

李恒猛, 王嫚, 王敬, 等. 威海周边海域表层沉积物沉积环境分区与元素组成控制因素[J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(9): 94-106.

LI Hengmeng, WANG Man, WANG Jing, et al. Control factors of sedimentary dynamic environment zones and element composition of surface sediments in surrounding waters of Weihai[J]. Marine Geology Frontiers, 2023, 39(9): 94-106.

威海周边海域表层沉积物沉积环境分区与元素组成控制因素

李恒猛^{1,2}, 王嫚^{1,2}, 王敬^{1,2*}, 边雄飞^{1,2}

(1 山东省第六地质矿产勘查院, 威海 264209; 2 山东省深部金矿探测大数据应用开发工程实验室, 威海 264209)

摘要:为深入理解黄海现代沉积作用和沉积环境,研究了威海周边海域表层沉积物的粒度、元素地球化学特征及其控制因素,并探讨了海域沉积动力环境。研究发现,粉砂粒级是表层沉积物中最重要的组分,由岸向海逐渐增加,研究区北部、东部及刘公岛南部海域粉砂含量普遍>60%;砂粒级组分含量由岸向海逐渐降低。依据沉积物粒度特征,研究区的沉积动力环境可以划分为5个区,由岸向海水动力逐渐减弱。近岸粗颗粒沉积物受河流以及海岸侵蚀影响,细颗粒物来源于黄河,受到山东半岛沿岸流控制。表层沉积物大部分常量元素分布特征受粒度控制,CaO主要受碳酸盐碎屑影响,控制Sr元素分布的主要因素是海洋生物沉积作用。K₂O、NaO、SiO₂、Ba等元素受物源控制,MnO₂除了受粒度控制影响外还受到氧化还原环境影响。

关键词:沉积动力环境分区;元素组成;控制因素;威海周边海域

中图分类号:P736.2;P736.4

文献标识码:A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2022.138

0 引言

沉积物粒度受到源岩、风化作用、搬运过程、水动力作用等因素影响,可以用来反映物质来源、水动力条件、运移方式以及沉积环境变化等^[1-5]。沉积物地球化学组成受物质来源、粒度以及沉积环境等因素的制约,其研究对深入理解源汇过程及古环境演化具有重要意义^[6-11]。

许多学者对中国海域表层沉积物粒度和常量元素分布特征展开了大量研究,并取得了系列成果^[12-19]。部分学者针对山东半岛周边海域进行过探讨,王伟等^[20]通过对北黄海表层沉积物粒度

特征及沉积环境进行分析,揭示了物源和水动力条件表层沉积物粒度分布的主控因素,并提出黄海暖流的存在限制了山东半岛沿岸流携带的细颗粒物向东运输;窦衍光等^[21]基于山东半岛东部表层沉积物地球化学分析认为山东半岛周边海域底质沉积物主要受到沿岸流和潮流的作用,物质来源以黄河碎屑物质为主。以往研究多集中于河口环境或大范围海域,空间取样密度小,对于局部海域,如山东半岛近海研究相对薄弱,关于威海周边海域表层沉积物粒度特征以及地球化学元素组成鲜有报道。

威海湾位于山东半岛最东端,北、东、南三面濒临黄海,底质沉积物以砂、粉砂为主。研究发现山东半岛海域的沉积物主要来自于黄河,并受到山东半岛沿岸流以及近岸潮流的影响^[22-26]。本文主要通过威海周边海域表层沉积物进行粒度与元素地球化学的分析,探讨这一海域粒度特征与地球化学分布规律,揭示研究区的沉积环境与元素组成的控制因素,有助于深入理解黄海现代沉积作用和沉积环境。

收稿日期: 2022-04-28

资助项目: “山东省威海市海洋牧场示范区海底沉积物地球化学调查”(鲁勘字(2019)52号)

作者简介: 李恒猛(1982—),男,正高级工程师,主要从事水文地质、环境地质及海洋地质等方面的研究工作。E-mail: 108392508@qq.com

* 通讯作者: 王敬(1982—),男,正高级工程师,主要从事水文地质、环境地质及海洋地质等方面的研究工作。E-mail: lywhwj@126.com

1 材料与方 法

1.1 研究材料

2017年3月31日—4月13日在威海周边海域共采集120个表层沉积样品(图1),采样区间为 $37^{\circ}20'-37^{\circ}00'N$ 、 $122^{\circ}10'-122^{\circ}20'E$ 。表层沉积物取样采用箱式采样器,取样站位间距为 $5\text{ km}\times 5\text{ km}$,部分近岸区按 $2.5\text{ km}\times 5\text{ km}$ 加密站位。

1.2 研究方法

1.2.1 沉积物粒度分析

主要依据沉积物的特点,综合采用筛析法与激光法进行沉积物粒度分析。筛析法适用于以粒径 $>2\text{ mm}$ 的砂砾为主要成分的沉积物。粒度分析样

品前处理主要经过洗盐、有机质去除(10%的 H_2O_2)和碳酸盐的去除(稀盐酸)。激光法采用 Mastersizer 2000 型激光粒度分析仪进行粒度测试。本文依据 FOLK 与 WARD^[27] 的粒度参数计算公式计算沉积物粒度参数。

1.2.2 元素地球化学测试

常量元素样品在 65 ℃ 下烘干, 研磨至 200 目后制片, 采用 Axios PW4400 型 X 射线荧光光谱仪测定常量组分 SiO_2 、 Al_2O_3 、 TFe_2O_3 、 MnO 、 MgO 、 Na_2O 、 P_2O_5 、 K_2O 、 CaO 、 TiO_2 。微量元素样品经过冷冻干燥, 研磨至 200 目后烘干后, 经过 (1:1) 氢氟酸和硝酸的消解, 采用 3 mL 50% 的 HNO_3 溶样后移液定容, 采用等离子质谱法 (ICP-MS) 测定微量元素 Ni、Co、Sr、Zr、Ba、Ga。

沉积物粒度分析与元素地球化学测试均在青岛海洋地质研究所实验测试中心完成。

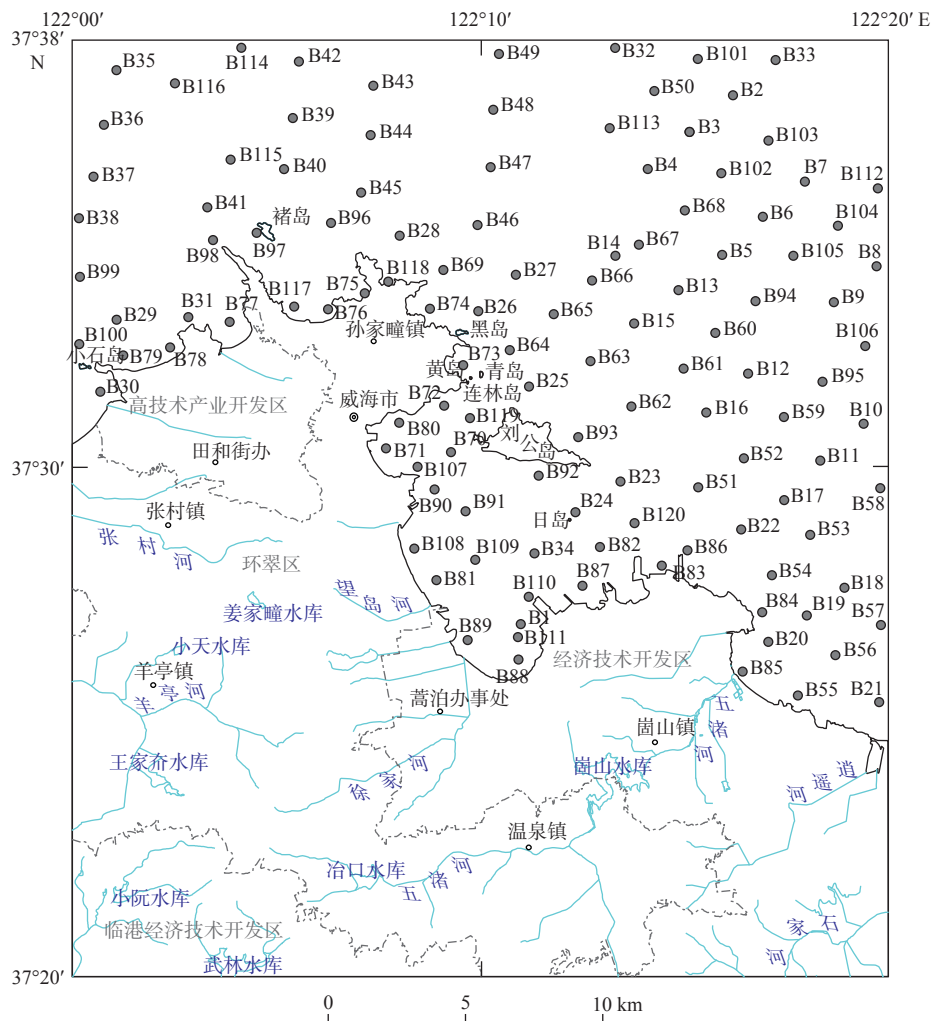


图 1 研究区表层沉积物取样站位

Fig.1 Sampling stations of surface sediments in the study area

2 结果

2.1 沉积物粒度特征

2.1.1 沉积物类型和分布

根据 FOLK^[28] 沉积物命名原则, 研究区的表层沉积物可以分为 10 类, 其中含砾沉积物 4 类: (g)mS-含砾泥质砂、gmS-砾质泥质砂、(g)M-含砾泥、gM-砾质泥; 无砾沉积物 6 类: S-砂、zS-粉砂质砂、mS-泥质砂、sZ-砂质粉砂、Z-粉砂、M-泥。(g)mS-含砾泥质砂与 gmS-砾质泥质砂主要分布在威海市以北的小石岛、黑岛附近海域, 分布面积较小, 由于取样区域的限制取样站位较少, 总共 4 站位。

(g)M-含砾泥分布相对离散, 主要分布在研究区东部与刘公岛、日岛附近海域, 占调查区面积的 13% 左右。gM-砾质泥主要分布在研究区东部及近岸海域, 与含砾泥((g)M)分布区相邻, 涉及站位相对较少。S-砂分布范围较为分散, 主要分布在小石岛附近、孙家疃镇北部、崆山镇东北部近岸海域。zS-粉砂质砂主要分布在研究区黄岛附近海域, 仅涉及 1 站位。mS-泥质砂主要分布在高新技术开发区北部海域, 分布范围较小。sZ-砂质粉砂分布较为分散, 主要分布在研究区北部、威海市东部近岸及经济技术开发区东部海域。Z-粉砂在威海市北部及东部海域均有大面积分布。sZ-砂质粉砂与 Z-粉砂是研究区分布最广泛的 2 种沉积物类型, 占该区沉积物面积的 70% 以上(图 2)。

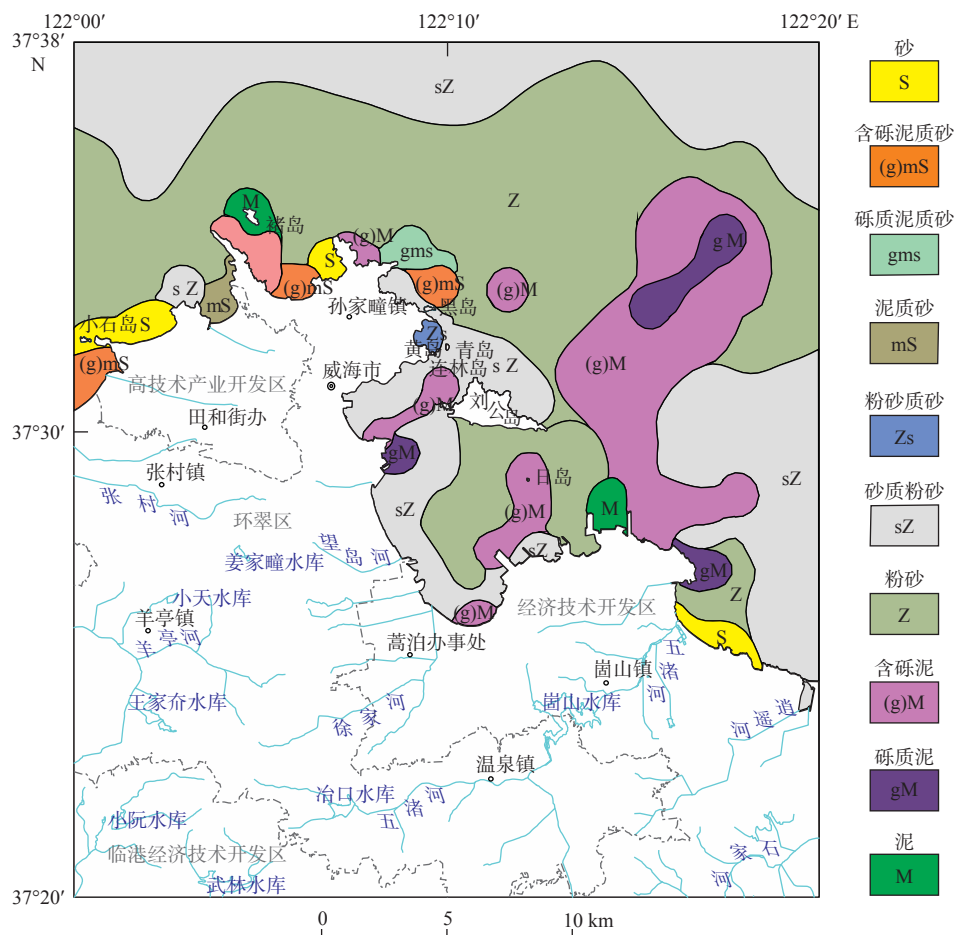


图 2 研究区表层沉积物类型分布

Fig.2 Distribution of surface sediment types in the study area

2.1.2 粒度组分和参数特征

(1) 粒度组分分布特征

研究区表层沉积物的粒度组分可以分为砾石、砂、粉砂、黏土 4 个粒级。砾石粒级组分主要呈圆斑状或条带状分布在孙家疃镇以北及崆山镇北部

近岸, 大部分区域含量介于 0.5%~2%, 部分含量可达 8%。研究区砾石粒级组分含量分布与沉积物类型分布有很好的-致性(图 3a)。砂粒级组分在近岸海域含量高, 由岸向海逐渐降低。其中, 高新技术产业开发区北部及崆山镇东北部近岸海域, 砂粒级

组分含量普遍超过 50%, 最高可达 80%; 在刘公岛东北部海域, 也存在一砂粒级组分含量较高的区域, 该高值区向南延伸至经济技术开发区北部近岸海域, 含量大部分区域介于 20%~30%(图 3b)。粉砂含量分布与砂含量分布相反, 近岸海域普遍为粉砂含量的低值区, 最低 < 5%, 由岸向海逐渐增加至

70% 以上。研究区北部、东部及刘公岛南部海域为粉砂覆盖的区域, 粉砂含量普遍 > 60%(图 3c)。研究区黏土含量总体较低, 平均含量约为 15%, 最低值为 0, 最高值超过 30%。黏土粒级组分高值区位于研究区中部海域及刘公岛南部海域, 大部分黏土组分含量介于 20%~26%(图 3d)。

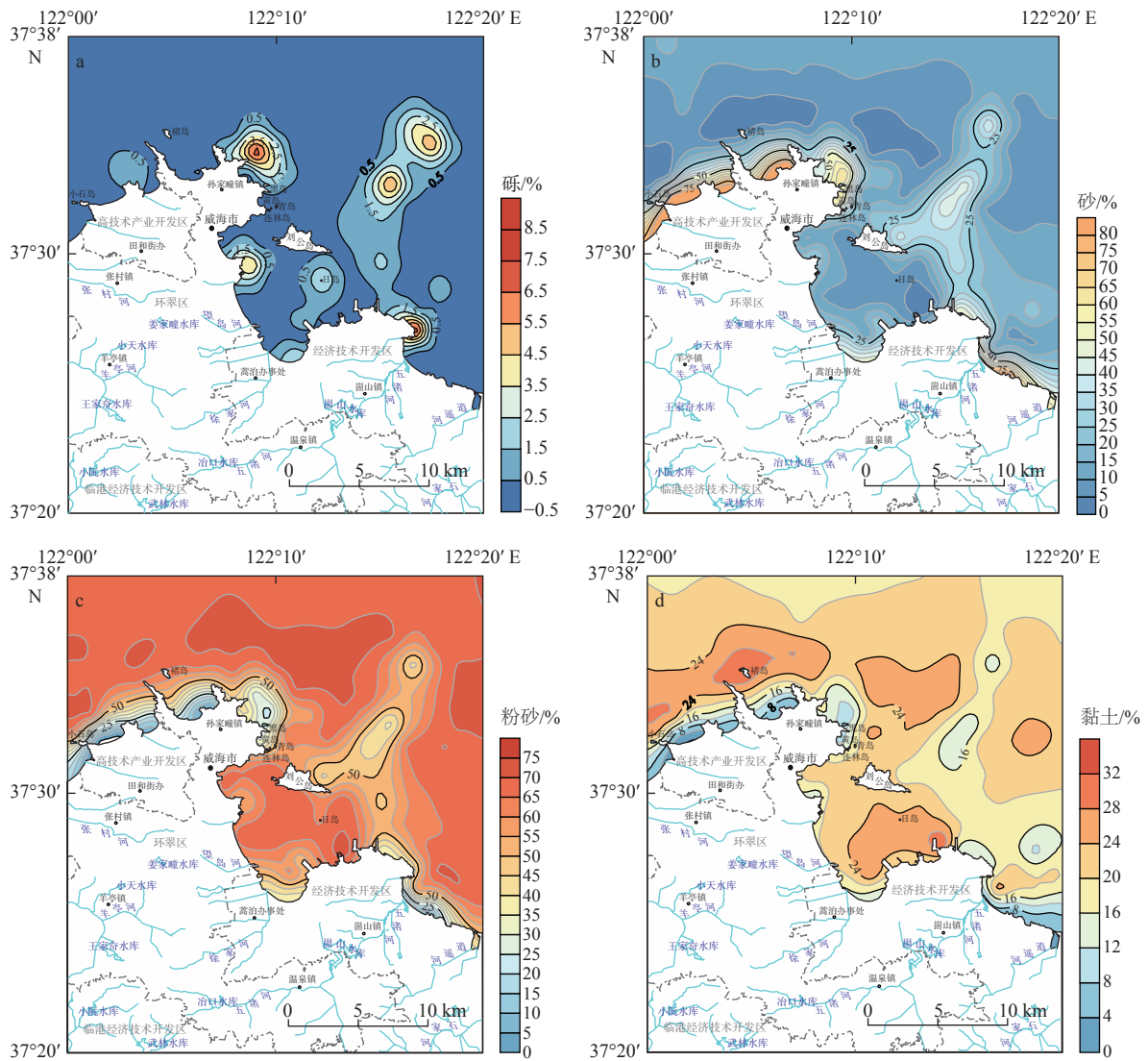


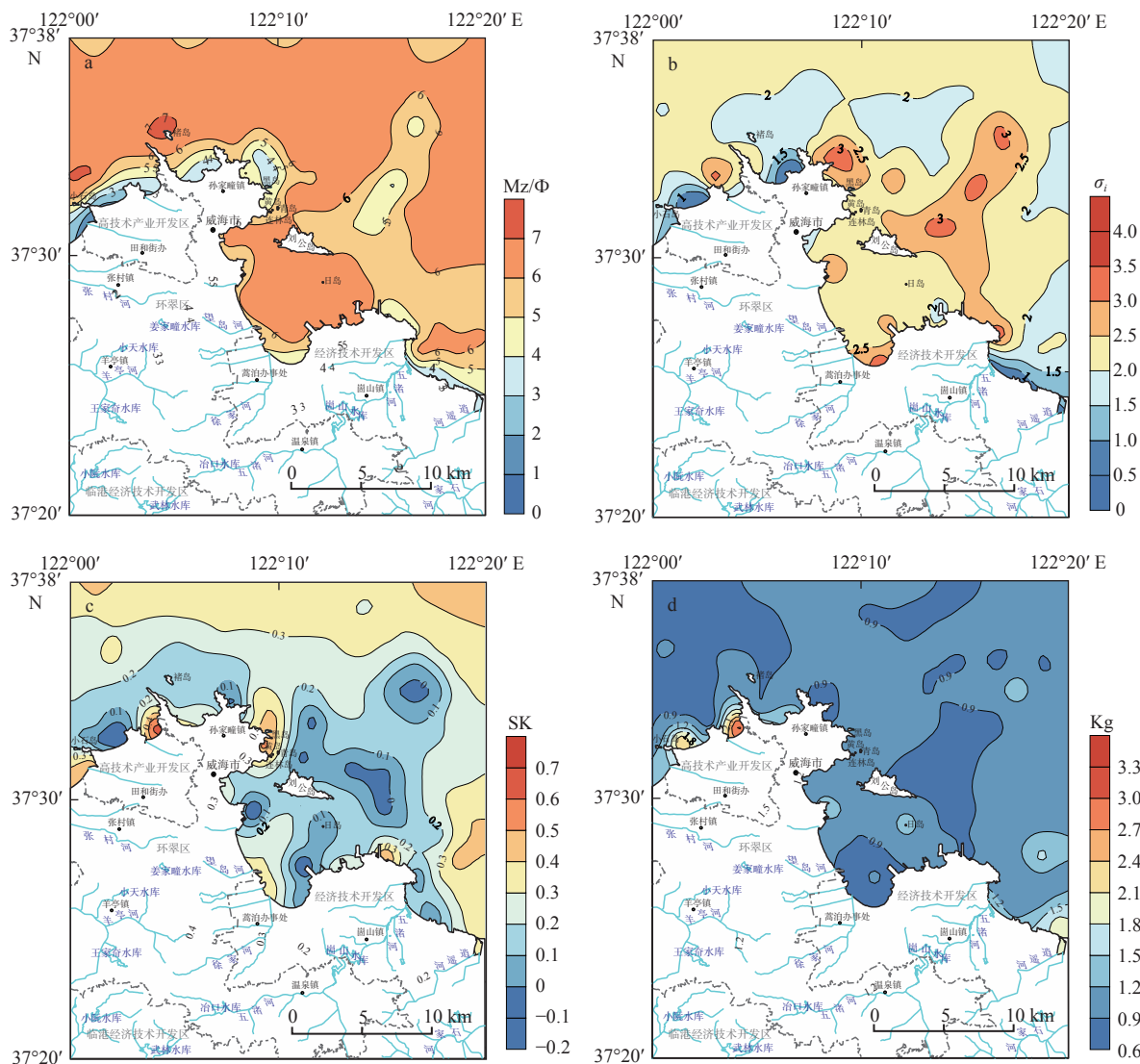
图 3 研究区表层沉积物粒度组分分布

Fig.3 Distribution of grain size composition of surface sediments in the study area

(2) 粒度参数分布特征

研究区平均粒径与沉积物类型具有较好的对应关系(图 4a), 总体呈现由岸向海逐渐变细的趋势, 仅刘公岛东北部发育一粗粒沉积区。平均粒径均值为 5.78Φ , 大部分海域平均粒径介于 $5\Phi \sim 7\Phi$, 属粉砂粒级, 在研究区中部与刘公岛南部海域均有分布; 最小值为 0.93Φ , 主要分布于高新技术产业开发区北部近岸海域; 最大值为 7.31Φ , 为细粉砂粒级, 在褚岛、小石岛北部海域均有分布。

研究区大部分海域分选系数介于 2~3, 分选差(图 4b); 高新技术产业开发区北部、孙家疃镇西北部与崆山镇东部近岸海域, 分选系数由 2 逐渐降至 0.5 及以下, 沉积物分选由较差逐渐变为分选较好; 而黑岛北部、刘公岛东北部、经济技术开发区西部海域, 分选系数可达 4, 为分选极差的海域。研究区偏态变化范围为 $-0.17 \sim 0.73$, 平均值为 0.21, 大部分区域偏度 > 0.1, 属于正偏的范畴(图 4c)。从偏态平面分布图上可以看出, 高新技术产业开发区北部、



(a)平均粒径; (b)分选系数; (c)偏态; (d)峰态

图4 研究区表层沉积物粒度参数分布

Fig.4 Distribution of granulicity parameters of surface sediments in the study area

经济技术开发区西部、环翠区东部及孙家疃镇北部近岸海域与刘公岛东北部海域, 偏度普遍 <0.1 , 部分区域 <-0.1 。研究区峰度变化范围为 $0.64\sim3.46$, 平均值为 1.01 , 大部分区域为 $0.85\sim1.2$ (图4d), 大致对应砂质粉砂。峰态高值区主要集中在高技术产业开发区北部与嵩山镇东部近岸海域, 峰态超过 1.5 , 表现为很尖锐; 而在高技术产业开发区北部远岸海域、经济技术开发区西部海域与刘公岛北部海域峰态值 <0.9 。

2.2 元素特征

2.2.1 常量元素地球化学特征

表层沉积物中 SiO_2 含量最高, 平均含量高达 57.61% , 变化范围介于 $51.38\%\sim69.89\%$; MnO

的含量最低, 平均含量仅为 0.10% , 变化范围介于 $0.06\%\sim0.14\%$; CaO 、 MgO 、 TFe_2O_3 和 Na_2O 的平均含量依次为 4.22% 、 2.78% 、 5.27% 和 3.43% , 其中, Na_2O 的丰度变化范围也较大, 含量为 $2.66\%\sim5.45\%$ 。 Al_2O_3 、 K_2O 、 TiO_2 和 P_2O_5 的平均含量依次为 15.64% 、 3.01% 、 0.67% 和 0.15% 。大部分常量元素丰度变化较小, 变异系数为 $5.84\%\sim20.54\%$ 。其中, Na_2O 、 MnO 、 TFe_2O_3 、 CaO 和 MgO 的变异系数超过 15% , Al_2O_3 、 K_2O 、 SiO_2 和 P_2O_5 的变异系数相对较小, 在 10% 以下。

常量元素含量分布如图5所示。 SiO_2 含量高值区主要分布在孙家疃镇北部近岸海域的粗粒沉积区, 部分区域含量接近 70% ; 此外, 刘公岛东部海域粗粒沉积区也有一含量较高的区域, 呈现由岸向

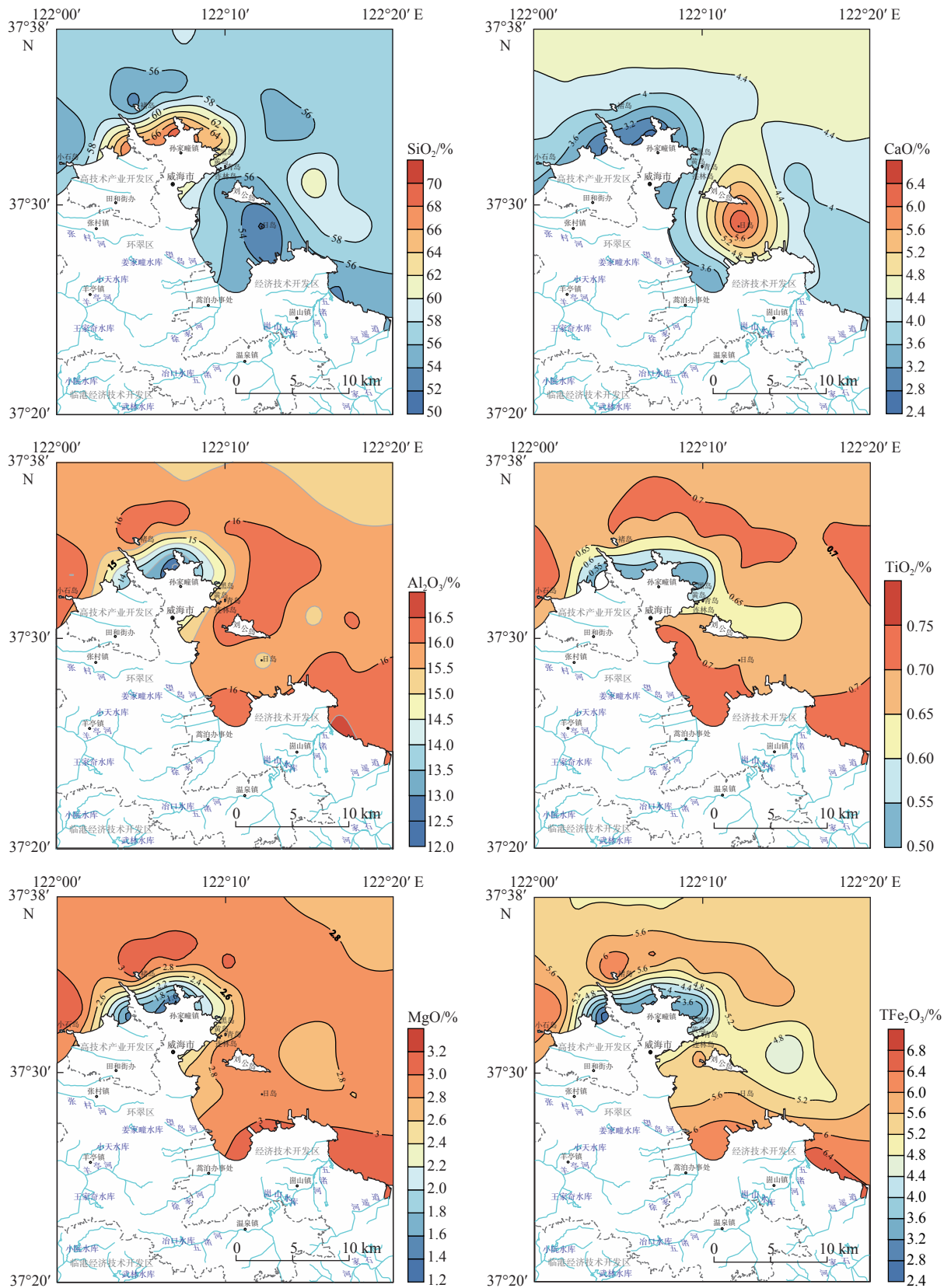


图 5 研究区表层沉积物代表性常量元素含量分布

Fig.5 Distribution of typical constant element content of surface sediments in the study area

海逐渐降低的趋势。 Al_2O_3 、 TiO_2 、 MgO 和 TFe_2O_3 具有相同的变化趋势。高值区主要位于威海市北

部和东部海域、经济技术开发区东部、西部近岸海域的细粒沉积区;低值区主要分布于调查区砂、含

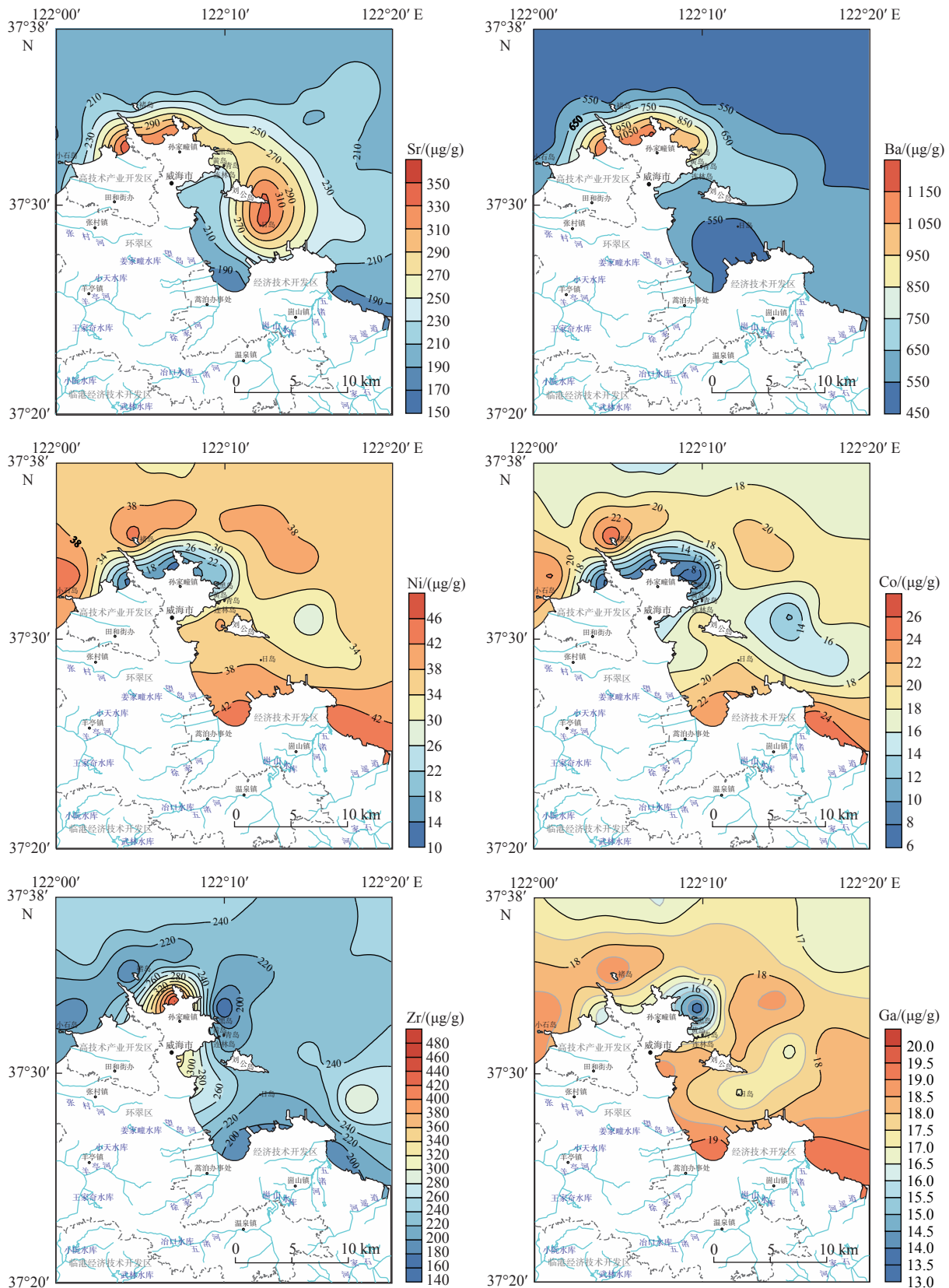


图6 研究区表层沉积物微量元素含量分布

Fig.6 Distribution of the trace element content of surface sediments in the study area

砾砂、含砾泥质砂等粗粒物质覆盖的大部分区域。 K_2O 表现出和 Al_2O_3 相异的分布趋势。高值区主

要位于近岸砂质沉积区,孙家疃镇北部近岸海域、经济技术开发区近岸海域含量都在 3.1% 以上。其

他地区含量在 3% 以下。 Na_2O 高值区主要分布在孙家疃镇周边近岸及远岸海域, 含量在 3.6% 以上, 中间海域为马鞍形低值区, 经济技术开发区近岸海域为 Na_2O 含量最低, 大部分含量在 2.8% 以下。 CaO 高值区主要分布在离岸较远的海域与日岛周边海域, 含量在 4.4% 以上, 近岸区域 CaO 含量普遍较低, 尤其在孙家疃镇北部近岸海域含量很低, 不足 3%。 MnO 总体含量较低, 高值区主要分布在高技术产业开发区与孙家疃镇北部远岸海域、刘公岛东北部海域, 大部分含量介于 0.1%~0.12%, 由高值区向远岸、向近岸含量逐渐降低, 部分海域 MnO 含量不足 0.09%。 P_2O_5 在孙家疃镇北部近岸显示出高值区, 大部分含量超过 0.16%, 向远岸逐渐降低至 0.14% 以下, 在刘公岛周边海域、经济技术开发区东部与西部近岸海域含量大部分介于 0.15%~0.16%。

2.2.2 微量元素地球化学特征

各微量元素空间变化如图 6 所示。Ba 的平均含量最高, 为 608.07 $\mu\text{g/g}$; 其次是 Zr 和 Sr, 平均含量分别为 238.10 和 231.27 $\mu\text{g/g}$; Ni、Ga 和 Co 的平均含量相对较低, 分别为 34.65、17.63 和 17.55 $\mu\text{g/g}$ 。研究区微量元素的变异系数为 20.11%~30.38%。微量元素 Ba 的变异系数为 30.38%, 其他元素的变异系数均在 30% 以下。

Sr 高值区主要分布在孙家疃镇北部近岸海域、刘公岛北部、东部与南部海域, 多数样品 Sr 的含量 >230 $\mu\text{g/g}$ 。由褚岛向北、刘公岛周边向东西两侧 Sr 含量逐渐降低, 低值区分布在经济技术开发区东西两侧, 含量 <190 $\mu\text{g/g}$ 。Ba 含量的高值区主要分布在孙家疃镇北部近岸附近海域, 含量 >650 $\mu\text{g/g}$, 且向北逐渐降低。此外, 经济技术开发区西部也存在 Ba 含量低值区, 含量 <550 $\mu\text{g/g}$ 。Ni、Co 同属于铁族元素, 其含量在研究区具有相同的变化趋势。Ni 的含量介于 10.20~44.90 $\mu\text{g/g}$, 平均含量为 34.65 $\mu\text{g/g}$; Co 的含量较低, 变化范围为 5.80~26.70 $\mu\text{g/g}$, 平均值仅有 17.55 $\mu\text{g/g}$ 。它们的平面分布趋势同常量元素 Fe 极为相似, 在粉砂、砂质粉砂等细颗粒沉积物区含量最高, 而在孙家疃镇北部近岸附近海域、刘公岛东部海域, 由于砂等粗颗粒物存在而明显降低。Zr 元素含量介于 152.0~464.0 $\mu\text{g/g}$, 平均含量为 238.10 $\mu\text{g/g}$, 变异系数为 23.15。Zr 的高值区位于孙家疃镇东北部近岸海域、刘公岛西部海域, 含量 >300 $\mu\text{g/g}$, 向海含量呈现先降低后增加的趋势。经济技术开发区东西两侧近

岸海域为 Zr 含量的低值区, 含量 <200 $\mu\text{g/g}$ 。Ga 元素的含量分布类似于 Ni、Co, 其含量高值区位于经济技术开发区东西两侧, 含量 >19.0 $\mu\text{g/g}$, 低值区位于孙家疃东北部近岸海域, 含量 <15.0 $\mu\text{g/g}$ 。研究区 Ga 含量总体上在孙家疃北部远岸海域向北、向南均呈降低趋势; 在刘公岛东部海域向周边呈明显增加的趋势。

3 讨论

3.1 沉积环境分区及影响因素

众多学者利用沉积物粒度参数的变化趋势来推断沉积物沉积时的动力条件^[29-32], 本文采用 Pejrup 三角图^[33] 对研究区沉积动力环境进行了分区。根据黏土(粉砂+黏土)的百分含量 20%、50% 和 80% 可以划分为 I、II、III、IV 4 个不同的水动力区, 粉砂和黏土的比值可反映沉积物的扰动程度, 从 I 区到 IV 区随着粉砂含量越高, 水动力越强(图 7)。根据沉积物中砂的百分含量为 10%、50%、90% 为分类标志线划分成 A、B、C、D 共 4 个区, 其中, 砂的百分含量从 A 区到 D 区逐渐减少, 表明水动力条件逐渐减弱。研究区共有 25 个含砾样品, 考虑砾组分在三角图中无法体现, 本文假设不考虑砾组分存在, 重新计算砂、粉砂、黏土的百分含量, 最终投点主要落于三角图中 A、B III、C III、C IV、D III 5 个区, 相应获得了研究区的沉积环境分区(图 8)。

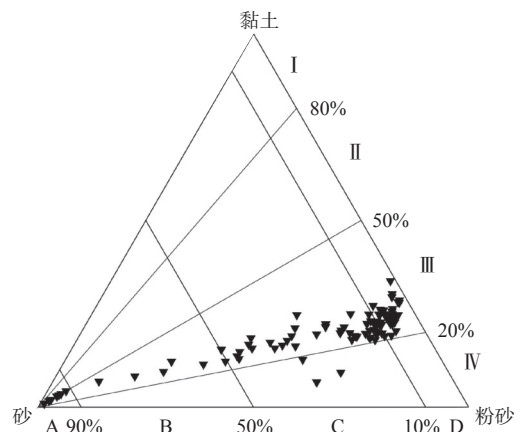


图 7 Pejrup 三角图投点结果

Fig.7 The Pejrup ternary graph

A 区主要集中分布在小石岛附近, 孙家疃镇北部、崆山镇东北部近岸海域, 为含砾沉积物, 砂组分含量较高, 粉砂和黏土组分含量较低, 分选较好, 偏态呈显著正偏, 峰态超过 1.5, 表现为很尖锐, 该区

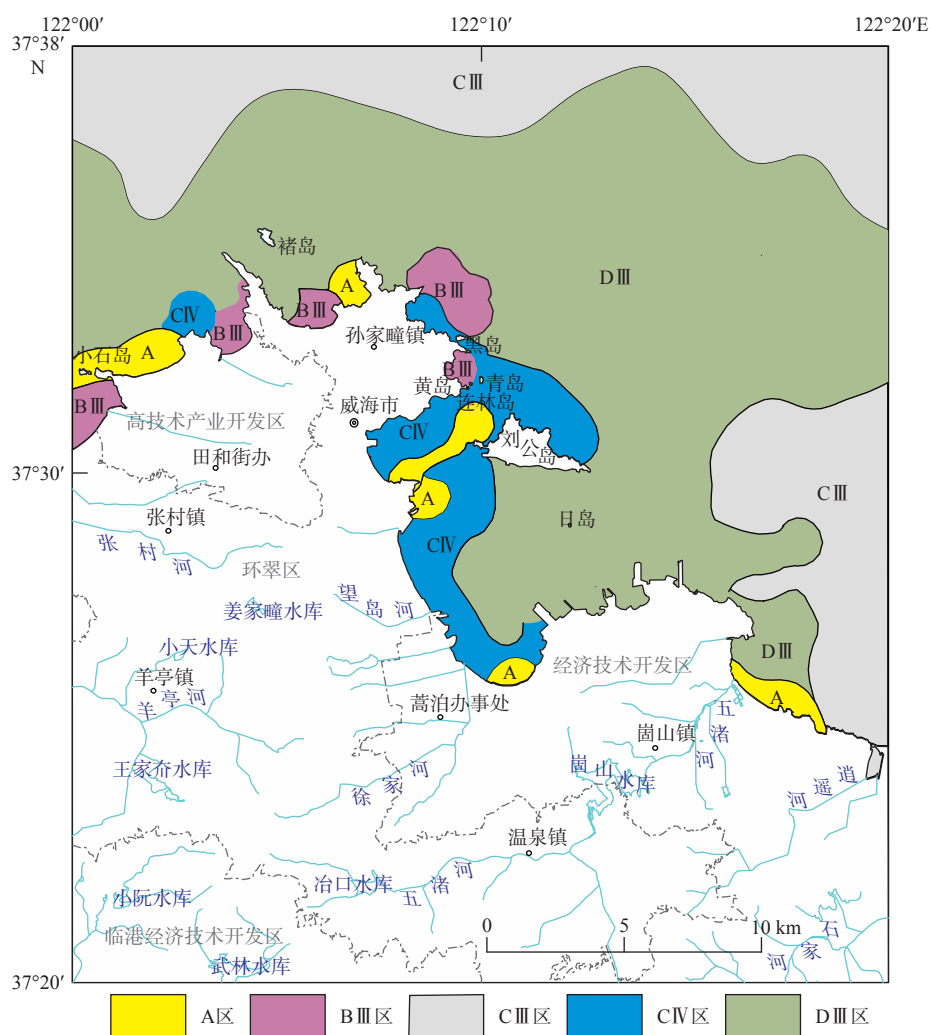


图8 研究区沉积动力环境分区

Fig.8 Dynamic sediment environment divisions in the study area

的水动力条件强, 沉积物搬运方式以推移和跃移为主。BⅢ区主要分布在小石岛南部、黑岛附近, 砂泥比和粉砂黏土比相对较高, 分选较差, 偏态呈显著正偏, 在高新技术产业开发区北部偏态出现高值, 水动力条件相对较强。CⅢ区主要分布在研究区北部和东部海域, 以砂质粉砂为主, 砂泥比和粉砂黏土比均较低, 分选差, 偏态呈显著正偏, 峰度 <0.9 , 水动力条件较弱。CIV区主要分布在望岛河东部、刘公岛附近海域, 该区粉砂与黏土比值高, 为扰动环境, 受扰动程度较CⅢ区高, 分选差, 偏态呈正偏, 峰度 <0.9 , 水动力条件较CⅢ区强。DⅢ区在威海市北部及东部海域广泛分布, 该区沉积物类型以粉砂为主, 粉砂黏土比较高, 砂泥比最低, 水动力条件最弱。

研究区沉积动力环境分区表现出近岸强, 远岸弱的分布格局, 与粒径组分、粒度参数及沉积物类型的分布较为一致, 表层沉积物分布明显受水动力条件控制。研究区主要环流体系包括山东半岛沿

岸流、黄河暖流以及威海附近潮流、波浪^[34-35]。前人对庙岛群岛海域沉积动力环境研究表明, 潮流是沉积动力环境的主要控制动力^[36]。对烟台北部近岸海域沉积动力研究则表明, 沉积动力环境由潮流、沿岸流以及沉积物来源共同控制影响^[37]。山东半岛北部存在中间厚、向海和陆地减薄的泥质区, 这种分布格局是黄河细粒物质在沿岸流影响下, 沿山东半岛输运形成, 沿岸流对于环山东半岛全新世泥质沉积体的发育起到关键作用^[38-39]。本研究区东北部开阔海域为细粒沉积物, 输运的主要动力为山东半岛沿岸流, 沿岸流搬运黄河入海沉积物, 并带动了部分悬浮泥沙运输。物质来源也对研究区沉积动力环境产生影响, 短源河流和海岸带范围内的基岩侵蚀物也对该区沉积物有一定贡献^[40-41]。研究区少量近源粗颗粒物质来自威海附近中小河流和海岸侵蚀带来的半岛物质, 受到潮流和波浪等动力影响。

3.2 元素组成的制约因素与来源分析

常量元素 Al_2O_3 、 TiO_2 、 MgO 、 TFe_2O_3 与平均粒径相关性明显, 呈正相关(图 9), 相关系数分别为 0.80、0.92、0.89、0.96, 即其百分含量都随着沉积物粒度的变细而增加, 符合“元素粒度控制规律”^[42], 这些元素主要富集在近岸细粒沉积物区, 明显在黏

土中富集^[43]。

CaO 、 P_2O_5 、 MnO 与平均粒径的相关性不明显。 Ca 主要存在于方解石、文石、白云石、钙质结核和多种生物遗体贝壳中^[44-45]。总体来看, CaO 受粒度影响不明显, 主要受碳酸盐碎屑影响。研究区 P 含量低, 作为与生物作用密切相关的“亲生物元素”^[46], 表明研究区生物作用对底质的影响较弱。 Mn 除了

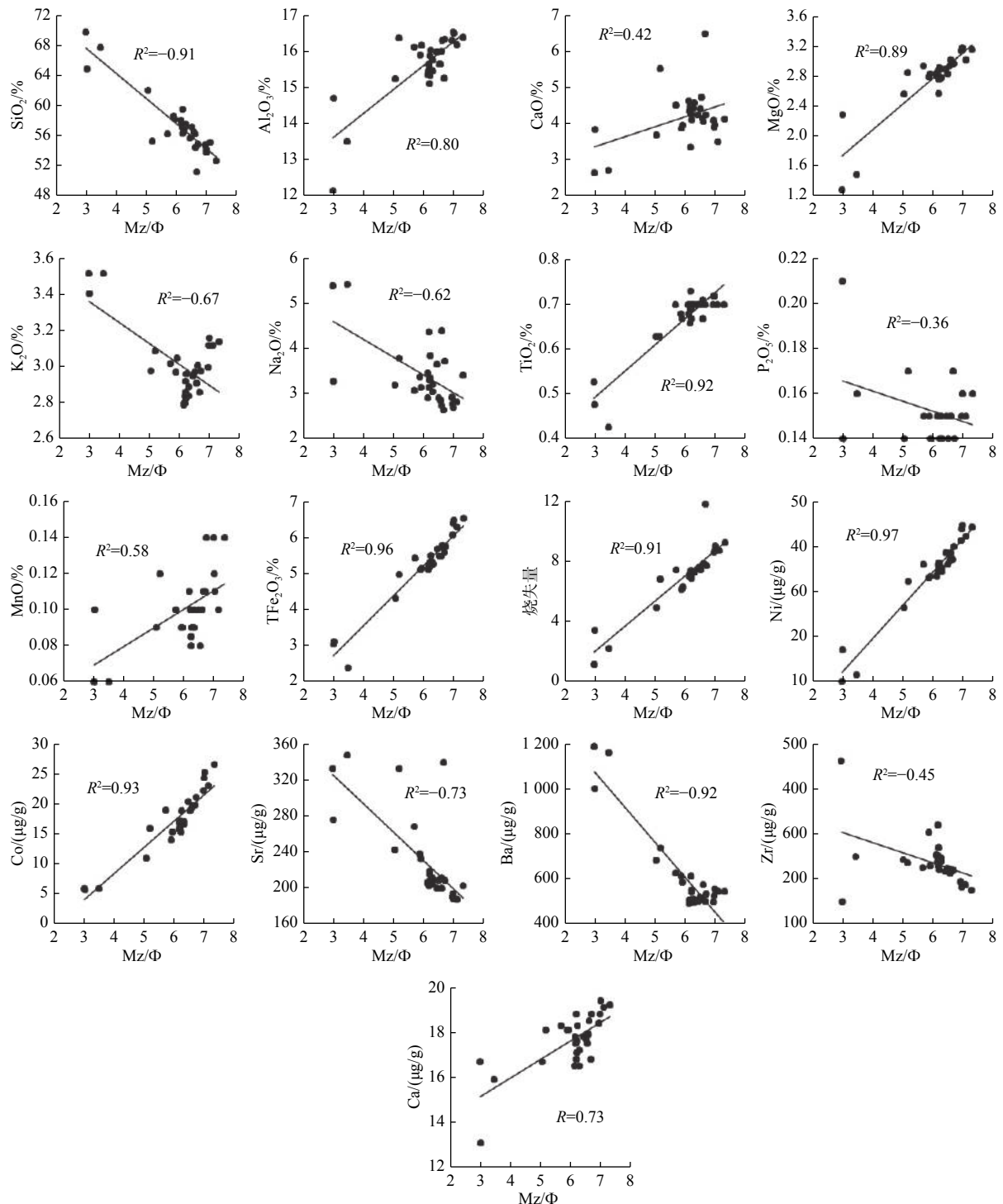


图 9 研究区主要常量、微量元素与 Mz 相关性图

Fig.9 Correlation between major and trace elements to the mean grain size (Mz) in the study area

部分来自陆源外,还受自生作用和生物作用的影响,MnO的含量与氧化还原条件密切相关^[47],氧化条件对应Mn高含量,研究区低MnO含量对应了还原条件。

SiO₂与平均粒径呈显著的负相关,即在粒度较粗的区域含量较高,这是由于SiO₂通常以碎屑态赋存于石英和其他硅酸盐等较粗颗粒陆源碎屑中^[48],其含量变化对其他元素含量变化起到稀释作用,呈现消长关系^[49]。K₂O主要分布在砂质沉积区,主要受钾长石、伊利石以及云母含量的影响,Na₂O主要赋存于陆源粗颗粒碎屑中,以硅酸盐为主,其分布反映沉积物源区的特征^[50]。

大多数微量元素与平均粒径具有良好的线性关系,Ni、Co、Ga与平均粒径相关性非常明显,相关系数分别为0.97、0.93、0.73(图9),这些微量元素的百分含量随沉积物粒度的变细而增加,遵循“元素粒度控制规律”。Ga、Ni、Co含量分布类似,主要富集在近岸细粒沉积物区,而在粗粒沉积区,其含量明显减少。Zr与平均粒径呈弱的负相关,相关系数为-0.45。元素Ba和Sr与平均粒径呈负相关,相关系数分别为-0.92和-0.72,从前面的含量分布图上可以看出,主要富集在粗粒沉积区。Sr通常被归类为亲钙质生物元素,是海洋生物沉积物的特征元素^[51],研究区Sr受碳酸盐碎屑影响明显,圆斑状高值区的出现可能与该区域生物贝壳碎片富集有关。研究区Ba的含量分布特征基本不受沉积物粒度的控制,Ba主要由陆源碎屑Ba和生物成因Ba组成^[52],其含量的变化主要受钾长石以及云母等矿物的影响。

微量元素除了受粒度特征影响之外,还受到源区源岩的影响,可以用来判别沉积物物源^[53-54]。研究区位于山东半岛东部,三面濒临黄海。沉积物可能来源于长江、黄河、山东半岛附近入海河流。黄河沉积物中Sr含量最高,可以作为识别黄河的物质来源的指标^[55-56]。而长江沉积物中显著富集Cr、Ni等过渡金属元素。研究区Co、Ni含量较低而Sr含量较高,Sr高值区主要分布在孙家疃镇北部近岸海域、刘公岛北部、东部与南部海域。由褚岛向北、刘公岛周边向东西两侧Sr含量逐渐降低,低值区分布在经济技术开发区东西两侧。结合动力环境分析,研究区受沿岸流影响,搬运大量黄河入海物质,黄河成为该地区沉积物的主要来源,长江沉积物影响较小。

4 结论

(1)威海周边海域表层沉积物类型共有10种;含砾泥质砂、砾质泥质砂、含砾泥、砾质泥、砂、粉砂质砂、泥质砂、砂质粉砂、粉砂、泥。砂质粉砂和粉砂分布最广泛。研究区平均粒径介于5Φ~7Φ,总体呈现由岸向海逐渐变细的趋势。大部分海域沉积物分选系数介于2~3,分选差。偏态变化范围为-0.17~0.73,属于正偏的范畴。峰度变化范围为0.64~3.46,平均值为1.01。

(2)研究区沉积动力环境可以划分为A、BⅢ、CⅢ、CⅣ、DⅢ5个区,由岸向海水动力逐渐减弱,输运的主要动力为山东半岛沿岸流。近岸粗颗粒沉积物受河流以及海岸侵蚀影响,细粒颗粒物质主要来源于黄河,受到山东半岛沿岸流控制。

(3)研究区表层沉积物大部分常微量元素受到粒度控制因素的影响,CaO主要受碳酸盐碎屑影响,控制Sr分布的主要因素是海洋生物沉积作用加强。K₂O、NaO、SiO₂、Ba等元素受到物源控制因素影响,MnO除了受粒度控制影响外还受到氧化环境环境影响。研究区Co、Ni含量较低而Sr含量较高,表明受沿岸流影响,黄河成为该地区沉积物的主要来源。

参考文献:

- [1] 张剑,李日辉,王中波,等.渤海东部与黄海北部表层沉积物的粒度特征及其沉积环境[J].海洋地质与第四纪地质,2016,36(5): 1-12.
- [2] 王中波,李日辉,张志珣,等.渤海及邻近海区表层沉积物粒度组成及沉积分区[J].海洋地质与第四纪地质,2016,36(6): 101-109.
- [3] 庄海海,徐绍辉,高茂生,等.胶州湾表层沉积物粒度特征及其沉积环境[J].海洋地质前沿,2018,34(9): 24-31.
- [4] 梅西,李学杰,密蓓蓓,等.中国海域表层沉积物分布规律及沉积分异模式[J].中国地质,2020,47(5): 1447-1462.
- [5] 乔淑卿,石学法,王国庆,等.渤海底质沉积物粒度特征及输运趋势探讨[J].海洋学报(中文版),2010,32(4): 139-147.
- [6] 金秉福,林振宏,季福武.海洋沉积环境和物源的元素地球化学记录释读[J].海洋科学进展,2003,21(1): 99-106.
- [7] 刘升发,石学法,刘焱光,等.东海内陆架泥质区表层沉积物常量元素地球化学及其地质意义[J].海洋科学进展,2010,28(1): 80-86.
- [8] 苗晓明,朱龙海,刘志杰,等.山东半岛东北部表层沉积物微量元素分布及其对物源的指示[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2018,48(1): 82-92.
- [9] 蓝先洪.渤海东部和黄海北部表层沉积物稀土元素的分布特征

- 与物源判别[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2016, 41(3): 463-474.
- [10] LI J, LIU S, FENG X, et al. Major and trace element geochemistry of the mid-Bay of Bengal surface sediments: implications for provenance[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2017, 36(3): 82-90.
- [11] 王中波, 杨守业, 张志珣, 等. 东海陆架中北部沉积物粒度特征及其沉积环境[J]. 海洋与湖沼, 2012, 43(6): 1039-1049.
- [12] 窦衍光, 李军, 李炎. 北部湾东部海域表层沉积物稀土元素组成及物源指示意义[J]. 地球化学, 2012, 41(2): 147-157.
- [13] 蓝先洪, 张志珣, 李日辉, 等. 长江口外海域表层沉积物微量元素地球化学特征[J]. 现代地质, 2011, 25(6): 1066-1076.
- [14] 杨群慧, 李木军, 杨胜雄, 等. 南海西南部表层沉积物粒度特征及输运趋势[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2013, 33(6): 1-7.
- [15] 钟和贤, 黄磊, 崔兆国. 南海西北部海域表层沉积物粒度分布特征及其影响因素[J]. 海洋地质前沿, 2013, 29(11): 22-31.
- [16] 张晋, 李安春, 万世明, 等. 南海南部表层沉积物粒度分布特征及其影响因素[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2016, 36(2): 1-10.
- [17] 赵利, 彭学超, 钟和贤, 等. 南海北部陆架区表层沉积物粒度特征与沉积环境[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2016, 36(6): 111-122.
- [18] LIU J, YIN P, ZHANG Y, et al. Distribution and provenance of detrital minerals in southern coast of Shandong Peninsula[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2017, 16(5): 747-756.
- [19] 王中波, 陆凯, 温珍河, 等. 中国东部海域表层沉积物粒度组成及影响因素[J]. 地球科学, 2020, 45(7): 2709-2722.
- [20] 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.
- [21] 窦衍光, 李军, 杨守业. 山东半岛东部海域表层沉积物元素组成及物源指示意义[J]. 海洋学报, 2012, 34(1): 109-119.
- [22] 李国刚, 胡邦琦, 李军, 等. 山东半岛沿岸海域表层沉积物的常量元素及其地质意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2012, 32(3): 45-54.
- [23] 朱龙海, 张自豪, 刘志杰, 等. 山东半岛东部海域表层沉积物微量元素分布及物源指示意义[J]. 海洋科学, 2018, 42(5): 1-11.
- [24] 孔祥淮, 刘健, 李巍然, 等. 山东半岛东北部滨浅海区表层沉积物的稀土元素及其物源判别[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2007, 27(3): 51-59.
- [25] LI Y, LI A C, HUANG P, et al. Clay minerals in surface sediment of the north Yellow Sea and their implication to provenance and transportation[J]. *Continental Shelf Research*, 2014, 90: 33-40.
- [26] LIU J, SAITO Y, WANG H, et al. Sedimentary evolution of the Holocene subaqueous clinoform off the Shandong Peninsula in the Yellow Sea[J]. *Marine Geology*, 2007, 236(3/4): 165-187.
- [27] FOLK R L, WARD W C. Barazos River bar: a study in the significance for grain parameters[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1957, 31: 514-519.
- [28] FOLK R L, ANDREWS P B, LEWIS D W. Detrital sedimentary rock classification and nomenclature for use in New Zealand[J]. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 1970, 13(4): 937-968.
- [29] 宋红瑛, 刘金庆, 印萍, 等. 日照近海表层沉积物粒度特征与沉积环境[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2016, 46(3): 96-104.
- [30] 汤世凯, 于剑峰, 李金鹏, 等. 丁字湾近岸海域表层沉积物粒度特征及沉积动力环境[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2019, 39(2): 70-78.
- [31] 张先锋, 吴建政, 胡日军, 等. 靖海湾表层沉积物粒度特征及沉积动力环境分区[J]. 海洋地质前沿, 2013, 29(10): 47-51.
- [32] 章伟艳, 张霄宇, 金海燕, 等. 长江口-杭州湾及其邻近海域沉积动力环境及物源分析[J]. 地理学报, 2013, 68(5): 640-650.
- [33] PEJRUP M. The Triangular Diagram Used for Classification of Estuarine Sediments: A New Approach[M]. Dordrecht, Holland: D Reidel Publishing Company, 1988: 289-300.
- [34] 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.
- [35] 李铁刚, 江波, 孙荣涛, 等. 末次冰消期以来东黄海暖流系统的演化[J]. 第四纪研究, 2007, 27(6): 945-954.
- [36] 刘成, 胡日军, 朱龙海, 等. 庙岛群岛海域沉积动力环境分区及沉积物输运趋势[J]. 海洋地质前沿, 2018, 34(8): 24-33.
- [37] 吕纪轩, 胡日军, 李毅, 等. 烟台北部近岸海域表层沉积物粒度分布及沉积动力环境特征[J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(4): 27-36.
- [38] Yang Z S, Liu J P. A unique Yellow River-derived distal subaqueous delta in the Yellow Sea[J]. *Marine Geology*, 2007, 240(1/4): 169-176.
- [39] ZHANG X, SHIPU B I, ZHANG Y, et al. Provenance analysis of surface sediments in the Holocene mud area of the southern coastal waters off Shandong Peninsula, China[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2016, 5: 124-133.
- [40] 胡刚, 毕世普, 张勇, 等. 山东半岛中南部滨浅海地区表层沉积物分布特征及形成机制[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2015, 35(6): 17-23.
- [41] 王益民, 吴建政, 朱龙海, 等. 文登近岸海域表层沉积物分布特征及影响因素[J]. 海洋地质前沿, 2014, 30(8): 23-28.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] 刘广虎, 李军, 陈道华, 等. 台西南海域表层沉积物元素地球化学特征及其物源指示意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2006, 26(5): 61-68.
- [45] 崔振昂, 林进清, 甘华阳, 等. 南海北部湾东部海域表层沉积物地球化学特征[J]. 海洋科学, 2015, 39(7): 103-111.
- [46] 陈弘, 刘坚, 王宏斌. 琼东南海域表层沉积物常量元素地球化学及其地质意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2007, 27(6): 39-45.
- [47] 韦刚健, 李献华, 刘颖, 等. 沉积物成岩蚀变过程中的Mn, Cd和Mo元素活动特征: 以ODP 1148站钻孔沉积物记录为例[J]. 地球化学, 2005, 34(2): 129-135.

- [48] 赵利, 蔡观强, 钟和贤, 等. 南海北部陆架海域表层沉积物地球化学特征及地质意义[J]. 地质学刊, 2017, 41(1): 103-111.
- [49] 王国庆, 石学法, 刘焱光, 等. 长江口南支沉积物元素地球化学分区与环境指示意义[J]. 海洋科学进展, 2007, 25(4): 408-418.
- [50] 密蓓蓓, 蓝先洪, 张志珣, 等. 长江口海域表层沉积物常量元素地球化学及其地质意义[J]. 海洋学研究, 2014, 32(1): 82-89.
- [51] 郭志刚, 杨作升, 曲艳慧, 等. 东海陆架泥质区沉积地球化学比较研究[J]. 沉积学报, 2000, 18(2): 284-289.
- [52] 蔡观强, 邱燕, 彭学超, 等. 南海西南海域表层沉积物中微量元素Ba的地球化学特征[J]. 现代地质, 2010, 24(3): 560-569.
- [53] 杨守业, 李从先, JUNG H S, 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): 19-24.
- [54] YANG S Y, YOUN J S. Geochemical compositions and provenance discrimination of the central South Yellow Sea sediments[J]. Marine Geology, 2007, 243(1/4): 229-241.
- [55] YANG S Y, JUNG H S, LIM D I, et al. A review on the provenance discrimination of sediments in the Yellow Sea[J]. Earth-Science Reviews, 2003, 63(1/2): 93-120.
- [56] LIM D I, JUNG H S, CHOI J Y, et al. Geochemical compositions of river and shelf sediments in the Yellow Sea: grain-size normalization and sediment provenance[J]. [Continental Shelf Research](#), 2006, 26(1): 15-24.

Control factors of sedimentary dynamic environment zones and element composition of surface sediments in surrounding waters of Weihai

LI Hengmeng^{1,2}, WANG Man^{1,2}, WANG Jing^{1,2*}, BIAN Xiongfei^{1,2}

(1 No.6 Institution of Geology and Mineral Resources Exploration of Shandong Province, Weihai 264209, China;

2 Shandong Provincial Engineering Laboratory of Application and Development of Big Data for Deep Gold Exploration, Weihai 264209, China)

Abstract: To gain a deeper understanding of modern sedimentation, sedimentary environment, and evolution in the Yellow Sea, the grain size, element geochemical characteristics, and the control factors of surface sediments in the waters around Weihai were analyzed, and the sedimentary dynamic environment discussed. We found that the silt is the major component in the sediments, and its amount gradually increases from shore to sea. The silt content in the northern, eastern, and southern waters of Liugong Island is generally more than 60%. The content of sand fraction decreases gradually from shore to sea. According to the grain size characteristics, the sedimentary dynamic environment in the study area can be divided into five zones or types; and water power gradually weakens from shore to sea. Coastal coarse-grained sediments are affected by river and coastal erosion, and fine-grained materials come from the Yellow River and are controlled by the coastal current around Shandong Peninsula. Most of the common trace elements in surface sediments are affected by particle size, CaO is mainly by carbonate debris, Sr by marine biological factor, K₂O, NaO, SiO₂, Ba and other elements by provenance property, and MnO₂ by particle size and oxidation state jointly.

Key words: sedimentary dynamic environment partitioning; element composition; controlling factors; the waters around Weihai