

渤海西部晚更新世以来沉积地球化学研究

蓝先洪^{1,2,3}, 李日辉^{1,2,3}, 陈晓辉^{1,2,3}, 秦亚超^{1,2,3}, 王中波^{1,2,3}, 密蓓蓓^{1,2,3}

(1. 中国地质调查局 青岛海洋地质研究所, 山东 青岛 266071;

2. 国土资源部 海洋环境与油气地质重点实验室, 山东 青岛 266071;

3. 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, 山东 青岛 266071)

摘要:渤海西部 TJC-1 孔 51.50 m 以上 120 个沉积物样品化学组分、粒度及测年分析结果表明, TJC-1 孔 51.50 m 以上为晚更新世以来沉积, 可划分为 5 个沉积单元; SiO_2 和 Na_2O 与粗粒沉积物呈明显正相关, Al_2O_3 , TFe_2O_3 , MgO , TiO_2 , Cu , Zn , Cr , Co , Ga , Rb 和 V 等元素与细粒沉积物呈显著正相关, Sr , Ba 和 Zr 分布与沉积物粒度无明显正或负的相关性。R-型因子分析显示, MgO 和 Na_2O 分别代表陆源细粒物质输入(黄河与海河物质)和滦河物质的影响。 $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ 比值与 Sr/Cu 比值, Ba/Zn 比值与 $\text{K}_2\text{O}/\text{MgO}$ 比值离散图分析揭示了 TJC-1 孔的物质来源, 该孔沉积物主要来源于黄河和海河, 该孔下部 30.50~51.50 m 和中下部 25.00~30.50 m 沉积物以滦河物质来源为主。

关键词: 渤海西部; 晚更新世; 沉积物; 地球化学

中图分类号: P736.4

文献标识码: A

文章编号: 1671-6647(2018)01-0067-12

doi: 10.3969/j.issn.1671-6647.2018.01.006

在渤海地区围绕古环境和地层结构等问题已有一些研究, 前人对渤海地区沉积环境、古环境演化和海平面变化等方面已经有了较为深入的认识^[1-7]。渤海 Bc-1 孔从距今 163 ka BP 以来, 形成了 7 期海相地层和介于海相层间的陆相地层, 发生了 7 次海侵记录^[2]; 渤海湾西岸 BQ1 孔 140 ka BP 以来发育有 3 个海相层及相间的陆相层^[6]; 依据生物分布特征渤海中部 BH08 孔岩心划分了 8 个陆相地层和 9 个滨海-浅海沉积环境^[7]。渤海西部泥质区柱状沉积物在化学成分上与北部泥质区黄河物质有一定差异, 说明受黄河物质影响较弱, 而南部泥质区主要受黄河物质控制^[9]。目前对渤海西部沉积物化学组成多集中于表层沉积物^[5,10-11]和柱状沉积物研究^[9,12], 而依据钻孔岩心主要开展了晚更新世以来的地层与沉积环境、海平面波动研究^[2-3,5-7], 对该地区缺乏系统的晚更新世以来沉积地球化学特征及物源研究。本文以取自渤海西部 TJC-1 孔 51.50 m 以上岩心的样品为分析材料, 研究和分析了渤海西部晚更新世以来的化学组分分布与物源关系。

1 样品采集与测试方法

1.1 样品采集

中国地质调查局青岛海洋地质研究所于 2013-10 在渤海西部海域开展了地质浅钻取样, 钻孔编号为 TJC-1, 孔深 200.20 m, 位置如图 1 所示。样品采集按照《1:1 000 000 海洋区域地质调查规范》^[13]要求进行

收稿日期: 2017-01-05

资助项目: 国家自然科学基金——中国东部海岸带-陆架区晚更新世以来沉积体系演化及高分辨率气候-环境变化的沉积记录(41330964)

和北黄海中部晚第四纪以来古河道的物源演变及其对海平面变化的响应(41406077); 中国地质调查局海洋地质调查项目——1:100 万天津幅海洋区域地质调查(1212011220113), 1:25 万锦西、营口幅海洋区域地质调查(GZH 201400205)和东部海域百万海洋区域地质成果集成与应用研究(DD20160137)

作者简介: 蓝先洪(1958-), 男, 浙江遂昌人, 研究员, 主要从事海洋地质与沉积地球化学方面研究。E-mail: lanxh@qingdaonews.com

(陈 靖 编辑)

质量控制。TJC-1 孔 51.50 m 以下沉积物的微体古生物未鉴定出任何海相物种,综合岩性、沉积学、微体古生物、测年等信息^①,本文仅研究 51.50 m 以上晚更新世以来沉积地球化学。对 51.50 m 不同层位的 TJC-1 孔岩心共采集了 120 个样品(大致按 0.30~0.50 m 的间隔)用于化学元素分析。

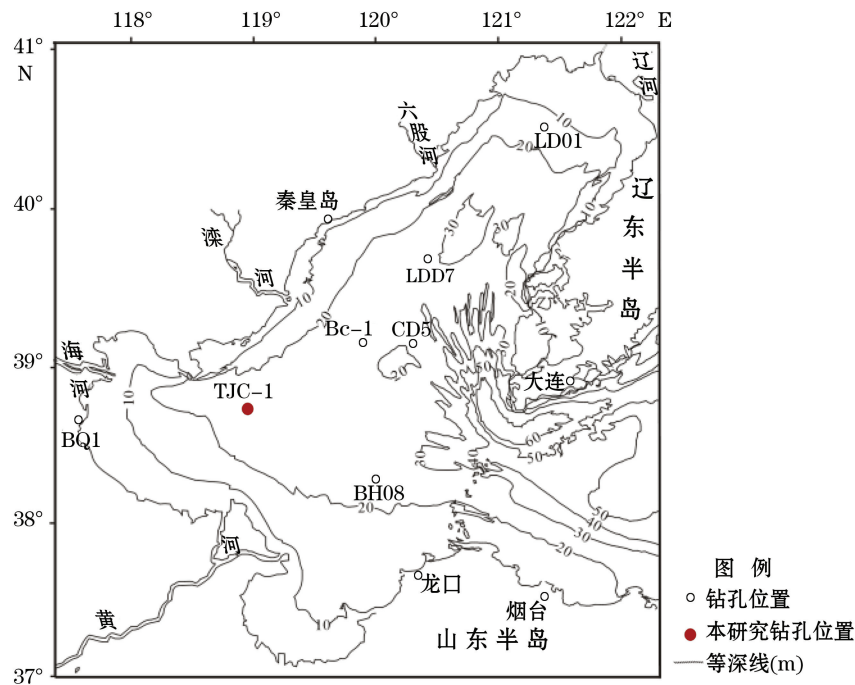


图 1 渤海西部 TJC-1 钻孔位置^[14]

Fig.1 Location of core TJC-1 in the western Bohai Sea^[14]

1.2 测试方法

实验分析前将要使用的离心管、量筒、玻璃棒等用稀硝酸(体积比浓度 1:6)在室温下浸泡一周,用超纯水彻底洗净备用。60 °C 烘干样品,研磨至 200 目备用。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 SiO₂, Al₂O₃, TFe₂O₃, CaO, K₂O, Na₂O, MgO, TiO₂, P₂O₅, MnO, Cu, Zn, Pb, Sr, Ba, Zr 等质量分数;Cr, Co, Li, V, Rb, Ga 等微量元素采用等离子质谱法(ICP-MS)测定;有机碳(Corg)用容量法(VOL)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,元素分析结果误差均小于 5%,数据可靠。化学分析实验在中国地质调查局青岛海洋地质研究所测试中心完成。

称取烘干样品,加双氧水除去有机质,反应完全后加入醋酸,除去生物碳酸盐沉积物,用 Mastersizer 2000 型激光粒度分析仪在中国地质调查局青岛海洋地质研究所测试中心完成测量。对 TJC-1 孔岩心 51.50 m 以上按照 40 cm 间隔共取 122 个样品进行了粒度分析。分析结果间隔为 1/4 Φ,待测样品质量不低于 50 g。

由美国伍兹霍尔海洋研究所 AMC¹⁴C 实验室对 TJC-1 孔上部 9 个样品进行了 AMS¹⁴C 年代测试,测试材料为混合底栖有孔虫和泥炭层,文中均为未校正年龄(表 1)。由中国科学院兰州分院分析测试中心盐湖化学分析测试部采用光释光(OSL)对 7 个样品(岩性为细砂)作了年代测定(表 1)。

① 中国地质调查局青岛海洋地质研究所. 1:100 万天津幅海洋区域地质调查综合研究报告. 2016.

表 1 晚更新世以来 TJC-1 孔年代数据
Table 1 Age data for core TJC-1 since Late Pleistocene

深度/m	测试材料	AMS ^{14}C 年龄/a BP	OSL 年龄/ka BP
0.50~0.52	混合底栖有孔虫	4 740±30	
0.90~0.92	混合底栖有孔虫	5 200±30	
1.80~1.82	混合底栖有孔虫	5 800±30	
15.58~15.60	泥炭层	8 630±40	
17.88~17.90	混合底栖有孔虫	20 730±70	
18.54~18.56	混合底栖有孔虫	36 020±280	
19.36~19.38	混合底栖有孔虫	33 050±210	
21.08~21.10	混合底栖有孔虫	34 130±240	
27.04~27.06	泥炭层	>43 500	
1.50	细砂		10.1±1.0
4.74	细砂		11.3±0.9
10.64	细砂		11.0±1.0
38.10	细砂		88±8
41.50	细砂		92±9
46.64	细砂		96±12
50.66	细砂		104±11

注:“空白”表示无数据

2 结果与讨论

2.1 常微量元素质量分数变化

据微体古生物(识别出了 3 次海侵记录,分别对应 MIS5 期、MIS3 期早中期、MIS1 早中期)、测年资料(表 1, 上部和下部主要采用 OSL 测年数据,中部则依据 AMS ^{14}C 测年数据)等将 TJC-1 孔 51.50 m 以上岩心自下而上划分为 5 个部分: 30.50 m 以深(30.50~51.50 m)为晚更新世早期里斯-玉木间冰期浅海-滨海-陆相交替沉积; 25.00~30.50 m 为晚更新世早玉木冰期陆相沉积; 17.70~25.00 m 为晚更新世玉木冰期中亚间冰期滨海沉积; 2.10~17.70 m 为晚玉木冰期陆相沉积; 2.10 m 以上为全新世冰后期滨海-浅海沉积(图 2)。

TJC-1 孔常微量元素垂向分布质量分数有较大变化(图 2 和图 3), 其中 Al_2O_3 , TFe_2O_3 , CaO , MgO , TiO_2 , MnO , Corg 质量分数受到粒度变化的控制, 质量分数变化与平均粒径变化相似; 粒度对 Na_2O 质量分数变化影响较小, Na_2O 质量分数与平均粒径变化不一致, 而粒度对 Sr 和 Ba 质量分数影响上部小于下部。 SiO_2 质量分数变化与平均粒径变化相反。

1) 深度 30.50~51.50 m: 常微量元素质量分数波动较大, 下部和上部 Al_2O_3 , MgO , TiO_2 , TFe_2O_3 , P_2O_5 , CaO , MnO , Corg , Cu , Pb , Zn , Cr , Co , Li , Rb , V , Ga 质量分数较高, SiO_2 , Na_2O 质量分数则较低。 中部 Al_2O_3 , MgO , TiO_2 , CaO , TFe_2O_3 等元素质量分数相对较低, SiO_2 , Na_2O , Sr , Ba 质量分数变化则相反, K_2O 质量分数总体较高, 从下向上质量分数有降低趋势; Zr 质量分数变化波动较小, 向上质量分数具有逐渐降低的趋势。

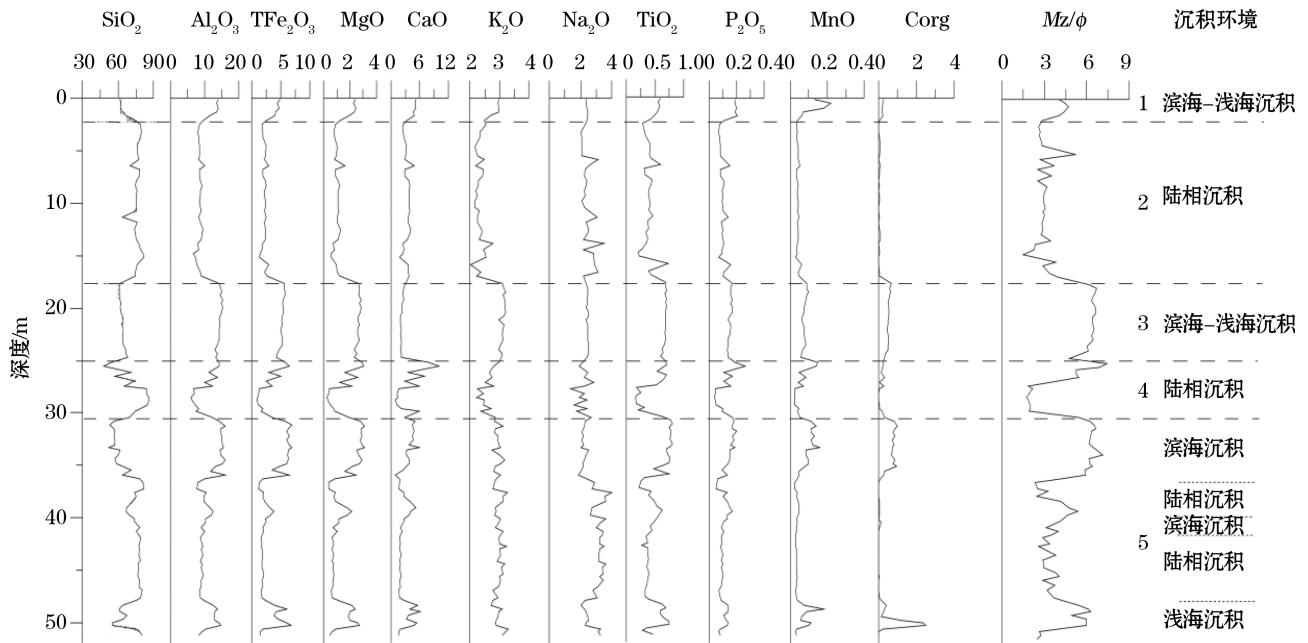
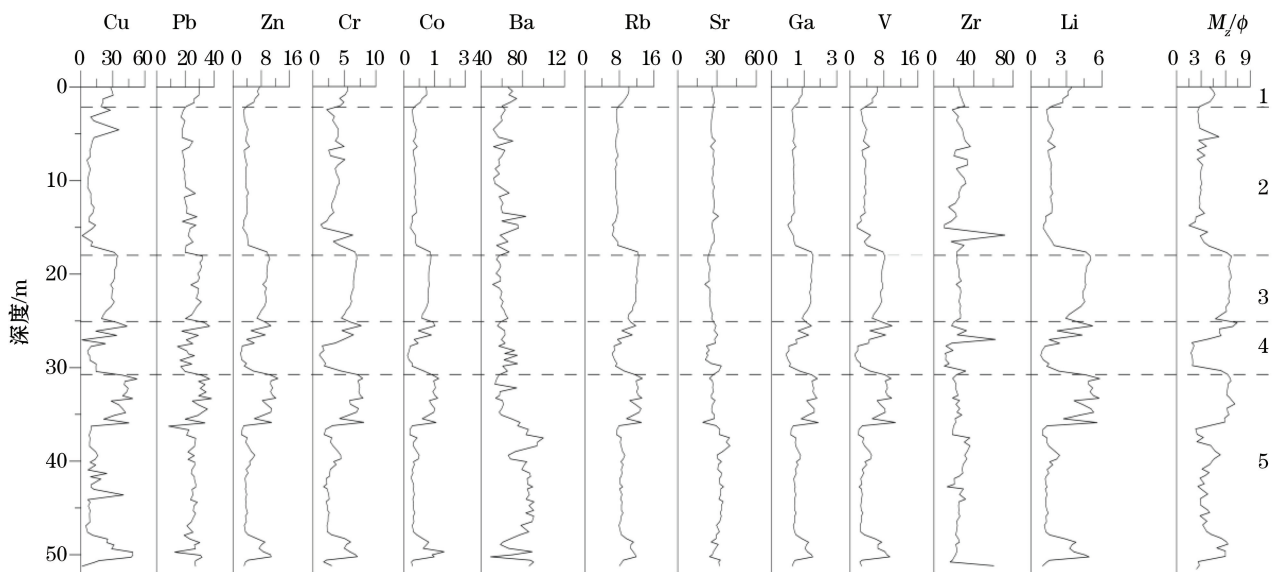


图 2 晚更新世以来 TJC-1 孔平均粒径与常量元素垂向分布(%)

Fig.2 Depth profiles of mean grain-size and major elements of core TJC-1 in the western Bohai Sea since Late Pleistocene(%)



注:1~5 同图 2 中沉积环境分类

图 3 渤海西部 TJC-1 孔晚更新世以来微量元素质量分数($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)垂向分布

Fig.3 Depth profiles of trace elements in core TJC-1 in the western Bohai Sea since Late Pleistocene

2) 深度 25.00~30.50 m: 以 SiO_2 , Na_2O 质量分数较高, Al_2O_3 , MgO , K_2O , TFe_2O_3 , TiO_2 , CaO , P_2O_5 , MnO , Corg , Cu , Pb , Zn , Cr , Co , Li , Rb , V , Ga 质量分数较低为特征。中部 Al_2O_3 , MgO , TiO_2 , TFe_2O_3 , CaO , Cu , Pb , Zn , Cr , Co , Li , Rb , V , Ga 等元素质量分数降至较低值, 然后逐渐向上升高, SiO_2 , Ba 质量分数变化则相反, Na_2O 质量分数变化趋势性不强。Sr 元素质量分数变化仅底部相反, 下部和上部变化一致; Zr 质量分数较高值在中上部, 然后向上质量分数下降。

3)深度 17.70~25.00 m:以 SiO_2 , CaO 质量分数较低, Al_2O_3 , MgO , K_2O , TFe_2O_3 , TiO_2 , P_2O_5 , MnO , Corg , Cu , Pb , Zn , Cr , Co , Li , Rb , V , Ga 质量分数较高为特征。 SiO_2 质量分数底部明显升高与 CaO 质量分数快速下降后,波动较小; Sr , Ba , Zr 质量分数变化波动较小,向上质量分数具有降低趋势。

4)深度 2.10~17.70 m:以 SiO_2 , Na_2O 质量分数较高, Al_2O_3 , MgO , K_2O , TFe_2O_3 , TiO_2 , P_2O_5 , MnO , Corg , Cu , Pb , Zn , Cr , Co , Li , Rb , V , Ga 质量分数较低为特征。 Al_2O_3 , MgO , K_2O , TFe_2O_3 , TiO_2 , P_2O_5 , Corg , Cu , Pb , Zn , Cr , Co , Li , Rb , V , Ga 质量分数处于较低值波动,底部质量分数突然下降; SiO_2 质量分数处于较高值,底部 SiO_2 和 Na_2O 质量分数明显升高; Sr , Ba , Zr 元素下部质量分数较高, CaO 和 MnO 质量分数变化不大。

5)深度 2.10 m 以浅:以 SiO_2 , Na_2O 质量分数较低, Al_2O_3 , MgO , K_2O , TFe_2O_3 , TiO_2 , P_2O_5 , CaO , MnO , Corg , Cu , Pb , Zn , Cr , Co , Li , Rb , V , Ga 质量分数较高为特征。 Al_2O_3 , MgO , K_2O , TFe_2O_3 , TiO_2 , P_2O_5 , MnO , Corg , Cu , Pb , Zn , Cr , Co , Li , Rb , V , Ga 上部质量分数较高,呈现迅速下降到较低质量分数; SiO_2 质量分数上部较低,迅速升至较高值; Sr , Ba 元素中部质量分数较高, Zr 元素底部质量分数较高,向上质量分数降低。

2.2 物质来源分析

2.2.1 渤海西部沉积物潜在源区

TJC-1 孔位于渤海西部,沉积物可能的物源主要有黄河、滦河以及海河。黄河起源于青藏高原东北部,流经黄土高原和华北,在山东东营流入渤海^[15]。黄河泥沙的主要来源于黄土高原,由于黄土高原独特的自然地理条件,以 K , Ca , Al , Fe , Mg , Ti 等元素高质量分数为特征^[9]。

滦河是渤海湾地区除黄河外的第 2 条多沙性河流,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 $1\Phi\sim 3\Phi$ 的中砂和细砂^[12]。滦河发源于巴延图古尔山,流经内蒙高原和燕山山地,其水系发育,燕山地区侵入岩以酸偏碱性为主(Ca 质量分数低, Na 或 K 质量分数高)^[15],造成滦河沉积物中 Na , Si , Sr 元素质量分数高, Ca 质量分数低的特点^[9]。

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 $5\sim 20\ \mu\text{m}$ ^[16-18]。海河西起太行山,南界黄河,汇合了较多的河流,分别归入南运河、子牙河、大清河、永定河和北运河五大河流,最后全部汇入海河,并在渤海湾西岸的天津入海^[15]。该水系沉积物继承了太行山地区源岩元素的特征,以 Zn 和 Cu 元素质量分数高为特征^[9]。

2.2.2 因子分析

为解释该区元素物质的来源和控制分布的主要因素,采用 SPSS 软件对 TJC-1 孔 51.50 m 以上岩心 120 个样品 23 个元素进行 R-型因子分析。结果表明,前 4 个因子获得了原始数据全部信息的 91.66%(表 2),表明分析结果较为理想,代表了研究区样品的数据变化。

1)因子 1 是影响该孔沉积物元素变化的最重要地质因素,方差贡献占总方差贡献的 62.47%。该组合特点是变量 Al_2O_3 , TFe_2O_3 , MgO , TiO_2 , P_2O_5 , Corg , Zn , Cr , Cu , Co , Rb , V , Ga 和 Li 等具有较高的正载荷, MnO , K_2O 和 Pb 等具有中等正载荷, SiO_2 具有较高的负载荷。该组合高值区主要分布在钻孔层 1、层 3 和层 5 上部和下部;该元素组合与 SiO_2 呈明显负相关关系, Al , Mg , Ti , Fe , Zn , Co , Rb , Ga , V , Cr 和 Li 等元素含量变化呈强的正相关关系,相关系数全部大于 0.90(表 3),这些组分主要赋存于沉积物颗粒较细的组分中^[19],此类相关性较高的元素组合代表了黄河源和海河源物质的影响^[9,20]。

2)因子 2 组合中 Na_2O , Ba , Sr 具有较高的正载荷,而 K_2O 具有中等正载荷;因子 2 方差贡献占总方差贡献的 14.37%。该组合高值区主要分布在钻孔层 5 中部和下部。 Na , Ba , Sr 呈明显正相关(相关系数大于 0.74,见表 3), Na , Ba , Sr 与沉积物平均粒径关系除层 5 段呈明显负相关外,其他层段相关性较弱(图 2、图 3), Sr , Ba 和 Na 组合代表了滦河源物质的影响^[9,21]。

表 2 晚更新世以来 TJC-1 孔沉积物 R-型主因子负荷矩阵

Table 2 R-mode rotated factor matrix of sediments from core TJC70-1 since Late Pleistocene

元 素	因子 1	因子 2	因子 3	因子 4
SiO ₂	-0.90	0.13	-0.39	0.02
Al ₂ O ₃	0.97	-0.07	0.12	0.03
TFe ₂ O ₃	0.95	-0.23	0.19	0.02
CaO	0.25	-0.16	0.94	0.01
MgO	0.92	-0.24	0.23	0.05
K ₂ O	0.67	0.62	-0.23	-0.13
Na ₂ O	-0.19	0.88	-0.19	0.23
TiO ₂	0.91	-0.13	0.19	0.31
P ₂ O ₅	0.76	-0.02	0.52	0.21
MnO	0.73	-0.14	0.48	-0.07
Corg	0.75	-0.21	0.01	-0.15
Cu	0.87	-0.18	0.15	-0.25
Pb	0.74	0.31	0.18	-0.11
Zn	0.97	-0.17	0.14	-0.04
Cr	0.89	-0.31	0.20	0.23
Co	0.94	-0.21	0.18	-0.02
Ba	-0.27	0.86	-0.23	-0.12
Rb	0.99	-0.03	-0.01	-0.07
Sr	-0.33	0.84	0.22	0.11
Ga	0.98	-0.12	0.05	0.02
V	0.94	-0.24	0.19	0.07
Zr	-0.01	0.12	0.03	0.97
Li	0.95	-0.25	0.11	-0.05
方差贡献/%	62.47	14.37	8.94	5.88
累计方差/%	62.47	76.84	85.78	91.66

3) 因子 3 的特征元素为 CaO, 具有较高的正载荷, 因子 3 方差贡献占总方差贡献的 8.94%。该组合高值区主要分布钻孔层 1、层 4 上部和层 5 上部和下部。CaO 与 P, Mn 呈较明显正相关(相关系数大于 0.60, 见表 3), 层 4 和层 5 段 CaO 与沉积物平均粒径呈明显正相关, 其他层段相关性较弱(图 2)。代表了黄河源和海河源物质的影响^[9,20]。

4) 因子 4 的特征元素为 Zr, 具有较高的正载荷, 因子 4 方差贡献占总方差贡献的 5.88%。该组合高值区主要分布钻孔层 2 底部、层 4 中部和层 5 底部。Zr 元素与其他元素相关性弱(表 3), 与沉积物平均粒度相关性也不强(图 3)。

表 3 晚更新世以来渤海西部 TJC-1 孔沉积物中元素相关关系
Table 3 Correlation coefficients between elements in core TJC-1 from the western Bohai Seas since Late Pleistocene

元 素	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TFe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	Corg	Cu	Pb	Zn	Cr	Co	Ba	Rb	Sr	Ga	V	Zr	Li	
SiO ₂	1.00																							
Al ₂ O ₃	-0.94 **	1.00																						
TFe ₂ O ₃	-0.96 **	0.96 **	1.00																					
CaO	-0.62 **	0.37 **	0.45 **	1.00																				
MgO	-0.96 **	0.97 **	0.98 **	0.48 **	1.00																			
K ₂ O	-0.43 **	0.61 **	0.44 **	-0.14	0.44 **	1.00																		
Na ₂ O	0.34 **	-0.29 **	-0.42 **	-0.36 **	-0.43 **	0.39 **	1.00																	
TiO ₂	-0.92 **	0.92 **	0.94 **	0.44 **	0.93 **	0.43 **	-0.25 **	1.00																
P ₂ O ₅	-0.89 **	0.82 **	0.82 **	0.64 **	0.86 **	0.38 **	-0.19 *	0.84 **	1.00															
MnO	-0.84 **	0.77 **	0.81 **	0.60 **	0.80 **	0.32 **	-0.38 **	0.73 **	0.78 **	1.00														
Corg	-0.72 **	0.70 **	0.76 **	0.28 **	0.70 **	0.32 **	-0.32 **	0.69 **	0.46 **	0.56 **	1.00													
Cu	-0.85 **	0.85 **	0.88 **	0.40 **	0.85 **	0.44 **	-0.41 **	0.77 **	0.66 **	0.73 **	0.77 **	1.00												
Pb	-0.67 **	0.66 **	0.66 **	0.27 **	0.61 **	0.61 **	0.11	0.62 **	0.64 **	0.63 **	0.45 **	0.61 **	1.00											
Zn	-0.95 **	0.96 **	0.99 **	0.40 **	0.96 **	0.51 **	-0.37 **	0.93 **	0.79 **	0.79 **	0.77 **	0.90 **	0.70 **	1.00										
Cr	-0.92 **	0.90 **	0.95 **	0.46 **	0.94 **	0.31 **	-0.42 **	0.96 **	0.82 **	0.76 **	0.69 **	0.80 **	0.57 **	0.94 **	1.00									
Co	-0.94 **	0.94 **	0.97 **	0.45 **	0.94 **	0.44 **	-0.40 **	0.91 **	0.79 **	0.79 **	0.77 **	0.90 **	0.61 **	0.97 **	0.93 **	1.00								
Ba	0.45 **	-0.37 **	-0.50 **	-0.41 **	-0.54 **	0.41 **	0.79 **	-0.44 **	-0.37 **	-0.41 **	-0.34 **	-0.36 **	-0.03	-0.44 **	-0.58 **	-0.44 **	1.00							
Rb	-0.89 **	0.96 **	0.94 **	0.25 **	0.91 **	0.68 **	-0.25 **	0.87 **	0.72 **	0.72 **	0.73 **	0.87 **	0.71 **	0.97 **	0.87 **	0.93 **	-0.29 **	1.00						
Sr	0.31 **	-0.33 **	-0.46 **	0.02	-0.45 **	0.24 **	0.75 **	-0.32 **	-0.19 **	-0.33 **	-0.36 **	-0.40 **	-0.07	-0.43 **	0.47 **	-0.42 **	0.74 **	0.33 **	1.00					
Ga	-0.92 **	0.97 **	0.97 **	0.32 **	0.95 **	0.56 **	-0.31 **	0.93 **	0.76 **	0.73 **	0.74 **	0.88 **	0.68 **	0.99 **	0.93 **	0.96 **	-0.40 **	0.98 **	-0.39 **	1.00				
V	-0.95 **	0.95 **	0.98 **	0.46 **	0.96 **	0.42 **	-0.41 **	0.95 **	0.81 **	0.78 **	0.75 **	0.88 **	0.63 **	0.98 **	0.97 **	0.98 **	-0.49 **	0.93 **	-0.45 **	0.97 **	1.00			
Zr	0.00	0.00	-0.02	0.03	0.00	-0.06	0.29 **	0.28 **	0.18	-0.04	-0.12	-0.23 *	-0.06	-0.06	0.19 *	-0.04	0.01	-0.08	0.21 *	-0.01	0.04	1.00		
Li	-0.93 **	0.95 **	0.98 **	0.38 **	0.96 **	0.46 **	-0.43 **	0.91 **	0.77 **	0.77 **	0.75 **	0.89 **	0.67 **	0.99 **	0.94 **	0.96 **	-0.51 **	0.96 **	-0.50 **	0.98 **	0.98 **	-0.08	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

2.2.3 散点图

依据黄河、滦河和海河沉积物中元素特征(表 4),黄河 Si, Mg, K 等元素和滦河 Na, Ba, Sr 等元素质量分数明显不同于海河沉积物^[9]。本文采用元素 $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ 比值与 Sr/Cu 比值, Ba/Zn 比值与 $\text{K}_2\text{O}/\text{MgO}$ 比值用于区分黄河、滦河和海河沉积物。元素 $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ 比值与 Sr/Cu 比值离散图可以清晰地区分黄河、滦河和海河河流沉积物(图 4),TJC-1 孔 51.50 m 以上岩心样品投点均在黄河、滦河和海河河流沉积物范围之内,说明 3 条河流对 TJC-1 沉积物物质均有影响。顶部(0~2.10 m)和中上部(17.70~25.00 m)主要落于现代黄河和海河样品分布的区域,下部(30.50~51.50 m)样品落于现代滦河样品区域,上部(2.10~17.70 m)和中下部(25.00~30.50 m)样品投点分布于现代黄河、海河与滦河样品之间,表明该孔沉积物主要来源于黄河和海河物质,而下部部分物质主要来源于滦河。

表 4 黄河、海河和滦河现代表层沉积物部分元素质量分数平均值^[9]

Table 4 Average contents of some elements in sediments from the Yellow River, Haihe River and Luanhe River^[9]

来源区域	元 素								
	$w_{\text{SiO}_2}/\%$	$w_{\text{MgO}}/\%$	$w_{\text{K}_2\text{O}}/\%$	$w_{\text{Na}_2\text{O}}/\%$	$w_{\text{TiO}_2}/\%$	$w_{\text{Sr}}/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$w_{\text{Ba}}/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$w_{\text{Cu}}/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$w_{\text{Zn}}/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
黄河	53.5	2.60	2.61	1.98	0.61	204	476	27	78
海河	57.7	1.91	2.19	1.99	0.57	313	675	41	139
滦河	74.9	0.80	2.35	3.19	0.22	376	817	11	36

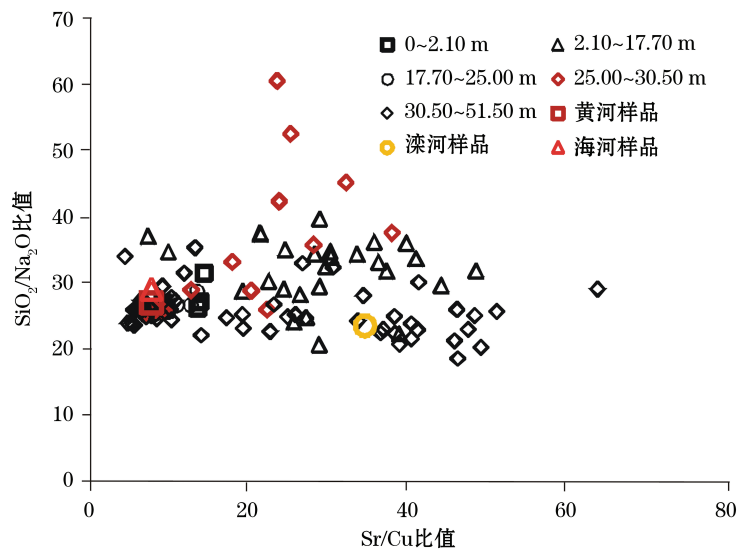
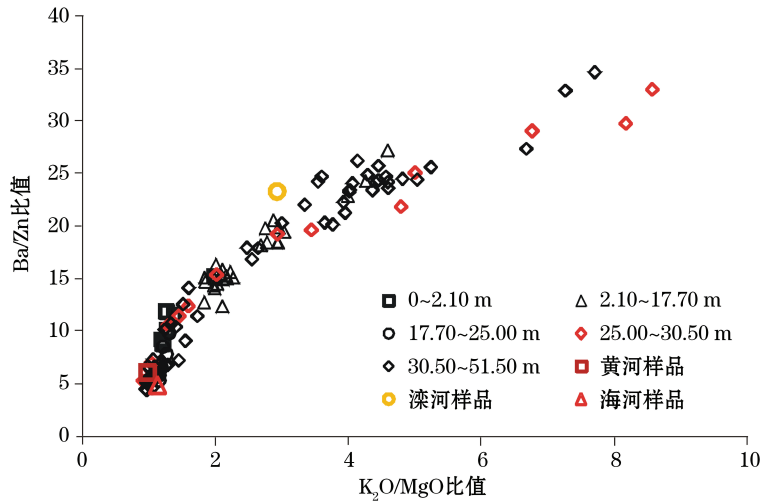


图 4 沉积物 $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ 比值与 Sr/Cu 比值离散图

Fig.4 The plot of $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ vs Sr/Cu

元素 Ba/Zn 比值与 $\text{K}_2\text{O}/\text{MgO}$ 比值也同样显示 TJC-1 孔物质受到黄河、滦河和海河物质的影响(图 5)。TJC-1 孔顶部和中上部样品大部分接近于黄河和海河样品分布区域,中下部和下部样品大部分在滦河样品区域分布。图 4 和图 5 反映了 TJC-1 孔上部沉积物来源主要为黄河和海河物质,下部其影响有所减弱,物质来源以滦河物质为主。

图 5 元素 Ba/Zn 比值与 K_2O/MgO 比值离散图Fig.5 The plot of Ba/Zn vs K_2O/MgO

2.3 渤海西部沉积物物质来源

对渤海西部沉积物的物质来源研究,近年来已取得了一些认识和成果^[2,9,18,20,22-23]。渤海作为我国半封闭的内海,直接接受巨量的黄河泥沙,渤海南部沉积物主要为黄河物质向西、向北和向南运移到渤海湾、渤海中部和渤海南部^[2,19]。在渤海西部 $118^{\circ}54'E$ 左右,南北向断面的表层沉积物地球化学特征南北差异明显(以 B94 站为界),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^[20]。渤海湾西部表层沉积物悬移组分元素丰度特征反映出渤海湾西部表层沉积物悬移组分的物源主要与黄河源区黄土高原的黄土有关^[21]。渤海西部泥质区中西南部与中部泥形成于约 6 000 a BP,黄河物质影响较强;而北部泥自早全新世之前便已开始形成,且主要沉积于高海面之前,受滦河物质作用相对较强^[9]。渤海湾北部表层沉积物黏土矿物组合特征显示北部沿岸为滦河-海河物源区,中部和东部为黄河-海河物源区,西部沿岸为海河物源区^[23]。

1)渤海西部 TJC-1 孔深度 30.50~51.50 m 为晚更新世早期里斯-玉木间冰期滨海-陆相-浅海沉积,50.66 m 和 38.10 m 处 OSL 年代分别为 (104 ± 11) ka BP 和 (88 ± 8) ka BP(图 2)。沉积物底部为灰褐色细-中砂,岩性较为均一,下部为灰黑色黏土至黏土与粉砂互层;中部为灰褐色细砂、中砂;上部为黄棕色粉砂、黏土质粉砂;顶部为灰黑色、深灰黑色黏土质粉砂。沉积物特征显示下部和上部 Al_2O_3 , MgO, TiO_2 , TFe_2O_3 , CaO, MnO, Corg, Cu, Zn, Cr, Co, Li, Rb, V, G 等质量分数较高, SiO_2 , Na_2O 质量分数则较低;中部 Al_2O_3 , MgO, TiO_2 , CaO, TFe_2O_3 等元素质量分数相对较低, SiO_2 , Na_2O 质量分数变化则相反; K_2O 质量分数总体较高,从下向上质量分数有降低趋势,Sr, Ba 元素质量分数中部和下部明显升高。晚更新世早期黄渤海发生晚更新世以来第一次大规模海侵,称之为“下沧州海侵”^[2],与渤海中部 BH08 孔($119^{\circ}99'E$, $38^{\circ}28'N$)^[7]以及渤海湾西岸 BQ1 孔($117^{\circ}33'48.48''E$, $38^{\circ}46'07.76''N$)^[6](图 1)对比,对应于 BH08 孔的 31.00~41.50 m 和 BQ1 孔的 58.00~80.00 m 海侵时沉积。滦河物质与黄河和海河沉积物相比颗粒粒径较大,元素 Na, Sr 和 Ba 等质量分数较高(表 4),显示该层位以滦河物质为主,上部已明显受黄河物质影响(图 5)。

2)深度 25.00~30.50 m 为晚更新世早玉木冰期陆相沉积,27.04~27.06 m 处 AMS¹⁴C 年代为大于 43 500 a BP(图 2)。沉积物下部为黄棕色、黄褐色细-中砂,上部为黄褐色细粉砂和黄棕色黏土;该层位 SiO_2 , Na_2O , Ba, Zr 元素质量分数较高,而 Al_2O_3 , MgO, MnO, TiO_2 , TFe_2O_3 , Cu, Zn, Cr, Co, V, Li

等质量分数则较低,其值在中部开始逐渐向上升高, SiO_2 质量分数变化则相反,反映出仍以滦河物质为主,上部沉积物受黄河物质影响已明显增强^[9,19]。该层对应于BH08孔的31.00~28.20 m和BQ1孔的58.00~42.18 m时期沉积^[6-7]。

3)深度17.70~25.00 m为晚更新世玉木冰期中上亚间冰期滨海-浅海沉积,21.08~21.10 m和17.88~17.90 m处AMS¹⁴C年代分别为(34 130±240) a BP和(20 730±70) a BP(图2)。沉积物为灰黑色黏土质粉砂;元素特征显示 SiO_2 , CaO, Ba, Sr, Zr质量分数较低, Al_2O_3 , MgO, K_2O , TFe_2O_3 , TiO_2 , Corg, Cu, Zn, Cr, Li, Rb, Ga质量分数较高。这次海侵范围不大,渤海湾西岸仅BQ1孔发现该期海相层,相当于渤海Bc-1孔中的献县海侵层^[2],与BH08孔的17.80~28.20 m和BQ1孔的31.44~42.18 m沉积相对应^[6-7]。该层位Mg, Ti, Cu和Zn等元素含量较高(表4),显示该层位主要受黄河和海河物质影响(图5)。

4)深度2.10~17.70 m为晚玉木冰期陆相沉积,10.64 m处OSL年代为(11.0±1.0)ka BP。沉积物下部(15.63 m以下)为黄褐色细砂、黄褐色粉砂、中部和上部为黄褐色、灰褐色细砂;随着到25 ka BP海平面下降^[2],渤海陆架沉积物由以黄河、海河沉积物来源为主,转变为部分滦河物质为主的沉积;该层位显示富含 SiO_2 , Na_2O 和贫 Al_2O_3 , MgO, K_2O , TiO_2 , MnO, TFe_2O_3 , Cu, Zn, Cr, Co, Li, Rb等(图2、图3),反映出此时滦河物质的影响增强,而黄河物质影响减弱^[9](图4和图5),与BH08孔的7.00~17.80 m和BQ1孔的21.00~31.44 m沉积相对应^[6-7]。

5)TJC-1孔上部深度2.10 m以上沉积物黄褐色泥质砂和黏土质粉砂,主要为黄河和海河沉积,0.50~0.52 m和1.80~1.82 m底栖有孔虫AMS¹⁴C测年分别为(4 740±30)a BP和(5 800±30) a BP,为全新世滨海-浅海沉积,相当于渤海Bc-1孔中的黄骅海侵层^[2],该层与BH08孔的7.0 m以上和BQ1孔的21.00 m以上沉积相对应^[6-7];渤海陆架全新世随着海相性增强,渤海陆架沉积物的来源发生了一定变化,黄河和海河沉积物来源逐渐增强,滦河物质影响减弱;沉积物特征显示 SiO_2 , Na_2O , Sr含量较低, Al_2O_3 , MgO, K_2O , TFe_2O_3 , TiO_2 , CaO, MnO, Pb, Zn, Cr, Co, Li, V含量较高(图2和图3),显示沉积物主要受到黄河和海河物质影响(图4和图5)。

4 结 论

1)根据渤海西部TJC-1孔51.50 m以浅沉积物样品化学组分及测年数据,钻孔岩心可划分为5层,为晚更新世以来沉积。

2)TJC-1孔51.50 m以浅沉积物的化学组分相关分析表明, SiO_2 , Na_2O 与粗粒沉积物呈明显正相关, Al_2O_3 , TFe_2O_3 , MgO, TiO_2 , Cu, Zn, Cr, Co, Ga, Rb和V等元素与细粒沉积物呈显著正相关,Sr, Ba和Zr分布与沉积物粒度无明显正或负的相关性。

3)TJC-1孔51.50 m以浅沉积物的化学成分因子分析表明,以MgO为代表反映了陆源细颗粒物输入和黄河与海河物质影响;以 Na_2O , Sr和Ba为代表指示滦河物质影。 $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ 比值与Sr/Cu比值,Ba/Zn比值与 $\text{K}_2\text{O}/\text{MgO}$ 比值离散图分析揭示了TJC-1孔51.50 m以浅沉积物主要来源于黄河和海河,而该孔下部和中部两个层段沉积物来源以滦河物质为主。

参考文献(References):

- [1] WU J Z, SUN H G, QI F Q, 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. 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.
- [2] Department of Marine Geology, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences. *Geology of the Bohai Sea*[M]. Beijing: Science Press, 1985: 161-232. 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.
- [3] ZHUANG Z Y, XU W D, LIU D S, et al. Division and environmental evolution of Late Quaternary marine beds of S₃ hole in the Bohai

- Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1999, 19(2): 27-35. 庄振业, 许卫东, 刘东生, 等. 渤海南部 S₃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.
- [4] LIU S F, ZHUANG Z Y, LONG H Y. 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. 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.
- [5] WANG H, LI J F, PEI Y D, et al. Study of Quaternary geology on the west coast of Bohai Bay[J]. *Geological Survey and Research*, 2011, 35(2): 81-96. 王宏, 李建芬, 裴艳东, 等. 渤海湾西岸海岸带第四纪地质研究成果概述[J]. *地质调查与研究*, 2011, 35(2): 81-96.
- [6] YAN Y Z, WANG H, LI F L, et al. Sedimentary environment and sea-level fluctuations revealed by Borehole BQ1 on the west coast of the Bohai Bay, China[J]. *Geological Bulletin of China* 2006, 25(3): 357-382. 阎玉忠, 王宏, 李凤林, 等. 渤海湾西岸 BQ1 孔揭示的沉积环境与海面波动[J]. *地质通报*, 2006, 25(3): 356-382.
- [7] YAO Z P, SHI X F, LIU Q S, 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] ZHANG X R, LI J, DOU Y G, et al. REE Geochemical characteristics and provenance discrimination of core LDC30 in the northern part of Liaodong Bay[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, 32(4): 684-691. 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.
- [9] LIU J G, LI A C, CHEN M H, et al. Geochemical characteristics of sediments in the Bohai Sea mud area during Holocene[J]. *Geochimica*, 2007, 36(6): 559-568. 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.
- [10] LÜ C G, CHEN Z. Geochemical analysis of the surface Sediments of the Bohai sea[J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 1993, 23(3): 91-98. 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.
- [11] ZHANG C S, WANG L J, LI G S, 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.
- [12] ZHOU Y Z, LIU J. 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. 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.
- [13] Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. Specifications for regional marine geological survey (scale: 1 : 1 000 000): DZ/T 0247-2009 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2009. 中华人民共和国国土资源部. 1 : 1 000 000 海洋区域地质调查规范: DZ/T 0247-2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [14] CHEN Y L, WU Y T, LIU X Y, et al. Features of seafloor topography in the Bohai Sea[J]. *Advances in Marine Science*, 2013, 31(1): 75-81. 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): 75-81.
- [15] SHENG J J. REE characteristics and provenance of the sediment in the northwest Bohai Bay since the Late Pleistocene period[D]. Changchun: Jilin University, 2010: 8-37. 盛晶瑾. 渤海湾西北部晚更新世以来沉积物稀土元素特征及物源意义[D]. 长春: 吉林大学, 2010: 8-37.
- [16] QIN Y S, LIAO X G. A preliminary probe of sedimentation in Bohai Bay[J]. *Oceanol Limnol Sinica*, 1962, 4(3-4): 199-207. 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.
- [17] XING H Z. The coastline evolution and sediment source analysis in the Haihe Estuary[J]. *Haihe Water*, 2003(2): 28-30. 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.
- [18] 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]. *Haiyang Xuebao*, 2010, 32(4): 139-147. 乔淑卿, 石学法, 王国庆, 等. 渤海海底沉积物粒度特征及运输趋势探讨[J]. *海洋学报*, 2010, 32(4): 139-147.
- [19] ZHAO Y Y, YAN M C. Geochemistry of sediments of the China Shelf Sea[M]. Beijing: Science Press, 1994: 1-203. 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.
- [20] ZHANG A B, LIU M, LIAO Y J, 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. 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.
- [21] ZHOU F G. The relations between element 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.
- [22] 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 and 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.

- [23] HAN Z Z, ZHANG J Q, ZOU H, 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(Natural Sciences), 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(自然科学版), 2011, 41(11): 95-102.

Study of Sedimentary Geochemistry in the Western Bohai Sea Since Late Pleistocene

LAN Xian-hong^{1,2,3}, LI Ri-hui^{1,2,3}, CHEN Xiao-hui^{1,2,3}, QIN Ya-chao^{1,2,3},
WANG Zhong-bo^{1,2,3}, MI Bei-bei^{1,2,3}

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

Abstract: 120 sediment samples were collected from the upper 51.50 m part of core TJC-1 in the western Bohai Sea. This study analyzed major and trace elements compositions, size parameters, and ages (AMS ¹⁴C dating and OSL dating). The results showed that the sediments from the upper 51.50 m part of core TJC-1 were deposited since Late Pleistocene, and can be divided into five layers. The contents of SiO₂ and Na₂O were positively correlated with coarse-grained sediments, and those of Al₂O₃, TF_{e2}O₃, MgO, TiO₂, Cu, Zn, Cr, Co, Ga, Rb and V elements were positively correlated with the fine-grained sediments, and there was no significant correlation between the contents of Sr, Ba and Zr and grain sizes of sediment. R-model factor analysis showed that one group represented by MgO contents was derived from the input of fine-grained terrigenous sediments (Yellow River and Haihe River sediments), and the other group represented by Na₂O contents was derived from the input of Luanhe River sediment. The above characteristics, combined with the plots of SiO₂/Na₂O vs. Sr/Cu, Ba/Zn vs. K₂O/MgO, indicate that the source of sediments from core TJC-1 are mainly originated from the Yellow River and Haihe River, however, the sediments between 30.50~51.50 m in the lower part and 25.00~30.50 m in the mid-lower part are mainly from the Luanhe River.

Key words: western Bohai Sea; Late Pleistocene; sediment; geochemistry

Received: January 5, 2017