



海洋地质与第四纪地质

MARINE GEOLOGY & QUATERNARY GEOLOGY

长江口和东海内陆架黏土矿物与黏土粒级碎屑矿物构成及物源指示意义

段昊一，毛居东，程鹏，任啸霖，范德江

Clay minerals and detrital minerals in clay fraction from the Changjiang River estuary and inner continental shelf of the East China Sea and their provenance indication

DUAN Haoyi, MAO Judong, CHENG Peng, REN Xiaolin, and FAN Dejiang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2023092102>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

长江口-东海陆架黏土中高活性铁的富集效应及环境控制机制

Enrichment effect and environmental control of clay reactive iron in the Changjiang River estuary and East China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2024, 44(4): 54–64

珠江口内伶仃洋晚第四纪黏土矿物组成特征及对源区气候变化的指示

Late Quaternary clay minerals in the inner Lingdingyang of the Pearl River Estuary, southern China: Implications for paleoclimate changes at the provenance

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 202–209

东海东北部陆架表层沉积物碎屑矿物分布及其物源分析

Distribution and provenance of detrital minerals in surface sediments of the northeastern East China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(5): 58–69

长江口和黄东海沉积物单矿物分选的常用方法和流程

Methods of single mineral separation for sediments of the Changjiang estuary, the Yellow Sea and the East China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(1): 163–174

长江与黄河黏土粒级沉积物地球化学特征及其物源指示意义

Geochemical characteristics of clay-sized sediments of the Yangtze and Yellow Rivers and their implications for provenance

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(3): 109–118

东海内陆架夏季台风与冬季寒潮沉积动力过程的差异—基于现场观测的认识

Differences in sedimentary dynamic processes between summer typhoons and winter cold waves on the inner shelf of the East China Sea: Insights from in-situ observations

海洋地质与第四纪地质. 2023, 43(5): 96–105



关注微信公众号，获得更多资讯信息

段昊一,毛居东,程鹏,等.长江口和东海内陆架黏土矿物与黏土粒级碎屑矿物构成及物源指示意义[J].海洋地质与第四纪地质,2024,44(5): 119-128.

DUAN Haoyi, MAO Judong, CHENG Peng, et al. Clay minerals and detrital minerals in clay fraction from the Changjiang River estuary and inner continental shelf of the East China Sea and their provenance indication[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2024, 44(5): 119-128.

长江口和东海内陆架黏土矿物与黏土粒级碎屑矿物构成及物源指示意义

段昊一,毛居东,程鹏,任啸霖,范德江

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:黏土矿物以及黏土粒级碎屑矿物颗粒细小、搬运距离远,是进行长江口及浙闽内大陆架泥质区多物源示踪的良好指标。本研究利用改进的黏土矿物XRD(X射线衍射分析)预处理方法,制作了供多面XRD衍射分析的方形样品,实现了部分黏土矿物种的鉴定,结合黏土粒级中碎屑矿物鉴定,探讨了长江口及内大陆架沉积物来源。研究表明:长江口及内大陆架表层沉积物中的黏土矿物种类包括伊利石(含2M1、2M2两个多型)、高岭石、珍珠陶土、斜绿泥石以及弹性绿泥石,非黏土矿物主要有石英、钾长石、斜长石、白云石、铁白云石、方解石以及硬石膏。依据黏土矿物、黏土粒级碎屑矿物空间分布差异把长江口及东海内大陆架划分为两个物源区:长江口及内大陆架北部物源区、内大陆架南部物源区,前者受废黄河物质影响,后者受浙闽中小河流物质影响。本研究表明来自苏北废黄河的沉积物不仅跨过了长江冲淡水进入长江水下三角洲,而且一直向南达到浙闽泥质区的北部。

关键词:黏土矿物;碎屑矿物;物源分区;源汇过程;长江口;东海内大陆架

中图分类号:P736.3; P575.5 文献标识码:A DOI: [10.16562/j.cnki.0256-1492.2023092102](https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2023092102)

Clay minerals and detrital minerals in clay fraction from the Changjiang River estuary and inner continental shelf of the East China Sea and their provenance indication

DUAN Haoyi, MAO Judong, CHENG Peng, REN Xiaolin, FAN Dejiang

Key Laboratory of Submarine Geoscience and Prospecting Technology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

Abstract: Clay minerals and detrital minerals in clay fraction can be transported long distance due to small sizes, making them good indicators for multi-provenance tracing in the muddy areas of the Changjiang (Yangtze) River estuary and its adjacent areas. Based on an improved clay mineral XRD pretreatment method, the main clay mineral species and detrital minerals in clay fraction were specified. The distributions of clay minerals and non-clay minerals in the areas, and the sources and sinks of sediment in the Changjiang River estuary and the inner continental shelf were explored. The results show that the types of clay minerals in the surface sediments in the Changjiang River estuary and inner continental shelf included illite (containing 2M1 and 2M2), kaolinite, nacrite, clinochlore, and cronstedtite, whereas non-clay minerals in clay fraction included mainly quartz, potassium feldspar, plagioclase, dolomite, iron dolomite, calcite, and anhydrite. Based on the spatial distribution differences of clay minerals and non-clay minerals, the study areas could be divided into two provenance areas: the first is the northern area covering the Changjiang River estuary and the northern part of the inner continental shelf; and the second is the southern area covering the southern part of the inner continental shelf. Provenances in the former area are dominated by Changjiang River originated materials, with a few from the abandoned Huanghe (Yellow) River delta; while the latter are also dominated by Changjiang River originated materials, but with a certain amount of material from regional small-medium-sized rivers in Zhejiang and Fujian provinces. These results reveal that sediments from the abandoned Huanghe River delta in the northern Jiangsu coastal zone could transport cross the Changjiang River estuary and reach the northern part of the inner continental shelf.

Key words: clay minerals; detrital mineral; provenance specification; source and sink processes; Changjiang River estuary; inner continental shelf of East China Sea

资助项目:国家自然科学基金项目“重大水利工程影响下长江水下三角洲沉积-侵蚀高分辨演变过程重构”(42176077)

作者简介:段昊一(1998—),男,硕士研究生,海洋地质专业, E-mail: dhy@stu.ouc.edu.cn

通讯作者:范德江(1965—),男,教授,博士,博士生导师,主要从事海洋沉积学和沉积地球化学方面研究, E-mail: djfan@ouc.edu.cn

收稿日期:2023-09-21; 改回日期:2023-11-14. 张现荣编辑

近海沉积物的物源研究是海岸带陆海相互作用的重要内容,而矿物则是沉积物物源判别的重要指标^[1-2]。前人利用黏土矿物以及碎屑矿物在中国近海开展了大量富有成效的矿物分区和物源识别研究,取得了丰富的成果,基本上区分了长江物源、黄河物源的基本特征以及在中国东部陆架的扩散范围^[1, 3-5]。前人研究表明,长江口及东海内陆架沉积物主要来自长江,浙闽沿岸的中小型河流亦有贡献;南部可能还混入了台湾物质^[6]。长江口和东海内陆架毗邻苏北沿岸,来自废黄河三角洲的侵蚀再悬浮物质是否跨过长江冲淡水团进而进入长江水下三角洲以及内陆架尚存在争论,大部分学者认为废黄河物质没有进入该区^[7-9],少数学者认为来自苏北的黄河源沉积物至少进入到长江水下三角洲之中^[10]。

通常认为沉积物中的黏土矿物包括蒙皂石族、伊利石族、高岭石族和绿泥石族4大类,又包括多个矿物种,前人主要开展了黏土矿物族的定性鉴定和含量估算,并据此进行物源探讨^[11-14],缺乏对黏土矿物种的鉴定和物源识别;沉积物中的碎屑矿物鉴定和物源识别则主要针对砂粒级中的轻、重矿物^[7-8, 15],而针对黏土粒级中的碎屑矿物研究较少。为此,本研究利用采自长江口及东海内陆架的表层沉积物,通过改进黏土矿物X射线衍射分析(XRD)

的样品预处理方法,尝试对黏土矿物种的鉴定,结合黏土粒级中碎屑矿物的分析,阐明黏土矿物及黏土粒级碎屑矿物的组成和空间分布,探讨长江口和东海内陆架沉积物物源。

1 区域概况

东海内陆架位于中国浙闽沿岸海域,发育一套末次冰期高海平面以来形成的泥质沉积体,东海内陆架泥质沉积体自长江水下三角洲向南,沿浙闽近岸一直延伸到台湾海峡中部^[10, 16],并且根据泥质区的堆积位置和成因将近岸泥质区划分为长江口泥质区和浙闽沿岸泥质区^[17-18]。浙闽泥质区的平均厚度为0~40 m,局部厚达40~80 m^[19-20]。该海域的沉积物主要由长江、钱塘江等浙闽沿岸河流汇入^[21],其中长江是该海域最主要的沉积物供给者^[20, 22-23],浙闽沿岸的中小河流也提供了少量沉积物^[24-25],研究表明,部分来自废黄河三角洲侵蚀物质随着苏北沿岸流进入长江口及东海内陆架^[26-30]。该海域发育浙闽沿岸流、台湾暖流、长江冲淡水等流系和水团;海洋风浪冬季强、夏季弱;夏季入海沉积物多,主要沉积于河口附近,在冬季时节再悬浮并随着沿岸流向南搬运和沉积,最终形成了沿闽沿岸分布的狭长泥质带^[31-33]。

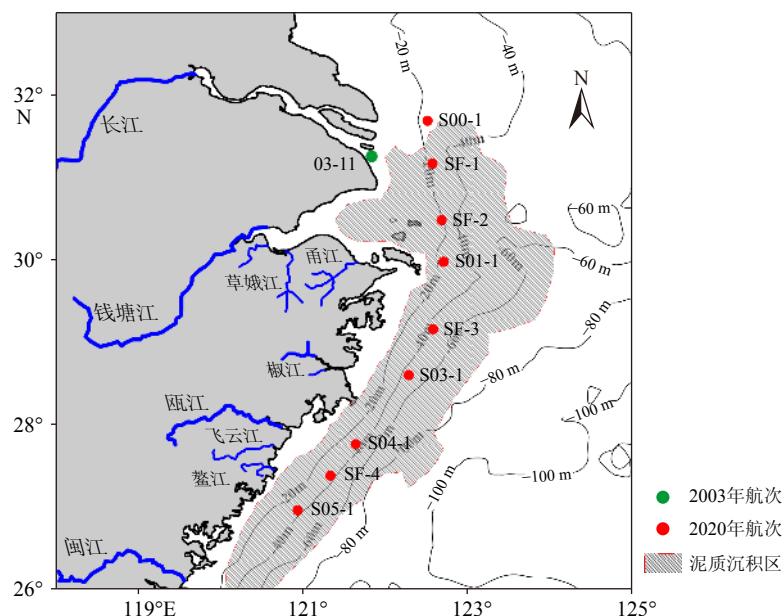


图1 表层沉积物站位分布图

底图来源于秦蕴珊等^[34], Qiao 等^[35]。

Fig.1 The study areas and sampling sites of surface sediments

Base map was modified after Qin et al^[34] and Qiao et al^[35].

2 材料与方法

2.1 研究材料

共采集了长江口到东海内陆架南部共 10 个表层沉积物样品。其中, 长江入海口样品(站位: 03-11)为“东方红 2 号”综合调查船在 2003 年 6 月执行“973 计划”时所采集, 其他 9 个表层沉积物均为“向阳红 18 号”科考船执行 2020 国家自然科学基金委秋季东海共享航次时采集, 具体站位分布见图 1。

2.2 研究方法

黏土矿物 XRD 分析的质量在很大程度上依赖于黏土矿物的提取和样品制备^[36]。本文依据 Stokes 沉降定律的传统沉降法提取足量的黏土, 并制作成方形样品块供 XRD 分析使用。取各站位表层沉积物样品 150 g, 依据 Stokes 沉降定律的传统沉降法多次提取黏土, 并将提取的黏土搅拌至粘稠, 缓慢滴入 1.2 cm×1.2 cm×1.2 cm 的立方体亚克力盒子中, 制作成方形样品, 样品的各个面都可以供 XRD 分析使用(图 2)。随后将制作完成的黏土样片晾干制成自然片, 供 XRD 分析使用; 后送入 60 °C 的烘箱中用乙二醇饱和制成饱和片, 供 XRD 分析使用。

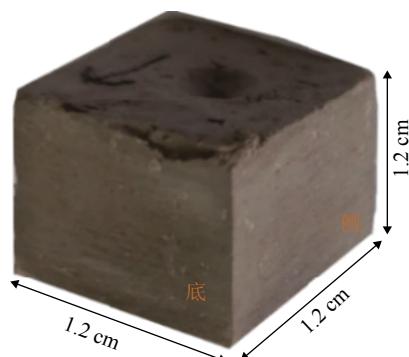


图 2 制作完成的 XRD 分析试样

Fig.2 Prepared specimen for XRD analysis

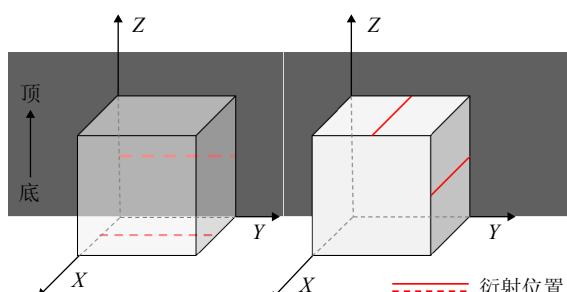


图 3 黏土矿物样品 XRD 测试位置

Fig.3 The XRD testing positions of clay mineral specimens

使用中国科学院能源科学与技术研究中心公共实验室的 Bruker D8 ADVANCE 型衍射仪进行 XRD 分析。XRD 分析条件为: 铜靶, 管电压 40 kV, 管电流 100 mA, 测角仪步进长度 0.02°(2θ)、扫描速度 2 °/min、扫描范围 3°~65°。在对黏土矿物试样进行 X 射线衍射分析时, 分别对同一个样品的顶面、侧面同一位置进行自然片和饱和片的 4 次衍射, 衍射位置见图 3。

最后, 使用 MDI Jade 软件进行衍射数据的校正和处理, 经过测角仪误差校正、扣除背景、标定衍射峰等处理过程, 依据 PDF 卡片库中的黏土矿物数据并结合《矿物 X 射线粉晶鉴定手册》进行详细的黏土矿物和黏土粒级碎屑矿物的鉴定^[18, 37], 黏土矿物相对含量估算依据 Biscaye 方法计算^[38]。

3 结果与讨论

3.1 顶面和侧面衍射差异和黏土种的识别

在对黏土矿物进行 XRD 衍射分析时, 各站位的饱和片的底侧面衍射数据对比见图 4, 侧面衍射强度和顶底面的衍射强度基本相同, 结合顶侧面衍射结果可以有效地对黏土矿物信息进行提取识别。

通过分析对比各站位饱和片样品的侧面和顶底面衍射结果, 共鉴定出黏土矿物种 5 种, 即伊利石(2M1型和2M2型)、高岭石、珍珠陶土、斜绿泥石和弹性绿泥石。而蒙皂石因其含量低, 未能确定种类。

伊利石族矿物鉴定特征: 仅出现了伊利石矿物, 包含伊利石 2M1($(K, H_3O)Al_2Si_3 AlO_{10} (OH)_2$)、伊利石 2M2($(K, H_3O) (Al, Mg, Fe)_2 (Si, Al)_4O_{10} [(OH)_2, (H_2O)]$)两个多型, 且以伊利石 2M1 为主。伊利石 2M1 成分较为单一, 除了 Si-O 四面体中少量 Si 被 Al 替代外, 在 Al-OH 八面体中未发生类质同像替代, 层间域中充填了 K^+ 、 H_2O 等, 是硅酸盐矿物风化较为彻底的次生产物, 在 XRD 图谱上该多型以出现一系列平行底面明显的(00n)的衍射峰为特点, 包括 10 Å、5 Å、3.34 Å 以及 2.00 Å 的衍射峰(图 5)。伊利石 2M2 成分较为复杂, 除了 Si-O 四面体内发生 Al 的类质同像替代外, Al-OH 八面体中也发生了类质同像替代, 层间被 K^+ 、 H_2O 等充填, 它具有向蒙皂石过渡的特点, 其 XRD 图谱上 10 Å、5 Å 峰向低角度方向偏移, 4.48 Å、2.58 Å 峰明显(图 5)。自然界中, 伊利石具有 1Md、1M、2M 以及 3T 等多型, 遵循着 1Md→1M→2M1 的演化途径^[39], 而 2M1

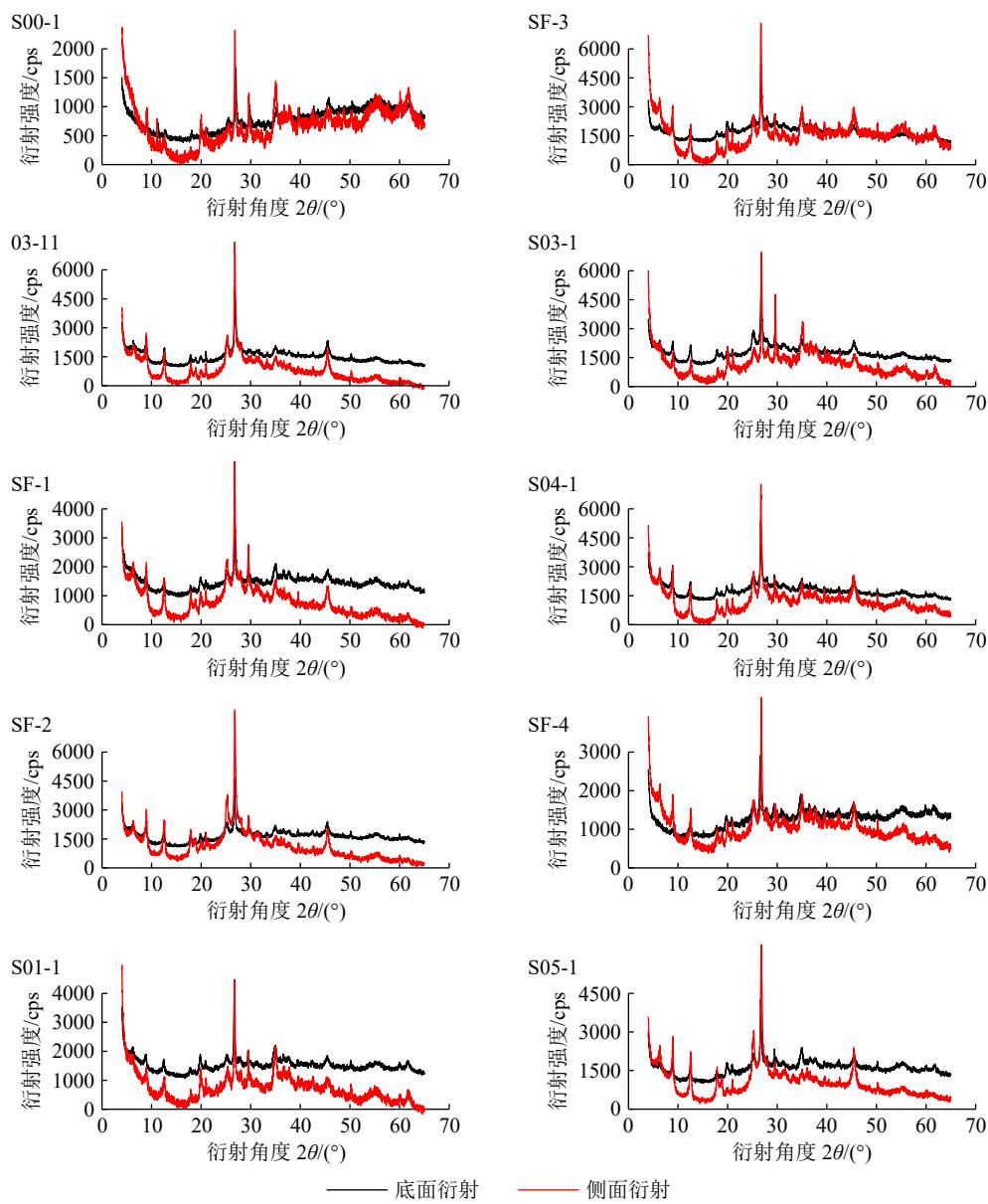


图4 研究区各站位黏土矿物乙二醇饱和片底面和侧面衍射图谱

Fig.4 XRD graphs at bottom and side directions of the ethylene glycol saturated specimens

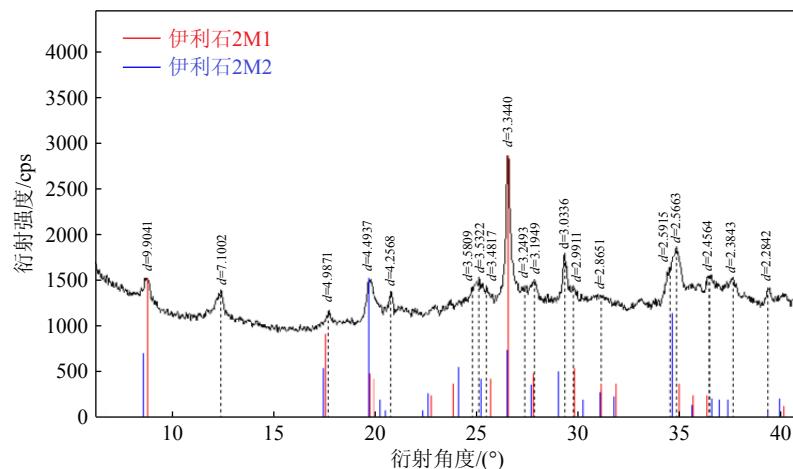


图5 伊利石族黏土矿物的XRD衍射图谱

Fig.5 XRD diffraction patterns of illite group minerals

是最稳定的伊利石多型。长江口及东海内陆架伊利石以 2M1 占主导地位, 反映了该海域伊利石来源区母岩经历了较为充分风化作用, 形成了稳定的 2M1 型伊利石矿物。

高岭石族矿物鉴定特征: 鉴定出了高岭石、珍珠陶土两种矿物。在 XRD 图谱上, 高岭石(001, 7.16 Å)、(002, 3.58 Å)的衍射峰强, 其他峰弱, 且(001)衍射峰偏向低角度方向, 与绿泥石的(002)衍射峰偏差明显, 两者共同存在使得该峰对称性变差(图 6)。珍珠陶土的(001, 7.12 Å)、(002, 3.56 Å)、(110)衍射峰明显, 特别是(001)衍射峰相对较弱、偏向高角度方向, 且与绿泥石的(002)衍射峰偏离小, 它们共同存在时使得该峰对称性变好。高岭石、珍珠陶土两种矿物的成分都为 $\text{Al}_4[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8$, 区别为单位层在 C 轴上排列方向不同, 而在结构上珍珠陶土更加紧密, 且是高岭石族中最为稳定的矿物种。这两种矿物长江口及东海内陆架均存在, 其

中珍珠陶土略微偏多, 反映了其来源区经历了较为强烈的化学风化作用。

绿泥石族矿物鉴定特征: 研究区出现的绿泥石基本上都是斜绿泥石, 个别站位检出了弹性绿泥石。在 XRD 图谱上, 斜绿泥石的(001, 14 Å)、(002, 7 Å)、(004, 3.52 Å)清晰, 而弹性绿泥石的(001)衍射峰几乎没有, 但是(002)峰明显, 且(004)峰清晰可见(图 7)。绿泥石成因复杂, 外动力地质作用的风化作用、沉积成岩作用以及变质作用都可以形成绿泥石, 长江口及东海内陆架沉积物中绿泥石较为单一, 以斜绿泥石为主, 推测主要来自母岩区的风化作用; 个别的富含铁的绿泥石, 可能与来源区的母岩类型有关, 是母岩机械破碎后的产物。

3.2 长江口及内陆架黏土矿物组成和空间分布

长江口及内陆架表层沉积物中的黏土矿物仍然包括蒙皂石族、伊利石族、高岭石族、绿泥石族

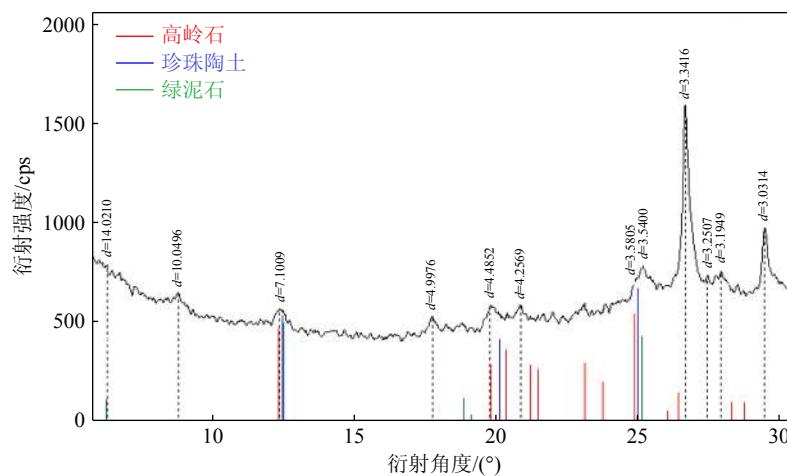


图 6 高岭石族黏土矿物的 XRD 衍射图谱

Fig.6 XRD diffraction patterns of kaolinite group minerals

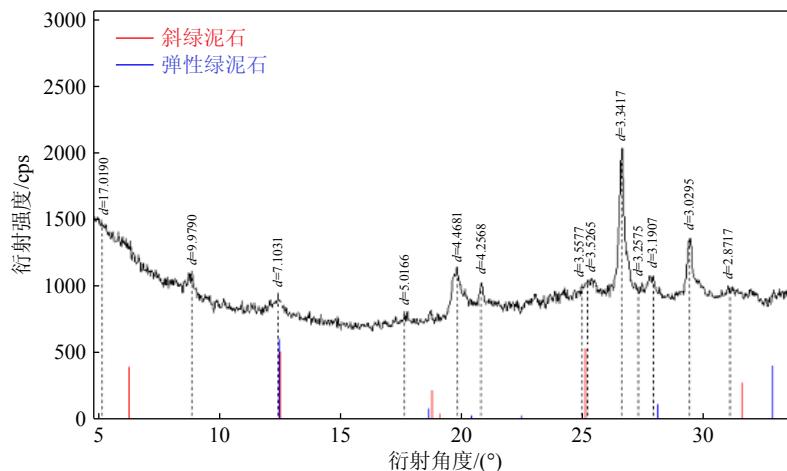


图 7 绿泥石族黏土矿物的 XRD 衍射图谱

Fig.7 XRD diffraction patterns of chlorite group minerals

四个族的黏土矿物，其中由于蒙皂石族相对含量较低(均<0.5%)，未能鉴定矿物种。

各个站位出现的黏土矿物基本一致，仅在个别矿物及相对含量上略有不同(表1)。弹性绿泥石仅出现在S01-1、S04-1、S05-1三个站位之中，其他黏土矿物则见于所有站位之中。各个站位高岭石、珍珠陶土的相对含量有所差异，S00-1站靠近苏北沿岸，代表受到废黄河三角洲物质的影响，其高岭石相对含量大于珍珠陶土；03-11站采自长江河道，代表长江来源物质，其珍珠陶土相对含量高于高岭石。从长江河口到浙闽沿岸北部的SF-1、S01-1、SF-3、S03-1等站位高岭石和珍珠陶土的相对含量相当，而浙闽沿岸南部的S04-1、SF-4和S05-1三个站位以珍珠陶土为主，高岭石含量较少。

黏土矿物相对含量分布见图8，从图8可以看出，沿长江口-内陆架断面各站位黏土矿物相对含量总体上与前人的研究相近^[3, 40-41]。其中，SF-1、SF-2站位与03-11站位的黏土矿物相对含量较为一致，其与S00-1站位相近，但S00-1站位蒙皂石族含量略高；S03-1、SF-4站位的黏土矿物族的相对含量相对于泥质区北部发生了变化，在S03-1、SF-4站位高岭石族、绿泥石族的相对含量增加，高岭石族的相对含量增加明显。

3.3 黏土粒级碎屑矿物组成和分布

通过分析对比各站位样品自然片和饱和片衍射结果，可识别出本文选用的样品中共含有黏土粒级非黏土的碎屑矿物共7种，包括硬石膏、石英、钾

表1 各站位饱和片中黏土矿物种的统计结果

Table 1 Statistics of clay mineral species in ethylene glycol saturated specimens of each station

黏土矿物	站位									
	S00-1	03-11	SF-1	SF-2	S01-1	SF-3	S03-1	S04-1	SF-4	S05-1
蒙皂石族	少	少	少	少	少	少	少	少	少	少
伊利石族	2M ₂ 伊利石	较多	较多	较多	较多	较多	较多	较多	较多	较多
	2M ₁ 伊利石	多	多	多	多	多	多	多	多	多
高岭石族	高岭石	较多	少	较多	少	较多	较多	少	少	少
	珍珠陶土	少	较多	较多	较多	较多	较多	较多	较多	较多
绿泥石族	斜绿泥石	较多	较多	较多	较多	较多	较多	较多	较多	较多
	弹性绿泥石				少			少		少

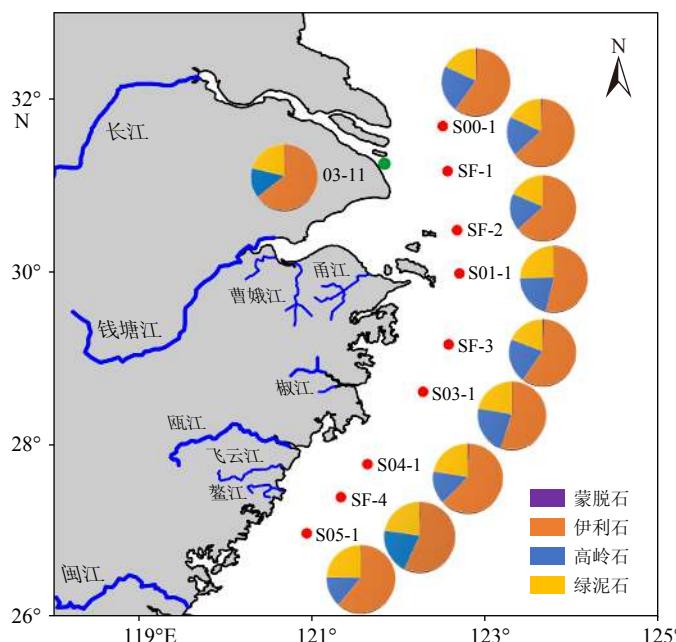


图8 黏土矿物相对含量空间分布图

Fig.8 Spatial distribution of relative content of clay minerals

长石、斜长石、方解石、铁白云石及白云石。各站位所识别出的黏土粒级碎屑矿物的统计结果见表 2 所示。其中, 石英、钾长石、斜长石、方解石见于所有站位, 硬石膏出现于紧靠苏北的 S00-1 站以及浙闽沿岸 SF-3 以北的站位, 而白云石、铁白云石则出现于长江河道、长江口以及浙闽沿岸站位。

为了进一步分析非黏土矿物在空间上的差异, 分别选取钾长石($d=3.18$)、斜长石($d=3.24$)、方解石($d=3.02$)、白云石($d=2.88$)4 种常见的非黏土矿物最强衍射峰强度与石英($d=4.25$)的衍射峰强度进行比较, 反映它们相对含量的空间变化情况, 结果见图 9。可以发现, 方解石/石英比值在靠近苏北海岸的 S00-1 站最高, 反映该站沉积物方解石较多、受到废黄河物质的影响; 在长江河道的 03-11 站最低, 说明长江来源沉积物方解石含量少; 从长江水下三角洲向浙闽沿岸, 该比值较高, 反映了该区沉积物一方面受到来自苏北废黄河高方解石含量物质加入的影响, 另一方面有海洋钙质生物碎屑的加入。钾长石/石英、斜长石/石英、白云石/石英变化不明显, 但斜长石/石英、白云石/石英两个比值从长江口向浙闽沿

岸方向呈现轻微的增加趋势, 且 S04-1 站向南波动更加明显, 在以长江为主导的物源背景下, 该比值增加指示黏土粒级中的斜长石和白云石较石英搬运和扩散距离更长, 而 S04-1 以南部分则可能受到小型河流物质的影响。

3.4 黏土矿物和黏土粒级碎屑矿物的构成对物源的指示

黏土矿物以及黏土粒级碎屑矿物分析表明, 苏北沿岸区域(S00-1 站)沉积物中蒙皂石、高岭石族矿物相对含量偏高, 高岭石较珍珠陶土明显偏多, 方解石含量较高, 且出现硬石膏, 具有黄河来源沉积物的特征^[2,4,15], 可能受来自苏北废黄河物质的影响; 长江河道(03-11 站)沉积物以高岭石族中珍珠陶土含量明显多于高岭石、白云石含量较高为特点; 浙闽沿岸泥质带沉积物零星出现的弹性绿泥石、铁白云石则可能受小型河流物源的影响。

沉积物中黏土矿物以及黏土粒级碎屑矿物空间分布反映了苏北废黄河物质信号和长江物源信号的强弱变化。综合分析发现, 来自苏北废黄河物

表 2 各站位黏土粒级非黏土矿物统计
Table 2 Statistics of other minerals in clay fraction at each station

矿物	S00-1	03-11	SF-1	SF-2	S01-1	SF-3	S03-1	S04-1	SF-4	S05-1	%
硬石膏	21.8	0.0	0.0	10.2	9.9	12.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
石英	5.8	2.3	7.6	2.1	2.6	2.8	2.2	5.4	3.7	2.8	
钾长石	12.8	1.3	2.5	1.2	4.0	1.7	2.2	2.6	4.0	0.0	
斜长石	13.9	3.8	5.9	3.1	7.1	6.2	3.3	10.9	10.9	6.0	
方解石	8.4	2.4	11.0	7.7	9.4	8.9	7.5	15.3	13.9	10.8	
铁白云石	0.0	0.0	2.5	0.0	0.0	0.0	2.3	2.2	7.5	4.2	
白云石	0.0	1.8	2.6	1.7	2.1	0.0	2.5	3.2	4.5	0.0	

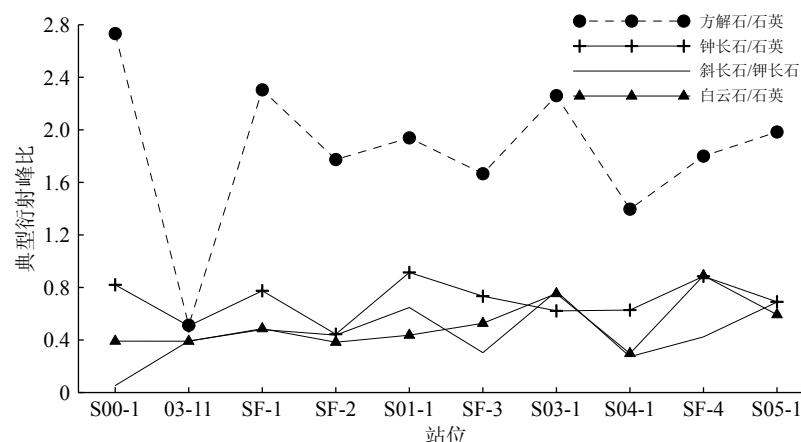


图 9 各站位黏土粒级非黏土矿物典型衍射峰比值

Fig.9 Typical XRD peak ratios of non-clay minerals in clay fraction at each station

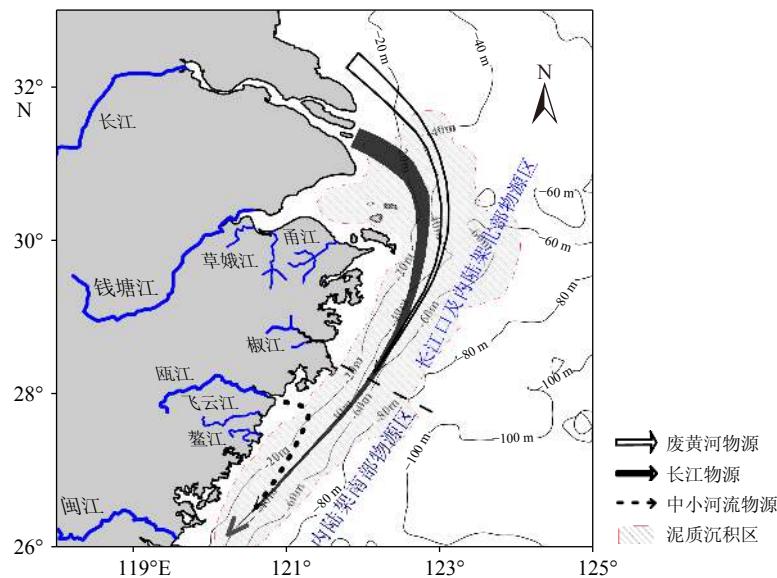


图 10 长江口及内陆架沉积物源汇过程示意图

Fig.10 The sources to sinks in the study areas

源信号为高岭石多,硬石膏、方解石等影响最远可到达 S03-1 站;长江物源信号包括高岭石族中的珍珠陶土为主并出现了白云石等,几乎涵盖了长江河口和浙闽沿岸所有站位,说明长江是本海域的主导物源;而铁白云石、弹性绿泥石则主要局限于浙闽沿岸南部站位。为此,可以 S03-1 为界,该站位以北包括长江水下三角洲、浙闽泥质区北部出现了长江物源、苏北物源两类信号,是长江物质主导受黄河物源影响的区域;该站位以南,包括浙闽沿岸泥质区南部,主要是长江物源为主,但是出现了小型河流物源信号,属于长江物源和中小河流共同影响的区域(图 10)。

长江入海沉积物一部分沉积在水下三角洲,另一部分则随着浙闽沿岸流向南搬运和沉积,构成长江三角洲和浙闽泥质带的主要物质来源,这已被前人研究所证实^[6, 15-16]。然而,关于苏北废黄河沉积物是否能跨过长江冲淡水团进入长江水下三角洲以及浙闽沿岸尚存在争议,表层沉积物中的矿物组合未发现明显的黄河源信号^[7-8];对采自浙闽泥质区中部的岩芯记录研究没有发现黄河源信号^[9],但是在采自长江水下三角洲的沉积物岩芯中显示了 540 aBP 以来黄河物质影响到该区^[10]。本次研究表明来自苏北废黄河的再悬浮物质可以通过苏北沿岸流进入长江口,并继续向南影响到浙闽沿岸泥质区北部。

4 结论

(1) 长江口及内陆架海域黏土矿物由蒙皂石

族、伊利石族、高岭石族和绿泥石族组成。其中,伊利石族仅出现伊利石,包含 2M1、2M2 两个多型,以 2M1 型伊利石为主;高岭石族出现高岭石、珍珠陶土 2 种,长江来源的沉积物珍珠陶土含量相对偏多;绿泥石族包括斜绿泥石、弹性绿泥石 2 种,斜绿泥石占绝对优势。

(2) 黏土粒级中碎屑矿物种类丰富,主要有石英、钾长石、斜长石、白云石、铁白云石、方解石以及硬石膏等。

(3) 依据黏土矿物、黏土粒级非黏土空间分布差异,把长江口及东海内陆架划分为 2 个物源区:长江口及内陆架北部物源区、内陆架南部物源区,除受长江物质影响外,前者受废黄河物质影响,后者受浙闽中小河流物质影响。

参考文献 (References)

- [1] 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. [FAN Dejiang, YANG Zuosheng, MAO Deng, et al. Clay minerals and geochemistry of the sediments from the Yangtze and Yellow Rivers[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2001, 21(4): 7-12.]
- [2] 范德江, 杨作升, 王文正. 长江、黄河沉积物中碳酸盐组成及差异 [J]. 自然科学进展, 2002, 12(1): 60-64. [FAN Dejiang, YANG Zuosheng, WANG Wenzheng. Carbonate composition and differences in sediments of the Yangtze and Yellow Rivers[J]. Progress in Natural Science, 2002, 12(1): 60-64.]
- [3] 朱凤冠, 李秀珠, 高水土. 东海大陆架沉积物中粘土矿物的研究 [J]. 东海海洋, 1988, 6(1): 40-51. [ZHU Fengguan, LI Xiuzhu, GAO Shuitu. Research of clay minerals of sediments on the continental shelf

- of the East China Sea[J]. *Donghai Marine Science*, 1988, 6(1): 40-51.]
- [4] 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. [YANG Zuosheng. Mineralogical assemblages and chemical characteristics of clays from sediments of the Huanghe, Changjiang, Zhujiang Rivers and their relationship to the climate environment in their sediment source areas[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1988, 19(4): 336-346.]
- [5] 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 Yuhui, LIU Jian, ZHANG Junqiang, et al. Comparative researches on the provenance indicators of Huaihe River, Yangtze River and Yellow River sediments[J]. *Quaternary Sciences*, 2020, 40(3): 837-850.]
- [6] 李安春, 张凯棣. 东海内陆架泥质沉积体研究进展 [J]. *海洋与湖沼*, 2020, 51(4): 705-727. [LI Anchun, ZHANG Kaidi. Research progress of mud wedge in the inner continental shelf of the East China Sea[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2020, 51(4): 705-727.]
- [7] 王昆山, 王国庆, 蔡善武, 等. 长江水下三角洲沉积物的重矿物分布及组合 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2007, 27(1): 7-12. [WANG Kunshan, WANG Guoqing, CAI Shanwu, et al. Heavy mineral characteristics of surface sediments in the subaqueous Yangtze River delta[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2007, 27(1): 7-12.]
- [8] 张凯棣, 李安春, 董江, 等. 东海表层沉积物碎屑矿物组合分布特征及其物源环境指示 [J]. *沉积学报*, 2016, 34(5): 902-911. [ZHANG Kaidi, LI Anchun, DONG Jiang, et al. Detrital mineral distributions in surface sediments of the East China Sea: implications for sediment provenance and sedimentary environment[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2016, 34(5): 902-911.]
- [9] 徐方建, 李安春, 李铁刚, 等. 中全新世以来东海内陆架泥质沉积物来源 [J]. *中国石油大学学报:自然科学版*, 2011, 35(1): 1-6,12. [XU Fangjian, LI Anchun, LI Tiegang, et al. Provenance of mud sediments in the inner shelf of East China Sea since mid-Holocene[J]. *Journal of China University of Petroleum*, 2011, 35(1): 1-6,12.]
- [10] Liu J, Saito Y, Kong X H, et al. Sedimentary record of environmental evolution off the Yangtze River estuary, East China Sea, during the last ~13,000 years, with special reference to the influence of the Yellow River on the Yangtze River delta during the last 600 years[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29(17-18): 2424-2438.
- [11] 李佩玉. X 射线鉴定绿泥石方法及其意义 [J]. *中国地质科学院南京地质矿产研究所所刊*, 1987, 8(4): 14-23. [LI Peiyu. Discussion on some problems of chlorite in X-ray diffraction[J]. *Bulletin Nanjing Institute of Geology and Mineral Resources Chinese Academy of Geological Sciences*, 1987, 8(4): 14-23.]
- [12] 国家能源局. SY/T 5163-2010 沉积岩中黏土矿物和常见非黏土矿物 X 衍射分析方法 [S]. 北京: 石油工业出版社, 2010: 1-37. [National Energy Administration. SY/T 5163-2010 Analysis method for clay minerals and ordinary non-clay minerals in sedimentary rocks by the X-ray diffraction[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010: 1-37.]
- [13] 张乃娴, 傅景春. 用 X 射线衍射仪定量分析粘土矿物的实验研究 [J]. *石油勘探与开发*, 1980(6): 12-19,33. [ZHANG Naixian, FU Jingchun. Experimental study on quantitative analysis of clay minerals by X-ray diffractometer[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1980(6): 12-19,33.]
- [14] Huff W D. X-ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals[J]. *Clays and Clay Minerals*, 1990, 38(4): 448.
- [15] 陈丽蓉, 申顺喜, 徐文强, 等. 中国海的碎屑矿物组合及其分布模式的探讨 [J]. *沉积学报*, 1986, 4(3): 87-96. [CHEN Lirong, SHEN Shunxi, XU Wenqiang, et al. An approach to the detrital assemblages and their distribution patterns in the sediments of the China sea[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1986, 4(3): 87-96.]
- [16] 肖尚斌, 李安春, 陈木宏, 等. 近 8 ka 东亚冬季风变化的东海内陆架泥质沉积记录 [J]. *地球科学-中国地质大学学报*, 2005, 30(5): 573-581. [XIAO Shangbin, LI Anchun, CHEN Muhong, et al. Recent 8 ka mud records of the East Asian Winter monsoon from the inner shelf of the East China Sea[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2005, 30(5): 573-581.]
- [17] 郭志刚, 杨作升, 范德江, 等. 长江口泥质区的季节性沉积效应 [J]. *地理学报*, 2003, 58(4): 591-597. [GUO Zhigang, YANG Zuosheng, FAN Dejiang, et al. Seasonal sedimentary effect on the Changjiang estuary mud area[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(4): 591-597.]
- [18] 杨灿. 浙闽泥质区沉积物相关物源和粒径特征分析 [D]. 厦门大学硕士学位论文, 2019. [YANG Can. Recent changes in detrital supply and organic matter burial inferred from elemental and isotopic geochemistry of date short sediment cores from the Changjiang distal mud belt, East China sea[D]. Master Dissertation of Xiamen University, 2019.]
- [19] 丁大林, 张训华, 于俊杰, 等. 浙闽泥质区全新世物源和古气候演化研究进展 [J]. *吉林大学学报:地球科学版*, 2019, 49(1): 178-195. [DING Dalin, ZHANG Xunhua, YU Junjie, et al. Progress in sedimentary sources and palaeoclimate evolution in Zhejiang-Fujian mud area in Holocene[J]. *Journal of Jilin University:Earth Science Edition*, 2019, 49(1): 178-195.]
- [20] Liu J P, Xu K H, Li A C, et al. Flux and fate of Yangtze River sediment delivered to the East China Sea[J]. *Geomorphology*, 2007, 85(3-4): 208-224.
- [21] Yang Z, Wang H, Saito Y, et al. Dam impacts on the Changjiang (Yangtze) River sediment discharge to the sea: the past 55 years and after the Three Gorges Dam[J]. *Water Resources Research*, 2006, 42(4): W04407.
- [22] 石学法, 刘升发, 乔淑卿, 等. 东海闽浙沿岸泥质区沉积特征与古环境记录 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2010, 30(4): 19-30. [SHI Xuefa, LIU Shengfa, QIAO Shuqing, et al. Depositional features and paleoenvironmental records of the mud deposits in Min-Zhe coastal mud area, East China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2010, 30(4): 19-30.]
- [23] 董江. 末次盛冰期以来东海内陆架沉积物来源及环境记录 [D]. 中国科学院大学(中国科学院海洋研究所)博士学位论文, 2018. [DONG Jiang. Sediment provenance and environmental records on the inner shelf of the East China Sea since the Last Glaciation Maximum[D]. Doctor Dissertation of Institute of Oceanography, Chinese Academy of Sciences, 2018.]
- [24] 肖尚斌. 东海内陆架泥质沉积的古环境记录 [D]. 中国科学院研究生院(海洋研究所)博士学位论文, 2004. [XIAO Shangbin. Record on paleoenvironmental from mud in the inner shelf of the East China Sea[D]. Doctor Dissertation of Graduate School of Chinese Academy

- of Sciences (Institute of Oceanography), 2004.]
- [25] 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. [YANG Shouye, YIN Ping. Sediment source-to-sink processes of small mountainous rivers under the impacts of natural environmental changes and human activities[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2018, 38(1): 1-10.]
- [26] 王亮, 范德江, 李巍然, 等. 东海内陆架泥质区百年来黏土矿物组成变化及其环境意义 [J]. 海洋学报, 2015, 37(5): 87-100. [WANG Liang, FAN Dejiang, LI Weiran, et al. The variation of clay minerals contents on the inner shelf of the East China Sea in the last one hundred years and its environmental implication[J]. Haiyang Xuebao, 2015, 37(5): 87-100.]
- [27] 周晓静, 李安春, 万世明, 等. 东海陆架表层沉积物粘土矿物组分分布特征及来源 [J]. 海洋与湖沼, 2010, 41(5): 667-675. [ZHOU Xiaojing, LI Anchun, WAN Shimeng, et al. Clay minerals in surficial sediments of the East China sea shelf: distribution and provenance[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2010, 41(5): 667-675.]
- [28] 肖尚斌, 李安春, 刘卫国, 等. 阿拉善沿岸泥质沉积的物源分析 [J]. 自然科学进展, 2009, 19(2): 185-191. [XIAO Shangbin, LI Anchun, LIU Weiguo, et al. Source analysis of muddy sediments along the Fujian-Zhejiang coast[J]. *Progress in Natural Science*, 2009, 19(2): 185-191.]
- [29] Doeke E. Intertidal Deposits: River Mouths, Tidal Flats, and Coastal Lagoons[M]. London: CRC Press: 2019.
- [30] Liu J P, Li A C, Xu K H, et al. Sedimentary features of the Yangtze River-derived along-shelf clinoform deposit in the East China Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 2006, 26(17-18): 2141-2156.
- [31] 孙效功, 方明, 黄伟. 黄、东海陆架区悬浮体输运的时空变化规律 [J]. 海洋与湖沼, 2000, 31(6): 581-587. [SUN Xiaogong, FANG Ming, HUANG Wei. Spatial and temporal variations in suspended particulate matter transport on the Yellow and East China Sea shelf[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2000, 31(6): 581-587.]
- [32] 杨作升, 郭志刚, 王兆祥, 等. 黄东海陆架悬漂体向其东部深海区输送的宏观格局 [J]. 海洋学报, 1992, 14(2): 81-90. [YANG Zuosheng, GUO Zhigang, WANG Zhaoxiang, et al. Macroscopic pattern of transport of suspended bodies from the Yellow Sea and East China Sea shelf to the eastern deep-sea region[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1992, 14(2): 81-90.]
- [33] Hao Y C, Guo Z G, Fan D J. High-resolution sedimentary record of lead in the coastal mud of the East China Sea in the past one hundred and fifty years[J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 2006, 25(S1): 13.
- [34] 秦蕴珊. 东海地质 [M]. 北京: 科学出版社, 1987: 1-286. [QIN Yunshan. *Geology of the East China Sea*[M]. Beijing: Science Press, 1987: 1-286.]
- [35] Qiao S Q, Shi X F, Wang G Q, et al. Sediment accumulation and budget in the Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea[J]. *Marine Geology*, 2017, 390: 270-281.
- [36] 赵德博, 万世明, 沈兴艳, 等. 海洋沉积物中黏土矿物的两种提取方法的对比 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2015, 35(5): 173-181. [ZHAO Debo, WAN Shimeng, SHEN Xingyan, et al. A discussion on methodology to extract clay minerals from marine sediments[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2015, 35(5): 173-181.]
- [37] 南京大学地质学矿物岩石学教研室. 粉晶 X 射线物相分析 [M]. 北京: 地质出版社, 1980. [Teaching and Research Office of Geology, Mineral and Petrology at Nanjing University. *Powder X-Ray Phase Analysis one Thousand Nine Hundred and Seventy-Eight*[M]. Beijing: Geology Press, 1980.]
- [38] Biscaye P E. Mineralogy and sedimentation of recent deep-sea clay in the Atlantic Ocean and adjacent seas and oceans[J]. *GSA Bulletin*, 1965, 76(7): 803-832.
- [39] Levinson A A. Studies in the mica group: polymorphism among illites and hydrous micas[J]. *American Mineralogist*, 1955, 40(1-2): 41-49.
- [40] 张国藩. 4.7ka 以来东海内陆架泥质区南部沉积学特征及物源环境指示意义 [D]. 中国地质大学 (北京) 硕士学位论文, 2018. [ZHANG Guofan. The characteristics and provenances of sediments in the inner shelf of the East China Sea: constraints on the index of paleoenvironment since 4.7ka[D]. Master Dissertation of China University of Geosciences (Beijing), 2018.]
- [41] 张杰. 东海内外大陆架泥质区 S05-2 孔沉积物 4.9 ka 以来沉积特征、物源指示及气候响应 [D]. 中国地质大学 (北京) 硕士学位论文, 2019. [ZHANG Jie. Sedimentary characteristics, provenance indication and climate response of Core S05-2 sediments in the mud area of inner shelf in the East China Sea since 4.9 Ka[D]. Master Dissertation of China University of Geosciences (Beijing), 2019.]