	24.9	35.7	23.9	73.7	51.8	212.0	585.0	74.5

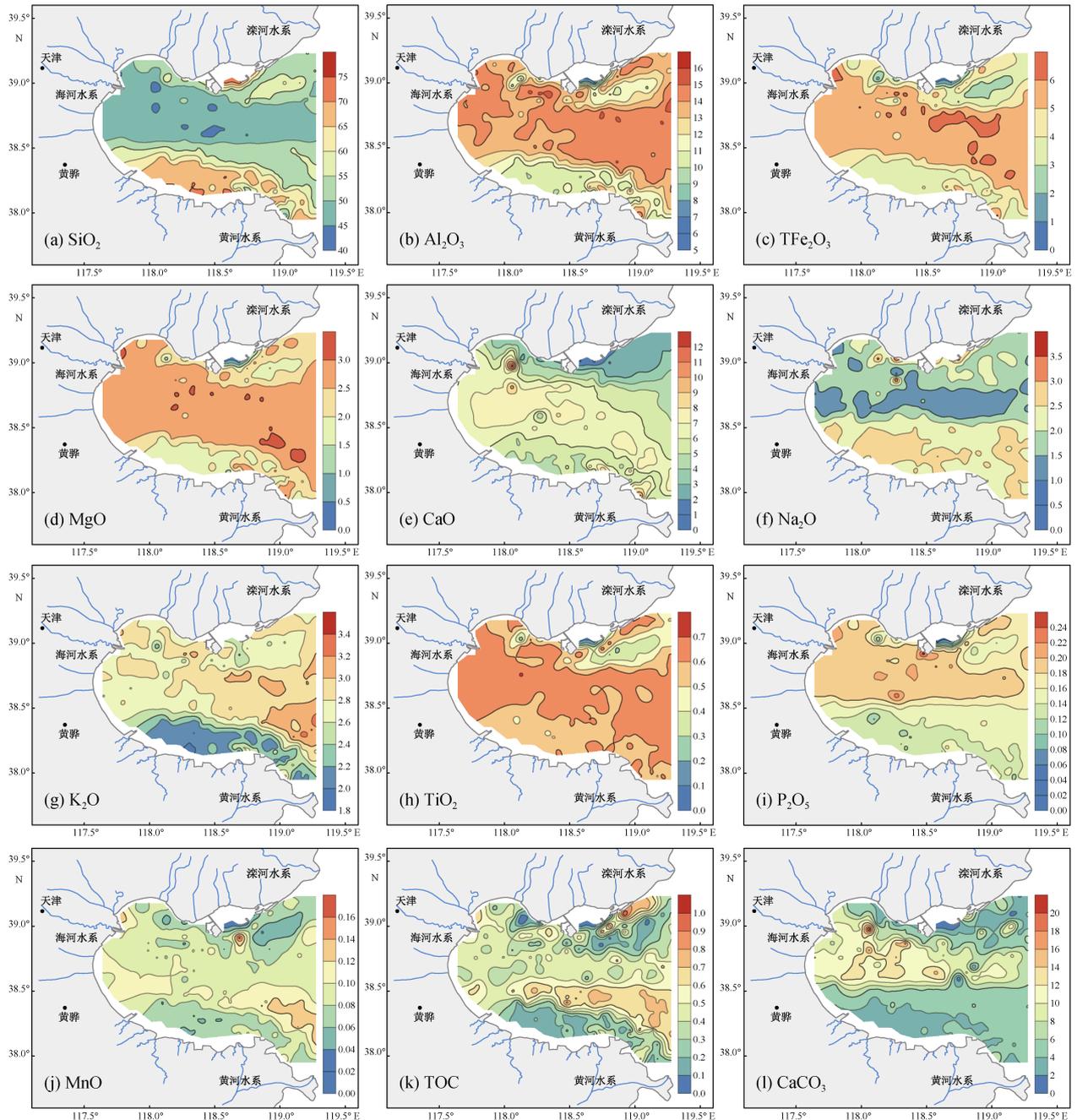


图 2 渤海湾表层沉积物常量元素含量分布(%)

Fig. 2 Distribution of major elements contents of the surface sediments in the Bohai Bay(%)

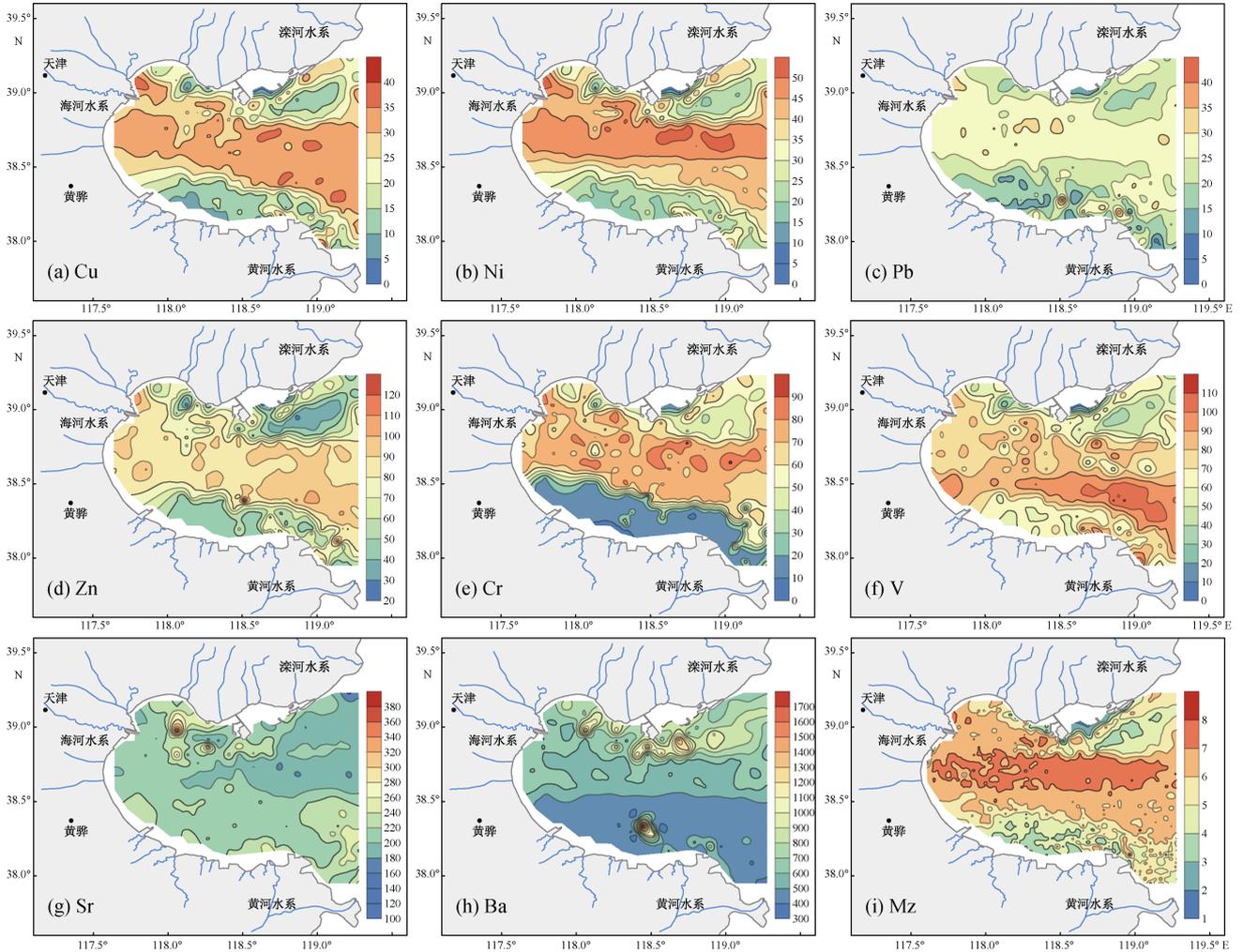


图 3 渤海湾表层沉积物微量元素含量分布(μg/g)

Fig. 3 Distribution of trace elements contents of the surface sediments in the Bohai Bay(μg/g)

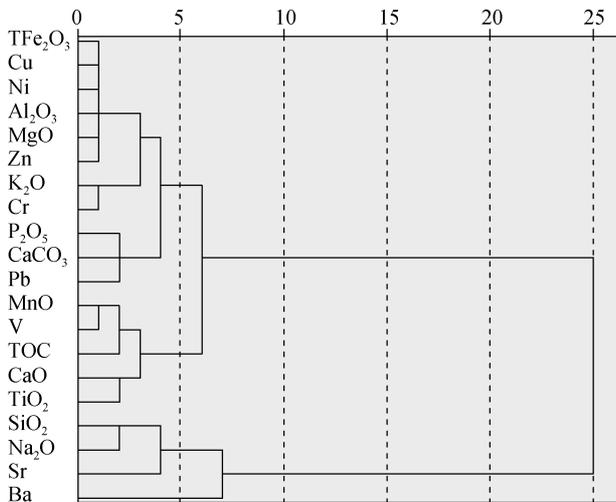


图 4 渤海湾表层沉积物元素丰度 R 型聚类

Fig. 4 R-type clustering to the elements contents of the surface sediments in the Bohai Bay

(1)  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$  组合。 $\text{SiO}_2$  和  $\text{Na}_2\text{O}$  分布较为一致，在曹妃甸浅滩、外侧水下沙脊、渤海湾南部近岸等粗粒沉积区的含量较高，而在渤海湾中部、西部等细粒沉积区含量较低(图 2a、2f)。粗粒沉积物的主要矿物组成为石英和斜长石，而  $\text{SiO}_2$  是陆源碎屑石英的主要组成元素， $\text{Na}_2\text{O}$  是斜长石的主要组成元素，二者均易富集于粗粒沉积物中，是“元素的粒度控制律”<sup>[1]</sup>中的第二种模式。

(2)  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{TFe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{Cu}$ 、 $\text{Zn}$ 、 $\text{Ni}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{Cr}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 、 $\text{Pb}$  组合。以  $\text{Al}_2\text{O}_3$  为代表的元素组合含量分布与  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$  分布正好相反(图 2b)。Al 是亲氧元素，广泛赋存于黏土矿物中，Al 的平均含量在伊利石中为 13.5%，在高岭石中为 21%，在蒙脱石中为 11%<sup>[14]</sup>。绝大多数的重金属元素易受细粒物质的吸附作用而富集，是“元素的粒度控制律”<sup>[1]</sup>中的第一种模式。

(3) CaO、TiO<sub>2</sub>组合。海洋沉积物中的 Ti 常被认为全部来源于陆源碎屑, TiO<sub>2</sub> 被认为是渤海陆源物质输入的代表性因子<sup>[11]</sup>, 黄河物质因富含碳酸盐, 以高含量的 Ca 为主要特点, 且呈现河口富集, 向外逐渐降低的分布特征, 表现了河流陆源输入对渤海湾沉积的重要影响, 这与前人<sup>[1]</sup>的发现一致。

(4) MnO、V、TOC 组合。该组合与第二组元素组合存在一定的亲缘性, 即亲黏土特性, 但其分布又有迥然不同: 在黄河水下前三角洲的外缘, 沉积物并不是最细的, 但含量却是最高的, 而这里也恰是自生黄铁矿的高含量区(图 5), 指示局部强还原性环境。V 的絮凝沉降与还原环境密切相关, 国内外都发现富集 V 的沉积物中都富含有机质; 自生黄铁矿(FeS<sub>2</sub>)也是还原环境下铁和硫被还原所形成; Mn 也是有机质的降解过程中的重要参与物<sup>[15]</sup>。Mn、V、

Fe<sup>2+</sup>是对氧化还原非常敏感的元素, 被广泛作为氧化还原环境的判别指标<sup>[16, 17]</sup>。高含量的 TOC 说明有机质含量丰富, 就为还原细菌提供了必要的生存条件, 有机质分解时消耗大量氧气而导致还原性环境的形成, 钒、铁、锰的高价化合物被还原为低价<sup>[18]</sup>。因此, 本组合与有机物的分解及由此导致的局部还原环境有关, 指示了海洋自生化学沉积因素。有机质的来源具有陆源生物碎屑和海洋生物两种来源, 该组合与 TiO<sub>2</sub>、CaO 呈现一定的亲缘性, 说明以河流为主的陆源输入是有机质的主要来源。

(5) Sr。Sr 表现出一定亲碎屑性, 在渤海湾南北沿岸、曹妃甸深槽、黄河口水下前三角洲外缘的含量较高, 可能与钙质生物外壳碎屑的分布有关。Sr 可以以类质同象的方式进入碳酸盐中, 推测 Sr 受到海洋钙质生物沉积因素的影响。

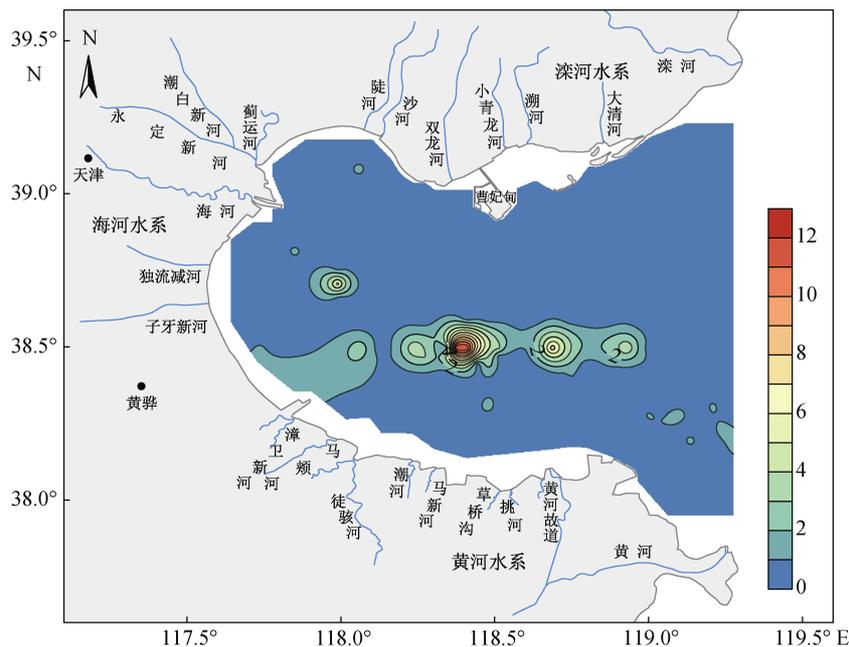


图 5 渤海湾表层沉积物中自生黄铁矿含量(%)<sup>[22]</sup>

Fig. 5 Authigenic pyrite contents of the surface sediments in the Bohai Bay(%)<sup>[22]</sup>

(6) Ba。Ba 的含量在渤海湾北部整体比南部要高得多, 其含量最高的区域位于潮流沙脊区, 并向西延伸至泻湖的老龙沟潮道、曹妃甸南侧深槽及槽外沙脊。在渤海湾南部 Ba 的含量却非常低。钡(Ba)在海洋中类似营养物, 参与生物过程, 与海洋生产力有关, 硅藻的旺发有利于 Ba 的沉积<sup>[19]</sup>。钡(Ba)在海洋生物中有明显的富集倾向, 如海洋生物的软组织、有孔虫的硬组织(SiO<sub>2</sub>)、红藻与钙质生物外壳(CaCO<sub>3</sub>)均有较高的含量<sup>[20]</sup>。Ba 的富集可能与胶结壳有孔虫

在砂质沉积区的富集<sup>[21]</sup>有关。

## 4.2 元素分布的控制因素

因子分析是一种数据的降维方法, 可以从原始高维数据中, 对具有相同规律参数进行整合, 提取出公因子。因子分析在地质学中得到了广泛应用<sup>[5, 23]</sup>。本文选取 12 种常量元素 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO、Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O、MgO、TiO<sub>2</sub>、MnO、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、CaCO<sub>3</sub>、TOC, 8 种微量元素 Cu、Ni、Pb、Zn、Cr、Sr、Ba、V 利

用 SPSS 软件进行因子分析。取样適切性量数(KMO)为 0.905, 因子分析的适宜性非常好。因子提取采用主成分分析法, 成分得分采用回归法。共提取了 6 个主成分, 总方差解释累计 92.75%。各成分载荷矩阵见表 1, 各成分得分的平面分布如图 6 所示。

表 2 渤海湾表层沉积物元素因子分析  
Tab. 2 Factor analysis of elements of the surface sediments in the Bohai Bay

元素	主成分					
	F1	F2	F3	F4	F5	F6
SiO <sub>2</sub>	-0.87	0.42	-0.11	-0.10	0.02	0.03
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.95	-0.06	-0.15	0.07	0.01	0.08
TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.98	0.17	-0.04	-0.06	0.00	-0.02
MgO	0.97	0.08	0.01	0.01	0.03	0.04
MnO	0.77	0.39	0.03	0.22	0.21	-0.10
CaO	0.61	0.44	0.53	-0.20	-0.02	-0.25
Na <sub>2</sub> O	-0.60	0.65	0.05	0.35	-0.01	-0.02
K <sub>2</sub> O	0.77	-0.25	-0.26	0.42	-0.14	-0.04
TiO <sub>2</sub>	0.75	0.37	0.09	-0.32	0.06	0.38
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.75	-0.50	0.18	-0.14	0.09	0.28
TOC	0.76	0.38	-0.25	0.27	-0.03	0.03
CaCO <sub>3</sub>	0.59	-0.41	0.50	-0.24	-0.20	-0.20
Cu	0.97	0.10	-0.11	0.05	-0.07	-0.07
Ni	0.97	-0.12	-0.02	-0.09	-0.07	0.00
Pb	0.75	-0.25	0.08	0.03	0.49	-0.09
Zn	0.91	0.24	-0.08	0.04	-0.09	-0.10
Cr	0.79	-0.37	-0.09	0.14	-0.29	0.06
Sr	-0.14	0.33	0.74	0.48	-0.10	0.22
Ba	-0.14	-0.80	0.21	0.44	0.17	-0.03
V	0.72	0.63	-0.01	0.02	0.06	-0.03
方差贡献率/%	59.83	15.87	6.81	5.57	2.52	2.15
累计方差贡献率/%	59.83	75.70	82.51	88.08	90.60	92.75

成分 F1, 方差贡献占比为 59.83%。其中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgO、MnO、CaO、K<sub>2</sub>O、TiO<sub>2</sub>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、Cu、Ni、Pb、Zn、Cr、V、TOC、CaCO<sub>3</sub> 均呈现较强的正载荷(0.60~0.98), 而 SiO<sub>2</sub>、Na<sub>2</sub>O 呈现较强的负载荷(-0.60~-0.87)。成分 F1 的得分(图 6a)与平均粒径的分布一致(图 3i), 呈显著正相关(相关系数 0.89), 与海洋自生因素密切相关的 Sr、Ba、Ca 元素都呈现弱载荷。因此, 可以判断成分 F1 为粒度控制律, 其正

载荷代表了细粒沉积, 负载荷代表了粗粒沉积, F1 说明沉积物的粒度大小对元素分布起主导控制作用。

成分 F2, 方差贡献占比为 15.87%。Na<sub>2</sub>O、CaO、SiO<sub>2</sub> 呈现较强的正载荷(0.42~0.65), 而 Ba、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 呈现较强的负载荷(-0.50~-0.80)。图 6b 显示, 成分 F2 的得分呈现明显的南北分异。黄河物质源自黄土高原, 富含方解石, CaO 是黄河物质的特征元素; 黄土高原长期风化, 黄河物质成熟度高、富含石英, 因而富 SiO<sub>2</sub>, 渤海湾南部正是成分 F2 的高得分区。据此推断, 成分 F2 指示了黄河和滦河的物源差异贡献对元素分布的影响。这也意味着对成分 F2 呈现强载荷(强正或强负)的元素, 可以考虑作为定量区分黄河和滦河物源贡献的指标。

成分 F3, 方差贡献占比为 6.81%。Sr、CaO、CaCO<sub>3</sub> 呈现较强的正载荷(0.50~0.74), 而负载荷很不明显, 仅 K<sub>2</sub>O 和 TOC 呈现微弱的负载荷(-0.25~-0.26), 正载荷主导了成分 F3。图 6c 显示, 成分 F3 得分没有明显的低值区, 而高值区位于曹妃甸南侧和西侧, 与冲刷深槽、外侧和向西延伸的水下沙坝相重叠。表层沉积物的调查在曹妃甸的甸头发现了砾石贝壳、深槽的西侧发现了贝壳砂, Sr、CaO、CaCO<sub>3</sub> 高得分恰好与贝壳碎屑的富集符合, 因此成分 F3 应该是由贝壳碎屑的富集造成的。这片狭小并呈延伸分布的区域的突出特征就是强烈的潮流作用, 深槽中的流速涨潮时最大可达 1.1 m/s, 而显著高于渤海湾其他海域普遍的 0.5 m/s 左右<sup>[24]</sup>, 在如此高速潮流的侵蚀环境下, 并不适宜贝类的附着和生长, 而且陆源碎屑因子 1 中的强载荷元素在因子 F3 中没有明显的负载荷, 因此可以判断因子 F3 虽然通过钙质生物碎屑表现出来, 但其指示的并不是现代的沉积作用。曹妃甸深槽现代仍处于侵蚀状态, 2004 年以来最大侵蚀速率可达 19 cm/a, 深槽最大水深达-42 m, 是整个渤海湾最深的海域, 槽底的全新世沉积地层被蚀穿<sup>[25]</sup>。因此推测可能是潮流冲刷下贝壳碎屑在流速较大的深槽富集, 或被潮流搬运在深槽南侧的水下沙脊和深槽西侧堆积, 导致了 Sr、CaO、CaCO<sub>3</sub> 的强正载荷。成分 F3 的凸显是潮流产生强烈侵蚀和堆积作用所致。成分 F3 指示了以曹妃甸深槽为代表的、强潮流主导下的沉积物蚀淤和再分配的影响。

成分 F4, 方差贡献占比为 5.57%。有机碳、K<sub>2</sub>O、Na<sub>2</sub>O、MnO、Sr、Ba 呈现略强的正载荷(0.22~0.48), 而 TiO<sub>2</sub> 呈现略强的负载荷(-0.32), CaO、CaCO<sub>3</sub> 呈微弱的负载荷(-0.20~-0.24)。TiO<sub>2</sub> 是渤海陆源物质

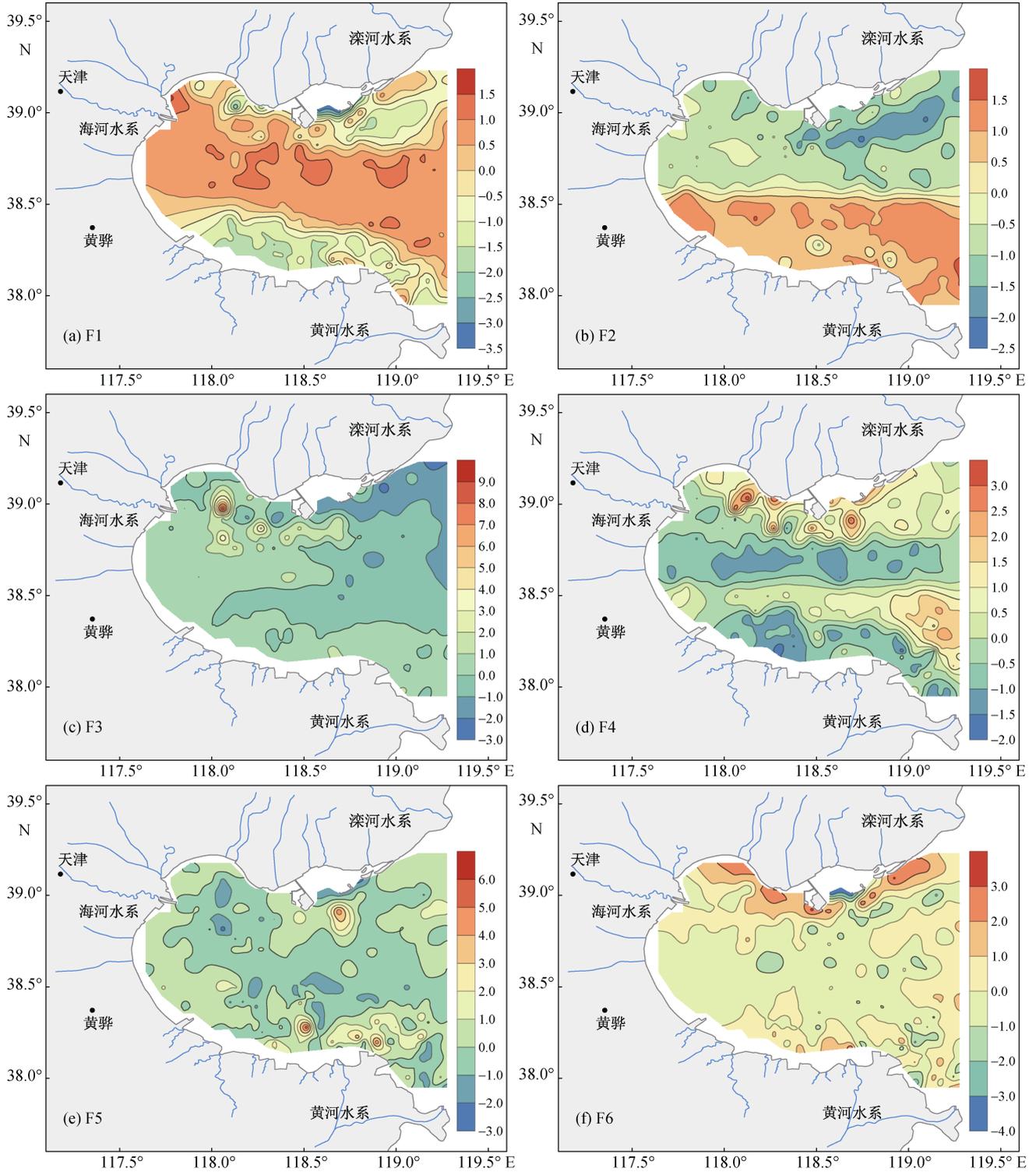


图 6 各因子得分的平面分布  
Fig. 6 Distribution of the scores for each factor

代表性元素<sup>[11]</sup>，因此成分 F4 与陆源物质有一定关系，CaO、CaCO<sub>3</sub> 的弱载荷说明非钙质生物沉积。海洋中藻类和浮游生物对 Sr、Ba 有相当的富集作用<sup>[14]</sup>，多与海洋生产力有关，硅藻的旺盛有利于 Ba 的沉积<sup>[19]</sup>。

图 6d 显示，成分 F4 得分的高值区有两处，一个位于渤海南部位于黄河水下前三三角洲的外缘，另一个位于渤海北部沿岸。成分 F4 的高得分区恰好与有机碳、V、Mn、自生黄铁矿的高值区相对应，而这些都是与

氧化还原环境密切相关的要素,因此推测成分 F4 代表了与氧化还原反应有关的海洋自生化学沉积。在黄河水下前三角洲的外缘三角洲沿岸盐度低、悬沙含量高的影响,不适宜海洋浮游和底栖生物的生长<sup>[26]</sup>,三角洲沿岸沉积物粗不利于有机质的富集。向外海海洋生产力逐渐增高,有机质在黄河水下前三角洲的外缘的细粒区富集。在渤海湾北部近岸,沿岸河流提供了丰富的营养物,促进了海洋生物的大量繁殖,海洋生产力旺盛<sup>[27]</sup>,有机质富集。有机质分解消耗氧气,导致氧化环境向局部还原环境的转换,Mn、V 被还原并与有机质分解的产物络合而絮凝沉积,黄河水下前三角洲的外缘形成了自生黄铁矿。成分 F4 指示了与氧化还原反应有关的海洋自生化学沉积,且其形成与河流有机物质的输入和快速埋藏有关。

成分 F5, 方差贡献占比为 2.52%。Pb 呈现略强的正载荷(0.49), 而 Cr 呈现微弱的负载荷(-0.29)。图 6e 显示,成分 F5 的得分在整个沿岸都整体较高,其中在诸多河流的入海口、曹妃甸港、黄骅港、东营港的周围得分最高。在渤海湾中,Pb 的富集系数明显高于 Cu、Zn<sup>[28, 29]</sup>。成分 F5 可能指示了人类工业活动导致的重金属污染对元素分布的影响。

成分 F6, 方差贡献占比为 2.15%。Ti 呈现略强的正载荷(0.34), 而 CaO 呈现略强的负载荷(-0.35)。海洋沉积物中的 Ti 几乎全部来源于陆源碎屑,而 CaO 还会受到海洋钙质生物介壳的影响。图 6f 显示,成分 F6 的得分的高值区位于曹妃甸沙岛群外侧水下岸坡,强载荷元素为 Ti,代表陆源碎屑沉积。低值区主要位于沙岛群内侧的泻湖,这些区域富集钙质生物介壳,蛤坨、草木坨、腰坨等沙洲的生物介壳含量可达 80%<sup>[27]</sup>,代表了海洋钙质生物沉积。成分 F6 指示了以曹妃甸浅滩“泻湖-沙坝-水下岸坡”这一独特的沉积环境为代表的,沙坝内侧的泻湖(海洋钙质生物沉积)与沙坝外侧水下岸坡(陆源碎屑沉积)的截然不同的物源差异。

## 5 结论

(1) SiO<sub>2</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 在渤海湾表层沉积物中含量最高,Ba 和 Sr 在已测试的微量元素中含量最高。

(2) 渤海湾表层沉积物呈现出以下的元素组合形式:富集于粗粒沉积区的 SiO<sub>2</sub>、Na<sub>2</sub>O 亲碎屑元素组合;富集于细粒沉积区的以 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为代表的亲黏土元素组合;与缺氧环境有关的 MnO、V、TOC 元素组合;与河流物质输入有关的 CaO、TiO<sub>2</sub> 陆源元素

组合;Sr、Ba 相对独立,无明显亲缘性。

(3) 因子分析共提取了 6 个主成分:成分 F1 指示了沉积物的粒度大小对元素分布起主导控制作用;成分 F2 指示了黄河和滦河的物源差异贡献对元素分布的影响;成分 F3 指示了以曹妃甸深槽为代表的、强潮流主导下的沉积物蚀淤和再分配的影响;成分 F4 指示了与氧化还原反应有关的海洋自生化学沉积;成分 F5 指示了人类工业活动导致的重金属污染对元素分布的影响;成分 F6 指示了以曹妃甸浅滩“泻湖-沙坝-水下岸坡”这一独特的沉积环境为代表的,沙坝内侧的泻湖(海洋钙质生物沉积)与沙坝外侧水下岸坡(陆源碎屑沉积)的物源差异。

## 参考文献:

- [1] 赵一阳. 中国海大陆架沉积物地球化学的若干模式[J]. 地质科学, 1983, 18(4): 307-314.  
Zhao Yiyang. Some geochemical patterns of shelf sediments of the china seas[J]. scientia geologica sinica, 1983, 18(4): 307-314.
- [2] 安凤桐, 高善明, 李元芳. 用微量元素分析法研究滦河三角洲沉积环境[J]. 海洋湖沼通报, 1982, 2(2): 24-31.  
An Fengtong, Gao Shanming, Li Yuanfang. A research on depositional environment of delta by analyzed method of trace elements in luanhe river[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 1982, 2(2): 24-31.
- [3] 杨守业, 李从先. 长江与黄河现代层沉积物元素组成及其示踪作用[J]. 自然科学进展, 1999, 9(10): 68-75.  
Yang Shouye, Li Congxian. Element compositions and their traceability of modern surface sediments from the yangtze and yellow rivers[J]. Progress in Natural Science, 1999, 9(10): 68-75.
- [4] 赵一阳, 鄢明才, 李安春, 等. 中国近海沿岸泥的地球化学特征及其指示意义[J]. 中国地质, 2002, 29(2): 181-185.  
Zhao Yiyang, Yan Mingcai, Li Anchun, et al. Geochemistry of muds along the coast of china and their significance[J]. Chinese Geology, 2002, 29(2): 181-185.
- [5] 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.
- [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] 杨作升, 王兆祥, 瞿建忠, 等. 黄河三角洲沿岸及相邻渤海海域碳酸盐研究(英文)[J]. 青岛海洋大学学报, 1989, 19(3): 91-99.  
Yang Zuosheng, Wang Zhaoxiang, Qu Jianzhong, et al. Study on carbonates from the coastal zone of the yellow river delta and adjacent bohai gulf[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 1989, 19(3): 91-99.
- [8] 赵玉玲, 冯秀丽, 宋涅, 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 science, 2016, 40(9): 98-106.
- [9] 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]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2007.  
Liu Jianguo. Material compositions of sediments in the bohai sea mud area during the holocene and their environmental implications[D]. Qingdao: Institute of Oceanography Chinese Academy of Sciences, 2007.
- [10] 张爱滨, 刘明, 廖永杰, 等. 黄河沉积物向渤海湾扩散的沉积地球化学示踪[J]. 海洋科学进展, 2015, 33(2): 246-256.  
Zhang Aibin, Liu Ming, Liao Yongjie, et al. The sedimentary geochemical trace of the yellow river sediments diffusion in the bohai bay[J]. Advances in Marine Science, 2015, 33(2): 246-256.
- [11] 刘建国, 李安春, 陈木宏, 等. 全新世渤海泥质沉积物地球化学特征[J]. 地球化学, 2007, 36(6): 559-568.  
Liu Jianguo, Li Anchun, Chen Muhong, et al. Geochemical characteristics of sediments in the bohai sea mud area during holocene[J]. Geochimica, 2007, 36(6): 559-568.
- [12] 季荣耀, 陆永军, 左利钦. 渤海湾曹妃甸深槽形成机制及稳定性分析[J]. 地理学报, 2011, 66(3): 348-355.  
Ji Rongyao, Lu Yongjun, Zuo Liqin. Formation mechanism and stability of caofeidian channel in the bohai bay[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(3): 348-355.
- [13] 侍茂崇, 赵进平. 黄河三角洲半日潮无潮区位置及水文特征分析[J]. 山东海洋学院院报, 1985, 15(1): 127-136.  
Shi Maochong, Zhao Jinping. The analysis of hydrographical characteristics in the nontidal region m2 near the delta of the huanghe river[J]. Journal of Shandong College of Oceanology, 1985, 15(1): 127-136.
- [14] 牟保磊. 元素地球化学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2000.  
Mou Baolei. Element geochemistry[M]. Beijing: Peking University Press, 2000.
- [15] 邹建军, 石学法, 李双林. 北黄海浅表层沉积物微量元素分布及其早期成岩作用探讨[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2007, 27(3): 43-50.  
Zou Jianjun, Shi Xuefa, Li Shuanglin. Distributions of minor elements in near surface sediments in north yellow sea and the early diagenesis[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2007, 27(3): 43-50.
- [16] Morford Jenniferl, Emerson Steven. The geochemistry of redox sensitive trace metals in sediments[J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 1999, 63(11-12): 1735-1750.
- [17] Thomson J, Nixon S, Croudace Iw, et al. Redox-sensitive element uptake in north-east Atlantic Ocean sediments[J]. Earth & Planetary Science Letters, 2001, 184(2): 535-547.
- [18] 许昆明, 邹文彬, 司靖宇. 南海越南上升流区沉积物中溶解氧、锰和铁的垂直分布特征[J]. 热带海洋学报, 2010, 29(5): 56-64.  
Xu Kunming, Zou Wenbin, Si Jingyu. Vertical distributions of dissolved oxygen, manganese, and iron in the sediments from vietnam upwelling zone of south china sea[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2010, 29(5): 56-64.
- [19] 倪建宇, 潘建明, 扈传昱, 等. 南海表层沉积物中生物钼的分布特征及其与初级生产力的关系[J]. 地球化学, 2006, 35(6): 615-622.  
Ni Jianyu, Pan Jianming, Hu Chuanyu, et al. Biogenic barium distribution in surface sediments of south china sea and its relationship to primary productivity[J]. Geochimica, 2006, 35(6): 615-622.
- [20] 刘英俊. 元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1984.  
Liu Yingjun. Element geochemistry[M]. Beijing: Science Press, 1984.
- [21] 陈文文. 渤海湾北部 5000 年以来环境变化及其背景[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.  
Chen Wenwen. The palae-environment evolution and its background in the Bohai Bay since the late 5000aBP[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009.
- [22] 张连杰. 渤海湾现代沉积特征及 5000 年以来沉积环境演化[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2018.  
Zhang Lianjie. Modern sedimentary characteristics of the Bohai Bay and its sedimentary environment evolution during the past 5000 years[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2018.
- [23] 蒋富清, 李安春. 冲绳海槽南部表层沉积物地球化学特征及其物源和环境指示意义[J]. 沉积学报, 2002, 20(4): 680-686.  
Jiang Fuqing, Li Anchun. Geochemical characteristics and their implications to provenance and environment of surface sediments from the south okinawa trough[J]. acta sedimentologica sinica, 2002, 20(4): 680-686.
- [24] 张立奎. 渤海湾海岸带环境演变及控制因素研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.  
Zhang Likui. Research on the coastal environment evolution and its' controlling factors of bohai bay[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012.
- [25] 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 caofeidian channel in the bohai bay[J]. *marine science*, 2016, 40(3): 128-137.
- [26] 李小艳, 石学法, 程振波, 等. 渤海莱州湾表层沉积物中底栖有孔虫分布特征及其环境意义[J]. *微体古生物学报*, 2010, 27(1): 38-44.
- Li Xiaoyan, Shi Xuefa, Cheng Zhenbo, et al. Distribution of benthic foraminifera in surface sediments of the laizhou bay, bohai sea and its environmental significance[J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 2010, 27(1): 38-44.
- [27] 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.
- [28] 李淑媛, 郝静. 渤海湾及其附近海域沉积物中 Cu, Pb, Zn, Cd 环境背景值的研究[J]. *海洋与湖沼*, 1992, 23(1): 39-48.
- Li Shuyuan, Hao Jing. The study of environment background concentrations of cu, pb, zn, cd in the sediment of the bohai bay and adjacent sea area[J]. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 1992, 23(1): 39-48.
- [29] 秦延文, 郑丙辉, 李小宝, 等. 渤海湾海岸带开发对近岸沉积物重金属的影响[J]. *环境科学*, 2012, 33(7): 2359-2367.
- Qin Yanwen, Zheng Binghui, Li Xiaobao, et al. Impact of coastal exploitation on the heavy metal contents in the sediment of Bohai Bay[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(7): 2359-2367.

## Geochemical distribution and its controlling factors of the surface sediments in the Bohai Bay

ZHANG Lian-jie<sup>1</sup>, ZHU Long-hai<sup>2</sup>, ZHANG Pan<sup>1</sup>, ZHAO Bo<sup>1</sup>, WANG Peng<sup>1</sup>

(1. National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China; 2. Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

**Received:** Jan. 20, 2019

**Key words:** Bohai Bay; elemental geochemistry; factor analysis; authigenic chemical deposition; anoxic environment

**Abstract:** The geochemistry and particle size of 307 surface sediment samples collected from the Bohai Bay were analyzed. The surface sediments in the Bohai Bay show 4 element assemblages: phlo-clastic element assemblage (SiO<sub>2</sub> and Na<sub>2</sub>O) enriched in coarse-grained deposition area, phlo-clay element assemblage (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and most of the heavy metal elements) enriched in fine-grained deposition area, redox sensitive elements assemblage (MnO, V, and TOC) associated with anoxic environment and terrestrial element assemblage (CaO and TiO<sub>2</sub>) related to river input. Particle size dominates the overall distribution pattern of the element contents in the sediment from the Bohai Bay; different river sources strongly affect the element content differences between the southern (rich in Na<sub>2</sub>O, CaO and SiO<sub>2</sub>) and the northern (rich in Ba and P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) parts of the Bohai Bay; the erosion and redistribution of fast flowing tidal currents to the sediments lead to a strip-like enrichment of Sr and Ca in south of Caofeidian; the enrichment of organic matter in fine-grained deposition area leads to the formation of anoxic environment and marine autogenous chemical deposition of K<sub>2</sub>O, Mn, V and authigenic pyrite; human activities cause an abnormal enrichment of heavy metal elements (represented by Pb) in river estuaries, ports and coastal waters; the distinct sources between the lagoon (marine calcareous deposition) on the inner side of the Caofeidian sand bar and the underwater bank slope (terrigenous clastic deposition) on the outside of the Caofeidian sand bar, leads to local element differences under the unique geomorphic sedimentary environment.

(本文编辑: 康亦兼)