

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.吉林大学学报(地球科学版),2019,49(1):178-195. doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.20180114.

Ding Dalin, Zhang Xunhua, Yu Junjie, et al. Progress in Sedimentary Sources and Palaeoclimate Evolution in Zhejiang-Fujian Mud Area in Holocene. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2019, 49 (1):178 - 195. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20180114.

浙闽泥质区全新世物源和古气候演化研究进展

丁大林^{1,2},张训华^{1,2},于俊杰²,王修齐^{1,2}

1.中国海洋大学海洋地球科学学院,山东 青岛 266100

2.中国地质调查局南京地质调查中心,南京 210016

摘要:浙闽泥质区是全新世高海平面以来沉积物的汇。受东亚季风影响,浙闽沿岸流和台湾暖流具有季节性变化,长江口“夏储冬输”的沉积物输运模式对东海内陆架泥质区的形成有关键作用。浙闽泥质区的潜在物源主要有长江、浙闽河流以及台湾西部山地河流,以长江物质为主。黏土矿物、稀土元素、Sr-Nd同位素、环境磁学等方法是物源研究的重要手段。长江物质以伊利石为主,蒙脱石含量较少,高岭石和绿泥石含量中等;而台湾物质以伊利石和绿泥石为主,没有蒙脱石。磁黄铁矿是台湾河流沉积物特有的磁性矿物,可作为大陆河流与台湾河流物源识别的指标。泥质区位于东亚季风区,受低纬热带过程和高纬大气环流的影响,气候变化具有波动性。沉积物敏感粒级反演的东亚冬季风(EAWM)只记录了泥质区形成以来的气候变化,不能代表整个全新世。受台湾暖流和浙闽沿岸流的双重影响,敏感粒级作为EAWM演化的指标需进一步深入研究。

关键词:全新世;物源;黏土矿物;稀土元素;东亚冬季风

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20180114

中图分类号:P736.21;P532

文献标志码:A

Progress in Sedimentary Sources and Palaeoclimate Evolution in Zhejiang-Fujian Mud Area in Holocene

Ding Dalin^{1,2}, Zhang Xunhua^{1,2}, Yu Junjie², Wang Xiuqi^{1,2}

1. College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, Shandong, China

2. Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, China

Abstract: The Zhejiang-Fujian mud area has been the sink of sediments since the formation of Holocene high sea level. Under the influence of the East Asian monsoon, the variation of Zhejiang-Fujian Coastal Current and Taiwan Warm Current is characterized by seasonality, the sediment transport pattern “trapped in summer and transported in winter” in the Yangtze River mouth plays a key

收稿日期:2018-05-16

作者简介:丁大林(1992—),男,博士研究生,主要从事海洋沉积和第四纪研究,E-mail:oucdalin@163.com

通信作者:张训华(1961—),男,研究员,博士生导师,主要从事海洋地球物理和大地构造等方面的研究,E-mail:xunhuazh611102@sina.com

基金项目:中国地质调查局地质调查项目(121201008000182401);国家海洋地质专项(DD20160147)

Supported by Geological Survey Project of China Geological Survey(121201008000182401) and National Marine Geology Special Project of China (DD20160147)

role in the formation of the East China Sea inner-shelf mud area. The potential sources of the Zhejiang-Fujian mud area are the Yangtze River, Zhejiang-Fujian rivers and western Taiwan mountain rivers, and the Yangtze River materials are the main source. Through the analysis on clay minerals, rare earth elements, Sr Nd isotopes and environmental magnetism, the Yangtze River is dominated by illite, followed by kaolinite and chlorite, with less smectite. In the rivers of western Taiwan, illite and chlorite are the main clay materials, with no smectite. Pyrrhotite is a unique magnetic mineral of Taiwan river sediments, and can be used as an indicator of the source identification of sediments from rivers in mainland or Taiwan. The mud area is located in the East Asian monsoon region. Under the combined influence of the tropical processes in the low latitude and high latitude atmospheric circulation, the climate change is fluctuating. The changes in the East Asian Winter Monsoon (EAWM) reflected in sediment-sensitive grain size only record the climate changes since the formation of the muddy area, and cannot represent the entire Holocene. Influenced by the Taiwan Warm Current and Zhejiang-Fujian Coastal Current, the sensitive grain size needs to be further studied as an indicator of EAWM evolution.

Key words: Holocene; provenance; clay mineral; rare earth element; East Asian winter monsoon

0 引言

东海是东亚大陆边缘海,东海陆架是世界上最宽广、最平坦的大陆架之一,全新世以来受海平面变化、河流以及气候变化影响显著,沉积环境发生过重大改变。研究^[1-3]表明,末次盛冰期(last glacial maximum, LGM)时,全球海平面比现今低130 m左右,海岸位于东海陆架边缘和对马—朝鲜海峡东端,发育一套低位体系域层序^[4]。冰消期以来海平面快速上升与慢速上升相间发生,形成了不同的沉积体系,如古滨岸沉积和潮流沙脊群。当海平面到达高水位期以后,东海的环流体系已经形成,浙闽泥质区开始沉积^[5]。

东海内陆架形成的泥质沉积体具有连续、分辨率高的特点,近年来受到广泛关注。对泥质区的研究已在沉积物物源、沉积环境和古气候演化等方面取得了丰硕成果^[6-10]。浙闽泥质区作为沉积物的汇,潜在物源主要有长江、浙闽沿岸河流以及台湾山地河流,以长江细颗粒沉积物占主导^[11-13]。除海平面变化以外,东亚季风控制下的沿岸流也是泥质区形成的必要条件。

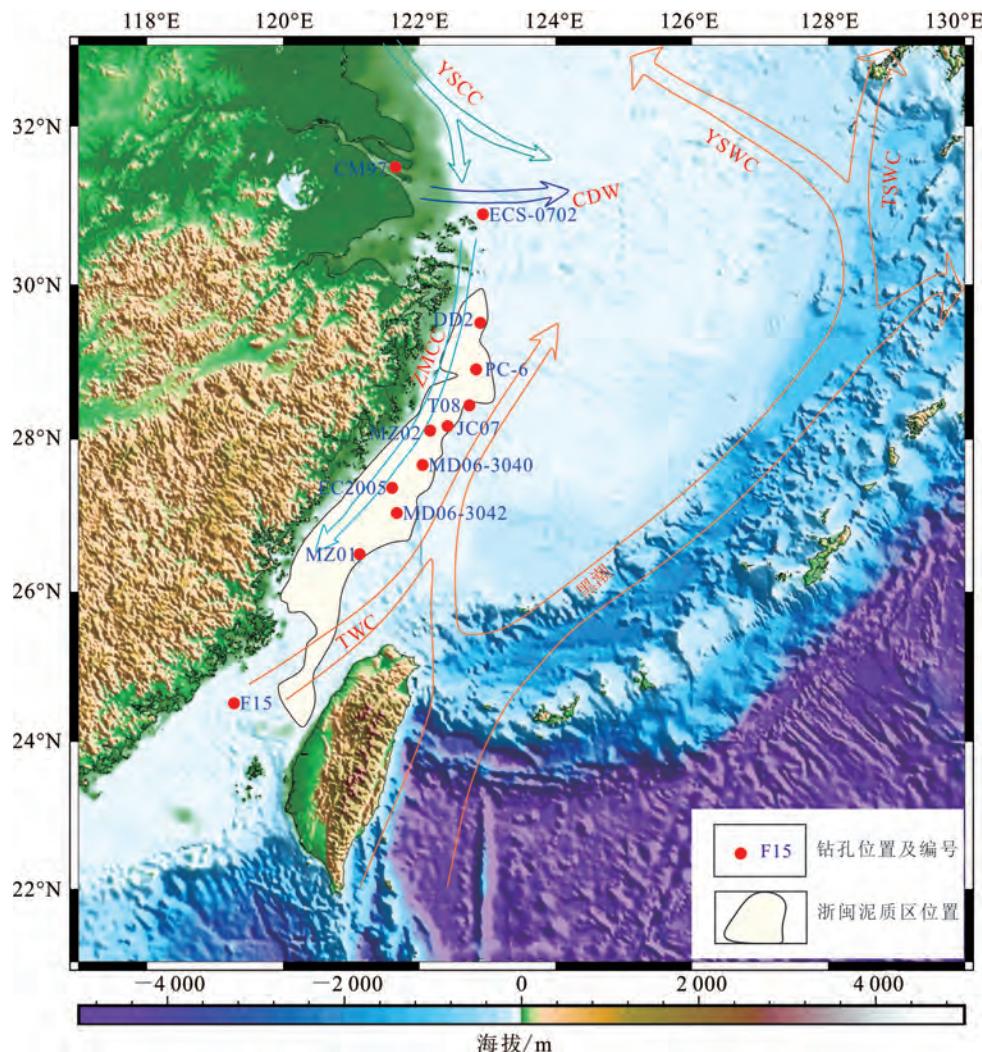
东亚季风是欧亚大陆和太平洋之间的海陆热力差异形成的,东亚冬季风(East Asian winter monsoon, EAWM)是亚洲气候系统的重要组成部分,在东亚季风中占主导地位^[14]。冷空气从西伯利亚—蒙古高压向中低纬东南方向运动,甚至越过赤道到达南半球,对人类社会有重要影响。对全新世EAWM的演化历史、机制的全面了解,可以更好地

预测未来气候变化。黄土-古土壤^[15]、湖泊^[16]和海洋^[17]等记录重建的全新世EAWM在千年尺度上的变化规律一致,百年—十年尺度上会有较大差异^[18-19]。沉积物粒度提取的敏感粒级被用作EAWM的替代指标^[20]已广泛报道,在不同时间尺度上重建了EAWM的变化。此外,前人^[21-24]利用地球化学、有孔虫以及环境磁学等指标研究泥质区的气候变化,并且识别出了多次气候变冷事件,进一步证明全新世气候变化的不稳定性。

在前人研究工作的基础上,总结了全新世以来泥质区沉积地层、物源,以及泥质区记录的古气候演化,以期对全新世泥质区的沉积演化有更全面的了解。

1 区域概况

浙闽泥质区是长江入海泥沙在陆架沉积体系的重要组成部分,分布在长江入海口以南、水深60 m以浅的闽浙沿岸一带,该泥质区沿东北—西南方向呈条带状分布(图1),厚度为0~40 m。刘敬圃等^[25]基于高分辨率地震剖面指出该泥质条带长800 km,并且进一步估计总体积大约是 $4.5 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 。浙闽沿岸流和台湾暖流是中国东南沿海的两支重要海流(图1),对东海内陆架物质的运输和沉积过程有着不可忽视的影响。浙闽沿岸流主体水起源于长江、钱塘江、瓯江、闽江等淡水河,表层最大流速0.5 m/s^[37],平均流速24.0 m/s^[38];台湾暖流是高温高盐的海流,发源于台湾海峡,黑潮的一个分支在台湾东北部侵入台湾暖流,终年流向东北,最北可上溯至长江口附近,平均流速小于0.09 m/s^[38]。



水深数据来自脚注①。泥质区位置修改自文献[25];洋流修改自文献[26],钻孔详细信息见表1。TWC.台湾暖流;ZMCC.浙闽沿岸流;YSWC.黄海暖流;TSWC.对马暖流;YSCC.黄海沿岸流;CDW.长江冲淡水。

图1 东海海底地形及区域环流图

Fig. 1 Map of submarine topography and regional circulation in East China Sea

这两支海流都有着明显的季节性,受东亚季风影响显著:冬季偏北季风盛行,浙闽沿岸流强化,台湾暖流弱化;夏季受东南季风影响,台湾暖流强化,浙闽沿岸流变弱,甚至转向东北^[26]。

浙闽泥质区(图1)从邻近陆地接收大量河流沉积物,包括长江、台湾山地河流以及浙江—福建沿岸河流。长江发源于青藏高原海拔5 100 m的唐古拉山脉,全长6 397 km,最终于上海崇明岛附近汇入东海,流域面积 $1.8 \times 10^6 \text{ km}^2$ (表2)。大约有240 Mt/a的悬浮沉积物向南运输到泥质区海域,约

占长江入海物质的一半^[25,40]。以宜昌和湖口为界,长江分为上、中、下游。长江上游主要是中生代岩石,古生代和新生代岩石次之,代表性岩石为古生代碳酸盐岩和峨眉山玄武岩;中下游以古生代碳酸盐岩和中生代中—酸性火成岩以及第四纪河流—湖泊相沉积岩为主^[41]。在亚洲季风的影响下,流域降雨有季节特征,年平均降雨量1 100 mm,平均温度15 °C。

浙江省地势自西南向东北呈阶梯状倾斜,西南以山地为主,中部为丘陵,东北是冲积平原^[41],处于亚热带季风气候区,年降水量约1 600 mm。钱塘江

表1 浙闽泥质区相关钻孔位置信息及来源

Table 1 Locations of cores in the Zhejiang-Fujian mud area and relevant references

钻孔	纬度	经度	海拔/m	钻孔长/度/cm	参考文献
CM97	31.62°N	121.38°E	2.5	7 050	[27]
ECS-0702	31.00°N	122.67°E	-22.0	3 560	[28]
DD2	29.58°N	122.63°E	-43.5	298	[29]
PC-6	28.97°N	122.57°E	-56.7	450	[30]
T08	28.50°N	122.47°E	-64.6	220	[23]
JC07	28.23°N	122.15°E	-48.3	160	[31]
MZ02	28.17°N	121.89°E	-32.4	3 530	[12]
MD06-3040	27.72°N	121.78°E	-46.0	1 936	[32]
EC2005	27.42°N	121.33°E	-36.0	6 020	[33]
MD06-3042	27.09°N	121.40°E	-62.0	3 410	[34]
MZ01	26.55°N	120.85°E	-64.7	296	[35]
F15	24.60°N	119.00°E	47.1	250	[36]

表2 浙闽泥质区周边主要河流水沙特征

Table 2 Characteristics of water and sediments in rivers around the Zhejiang-Fujian muddy area

河流名称	长度/km	流域面积/(10 ⁴ km ²)	年径流量/(10 ¹⁰ m ³)	年输沙量/(10 ⁴ t)
长江	6 300	180.540	8 931.00	36 800
钱塘江	522	2.440	220.50	289
瓯江	384	1.820	193.00	196
闽江	562	6.099	575.79	599
浊水溪	186	0.310	51.84	6 555

注:长江、钱塘江数据来源于文献[39];瓯江、闽江、浊水溪数据分别来自脚注①②③。年径流量和年输沙量是河流2006—2016年的平均值。

省内最大的河流,长522 km,流域面积 $2.44 \times 10^4 \text{ km}^2$,多年平均径流量为 220.5 km^3 ,年均输沙量5 Mt;瓯江是第二大河流,全长388 km,年均径流量 193 km^3 ,年均输沙量1.96 Mt。福建省靠近北回归线,受季风和地形的影响,形成了温暖湿润的亚热带海洋性气候,年均气温 $17\sim21^\circ\text{C}$ 。闽江是福建省最大的河流,长562 km,年均径流量 575.79 km^3 ,年均输沙量6 Mt。汇水盆地内以火山岩、侵入岩为主,

其次是变质岩及海相沉积岩,局部为第四纪沉积物覆盖^[41]。

台湾岛是欧亚板块和菲律宾海板块聚合碰撞产生的,其陡峭的地形、强烈的构造活动以及频繁的台风和地震,造就了世界上最高速的沉积区^[42]。每年大约有 $180\sim380 \text{ Mt}$ 的沉积物进入周围海域^[43]。浊水溪是台湾西部最长的一条河流(长186.4 km,流域面积 $3 150 \text{ km}^2$),发源于台湾西南中央山脉合欢山西麓,坡度变化大,水土流失严重,年输沙量可达 65.55 Mt 。流域内以新生代沉积岩、变质岩和浅变质岩为主^[44]。台湾穿越北回归线,是亚热带海洋性气候,年平均温度 22°C ,年平均降雨量达2 500 mm。在亚洲季风的影响下,降水主要发生在5—10月,其占总降雨量的78%。

2 全新世沉积环境演化

研究^[10, 25]表明,浙闽泥质区是全新世高海平面以来沉积物的汇,约占长江入海泥沙量的32%。长江输沙量和河口泥质区沉积速率季节差异较大,洪季(5—10月)多年平均输沙量占全年输沙量的87%^[45]。与此对应,长江口附近在6—9月的月沉积速率约为4.4 cm/月,远高于年平均的1.6 cm/月^[46],有大量沉积物在冬季被再悬浮和搬运。影响泥质区的主要水动力体系——浙闽沿岸流受季风影响,夏季向北冬季向南运动^[47]。因此中国东部海域形成了“夏储冬输”的沉积格局。

2.1 沉积体系形成

利用CLIMAP(climate long-range investigation, mapping and prediction)^[48-49]重建的过去18 ka以来的古气候历史表明,LGM期间全球海平面下降了130 m。基于全球不同沉积环境中的陆架泥质沉积的统计结果,Mahiques等^[50]将晚更新世—全新世泥质沉积的形成时间分为3个阶段:14.0 ka B.P., 9.5~6.5 ka B.P.和2.0 ka B.P.。浙闽泥质区在第二个时间段开始形成:冰消期早期海平面快速上升,大量陆源碎屑沉积物填充古下切河道;到早全新世长江三角洲开始发育;直至8.0~7.0 ka左右海平面基本达到目前高度,现代环流体系基本形成,细颗粒沉积物在浙闽沿岸流带动下向南运输,

①浙江水利厅.瓯江流域综合规划.2018. <http://www.zjwater.com/>

②福建省水利厅.2017福建省水资源公报.2018.<http://www.fjwater.gov.cn/>

③台湾经济部水利署.浊水溪的故事.2018.<https://www.wra.gov.tw/>

浙闽泥质区才开始形成。

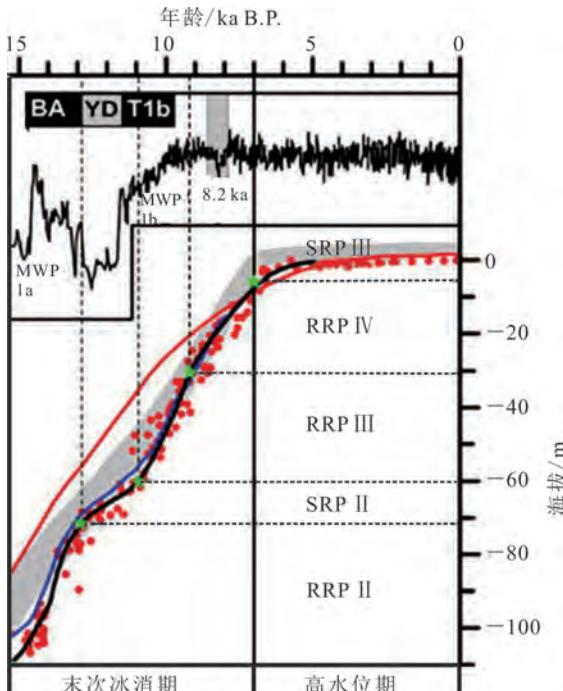
EC2005 孔的研究^[51]表明,随着海平面的逐渐上升,自 13.1 ka B.P.开始,形成了 41 m 的海相沉积地层。综合岩性、粒度和 AMS ¹⁴C 结果,将 EC2005 孔沉积相分为前滨、近滨、浅海 3 个亚相。自 12.3 ka B.P.开始,研究区受到沿岸流影响,长江物质开始进入研究区。浙闽泥质区是 7.3 ka B.P.以来长江的悬浮体在沿岸流作用下形成的。赵泉鸿等^[21]根据 MD06-3040 底栖有孔虫组合和不同生态种的丰度、浮游有孔虫 G.bull 和 G.ruber 的丰度及其氧同位素记录,得出了研究区全新世早期海面快速上升,沉积环境由滨岸内陆架(10.6~9.9 cal ka B.P.)、内陆架外缘(9.9~8.1 cal ka B.P.)转变至中陆架并达全新世最高海面(7.7~7.2 cal ka B.P.)的结论。

李广雪等^[52]提出东海内陆架泥质区在 7.3 ka 以来开始形成,与全新世高水位期(图 2)对应。同时,东海的现代环流体系也在这时形成,浙闽沿岸流

开始向南流,将长江源的沉积物带到浙闽泥质区沉积。这与东海沉积体系中高水位体系域(HST)底部的 ¹⁴C 年龄(≈ 7 ka)一致。东海内陆架从冰消期最大海侵以后开始广泛沉积,海平面达到高水位期以后水下斜坡沉积开始推进,泥质沉积中心开始形成。因此,海平面变化和海洋环流在浙闽泥质区的形成中起到重要作用,在过去的十几年中备受关注。

利用 Calib 7.04^[58]对研究区几个柱状样(表 1)的年代重新进行校正,长江口 ECS-0702 孔的 ΔR (当地碳储库校正)选取(-96 ± 60) a^[59],浙闽泥质区钻孔的 ΔR 值为(73 ± 17) a^[60],得到全新世以来的沉积速率(图 3)。可以看到,泥质区存在几个高沉积速率时期,分别是 12.0~10.0 ka B.P., 6.0~4.0 ka B.P. 和 2.0 ka B.P. 以来。在 12.0~10.0 ka B.P., 研究区处于滨岸—浅海环境,该时期海平面上升缓慢,在东海大陆架上发育了 2 个潮流沙脊体系^[61]。大约 7.0 ka B.P., 海平面达到现今高度,进入高海平面时期,目前的海洋水动力环境基本形成,泥质区开始发育。6.0~4.0 ka B.P. 是泥质区沉积速率较快的阶段,EC2005 孔在 5.8~5.0 ka 之间沉积速率高达 12.1~20.8 mm/a,EC2005 钻孔附近的 MD06-3040 孔和泥质区南部的 F15 孔也在该时期高速沉积,这说明泥质区在此时接受陆源物质输入量较大,可能是 EAWM 增强,沿岸流增强,为泥质区带来更多的长江物质。而泥质区北部的 PC-6 孔在 8.0~7.0 ka B.P. 沉积速率较高,这可能与测年误差有关,也可能与钻孔位置有关。泥质区不同位置的地理环境、水动力条件以及物质供应速率等对沉积速率都有一定影响,造成沉积地层之间的差异。最近 2.0 ka B.P. 以来,泥质区大部分钻孔都出现高速沉积,很多研究者将其归因于人类活动。在浙江—福建沿海地区的孢粉记录中发现,2.0 ka 以来用火、水稻种植以及航海活动逐渐繁荣^[62-64],人类活动对当地植被、环境变化产生了重要影响。长江地区人类活动的证据要早一些,大约在 3.5 ka B.P. 左右^[65-66]。但是人类活动能否造成泥质区那么高的沉积速率还有待商榷,或许自然变化占的比重更大一些^[67-68]。泥质区北部 DD2 孔的沉积环境表明,近 2.0 ka 以来该区域的沉积环境与现今一致^[31],沉积环境稳定,主要受沿岸流的控制。

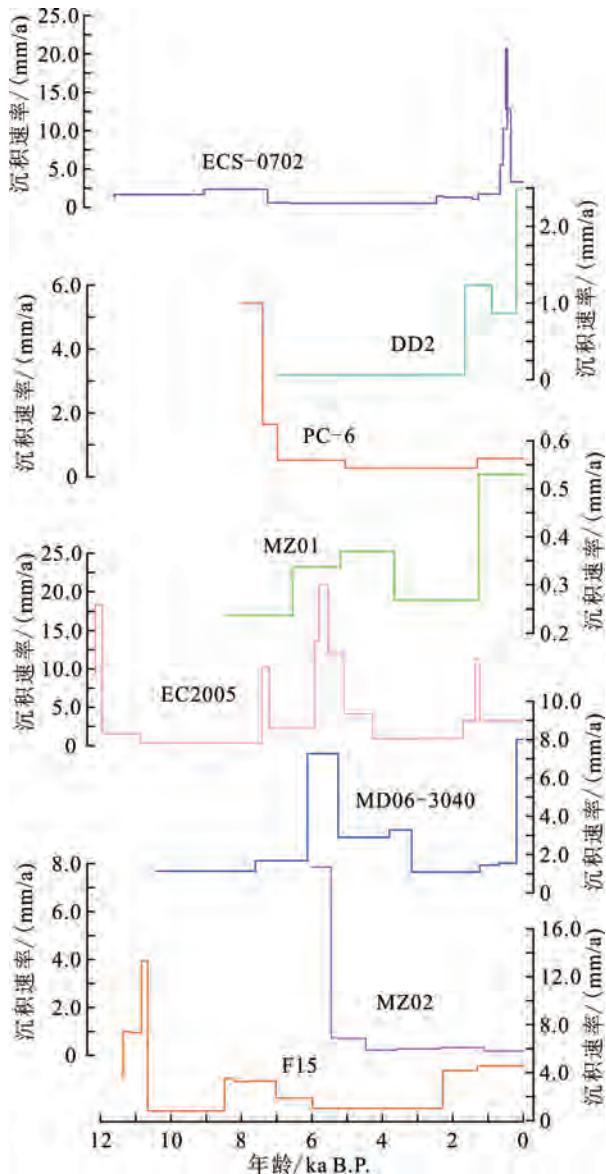
钻孔位置、环流条件、测年材料等差异造成的误差,使不同钻孔的沉积环境解释差别较大,因此仅用一个钻孔反演区域环境的变化存在很大问题。为了



红色曲线、灰色条带、蓝色曲线分别来自文献[53]、[54]、[55],红点来自文献[56],黑色曲线是根据地形梯度和地质记录修改蓝线后的 ECSs(east china seas)海平面变化。 $\delta^{18}\text{O}$ 数据来自 GISP2 格陵兰冰心^[57]。T1b.冰期终止期 1b 事件;YD.新仙女木事件;BA.Bølling-Allerød 暖期;MWP.冰融水脉冲事件;RRP.快速上升期;SRP.慢速上升期。修编自文献[52]。

图 2 末次冰消期以来海平面变化

Fig. 2 Sea level changes since the last deglaciation



钻孔相关信息见表1。

图3 全新世以来浙闽泥质区不同钻孔沉积速率

Fig. 3 Sedimentation rates of different cores in Zhejiang-Fujian mud area since Holocene

对泥质区沉积环境有更全面的了解,有必要进行多钻孔的联合解释。综合利用浅地层剖面、钻孔岩心等进行研究,可对泥质区沉积环境演化、“源—汇过程”以及气候变化有更全面的了解。

2.2 泥质区物源

浙闽泥质区的表层沉积物黏土矿物研究表明,沉积物主要来自长江^[69],在泥质区南部受闽江影响显著^[70]。范德江等^[71]利用非线性规划模型,对东海陆架表层沉积物中长江、黄河的贡献做了定量计算,认为长江沉积物主要分布于32°N以南、台湾暖

流以西的海域,黄河沉积物主要分布于32°N以北、台湾暖流以东的海域。因此在浙闽泥质区的物源讨论中很少涉及黄河。

郑洪波等^[72-73]提出,长江在渐新世(或者最晚在渐新世—中新世之交)贯通东流,东亚地貌格局基本形成,长江悬浮物开始在东海陆架沉积。长江三角洲在8.0 ka左右开始形成,5.5 ka以前大量沉积物填充下切河谷^[74]。根据杭州湾附近的记录,王昕等^[75]认为在约10.0~4.0 ka之间长江沉积物主要填充古河谷和水下三角洲,向南输运量很低,东海陆架的潮流沙脊体系可能是浙闽泥质区下部沉积层主要的物质来源。长江、浙闽沿岸河流以及台湾山地河流作为泥质区的潜在物源,全新世以来对泥质区的贡献很大,前人对此做了大量的定性研究,取得了丰硕的成果。下面主要从黏土矿物、地球化学以及环境磁学方面对泥质区物源进行介绍。

2.2.1 黏土矿物方法

黏土矿物含量和特征的变化是古气候环境条件控制和影响的结果,因此,在海洋沉积物中黏土矿物组合及其含量的变化反映了海洋沉积源区气候条件的变化,而在钻孔岩心中黏土矿物组合及其含量的变化则记录了沉积源区古气候、古环境演变的信息(图4)^[12]。

表层沉积物的黏土矿物调查结果(表3)显示:长江沉积物以伊利石为主(67.00%±1.00%),高岭石(9.00%±3.00%)和绿泥石(19.00%±1.00%)质量分数也较高,蒙脱石质量分数较低^[69];与之相比,台湾河流(如浊水溪)沉积物中的黏土矿物主要由伊利石(70.00%)和绿泥石(29.00%)组成,高岭石质量分数较低,没有蒙脱石。浙闽泥质区的黏土矿物主要由伊利石组成,绿泥石、高岭石、蒙脱石依次减少,与长江黏土矿物组合特征更接近,说明长江是泥质区的主要物源。由于距离长江口较近,在较强的沿岸流作用下,钱塘江和瓯江河口的沉积物与长江源细颗粒物质混合,黏土矿物与长江类似;而闽江口沉积物的黏土矿物则与长江有明显的差异(表3,图4)。

在泥质区北部DD2孔中,各黏土矿物的质量分数、伊利石/蒙脱石以及黏土矿物端元图都显示,黏土级细颗粒物质来自长江,而不是黄河^[81]。刘升发等^[12]利用黏土矿物将MZ02孔分为4个沉积单元(图4):13.0~9.5 ka B.P.,海平面较低,物源是长江、闽江和台湾河流物质的混合;早全新世(9.5~6.2 ka B.P.),陆架侵蚀严重,再悬浮作用增强,沉积物主要来源于长江;6.2~2.4 ka B.P.之间,台湾暖

表3 浙闽泥质区及其潜在物源的黏土矿物质量分数

Table 3 Clay minerals contents of potential sources of the Zhejiang-Fujian mud area

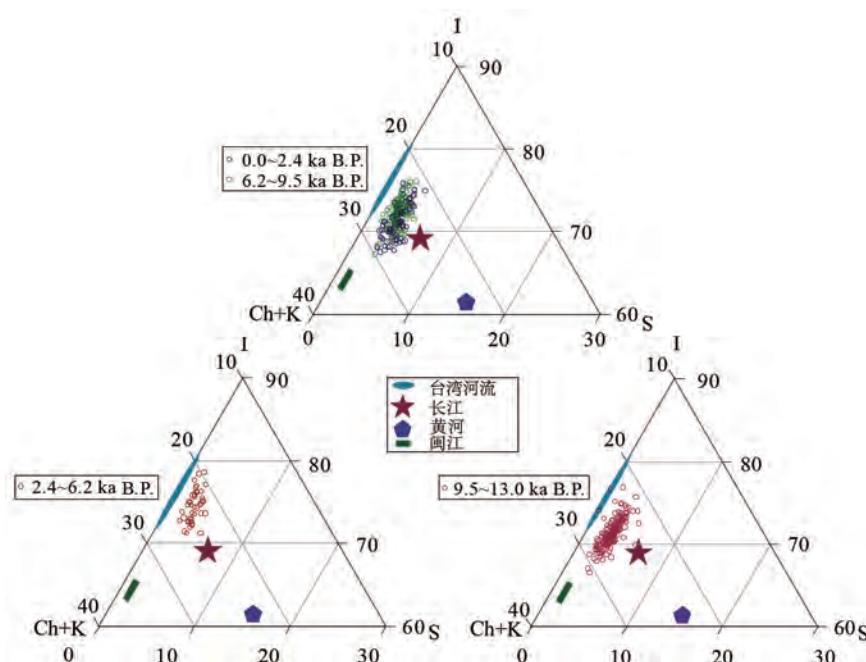
沉积物分布区	河流	样品数量	$w_B/\%$				参考文献
			S	I	K	Ch	
长江沉积物	长江	18	5.00	67.00	9.00	19.00	[69]
		21	2.00	66.00	12.00	20.00	[33]
	长江上游	9	1.73	63.84	15.75	18.69	[11]
	长江中游	12	2.99	67.87	14.9	14.24	[11]
浙江-福建河流沉积物	长江下游	4	1.82	66.07	15.27	16.84	[11]
	钱塘江	2	5.06	69.21	15.61	10.12	[76]
	瓯江	3	4.00	74.00	9.00	13.00	[77]
台湾河流沉积物	闽江	25	1.00	33.00	42.00	24.00	[78]
	浊水溪	6	0.00	70.00	1.00	29.00	[79]
	浙闽泥质区	42	6.00	65.00	9.00	20.00	[69]
		6	7.00	64.00	12.00	17.00	[79]
		265	2.77	60	9.47	27.75	[80]

注:S.蒙脱石; I.伊利石; K.高岭石; Ch.绿泥石。

流增强,超过60%的沉积物来源于台湾河流;2.4 ka B.P.以来,随着东亚季风的增强和台湾暖流的减弱,长江和闽江沉积物对泥质区的贡献增加。泥质区南部的F15孔的黏土矿物揭示,≈4 ka沉积物中蒙脱石消失,长江对泥质区南部贡献降低^[36]。这可能是中晚全新以来EAWM强度降低,致使浙闽沿岸流

减弱造成的。

在百年尺度上,泥质区物源变化和上述结果有较大差异。赵一飞等^[33]在长江口和内陆架泥质区2个钻孔黏土矿物端元图中发现,1950年以来长江对泥质区的贡献逐渐降低,而黄河的贡献相对增加,认为可能与1950年以来长江的输沙量降低有关。王



修改自文献[12]。

图4 浙闽泥质区MZ02孔及周边河流黏土矿物端元图

Fig. 4 Clay mineral end member diagram of sediments in core MZ02 in the Zhejiang-Fujian mud area and surrounding rivers

亮等^[13]在长江口和内陆架泥质区的钻孔中发现,1950年左右伊利石质量分数降低,高岭石和绿泥石质量分数增加。原因主要有两个:一个是EAWM增强,沿岸流增强,老黄河口的物质输入增加,同一站位的伊利石质量分数就会降低,而高岭石的质量分数相应升高;另一个是长江中上游物质来源的减少,必然会引起伊利石质量分数的下降以及高岭石等组分质量分数的相对升高。

百年尺度的结果表明,1950年以来黄河对泥质区贡献增加,与千年尺度的结果存在差异,这可能与时间跨度、样品分辨率、采样位置等有关,也可能和定性解释的人为性有关,因此需要更高分辨率的指标、更精确的数学模型以及现场观测数据加以验证,以重新解释不同时期物源的变化规律。黏土矿物物源判别时,用的较多的是黏土矿物组成三角端元图、伊利石结晶度以及黏土矿物质量分数变化。对于同一地区,不同实验室的结果可能会有较大差别,因此建立一套国际统一的黏土矿物测试程序是很有必要的。另外,黏土矿物与其他指标联合解释也是切实可行的,例如矿物磁性、主微量元素等。

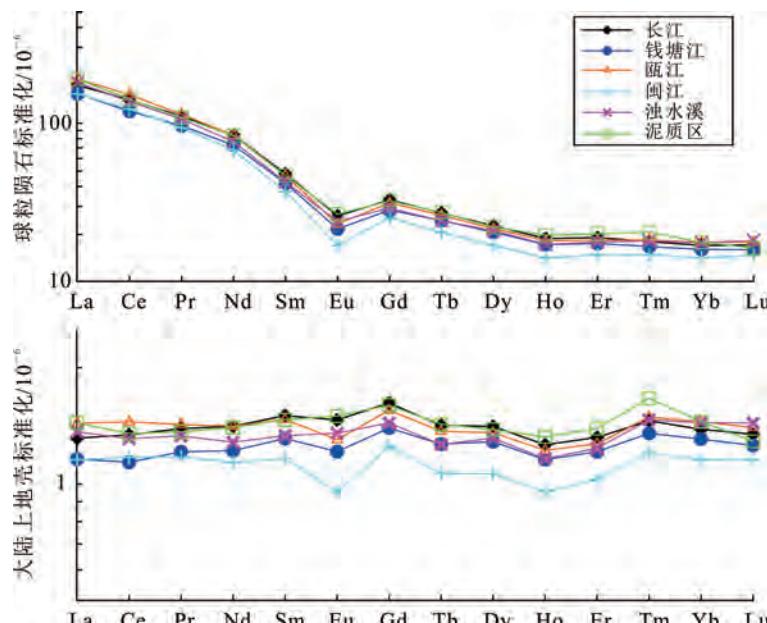
2.2.2 地球化学方法

在传统地球化学方法中,微量元素如稀土元素

(REE),Ti,Th,Sc,Co等受风化剥蚀、搬运、动力分选、沉积成岩和变质作用等影响较小,基本继承和反映了物源区源岩的平均组成,因而被广泛用为沉积物的物源示踪。现代长江下游河口地区沉积物的REE基本可以代表长江入海物质的平均组成(图5),而长江主要支流和干流中差异较大^[87]。

在EC2005钻孔的研究中,徐方建等^[88]认为泥质区不受或者受黄河、浙闽泥质区以及台湾河流的影响较小。REE结果表明:12.3~9.8 ka B.P.之间,研究区开始受到浙闽沿岸流的影响,物源逐渐转为长江;10.0~9.8 ka B.P.以来,研究区的物源主要受长江控制;7.3 ka B.P.以来受浙闽沿岸流影响泥质区开始沉积。杨守业等^[7]对MD06-3040钻孔的地球化学特征,如Al/Ti,Li/Sc,Co/Sc和Nb/Sc进行调查,结果表明:过去7.0 ka B.P.以来,浙闽泥质区的物质主要来自长江,1.5 ka B.P.以来浙江和福建省当地小河流的贡献增加;但是1.5 ka时地球化学指标的突然变化是由于东亚夏季风的变化还是人类活动影响,仍有待商榷。

米贝贝等^[6]研究了MZ02孔的稀土元素分布特征,同样划分出了4个沉积单元,其中晚更新世—早全新世(13.0~9.8 ka B.P.)以及中晚全新世(7.3 ka



长江^[82]、钱塘江、瓯江、闽江、浊水溪^[83]和内陆架泥质区^[84]REE平均浓度都转化为自然对数。大陆上地壳REE数据来自文献^[85],球粒陨石REE数据来自文献^[86]。

图5 浙闽泥质区及附近河流球粒陨石和大陆上地壳REE标准化配分模式

Fig. 5 Chondritic and the upper continental crust normalized patterns of Zhejiang-Fujian mud area and surrounding river sediments

B.P.)以来的物源划分和黏土矿物结果一致^[12],但早全新世(9.8~7.3 ka B.P.)与刘升发等^[12]的结果完全相反。刘升发等^[12]认为早全新世海平面逐渐升高,沉积物再悬浮作用增强,此时东亚夏季风也增强,闽江和台湾河流成为主要物源,长江物质供给较少。随后,刘升发等^[89]又综合分析了MZ02孔的粒度、黏土矿物、主微量元素、稀土元素的变化特征认为:10.05~8.15 ka B.P.,稀土元素(La/Sm)_{ucc}-(Gd/Yb)_{ucc}图表明泥质沉积物更加接近闽江与台湾西部河流;而在9.50~8.15 ka B.P.,黏土矿物端元图显示泥质沉积物与长江更加接近。因此刘升发等^[89]认为不同粒径的沉积物来源不同:细颗粒物质主要来自于长江,经浙闽沿岸流长距离运输到达泥质区沉积;粗颗粒物质主要来源于泥质区南部的闽江和台湾西部河流。这与杨守业等^[7]提出的东亚大陆边缘两类河流体系的风化与源汇体系观点本质上是相同的。

放射性同位素在沉积物风化、搬运、沉积过程中相对稳定,保留了源岩的化学组成,可以更准确地追踪物源。其中Sr-Nd同位素应用较多(图6),在冲绳海槽和黄海等物源研究中都有报道^[8,90-95],但是浙闽泥质区中的案例较少。毕磊等^[91]分析了MD06-3040孔和CM97孔的Sr-Nd,Sc/Th和

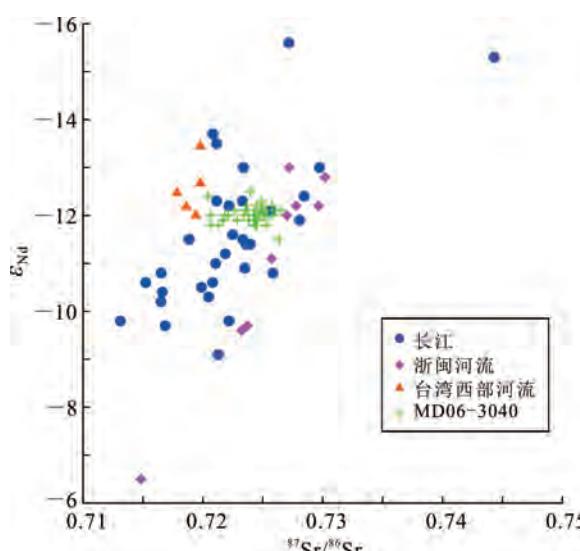
Cr/Th等地球化学数据,结果表明长江入海的大部分沉积物在早—中全新世来自中下游河谷、晚全新世主要来自上游流域,这可能是ENSO(El niño-southern oscillation)活动频率增加以及农业文明发展所致。

2.2.3 环境磁学

环境磁学测量具有快速、无损、经济的特点,可以检测到沉积环境中的微小变化,不同的磁学特征能够判别沉积物的来源。现代长江悬浮物的磁学研究表明磁铁矿是主要的磁性矿物,赤铁矿和针铁矿质量分数较少^[96]。长江和黄河沉积物的磁性参数存在明显差异,长江沉积物中亚铁磁性矿物明显高于黄河^[97-98],但二者都是亚铁磁性矿物占主导。大陆河流沉积物中只包含磁铁矿而没有磁黄铁矿,台湾西部河流沉积物中既有磁黄铁矿又有磁铁矿,因此磁黄铁矿可以作为台湾河流物质的示踪指标^[99]。这种差异是源区岩石性质造成的,台湾西部河流流域是富含磁黄铁矿的变质岩。

在东海陆架表层沉积物的研究中,磁学参数 χ_{fd} (频率磁化率)、IRM(等温剩磁)、ARM(非磁滞剩磁)、 χ_{ARM}/χ (非磁滞剩磁/磁化率)及 $\chi_{ARM}/SIRM$ (非磁滞剩磁/饱和等温剩磁)值的分布都表明:在内陆架磁性矿物颗粒频率较高,亚铁磁性矿物频率较低,磁性矿物颗粒较细^[100]。张凯棣等^[101]的研究认为内陆架磁性矿物颗粒以单畴为主,这与前人提出的伪单畴和多畴^[100, 102]相悖。泥质区 $\kappa-T$ (磁化率-温度)曲线表明,样品中磁性矿物以磁铁矿和磁赤铁矿为主,同时还有少量赤铁矿。泥质区样品投影在 $S_{100}-SIRM$ (S_{100} 为饱和等温剩磁的矫顽参数, $S_{100} = (SIRM - IRM_{100})/SIRM \times 100\%$, IRM_{100} 为100 mT磁感应强度下获得的等温剩磁)散点图上,结果表明大部分内陆架表层沉积物与长江沉积物磁学性质更接近,说明泥质区物源主要来自长江^[101]。

在台湾海峡和浙闽沿岸沉积物磁性矿物的研究中,通过磁性特征将物源划分为4个区域:台湾西部、大陆东南部、台湾北部和台湾浅滩。台湾西部沉积物的 χ 、SIRM、HIRM(硬剩磁)值较低, S_{ratio} (S 比值,饱和等温剩磁的矫顽参数)变化范围较大;而大陆东南部的沉积物有较高的 χ 、SIRM和HIRM值, S_{ratio} 变化范围很窄(82.2%~84.9%)^[99]。曹文红等^[103]提出基于 $SIRM/\chi_{lf}$ (χ_{lf} 为低频磁化率)和HIRM磁性参数示踪中国东南沿海河流和台湾河



长江数据来自文献[90],MD06-3040和浙闽河流数据来自文献[91],台湾西部河流数据来自文献[8]。

图6 MD06-3040钻孔以及潜在物源 ϵ_{Nd} - $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 散点图

Fig. 6 Relation between ϵ_{Nd} and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ of sediments in core

MD06-3040 and potential sources

流物质的判别指标:长江和浙闽河流具有高 HIRM 和低 SIRM/ χ_{lf} ,其中浙闽河流 HIRM 较长江略低;而台湾浊水溪具有低 HIRM 和高 SIRM/ χ_{lf} ,西部小河流整体具低 HIRM 和低 SIRM/ χ_{lf} 。

沉积物的磁性特征受到多种因素的制约,比如粒度、风化条件、成岩作用、自生矿物、生物作用和陆源物质输入等,因此在利用该方法进行物源示踪时需谨慎。目前对于东海内陆架表层沉积物物源的环境磁学特征研究较多,长时间序列物源的环境磁学应用较少,但在古气候演化上有较多报道^[36, 104]。

众多的科学研究表明长江是浙闽泥质区主要物质来源,来自浙闽沿岸和台湾的山地河流对泥质区也有一定贡献,并且全新世以来各自多占比重有不同程度改变。基于前人研究,将浙闽泥质区全新世物源变化分为几个时期:全新世早期($\approx 11.7 \sim 7.0 \pm 0.5$) ka B.P.,海平面较低,泥质区下部的沉积物是长江、浙闽河流和台湾西部河流的混合;中全新世($\approx 7.0 \sim 2.0 \pm 0.5$) ka B.P.,海平面上升,浙闽沿岸流和台湾暖流相互作用的东海内陆架环流体系基本形成,长江细颗粒物质在浙闽沿岸流作用下向南输运,是浙闽泥质区的主要物质来源;晚全新世(≈ 2.0 ka B.P.)以来,地球化学和黏土矿物结果都指示浙闽河流对泥质区的贡献逐渐增加。

在前人的研究中,对长江和台湾河流(如浊水溪)的沉积过程研究较透彻,而浙闽河流虽然近年来逐渐受到重视,但与长江、黄河等大河的源汇过程研究相比仍显不足。在浙闽泥质区物源研究中,浙闽河流的取样多取自河口,对母岩区的样品采集较少,降低了物源分析结果的可靠性;而且不同物源对泥质区的贡献只有定性或半定量的描述,不同替代指标的差异对物源的反演也存在误差,因此需要多种指标联合反演物源的演化及不同物源的相对贡献。另外,在以后的研究中仍需要做更多的努力来判断泥质区底部沉积物是来自低海平面时期沉积在中—外大陆架的物质,还是来自长江、浙闽河流又或者是台湾河流。

3 全新世古气候

在长时间序列的黄土-古土壤研究中,粒度和磁化率分别被用作 EAWM 和 EASM(东亚夏季风)的替代指标,并在国际上得到了广泛认可^[105-106]。前人利用湖泊、海洋等高分辨率记录对全新世 EAWM 进行了详细研究,但是由于区域位置、替代指标的差异,不同研究者的结果偏差较大,只能反映特定环境

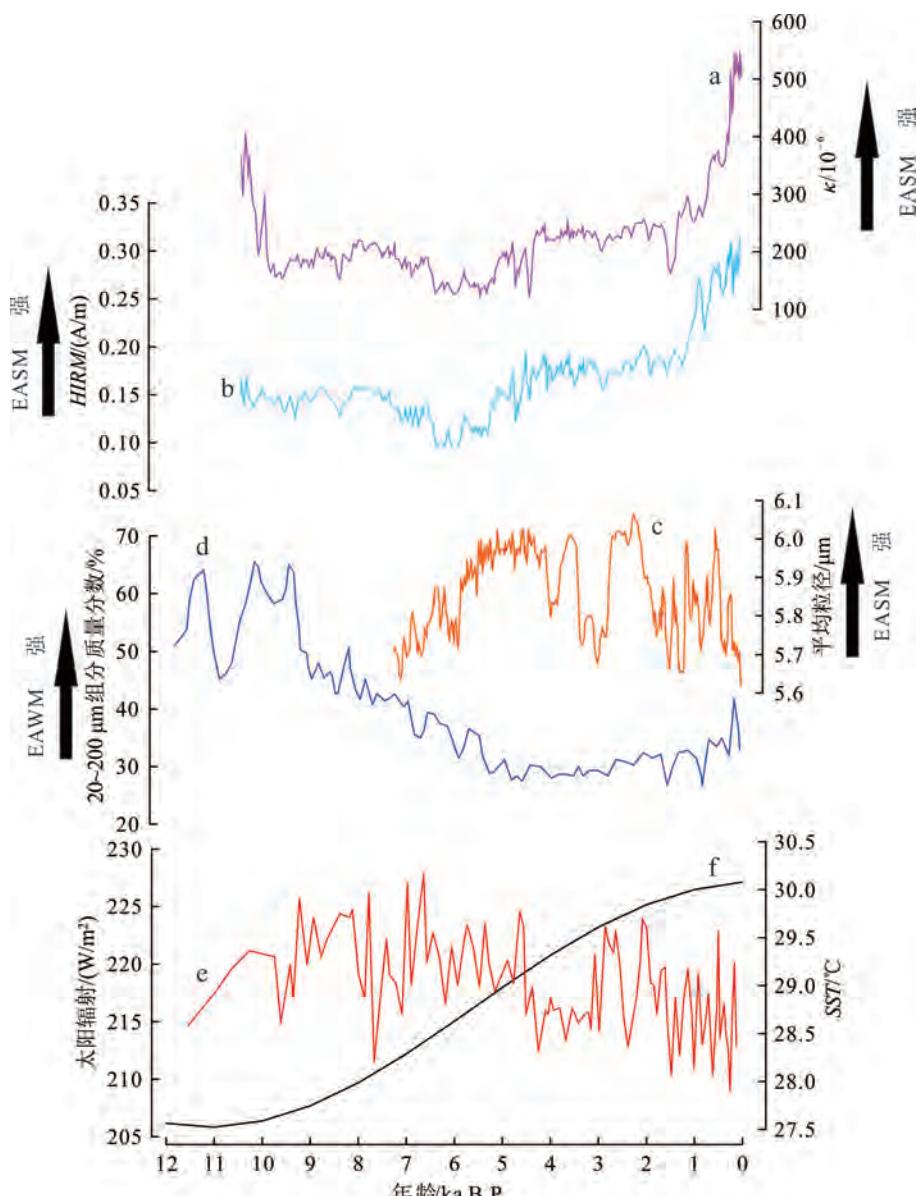
下的季风响应^[107]。

浙闽泥质区全新世以来沉积连续、分辨率高,沉积物“夏储冬输”迁移方式与浙闽沿岸流密切相关,主要受 EAWM 控制,有明显的季节性。与 EASM 相比,EAWM 研究不够详细,EAWM 本身的复杂性也给研究造成了很大困扰。近年来,利用海洋沉积物粒度提取的敏感粒级(sensitive grain size,SGS)已被广泛用来重建 EAWM 强度,但是仍然存在较多问题。

MZ01 孔敏感粒级指示的中全新世以来东亚冬季风演化过程可以大致分为 4 个阶段^[108]:8.30~6.30 ka B.P. 期间较强且波动较大;6.30~3.85 ka B.P. 期间较弱且稳定;3.85~1.40 ka B.P. 为高波动期;1.4 ka B.P. 以来进入稳定增强期。肖尚斌等^[30]从 PC6 孔提取 $< 20 \mu\text{m}$ 的组分作为近 8 ka 以来 EAWM 的指标,认为 7.60~5.10 ka B.P. 呈现出中等强度的高频波动,5.10~1.70 ka B.P. 为长期持续强盛期,1.7 ka 至今为稳定最弱期。徐方建等^[24]提取敏感粒级 $< 14 \mu\text{m}$ 的组分作为 EC2005 孔 EAWN 替代指标,着重研究了中全新世的气候变化,认为该时期 EAWM 增强、EASM 减弱,与轨道驱动的北半球夏季太阳辐照强度降低是一致的(图 7)。

MZ01、PC-6 及 EC2005 钻孔中提取的敏感粒级分别是 $> 9.71 \mu\text{m}$ 、 $< 28.0 \mu\text{m}$ 和 $< 14.0 \mu\text{m}$ 。一般认为细颗粒组分是长江沉积物在 EAWM 引起的沿岸流运输下在泥质区沉积,而粗颗粒组分则来自波浪、潮汐作用,靠近台湾海峡的粗颗粒组分则主要来自台湾山地河流。MZ01 孔中 $> 9.71 \mu\text{m}$ 的部分包含了粗粒级组分,不全是冬季风影响下沿岸流向南输运的细颗粒物质,还包括风暴潮、台风等突发事件造成的粗颗粒碎屑物质。由于粒度变化的影响因素较多,敏感粒级虽然可以从中提取对 EAWM 变化敏感的组分,但并不能完全反映整个泥质区 EAWM 的变化。

王可等^[112]在 MD06-3040 钻孔中提取了敏感粒级 $< 45 \mu\text{m}$ 作为 EAWM 的指标,年代跨度为 10 ka B.P.。而泥质区在高海平面以来才开始形成, $\approx 10 \sim 7$ ka B.P. 时为近岸浅水环境,波浪和潮汐作用强烈,主要是潮流沙脊等的再悬浮沉积,粒度不能代表沿岸流强度的变化。所以在利用粒度指示 EAWM 变化时需特别注意钻孔底界年龄,只有泥质区形成后提取的敏感粒级才能代表 EAWM 强度。基于沉积物粒度,有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 和 Mg/Ca 值,重



a 和 b 分别为 MD06-3040 钻孔的磁化率和硬剩磁^[22]; c. 东海内外陆架 EC2005 孔的平均粒径^[24]; d. 戈壁沙漠沉积物提取的敏感粒级 20~200 μm 组分的质量分数^[109]; e. 西太平洋孔有孔虫 Mg/Ca 值重建的海洋表层温度(SST)记录^[110]; f. 30°N 冬季太阳辐照强度变化^[111]。

图 7 浙闽泥质区全新世气候记录与全球纪录对比

Fig. 7 Comparison of Holocene climate records in Zhejiang-Fujian mud area and global records

建的 MZ01 孔全新世气候序列^[113]中识别出 8 次千年尺度的气候变冷事件, 分别是 8.2, 7.2, 6.2, 5.1, 4.2, 3.2, 2.3 和 1.2 ka。8.3 和 4.2 ka 事件与全球气候记录^[114]有较好的一致性, 说明东海内外陆架地区具有全球气候变化的响应。而利用地球化学指标识别的冷事件与李小艳等^[113]的结果还是有较大差别的。结合 CIA (化学蚀变指数)、Ba/Sr 和 CaO/MgO 重建的气候记录^[37]表明, 8.3~4.2 ka B.P. 气候中等温暖湿润, 4.2~2.3 ka B.P. 气候干冷, 2.3 ka

B.P. 以来气候转暖, 238 a 的显著气候周期说明中全新世以来太阳活动对区域气候有重要影响。利用底栖有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 、Mg/Ca 值、磁化率、Al/Ti、Ba/Ti 等识别出中全新世存在 8.4、7.2、6.2 ka 3 次降温事件^[115], 以 200 a 的周期最为显著, 推测其与太阳活动有关。利用 K/Ti 值^[23]建立的近 2.0 ka 以来东海内外陆架记录的 EAWM 变化表明, 1.9~1.6 ka B.P., EAWM 较弱。在 1.4~0.9 ka B.P. 之间, 大多数重建的气候记录是比较一致的, 其中 1.2~1.1 ka B.P.

是一个冷期, EAWM 较强, 而 1.4~1.2 ka B.P. 和 1.1~0.9 ka B.P., EAWM 较弱。

众多研究^[16,109,116]结果表明, 末次冰期 EAWM 与 EASM 变化是反相位的, 全新世以来二者在千年尺度上却是同相位变化, 这说明全新世二者关系更加复杂。与晚全新世相比, EAWM 在早—中全新世更强。中国北方与南方的变化是不同步的, 在北方 EAWM 强度降低发生在 10.0~7.5 ka B.P., 而南方则滞后, 大约从 6.0~4.5 ka B.P. 才开始降低^[116]。浙闽泥质区沉积受东亚季风的控制, 沿岸流在季风的影响下具有明显的季节性变化, 黑潮、台湾暖流等对研究区也有一定影响。由于分辨率较低或者测年的误差, 使用粒度、地球化学等指标反演的 EAWM 及古环境演化具有明显的区域性, 因此在进行古环境解释时要考虑区域环境影响, 明确每种指标的适用条件。浙闽泥质区受夏季风影响严重, 各替代指标能否准确代表 EAWM 变化? 现代海洋沉积动力研究表明泥质区在夏季也能进行物质迁移和沉积, 因此沉积物中同时包含冬季风和夏季风信号, 怎样更好地将二者分离开, 提取单独代表 EAWM 变化的指标是以后研究的重点。

4 结论及建议

1) 东海在 8.0~7.0 ka B.P. 进入高水位期, 泥质区开始沉积。黏土矿物、稀土元素以及 Sr-Nd 同位素是研究物源变化的重要手段, 长江以高伊利石 (67.0%±1.0%) 质量分数为特征, 而台湾河流缺乏蒙脱石。

2) 环境磁学经济、快速的优点逐渐受到重视, 长江物质以磁铁矿为主, 而磁黄铁矿是台湾河流特有的磁性矿物, 是物源识别的重要指标。受低纬热带过程(如 ENSO)和高纬大气环流(如西伯利亚高压)的影响, 中晚全新世以来泥质区气候具有百年—千年尺度的波动。敏感粒级只能用来反演 8.0~7.0 ka B.P. 以来的东亚冬季风演化, 不能代表整个全新世。浙闽沿岸流和海平面变化在泥质区演化过程中扮演重要角色, 晚全新人类活动对泥质区的影响是否占主要地位还需要更多的证据。

3) 近十几年来对泥质区的演化历史、形成机制以及区域气候变化等进行了详细研究, 取得了丰硕的成果, 但是还有很多问题亟待解决。例如, 不同指标反演的物源变化结果不一致, 需要谨慎考虑物源指标的适用条件, 剔除相关限制因素, 如粒度、自生

作用的影响。受浙闽沿岸流、台湾暖流以及夏季风的共同影响, 敏感粒级能否准确反映 EAWM 的变化也需进一步研究。

4) 百年尺度的诸多结果认为黄河对泥质区的贡献逐渐加大, 与之前认为的黄河沉积物对泥质区贡献很小甚至没有相悖。浙闽河流对泥质区的物质贡献有多大, 全新世以来的变化趋势怎样, 缺乏浙闽河流中上游母岩区的物源信息。针对以上问题, 建议以后泥质区研究的重点如下: 增加测年点、提高年代分辨率, 建立更准确的年龄-深度模型; 多种替代指标联合, 尽量减小单一指标带来的误差, 提高反演结果的可靠性; 进行多钻孔、高分辨率记录的联合解释, 恢复大区域环境变化, 消除位置、地形等的影响; 获取浙闽河流母岩区样品, 提取长江、浙闽和台湾河流独立物源端元, 定量研究各端元对泥质区的贡献。

参考文献(References):

- [1] Lambeck K, Yokoyama Y, Purcell T. Into and out of the Last Glacial Maximum: Sea-Level Change During Oxygen Isotope Stages 3 and 2[J]. Quaternary Science Reviews, 2002, 21(1/2/3): 343~360.
- [2] Yokoyama Y, Lambeck K, De Deckker P, et al. Timing of the Last Glacial Maximum from Observed Sea-Level Minima[J]. Nature, 2000, 406: 713~716.
- [3] Yokoyama Y, Lambeck K, De Deckker P, et al. Timing for the Maximum of the Last Glacial Constrained by Lowest Sea-Level Observations[J]. Nature, 2000, 406: 713~716.
- [4] 李广雪, 杨子庚, 刘勇. 中国东部海域海底沉积环境成因研究[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
Li Guangxue, Yang Zigeng, Liu Yong. Study on the Causes of Seabed Sedimentary Environment in the East China Seas[M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [5] Saito Y, Katayama H, Ikehara K, et al. Transgressive and Highstand Systems Tracts and Post-Glacial Transgression, the East China Sea [J]. Sedimentary Geology, 1998, 122(1/2/3/4): 217~232.
- [6] Mi B, Liu S, Shi X, et al. A High Resolution Record of Rare Earth Element Compositional Changes from the Mud Deposit on the Inner Shelf of the East China Sea: Implications for Paleoenvironmental Changes [J]. Quaternary International, 2017, 447: 35~45.
- [7] Yang S, Bi L, Li C, et al. Major Sinks of the Changjiang (Yangtze River)-Derived Sediments in the East China Sea During the Late Quaternary[J]. Geological Society,

- London, Special Publications, 2016, 429(1): 137–152.
- [8] Dou Y, Yang S, Shi X, et al. Provenance Weathering and Erosion Records in Southern Okinawa Trough Sediments Since 28 ka: Geochemical and Sr - Nd - Pb Isotopic Evidences [J]. Chemical Geology, 2016, 425: 93–109.
- [9] Xiao S, Li A, Liu J P, et al. Coherence Between Solar Activity and the East Asian Winter Monsoon Variability in the Past 8 000 Years from Yangtze River-Derived Mud in the East China Sea [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2006, 237(2–4): 293–304.
- [10] 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): 2141–2156.
- [11] He M, Zheng H, Huang X, et al. Yangtze River Sediments from Source to Sink Traced with Clay Mineralogy [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 69: 60–69.
- [12] Liu S, Shi X, Fang X, et al. 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 [J]. Quaternary International, 2014, 349: 270–279.
- [13] 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 Variations of Clay Minerals Contents on the Inner Shelf of the East China Sea in the Last One Hundred Years and Its Environment Implication [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2015, 37(5): 87–100.
- [14] Wen C, Graf H, Ronghui H. The Interannual Variability of East Asian Winter Monsoon and Its Relation to the Summer Monsoon [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2000, 17(1): 48–60.
- [15] Xiao J L, An Z S, Liu T S, et al. East Asian monsoon Variation During the Last 130 000 Years: Evidence from the Loess Plateau of Central China and Lake Biwa of Japan [J]. Quaternary Science Reviews, 1999, 18(1): 147–157.
- [16] Wang L, Li J, Lu H, et al. The East Asian Winter Monsoon over the Last 15 000 Years: Its Links to High-Latitudes and Tropical Climate Systems and Complex Correlation to the Summer Monsoon [J]. Quaternary Science Reviews, 2012, 32: 131–142.
- [17] Sagawa T, Kuwae M, Tsuruoka K, et al. Solar Forcing of Centennial-Scale East Asian Winter Monsoon Variability in the Mid-to Late Holocene [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2014, 395: 124–135.
- [18] Jia G, Bai Y, Yang X, et al. Biogeochemical Evidence of Holocene East Asian Summer and Winter Monsoon Variability from a Tropical Maar Lake in Southern China [J]. Quaternary Science Reviews, 2015, 111: 51–61.
- [19] Wang L, Sarnthein M, Erlenkeuser H, et al. East Asian Monsoon Climate During the Late Pleistocene: High-Resolution Sediment Records from the South China Sea [J]. Marine Geology, 1999, 156(1): 245–284.
- [20] Tu L, Zhou X, Cheng W, et al. Holocene East Asian Winter Monsoon Changes Reconstructed by Sensitive Grain Size of Sediments from Chinese Coastal Seas: A Review [J]. Quaternary International, 2017, 440: 82–90.
- [21] 赵泉鸿, 剪知滑, 张在秀, 等. 东海内陆架泥质沉积区全新世古环境变迁: 有孔虫证据 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(2): 75–82.
Zhao Quanhong, Jian Zhimin, Zhang Zaixiu, et al. Holocene Paleoenvironmental Changes of the Inner-Shelf Mud Area of the East China Sea: Evidence from Foraminiferal Faunas [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2009, 29(2): 75–82.
- [22] Zheng Y, Kissel C, Zheng H B, et al. Sedimentation on the Inner Shelf of the East China Sea: Magnetic Properties, Diagenesis and Paleoclimate Implications [J]. Marine Geology, 2010, 268(1): 34–42.
- [23] Yang W, Zhou X, Xiang R, et al. Reconstruction of Winter Monsoon Strength by Elemental Ratio of Sediments in the East China Sea [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 114: 467–475.
- [24] Xu F, Li A, Xu K, et al. Cold Event at 5 500 a BP Recorded in Mud Sediments on the Inner Shelf of the East China Sea [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2009, 27(4): 975–984.
- [25] Liu J P, Xu K H, Li A E A, et al. Flux and Fate of Yangtze River Sediment Delivered to the East China Sea [J]. Geomorphology, 2007, 85(3): 208–224.
- [26] 秦蕴珊. 东海地质 [M]. 北京: 科学出版社, 1987.
Qin Yunshan. Geology of the East China Sea [M]. Beijing: Science Press, 1987.
- [27] Hori K, Saito Y, Zhao Q, et al. Sedimentary Facies and Holocene Progradation Rates of the Changjiang (Yangtze) Delta, China [J]. Geomorphology, 2001, 41

- (2): 233–248.
- [28] Liu J, Saito Y, Kong X, 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): 2424–2438.
- [29] 肖尚斌,李安春.东海内陆架泥质沉积物的环境敏感粒度组分[J].*沉积学报*,2005,23(1): 122–129.
Xiao Shangbin, Li Anchun. A Study on Environmentally Sensitive Grain-Size Population in Inner Shelf of the East China Sea [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2005, 23(1): 122–129.
- [30] 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.
- [31] Zhao Y, Zou X, Liu Q, et al. Clay Mineralogy Indicates the Muddy Sediment Provenance in the Estuarine-Inner Shelf of the East China Sea [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 152: 69–79.
- [32] Wang K, Zheng H, Tada R, et al. Millennial-Scale East Asian Summer Monsoon Variability Recorded in Grain Size and Provenance of Mud Belt Sediments on the Inner Shelf of the East China Sea During Mid-to Late Holocene [J]. *Quaternary international*, 2014, 349: 79–89.
- [33] 徐方建,李安春,万世明,等.东海内陆架泥质区中全新世环境敏感粒度组分的地质意义[J].*海洋学报*,2009,31(3): 95–102.
Xu Fangjian, Li Anchun, Wan Shiming, et al. The Geological Significance of Environmental Sensitive Grain-Size Populations in the Mud Wedge of the East China Sea During the Mid-Holocene [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2009, 31(3): 95–102.
- [34] Zheng Y, Zheng H, Kissel C, et al. Sedimentation Rate Control on Diagenesis, East China Sea Sediments [J]. *Physics of the Earth & Planetary Interiors*, 2011, 187 (3/4): 301–309.
- [35] Liu S, Shi X, Liu Y, et al. Holocene Paleoclimatic Reconstruction Based on Mud Deposits on the Inner Shelf of the East China Sea [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 69(12): 113–120.
- [36] Chen J, Ma J, Xu K, et al. Provenance Discrimination of the Clay Sediment in the Western Taiwan Strait and Its Implication for Coastal Current Variability During the Late-Holocene [J]. *The Holocene*, 2016, 27 (1): 110–121.
- [37] Wu H, Deng B, Yuan R, et al. Detiding Measurement on Transport of the Changjiang-Derived Buoyant Coastal Current [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2013, 43(11): 2388–2399.
- [38] 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.
Zeng Dingyong, Ni Xiaobo, Huang Daji. Temporal and Spatial Variability of the Zhe-Min Coastal Current and the Taiwan Warm Current in Winter in the Southern Zhejiang Coastal Sea [J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2012, 42(7): 1123–1134.
- [39] 中华人民共和国水利部.中国河流泥沙公报:2016 [R].北京:中国水利水电出版社,2017.
The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Bulletin of River Sediments in China: 2016 [R]. Beijing: China Water & Power Press, 2017.
- [40] Milliman J D, Huang-Ting S, Zuo Sheng Y, et al. Transport and Deposition of River Sediment in the Changjiang Estuary and Adjacent Continental Shelf [J]. *Continental Shelf Research*, 1985, 4(1/2): 37–45.
- [41] 程裕淇.中国区域地质概论[M].北京:地质出版社,1994.
Cheng Yuqi. Introduction to Regional Geology of China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994.
- [42] Liew P M, Pirazzoli P A, Hsieh M L, et al. Holocene Tectonic Uplift Deduced from Elevated Shorelines, Eastern Coastal Range of Taiwan [J]. *Tectonophysics*, 1993, 222(1): 55–68.
- [43] Dadson S J, Hovius N, Chen H, et al. Links Between Erosion, Runoff Variability and Seismicity in the Taiwan Orogen [J]. *Nature*, 2003, 426: 648–651.
- [44] Ho C S. A Synthesis of the Geologic Evolution of Taiwan [J]. *Tectonophysics*, 1986, 125 (1/2/3): 1–16.
- [45] 沈焕庭,李九发,朱慧芳,等.长江河口悬沙输移特性 [J].*泥沙研究*,1986(1): 1–13.
Shen Huanting, Li Jiufa, Zhu Huifang, et al. Transport

- of the Suspended Sediments in the Changjiang Estuary[J].Journal of Sediment Research,1986(1): 1–13.
- [46] McKee B A,Nittrouer C A,Demaster D J.Concepts of Sediment Deposition and Accumulation Applied to the Continental Shelf Near the Mouth of the Yangtze River[J].Geology,1983,87(2/3): 1354–1360.
- [47] 苏纪兰.中国近海的环流动力机制研究[J].海洋学报.2001,23(4): 1–16.
- Su Jilan. A Review of Circulation Dynamics of the Coastal Oceans Near China [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2001, 23(4): 1–16.
- [48] McIntyre A,Kipp N G,Bé A W,et al.Glacial North Atlantic 18 000 Years Ago: A CLIMAP Reconstruction[J].Geological Society of America Memoirs, 1976,145: 43–76.
- [49] Clark P U,Mix A C.Ice Sheets and Sea Level of the Last Glacial Maximum [J]. Quaternary Science Reviews,2002,21(1): 1–7.
- [50] deMahiques M M,Hanebuth T J J,Martins C C,et al. Mud Depocentres on the Continental Shelf: A Neglected Sink for Anthropogenic Contaminants from the Coastal Zone[J]. Environmental Earth Sciences, 2016,75(1): 1–12.
- [51] 徐方建.末次冰消期以来东海内大陆架古环境演化[J].沉积学报,2009,27(1): 118–127.
- Xu Fangjian. Paleoenvironmental Evolution in the Inner Shelf of the East China Sea Since the Last Deglaciation[J].*Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27 (1): 118–127.
- [52] Li G,Li P,Liu Y,et al.Sedimentary System Response to the Global Sea Level Change in the East China Seas Since the Last Glacial Maximum [J]. Earth-Science Reviews,2014,139: 390–405.
- [53] Park Y A.The changes of Sea Level and Climate During the Late Pleistocene and Holocene in the Yellow Sea Region[J].Korean J Quat Res,1992,6: 13–19.
- [54] Saito Y.Sea Levels of the Last Glacial in the East China Sea Continental Shelf [J]. The Quaternary Research (Daiyonki-Kenkyu), 1998, 37 (3): 235 – 242.
- [55] Mix A C,Bard E,Schneider R.Environmental Processes of the Ice Age: Land, Oceans, Glaciers (EPILOG)[J].Quaternary Science Reviews,2001,20 (4): 627 – 657.
- [56] Lambeck K,Chappell J.Sea Level Change Through the Last Glacial Cycle[J].Science,2001,292: 679 – 686.
- [57] Grootes P M,Stuiver M.Oxygen 18/16 Variability in Greenland Snow and Ice with 10^3 - to 10^5 - Year Time Resolution[J].Journal of Geophysical Research: Oceans,1997,102(C12): 26455 – 26470.
- [58] Stuiver M,Reimer P J,Reimer R W.CALIB 7.1 [EB/OL].[2018 – 05 – 10] <http://calib.org/calib/calib.html>.
- [59] Southorn,Kashgarian,Fontugne, et al. Marine Reservoir Corrections for the Indian Ocean and Southeast Asia[J].Radiocarbon,2002,44(1): 167 – 180.
- [60] Yoneda M, Uno H, Shibata Y, et al. Radiocarbon Marine Reservoir Ages in the Western Pacific Estimated by Pre-Bomb Molluscan Shells[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2007,259(1): 432 – 437.
- [61] Li G X,Liu Y,Yang Z G.Sea-Level Rise and Sedimentary Environment Response in the East China Continental Shelf Since the Last Glacial Maximum [J].Marine Geology & Quaternary Geology,2009.
- [62] Rolett B V,Zheng Z,Yue Y. Holocene Sea-Level Change and the Emergence of Neolithic Seafaring in the Fuzhou Basin (Fujian, China) [J]. Quaternary Science Reviews,2011,30(7): 788 – 797.
- [63] Ma T,Zheng Z,Man M, et al. Holocene Fire and Forest Histories in Relation to Climate Change and Agriculture Development in Southeastern China[J]. Quaternary International,2018,488: 30 – 40.
- [64] Huang K,Zheng Z,Liao W,et al.Reconstructing Late Holocene Vegetation and Fire Histories in Monsoonal Region of Southeastern China [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2014, 393: 102 – 110.
- [65] Atahan P,Itzstein-Davey F,Taylor D,et al.Holocene-Aged Sedimentary Records of Environmental Changes and Early Agriculture in the Lower Yangtze, China [J].Quaternary Science Reviews,2008,27(5): 556 – 570.
- [66] Yi S,Saito Y,Zhao Q, et al. Vegetation and Climate Changes in the Changjiang (Yangtze River) Delta, China, During the Past 13 000 Years Inferred from Pollen Records [J]. Quaternary Science Reviews, 2003,22(14): 1501 – 1519.
- [67] Zhang M,Wei X,Sun P, et al. The Effect of Forest Harvesting and Climatic Variability on Runoff in a Large Watershed: The Case Study in the Upper

- Minjiang River of Yangtze River Basin[J].Journal of Hydrology,2012,464: 1–11.
- [68] Ren G. Decline of the Mid to Late Holocene Forests in China: Climatic Change or Human Impact? [J]. Journal of Quaternary Science, 2000, 15 (3): 273 – 281.
- [69] Xu K, Milliman J D, Li A, et al. Yangtze-and Taiwan-Derived Sediments on the Inner Shelf of East China Sea[J]. Continental Shelf Research, 2009, 29 (18): 2240 – 2256.
- [70] 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 Paleoenvironment Records of the Mud Deposits in Min-Zhe Coastal Mud Area, East China Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2010, 30(4): 19 – 30.
- [71] 范德江,孙效功,杨作升,等.沉积物物源定量识别的非线性规划模型:以东海大陆架北部表层沉积物物源识别为例[J].沉积学报,2002,20(1): 30 – 33.
Fan Dejiang, Sun Xiaogong, Yang Zuosheng, et al. A Mathematical Model on the Quantitative Provenance Identification: Take the Identification of the Surface Sediment Sources from ECS as Example[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2002, 20(1): 30 – 33.
- [72] Zheng H. Birth of the Yangtze River: Age and Tectonic-Geomorphic Implications [J]. National Science Review, 2015, 2(4): 438 – 453.
- [73] 郑洪波,魏晓椿,王平,等.长江的前世今生[J].中国科学:地球科学,2017,47(4): 385 – 393.
Zheng Hongbo, Wei Xiaochun, Wang Ping, et al. Geological Evolution of the Yangtze River[J]. Scientia Sinica Terra, 2017 , 47(4): 385 – 393.
- [74] Song B, Li Z, Saito Y, et al. Initiation of the Changjiang (Yangtze) Delta and Its Response to the Mid-Holocene Sea Level Change [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2013, 388: 81 – 97.
- [75] Wang X, Shi X, Wang G, et al. Late Quaternary Sedimentary Environmental Evolution Offshore of the Hangzhou Bay, East China-Implications for Sea Level Change and Formation of Changjiang Alongshore Current [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2015, 33(3): 748.
- [76] 席雅娟.钱塘江主要支流及干流沉积物的黏土矿物空间分布特征与影响因素研究[D].华东师范大学,2015.
- Xi Yajuan. The Research of Clay Mineral Spatial Distribution Characteristic and Influencing Factors in the Main Tributaries and Mainstream of Qiantang River[D].East China Normal University,2015.
- [77] 杨晓顺.瓯江悬沙的黏土矿物[J].海洋通报,1995,14 (3): 86 – 92.
Yang Xiaoshun. Clay Minerals of Suspended Sediments in Oujiang River [J]. Marine Science Bulletin, 1995, 14(3): 86 – 92.
- [78] 冯华,高爱国,朱旭旭,等.闽江下游及河口区表层沉积物黏土矿物含量分布特征及其环境意义[J].应用海洋学学报, 2014,33(3): 418 – 424.
Feng Hua, Gao Aiguo, Zhu Xuxu, et al. Distribution Characteristic of Clay Minerals Contents in Minjiang River and Its Environmental Significance[J]. Journal of Applied of Oceanography, 2014, 33(3): 418 – 424.
- [79] Xu Y, Chen J, Wang A, et al. Clay Minerals in Surface Sediments of the Taiwan Strait and Their Provenance [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(1): 120 – 129.
- [80] 刘升发.全新世以来东海内陆架泥质区沉积作用及古环境演变[D].中国科学院研究生院,2009.
Liu Shengfa. Sedimentary Function and Paleoenvironment Evolution of the Inner-Shelf Mud Area of East China Sea Since the Holocene [D]. University of Chinese Academy of Sciences, 2009.
- [81] 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.
Xiao Shangbin, Li Anchun, Jiang Fuqing, et al. Provenance Analysis of Mud Along the Min-Zhe Coast Since 2 ka BP[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2005, 23(2): 268 – 274.
- [82] Zhou X, Li A, Jiang F, et al. A Preliminary Study on Fingerprinting Approach in Marine Sediment Dynamics with the Rare Earth Elements [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2010, 29(4): 62 – 77.
- [83] Li C, Shi X, Kao S, et al. Rare Earth Elements in Fine-Grained Sediments of Major Rivers from the High-Standing Island of Taiwan[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 69: 39 – 47.
- [84] 朱爱美,刘季花,张辉,等.东海内陆架泥质区表层沉积物稀土元素的分布特征[J].海洋地质与第四纪地质,2012,32(1): 1 – 10.
Zhu Aimei, Liu Jihua, Zhang Hui, et al. Distribution Pattern of REEs in the Inner-Shelf Mud Area of East China Sea [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2012, 32(1): 1 – 10.

- [85] Rudnick R L, Gao S. Composition of the Continental Crust[J]. *Treatise on Geochemistry*, 2003, 3: 659.
- [86] Anders E, Grevesse N. Abundances of the Elements: Meteoritic and Solar[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1989, 53(1): 197–214.
- [87] 杨守业, 李超, 王中波, 等. 现代长江沉积物地球化学组成的不均一性与物源示踪[J]. 第四纪研究, 2013, 33(4): 645–655.
Yang Shouye, Li Chao, Wang Zhongbo, et al. Heterogeneity of Geochemical Compositions of the Changjiang River Sediments and Provenance Indication[J]. *Quaternary Sciences*, 2013, 33(4): 645–655.
- [88] Fangjian X, Anchun L, Tiegang L, et al. Rare Earth Element Geochemistry in the Inner Shelf of the East China Sea and Its Implication to Sediment Provenances[J]. *Journal of Rare Earths*, 2011, 29(7): 702–709.
- [89] Liu S, Mi B, Fang X, et al. A Preliminary Study of a Sediment Core Drilled from the Mud Area on the Inner Shelf of the East China Sea: Implications for Paleoclimatic Changes During the Fast Transgression Period (13 ka BP – 8 ka BP)[J]. *Quaternary International*, 2017.
- [90] 杨守业, 蒋少涌, 凌洪飞, 等. 长江河流沉积物 Sr – Nd 同位素组成与物源示踪[J]. 中国科学: D辑, 2007, 37(5): 682–690.
Yang Shouye, Jiang Shaoyong, Ling Hongfei, et al. Sr – Nd Isotope Composition and Source Tracing of Sediments in the Yangtze River[J]. *Science in China: Series D*, 2007, 37(5): 682–690.
- [91] Bi L, Yang S, Zhao Y, et al. Provenance Study of the Holocene Sediments in the Changjiang (Yangtze River) Estuary and Inner Shelf of the East China Sea [J]. *Quaternary International*, 2017, 441: 147–161.
- [92] 孟宪伟, 杜德文, 吴金龙. 冲绳海槽中段表层沉积物质来源的定量分离: Sr – Nd 同位素方法[J]. 海洋与湖沼, 2001, 32(3): 319–326.
Meng Xianwei, Du Dewen, Wu Jinlong. Quantitative Partition of Mixed Surface Sediments from the Middle Okinawa Trough into Their End-Members Using Sr – Nd Isotope [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2001, 32(3): 319–326.
- [93] Li T, Xu Z, Lim D, et al. Sr – Nd Isotopic Constraints on Detrital Sediment Provenance and Paleo-environmental Change in the Northern Okinawa Trough During the Late Quaternary [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2015, 430: 74–84.
- [94] Hu B, Li J, Zhao J, et al. Sr – Nd Isotopic Geochemistry of Holocene Sediments from the South Yellow Sea: Implications for Provenance and Monsoon Variability[J]. *Chemical Geology*, 2018, 479: 102–112.
- [95] Rao W, Mao C, Wang Y, et al. Using Nd – Sr Isotopes and Rare Earth Elements to Study Sediment Provenance of the Modern Radial Sand Ridges in the Southwestern Yellow Sea[J]. *Applied Geochemistry*, 2017, 81: 23–35.
- [96] Luo C, Zheng Y, Zheng H, et al. Temporal and Spatial Variations in Magnetic Properties of Suspended Particular Matter in the Yangtze River Drainage and Their Implications [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2016, 124: 204–213.
- [97] 王永红, 沈焕庭, 张卫国. 长江与黄河河口沉积物磁性特征对比的初步研究[J]. 沉积学报, 2004, 22(4): 658–663.
Wang Yonghong, Shen Huanting, Zhang Weiguo. A Preliminary Comparison of Magnetic Properties of Sediments from the Changjiang and the Huanghe Estuaries[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2004, 22(4): 658–663.
- [98] 牛军利, 杨作升, 李云海, 等. 长江与黄河河口沉积物环境磁学特征及其对比研究[J]. 海洋科学, 2008, 32(4): 24–30.
Niu Junli, Yang Zuosheng, Li Yunhai, et al. The Characteristics of the Environmental Magnetism in Sediment from the River Mouths of the Changjiang River and the Huanghe River and Their Comparison Study[J]. *Marine Sciences*, 2008, 32(4): 24–30.
- [99] Horng C S, Huh C A. Magnetic Properties as Tracers for Source-to-Sink Dispersal of Sediments: A Case Study in the Taiwan Strait[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2011, 309(1/2): 141–152.
- [100] Wang Y, Dong H, Li G, et al. Magnetic Properties of Muddy Sediments on the Northeastern Continental Shelves of China: Implication for Provenance and Transportation[J]. *Marine Geology*, 2010, 274(1/2/3/4): 107–119.
- [101] 张凯棣, 李安春, 卢健, 等. 东海陆架沉积物环境磁学特征及其物源指示意义[J]. 海洋与湖沼, 2017, 48(2): 246–257.
Zhang Kaidi, Li Anchun, Lu Jian, et al. Magnetic Property of the East China Sea Sediment: Indication to the Provenance [J]. *Oceanologia et Limnologia*

- Sinica, 2017, 48(2): 246–257.
- [102] Zheng Y, Zheng H, Deng C, et al. Holocene Paleomagnetic Secular Variation from East China Sea and a PSV Sack of East Asia [C]. 2014, 236: 69–78.
- [103] 曹文红,陈静,马俊强.大陆东南沿海河流与台湾西部河流磁性矿物特征及判源指标[J].第四纪研究,2016,36(1): 227–236.
Cao Wenhong, Chen Jing, Ma Junqiang. Magnetic Minerals as Tracers for the Mainland Coastal Rivers and West Taiwan Rivers [J]. Quaternary Sciences, 2016, 36(1): 227–236.
- [104] 徐方建,李安春,李铁刚,等.末次冰消期以来东海内
陆架沉积物磁化率的环境意义[J].海洋学报,2011,
33(1): 91–97.
Xu Fangjian, Li Anchun, Li Tiegang, et al. The Paleoenvironmental Significance of Magnetic Susceptibility of Sediments on the East China Sea Inner Shelf Since the Last Deglaciation [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2011, 33(1): 91–97.
- [105] Guo Z T, Ruddiman W F, Hao Q Z, et al. Onset of Asian Desertification by 22 Myr Ago Inferred from Loess Deposits in China [J]. Nature, 2002, 416: 159.
- [106] Zhisheng A, Kutzbach J E, Prell W L, et al. Evolution of Asian Monsoons and Phased Uplift of the Himalaya-Tibetan Plateau Since Late Miocene Times [J]. Nature, 2001, 411: 62–66.
- [107] 丁大林,李广雪,徐继尚,等.全新世亚洲季风演变 [J].地学前缘,2017,24(4): 114–123.
Ding Dalin, Li Guangxue, Xu Jishang, et al. Evolution of the Asian Monsoon During the Holocene [J]. Geoscience Frontiers, 2017, 24(4): 114–123.
- [108] 刘升发,石学法,刘焱光,等.中全新世以来东亚冬季风的东海内陆架泥质沉积记录[J].科学通报,2010,
55(14): 1387–1396.
Liu Shengfa, Shi Xuefa, Liu Yanguang, et al. Records of the East Asian Winter Monsoon from the Mud Area on the Inner Shelf of the East China Sea Since the Mid-Holocene [J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(14): 1387–1396.
- [109] Li Y, Morrill C. A Holocene East Asian Winter Monsoon Record at the Southern Edge of the Gobi Desert and Its Comparison with a Transient Simulation [J]. Climate Dynamics, 2015, 45(5/6): 1219–1234.
- [110] Stott L, Timmermann A, Thunell R. Southern Hemisphere and Deep-Sea Warming Led Deglacial Atmospheric CO₂ Rise and Tropical Warming [J]. Science, 2007, 318: 435–438.
- [111] Berger A, Loutre M. Insolation Values for the Climate of the Last 10 Million Years [J]. Quaternary Science Reviews, 1991, 10(4): 297–317.
- [112] 王可,郑洪波,Prins Maarten,等.东海内陆架泥质沉积反映的古环境演化[J].海洋地质与第四纪地质,2008,28(4): 1–10.
Wang Ke, Zheng Hongbo, Prins Maarten, et al. High-Resolution Paleoenvironmental Record of the Mud Sediments of the East China Sea Inner Shelf [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2008, 28(4): 1–10.
- [113] Li X, Jian Z, Shi X, et al. A Holocene Record of Millennial-Scale Climate Changes in the Mud Area on the Inner Shelf of the East China Sea [J]. Quaternary International, 2015, 384: 22–27.
- [114] Bond G, Showers W, Cheseby M, et al. A Pervasive Millennial-Scale Cycle in North Atlantic Holocene and Glacial Climates [J]. Science, 1997, 278: 1257–1266.
- [115] 李小艳,翦知湣,石学法,等.东海内陆架泥质沉积记录的全新世快速气候波动[J].科学通报,2015,60(4): 411–419.
Li Xiaoyan, Jian Zhimin, Shi Xuefa, et al. Holocene Abrupt Climate Fluctuations: Sedimentary Record from the Inner-Shelf Mud Area of the East China Sea [J]. Chinese Science Bulletin, 2015, 60(4): 411–419.
- [116] Zhang X, Jin L, Li N. Asynchronous Variation in the East Asian Winter Monsoon During the Holocene [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2015, 120(11): 5357–5370.