

远继东, 褚宏宪, 冯永财, 等. 渤海曹妃甸海域表层沉积物常量元素特征及其对源区风化特征的指示意义[J]. 海洋地质前沿, 2024, 40(11): 80-90.

YUAN Jidong, CHU Hongxian, FENG Yongcai, et al. Geochemical characteristics of major elements in surface sediments of Caoifeidian offshore area in the Bohai Sea: implications for the weathering characteristics of the source area[J]. Marine Geology Frontiers, 2024, 40(11): 80-90.

渤海曹妃甸海域表层沉积物常量元素特征及其对源区风化特征的指示意义

远继东^{1,2}, 褚宏宪^{1,2*}, 冯永财^{1,2}, 冯兵辉^{1,2}, 陈玉海^{1,2}, 李佳林^{1,2},
姜文钦^{1,2}, 黄杏^{1,2}, 贾濮硕^{1,2}, 曹凡凡^{1,2}, 李玉彦^{1,2}

(1 中国地质调查局烟台海岸带地质调查中心, 烟台 264000;

2 自然资源部黄河入海口陆海交互作用野外科学观测研究站, 烟台 264000)

摘要:通过对渤海曹妃甸海域的 161 个表层沉积物样品和环渤海湾主要河流的 30 个表层沉积物样品进行常量元素测试, 研究常量元素组合特征及其影响因素, 并运用化学蚀变指数 (CIA), 探讨沉积物风化特征及其物源指示意义。结果表明, 曹妃甸附近海域表层沉积物常量元素氧化物组分以 SiO_2 和 Al_2O_3 为主, Si、Al、Fe、K、Mg、P、Ti 7 种元素“粒度效应”显著, 受沉积物粒径影响, 除 Si 外, 其他 6 种元素在研究区基本呈现南高北低、西高东低的分布格局。元素 Ca、Na 受物源的影响显著, Mn 的分布与氧化还原条件相关。风化程度研究表明, 曹妃甸海域砂粒级和粉砂粒级沉积物 CIA 分别为 48.4 和 57.2, CIA 与沉积物粒径呈正相关性, 与周边水系沉积物同处于初级风化阶段, 其源岩成分接近二长花岗岩。地形和气候差异是影响滦河水系和海河水系沉积物风化程度差异不可忽视的重要因素。

关键词:常量元素; 化学风化; 曹妃甸海域; 滦河水系; 海河水系; 黄河

中图分类号: P736.4

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2024.167

0 引言

渤海是一个半封闭的陆架边缘海, 接受来自黄河的巨量沉积物, 并通过渤海海峡与黄海、东海形成联系, 是构成中国东部陆架源-汇体系的重要组成部分。黄河每年向渤海输送约 1.08×10^9 t 的沉积物^[1], 构成其沉积物主要来源。除黄河以外, 渤海周边河流也为渤海提供了相当数量的沉积物, 如滦河年平均输沙量为 2.2×10^7 t^[2], 海河年平均输沙量为

1.87×10^6 t^[3]。曹妃甸附近海域处于渤海湾北部, 黄海暖流进入渤海后, 在该区域形成向北呈顺时针流动的辽南沿岸流和向西呈逆时针流动的渤海沿岸流。在渤海湾内, 高盐海水沿渤海湾北岸呈逆时针回转, 黄河冲淡水沿渤海湾南岸北上, 在湾内形成双向环流^[4]。与此同时, 黄河、海河、滦河的沉积物在复杂的环流驱动下在此交汇并相互影响(图 1)。

沉积物常量元素中的 Si、Al、Ti、Fe, 因其化学性质相对稳定, 在经历风化剥蚀、搬运以及沉积等自然过程中, 依然保存了物源区的元素组成特征, 常被视为理想的物源指示元素^[5]。而在化学风化过程中, 长石中富集的活泼元素 Na、Ca、K, 易于以离子形式淋滤释出, 导致一些稳定氧化物(如 Al_2O_3) 的占比有所增加。因此, 沉积物中常量元素含量和配分模式可以对沉积物源岩所经历的风化程度进行定性分析和定量表达^[6-8]。基于常量元素迁移性

收稿日期: 2024-07-15

资助项目: 中国地质调查局项目(DD20211553, DD20230412)

第一作者: 远继东(1993—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事海洋地质方面的研究工作。E-mail: 787312820@qq.com

* 通讯作者: 褚宏宪(1973—), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要从事海洋地质与海岸带地质方面的研究工作。E-mail: chx-8@163.com

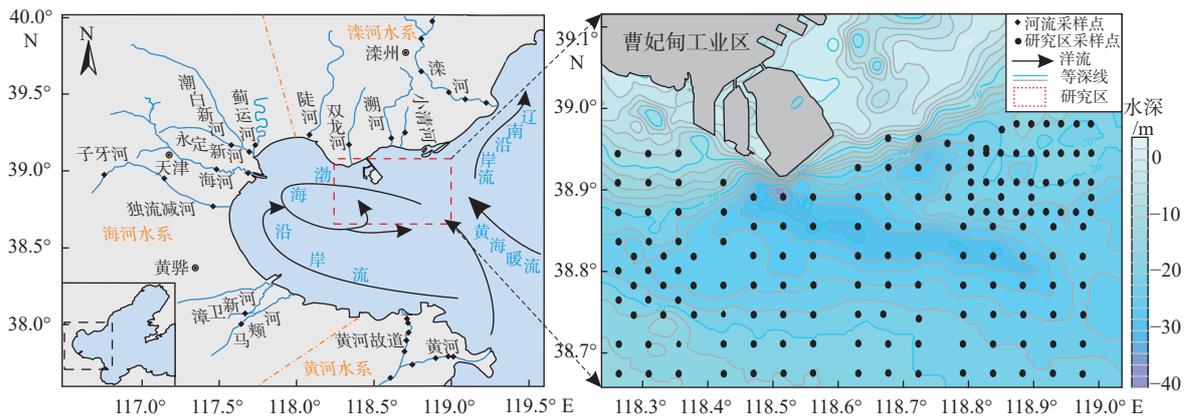


图 1 研究区位置及采样站位

Fig.1 Location of the study area and sampling stations

差异,多位学者提出了不同的化学风化指标,如化学蚀变指数(CIA)^[9]、化学风化指数(CIW)^[10]、斜长石蚀变指数(PIA)^[11]等,并被广泛应用^[12-16]。

曹妃甸地处环渤海中心地带,甸头南侧 500 m 即为曹妃甸深槽^[17],平均水深达 30 m 以上,构成渤海湾内天然深水港址,其地质环境一直备受关注。祝贺^[18]曾对曹妃甸近岸海区表层沉积物粒度、矿物特征和地球化学元素进行了系统研究。杨娅敏等^[19]结合曹妃甸海域沉积物粒度和黏土矿物特征对物源进行了探讨。JIANG 等^[20]总结了重金属元素分布特征,阐述了重金属运移规律。张连杰等^[21]、蓝先洪等^[22]总结了整个渤海湾沉积物的地球化学特征,并对沉积环境、物质来源进行了探讨。以往的研究主要利用微量元素、稀土元素、黏土矿物等特征揭示了曹妃甸海域或渤海湾的物质来源,但是对沉积物化学风化特征缺少深入研究。本文从沉积物常量元素特征入手,研究元素组合规律及控制因素,探讨曹妃甸海域沉积物及周边河流沉积物的风化特征,深化对曹妃甸海域沉积环境认识。

1 材料与方 法

1.1 样品采集

于 2021 年在曹妃甸工业区南部海域利用箱式取样器共采集 161 站位表层沉积物(图 1)。采样站位非均匀分布,东北部海域和西部海域加密采样,间距约 2 km,其他站位均匀采集,间距约 4 km。采取底质上覆 0~5 cm 沉积物,保存于聚乙烯样袋中,4 ℃ 低温保存。2023 年 4 月,利用取样铲和抓斗取样器采集渤海湾周边的黄河、海河水系、滦河水系

等多条河流河漫滩处表层沉积物,采用梅花采样法采集 5 个 0~5 cm 的表层样品,均匀混合后作为该点的代表样品,采用聚乙烯样袋封装并于 4 ℃ 低温保存。采样点位均位于各河流的下游地区或临近入海口处(图 1),共采集表层沉积物 30 站位。

1.2 测试方法

1.2.1 粒度分析

粒度分析由中国地质调查局烟台海岸带地质调查中心完成。具体处理方法:将样品混合均匀,称取 0.5 g 样品,用体积分数 30% 的过氧化氢(H₂O₂)去除有机质;然后加入 10% 的 HCl 去除钙质胶结物;上机前加入 0.5 mol/L 的六偏磷酸钠并经超声波完全分散后,利用奥地利 Anton Paar PSA1190 激光粒度分析仪进行粒度分析测试。沉积物粒级标准划分采用 Udden-Wentworth 等比制 Φ 粒级标准,分类和命名采用 Folk-Ward 图解法^[23]。

1.2.2 常量元素

常量元素测定由青岛斯八达分析测试有限公司完成,共测定了 Al₂O₃、CaO、MgO、K₂O、Na₂O、Fe₂O₃、SiO₂、Mn、P、Ti 共 10 种氧化物及元素。采用 X 射线荧光光谱法测试,样品经烘干、研磨后,制成 200 目粉末,通过粉末压片法制片备测,测试仪器为 ZSX Primus II X 射线荧光光谱仪。测试过程中,每批样品进行 10% 平行样分析,相对误差优于 10%,平行样合格率为 100%。

1.3 富集因子

为了表征沉积物元素的富集程度及组成特征,引入富集系数(EF)^[24],计算公式:

$$EF = (C_E/C_{Al})_{\text{沉积物}} / (C_E/C_{Al})_{\text{UCC}} \quad (1)$$

式中: EF 为元素的富集系数;

$(C_E/C_{Al})_{\text{沉积物}}$ 为样品中某元素与参照元素 Al 的含量比值;

$(C_E/C_{Al})_{\text{UCC}}$ 为上陆壳中某元素与参照元素 Al 的含量比值。

沉积物中 Al 主要存在于细粒黏土矿物中,且主要为陆源,以 Al 作为参照元素可以消除粒度效应。

1.4 化学蚀变指数

为了评价母岩的化学风化程度和源区所处的气候环境, NESBITT 和 YOUNG^[9] 提出了化学蚀变指数(CIA), 利用 Al_2O_3 与碱金属和碱土金属元素(Na、K、Ca)氧化物的摩尔分数比值来定量研究碎屑源区岩石化学风化强度。CIA 的计算公式如下:

$$CIA = Al_2O_3 / (Al_2O_3 + Na_2O + K_2O + CaO^*) \times 100 \quad (2)$$

式中: 氧化物为摩尔质量百分比;

CaO*为硅酸盐矿物中的 Ca 含量, 不包括碳酸盐和磷酸盐等矿物中结合的 Ca。

采用 MCLENNAN^[25] 提出的校正方法, 去除碳酸盐中的 CaO: $CaO' = CaO - 10 \times P_2O_5 / 3$, 若 $CaO' < Na_2O$, 则 $CaO^* = CaO'$, 若 $CaO' > Na_2O$, 则 $CaO^* = Na_2O$ 。

CIA 的值越大, 指示硅酸盐矿物中 Na、Ca 和 K 元素流失越多, 化学风化程度越强。

1.5 成分变异指数

COX 等^[26] 提出的成分变异指数(ICV)可以评估岩石或矿物成分的成熟度, 从而判断沉积物是首次沉积产物还是再沉积产物。其计算公式为:

$$ICV = (Fe_2O_3 + K_2O + Na_2O + CaO + MgO + MnO + TiO_2) / Al_2O_3 \quad (3)$$

公式(3)中氧化物以摩尔数为单位。ICV < 1, 说明样品中黏土矿物含量较高, 代表了再旋回作用或首次强烈的风化作用。ICV > 1, 说明样品中黏土矿物含量较少, 代表构造活动背景下的首次沉积。

2 结果

2.1 沉积物粒度特征

研究区表层沉积物粒度参数如表 1 所示, 其参数分布特征见文献 [19]。按照 Folk 图解法, 研究区表层沉积物主要以粉砂(Z)、粉砂质砂(zS)、砂质粉砂(sZ)为主, 泥(M)、砂(S)、泥质砂(mS)分布较少(图 2a)。粉砂主要分布在研究区南部海域和曹

表 1 研究区表层沉积物粒度参数

Table 1 Grain size parameters of surface sediments in the study area

	黏土/%	粉砂/%	砂/%	平均粒径/ ϕ	分选系数	偏态	峰态
最大值	51.1	79.0	98.6	8.2	2.9	0.7	2.4
最小值	0.5	0.9	0.0	1.4	0.7	-0.2	0.7
平均值	21.5	50.4	28.2	5.7	2.0	0.3	1.0

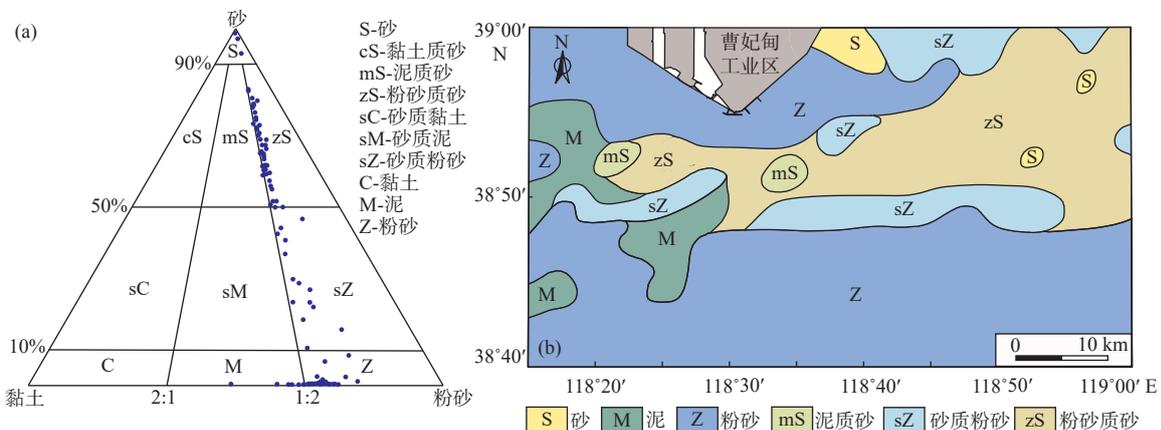


图 2 Folk 分类三角图 (a) 和沉积物类型分布图 (b)

Fig.2 The Folk's classification of sediments (a) and distribution of sediment types (b)

妃甸港以西海域; 粉砂质砂呈条带状分布于研究区中东部海域, 砂质粉砂呈小范围区域分布于研究区中部和北部(图 2b)。

2.2 沉积物常量元素含量特征

研究区表层沉积物化学成分以硅酸盐和铝硅酸盐为主, 其中, SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 K_2O 、 Na_2O 和 MgO 这 7 种组分约占沉积物总量的 90.29%。 SiO_2 (平均值为 62.5%) 含量最高, 其次为 Al_2O_3 (平均值为 11.77%), 其他组分含量均 $< 10\%$, TiO_2 、 P_2O_5 、 MnO 的含量均 $< 1\%$ 。 Fe_2O_3 、 CaO 、 Na_2O 、 MgO 的变异系数较大, 说明这些组分分布不均匀, 差异较大(表 2)。与中国浅海沉积物^[27] 相比, K_2O 、 MgO 含量相对较高, 其他组分含量水平大致相当。与中国黄土^[28] 相比, SiO_2 、 Fe_2O_3 、 K_2O 含量相对较高, CaO 相对亏损。与渤海表层沉积物^[27] 相比, CaO 、 MgO 含量相对较高(表 2)。与上陆壳(UCC)^[29] 元素含量相比(图 3a), CaO 、 TiO_2 含量明显富集, Al_2O_3 、 Na_2O 含量相对亏损。EF 值结果显

示只有 Na_2O 相对亏损, 其他组分与 UCC 相当或略有富集。相比于 UCC, 黄河和海河水系沉积物具有 Ca 、 Ti 富集, K 、 Na 亏损的特点, 滦河水系沉积物具有 Ca 、 Ti 、 P 、 Mn 富集, Na 亏损的特点(图 3b)。

2.3 沉积物常量元素分布特征

从区域分布特征来看(图 4a), SiO_2 的高值区主要位于研究区东北部, 这个区域的 SiO_2 含量普遍 $> 62\%$; SiO_2 的低值区位于研究区的西南部, 含量普遍 $< 62\%$ 。 Al 主要以铝硅酸盐的形式存在于细粒组分中, 其分布特征与 SiO_2 分布特征相反, Al_2O_3 含量的高值区位于西北及东南部(图 4b), 含量普遍 $> 12.5\%$, 低值区主要集中在东北部少数站位。 Fe_2O_3 高值区主要分布在 38.8°N 以南以及 118.6°E 以西, 东北部除少数站位含量较低外, 其他地区含量分布较为均一(图 4c)。 CaO 在研究区的分布呈南高北低, 南部含量普遍 $> 6\%$, 局部 CaO 含量高达 8.5%, 东北部区域 CaO 含量 $< 3.5\%$, 整体分布特征与 SiO_2 分布特征相反(图 4d)。 K_2O 的分布

表 2 沉积物常量元素含量统计

Table 2 Contents of major elements in the sediments

区域		SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	K_2O	MgO	Na_2O	TiO_2	P_2O_5	MnO
曹妃甸海域	均值/%	62.50	11.77	5.13	5.82	3.11	2.34	2.00	0.589	0.124	0.081
	极大值/%	78.60	13.37	7.25	11.69	3.39	2.71	4.45	0.804	0.153	0.311
	极小值/%	58.72	6.25	0.36	1.10	2.43	0.60	1.38	0.122	0.057	0.021
	标准差	3.41	1.25	1.57	2.11	0.19	0.36	0.61	0.123	0.012	0.029
	变异系数	0.05	0.11	0.31	0.36	0.06	0.15	0.31	0.210	0.090	0.351
	均值/%	61.32	10.52	4.31	6.88	1.99	1.98	1.90	0.870	0.188	0.074
黄河	极大值/%	66.15	12.41	9.32	8.47	2.35	2.50	2.15	2.300	0.304	0.142
	极小值/%	53.11	9.60	3.25	6.04	1.63	1.70	1.30	0.585	0.154	0.051
	标准差	4.60	0.89	1.83	0.81	0.20	0.28	0.25	0.516	0.047	0.027
	变异系数	0.07	0.08	0.42	0.12	0.10	0.14	0.13	0.593	0.249	0.371
	均值/%	56.35	12.82	4.64	5.90	2.52	2.31	1.65	0.623	0.174	0.089
海河水系	极大值/%	61.94	15.23	6.64	7.27	2.98	2.88	2.22	0.699	0.215	0.136
	极小值/%	51.73	10.81	3.25	3.32	2.19	1.72	1.17	0.519	0.144	0.062
	标准差	3.82	1.51	1.21	1.14	0.28	0.35	0.41	0.061	0.024	0.022
	变异系数	0.07	0.12	0.26	0.19	0.11	0.15	0.25	0.097	0.137	0.249
滦河水系	均值/%	61.93	11.00	4.49	4.53	2.58	2.07	2.34	0.496	0.184	0.098
	极大值/%	76.83	13.71	12.54	10.59	2.92	3.96	2.80	0.894	0.382	0.185
	极小值/%	47.82	8.30	1.46	1.46	1.67	0.70	1.43	0.196	0.073	0.056
	标准差	8.98	1.82	3.30	2.73	0.39	1.06	0.50	0.206	0.095	0.041
中国浅海 ^[27]	变异系数	0.15	0.17	0.74	0.60	0.15	0.51	0.21	0.416	0.515	0.417
	平均值/%	62.61	11.09	4.43	5.31	2.32	1.82	1.99	0.584	0.115	0.068
	黄土 ^[28]	平均值/%	59.89	11.88	4.19	7.80	2.25	2.35	1.77	0.597	0.147
渤海 ^[27]	平均值/%	62.36	12.01	4.32	3.47	2.77	1.89	2.41	0.55	0.12	0.07
UCC ^[29]	平均值/%	65.89	15.17	5.00	4.19	3.39	2.20	3.89	0.50	0.16	0.07

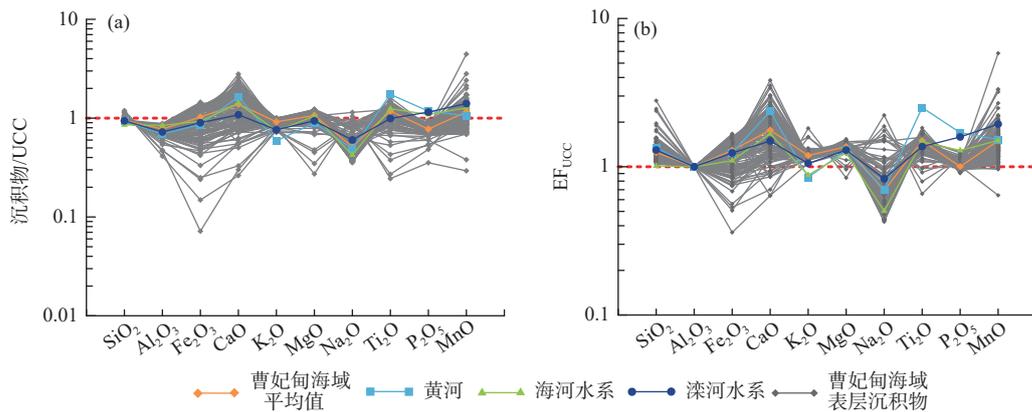


图3 沉积物常量元素标准化模式图 (a) 及富集因子图 (b)

Fig.3 Normalized patterns (a) and enrichment factors (EF) pattern (b) of elements in sediment

与 Fe_2O_3 相似, 38.8°N 以南海域 K_2O 含量较高, $>3.2\%$, 东北部含量较低, 存在零星异常低值区 (图 4e)。 MgO 在研究区南部海域和西部海域含量较高, 平均含量 $>2.5\%$, 其含量分布与 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 K_2O 含量分布相似 (图 4f)。 Na_2O 的分布趋势和 SiO_2 相似, 在南部海域含量相对较少, 东北部海域含量较高, 西部海域 Na_2O 含量普遍低于东部海域 Na_2O 含量 (图 4g)。 TiO_2 的高值区分布在研究区的南部和西部, 低值区位于东北部海域, 其分布特征与 Al_2O_3 相似, 在细粒沉积物区域含量较高, 粗粒区域含量较低 (图 4h)。 P_2O_5 的高值区位于研究区的南部和西部海域, 东北部含量相对较低 (图 4i)。 MnO 的分布特征具有区域性, 西部海域含量高于东部海域, 中间海域存在异常高值区 (图 4j)。

3 讨论

3.1 常量元素组合特征及其控制因素

沉积物中元素的分布往往存在内在联系, 表现为化学性质相似或成因、赋存状态相似的元素具有类似的分布特征, 元素间存在共生组合关系^[27]。本文采用离差平方和法 (Ward 法) 进行 R 型聚类分析, 以欧式距离平方为判别依据, 选定判别距离为 5 时, 常量元素之间可划分为 3 类组合。第 1 类组合为 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 MgO 、 TiO_2 、 K_2O 、 CaO 、 P_2O_5 。相关性分析显示 (表 3), 该组合中, 除 CaO 以外, 其他元素与 Al 的相关性 >0.8 , Al 和 Ti 元素由陆到海的过程, 元素含量相对稳定, 二者常被作为海洋中陆源成分的指标^[27]。Al 广泛赋存于细粒的黏土矿物中, Fe、Mg、K 也常常表现为随沉积物粒度的变小而含

量增加。在聚类树状图上 (图 5), Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 MgO 、 TiO_2 、 K_2O 间的相关性要大于 CaO 与 P_2O_5 之间, 说明 CaO 和 P_2O_5 除了受到粒度效应影响外, 还与海洋生物作用相关^[3, 27], 所以第 1 类组合表现为“元素粒度控制率”中的第 1 种模式^[27]。第 2 类组合为 SiO_2 和 Na_2O , 二者之间相关性中等, 分布特征与第 1 组合相反。近岸海域 SiO_2 主要赋存于粗粒的陆源碎屑, Na_2O 主要赋存于粗粒的斜长石中, 与第 1 类组合赋存状态相反, 二者表现为“元素的粒度控制率”中的第 2 种模式^[27]。Mn 为单独一类, 与第 1 类组合距离稍近 (图 5)。Mn 是变价元素, 在还原和酸性介质中锰呈 Mn^{2+} 而溶解, 在氧化环境中锰呈 Mn^{4+} 而沉淀, 故可作为氧化还原环境的指示剂^[27, 30]。张连杰等^[21] 就曾发现, 渤海湾表层沉积物 MnO 与有机碳 (TOC) 存在相关性, TOC 含量高的区域, MnO 含量也较高, 认为这与有机质分解消耗大量氧气从而产生还原环境相关。

特定的化学元素组合往往具有成因专属性, 因而具有成因指示意义, 因子分析能够提取影响元素含量的共性因子。运用 SPSS 19.0 软件对样品的 10 种常量元素及平均粒径进行 R 型因子分析。在 R 型因子分析之前先进行相关性检验, 结果显示 KMO (Kaiser-Meyer-Olkin) 值为 0.814, 说明相关性较强, 适合进行因子分析。结果显示, 当特征值 >1 时, 只提取出 1 个因子, 方差为 73.42%, 说明常量元素之间相关性较强, 而且共同受到同一因子强烈制约。当人为设定提取 3 个因子时, 累计贡献率接近 90%, 可以代表影响元素组成和分布的主要因素, 成分载荷矩阵见表 4。

因子 F1 方差贡献率为 54.08%。 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 K_2O 、 MgO 、 TiO_2 、 P_2O_5 、平均粒径均呈较强的正载荷, SiO_2 呈较强的负载荷。在渤海海域, 粒度和物

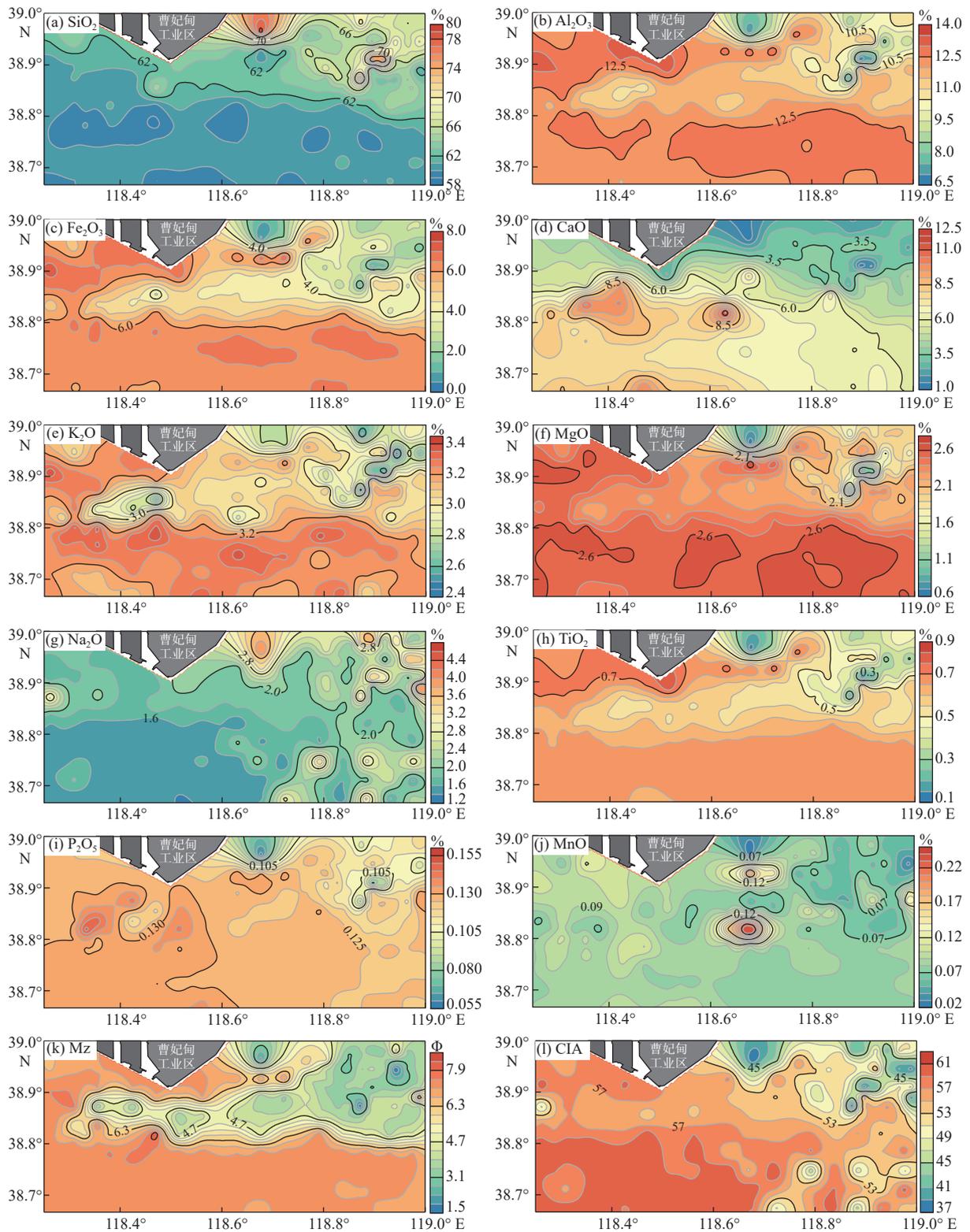


图 4 表层沉积物常量元素、平均粒径 (Mz) 及 CIA 分布

Fig.4 Distribution of major elements, particle size (Mz), and CIA value

源差异是影响沉积物元素丰度和分布的重要因素, 而且粒度效应往往起到主导作用^[21]。从元素含量分布图可以看出, Al₂O₃、Fe₂O₃、K₂O、MgO、TiO₂ 和平均粒径(图 4k)分布存在一定相似性, 因此, 判

断这个因子为元素的粒度效应, 正载荷为细粒沉积, 负载荷为粗粒沉积。

因子 F2 方差贡献率为 23.72%。CaO 呈强的正载荷, Na₂O 呈强负载荷。黄河流域以蒸发盐类

表 3 表层沉积物的常量元素、平均粒径和 CIA 相关性分析 (n=161)

Table 3 Analysis of correlation between major elements, average particle size, and chemical index of alteration (CIA) in surface sediments (n=161)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	Mz	CIA
SiO ₂	1.00											
Al ₂ O ₃	-0.913**	1.00										
Fe ₂ O ₃	-0.903**	0.936**	1.00									
CaO	-0.795**	0.550**	0.642**	1.00								
K ₂ O	-0.822**	0.918**	0.885**	0.518**	1.00							
MgO	-0.965**	0.960**	0.928**	0.658**	0.853**	1.00						
Na ₂ O	0.596**	-0.583**	-0.522**	-0.638**	-0.575**	-0.562**	1.00					
TiO ₂	-0.900**	0.978**	0.962**	0.565**	0.877**	0.946**	-0.551**	1.00				
P ₂ O ₅	-0.888**	0.816**	0.782**	0.701**	0.685**	0.837**	-0.613**	0.810**	1.00			
MnO	-0.392**	0.325**	0.418**	0.296**	0.249**	0.351**	-0.170*	0.375**	0.405**	1.00		
Mz	-0.777**	0.776**	0.883**	0.647**	0.748**	0.798**	-0.428**	0.827**	0.625**	0.303**	1.00	
CIA	-0.771**	0.783**	0.738**	0.706**	0.760**	0.757**	-0.948**	0.762**	0.738**	0.263**	0.631**	1.00

注:n为样品数量; **在 0.01 水平(双侧)上显著相关; *在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

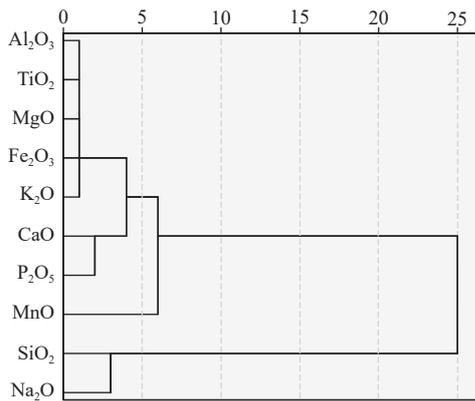


图 5 表层沉积物常量元素含量 R 型聚类分析谱系图
Fig.5 R-type cluster analysis pedigree of major element content in surface sediments

和碳酸盐风化为重,物理风化强于化学风化,碱金属、碱土金属淋失少,所以黄河沉积物以高 CaO 为显著特征^[31]。沉积物中生物介壳碎屑的含量往往也会影响 Ca 的丰度^[27],曹妃甸甸头就曾发现过砾石贝壳,深槽西侧发现过贝壳砂^[3],其分布位置与 CaO 的高值区基本吻合。研究区及周边主要水系沉积物 Na 元素 EF 值 < 1,相对于 UCC 亏损,海域沉积物 Na 的 EF_{UCC} 值与黄河沉积物 Na 的 EF_{UCC} 值最接近(分别为 0.69 和 0.70)。值得一提的是, P₂O₅ 在 F2 因子中也有较强的正载荷,略微低于因子 F2。海洋沉积物中的磷主要来自陆源碎屑和海洋生物代谢,自然粒度状态下少部分的磷经过矿化或早期成岩从沉积物中释放出来,参与海水中磷的循环,对生物代谢起重要作用^[32-33]。有研究表明,

表 4 研究区元素因子载荷矩阵

Table 4 Element factor-loading matrix of the study area

因子	F1	F2	F3
SiO ₂	-0.779	-0.530	-0.234
Al ₂ O ₃	0.920	0.320	0.114
Fe ₂ O ₃	0.901	0.310	0.233
CaO	0.351	0.814	0.206
K ₂ O	0.884	0.292	0.013
MgO	0.873	0.392	0.171
Na ₂ O	-0.298	-0.847	0.041
TiO ₂	0.919	0.296	0.179
P ₂ O ₅	0.628	0.581	0.282
MnO	0.183	0.098	0.961
平均粒径/φ	0.809	0.275	0.150
累计贡献率/%	54.08	77.80	89.20

底栖生物量与“可转化”磷的含量有明显的正相关性^[32]。所以 F2 因子代表了黄河来源、生物来源等物源差异对元素分布的影响。

因子 F3 方差贡献率为 11.40%。MnO 呈强的正载荷,渤海海域沉积物中,自生 Mn 在各类沉积物中占绝对优势,主要以 MnO₂·nH₂O,或是与 Fe(OH)₃ 胶体伴生的 MnO₂·MnO·2H₂O 胶体形式存在,也有可能出低价态的 MnCO₃、MnO·nH₂O 等,而来自于原岩矿物晶格中的 Mn 含量很低^[1]。氧化还原环境的改变容易造成溶解态的 Mn 和不溶态的 Mn 频繁转换,而造成氧化还原环境变化的因素诸多,例如沉积物中有机质、硫化物含量,上覆海水溶解氧含量、温度等^[21,34],所以粒度因素对 Mn 的影响较

弱, 而氧化还原环境变化对 Mn 的影响更突出, 因此, F3 因子代表了氧化还原条件的影响。

3.2 化学风化特征

河流和近海沉积物 CIA 指示的化学风化强度通常是长时间尺度流域(近岸海域)的综合风化情况^[13,35], 在使用时需考虑物源岩性、粒度差异、再旋回作用等因素的影响。研究区 ICV 值为 1.56~2.41, 平均为 1.70, 表明沉积物矿物成熟度低, 黏土矿物含量较少, 推测其源岩为构造活动背景下的首次沉积。

采用沉积物全岩矿物组成讨论化学风化强度往往需要考虑沉积物粒级的影响^[13,35-36]。曹妃甸海域表层沉积物 CIA 值与平均粒径的相关系数为 0.631, 黄河沉积物与平均粒径相关性为 0.758, 海河为 0.846, 滦河为 0.796。相比于砂粒级和黏土粒级, 粉砂粒级与区域化学风化相关性更好^[35]。为了尽可能排除沉积物粒级的影响, 分别计算曹妃甸海域以砂(含量>70%)为主和以粉砂(含量>70%)为主的沉积物的 CIA 值, 分别为 48.4 和 57.2, 所有样品 CIA 平均值为 54.60, 说明在曹妃甸海域粒度效应对 CIA 值有显著影响。黄河、海河水系、滦河水系以粉砂粒级为主的沉积物 CIA 值分别为 56.90、61.90 和 57.58, 由于滦河沉积物主要以砂为主, 仅有 2 个样品的粉砂含量>70%, 其 CIA 均值(57.58)存在一定偶然性, 仅供参考。而以砂为主的沉积物更能代表滦河沉积物的粒度特征, 能反映真实的 CIA 值, 其结果为 47.00。研究区表层沉积物和各水系沉积物都处于较弱的化学风化程度^[11], 其中, 南部和西部海域沉积物风化程度与黄河和海河沉积物风化程度最接近, 说明可能经历了相似的风化过程, 而东北部沉积物与滦河水系沉积物 CIA 值相近, 说明二者处于相同的风化阶段。考虑黄河与海河年输沙量的悬殊差距, 推测西部和南部海域沉积物主要以黄河来源为主, 混合有海河沉积物, 而东北部海域主要堆积来自滦河的粗粒沉积物。

CIA 值计算公式中的 Al_2O_3 、 CaO^* 、 K_2O 含量都与平均粒径呈显著正相关, Na_2O 与粒径呈负相关(表 3)。沉积物粒径变细时, Al_2O_3 含量增加程度大于 Al_2O_3 、 CaO^* 、 K_2O 、 Na_2O 含量之和的增加程度, 从而 CIA 值也随之变大。沉积物中各元素的含量直接取决于矿物的组成和含量, 滦河沉积物主要为细砂粒级, 矿物以石英和长石为主, SiO_2 、 K_2O 、 Na_2O 含量较高, Al_2O_3 含量相对较低, 导致 CIA 值偏低。海河水系沉积物较黄河更细, 以细粉砂为

主, 而黄河以粗粉砂为主^[37], 海河水系沉积物钾长石/石英和长石/石英分别为 0.09 和 0.84, 黄河为 0.22 和 0.94^[37], 海河沉积物中富含 Al、Fe 元素的黏土矿物含量也高于黄河沉积物, 从而海河的 CIA 值是 3 条河流中最高的, 黄河次之, 滦河最低。

NESBITT 等^[6]提出的 A-CN-K(Al_2O_3 -(CaO^* + Na_2O)- K_2O)图解, 可以反映岩石风化过程中长英质矿物中活泼元素随风化程度的变化趋势。UCC 可以作为未受化学风化作用的岩石代表, 陆源页岩(PAAS)是典型上陆壳初级风化产物, 由 UCC 到 PAAS 代表了大陆初期风化趋势^[15]。结果显示, 研究区及沿岸河流沉积物样品主要落于斜长石一侧, 反映出沉积物中斜长石含量较高, 风化趋势与 A-CN 线大致平行, 说明矿物整体处于脱 Na、Ca 的初级风化阶段, K 元素迁移不明显。海域沉积物少量样品落于 A-CN 连线之下, CIA 值<50, 说明化学风化程度极低, 以物理风化为主。滦河的样品点较分散, 粗粒的样品位于 UCC 附近, 反映出与上陆壳相似的风化程度, 细粒的样品 CIA 值稍高, 但仍处于化学风化初级阶段。黄河和海河风化趋势基本一致, 海河风化程度比黄河风化程度略高。黄河曾在华北平原多次改道入海, 海河水系受其影响, 沉积物性质与黄河沉积物性质存在一定相似性。

地表化学风化过程受到气候、构造、地形、水文特征、植被和岩性等多因素影响^[35]。黄河中游流经的黄土高原, 属于干旱-半干旱气候, 降雨量少, 而蒸发量大, 该段是黄河泥沙的主要物源^[38], 黄河中上游泥沙相对较低的 CIA 值^[39]一直延续到入海口。海河水系主要支流和干流有较长河段位于华北平原, 纵比降小, 流速低, 有利于沉积分异作用, 加之气候较滦河水系暖温湿润, 有利于化学风化, CIA 值略高。滦河上游燕山地区中生代构造活动强烈, 断层发育, 加之高原寒冷气候, 岩石易于破碎。滦河上游河段河床落差大, 坡陡流急, 可短期内将物理风化的粗颗粒产物搬运至下游。虽然滦河下游河道比降小, 河谷宽阔, 流速减缓, 但河段较短, 沉积物还未经过充分的沉积分异作用就搬运至入海口, 所以滦河水系沉积物以粗颗粒的粉砂质砂为主, 化学风化程度低。在平均粒径和 CIA 分布图(图 4k、l)也能看出, 东北部海域平均粒径粗, CIA 值低, 沉积物主要为滦河供给, 南部海域平均粒径细, CIA 值高, 沉积物主要为黄河供给。

A-CN-K 图也可用于判断源岩^[12], 表层沉积物化学风化趋势线与图 6 中斜长石-钾长石连线的交

点,反映了源岩的斜长石和钾长石比例。结果显示,表层沉积物的源岩成分接近二长花岗岩的成分。滦河和海河上游基岩主要分布于燕山和太行山,流域内出露大面积中生代陆相中酸性火山岩和碎屑岩^[40],其风化产物可随河流、风等介质搬运至东部的渤海,为研究区源源不断地提供碎屑沉积物。

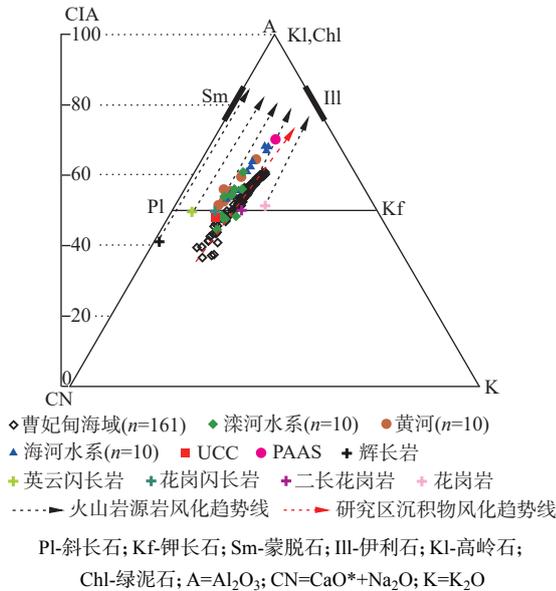


图6 沉积物 A-CN-K 图解

Fig.6 The A-CN-K ternary diagram of sediments

4 结论

(1)渤海曹妃甸海域表层沉积物常量元素氧化物主要由 SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、CaO、K₂O、Na₂O 和 MgO 组成,约占沉积物总量的 90.29%。其中, SiO₂ 和 Al₂O₃ 含量最高,平均值为 62.50% 和 11.77%。

(2)相关性分析及因子分析结果表明,粒度效应是影响曹妃甸海域 Al₂O₃、Fe₂O₃、K₂O、MgO、TiO₂、P₂O₅ 分布的主要原因,物源差异对 CaO、Na₂O 的分布影响较大,而 MnO 分布主要受控于氧化还原条件。

(3)曹妃甸海域沉积物成熟度低,属于初次循环, CIA 平均值为 54.60,滦河、海河、黄河沉积物在风化程度上都处于初等化学风化阶段,其物源成分接近二长花岗岩。曹妃甸南部和西部海域沉积物与黄河、海河沉积物风化程度更为接近,东北部沉积物与滦河沉积物风化程度接近。流域内地形和气候对滦河和海河水系沉积物风化程度起到重要影响。

参考文献:

[1] 中国科学院海洋研究所. 渤海地质 [M]. 北京: 科学出版社,

1985.

Chinese Academy of Sciences Institute of Oceanography. Geology of the Bohai Sea[M]. Beijing: Science Press, 1985.

[2] 薛春江. 滦河冲积扇-三角洲的范围和类型及其演化 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2016, 36(6): 13-22.

XUE Chunting. Extent, type and evolution of Luanhe River fan-delta system, China[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2016, 36(6): 13-22.

[3] 张连杰. 渤海湾现代沉积特征及 5 000 年以来沉积环境演化 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2018.

ZHANG Lianjie. Modern sedimentary characteristics of the Bohai Bay and its sedimentary environment evolution during the past 5 000 years[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2018.

[4] 赵保仁, 庄国文, 曹德明, 等. 渤海的环流, 潮余流及其对沉积物分布的影响 [J]. 海洋与湖沼, 1995, 26(5): 466-473.

ZHAO Baoren, ZHUANG Guowen, CAO Deming, et al. Circulation, tidal residual currents and their effects on the sedimentations in the Bohai Sea[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1995, 26(5): 466-473.

[5] 陈丹婷. 洞庭湖“四水”入湖沉积物主量元素地球化学特征及意义 [D]. 长沙: 湖南师范大学, 2021.

CHEN Danting. Geochemistry of major elements in bed sediments from inlets of the Four Rivers to Dongting Lake, China[D]. Changsha: Hunan Normal University, 2021.

[6] NESBITT H W, YOUNG G M. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1984, 48(7): 1523-1534.

[7] NESBITT H W, YOUNG G M, MCLENNAN S M, et al. Effects of chemical weathering and sorting on the petrogenesis of siliciclastic sediments, with implications for provenance studies[J]. The Journal of Geology, 1996, 104(5): 525-542.

[8] OHTA T, ARAI H. Statistical empirical index of chemical weathering in igneous rocks: a new tool for evaluating the degree of weathering[J]. Chemical Geology, 2007, 240(3): 280-297.

[9] NESBITT H W, YOUNG G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. Nature, 1982, 299(5885): 715-717.

[10] HARNOIS L. The CIW index: a new chemical index of weathering[J]. Sedimentary Geology, 1988, 55(3): 319-322.

[11] FEDO C M, WAYNE NESBITT H, YOUNG G M. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance[J]. Geology, 1995, 23(10): 921-924.

[12] 冯连君, 储雪蕾, 张启锐, 等. 化学蚀变指数 (CIA) 及其在新元古代碎屑岩中的应用 [J]. 地学前缘, 2003, 10(4): 539-544.

FENG Lianjun, CHU Xuelei, ZHANG Qirui, et al. CIA (chemical index of alteration) and its applications in the Neoproterozoic clastic rock[J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10(4): 539-544.

[13] 邵菁清, 杨守业. 化学蚀变指数 (CIA) 反映长江流域的硅酸盐岩化学风化与季风气候? [J]. 科学通报, 2012, 57(11): 933-942.

- SHAO Jingqing, YANG Shouye. Does chemical index of alteration (CIA) reflect silicate weathering and monsoonal climate in the Changjiang River Basin? [J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(11): 933-942.
- [14] 成海燕, 姜胜辉, 张超, 等. 渤海海峡表层沉积物地球化学特征 [J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(8): 19-28.
CHENG Haiyan, JIANG Shenghui, ZHANG Chao, et al. Geochemical characteristics of surface sediments in Bohai Strait and controlling factors [J]. Marine Geology Frontiers, 2020, 36(8): 19-28.
- [15] 宁泽, 张勇, 林学辉, 等. 闽北近岸海域表层沉积物的风化特征及物源指示 [J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(10): 12-21.
NING Ze, ZHANG Yong, LIN Xuehui, et al. Weathering characteristics and provenance of the surface sediments in the offshore of northern Fujian [J]. Marine Geology Frontiers, 2020, 36(10): 12-21.
- [16] 段云莹, 裴绍峰, 廖名稳, 等. 渤海莱州湾沉积物 REE 与重金属污染特征及物源判别 [J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(10): 8-24.
DUAN Yunying, PEI Shaofeng, LIAO Mingwen, et al. Characteristics of REE and heavy metals in the surficial sediments of Laizhou Bay, Bohai Sea and their implications for provenance [J]. Marine Geology Frontiers, 2021, 37(10): 8-24.
- [17] 褚宏宪, 史慧杰, 宗欣, 等. 渤海湾曹妃甸深槽海区地形地貌特征及控制因素 [J]. 海洋科学, 2016, 40(3): 128-137.
CHU Hongxian, SHI Huijie, ZONG Xin, et al. Characteristic geomorphology and controlling factors of Caoifeidian Channel in the Bohai Bay [J]. Marine Sciences, 2016, 40(3): 128-137.
- [18] 祝贺. 曹妃甸近岸海区沉积物特征研究 [D]. 烟台: 鲁东大学, 2016.
ZHU He. Research of the sedimentary characteristics in Caoifeidian inshore [D]. Yantai: Ludong University, 2016.
- [19] 杨娅敏, 张礼中, 沈睿文, 等. 渤海湾唐山港海域表层沉积物粒度和黏土矿物分布特征及其物源指示 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2023, 43(5): 136-147.
YANG Yamin, ZHANG Lizhong, SHEN Ruiwen, et al. Characteristics of grain size and clay mineral distribution of surface sediments and their provenance implication in Tangshan Harbor, Bohai Bay [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2023, 43(5): 136-147.
- [20] JIANG W Q, CHU H X, LIU Y Y, et al. Distribution of heavy metals in coastal sediments under the influence of multiple factors: a case study from the south coast of an industrialized harbor city (Tangshan, China) [J]. Science of the Total Environment, 2023, 889: 164208.
- [21] 张连杰, 朱龙海, 张盼, 等. 渤海湾表层沉积物元素地球化学分布特征与影响因素 [J]. 海洋科学, 2019, 43(6): 78-87.
ZHANG Lianjie, ZHU Longhai, ZHANG Pan, et al. Geochemical distribution and its controlling factors of the surface sediments in the Bohai Bay [J]. Marine Sciences, 2019, 43(6): 78-87.
- [22] 蓝先洪, 李日辉, 王中波, 等. 渤海西部表层沉积物的地球化学记录 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2017, 37(3): 75-85.
LAN Xianhong, LI Rihui, WANG Zhongbo, et al. Geochemical records of surface sediments in the western Bohai Sea [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2017, 37(3): 75-85.
- [23] FOLK R L, ANDREWS P B. Detrital sedimentary rock classification and nomenclature for use in New Zealand [J]. New Zealand Journal of Geology and Geophysics, 1970, 13(4): 937-968.
- [24] ZOLLER W H, GLADNEY E S, DUCE R A. Atmospheric concentrations and sources of trace metals at the South Pole [J]. Science, 1974, 183(4121): 198-200.
- [25] MCLENNAN S M. Weathering and global denudation [J]. The Journal of Geology, 1993, 101(2): 295-303.
- [26] COX R, LOWE D R, CULLERS R L. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in southwestern United States [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59(14): 1940-2919.
- [27] 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.
ZHAO Yiyang, YAN Mingcai. Geochemistry of Sediments of the China Shelf Sea [M]. Beijing: Science Press, 1994.
- [28] 文启忠, 吴明清. 黄土高原黄土的平均化学成分与地壳克拉克值的类比 [J]. 土壤学报, 1996, 33(3): 227-231.
WEN Qizhong, WU Mingqing. Comparison of average chemical composition of loess in loess plateau with Clark values of crust [J]. Acta Pedologica Sinica, 1996, 33(3): 227-231.
- [29] TAYLOR S R, MCLENNAN S M. The Continental Crust: Its Composition and Evolution [M]. Oxford: Blackwell Scientific Publication, 1985.
- [30] 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.
ZOU Jianjun, SHI Xuefa, LI Shuanglin. Distributions of minor elements in near surface sediments in North Yellow Sea and the early diagenesis [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2007, 27(3): 43-50.
- [31] 杨守业, 李从先. 长江与黄河现代表层沉积物元素组成及其示踪作用 [J]. 自然科学进展, 1999, 9(10): 930-937.
YANG Shouye, LI Congxian. Elemental composition and tracer in modern surface sediments of Yangtze River and Yellow River [J]. Progress in Natural Science, 1999, 9(10): 930-937.
- [32] 宋金明. 黄河口邻近海域沉积物中可转化的磷 [J]. 海洋科学, 2000, 24(7): 42-45.
SONG Jinming. Transferable phosphorus in sediments of the Huanghe River Estuary adjacent waters [J]. Marine Sciences, 2000, 24(7): 42-45.
- [33] 宋金明, 李学刚, 邵君波, 等. 南黄海沉积物中氮、磷的生物地球化学行为 [J]. 海洋与湖泊, 2006(4): 370-376.
SONG Jinming, LI Xuegang, SHAO Junbo, et al. Biogeochemical characteristics of nitrogen and phosphorus in the South Yellow Sea sediments [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2006(4): 370-376.
- [34] 吴金浩, 刘桂英, 王年斌, 等. 辽东湾北部海域表层沉积物氧化还原电位及其主要影响因素 [J]. 沉积学报, 2012, 30(2): 333-339.

- WU Jinhao, LIU Guiying, WANG Nianbin, et al. The Eh in surface sediments in the northern of Liaodong Bay and its main influencing factors[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2012, 30(2): 333-339.
- [35] 傅寒晶, 简星, 梁航海. 硅酸盐化学风化强度评估的沉积物指标与方法研究进展 [J]. *古地学报*, 2021, 23(6): 1192-1209.
- FU Hanjing, JIAN Xing, LIANG Hanghai. Research progress of sediment indicators and methods for evaluation of silicate chemical weathering intensity[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2021, 23(6): 1192-1209.
- [36] 杨作升, 赵晓辉, 乔淑卿, 等. 长江和黄河入海沉积物不同粒级中长石/石英比值及化学风化程度评价 [J]. *中国海洋大学学报 (自然科学版)*, 2008, 38(2): 244-250.
- YANG Zuosheng, ZHAO Xiaohui, QIAO Shuqing, et al. Feldspar/Quartz(F/Q) ratios as a chemical weathering intensity indicator in different grain size-fractions of sediments from the Changjiang and Huanghe Rivers to the seas[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2008, 38(2): 244-250.
- [37] 王艳君. 海河尾闾沉积物特征分析兼与黄河尾闾沉积物比较 [D]. 烟台: 鲁东大学, 2017.
- WANG Yanjun. Analysis of sediment characteristics in the tail section of Haihe River and compared with the tail section of Yellow River[D]. Yantai: Ludong University, 2017.
- [38] 陈垚. 黄河泥沙沉积物演化特征及物源示踪 [D]. 西安: 长安大学, 2020.
- CHEN Yao. Spatial evolution characteristics of the Yellow River sediments and the significance of provenance tracing[D]. Xi'an: Chang'an University, 2020.
- [39] PANG H L, PAN B T, GARZANTI E, et al. Mineralogy and geochemistry of modern Yellow River sediments: implications for weathering and provenance[J]. *Chemical Geology*, 2018, 488: 76-86.
- [40] 迟清华, 马生明. 流域上游基岩与下游冲积平原土壤化学组成的对比 [J]. *地质通报*, 2008, 27(2): 188-195.
- CHI Qinghua, MA Shengming. Comparison between the chemical composition of bedrocks in the upper reaches and that of alluvial plain soils in the lower reaches of a drainage area[J]. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27(2): 188-195.

Geochemical characteristics of major elements in surface sediments of Caofeidian offshore area in the Bohai Sea: implications for the weathering characteristics of the source area

YUAN Jidong^{1,2}, CHU Hongxian^{1,2*}, FENG Yongcai^{1,2}, FENG Binghui^{1,2}, CHEN Yuhai^{1,2}, LI Jialin^{1,2},
JIANG Wenqin^{1,2}, HUANG Xing^{1,2}, JIA Pushuo^{1,2}, CAO Fanfan^{1,2}, LI Yuyan^{1,2}

(1 Yantai Center of Coastal Zone Geological Survey, China Geological Survey, Yantai 264000, China;

2 Ministry of Natural Resources Observation and Research Station of Land-Sea Interaction Field in the Yellow River Estuary, Yantai 264000, China)

Abstract: Based on the analysis of major element characteristics of 161 surface sediment samples from the Caofeidian offshore area of the Bohai Sea and 30 surface sediment samples from major rivers around Bohai Bay, the assemblage characteristics and influencing factors of major elements were studied. Considering the characteristics of major elements in stream sediment along Bohai Bay, the weathering and provenance were discussed using the chemical index of alteration (CIA). Results show that SiO₂ and Al₂O₃ constitute the predominant elements in the surface sediment of the study area. Seven elements, i.e., Si, Al, Fe, K, Mg, P, and Ti, clearly demonstrate a significant "grain size effect". Except for Si, the distribution patterns of other six elements follow a discernible trend consistently. Higher concentrations were observed in the southern and western regions, while lower concentrations prevail in the north and east. It is worth noting that CaO and Na₂O exhibit a substantial influence from their provenance, while the distribution of MnO appears to be closely correlated with redox conditions. The CIA values of sand and silt-sand sediments in Caofeidian sea area are 48.4 and 57.2, respectively. This index is positively correlated with sediment particle size, and it is in the primary weathering stage with the surrounding stream sediments. Furthermore, the source rock composition of sediments in the Caofeidian offshore area bears striking similarities to that of adamellite. Topographic and climatic variations are important factors affecting the differences in the weathering intensity of sediments in the Luanhe River system and the Haihe River system.

Key words: major elements; chemical weathering; Caofeidian offshore; Luanhe River water system; Haihe River water system; Yellow River