

# 北黄海表层沉积物常量元素分布特征及其控制因素分析

方海超<sup>1,2,3</sup>, 黄朋<sup>1,2</sup>, 周宇<sup>1,2,3</sup>, 张晋<sup>4</sup>, 李安春<sup>1,2</sup>, 闫吉顺<sup>5</sup>

(1. 中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院 海洋地质与环境重点实验室, 山东 青岛 266071; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 中国石油大学(华东), 山东 青岛 266580; 5. 辽宁师范大学, 辽宁 大连 116029)

**摘要:** 为探讨北黄海表层沉积物中常量元素分布特征, 并进一步分析其控制因素和物质来源, 以常量元素为依托, 对 304 个站位表层沉积物常量元素含量分布特征及控制因素进行统计分析, 结果表明: 沉积物中 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgO、K<sub>2</sub>O、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、TiO<sub>2</sub> 七种元素含量的空间分布具有明显的区域性。其中, SiO<sub>2</sub>、K<sub>2</sub>O 具有相似的空间分布; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgO、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、TiO<sub>2</sub> 具有相似的空间分布, 但与 SiO<sub>2</sub>、K<sub>2</sub>O 的分布趋势相反; CaO、MnO、Na<sub>2</sub>O 在区域内分布较为均匀, 未显示出明显的高低变化趋势。聚类分析显示, 表层沉积物的常量元素分布主要受粒度效应的控制。主因子分析提取出 3 种控制常量元素分布的主成分, 分析表明, 粒度控制效应、源区风化作用和不同物源输入是影响表层沉积物常量元素空间分布的主要因素, 贡献累计方差总和达 77.12%。以 K<sub>2</sub>O、CaO、TiO<sub>2</sub> 为指标, 通过  $F_D$  函数识别出北黄海不同海域内的主要物质来源, 其主要物源包括黄河、鸭绿江和黄海暖流携带的长江物质。对北黄海沉积物物质来源进行分析, 不仅在海洋矿产资源勘探、航道开发、沿岸港口建设与整治等方面具有实际意义, 而且在认识海洋环境变迁等方面同样具有理论意义。

**关键词:** 北黄海; 表层沉积物; 常量元素; 控制因素

中图分类号: P736.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2015)04-0108-09  
doi: 10.11759/hyqx20131031001

北黄海位于辽东半岛以南、山东半岛成山角与朝鲜长山串联线以北, 是一半封闭的海域。随着末次盛冰期结束, 西太平洋边缘海的海平面开始呈阶段式上升, 约 14 kaBP 海水到达北黄海南缘, 约 11.6 kaBP 海水开始进入渤海<sup>[1]</sup>, 北黄海开始接受全新世沉积。黄河、鸭绿江、大洋河、庄河等直接或间接注入北黄海, 将大量陆源物质输入海区<sup>[2-5]</sup>。

北黄海是渤海和南黄海物质和能量交换的重要通道<sup>[5]</sup>, 其环流体系主要由黄海暖流和一系列的沿岸流组成。黄海暖流一般被认为是一支高温高盐水体, 在约 6 kaBP 海平面达到最高后形成<sup>[6]</sup>, 夏季相对较弱, 冬季较强可沿黄海海槽北上到达渤海, 对北黄海表层沉积物分布格局产生显著影响。前人在北黄海沉积物粒度特征和输运趋势<sup>[7-8]</sup>、重金属分布及环境背景值<sup>[9]</sup>、以及表层沉积物中微量元素早期成岩作用<sup>[10]</sup>等方面进行了一些研究, 但相对我国其他海域, 北黄海沉积物物源和沉积环境方面的研究程度仍然较低。本文采用相关分析、聚类分析、因子分析等多元统计学方法来分析研究区内常量元素的区域分布特征, 进而探讨影响元素分布的主要控制

因素及其物质来源, 为海域内矿产资源勘探、航道开发、沿岸港口建设与整治等提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集

文中所用样品由“科学一号”科学考察船于 2006 年采自北黄海, 在海域内表层采样 1140 站, 所有样品进行了粒度分析, 其中 304 站进行了元素地球化学分析(图 1), 涵盖整个北黄海的大部分海域, 有助于从大的空间尺度上了解北黄海表层沉积物的元素分布特征, 并进一步探讨其控制因素及物质来源。

### 1.2 样品测试

粒度分析在中国科学院海洋研究所完成, 使用法国生产的 Cilas940L 激光粒度仪。取适量样品, 先

收稿日期: 2013-10-31; 修回日期: 2014-03-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(41076032, 41276052)

作者简介: 方海超(1986-), 男, 河北承德人, 硕士研究生, 研究方向为海洋沉积及物源分析, E-mail: fanghaichao18@sina.com; 通信作者: 黄朋, 男, 副研究员, 电话: 0532-82898644, E-mail: huangpeng@qdio.ac.cn

后加入过量的 30% 的双氧水和 0.25 mol/L 的盐酸溶液去除有机质和碳酸盐, 离心清洗两次, 再经超声波充分分散后上机测试, 重复测量的相对误差小于 2%, 测量范围为 0.3~2 000  $\mu\text{m}$ 。

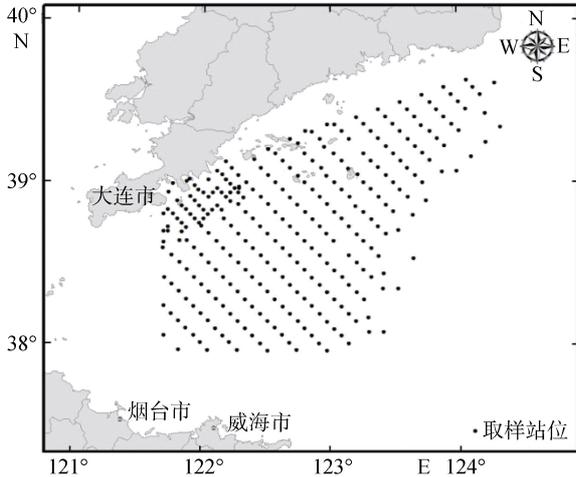


图 1 北黄海表层沉积物取样站位

Fig. 1 Location of sampling stations for chemistry analysis in the North Yellow Sea

表层沉积物的常量元素分析在中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所(廊坊)完成, 采用 X-射线荧光光谱(XRF)测试方法, 样品的加工、分析方法的选择、准确度和精密度的控制, 分析质量等严格按照《中华人民共和国国土资源部 DZ/T 0130-2006 地质矿产实验室测试质量管理规范》和《我国近海海洋综合调查与评价专项海洋底质调查技术规程》有关规定进行。样品分析质量控制采用标准样品法, 每批样品分析的同时, 插入 2 个或 2 个以上国内一级标准样品。测试结果一级标准物质和重复样的合格率为 100%。标样编号 GBW07317、GSD9、GSD10。

## 2 结果

### 2.1 粒度特征

粒度控制效应是控制沉积物元素分布特征的一个重要因素<sup>[11]</sup>, 本次研究分析了北黄海 1 140 个站位的表层沉积物粒度组成。按照  $\phi$  值分类标准对表层沉积物平均粒径( $M_z$ )进行分析, 结果显示, 受北黄海西部冷水团作用和黄河细颗粒物向北黄海西部运输的影响<sup>[4, 6]</sup>, 细粒组分高值区主要分布在北黄海的中西部海域以及大连外海, 在大连外海的南部海域也出现局部的高值区, 呈斑点式分布; 受北黄海东部强潮流冲刷的影响<sup>[12]</sup>, 细粒组分低值区主要分布

在北黄海东北部海域, 受附近岛屿风化剥蚀作用影响, 在长山列岛海域存在两个细粒组分低值区, 北黄海整体上自西南向东北表层沉积物粒度逐渐变粗(图 2)。王伟<sup>[7]</sup>根据谢帕德(Shepard)沉积物分类法, 将北黄海表层沉积物类型分为砂、粉砂质砂、砂质粉砂、黏土质粉砂和泥, 其各自分布区与图 2 分析显示相一致。

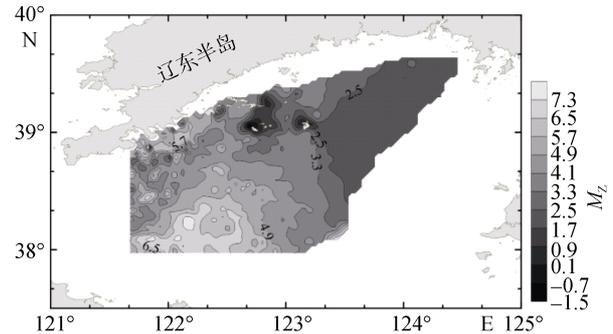


图 2 北黄海表层沉积物平均粒径分布图

Fig. 2 The distribution map of the mean grain size of the surface sediments in the North Yellow Sea

### 2.2 常量元素分布特征

沉积物中  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 、 $\text{MnO}$ 、 $\text{TiO}_2$  含量统计分析显示, 表层沉积物总体上相对富含  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 而  $\text{MnO}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 、 $\text{TiO}_2$  含量低;  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$  的标准偏差较大, 说明其在空间上分布差异性较大, 受到多种因素控制;  $\text{CaO}$  的变异系数较高, 暗示其物质来源除了陆源碎屑外面, 会有部分样品受到钙质生源碎屑影响(表 1)。

表 1 北黄海表层沉积物常量元素数据统计

Tab. 1 The data statistics of the major elements of the surface sediment

元素	元素质量分数平均值 (%)	标准偏差	变异系数
$\text{SiO}_2$	68.74	6.96	0.1
$\text{Al}_2\text{O}_3$	12.15	1.76	0.15
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	3.63	1.21	0.33
$\text{CaO}$	2.23	3.03	1.36
$\text{MgO}$	1.42	0.6	0.42
$\text{MnO}$	0.05	0.03	0.72
$\text{TiO}_2$	0.5	0.15	0.3
$\text{P}_2\text{O}_5$	0.11	0.02	0.22
$\text{K}_2\text{O}$	2.97	0.42	0.14
$\text{Na}_2\text{O}$	2.66	0.42	0.16

相关分析表明:  $Al_2O_3$ 、 $Fe_2O_3$ 、 $MgO$ 、 $P_2O_5$ 、 $TiO_2$  与  $M_Z$  呈明显的正相关关系, 即随着粒径的减小上述元素含量明显增加,  $MnO$ 、 $NaO$  与  $M_Z$  呈较弱的正相关关系;  $SiO_2$ 、 $K_2O$ 、 $CaO$  与  $M_Z$  呈负相关关系, 即随

着粒径的减小上述元素含量减少,  $SiO_2$  与  $M_Z$  相关性较强,  $K_2O$ 、 $CaO$  与  $M_Z$  相关性较弱(表 2)。此外,  $Al_2O_3$ 、 $Fe_2O_3$ 、 $MgO$ 、 $P_2O_5$ 、 $TiO_2$  五种常量元素之间呈明显的正相关关系, 说明其分布受控因素较为相近。

表 2 北黄海表层沉积物常量元素含量与平均粒径相关关系

Tab. 2 The relationship between percentage content of major elements and mean size

	$SiO_2$	$Al_2O_3$	$Fe_2O_3$	$CaO$	$MgO$	$MnO$	$TiO_2$	$P_2O_5$	$K_2O$	$NaO$	$M_Z$
$SiO_2$	1.00										
$Al_2O_3$	-0.55	1.00									
$Fe_2O_3$	-0.78	0.86	1.00								
$CaO$	-0.57	-0.34	0.00	1.00							
$MgO$	-0.81	0.84	0.92	0.05	1.00						
$MnO$	-0.45	0.13	0.42	0.32	0.36	1.00					
$TiO_2$	-0.69	0.79	0.87	-0.02	0.88	0.42	1.00				
$P_2O_5$	-0.67	0.61	0.76	0.10	0.81	0.53	0.82	1.00			
$K_2O$	0.42	0.11	-0.8	-0.56	-0.31	-0.42	-0.46	-0.44	1.00		
$NaO$	-0.05	0.33	0.17	-0.29	0.19	-0.14	0.17	0.13	0.23	1.00	
$M_Z$	-0.60	0.80	0.84	-0.15	0.88	0.39	0.86	0.74	-0.26	0.17	1.00

分析表明,  $SiO_2$ 、 $Al_2O_3$ 、 $Fe_2O_3$ 、 $MgO$ 、 $K_2O$ 、 $P_2O_5$ 、 $TiO_2$  七种元素分布特征具有明显的区域性, 其中  $SiO_2$ 、 $K_2O$  在空间上分布具有相似性, 与粗粒沉积物分布区相一致; 而  $Al_2O_3$ 、 $Fe_2O_3$ 、 $MgO$ 、 $P_2O_5$ 、 $TiO_2$  在空间上分布相似, 与细粒沉积物分布区相一致, 并且与  $SiO_2$ 、 $K_2O$  的高低值分布区域相反;  $CaO$ 、 $MnO$ 、 $Na_2O$  没有表现出明显的区域上分布特征(图 3)。

从图 3 可以看出,  $SiO_2$  含量呈现自西南到东北逐渐增多的趋势, 高值区主要分布在北黄海的东北部海域, 在辽东半岛南部沿岸海域有一条向西延伸的高值带, 推断其可能受到辽东沿岸流的影响; 低值区主要分布在中西部海域, 在长山列岛和大连湾附近海域出现极低值区。  $SiO_2$  含量分布特征与图 2 中粗粒物质分布趋势极为相似。  $K_2O$  的含量分布特征与  $SiO_2$  相似, 高值区主要分布在东北部海域; 低值区主要分布在中部海域, 呈南北向展布, 在  $38.7^\circ N$  附近向西转向, 自西南向东北  $K_2O$  含量先减少在增加。

$Al_2O_3$  的高值区主要分布在北黄海的中西部海域和大连湾附近海域, 低值区主要分布在北黄海的东北部海域, 在长山列岛附近出现极低值, 总体上自西南到东北  $Al_2O_3$  的含量逐渐减少。  $Fe_2O_3$ 、 $MgO$ 、 $P_2O_5$ 、 $TiO_2$  含量在空间上的分布特征与  $Al_2O_3$  相似。

$CaO$ 、 $MnO$ 、 $Na_2O$  在区域上没有明显的分布特征, 含量相对较低, 其中  $CaO$ 、 $MnO$  含量在大连湾和长山列岛附近海域出现局部的高值区,  $Na_2O$  在中部、东北部和长山列岛附近海域出现局部的高值区。

### 3 讨论

#### 3.1 表层沉积物元素组成的影响因素

为探讨北黄海表层沉积物常量元素分布的主要控制因素, 对沉积物中常量元素进行 R 型主因子分析, 提取出 3 个主成分(成分 1、成分 2、成分 3), 贡献累积方差达到 77.12%, 成分矩阵载荷和贡献累积方差见表 3。

表 3 北黄海表层沉积物常量元素主因子分析矩阵载荷

Tab. 3 R-mode rotated factor matrix of major elements

分析要素	成分矩阵载荷		
	成分 1	成分 2	成分 3
$SiO_2$	-0.727	0.657	-0.054
$Al_2O_3$	0.919	0.191	-0.199
$Fe_2O_3$	0.938	-0.104	-0.063
$CaO$	-0.103	-0.949	0.223
$MgO$	0.95	-0.131	0.105
$MnO$	0.257	-0.222	0.177
$TiO_2$	0.86	0.017	0.296
$P_2O_5$	0.721	-0.093	0.238
$K_2O$	-0.126	0.349	-0.828
$Na_2O$	0.153	0.097	-0.079
$M_Z$	0.882	0.118	0.13
砂	-0.807	0.17	-0.505
粉砂	0.744	-0.145	0.596
黏土	0.848	-0.202	0.24
CIA	-0.097	0.98	-0.127
贡献累积方差/%	48.28	65.94	77.12

注:  $CIA = (Al_2O_3 / (Al_2O_3 + K_2O + Na_2O + CaO)) \times 100$

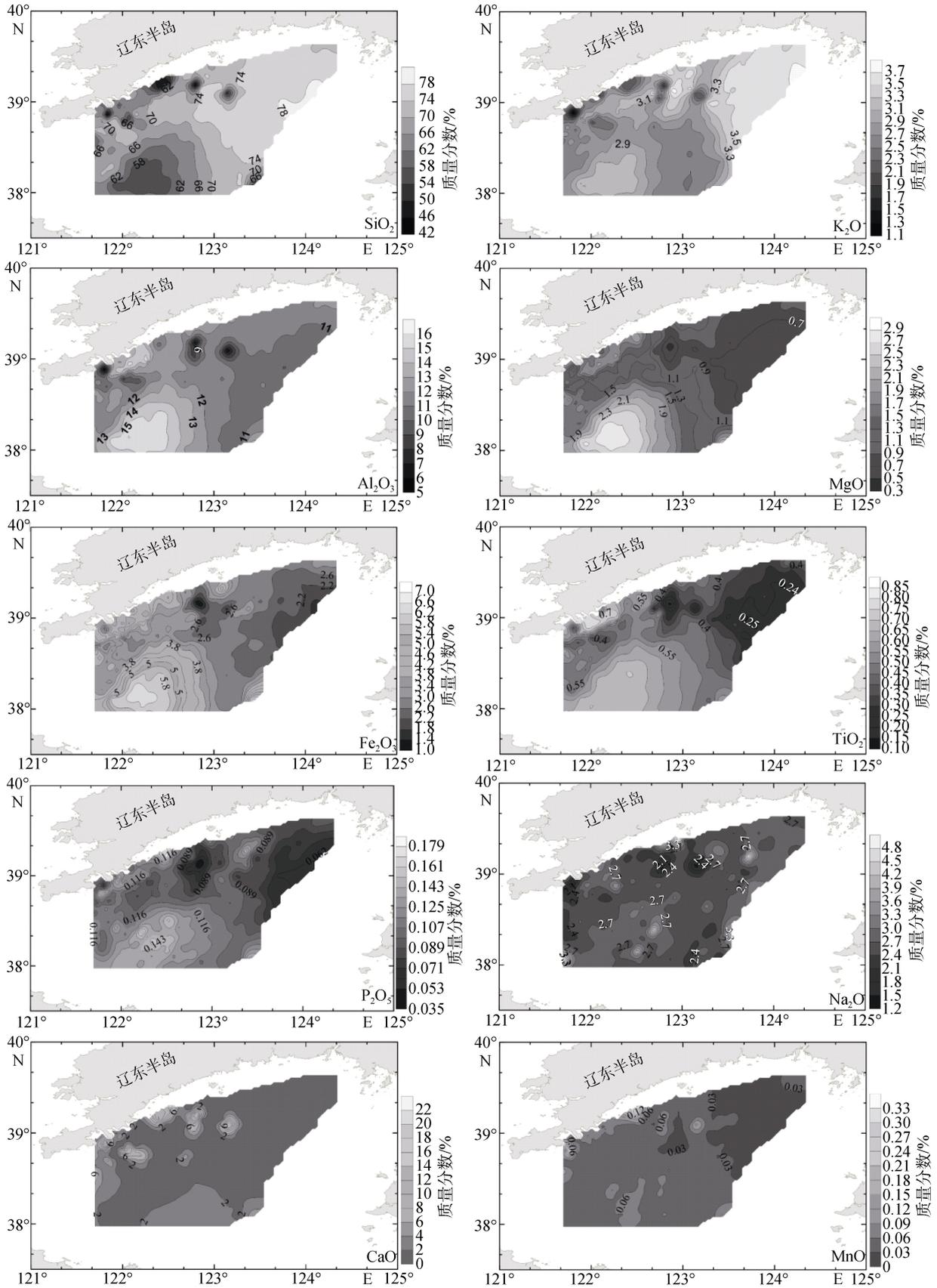


图 3 北黄海表层沉积物常量元素含量分布图

Fig. 3 The distribution diagram of the content of the major elements

从表3可以看出,成分1贡献累积方差达48.28%,主要控制 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgO、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、TiO<sub>2</sub> 六种元素,对 SiO<sub>2</sub>和砂为显著的负载荷,对 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgO、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、TiO<sub>2</sub>、Mz、粉砂和黏土为显著的正载荷,初步反映出北黄海表层沉积物的常量元素分布主要受粒度效应控制。SiO<sub>2</sub>主要由中酸性岩浆岩和石英砂岩等风化而来,抗风化相对较强,富集于粗颗粒沉积物中;而 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgO、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、TiO<sub>2</sub>等元素为黏土矿物主要成分或易受黏土矿物吸附,主要赋存在细粒沉积物中。此外,从每个样品的因子1载荷值也可以看出,在东北部海域因子载荷为负,在中西部海域因子载荷为正,并且从西南部向东北部因子载荷逐渐过渡为负值(图4),说明成分1在东北部和中西部海域对元素的控制作用截然相反,而北黄海表层沉积的物粒度分布也有同样的趋势(图2),进一步表明成分1代表了粒度效应对元素的控制。沉积物粒度的分布受到物源、水动力条件等多种因素控制,粗粒物质通过物理沉积分异作用主要卸载在近岸海域,而细粒物质会被不同的海流带入到远海位置,一般情况下,细粒沉积物代表相对较弱的水动力环境,粗粒物质代表相对较强的水动力环境,前人研究表明,大连湾附近海域和北黄海西部水动力较弱<sup>[3, 13-14]</sup>,而东北部海域主要为强潮流区<sup>[12]</sup>,所以我们可以认为成分1代表了水动力条件对元素分布的控制,通过粒度控制效应表现出来。

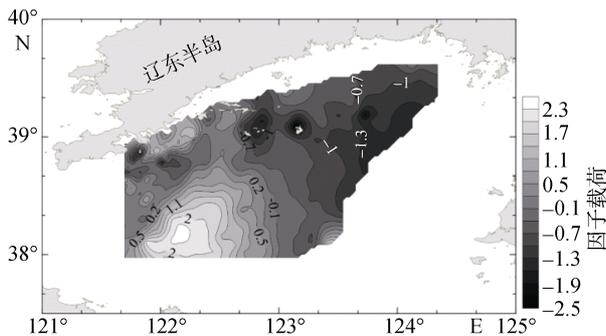


图4 北黄海表层沉积物样品因子1载荷

Fig. 4 The factor one loading of samples from the North Yellow Sea

成分2的贡献累积方差为17.67%,主要控制 SiO<sub>2</sub>和CaO两种元素,对 SiO<sub>2</sub>和CIA(化学风化指数)为显著的正载荷,对CaO为显著的负载荷。SiO<sub>2</sub>和CaO两种元素对风化作用的敏感性截然相反, SiO<sub>2</sub>主要赋存在硅酸盐矿物中,其抗风化能力相对较强,而CaO主要赋存在碳酸盐岩中,其抗风化能力相对

较弱。近海沉积物主要来源于陆源碎屑,而源区风化作用强弱最先控制了陆源碎屑的组成,从而影响海区沉积物元素在空间分布特征。从图5可以看出,整个海区因子载荷较低,但是在大连湾和长山列岛附近海域出现了局部高值区,可能是近岸岛屿受到海水反复冲刷,加速了风化作用;黄河和鸭绿江处于中纬度地区,以物理风化作用为主<sup>[13, 15]</sup>,相对于化学风化作用而言,物理风化作用减少了碎屑物质中元素的流失。因此,成分2可能代表了源区风化作用强度和形式对表层沉积物常量元素分布的控制。

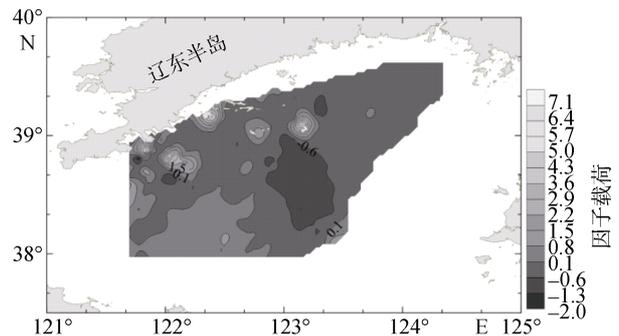


图5 北黄海表层沉积物样品因子2载荷

Fig. 5 The factor two loading of samples from the North Yellow Sea

成分3贡献累积方差为11.17%,主要对K<sub>2</sub>O和粉砂含量起控制作用,其中对K<sub>2</sub>O为显著的负载荷,对粉砂含量为正载荷。为方便讨论,将研究区海域分成四个区块(A、B、C、D),值得注意的是,在样品因子3载荷值中,A海域样品的因子载荷值均为正值,而B、C、D海域样品因子载荷值均为负值(图6),这说明成分3对A海域和B、C、D海域的元素分布起着截然相反的控制作用。A海域为黄海暖流的流经区;B海域为北黄海西部的泥质沉积区,其主要物源来源于黄河<sup>[3-4]</sup>;C海域为鸭绿江沉积物向外海扩散区域;D海域为辽东沿岸流流经区,其携带了鸭绿江物质。鸭绿江流域主要出露花岗岩类和石英岩、石英砂岩为主的太古代变质岩,相对富含钾长石、云母等富钾矿物;黄河在流经黄土高原后携带了大量泥沙,其沉积物也相对富含富钾矿物;黄海暖流在北上的过程中通过与周围水体的交换,会将携带部分南黄海物质进入北黄海<sup>[4]</sup>,长江是南黄海的主要物源区之一,其沉积物中也富含钾<sup>[15]</sup>,因此黄海暖流像一道天然的屏障影响了北黄海东西向物质的交换,形成了北黄海不同的物源沉积区。因此,成分3代表了不同物源输入对北黄海表层沉积物常量元素分布的控制。

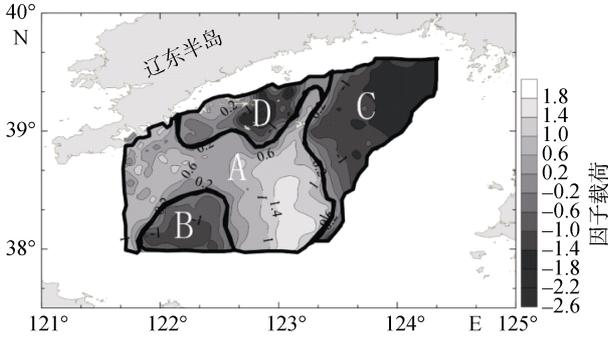


图 6 北黄海表层沉积物样品因子 3 载荷

Fig.6 The factor three loading of samples from the North Yellow Sea

### 3.2 粒度效应对表层沉积物元素组成的影响

#### 3.2.1 R 型聚类分析

对 10 种常量元素与样品砂、粉砂和黏土组分的百分含量进行系统聚类分析，聚类对象总体上分为两类(图 7)，明显受到粒度效应的控制。聚类 1 包括  $Al_2O_3$ 、 $Fe_2O_3$ 、 $CaO$ 、 $MgO$ 、 $K_2O$ 、 $Na_2O$ 、 $P_2O_5$ 、 $MnO$ 、 $TiO_2$  九种组分，主要与陆源碎屑组成有关<sup>[16]</sup>， $Al_2O_3$  是黏土矿物的主要组分，随着沉积物粒径的变小会明显的富集<sup>[17]</sup>，因此  $Al_2O_3$  与黏土百分含量最先聚为一类，之后，上述九种元素与黏土百分含量和粉砂百分含量聚为一类，指示九种元素主要富集于细粒沉积物中并受其空间分布的控制。聚类 2 为  $SiO_2$  和砂百分含量， $SiO_2$  是粗粒级沉积物中的典型

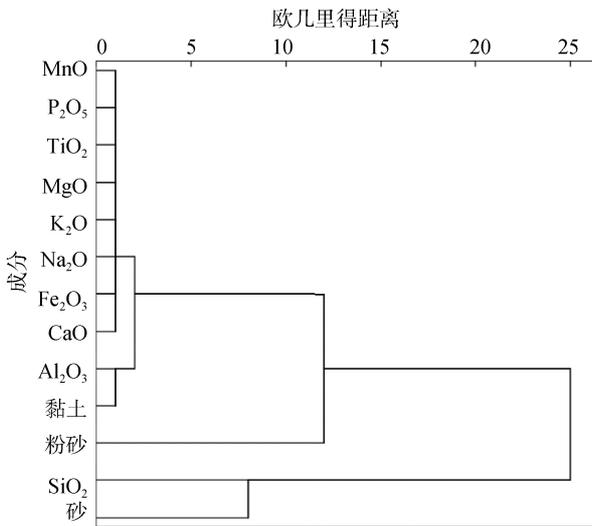


图 7 北黄海表层沉积物常量元素与样品砂、粉砂和黏土百分含量聚类

Fig.7 The R-mode cluster analysis of major elements with the percentage of sand, silt and clay of the surface sediments

富集组分，随着沉积物粒径的变大而明显增加，受到粗粒沉积物分布的控制。最后所有元素聚为一类，说明元素均来源于陆源碎屑的输入，显示出亲陆性。因此，以变量为变量的系统聚类分析表明，北黄海表层沉积物常量元素的分布主要受粒度效应的控制。

#### 3.2.2 Q 型聚类分析

为了揭示研究区常量元素含量在空间上的差异性，对 304 个站位样品进行系统聚类分析(图 8)。聚类对象明显地被分成两类，聚类 1，主要分布在北黄海西部海域和大连湾附近海域；聚类 2 主要分布在北黄海东北部海域。前人研究表明，大连湾附近海域和北黄海西部主要为泥质沉积区<sup>[3, 13-14]</sup>，而东北部海域主要为砂质沉积区<sup>[12]</sup>，图 8 中显示聚类 1 与细粒沉积物区相对应，聚类 2 与粗粒沉积物区相对应。因此，Q 型聚类分析表明，北黄海表层沉积物常量元素分布同样明显受到粒度效应的控制。

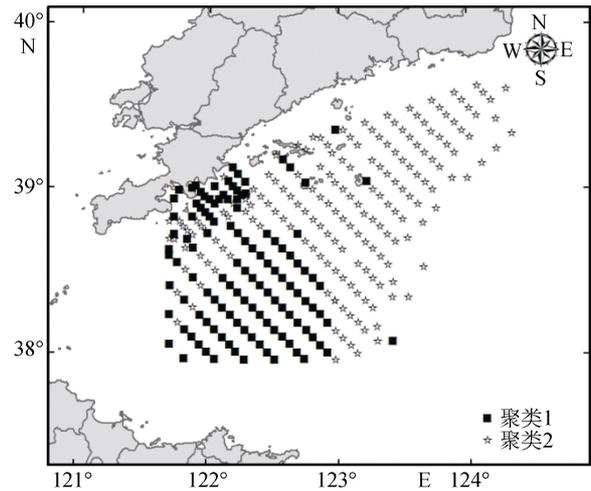


图 8 北黄海表层沉积物常量元素系统聚类分析

Fig.8 The system clustering analysis of the major elements of the surface sediments

### 3.3 北黄海物质来源分析

目前研究认为，北黄海在全新世期间主要接受周边河流携带的陆源物质，物质来源主要包括外海输入物质、辽东半岛东岸和山东半岛北岸河流输入物质<sup>[4]</sup>。通过主成分 3 分析初步推断出黄海暖流造成北黄海不同的物源沉积区，为进一步探讨不同物源区的物质来源，引入  $F_D$  函数来进行物源识别，公式如下<sup>[18]</sup>：

$$F_D = C_{ix} - C_{im} / C_{im}$$

式中： $i$  为元素或两元素之比； $C_{ix}$  为研究区样品中元素  $i$  的质量分数或两元素质量分数之比  $i$  的值； $C_{im}$  为

端元中元素  $i$  的质量分数或两元素质量分数之比  $i$  的值。 $F_D$  值越小, 则表明研究区样品中元素的组成越接近端元;  $F_D$  值越大, 则表明研究区样品中元素的组成越偏离端元。

长江流域岩石类型复杂、化学风化作用强烈, Ca、Mg、Na 等易迁元素在风化过程中大量淋失, Al、Ti 等难迁移元素及在氧化环境中稳定元素 Fe、Mn 相对富集, 因此, 可根据沉积物中  $TiO_2$  含量来识别长江物源<sup>[19-20]</sup>; 黄河流经黄土高原, 携带大量泥沙, 且流域以物理风化作用为主, 此外, 土壤中因富含碱土金属而形成碱性或弱碱性的环境, 因此, 在黄河沉积物中 Ca、Na、Sr 含量较高<sup>[15, 20-21]</sup>, 可根据 CaO 的含量来识别黄河物源; 鸭绿江流域岩性以中酸性火山岩和古老变质砂岩为主, 钾长石、云母等富钾矿物含量相对较高, 鸭绿江河口沉积物中以  $K_2O$  含量高为显著特征<sup>[16]</sup>, 因此选择  $K_2O$  来识别鸭绿江物源。

本文将 A、B、C、D 四个区域内的站位单独选出, 计算出每个区域内指示元素平均百分含量(表 4), 进而以特征元素进行物源探讨。在 A 海域内,  $K_2O$  与鸭绿江端元的  $F_D$  值非常小, CaO 和  $TiO_2$  则与长江端元的  $F_D$  值较小, 这说明 A 海域是一个多物源沉积区, 鸭绿江输入物质是其主要物源区, 此外, A 区是黄海暖流的流经区, 暖流在其北上的过程中通过与周围水体的交换, 会携带部分南黄海物质进入北黄海<sup>[4]</sup>, 长江是南黄海的主要物源区之一, 所以, 长江物质也很有可能对 A 海域表层沉积物中元素的分布产生了影响; 在 B 海域内,  $K_2O$  与鸭绿江端元的  $F_D$  值较小, CaO 与长江端元  $F_D$  值较小,  $TiO_2$  则与黄河端元

$F_D$  值最小, 说明黄河输入物质是该区的主要物源区, 鸭绿江和长江输入物质也产生了一定程度的影响; 在 C、D 海域内,  $K_2O$  与鸭绿江端元的  $F_D$  值都非常小, 说明鸭绿江输入物质是这两个海域的主要源区, C 海域沉积物可能更多直接受到鸭绿江输入物质影响, 与 C 海域  $K_2O$  和鸭绿江端元  $F_D$  值相比, D 海域的  $F_D$  值稍大, D 海域位于长山列岛附近, 岛屿的风化产物可能对沉积物中元素的分布也产生了影响, 但鸭绿江沉积物随辽东半岛沿岸流向西输运仍是其主要物源区。

## 4 结论

通过相关分析、聚类分析、因子分析等多元统计学方法对研究区内的沉积物常量元素分布特征进行了分析, 进而探讨了影响元素分布的主要控制因素及北黄海的主要物质来源, 得出以下结论。

1) 北黄海表层沉积物中大部分常量元素空间分布具有区域性,  $SiO_2$ 、 $K_2O$  在空间上具有相似分布特征, 并与粗粒沉积物分布区大致重合;  $Al_2O_3$ 、 $Fe_2O_3$ 、MgO、 $P_2O_5$ 、 $TiO_2$  在空间上具有相似分布特征, 并与细粒沉积物分布区大致重合; 且与  $SiO_2$ 、 $K_2O$  的高低值分布区域相反; CaO、MnO、 $Na_2O$  没有表现出明显的区域上分布特征。

2) 北黄海表层沉积物中常量元素的分布受粒度控制效应、物源区风化作用强度以及不同物源输入等多种因素的控制, 其中粒度控制效应是控制表层沉积物中元素分布的最主要因素。

3) 以  $K_2O$ 、CaO、 $TiO_2$  为指标, 通过  $F_D$  函数识别出北黄海不同海域内的主要物源区, 东北部海域的物源主要受控于鸭绿江物质输入; 中部海域物源以鸭绿江输入物质为主, 但黄海暖流携带的南黄海物质也有一定程度影响; 西部海域物源则主要来源于黄河细粒物质输入。

### 参考文献:

[1] Liu J P, Milliman J D, Gao Shu, et al. Holocene development of the Yellow River's subaqueous delta, North Yellow Sea[J].Marine Geology, 2004, 209: 45-67.  
 [2] 齐君, 李凤业, 宋金明, 等.北黄海沉积速率及其通量[J].海洋地质与第四纪地质, 2004, 24(2): 9-14.  
 [3] 王桂芝, 高抒, 李凤业.北黄海西部的全新世泥质沉积[J].海洋学报, 2003, 25(4): 125-134.

表 4 北黄海各海域与主要河流表层沉积物常量元素质量百分含量对比

Tab. 4 Mean content of major elements in sediments of the North Yellow Sea and main rivers of china

源区	元素质量分数(%)		
	$K_2O$	CaO	$TiO_2$
A 海域	3.08	1.95	0.58
B 海域	3.04	2.04	0.38
C 海域	2.84	2.59	0.5
D 海域	3.06	1.62	0.42
鸭绿江 <sup>[16]</sup>	2.81	0.77	0.31
黄河 <sup>[22]</sup>	1.95	3.88	0.39
长江 <sup>[22]</sup>	2.20	3.06	0.68

注: 文中数据为全样测试数据, 引用的鸭绿江、黄河、长江数据也为全样数据

- [4] 程鹏, 高抒. 北黄海西部海底沉积物的粒度特征和净  
 运输趋势[J]. 海洋与湖沼, 2000, 31(6): 604-615.
- [5] Liu J P, Milliman J D, Gao Shu. The Shandong mud  
 wedge and post-glacial sediment accumulation in the  
 Yellow Sea [J]. Marine Geology, 2002, 21: 212-218.
- [6] 刘健, 李绍全, 王圣洁, 等. 末次冰消期以来黄海海  
 平面变化与黄海暖流的形成[J]. 海洋地质与第四纪地  
 质, 1999, 19(1): 13-24.
- [7] 王伟, 李安春, 徐方建, 等. 北黄海表层沉积物粒度  
 分布特征及其沉积环境分析[J]. 海洋与湖沼, 2009,  
 40(5): 525-531.
- [8] 李凤业, 高抒, 贾建军, 等. 黄、渤海泥质沉积区现代  
 沉积速率[J]. 海洋与湖沼, 2002, 33(4): 364-369.
- [9] 李淑媛, 苗丰民, 刘国贤. 北黄海沉积物中重金属分  
 布及环境背景值[J]. 黄渤海海洋, 1994, 12(3): 20-24.
- [10] 邹建军, 石学法, 李双林. 北黄海浅表层沉积物微量  
 元素的分布及其早期成岩作用探讨[J]. 海洋地质与第  
 四纪地质, 2007, 27(3): 43-50.
- [11] 杜德文, 石学法, 孟宪伟, 等. 黄海沉积物地球化学  
 的粒度效应[J]. 海洋科学进展, 2003, 21(1): 78-82.
- [12] 高建华, 高抒, 董礼先, 等. 鸭绿江河口地区沉积物  
 特征及悬沙输送[J]. 海洋通报, 2003, 22(5): 26-33.
- [13] 赵一阳, 鄢明才, 李安春, 等. 中国近海沿岸泥的地  
 球化学特征及其指示意义[J]. 中国地质, 2002, 29(2):  
 181-185.
- [14] 李燕, 李安春, 万世明, 等. 大连湾近海表层沉积物  
 矿物组合分布特征及其物源环境[J]. 海洋地质与第四  
 纪地质, 2009, 29(4): 115-121.
- [15] 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): 19-24.
- [16] 李家胜, 高建华, 李军, 等. 鸭绿江河口沉积物地球  
 化学及其控制因素[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2010,  
 30(1): 25-31.
- [17] Petschick R, Kuhn G, Gingele F. Clay mineral  
 distribution in surface sediments of the south Atlantic:  
 sources, transport, and relation to oceanography[J].  
 Marine Geology, 1996, 130: 203-229.
- [18] 王爱萍, 杨守业, 李从先. 南京地区下蜀土元素地球  
 化学特征及其物源判别[J]. 同济大学学报, 2001, 29(6):  
 657-661.
- [19] 杨守业, 李从先, Jung H, 等. 中韩河流沉积物微量元  
 素地球化学研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2003,  
 23(2): 19-20.
- [20] 范代读, 王扬扬, 吴伊婧. 长江沉积物源示踪研究进  
 展. 地球科学进展[J]. 2012, 27(5): 515-528.
- [21] 杨守业, Jung HorSoo, 李从先, 等. 黄河、长江与韩国  
 Keum、Yeongsan 江沉积物常量元素地球化学特征[J].  
 地球化学, 2004, 33(1): 99-105.
- [22] 杨守业, 李从先. 长江与黄河沉积物组成及地质背景  
 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 1999, 19(2): 19-25.

## Distribution and controlling factors of the major elements in surface sediments of the North Yellow Sea

FANG Hai-chao<sup>1, 2, 3</sup>, HUANG Peng<sup>1, 2</sup>, ZHOU Yu<sup>1, 2, 3</sup>, ZHANG Jin<sup>4</sup>, LI An-chun<sup>1, 2</sup>, YAN Ji-shun<sup>5</sup>

(1. Institute of Oceanology, the Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Key Laboratory of Marine Geology and Environment, the Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 3. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. China University of Petroleum, Qingdao 266580, China; 5. Liaoning Normal University, Dalian 116029, China)

**Received:** Oct., 31, 2013

**Key words:** the North Yellow Sea; surface sediments; major elements; controlling factors

**Abstract:** The distribution characteristics and controlling factors of the surface sediments obtained from 304 positions of the North Yellow Sea were analyzed. The results show that SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, K<sub>2</sub>O, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, and TiO<sub>2</sub> seven elements have obvious regional distribution. The SiO<sub>2</sub> and K<sub>2</sub>O have a similar distribution in the area. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, and TiO<sub>2</sub> have a similar distribution in the area, which is opposite to the distribution trend of SiO<sub>2</sub> and K<sub>2</sub>O. CaO, MnO and Na<sub>2</sub>O have no obvious change in the area. Cluster analysis shows that the major elements distributions of the surface sediments are mainly controlled by grain size effect. Three principal components that control the major elements distribution are extracted by the main factor analysis, the contribution to the total sum of variance is 77.12%, and the analysis shows that the grain size control effect, weathering of source rocks and different sources input are the main influence factors to control the distribution of the major elements of the surface sediment. K<sub>2</sub>O, CaO and TiO<sub>2</sub> were used for indicators to identify the source materials of the North Yellow Sea by  $F_D$  function.

(本文编辑: 刘珊珊)