

文章编号:1000-0550(2014)05-0855-08

黄河三角洲 ZK5 钻孔沉积物地球化学特征及其沉积环境^①

宫少军^{1,2} 秦志亮³ 叶思源⁴ 乔吉果^{1,2} 赵 卫^{1,2}

(1.天津市海洋地质勘查中心 天津 300170;2.天津华北地质勘查局地质研究所 天津 300170;
3.国家海洋局海洋减灾中心 北京 100194;4.青岛海洋地质研究所 山东青岛 266071)

摘要 本文根据 36 件沉积物样品的微量元素和常量元素的相关性、组分含量及某些元素的比值特征,探讨了黄河三角洲 ZK5 钻孔的元素地球化学特征与古环境意义。应用历史地理学和沉积地质学综合分析方法确定钻孔岩芯沉积年代,将 ZK5 岩芯沉积物自下而上大致划分为 7 个层序。元素地球化学特征的研究表明:K₂O、Fe₂O₃、Al₂O₃、TiO₂、Cr、V、Rb 元素相互间呈明显的正相关关系;SiO₂与其他元素呈明显的负相关,与 P₂O₅呈弱负相关关系;Sr 与 CaO 呈弱负相关关系;P₂O₅与 Al₂O₃、Fe₂O₃、K₂O、TiO₂、CaO 呈弱的正相关。据 V/Cr 值分析,ZK5 钻孔从下往上水体有逐渐加深的趋势,与相关性分析结果相符。根据锶钡比值(Sr/Ba)和镁铝比值 10²(MgO/Al₂O₃)分析得出,ZK5 孔沉积环境的水体盐度从下往上变化相差不大,属于海相沉积环境,同时有黄河水的注入。通过古气候指示剂 Rb/Sr 值和 MgO/CaO 值的分析:ZK5 孔从 NQ1 到 NQ7 层序沉积时期的气候变化不大,气候相对潮湿。总之,地球化学特征所反映的沉积环境与沉积相分析的结果相一致,说明元素地球化学与沉积环境关系密切,可作为沉积相判别的标志。

关键词 黄河三角洲 相关分析 古环境 地球化学特征 沉积环境

第一作者简介 宫少军 男 1982 年出生 硕士 工程师 海洋地质与海洋环境调查 E-mail: gongtao0904@163.com

中图分类号 P595 TE121.3⁺1 **文献标识码** A

近些年来,沉积物元素地球化学的应用及其理论方面取得了一定的进展,已然成为地球化学研究不可取代的一部分^[1~4]。特别是在揭示沉积物物质来源、沉积环境及其迁移规律等方面^[5~7],元素地球化学方法应用于实际研究的成果越来越多,也备受广大学者和专家的重视。为了研究黄河三角洲 ZK5 孔柱状沉积物的地球化学特征及其沉积环境,本文根据沉积物的常微量元素组分含量和特定元素之间的比值进行了探讨。

1 地质背景

现代黄河三角洲处于渤海的西岸,地势总体呈现南高北低,西高东低,总体平缓。位于华北—渤海盆地的南侧,华北—渤海盆地是新生代沉积盆地,最大沉降幅度达 12 000 m。区内断裂以北东、北东东向为主,次为北北西及北西向。主要断裂有:埕子口断裂、陈南断裂、义南断裂、胜北断裂、孤北断裂、广饶—齐河断裂、埕中断裂、东营断裂^[8,9]。

研究区内土层均为第四系松散沉积物,以粉砂质

黏土为主,其次为粉砂和黏土。其岩性分布受地貌单元控制,如在古河道带,决口扇顶部以粉砂为主,在山前冲洪积平原区包气带岩性以粉质黏土为主,在黄泛平原区以粉砂质黏土为主,在洼地地带则以粉质黏土、黏土及粉砂质黏土互层为主。黄河单一而短期的分流河道及高浓度水体形成的椭圆形砂体相互迭置,是黄河三角洲砂体的主要特征^[10]。

ZK5 孔位于现代黄河三角洲海岸线附近,处于 37°51'37" N,119°5'13" E(图 1)。ZK5 钻孔的沉积记录表明,黄河三角洲沉积以一套水下三角洲的沉积为主,分流河道改道后,新河口沉积物位于老河口的侧部或两个老河口之间,年轻的三角洲前缘粉砂覆盖在老三角洲侧缘黏土质粉砂之上,年轻的三角洲侧缘黏土质粉砂覆盖在老三角洲前缘粉砂之上,这是在黄河三角洲常见的沉积序列;根据历史上河口的位置及海区水深图可以较为准确地确定沉积年代^[11]。

2 ZK5 孔层序划分

现代黄河三角洲是 1855 年以后才形成的,由于

^①国家地质调查项目(编号:1212010611402)、海保工程项目(编号:GZH201200503)、天津市国土房管局科技项目(编号:国土房任[2013]5号)与国家自然科学基金青年基金(批准号:41306057)联合资助
收稿日期:2013-06-21;收修改稿日期:2013-09-02

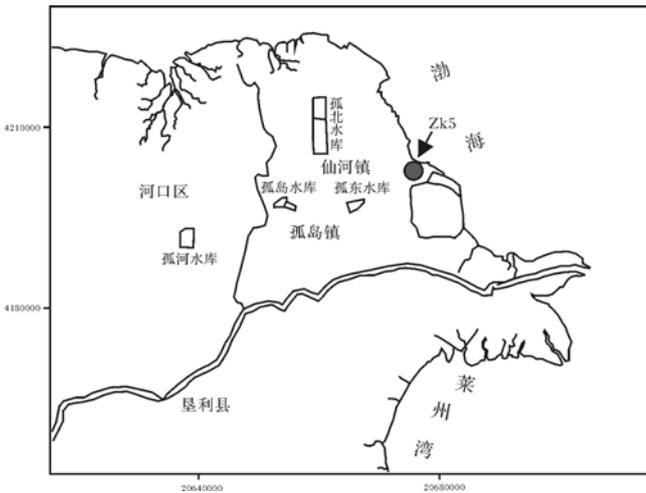


图1 黄河三角洲 ZK5 钻孔取样站位图

Fig.1 The location of sampling Core ZK5 in Yellow River Delta

时间太短,已经不在¹⁴C测年的有效范围之内,而且难以运用同位素方法测年。确定沉积物的沉积环境是判断其沉积年代的基础,因此要锁定钻孔中现代黄河三角洲沉积物的起始位置,必须要确定老黄河三角洲(1855年以前)的沉积序列。研究区1855年海岸线20 km范围以内,公元1099~1855年形成的年轻陆架沉积物或改造层覆盖在11~1099年黄河三角洲之上,而现代黄河三角洲沉积物覆盖在最上部。从海岸线(1855年)向海方向,由于现代黄河三角洲的沉积作用,老黄河三角洲沉积物越来越薄。在ZK5孔中没有发现老黄河三角洲沉积物,而陆架沉积物之上有2~3 m厚的黏土质粉砂,具有透镜体、粉砂薄层,贝壳的数量也减少,生物扰动构造突然变得不发育,这表明此段为现代黄河三角洲的底部—前三角洲的沉积物;前三角洲之上的粉砂夹黏土质粉砂便是三角洲前缘的下部^[11]。

根据ZK5孔沉积物的厚度、性质以及高程判断对应的沉积环境,追踪其物质来源,即判断沉积物是由哪一条分流河道输送而来,那么这一条分流河道的活动年代就是这层沉积物所形成的年代。对岩芯自下而上逐层分析它的地质发展历史,检查环境分析和年代确定是否合理,搞清楚不同时期形成沉积物的叠覆关系。应用沉积地质学和历史地理学综合分析方法确定钻孔岩芯沉积年代^[11],同时结合有孔虫测试数据,ZK5岩芯沉积物自下而上,大致划分为7个层序(图2)。

NQ1以灰色粉砂为主,含少量极细砂,见黑色有机质;属湖坪沉积相。NQ2以灰色黏土质粉砂为主,

含大量黑色有机质、透镜体和虫孔构造;下部多见深灰色粉砂质黏土与黄色粉砂质黏土混杂,含黑色腐殖质层;属陆架沉积相。NQ3上部以灰黄色黏土质粉砂与粉砂互层为主,下部为浅黄色黏土质粉砂,黏土含量较高;属前三角洲沉积相。NQ4为黄褐色粉砂质黏土与粉砂混杂,有夹层;属三角洲前缘沉积相。NQ5以土黄色黏土质粉砂为主,生物扰动较为强烈,炭质含量高;下部以黄褐色粉砂质黏土为主,含水量大,偶见黑色有机质,黏土含量较NQ4高;属三角洲侧缘沉积物。NQ6多见灰黄色黏土质粉砂,偶见粉砂与黏土质粉砂互层;黑色有机质含量较高,属三角洲前缘沉积相。NQ7以土黄色粉砂为主,偶见黏土质粉砂夹层,上部含水量较少,土质较干,下部含水量较大;属1976年后形成的决口扇沉积相。

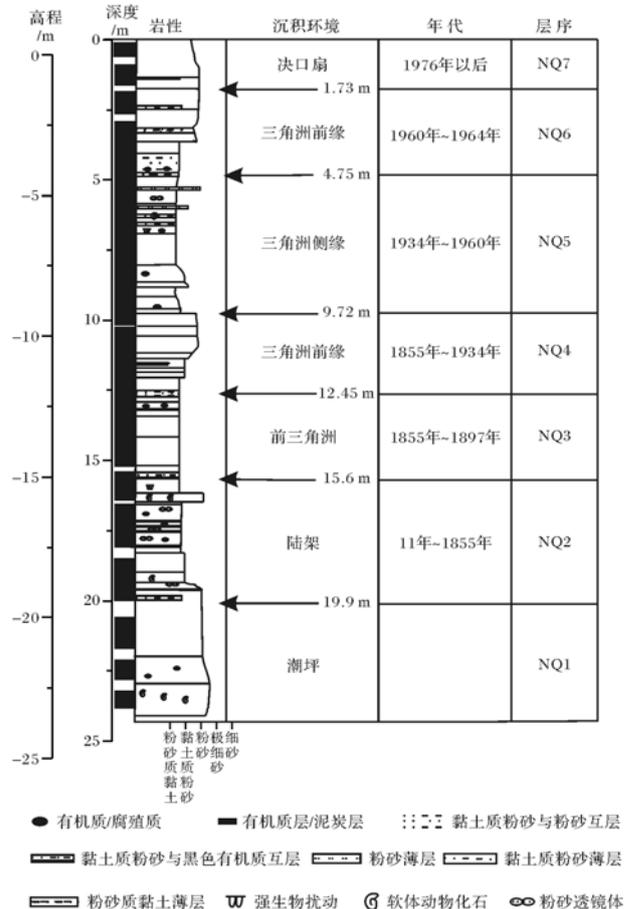


图2 黄河三角洲 ZK5 孔沉积年代划分示意图

Fig.2 Sketch map of ZK5 Core sediment age divided in Yellow River Delta

3 样品及分析

为了解现代黄河三角洲垂向上的地球化学特征和沉积环境变化,笔者在ZK5孔岩芯剖面上,自下而

上采集了岩芯沉积物样品 36 件,其中 NQ1 层序 3 件,NQ2 层序 5 件,NQ3 层序 6 件,NQ4 层序 4 件,NQ5 层序 9 件,NQ6 层序 5 件,NQ7 层序 4 件。样品处理及测试在河北中化地质矿山总局地质研究院完成,检测的元素有 Al、Ca、Fe、K、Mg、Mn、Na、P、Ti、Si、V、Cr、Rb、Sr 和 Ba 等,测试数据见表 1。

4 元素地球化学特征

4.1 相关性分析

受沉积环境、源区岩性及成岩作用的影响,各元

素含量分布不同。通过相关系数分析(见表 2),弄清楚各元素的富集特征及相互之间的关系。

(1) K_2O 、 TiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、Cr、V、Rb 相互间呈明显的正相关关系,两两相关系数 R 均 >0.8 。这些元素主要赋存于泥质矿物中,表现的是陆源泥质沉积特征。现代黄河三角洲中 TiO_2 和 Al_2O_3 的富集组合,表明有大量陆源物质的侵入,因为这两种元素常被吸附于黏土矿物中。由于 K、V、Cr 和 Rb 的离子半径相对较大,很容易被吸附,因此被黏土矿物吸附后,保留在原地或仅是近范围迁移,说明这几种元素主要赋存

表 1 黄河三角洲 ZK5 孔沉积物地球化学分析数据

Table 1 Results of geochemical analyses of ZK5 Core sediment in Yellow River Delta

层位	样品号	取样深度 (m)	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	K_2O	MgO	MnO	Na_2O	P_2O_5	TiO_2	SiO_2	V	Cr	Rb	Sr	Ba
NQ7	E-1	0.12	10.50	5.74	3.36	2.03	2.00	0.04	2.91	0.06	0.35	61.88	66.5	56.8	82.8	199	442
	E-2	0.90	10.57	5.68	3.21	2.02	1.98	0.04	2.78	0.06	0.35	62.33	64.7	53.8	80.2	201	447
	E-3	1.85	10.36	5.52	3.08	1.99	1.88	0.04	2.73	0.06	0.34	62.99	61.3	52.5	76.6	199	425
	E-4	2.35	11.05	5.88	3.44	2.11	2.03	0.05	2.37	0.06	0.35	61.48	66.5	55.4	85.1	202	470
NQ6	E-5	2.90	10.38	5.79	3.32	2.04	1.88	0.04	2.55	0.06	0.35	62.43	66.7	58.8	81.3	198	456
	E-6	3.16	10.52	5.53	3.20	2.06	1.87	0.04	2.38	0.06	0.34	62.69	63.8	52.1	80.0	197	439
	E-7	3.60	12.64	6.73	4.30	2.38	2.41	0.06	1.94	0.06	0.38	57.49	76.8	67.8	94.1	197	495
	E-8	4.00	10.69	5.76	3.31	2.12	1.89	0.04	2.29	0.06	0.34	61.85	64.2	55.0	80.6	193	448
	E-9	4.40	12.12	6.21	3.94	2.31	2.27	0.05	2.03	0.06	0.35	59.46	73.6	61.6	93.7	191	459
NQ5	E-10	4.82	14.21	8.26	5.68	2.62	2.74	0.09	1.68	0.06	0.38	51.71	90.3	81.0	113	193	480
	E-11	5.30	14.00	8.25	5.77	2.65	2.76	0.09	1.67	0.06	0.39	52.04	91.8	83.1	117	196	506
	E-12	5.80	13.76	7.92	5.35	2.56	2.69	0.08	1.71	0.06	0.38	53.06	85.9	78.2	111	197	495
	E-13	6.55	13.66	7.92	5.45	2.57	2.67	0.08	1.70	0.06	0.40	53.54	88.3	79.1	111	193	486
	E-14	6.90	13.79	7.74	5.24	2.54	2.64	0.08	1.75	0.06	0.39	53.43	85.6	76.6	106	188	471
	E-15	8.00	13.60	7.71	5.19	2.53	2.63	0.08	1.74	0.06	0.39	53.98	86.8	79.4	106	190	490
	E-16	8.60	11.50	6.02	3.56	2.19	2.09	0.05	2.19	0.06	0.34	60.25	69.0	60.1	83.3	184	444
	E-17	9.10	12.78	7.04	4.63	2.39	2.45	0.07	1.89	0.06	0.38	56.48	79.6	70.8	100	195	480
	E-18	9.56	11.27	5.83	3.63	2.18	2.08	0.05	2.22	0.06	0.36	61.14	68.6	57.0	88.7	192	440
NQ4	E-19	10.50	11.34	5.81	3.45	2.16	2.07	0.05	2.26	0.06	0.35	61.14	68.7	60.0	84.6	193	433
	E-20	11.33	11.61	5.93	3.55	2.18	2.17	0.05	2.29	0.06	0.35	60.39	67.6	59.5	85.3	191	440
	E-21	11.90	11.76	6.19	3.84	2.22	2.20	0.05	2.23	0.06	0.36	59.73	68.1	62.4	88.4	190	443
	E-22	12.45	14.09	8.52	5.77	2.67	2.84	0.09	1.85	0.06	0.38	50.76	89.2	83.4	117	195	493
NQ3	E-23	13.10	13.78	7.95	5.39	2.58	2.69	0.08	1.70	0.06	0.39	53.07	89.6	78.4	112	197	477
	E-24	13.40	11.87	6.29	3.79	2.24	2.21	0.05	2.10	0.06	0.36	59.43	70.4	67.5	88.8	194	452
	E-25	14.10	12.70	6.82	4.35	2.32	2.45	0.06	2.09	0.06	0.38	57.07	77.3	64.8	93.4	192	450
	E-26	14.70	13.71	7.68	5.21	2.56	2.68	0.08	1.91	0.06	0.39	53.20	85.0	76.6	112	195	480
	E-27	15.34	13.91	8.08	5.50	2.66	2.77	0.08	1.92	0.06	0.39	52.08	85.9	79.0	115	194	473
	E-28	15.60	13.27	6.41	4.63	2.54	2.51	0.06	2.15	0.06	0.39	56.51	79.7	71.1	102	193	443
NQ2	E-29	16.13	11.25	5.51	3.29	2.24	2.00	0.04	2.54	0.05	0.32	61.76	64.5	52.6	86.7	203	436
	E-30	16.50	12.85	6.24	4.50	2.52	2.37	0.07	1.97	0.06	0.39	57.59	77.0	69.3	103	186	434
	E-31	17.20	12.40	5.77	4.11	2.44	2.33	0.05	2.31	0.06	0.37	59.51	67.9	61.6	100.0	196	422
	E-32	19.00	11.15	5.39	3.30	2.21	2.05	0.04	2.55	0.06	0.34	61.95	62.6	57.4	84.0	195	417
	E-33	19.50	10.59	5.15	3.05	2.14	1.90	0.04	2.69	0.06	0.31	63.03	58.7	56.2	81.5	195	424
NQ1	E-34	20.90	10.37	4.64	2.76	2.22	1.75	0.04	2.70	0.06	0.33	63.94	54.7	43.5	75.3	212	468
	E-35	22.02	9.61	5.44	2.94	1.92	1.70	0.04	3.02	0.06	0.37	63.07	59.9	59.9	74.6	193	437
	E-36	23.07	9.96	5.55	3.02	1.96	1.77	0.04	3.02	0.06	0.37	63.08	62.9	63.9	74.6	194	434

注:除了 V、Cr、Rb、Sr 和 Ba 单位为 10^{-6} 外,其他元素的单位均为 %。

于泥岩中。由于 Rb、K 的离子半径相似, Rb 的地球化学行为与 K 密切^[12], Rb 可在矿物晶格中取代 K。而 Al₂O₃ 和 Fe₂O₃ 的含量反映了氧化作用的特征, 两者的变化具有一致性, 呈强相关关系 ($R=0.98$), 含量较高说明了氧化环境较弱, 意味着所处环境的水体变深。

(2) SiO₂ 与其他元素呈明显的负相关 ($R \leq -0.75$), 与 Sr 呈弱正相关关系 ($R=0.30$), 与 P₂O₅ 呈弱负相关关系 ($R=-0.34$), 说明石英物质 (SiO₂) 在粉砂及泥岩中极不发育, 其主要发育在砂岩中, 据冯胜斌等研究, SiO₂ 与硅质岩有很好的相关性^[13]。

(3) Sr 与 CaO 呈弱负相关关系 ($R=-0.30$), 说明 Sr 主要赋存于方解石矿物中, 最初 Sr 多保存于文石矿物中, 因为与低镁方解石和高镁方解石相比, 文石矿物晶体结构中的钙离子易被离子半径较大的二价锶离子所替代; 但文石经过成岩作用, 向低镁方解石转变的过程中, Sr 反而会被保存下来。胡明毅等发现^[14], 海水和淡水中的 Sr、Ca 的平均含量差别很

大, 海水中 Sr 含量为 8×10^{-6} 、Ca 含量为 4×10^{-6} , 淡水中 Sr 含量为 0.06×10^{-6} 、Ca 含量为 4.6×10^{-6} , 因此, 在成岩过程中有淡水加入时, 就会影响 Sr 的含量。所以现在见到的 Sr, 以保存在低镁方解石中的为主。

(4) P₂O₅ 与 Al₂O₃、TiO₂、Fe₂O₃、CaO、K₂O 呈弱的正相关 ($R \leq 0.57$), P₂O₅ 含量的高低代表了海水的深浅, 作为海水深度的指标元素, 其值大小亦可用来进行进一步分析沉积环境^[15]。从表 1 中可见, CaO 的垂向含量变化较为频繁, 这与黄河尾间的频繁摆动和海洋动力的重新塑造有关。

4.2 地球化学特征

沉积岩中元素含量及其分布特征与矿物成分有很大的关系^[16]。其中常量元素的分布与沉积环境的关系更加密切。本文选取某些氧化物 (CaO、Fe₂O₃、MgO、Na₂O、K₂O、TiO₂、MnO、SiO₂、Al₂O₃、P₂O₅) 进行分析, 旨在查明 ZK₅ 孔沉积物自下而上常量元素分布规律, 及其所反映的不同沉积环境, 各沉积相中常量元素的平均质量分数如表 3 所示。

表 2 ZK5 孔沉积物中各元素含量的相关系数

Table 2 Correlation coefficients of ZK5 Core of each element in sediment

元素	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	TiO ₂	V	Rb	Sr	Cr	Ba
SiO ₂	1.00														
Al ₂ O ₃	-0.97	1.00													
Fe ₂ O ₃	-0.99	0.98	1.00												
MgO	-0.98	0.99	0.98	1.00											
CaO	-0.98	0.92	0.97	0.95	1.00										
Na ₂ O	0.89	-0.93	-0.89	-0.90	-0.86	1.00									
K ₂ O	-0.94	0.97	0.94	0.95	0.86	-0.88	1.00								
MnO	-0.99	0.96	1.00	0.97	0.98	-0.88	0.93	1.00							
P ₂ O ₅	-0.34	0.31	0.34	0.30	0.25	-0.11	0.39	0.36	1.00						
TiO ₂	-0.84	0.81	0.86	0.83	0.83	-0.72	0.75	0.86	0.57	1.00					
V	-0.98	0.96	0.99	0.97	0.98	-0.90	0.90	0.98	0.28	0.87	1.00				
Rb	-0.97	0.98	0.98	0.98	0.93	-0.88	0.97	0.98	0.34	0.82	0.96	1.00			
Sr	0.30	-0.32	-0.30	-0.31	-0.30	0.38	-0.23	-0.28	-0.08	-0.40	-0.34	-0.26	1.00		
Cr	-0.96	0.91	0.96	0.93	0.96	-0.81	0.86	0.96	0.39	0.88	0.96	0.92	-0.41	1.00	
Ba	-0.77	0.70	0.76	0.71	0.81	-0.72	0.67	0.78	0.14	0.61	0.77	0.71	0.09	0.71	1.00

表 3 各沉积层序常量元素平均质量分数统计 (%)

Table 3 The average mass fraction of constant elements each sedimentary facies

元素层序	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	SiO ₂
NQ7	10.62	5.70	3.27	2.04	1.97	0.04	2.70	0.06	0.35	62.17
NQ6	11.27	6.00	3.61	2.18	2.06	0.05	2.24	0.06	0.35	60.78
NQ5	13.18	7.41	4.94	2.47	2.53	0.07	1.84	0.06	0.38	55.07
NQ4	12.20	6.61	4.15	2.31	2.32	0.06	2.16	0.06	0.36	58.00
NQ3	13.21	7.20	4.81	2.48	2.55	0.07	1.98	0.06	0.38	55.23
NQ2	11.65	5.61	3.65	2.31	2.13	0.05	2.41	0.06	0.34	60.77
NQ1	9.98	5.21	2.91	2.03	1.74	0.04	2.92	0.06	0.35	63.36

根据测试分析,ZK5 孔沉积物的 SiO₂ 含量比较高,其质量分数都在 50.76% 以上,平均值为 58.49%,说明 ZK₅ 孔沉积物中富含 SiO₂ 的矿物(如石英、长石)含量较高,矿物成分的成熟度较高。可以看出,Al₂O₃ 质量分数相对于其他元素较大,平均为 12.05%,其含量高与碎屑岩中云母、长石及其它富铝的黏土矿物有关,其中以黏土矿物中铝元素最为富集。

此外,ZK5 各层序常量元素又表现出各自固有的特征:Al₂O₃ 以 NQ3 层序含量最大,平均质量分数为 13.21%;Na₂O 则以 NQ1 层序含量最大,平均质量分数 2.92%;CaO、Fe₂O₃ 以 NQ5 层序含量最大,而 K₂O、MgO 以 NQ3 层序的含量最大。

ZK5 各层序微量元素的平均含量也有明显的差异(表 4),V、Cr、Rb、Ba 以 NQ5 层序相对最大,Sr 含量以 NQ7 层序相对最大,Ba 质量分数较高,说明陆源供给充足。而 Sr/Ba 值对古盐度的变化非常敏感,其值越大,反映的古盐度越高^[5],依据常用的标准:Sr/Ba 值大于 1.0 为海相,0.5~1.0 为半咸水相,小于 0.5 为微咸水相,说明各个层序的沉积环境,古盐度值变化不大,矿化度也相当,处于微咸水的浅水环境,反映出现代黄河三角洲受河流,主要是黄河影响,海水淡化,盐度较低。

表 4 各沉积相微量元素平均质量分数统计(×10⁻⁶)

Table 4 The average mass fraction of trace elements in each sedimentary facies

层序	V	Cr	Rb	Sr	Ba	Sr/Ba
NQ7	64.74	54.61	81.19	199.92	445.98	0.45
NQ6	69.00	59.07	85.96	195.34	459.43	0.43
NQ5	82.87	73.94	104.02	192.10	476.72	0.40
NQ4	73.38	66.31	93.85	192.38	452.17	0.43
NQ3	81.30	72.89	103.77	194.21	462.24	0.42
NQ2	66.14	59.44	91.03	194.97	426.37	0.46
NQ1	59.17	55.76	74.85	199.65	446.27	0.45

5 沉积环境研究

沉积岩的成因不同,是其物质来源、物理化学条件及沉积环境等方面的差异所造成的,因此不同环境的沉积岩元素地球化学成分必然亦有所不同,其相关特定元素的比值也会存在明显的差异^[17,18]。

5.1 古水深

以往研究表明,V/Cr 比值的高低,代表不同的氧化还原条件,还原条件下 V 元素易于富集,而 Cr 元素在氧化条件下易于富集,因此在氧化条件下 V/Cr

比值低,反之,还原环境下该比值较高,因此沉积环境水体的深浅可以根据 V/Cr 的比值来判断^[19,20]。从图 3 中看出,潮坪沉积(NQ1)中 V/Cr 比值为 0.99~1.26,平均值为 1.08;陆架沉积(NQ2)和 1897~1934 年三角洲前缘沉积(NQ4)中平均值都为 1.11;1855~1897 年前三角洲沉积(NQ3)和 1934~1960 年三角洲前缘沉积(NQ5)为 1.12;1960~1964 年三角洲前缘沉积(NQ6)为 1.13~1.22,平均值为 1.17;决口扇沉积(NQ7)则为 1.19。可以看出,在不同的沉积相中,从前三角洲、三角洲前缘到三角洲侧缘,V/Cr 值相应变化规律,反映出随着水体的加深,沉积环境的还原性加强,其值亦随之增大。

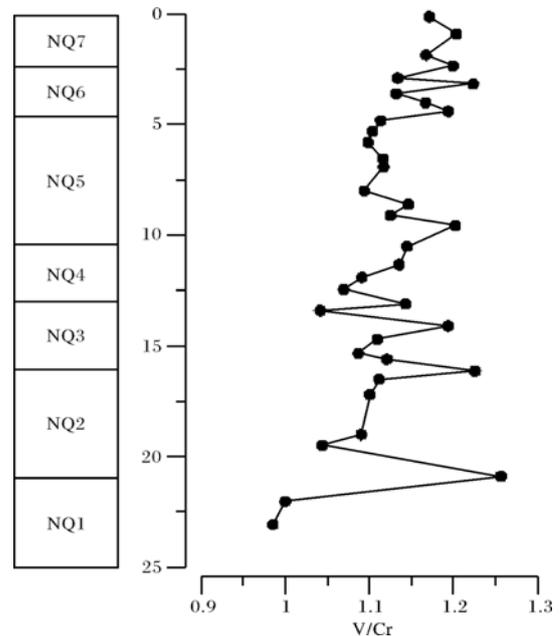


图 3 ZK5 孔沉积物 V/Cr 垂向变化

Fig.3 Variations with depth of V/Cr in ZK5 Core sediment

V/Cr 比值从下往上呈增加的趋势,说明沉积环境的氧化还原条件是向还原条件方面转化的,可以判断出水深有逐渐增加的趋势,这与前文中元素相关性分析的结论是一致的。

5.2 古盐度

沉积岩层中 MgO 具有亲海性,而 Al₂O₃ 具有亲陆性特征,因此判断水体盐度的高低,可以建立镁铝比值 $w = 10^2 (MgO/Al_2O_3)$ ^[21]。w 值的增加,表明水体盐度的增大,沉积环境由淡水向海水过渡;w < 1 代表淡水沉积环境,w 为 1~10 代表陆海过渡性沉积环境,w 为 10~500 代表海水沉积环境,w > 500 时陆表海沉积环境。由图 4a 可知,NQ3 的 w 值相对较高,

其平均值为 19.30,属于前三角洲沉积环境,而 ZK5 孔沉积物的 w 值都在 10~500 之间,最大值为 20.13,平均值为 18.7,总体变化不大, w 值偏小,说明属于海相沉积环境,同时有黄河水的注入。

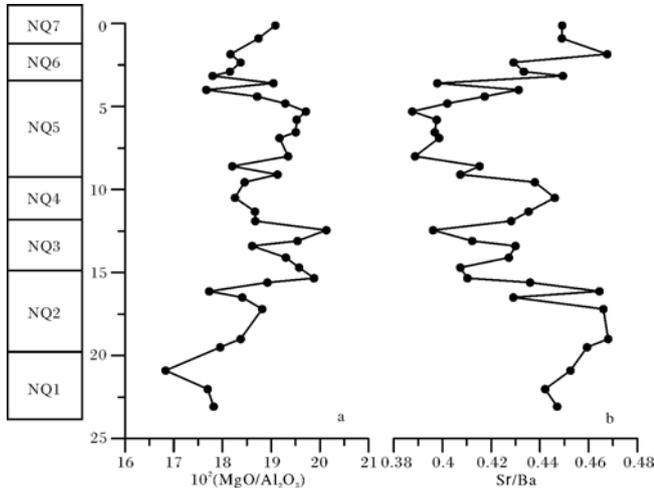


图4 ZK5 孔沉积物 $10^2(\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3)$ (a) 和 Sr/Ba (b) 垂向变化
Fig.4 Variations with depth of $10^2(\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3)$ and Sr/Ba in ZK5 Core sediment

分辨陆相和海相环境是最常用的一个指标元素是 Sr/Ba 比值。前人研究表明, Sr 元素在淡水(河水、湖泊水等)中的平均含量为 $7 \times 10^{-8} \mu\text{g}/\text{g}$,而在半咸水或海水里含量升为 $7.6 \times 10^{-6} \mu\text{g}/\text{g}$;然而, Ba 元素在淡水中浓度大约为 $2 \times 10^{-8} \mu\text{g}/\text{g}$,在海水中的含量为 $1.4 \times 10^{-8} \mu\text{g}/\text{g}$ ^[5]。因此, Sr/Ba 值可以用作古盐度研究的标志,其值的大小,反映了盐度值的高低。

从图 4(b) 来看,ZK5 孔沉积物样品的 Sr/Ba 值自下而上,相差不大,处于 0.39~0.47 之间,说明从 NQ1 到 NQ7 沉积环境的水体盐度变化不太大。

5.3 古气候

Rb 和 Sr 这两种微量元素的地球化学行为,既有明显的差别,又有一定的联系。由于 Rb 的离子半径较大,很容易被吸附,被矿物吸附后,保留在原地或仅是近范围的迁移^[12];相反,离子半径较小的 Sr 主要以游离态形式存在,容易被地表水或地下水带走。 Rb/Sr 值的大小能够反映气候水热变化的环境条件,及其化学风化的程度^[22~24]。

通常情况,在温暖湿润、降水量大的环境下,地表径流量大,亦加强了地表侵蚀,较多的细粒物质在地表沉积下来。同时在湿热的条件下,会增强化学风化作用,使更多的 Sr 元素进入沉积环境,就造成了沉积物中 Rb/Sr 值的变小;反之,在寒冷干燥,降水量少的

环境下, Rb/Sr 值会增大。

图 5(a) 给出了 Rb 和 Sr 两种元素的分析结果:可以看出,从 NQ1 到 NQ5 中的 Rb/Sr 值有变大的趋势,说明 NQ2 到 NQ5 层序沉积时期气候相对干燥寒冷,降水量少,而到上面的 NQ6 和 NQ7 层序沉积时期,气候又相对湿热,降水量较大。而从整个钻孔沉积物样品的分析数据来看, Rb/Sr 比值为 0.35~0.60,所以从 NQ1 到 NQ7 层序沉积时期的气候变化不大,气候相对湿热,降水量较大。

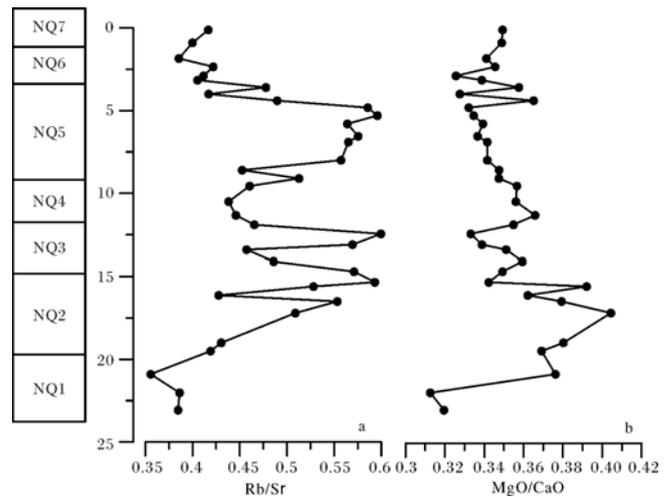


图5 ZK5 孔沉积物 Rb/Sr (a) 和 MgO/CaO (b) 垂向变化
Fig.5 Variations with depth of Rb/Sr and MgO/CaO in ZK5 Core sediment

研究表明,除了 Rb/Sr 值能够反映气候变化, MgO/CaO 值也是气候变化的一种指示剂,高值指示干热气候,低值指示湿润气候^[25~27]。从图 5b 可以看出,NQ2 和 NQ5 层序沉积时期的 MgO/CaO 比值较大,气候相对干热,降水量较小,整个钻孔层序沉积物的 MgO/CaO 比值为 0.31~0.40,平均值为 0.35,从 NQ1 到 NQ7 层序沉积时期的气候变化不大,气候相对潮湿,化学风化作用较强。

6 结论

(1) K_2O 、 TiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 Cr 、 V 、 Rb 相互间呈明显的正相关关系,表现的是陆源泥质沉积特征。 SiO_2 与其他元素呈明显的负相关,与 Sr 呈弱正相关关系,说明石英物质(SiO_2) 在粉砂及泥岩中不发育,主要发育在砂岩中。 CaO 的含量变化较为频繁,这与黄河尾间的频繁摆动和海洋动力的重新塑造有关。

(2) 根据 V/Cr 值分析,ZK5 孔自下往上,从 NQ1 到 NQ7 沉积环境的水体有逐渐加深的趋势,与钻孔

分析的从 NQ1 到 NQ7 依次发育潮坪相、前三角洲相、三角洲前缘相及三角洲侧缘相基本对应。

(3) 通过 $10^2(\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3)$ 值和 Sr/Ba 值的分析:ZK5 孔从下往上沉积环境的水体盐度变化相差不大,基本属于海相沉积环境,同时有黄河水的注入。

(4) 通过古气候指示剂 Rb/Sr 值和 MgO/CaO 值的分析:ZK5 孔从 NQ1 到 NQ7 层序沉积时期的气候变化不大,气候相对潮湿,化学风化作用较强。

参考文献 (References)

- 张金亮,张鑫. 塔里木盆地志留系古海洋沉积环境的元素地球化学特征[J]. 中国海洋大学学报,2006,36(2):200-208 [Zhang Jinliang, Zhang Xin. The element geochemical features of ancient oceanic sedimentary environments in the Silurian Period in the Tarim Basin[J]. Periodical of Ocean University of China, 2006, 36(2): 200-208]
- Jarvis I, Murphy A M, Gale A S. Geochemistry of pelagic and hemipelagic carbonates: criteria for identifying systems tracts and sea-level change[J]. Journal of the Geological Society, 2001, 158(4): 685-696
- Svendsen J, Friis H, Stollhofen H, *et al.* Facies discrimination in a mixed fluvio-eolian setting using elemental whole-rock geochemistry-Applications for reservoir characterization[J]. Journal of Sedimentary Research, 2007, 77(1): 23-33
- Lamaskin T A, Dorsey R J, Vervoort J D. Tectonic controls on mudrock geochemistry, Mesozoic rock of eastern Oregon and western Idaho, USA: Implications for Cordilleran tectonics [J]. Journal of Sedimentary Research, 2008, 78(12): 765-783
- 刘燕学,宋天锐. 辽东半岛复州湾十三里台组地球化学特征及沉积环境探讨[J]. 沉积学报,2009,27(5):1018-1026 [Liu Yanxue, Song Tianrui. Discussion on characteristics of geochemical and sedimentary environments of the Shisanlitai Formation of Fuzhou Bay, Liaoning province[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(5): 1018-1026]
- 白宪洲,何明友,王玉婷,等. 四川若尔盖地区西康群地球化学特征及其物源区和古风化程度分析[J]. 现代地质,2010,24(1):151-157 [Bai Xianzhou, He Mingyou, Wang Yuting, *et al.* On the geochemical characteristics, provenance and paleoweathering degree of Triassic Xikang Group in Ruorgai area in Sichuan province[J]. Geoscience, 2010, 24(1): 151-157]
- 罗静兰,史成恩,李博,等. 鄂尔多斯盆地周缘及西峰地区延长组长8、长6沉积物源——来自岩石地球化学的证据[J]. 中国科学(D辑):地球科学,2007,37(增刊):62-67 [Luo Jinglan, Shi Cheng'en, Li Bo, *et al.* Stage 8、6 of Yanchang sediments in the periphery of Erdos Basin and Xifeng—from evidence of litho-geochemistry [J]. Science China (Seri. D): Earth Science, 2007, 37(Suppl.): 62-67]
- 陈吉余,黄金森,等. 中国海岸带地貌[M]. 北京:海洋出版社,1995:187 [Chen Jiyu, Huang Jinsen, *et al.* Coastal Geomorphology of China Coastal Zone[M]. Beijing: Maritime Press, 1995: 187]
- 成国栋,薛春江. 黄河三角洲沉积地质学[M]. 北京:地质出版社,1997 [Cheng Guodong, Xue Chunting. Sedimentary Geology of the Yellow River Delta[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997]
- 李广雪,薛春江. 黄河水下三角洲沉积厚度、沉积速率及砂体形态[J]. 海洋地质与第四纪地质,1993,13(4):35-43 [Li Guangxue, Xue Chunting. Sediment thickness, sedimentation rate and silt body shape of the Yellow River subaqueous delta lobe[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1993, 13(4): 35-43]
- 薛春江,叶思源,高茂生,等. 现代黄河三角洲沉积物沉积年代的确定[J]. 海洋学报,2009,31(1):117-124 [Xue Chunting, Ye Siyuan, Gao Maosheng, *et al.* Determination of depositional age in the Huanghe Delta in China [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2009, 31(1): 117-124]
- 赵一阳,焉明才. 中国浅海沉积物地球化学[M]. 北京:科学出版社,1994 [Zhao Yiyang, Yan Mingcai. China Marine Sediment Geochemistry [M]. Beijing: Science Press, 1994]
- 冯胜斌,周洪瑞,燕长海,等. 东秦岭二郎坪群硅质岩地球化学特征及其沉积环境意义[J]. 现代地质,2007,21(4):675-682 [Feng Shengbin, Zhou Hongrui, Yan Changhai, *et al.* The geochemical characteristics of cherts of Erlangping Group in east Qinling and their sedimentary environment implication[J]. Geoscience, 2007, 21(4): 675-682]
- 胡明毅. 中扬子台地北缘上震旦统碳酸盐岩中锶的分布特征及环境意义[J]. 岩石矿物学杂志,1999,18(3):243-246 [Hu Mingyi. Distribution of strontium in Upper Sinian carbonate rocks along the northern margin of Middle Yangtze Platform and its environmental implications[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 1999, 18(3): 243-246]
- 陈小军,罗顺社,张建坤,等. 冀北拗陷长龙山组沉积相与地球化学特征研究[J]. 断块油气田,2010,17(3):270-273 [Chen Xiaojun, Luo Shunshu, Zhang Jiankun, *et al.* Study on sedimentary facies and geochemical features of Changlongshan Formation in Jibei depression[J]. Fault-Block Oil and Field, 2010, 17(3): 270-273]
- 张茂盛,胡晓静. 微量元素在地质沉积环境中应用[J]. 光谱仪器与分析,1999,12(4):19-21 [Zhang Maosheng, Hu Xiaojing. Applications of trace elements in depositional environment [J]. Spectrum Instrument and Analysis, 1999, 12(4): 19-21]
- 杨建民,王登红,毛景文,等. 硅质岩岩石化学方法及其在“镜铁山式”铁矿床中的应用[J]. 岩石矿物学杂志,1999,18(2):108-120 [Yang Jianmin, Wang Denghong, Mao Jingwen, *et al.* The petrochemical research method for silicalite and its application to the “Jingtieshan Type” iron deposits [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 1999, 18(2): 108-120]
- Veizer J, Demovic R. Strontium as a tool for facies analysis[J]. Sedimentary Petrology, 1974, 44(1): 93-115
- Murray R W, Buchholtz Ten Brink M R, Gerlach D C, *et al.* Rare major and trace element composition of Monterey and DSDP chert and associated host sediment assessing the influence of chemical fractionation during diagenesis [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1992, 56(7): 2657-2671
- Murray R W. Chemical criteria to identify the depositional environment of chert: general principles and applications [J]. Sedimentary Geology, 1994, 90(3/4): 213-232
- 杨晓强,李华梅. 陆相断陷湖盆沉积物磁组构特征及其环境意

- 义——以泥河湾盆地为例[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2000, 20(3):43-52 [Yang Xiaoqiang, Li Huamei. Magnetic anisotropy and its environmental significance in limnal faulted basin-Taking the Nihewan Basin as an example [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2000, 20(3): 43-52]
- 22 张振克, 吴瑞金, 王苏民, 等. 全新世大暖期云南洱海环境演化的湖泊沉积记录[J]. 海洋与湖沼, 2000, 31(2): 110-114 [Zhang Zhenke, Wu Ruijin, Wang Sumin, *et al.* Environmental evolution recorded by lake sediments from Erhai lake, Yunnan province in Holocene megathermal[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2000, 31(2): 110-114]
- 23 庞奖励, 黄春长, 张占平. 陕西岐山黄土剖面 Rb、Sr 组成与高分辨率气候记录[J]. 沉积学报, 2001, 19(4): 637-641 [Pang Jiangli, Huang Chunchang, Zhang Zhanping. Rb, Sr elements and high resolution climatic records in the loess-paleosol profile at Qishan, Shanxi [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19(4): 637-641]
- 24 余焯, 张昌民, 张尚锋, 等. 惠州凹陷 HZ21 钻孔珠江组地球化学特征及其沉积环境[J]. 煤田地质与勘探, 2012, 3(40): 6-12 [Yu Ye, Zhang Changmin, Zhang Shangfeng, *et al.* Geochemical characteristics and sedimentary environments of the Zhujiang Formation in Well HZ21 at Huizhou depression [J]. Coal Geology & Exploration, 2012, 3(40): 6-12]
- 25 李福春, 谢昌仁, 金章东, 等. 南京老虎山黄土剖面中铷锶地球化学和磁化率与古气候变化的关系[J]. 中国地质, 2003, 30(1): 93-98 [Li Fuchun, Xie Changren, Jin Zhangdong, *et al.* Rubidium and strontium geochemistry in the Laohushan loess section, Nanjing, and relation between magnetic susceptibility and paleoclimatic change [J]. Geology in China, 2003, 30(1): 93-98]
- 26 宋明水. 东营凹陷南斜坡沙四段沉积环境的地球化学特征[J]. 矿物岩石, 2005, 25(1): 67-73 [Song Mingshui. Sedimentary environment geochemistry in the Shasi section of southern ramp, Dongying depression [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2005, 25(1): 67-73]
- 27 张玉芬, 李长安, 陈国金, 等. 江汉平原湖区周老镇钻孔磁化率和有机碳稳定同位素特征及其古气候意义[J]. 中国地质大学学报: 地球科学, 2005, 30(1): 114-120 [Zhang Yufen, Li Chang'an, Chen Guojin, *et al.* Characteristics and paleoclimatic significance of magnetic susceptibility and stable organic carbon isotopes from a bore in Zhoulao Town, Jiangnan Plain [J]. Journal of China University of Geosciences; Earth Science, 2005, 30(1): 114-120]

Geochemical Characteristics and Sedimentary Environment of ZK5 Core Sediments in Yellow River Delta

GONG Shao-jun^{1,2} QIN Zhi-liang³ YE Si-yuan⁴ QIAO Ji-guo^{1,2} ZHAO Wei^{1,2}

(1. Tianjin North China Geological Exploration Bureau, Institute of Geology, Tianjin 300170;

2. Tianjin Exploration Center of Marine Geology, Tianjin 300170;

3 National Marine and Hazard Mitigation Service, SOA, Beijing 100194;

4. Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao, Shandong 266071)

Abstract: This study discussed the sedimentary geochemistry characteristics and the palaeosedimentary environmental significance of ZK5 core in Yellow River Delta, on the basis of geochemical analyses of 36 sediments samples. Applying comprehensive analysis of historical geography and sedimentary geology to determine the depositional age of core sediments, and from the bottom to the top of the ZK5 sediment cores was divided into 7 sequences. The results of geochemistry characteristics indicated: K_2O , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , TiO_2 , Cr, V, Rb remarkably were positively correlated with each other; SiO_2 was apparently negatively correlated with other elements, and weakly negatively correlated with P_2O_5 ; Sr and CaO weakly negatively correlated with each other; P_2O_5 was weakly positively correlated with Al_2O_3 , Fe_2O_3 , K_2O , TiO_2 , CaO. The analytic result of the value of V/Cr revealed that the depth of sedimentary water increased from bottom to top in ZK5 core, and the variation regularities were consistent with the conclusions of sedimentary facies. The analytic result of the value of $10^2(MgO/Al_2O_3)$ and Sr/Ba revealed that the salinity was similar from the bottom to the top of ZK5 core, and belongs to marine sedimentary environment, while water injected from Yellow River. Based on the characters of Rb/Sr and MgO/CaO, climate conditions from NQ1 to NQ7 of ZK5 core have no more change, were deposited in warm-wet climate condition. In summary, the geochemical characteristics and the sedimentary environment are closely correlated, and the geochemical characteristics can be regarded as a mark in the sedimentary facies recognition.

Key words: Yellow River Delta; correlation; palaeo-environment; geochemical characteristics; sedimentary environments