

林炜, 李峰, 张晓举, 等. 荣成天鹅湖内外表层沉积物常量元素含量分布差异及其影响因素[J]. 海洋地质前沿, 2025, 41(6): 78-92.

LIN Wei, LI Feng, ZHANG Xiaojun, et al. Differences in the distribution of constant element content in surface sediments inside and outside Rongcheng Swan Lake and their influencing factors[J]. Marine Geology Frontiers, 2025, 41(6): 78-92.

荣成天鹅湖内外表层沉积物常量元素含量分布差异及其影响因素

林炜¹, 李峰^{2*}, 张晓举³, 孙菲菲¹, 朱龙海^{1,4}, 胡日军^{1,4}

(1 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100; 2 烟台市海洋环境监测预报中心, 烟台 264003; 3 自然资源部北海调查中心, 青岛 266100; 4 中国海洋大学, 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 青岛 266100)

摘要: 于 2020 年 9 月和 2023 年 9 月利用蚌式取样器在天鹅湖和荣成湾 44 个站位进行表层沉积物采样, 通过对样品的粒度和常量元素进行测试, 分析了潟湖内外粒度和常量元素的平面分布特征及其差异, 结合相关性分析、水动力数值模拟、聚类分析、主成分分析等方法, 探讨研究区表层沉积物常量元素分布的主要控制因素。结果表明, 天鹅湖表层沉积物组分以砂为主, 荣成湾表层沉积物组分以粉砂为主, 天鹅湖表层沉积物粒度明显粗于荣成湾; 天鹅湖表层沉积物的 SiO_2 和 P_2O_5 含量 (75.74% 和 0.055%) 高于荣成湾 (61.73% 和 0.053%), Al_2O_3 、 TFe_2O_3 、 MgO 等常量元素含量均低于荣成湾。整体上 SiO_2 的分布与平均粒径的分布趋势相反, 其他大部分常量元素分布与平均粒径的分布相似, 大部分常量元素含量在荣成湾由岸边向外海逐渐增加, 在天鹅湖其含量由湖岸向湖内逐渐增加。粒度是影响荣成湾和天鹅湖大部分常量元素 (SiO_2 、 Al_2O_3 、 TFe_2O_3 、 MgO 等) 分布的主要因素, 且对荣成湾的影响明显高于天鹅湖; 天鹅湖表层沉积物的 K_2O 分布受成山头海岸侵蚀物质和粒度的共同影响, 荣成湾的 K_2O 分布主要受侵蚀物质的影响; 天鹅湖表层沉积物的 P_2O_5 分布主要受人类活动和海草床的共同影响, 而荣成湾的 P_2O_5 分布主要受粒度影响。

关键词: 荣成湾; 天鹅湖; 表层沉积物; 常量元素; 影响因素

中图分类号: P736

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2024.069

0 引言

海洋沉积物是各种海洋自然因素综合作用的产物, 是组成海底的物质基础^[1]。作为承载环境信息的重要载体, 海洋沉积物在搬运和沉积的过程中, 其元素特征会因搬运介质、运移方式、物源、水动力等因素发生变化^[2], 元素地球化学是海洋沉积学

的重点研究内容之一^[3], 通过研究海洋沉积物的元素地球化学特征可以揭示沉积环境的变化^[4-5]。

沙坝-潟湖海岸大多形成于全新世, 由潟湖、潮汐通道和沙坝等单元构成, 占到了世界海岸线的 13% 以上^[6], 其环境演变主要受海平面变化、区域地质和地貌因素的影响; 人类活动的干扰 (土地开发和污染排放等) 则进一步改变其生态环境, 因此, 沙坝-潟湖海岸是沿海区域最脆弱的生态系统之一^[7-8]。沙坝-潟湖海岸也是中国砂质海岸的重要组成类型, 是进行海水养殖、旅游、港口建设等开发利用活动的重要资源地^[9]。潟湖的沉积速率快^[10], 水深相对较浅, 被沙坝 (或沙嘴) 阻隔, 处于半封闭状态^[11], 拥有丰富的生物资源^[12]; 此外, 人类活动对潟湖环境的影响明显, 例如潟湖的潮间带地区常被用于进行盐田、农业、港口等活动, 导致潟湖的淤积程度明显

收稿日期: 2024-03-22

资助项目: 山东省自然科学基金“近 50 年来山东半岛滨海沙滩侵蚀演变的定量评价及其影响因素” (ZR2019MD037)

第一作者: 林炜 (1999—), 男, 在读硕士, 主要从事海洋沉积学等方面的工作。E-mail: 1120139049@qq.com

* 通讯作者: 李峰 (1979—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事海洋环境监测与保护、海洋预报等方面的工作。E-mail: 26050146@qq.com

增加^[6]。作为受海陆共同影响的生态系统, 潟湖具有独特的沉积环境特征, 如海湖水交换、浅水低能、多物源等^[13], 其环境敏感脆弱, 生态环境受人类活动影响显著^[14], 是进行地球化学元素特征研究的热点区域之一^[7,15-16]。

天鹅湖是中国北方最典型的潟湖之一, 通过狭窄的潮汐通道与荣成湾相连。天鹅湖是国家级自然保护区和亚洲最大的天鹅越冬栖息地, 相邻的荣成湾则是中国最发达的水产养殖海湾之一^[17], 独特的潟湖-海湾生态系统具有很高的科研、经济、生态和旅游价值。天鹅湖水深较浅、水动力以潮流作用为主, 沉积物以砂和粉砂为主, 物质来源多样, 包括流域地面侵蚀物质、涨潮带入的外海物质、风尘沉降以及生物作用等^[18-20]; 天鹅湖周围区域人类活动活跃, 主要包括虾池养殖、农田、旅游度假等^[21]; 此外, 潟湖内植物茂盛, 分布有大面积的海草床^[22]。相邻的荣成湾海域水深较深、具有弱潮、海蚀地貌发育等特点^[9,23-24]; 成山头区域侵蚀作用强, 为荣成湾提供了丰富的泥沙来源^[25]; 荣成湾内分布大面积海水养殖, 养殖船舶活动较多, 受养殖活动影响显著^[26]。综上所述, 天鹅湖和荣成湾在物源、地形地貌、水动力条件和人类活动等方面存在明显区别, 导致两者沉积物地球化学特征各具特点, 其影响因素也存在显著差异, 通过分析沉积物的地球化学特征对于了解潟湖-海湾独特的沉积环境特点、指导海洋开发活动以及开展环境保护等方面具有重要的科学价值和实践意义。

1 研究区概况

天鹅湖位于山东半岛最东端的荣成市, 是中国北方典型的潟湖, 同时也是国家级自然保护区, 湖内有几条季节性河流注入, 平均水深 < 2 m, 整体面积约为 5 km²^[27]。天鹅湖和荣成湾被沙坝阻隔, 通过狭窄的潮汐通道与荣成湾相连, 荣成湾滩面窄而陡, 沙坝主要由中、粗砂和砾石等组成^[28]。天鹅湖为半封闭潟湖, 波浪通过狭窄的潮汐通道进入湖内后非常微弱, 潟湖的水动力主要受潮汐、潮流控制^[18]; 沙坝外侧荣成湾海域波浪作用较弱^[29], 水动力以潮流为主, 并且其内广泛分布海水养殖, 海带养殖面积占到一半以上^[26], 海带养殖架群进一步消减波浪作用^[30]。研究区的地理位置范围为 37°20'—37°23' N, 122°32'—122°37' E (图 1)。

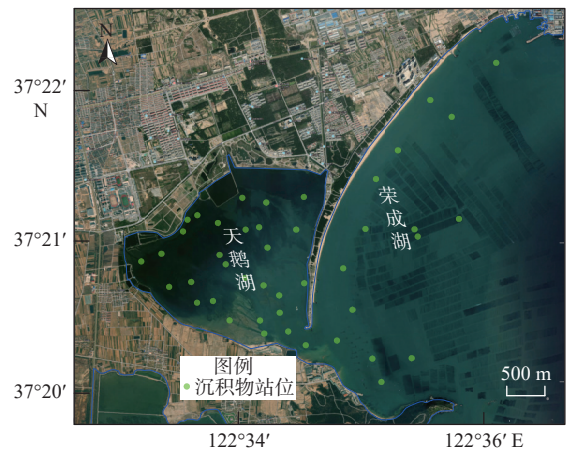


图 1 研究区表层沉积物站位

Fig.1 Map of surface sediment stations in the study area

2 材料与方法

2.1 样品采集

于 2020 年 9 月和 2023 年 9 月利用蚌式取样器在天鹅湖和荣成湾采集的 44 个表层沉积物样品 (图 1)。样品采集后马上用聚乙烯袋装好, 记录好采样点和袋号, 送至实验室低温保存, 并进行粒度、元素测试。

2.2 分析测试方法

2.2.1 粒度测试

粒度测试在中国海洋大学海洋地球科学学院完成, 主要使用筛析法、激光法和综合法^[31]。砂粒级组分 (> 0.063 mm) 含量 > 85% 的条件下使用筛析法; 在沉积物粉砂和黏土组分含量较高的条件下使用激光分析法; 当 2 种组分含量相当的情况下使用综合法, 即 > 0.063 mm 的粒级组分用筛析法, < 0.063 mm 的粒级组分用激光法。样品预处理时首先称取所采集的原始沉积物样品 10~20 g。然后在烧杯中先后加入双氧水和稀盐酸溶液以去除沉积物样品中所含的碳酸盐和有机质, 再加入 (NaPO₃)₆ 溶液作分散剂, 之后根据上述要求分别选用不同的方法进行测试分析。筛析法用 1/4 Φ 间隔分级; 激光法采用美国贝克曼库尔特公司生产的 LS13 320 激光粒度分析仪测试 (测量范围为 0.02~2 000 μm, 偏差 < 1%, 重现性 50Φ < 1%) 进行粒度测试。

2.2.2 元素测试

沉积物元素测试在中国海洋大学海洋地球科

学学院完成。将沉积物样品在温度 $<60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下进行烘干,然后使用玛瑙研钵研磨至200目以下,将研磨后的样品进行压片以用于X射线荧光光谱分析仪(XRF)进行常量元素分析(XRF采用的是美国赛默飞世尔科技公司生产的ARLPerform'X型号)。元素测定分别进行了多个样品的重复测量和标准样品测量,标准样品采用GBW-7343(黄河口沉积物1)、GB7314(近海沉积物)、GB7333(黄海沉积物)和GBW-7345(黄河口沉积物2),重复测量和标准样品测量结果显示元素的相对误差 $<5\%$ 。

2.2.3 水动力数值模拟

采用Mike21中Flow Model HD模块进行水动力数值模拟,使用标准 Galerkin 有限元法进行水平空间离散和非结构网格剖分计算域。时间上使用显示迎风差分格式离散动量方程与运输方程。本次潮流数值模拟的计算范围及潮流、潮位验证点如图2所示,计算坐标范围为 $36^{\circ}31'14.04''$ — $37^{\circ}47'55.61''\text{N}$ 、 $121^{\circ}41'29.83''$ — $123^{\circ}32'32.57''\text{E}$,对于动边界的处理使用干、湿网格进行,模拟计算中将本次研究区及其周边海域的计算网格进行加密处理。计算三角单元共计41 574个,节点共计23 971个,本次研究区局部加密网格图如图3所示。

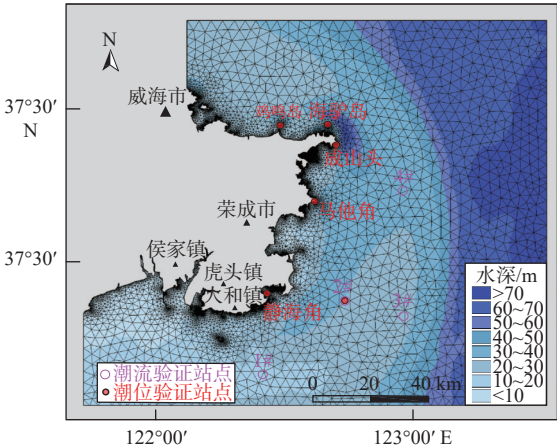


图2 计算区域网格和潮流、潮位验证点分布
Fig.2 Calculation of regional grid and tidal current, and the distribution of tidal level verification point

本研究潮位验证资料根据鸡鸣岛、海驴岛、成山头、马他角、靖海角历史观测资料调和分析以及2#站位实测资料(2015年12月12日10:00—12月13日11:00)与潮流数值模拟的结果进行验证;潮流验证根据2015年12月12日10:00—12月13日11:00(大潮)4个站位26 h单周日海流同步连续观测数据,海流观测资料经调和分析后,选用预报出大潮期的潮位与计算结果进行验证(表1)。

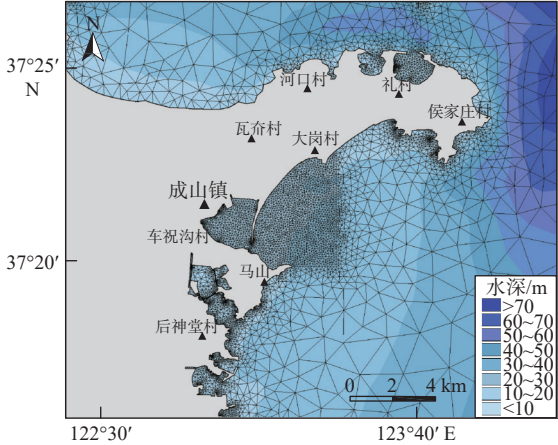


图3 研究区局部加密网格分布
Fig.3 Local refined grid distribution in the study area

表1 潮流潮位验证点概况

Table 1 Overview of tide level verification points

潮流验证点	纬度(N)	经度(E)	潮位验证点	纬度(N)	经度(E)
1#	36°38.220'	122°25.136'	鸡鸣岛	37°25'	122°28'
2#	36°52.621'	122°44.149'	海驴岛	37°27'	122°40'
3#	36°49.661'	122°57.818'	成山头	37°23'	122°42'
4#	37°14.057'	122°57.600'	马他角	37°12'	122°37'
			靖海角	36°54'	122°26'
			2#	36°52.621'	122°44.149'

3 结果

3.1 表层沉积物粒度分布特征

3.1.1 表层沉积物粒度组成

研究区主要沉积物组分为砂、粉砂和黏土(图4)。荣成湾的砂粒级含量的变化范围为0~89.29%,平均为31.11%,粉砂粒级介于2.64%~80.54%,平均为56.77%,黏土含量介于0.22%~25.30%,平均为10.07%;天鹅湖的砂粒级含量介于5.38%~97.14%,平均为55.56%,粉砂粒级含量介于0.02%~83.63%,平均为37.84%,黏土含量介于0~21.94%,平均为5.49%。荣成湾沉积物粒度相对较细,平均粒径为 $2.13\Phi\sim7.12\Phi$,平均为 5.34Φ ;天鹅湖沉积物粒度相对较粗,平均粒径的变化范围为 $-0.74\Phi\sim6.05\Phi$,平均为 2.72Φ 。整体上,天鹅湖的沉积物粒度明显粗于荣成湾。从平均粒径分布来看,整体上荣成湾沉积物粒度由岸边向外海逐渐变细,天鹅湖的沉积物粒度东西两侧粗、中间细,潮汐通道附近粒度最粗。

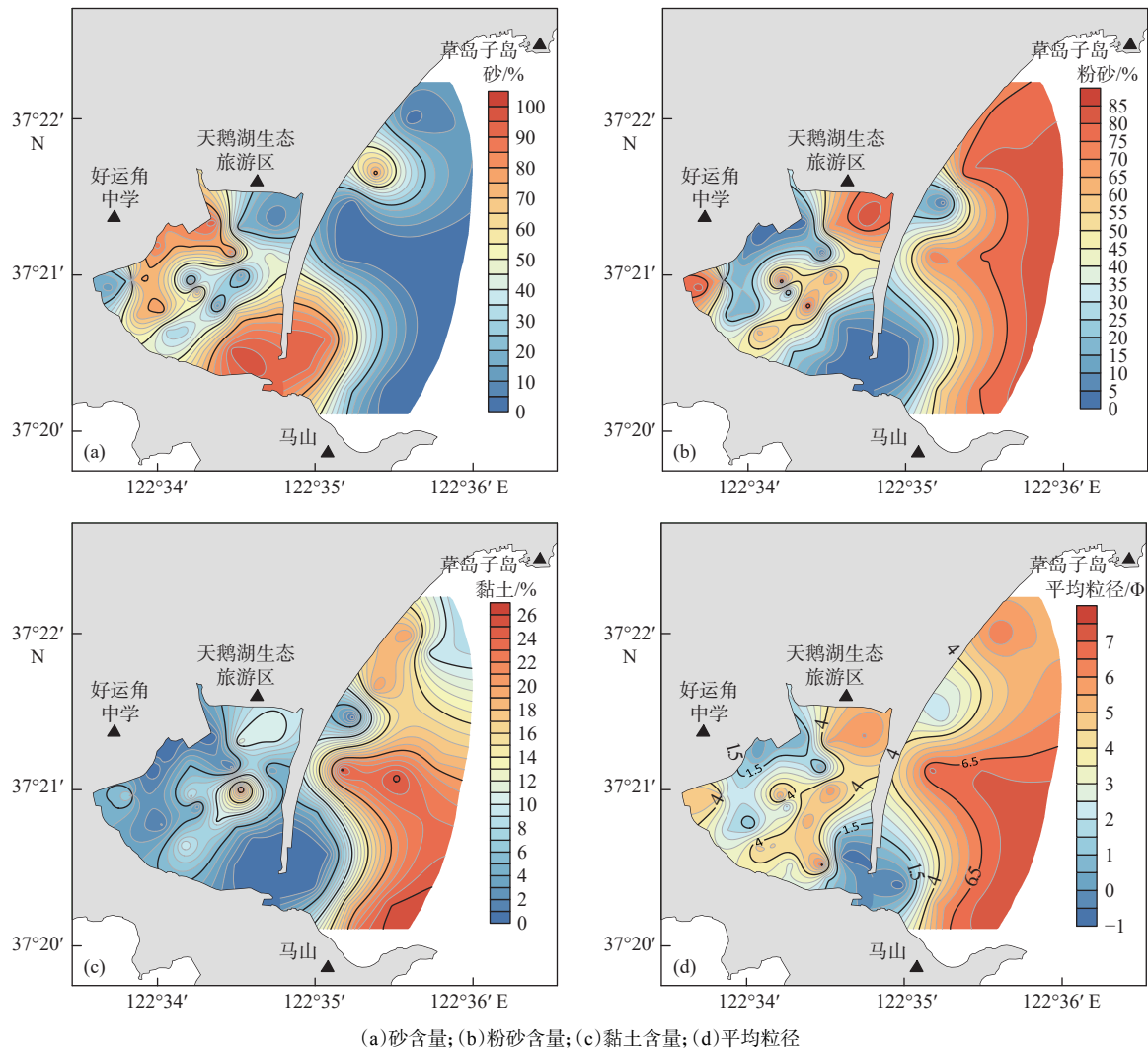


图 4 研究区粒度组成和平均粒径分布

Fig.4 Distribution of the grain size composition and average particle size in the study area

3.1.2 表层沉积物类型及分布特征

根据 Folk 沉积物分类法^[32], 研究区沉积物类型可以分为 7 类: 砾质砂(gS)、含砾砂((g)S)、砾质泥质砂(gmS)、砂(S)、粉砂质砂(zS)、砂质粉砂(sZ)

和粉砂(Z)(图 5)。

研究区表层沉积物类型分布如图 6 所示, 在潮汐通道口附近沉积物最粗, 沉积物类型主要为砾质砂、砂、砾质泥质砂以及粉砂质砂; 荣成湾内沉积物

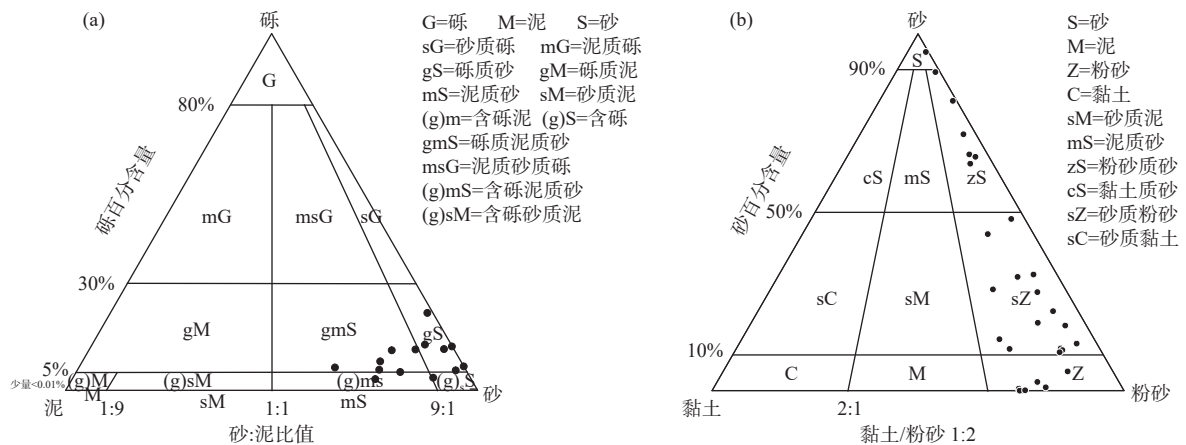


图 5 研究区表层沉积物含砾分类三角图 (a) 和无砾分类三角图 (b)

Fig.5 Triangular classification of surface sediments with(a) or without(b) gravels in the study area

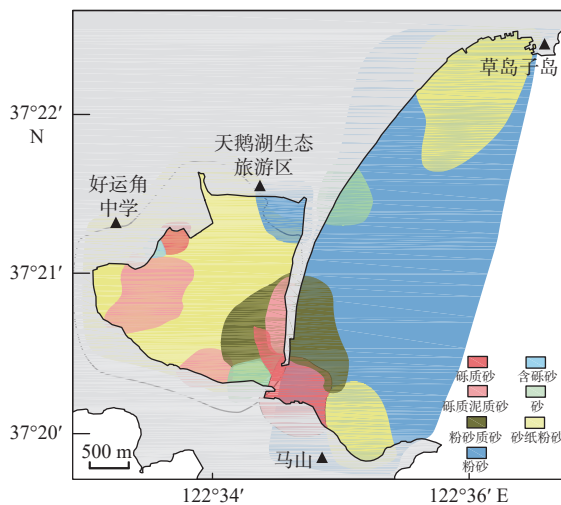


图6 研究区表层沉积物类型分布

Fig.6 Distribution of surface sediment types in the study area

粒度相对较细,粉砂分布最广,在海湾的南部和北部分布有砂质粉砂,沙坝北侧分布砂;天鹅湖沉积物粒度相对较粗,砂质粉砂分布最广,东北侧分布粉砂,西侧、西南侧分布砾质砂、含砾砂以及砾质泥质砂。

3.1.3 沉积环境分区

沉积物粒度受搬运方式、沉积环境等因素影响,反之环境特点也会表现在沉积物粒度参数中^[33-34]。粒度组成和参数可以作为水动力和沉积环境变化的综合指标,不同组成和参数可以反映不同的水动力和沉积环境特点,因此,对砂粒级、粉砂粒级、黏土粒级、平均粒径、分选系数、偏态、峰态 7 种粒度参数进行系统聚类分析,可以综合反映不同沉积环境的差异^[35]。通过聚类分析,本文共划分了 2 种沉积区(图 7)。

(1) I 类沉积区 主要特点为砂粒级的含量相对较高,沉积物类型主要包括砾质砂、砾质泥质砂、粉砂质砂、砂,粒度较粗。荣成湾主要分布在沙坝以及潮汐通道口附近,前人研究表明中荣成湾海滩沉积物粒度粗,形成细长的沿岸漂沙带,直到 5 m 等深线外才变成泥质沉积^[18],沙坝沿岸 I 类沉积区与沿岸输沙相关,潮汐通道口附近的 I 类沉积区主要是由于口门潮流流速较大,加之沿岸输沙影响,导致沉积物粒度较粗。潮流是荣成湾向潟湖搬运物质的主要动力,但潮流进入潟湖后,由于水流的扩散,沿着 NW 方向流速迅速减小。潟湖西侧沉积物来自于流域地面侵蚀^[36],导致西侧沿岸区域粒度较粗,形成 I 类沉积区。

(2) II 类沉积区 主要特点为粉砂、黏土粒级含量较高,沉积物类型主要为含砾砂、砂质粉砂,粒度较细。荣成湾 II 类沉积区主要分布于沿岸以

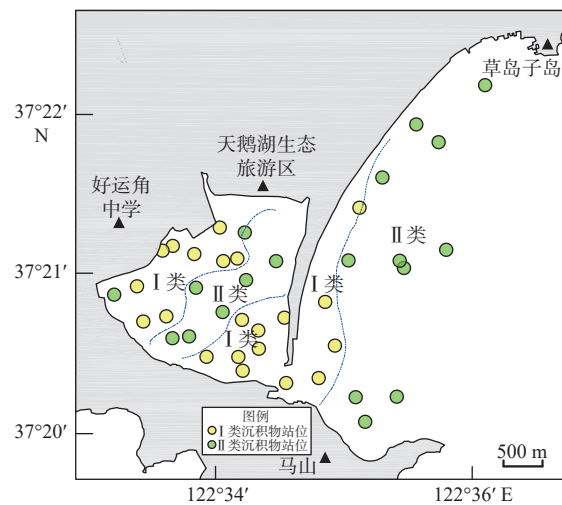


图7 研究区粒度参数系统聚类沉积环境分区

Fig.7 The grain size parameter system clustering and sedimentary environment zoning in the study area

外,荣成市周边海域主要为不规则半日潮,成山头及周边区域潮差较小,平均潮差约为 0.75 m,荣成湾整体水动力较弱^[19],沉积物粒度较细,II 类沉积区主要受潮流控制。天鹅湖 II 类沉积区分布于中部区域,潮汐通道口潮流较大,潮流进入潟湖后,由于流道变宽、水流扩散,沿着西北方向流速迅速减小,导致携带泥沙的能力下降,泥沙逐渐沉积下来^[18],使得潟湖中部区域粒度相对较细。

3.2 表层沉积物常量元素含量和分布特征

天鹅湖和荣成湾表层沉积物常量元素的含量见表 2。天鹅湖和荣成湾表层沉积物主要的化学组成物质均为 SiO_2 、 Al_2O_3 、 TFe_2O_3 、 MgO 、 K_2O 、 CaO 和 Na_2O ,含量大小有一定差异。天鹅湖平均含量大小顺序为 $\text{SiO}_2 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{K}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{O} > \text{TFe}_2\text{O}_3 > \text{CaO} > \text{MgO}$,荣成湾平均含量大小顺序为 $\text{SiO}_2 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{TFe}_2\text{O}_3 > \text{CaO} > \text{K}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{O} > \text{MgO}$ 。主要化学组成物质在天鹅湖的表层沉积物中的占比范围为 84.23%~98.48%,平均为 93.45%;在荣成湾表层沉积物中的占比范围为 87.20%~93.19%,平均为 90.03%。研究区内 SiO_2 和 Al_2O_3 含量占比较高,天鹅湖表层沉积物中 SiO_2 和 Al_2O_3 的平均含量占比分别为 75.74% 和 9.01%,荣成湾主表层沉积物中 SiO_2 、 Al_2O_3 的平均含量占比分别为 61.73% 和 12.44%,天鹅湖 SiO_2 含量较高,荣成湾的 Al_2O_3 含量较高。整体上,除 SiO_2 和 P_2O_5 外,荣成湾其他常量元素的平均含量均高于天鹅湖。

研究区常量元素分布如图 8 所示, SiO_2 在天鹅湖内潟湖内北侧和中部含量较低,整体上呈现由潟

表 2 研究区表层沉积物常量元素含量

Table 2 The content of major elements in surface sediments of the study area

元素	荣成湾		天鹅湖	
	范围	平均值	范围	平均值
SiO ₂	47.48~75.02	61.73	61.47~91.36	75.74
Al ₂ O ₃	7.00~16.43	12.44	4.58~14.13	9.01
TFe ₂ O ₃	1.40~7.77	4.62	0.36~5.33	2.20
MgO	0.36~3.41	2.10	0.02~2.44	0.79
MnO	0.022~0.091	0.061	0.005~0.070	0.023
TiO ₂	0.114~0.395	0.281	0.032~0.661	0.238
CaO	1.39~4.86	3.61	0.33~5.29	1.30
Na ₂ O	1.84~4.65	2.66	0.48~2.93	1.83
K ₂ O	2.24~3.17	2.88	1.72~3.26	2.57
P ₂ O ₅	0.024~0.066	0.053	0.008~0.237	0.055

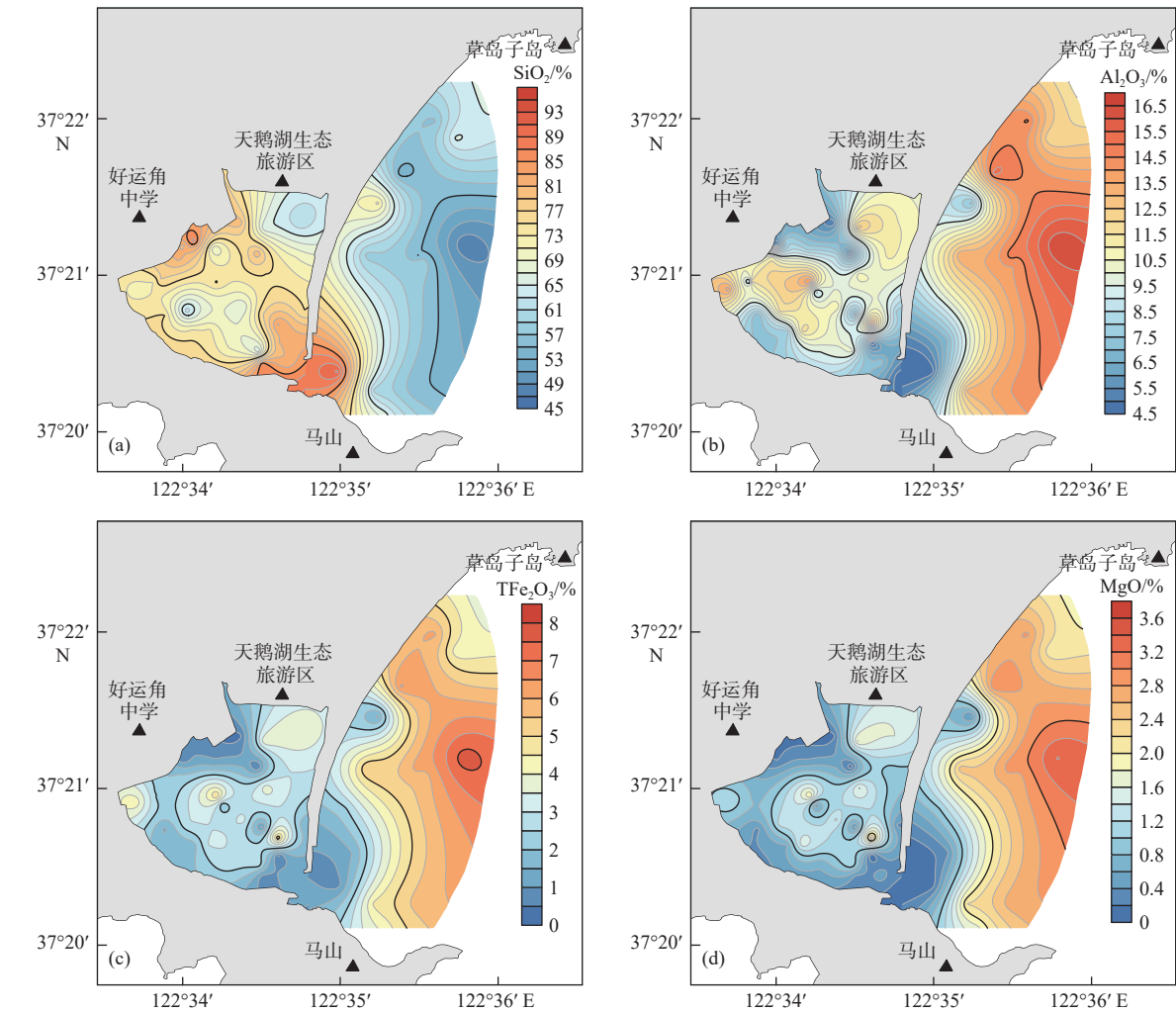
湖内向岸边逐渐减少的趋势,在荣成湾整体呈现由岸向外海逐渐减小的趋势,潮汐通道口附近含量最高。Al₂O₃、TFe₂O₃、MgO、MnO 含量在天鹅湖内整体呈现由潟湖中部向岸逐渐减小的趋势,荣成湾内呈现由岸向外海逐渐增大的趋势,潮汐通道口附

近含量最低,与平均粒径的分布相似;CaO、Na₂O 含量在潟湖内东北侧和南侧具有高值区,在荣成湾外呈现由岸向外海含量不断增大,荣成湾内 CaO、Na₂O 含量明显高于天鹅湖;天鹅湖 TiO₂ 和 P₂O₅ 相对于荣成湾较高,高值主要位于西侧以及中部地区,荣成湾内 P₂O₅ 含量随分布变化相对不大,TiO₂ 则呈现由岸向外海逐渐增加;K₂O 的分布与 Al₂O₃、TFe₂O₃、MgO、MnO 有一定的相似性,潮汐通道口附近区域均为低值,但 K₂O 在天鹅湖南侧也分布有高值区,并且在荣成湾内没有明显呈现由沿岸向外海逐渐增加的趋势,在岸边分布有高值区。

4 讨论

4.1 表层沉积物常量元素分布的主要影响因素

海洋沉积物常量元素的分布会受到多种因素的影响,包括物源、粒度、水动力等^[37]。本文主要利用相关性分析、水动力数值模拟等方法,结合前



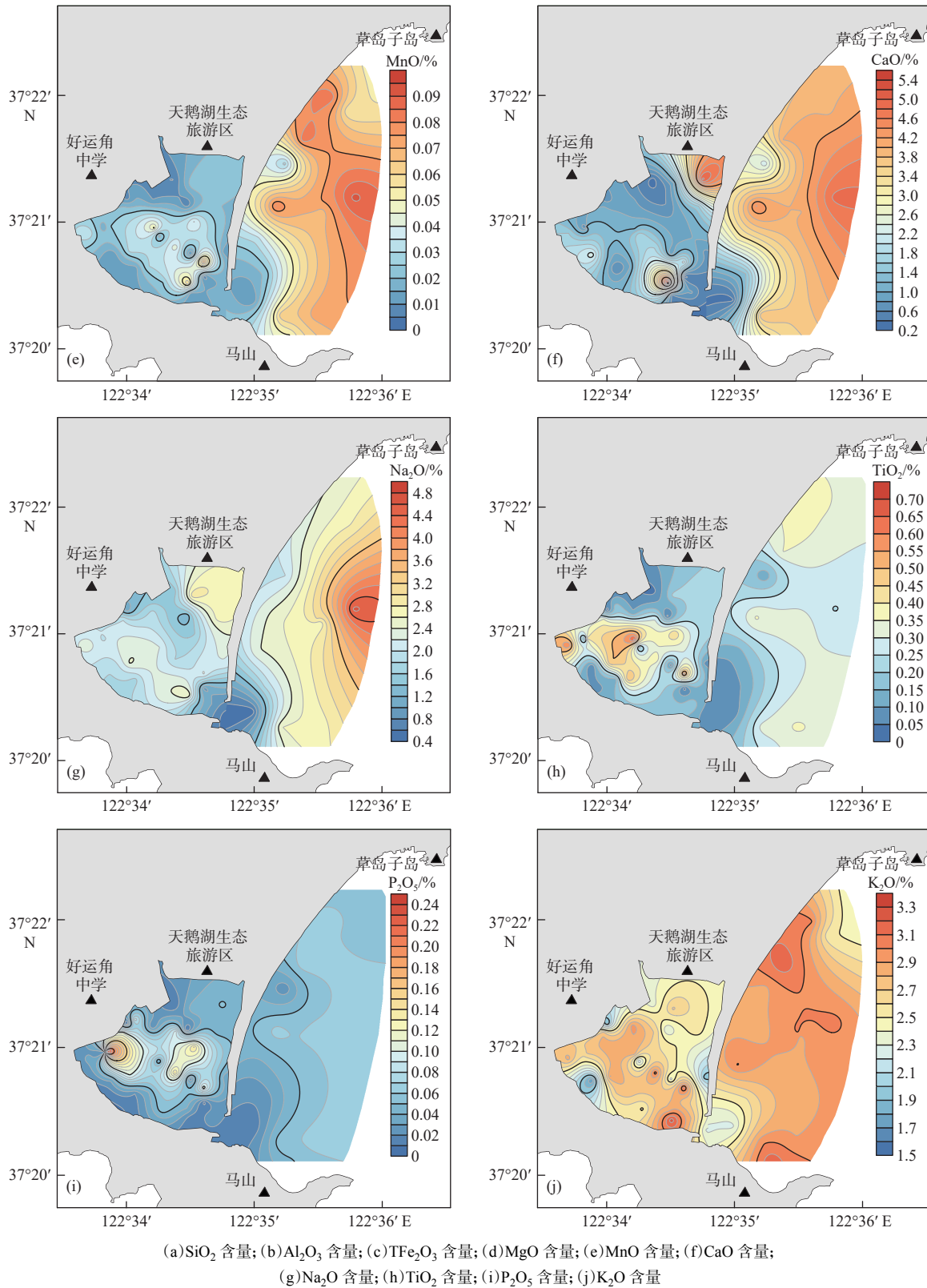


图 8 研究区常量元素等值线分布

Fig.8 Distribution of constant element contours in the study area

人的研究成果,从粒度、水动力、侵蚀物质 3 个方面分析研究区表层沉积物常量元素分布的主要影响因素。

4.1.1 粒度对研究区表层沉积物常量元素分布的影响

赵一阳和喻德科^[38]提出“元素粒度控制律”,

即大部分常量元素(Al、Fe、Mg、Ti、Li、等)会随着粒度由粗变细而含量逐渐增加,个别元素(Si 等)会由粗变细而含量逐渐减小。本文通过对砂粒级(S)、粉砂粒级(Z)、黏土粒级(C)、平均粒径(Φ)和常量元素进行相关性分析,分析沉积物粒度对天鹅湖和荣成湾表层沉积物常量元素的影响。

相关性分析结果显示(图 9、10),荣成湾和天鹅湖的砂粒级含量和 SiO_2 呈正相关,并且与其他大部分元素以及平均粒径均为负相关, SiO_2 主要赋存在石英和其他硅酸盐碎屑等粗颗粒的陆源碎屑中^[39],因此,随沉积物粒度变细, SiO_2 含量呈现减少的

趋势。除了 SiO_2 外,大部分的元素含量(Al_2O_3 、 TFe_2O_3 、 MgO 、 MnO 、 TiO_2 、 MgO 等)与平均粒径、粉砂和黏土均为相对较高的正相关,并且与黏土含量的相关性高于粉砂。前人研究表明, Al_2O_3 、 MgO 、 TiO_2 、 MnO 、 Fe_2O_3 等元素容易富集在细颗粒的黏土矿物中^[40],随着沉积物粒度变细,这些元素的含量呈现增加的趋势。荣成湾和天鹅湖表层沉积物中大部分元素(Al_2O_3 、 TFe_2O_3 、 MgO 、 MnO 、 TiO_2 、 MgO 等)与平均粒径具有相似的分布趋势,荣成湾内整体上都表现为由岸向外海元素含量增加的趋势;天鹅湖整体上来看从湖岸向湖内增加。

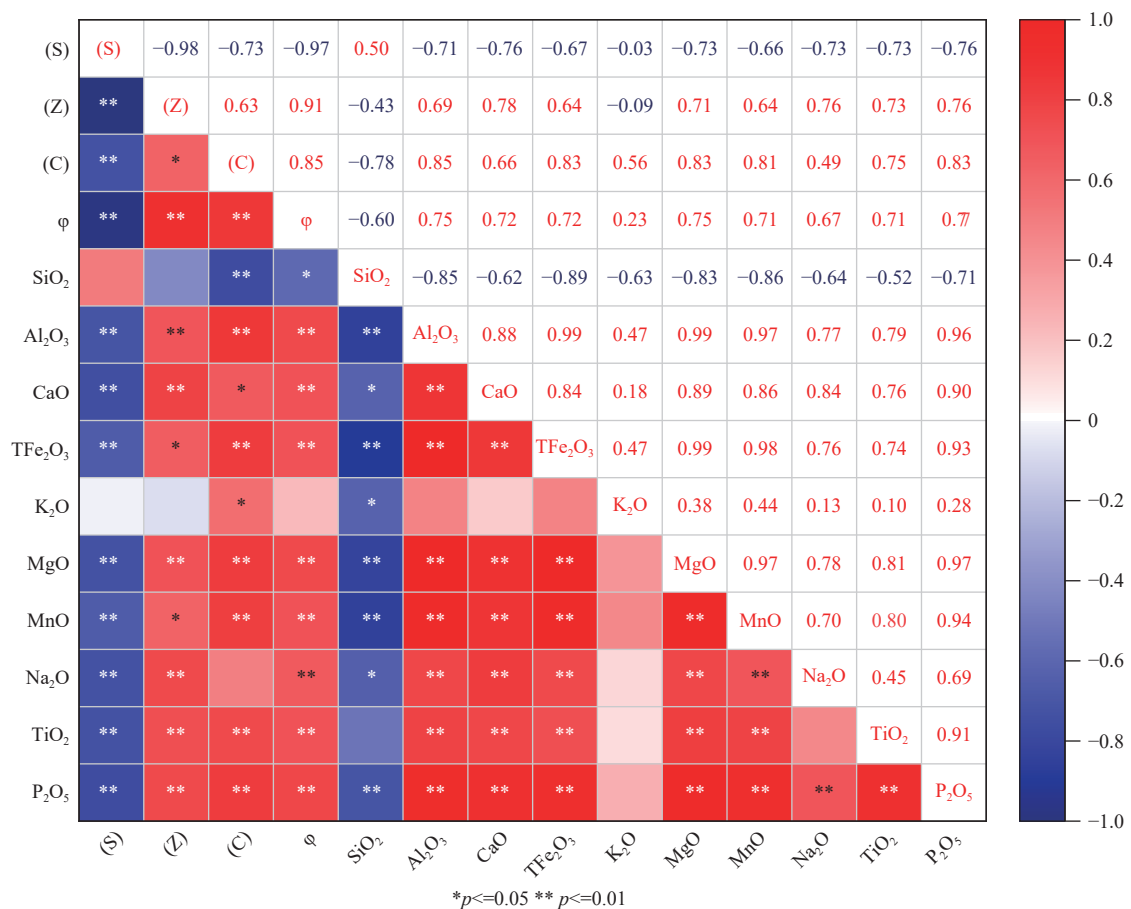


图 9 荣成湾平均粒径、砂粒级、粉砂粒级、黏土粒级与常量元素相关性结果

Fig.9 The correlations of the average particle size, sand particle size, silt particle size, and clay particle size to the major elements in Rongcheng Bay

荣成湾元素含量与黏土组分相关性较高,而天鹅湖元素与粉砂组分相关性较高。从沉积物组分含量上看,天鹅湖黏土粒级含量相对较少,平均含量仅为 5.49%,约是荣成湾黏土粒级平均含量的一半;从粉砂和黏土的比例上看,天鹅湖的粉砂粒级含量约为黏土粒级的 6.9 倍,而荣成湾的粉砂粒级含量约为黏土粒级的 5.6 倍,相对来说粉砂含量占

比高,这些因素可能是造成粉砂粒级相关性略高于天鹅湖常量元素黏土粒级的原因。

荣成湾的沉积物中部分元素的分布与平均粒径之间的相关性不显著($p > 0.05$),如 K_2O 。 K_2O 没有明显呈现由沿岸向外海逐渐增加的趋势,部分高值分布在岸边区域,与黏土粒级含量相关性(0.56)相对较高,说明 K_2O 的分布可能受某些矿物成分影

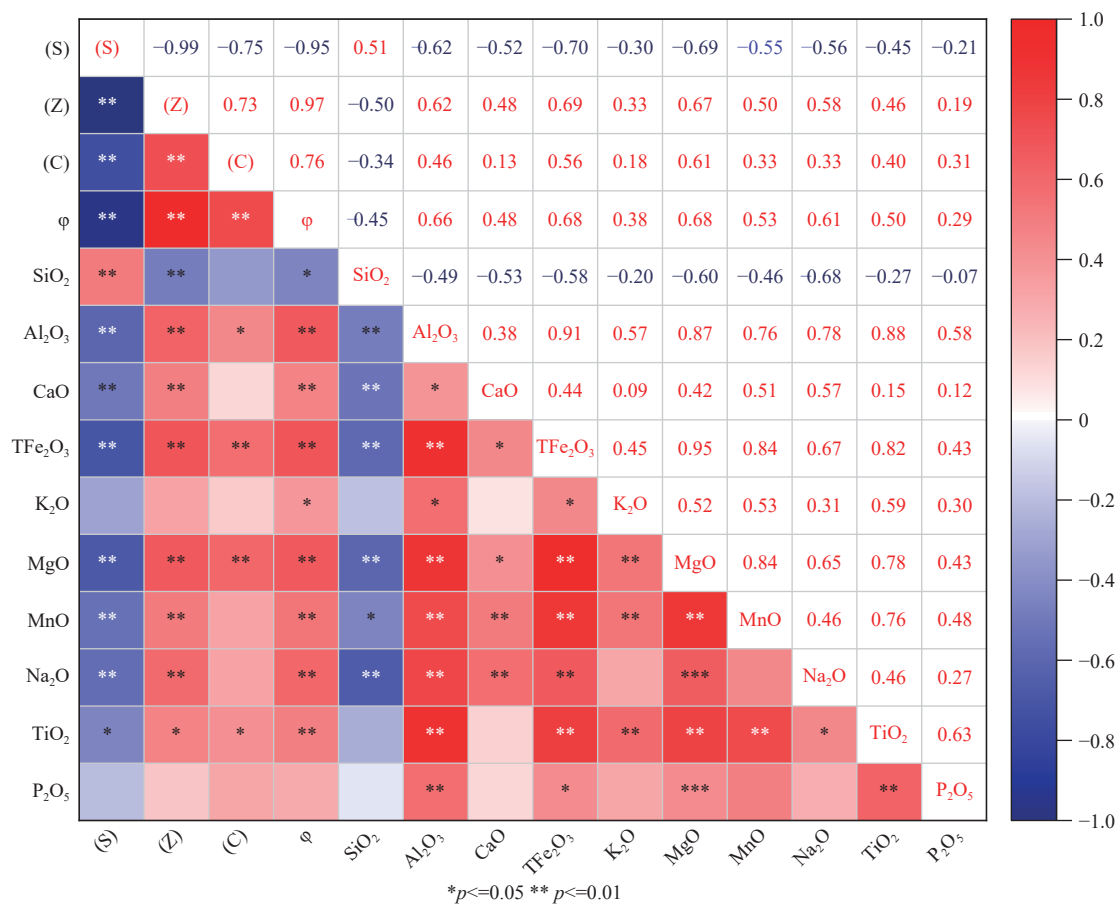


图 10 天鹅湖平均粒径、砂粒级、粉砂粒级、黏土粒级与常量元素相关性结果

Fig.10 The correlations of the average particle size, sand particle size, silt particle size, and clay particle size to the major elements in Swan Lake

响。天鹅湖同样有部分元素与平均粒径的相关性较小,如 K_2O 的 $p=0.38$,而 P_2O_5 与粒度相关性不显著($p>0.05$)。荣成湾物质会被涨潮流带入天鹅湖内^[36], K_2O 可能受到荣成湾泥沙的影响,与粒度相关性较低。西侧和北侧为大天鹅等禽鸟的栖息地和旅游度假区,也是入湖河流的主要分布区,受到外源污染,天鹅湖西侧和北侧沉积物磷含量较高^[21],本研究中天鹅湖 P_2O_5 的高值区位于西侧至中部地区,且高值含量明显高于荣成湾,其分布可能受人类活动等因素的影响。

4.1.2 潮流对研究区表层沉积物粒度及常量元素分布的影响

潮流数值模拟结果显示(图 11),潮流自外海进入荣成湾的过程中,流速逐渐减小,涨急时刻荣成湾大部分区域流速为 $0.20 \sim 0.30$ m/s,落急时刻荣成湾大部分区域流速为 $0.10 \sim 0.30$ m/s,整体上流速较小。沉积环境分区(图 7)也表明,荣成湾离岸深水区为沉积粒度相对较细的 II 类沉积区。研究区大部分常量元素与沉积物粒度具有较好的相关

性, Al_2O_3 、 MgO 、 TiO_2 、 MnO 、 Fe_2O_3 等元素容易富集在细颗粒的黏土矿物中^[40],因此,随着粒度变细元素的含量逐渐增加,使得 Al_2O_3 、 TFe_2O_3 、 MgO 等元素含量在此区域相对较高。

潮流场数值模拟结果显示,荣成湾岸边流速非常小,流速 <0.1 m/s,潮流不是影响近岸的主要水动力因素,但由于近岸水深较浅,受波浪作用影响显著,总体水动力条件相对较强,发育沙坝型沙滩。成山头至荣成湾存在明显的自北向南的沿岸输沙,荣成湾沿岸的海滩沉积物粒度粗,在海滩外形成细长的沿岸漂沙带,输沙量约为 1.5×10^5 m³/a,直到 5 m 等深线外才变成泥质沉积^[18,25,36],因此,荣成湾沙坝沿岸浅水区为粒度相对较粗的 I 类沉积区,而 SiO_2 主要赋存在石英和其他硅酸盐碎屑等粗颗粒的陆源碎屑中^[39],沉积物粒度较粗使得 SiO_2 在此区域的含量相对较高。

根据数值模拟结果,在潮流从荣成湾进入天鹅湖的过程中,由于受沙坝阻挡,流速在潮流通道口迅速增加,涨潮流最大流速 >0.5 m/s,落潮流最大

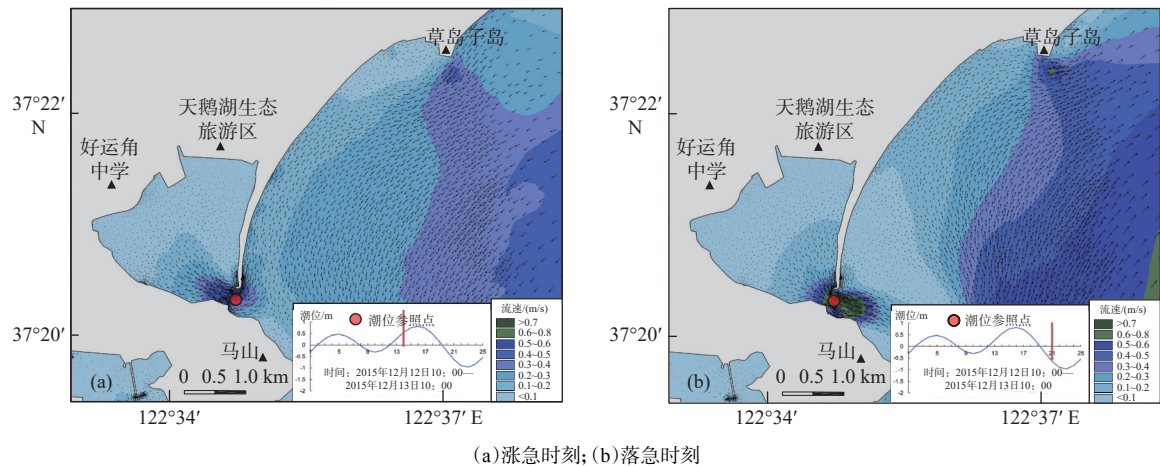


图 11 研究区潮流流速、流向

Fig.11 Tidal current velocity and flow direction in the study area

流速 >0.7 m/s。该区域潮流流速大, 水深较浅, 波浪作用强, 沉积物粒度整体较粗。潮流往复搬运的过程中, 涨潮时沿岸输沙搬运至此的粗粒物质随涨潮流运移至天鹅湖内并形成涨潮三角洲^[36], 落潮时粗粒物质随落潮流搬运至潮汐通道口外侧。由于细粒的沉积物在水动力较强的区域难以沉积, 因此, 口门附近区域形成粒度相对较粗的 I 类沉积区, 使得 SiO_2 在此区域的含量相对较高。

天鹅湖受沙坝的遮蔽作用, 湖内波浪作用很弱, 主要受潮流影响, 潮流进入天鹅湖后, 在沿着 NW 向流动的过程中, 流速迅速减小并很快下降至厘米级^[18], 数值模拟结果也可以看出潟湖内潮流流速基本 <0.1 m/s。沉积环境分区结果亦表明, 在远离口门区域为粒度相对较细的 II 类沉积区, 同样会使得该区域的 Al_2O_3 、 TFe_2O_3 、 MgO 等元素含量相对较高。天鹅湖西侧、西北侧以及西南侧水动力作用很弱, 不足以搬运粗颗粒物, 但沉积物粒度相对较粗, 说明可能受到不同物源的影响。

根据 Gao-Collins 粒径趋势分析法^[41], 绘制了研究区沉积物的运移趋势(图 12), 矢量方向代表沉积物的净运移方向, 长度表示粒径趋势的显著性, 不代表沉积物搬运率大小。结果显示, 荣成湾沉积物整体上呈现自北向南输运, 与涨潮流方向相似, 并受到自北向南的沿岸输沙; 天鹅湖沉积物南侧向中心输运, 趋势较显著, 北侧沉积物输运趋势相对不显著, 主要受到潮流影响。

4.1.3 侵蚀物质对表层沉积物常量元素分布的影响

(1) 海岸侵蚀物质

成山头至荣成湾海岸线曲折, 海蚀地貌发育, 成山头区域周围主要出露中生代岩浆入侵形成的

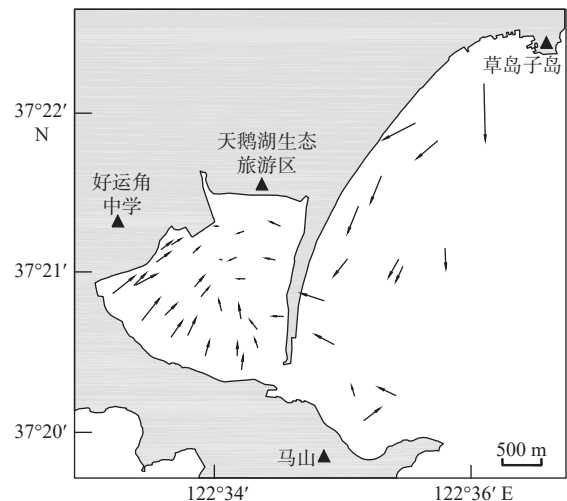


图 12 研究区表层沉积物运移趋势

Fig.12 Trend of surface sediment transport in the study area

黑云母花岗岩^[23-24], 而黑云母花岗岩含有富钾矿物如黑云母等^[42]。成山头区域波浪和潮流作用均较强, 潮流和波浪联合作用使得周围海岸的侵蚀物质会不断向荣成湾输运, 成为荣成湾泥沙的重要来源^[25]。

荣成湾表层沉积物的 K_2O 与粒度以及其他元素的相关性不显著 ($p>0.05$), 而天鹅湖 K_2O 与粒度相关性 (0.38) 较低, 与部分元素相关性不显著 ($p>0.05$), 说明荣成湾和天鹅湖 K_2O 的分布可能受到其他因素的影响。前人对挪威北部蒂斯峡湾表层沉积物元素研究中发现, K_2O 与其他元素相关性较差, 与蒂斯峡湾邻近的 2 个海湾存在差异, 蒂斯峡湾区域的基岩为富含黑云母和钾长石的片麻岩, 是钾元素的主要来源, 而物源富含钾可能是导致 K_2O 相关性与其他元素较差的原因^[43]。荣成湾

沿岸物质来自于成山头,并且其泥沙会被涨潮流带入天鹅湖内,在进入潟湖后流速会迅速减小沉积在天鹅湖内的涨潮三角洲附近区域^[36]。黑云母花岗岩中的黑云母、钾长石等矿物具有较高的钾含量^[42],这些含钾矿物沉积可能会使得荣成湾以及天鹅湖内涨潮三角洲区域附近的 K_2O 含量相对增加。

(2) 流域地面侵蚀物质

潮流数值模拟结果显示,天鹅湖西侧、西北侧以及西南侧近岸浅水区域水动力作用非常弱,前人研究也表明,潮流通过潮汐通道进入天鹅湖后,在沿着 NW 向流动的过程中,流速迅速减小并很快下降至厘米级^[18],沉积物较难被搬运至西侧这些区域。但从沉积物粒度来看,该区粒度较粗,平均粒径基本都 $< 2\Phi$,沉积环境分区也表明该区为沉积物粒度相对较粗的 I 类沉积区,为弱水动力区,说明可能受到其他物源的影响。前人研究表明,流域地面侵蚀是天鹅湖内主要物质来源之一,天鹅湖周边区域因而受到流域侵蚀,而入湖的河流主要分布在西侧和西北侧,导致地面泥沙通过河流进入到潟湖内部^[36],因此,潟湖周边的沉积物特征会受流域侵蚀物质的影响,导致潟湖西侧周边区域的沉积物粒度较粗。大部分常量元素(Al、Fe、Mg、Ti 等)会随着粒度由粗变细而含量逐渐增加,个别元素(Si 等)会随粒度由粗变细而含量逐渐减小^[38],因此,潟湖西侧区域粒度较粗的地区的 SiO_2 的含量较高,其他元素含量相对较低。

4.2 表层沉积物常量元素差异主要的影响因素

天鹅湖和荣成湾既相对独立又彼此联系,其沉积环境各具特色,影响常量元素分布的因素存在差异,因此,针对不同因素对天鹅湖内外的常量元素分布的影响因素差异进行进一步探讨。主成分分析已经被广泛应用于沉积物的常量元素分布影响因素和来源的识别^[44],分别对荣成湾和天鹅湖沉积物样品的常量元素含量进行主成分分析,以分析影响荣成湾和天鹅湖常量元素异同的因素。在荣成湾共提取了 2 种主成分,其 KMO 值为 0.68($p < 0.05$),累积贡献率达到 89.47%;在天鹅湖共提取 3 种主成分,其 KMO 值为 0.75($p < 0.05$),累积贡献率达到 84.86%(表 3),这些因子可以反映常量元素含有的绝大部分信息,符合进行主成分分析的要求^[45-47]。

4.2.1 荣成湾常量元素分布主要影响因素

荣成湾常量元素提取的主成分 F1 的方差贡

表 3 常量元素主成分分析结果

Table 3 Results of principal component analysis of constant elements

元素	荣成湾		元素	天鹅湖		
	F1	F2		F1	F2	F3
P_2O_5	0.97	0.12	TFe_2O_3	0.94	0.06	0.08
MgO	0.95	0.28	MgO	0.94	0.12	0.05
CaO	0.94	0.05	Al_2O_3	0.93	0.12	0.22
Al_2O_3	0.93	0.37	MnO	0.86	0.13	0.15
MnO	0.92	0.34	SiO_2	-0.84	0.29	0.30
TFe_2O_3	0.91	0.39	Na_2O	0.80	-0.32	-0.13
SiO_2	-0.89	-0.41	TiO_2	0.78	0.36	0.42
TiO_2	0.88	-0.11	CaO	0.60	-0.56	-0.22
Na_2O	0.66	0.22	K_2O	0.54	0.71	-0.09
K_2O	0.13	0.96	P_2O_5	0.45	0.02	0.83
方差贡献率/%	72.95	16.52	方差贡献率/%	35.81	27.02	22.03
累积贡献率/%	72.95	89.47	累积贡献率/%	35.81	62.83	84.86

献率占到 72.95%,其中, P_2O_5 、MgO、CaO、 Al_2O_3 、MnO、 TFe_2O_3 、 TiO_2 都表现出较高的正载荷, Na_2O 的正载荷相对较低,而 SiO_2 则表现出较高的负载荷。荣成湾粒度主要受潮流影响,沉积物粒度相对较细。相关性分析可知,荣成湾表层沉积物的 P_2O_5 、MgO、CaO、 Al_2O_3 、MnO、 TFe_2O_3 、 TiO_2 和 Na_2O 等元素含量与平均粒径以及粉砂或黏土粒径具有较高的相关性,与 SiO_2 以及砂粒级具有较高的负相关性。前人研究表明, Al_2O_3 、MgO、 TiO_2 、MnO、 Fe_2O_3 等元素容易富集在细颗粒的黏土矿物中^[40],因此,这些正载荷表现出的是细颗粒沉积物对元素分布的影响,受粒度影响明显。 SiO_2 主要赋存在石英和其他硅酸盐碎屑等粗颗粒的陆源碎屑中^[39], SiO_2 的高负载荷说明表现出的细粒沉积物中的亏损,同样受粒度影响明显。主成分 F1 中高载荷的元素与粒度具有非常明显的相关性,反映出粒度变化对元素含量的影响,因此, F1 可以解释粒度对元素分布的影响。

荣成湾常量元素提取的主成分 F2 的方差贡献率占到 16.52%,其中, K_2O 具有高的正载荷,其与粒度相关性不显著($p > 0.05$)。根据前人研究,成山头至荣成湾海岸线曲折,海蚀地貌发育,区域周围主要是出露中生代岩浆入侵形成的中粗粒黑云母花岗岩^[23-24],成山头的海岸侵蚀物质为荣成湾提供了丰富的物质来源^[25,36],成山头的黑云母花岗岩在风化侵蚀过程后,物质随潮流向荣成湾一带输运并且沉积下来。黑云母花岗岩中的黑云母、钾长石等矿

物具有较高的钾含量^[42],这些含钾矿物可能使得荣成湾表层沉积物 K_2O 含量增加,因此, K_2O 与其他常量元素呈现出不同的分布趋势。F2 可能指示成山头陆源侵蚀物质对元素分布的影响。

4.2.2 天鹅湖常量元素分布主要影响因素

天鹅湖常量元素提取的主成分 F1 的方差贡献率占到 35.81%。其中, TFe_2O_3 、 MgO 、 Al_2O_3 、 MnO 、 Na_2O 等都表现为较高的正载荷, SiO_2 表现为较高的负载荷。相关性分析可知,天鹅湖内的 TFe_2O_3 、 MgO 、 Al_2O_3 、 MnO 、 Na_2O 等与粒度的相关性都较高,与荣成湾类似,这些元素主要富集在细颗粒的黏土矿物中,表现为细颗粒沉积物对元素分布的影响。 SiO_2 的负载荷也与荣成湾类似,主要是因为 SiO_2 在细粒沉积物中的亏损。因此,天鹅湖主成分 F1 与荣成湾的类似,但贡献率明显低于荣成湾 F1 (72.95%),说明粒度对天鹅湖元素分布影响相对较小。天鹅湖 F1 中高载荷元素受粒度影响含量变化明显,可以解释为粒度对元素分布的影响。

天鹅湖常量元素提取的主成分 F2 的方差贡献率占到 27.02%,其中, K_2O 为高的正载荷,与粒度相关性(0.38)较低,与荣成湾不同, K_2O 的分布还是有受到粒度的影响。荣成湾内沉积的成山头侵蚀物质可以通过涨潮流带入天鹅湖内,成为天鹅湖的物质来源之一^[36],由图 8j 可以看出, K_2O 的等值线分布与 TFe_2O_3 、 MgO 、 Al_2O_3 、 MnO 等不同。天鹅湖内的 K_2O 的分布同样可能受到富钾的成山头侵蚀物质影响,这些侵蚀物质随涨潮流通过潮汐通道被带入潟湖,随潮流减弱后沉积潟湖内涨潮三角洲附近区域,影响了天鹅湖内 K_2O 的分布。因此, F2 可以解释为随涨潮带入天鹅湖的成山头侵蚀物质对元素分布的影响。

天鹅湖常量元素提取的主成分 F3(22.03%)中, P_2O_5 具有最高正载荷。研究区内 P_2O_5 的高值(0.237)明显高于荣成湾(0.066)。通过相关性分析可以看出, P_2O_5 与粒度之间的相关性不显著($p>0.05$),天鹅湖的西侧和北侧为大天鹅等禽鸟的栖息地和旅游度假区,入湖河流的主要分布区,受到外源污染,前人研究中天鹅湖西侧和北侧沉积物磷含量较高^[21],因此,本研究区中天鹅湖 P_2O_5 的分布可能受西侧人类活动带入污染的影响。而磷元素是海草需要的营养物质,海草对其富集有一定影响^[48],在外源污染进入海草范围内时,其中的 P_2O_5 可能会被蓄积在海草床内,导致 P_2O_5 在西侧至中部含量相对较高,没有随潮流进入荣成湾。F3 可以解释为

人类活动和海草床共同作用对元素分布的影响。

5 结论

(1)荣成湾和天鹅湖粒度差异明显,荣成湾沉积物粒度较细,粉砂粒级的含量最高;天鹅湖沉积物粒度较粗,砂粒级的含量最高。整体上,荣成湾沉积物粒度由岸边向外海逐渐变细,天鹅湖的沉积物粒度东西两侧粗、中间细,潮汐通道附近粒度最粗。

(2)天鹅湖表层沉积物中 SiO_2 和 P_2O_5 含量高于荣成湾,其他常量元素含量均低于荣成湾;大部分常量元素含量在荣成湾呈现从岸边向外海增加的趋势,在天鹅湖呈现由湖岸向湖内增加的趋势。

(3)研究区表层沉积物常量元素分布主要受粒度影响,水动力作用是改变沉积物粒度空间分布并影响元素组分分布的主要因素。荣成湾和天鹅湖大部分潮流较弱的区域沉积物粒度较细,沉积物中 Al_2O_3 、 TFe_2O_3 、 MgO 等元素的含量相对较高;潮汐通道附近潮流较强,沉积物粒度较粗, SiO_2 含量较高。

(4)荣成湾与天鹅湖常量元素分布的影响因素差异明显。粒度对荣成湾常量元素的影响明显高于天鹅湖;天鹅湖 K_2O 的分布主要受陆源侵蚀物质和粒度的共同影响,而荣成湾 K_2O 的分布主要受陆源侵蚀物质的影响;天鹅湖 P_2O_5 的分布主要受人类活动和海草床共同影响,而荣成湾 P_2O_5 的分布主要受粒度影响。

参考文献:

- [1] 赵一阳. 中国海大陆架沉积物的调查研究 [J]. 海洋科学, 1979(S1): 49-50.
ZHAO Y Y. Investigation on the sediments of the continental shelf of China Sea [J]. Marine Sciences, 1979(S1): 49-50.
- [2] 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): 93-120.
- [3] 崔振昂, 甘华阳, 刘文涛, 等. 北部湾东部海域表层沉积物常量元素地球化学特征及其物源指示意义 [J]. 物探化探计算技术, 2015, 37(4): 522-531.
CUI Z A, GAN H Y, LIU W T, et al. Geochemical characteristics of major elements and provenance indication of surface sediments in the eastern Beibu Gulf [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 37(4): 522-531.
- [4] 安郁辉, 刘健, 张军强, 等. 淮河与长江和黄河沉积物的物源识别指标比较研究 [J]. 第四纪研究, 2020, 40(3): 837-850.

- AN Y H, LIU J, ZHANG J Q, et al. Comparative study on provenance identification indexes of sediments in Huaihe River, Yangtze River and Yellow River[J]. *Quaternary Sciences*, 2020, 40(3): 837-850.
- [5] CONSANI S, CUTRONEO L, CARBONE C, et al. Baseline of distribution and origin of rare earth elements in marine sediment of the coastal area of the eastern Gulf of Tigullio (Ligurian Sea, North-West Italy)[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, 155(15): 111145.
- [6] DUCK R W, DA SILVA J F. Coastal lagoons and their evolution: a hydromorphological perspective[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2012, 110: 2-14.
- [7] AVRAMIDIS P, ILIOPOULOS G, PANAGIOTARAS D, et al. Tracking Mid to Late Holocene depositional environments by applying sedimentological, palaeontological and geochemical proxies, Amvrakikos coastal lagoon sediments, Western Greece, Mediterranean Sea[J]. *Quaternary International*, 2014, 332: 19-36.
- [8] BAS-SILVESTRE M, QUINTANA X D, COMPTE J, et al. Ecosystem metabolism dynamics and environmental drivers in Mediterranean confined coastal lagoons[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2020, 245: 106989.
- [9] 魏合龙, 庄振业. 山东荣成湾月湖地区的潟湖-潮汐汊道体系[J]. *湖泊科学*, 2015, 9(2): 135-140.
- WEI H L, ZHUANG Z Y. Study on the evolution of Yuehu lake-tidal inlet system, Rongcheng Bay, Shandong Province[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, 9(2): 135-140.
- [10] KUHLMANN J, ASIOLI A, TRINCARDI F, et al. Sedimentary response to Milankovitch-type climatic oscillations and formation of sediment undulations: evidence from a shallow-shelf setting at Gela Basin on the Sicilian continental margin[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2015, 108: 76-94.
- [11] BIRD E C F. *Coastal Geomorphology: An Introduction*[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2008.
- [12] TAKYI R, EL MAHRAD B, NUNOO F K E, et al. Adaptive management of environmental challenges in West African coastal lagoons[J]. *Science of The Total Environment*, 2022, 838: 156234.
- [13] 庄振业. 泻湖沉积环境: 山东半岛为例[J]. *青岛海洋大学学报*, 1993, 23(1): 52-60.
- ZHUANG Z Y. Sedimentary environment of coastal lagoons: take the Shandong Peninsula as an example[J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*. 1993, 23(1): 52-60.
- [14] 吴瑞. 海南岛潟湖环境现状及治理对策[J]. *热带农业工程*, 2020, 44(3): 99-101.
- WU R. Current status and controlling strategies of lagoon environment in Hainan Island[J]. *Tropical Agricultural Engineering*, 2020, 44(3): 99-101.
- [15] ULUTURHAN E, KONTAS A, CAN E. Sediment concentrations of heavy metals in the Homa Lagoon (Eastern Aegean Sea): assessment of contamination and ecological risks[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, 62(9): 1989-1997.
- [16] MAANAN M, SADDIK M, MAANAN M, et al. Environmental and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Nador Lagoon, Morocco[J]. *Ecological Indicators*, 2015, 48: 616-626.
- [17] HUANG L L, PU X M, PAN J F, et al. Heavy metal pollution status in surface sediments of Swan Lake lagoon and Rongcheng Bay in the northern Yellow Sea[J]. *Chemosphere*, 2013, 93(9): 1957-1964.
- [18] 薛允传. 山东半岛月湖潮汐汊道沉积物输运与堆积[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2000.
- XUE Y C. Sediment transport and accumulation in the tidal inlet of the Moon Lake in Shandong Peninsula[D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2000.
- [19] 贾建军. 小型潮汐汊道系统的沉积动力过程与演化[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2001.
- JIA J J. Sedimentary dynamic process and evolution of small tidal inlet system[D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2001.
- [20] 孙阳. 近 50 年来天鹅湖沙坝海岸地貌演变[J]. *鲁东大学学报 (自然科学版)*, 2021, 37(4): 366-373.
- SUN Y. Coastal geomorphic evolution of Swan Lake barrier during the past 50 years[J]. *Ludong University Journal (Natural Science Edition)*, 2021, 37(4): 366-373.
- [21] 宋鹏鹏, 侯金枝, 高丽, 等. 荣成天鹅湖沉积物磷的赋存形态和时空分布特征[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(3): 98-102.
- SONG P P, HOU J Z, GAO L, et al. Phosphorus fractions and temporal-spatial distribution characteristics in sediments from Rongcheng Swan Lake[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(3): 98-102.
- [22] 张彦浩, 王喜涛, 路加, 等. 荣成天鹅湖鳗草海草床及邻近裸沙区关键环境因子的时空变化特征[J]. *海洋环境科学*, 2022, 41(2): 253-259.
- ZHANG Y H, WANG X T, LU J, et al. The temporal and spatial variation characteristics of key environmental factors in *Zostera* marine bed and bare sand areas in Swan Lake, Rongcheng[J]. *Marine Environmental Science*, 2022, 41(2): 253-259.
- [23] 吴锦秀, 刘仲衡, 陈洪亮, 等. 山东半岛荣成湾海岸泻湖沉积环境的初步分析[J]. *海洋湖沼通报*, 1986, 2: 19-24.
- WU J X, LIU Z H, CHEN H L, et al. Preliminary analysis of coastal lagoonal sediment environment of Rongcheng Bay of Shandong Peninsula[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 1986, 2: 19-24.
- [24] 李从先, 陈刚, 高曼娜, 等. 山东荣成成山角至石岛海岸地貌和沉积特征[J]. *海洋与湖沼*, 1987, 18(2): 162-172.
- LI C X, CHEN G, GAO M N, et al. Geomorphology and sedimentation in coastal zones from Chengshanjiao to Shidao, Rongcheng, Shandong Province[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1987, 18(2): 162-172.
- [25] 王永红, 庄振业, 李学伦. 山东荣成湾沿岸输沙率及沙嘴的演化动态[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2000, 20(4): 31-35.
- WANG Y H, ZHUANG Z Y, LI X L. The calculation of along-

- shore silt discharge rates and evolution development of sandspit in the Rongcheng Bay, Shandong Peninsult[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2000, 20(4): 31-35.
- [26] 谢琳萍, 蒲新明, 孙霞, 等. 荣成湾营养盐的时空分布特征及其影响因素分析[J]. *海洋通报*, 2013, 32(1): 19-27.
- XIE L P, PU X M, SUN X, et al. Analysis on the temporal and spatial distribution of nutrients and the influence factor in Rongcheng Bay[J]. *Marine Science Bulletin*, 2013, 32(1): 19-27.
- [27] 高丽, 宋鹏鹏, 史衍玺, 等. 荣成天鹅湖沉积物中重金属的分布特征研究[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(11): 2192-2197.
- GAO L, SONG P P, SHI Y X, et al. Distribution characteristics of heavy metals insurfer sediment of Rongcheng Swan Lake, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(11): 2192-2197.
- [28] 余建奎, 任宗海, 战超, 等. 山东荣成天鹅湖沙坝水下岸坡地貌冲淤演变分析[J]. *热带海洋学报*, 2022, 41(4): 61-70.
- YU J K, REN Z H, ZHAN C, et al. Erosion-depositionanalys is of underwear slope on lagoon and sand barriers in the Swan Lake, Rongcheng, Shandong Province[J]. *Journal of Tropica-Iceanography*, 2022, 41(4): 61-70.
- [29] 任宗海, 余建奎, 战超, 等. 荣成湾典型沙坝-潟湖海岸地貌演变研究[J]. *海洋通报*. 2023, 42(3): 290-302.
- REN Z H, YU J K, ZHAN C, et al. Research on the coastal geomorphic evolution of the typical barrier-lagoon system in the Rongcheng Bay[J]. *Marine Science Bulletin*. 2023, 42(3): 290-302.
- [30] 严立文. 浅海区海带养殖的沉积环境效应及动力机制[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2008.
- YAN L W. Sedimentary environment effect and dynamic mechanism of kelp aquaculture in shallow sea area[D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2008.
- [31] 蓝先洪, 张志珣, 李日辉, 等. 南黄海沉积物不同粒度分析结果的对比研究[J]. *海洋地质动态*, 2006, 22(10): 5-7.
- LAN X H, ZHANG Z X, LI R H, et al. Comparative study on the results of different grain size analysis of sediments in the South Yellow Sea[J]. *Marine Geology Letters*, 2006, 22(10): 5-7.
- [32] 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 & Geophysics*, 1970, 13(4): 937-968.
- [33] 窦衍光. 长江口邻近海域沉积物粒度和元素地球化学特征及其对沉积环境的指示[D]. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所, 2007.
- DOU Y G. Grain size and element geochemical characteristics of sediments in the adjacent waters of the Yangtze Estuary and their implications for sedimentary environment[D]. Qingdao: The First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, 2007.
- [34] 胡荣梅. 升金湖沉积物微量元素分布特征及其环境指示意义[D]. 合肥: 安徽大学, 2021.
- HU R M. Distribution characteristics of trace elements in sediments of Shengjin Lake and its environmental significance[D]. Hefei: Anhui University, 2021.
- [35] 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.
- Zhuang H H, XU S H, GAO M S, Grain size distribution of surface sediments in Jiaozhou Bay and its environmental significance[J]. *Marine Geological Frontiers*, 2018, 34(9): 24-31.
- [36] 贾建军, 高抒, 薛允传, 等. 山东荣成月湖潮汐汉道系统的沉积物平衡问题: 兼论人类活动的影响[J]. *地理科学*, 2004, 24(1): 83-88.
- JIA J J, GAO S, XUE Y C, et al. Sediment budget of Yuehu Lagoon andimplications for human activities, Shandong Peninsula, China[J]. *Scientia Geographical Sinica*, 2004, 24(1): 83-88.
- [37] 王海根, 王庆同, 杨鹏, 等. 庙岛群岛西部海域表层沉积物常量和稀土元素的分布特征及其物源指示意义[J]. *海洋通报*, 2023, 42(6): 695-706.
- WANG H G, WANG Q T, YANG P, et al. Distribution features of major elements and rare earth elements of the surface sediment in the western Miaodao archipelago and their provenance implications[J]. *Marine Science Bulletin*, 2023, 42(6): 695-706.
- [38] 赵一阳, 喻德科. 黄海沉积物地球化学分析[J]. *海洋与湖沼*. 1983, 14(5): 432-446.
- ZHAO Y Y, YU D K. Geochemical analysis of the sediments of the Huanghai Sea[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1983, 14(5): 432-446.
- [39] 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.
- LIU G H, LI J, CHEN D H, et al. Geochemical of surface sediments in the Taixinan (southwestern Taiwan) Sea area in the northeastern South China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2006, 26(5): 61-68.
- [40] KUMAR A, SINGHAL R K, ROUT S, et al. Spatial geochemical variation of major and trace elements in the marine sediments of Mumbai Harbor Bay[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 70(7): 3057-3066.
- [41] GAO S, COLLINS M. Net sediment transport patterns inferred from grain-size trends, based upon definition of "transport vectors"[J]. *Sedimentary Geology*, 1994, 90(1/2): 47-60.
- [42] 马英军, 刘丛强. 化学风化作用中的微量元素地球化学: 以江西龙南黑云母花岗岩风化壳为例[J]. *科学通报*, 1999, 44(22): 2433-2437.
- MA Y J, LIU C Q. Geochemistry of trace elements in chemical weathering: taking the weathering crust of biotite granite in Longnan, Jiangxi Province as an example[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(22): 2433-2437.
- [43] FAUST J C, SCHEIBER T, FABIAN K, et al. Geochemical characterisation of northern Norwegian fjord surface sediments: a baseline for further paleo-environmental investigations[J]. *Continental Shelf Research*, 2017, 148: 104-115.
- [44] ASHAYERI N Y, KESHAVARZI B. Geochemical characteristics, partitioning, quantitative source apportionment, and ecologi-

- gical and health risk of heavy metals in sediments and water: a case study in Shadegan Wetland, Iran[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, 149: 110495.
- [45] MA L, YANG Z G, LI L, et al. Source identification and risk assessment of heavy metal contaminations in urban soils of Changsha, a mine-impacted city in Southern China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(17): 17058-17066.
- [46] LEUNG H M, CHEUNG K C, AU C K, et al. An assessment of heavy metal contamination in the marine soil/sediment of Coles Bay area, Svalbard, and Greater Bay area, China: a baseline survey from a rapidly developing bay[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28: 22170-22178.
- [47] MISHRA S, KUMAR A, YADAV S, et al. Assessment of heavy metal contamination in water of Kali River using principle component and cluster analysis, India[J]. *Sustainable Water Resources Management*, 2018, 4: 573-581.
- [48] 刘伟妍, 韩秋影, 唐玉琴, 等. 营养盐富集和全球温度升高对海草的影响[J]. *生态学杂志*, 2017, 36(4): 1087-1096.
- LIU W Y, HAN Q Y, TANG Y Q, et al. Review of nutrient enrichment and global warming effect on seagrasses[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36(4): 1087-1096.

Differences in the distribution of constant element content in surface sediments inside and outside Rongcheng Swan Lake and their influencing factors

LIN Wei¹, LI Feng^{2*}, ZHANG Xiaoju³, SUN Feifei¹, ZHU Longhai^{1,4}, HU Rijun^{1,4}

(1 College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2 Yantai Marine Environmental Monitoring & Forecasting, Yantai 264003, China; 3 Beihai Survey Center of the Ministry of Natural Resources, Qingdao 266100, China; 4 Key Laboratory of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: In September 2020 and September 2023, surface sediment samples from sediments were sampled at 44 stations inside and outside the using a clam sampler in Swan Lake in and Rongcheng Bay, Shandong Peninsula, East China, and the sample particle size and major elements were tested. Based on the test results, the plane distribution characteristics and differences of grain size and major elements inside and outside the lagoon were analyzed. Combined with correlation analysis, hydrodynamic numerical simulation, cluster analysis, principal component analysis and other methods, the main control factors of the distribution of major elements were explored. Results show that the sediment components of Swan Lake are mainly sand, and the sediment components of Rongcheng Bay are mainly silt. The grain size of Swan Lake sediment is obviously coarser than that of Rongcheng Bay. The average contents of SiO₂ and P₂O₅ in the sediments of Swan Lake (75.74% and 0.055%) were higher than those in Rongcheng Bay (61.73% and 0.053%), and the contents of major elements such as Al₂O₃, TFe₂O₃ and MgO were lower than those in Rongcheng Bay. Overall, the distribution of SiO₂ is opposite to the distribution trend of average particle size, and the distribution of most other major elements was similar to the distribution of average particle size. The contents of most major elements in Rongcheng Bay increased gradually from the shore to the open sea, and those in Swan Lake increased gradually from the shore to the lake. Particle size was the main factor affecting the distribution of most major elements (SiO₂, Al₂O₃, TFe₂O₃, MgO, and so on) in the two lakes, and its impact on Rongcheng Bay was significantly higher than that on Swan Lake. The distribution of K₂O in the sediments of Swan Lake was affected by the erosion materials and their grain size from Chengshantou coast, and that in Rongcheng Bay was mainly affected by erosion materials. The distribution of P₂O₅ in the sediments of Swan Lake was mainly affected by human activities and seagrass beds, while that in Rongcheng Bay was mainly affected by grain size.

Key words: Rongcheng Bay; Swan Lake; surface sediments; geochemical characteristics; influencing factors