

成海燕, 姜胜辉, 张超, 等. 渤海海峡表层沉积物地球化学特征[J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(8): 19-28.

渤海海峡表层沉积物地球化学特征

成海燕^{1,2}, 姜胜辉^{2*}, 张超¹, 赵冬冬¹

(1 中国冶金地质总局青岛地质勘察院, 青岛 266100; 2 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100)

摘要:通过对渤海海峡 412 个站位的表层沉积物粒度及 123 个站位的表层沉积物地球化学特征分析, 探讨了其空间分布特征、元素相关性、元素组合特征、表层沉积物沉积动力环境及沉积物输运方式, 揭示了沉积物地球化学特征的环境意义。结果表明: 研究区表层沉积物常量元素以 SiO_2 和 Al_2O_3 为主, 随着沉积物粒径变粗 SiO_2 含量逐渐增加, Al_2O_3 含量逐渐减小。全区表层沉积物微量元素含量最高为 Ba。各类型沉积物中元素的富集因子表明元素含量的变化服从粒度控制规律。采用聚类分析方法, 将元素分布划分为 5 个分区: 残留沉积区、老铁山水道区、水道东西两侧区、海峡中部区和海峡南部区。

关键词: 表层沉积物; 粒度; 地球化学; 微量元素; 常量元素; 渤海海峡

中图分类号: P736.4

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2020.015

0 引言

渤海海峡是我国近海仅次于台湾海峡的第二大海峡, 是渤海物质交换的重要通道。海峡内岛屿散布, 发育老铁山水道、登州水道等众多水道, 地形条件复杂, 形成了渤海海峡表层沉积物独特的地球化学特征。徐东浩等^[1]、袁萍^[2]、王伟等^[3]、赵利等^[4]根据粒度特征探讨了辽东湾、渤海、北黄海、南海北部陆架区的粒度分布特征、沉积物类型以及所指示的沉积动力环境; 肖晓等^[5]、赵广明等^[6]、张盼等^[7]人根据沉积物粒度数据, 并依据沉积动力环境分区的方法对沉积环境进行了分区研究。前人对于粒度与沉积环境之间相应关系的探索为进一步研究渤海海峡表层沉积物提供了科学方法和技术路线。

相较海峡两侧的北黄海和渤海, 渤海海峡地球化学方面的研究相对较少, 主要偏重于元素地球化

学方面。廖永杰^[8]、李淑媛等^[9]、蓝先洪等^[10-11]采用聚类分析的方法对渤海表层沉积物的分布特征进行了分析, 并对物源进行了探讨。塔金璐^[12]通过对渤海表层沉积物的黏土粒级和黄海北部岩心进行地球化学分析, 讨论了发生沉积的水动力条件和渤海物质来源。本文拟通过对渤海海峡表层沉积物常量元素分布特征、元素的相关性分析, 探讨研究区表层沉积物沉积动力环境和沉积物输运方式, 进而揭示其沉积环境意义。

1 材料与方法

1.1 样品来源

本文表层沉积物调查资料主要来源于“中国近海海洋综合调查与评价专项”。表层沉积物取样来自 412 个站位(图 1), 采样间隔在 5 km 左右, 采样深度约 2 cm。全部样品进行粒度分析, 其中 123 个样品进行了元素地球化学分析。采样设备为蚌式取样器, 每个站位均采用 DGPS 差分定位。

1.2 分析方法

采用筛分法和激光粒度仪结合的方法进行沉积物粒度测试, 先烘干称重, 用 2.0 mm 孔径的标准

收稿日期: 2020-02-25

资助项目: 国家自然科学基金项目(41776059)

作者简介: 成海燕(1982—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事海洋地质、地球化学方面的研究工作。E-mail: chenghaiyan_2005@163.com

* 通讯作者: 姜胜辉(1981—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事海洋地质与水动力数值模拟方面的研究工作。E-mail: 54086464@qq.com

筛进行湿筛,然后将 $<2.0\text{ mm}$ 的细颗粒部分用英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer2000 型激光粒度仪进行分析, $>2.0\text{ mm}$ 的粗颗粒部分烘干称重并用传统筛法分析;将上述数据按照 0.25Φ 间隔输出,合并后获得完整粒度分布。沉积物粒径采用 Wentworth 等比制 Φ 粒级标准,粒度参数采用 Mc Manus 矩法^[13]计算。沉积物分类和命名采用 Folk 的三角图命名方法。用于地球化学分析的样品经烘干、研磨,制成 200 目的粉末后,采用 X-射线荧光光谱法测定各样品的常、微量元素。分析过程中,每批样品中插入 3 个标准样品进行数据监测(GBW 0713、GSD-9 和 GSD-10),同时随机重复测量了 30% 的样品,所得数据误差 $<0.3\%$ 。

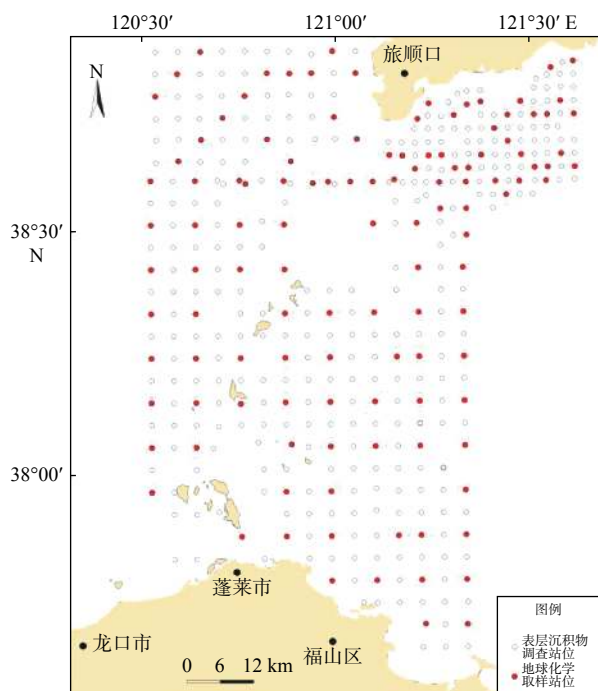


图1 研究区表层沉积物、化学元素分析站位图

Fig.1 Site map of sampling stations for surface sediments and chemical elements

2 结果

2.1 表层沉积物粒度分布特征

研究区表层沉积物按照粒径大小可分为砾石、砂、粉砂和黏土 4 个粒级组分,粉砂为表层沉积物主要组分,其次为砂质粉砂。依据 Folk 分类,研究

区的底质沉积物的类型有砂(S)、粉砂质砂(zS)、泥质砂(mS)、砂质粉砂(sZ)、砂质泥(sM)、粉砂(Z)、泥(M)、泥质砾(mG)、泥质砂质砾(msG)、砾质泥质砂(gmS)、砾质泥(gM)和黏土(C)12 种类型。沉积物类型主要包括粉砂、砂质粉砂和粉砂质砂 3 种类型,这 3 种类型占研究区所有沉积物的 69.4%。

研究区粉砂分布最广主要分布在北隍城岛以南海域,粉砂的平均含量为 76.9%;砂质粉砂分布较分散,主要分布于旅顺口西部、老铁山水道东北部和渤海海峡中部,跃移组分含量一般可达 60%~90% 左右;粉砂质砂主要分布于旅顺口西和老铁山水道东南部,推移组分含量在 60%~75% 左右;泥质砂质砾主要分布于老铁山水道附近海域。

从沉积物类型空间分布(图 2)来看,研究区渤海海峡北部水动力明显强于南部;老铁山水道附近以含砾沉积物为主,指示极强的水动力环境;老铁山水道东西两侧以中砂和粗砂为主,水动力环境有所减弱;中部和南部以砂质粉砂、粉砂为主,沉积物悬移质比重较高,水动力环境进一步减弱;黏土为主的区域很少出现,主要由于渤海海峡为渤海与北黄海水体的交换通道,水动力较强,细粒物质不易沉积。

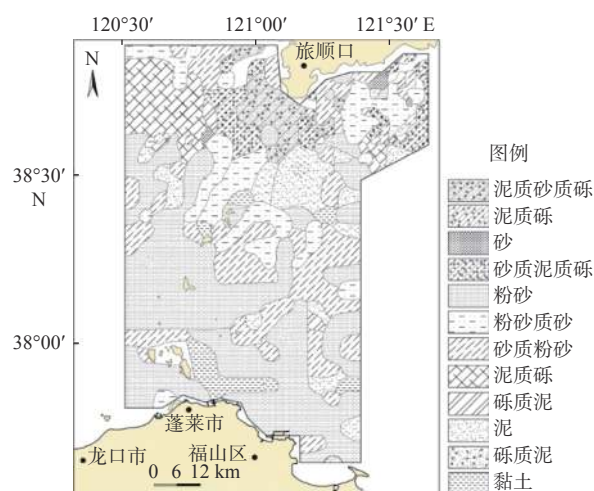


图2 研究区底质类型分布特征图 (Folk 分类)

Fig.2 Distribution map of sediment types in the study area

2.2 表层沉积物常、微量元素地球化学分布特征

对沉积物中 Al_2O_3 、 SiO_2 、 MgO 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 K_2O 、 Na_2O 、 P_2O_5 、 TiO_2 、 MnO 、 CaCO_3 等指标进行

了分析(图 3)。结果表明: 表层沉积物中常量元素以 Al_2O_3 和 SiO_2 为主, 平均含量分别为 10.51% 和 66.45%, 其次为 CaCO_3 、 CaO 、 Fe_2O_3 , 平均含量分别为 8.30%、5.21%、3.84%, 上述元素占常量元素总量的 94.30%。粉砂质砂中 Al_2O_3 和 SiO_2 的含量分别为 10.28% 和 71.64%, 砂质粉砂中 Al_2O_3 和 SiO_2 的含量分别为 11.29% 和 68.59%, 粉砂中 Al_2O_3 和 SiO_2 的含量分别为 11.38% 和 67.18%。图 3 表明随着沉积物粒径由粉砂至砂质粉砂到粉砂质砂, 粒径逐渐变粗, SiO_2 含量逐渐增加, Al_2O_3 含量逐渐减小。另外, CaO 、 Fe_2O_3 、 MgO 和 CaCO_3 的含量随着沉积物粒径变粗含量逐渐减小, 而 Na_2O 含量逐渐增加。

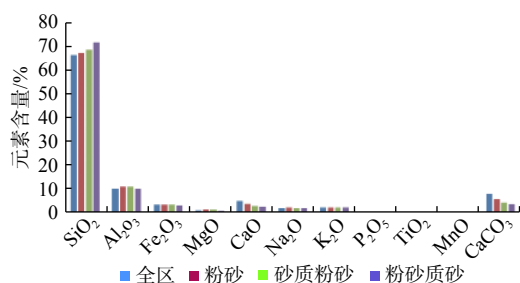


图 3 全区与各类型沉积物常量元素组成比较

Fig.3 Comparison of the major element composition of the area and its relationship with sediment types

渤海海峡表层沉积物中微量元素含量最高的为 Ba, 平均含量为 669.42×10^{-6} , 其次为 Sr 和 Zr, 平均含量分别为 280.47×10^{-6} 和 120.79×10^{-6} (图 4)。粉砂质砂中 Zr、Sr 和 Ba 的平均含量分别是 151.11×10^{-6} 、 238.01×10^{-6} 和 739.2×10^{-6} ; 砂质粉砂中 Zr、Sr 和 Ba 的平均含量分别是 133.26×10^{-6} 、 230.70×10^{-6} 和 583.80×10^{-6} ; 粉砂中 Zr、Sr 和 Ba 的平均含量分别是 85.80×10^{-6} 、 239.03×10^{-6} 和 522.39×10^{-6} 。从图 4 中可以看出随着沉积物平均粒径变大, Ba、Zr 含量逐渐增加, Sr 无明显变化。

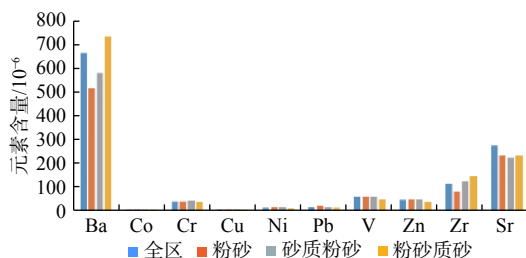


图 4 全区与各类型沉积物微量元素组成比较

Fig.4 Comparison of trace element composition of the area and its relationship with sediment types

3 讨论

3.1 常微量元素相关性分析

3.1.1 元素的控制规律

不同粒径沉积物中元素含量具有一定的变化规律, 沉积物元素组成明显受粒度影响, 不同沉积物类型差异明显。“元素的粒度控制率”得到业内学者的一致认同^[14-15]。

(1) 常量元素的粒度控制规律

从表 1 可以看出平均粒径与常量元素的相关关系。其中, SiO_2 与平均粒径呈高度负相关, Na_2O 与平均粒径为显著负相关; Al_2O_3 、 Fe_2O_3 与平均粒径为高度正相关(相关系数 > 0.8), CaO 、 MnO 、 CaCO_3 和 P_2O_5 与平均粒径为显著正相关($0.5 < \text{相关系数} < 0.8$); K_2O 和 TiO_2 与平均粒径则无明显的相关关系。

研究区元素在不同的沉积物类型中含量也能表明元素的粒度控制规律。通过各类型沉积物中元素含量的平均值($\text{Mean}(s)$)与研究区所有样品的平均值($\text{Mean}(t)$)的比值可以反映元素随沉积物粒度变化的趋势, 结果如图 5 所示。可以看出, 砂质粉砂沉积物中元素含量和研究区整体常量元素含量较为接近, 而粉砂质砂和粉砂中的常量元素组分相对研究区元素组成变化较大, 其中 CaO 、 CaCO_3 、 MnO 在研究的 3 种沉积物中含量均偏低。粉砂沉积物富集 TiO_2 、 MgO 、 Na_2O 、 Al_2O_3 ; 粉砂质砂沉积物富集 SiO_2 , 贫 P_2O_5 、 TiO_2 、 Fe_2O_3 、 MgO 、 CaO 、 MnO 和 CaCO_3 。元素在不同类型沉积物中的分布符合元素粒度控制规律的趋势: P_2O_5 、 TiO_2 、 Fe_2O_3 、 MgO 、 Al_2O_3 、 CaO 和 Na_2O 在粉砂质砂、砂质粉砂和粉砂中含量依次增加, 即随着沉积物粒径变细, 元素含量逐渐增加; SiO_2 的含量在粉砂质砂、砂质粉砂和粉砂中含量依次减小, 即随着沉积物粒径变细, 元素含量逐渐减小。 K_2O 在各种沉积物中含量变化较小, 说明元素的含量受粒度影响较小。

(2) 微量元素的粒度控制规律

从表 1 可以看出平均粒径与微量元素的相关关系。Co、Cr 和 Ni 与平均粒径为高度正相关(相关系数 > 0.8), Ba、Pb、Sr 和 V 与平均粒径为显著正相关($0.5 < \text{相关系数} < 0.8$), Cu、Zn 与平均粒径无明显的相关关系; Zr 与平均粒径为高度负相关。

表 1 研究区表层沉积物元素相关系数表 ($n=247$)Table 1 Correlation coefficient of elements in surface sediments of the study area($n=247$)

	Mz	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	MnO	CaCO ₃	Ba	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	V	Zn	Zr	Sr
Mz	1.00																					
SiO ₂	-0.86	1.00																				
Al ₂ O ₃	0.90	-0.73	1.00																			
Fe ₂ O ₃	0.83	-0.76	0.89	1.00																		
MgO	0.68	-0.78	0.82	0.77	1.00																	
CaO	0.65	-0.86	-0.48	0.10	-0.04	1.00																
Na ₂ O	-0.72	0.75	0.54	-0.02	0.34	-0.88	1.00															
K ₂ O	-0.09	0.28	0.74	0.49	0.56	-0.78	0.65	1.00														
P ₂ O ₅	0.74	-0.68	0.05	0.87	0.39	0.30	-0.16	0.11	1.00													
TiO ₂	-0.43	-0.25	0.91	0.51	0.87	-0.46	0.69	0.53	0.07	1.00												
MnO	0.59	-0.43	-0.09	0.35	0.06	0.29	-0.36	-0.05	0.57	-0.11	1.00											
CaCO ₃	0.68	-0.75	-0.49	0.08	-0.07	1.20	-0.89	-0.66	0.24	-0.48	0.28	1.00										
Ba	0.59	-0.04	-0.29	0.30	-0.26	0.10	-0.22	0.12	0.48	-0.41	0.19	0.11	1.00									
Co	0.81	-0.59	0.69	0.75	0.82	-0.10	0.37	0.49	0.56	0.70	0.21	-0.12	-0.02	1.00								
Cr	0.86	-0.71	0.76	0.57	0.77	-0.08	0.07	0.42	0.17	0.71	0.05	-0.09	-0.22	0.59	1.00							
Cu	-0.26	-0.90	0.65	0.60	0.69	0.11	-0.16	0.33	0.23	0.58	0.20	0.10	-0.13	0.56	0.90	1.00						
Ni	0.84	-0.67	0.83	0.66	0.91	-0.12	0.28	0.51	0.32	0.80	0.13	-0.14	-0.24	0.87	0.85	0.81	1.00					
Pb	0.58	-0.24	0.53	0.66	0.53	-0.24	0.37	0.50	0.51	0.50	0.28	-0.25	0.11	0.80	0.36	0.39	0.64	1.00				
V	0.60	-0.81	0.63	0.86	0.74	0.01	0.04	0.44	0.61	0.59	0.29	0.00	0.14	0.80	0.80	0.80	0.85	0.64	1.00			
Zn	0.08	-0.62	0.81	0.67	0.83	-0.15	0.31	0.54	0.30	0.77	0.05	-0.17	-0.16	0.83	0.78	0.76	0.90	0.70	0.76	1.00		
Zr	-0.87	-0.03	0.13	0.02	-0.06	-0.11	-0.19	0.10	-0.15	0.12	0.06	-0.11	0.05	-0.27	0.41	0.40	0.03	-0.24	0.19	-0.01	1.00	
Sr	0.79	-0.82	-0.67	-0.04	-0.31	0.88	-0.66	-0.59	0.26	-0.61	0.23	0.89	0.34	-0.25	-0.33	-0.14	-0.35	-0.26	-0.15	-0.33	-0.16	1.00

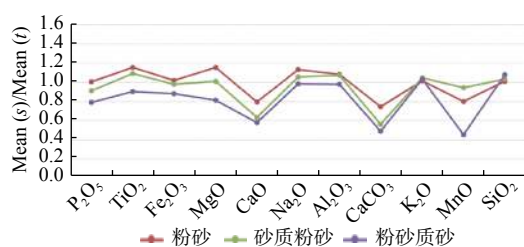


图 5 不同沉积物类型常量元素相对含量变化趋势图

Fig.5 Variation trend of relative content of major elements in different sediment types

研究区微量元素在不同的沉积物类型中含量有所不同。通过各类型沉积物中元素含量的平均值(Mean(s))与研究区所有样品的平均值(Mean(t))的比值可以反映元素随沉积物粒度变化的趋势,结果如图 6 所示。砂质粉砂沉积物中元素含量和研究区微量元素含量相近,粉砂沉积物富集 Cr、Pb、V 和 Zr, 贫 Co、Sr 和 Ba; 粉砂质砂沉积物富集 Zr 和 Ba, 贫 Co、Cr、Cu、Ni、Pb、V 和 Zn。元素在不同类型沉积物中的分布符合元素粒度控制规律的趋势: Cr、Pb 和 V 在粉砂质砂、砂质粉砂和粉砂中

含量依次增加,即随着沉积物粒径变细,元素含量逐渐增加。Zr、Sr 和 Ba 在粉砂质砂沉积物中含量较高,在粗粒粉砂中含量偏低,表明其主要富集于细粒沉积物中。

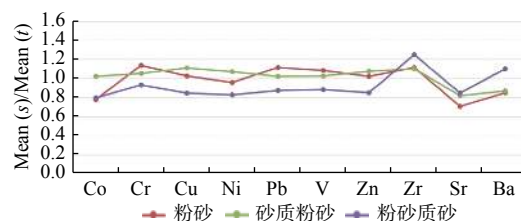


图 6 不同沉积物类型微量元素相对含量变化趋势图

Fig.6 Trend of relative content of trace elements in different sediment types

3.1.2 元素的相关性

常、微量元素间的相关性用 Pearson 相关系数进行度量,其结果如表 1。

渤海海峡表层沉积物元素组成中最多的元素为 SiO₂,主要以硅酸盐、硅的氧化物形式存在,其含量能够反映沉积物的物质来源于沉积作用^[16],由于

沉积物中 Si 的“稀释剂”作用从而影响其他元素^[17]。从表 1 可以看出, SiO_2 与大部分的常、微量元素呈负相关, 但 SiO_2 与常量元素 K_2O 、 Al_2O_3 、 TiO_2 以及部分微量元素 Ba、Sr、Zr 等不存在明显的相关关系, 这可能与物质来源差异以及海洋作用等贡献有关^[18-19]。

Al_2O_3 是表层沉积物元素组成的次要元素组分, 根据前文分析 Al_2O_3 主要富集于细粒沉积物中。在与常量元素相关性中, Al_2O_3 与 MgO 、 TiO_2 之间为高度正相关, 相关系数在 0.8 以上; 在与微量元素相关性中, Al_2O_3 与 Cr、Co、Cu、Ni 和 Zn 之间为显著正相关到高度正相关, 相关系数为 0.65~0.83, 除 Sr、Ba 外微量元素均与 Al_2O_3 呈正相关关系。 Al_2O_3 是细粒黏土矿物的重要组成部分, 这些元素与 Al_2O_3 的高度相关性表明其具有明显的亲黏土性。

3.2 表层沉积物微量元素指数特征

表 2 为研究区元素在全区及各沉积物类型中的富集因子。全区元素富集因子除 Pb 较高外, 其他接近 1, Pb 的富集因子也均 < 2, 说明元素的地壳来源属性。

表 2 研究区元素富集因子

	Ba	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	V	Zn	Zr	Sr
全区	1.48	1.32	1.44	1.02	1.37	1.83	1.27	1.10	0.98	1.38
粉砂	1.01	1.38	1.36	0.91	1.41	1.81	1.19	1.14	0.63	1.00
砂质粉砂	1.18	1.26	1.40	1.04	1.37	1.73	1.21	1.10	0.96	0.99
粉砂质砂	1.61	1.09	1.37	0.89	1.17	1.61	1.14	0.97	1.21	1.10

渤海海峡各类沉积物中元素的富集因子表明元素含量的变化服从粒度控制律, 砂质粉砂中元素富集程度与研究区元素富集程度相近。Co、Pb、Ni、Zn 随沉积物粒径变细均呈现含量升高的趋势; Ba、Zr 随沉积物粒径变细呈现含量变低的趋势。Cu、V 在砂质粉砂沉积物中相对较为富集。

化学风化指数(CIA)反映的是沉积物在形成时化学风化程度, 不受元素搬运、沉积的影响即不是反映后期的化学变化, CIA 指数可以很好地反映沉积物源区风化程度从而广泛运用。

$$\text{CIA} = [\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})] \times 100$$

式中: Al_2O_3 、 Na_2O 、 K_2O 和 CaO^* 的含量均为摩尔含量, CaO^* 为硅酸盐矿物中的钙含量^[20]。根据 Na_2O 予以校正消除碳酸钙的影响, 当 CaO 的摩尔

数大于 Na_2O 时, $\text{M}(\text{CaO}^*) = \text{M}(\text{Na}_2\text{O})$; 当 CaO 的摩尔数小于 Na_2O 时, $\text{M}(\text{CaO}^*) = \text{M}(\text{CaO})$, 研究区 CaO 的摩尔数大于 Na_2O , 所以取 $\text{M}(\text{CaO}^*) = \text{M}(\text{Na}_2\text{O})$ 。

研究区 CIA 指数分布如图 7 所示。研究区风化程度整体南部高于北部, CIA 指数高值区位于渤海海峡中部, 砣矶岛与南隍城岛之间海域, CIA 指数一般高于 46; 海域 CIA 指数低值区主要位于老铁山水道, CIA 指数一般低于 35, 反映了该区域海底沉积物发生的快速剥蚀和堆积。渤海海峡中部及南部 CIA 指数偏高很可能是黄河源物质为重要物源沉积形成。

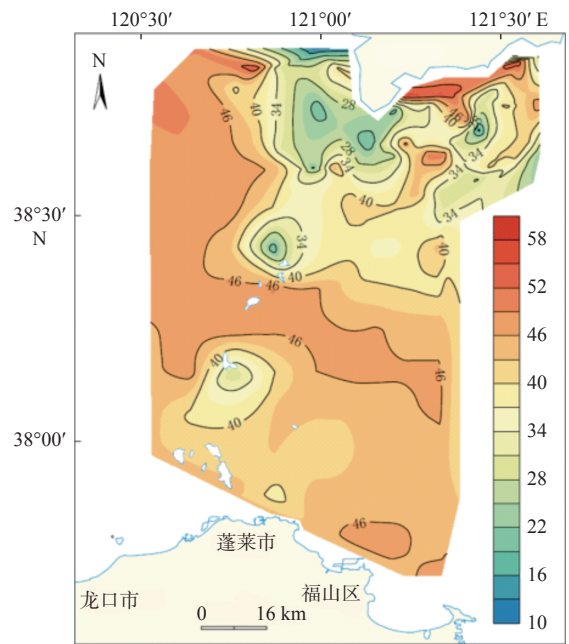


图 7 研究区 CIA 指数等值线分布图

Fig.7 Contour map of CIA index in the study area

3.3 元素因子分析对沉积环境的指示

利用 SPSS 19.0 软件对渤海海峡常量和微量元素进行了因子分析, 分析采用 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 MgO 、 CaO 、 Na_2O 、 K_2O 、 P_2O_5 、 CaCO_3 、 TiO_2 和 MnO 共 11 种常量元素; Ba、Co、Cr、Cu、Ni、Pb、V、Zn、Zr、Sr 共 10 种微量元素作为变量。分析数据抽样适度测定值(Kaiser-Meyer-Olkin measure of sampling adequacy, KMO)为 0.84 (> 0.50), 显著性 $P < 0.05$, 因此研究区化学元素数据适宜进行主成分分析。因子提取方法采用主成分分析方法, 分析采用 Z 值标准化, 因子采用 Kaiser 标准化的正交旋转法。分析方法共提取 4 个因子, 累积方差贡献率达到 86.6%。

因子 F1 方差贡献率为 41.2%, 选取因子载荷 > 0.5 的元素作为因子代表元素(表 3), F1 的元素组合为 MgO、Al₂O₃、Fe₂O₃、TiO₂、SiO₂、Ni、Zn、Cr、Cu、V、Co、Pb, 其中 SiO₂ 为负载荷, 其他元素为正载荷。F1 组合元素中, Al₂O₃ 与 MgO、Fe₂O₃、TiO₂、Ni、Zn、Cr、Cu、V、Co、Pb 之间为显著正相关到高度正相关关系, Al₂O₃ 是细粒黏土矿物的重要组成部分, 显示出在细粒沉积物中富集的特性。由于沉积物中 Si 的“稀释剂”作用, SiO₂ 与大部分元素呈负相关。陆源碎屑沉积物化学组成中 SiO₂ 组分具有重要作用, 组分一般可高达 50%~90%, 而化学性质稳定的 SiO₂、Al₂O₃、TFe₂O₃、MgO 等元素赋存于陆源碎屑和黏土矿物中, 而黄河河口絮凝作用造成了细粒沉积物中 Fe、Mg、Co、Ni 和 V 等金属元素的富集^[17], 悬移组分在水动力作用下在海峡附近沉积。因此, F1 因子代表的是亲陆源碎屑及黏土元素组合, 是控制研究区沉积物化学成分及分布的最主要因素。

表 3 研究区元素因子载荷矩阵(经过方差极大旋转)

Table 3 Element factor loading matrix in the study area (rotated by variance maxima)

元素	F1	F2	F3	F4
Ni	0.97	0.10	0.06	-0.03
MgO	0.94	0.02	-0.02	-0.13
Zn	0.92	0.14	0.09	-0.08
Cr	0.88	0.02	-0.03	0.39
Cu	0.84	-0.16	0.08	0.42
Al ₂ O ₃	0.84	0.46	-0.11	0.06
V	0.84	-0.01	0.45	0.14
Co	0.84	0.13	0.31	-0.37
TiO ₂	0.84	0.37	-0.21	-0.04
Fe ₂ O ₃	0.69	-0.06	0.61	-0.03
Pb	0.60	0.28	0.46	-0.37
CaO	-0.02	-0.99	0.08	-0.06
CaCO ₃	-0.04	-0.98	0.08	-0.05
Sr	-0.30	-0.85	0.25	-0.10
SiO ₂	-0.56	0.78	-0.17	-0.03
Na ₂ O	0.22	0.77	-0.19	-0.38
K ₂ O	0.46	0.69	0.23	0.07
P ₂ O ₅	0.31	-0.20	0.82	-0.21
Ba	-0.28	0.00	0.81	0.10
MnO	0.09	-0.23	0.59	0.05
Zr	0.07	0.08	0.00	0.94

因子 F2 的方差贡献率为 23.6%, 其元素组合为 CaO、CaCO₃、Sr、K₂O、Na₂O、SiO₂, 其中 CaO、CaCO₃、Sr 为负载荷, K₂O、Na₂O、SiO₂ 为正载荷。CaO、CaCO₃ 是生物碳酸盐沉积的重要组成, 其分布与钙质生物屑有关; Sr 是亲生物元素, 可为生物吸收转变为碳酸盐物质; K₂O、Na₂O 在地球化学环

境中活动性较大, 在沉积物形成过程中主要以溶解态形式迁移, 很容易被黏土矿物所吸附而富集。因此, F2 因子代表碳酸钙型的生物碎屑组分。

因子 F3 方差贡献率为 13.4%, 其元素组合为 Fe₂O₃、P₂O₅、MnO、Ba, 全部为正载荷。P₂O₅ 以磷灰石形式(Ca₅(PO₄)₃(F, Cl, OH))存在, Fe₂O₃、Ba 富集于渤海海峡残留沉积区, F3 代表是残留沉积区的重要指标。

因子 F4 的方差贡献率为 8.4%, 对元素分布的影响最弱。F4 的元素为 Zr, 为正载荷。Zr 在表生状态下一般以锆石(ZrSiO₄)等稳定的重矿物形式存在, 所以因子 F4 代表该区的稳定重矿物组合。

3.4 表层沉积物元素的地球化学分区

3.4.1 R 型聚类分析

首先对渤海海峡 21 种元素含量进行 R 型聚类分析, 对样品的多个观测值(即变量)进行分析。统计分析采用软件 SPSS19.0, 采用的聚类方法是沃尔德方法(Ward Method), 组间距离测定采用欧氏距离平方(Square Euclidean distance)。

R 型聚类分析结果如图 8 所示。由图可见, 当选定的判别距离 < 5 时, 各化学元素可划归为 5 个组合, 1 组为 CaO、Sr 等, 2 组为 P₂O₅、Fe₂O₃ 等, 3 组为 TiO₂、Al₂O₃ 和重金属, 4 组为 Na₂O、K₂O 和 Zr, 5 组为 SiO₂。当选定的判别距离为 3 时可被细分为 11 个元素组。考虑到 R 型聚类分析简化的 2 个条件以及元素间的相关性, 最后挑选出 CaO、Sr、Fe₂O₃、P₂O₅、Al₂O₃、Cu、Na₂O、Zr 和 SiO₂ 这 9 种元素作为样品 Q 型聚类分区的基础。

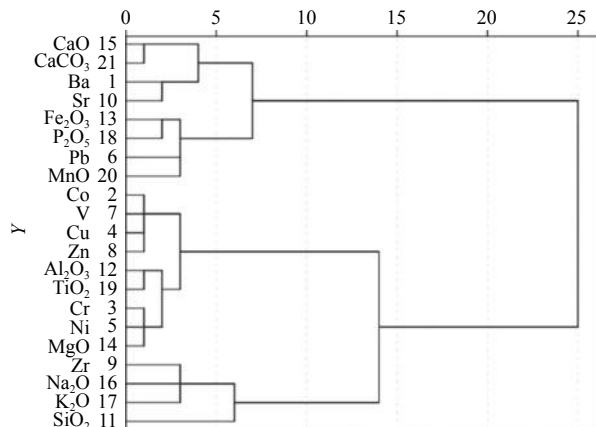


图 8 表层沉积物化学元素含量 R 型聚类分析谱系图

Fig.8 R-type cluster analysis pedigree of chemical element content in surface sediments

3.4.2 Q 型聚类及典型站位分析

考虑 R 型聚类分析方法以及元素彼此相关性选出 9 个变量 CaO、Sr、Fe₂O₃、P₂O₅、Al₂O₃、Cu、Na₂O、Zr 和 SiO₂ 作为样品 Q 型聚类分区的基础, 采用的聚类方法是沃尔德方法(Ward Method), 组间距离测定采用欧氏距离平方, Q 型聚类分区结果见图 9。

3.4.3 表层沉积物地球化学分区特征

(1) 常量元素与微量元素分区特征

根据对不同地球化学分区中元素含量的统计, 不同化学分区常量元素含量表现出不同特征。

从表 4 和图 10 可以看出, 常量元素中, SiO₂ 在老铁山水道含量最低, 依次残留沉积区、海峡南部区、水道东西两侧区、海峡中部区含量最高; 而 CaO 的分布与 SiO₂ 分布完全相反, 老铁山水道区含量最高, 海峡中部区含量最低; Al₂O₃ 在老铁山水道含量明显低于其他区域, 残留沉积区明显高于其他区; Fe₂O₃ 在残留沉积区明显较高; 在老铁山水道区 Na₂O、K₂O 含量明显较低。

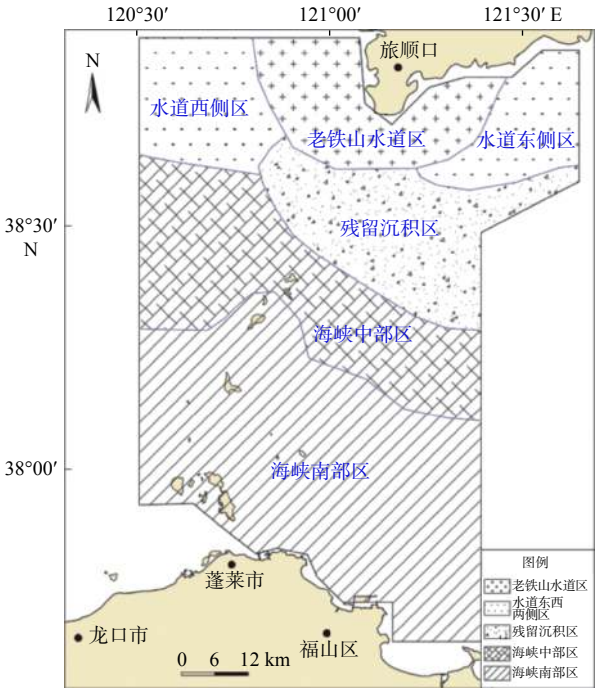


图 9 渤海海峡表层沉积物地球化学分区
Fig.9 Geochemical areas of surface sediments in the Bohai Strait

表 4 研究区地球化学分区常量元素含量特征统计
Table 4 Content of major elements in each geochemical areas of the study area /%

		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	MnO	CaCO ₃
残留沉积区	最大值	70.02	11.96	10.12	2.22	9.15	2.35	3.13	0.32	0.51	0.32	16.39
	最小值	54.02	8.07	3.62	1.04	3.40	1.69	2.42	0.13	0.31	0.05	5.07
	均值	62.61	9.61	5.58	1.46	7.01	2.11	2.71	0.18	0.39	0.17	11.73
	变异系数	8.27	11.72	30.53	24.58	26.21	10.39	8.67	29.06	15.62	53.60	29.68
老铁山水道区	最大值	65.80	9.82	3.97	2.13	21.87	2.00	2.47	0.16	0.39	0.20	40.33
	最小值	43.91	4.69	2.30	0.67	7.60	1.13	1.28	0.07	0.23	0.06	12.77
	均值	58.32	7.65	2.97	1.21	12.49	1.45	2.10	0.11	0.34	0.09	22.26
	变异系数	14.39	20.93	18.14	35.51	41.32	19.91	17.98	24.70	17.63	49.63	44.08
水道东西两侧区	最大值	76.98	11.56	3.86	1.53	4.79	2.86	2.75	0.14	0.52	0.09	7.27
	最小值	67.75	9.26	2.26	0.82	1.90	1.88	2.47	0.07	0.33	0.04	2.13
	均值	71.57	10.32	3.14	1.15	2.97	2.22	2.60	0.10	0.43	0.06	4.03
	变异系数	3.74	7.38	13.60	17.82	36.61	12.26	3.44	19.15	13.08	25.03	49.13
海峡中部区	最大值	76.98	10.83	3.31	1.42	4.03	2.74	2.84	0.12	0.51	0.07	5.55
	最小值	71.66	9.26	2.51	0.86	1.95	2.42	2.52	0.09	0.37	0.05	2.25
	均值	73.96	10.11	2.92	1.17	2.62	2.55	2.64	0.10	0.44	0.06	3.43
	变异系数	1.72	3.45	7.06	10.92	22.11	3.14	2.97	8.86	8.68	10.01	28.59
海峡南部区	最大值	70.62	13.82	5.28	2.49	6.83	2.89	2.90	0.16	0.69	0.17	11.07
	最小值	59.63	10.30	3.39	1.54	2.98	2.31	2.44	0.12	0.52	0.06	2.95
	均值	65.58	11.99	4.15	1.96	4.21	2.64	2.63	0.13	0.60	0.09	6.23
	变异系数	5.32	7.49	13.37	14.04	22.46	5.12	4.61	7.70	6.22	29.92	29.23

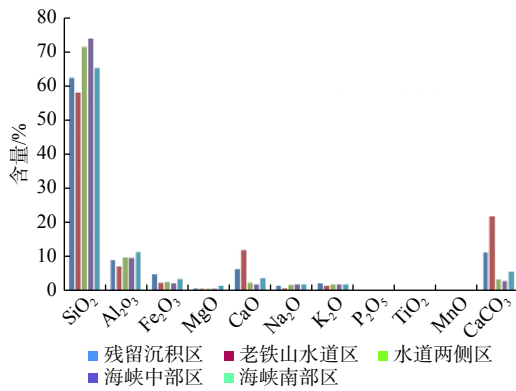


图 10 各地球化学分区常量元素含量图

Fig.10 Content map of major elements in each geochemical area

从表 5 和图 11 可以看出,微量元素中, Ba 在残留沉积区中明显高于其他区,约为其他区域的 2 倍;

Sr 在老铁山水道区含量最高,其次为海峡南部区,其他区域无明显差别; Sr 集中分布在水道两侧区,其次是老铁山水道区,海峡中部区含量最低; Co、Ni、Zn、Pb 和 V 在残留沉积区和海峡南部区较富集,海峡中部区 Cu 的含量明显较低。

(2) 表层沉积物地球化学分区

老铁山水道区位于渤海海峡最北端,水深较深、流速较大,为渤海海水体交换的重要通道。该沉积区沉积物明显特征含有砾石; CIA 指数一般 < 30,处于风化初级阶段。在地球化学特征方面,水道区明显的富含 CaO 和 Sr, CaO 是生物碳酸盐沉积的重要组成部分, Sr 为亲生物元素,水道区富含生物碎屑组分。SiO₂ 富集于砂中,水道附近水动力强,推移质的砂无法在此沉积, SiO₂ 含量较低。

表 5 研究区地球化学分区微量元素含量特征统计

Table 5 Statistics of trace element contents in geochemical areas of the study area

/10⁻⁶

		Ba	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	V	Zn	Zr	Sr
残留沉积区	最大值	2217.00	17.27	57.30	21.82	29.46	36.20	140.70	72.72	167.10	488.00
	最小值	738.00	10.76	28.54	5.97	16.45	21.64	52.52	41.32	46.20	263.00
	均值	1410.33	13.99	42.67	12.00	21.14	27.43	76.97	56.50	88.20	373.98
	变异系数	34.73	14.82	23.06	44.22	21.69	14.31	30.10	19.70	50.86	17.76
老铁山水道区	最大值	638.20	11.20	55.10	15.70	24.70	20.80	71.30	53.10	189.40	693.20
	最小值	235.20	4.60	29.50	9.00	9.50	13.00	38.00	21.60	87.30	304.20
	均值	477.29	7.88	40.96	12.89	16.25	18.25	54.68	35.90	137.58	472.96
	变异系数	24.95	25.96	19.99	16.25	26.60	13.25	18.27	26.81	26.61	30.81
水道东西两侧区	最大值	1359.40	11.50	61.30	20.40	23.60	25.40	69.50	57.80	395.40	289.70
	最小值	529.40	3.90	37.10	9.60	12.70	15.00	42.60	30.90	146.40	192.10
	均值	735.06	7.84	49.20	13.27	17.22	19.85	60.20	42.22	240.45	226.34
	变异系数	36.73	23.89	14.50	22.56	18.87	13.86	12.22	20.31	30.53	14.26
海峡中部区	最大值	598.00	11.82	50.06	9.04	21.84	25.47	57.53	51.10	85.29	274.00
	最小值	467.00	8.62	31.19	5.09	14.61	21.04	41.20	37.12	61.32	220.00
	均值	531.74	10.29	37.55	7.03	17.84	23.25	49.76	42.08	74.09	232.74
	变异系数	7.85	7.42	10.52	15.39	8.64	6.64	7.26	9.32	9.34	5.62
海峡南部区	最大值	543.00	17.78	65.14	23.53	37.06	32.96	92.82	92.38	105.19	280.00
	最小值	402.00	12.33	41.21	8.88	21.95	23.45	62.14	47.65	79.75	199.00
	均值	447.69	14.68	52.06	14.27	26.80	26.19	73.64	63.02	94.79	225.12
	变异系数	5.72	10.71	10.43	26.54	14.18	7.85	11.57	16.33	6.91	8.38

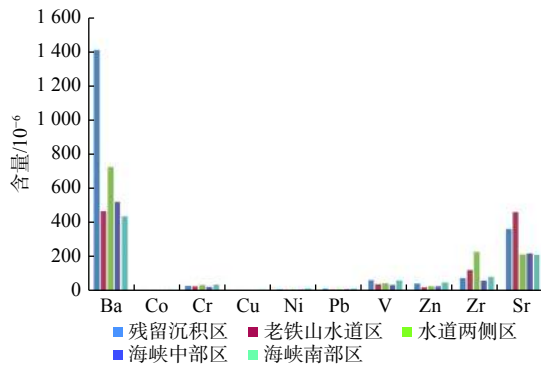


图 11 各地球化学分区微量元素含量图

Fig.11 Content map of trace elements in each geochemical area

残留沉积区位于老铁山水道南部, 主要沉积物类型为泥、细粒物质为主, 富含 Pb、V、Zn 等重金属, 贫 SiO₂。CIA 指数一般 <40, 该区沉积物为晚更新世的滞留沉积。

水道东西两侧区位于老铁山水道砾石区的东西两侧, 沉积物类型以砂为主, 富含 SiO₂、Zr, 贫 CaO, CIA 指数一般为 40~50, 区域水动力较强, 黄渤海物质在此区域混合。

海峡中部区位于渤海海峡中部, 沉积物类型以粉砂至砂为主。富含 SiO₂, 贫 CaO、Zr、V, CIA 指数一般为 45~50, 区域水动力较强。

海峡南部区位于渤海海峡南部, 沉积物类型以粉砂为主。根据渤海物质北进南出的特征, 本区的物源主要来自于黄河和周边小型河流。

4 结论

通过对渤海海峡表层沉积物常微量元素分布特征、相关性分析, 探讨了研究区沉积动力环境和沉积物输运方式, 揭示了沉积物地球化学特征的沉积环境意义。

(1) 研究区表层沉积物常量元素以 SiO₂ 和 Al₂O₃ 为主, 随着沉积物粒径变粗 SiO₂ 含量逐渐增加, Al₂O₃ 含量逐渐减小。研究区全区表层沉积物微量元素含量最高的为 Ba, 其次为 Sr 和 Zr, P₂O₅、TiO₂、Fe₂O₃、MgO、Al₂O₃、CaO、Na₂O、Cr、Pb 和 V 的含量均随着沉积物粒径变粗逐渐减小。研究区各类型沉积物中元素的富集因子表明元素含量的变化服从粒度控制规律。

(2) 对常量元素和微粒元素进行因子分析, 可

提取 4 个主因子: F1 代表亲陆源碎屑及黏土元素组合; F2 代表碳酸钙型的生物碎屑组分; F3 代表残留沉积区的重要指标; F4 代表稳定重矿物组合。

(3) 采用聚类分析方法, 研究区元素分布可划分为残留沉积区、老铁山水道区、水道东西两侧区、海峡中部区、海峡南部区 5 个分区。

参考文献:

- [1] 徐东浩, 李 军, 赵京涛, 等. 辽东湾表层沉积物粒度分布特征及其地质意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2012, 32(5): 35-42.
- [2] 袁 萍. 渤海表层沉积物的空间分布及其物源和沉积动力环境的关系[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
- [3] 王 伟, 李安春, 徐方建, 等. 北黄海表层沉积物粒度分布特征及其沉积环境分析[J]. 海洋与湖泊, 2009, 40(5): 525-531.
- [4] 赵 利, 彭学超, 钟和贤, 等. 南海北部陆架区表层沉积物粒度特征与沉积环境[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2016, 36(6): 111-122.
- [5] 肖 晓, 石要红, 冯秀丽, 等. 北部湾表层沉积物粒度分布规律及沉积动力分区[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2016, 46(5): 83-89.
- [6] 赵广明, 叶 青, 薛春汀, 等. 现代黄河三角洲陆上表层沉积物类型与沉积环境分区及岸线演变[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2013, 33(5): 47-52.
- [7] 张 盼, 吴建政, 胡日军, 等. 莱州湾西南部表层沉积物粒度分布特征及其现代沉积环境分区[J]. 海洋地质前沿, 2014, 30(9): 11-17.
- [8] 廖永杰. 渤海中南部沉积地球化学特征和黄河改道事件[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [9] 李淑媛, 苗丰民, 赵全民, 等. 辽东半岛西南及渤海中部海域表层沉积物的地球化学[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2010, 30(4): 123-130.
- [10] 蓝先洪, 顾兆峰, 密蓓蓓, 等. 渤海西部表层沉积物中重金属的环境地球化学特征[J]. 现代地质, 2017, 31(2): 367-373.
- [11] 蓝先洪, 李日辉, 张志珣, 等. 渤海东部与黄海北部表层沉积物的元素地球化学记录[J]. 地球学报, 2015, 36(6): 718-728.
- [12] 塔金璐. 渤海海黏土粒级沉积物地球化学记录对物源和沉积环境的释读[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [13] McManus J. Grain size determination and interpretation[C]// Tucker M ed. Techniques in Sedimentology, Blackwell, Oxford 1988: 63 - 85.
- [14] 林炳煌, 雷怀彦, 官宝聪, 等. 九龙江河口表层沉积物元素特征及地球化学意义[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2009, 48(3): 450-455.
- [15] 王蒙光. 九龙江河口湾沉积物粒度和元素地球化学特征对沉积动力环境的指示[D]. 厦门: 厦门大学, 2008.
- [16] Han D L. Geochemistry of core E in the Laizhou Bay since late stage of Middle Pleistocene[J]. 海洋学报, 2001, 23(1): 79-85.
- [17] 窦衍光, 李 军, 杨守业. 山东半岛东部海域表层沉积物元素

- 组成及物源指示意义[J]. 海洋学报(中文版), 2012, 34(1): 109-119.
- [18] 郭 飞, 高茂生, 侯国华, 等. 莱州湾07钻孔沉积物晚更新世以来的元素地球化学特征[J]. 海洋学报(中文版), 2016, 38(3): 145-155.
- [19] 陈 弘, 刘 坚, 王宏斌. 琼东南海域表层沉积物常量元素地球化学及其地质意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2007, 27(6): 39-45.
- [20] Nesbitt H W, Young G M, McLennan S M et.al. Effects of Chemical Weathering and Sorting On the Petrogenesis of Siliciclastic Sediments, with Implications for Provenance Studies[J]. *The Journal of Geology*, 1996, 104(5): 525-542.

GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF SURFACE SEDIMENTS IN BOHAI STRAIT AND CONTROLLING FACTORS

CHENG Haiyan^{1,2}, JIANG Shenghui^{2*}, ZHANG Chao¹, ZHAO Dongdong¹

(1 Qingdao Geological Exploration Institute, China Metallurgical Geology Bureau, Qingdao 266100, China;

2 College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Based on the grain size data of surface sediments collected at 412 stations and the geochemical data from 123 stations in the Bohai Strait, we discussed in this paper the spatial distribution pattern of elements, elements correlation, element assemblages, sedimentary dynamic environment and sediment transportation mechanism of the surface sediments, aiming at revealing the environmental significance of sediment geochemistry. The results indicate that the major elements of the surface sediments in the study area are predominated by SiO_2 and Al_2O_3 . The content of SiO_2 increase and Al_2O_3 decrease gradually with the increase in grain size of sediments. The highest trace element in the surface sediments is Ba. The element enrichment factors of the sediments from the study area also indicate that the distribution of element content is controlled by the grain size of sediments. The results of cluster analysis further suggest that the spatial distribution of elements in the study area could be subdivided into 5 areass, namely, the relict deposits area, the Laotieshan area, the east and west sides of the water-course, the central area of the Straits and the southern part of the Straits.

Key words: surface sediments; grain size; geochemistry; trace elements; major elements; Bohai Strait