

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.046>



# 东海东北部海域表层沉积物黏土矿物来源及输运

黄龙<sup>1,2</sup>, 王中波<sup>1,2</sup>, 耿威<sup>1,2</sup>, 张勇<sup>1,2</sup>, 王明健<sup>1,2\*</sup>

1. 青岛海洋地质研究所, 自然资源部天然气水合物重点实验室, 山东青岛 266071
2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室, 海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 山东青岛 266071

**摘要:** 利用 X 射线衍射, 对东海东北部海域 80 个表层沉积物样品进行黏土矿物的相对含量分析. 结果表明: 东海东北部海域表层沉积物黏土矿物中伊利石 (65.1%) 含量最高, 其次为绿泥石 (26.6%)、高岭石 (8.9%) 和蒙皂石 (4.3%); 矿物组合中伊利石—绿泥石—高岭石—蒙皂石型占绝对优势, 伊利石—绿泥石—高岭石型较少. 由外陆架至冲绳海槽, 伊利石含量分布呈低—高—低—高; 绿泥石呈低—高—低; 高岭石分布趋势明显异于伊利石和绿泥石, 含量值分布出现由高到低的趋势; 蒙皂石在个别区域缺失, 高值区呈斑块状分布在水深小于 100 m 的外陆架. 快速聚类分析显示, 黏土矿物可分为“类长江”、“类黄河”和“类台湾”3 种类型, 呈 4 个区域相间展布. “类黄河”型黏土矿物主要由黄海沿岸流将黄河、废黄河等物质再悬浮搬运而来, 分布于 29.5°N 以北、127°E 以西的外陆架区, 并未越过东海外陆架进入冲绳海槽. 外陆架区“类长江”型黏土矿物主要为低海平面时期古长江物质, 并混有少量现代长江源悬浮物质; 冲绳海槽区“类长江”型黏土矿物主要来自低海平面时期古长江物质. “类台湾”型黏土矿物主要由黑潮控制, 由台湾经冲绳海槽南部搬运而来, 沿陆坡附近沉积.

**关键词:** 东海东北部; 表层沉积物; 黏土矿物; 物源; 输运; 海洋地质.

中图分类号: P736.2

文章编号: 1000-2383(2020)07-2722-13

收稿日期: 2020-03-11

## Sources and Transport of Clay Minerals in Surface Sediments of the Northeastern East China Sea

Huang Long<sup>1,2</sup>, Wang Zhongbo<sup>1,2</sup>, Geng Wei<sup>1,2</sup>, Zhang Yong<sup>1,2</sup>, Wang Mingjian<sup>1,2\*</sup>

1. Key Laboratory of Gas Hydrate, Ministry of Natural Resources, Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China
2. Key Laboratory of Coastal Wetland Biogeosciences, China Geological Survey, Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China

**Abstract:** The relative contents of clay minerals in 80 surface sediment samples were analyzed by X-ray diffraction. The results showed that the content of illite (65.1%) was the highest in the surface sediment clay minerals in the northeastern part of the east China sea, followed by chlorite (26.6%), kaolinite (8.9%) and smectite (4.3%). In mineral assemblages, illite-chlorite-kaolinite-smectite type is dominant, while illite-chlorite-kaolinite type is less. From the outer shelf to Okinawa Trough, the distribution of illite content was low-high-low-high. Chlorite distribution was low-high-low. The distribution trend of kaolinite is obviously different from that of illite and chlorite. The smectite was absent in some areas and the high value area was patchy in the outer shelf with water depth less than 100 meters. Fast clustering analysis shows that clay minerals can be divided into three types: Yangtze River-like, Yellow River-like and Taiwan-like, which covered in four regions. The "Yellow River-like" clay minerals are mainly transported from the Yellow River and the abandoned Yellow River by the coastal current of the Yellow Sea. They are distributed in the outer shelf area north of 29.5°N and west of 127°E, and don't cross the East China Sea shelf into the Okinawa Trough. The

**基金项目:** 国家海洋地质专项项目 (Nos. DD20160137, DD20190377, DD20190205, DD20190208, GZH002-06, GHZ201400201); 国家自然科学基金项目 (Nos. 41606079, 41876059); 山东省博士后创新项目 (No. 201201001).

**作者简介:** 黄龙 (1983—), 男, 高级工程师, 从事海洋地质研究. ORCID: 0000-0002-2540-2896. E-mail: huanglong0919@126.com

\* **通讯作者:** 王明健, ORCID: 0000-0003-2250-7200. E-mail: wangmingjian0328@qq.com

**引用格式:** 黄龙, 2020. 东海东北部海域表层沉积物黏土矿物来源及输运. 地球科学, 45(7):2722-2734.

"Yangtze-like" clay minerals covered in the outer continental shelf were mainly paleo-Yangtze materials in the low sea level period, mixed with a small amount of suspended materials from the modern Yangtze River. The "Yangtze-like" clay minerals covered in the Okinawa Trough were mainly derived from the paleo-Yangtze materials in the low sea level period. The "Taiwan-like" clay minerals are mainly controlled by the Kuroshio, which are transported from Taiwan through the southern Okinawa Trough and deposited along the continental slope.

**Key words:** Northeast East China Sea; surface sediments; clay minerals; source; transport; marine geology.

## 0 引言

黏土矿物是气候、物源、水介质条件受沉积、成岩作用综合影响的产物,分布于地表各类沉积物内,海洋沉积物是其重要的组成部分,在浅海沉积物总量中占30%以上(Petschick *et al.*, 1996).黏土矿物对地质过程和环境演化的响应敏感,其颗粒细微,能够被水流搬运到距离河口很远的地方,尤其是能被海流再悬浮搬运至远海,可以作为一种追溯物质搬运路径的良好指标(Zöllmer and Irion, 1993).通过分析海洋沉积物中的黏土矿物相对含量等数据特征,在南海北部、台湾海峡和辽东湾等海域均有效识别了沉积物中细颗粒物质的来源,并示踪了洋流搬运路径(刘志飞等, 2003;徐勇航等, 2013; Dou *et al.*, 2014).

东海作为西太平洋边缘最广阔的陆架边缘海,是连接陆地和深海大洋的关键区域(图1),接收了大量来自陆源的沉积物质.长江和黄河作为世界上最大的两条河流,分别向东海输送了约 $5 \times 10^8$  t/a和 $1 \times 10^9$  t/a的沉积物(Milliman and Meade, 1983).此外,东海陆架的沉积物部分来自台湾河流(徐勇航等, 2013).黏土矿物作为东海细颗粒沉积物的最重要组分,其类型多样,分布广泛,是各种地质作用信息的主要载体,对黏土矿物类型、共生组合及其分布特征等方面的研究可提供其物源、气候环境及其输运模式等方面的重要信息.前人对东海黏土矿物分布和物源进行了大量研究(朱凤冠等, 1988;何良彪, 1989;李国刚, 1990;周晓静等, 2010).朱凤冠等(1988)认为东海沉积物的黏土矿物特征主要受入海物源的控制和海区水动力作用的支配.东海陆架沉积物来自我国大陆黄河、淮河、长江等大河携带入海的巨量泥沙,由于海流的携带不断向外陆架搬运扩散并沉积.北部主要受黄河、废黄河、淮河物质影响,南部主要受古今长江入海物质影响,海槽区尚有部分火山喷发物为来源的黏土矿物.长江入海细颗粒物向东和西南运移扩散,黄河入海细颗粒物

向东进入北黄海,经南黄海西部进入东海(何良彪, 1989).“类黄河”源的黏土矿物主要分布在陆架东北部和东部,“类长江”源主要分布在中西部(周晓静等, 2010).过往的研究工作主要集中在东海台湾海峡、陆架区或者冲绳海槽等单一地形区,针对横跨外陆架—陆坡—冲绳海槽不同地形单元的表层沉积物黏土矿物分布规律及来源的研究较少,源自黄河的细颗粒沉积物是否越过东海外陆架进入冲绳海槽尚不清楚,对黏土矿物在外陆架—陆坡—冲绳海槽区的运移路径的研究略显欠缺.本研究区位于东海东北部外陆架至冲绳海槽的过渡区,横跨陆坡区,选择了80个表层沉积物样品(图)进行黏土矿物分析,主要目的是:(1)研究东海外陆架至冲绳海槽区表层沉积物中黏土矿物的分布特征及物质来源;(2)判别黏土矿物的海洋环流输运路径.

东海东北部海域东西横跨东海外陆架、陆坡和冲绳海槽,南北衔接黄海和东海(图1a),东海外陆架是指水深50~200 m的区域,地形平坦;陆坡区较窄,局部位置发育海底峡谷(罗伟东等, 2018;孙美静等, 2018);冲绳海槽南深北浅,北部水深一般在1 000 m.作为枢纽性地理位置,受海流分布的影响较大,该海域的海洋环流主要有黑潮流、台湾暖流、黄海沿岸流、黄海暖流和长江冲淡水等,受季风、地形、河流入海、外海水入侵、潮汐和波浪等影响,其结构复杂.黑潮流是东海最显著的海流,流速较强,常年沿东海陆坡朝北流动,存在夏强冬弱的显著周期性(Huh and Su, 1999).台湾暖流是黑潮在进入东海前的分支海流,经台湾海峡沿50 m等深线附近北上,在 $28.5^{\circ}\text{N}$ 附近分成两支,一支转向东流至陆坡,一支继续北上至长江口海域.黄海沿岸流同样受季风的影响,冬季向南流动, $32^{\circ}\text{N}$ 附近转向东南流至 $30^{\circ}\text{N}$ 附近(孙湘平, 2006),夏季以极弱流速向北流动.黄海暖流被认为是黑潮从东海进入黄海分支海流,沿黄海海槽终年北上,流速较弱.长江冲淡水夏强冬弱,夏季出口门后偏东北向,高径流量时淡水舌向东可达 $124.5^{\circ}\text{E}$ ,冬季出口门后转向南,

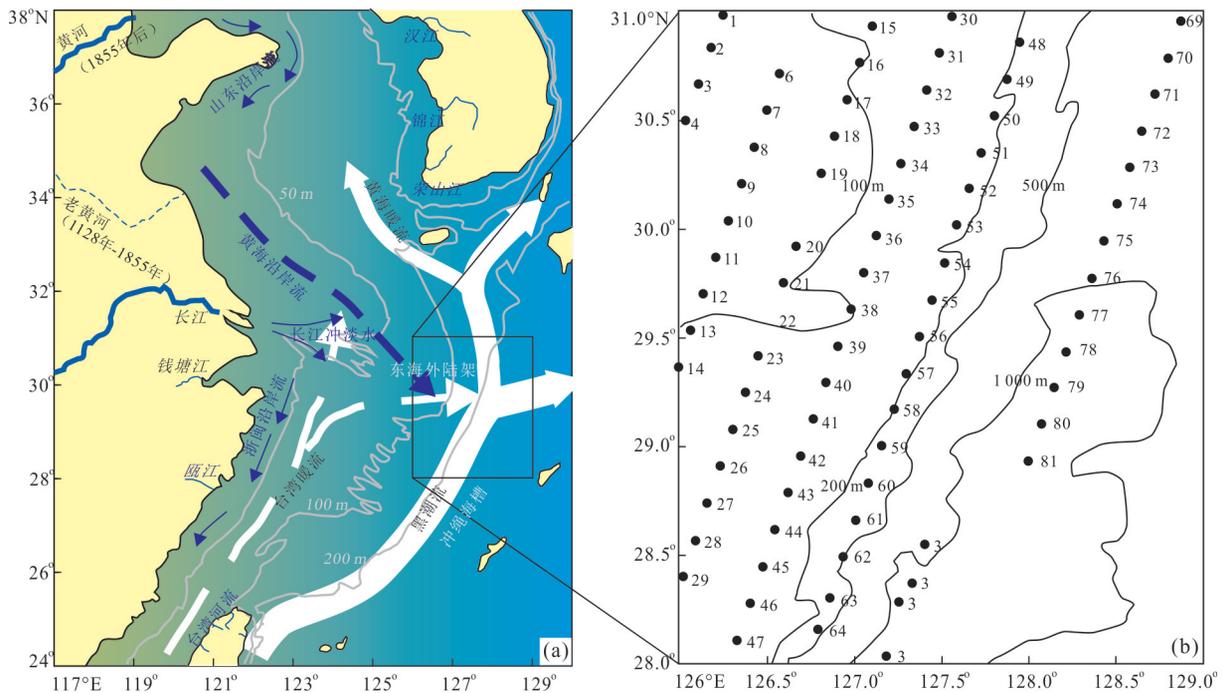


图1 研究区表层沉积物站位与周边主要河流分布(海洋环流据 Huh and Su, 1999)

Fig.1 Locations of surface sediments and distribution of main rivers around the study area(modified from Huh and Su, 1999)

水量明显减少,向东可影响至 123°E(叶菁等, 2007)。

## 1 材料和方法

本文使用的 80 件东海东北部海域表层沉积物样品,由中国海洋大学“海大号”海洋调查船,于 2014 年 6~8 月东海海洋地质调查航次中使用箱式采样器取得,采样站位(见图 1b)。

样品粒度分析由自然资源部青岛海洋地质研究所测试中心完成。测试所用仪器为英国 Malvern 公司产的 Mastersizer2000 型激光粒度仪。测量范围为 0.02~2 000  $\mu\text{m}$ ,重复测量的相对误差小于 2%。东海外陆架部分海域表层沉积物以砂质为主(图 2),但是在全部表层样品中均含有细颗粒沉积物。黏土粒级组分(粒径  $< 4 \mu\text{m}$ ,图 2)含量为 5.2%~31.9%,满足黏土矿物分析的需求。

由自然资源部青岛海洋地质研究所测试中心完成所有样品 X 射线衍射分析鉴定。对测定的每个样品在依次加入 10% 的醋酸和 10% 的双氧水后,再用蒸馏水水洗 2 次。提取样品  $< 2 \mu\text{m}$  的黏土颗粒,并将其制成定向片放置到装有乙二醇的干燥皿内,随后置于 60 °C 的烘箱中蒸样 12 h。测试仪器是日本理学 D/Max-RA 型高功率转靶 X 射线衍射仪,其相关实验参数如下:CuK $\alpha$  辐射,管电压 40 kV,管

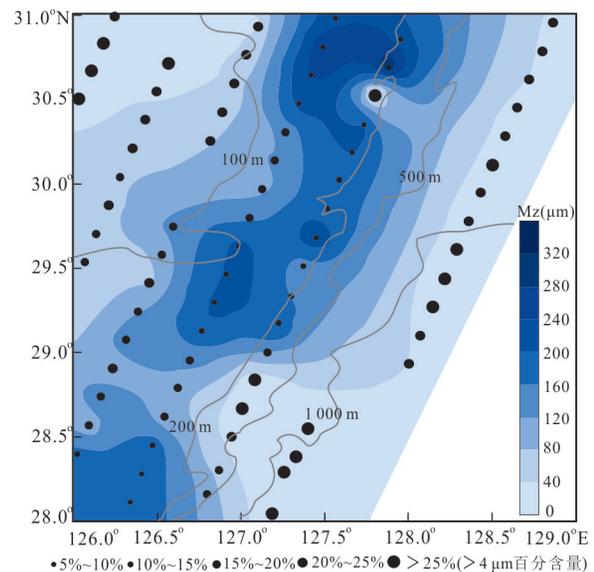


图2 东海东北部海域表层沉积物平均粒径趋势和粘土粒级含量分布

Fig.2 Distribution of clay components and mean grain size of surface sediments in the northeast East China Sea

电流 40 mA,扫描范围( $2\theta$ ) $3^{\circ}$ ~ $30^{\circ}$ ,扫描步长( $2\theta$ ) $0.02^{\circ}$ 。粘土矿物的半定量计算使用 Jade5.5 软件在 X 射线衍射分析的乙二醇曲线上进行,粘土矿物的相对含量主要使用(001)晶面衍射峰的面积比。4 种粘土矿物蒙皂石、伊利石、高岭石和绿泥石的相对含量计算按 Biscaye(1965)的方法,17 $\text{\AA}$  衍射峰面积  $\times$

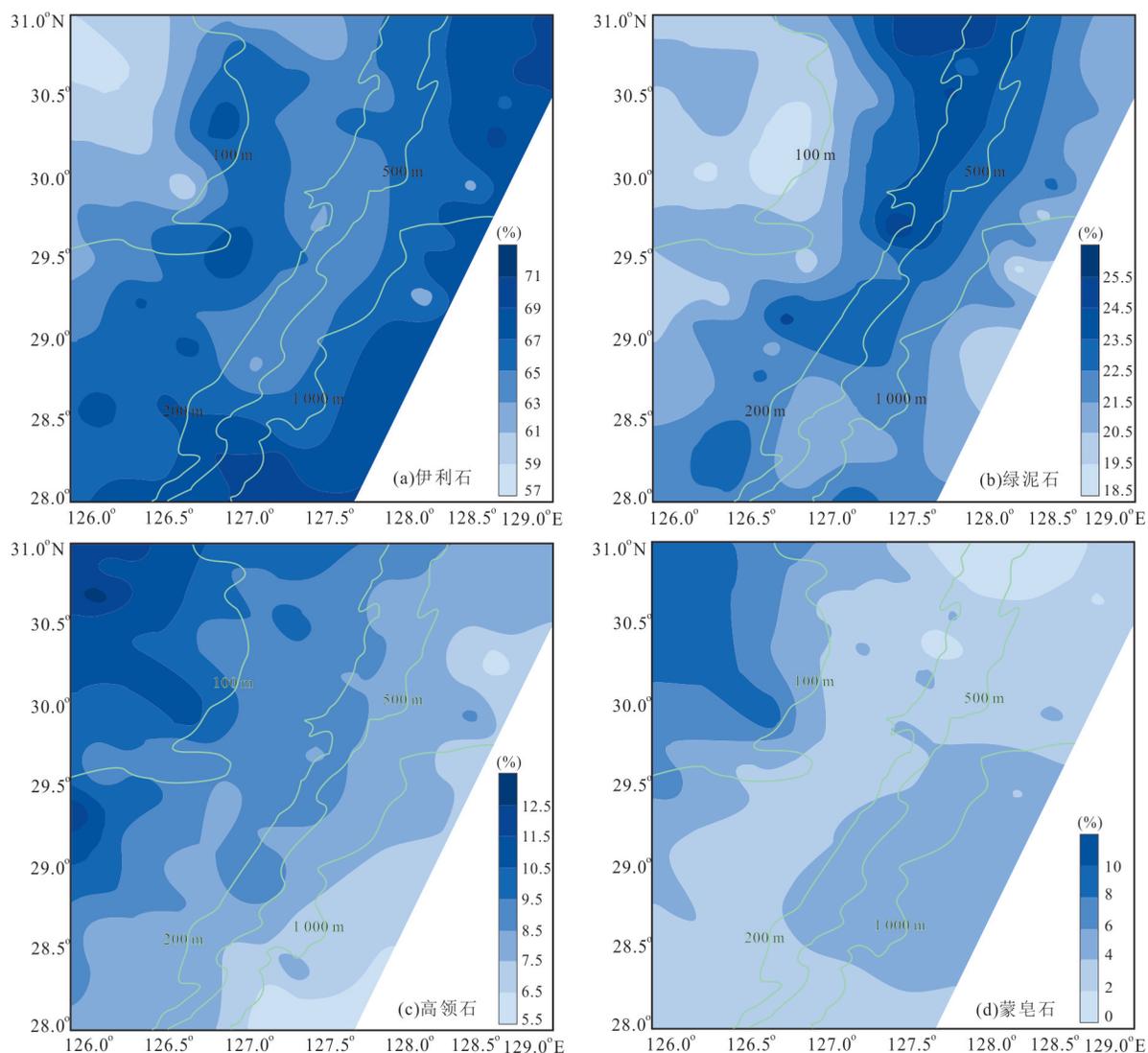


图3 东海东北部海域表层沉积物黏土矿物分布

Fig.3 Distribution of clay minerals in surface sediments of the northeast East China Sea

1为蒙皂石的权重强度;10Å衍射峰面积×4为伊利石的权重强度;7Å衍射峰面积×2为高岭石和绿泥石合计的权重强度,两者的含量由绿泥石的(004)(3.54Å)和高岭石的(002)(3.58Å)的衍射峰面积比值求出,4种黏土矿物的总含量校正为100%后分别求得各自含量.不同样品的制片、扫描速度在XRD测试及半定量分析中均会引起误差,这种误差估值约为5%(Dou *et al.*, 2010).所有样品在相同实验室和相同条件下测试完成.

鉴于周晓静等(2010)在长江口及东海陆架海域使用快速聚类分析方法已成功地判别了黏土矿物来源,本文中同样根据沉积物中黏土矿物种类的含量特征,选择伊利石、绿泥石、高岭石和蒙皂石的相对百分含量为因变量参数,采用SPSS17.0软件,对80个黏土矿物数据进行快速聚类分析,参照东海

陆架区以往的样品聚类分析结果,“类黄河”型、“类长江”型和“类台湾”型,聚类数预设定为3类.聚类方法选择迭代分类,即先定初始类别中心点,而后按K均值算法作迭代分类.

## 2 研究结果

采用上述XRD数据处理方法,得到东海东北部海域80个表层沉积物黏土矿物相对含量数据(见表1).结果表明,黏土矿物主要为伊利石、绿泥石、高岭石和蒙皂石,含量最高的伊利石,占一半以上,其次为绿泥石,再次为高岭石和蒙皂石.其结果与东海大陆架的黏土矿物分布规律相吻合(朱凤冠等, 1988).将黏土矿物相对含量进行统计分析,80个样品大致可以分为2种矿物组合类型:(I型)伊利石—

表 1 东海东北部与周边主要河流及陆架表层沉积物黏土矿物相对含量(%)

Table 1 Relative content of clay minerals in surface sediments of main rivers and continental shelf in northeastern East China Sea

| 样品 | 纬度(°)  | 经度(°) | 分类 | 伊利石  | 绿泥石  | 高岭石  | 蒙皂石 | 伊利石+<br>高岭石 | 数据来源 |
|----|--------|-------|----|------|------|------|-----|-------------|------|
| 1  | 126.25 | 31.00 | H  | 59.9 | 19.5 | 12.2 | 8.5 | 72.1        | 本文   |
| 2  | 126.18 | 30.84 | H  | 59.3 | 20.3 | 11.0 | 9.3 | 70.3        | 本文   |
| 3  | 126.11 | 30.67 | H  | 57.0 | 21.7 | 13.0 | 8.3 | 70.0        | 本文   |
| 4  | 126.04 | 30.50 | H  | 60.0 | 20.2 | 10.9 | 8.9 | 70.9        | 本文   |
| 6  | 126.57 | 30.72 | H  | 60.8 | 20.6 | 10.9 | 7.7 | 71.7        | 本文   |
| 7  | 126.50 | 30.55 | H  | 60.5 | 20.7 | 11.3 | 7.6 | 71.8        | 本文   |
| 8  | 126.42 | 30.38 | H  | 60.7 | 21.0 | 9.9  | 8.4 | 70.6        | 本文   |
| 9  | 126.35 | 30.21 | H  | 60.0 | 20.4 | 11.2 | 8.4 | 71.2        | 本文   |
| 10 | 126.21 | 29.87 | H  | 62.4 | 20.0 | 10.4 | 7.2 | 72.8        | 本文   |
| 11 | 126.28 | 30.04 | H  | 63.2 | 19.2 | 10.0 | 7.7 | 73.2        | 本文   |
| 12 | 126.14 | 29.70 | T  | 64.8 | 21.4 | 9.0  | 4.9 | 73.8        | 本文   |
| 13 | 126.06 | 29.53 | H  | 62.5 | 20.8 | 9.4  | 7.3 | 71.9        | 本文   |
| 14 | 126.00 | 29.36 | H  | 63.1 | 19.6 | 12.2 | 5.1 | 75.3        | 本文   |
| 15 | 127.10 | 30.93 | T  | 62.5 | 21.7 | 9.8  | 6.0 | 72.3        | 本文   |
| 16 | 127.03 | 30.76 | C  | 66.3 | 20.2 | 9.2  | 4.2 | 75.5        | 本文   |
| 17 | 126.96 | 30.59 | C  | 65.9 | 20.1 | 10   | 4.0 | 75.9        | 本文   |
| 18 | 126.89 | 30.43 | C  | 67.4 | 19.4 | 8.3  | 4.9 | 75.7        | 本文   |
| 19 | 126.82 | 30.26 | C  | 67.4 | 18.8 | 9.7  | 4.2 | 77.1        | 本文   |
| 20 | 126.67 | 29.92 | H  | 59.4 | 19.2 | 11.5 | 9.9 | 70.9        | 本文   |
| 21 | 126.60 | 29.75 | T  | 64.7 | 21.7 | 8.4  | 5.1 | 73.1        | 本文   |
| 22 | 126.53 | 29.58 | C  | 65.9 | 21.2 | 9.4  | 3.6 | 75.3        | 本文   |
| 23 | 126.45 | 29.41 | T  | 64.0 | 21.2 | 9.9  | 4.9 | 73.9        | 本文   |
| 24 | 126.38 | 29.24 | C  | 67.4 | 20.0 | 9.0  | 3.6 | 76.4        | 本文   |
| 25 | 126.31 | 29.07 | T  | 65.7 | 22.3 | 9.2  | 2.7 | 74.9        | 本文   |
| 26 | 126.24 | 28.91 | T  | 65.4 | 21.2 | 9.8  | 3.7 | 75.2        | 本文   |
| 27 | 126.16 | 28.74 | C  | 66.7 | 20.6 | 8.6  | 4.4 | 75.3        | 本文   |
| 28 | 126.09 | 28.57 | C  | 67.7 | 21.2 | 8.2  | 2.9 | 75.9        | 本文   |
| 29 | 126.02 | 28.40 | C  | 66.3 | 22.0 | 8.7  | 2.9 | 75.0        | 本文   |
| 30 | 127.56 | 30.98 | T  | 62.5 | 25.2 | 9.9  | 2.3 | 72.4        | 本文   |
| 31 | 127.49 | 30.81 | T  | 60.7 | 25.1 | 9.6  | 4.6 | 70.3        | 本文   |
| 32 | 127.42 | 30.64 | T  | 65.2 | 22.7 | 9.3  | 2.7 | 74.5        | 本文   |
| 33 | 127.34 | 30.47 | T  | 65.0 | 21.4 | 9.8  | 3.8 | 74.8        | 本文   |
| 34 | 127.27 | 30.31 | T  | 64.3 | 22.4 | 9.2  | 4.1 | 73.5        | 本文   |
| 35 | 127.20 | 30.14 | C  | 65.9 | 21.7 | 9.2  | 3.3 | 75.1        | 本文   |
| 36 | 127.13 | 29.97 | C  | 66.6 | 21.4 | 8.9  | 3.1 | 75.5        | 本文   |
| 37 | 127.06 | 29.80 | C  | 66.3 | 20.7 | 9.0  | 3.9 | 75.3        | 本文   |
| 38 | 126.98 | 29.63 | C  | 67.8 | 21.0 | 8.7  | 2.6 | 76.5        | 本文   |
| 39 | 126.91 | 29.46 | C  | 68.0 | 20.0 | 8.4  | 3.6 | 76.4        | 本文   |
| 40 | 126.84 | 29.29 | C  | 66.1 | 22.3 | 8.4  | 3.3 | 74.5        | 本文   |
| 41 | 126.77 | 29.12 | T  | 64.6 | 23.9 | 8.5  | 2.9 | 73.1        | 本文   |
| 42 | 126.69 | 28.95 | C  | 68.1 | 21.0 | 7.9  | 3.0 | 76.0        | 本文   |
| 43 | 126.62 | 28.79 | T  | 64.8 | 22.9 | 8.8  | 3.5 | 73.6        | 本文   |
| 44 | 126.55 | 28.62 | C  | 67.7 | 21.3 | 7.8  | 3.2 | 75.5        | 本文   |
| 45 | 126.48 | 28.45 | T  | 66.0 | 23.1 | 8.4  | 2.5 | 74.4        | 本文   |
| 46 | 126.41 | 28.28 | T  | 65.7 | 23.2 | 8.4  | 2.7 | 74.1        | 本文   |
| 47 | 126.33 | 28.11 | C  | 67.4 | 22.5 | 8.0  | 2.2 | 75.4        | 本文   |

续表1

| 样品      | 纬度(°)  | 经度(°) | 分类 | 伊利石      | 绿泥石      | 高岭石      | 蒙皂石      | 伊利石+<br>高岭石 | 数据来源                      |
|---------|--------|-------|----|----------|----------|----------|----------|-------------|---------------------------|
| 48      | 127.95 | 30.86 | T  | 65.7     | 25.3     | 9.0      | 0        | 74.7        | 本文                        |
| 49      | 127.88 | 30.69 | T  | 65.8     | 23.0     | 8.3      | 3.0      | 74.1        | 本文                        |
| 50      | 127.81 | 30.52 | T  | 62.6     | 24.7     | 8.4      | 4.3      | 71.0        | 本文                        |
| 51      | 127.73 | 30.35 | T  | 66.5     | 24.1     | 9.4      | 0        | 75.9        | 本文                        |
| 52      | 127.66 | 30.19 | T  | 63.4     | 23.6     | 8.3      | 4.7      | 71.7        | 本文                        |
| 53      | 127.59 | 30.02 | T  | 64.3     | 23.5     | 9.1      | 3.2      | 73.4        | 本文                        |
| 54      | 127.52 | 29.85 | T  | 63.0     | 23.8     | 8.7      | 4.4      | 71.7        | 本文                        |
| 55      | 127.45 | 29.68 | T  | 62.8     | 25.6     | 8.4      | 3.2      | 71.2        | 本文                        |
| 56      | 127.37 | 29.51 | C  | 65.7     | 21.2     | 9.4      | 3.7      | 75.1        | 本文                        |
| 57      | 127.30 | 29.34 | T  | 63.9     | 23.0     | 8.9      | 4.2      | 72.8        | 本文                        |
| 58      | 127.23 | 29.17 | T  | 64.0     | 23.0     | 8.2      | 4.7      | 72.2        | 本文                        |
| 59      | 127.16 | 29.00 | T  | 63.5     | 23.2     | 9.3      | 4.0      | 72.8        | 本文                        |
| 60      | 127.08 | 28.83 | T  | 62.6     | 22.3     | 9.0      | 6.1      | 71.6        | 本文                        |
| 61      | 127.01 | 28.66 | C  | 66.1     | 20.3     | 8.0      | 5.7      | 74.1        | 本文                        |
| 62      | 126.94 | 28.50 | C  | 67.2     | 21.5     | 7.3      | 4.1      | 74.5        | 本文                        |
| 63      | 126.87 | 28.30 | C  | 69.2     | 20.4     | 7.8      | 2.6      | 77.0        | 本文                        |
| 64      | 126.80 | 28.16 | C  | 68.2     | 21.2     | 8.2      | 2.5      | 76.4        | 本文                        |
| 65      | 127.40 | 28.55 | C  | 66.2     | 22.6     | 6.5      | 4.7      | 72.7        | 本文                        |
| 66      | 127.33 | 28.38 | C  | 65.7     | 20.7     | 8.4      | 5.3      | 74.1        | 本文                        |
| 67      | 127.26 | 28.29 | C  | 69.8     | 21.4     | 6.1      | 2.7      | 75.9        | 本文                        |
| 68      | 127.19 | 28.04 | C  | 69.5     | 23.1     | 5.8      | 2.6      | 75.3        | 本文                        |
| 69      | 128.87 | 30.96 | C  | 69.2     | 20.7     | 7.6      | 2.5      | 76.8        | 本文                        |
| 70      | 128.80 | 30.79 | C  | 68.8     | 21.0     | 7.5      | 2.7      | 76.3        | 本文                        |
| 71      | 128.73 | 30.62 | C  | 69.5     | 20.5     | 8.1      | 1.8      | 77.6        | 本文                        |
| 72      | 128.65 | 30.45 | C  | 66.4     | 22.0     | 7.9      | 3.7      | 74.3        | 本文                        |
| 73      | 128.58 | 30.28 | C  | 69.4     | 21.3     | 5.9      | 3.4      | 75.3        | 本文                        |
| 74      | 128.51 | 30.11 | C  | 68.6     | 21.3     | 7.0      | 3.1      | 75.6        | 本文                        |
| 75      | 128.44 | 29.94 | T  | 64.2     | 22.8     | 8.8      | 4.3      | 73.0        | 本文                        |
| 76      | 128.37 | 29.78 | C  | 69.3     | 20.1     | 7.3      | 3.2      | 76.6        | 本文                        |
| 77      | 128.29 | 29.61 | C  | 66.1     | 22.1     | 7.1      | 4.8      | 73.2        | 本文                        |
| 78      | 128.22 | 29.44 | C  | 68.9     | 19.1     | 8.3      | 3.8      | 77.2        | 本文                        |
| 79      | 128.15 | 29.27 | T  | 63.9     | 22.3     | 8.1      | 5.8      | 72.0        | 本文                        |
| 80      | 128.07 | 29.10 | C  | 67.7     | 20.6     | 7.1      | 4.6      | 74.8        | 本文                        |
| 81      | 128.00 | 28.93 | C  | 69.3     | 19.5     | 6.9      | 4.3      | 76.2        | 本文                        |
| 标准偏差    |        |       |    | 2.9      | 1.6      | 1.4      | 2.0      | 1.9         | 本文                        |
| 黄河      |        |       |    | 62.0±0.5 | 16.0±2.4 | 10.0±0.8 | 12.0±1.2 | 72.0        | Yang <i>et al.</i> (2003) |
| 黄河      |        |       |    | 62.0     | 12.0     | 10.0     | 16.0     | 72.0        | 杨作升(1988)                 |
| 废黄河     |        |       |    | 63.7     | 8.3      | 7.7      | 20.3     | 71.4        | 梁小龙等(2015)                |
| 黄海西南泥质区 |        |       |    | 70.0     | 7.0      | 7.0      | 16.0     | 77.0        | Wang <i>et al.</i> (1999) |
| 黄海中部泥质区 |        |       |    | 66.0±1.3 | 12.0±0.7 | 10.0±0.5 | 13±1.0   | 76.8        | Park and Khim(1992)       |
| 南黄海     |        |       |    | 62.2     | 9.9      | 12.8     | 15.0     | 75.0        | 蓝先洪等(2011a)               |
| 汉江      |        |       |    | 63.0     | 18.4     | 18.3     | 0.4      | 81.3        | 梁小龙等(2015)                |
| 锦江      |        |       |    | 59.3     | 17.4     | 18.9     | 4.4      | 78.2        | Yang <i>et al.</i> (2003) |
| 荣山江     |        |       |    | 63.9     | 16.8     | 19.2     | 0.1      | 83.1        | Park and Khim(1992)       |
| 长江      |        |       |    | 67.9±0.5 | 12.7±0.3 | 13.9±1.0 | 5.5±0.1  | 81.8        | 梁小龙等(2015)                |
| 长江      |        |       |    | 67.7±0.7 | 12.1±0.9 | 14.3±1.4 | 5.9±0.4  | 82.0        | Ren and Shi(1986)         |
| 长江      |        |       |    | 65.5±2.9 | 15.6±2.6 | 14.5±1.6 | 4.3±1.3  | 80.0        | 何良彪(1989)                 |

续表1

| 样品 | 纬度(°)  | 经度(°) | 分类 | 伊利石      | 绿泥石      | 高岭石     | 蒙皂石     | 伊利石+<br>高岭石 | 数据来源                     |
|----|--------|-------|----|----------|----------|---------|---------|-------------|--------------------------|
|    | 长江口    |       |    | 67.5±3.3 | 18.1±2.4 | 8.7±0.1 | 5.7±1.1 | 76.2        | Xu <i>et al.</i> (2009)  |
|    | 钱塘江    |       |    | 64.4     | 18.8     | 13.8    | 3.4     | 78.2        | Xu <i>et al.</i> (2012)  |
|    | 瓯江河口   |       |    | 64.5     | 17.7     | 14.7    | 2.9     | 79.2        | 梁小龙等(2015)               |
|    | 东海内陆架  |       |    | 68.7     | 16.3     | 10.0    | 5.3     | 78.7        | Liu <i>et al.</i> (2014) |
|    | 台湾西部河流 |       |    | 69.0±1.8 | 30.0±2.3 | 1.0±1.3 | 0±0.1   | 70.0        | 徐勇航等(2013)               |
|    | 台湾西部河流 |       |    | 70.0±0.8 | 29.0±1.3 | 1.0±1.3 | 0±0.1   | 71.0        | 李传顺等(2012)               |
|    | 台湾东部河流 |       |    | 77.0±7.6 | 23.0±4.4 | 0±3.4   | 0±0.1   | 77.0        | Li <i>et al.</i> (2012)  |
|    | 台湾海峡   |       |    | 65.3±2.1 | 23.3±2.2 | 6.5±2.7 | 4.0±2.0 | 71.8        | Xu <i>et al.</i> (2009)  |

注:表中  $n \pm 1$ ,  $n$  为均值, 1 为标准偏差.

绿泥石—高岭石—蒙皂石;(II型)伊利石—绿泥石—高岭石. 其中I型78个,II型2个. 由组合类型来看,黏土矿物分布较一致,但单种黏土矿物的空间分布还是存在较大差异.

### 2.1 伊利石

伊利石相对含量为57.0%~69.8%,平均含量65.2%,标准偏差2.9,黏土矿物中相对含量最高. 由图3a可以看出,伊利石含量整体呈现北东—南西向条带状分布规律,由陆架—海槽方向,含量值分布出现低—高—低—高趋势,低值区位于西北侧陆架区和中东部陆架坡折区. 其中,西北侧陆架区,水深小于100 m,伊利石含量均值最低,略高于60%,最低值57%出现在此区域;东侧海槽区,水深大于500 m,伊利石均值含量最高,最高值69.8%出现在东南侧海槽底部,水深大于1000 m区域.

### 2.2 绿泥石

绿泥石相对含量为18.8%~25.6%,平均含量21.6%,标准偏差1.6,其黏土矿物相对含量仅次于伊利石. 由图3b可以看出,绿泥石含量低值区占据较大面积,整体亦呈现北东—南西向条带状分布规律,由陆架—海槽方向,含量值分布呈低—高—低趋势. 西侧陆架区和东部陆坡至海槽区均为低值区,高值区呈条带状沿200米等深线分布在研究区中部.

### 2.3 高岭石

高岭石相对含量为5.8%~13.0%,平均含量8.9%,标准偏差1.4. 由图3c可以看出,其分布趋势明显异于伊利石和绿泥石,分带性不明显,整体上呈面状连片分布,由陆架—海槽方向,含量值分布出现由高到低的趋势. 西侧较浅水陆架区,含量均值最高,可达11.1%,最高值也分布在此区域,随着海水深度加大,高岭石含量越来越低,东部海槽低

值区,含量均低于8.5%. 这一结果与中国近海高岭石由陆及海逐渐降低的分布规律相一致(李国刚,1990).

### 2.4 蒙皂石

蒙皂石相对含量在黏土矿物中最低,其含量为0~9.9%,平均含量4.3%,标准偏差2.0. 由图3d可以看出蒙皂石在个别区域缺失,低值区面积较大. 整体分布上,高值区主要呈斑块状分布在西北侧水深小于100 m的陆架区,均值达8.0%以上,其余均值较低,个别区域有较高含量值(小于6%)呈斑点分散于海槽区.

## 3 讨论

### 3.1 黏土矿物物源

前人许多研究表明,东海细颗粒沉积物主要是来自陆源河流输入物质. 其中细颗粒沉积物中黏土矿物特征主要受入海物源的控制(朱凤冠,1988). 黏土矿物是一定气候条件下源区母岩风化蚀变的产物,流域源岩的差异决定了东海黏土矿物组成的不同. 晚更新世以来,以黄河、长江为主的源岩流域,其黏土矿物组合类型和含量均未发生明显变化(李玲等,2011).

黄河和废黄河主要流经华北克拉通,处于中纬度地带,气候比较寒冷干旱,化学风化作用弱,流经的黄土高原提供了主要沉积物来源,黄土呈碱性或弱碱性,利于蒙皂石的形成和保存(范德江等,2001). 由表1中可见,黄河和废黄河沉积物黏土矿物除伊利石外,蒙皂石含量12%~23%,远远高于其他河流.

长江沿岸流域源岩类型较为复杂,长江上游的青藏高原源区中—酸性岩浆岩、碳酸盐岩和玄武岩

等在风化作用下形成了大量伊利石(何梦颖等, 2011);中下游主要流经扬子板块,以第四纪松散沉积物、中-酸性花岗岩和古老变质岩等为主,有利于绿泥石和高岭石的形成.因此,长江流域黏土矿物整体上以伊利石为主,均值67.2%(表1),绿泥石和高岭石次之,蒙皂石较少.钱塘江、甌江等浙江沿岸流域主要位于扬子板块,源岩发育类型较齐全,黏土矿物相对含量与长江流域较为相似(表1).

台湾位于太平洋板块与欧亚板块的俯冲碰撞带上,中央山脉的变质岩和海岸山脉的火山岩,在强烈的物理风化作用下形成了大量的伊利石和绿泥石,导致台湾东西部河流均以高含量的伊利石和绿泥石、极低的高岭石和蒙皂石为特征(李传顺等, 2012),尤其是绿泥石含量均值27.3%(表1),远高于其他河流,而蒙皂石含量几乎为零.

朝鲜半岛河流源岩区主要由中生代花岗岩和前寒武纪片麻岩组成(Yang *et al.*, 2003),风化后有利于伊利石的形成,同时伴有部分绿泥石和高岭石,极少生成蒙皂石.

以伊利石、绿泥石、高岭石和蒙皂石相对百分含量为变量参数快速聚类分析(周晓静等, 2010)显示,可将东海东北部海域80个表层沉积物黏土矿物分成3类(表2),其所包括的样本数量分别是29个、38个和13个,无效样本数为零.分别命名为T、C、H.

T类包含29个样品,该类黏土矿物组合以高绿泥石含量一较低蒙皂石含量为突出特征.其中,伊利石含量较其他2类居中,但整体含量偏高,均值达到64.2%,标准偏差1.3;绿泥石含量普遍较高,均值可达23.2%,标准偏差1.3,部分样品中含量超过25%,明显高于其他2类;蒙皂石含量偏低,均值为3.7%,标准偏差1.5,部分样品中已不含蒙皂石组分.

C类包含样品38个,数量最多,几乎接近半数,该类黏土矿物组合以高伊利石含量一低蒙皂石含量为特征.伊利石含量普遍较高,介于65.7%~69.8%,均值高达67.5%,标准偏差1.3,是3类中最高的;而蒙皂石含量最低,均值为3.5%,标准偏差0.9,与T类不同之处在于,虽然蒙皂石含量较低,但不存在含量为零的样品.

H类数量最少,包含13个样品,较其他2类,黏土矿物组合以低伊利石含量一高蒙皂石含量为特征.伊利石含量普遍较低,一般在57.0%~63.2%,

表2 东海东北部海域表层沉积物黏土矿物分类统计

Table 2 Classification and statistics of clay minerals in surface sediments of the northeastern East China Sea

| 类别 | 样品数<br>(个) | 伊利石<br>(%) | 绿泥石<br>(%) | 高岭石<br>(%) | 蒙皂石<br>(%) |
|----|------------|------------|------------|------------|------------|
| T  | 29         | 64.2±1.3   | 23.2±1.3   | 9.0±0.6    | 3.7±1.5    |
| C  | 38         | 67.5±1.3   | 20.9±1.0   | 8.9±1.0    | 3.5±0.9    |
| H  | 13         | 60.7±1.8   | 20.2±0.7   | 11.1±1.0   | 8.0±1.2    |

注:表中 $n\pm 1$ , $n$ 为均值,1为相对偏差.

均值60.7%,是3类中最低的标准偏差1.8;而蒙皂石含量均较高,在5.1%~9.9%,均值8.0%,远高于其他2类,标准偏差1.2.

为了进一步区分3类黏土矿物的物质来源,利用东海东北部表层沉积物黏土矿物数据和所有周边提供潜在物源可能的河流及附近海域表层沉积物黏土矿物数据(表1),绘制蒙皂石-(伊利石+高岭石)-绿泥石三角端元图(图4).由图4可见,绝大部分表层黏土矿物数据投影位置相近,但可清晰的分开为3个区,与聚类分析的分类结果相一致.通过与周边潜在物源供给河流及附近海域表层沉积物黏土矿物数据投影位置相比较可以发现,东海东北部表层沉积物黏土矿物数据投影位置相较于黄河、废黄河、长江、钱塘江、甌江、台湾东西部河流等陆源河流黏土矿物数据投影位置均有一定距离,一方面可能是细颗粒黏土矿物入海后随着水质环境的改变,致使大量细颗粒沉积物在河口区絮凝沉降(蓝先洪等, 2011b);另一方面随着不同海流的分选作用和不同粒级黏土矿物的差异沉降作用,导致来自不同源区的黏土矿物发生了一定程度的混合.

T类黏土矿物数据投影位置(图4),除了2个投影位置与台湾东部河流紧靠在一起,3个与C类位置混合,大部分与台湾东、西部河流样品的投影位置靠近,与台湾海峡表层沉积物样品投影位置一致,据此推断此类黏土矿物来源与台湾河流沉积物相关性较高,可以认为以台湾源物质为主,参考周晓静等分类命名,可将T类归为“类台湾”型;

C类黏土矿物数据投影位置靠近T类(图4),除2个混入T类投影位置区外,绝大部分与台湾源黏土矿物投影距离较远,更靠近锦江、长江、长江口、钱塘江、甌江口和东海内陆架表层沉积物的黏土矿物投影位置,因朝鲜半岛河流物质携带的物质主要沉积在近岸河口区(梁小龙等, 2015),很难影响到东海东北部海域,可将汉江、锦江和荣山江的

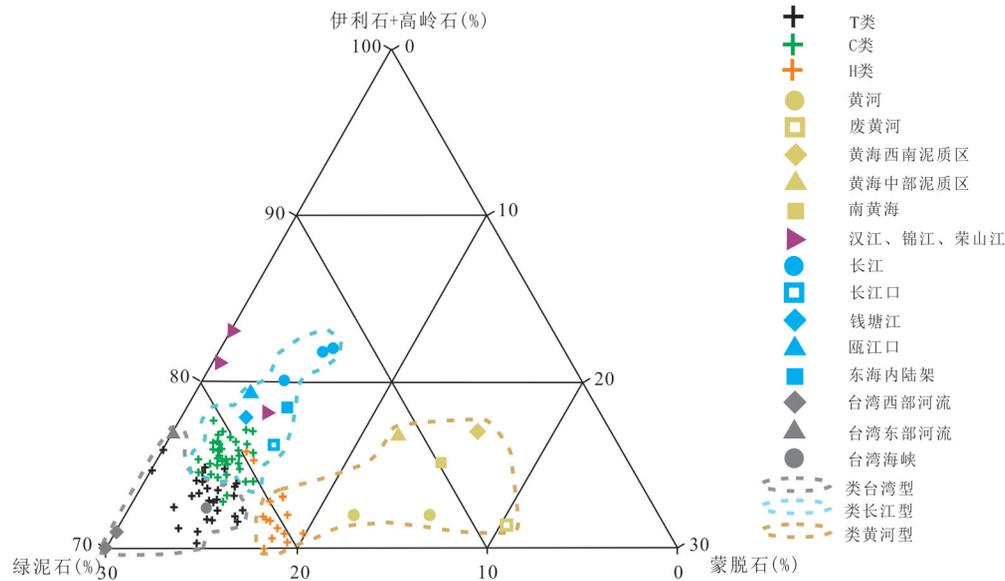


图4 伊利石+高岭石、绿泥石、蒙脱石物源判别三角图

Fig.4 Trigonometric map of provenance discrimination of illite+kaolinite, chlorite and montmorillonite

物质来源排除,因此可判断C类黏土矿物以长江、钱塘江、瓯江等物源为主。而钱塘江、瓯江等浙江河流黏土矿物与长江口和东海内陆架相似,在远海区因混合作用将更不易区分,故而可以将C类黏土矿物归为“类长江”型;

H类黏土矿物数据靠近T类和C类(图4),且有2个投影位置混入到C类当中,但其余大部分距离长江源和台湾源投影位置较远,与黄河、废黄河黏土矿物投影位置相近,而黄海中部、西南部和南黄海海域表层沉积物黏土矿物物源主要来自黄河与废黄河(梁小龙等,2015),在三角图上投影位置也靠近H类,由此认为H类黏土矿物以黄河、废黄河等物源为主,可以归为“类黄河”型。

通过3类黏土矿物在东海东北部的分布(图5),可清晰的划为4个区,分别为类黄河区、类台湾区、外陆架类长江区和冲绳海槽类长江区。外陆架类黄河区主要分布在西北侧水深低于100m的海域,均分布为“类黄河”型黏土矿物。类长江区与类台湾区呈北东-南西向条带状镶嵌分布,类长江区可分为东西2个区,西区紧靠外陆架类黄河区分布于外陆架100~200m等深线之间,东区位于东海陆坡-冲绳海槽。类台湾区主要呈条带状镶嵌于类长江区之间,沿陆坡分布。

### 3.2 河流输入及洋流运输过程

东海东北部海域表层黏土矿物的空间分布差异(图5)表明,沉积物中黏土矿物物质来源及分布

不仅受控于河流输入,也与海洋动力密切相关。东中国海的环流是细颗粒悬浮物质长期输运的最重要动力因素(杨作升等,1991)。晚更新世末次冰期,海平面退至东海外陆架区,古长江等近源河流为外陆架区和冲绳海槽输入了大量沉积物(王中波等,2012),奠定了东海东北部海域黏土矿物分布格局。随着海岸线的后退,高海平面时期东海东北部海域的环流受季风、外海水入侵、河流输入、地形变化以及潮汐等的影响,其结构非常复杂。

其西北方向的黄海沿岸流夏季以微弱流速向北流动,在冬季强季风作用下从苏北浅滩附近沿40~50m等深线向南流动,在32°N附近转向东南,其前锋可达30°N。何良彪的研究表明,在黄海沿岸流的作用下一部分绕过山东半岛的黄河物质进入南黄海西部与长江口北部(何良彪,1989),另有研究发现废黄河口水下三角洲的物质再悬浮被黄河沿岸流携带搬运至东海大陆架(Wang and Jiang, 2008),还有学者推测黄海沿岸流与台湾暖流汇合的过程中产生向冲绳海槽的冲力,进而将再悬浮物质搬运至冲绳海槽(Yuan *et al.*, 2008)。对比东海东北部海域表层黏土矿物的空间分布来看,可以认为“类黄河”型黏土矿物主要是黄海沿岸流在冬季将黄河、废黄河等物质再悬浮搬运而来,分布于29.5°N以北、127°E以西的外陆架区(图5)，“类黄河”型黏土矿物并未越过东海外陆架进入冲绳海槽,推测可能是黄海沿岸流随着离岸距离的增加流速降低,

向东至外陆架海域遇到黑潮“水障”的阻隔下北转汇入到低流速的黄海暖流中。

南部的黑潮流从台湾东南进入东海,沿100~1 000 m等深线的陆坡流入东海东北部海域。黑潮的摆动现象十分明显,一般夏季较强流幅较宽,会向陆架区爬升,冬季向外海退缩变窄(Dou *et al.*, 2010)。杨作升的研究表明(杨作升等,1991),黑潮次一中层混合爬升水及其混合水形成悬浮体含量最低值区,横亘在陆架与深海之间,形成阻隔含有大部分悬浮体的陆架中、下层水体向深海输送的洁净“水障”。对应东海东北部海域沉积物粒度分布情况(图2),可见100~200 m外陆架区细颗粒含量较少,结合黏土矿物的分布特点来看,推测外陆架区“类长江”型黏土矿物主要来源于低海平面时期古长江,海侵及高海平面期外陆架区域又经潮流、海浪等水动力作用分选改造,导致细颗粒沉积物含量较少。现代长江沉积物中的细颗粒悬浮物质大部分被搬运至浙闽泥质区,剩余10%~30%会被长江冲淡水等海流搬运至东海外陆架区(Milliman *et al.*, 1989)。西南部的台湾暖流,是黑潮的重要分支,经台湾海峡北上,在28.5°N附近分成两支,一支继续

北上到长江口海域,另外一支先向东转,然后又向北流到东海陆坡附近。另有部分研究表明,东北向季风能使陆架区长江物质发生再悬浮并且在海底产生一种向海环流效应,从而使长江物质在部分外陆架区搬运至冲绳海槽(高抒等,1999),且具有“冬贮夏输”季节性,推测外陆架区“类长江”型黏土矿物混有少量现代长江源的细颗粒沉积物。对应沉积物粒度(图2)和黏土矿物分布(图5)来看,28°N~29°N海域沉积物细颗粒含量较高,黏土矿物以“类台湾”型为主,混合有少量“类长江”型,结合区域地形来看,该位置陆坡较陡,水深变化急剧下降,推测可能为在东向台湾暖流的驱动下,陆架区残留沉积物中的少量细颗粒物质再悬浮后向海槽的运移路径,因此认为东部海槽区“类长江”型黏土矿物主要来源于古长江。

黑潮不仅有“水障作用”,同样具有物源输运功能。已有研究表明台湾沉积物已沉积在冲绳海槽南部和中部,其中一部分与黑潮流一起向北运输(Zheng *et al.*, 2016)。与我们的研究相比,“类台湾”型黏土矿物由南往北沿陆坡附近分布,与黑潮在该海域的运移路径完全一致,可以认为该类黏土矿物

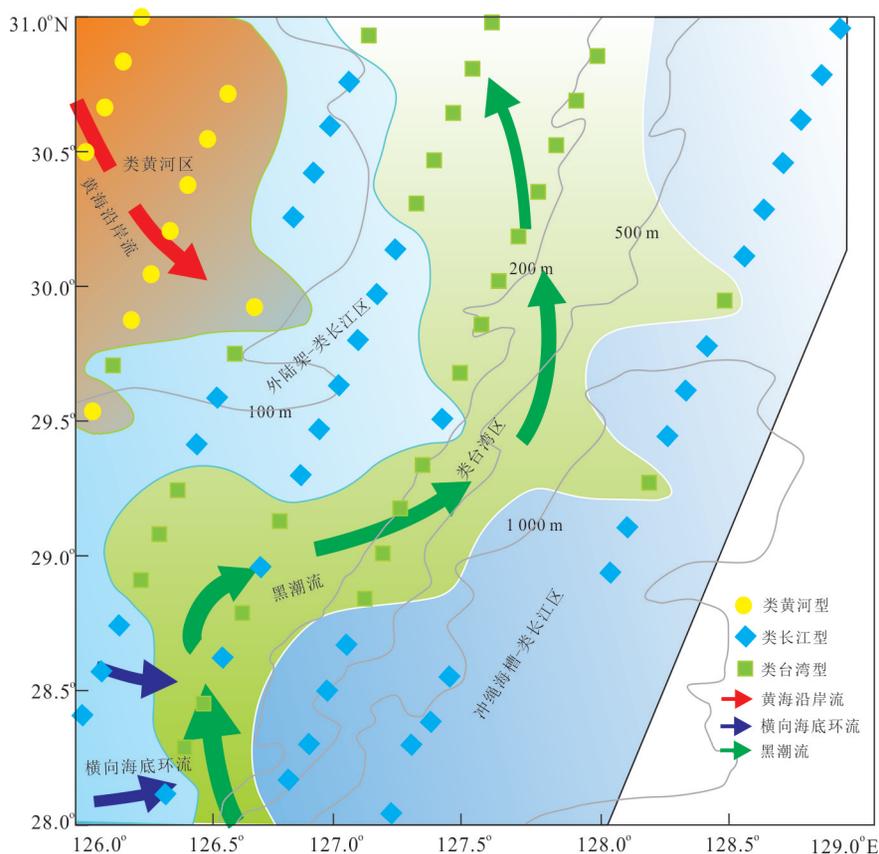


图5 东海东北部海域表层沉积物黏土矿物来源及输运

Fig.5 Sources and transport of clay minerals in surface sediments in the northeastern East China Sea

主要受黑潮控制。

## 4 结论

(1) 东海东北部海域表层黏土矿物以伊利石为主, 绿泥石和高岭石次之, 蒙皂石最少。伊利石和绿泥石含量整体呈现北东—南西向条带状分布规律, 由陆架—海槽方向, 伊利石含量值分布出现低—高—低—高趋势, 绿泥石含量值分布出现低—高—低趋势。高岭石分布趋势明显异于伊利石和绿泥石, 分带性不明显, 整体上呈面状连片分布, 由陆架—海槽方向, 含量值分布出现由高到低的趋势。蒙皂石在个别区域缺失, 低值区面积较大, 整体分布上, 高值区主要呈斑块状分布在西北侧水深小于 100 m 的陆架区。

(2) 利用快速聚类分析将 80 个表层黏土矿物分为 3 类, 对比陆源河流及附近海域黏土矿物特征, 进一步划分为“类黄河”型、“类长江”型和“类台湾”型。

(3) “类黄河”型黏土矿物主要由黄海沿岸流在冬季将黄河、废黄河等物质再悬浮搬运而来, 分布于 29.5°N 以北、127°E 以西的外陆架区, 未越过东海外陆架进入冲绳海槽。外陆架区“类长江”型黏土矿物主要来源于低海平面时期古长江物质, 并混有少量现代长江悬浮物质; 冲绳海槽区“类长江”型黏土矿物主要来自低海平面时期古长江物质以及极少量陆架区再悬浮长江源物质。“类台湾”型黏土矿物分布主要由黑潮控制, 由台湾经冲绳海槽南部搬运而来, 沿陆坡附近沉积。

## References

- Biscaye, P. E., 1965. Mineralogy and Sedimentation of Recent Deep-Sea Clay in the Atlantic Ocean and Adjacent Seas and Oceans. *Geological Society of America Bulletin*, 76: 803–832. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1965\)76\[803:MASORD\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1965)76[803:MASORD]2.0.CO;2)
- Dou, Y. G., Li, J., Zhao, J. T., et al., 2014. Clay Mineral Distributions in Surface Sediments of the Liaodong Bay, Bohai Sea and Surrounding River Sediments: Sources and Transport Patterns. *Continental Shelf Research*, 73: 72–82. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2013.11.023>
- Dou, Y. G., Yang, S. Y., Liu, Z. X., et al., 2010. Clay Mineral Evolution in the Entral Okinawa Trough since 28 ka: Implications for Sediment Provenance and Palaeoenvironmental Change. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 288: 108–117. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2010.01.040>
- Fan, D. J., Yang, Z. S., Mao, D., et al., 2001. Clay Minerals and Geochemistry of the Sediments from the Yangtze and Yellow Rivers. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 21(4): 7–12. (in Chinese with English abstract).
- Gao, S., Cheng, P., Wang, Y. P., et al., 1999. Characteristics of Suspended Sediment Concentrations over the Areas Adjacent to Changjiang River Estuary, the Summer of 1998. *Marine Science Bulletin*, 18(6): 44–50. (in Chinese with English abstract).
- He, L. B., 1989. Clay Minerals in China Sea and Its Adjacent Waters. *Science in China (Series B)*, 1: 75–83. (in Chinese).
- He, M. Y., Zheng, H. B., Huang, X. T., et al., 2011. Clay Mineral Assemblages in the Yangtze Drainage and Provenance Implications. *Acta Sedimentologica Sinica*, 29(3): 544–551. (in Chinese with English abstract).
- Huh, C. A., Su, C. C., 1999. Sedimentation Dynamics in the East China Sea Elucidated from  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{239,240}\text{Pu}$ . *Marine Geology*, 160: 183–196. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(99\)00020-1](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(99)00020-1)
- Lan, X. H., Zhang, X. J., Liu, X. B., et al., 2011a. Distribution Pattern of Clay Minerals in Surface Sediments of South Yellow Sea and Their Provenance. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 31(3): 11–16. (in Chinese with English abstract).
- Lan, X. H., Zhang, Z. X., Li, R. H., et al., 2011b. Distribution of Clay Minerals in Surface Sediments off Yangtze River Estuary. *Marine Geology Frontiers*, 27(11): 1–7. (in Chinese with English abstract).
- Li, C. S., Shi, X. F., Gao, S. J., et al., 2012. Clay Mineral Composition and Their Sources for the Fluvial Sediments of Taiwanese Rivers. *Chinese Science Bulletin*, 57(2–3): 169–177. (in Chinese).
- Li, G. G., 1990. Composition, Distribution and Geological Significance of Clay Minerals in Surface Sediments of China Offshore. *Acta Oceanologica Sinica*, 12(4): 470–479. (in Chinese).
- Li, L., Zheng, H. B., Zhao, L., et al., 2011. Temporal and Spatial Changes of Clay Minerals since the Miocene in Lower Reaches of Yangtze River and Chinese Loess Plateau and Their Palaeoclimate Implications. *Journal of Palaeogeography*, 13(3): 355–362. (in Chinese with English abstract).
- Liang, X. L., Yang, S. Y., Yin, P., et al., 2015. Distribution of Clay Mineral Assemblages in the Rivers Entering Yellow Sea and East China Sea and the Muddy Shelf Deposits and Control Factors. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 35(6): 1–15. (in Chinese with English abstract).

- abstract).
- Liu, S.F., Shi, X.F., Fang, X.S., et al., 2014. Spatial and Temporal Distributions of Clay Minerals in Mud Deposits on the Inner Shelf of the East China Sea: Implications for Paleoenvironmental Changes In the Holocene. *Quaternary International*, 349: 270—279. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.07.016>
- Liu, Z.F., Trentesaux, A., Clemens, S.C., et al., 2003. Quaternary Clay Mineral Records at ODP1146 Station on the North Slope of South China Sea: Ocean Current Transport and East Asian Monsoon Evolution. *Science in China(Series D)*, 33(3):271—280(in Chinese).
- Luo, W.D., Zhou, J., Li, X.J., et al., 2018. Morphology and Structure and Evolution of West Basin Canyon, South China Sea. *Earth Science*, 43(6): 2160—2171(in Chinese with English abstract).
- Milliman, J.D., Meade, R.H., 1983. World-Wide Delivery of River Sediment to the Oceans. *The Journal of Geology*, 91:1—21. <https://doi.org/10.1086/628741>
- Milliman, J.D., Qin, Y.S., Park, Y.A., 1989. Sediments and Sedimentary Processes in the Yellow and East China Seas. *Sedimentary Facies in the Active Plate Margin*, New York, 233—249.
- Park, Y.A., Khim, B.K., 1992. Origin and Dispersal of Recent Clay Minerals in the Yellow Sea. *Marine Geology*, 104(1—4): 205—213. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(92\)90095-Y](https://doi.org/10.1016/0025-3227(92)90095-Y)
- Petschick, R., Kuhn, G., Gingel, F., 1996. Clay Mineral Distribution in Surface Sediment's of the South Atlantic: Sources, Transport and Relation to Oceanography. *Marine Geology*, 130(3—4):203—229. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(95\)00148-4](https://doi.org/10.1016/0025-3227(95)00148-4)
- Ren, M.E., Shi, Y.L., 1986. Sediment Discharge of the Yellow River(China) and Its Effect on the Sedimentation of the Bohai and the Yellow Sea. *Continental Shelf Research*, 6(6):785—810. [https://doi.org/10.1016/0278-4343\(86\)90037-3](https://doi.org/10.1016/0278-4343(86)90037-3)
- Sun, M.J., Gao, H.F., Li, X.J., et al., 2018. Sedimentary Characteristics and Origin of Taitung Canyon in Eastern Waters of Taiwan Island. *Earth Science*, 43(10):3708—3718(in Chinese with English abstract).
- Sun, X.P., 2006. *China Offshore Regional Ocean*. Ocean Press, Beijing, 1—376(in Chinese).
- Wang, W.J., Jiang, W.S., 2008. Study on the Seasonal Variation of the Suspended Sediment Distribution and Transportation in the East China Seas Based on Sea WiFS Data. *Journal of Ocean University of China*, 7: 385—392. <https://doi.org/10.1007/s11802-008-0385-6>
- Wang, Y., Zhu, D.K., You, K.Y., et al., 1999. Evolution of Radiative Sand Ridge Field of the South Yellow Sea and Its Sedimentary Characteristics. *Science in China(Series D)*, 42(1): 97—112. <https://doi.org/10.1007/bf02878503>
- Wang, Z.B., Yang, S.Y., Zhang, Z.X., et al., 2012. The Grain Size Compositions of the Surface Sediments in the East China Sea: Indication for Sedimentary Environments. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 43(6):1039—1049(in Chinese with English abstract).
- Xu, K.H., Li, A.C., Liu, J.P., et al., 2012. Provenance, Structure, and Formation of the Mud Wedge Along Inner Continental Shelf of the East China Sea: A Synthesis of the Yangtze Dispersal System. *Marine Geology*, 1:291—294. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2011.06.003>
- Xu, K.H., Milliman, J.D., Li, A.C., et al., 2009. Yangtze and Taiwan Derived Sediments on the Inner Shelf of East China Sea. *Continental Shelf Research*, 29(18): 2240—2256. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2009.08.017>
- Xu, Y.H., Chen, J., Wang, A.J., et al., 2013. Clay Minerals in Surface Sediments of the Taiwan Strait and Their Provenance. *Acta Sedimentologica Sinica*, 31(1): 120—129(in Chinese with English abstract).
- Yang, S.Y., Lim, D.I., Li, C.X., 2003. A Review on the Provenance-Discrimination of Sediments in the Yellow Sea. *Earth Science Reviews*, 63: 93—120. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(03\)00033-3](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(03)00033-3)
- Yang, Z.S., 1988. 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. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 19(4): 336—346(in Chinese with English abstract).
- Yang, Z.S., Guo, Z.G., Wang, Z.X., et al., 1991. Suspended Matter in the Huanghai Sea and East China Sea: Its Contents, Distribution, Relation to the Water Masses and Factors of Influence. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 21(3):55—69(in Chinese with English abstract).
- Ye, Q., Li, G.X., Deng, S.G., et al., 2007. Changjiang Diluted Water off Estuary in Winter. *Periodical of Ocean University of China*, 37(Suppl): 203—206(in Chinese with English abstract).
- Yuan, D.L., Zhu, J.R., Li, C.Y., et al., 2008. Cross-Shelf Circulation in the Yellow and East China Seas Indicated by MODIS Satellite Observations. *Journal of Marine Systems*, 70: 134—149. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2007.04.002>
- Zheng, X.F., Li, A., Kao, S.J., et al., 2016. Synchronicity

- of Kuroshio Current and Climate System Variability Since the Last Glacial Maximum. *Earth and Planetary Science Letters*, (452): 247–257. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.07.028>
- Zhou, X.J., Li, A.C., Wan, S.M., et al., 2010. Clay Minerals in Surficial Sediments of the East China Sea Shelf: Distribution and Probenance. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 41(5):667–675(in Chinese with English abstract).
- Zhu, F.G., Li, X.J., Gao, S.T., 1988. Research of Clay Minerals of Sediments on the Continental Shelf of the East China Sea. *Donghai Marine Science*, 6(1):40–51 (in Chinese with English abstract).
- Zöllmer, V., Irion, G., 1993. Clay Mineral and Heavy Metal Distributions in the Northeastern North Sea. *Marine Geology*, 111: 223–230. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(93\)90132-F](https://doi.org/10.1016/0025-3227(93)90132-F)
- 附中文参考文献**
- 范德江, 杨作升, 毛登, 等, 2001. 长江与黄河沉积物中粘土矿物及地化成分的组成. *海洋地质与第四纪地质*, 21(4): 7–12.
- 高抒, 程鹏, 汪亚平, 等, 1999. 长江口外海域 1998 年夏季悬沙浓度特征. *海洋通报*, 18(6):44–50.
- 何良彪, 1989. 中国海及其邻近海域的粘土矿物. *中国科学 (B 辑)*, 1:75–83.
- 何梦颖, 郑洪波, 黄湘通, 等, 2011. 长江流域沉积物粘土矿物组合特征及物源指示意义. *沉积学报*, 29(3):544–551.
- 蓝先洪, 张宪军, 刘新波, 等, 2011a. 南黄海表层沉积物粘土矿物分布及物源. *海洋地质与第四纪地质*, 31(3): 11–16.
- 蓝先洪, 张志珣, 李日辉, 等, 2011b. 长江口外表层沉积物粘土矿物分布特征. *海洋地质前沿*, 27(11):1–7.
- 李传顺, 石学法, 高树基, 等, 2012. 台湾河流沉积物的粘土矿物组成特征与物质来源. *科学通报*, 57(2–3):169–177.
- 李国刚, 1990. 中国近海表层沉积物中粘土矿物的组成、分布及其地质意义. *海洋学报*, 12(4):470–479.
- 李玲, 郑洪波, 赵良, 等, 2011. 中新世以来长江下游和黄土高原地区粘土矿物的时空变化及古气候意义. *古地理学报*, 13(3):355–362.
- 梁小龙, 杨守业, 印萍, 等, 2015. 黄海与东海周边河流及泥质区沉积物粘土矿物的分布特征和控制因素. *海洋地质与第四纪地质*, 35(6):1–15.
- 罗伟东, 周娇, 李学杰, 等, 2018. 南海海盆西峡谷的形态与结构及形成演化. *地球科学*, 43(6):2160–2171.
- 刘志飞, Trentesaux A., Clemens S.C., 等, 2003. 南海北坡 ODP1146 站第四纪粘土矿物记录: 洋流搬运与东亚季风演化. *中国科学(D 辑)*, 33(3):271–280.
- 孙美静, 高红芳, 李学杰, 2018. 台湾东部海域台东峡谷沉积特征及其成因. *地球科学*, 43(10):3708–3718.
- 孙湘平, 2006. 中国近海区域海洋. 北京: 海洋出版社, 1–376.
- 王中波, 杨守业, 张志珣, 等, 2012. 东海陆架中北部沉积物粒度特征及其沉积环境. *海洋与湖沼*, 43(6):1039–1049.
- 徐勇航, 陈坚, 王爱军, 等, 2013. 台湾海峡表层沉积物中粘土矿物特征及物源. *沉积学报*, 31(1):120–129.
- 杨作升, 1988. 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. *海洋与湖沼*, 19(4):336–346.
- 杨作升, 郭志刚, 王兆祥, 等, 1991. 黄、东海毗邻海域悬浮体与水团的对应关系及影响因素. *青岛海洋大学学报*, 21(3):55–69.
- 叶菁, 李广雪, 邓声贵, 等, 2007. 冬季长江口冲淡水发育特征. *中国海洋大学学报*, 37(Suppl.):203–206.
- 周晓静, 李安春, 万世明, 等, 2010. 东海陆架表层沉积物粘土矿物组成分布特征及来源. *海洋与湖沼*, 41(5): 667–675.
- 朱凤冠, 李秀珠, 高水土, 1988. 东海大陆架沉积物的粘土矿物的研究. *东海海洋*, 6(1):40–51.