

文章编号:1000-0550(2016)05-0892-10

doi: 10.14027/j.cnki.cjxb.2016.05.008

# 渤海东部晚更新世以来的沉积物地球化学特征

蓝先洪<sup>1,2</sup> 秦亚超<sup>1,2</sup> 王中波<sup>1,2</sup> 陈晓辉<sup>1,2</sup> 密蓓蓓<sup>1,2</sup> 黄龙<sup>1,2</sup>

(1.国土资源部海洋环境与油气地质重点实验室 青岛海洋地质研究所 山东青岛 266071;  
2.青岛海洋国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室 山东青岛 266071)

**摘要** 为探讨渤海东部晚更新世以来的元素地球化学特征及控制因素,对渤海东部 DLC70-1 孔 157 个沉积物样品进行了化学成分、粒度及测年分析。结果表明,晚更新世以来研究区沉积物的物质来源与沉积环境较为稳定;根据 DLC70-1 孔沉积物地球化学特征,钻孔岩芯可划分为 6 层,反映了末次间冰期(暖期)晚期以来渤海东部沉积物物源的变化以及海面波动。 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{TFe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MnO}$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{Cu}$ 、 $\text{Zn}$ 、 $\text{Pb}$ 、 $\text{Cr}$  和  $\text{Rb}$  等元素与细粒沉积物呈正相关, $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$  与粗粒沉积物呈正相关, $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{Sr}$  和  $\text{Ba}$  分布与沉积物粒度无明显正或负的相关性;R-型因子分析得出三种主要组合类型,以  $\text{Mg}$ 、 $\text{Sr}$  和  $\text{Ba}$  为代表,分别对应陆源细粒物质输入与黄河物质、海河物质和滦河物质的影响。运用  $\text{Ba}/\text{Al}_2\text{O}_3$  与  $\text{Sr}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  与  $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$  离散图分析了 DLC70-1 孔的物质来源,结果表明沉积物主要来源于黄河,该孔中上部 32.30~49.00 m 和 9.30~23.20 m 沉积物受到了滦河和海河物质的影响。

**关键词** 渤海东部 地球化学 沉积物 晚更新世

**第一作者简介** 蓝先洪 男 1958 年出生 研究员 海洋沉积地球化学 E-mail: lanxh@qingdaonews.com

**中图分类号** P736.4 P595 **文献标识码** A

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,是中国 4 个海域中坡度最小的海区。渤海平均水深约 18 m,最深水深 84 m,位于渤海海峡北部的老铁山水道<sup>[1]</sup>。在围绕着渤海地区古环境和海平面变化等问题已开展了许多研究工作,对晚第四纪以来的古环境演化、地层结构和沉积环境等方面有了比较深入的认识<sup>[2-6]</sup>。

渤海 Bc-1 孔从距今 163 000 年以来,共发生了 7 次海侵,形成了 7 期海相地层和介于海相层间的陆相地层<sup>[2]</sup>;辽东湾北部自晚更新世中期以来曾发生过 3 次海侵<sup>[4]</sup>;依据渤海东部 CD5 孔岩性、生物以及年代学等地层分析,晚更新世晚期以来可划分出 2 个陆相和 2 个海相层<sup>[5]</sup>;渤海东部高分辨率浅地层图像资料反映的浅地层,自海底向下数十米可分 A、B、C 三层,A 层为全新世海相沉积,大约形成于 9 ka B.P. 以来;B 层为陆相至海陆过渡相沉积,大约形成于 9~13 ka B.P.;C 层为末次冰期盛期的陆相沉积,形成于 13~22 ka B.P.<sup>[6]</sup>。Yao *et al.*<sup>[7]</sup> 对渤海 BH08 孔岩芯的古地磁和天文年代学研究表明,该孔古地磁研究显示布容/松山界限位于孔深 125.66 m,190.6 m 为哈拉米洛亚时顶部,并依据生物分布特征划分了 9 个滨海—浅

海沉积环境和 8 个陆相地层。依据辽东湾东南部海域柱状样沉积物稀土元素数据,对稀土元素组成特征以及物质来源作了探讨<sup>[8]</sup>。渤海泥质区柱状沉积物的粒度与化学成分及<sup>14</sup>C 测年数据表明,北部泥质沉积物自早全新世便已开始形成,在化学成分上北部泥质区与黄河物质有一定差异,说明受黄河物质影响较弱<sup>[9]</sup>。对渤海沉积物化学组成的研究,以往多数集中于表层沉积物<sup>[10-14]</sup>和柱状样沉积物<sup>[8-9,15]</sup>,柱状样沉积物化学组分研究局限为全新世<sup>[9]</sup>或因柱状样较短没有年代框定<sup>[8,15]</sup>,而钻孔主要研究晚更新世以来的沉积环境和演化<sup>[2-7]</sup>,对于晚更新世以来沉积物的地球化学及物源研究却较少。本文以取自渤海东部 DLC70-1 岩芯沉积物为分析材料,结合粒度特征,探讨了渤海东部晚更新世以来古环境演化的地球化学特征。

## 1 采样与测试方法

### 1.1 样品采集

青岛海洋地质研究所于 2009 年 9 月在渤海东部海域进行了区域地质调查,其中开展了地质浅钻取样(钻孔编号为 DLC70-1,孔深 70.20 m,水深 27.5 m,图

收稿日期:2015-11-27; 收修改稿日期:2016-02-03

基金项目:国家自然科学基金(41330964,41406077);国土资源部海洋区域地质调查项目(GZH200800501,GZH201400205,GZH201400201,DD20160137) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41330964, 41406077; Marine Geological Survey in Ministry of Land and Resources of China, No. GZH200800501, GZH201400205, GZH201400201, DD20160137]

1),取芯率为67.0%~99.3%。样品采集过程按照《1:1 000 000 海洋区域地质调查规范》<sup>[16]</sup>要求控制。共采集不同层位的DLC70-1孔岩芯样品157个用于化学元素分析(大致按0.30~0.50 m的间隔,岩性分层时加密)。

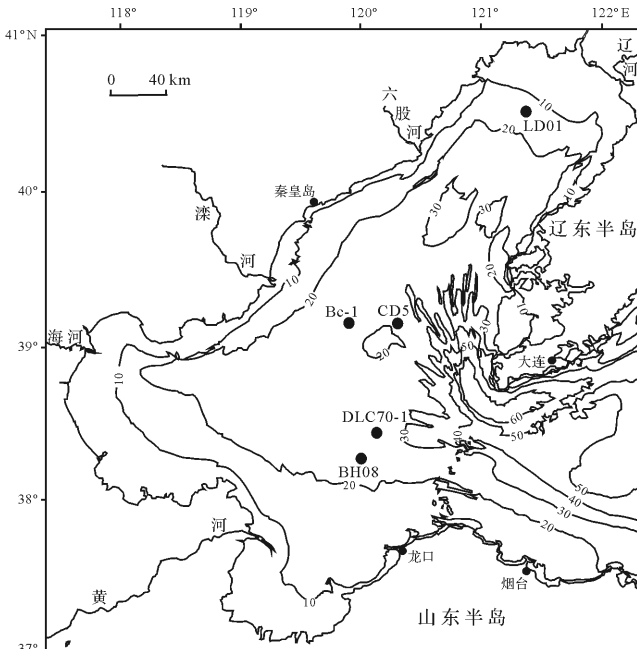


图1 渤海东部 DLC70-1 钻孔位置(等深线资料据文献[1])

Fig.1 Location of Core DLC70-1 in the eastern Bohai Sea (from reference[1], with depth contour data)

各层岩性描述如下:

70.20~69.40 m,为黑色贝壳砂,富含贝壳碎片。

69.40~61.80 m 为浅灰黑色黏土,块状层理,夹薄层粉砂/细砂,向上变细;整体含碳量较高,颜色呈黑色,向上含水量减少。

61.80~56.90 m 为浅黄褐色—黄褐色中砂—细砂,夹薄层粉砂。

56.90~49.00 m,为灰褐色黏土/粉砂夹透镜体状砂质薄层,偶见明显虫孔遗迹(55.30~55.40 m),51.30 m处有明显不整合面,其上为灰色黏土,其下为高富炭黏土层。

49.00~32.30 m,下部(49.00~46.20 m)为青褐色中细砂,夹灰黑色黏土薄层,块状层理;中部(46.20~42.70 m)为灰色、灰褐色、深灰色黏土/粉砂夹透镜体状砂质薄层,平行层理,偶见贝壳碎片;上部(42.70~32.30 m)为灰黑色细砂/粉砂,块状层理,含水量稍高,偶现脉状黏土薄层。

32.30~29.30 m 为灰色黏土与灰色粉砂/细砂互层,平行层理,压扁层理,韵律性强。

29.30~23.20 m,为灰色黏土,质硬,含水量低,发育多点状黑色富炭团块。其中25.90~25.30 m 为灰色黏土与灰黑色粉砂/细砂互层,平行层理,韵律分布。

23.20~18.30 m,为浅灰黑色、黄色中—细砂,含水量下部高上部低。

18.30~14.40 m,为青黄褐色黏土,含水量低,压实,夹少许浅灰色脉状粉砂/细砂薄层,互层,平行层理(17.10 m 附近)。

14.40~9.30 m 为浅黄褐色、浅灰黑色中细砂,含水量较高,块状层理。

9.30 m 以上为灰色黏土薄层与灰黑色透粉砂/细砂互层,平行层理,5.85 m 以上发育虫穴充填体,生物扰动较强;5.40~5.85 m 发育贝壳碎片富集层。

## 1.2 测试方法

化学分析由青岛海洋地质研究所测试中心完成。试样在110℃干燥5 h,置于干燥器中,冷却至室温。将试样经氢氟酸、硝酸分解,低温加热稍冷后,加高氯酸分解,再用盐酸溶解盐类,制成溶液。采用熔片法X射线荧光光谱法(XRF)测定 $Al_2O_3$ 、 $MgO$ 、 $K_2O$ 、 $Na_2O$ 、 $TiO_2$ 、 $CaO$ 、 $TFe_2O_3$ 、 $MnO$ 、 $SiO_2$ 、 $Cu$ 、 $Zn$ 、 $Pb$ 、 $Sr$ 、 $Ba$ 等含量;采用等离子质谱法(ICP-MS)测定Cr、Rb等微量元素; $CaCO_3$ 含量用等离子体发射光谱法(ICP-OES)测定;化学元素分析分别进行了若干样品的重复分析与标样分析,采用海洋沉积物标样GBW07315对测试结果进行标定,元素分析结果误差均在5%以内,数据可靠。

DLC70-1孔岩芯按照20 cm间隔共取313个样品进行了粒度分析,分析结果间隔为 $1/2 \phi$ ,待测样品质量不低于50 g。称取烘干样品先后加入6%的过氧化氢( $H_2O_2$ )和盐酸溶液除去有机质和碳酸盐,在青岛海洋地质研究所测试中心用英国产的Mastersizer 2000型激光粒度分析仪上进行测量。

对DLC70-1孔上部5个样品做了 $^{14}C$ 测定,由青岛海洋地质研究所测试中心年代实验室完成, $^{14}C$ 测定采用低本底的液体闪烁计数方法(以1950年作为计时零年,半衰期取5730年)测试,样品为深灰粉砂和砂质粉砂(表1);另外还在美国伍伍兹霍尔海洋研究所AMC $^{14}C$ 实验室对3个样品进行了AMS $^{14}C$ 年代测试,测试材料为底栖有孔虫,文中均为未校正年龄(表1)。采用光释光(OSL)测年由青岛海洋地质研究所测试中心年代实验室对5个样品(岩性为粉砂)作了年代测定(表1)。

表1 DLC70-1孔年代数据  
Table 1 Dating data of Core DLC70-1

深度/m	测试材料	AMS $^{14}\text{C}$ 年龄/a B.P.	$^{14}\text{C}$ 年龄/a B.P.	OSL 年龄/ka B.P.
1.40~1.45	底栖有孔虫	6 540±35		
4.30~4.35	底栖有孔虫	7 280±40		
5.60~5.65	底栖有孔虫	9 280±35		
8.57~8.70	粉砂		10 080±140	
14.47~14.60	粉砂		16 720±1 530	
23.37~23.50	粉砂		29 060±775	
27.65~27.80	粉砂		33 620±920	
32.23~32.30	粉砂		35 010±1 640	
41.24	粉砂			53±5
50.82	粉砂			61±6
56.39	粉砂			92±9
64.65	粉砂			110±10
65.32	粉砂			112±11

注:AMC $^{14}\text{C}$ 年代由美国伍兹霍尔海洋研究所 AMC $^{14}\text{C}$ 实验室完成; $^{14}\text{C}$ 年代和 OSL 年代由青岛海洋地质研究所测试中心年代实验室完成。

## 2 结果

### 2.1 常量元素地球化学特征

常量元素构成了沉积物的主要化学成分,反映物质来源和沉积作用。据微体古生物<sup>①</sup>、测年资料(表1)等将 DLC70-1 孔自下而上划分为6个部分:55.30 m 以下(70.20~55.30 m)为晚更新世早期里斯—玉木间冰期滨海—浅海沉积,55.30~49.00 m 为晚更新世早玉木冰期陆相沉积,49.00~32.30 m 为晚更新世玉木冰期中亚间冰期滨海沉积,32.30~23.20 m 为晚更新世晚期陆相沉积和晚更新世晚期末次冰期中间冰阶(暖期)滨海沉积,23.20~9.30 m 为晚玉木冰期陆相沉积,9.30 m 以上为全新世冰后期滨海—浅海沉积。

从图2可以看出,DLC70-1孔常量元素垂向上分布不均匀,含量有较大变化,表明该孔沉积物中元素的分散程度较高。 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{MnO}$ 、 $\text{TFe}_2\text{O}_3$ 与平均粒径变化相似,说明它们含量受到粒度变化的控制,而 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{CaO}$ 与平均粒径变化不一致,说明粒度对他们含量影响较小。55.30 m 以下元素皆变化剧烈,70.20~61.80 m 常量元素含量波动较大, $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{MnO}$ 、 $\text{TFe}_2\text{O}_3$ 含量相对较高, $\text{SiO}_2$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 含量下部比上部略高;61.80~55.30 m 以 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{MnO}$ 、 $\text{TFe}_2\text{O}_3$ 含量较低和 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 含量较高为特征,底部 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{MnO}$ 、 $\text{TFe}_2\text{O}_3$ 含量迅速下降,而 $\text{SiO}_2$ 则突然增高。55.30~49.00 m 以富

$\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{MnO}$ 、 $\text{TFe}_2\text{O}_3$ 和贫 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 为特征。前者含量从下到上逐渐升高,后者则相反,含量逐渐下降,反映出黄河物质影响明显加强<sup>[9]</sup>。49.00~32.30 m 以 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 元素含量处于相对高值和 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{MnO}$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{TFe}_2\text{O}_3$ 含量处于相对低值为特征;上部常量元素含量相对较为稳定,波动较小,下部波动较大,中下部出现 $\text{CaO}$ 和 $\text{CaCO}_3$ 含量岩芯中最高值和 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 含量出现较低值,上部则相反,反映出该段可能受到海河和滦河物质的影响<sup>[9]</sup>。32.30~23.20 m 以 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{MnO}$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{TFe}_2\text{O}_3$ 含量较高、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 元素含量较低为特征。 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{MnO}$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{TFe}_2\text{O}_3$ 等元素含量从下到上呈增高趋势,而 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 元素含量则呈下降趋势。反映出此时黄河物质的影响增强,而滦河物质影响减弱<sup>[9]</sup>。23.20~9.30 m 元素含量波动较大,上部和下部以贫 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{MnO}$ 、 $\text{TFe}_2\text{O}_3$ 和富 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{SiO}_2$ 为特征,而中部则相反。 $\text{K}_2\text{O}$ 含量从下到上呈下降趋势。底部除 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 含量突然增高外,其他元素含量均迅速下降,反映出此时沉积物受到滦河和海河物质的影响<sup>[9]</sup>。9.30 m 以上全新世沉积,以 $\text{MgO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{MnO}$ 、 $\text{TFe}_2\text{O}_3$ 含量较高、 $\text{CaO}$ 、 $\text{SiO}_2$ 含量较低为特征。元素含量有较大波动,底部除 $\text{SiO}_2$ 含量突然下降外,其他元素含量均迅速增高。

### 2.2 微量元素地球化学特征

微量元素与常量元素相似,在漫长的地质作用过

①蓝先洪,秦亚超,陈晓辉,等.渤海东部晚第四纪沉积环境变化的稀土元素地球化学记录.海洋通报(待刊).

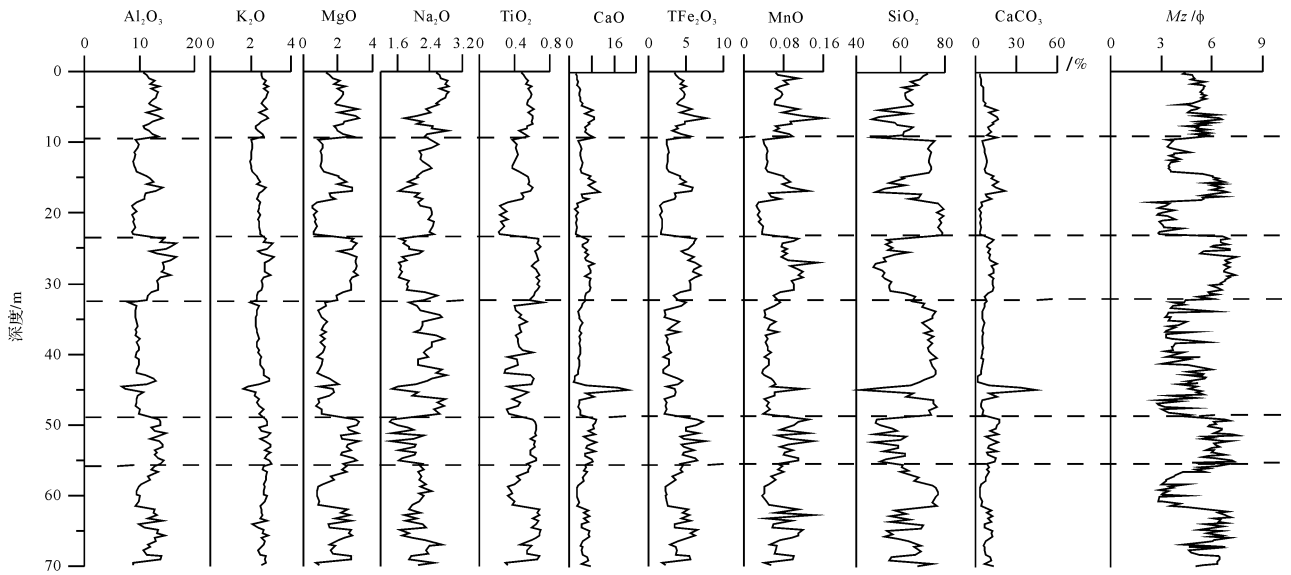


图2 DLC70-1 孔平均粒径与常量元素垂向分布

Fig.2 Depth profiles of mean grain-size and major elements of Core DLC70-1

程中发生分异与富集,大量的地质作用信息被记录下来。从图3可看出,除Sr和Ba元素外其他微量元素含量均受到粒度变化的控制,而粒度对Sr和Ba含量影响较小。55.30 m以下除Sr元素外,其他微量元素均有较大变化,70.20~61.80 m除Ba、Sr含量从下到上呈下降趋势外,其他元素含量趋势不明显,均有较大波动,含量处于较高水平;55.30~61.80 m Cu、Pb、Zn、Cr、Rb等元素含量较低,在底部含量迅速下降,Ba含量则较高,在底部含量迅速升高。55.30~49.00 m Cu、Pb、Zn、Cr、Rb等元素含量较高,在底部含量逐步

增高,反映出黄河物质影响明显增强<sup>[9]</sup>。49.00~32.30 m其上部 Cu、Pb、Zn、Cr、Rb、Sr等元素含量较低,变化较小,下部元素含量波动较大;Sr含量在下部出现该层段的最高值,除Sr、Ba元素外,其他元素含量在底部均迅速下降,反映出此时可能有海河和滦河物质的影响<sup>[9]</sup>。32.30~23.20 m Cu、Pb、Zn、Cr、Rb等元素含量较高,从底部含量逐渐升高,到中部达到相对高值或最高值,然后在上部含量逐渐下降。Sr、Ba等元素含量波动较小。23.20~9.30 m Cu、Pb、Zn、Cr、Rb、Ba等元素含量在上部和下部均较为稳定,中

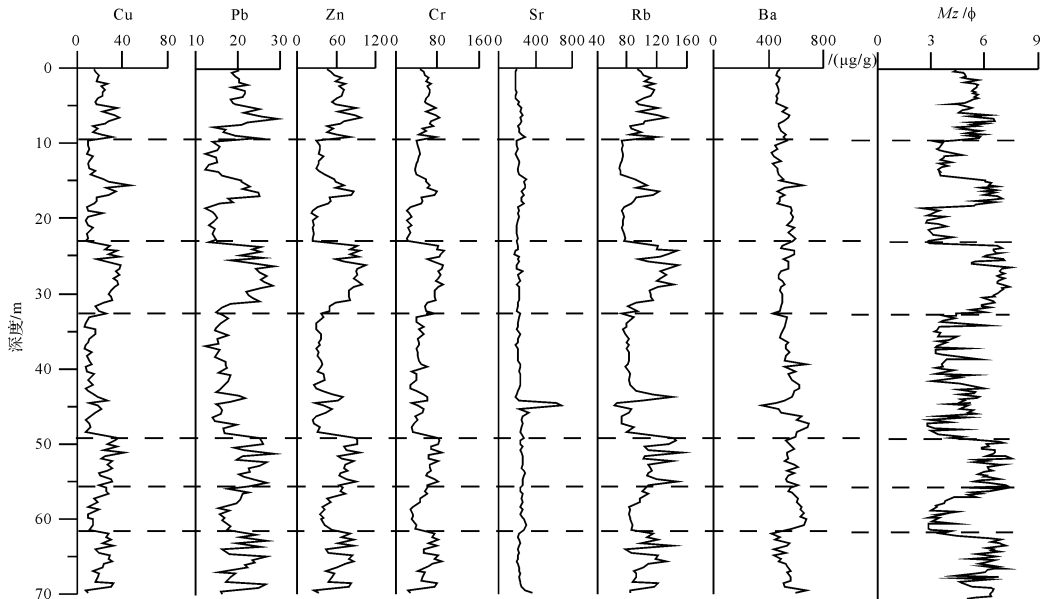


图3 渤海东部 DLC70-1 孔微量元素垂向分布

Fig.3 Depth profiles of trace elements in Core DLC70-1 in the eastern Bohai Sea



部含量有一个三角形形状升高又下降的过程,反映沉积物受到滦河和海河物质影响<sup>[9]</sup>。9.30 m 以上微量元素含量波动较大,Cu、Pb、Rb、Zn、Cr、Ba 等元素含量从下部向上逐渐增高,在中部到达较高值后在元素含量逐渐下降。

### 3 讨论

#### 3.1 相关分析

以往研究表明,元素含量随沉积物粒度变化而有规律地变化,遵从“元素粒度控制律”<sup>[2,9,17]</sup>。DLC70-1 孔相关分析表明,该孔大部分化学元素含量与沉积物类型、平均粒径同样有着较明显的相关关系(表 2),其中 SiO<sub>2</sub>、Na<sub>2</sub>O 等元素含量随沉积物粒度变细而减少,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgO、TiO<sub>2</sub>、MnO、TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Cu、Pb、

Zn、Cr、Rb 等元素含量随粒度变细而增加。仅 K、Sr、Ba 等个别元素与沉积物粒度无明显正或负的相关性(图 4)。

#### 3.2 物质来源分析

##### 3.2.1 因子分析

R-型因子分析是确定元素组合的一种有效方法,可反映沉积物中元素的物质来源和元素分布的主要控制因素。采用 SPSS 软件对 DLC70-1 孔沉积物中的常微量元素和粒度组成进行 R-型因子分析。因子分析采用方差极大旋转法,提取 3 个最重要的因子(表 3)。

因子 1 方差贡献占总方差贡献的 61.01%,其中 Al、Mg、K、Ti、Mn、Fe、Cu、Pb、Zn、Cr、Rb 和粉砂、黏土的组合为正载荷,Si、Na 和砂为负载荷。根据该元素

表 2 渤海东部 DLC70-1 孔沉积物中元素及沉积物类型相关关系

Table 2 Correlation coefficients between elements and sediment type of sediment in Core DLC70-1 from the eastern Bohai Sea

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MnO	TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaCO <sub>3</sub>	Cu	Pb	Zn	Cr	Rb	Sr	Ba	砂	粉砂	黏土	Mz	
SiO <sub>2</sub>	1.00																					
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-0.80**	1.00																				
CaO	-0.81**	0.33**	1.00																			
MgO	-0.94**	0.93**	0.59**	1.00																		
K <sub>2</sub> O	-0.43**	0.77**	-0.02	0.57**	1.00																	
Na <sub>2</sub> O	0.69**	-0.45**	-0.69**	-0.60**	-0.20*	1.00																
TiO <sub>2</sub>	-0.76**	0.82**	0.41**	0.87**	0.41**	-0.47**	1.00															
MnO	-0.91**	0.74**	0.69**	0.89**	0.42**	-0.65**	0.75**	1.00														
TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-0.92**	0.88**	0.56**	0.96**	0.54**	-0.66**	0.86**	0.91**	1.00													
CaCO <sub>3</sub>	-0.80**	0.31**	0.99**	0.58**	-0.04	-0.69**	0.38**	0.68**	0.55**	1.00												
Cu	-0.87**	0.86**	0.55**	0.91**	0.54**	-0.63**	0.77**	0.82**	0.89**	0.55**	1.00											
Pb	-0.85**	0.89**	0.48**	0.90**	0.70**	-0.60**	0.76**	0.85**	0.90**	0.47**	0.89**	1.00										
Zn	-0.90**	0.95**	0.51**	0.97**	0.65**	-0.61**	0.85**	0.87**	0.95**	0.50**	0.92**	0.94**	1.00									
Cr	-0.88**	0.89**	0.49**	0.95**	0.50**	-0.58**	0.93**	0.84**	0.95**	0.49**	0.88**	0.87**	0.94**	1.00								
Rb	-0.81**	0.93**	0.37**	0.89**	0.78**	-0.55**	0.75**	0.77**	0.89**	0.37**	0.84**	0.91**	0.94**	0.87**	1.00							
Sr	-0.28**	-0.21**	0.72**	-0.02	-0.23**	-0.34**	-0.14	0.15	-0.04	0.71**	0.01	-0.01	-0.06	-0.12	-0.15	1.00						
Ba	0.31**	-0.10**	-0.30**	-0.26**	0.39**	0.11	-0.36**	-0.32**	-0.29**	-0.34**	-0.17*	-0.09	-0.21**	-0.34**	-0.06	0.02	1.00					
砂	0.78**	-0.76**	-0.52**	-0.81**	-0.46**	0.52**	-0.78**	-0.72**	-0.78**	-0.50**	-0.73**	-0.74**	-0.79**	-0.77**	-0.73**	-0.06	0.25**	1.00				
粉砂	-0.75**	0.71**	0.51**	0.77**	0.40**	-0.48**	0.78**	0.68**	0.74**	0.49**	0.68**	0.68**	0.74**	0.74**	0.67**	0.06	-0.27**	-0.98**	1.00			
黏土	-0.72**	0.74**	0.45**	0.75**	0.52**	-0.56**	0.61**	0.68**	0.73**	0.44**	0.73**	0.76**	0.76**	0.71**	0.74**	0.03	-0.14	-0.85**	0.74**	1.00		
Mz	-0.79**	0.78**	0.51**	0.82**	0.50**	-0.57**	0.74**	0.73**	0.79**	0.50**	0.76**	0.78**	0.81**	0.78**	0.76**	0.04	-0.22**	-0.97**	0.91**	0.94**	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

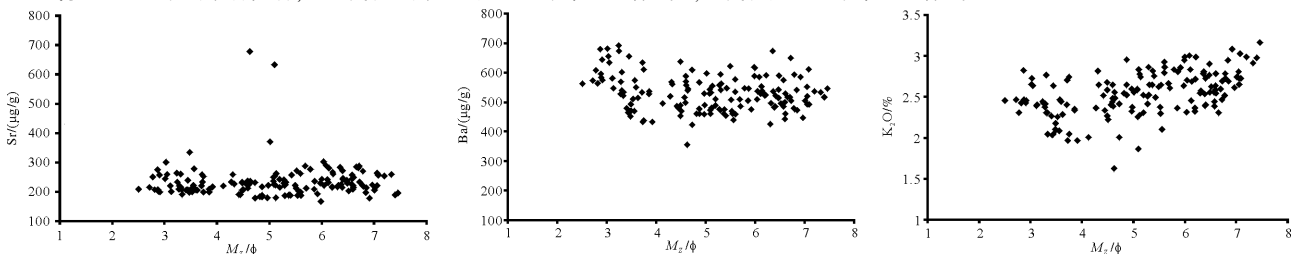


图 4 DLC70-1 孔沉积物平均粒径(M<sub>Z</sub>)φ 值与 Sr、Ba、K<sub>2</sub>O 与的相关图

Fig.4 Correlation between average grain diameter(M<sub>Z</sub>)φ value and Sr,Ba,K<sub>2</sub>O of Core DLC70-1

表3 DLC70-1孔沉积物R-型主因子负荷矩阵  
Table 3 R-mode rotated factor matrix of sediments  
from Core DLC70-1

公因子	因子1	因子2	因子3
SiO <sub>2</sub>	-0.83	-0.52	-0.12
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.97	-0.02	0.10
CaO	0.36	0.90	-0.19
MgO	0.95	0.24	-0.09
K <sub>2</sub> O	0.71	-0.19	0.62
Na <sub>2</sub> O	-0.52	-0.62	-0.03
TiO <sub>2</sub>	0.88	0.04	-0.29
MnO	0.82	0.41	-0.19
TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.94	0.23	-0.12
CaCO <sub>3</sub>	0.35	0.90	-0.21
Cu	0.89	0.26	0.01
Pb	0.92	0.20	0.13
Zn	0.97	0.10	0
Cr	0.94	0.13	-0.19
Rb	0.95	0.07	0.17
Sr	-0.23	0.92	0.09
Ba	-0.19	-0.09	0.92
砂	-0.83	-0.23	0.15
粉砂	0.78	0.22	-0.20
黏土	0.79	0.22	0.04
方差贡献/%	61.01	18.74	8.07
累计方差/%	61.01	79.75	87.82

组合与Si呈明显负相关关系,反映出石英的稀释作用<sup>[17]</sup>。Al、Mg、Ti、Fe、Cr和Rb等主要赋存于沉积物颗粒较细的组分中(表2),其含量变化呈强的正相关关系,相关系数全部大于0.80(表2)。与黏土、粉砂呈明显正相关、与砂呈较强负相关的元素组合相吻合(表2),这些组分主要赋存于沉积物颗粒较细的组分中,反映了陆源细颗粒物输入。此类相关性较高的元素大多富集在细颗粒沉积物中,与黄河沉积物元素组合更为接近<sup>[9]</sup>,代表了黄河源物质的影响<sup>[18]</sup>。

因子2方差贡献占总方差贡献的18.74%,其中正载荷为Ca和Sr组合,负载荷为Na和Si的组合。Ca、Sr呈明显正相关(相关系数大于0.71,见表2),Ca与黏土、粉砂呈中等正相关(相关系数为0.45~0.51,见表2)、与砂呈中等负相关(相关系数为-0.52,见表2),而Sr与黏土、粉砂和砂的无相关性(表2),说明Sr含量变化与沉积物类型关系不大(图4),反映出它们的地球化学行为略有不同;Na与Si呈较强正相关关系(相关系数为0.52,见表2),与黏土、粉砂呈较强负相关,说明Na主要赋存于粗粒沉积物中。Sr和Ca组合代表了海河源物质的影响<sup>[9,18]</sup>。

因子3方差贡献占总方差贡献的8.07%,是控制该孔元素分布较重要的地质因素,包括Ba和K元素组合。Ba与K呈弱的正相关(相关系数为0.39,见表2),相关分析中Ba和K与黏土、粉砂呈弱正相关、与砂呈弱负相关(表2),反映出这该元素组合与沉积物类型关系不大(图4)。Ba和K的元素组合反映了滦河物质的影响<sup>[9,18-19]</sup>。

### 3.2.2 散点图

渤海东部沉积物的物源来源主要有黄河、滦河以及海河。黄河沉积物主要来自于黄土,入海泥沙多为细颗粒泥沙,94.2%的泥沙粒径小于0.063 mm,绝大部分地球化学参数都继承了黄土的特征,对渤海物质分布起到控制作用<sup>[2]</sup>。滦河年平均流量148 m<sup>3</sup>/s,年平均悬移质输沙量2 670万吨,年最大悬移质输沙量8790万吨;滦河携带入海的沉积物主要是中细砂,含泥质少<sup>[20]</sup>。滦河入海泥沙大多沉积在滦河口—曹妃甸一带沿岸区域,与黄河相比滦河对三角洲和邻近的渤海浅海供应的沉积物不多<sup>[21-22]</sup>。海河多年平均入海径流为60.2亿m<sup>3</sup>,多年平均入海沙量为426万吨,主要沉积在渤海湾西部近岸区域,径流输入的泥沙颗粒很细,中值粒径大部分为5~20 μm<sup>[23-25]</sup>。

黄河、滦河和海河三条河流现代层沉积物中,黄河沉积物含有较高的Mg、K、Al、Ca、Fe、Ti、Rb和Cr元素含量,滦河沉积物中则Na、Si和Ba元素含量较高,而海河沉积物以Mn、Sr和Cu元素含量高为特征<sup>[9]</sup>。黄河Al、Mg、K、Ca等元素和滦河Na、Ba、Sr等元素含量明显不同于海河沉积物(表4),而且K、Sr和Ba元素与沉积物粒度粗细无明显相关性(图4)。为了消除沉积物粒度变化对元素含量的影响,可以采用元素与铝比值的元素指标来研究钻孔沉积物受周边可能的物源影响。依据黄河、滦河和海河沉积物中元素特征(表4),本文采用Ba、Sr、MgO、K<sub>2</sub>O与Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的比值用于区分黄河、滦河和海河流沉积物,黄河、滦河和海河样品数据见表3。Ba/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>与Sr/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>离散图显示(图5),DLC70-1孔的样品主要落于现代黄河样品分布的区域,中上部32.30~49.00 m和9.30~23.20 m大部分样品落于偏于现代滦河和海河样品区域,表明该孔沉积物主要来源于黄河物质,而中上部有部分物质可能来源于滦河和海河。

元素MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>与K<sub>2</sub>O/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>比值同样可以清晰地区分黄河、滦河和海河物质对DLC70-1孔的影响。从图6上清晰地显示,DLC70-1孔样品投点大部分较接近黄河样品,中上部32.30~49.00 m和9.30~

23.20 m 大部分样品靠近滦河和海河样品区域分布, 同样表明钻孔沉积物物源主要与黄河沉积物较为接近, 有部分层段受到滦河和海河物质影响。

表4 黄河、海河和滦河现代表层沉积物部分元素平均值<sup>[9]</sup>

Table 4 Average contents of some elements in sediments of the Yellow River, Haihe River and Luanhe River<sup>[9]</sup>

元素	Al/%	Ca/%	K/%	Mg/%	Na/%	Ba/( $\mu\text{g/g}$ )	Sr/( $\mu\text{g/g}$ )
黄河	6.65	5.36	2.17	1.57	1.47	476	204
海河	6.13	4.62	1.82	1.15	1.48	675	313
滦河	4.79	1.09	1.95	0.48	2.37	817	376

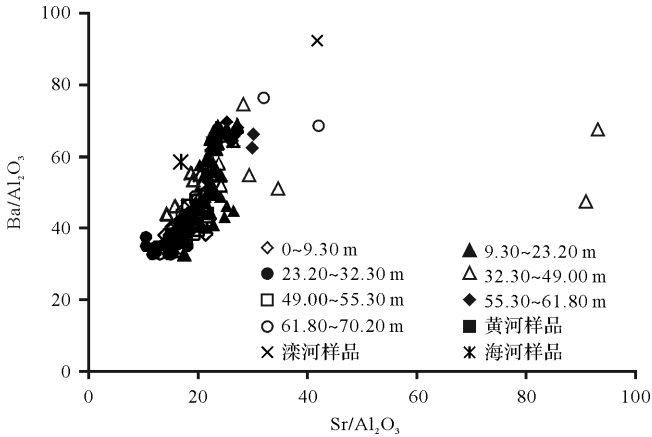


图5 元素 Ba/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>与 Sr/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>离散图

Fig.5 Scatter diagram showing Ba/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> vs. Sr/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> distribution

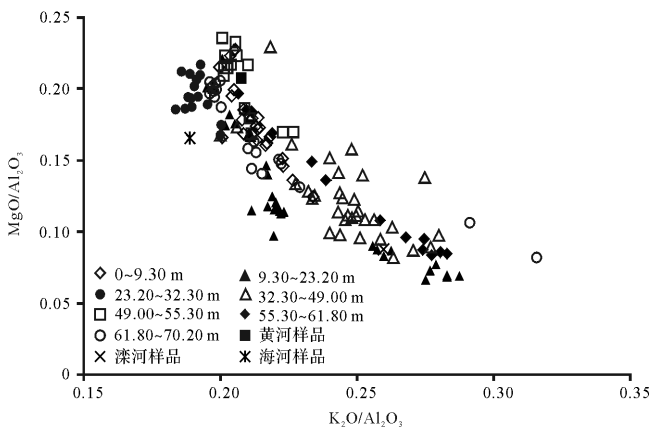


图6 元素 MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>与 K<sub>2</sub>O/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>离散图

Fig.6 Scatter diagram showing MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> vs. K<sub>2</sub>O/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> distribution

渤海沉积物中轻矿物白云母的分布反映出黄河的物质控制着渤海湾南部、莱州湾、向北可直达滦河口外, 显示其向西, 向北和向东输送特征<sup>[2,21]</sup>; 矿物学

和地球化学研究表明, 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主要受黄河入海物质的控制<sup>[2]</sup>。黄海暖流由南黄海东南部流入北黄海, 通过渤海海峡的北侧进入渤海, 在渤海中部呈南北向伸展<sup>[26]</sup>, 在北黄海西部冷涡环流的驱动下, 有部分黄河物质从山东半岛北侧近海向北黄海西部泥质区搬运, 再沿黄海暖流的路径向渤海东部输送<sup>[27]</sup>。

渤海晚更新世以来的地层主要由海水进退形成<sup>[2,4]</sup>。图5和图6反映了 DLC70-1 孔沉积物来源主要为黄河物质, 而在中上部其影响有所减弱。研究表明现代黄河至少在 1.165 Ma 前就已经出现<sup>[28]</sup>, 黄河东流入海的格局最迟在 0.865 Ma 前就已形成<sup>[29]</sup>。Liu 等<sup>[30]</sup>认为, 距今 11 400 a 之后海面有 1 800 a 时间上升迟缓, 导致了北部黄河水下三角洲即“山东泥楔”的形成。这一时期黄河汇集了现今的辽河、滦河、海河和所有进入渤海的短源河流。除了距今 9 600~8 500 a 和 1 128~1 855 a 黄河汇集了淮河主干流和山东南部一些河流注入黄海外, 其他时间都注入渤海西岸<sup>[31]</sup>。

渤海东部 DLC70-1 孔研究表明, 49.00~32.30 m 为晚更新世玉木冰期中亚间冰期滨海沉积, 41.24 m 处 OSL 年代为 (53±5) ka B.P. 和 32.30 m 处<sup>14</sup>C 年代为 (35 010±1 640) a B.P., 沉积物较粗, 为青褐色中细砂、灰色砂质粉砂和灰黑色细砂; 元素特征显示 SiO<sub>2</sub>、Na<sub>2</sub>O、Sr、Ba 元素含量较高, 而 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgO、MnO、TiO<sub>2</sub>、TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Cu、Pb、Zn、Cr、Rb 含量则较低。这次海侵范围不大, 渤海湾西岸及下辽河地区的钻孔均未发现, 相当于渤海 Bc-1 孔中的渤海海侵<sup>[2]</sup>, 辽东湾的水源海侵<sup>[4]</sup>。与黄河沉积物相比, 滦河物质的颗粒粒径较大, Na、Sr 和 Ba 等元素含量较高(表3), 元素特征显示该层位有滦河物质影响(图6)。9.30~23.20 m 为晚玉木冰期陆相沉积, 23.37~23.50 m 处<sup>14</sup>C年代为 (29 060±775) a B.P., 14.47 m~14.60 m 处<sup>14</sup>C年代为 (16 720±1 530) a B.P.。沉积物来源和物质供应量受海平面变化的重要影响<sup>[32]</sup>, 到 25 ka B.P. 随着海平面下降<sup>[2]</sup>, 渤海陆架沉积物的来源发生了一定变化, 由以黄河沉积物来源为主, 转变为有部分滦河和海河物质影响的沉积; 元素特征显示上部和下部富含 SiO<sub>2</sub>、Na<sub>2</sub>O 和贫 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgO、CaO、TiO<sub>2</sub>、MnO、TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 而中部 MnO、Cu、Zn、Ba 含量明显升高(图2, 3), 显示沉积物受到海河和滦河物质影响(图5, 6)。

## 4 结论

(1) 根据 DLC70-1 孔常微量元素变化特征, 钻芯岩芯可划分为 6 层, 反映了末次间冰期(暖期)晚期以来渤海东部沉积物物源的变化和海面波动。

(2) 相关性分析发现  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{MnO}$ 、 $\text{TFe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Cu}$ 、 $\text{Pb}$ 、 $\text{Zn}$ 、 $\text{Cr}$ 、 $\text{Rb}$  与  $\text{TiO}_2$  具有较好的相关性, 表明受陆源物质输入和黄河来源的影响较大;  $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{Sr}$ 、 $\text{Ba}$  与大多数元素为负相关, 反映了滦河和海河来源;  $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{Sr}$ 、 $\text{Ba}$  与平均粒径相关性不明显, 反映了它们含量不受粒度的控制。

(3) 运用因子分析, 可将 DLC70-1 孔沉积物中化学成分分为以下几类: 其一以  $\text{MgO}$  为代表, 与黏土组分关系密切, 反映陆源细粒物质输入和黄河物质影响; 其二以  $\text{Sr}$  和  $\text{Ca}$  为代表, 指示海河物质影响; 其三以  $\text{Na}_2\text{O}$  和  $\text{Ba}$  为代表, 指示滦河物质影响。

(4)  $\text{Ba}/\text{Al}_2\text{O}_3$  与  $\text{Sr}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  与  $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$  离散图分析表明, DLC70-1 孔沉积物主要来源于黄河, 32.30~49.00 m 和 9.30~23.20 m 两个层段沉积物明显受到滦河和海河物质的影响。

## 参考文献 (References)

- 1 陈义兰, 吴永亭, 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: 161-232. [Department of Marine Geology, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences. Geology of the Bohai Sea [M]. Beijing: Science Press, 1985: 161-232.]
- 3 庄振业, 许卫东, 刘东生, 等. 渤海南部  $\text{S}_3$  孔晚第四纪海相地层的划分及环境演变[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1999, 19(2): 27-35. [Zhuang Zhenye, Xu Weidong, Liu Dongsheng, et al. Division and environmental evolution of Late Quaternary marine beds of  $\text{S}_3$  hole in the Bohai Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1999, 19(2): 27-35.]
- 4 吴建政, 孙洪光, 元发庆, 等. 辽东湾北部晚更新世中期以来的地层结构及环境演化[J]. 海洋科学进展, 2005, 23(4): 452-459. [Wu Jianzheng, Sun Hongguang, Qi Faqing, et al. Stratigraphic structure and environmental evolution in the northern Liaodong Bay since the middle stage of Late Pleistocene[J]. Advances in Marine Science, 2005, 23(4): 452-459.]
- 5 刘升发, 庄振业, 龙海燕. 渤海东部晚第四纪环境演变及潮流沙席沉积[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2008, 28(1): 25-31. [Liu Shengfa, Zhuang Zhenye, Long Haiyan. Environmental evolution and tidal sand sheet sedimentation in Late Quaternary in the East Bohai Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2008, 28(1): 25-31.]

- 6 夏东兴, 刘振夏, 王揆洋, 等. 渤海东部更新世末期以来的沉积环境[J]. 海洋学报, 1995, 17(2): 86-92. [Xia Dongxing, Liu Zhenxia, Wang Kuiyang, et al. Depositional environment in the eastern Bohai Sea since the Latest Pleistocene last glacial stage[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1995, 17(2): 86-92.]
- 7 Yao Zhengquan, Shi Xuefa, Liu Qingsong, et al. Paleomagnetic and astronomical dating of sediment core BH08 from the Bohai Sea, China: implications for glacial - interglacial sedimentation[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2014, 393: 90-101.
- 8 张现荣, 李军, 窦衍光, 等. 辽东湾东南部海域柱状沉积物稀土元素地球化学特征与物源识别[J]. 沉积学报, 2014, 32(4): 684-691. [Zhang Xianrong, Li Jun, Dou Yanguang, et al. REE Geochemical characteristics and provenance discrimination of core LDC30 in the southeastern part of Liaodong Bay[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2014, 32(4): 684-691.]
- 9 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.]
- 10 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. [Lü 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.]
- 11 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.]
- 12 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 & Quaternary Geology, 2010, 30(4): 123-130.]
- 13 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. [Lan Xianhong, Li Rihui, Zhang Zhixun, et al. Element geochemistry records of surface sediments in the east of the Bohai Sea and the Northern Yellow Sea[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2015, 36(6): 718-728.]
- 14 Zhang Chaosheng, Wang Lijun, Li Guosheng, et al. Grain size effect on multi-element concentrations in sediments from the intertidal flats of Bohai Bay, China[J]. Applied Geochemistry, 2002, 17(1): 59-68.
- 15 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.]
- 16 中华人民共和国国土资源部. DZ/T 0247-2009 1:1000000 海洋



- 区域地质调查规范[S].北京:中国标准出版社,2009:1-48. [Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. DZ/T 0247-2009 Specifications for regional marine geological survey (scale: 1:1 000 000) [S]. Beijing: Standards Press of China, 2009: 1-48.]
- 17 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: 1-203. [Zhao Yiyang, Yan Mingcai. Geochemistry of Sediments of the China Shelf Sea [M]. Beijing: Science Press, 1994: 1-203.]
- 18 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 tracing of the Yellow River sediments diffusion in the Bohai Bay [J]. Advances in Marine Science, 2015, 33(2): 246-256.]
- 19 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 Fugen. The relations between element distribution in sediments and environments in Luanhe estuary [J]. Marine Science Bulletin, 1983, 2(2): 60-70.]
- 20 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, 7(3): 15-18. [Zhang Yifeng, Li Fengxin. The characteristics of material component and its resources in Huanghe (Yellow) River, Luanhe River [J]. Marine Sciences, 1983, 7(3): 15-18.]
- 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, 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 Xiangui. 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 李文勤. 黄、渤海表层沉积物中钙质超微化石分布规律与黄海暖流流路[J]. 黄渤海海洋, 1991, 9(1): 7-11. [Li Wenqin. The distributive law of calcareous nannofossil in the surface sediments from the Huanghai Sea and the Bohai Sea and flow way of Warm Current in the Huanghai Sea [J]. Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas, 1991, 9(1): 7-11.]
- 27 秦亚超, 李日辉, 姜学钧. 黄海中北部和渤海东部表层沉积物轻矿物特征及其指示意义[J]. 第四纪研究, 2014, 34(3): 611-622. [Qin Yachao, Li Rihui, Jiang Xuejun. Characteristics of light minerals in the surficial sediments and their implications in the north central Yellow and eastern Bohai Seas [J]. Quaternary Sciences, 2014, 34(3): 611-622.]
- 28 潘保田, 王均平, 高红山, 等. 河南扣马黄河最高级阶地古地磁年代及其对黄河贯通时代的指示[J]. 科学通报, 2005, 50(3): 255-261. [Pan Baotian, Wang Junping, Gao Hongshan, et al. Paleomagnetic dating of the topmost terrace in Kouma, Henan and its indication to the Yellow River's running through Sanmen Gorges [J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(3): 255-261.]
- 29 潘保田, 王均平, 高红山, 等. 从三门峡黄河阶地的年代看黄河何时东流入海[J]. 自然科学进展, 2005, 15(6): 700-705. [Pan Baotian, Wang Junping, Gao Hongshan, et al. The age of the terrace of the Yellow River in Sanmenxia area and its indication to the time of the Yellow River running to the eastern China Sea [J]. Advance in Natural Science, 2005, 15(6): 700-705.]
- 30 Liu J P, Milliman J D, Gao S. The Shandong mud wedge and post-glacial sediment accumulation in the Yellow Sea [J]. Geo-Marine Letters, 2001, 21(4): 212-218.
- 31 薛春汀, 周永青, 朱雄华. 晚更新世末至公元前7世纪的黄河流向和黄河三角洲[J]. 海洋学报, 2004, 26(1): 48-61. [Xue Chunting, Zhou Yongqing, Zhu Xionghua. The Huanghe River course and delta from end of Late Pleistocene to the 7th century BC [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2004, 26(1): 48-61.]
- 32 蓝先洪, 张志珣, 郭兴伟, 等. 东海陆架 SFK-1 孔微量元素地球化学特征与物源意义[J]. 现代地质, 2013, 27(6): 1323-1331. [Lan Xianhong, Zhang Zhixun, Guo Xingwei, et al. Geochemical characteristics of trace elements of sediments from drillhole SFK-1 in the continental shelf of the East China Sea and the source implication [J]. Geoscience, 2013, 27(6): 1323-1331.]

## Geochemical Characteristics of Sediments in the Eastern Bohai Sea since Late Pleistocene

LAN XianHong<sup>1,2</sup> QIN YaChao<sup>1,2</sup> WANG ZhongBo<sup>1,2</sup> CHEN XiaoHui<sup>1,2</sup>  
MI BeiBei<sup>1,2</sup> HUANG Long<sup>1,2</sup>

- (1. Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resource and Environmental Geology, Ministry of Land and Resources, Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao, Shandong 266071, China ;  
2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao, Shandong 266071, China)

**Abstract:** 157 sediment samples were collected from Core DLC70-1 in the eastern Bohai Sea. These samples were analyzed for major and trace elements, grain size parameters, C<sup>14</sup> dating and OSL dating with the purpose of studying the geochemical characteristics of elements and controlling factors in the eastern Bohai Sea since Late Pleistocene. The results show that sediment sources and depositional environments of the study area remained relatively stable since Late Pleistocene. According to the changing law of element contents, the sediments from Core DLC70-1 can be divided into six layers, reflecting the fluctuation of sea level and the change of sediment sources in Bohai Sea since the late of the last interglacial cycle (warm period). The Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO, TiO<sub>2</sub>, Cu, Zn, Pb, Cr and Rb elements were positively correlated with the fine-grained sediments, and SiO<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>O was positively correlated with coarse-grained sediments. There was no significant positive or negative correlation between K<sub>2</sub>O, Sr and Ba distributions and grain size of sediment. Three groups representing respectively by Mg, Sr and Ba can be derived from R-model factor analysis, corresponding to the impact of the input of fine-grained terrigenous sediments and Yellow River sediment, Haihe River sediments, Luanhe River sediments. Combined with scatter diagram of Ba/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> vs. Sr/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> vs. K<sub>2</sub>O/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> were drawn to reveal the source of sediments from Core DLC70-1. The results suggest that the material sources of the core mainly come from the Yellow River, but the sediments in the upper-middle parts of the core were apparently influenced by materials from the Luanhe River and Haihe River.

**Key words:** eastern Bohai Sea; geochemistry; sediment; Late Pleistocene