

黄河沉积物向渤海湾扩散的 沉积地球化学示踪^{*}

张爱滨^{1,2}, 刘 明^{1,2,3}, 廖永杰^{1,2,4}, 张艳丽^{1,2}, 范德江^{1,2}

- (1. 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 山东 青岛 266100;
2. 中国海洋大学 海洋地球科学学院, 山东 青岛 266100;
3. 海洋沉积与环境地质国家海洋局重点实验室, 山东 青岛 266061;
4. 国家海洋局海域管理技术重点实验室, 辽宁 大连 116083)

摘 要:使用 ICP-AES 和 ICP-MS 对渤海中部 118°54'E 左右南北向断面的表层沉积物中 53 种常、微量及稀土元素进行了测试, 研究了其含量变化和分布特征, 并进行了物质组成分析。研究表明: 该区沉积物以 B94 站为界, 南北差异明显, 南部区域沉积物以黏土质粉砂为主, 富集 Al_2O_3 , CaO , Fe_2O_3 , MgO , MnO , P_2O_5 和 TiO 等常量元素以及绝大多数的微量元素和稀土元素等与细颗粒黏土矿物相关的元素; 北部区域沉积物以粉砂-砂为主, 富集 SiO_2 , K_2O 和 Na_2O 等常量元素以及 Zr, Ba, Sr, Sb 和 Hf 等微量元素, 稀土元素相对亏损。物源对比表明南部沉积物具有黄河来源沉积物特点, 北部沉积物具有滦河来源特点, 两者的分界大致在 38°42'N 附近。河口动力过程、渤海环流是影响该区沉积物扩散的主要因素。

关键词:黄河沉积物; 渤海湾; 扩散; 物源; 元素地球化学

中图分类号: P736.2

文献标识码: A

文章编号: 1671-6647(2015)02-0246-11

元素地球化学是沉积物物质组成的重要指标之一, 它的含量变化及分布规律可以反映沉积物的物质来源, 示踪沉积物搬运和沉积过程及污染物质的迁移和积累等诸多方面。

渤海是一个半封闭的陆架边缘海, 仅通过渤海海峡与黄海相通。许多学者对渤海海域沉积物物质来源、搬运和沉积作用做了大量研究^[1-4]。研究表明, 其沉积物主要来自周边的河流输入、外海进入和大气沉降物质, 其中河流入海物质的贡献量最大, 约占 90%, 每年由黄河、海河、滦河、蓟运河等输入的泥沙达 1.3×10^9 t, 仅黄河每年输送的物质就达 1.08×10^9 t, 对渤海物质分布起到控制作用^[1,5-7], 同时沉积物的物质组成和分布也受到了渤海环流和潮流、余流等的影响^[8-9]。大多研究认为, 渤海中部沉积物多来源于黄河等环渤海湾河流的入海物质, 黄河入海物质控制了渤海湾南部、莱州湾、渤海海峡南部以及从莱州湾向北到渤海中央的区域, 对渤海沉积作用的影响最为显著; 滦河多年平均输沙量为 2 010 Mt, 以砂质沉积物为主, 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—曹妃甸一带沿岸区域, 而对渤海沉积的影响主要限制在近岸区域^[1,4,10-11]; 海河由渤海湾西北岸边入海, 年平均入海沙量仅为 119 kt, 输入的泥沙颗粒很细, 中值粒径大都为 5~20 μm , 主要沉积在渤海湾西部近岸区域^[7,12]。但目前为止, 黄河物质向北扩散的范围尚不明确, 黄河与渤海湾北部河流(如滦河等)入海物质的各自影响范围也尚未能明确划分。本文使用 ICP-AES 和 ICP-MS 对采自渤海中部 118°54'E 左右南北向断面的表层沉积物进行了 53 种常、微量及稀土元素的分析测试, 研究了其含量变化和分布特征, 探讨了其所代表的地质意义, 试图明确黄河和滦河物

^{*} 收稿日期: 2013-12-04

资助项目:海洋沉积与环境地质国家海洋局重点实验室开放基金——渤海强烈人类活动区重金属沉积记录研究(MASEG201204); 国家海洋局海域管理技术重点实验室开放项目——围填海对周边海域沉积环境影响的沉积学评价模型研究(201203); 国家海洋局海洋公益性行业科研专项——海洋底质环境多元地球化学评价技术及其在典型区的示范应用(201105003-06)

作者简介:张爱滨(1959-), 男, 福建南靖人, 高级工程师, 硕士, 主要从事仪器分析和海洋地球化学方面研究。E-mail: a. b. zhang@tom.com
(张 骞 编辑)

质在该海域的影响范围,为进一步了解河流入海物质的扩散和沉积作用提供支持。

1 区域背景

渤海为东北—西南向的陆表海,周边基本上被陆地环绕,只有东面通过狭窄的渤海海峡与黄海相连。渤海平均水深 18 m,中央水深较大,可达 30 m,最深处见于渤海海峡老铁山水道,可达 80 m;渤海地形平缓,平均坡度仅为 $0^{\circ}0'28''$ 。渤海的地理形态划分了 3 个海湾:渤海湾、莱州湾和辽东湾。渤海湾位于秦皇岛金山嘴和老黄河口连线以西海域,为一向西凹入的弧形浅水海湾,最大深度约 25 m(在湾口中部),其面积约为 $1.5 \times 10^4 \text{ m}^2$,约占渤海面积的 20%。渤海湾的海底地形从湾顶向渤海中央倾斜,湾内水深较浅,一般均小于 20 m^[1]。

渤海的潮流以半日潮流为主,流速一般为 0.5~1.0 m/s,最强的潮流出现于老铁山水道附近,为 1.5~2.0 m/s,辽东湾次之,约为 1.0 m/s,莱州湾仅为 0.5 m/s 左右^[13]。进入渤海的高盐水在绝大多数情况下到达渤海西部近海时分成南北两支,北支高盐水沿辽东湾西岸北上,而辽东湾的低盐水则沿东岸南下,这样在渤海中部及辽东湾便形成一个顺时针向的环流。南支高盐水沿渤海北岸流入渤海湾,湾内沿岸低盐水则沿渤海湾南岸流出,湾内海流呈逆时针向回转;黄河冲淡水常扩展到渤海湾南部区域,在洪水期有时甚至全部冲淡水都涌入渤海湾南部区域,因此渤海湾的环流是北部为逆时针向、南部为顺时针向的双环结构^[9]。在像渤海这样的浅海系统中,沉积物的长期输运过程主要是靠环流的作用^[1,7,9,13-14]。

渤海湾的沉积物主要来自周边的河流入海物质、外海进入和大气沉降物质^[10],其中河流入海物质对渤海沉积物的贡献量大,约占 90%,以黄河、滦河、海河、蓟运河等为主。黄河是我国第二大河,平均每年携带大约 $1.08 \times 10^9 \text{ t}$ 泥沙进入海洋,黄河入海泥沙多为细颗粒泥沙,94.2%的泥沙粒径小于 0.063 mm,是渤海湾海底沉积的重要物质来源^[11]。黄河泥沙入海后,大部分沉积在河口三角洲和近海海域,余者则在潮流和海流等因素的影响下,扩散至较远的海区^[15]。滦河全长 1 200 km,年平均径流量为 $4.6 \times 10^9 \text{ m}^3$,多年平均输沙量为 2 010 Mt,但是沉积物以砂质为主,细粒级物质较少^[16]。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—曹妃甸一带沿岸区域,而对渤海沉积的影响主要限制在近岸区域^[11]。海河年平均径流量为 $9.8 \times 10^9 \text{ m}^3$,年平均输沙量为 $6 \times 10^6 \text{ t}$,物质颗粒相对较细。蓟运河无论就其径流量,还是输沙量,其规模远比海河小,入海物质较细,多为黏土质粉砂。渤海周围沿岸河流每年向海输入约 1.3 Gt 泥沙,但是绝大部分沉积在河口三角洲浅海海域。入海河流泥沙中细粒级部分直接或者通过底质再悬浮的方式被搬运,沉积在渤海泥质沉积区,造成渤海泥质区沉积速率相对较低,而且渤海泥质区西南部和中部受黄河物质的影响较强,北部沉积物在化学成分上与黄河入海物质有一定差异^[7]。

2 材料与分析方法

2.1 研究区与采样

研究区位于渤海中部,样品采自 $118^{\circ}54'E$ 附近自南向北的断面上,具体站位见图 1(流系改自文献[7]和文献[9])。研究区水深在 10~30 m。样品使用挖泥斗获得,采集后装入聚乙烯瓶中带回实验室待测。

2.2 分析方法

2.2.1 沉积物粒度测试

沉积物的粒度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,所用仪器为英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer 2000 型激光粒度分布测量仪。采集粒级间隔 $\Phi/4$,重复测试的相对误差 $< 2\%$ 。粒度参数的计算采用 Folk 和 Ward 的公式。

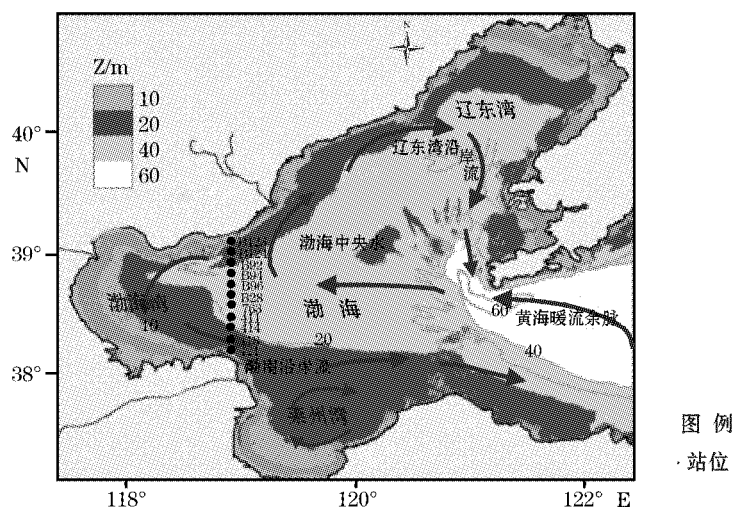


图1 研究区及采样站位图

Fig.1 The study area and locations of sampling sites

2.2.2 沉积物中元素分析

将样品置于玛瑙研钵中研磨至200目,于110℃烘干3h,转移至密封干燥器中冷却平衡后,准确称取50.00 mg(49~51)样品于聚四氟乙烯溶样内胆中,加入1.50 mL经亚沸蒸馏的高纯 HNO_3 、1.50 mL经亚沸蒸馏的高纯 HF 摇匀。将溶样内胆密封放入不锈钢外套中,旋紧外套盖后放入干燥箱,在190℃保持48 h以上,冷却后取出溶样内胆,置于电热板上蒸至湿盐状,再加入1 mL经亚沸蒸馏的 HNO_3 蒸干(以除去残余的 HF),然后加入3 mL经亚沸蒸馏的高纯 HNO_3 配制的1:1硝酸溶液,于150℃保持24 h,以保证对样品的完全提取。

以沉积物标准物质GBW07311,GBW07314制备标准溶液,来绘制标准工作曲线,同时以GBW07309作为监控样品,用Optima 4300DV电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-AES,美国PE公司制造)测定了 Al_2O_3 , CaO , TFe_2O_3 , K_2O , MgO , MnO , Na_2O , P_2O_5 , TiO_2 ,Ba,Cr,Sr,V,Zn和Zr,用7500C电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS,美国安捷伦公司生产)测定了Li,Be,Co,Ni,Cu,Ga,Ge,Rb,Nb,Mo,Cd,In,Sb,Cs,Hf,Ta,W,Pb,Bi,Th,U,Sc,La,Ce,Pr,Nd,Sm,Eu,Gd,Tb,Dy,Ho,Er,Tm,Yb,Lu和Y。所测元素的相对标准偏差(RSD)均小于10%,符合要求。

3 结 果

3.1 典型断面的沉积物类型和粒度特征

研究断面沉积物的平均粒径见表1,沉积物主要以粘土质粉砂-粉砂为主,分选较差,总体上为南部沉积物较细,北部沉积物稍粗。B94,B92,B124三站沉积物以粉砂为主,其余站位主要为黏土质粉砂。

表 1 研究区表层沉积物粒度特征

Table 1 The characteristics of sediments grain sizes in the studied area

站 位	平均粒径/ Φ	分选系数	站 位	平均粒径/ Φ	分选系数
421	6.48	2.13	B96	6.70	3.10
418	7.17	1.99	B94	5.11	2.23
414	7.65	2.17	B92	3.89	2.58
411	7.53	2.18	B124	4.29	2.58
763	7.49	2.61	B123	6.55	2.25
B28	7.46	2.99			

注:空白处无数据

3.2 典型断面沉积物元素地球化学组成

3.2.1 常量元素地球化学特征

研究断面沉积物中常量元素的质量分数及其变化见图 2。这 10 种组分约占沉积物总量的 91.37%(平均值),其中质量分数最高的是 SiO_2 ,平均为 60.46%,其次是 Al_2O_3 ,平均为 12.87%。同时,为了消除沉积物粒度变化对元素质量分数的影响,本文计算了各元素质量分数与 Al_2O_3 的比值(图 2)。

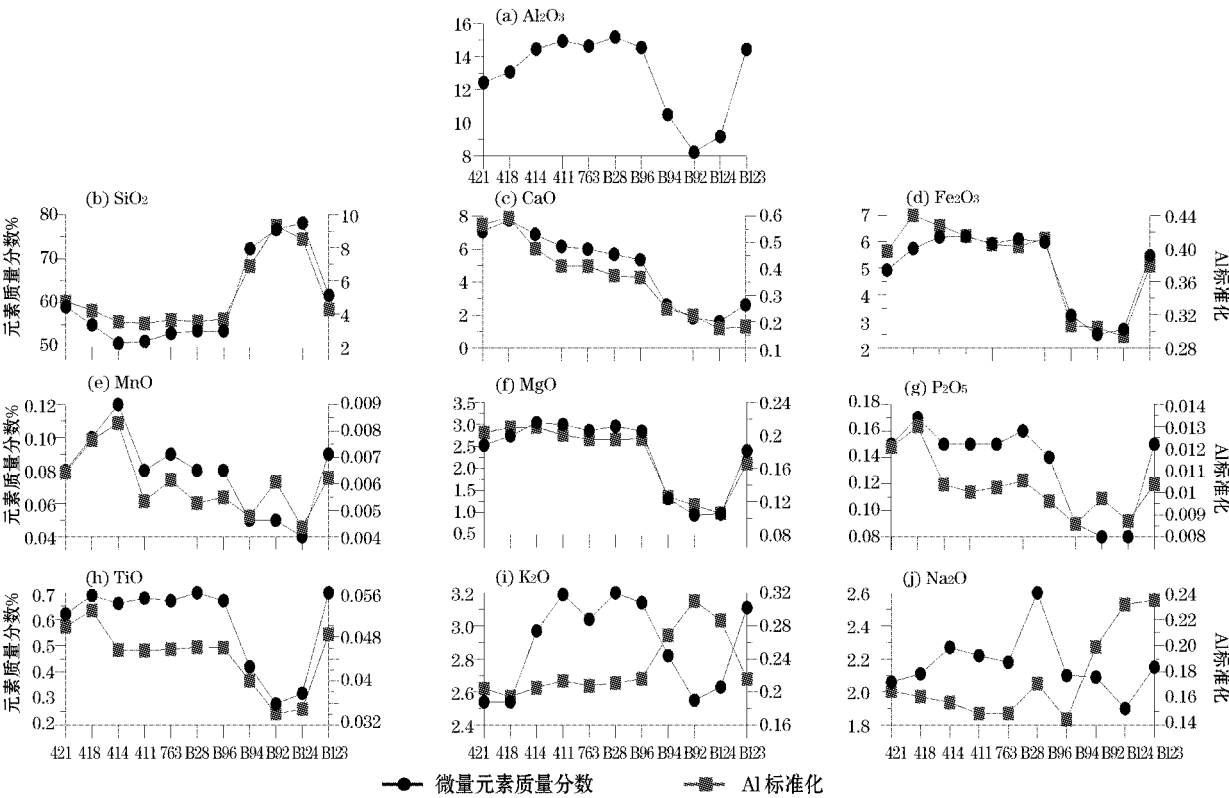


图 2 研究断面表层沉积物中常量元素质量分数及 Al 标准化变化图

Fig. 2 The contents and Al contents of major elements in the studied sections of the surface sediments

通过 Pearson 相关性分析可以看出(表 2), SiO_2 与其它常量元素均呈显著的负相关,这是由于 SiO_2 的“稀释剂”作用导致的^[17-18],该元素质量分数呈现南部较低,北部较高的趋势。 Al_2O_3 与 CaO , Fe_2O_3 , K_2O , MgO , MnO , Na_2O , P_2O_5 , TiO 的质量分数呈正相关,它们应与黏土矿物等细颗粒组分密切相关。

表 2 常量元素之间的相关性分析($n=11$)Table 2 The correlation analysis of the major elements ($n=11$)

元素名称	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO
SiO ₂	1.000	-0.940 **	-0.870 **	-0.985 **	-0.586	-0.995 **	-0.860 **	-0.513	-0.925 **	-0.940 **
Al ₂ O ₃	-0.940 **	1.000	0.681 *	0.977 **	0.773 **	0.957 **	0.784 **	0.646 *	0.893 **	0.964 **
CaO	-0.870 **	0.681 *	1.000	0.800 **	0.138	0.855 **	0.782 **	0.339	0.849 **	0.768 **
Fe ₂ O ₃	-0.985 **	0.977 **	0.800 **	1.000	0.651 *	0.992 **	0.859 **	0.565	0.943 **	0.974 **
K ₂ O	-0.586	0.773 **	0.138	0.651 *	1.000	0.594	0.346	0.660 *	0.424	0.598
MgO	-0.995 **	0.957 **	0.855 **	0.992 **	0.594	1.000	0.862 **	0.544	0.948 **	0.963 **
MnO	-0.860 **	0.784 **	0.782 **	0.859 **	0.346	0.862 **	1.000	0.352	0.864 **	0.838 **
Na ₂ O	-0.513	0.646 *	0.339	0.565	0.660 *	0.544	0.352	1.000	0.504	0.546
P ₂ O ₅	-0.925 **	0.893 **	0.849 **	0.943 **	0.424	0.948 **	0.864 **	0.504	1.000	0.969 **
TiO	-0.940 **	0.964 **	0.768 **	0.974 **	0.598	0.963 **	0.838 **	0.546	0.969 **	1.000

注: * 代表在 0.05 的显著性水平上相关性明显(双尾检验); ** 代表在 0.01 的显著性水平上相关性明显(双尾检验)

未经过 Al 标准化之前 SiO₂ 南低北高, Al₂O₃, CaO, Fe₂O₃, MgO, MnO, K₂O, P₂O₅, TiO 等质量分数具有相同的变化趋势, 都为南高北低; Na₂O 南北差异不明显。经过标准化之后, MnO, P₂O₅ 的差异消失, 其他元素南北差异突出, 特别是 K₂O, Na₂O 反而表现出南低北高的趋势, 界限位于 B94 处。B123 站位于近岸区域, 可能还受到近岸侵蚀物质的影响。

3.2.2 微量元素地球化学特征

研究断面 29 种微量元素的质量分数变化如图 3 所示, 质量分数最高的是 Ba, 平均质量分数为 537.3×10^{-6} , 质量分数最低的是 In, 平均质量分数为 0.06×10^{-6} 。同样, 为消除粒度的影响, 微量元素的质量分数也进行了 Al 标准化的计算(图 3)。

Al 标准化之前, 元素 Ba, Sb, Mo, Zr, Hf, Sr, Cd 和 Ga 在整个断面上差异较小, 其他元素则表现为明显的南高北低的变化(图 3)。标准化之后, 原来南北两个区域差异明显的元素反而变得模糊或者差异消失, 但是 Ba, Zr, Hf 和 Sr 等元素的差异突出, 表现为南低北高的特征(图 3)。微量元素质量分数的 Pearson 相关系数的研究表明, Zr 和 Ba, Sr, Sb, Hf 之间具有较高的相关性, 表明了其相似的来源和地球化学行为。而 Ga 和 Rb, Pb 的相关性较高, Cd 与其它元素均没有较好的相关性, 这些元素可能与人类活动影响有关。剩余的所有元素之间显著相关, 质量分数变化与 Al₂O₃ 较为一致, 呈现南高北低的趋势, 在 B94 突然降低, 最北端 B123 站略有回升。

2.2.3 稀土元素地球化学特征

研究区稀土的质量分数如表 3 所示, 其变化范围在 $(105.73 \sim 228.82) \times 10^{-6}$, 平均 188.52×10^{-6} , 略高于中国大陆架沉积物中稀土元素的平均丰度(156×10^{-6}), 与黄土的平均丰度较为接近^[19], 处于全球沉积物平均稀土元素质量分数 $(150 \sim 300) \times 10^{-6}$ 的较低值。与中国其他海区相比, 高于黄海、东海表层沉积物的平均质量分数(黄海为 134.03×10^{-6} , 东海为 140.03×10^{-6}), 而与南海表层沉积物平均质量分数(187.58×10^{-6})相当。与前人研究相比(229.29×10^{-6}), 本次研究渤海表层沉积物稀土元素(REE)质量分数较低^[20]。稀土元素的质量分数变化大体呈现南高北低的模式, B94 站以南的质量分数较高且较为一致, 北部的质量分数较低, 沉积物中轻稀土元素(LREE)相对富集, 重稀土元素(HREE)相对亏损, 符合边缘海(陆架)沉积物的稀土元素组成与配分形式^[21-22]。

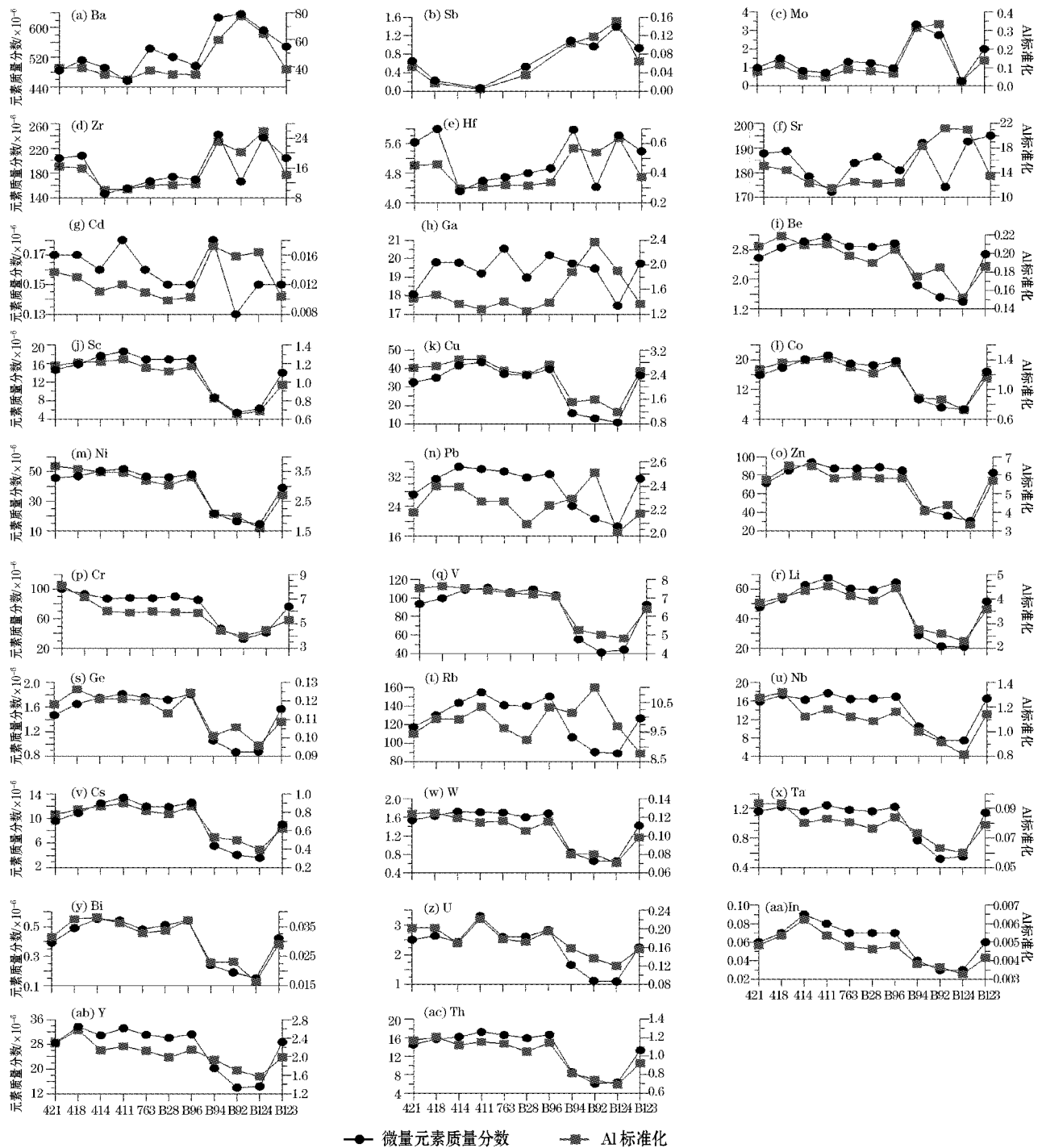


图 3 研究断面表层沉积物中微量元素质量分数及 Al 标准化变化图

Fig. 3 The contents and Al contents of trace elements in the studied sections of the surface sediments

表 3 研究断面稀土元素质量分数($\times 10^{-6}$)

Table 3 The concentrations of the REEs in the studied sediment sections($\times 10^{-6}$)

站 位	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Σ REE	Σ LREE	Σ HREE
421	42.85	84.68	9.85	36.28	6.95	1.41	6.03	0.96	5.31	0.99	2.85	0.47	2.71	0.50	201.39	182.02	19.82
418	46.75	93.23	10.98	40.67	7.78	1.62	6.87	1.09	6.28	1.20	3.33	0.55	3.11	0.50	223.51	201.03	22.93
414	45.49	89.76	10.52	38.87	7.31	1.54	6.35	1.05	5.86	1.08	2.94	0.47	2.87	0.50	214.16	193.49	21.12
411	48.61	96.03	11.24	40.82	7.93	1.61	6.89	1.09	6.22	1.16	3.20	0.56	3.17	0.50	228.58	206.24	22.79
763	46.03	91.58	10.80	39.90	7.57	1.55	6.60	1.03	5.81	1.06	3.05	0.50	2.90	0.50	218.43	197.43	21.45
B28	44.50	88.42	10.35	38.34	7.24	1.52	6.43	0.99	5.59	1.03	2.98	0.50	2.97	0.50	210.91	190.37	20.99
B96	46.87	92.87	10.83	40.08	7.63	1.60	6.67	1.02	5.90	1.07	3.08	0.51	3.03	0.50	221.21	199.88	21.78
B94	27.69	53.37	6.36	23.08	4.24	1.20	3.90	0.62	3.75	0.70	2.06	0.34	2.03	0.30	129.37	115.94	13.70
B92	22.92	43.78	5.33	19.48	3.50	1.04	3.03	0.46	2.65	0.48	1.40	0.23	1.43	0.20	105.75	96.05	9.88
B124	25.95	48.57	5.59	20.54	3.71	1.02	3.17	0.47	2.72	0.51	1.44	0.25	1.56	0.20	115.52	105.38	10.32
B123	43.40	85.58	10.17	37.46	7.05	1.52	6.03	0.96	5.55	0.99	2.88	0.47	2.78	0.50	204.89	185.18	20.16
最大值	48.61	96.03	11.24	40.82	7.93	1.62	6.89	1.09	6.28	1.20	3.33	0.56	3.17	0.50	228.82	206.24	22.99
最小值	22.92	43.78	5.33	19.48	3.50	1.02	3.03	0.46	2.65	0.48	1.40	0.23	1.43	0.20	105.73	96.05	9.88
平均值	40.10	78.90	9.27	34.14	6.45	1.42	5.63	0.89	5.06	0.93	2.66	0.44	2.60	0.43	188.52	170.27	18.63

本文采用北美页岩中稀土元素的质量分数平均值对研究断面沉积物稀土元素标准化,结果见图 4。由图可见,研究区表层沉积物稀土元素分布模式大体相同,均表现为(La/Yb)N 比值近于 1,整个曲线近于平坦。但 B94,B92,B124 三站位位于下部,比值均小于 1,其余站位位于上部,比值多大于 1。在北美页岩平均值标准化情况下计算了样品 δ Eu 值,B94,B92,B124 的值在 1.3~1.4,B123 站的值为 1.02,其余站位的值在 0.96~0.99,相对于北美页岩沉积物,研究区北部站位出现了 Eu 的正异常,而南部未出现明显的异常。研究认为控制沉积物中 REE 组成最主要的因素是物源^[23],因而研究区沉积物以 B94 站为界,南北两区域的物质来源具有显著区别,应分别主要以黄河物质和滦河物质为主。

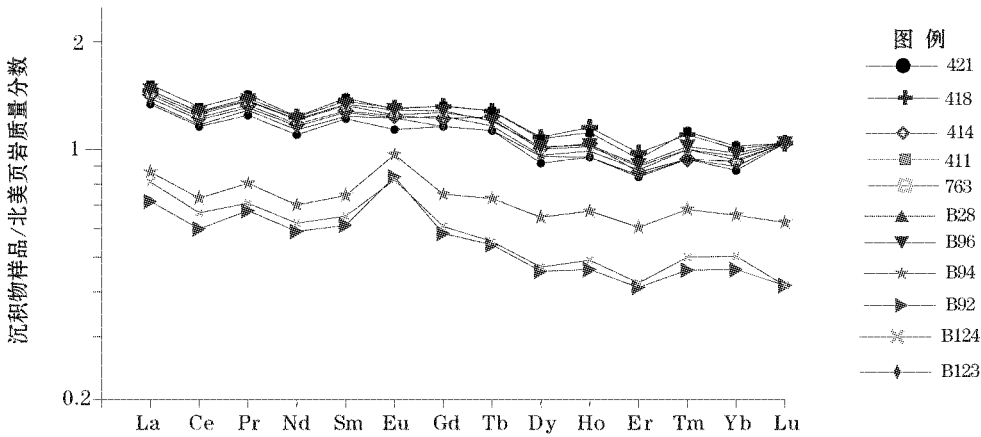


图 4 研究断面沉积物稀土元素北美页岩标准化配分模式

Fig. 4 REEs standard curve of North American shale in the studied sediment sections

4 讨 论

4.1 沉积物物质来源识别

因流域的地质背景关系,黄河源物质主要来自黄土高原,因而常量元素中 CaO 含量较高,且黄河沉积物的颗粒较细。而滦河源物质相对较粗, SiO_2 含量较高;且因燕山地区作为滦河主要源区,富含中酸性长英质物质,导致滦河沉积物相对富集 Na , K 等元素^[12,24-25]。消除粒度影响后的分布趋势表明,研究区以 B94 站为界,常量元素中南部区域 CaO 含量较高, SiO_2 , K_2O 和 Na_2O 含量较低,北部区域则相反。而海河源沉积物颗粒较细, SiO_2 含量低,显然北部含有高 SiO_2 含量的粗颗粒沉积物则主要来自滦河源物质,而南部主要是受到黄河源物质的影响。

滦河物质主要来自流域的前古生代变质岩系,古-中-新生代的砂页岩和灰岩等沉积岩系以及中、酸性的火山岩系和广布的燕山花岗岩的风化产物,以稳定矿物(钛铁矿、磁铁矿)和极稳定矿物(锆石)含量高为特点^[16,25],与黄河沉积物相比,滦河物质的颗粒粒径明显较大,且具有较高的 Zr , Hf , Sr 和 Ba 等元素的含量^[12, 24-26]。这些元素在 B94 站以南区域含量较低,而北部则含量较高。上述元素多赋存在大颗粒的重矿物颗粒中,因此可以认为代表了滦河源的物质。 Al_2O_3 及其与之相关性较高的元素大多富集在细颗粒沉积物中,代表了黄河源物质的影响,同样也显示了以 B94 站为界限的分布趋势,表明了黄河物质在该站以南的控制作用。

稀土元素的配分模式也表现出了以 B94 站为界的显著差异, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 比值表现为南高北低, δEu 值在北部为正异常,同样表明了南北沉积物物质来源的差异。

综上所述,常量元素 SiO_2 , K_2O , Na_2O , CaO 和 MgO , 微量元素 Zr , Ba , Sr , Sb 和 Hf 以及稀土元素配分模式都指示存在明显的南北差异,这些元素可作为区分黄河来源和滦河来源物质的指标。

4.2 黄河沉积物向渤海湾扩散范围分析

以上研究表明,以 B94 站为界,南部区域相对富集 CaO , Fe_2O_3 , MgO 以及稀土元素,其沉积物来源与黄河沉积物关系密切;北部区域则相对富集 SiO_2 , K_2O , Na_2O 和 Zr , Ba , Sr , Sb , Hf 等元素,且 δEu 表现为正异常,表明了滦河物质对该区域的影响。

黄河、滦河主要输沙出现在夏、秋时的丰水期,该时段波浪作用弱,入海的沉积物大部分沉积于河口处,少部分向较远处扩散。现行黄河入海水沙调查研究表明:水沙入海后有 3 个扩散方向,即东北向、西北向和东南向,其中东北向和西北向的运移的物质可能影响本区^[2, 15, 27]。需要特别注意的是切变锋对河口泥沙的向海传输有重要的影响,它的发育导致河口泥沙局限于切变锋的向岸一侧,并且随落潮流向北侧传输,少量泥沙随涨潮流沿岸向南传输^[27]。相对于黄河,滦河入海沉积物少、沉积物粒级组成较粗^[7,16],其入海沉积物主要沉积于水下三角洲以及附近海域。

再悬浮沉积物是该区沉积物重新分配的重要因素。夏季风浪弱,黄河、滦河入海沉积物局限于河口三角洲及其附近海域;冬季风浪作用强烈,夏季沉积的物质以及老三角洲物质发生侵蚀,再悬浮物质一方面向浅海方向扩散,另一方面则随着渤海环流向远处搬运。向浅海方向扩散的程度和范围与该区的地形以及波浪、潮汐密切相关,相对沉积物颗粒较粗、影响范围有限。但是,随着环流扩散的沉积物颗粒细、影响范围广。黄河再悬浮沉积物随沿岸流向东偏南方向搬运,部分再悬浮物质经山东半岛、过渤海海峡、最终进入黄海;滦河三角洲(包括古滦河三角洲)再悬浮沉积物则主要随着辽东湾西侧的沿岸流向渤海湾中部及秦皇岛方向输运,进入辽东湾海域(图 1)。

黄河、滦河入海沉积物主要沉积于河口附近,其再悬浮物质的扩散和搬运又受到渤海环流体系的控制,结果使得研究区内黄河沉积物局限于渤海湾南部,滦河沉积物局限于渤海湾北部。

5 结 论

1) 渤海中部表层沉积的物物质组成和元素地球化学特征南北差异明显。以 B94 站为界,南部区域沉积物以粘土质粉砂为主,北部区域则以粉砂-砂为主。南部区域相对富集与细颗粒黏土矿物相关的元素,如 Al_2O_3 , CaO , Fe_2O_3 , MgO , MnO , P_2O_5 和 TiO 等常量元素、绝大多数的微量元素和稀土元素等;而北部则相对富集 SiO_2 , K_2O , Na_2O 等常量元素及 Zr, Ba, Sr, Sb, Hf 等微量元素,稀土元素相对亏损。

2) 研究区沉积物具有不同的物质来源,南部沉积物以黄河来源为主,而北部沉积物具有显著的滦河来源特点,北端近岸海域个别站位还受到沿岸陆源的影响。黄河来源沉积物、滦河来源沉积物的分界大致在 $38^\circ 42' \text{N}$ 附近。河口动力过程、渤海环流是影响该区沉积物扩散的主要因素。

参考文献(References):

- [1] QIN Y S, ZHAO Y Y, ZHAO S L, et al. Geology of the Bohai Sea[M]. Beijing: Science Press, 1985. 秦蕴珊, 赵一阳, 赵松龄, 等. 渤海地质[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [2] LI G X, TANG Z S, YUE S H, et al. Sedimentation in the shear front off the Yellow River mouth[J]. Continental Shelf Research, 2001, 21(6-7): 607-625.
- [3] WANG H J, YANG Z S, LI Y H, et al. Dispersal pattern of suspended sediment in the shear frontal zone off the Huanghe (Yellow River) mouth[J]. Continental Shelf Research, 2007, 27(6): 854-871.
- [4] HAN Z Z, ZHANG J Q, ZOU H, et al. Characteristics and provenance of clay mineral assemblage of sediments from the north part of the Bohai Bay[J]. Periodical of Ocean University of China, 2011, 41(11): 95-102. 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.
- [5] YANG Z S, JI Y J, BIN S, et al. Sediment transport off the Huanghe (Yellow River) delta and in the adjacent Bohai Sea in the adjacent Bohai Sea in winter and seasonal comparison[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2010, 93(3): 173-181.
- [6] LI S Y, MIAO F M, LIU G X, et al. The study of pollution history of heavy metal in Bohai Sea[J]. Marine Environment Science, 1996, 15(4): 28-31. 李淑媛, 苗丰民, 刘国贤, 等. 渤海重金属污染历史研究[J]. 海洋环境科学, 1996, 15(4): 28-31.
- [7] QIAO S Q, SHI X F, WANG G Q, 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. 乔淑卿, 石学法, 王国庆, 等. 渤海底质沉积物粒度特征及运输趋势探讨[J]. 海洋学报, 2010, 32(4): 139-147.
- [8] DONG T L. Modern sedimentation models in the Bohai Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1996, 16(4): 43-53. 董太禄. 渤海现代沉积作用与模式的研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1996, 16(4): 43-53.
- [9] ZHAO B R, ZHUANG G W, CAO D M, et al. Circulation, tidal residual currents and their effects on the sedimentation in the Bohai Sea[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1995, 26(5): 466-473. 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.
- [10] CHEN L Y, LUAN Z F, ZHENG T M, 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. 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.
- [11] LIU Z X. The influential factors and zoning of the modern Luanhe River Delta[J]. Journal of Oceanography of Huanhai & Bohai Seas, 1989, 7(4): 55-64. 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.
- [12] TIAN L Z, PEI Y D, SHANG Z W, et al. Elements characteristics of the suspended component in surface sediments from the west Bohai Bay and the provenance implication[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2010, 30(1): 9-15. 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.
- [13] FENG S Z, LI F Q, LI S J. Introduction to marine science[M]. Beijing: Higher Education Press, 1999. 冯士筌, 李凤岐, 李少菁. 海洋科学导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999.
- [14] JIANG W, PO H L, MAN N T, SUN J, et al. SPM transport in the Bohai Sea: field experiments and numerical modelling[J]. Journal of Marine Systems, 2004, 44(3-4): 175-188.
- [15] LI G X, YUE S H, ZHAO D B, et al. Rapid deposition and dynamical processes in the modern Yellow River Estuary[J]. Marine Geolo-

- gy & Quaternary Geology, 2004, 24(3): 29-36. 李广雪, 岳淑红, 赵东波, 等. 黄河口快速沉积及其动力过程[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2004, 24(3): 29-36.
- [16] ZHANG Y F, LI F X. The characteristics of material component and the material resources in Huanghe (Yellow) River, Luanhe River [J]. Marine Science, 1983, 3: 15-18. 张义丰, 李凤新. 黄河、滦河三角洲的物质组成及其来源[J]. 海洋科学, 1983, 3: 15-18.
- [17] QIN Y S, ZHAO Y Y, CHEN L R, et al. Geology of the East China Sea[M]. Beijing: Science Press, 1987. 秦蕴珊, 赵一阳, 陈丽蓉, 等. 东海地质[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [18] LIU S F, SHI X F, LIU Y G, et al. Geochemical characteristics and geological significance of major elements in the surface sediments from the inner shelf mud area of the East China Sea[J]. Advances in Marine Science, 2010, 28(1): 80-86. 刘升发, 石学法, 刘焱光, 等. 东海内陆架泥质区表层沉积物常量元素地球化学及其地质意义[J]. 海洋科学进展, 2010, 28(1): 80-86.
- [19] ZHAO Y Y, YAN M C. Sedimental geochemistry of China shallow seas[M]. Beijing: Science Press, 1994. 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.
- [20] LI S L, LI S Q. REE composition and source tracing of sediments from core YA01 in Yellow Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2001, 21(3): 51-56. 李双林, 李绍全. 黄海 YA01 孔沉积物稀土元素组成与源区示踪[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2001, 21(3): 51-56.
- [21] PIPER D Z. Rare earth elements in the sedimentary cycle: a summary[J]. Chemical Geology, 1985, 14: 285-304.
- [22] ELDERFIELD H, UPSTILL-GODDARD R, SHOLKOVITZ E R. The rare earth elements in rivers, estuaries and coastal seas and their significance to the composition of ocean waters[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1990, 54: 971-991.
- [23] FENG X W, SHI X F, HUANG Y X, et al. Distributions and main controlling factors of rare earth elements in core sediments from the Changjiang Estuary mud area over the last 100 years[J]. Geochemical, 2011, 40(5): 464-472. 冯旭文, 石学法, 黄永祥, 等. 长江口东南泥质区百年来稀土元素的组成及控制因素[J]. 地球化学, 2011, 40(5): 464-472.
- [24] LIU M, FAN D J. The comparative study on the elements compositions in the sediments of Yangtze and Yellow Rivers[J]. Advances in Marine Science, 2009, 27(1): 42-50. 刘明, 范德江. 长江、黄河入海沉积物中元素组成的对比[J]. 海洋科学进展, 2009, 27(1): 42-50.
- [25] ZHOU F G. The relations between elements distribution in sediments and environments in Luanhe Estuary[J]. Marine Science Bulletin, 1983, 2(2): 60-70. 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.
- [26] YANG S Y, LI C X. Characteristic element compositions of the Yangtze and the Yellow Rivers sediments and their geological background[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 1999, 19(2): 19-26. 杨守业, 李从先. 长江与黄河沉积物元素组成及地质背景[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1999, 19(2): 19-26.
- [27] WANG H J, YANG Z S, BI N S. 3-D simulation of the suspended sediment transport in the Yellow River mouth I: Shear front off the Yellow River mouth[J]. Journal of Sediment Research, 2006, (2): 1-9. 王厚杰, 杨作升, 毕乃双. 黄河口泥沙输运三维数值模拟—黄河口切变锋[J]. 泥沙研究, 2006, (2): 1-9.

The Sedimentary Geochemical Trace of the Yellow River Sediments Diffusion in the Bohai Bay

ZHANG Ai-bin^{1,2}, LIU Ming^{1,2,3}, LIAO Yong-jie^{1,2,4}, ZHANG Yan-li^{1,2}, FAN De-jiang^{1,2}

(1. *Key Laboratory of Submarine Geosciences and Technology of Ministry of Education*, Qingdao 266100, China;

2. *College of Marine Geosciences, Ocean University of China*, Qingdao 266100, China;

3. *Key Laboratory of Marine Sedimentology & Environmental Geology, SOA*, Qingdao 266061, China;

4. *Key Laboratory of Sea-area Management Technology, SOA*, Dalian 116083, China)

Abstract: The 53 major, trace elements and REEs of the surface sediments collected near 118°54' E in the central Bohai Bay were tested using ICP-AES and ICP-MS. Their contents, spatial distributions and the sediment compositions were analyzed. The results showed that the sediments in studied area were quite different between the north and south regions with B94 station as a boundary. In the southern region, sediments were mainly clayey silt enriched in Al_2O_3 , CaO , Fe_2O_3 , MgO , MnO , P_2O_5 , TiO and the vast majority of the trace elements and rare earth elements associated with the fine particles of clay minerals. Meanwhile, the northern region was mainly the silt-sand sediments enriched in the major elements of SiO_2 , K_2O , Na_2O and the trace elements of Zr, Ba, Sr, Sb, Hf etc., and was relatively deficit in REEs. The comprehensive provenance analysis showed that, the southern region sediments were mainly affected by the Yellow River sediments, while the sediments in the north region were mainly come from the Luanhe River. The boundary was roughly near 38°42' N. The estuarine dynamic process and the circulation in Bohai sea is the main factor affecting the sediment diffusion in this area.

Key words: Yellow River sediments; Bohai Bay; diffusion; provenance; geochemistry

Received: December 4, 2013