

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2017.03.008

渤海西部表层沉积物的地球化学记录

蓝先洪^{1,2}, 李日辉^{1,2}, 王中波^{1,2}, 陈晓辉^{1,2}, 顾兆峰^{1,2}, 徐晓达^{1,2}

(1. 国土资源部海洋油气资源与环境地质重点实验室, 青岛海洋地质研究所, 青岛 266071;

2. 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266071)

摘要:对渤海西部表层沉积物 44 个样品 20 种化学组分进行了测试分析, 研究了各化学组分分布特征及物质来源。 Al_2O_3 、 MgO 、 TFe_2O_3 、 K_2O 、 Corg 、 TN 、 Li 、 V 和 Sb 等组分与细粒沉积物呈正相关, SiO_2 组分与粗粒沉积物呈正相关, Na_2O 、 CaO 和 Ta 组分与沉积物粒度无明显正或负的相关性; 研究区化学组分 R-型因子分析得出 3 种主要组合类型, 以 Li 、 CaO 和 TC 为代表, 分别代表了陆源细粒物质输入、黄河物质、黄河物质与海河物质的影响。 $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 与 $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Zr}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 与 $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 的离散图和 Q-型聚类分析表明, 渤海西部沉积物主要来源于黄河和海河, 东北部沉积物受到了滦河物质的影响。

关键词:化学组分; 地球化学; 表层沉积物; 物源; 渤海西部

中图分类号: P736.4

文献标识码: A

文章编号: 0256-1492(2017)03-0075-11

渤海西部主要包括渤海湾、莱州湾和渤海中央海盆西部。渤海湾位于渤海西部, 是一个向西凹入的弧形浅水海湾, 海底地势平缓, 自湾顶向渤海中央倾斜, 海底地形平均坡度约为 0.2‰; 莱州湾位于渤海南部, 北以黄河口-妃姆岛一线为界, 是一个弧状的浅水海湾; 渤海中央盆地属于浅海堆积平原, 水深 20~28 m, 为一较浅的大型盆地^[1]。研究区域水动力条件变化较大, 物质来源复杂。

20 世纪 80 年代以来在渤海西部已开展了一些地球化学研究工作, 在探讨该区域沉积物元素分布、环境背景值和沉积分区等方面做了不少工作^[2-10]。中国科学院海洋研究所对包括渤海西部在内的渤海沉积物元素地球化学作了比较全面而深入的研究^[2], 探讨了 Al 、 Fe 、 Mn 、 P 、 U 和 CaCO_3 在不同类型沉积物中的分布和表层沉积物中的区域分布。渤海表层沉积物的 CaO 、 MnO 、 Fe_2O_3 、 CaCO_3 和有机质等多种化学成分的模糊分析表明, 大致可将渤海沉积物划分为 3 个地球化学区^[6]; 渤海湾西部表层沉积物悬移组分的元素特征及分区反映出不同季节沿岸环流方向改变, 导致了不同物源母质沉积物输运混合作用^[7]。渤海沉积物的 CaO 、 MgO 和 CaCO_3 分布趋势是西高东低, 辽东湾为低含量分布区;

磷的高含量分布于渤海西部和辽东湾西部两个不规则的带状区, 锰的高含量分布于渤海的中部和辽东湾以南的局部海区, 低含量分布于滦河口附近和辽东湾东南的局部海区^[8]。虽然近年来对渤海西部沉积物的地球化学分别作过相关报道, 但这些研究主要集中于渤海湾^[7]、少量常量元素^[8-10]和重金属元素的环境质量评价^[3,4]方面, 而对渤海西部表层沉积物地球化学特征仍然缺乏全面系统的研究。本文依据国土资源部海洋区域地质调查取得的渤海西部沉积物地球化学数据, 研究和分析了研究区的化学组分空间分布与物源关系。

1 样品采集与分析

青岛海洋地质研究所于 2011 年 7 月用箱式取样器在渤海西部海域进行了底质沉积物样品采集, 采样深度不大于 25 cm, 样品重量不小于 5 kg, 取得样品装入塑料袋, 密封保存。

本次化学组分分析选择了 44 个表层沉积物样品(图 1), 分析包括 SiO_2 、 Al_2O_3 、 TFe_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 Na_2O 、 K_2O 、 TiO_2 、 P_2O_5 、 MnO 、 Li 、 V 、 Sb 、 Nb 、 Ta 、 Zr 、有机碳(Corg)、烧失量(LOI)、总氮(TN)和总碳(TC)等 20 项。试样在 110 °C 干燥 5 h, 以便除去含量较高的吸附水, 置于干燥器中, 冷却至室温。将试样(干样)经硝酸、氢氟酸、高氯酸密闭分解, 在开放体系中蒸发除去氢氟酸, 用盐酸加热溶解盐类, 用熔片法-X 射线荧光光谱仪(XRF)测定 SiO_2 、 Al_2O_3 、 TFe_2O_3 、 CaO 、 K_2O 、 Na_2O 、 MgO 、 TiO_2 、

基金项目:国土资源部海洋区域地质调查项目(1212011220113, GZH201400205, GZH201400201, GZH20150201, DD20160137); 国家自然科学基金项目(41330964, 41406077)

作者简介:蓝先洪(1958—), 男, 研究员, 主要从事海洋地质与沉积地球化学研究, E-mail: lanxh@qingdaonews.com

收稿日期:2016-05-16; **改回日期:**2016-07-21. 周立君编辑

P₂O₅、MnO、Nb、Ta、Zr 等含量;采用原子荧光光谱法(AF)测定 Sb 微量元素;而 Li、V 等微量元素采用等离子质谱法(ICP-MS)测定。用容量法(VOL)测定有机碳,用 CHN 元素分析仪测定 TC 和 TN。化学组分分析分别进行了若干样品的重复分析与标样分析,分析组分的相对误差小于 5%。化学组分测试由国土资源部海洋地质实验测试中心完成。

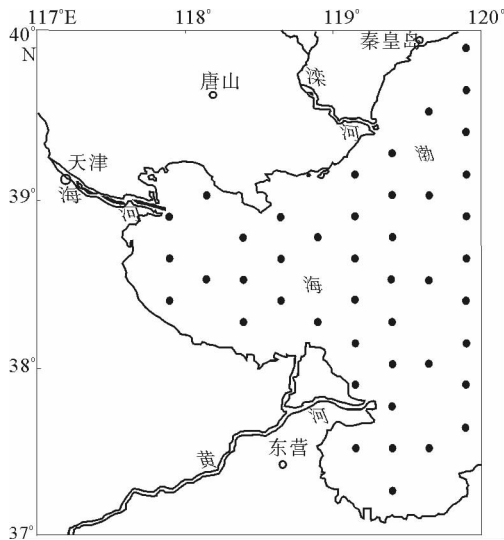


图 1 渤海西部取样站位分布
Fig. 1 Location of sampling stations in the western Bohai Sea

粒度分析预处理采用 10% 的 H₂O₂ 去除有机质,处理后的样品用英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer 2000 型激光粒度仪测定,仪器测量范围 0.02~2 000 μm,粒级分辨率为 0.01 Φ,重复测量的相对误差小于 2%。对 84 个表层沉积物样品进行了粒度分析,分析结果间隔为 1/4 Φ。粒度分析测试由国土资源部海洋地质实验测试中心完成。

2 结果与讨论

2.1 化学组分含量与分布

渤海西部表层沉积物 20 种化学组分含量统计结果见表 1。变异系数反映了沉积物中元素的分散程度,各化学组分变异系数为 0.09~0.41,其中变异系数较大(大于 0.20)的化学组分有 CaO、MnO、Corg、LOI、TN、TC、Li、V、Sb 和 Zr。

各种化学组分含量在研究区不同地区分布出现较大差异,空间分布总体上表现出南北变化的规律(图 2)。其中在研究区中部富集、莱州湾和滦河口

外含量较低的主要有 Al、Fe、Ti、Mg、K、Corg、Li、V、Nb、Sb 等 10 种化学组分,其分布趋势基本一致;而 Si 元素分布趋势与上述元素丰度规律相反,主要富集在研究区北部滦河口外和莱州湾,在中部含量相对较低;Na 和 Ta 研究区东部含量较高,西部含量则较低;Zr 在黄河口附近含量较高,在海河口和滦河口外海域含量则较低。Mn 和 TN 在东偏北部含量较高,在黄河口和滦河口附近则较低。Ca、TC 含量在海河口和黄河口附近含量较高,在滦河口外海域含量则较低。

表 1 渤海西部表层沉积物化学组分含量

Table 1 Chemical composition of surface sediments in the western Bohai Sea

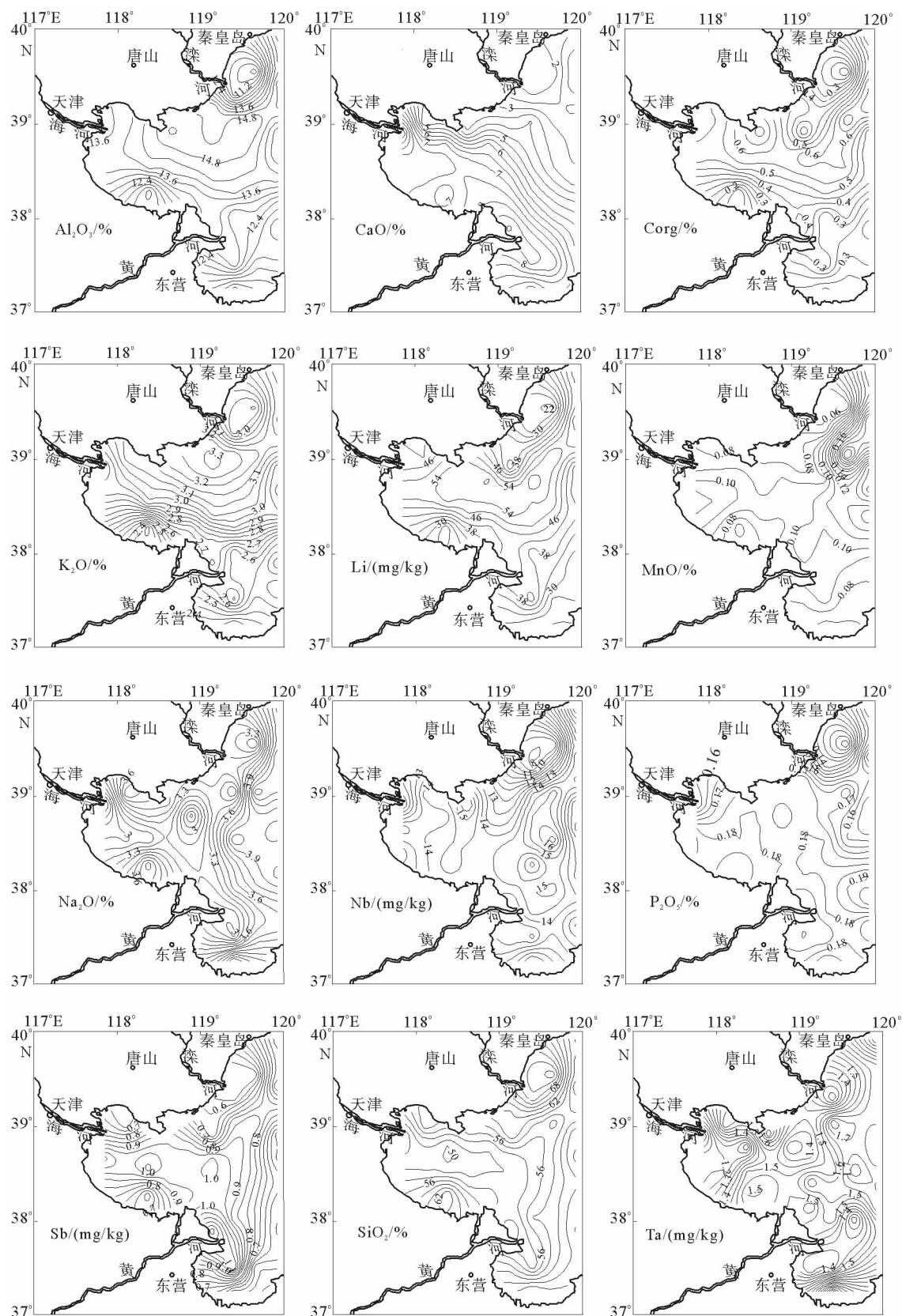
化学组分	平均值	范围	变异系数
SiO ₂	57.5	48.6~74.9	0.10
Al ₂ O ₃	13.5	9.85~15.3	0.11
CaO	5.54	1.61~10.0	0.40
MgO	2.64	1.35~3.13	0.16
K ₂ O	2.91	2.30~3.31	0.10
Na ₂ O	3.53	2.58~4.37	0.13
TiO ₂	0.68	0.34~0.76	0.11
P ₂ O ₅	0.17	0.11~0.20	0.09
MnO	0.10	0.05~0.23	0.34
TF ₂ O ₃	5.19	2.60~6.53	0.10
Corg	0.41	0.09~0.75	0.41
LOI	0.29	2.64~12.9	0.29
TN	0.06	0.02~0.10	0.37
TC	1.32	0.36~2.46	0.33
Li	43.7	20.4~60.9	0.27
V	83.4	40.6~106	0.21
Sb	0.83	0.51~1.28	0.25
Nb	13.9	8.9~16.9	0.12
Ta	1.53	1.0~2.2	0.16
Zr	211	114~425	0.30

注:SiO₂、Al₂O₃、TF₂O₃、CaO、MgO、Na₂O、K₂O、TiO₂、P₂O₅、MnO、Corg、LOI、TN、TC 等化学组分含量单位为%;Li、V、Sb、Nb、Ta 和 Zr 等微量元素含量单位为 mg/kg。

渤海西部表层沉积物各化学组分平均含量与渤海泥质沉积物基本一致^[11],与渤海中、东部沉积物含量差距大一些(表 2);与黄河、海河和滦河沉积物

相比(表 2), SiO_2 、 Al_2O_3 、 MgO 、 K_2O 、 TiO_2 、 TFe_2O_3 、 Zr 更接近于黄河物质, MnO 含量接近于海河物质, 而 Na_2O 含量接近于滦河物质, 说明研究区

物质来源与渤海泥质区一样, 主要与黄河物质来源有关。



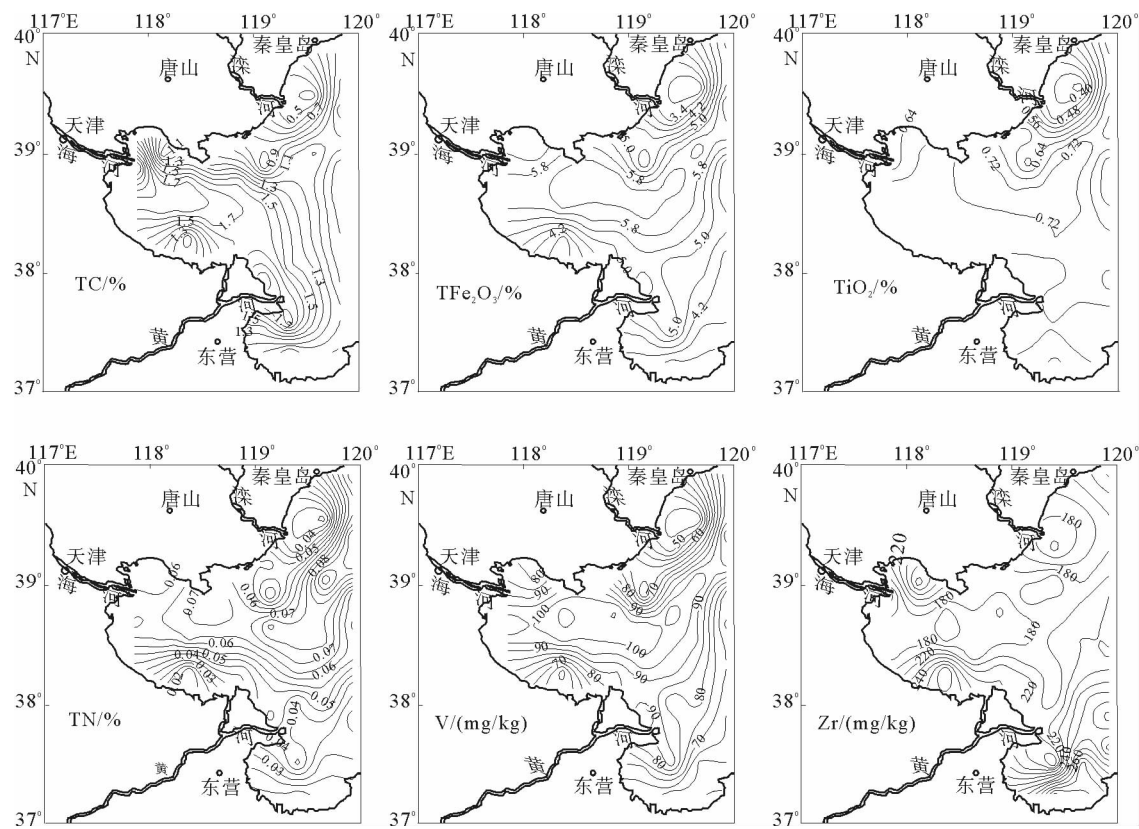


图 2 渤海西部表层沉积物化学组分含量等值图

Fig. 2 Contour maps of chemical components from surface sediments in the western Bohai Sea

表 2 渤海西部表层沉积物元素含量对比

Table 2 Correlation element contents from surface sediments in the western Bohai Sea

元素	本研究区	渤海中东部 ^[5]	渤海泥 ^[11]	中国浅海 ^[11]	黄河 ^[11,12]	海河 ^[12,13]	滦河 ^[12,14]
SiO ₂	57.5	67.7	56.0	63.8	53.5	57.7	74.9
Al ₂ O ₃	13.5	11.5	14.2	11.1	12.5	11.6	9.10
CaO	5.54	3.29	4.60	5.29	7.50	6.46	2.52
MgO	2.64	1.49	2.49	1.84	2.60	1.91	0.80
K ₂ O	2.91	2.72	2.90	2.32	2.61	2.19	2.35
Na ₂ O	3.53	2.23	2.49	1.99	1.98	1.99	3.19
TiO ₂	0.68	0.51	0.68	0.58	0.61	0.57	0.22
P ₂ O ₅	0.17	0.11	0.11	0.09			
MnO	0.10	0.11	0.088	0.068	0.063	0.074	0.040
TFe ₂ O ₃	5.19	3.79	5.63	4.36	4.77	3.91	2.07
Corg	0.41	0.41	0.78	0.62			
Li	43.7		47	38	23		
V	83.4	67.7	91	70	66		94
Sb	0.83		0.8	0.5	0.62		
Nb	13.9		16	14	15	8.6	
Ta	1.53		1.0	0.98	1.0	0.7	
Zr	211	251	210	210	354	80	204

注:SiO₂、Al₂O₃、TFe₂O₃、CaO、MgO、Na₂O、K₂O、TiO₂、P₂O₅、MnO、Corg 等常量元素含量单位为%;Li、V、Sb、Nb、Ta 和 Zr 等微量元素含量单位为 mg/kg。

2.2 化学组分 R-型因子分析与相关分析

为解释渤海西部表层沉积物中化学组分的物质来源和控制分布的主要因素^[15],采用 SPSS17 软件进行了化学组分和沉积物类型的 R-型因子分析与相关性分析。R-型因子分析采用方差极大旋转法,对渤海西部表层沉积物中的 20 种化学组分和 3 种粒度组成进行了分析。结果表明,前 3 个因子获得了原始数据全部信息的 88.08%(表 3),表明分析结果较为理想,代表了研究区样品的数据变化。

表 3 渤海西部表层沉积物化学组分与沉积物类型 R-型主因子负荷矩阵

Table 3 R-mode rotated factor matrices of chemical components and sediment types of surface sediment in the western Bohai Sea

元素	因子 1	因子 2	因子 3
SiO ₂	-0.47	-0.84	-0.21
Al ₂ O ₃	0.91	0.20	0.10
CaO	-0.38	0.90	0.09
MgO	0.61	0.73	0.21
K ₂ O	0.90	-0.18	-0.21
Na ₂ O	0.16	-0.71	0.56
TiO ₂	0.33	0.38	0.81
P ₂ O ₅	-0.13	0.36	0.76
MnO	0.68	-0.12	0.36
TFe ₂ O ₃	0.83	0.50	0.22
Corg	0.96	0.11	0.13
LOI	0.34	0.91	0.11
TN	0.97	0.04	0.13
TC	0.14	0.96	0.07
Li	0.90	0.37	0.19
V	0.74	0.60	0.27
Sb	0.52	0.69	0.15
Nb	0.29	0.11	0.88
Ta	0.12	-0.58	0.58
Zr	-0.62	-0.28	0.63
砂	-0.56	-0.67	-0.38
粉砂	0.36	0.66	0.53
黏土	0.77	0.53	0.01
方差贡献/%	38.34	32.53	17.21
累积方差贡献/%	38.34	70.87	88.08

因子分析结果表明,20 种化学组分和 3 种粒度组分包含了 3 个因子。因子 1 组合中 Al、K、Fe、

Corg、TN、Li、V 和黏土具有较高的正载荷,Mg、Mn 具有中等正载荷,而 Zr 和砂具有中等负载荷。因子 1 方差贡献占总方差贡献的 38.34%,是影响研究区沉积物化学组分变化的主要地质因素之一。各组分的相关性分析表明(表 4),Al、Mg、Fe、TN、Li 和 V 等与黏土呈明显正相关关系(相关系数在 0.76~0.90 之间),反映了这些组分主要赋存于沉积物颗粒较细的组分中。因子 1 化学组分组合高值区主要分布在研究区西部、中部和东南部;研究区西部渤海湾沉积物主要来源于黄河和海河入海物质^[6-8],中部和东南部沉积物主要来源于黄河源的细颗粒物^[2,12],因此,此类化学组分组合反映了陆源细粒物质的输入。因子 1 的载体代表了陆源碎屑组物质的向海搬运和沉积,体现了现代水动力条件和机械分异作用^[2,10]。

因子 2 组合中 Ca、Mg、LOI、TC 具有较高的正载荷,Sb、V、粉砂和黏土具有中等正载荷;而 Si、Na 具有较高的负载荷,Ta 和砂具有中等负载荷;因子 2 方差贡献占总方差贡献的 32.53%,也是影响研究区沉积物化学组分变化的较重要地质因素之一。表 4 相关分析表明,Mg、LOI、TC、Sb、V 等与粉砂呈较强正相关关系(相关系数在 0.69~0.79 之间),与黏土呈较明显正相关关系(相关系数在 0.60~0.89 之间),反应了这些组分主要赋存于粉砂级较细颗粒的组分中。Ca、Na 和 Ta 含量与沉积物类型间相关性不明显,说明其富集与沉积物颗粒关系不大。Ca 含量高值区分布在研究区南部黄河口外海域,其含量由黄河口沿岸向东北逐渐降低,CaO 含量等值线基本与黄河口海岸线平行,渤海沉积物中的 CaO 主要来源于黄河^[8],其分布特征反映出黄河入海物质的影响^[8,16]。TC 含量高值区主要分布在海河口和黄河口外海域,其含量由海河口向东和黄河口沿岸向东北逐渐降低,TC 含量等值线基本与海河口、黄河口海岸线平行,其分布特征反映出海河或黄河入海物质对研究区的影响。因此,因子 2 指示了黄河源或海河源入海物质的影响^[10,12,16],而黄河物质影响是控制 Ca 含量分布的主要因素^[12,16]。

因子 3 组合中 Ti、P、Nb 具有较高的正载荷,Zr、Ta、Na 和粉砂具有中等正载荷,其方差贡献占总方差贡献的 17.21%。相关分析表明(表 4),Ti、P、Nb 等与粉砂呈较明显正相关关系(相关系数在 0.55~0.79 之间),而 Na、Ta 和 Zr 与粉砂、砂不具相关性,与黏土呈弱的负相关,反应了这些组分有部分赋存于粉砂级较粗的沉积物颗粒的组分中。TiO₂ 含量高值区主要分布在研究区南部黄河口外

表 4 渤海西部表层沉积物化学组分及沉积物类型相关关系

Table 4 Correlation coefficients between chemical components and sediment type in surface sediment from the western Bohai Sea

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	TFe ₂ O ₃	Corg	LOI	TN	TC	Li	V	Sb	Nb	Ta	Zr	砂	粉砂	黏土
SiO ₂	1.00																						
Al ₂ O ₃	-0.64 **	1.00																					
CaO	-0.62 **	-0.16	1.00																				
MgO	-0.96 **	0.80 **	0.45 **	1.00																			
K ₂ O	-0.25	0.85 **	-0.51 **	0.44 **	1.00																		
Na ₂ O	0.39 **	0.00	-0.64 **	-0.33 *	0.08	1.00																	
TiO ₂	-0.64 **	0.51 **	0.26	0.67 **	0.08	0.20	1.00																
P ₂ O ₅	-0.39 **	0.13	0.40 **	0.41 **	-0.23	0.11	0.77 **	1.00															
MnO	-0.30 *	0.55 **	-0.29	0.37 *	0.44 **	0.48 **	0.41 **	0.10	1.00														
TFe ₂ O ₃	-0.86 **	0.89 **	0.14	0.92 **	0.63 **	-0.12	0.66 **	0.25	0.54 **	1.00													
Corg	-0.59 **	0.92 **	-0.25	0.70 **	0.82 **	0.15	0.48 **	0.02	0.64 **	0.89 **	1.00												
LOI	-0.97 **	0.46 **	0.73 **	0.87 **	0.09	-0.49 **	0.52 **	0.30 *	0.20	0.75 **	0.45 **	1.00											
TN	-0.53 **	0.88 **	-0.31 *	0.63 **	0.82 **	0.23	0.43 **	-0.04	0.74 **	0.85 **	0.97 **	0.40 **	1.00										
TC	-0.91 **	0.29	0.85 **	0.78 **	-0.08	-0.58 **	0.45 **	0.31 *	0.06	0.60 **	0.26	0.97 **	0.21	1.00									
Li	-0.78 **	0.89 **	0.01	0.85 **	0.70 **	-0.02	0.60 **	0.14	0.58 **	0.98 **	0.93 **	0.67 **	0.91 **	0.49 **	1.00								
V	-0.90 **	0.79 **	0.27	0.92 **	0.50 **	-0.16	0.69 **	0.31 *	0.49 **	0.98 **	0.82 **	0.83 **	0.78 **	0.69 **	0.96 **	1.00							
Sb	-0.85 **	0.57 **	0.44 **	0.83 **	0.29	-0.33 *	0.47 **	0.23	0.35 *	0.80 **	0.56 **	0.83 **	0.53 **	0.74 **	0.76 **	0.84 **	1.00						
Nb	-0.41 **	0.37 *	0.06	0.42 **	0.07	0.42 **	0.79 **	0.59 **	0.42 **	0.49 **	0.39 **	0.30 *	0.38 *	0.21	0.48 **	0.53 **	0.41 **	1.00					
Ta	0.29	0.04	-0.48 **	-0.24	0.10	0.66 **	0.23	0.04	0.27	-0.07	0.09	-0.40 **	0.13	-0.46 **	0.01	-0.10	-0.14	0.53 **	1.00				
Zr	0.37 *	-0.52 **	0.06	-0.44 **	-0.58 **	0.42 **	0.20	0.42 **	-0.21	-0.50 **	-0.52 **	-0.38 *	-0.51 **	-0.28	-0.53 **	-0.44 **	-0.47 **	0.37 *	0.45 **	1.00			
砂	0.87 **	-0.65 **	-0.39 **	-0.87 **	-0.26	0.18	-0.74 **	-0.42 **	-0.46 **	-0.86 **	-0.64 **	-0.82 **	-0.61 **	-0.72 **	-0.82 **	-0.91 **	-0.81 **	-0.56 **	0.11	0.34 *	1.00		
粉砂	-0.79 **	0.47 **	0.46	0.77 **	0.04	-0.09	0.79 **	0.55 **	0.41 **	0.72 **	0.46 **	0.75 **	0.44 **	0.69 **	0.66 **	0.79 **	0.71 **	0.60 **	-0.06	-0.16	-0.95 **	1.00	
黏土	-0.79 **	0.80 **	0.17	0.83 **	0.61 **	-0.29	0.45 **	0.08	0.43 **	0.90 **	0.79 **	0.73 **	0.76 **	0.60 **	0.88 **	0.89 **	0.77 **	0.33 *	-0.18	-0.58 **	-0.83 **	0.61 **	1.00

注:使用 PASS 统计软件分析; * * 代表双侧检验在 0.01 水平上显著相关, * 代表在 0.05 水平上显著相关。

海域和中部,其分布特征反映沉积物以黄河来源为主^[8,16]。 P_2O_5 含量高值区主要分布在研究区南部和东南部,磷是典型的非金属元素,在自然界呈 $(PO_4)^{3-}$ 形式存在,最常见的矿物是磷灰石;渤海地区碎屑磷灰石的含量是各种形态之中最高的,约占 40%~86%,而自生磷灰石和 Ca 结合 P 占 4.2%~15.3%^[17]。Zr 含量高值区分布在研究区南部黄河口外海域,含量由黄河口沿岸向北和东南逐渐降低,其分布特征反映出黄河物质的影响^[11]。Nb、Ta 和 Na 含量高值区分布在研究区东部,相当于刘彬昌等^[6]划分的渤海中部地球化学Ⅲ区的南部区域,是由黄河和海河携带细粒物质随海流和潮流向远处扩散形成的沉积^[6]。该区域黄河物质影响较强烈、而滦河物质影响微弱^[12]。因此,陆源岩石风化后的碎屑和重矿物在渤海湾环流和黄河口外北—北东向海流水动力条件下的沉积作用以及粒度控制效应、自生沉积作用共同控制着该组合元素的分布。

2.3 地球化学分区

选取 44 个样品测试的 20 种化学组分 SiO_2 、 Al_2O_3 、 TFe_2O_3 、CaO、MgO、 Na_2O 、 K_2O 、 TiO_2 、 P_2O_5 、MnO、Corg、LOI、TN、TC、Li、V、Sb、Nb、Ta 和 Zr,对研究区样品进行 Q-型聚类分析。使用 SPSS17 软件分析,中间距离法(Median clustering)进行聚类,采用 Euclidean 距离平方(Squared Euclidean distance)判别距离。

渤海西部表层沉积物化学组分样品的 Q-型聚类分析结果大致可分为 3 类:第 I 类样品共有 18 个,主要分布于研究区南部和西部海域,为地球化学 I 区(图 3),该区水动力条件弱,沉积物较细,多为粉砂和黏土质粉砂;第 II 类样品共有 22 个,位于研究区中北部和中部海域,为地球化学 II 区(图 3),该区水动力条件较弱,属于较细的泥质沉积;第 III 类样品共有 4 个,位于研究区东北部滦河口海域,为地球化学 III 区,该区水动力条件较强,属于较粗的砂质沉积。Q-型聚类分析结果与前人给出的分析结果稍有差别,但主要的地球化学分区相似^[8]。

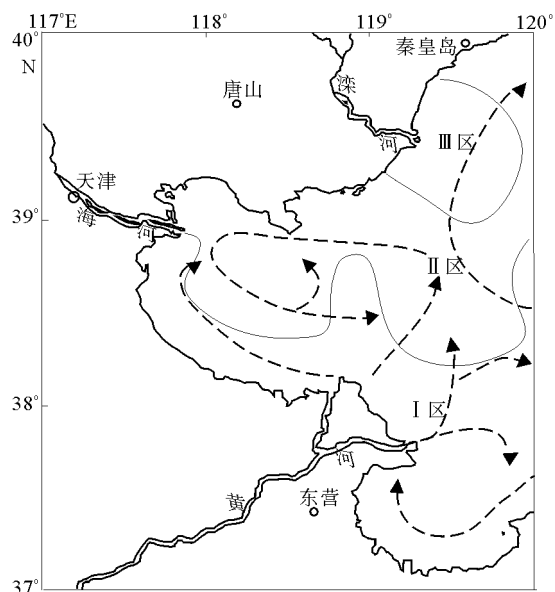


图 3 研究区地球化学分区及海区流系示意图
(图中细实线表示地球化学区界,虚线为渤海环流(据文献[18]))

Fig. 3 Geochemical subareas and ocean current patterns in the study area

3 个地球化学分区具有明显的不同化学组分含量(表 5),位于南部和西部的地球化学 I 区化学组分 CaO、 P_2O_5 、TC、Zr 等较 II 区和 III 区含量高,中北部及中部地球化学 II 区 Al_2O_3 、MgO、 K_2O 、 TiO_2 、 TFe_2O_3 、Corg、LOI、TN、Li、V、Sb、Nb、Ta 等较 I 区和 III 区含量高;地球化学 III 区 SiO_2 、 Na_2O 、MnO 等较 I 区和 II 区元素含量高,其他化学组分含量则较 I 区和 II 区含量低。3 个区平均含量差异较大的化学组分包括 SiO_2 、CaO、MgO、 Na_2O 、 TiO_2 、MnO、Corg、Li、V、Zr 等。

2.4 物源分析

尽管研究区渤海西岸入海河流较多,但除了黄河、滦河以及海河外,向海输运的泥沙量均比较有限。黄河泥沙主要来源于黄土高原,由于黄土高原独特的自然地理条件,Ca、K 含量高,使得黄河泥沙中这些元素也较高^[2,12,16]。黄河入海泥沙多为细颗粒泥沙,统计表明,94.2%的泥沙粒径小于 0.063 mm,

表 5 渤海西部地球化学分区化学组分平均含量

Table 5 Mean chemical components in geochemical provinces in the western Bohai Sea

	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	TiO_2	P_2O_5	MnO	TFe_2O_3	Corg	LOI	TN	TC	Li	V	Sb	Nb	Ta	Zr
I 区	57.9	12.6	7.00	2.55	2.65	3.44	0.68	0.18	0.089	4.66	0.37	8.18	0.04	1.43	36.6	76.8	0.79	13.8	1.47	245
II 区	55.9	14.4	4.93	2.80	3.09	3.60	0.70	0.17	0.11	5.71	0.55	8.32	0.07	1.32	50.0	90.6	0.87	14.4	1.57	194
III 区	64.0	12.8	2.48	2.21	3.07	3.81	0.56	0.15	0.14	4.68	0.46	5.84	0.06	0.84	41.2	72.8	0.75	12.1	1.53	152

注: SiO_2 、 Al_2O_3 、 TFe_2O_3 、CaO、MgO、 Na_2O 、 K_2O 、 TiO_2 、 P_2O_5 、MnO、Corg、LOI、TN、TC 等化学组分含量单位为%;Li、V、Sb、Nb、Ta 和 Zr 等微量元素含量单位为 mg/kg

是渤海湾海底沉积的重要物质来源^[2]。滦河年平均径流量为 45.5 亿 m^3 , 每年入海泥沙约 1 900 万 t, 平均含沙量仅次于黄河而高于长江^[19]; 滦河口流域地质基础特异, 河床坡度大, 经滦河带入渤海湾北部的沉积物泥砂中 65% 为 1~3 Φ 的中砂和细砂^[20]。与黄河相比, 滦河对前三三角洲和邻近的渤海浅海供应的沉积物不多, 入海泥沙大多沉积在滦河口一带沿岸区域^[21,22]。海河多年平均入海径流量为 60.2 亿 m^3 , 多年平均入海沙量为 426 万 t, 径流输入的泥沙颗粒较细, 中值粒径大都为 5~20 μm ^[23-25]。

黄河、滦河和海河 3 条河流现代表层沉积物研究表明(表 2), 黄河沉积物 Mg、K、Ca、Al、Fe、Ti、Zr 等元素和滦河沉积物的 Na、Si 和 K 元素含量较高, 而海河沉积物则以 Mn 元素含量高为特征^[11-14]。黄河 Ca、Al、K、Zr 等元素和滦河 Si、Na 等元素含量明显不同于海河沉积物^[11,12,16]。为了消除沉积物粒度变化对元素含量的影响, 采用经过 Al 标准化处理后的比值来研究沉积物受周边可能的物源影响^[26,27]。依据黄河、滦河和海河沉积物中元素特征(表 2)^[11-14], 本文采用 $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 与 $\text{Zr}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 的比值用于区分黄河、滦河和海河沉积物。 $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 与 $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 离散图显示(图 4a), 渤海南部和西部表层沉积物地球化学 I 区大部分样品落于现代黄河样品的周围, 表明该区沉积物主要来源于黄河物质; 地球化学 II 区大部分样品落于现代黄河和海河样品偏南部区域, 说明该区域沉积物可能来源于黄河和海河; 地球化学 III 区样品落于偏于现代滦河样品左右两侧, 靠近现代滦河样品。

元素 $\text{Zr}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值(图 4b)同样可以清晰地区分黄河、滦河和海河物质对渤海西部表层沉积物的影响。地球化学 I 区样品投点绝大部分为接近黄河样品区域, 地球化学 II 区样品位于黄河和海河样品之间, 靠近海河样品, 地球化学 III 区

样品靠近滦河样品, 同样表明沉积物物源主要与黄河和海河沉积物较为接近, 极少数样品受到滦河物质影响。

陆源沉积物对研究区有较大影响主要是黄河、海河和滦河所携带的物质。渤海西部表层沉积物化学组分的分布特征与渤海西部沉积物物质来源和渤海西部的环流密切相关, 其地球化学分区显示了环流体系对黄河、海河和滦河来源物质的搬运与扩散作用^[18]。

渤海西部环流为渤海湾北部反时针向与南部顺时针向的双环结构环流和黄河口东北向、西北向、东南向顺时针向环流以及莱州湾南部、北部顺时针向环流和东北部顺时针向辽东湾的西部环流(图 3)^[18,28]。黄河物质在东北向、西北向和东南向环流顺时针作用下, 其运移的物质主要影响研究区的南部及东南部、东部和部分中部区域; 结果形成以黄河沉积物为主的地球化学 I 区, 化学组分以 CaO 、 TiO_2 、 P_2O_5 、TC、Nb、Zr 含量较高, K_2O 、 MnO 、Corg、TN、Li 含量较低为特征(表 5)。渤海沉积物矿物学研究表明, 渤海湾南部、莱州湾以及从莱州湾向北到渤海中央的区域受黄河入海物质的控制^[2,20]。渤海泥质区地球化学研究表明西南部与中部泥黄河物质影响较强, 主要在潮流流的作用下搬运后沉积下来^[12]。

黄河物质在渤海湾顺时针环流的作用下输运到海河口, 在海河口附近向东南转为反时针方向输运, 最终到达研究区中部和东部地区, 而海河沉积物入海后在双环结构环流海河口会合后的作用下主要向河口北侧及中部区域扩散(图 3)^[18,28]。结果形成以黄河和海河沉积物为主的地球化学 II 区, 化学组分以 Al_2O_3 、 MgO 、 K_2O 、 TiO_2 、 TFe_2O_3 、Corg、TC、Li、V、Sb、Nb、Ta 含量较高, SiO_2 含量较低为特征(表 5)。渤海湾北部底质沉积物黏土矿物组合研究同样

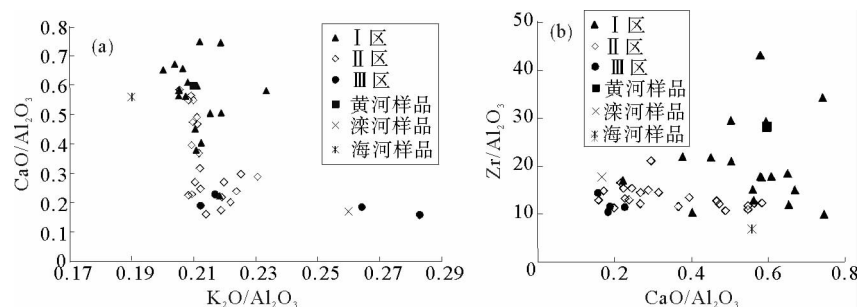


图 4 元素 $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 与 $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 离散图(a)和元素 $\text{Zr}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 与 $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 离散图(b)

Fig. 4 Scatter diagrams showing $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 与 $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ distribution and $\text{Zr}/\text{Al}_2\text{O}_3$ and $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ distribution

认为其中部和东部为黄河-海河物源区^[29]。而滦河沉积物在研究区东部由辽东湾西部环流作用下向北运移,受其影响范围为研究区的东北部地区,形成以滦河沉积物为主的地球化学Ⅲ区,与黄河和海河沉积物相比,滦河物质的颗粒粒径较大, SiO_2 、 Na_2O 、 MnO 等元素含量较高,而 CaO 、 MgO 、 TiO_2 、 TC 、 Sb 和 Zr 等含量较低(表5)。渤海泥质区地球化学研究表明北部泥滦河物质作用相对较强^[12]。

3 结论

(1) 渤海西部表层沉积物44个样品的20种化学组分相关分析表明, Al_2O_3 、 MgO 、 TFe_2O_3 、 K_2O 、 Corg 、 TN 、 Li 、 V 和 Sb 等组分与细粒沉积物呈正相关, SiO_2 组分与粗粒沉积物呈正相关, Na_2O 、 CaO 和 Ta 组分与沉积物粒度无明显正或负的相关性。

(2) 研究区R-型因子分析得出3种主要组合类型,一是以 Li 为代表,与黏土组分关系密切,反映陆源细粒物质输入;二是以 CaO 为代表,指示黄河物质影响;三是以 TC 为代表,指示黄河或海河物质影响。

(3) 运用 $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 与 $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Zr}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 与 $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 离散图分析了渤海西部物质来源,结果表明沉积物主要来源于黄河和海河,东北部沉积物受到了滦河物质的影响。

(4) 依据Q-型聚类分析特征,将研究区沉积物划分为3个不同的地球化学分区,地球化学Ⅰ区以黄河沉积物为主,地球化学Ⅱ区以黄河和海河沉积物为主,地球化学Ⅲ区以滦河沉积物为主。

参考文献(References)

- [1] 陈义兰, 吴永亨, 刘晓瑜, 等. 渤海海底地形特征[J]. 海洋科学进展, 2013, 31(1): 75-82. [CHEN Yilan, WU Yongting, LIU Xiaoyu, et al. Features of seafloor topography in the Bohai Sea[J]. Advances in Marine Science, 2013, 31(1): 75-82.]
- [2] 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. [Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences. Geology of the Bohai Sea[M]. Beijing: Science Press, 1985.]
- [3] 陈江麟, 刘文新, 刘书臻, 等. 渤海表层沉积物重金属污染评价[J]. 海洋科学, 2004, 28(12): 16-21. [CHEN Jianglin, LIU Wenxin, LIU Shuzhen, et al. An evaluation on heavy metal contamination in the surface sediments in Bohai Sea[J]. Marine Sciences, 2004, 28(12): 16-21.]
- [4] 李淑媛, 刘国贤, 苗丰民. 渤海沉积物中重金属分布及环境背景值[J]. 中国环境科学, 1994, 14(5): 370-376. [LI Shuyuan, LIU Guoxian, MIAO Fengmin. The distribution and environmental background values of the heavy metals in sediment of the Bohai Sea[J]. China Environmental Science, 1994, 14(5): 370-376.]
- [5] 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. [LI Shuyuan, MIAO Fengmin, ZHAO Quanmin, et al. Geochemistry of surface sediments off southwest Liaodong Peninsula and in Mid-Bohai Sea[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2010, 30(4): 123-130.]
- [6] 刘彬昌, 卢中发, 张守法. 渤海沉积物地球化学分区的模糊分析[J]. 海洋与湖沼, 1992, 23(5): 561-565. [LIU Binchang, LU Zhongfa, ZHANG Shoufa. Fuzzy analysis of geochemical divisions in sediments collected from the Bohai Sea[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1992, 23(5): 561-565.]
- [7] 田立柱, 裴艳东, 商志文, 等. 渤海湾西部表层沉积物悬移组分元素特征及物源意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2010, 30(1): 9-15. [TIAN Lizhu, PEI Yandong, SHANG Zhiwei, et al. Elements characteristics of the suspended component in surface sediments from the west Bohai Bay and the provenance implication[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2010, 30(1): 9-15.]
- [8] 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): 9-18. [LÜ Chengong, CHEN Zhen. Geochemical analysis of the surface sediments of the Bohai sea[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 1993, 23(3): 9-18.]
- [9] 李全生, 马锡年, 沈万仁, 等. 渤海湾表层沉积物中几种化学成分的研究[J]. 海洋科学, 1984, 8(5): 22-27. [LI Quansheng, MA Xinian, SHEN Wanren, et al. Chemical compositions of surface sediment of Bohai Bay[J]. Marine Sciences, 1984, 8(5): 22-27.]
- [10] 郭津年, 李健博, 吴景阳, 等. 渤海沉积物中的Fe, Al, Mn的分布及某些地球化学特征的研究[J]. 海洋科学, 1983, 7(4): 22-25. [GUO Jinnian, LI Jianbo, WU Jingyang, et al. The distribution of Fe, Al and Mn in sediments of Bohai Sea and their certain geochemical characteristics[J]. Marine Sciences, 1983, 7(4): 22-25.]
- [11] 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.]
- [12] 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.]
- [13] 曹红英, 梁涛, 王立军, 等. 近海潮间带水体及沉积物中重金属的含量及分布特征[J]. 环境科学, 2006, 27(1): 126-131. [CAO Hongying, LIANG Tao, WANG Lijun, et al. Contents and distribution characteristics of heavy metals in

- water and sediment of intertidalite[J]. *Environmental Science*, 2006, 27(1): 126-131.]
- [14] 周福根. 滦河口区沉积物中元素的分布和环境的关系[J]. *海洋通报*, 1983, 2(2): 60-70. [ZHOU Fugeng. The relations between element distribution in sediments and environments in Luanhe Estuary[J]. *Marine Science Bulletin*, 1983, 2(2): 60-70.]
- [15] 蓝先洪, 密蓓蓓, 李日辉, 等. 渤海东部和黄海北部沉积物中重金属分布特征[J]. *中国环境科学*, 2014, 34(10): 2660-2668. [LAN Xianhong, MI Beibei, LI Rihui, et al. Distribution of heavy metals in surface sediments in the eastern Bohai Sea and the northern Yellow Sea[J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(10): 2660-2668.]
- [16] 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.]
- [17] 董方, 刘素美, 张经. 北黄海与渤海沉积物中磷形态的分布特征[J]. *海洋环境科学*, 2001, 20(2): 18-23. [DONG Fang, LIU Sumei, ZHANG Jing. Phosphorus speciation in the sediments of the Bohai Sea and North Yellow Sea[J]. *Marine Environmental Science*, 2001, 20(2): 18-23.]
- [18] 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.]
- [19] 施建堂. 渤海湾西部的现代沉积[J]. *海洋通报*, 1987, 6(1): 22-26. [SHI Jiantang. Modern sedimentation in the western Bohai Bay[J]. *Marine Science Bulletin*, 1987, 6(1): 22-26.]
- [20] 周永芝, 刘娟. 莱州湾、渤海湾及渤海中央盆地沉积物岩芯地球化学的初步研究[J]. *黄渤海海洋*, 1991, 9(2): 54-59. [ZHOU Yongzhi, LIU Juan. A preliminary study on geochemistry of sediment cores from Laizhou Bay, Bohai Bay and the central Basin of Bohai Sea[J]. *Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas*, 1991, 9(2): 54-59.]
- [21] 陈丽蓉, 栾作峰, 郑铁民, 等. 渤海沉积物中的矿物组合及其分布特征的研究[J]. *海洋与湖沼*, 1980, 11(1): 46-64. [CHEN Lirong, LUAN Zuofeng, ZHENG Tiemin, et al. Mineral assemblages and their distribution patterns in the sediments of the gulf of Bohai Sea[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1980, 11(1): 46-64.]
- [22] 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.]
- [23] 邢焕政. 海河口岸线演变及泥沙来源分析[J]. *海河水利*, 2003(2): 28-30. [XING Huanzheng. Haihe River estuarial coastline evolution and sediment source analysis[J]. *Haihe Water Resources*, 2003(2): 28-30.]
- [24] 秦蕴珊, 廖先贵. 渤海湾海底沉积作用的初步探讨[J]. *海洋与湖沼*, 1962, 4(3-4): 199-207. [QIN Yunshan, LIAO Xian-gui. A preliminary probe of sedimentation in Bohai Bay[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1962, 4(3-4): 199-207.]
- [25] 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.]
- [26] Kremling K, Streu P. Saharan dust influenced trace element fluxes in deep North Atlantic Subtropical waters[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 1993, 40(6): 1155-1168.
- [27] 蓝先洪. 珠江三角洲第四纪沉积物 $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 值及其地质意义[J]. *台湾海峡*, 1992, 11(3): 227-232. [LAN Xianhong. $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratio in Quaternary sediments of Zhujiang River delta and its geological significance[J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 1992, 11(3): 227-232.]
- [28] Hainbucher D, Hao W, Pohlmann T, et al. Variability of the Bohai Sea circulation based on model calculations[J]. *Journal of Marine System*, 2004, 44(3-4): 153-174.
- [29] 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 Junqing, 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.]

GEOCHEMICAL RECORDS OF SURFACE SEDIMENTS IN THE WESTERN BOHAI SEA

LAN Xianhong^{1,2}, LI Rihui^{1,2}, WANG Zhongbo^{1,2}, CHEN Xiaohui^{1,2}, GU Zhaofeng^{1,2}, XU Xiaoda^{1,2}

(1. Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resources and Environmental Geology, Ministry of Land and Resources,

Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071;

2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071)

Abstract: Based on the concentrations of chemical components SiO_2 , Al_2O_3 , TFe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O , TiO_2 , P_2O_5 , MnO , Li , V , Sb , Nb , Ta , Zr , Corg , LOI , TN and TC in surface sediment samples taken from 44 stations in the west part of the Bohai Sea, the distribution pattern and material sources of the chemical components are studied. The chemical components of Al_2O_3 , MgO , TFe_2O_3 , K_2O , Corg , TN , Li , V and Sb are positively correlated with the fine-grained sediments, while SiO_2 is positively correlated with coarse-grained sediments; there are no significant positive or negative correlations between Na_2O , CaO and Ta and grain sizes of sediments. R-mode cluster analysis indicates three types of combinations that are represented by Li , CaO and TC , respectively, reflecting the input of terrigenous fine-grained material, the impact of the Yellow River, and the substances from both Yellow and Haihe Rivers, respectively. Combined with scatter diagrams of $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ vs. $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{Zr}/\text{Al}_2\text{O}_3$ vs. $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$, the Q-mode cluster analysis is drawn to reveal the source of sediments in the west part of the Bohai Sea. The results suggest that the sediments of the study area mainly come from the Yellow River and Haihe River, and the sediments in the northeast part of the study area are apparently influenced by the materials from the Luanhe River.

Key words: chemical components; geochemistry; sediments; provenance; western Bohai Sea