

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.

闽北近岸海域表层沉积物的风化特征及物源指示

宁 泽^{1,2}, 张 勇^{1,2*}, 林学辉^{1,2}, 毕世普^{1,2}, 胡 刚^{1,2}, 孔祥淮^{1,2}

(1 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266071;

2 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266071)

摘 要:通过对闽北近岸海域的 229 个表层沉积物样品和周边河流的 54 个表层沉积物样品进行粒度和常量元素测试, 分析了研究区常量元素分布及粒度控制效应, 并运用成分变异指数 (ICV) 和化学蚀变指数 (CIA) 2 种风化指标, 结合 (A-CN-K)-(A-CN-K-FM) 三角图, 探讨了其风化特征及物源指示。研究表明, 闽北近岸海域从岸向海表层沉积物粒径变粗, 底质类型表现为明显的条带状, 依次为泥-粉砂-砂质粉砂-砂。分析认为, 形成这种条带状的主要原因是其物源及动力机制的不同, 近岸主要为长江及周边河流物质输送, 分布在 50 m 水深以浅, 而在 70 m 以深的粗砂主要为残留沉积, 50~70 m 表现为过渡类型。风化程度研究表明, 在空间分布上, 从岸向海化学风化程度逐渐增强, 70 m 以深的异常区是以石英为主的残留沉积, 抗风化能力强, 黏土矿物含量低, 表现为弱化学风化程度。长江、瓯江、闽江沉积物的风化程度表现为随着地理纬度的降低而增强, 气候效应明显, 研究区与长江沉积物风化趋势更为接近, 所经历的形成环境最为相似, 受物源效应影响。

关键词: 粒度; 常量元素; 化学风化; 闽北近岸海域

中图分类号: P736.21

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2020.055

0 引言

化学风化作用是地球外动力地质作用的一种, 显著影响着全球物质循环, 控制着表层地球化学过程, 与岩石圈、水圈、大气圈和生物圈有着密切的关系。风化岩石、水系沉积物等风化产物中的不活动元素可以保留母岩的元素特征, 因此化学元素的分布、迁移和富集规律能反映沉积物源岩的物质成分特点^[1-3]。通过对沉积物中相关成分的化学风化特征进行研究, 可以利用其矿物化学成分为确定物源、重建环境演变提供依据^[4-6]。

上地壳矿物中, 石英的体积分数约占 21%, 斜

长石约为 41%, 钾长石约为 21%^[7], 风化过程中不同元素的运移规律有一定差异, Ca、Na 和 K 元素在风化过程中逐渐从长石中析出, Al₂O₃ 和碱金属的比值增高, 因此, Nesbitt 和 Young^[8] 根据元素活动性顺序, 利用地球化学的方法, 将化学风化过程划分为早、中、晚 3 个阶段, 提出用化学蚀变指数 (CIA) 判断物源区的风化程度, 主要根据源岩残余组分以及主要碱金属和碱土金属元素 (Na、K 和 Ca) 来对化学风化程度进行评估。CIA 能反映流域累积的综合化学风化历史, 是源区化学风化程度的指标, 徐小涛等^[9] 通过对化学蚀变指数 (CIA)、化学风化指数 (CIW) 和斜长石蚀变指数 (PIA) 的综合分析, 认为在对物源区风化程度进行判断时, CIA 的干扰因素相对较少。过去几十年间, 化学风化作用强度作为探讨环境演变及物质来源的重要手段而被广泛应用^[10-13]。

浙闽近岸海域由于其得天独厚的地理位置和沉积体系一直是研究者们关注的热点区域, 有众多关于沉积物粒度、地球化学元素、碎屑矿物以及沉积动力方面的研究, 然而对表层沉积物化学风化程

收稿日期: 2020-05-16

资助项目: 中国地质调查局项目 (DD20160137, DD20190205, DD20190208)

作者简介: 宁 泽 (1992—), 女, 硕士, 主要从事海洋地质测试与研究工
作. E-mail: 353511791@qq.com

* 通讯作者: 张 勇 (1970—), 男, 博士, 教授级高工, 主要从事海洋地质
研究工作. E-mail: qingzy@163.com

度的探究却较少,因此,本文从常量元素分布及其粒度控制效应、风化特征及其物源指示方面入手,对闽北近岸海域沉积物的化学元素和风化特征进行探究,深化对闽北近岸海域的认识。

1 材料与方法

1.1 样品获取

2016 年 5 月,用箱式取样器对闽北近岸海域的 229 个站位 (120° — 121.5°E , 26° — 27°N) 进行海底表层沉积物的取样,取样间距约为 5 km,所采集到的样品全部超过 2 kg,部分区域适当加密。2015 年 10 月,在研究区周边的闽江、瓯江、长江共采集了 58 个站位的表层沉积物样品。为了保证河流样品的代表性,长江样品主要采自中下游地区,瓯江和闽江样品主要采自干流区。以上采集的样品全部符合相关规范要求,具体采样位置见图 1。

1.2 测试方法

1.2.1 粒度分析

在粒度测试之前将样品混合均匀,使其具有代表性,黏土质粉砂或粉砂质黏土等细粒沉积物一般取样 0.1~0.2 g,以粉砂和细砂为主的沉积物一般取样 0.3~0.4 g,以中粗砂为主的沉积物取样量一般为 0.5~0.6 g,将样品放入洗净的烧杯中。在烧杯中加入浓度为 30% 的过氧化氢至气泡不再产生,除掉有机质后再加入 3 mol/L 的盐酸至样品不冒泡,去除钙质胶结物。样品经以上步骤后再进行洗盐,然后加入六偏磷酸钠溶液经超声波分散后,用英国马尔文(Malvern)公司生产的 Mastersizer-2000 型激光粒度分析仪进行测试。仪器测量范围为 0.02~2 000 μm ,偏差 <1%,重现性 $\phi 50 < 1\%$,粒度分辨率为 0.01 Φ ,可以满足实验需求。粒级划分标准使用 Udden-Wentworth 等比制 Φ 粒级标准^[14],沉积物的分类和定名采用 Folk 无砾沉积物分类法^[15]。

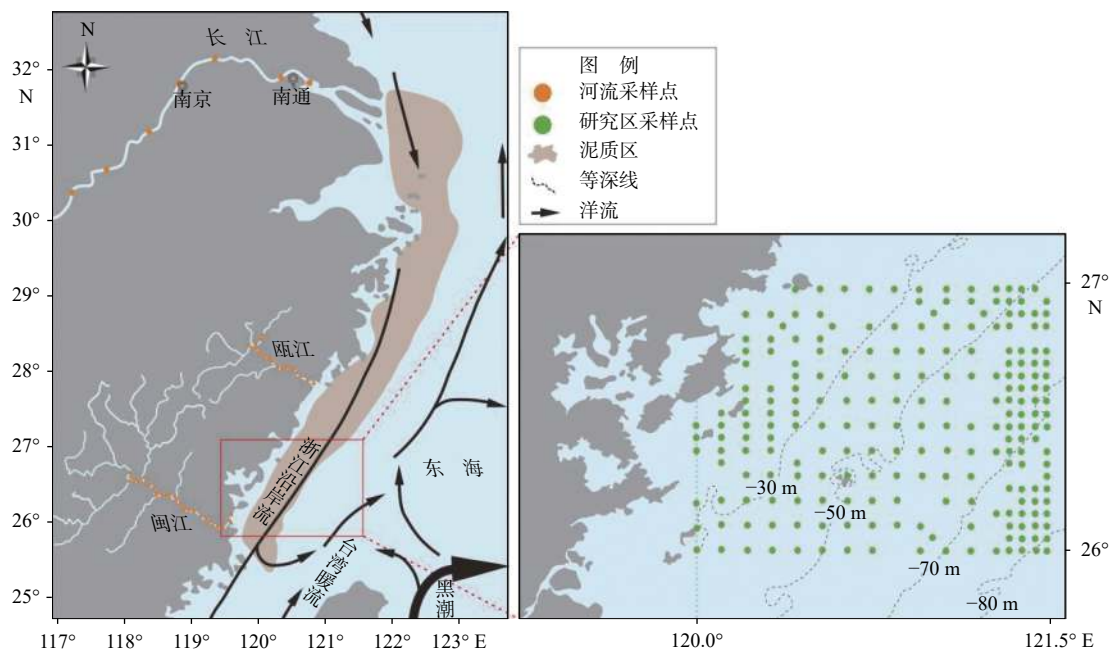


图 1 研究区位置及采样站位

Fig.1 Location of the study area and sampling stations

1.2.2 常量元素分析

元素分析在国土资源部海洋地质实验检测中心完成,沉积物样品经 $\text{HNO}_3\text{-HF-HClO}_4$ 完全消解后,采用等离子质谱和光谱分析方法测定元素含量。经质量控制审核后,样品检测结果的合格率为 100%。为了监控测试精度和准确度,元素分析分别进行了

若干样品的重复分析与标样分析,经检测分析元素的相对误差优于 10%。

1.3 化学蚀变指数 CIA 的计算

再旋回的母岩物质经历二次风化后 CIA 指数偏大,成分变异指数 ICV 可以用来判断物源区物质

是否发生再旋回作用,因此,进行 CIA 计算之前首先进行 ICV 的判断,以消除再旋回作用的影响,ICV 的计算公式为:

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

式中:氧化物以摩尔数为单位,对 $ICV > 1$ 的样品进行 CIA 计算^[16],其计算公式为:

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

式中:氧化物以摩尔数为单位,CaO*为硅酸盐矿物中的 CaO。

在计算 CIA 时,根据 McLennan(1993)^[17] 提出间接计算 CaO*的方法:

$$CaO_{\text{剩余}} = CaO - P_2O_5 \times 10/3$$

若 $CaO_{\text{剩余}} < Na_2O$, 令 $CaO^* = CaO_{\text{剩余}}$; 若 $CaO_{\text{剩余}} > Na_2O$, 令 $CaO^* = Na_2O$ 。以此将非硅酸盐矿物中的 CaO 排除。

1.4 化学风化趋势分析

根据质量平衡原理,通过长石溶淋动力学实验和矿物稳定性的热力学计算,Nesbitt 和 Young 等^[18] 提出大陆化学风化趋势预测的 A-CN-K 和 A-CN-K-FM 三角模型。 $A-CN-K(Al_2O_3-(CaO^*+Na_2O)-K_2O)$

三角图解常用来表示长石的风化趋势以及化学风化过程中主要矿物成分的变化,沉积物中含有基性矿物时,常用 A-CN-K-FM($Al_2O_3-(CaO^*+Na_2O+K_2O)-(FeO^T+MgO)$)三角图解来说明沉积物的化学风化趋势^[18-19]。本研究采用 2 种三角图解对研究区沉积物风化程度进行探究。

2 结果

2.1 粒度特征及空间分布

表层沉积物的类型和粒度包含了沉积物运移和沉积动力条件等多方面的重要信息,是其物质来源和沉积环境的重要指标^[20-21]。闽北近岸海域表层沉积物类型多样,由岸向远海主要为泥、粉砂、砂质粉砂和粉砂质砂等 7 种沉积物类型,类型界限与等深线大致平行,呈带状分布,中部的砂质泥和砾质泥呈斑块状分布,70 m 水深以外颗粒较粗,有零星分布的砂(图 2)。区内沉积物粒径介于 $7.83\Phi \sim 1.26\Phi$,平均粒径较细,为 6.42Φ (表 1),从岸向海由细变粗,与粒度分异规律相反,可能是由于细粒与粗粒沉积物物质来源不同。

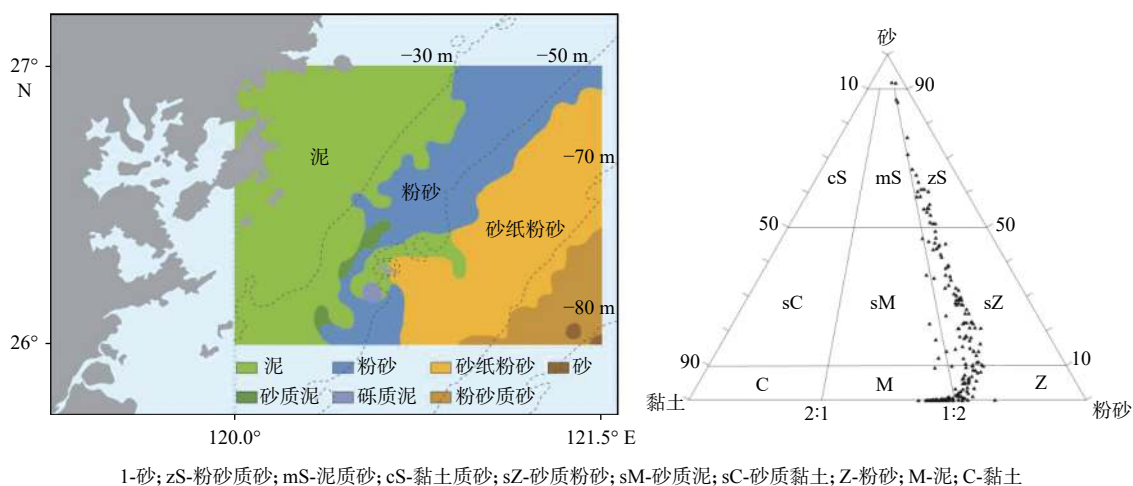


图 2 沉积物类型分布图和 Folk 分类粒度三角图

Fig.2 Distribution of sediments in the study area

2.2 常量元素分布特征

研究区表层沉积物化学成分以硅酸盐和铝硅酸盐为主,氧化物中 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 K_2O 、

Na_2O 和 MgO 7 种组分约占沉积物总量的 90.29%。除 Na_2O 外,各常量元素含量空间分布都表现为大致平行等深线,从近岸向远海递增或递减的趋势(图 3)。

表 1 表层沉积物常量元素含量统计
Table 1 Contents of major elements in surface sediments 元素含量/%

区域	参数指标	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	CI _A	平均粒径(<i>M_z</i>)
研究区(<i>n</i> =229)	最大值	66.04	18.96	14.58	4.21	19.21	3.91	3.56	64.74	7.83Φ
	最小值	29.73	6.85	4.36	1.81	2.82	1.36	1.21	44.80	1.26Φ
	平均值	55.62	15.99	6.19	2.59	4.19	2.68	3.09	56.14	6.42Φ
	标准偏差	4.23	1.86	1.05	0.35	1.61	0.61	0.30	3.40	1.19
	变异系数	0.07	0.12	0.17	0.13	0.39	0.23	0.10	0.07	0.19
上陆壳	平均值	66.00	15.20	5.00	2.20	4.20	3.90	3.40	47.92	\
长江(<i>n</i> =13)	最大值	72.42	16.10	6.62	2.83	8.84	1.79	2.89	73.76	\
	最小值	49.16	8.36	3.38	1.81	3.62	0.82	2.08	52.09	
	平均值	61.28	12.68	5.27	2.32	5.66	1.38	2.39	62.78	
瓯江(<i>n</i> =17)	最大值	77.08	17.13	6.84	2.41	1.44	2.85	5.01	70.79	\
	最小值	58.79	11.45	2.02	0.28	0.33	0.82	3.15	48.15	
	平均值	69.14	14.27	3.88	1.03	0.83	1.58	3.91	63.43	
闽江(<i>n</i> =28)	最大值	87.78	24.06	7.69	1.00	1.09	1.19	4.24	91.15	\
	最小值	51.49	6.12	1.29	0.16	0.15	0.13	1.72	50.83	
	平均值	68.67	16.58	4.21	0.58	0.49	0.64	3.01	74.68	

注: 上陆壳数据引自文献[22]。

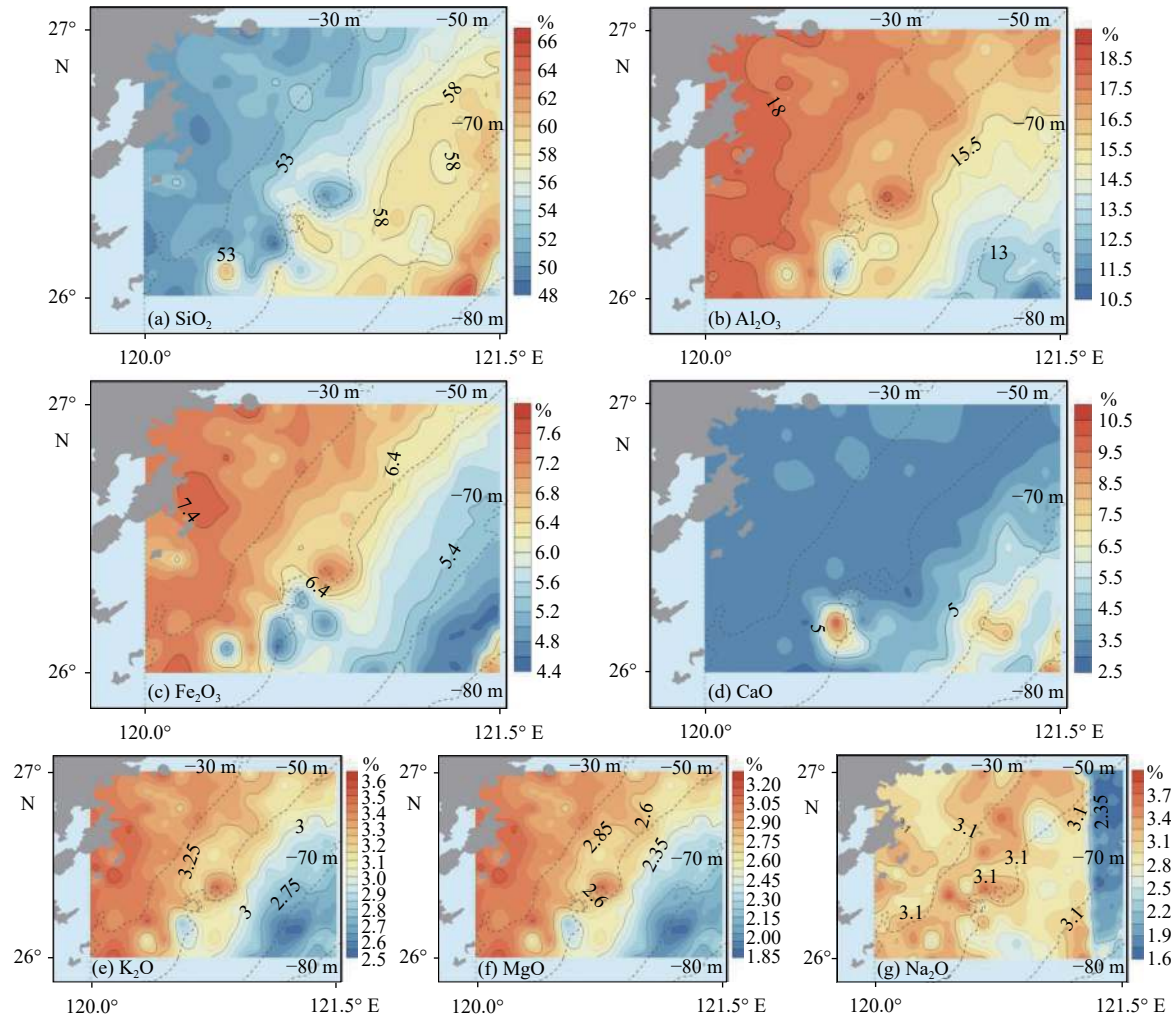


图 3 表层沉积物主要常量元素分布图
Fig.3 Distribution of major elements in the surface sediments

SiO_2 和 Al_2O_3 是陆源碎屑的主要成分, 研究区内的 SiO_2 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 的平均含量之和 $>77\%$, 水深 50 m 以浅表现为高铝低硅, 长石含量高, 50 m 以深处表现为高硅低铝, 石英含量占主导。将研究区常量元素含量与上陆壳和周边河流沉积物同名成分对比(表 1), SiO_2 含量均低于上陆壳和 3 条河流, Al_2O_3 含量略高于上陆壳, 其他元素含量较为接近。 Fe_2O_3 含量较高, MgO 、 CaO 含量与上陆壳和长江沉积物接近, 高于瓯江和闽江。总体来看, 研究区 Si 元素相对贫乏, Fe 元素较为富集, 各元素含量与上陆壳和周边河流差异不大。

2.3 化学风化程度特征

2.3.1 CIA 与 Na/K 摩尔比分布

沉积过程中的沉积分异作用、再旋回作用、沉积区进一步风化作用以及成土作用、成岩期的钾交代作用等都是 CIA 分析过程中不可忽略的影响因

素^[9]。河流和海洋沉积物的 CIA 主要受到源岩和流域气候(气温和降水)的影响, 其次受到地貌特征、植被和人类活动等因素的影响, 因此, 要通过各种办法来提高 CIA 推测物源风化程度的准确度。

本研究在对样品进行分析时, 首先依据沉积物常量元素的摩尔数计算出成分变异指数。 $ICV < 1$ 表明高岭石、蒙脱石等黏土矿物含量较高, 沉积物可能在首次沉积条件下经历了强烈的风化作用, 或者经历过再旋回作用^[9], 选取 $ICV > 1$ 的样品, 以消除沉积物再旋回作用的干扰。如图所示, 研究区沉积物 ICV 值均 > 1 , 表明沉积物中含有较高的非黏土硅酸盐矿物, 推测其源岩为构造活动背景下的首次循环沉积。经过计算得出 CIA 值(图 4, 表 1)。研究区 70 m 以深处为 ICV 和 CIA 值异常区, 70 m 以浅的区域整体表现为从近岸向远海, 成分变异指数降低, 化学蚀变指数增高。

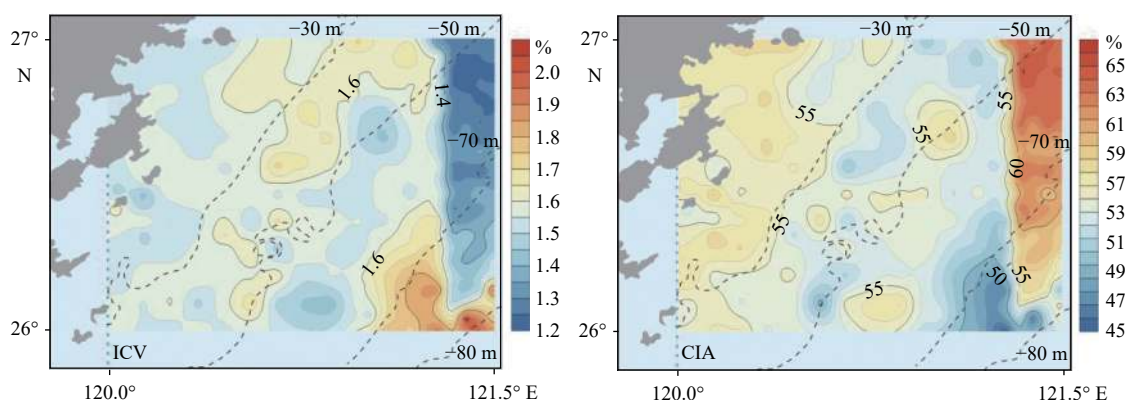


图 4 成分变异指数 ICV 和化学蚀变指数 CIA

Fig.4 Composition Variation Index ICV and Chemical Alteration Index CIA of the study area

邵菁清等^[23] 对大河沉积物 CIA 指数和粒度进行了分析, 认为河流下游沉积物平均粒径变化不大, 其 CIA 值反映流域的累计化学风化程度, 可以作为整个流域细颗粒风化物质的平均代表。因此, 选取闽江、瓯江和长江下游的样品计算 CIA 值。Na/K 可以用来衡量样品中斜长石风化程度, K 和 Na 元素在地壳中含量为 1:1, 都属于碱金属元素, 斜长石风化速率大于钾长石。在表生环境中, K^+ 离子半径大, 黏土对 K^+ 的吸附性大于 Na^+ ; 后生环境中 K 元素多于 Na 元素^[9, 24]; 因此, 研究区沉积物 Na/K 与 CIA 呈负相关(图 5)。闽江沉积物样品点较分散, 大部分为温暖湿润环境下的中等—强化学风化程

度, 瓯江为初等—中等化学风化程度, 长江 CIA 值介于 52~74, 指示为弱—中等化学风化程度, 3 条河流随着纬度的增高, 化学风化程度表现出降低的趋势, 研究区风化程度与长江沉积物风化程度更为接近。水深 50 m 以浅的沉积物风化程度较为集中, CIA 值基本集中于 55~60, 水深 > 50 m 的沉积物 CIA 值较分散, 部分样品风化趋势接近中等化学风化比 50 m 水深以浅的样品风化程度增强。70 m 以深的沉积物有部分样品的 CIA 值在 50 左右, Na/K 值较高, 受化学风化很弱, 推测该部分样品为研究区东南部外陆架的残留沉积。

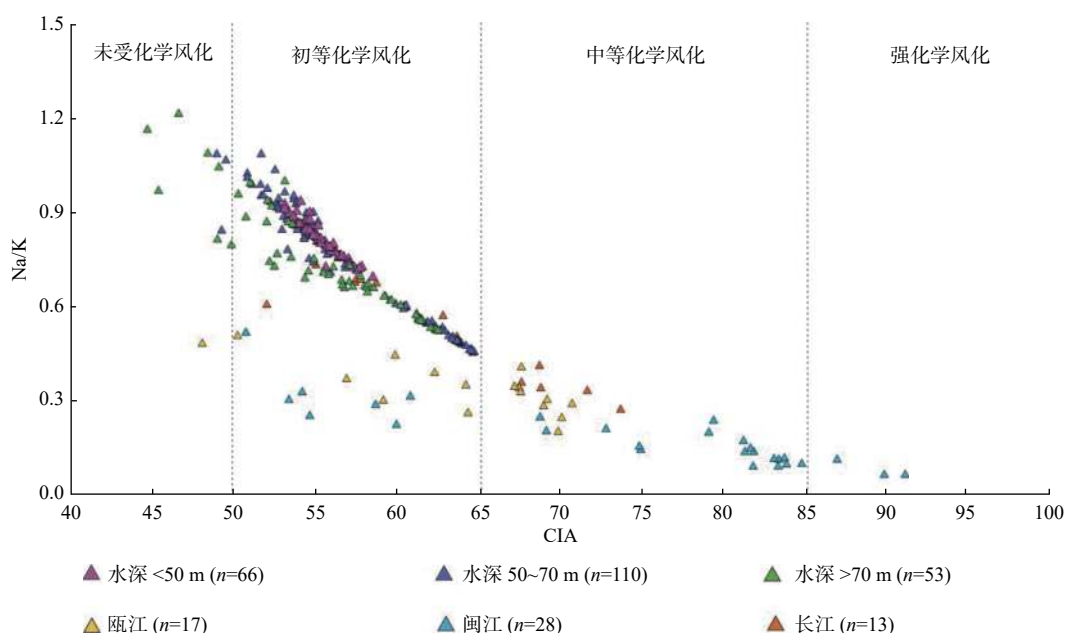


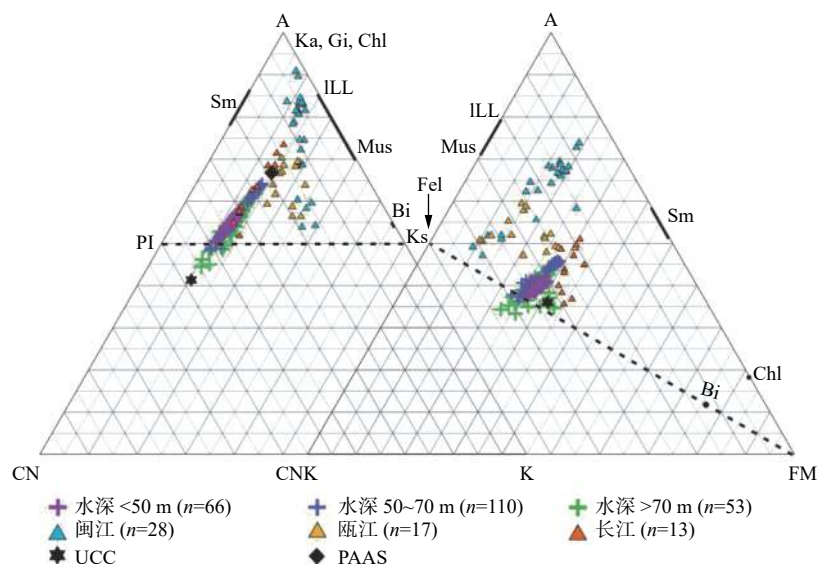
图 5 表层沉积物 CIA-Na/K 关系散点图

Fig.5 Scatter diagram of CIA-Na/K ratio of surface sediments

2.3.2 化学风化演变特征

将研究区和周边河流沉积物样品进行投点, 如图 6 所示。在 A-CN-K 图解中, 研究区样品与长江沉积物风化趋势基本相同, 近似平行于 A-CN 线, 接近斜长石一边, 研究区样品横跨斜长石-钾长石线, 与上陆壳→陆源页岩的风化趋势大致一致。瓯江

沉积物投点相对集中, 大致平行于 A-K 线, 闽江沉积物样品更接近 A 点。A-CN-K-FM 图解中, 研究区和长江样品更接近长石线, 闽江沉积物更接近于 A-FM 线, 大部分样品处在伊利石-高岭石区, 研究区及周边河流的三角图解和 CIA 指数表现出比较一致的风化趋势规律。



Ka-高岭石; Gi-水铝矿; Chl-绿泥石; IL-伊利石; Mus-白云石; Bi-黑云母; Pl-斜长石; Sm-蒙脱石;
Ks-钾长石; Fe-长石; PAAS-陆源页岩; UCC-平均上陆壳^[22]

图 6 A-CN-K 和 A-CN-K-FM 图解

Fig.6 A-CN-K and A-CN-K-FM ternary diagrams

3 讨论

3.1 粒度特征及空间分布

沉积物粒度分异规律为随着离岸向海水深的增大,沉积次序由粗变细^[25],然而闽北近岸海域沉积物粒径从西北沿岸向东南逐渐变粗,水深约 30 m 以浅主要为泥,30~50 m 水深主要为粉砂,50~70 m 水深处沉积物类型以砂质粉砂为主,70 m 以深处多为粉砂质砂。研究区虽然经纬跨度较小,但地理位置特殊,西北近岸属于浙闽泥质区南部末端,东南部水深达 80 m 以上,属外陆架,且区内有终年自南向北的台湾暖流和近岸的浙闽沿岸流在约 50~60 m 等深线处交汇,形成切变锋,水动力条件复杂,底质沉积物在此段为过渡类型^[26-28]。长江入海的巨量物质及浙闽河流入海沉积物随沿岸流到达闽北近岸海域,闽北近岸处在长江沉积物分散系统的末端,随水流而来的多为细粒物质,细粒物质向南部和东部分散时,受到台湾暖流动力、温盐结构形成“水障效应”的阻隔,基本滞留在 50 m 以浅的内陆架^[29-34];而区内 70 m 以深处沉积物较粗。研究资料发现,外陆架沉积中包含相当多的现代及更新世遭磷化的有孔虫介壳,且部分已经海绿石化,表明它们在海底经受了长期又复杂的变化过程,而内陆架沉积中有孔虫数量则明显降低,可见东海陆架沉积物的物质组成有较大差异^[20, 29],¹⁴C 测年数据认为,外陆架沉积物年代一般为 15~12 kaBP,不是现代沉积,而是晚玉木冰期海退时的沉积物^[20, 35]。周晓静^[31]认为内陆架悬浮及再悬浮沉积物可以跨越 123°E 向东继续延伸,但东海外陆架边缘表层细颗粒沉积物的微量元素构成与现代长江沉积物存在较大差异。综合前人的研究成果及研究区特殊的地理位置和复杂的水动力条件,认为周边河流的现代物质很少能在 70 m 以深处的外陆架沉积,外陆架沉积区未被现代物质覆盖,裸露的粗粒砂质沉积物为残留沉积。

3.2 常量元素分布及其粒度控制效应

沉积物的元素地球化学特征与沉积物矿物组成、水动力条件、粒度等密切相关,沉积物元素的赋存状态、丰度、时空分布等规律可以反映沉积环境

的演化,对研究河流沉积物入海后的输运、扩散、沉积介质环境有重要意义^[36-38]。

SiO₂ 含量在研究区表层沉积物中占主导地位,主要在粗粒沉积物中富集,与沉积物平均粒径值呈负相关(表 2), R^2 为 0.77,相关性很强。黏土是 Al₂O₃ 的重要载体,Al 元素主要在细粒组分中以铝硅酸盐形式富集,其平面分布规律与 SiO₂ 相反,表现为西北高东南低,与平均粒径呈正相关, R^2 为 0.92,相关性极强。Fe₂O₃ 含量高于中国浅海,底质沉积物类型的控制作用明显,有 2 种可能来源:①长江等河流中含铁的胶体和金属离子随河流入海,在高盐、低盐水混合的环境中因絮凝作用而沉淀;②钛铁矿、磁铁矿、褐铁矿等含铁陆源碎屑矿物随径流输运至研究区。Fe₂O₃ 与平均粒径呈正相关,主要在细粒物质中富集, R^2 为 0.87,具有很强的相关性。钾、钙、镁元素都属于易迁移的碱金属元素或碱土金属元素,在强化学风化过程中不稳定,更易流失^[39]。K₂O 平面分布呈条带状,与平均粒径相关系数为 0.82,受粒度效应控制明显,此外还受水动力条件和钾长石、云母含量的影响。研究区内 Na₂O 含量低于上陆壳,而高于中国海域及周边河流,推测是由于海洋沉积物中 Na₂O 属于易迁移元素,Na、Ca 最易迁移、淋失^[40-41],海水中的 Na 元素常以吸附及阳离子交换的形式在海底细颗粒沉积物中富集^[42]。虽然研究区 Na₂O 与粒度相关性较差,但从平面图可以看出 50 m 以浅的细粒沉积物中 Na₂O 含量占比较高,研究区东部沉积物风化程度较高,对应 Na₂O 含量低值区。CaO 主要以 CaCO₃ 的形式存在于方解石、白云石及钙质结核、生物贝壳中,研究区 CaO 含量与平均粒径呈负相关,有较强的相关性,东南部个别站位出现高值,主要由于外陆架为冰期时的残留沉积,具有肉眼可见的贝壳砂层,此外,台湾暖流带来的暖水使暖水种壳类生物生存,沉积物中存有贝壳碎片,也是造成 CaO 含量较高的原因之一。MgO 含量在研究区均值为 2.57%,东南部含量较低可能受到碎屑矿物如辉石类、透闪石等矿物含量的影响^[43],其随粒度变化趋势明显,受粒度影响较大。综上可知,除 Na₂O 外,其他各常量元素均与粒度表现出很强的相关性(表 2),符合“元素粒度控制律”,其含量特征与上陆壳和周边河流沉积物有较好的一致性,陆源沉积特征明显。

表 2 主要常量元素与平均粒径的相关性
Table 2 Correlation coefficients of grain size and main elements

<i>X</i>	<i>Y</i>	方程	R^2
Mz	SiO ₂	$y = -2.985 2x + 74.945$	0.771 8
Mz	Al ₂ O ₃	$y = 1.472 8x + 6.609 8$	0.921 8
Mz	CaO	$y = -0.740 8x + 8.786 5$	0.647 5
Mz	MgO	$y = 0.247 6x + 1.003 6$	0.752 7
Mz	K ₂ O	$y = 0.221 7x + 1.677 3$	0.822 4
Mz	Na ₂ O	$y = 0.293 1x + 0.799 0$	0.299 5
Mz	Fe ₂ O ₃	$y = 0.748 0x + 1.321 4$	0.871 4

3.3 化学风化趋势分析

从空间分布来看, 70 m 以深处 *ICV* 和 *CIA* 值出现异常, *ICV* 值较高 (>1.7), 再旋回作用弱, *CIA* 值较低 (45~50), 为未受化学风化(图 4)。李国刚等^[44]指出沉积物的物源变化会对 *CIA* 起主要控制作用。认为此处的 *CIA* 值受物源影响较大, 70 m 以深处为残留沉积, 沉积物在洋流和潮流等强水动力长期冲刷下, 抗风化能力差的矿物流失, 抗风化能力强的硅酸盐矿物存留, 以石英为主, SiO₂ 含量高, 矿物颗粒较粗, 黏土矿物含量低, 因此表现为初次沉积条件下较弱的风化程度。水深 70 m 以浅的区域 *CIA* 值介于 50~65 之间, 属初等化学风化, 从近岸向远海表现为再旋回作用增强, 黏土矿物含量逐渐增高, 化学风化作用逐渐增强。

从化学风化程度来看, 长石类矿物在风化过程中, 最初阶段是 Na、Ca 的流失, 高岭石、伊利石、蒙脱石为最初阶段的主要产物。Nesbitt 等^[8]将化学风化过程划分为初期脱 Na、Ca, 中期去 K 和晚期脱 Si 的 3 个阶段。上陆壳(UCC)基本处于未受化学风化的阶段, 陆源页岩(PAAS)是典型的上陆壳初级风化产物, 上陆壳指向陆源页岩的方向表示典型的大陆初期的风化趋势^[21]。研究区与长江沉积物风化趋势大致平行 A-CN 线, 接近斜长石一边(图 6), 属于最初的风化趋势, 处于较弱的风化阶段。该风化阶段中斜长石矿物大量风化, 风化程度表现出脱 Ca 和 Na、富 Al 的主要趋势, 钾长石矿物的比例会有所上升, 沉积物风化水平处于低等风化阶段中后期。长江样品点比较分散, 风化程度不一, 可能是由于长江流域季节性降雨区迁移导致下游干流沉积物来源的不同, 不同河段地形坡度、河水流速、水动力条件也不尽相同, 外陆架海域物源存在多样性,

水动力条件复杂, 造成研究区各样品风化程度不同。瓯江沉积物投点较集中, 大致平行于 A-K 线, 属于中等化学风化程度, 风化程度的继续加剧使 K 元素从钾长石和伊利石中析出, 含 K 矿物进一步风化, 向含 Al 矿物转变, 因此风化趋势平行于 A-K 线。瓯江流域相对于长江位置靠南, 气候相对暖湿, 风化强度高于长江沉积物。沉积物的风化趋势最终会向 A 顶点靠拢并达到 A 点, 比如石英、高岭石等^[45], 图中显示的闽江沉积物处于该风化阶段, 样品中伊利石、蒙脱石和高岭石等黏土矿物含量较高, 其流域内气候湿热多雨, 风化强烈, 斜长石几乎风化殆尽。闽江样品点也较为分散, 可能是由于闽江位于福建山地, 属山溪性河流, 坡度大, 瞬时大通量使得下游干流沉积物短期聚集, 导致风化程度不一。

A-CN-K 图解通过碱金属和 Al 元素的含量变化来推测其经历的化学风化阶段, 但不能反映 Fe 和 Mg 等元素的迁移变化规律, Nesbitt 等^[8]提出 A-CN-K-FM 图解, 指示浅色矿物和暗色矿物的风化趋势, 反映 Fe、Mg 等金属元素的风化特征。A-CN-K-FM 图解显示研究区样品穿过长石-黑云母线, 与上陆壳样品接近, Fe、Mg 分异度不高, 矿物含量以长石为主。研究区和长江样品均未超过长石-蒙脱石线, 表明处于低等的化学风化程度, 而瓯江和闽江沉积物几乎都在长石-蒙脱石线以上, 风化程度较强。3 条河流沉积物的风化程度表现为随着地理纬度的降低呈现增加的趋势, 显示出元素的气候效应。A-CN-K 和 A-CN-K-FM 图解均表明研究区与长江沉积物风化趋势更为接近, 均属于低等的化学风化程度, 所经历的形成环境最为相似, 受到物源效应和气候效应的共同影响。

4 结论

(1) 闽北近岸海域沉积物类型表现为明显的东西分带特征。底质类型分布呈明显的条带状, 大致平行于水深线分布, 从岸向海依次为泥-粉砂-砂质粉砂-砂, 平均粒径逐渐变粗。研究认为形成这种条带状的主要原因为沉积物物源及动力机制不同, 长江及周边河流的入海物质在洋流的作用下主要在水深 50 m 以浅的近岸沉降, 70 m 以深的粗砂主要为残留沉积, 50~70 m 表现为过渡类型。

(2) 沉积物中各常量元素含量陆源特征明显,

粒度控制效应显著。 SiO_2 在50 m以浅含量相对较低,离岸向海逐渐增高, Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、 MgO 和 K_2O 分布规律与 SiO_2 大致相反,除 Na_2O 外均与粒度表现为很强的相关性,各元素含量特征与上陆壳和长江沉积物更为接近。

(3)研究区沉积物在风化程度上处在初等化学风化阶段,在空间分布上表现为从岸向海化学风化程度逐渐增强。70 m以深处 ICV 和 CIA 异常区是以石英为主的残留沉积,抗风化能力强,黏土矿物含量低,表现为弱化学风化。长江、闽江、瓯江沉积物的风化程度表现为随着地理纬度的降低而增强,气候效应明显,研究区与长江沉积物风化趋势更为接近,所经历的形成环境最为相似,受到物源效应影响。

参考文献:

- [1] Kump L R, Brantley S L, Arthur M A. Chemical weathering, atmospheric CO_2 , and climate[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2000, 28(1): 611-667.
- [2] 解晨骥,高全洲,陶 贞.流域化学风化与河流化学研究综述与展望[J]. *热带地理*, 2012, 32(4): 331-337, 356.
- [3] 严桃桃,吴 轩,权养科,等.从岩石到土壤再到水系沉积物:风化过程的岩性地球化学基因[J]. *现代地质*, 2018, 32(3): 453-467.
- [4] 付 玲,关 平,赵为永,等.柴达木盆地古近系路乐河组重矿物特征与物源分析[J]. *岩石学报*, 2013, 29(8): 2867-2875.
- [5] 杨守业,印 萍.自然环境变化与人类活动影响下的中小河流沉积物源汇过程[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2018, 38(1): 1-10.
- [6] 林 刚,陈琳莹,罗 敏,等.西太平洋新不列颠海沟表层沉积物的地球化学特征及其物源指示[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2019, 39(3): 12-27.
- [7] Rowland R A. Handbook of geochemistry: K. H. Wedepohl (Executive editor), 1969. Springer, Berlin. Vol. I: 442 pp., 60 fig., Vol. II; Loose-leaf, DM 224.00(both volumes)[J]. *Earth-Science Reviews*, 1970, 6(1): A24-A25.
- [8] 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.
- [9] 徐小涛,邵龙义.利用泥质岩化学蚀变指数分析物源区风化程度时的限制因素[J]. *古地理学报*, 2018, 20(3): 515-522.
- [10] Gallet S, Jahn B M, Torii M. Geochemical characterization of the Luochuan loess-paleosol sequence, China, and paleoclimatic implications[J]. *Chemical Geology*, 1996, 133(1/4): 67-88.
- [11] 陈 骏,安芷生,刘连文,等.最近2.5 Ma以来黄土高原风尘化学组成的变化与亚洲内陆的化学风化[J]. *中国科学(D辑)*, 2001, 31(2): 136-145.
- [12] 张西营,马海州,谭红兵.青藏高原东北部黄土沉积化学风化程度及古环境[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2004, 24(2): 43-47.
- [13] 李冠华,夏敦胜,柳加波,等.新疆塔城黄土沉积常量地球化学元素特征及其环境意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2013, 33(4): 183-191.
- [14] Wentworth C K. A scale of grade and class terms for Clastic sediments[J]. *The Journal of Geology*, 1922, 30(5): 377-392.
- [15] Folk R L, Ward W C. Brazos river bar: a study in the significance of grain size parameters[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1957, 27(1): 3-27.
- [16] Cox R, Lowe D R, Cullers R L. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59(14): 2919-2940.
- [17] McLennan S M. Weathering and global denudation[J]. *The Journal of Geology*, 1993, 101(2): 295-303.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 田姗姗,张富元,阎丽妮,等.东海西南陆架表层沉积物粒度分布特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2009, 29(5): 13-20.
- [21] 刘剑刚,张 华,朱夏夏,等.辽东山地冰缘地貌上覆土壤粒度及元素地球化学[J]. *水土保持研究*, 2015, 22(5): 331-335, 341.
- [22] Gibbs A K. The continental crust: its composition and evolution. Stuart Ross Taylor, Scott M. McLennan[J]. *The Journal of Geology*, 1985, 94(4): 632-633.
- [23] 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.
- [24] 张 威,董应巍,于 洋,等.辽南黄土化学风化特点及其环境意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2013, 33(5): 163-171.
- [25] 张晓东,翟世奎,许淑梅.长江口外近海表层沉积物粒度的级配特性及其意义[J]. *中国海洋大学学报*, 2007, 37(2): 328-334.
- [26] 刘升发,刘焱光,朱爱美,等.东海内陆架表层沉积物粒度及其净输运模式[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2009, 29(1): 1-6.
- [27] 黄 龙,张志珣,耿 威,等.闽浙沿岸东部海域表层沉积物粒度特征及其沉积环境[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2014, 34(6): 161-169.
- [28] 曾定勇,倪晓波,黄大吉.冬季浙闽沿岸流与台湾暖流在浙南海域的时空变化[J]. *中国科学:地球科学*, 2012, 42(7): 1123-1134.
- [29] 秦蕴珊.东海地质[M].北京:科学出版社,1987.
- [30] 肖尚斌,李安春,蒋富清,等.近2 ka闽浙沿岸泥质沉积物物源

- 分析[J]. 沉积学报, 2005, 23(2): 268-274.
- [31] 周晓静. 东海陆架细颗粒沉积物组成分布特征及其物源指示[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2009.
- [32] 杨旭辉, 冯秀丽, 褚忠信, 等. 中国东部陆架表层沉积物粒度特征及其沉积环境浅析[J]. 中国海洋大学学报, 2012, 42(7/8): 126-134.
- [33] Yang S Y, Wang Z B, Dou Y G, et al. A review of sedimentation since the last glacial maximum on the continental shelf of eastern China[J]. Geological Society, London, Memoirs, 2014, 41(1): 293-303.
- [34] 张晓娟. 东海内陆架南部表层沉积特征及物源分析[D]. 宜昌: 三峡大学, 2015.
- [35] 杨光复, 董太禄, 徐善民, 等. 东海大陆架南部更新世末期以来的沉积特征[M]//中国科学院海洋研究所海洋地质研究室. 黄东海地质. 北京: 科学出版社, 1982: 67-81.
- [36] 杨作升. 黄河、长江、珠江沉积物中粘土的矿物组合、化学特征及其与物源区气候环境的关系[J]. 海洋与湖沼, 1988, 19(4): 336-346.
- [37] Rudnick R, Gao S. Composition of the continental crust[J]. Treatise on Geochemistry, 2014, 4: 1-51.
- [38] 郭玉龙, 杨守业, 苏 妮, 等. 中国东南入海河流沉积物的稀土元素地球化学特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2018, 38(1): 139-149.
- [39] 沙旭光, 刘 健, 程新民, 等. 强制海退沉积作用及其地质意义[J]. 海洋地质动态, 2006, 22(11): 13-17.
- [40] 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.
- [41] 范德江, 杨作升, 毛 登, 等. 长江与黄河沉积物中粘土矿物及地化成分的组成[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2001, 21(4): 7-12.
- [42] 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.
- [43] 马晓红, 韩宗珠, 毕世普, 等. 闽江河口表层沉积物重矿物特征与物源示踪[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2018, 38(1): 87-95.
- [44] 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.
- [45] 凌超豪, 龙 进, 贾玉连, 等. 赣北鄱阳湖地区土塘剖面第四纪红土地球化学特征及古气候意义[J]. 古地理论, 2015, 17(5): 699-708.

WEATHERING CHARACTERISTICS AND PROVENANCE OF THE SURFACE SEDIMENTS IN THE OFFSHORE OF NORTHERN FUJIAN

NING Ze^{1,2}, ZHANG Yong^{1,2*}, LIN Xuehui^{1,2}, BI Shipu^{1,2}, HU Gang^{1,2}, KONG Xianghui^{1,2}

(1 Qingdao Institute of Marine Geology, CGS, Qingdao 266071, China;

2 Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China,)

Abstract: The analysis of grain size and major elements was carried out for 229 surface sediment samples collected from the coastal area of northern Fujian and 54 surface samples from the surrounding rivers. The factors controlling the distribution patterns of the major elements and grain size are studied. Two weathering indicators, the component variation index (ICV) and the chemical alteration index (CIA), are used together with the (A-CN-K)-(A-CN-K-FM) triangle chart to reveal the weathering characteristics and provenance indicators. Results show that the surface sediments along the coast are distributed in a quite regular pattern. From the coast to the sea, the deposits are getting thicker, and spatially in a banded manner. Sands occur near the land followed by mud-silt-sand silt-sand towards the sea. It is believed that the banded distribution pattern depends on sediment source and water dynamics. The near shore sediments are mainly coming from the Yangtze River and surrounding rivers, and deposited in the area less than 50 m in water depth. The coarse sands found in the area under 70 m of water depth are mainly residual sediments. In the area between 50~70 m in water depth, there occur the mixed sediments of the above two. Research of weathering degree suggests that chemical weathering becomes stronger off shore. The sediments below 70 m are mainly the residual sands dominated by high quartz and low clay mineral content, indicating a weak chemical weathering. The weathering degree of fluvial sediments in the Yangtze River, Oujiang River and Minjiang River shows an increase trend with the decrease in geographical latitude, and the effect of climate is obvious. The weathering status of the study area is rather similar to the Yangtze River sediments, and thus the environments are also similar and both affected by sediment sources.

Key words: particle size; constant elements; chemical weathering; coastal areas of northern Fujian