

# 东海内陆架泥质沉积体研究进展\*

李安春 张凯棣

(中国科学院海洋研究所 海洋地质与环境重点实验室 青岛 266071)

**摘要** 陆架海现代泥质沉积研究具有重要的地质学、环境科学和气候学意义,数十年来一直受到海洋科学家的关注,尤其是近年来在我国兴起了一股研究陆架泥质沉积体的热潮,取得一大批重要成果。本文对我国最大的东海内陆架泥质沉积体的研究进展进行回顾,作为典型区域呈献给读者。东海内陆架泥质沉积区从长江口水下三角洲向南,沿闽浙近岸浅海一直延伸到台湾海峡中部,全长 800km,宽约 100km,面积约 80000km<sup>2</sup>,相当于两个台湾岛的大小,实属我国乃至亚洲浅海规模最大(体积排第二)的楔式泥质沉积体和现代沉积区。该区中晚全新世沉积地层厚度较大,局部厚达 40—80m,总体上呈近岸厚、向海方向逐渐变薄,一般在 50—60m 等深线、局部可达 75m 甚至 90m 等深线附近尖灭。该区泥质沉积物粒度较细,主要由黏土和粉砂组成(大于 90%),砂含量很低(小于 10%),黏土和粉砂含量在泥质沉积区外缘急剧降低,而砂含量突然增加。沉积物类型为粉砂质黏土和黏土质粉砂,外侧与黏土-粉砂-砂(混合沉积)或泥质砂为界。粒度分布南北有一定差异,北段(长江口外至瓯江口外)近岸较粗外侧较细,近岸为黏土质粉砂,外侧为粉砂质黏土;而南段(自瓯江口至台湾海峡北部)则相反;深入台湾海峡中部的远端泥质沉积也较粗,为黏土质粉砂。现代沉积速率从长江口水下三角洲至闽浙沿岸近海以及从近岸向外陆架方向逐渐降低,与地层厚度分布相一致。悬浮体浓度空间分布,尤其是冬季悬浮体的分布与沉积速率的分布基本一致,表明沉积物是从长江口沿闽浙近海向南和从近岸向海运输的。矿物、化学和环境磁学指标等均显示沉积物主要来自长江,老黄河对该区北部,台湾物质对南部有一定影响,闽浙沿岸河流在局部也有少量贡献。该泥质沉积体的形成与全新世中期约 7.3ka BP 以来持续高海面及相应的总体沉积动力过程密切相关,主要包括闽浙沿岸流将长江物质源源不断地向南输送和沉积过程、台湾暖流、上升流在其外侧的阻挡作用,以及下降流和穿刺锋的横向输运等动力控制因素。沉积物输运主要发生在冬季,冬季风导致海洋动力加强的作用功不可没,热带气旋-台风风暴对泥质体起到了一定助长与破坏的双重作用。由于该泥质沉积体的形成与季风和沿岸流的密切关系,在形成过程中打上了气候环境的烙印,是冬季风和夏季风演化记录的良好载体,近年来的研究成果很好地揭示了中晚全新世以来千年、百年、十年尺度甚至更高分辨率的气候演化历史及气候突变事件。该泥质沉积区对人类活动的响应也较敏感,自 3.0ka BP 以来对长江流域燃火变化以及历史上中国人口的几次大迁徙均显现在沉积记录中,特别是对近几十年,尤其是三峡水库蓄水以来,长江来沙的变化也有明显的响应。

未来的研究需要进一步澄清泥质体形成发育过程不同阶段中长江、黄河、台湾、闽浙河流物质以及残留区物质的定量贡献及时空差异;深入了解人类活动的响应及环境记录研究;加强现代沉积动力过程的观测和精细的数值模拟研究,揭示泥质沉积区动力背景的空间差异性,这不仅是深化泥质沉积形成机制的需要,也可为古环境恢复提供科学支撑。

**关键词** 东海内陆架;泥质沉积;形成机制;物质来源;气候记录;环境响应

**中图分类号** P67; P722.6 **doi:** 10.11693/hyhz20200500145

\* 国家自然科学基金, 41430965 号; 国家自然科学基金, 41806056 号。李安春, 研究员, 博士生导师, E-mail: acli@qdio.ac.cn  
收稿日期: 2020-05-24, 收修改稿日期: 2020-06-02

泥质沉积是粉砂以下细粒沉积物类型的统称,包括黏土、粉砂质黏土、黏土质粉砂以及含砂量很低的砂质黏土沉积,中国陆架浅海底质沉积物中纯黏土沉积很少见,分布最广的是粉砂质黏土和黏土质粉砂沉积。现代的泥质沉积相当于古老地层中的泥岩和页岩等。泥质沉积具有特殊的物理化学特性和资源环境意义。泥质沉积物具有容易搬运又难以启动的双重特性;既不易沉积又容易沉积的矛盾特质。就其单颗粒而言,由于颗粒细小而在水介质中沉降速度缓慢;但是由于黏土颗粒的黏滞性和吸附性往往导致絮凝团形成而使颗粒增大加快沉降速度。环境意义在于其对阳离子和污染物(包括重金属和有机污染物)的吸附能力大于较粗的沉积物,使得污染物更多地被吸附在泥质沉积物中埋藏,从而减少对上覆水环境的危害;环境意义还在于对温室气体碳和甲烷气的保存,泥质沉积本身含有丰富的有机碳,是重要的碳储库(Fang *et al.*, 2019),另外在泥质沉积的下伏地层中往往存在大量生物甲烷气,由于泥质沉积的致密性和稳定性而得以保存未被释放到大气中,从而减少了这部分温室气体对大气的影 响(Chen *et al.*, 2020)。陆架泥质沉积由于受河流物质供给、海洋环流和季风的影响还是记录海洋和气候环境演化信息的重要载体。在油气勘探中泥岩不仅是生油的烃源岩,而且是储油构造的重要盖层,因此备受重视。研究现代泥质沉积对古老地层的研究和油气勘探具有很好的借鉴意义。

源远流长的黄河、长江向渤、黄、东海输入了大量细粒物质,在近代历史上黄河与长江年输沙量分别为5亿吨和11亿吨之多(Milliman *et al.*, 1985),因此中国近海现代泥质沉积分布非常广泛,尤其以东海内陆架泥质区或浙闽沿岸泥质区规模最大,属全新世沉积体系的重要组成部分(高抒, 2013)。由于篇幅所限本文仅对东海内陆架泥质区的研究进展做简要回顾。

## 1 泥质沉淀物分布

东海大陆架可大致以50—60m等深线为界分为内陆架和外陆架(秦蕴珊等, 1982),现代泥质沉积基本覆盖着整个内陆架,因此常被称为东海内陆架泥质沉积区,由于主要分布在福建、浙江沿岸海域,因此也被称为闽浙沿岸泥质沉积区或浙闽沿岸泥质带、浙闽岸外泥质区等(李广雪等, 2009),在成因上与沿岸流有关而被称为沿岸流泥质沉积(刘锡清, 1996)。

东海内陆架泥质沉积区,从长江水下三角洲跨过杭州湾一直向南延伸,至台湾海峡北部分为两支,一支贴近福建海岸并通过台湾海峡与南海细粒沉积物带相连(秦蕴珊, 1963; 秦蕴珊等, 1982, 1987)。另一支则向东南延伸至海峡中部直至接近台湾岛西岸,南可至24°N左右(刘锡青等, 1997; 李家彪, 2008),这一支也被称为环流沉积(刘锡清, 1996)。东海内陆架泥质沉积主要分布在50—60m水深以内,但局部可到75m(杨光复, 1984; 秦蕴珊等, 1987),甚至90m(Xu *et al.*, 2012)。它南北长约800余千米,北段较窄,中段宽,南段分叉,宽度大致平均约100km(Liu *et al.*, 2006),面积可达80000km<sup>2</sup>,相当于大半个浙江省或两个台湾省的面积,在我国陆架浅海乃至亚洲近海是最大的(体积屈居第二)。闽浙近岸浅海沉积区与现代长江水下三角洲同属现代沉积区,外侧与外陆架残留沉积之间有一混合沉积带相隔,但大致在27°40′—28°40′N之间被泥质砂所取代。不同学者报道的宽度有所差异(图1),但这条混合沉积带基本都存在(杨光复等, 1984; 金翔龙, 1992; 刘锡清等, 1997; 李家彪, 2008)。

## 2 粒度组成及分布特征

东海内陆架泥质沉积主要由黏土和粉砂组成,含砂量很低,一般小于10%,黏土含量从40%、50%到大于50%,最高可达60%。黏土组分含量等值线呈条带状平行海岸分布,整体上呈北低南高,近岸高远岸低的分布特征,但是在舟山岛以南至瓯江口之间则呈近岸含量较低而向外含量较高,再向外含量又缓慢降低的分布特征,在29°40′N左右20%的黏土含量等值线可达124°E。而在瓯江口以南则变成近岸高向外降低,再向外陡然降低,黏土含量从大于50%迅速降至10%以下(杨光复等, 1984)。粉砂的含量分布与黏土粒级基本一致,而在长江口、杭州湾和瓯江口以北近岸海域含量最高(大于50%),向南及向海方向降低,但远不如黏土粒级向外扩散的远,在29°N附近30%的粉砂等值线比黏土粒级向岸缩进约70km。砂粒级的含量恰好与黏土和粉砂的分布相反,长江口外至闽浙沿岸海域砂的含量很低,普遍小于10%。此外还表现出砂含量小于10%—50%等值线分布在长江口外及在浙江沿岸28°—29°N之间密集且由海向岸凹进,然而在28°30′—29°30′N之间等值线稀疏而向外凸出(秦蕴珊等, 1987)。沉积物类型与粒度组分具有类似的分布特征。泥质区以黏土质粉砂占优势,



动力条件和沉积物供给的变化控制,而中外陆架砂质区的粒度分布随季节的变化不明显。同样地,南黄海也有这种沉积物粒度随季节变化的现象(卢健等, 2015)。

内陆架泥质沉积对人类活动导致的长江来沙减少和粒度变化的响应颇为敏感,这也从另一方面印证了该区泥质沉积与长江物质的紧密关系。Zhang 等(2018 a)的研究表明距今 70 年以来内陆架泥质区沉积物粒度变粗阶段与长江输沙量剧烈降低和粒度变粗有很好的对应。Gao 等(2019)的研究对比也表明,三峡大坝建成蓄水后该泥质区沉积物粒度明显变粗,在舟山-瓯江口近岸段尤为显著,向南响应减弱。然而, Xu 等(2016)对三峡工程蓄水后不同年份的研究结果显示,内陆架泥质区舟山岛至瓯江口段粒度有变细的趋势,而在泥质区外侧粒度反而变粗。认为是长江泥沙供应减少、杭州湾建桥工程引起水动力改变以及钱塘江和瓯江供沙等造成。需注意的是,钱塘江和瓯江来沙细粒组分含量很低,其河口细粒沉积物大都为长江物质倒灌提供(孙英等, 1984),所以利用黏土矿物做物质端元对比时需特别注意。事实上,与 20 世纪 60—70 年代的数据相比(秦蕴珊等, 1987)浙江近岸的粒度确有明显变粗的迹象,当年杭州湾南部至瓯江口以北近岸海域粉砂含量 50%的等值线已变成了现今的 70%(Xu *et al.*, 2016),这种差别可能部分地由粒度分析方法的不同所导致(张富元等, 2011)。

### 3 形成过程及控制因素

东海内陆架泥质区形成于全新世高海平面低能沉积环境(Xu *et al.*, 2009b; Li *et al.*, 2014),冬季沿岸流在沉积物向南运输的过程中发挥了重要作用,冬季风暴、波浪、潮汐和近岸上升流的作用将泥质沉积物限制在内陆架范围内(杨作升等, 1992; 郭志刚等, 2002; Liu *et al.*, 2006, 2007; Zheng *et al.*, 2015; Qiao *et al.*, 2017a)。为厘清东海内陆架泥质区沉积物运移及沉降机制,前人已从沉积物组成和悬浮体分布(秦蕴珊, 1963; 秦蕴珊等, 1982, 1987; 杨光复等, 1982; 杨光复等, 1984)、现场观测(Liu *et al.*, 2018a)、航次观测数据分析(Bian *et al.*, 2013b; Li *et al.*, 2016)、遥感数据反演(Yuan *et al.*, 2008; 庞重光等, 2010; Liu *et al.*, 2015; Wu, 2015)以及数值模拟(Bian *et al.*, 2013a; Pang *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2018b)等方面进行了研究。

秦蕴珊(1963)(秦蕴珊等, 1982, 1987)通过沉积物与悬浮体的研究认为,内陆架泥质沉积主要来自长

江,闽浙沿岸河流贡献不大,主要由冬季沿岸流输运,杨光复等(1982, 1984)也持同样观点。Hu (1984)认为东海内陆架沉积物分布与上升流系统有关,在冬季,受季风驱动的沿岸流向南流动,引起近岸下降流,而向北的台湾暖流引起上升流,在两个垂直环流单元(近岸下降流和远岸上升流)的作用下,沉积物的输运被限制在上升流内侧。基于 2008 年 12 月和 2009 年 8 月两个航次的悬浮体调查, Li 等(2013)认为底部浑浊层是沉积物输移的主要方式,上升流和海洋锋面系统在闽浙沿岸泥质区的形成中起着重要作用。悬浮体的分布特征很好地指示了长江泥沙自北向南和由岸向海输运。东海内陆架的悬浮体分布具有三个特征:一是悬浮体浓度由岸向海降低,等值线走向与岸线基本平行,在长江口外  $122^{\circ}00'—123^{\circ}00'E$  形成梯度带,近岸为悬浮物质强沉积区,外侧为悬浮物质弱沉积区(杨光复等, 1984);二是终年悬浮体高值区见于长江口、杭州湾等河口地区;三是东海北部( $30^{\circ}00'N$  以北)悬浮体浓度高于南部(秦蕴珊等, 1987; 金翔龙, 1992)。这三个特征几乎一年四季均存在(李家彪, 2008)。长江口悬浮体分布具有明显的季节性变化规律,受台湾暖流阻挡长江泥沙被限制在  $122^{\circ}15'E$  以内沉积或向南输运(郭志刚等, 2003)。Wu(2015)在 2013 年夏季进行的区域观测表明内陆架泥质区沉积物长距离的扩散是近底沉积物沿陆架输运以及上升流导致的湍流使得沉积物再悬浮共同作用的结果。通过不同季节的悬浮体浓度、海洋环境要素调查发现,东海内陆架冬季悬浮体浓度为夏季悬浮体浓度的三倍以上;夏季,长江冲淡水主要影响河口及杭州湾区域,长江入海沉积物主要在长江口附近沉积,由于水体温度的分层限制了沉积物的再悬浮和运移;冬季是沉积物运移和沉积的关键时期,夏季沉积的河口沉积物再悬浮,南流的长江冲淡水及闽浙沿岸流将细粒沉积物带向南方,造成闽浙沿海海域的高泥沙含量;同时,闽浙沿岸流和台湾暖流之间的锋面阻止了沿岸高浊度水向东扩散(Dong *et al.*, 2011; Bian *et al.*, 2013b; Li *et al.*, 2013; Liu *et al.*, 2015; Qiao *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2018a),而在近岸浅海沉积并形成内陆架泥质沉积带,与亚马孙河在大西洋和波河在亚德里亚海陆架沿岸泥质带的形态类似。水色遥感反演分析(庞重光等, 2010)以及数值模拟分析(Bian *et al.*, 2013a; Zeng *et al.*, 2015; Pang *et al.*, 2016; 刘世东等, 2018)也支持了这一观点。刘升发等(2009)对泥质沉积区中南部的粒度趋势分析结果显示,表层沉积物的

总体运移方向呈 NE-WS 向, 而研究区边缘有向左右两侧偏移的现象, 南部闽江河口区沉积物由近岸向海方向辐射状运移, 净输运模式主要受控于流系和地形等多种因素。

近年来的研究表明, 除了沿岸输运外, 东海内陆架细粒沉积物存在明显的跨陆架横向输运。Bian 等(2013a)利用区域海洋环流模型(Regional Ocean Model System, ROMS)模拟了陆源沉积物在东海的输移过程, 认为台湾暖流向外海的分支将部分沉积物向东海中外陆架输运。Liu 等(2015)通过卫星图像及数值模拟分析认为冬季风作用下的 Ekman 输运导致了近岸物质向外海输运。Wu(2015)分析认为在黑潮入侵、Ekman 输运以及地形等综合因素影响下导致的海洋锋面的波动是导致近岸细粒沉积物跨陆架输运的原因。Ding 等(2016)结合卫星测高和原位水文测量分析了 22 年的东海陆架跨陆架水交换, 发现跨陆架输运可以分为三部分: 地表 Ekman 输运、地转输运和底层 Ekman 输运。我们对比发现, 闽浙沿岸泥质区的跨陆架向外延伸部分恰与观测到的悬浮体跨陆架输运的位置一致。根据沉积物粒度、矿物和磁化率分布特征, 并对比温盐和悬浮体资料分析, 东海内陆架泥质沉积分布形态受到台湾暖流、黑潮入侵水及内陆架外缘水文锋面位置的影响(Liu *et al.*, 2018b; Zhang *et al.*, 2019b)。

现代沉积速率的分布可反映沉积强度、物质来源方向和沉积环境稳定性。已有研究表明东海的沉积速率以长江水下三角洲最高, 其次是内陆架, 呈从长江口向南和从近岸向外海方向逐渐降低的分布趋势。长江水下三角洲至泥质区北部一般大于 1.0cm/a, 向南降低到 0.5—1.0cm/a。泥质区北部宽度较大, 但是在 27°N 附近大幅度缩窄, 外陆架沉积速率在 0.1—0.5cm/a 之间, 向外降到 0.1cm/a 以下(Xu *et al.*, 2012)。不同学者的结果均显示同样的分布规律, 即自北向南和自西向东沉积速率降低(叶银灿等, 2002; Su *et al.*, 2002; Lim *et al.*, 2007; 刘升发等, 2009; 李军等, 2012; Qiao *et al.*, 2017b)。

在泥质沉积的形成过程中, 风暴影响也是不可忽视的, 这种风暴不仅有夏季的热带气旋和台风还有冬季的大风。目前对台风过程的观测已有开展, 冬季风暴过程尚未见报道。台风莫拉克于 2009 年 8 月 7 日在台湾中部登陆, 8 月 9 日穿过台湾海峡后又在福建登陆, 是当年影响东海的最强台风。为研究台风对海洋环境和泥沙输移的影响, Li 等(2012b)先后于 8 月 1 日

和 8 月 12 日对浙闽近海泥质沉积中心进行的两次调查结果表明, 水温、盐度和浊度分布均发生了显著变化。台风过后水层得到较均匀的混合, 温跃层消失。上层水温和盐度有所降低, 而浊度大幅度增加, 普遍上升到大于 50FTU(甚至大于 150FTU)是风前的数倍至十倍。与风前相比, 风后底层浑浊层的浊度和体积都有较大的增加。50m 以下低温、高盐深层水的入侵也明显减少。Lu 等(2018)于 2015 年 6 月 19 日—9 月 3 日进行了连续 49 天的海底观测, 结果显示台风灿鸿(Chan-hom)过境期间, 海水温度略有降低, 近底层最大流速达到 152.0cm/s, 悬浮体最大浓度超过 1785mg/L, 悬浮体浓度达到台风前平均值的 50 倍。台风期间, 大部分悬浮体来自于表层沉积物的再悬浮; 沉积物输运指向西南(沿岸)和西北(陆地)方向, 期间向西南方向和陆地方向沉积物输运量分别占观测期间各自总量的 89% 和 44%, 主要输运当地再悬浮的沉积物。Zhang 等(2018a)认为在短时间尺度内的沉积物粒度突变一般是由洪水和台风引起的。在发现并研究了韵律层的基础上 Zhang 等(2018b)和 Tian 等(2019)对两个柱状岩心的高分辨率分析结果表明, 在距今 150 年的时间里岩心 DH6-1 和 C0702 分别记录到 3 个和 15 个台风事件层, 厚度在几毫米至 8cm 不等。这些台风沉积层与下伏地层呈整合接触并具有向上变细的粒序, Zr/Rb 比值及 Sr 含量急剧增加。台风层累积厚度分别占岩心总长度的 7.6% (DH6-1) 和 17.5% (C0702)。认为夏季台风对东海内陆架泥楔的形成起了重要作用。另外, 泥质沉积还可能受到古海啸大浪的影响, Yang 等(2017) 研究认为南海的大地震对该区有较弱影响, 但来自琉球方向的海啸影响可能更值得研究。

## 4 沉积体厚度及发育过程

### 4.1 泥质沉积厚度及分布

早年根据柱状岩心及钻孔资料研究发现, 在细粒沉积层之下为与外陆架相似的砂质沉积, 细粒沉积和粗粒沉积之间往往为由黏土-粉砂-砂组成的混合沉积或泥质砂等过渡性沉积, 现代混合沉积分布在泥质沉积外缘与残留沉积之间, 呈狭窄的条带状。而泥质沉积层底部的混合沉积说明在形成泥质体之前经历了一段时间的有泥而动力较强沉积环境, 这与声学地层调查揭示的薄层海侵地层分布是一致的(Xu *et al.*, 2012)。泥质沉积地层厚度近岸一带一般 45m, 最大可达 80m, 向外陆架方向逐渐减薄尖灭(秦蕴珊等, 1987; 叶银灿等, 2002)。高分辨率电火花地层勘测进

一步证明, 东海内陆架泥质沉积呈近岸厚, 向海逐渐变薄, 边界一般在50—60m等深线附近, 个别地方可到75m, 最远可达90m等深线附近, 是一大型楔状泥质沉积体, 因此也被称为内陆架泥质沉积体。在长江口水下三角洲和瓯江口外形成厚层沉积中心, 厚度分别为65m和40m(Liu *et al.*, 2006, 2007; Xu *et al.*, 2012)。该泥质区南北长达约800km, 东西宽约100km, 从长江入海口向南沿浙江和福建海岸向南进入台湾海峡, 覆盖在海侵泥砂层之上, 与表层泥质沉积的分布范围基本吻合(Liu *et al.*, 2007)。泥楔内部可划分四个不同的声学单元, 自下而上为: 单元I (晚更新世, 主要为下切谷充填), 单元II(由海侵形成, 地层较薄),

单元III (11—2ka BP, 下覆地层)和单元IV (2—0ka BP, 平坦而不透明的地层)。

根据高分辨率地层厚度估算的内陆架泥质沉积体积达 $450 \times 10^9 \text{ m}^3$ , 总质量达 $540 \times 10^9 \text{ t}$ , 在亚洲仅次于缅甸近岸海域的楔式泥质体(表1); 通量为 $2.4 \times 10^8 \text{ t/a}$ , 相当于长江输沙量的一半(Liu *et al.*, 2007; Xu *et al.*, 2012)。而Deng等(2017)根据2012年2月在泥质区北部的观测和估算结果表明, 长江口及水下三角洲每年向南总输沙量为2.7亿吨。这一结果是目前长江年输沙量的三倍多, 认为在沿岸地区有相当大的净沉积物迁移。尽管不同方法间差别明显, 但仍可说明长江物质对该泥质区的巨大贡献。

表1 亚洲陆架浅海主要全新世楔式泥质沉积体  
Tab.1 Major Holocene mud wedges in shelf seas of Asia

泥质体名称	面积(km <sup>2</sup> )	体积(km <sup>3</sup> )	总质量(t)	主要来源	文献
东海内陆架	$8 \times 10^4$	450	$540 \times 10^9$	长江	Liu <i>et al.</i> , 2007
黄海山东半岛沿岸海域		250	$300 \times 10^9$	黄河	Liu <i>et al.</i> , 2004
越南南部沿岸海域	$1.77 \times 10^4$	120	$130 \times 10^9$	湄公河	Liu <i>et al.</i> , 2017a
缅甸沿岸海域	$6 \times 10^4$	1075	$1290 \times 10^9$	伊洛瓦底江	Liu <i>et al.</i> , 2020

末次冰期结束后由于全球气候回暖两极冰盖及高原冰川融化导致海平面上升, 在末次冰期里低海面时暴露的东海陆架和期间形成的古河道、下切谷、湖泊、洼地等, 随着海平面的上升, 海岸不断后退而接受沉积物充填。在外陆架接受海洋沉积时的海平面上升初期, 内陆架由于海拔位置较高, 在低洼之处(湖泊、洼地等)可能接受沉积, 亦可能处于无沉积或剥蚀状态。随着海侵的发展既而内陆架也开始接受海洋沉积, 并经历了从滨岸到浅海的沉积环境变化(杨光复等, 1982; Xiao *et al.*, 2006)。内陆架泥质沉积就是海平面达到或接近现代海平面高水位时(距今约8—7ka)开始形成, 并在持续的高海面环境里发育的。高分辨率的声学地层和岩心资料均有明显的揭示(Xiao *et al.*, 2006; Liu *et al.*, 2006, 2007; 徐方建等, 2009a; Xu *et al.*, 2012; Li *et al.*, 2014)。

#### 4.2 泥质体发育中的物源问题

沉积学研究表明东海内陆架泥质沉积体是全新世中期海平面达到或接近高位后闽浙沿岸流作用的产物, 其大部分沉积物来自长江, 当地的小型河流可能也提供少部分物质(Liu *et al.*, 2007)。早期的研究主要通过表层和柱状样沉积并结合悬浮体分析, 认为东海现代沉积主要发生在内陆架, 长江为主要物源,

早在1963年就建立了沉积概念模型(秦蕴珊, 1963), 后经历次补充并不断完善, 但总体框架没有大的改变(杨光复等, 1982; 杨光复等, 1984; 秦蕴珊等, 1987; Liu *et al.*, 2006, 2007; Li *et al.*, 2014; Liu *et al.*, 2018a), 都认为东海内陆架泥质沉积主要来源于长江, 闽浙沿岸物质贡献较小。近期研究发现, 尽管该泥质沉积形成于全新世中期高海面以来, 沉积环境相对比较稳定, 然而各沉积阶段的沉积速率则很不同。Xu等(2012)研究认为由于当时海平面上升较快, 泥质沉积直接沉积在滨岸环境形成的砂质沉积之上, 造成了清晰地声学反射界面, 在过去的11ka中, 长江物质沉积堆积速率是不稳定的, 表现为两高、一低的堆积速率阶段。5—8ka BP的快速沉积阶段可能与长江流域最大东亚夏季季风降水有关; 另一个高沉积速率阶段, 0—2ka BP, 可能反映了河流域人类活动的增加。低沉积速率时期为2—5ka BP期间, 见于南部和北部长江沉积中心, 可能与河流输沙量低或台湾暖流和中国沿海沿岸流加强有关(徐方建等, 2009b)。取自泥质区的EC2005钻孔记录到末次冰消期以来的4次快速沉积事件, 其中3次都发生在全新世中晚期, 均与东亚冬季风的增强或是气候的变冷相一致, 而且与中国湖光玛珥湖沉积物Ti含量以及北大西洋浮冰

碎屑相吻合, 与世界范围内存在的新仙女木事件、7.3ka BP冷事件、第二新冰期(5.5ka BP强降温事件)以及北大西洋1.4ka BP 浮冰事件均有良好的对应。这说明在海平面相对稳定的环境中, 气候变化导致河流来沙量及沿岸流运输能力的变化对泥质沉积的发育成为主要影响因素。对比各孔全新世成泥以来的沉积速率, 最高发生在6—4ka BP之间。在EC2005钻孔岩心中最高沉降率(1324—1986cm/ka) 发生在5.9—5.2ka BP之间 (Xu *et al.*, 2009a), 在700a的时间里沉积厚度达11m。类似量级的沉积速率还见于MD06-3042岩心(郑妍等, 2010)。如此高的沉积速率不可能是由浙闽沿岸小型河流造成(图2), 而是大量长江沉积物南迁的结果(Liu *et al.*, 2018a)这得到矿物和化学数据的支持(董江等, 2015; Bi *et al.*, 2017)。长江水下三角洲YD0901孔的粒度、TOC和TN的分析结果显示, “中全新世大暖期”(7—6ka BP)水下三角洲加速营造, 同时闽浙泥质区开始缓慢形成。在距今2.7ka左右流域人类活动逐渐加剧 (王敏杰等, 2012)。泥质区南部岩心F15的黏土矿物和沉积速率甚至显示出自4ka BP以来闽浙泥质区长江源细粒沉积物向最南部的扩展减弱(Chen *et al.*, 2017)。此外, 尽管2ka BP沉积速率升高的原因仍存在不同认识(Feng *et al.*, 2016), 但大都认为是与长江流域及河口源汇的演变和人类活动造成的水土流失加剧, 如农业发展和森林砍伐, 烧荒毁林等有关(Liu *et al.*, 2007; Xu *et al.*, 2012; Pei *et al.*, 2020)。

然而, Wang等 (2015)和Zhang等 (2015)的研究结果与上述不同。根据杭州湾近海的沉积记录, Wang等(2015)认为距今4.3ka以前长江沉积物向南搬运较少。此外, Zhang等(2015)提出细粒物质从长江向内陆架的沉积开始于距今2ka。在此之前, 细粒沉积物是由全新世前陆架沉积物改造而来的。东海大陆架上的沙脊系统, 在强烈的潮流作用下重新改造, 可能成为内陆架泥质沉积体下层主要沉积物源 (Gao *et al.*, 2014, 2015)。上述不同学者的认识差异似乎表明, 狭长的强潮海湾与开阔的陆架在物源供应上可能大不相同。另外, 长江进入杭州湾的沉积物部分还会再次向外搬运, 例如胡日军等(2009)对舟山群岛海域表层沉积物的运移特性行的分析结果显示, 净输沙方向总体沿落潮方向从内向外海输运。至于泥质体形成初期陆架沉积改造和分选物质参与是有可能的, 根据前述在泥质沉积的底部和现代泥质沉积区外侧存在混合沉积(杨光复等, 1982; 金翔龙, 1992; 刘锡清等,

1997)分析, 外陆架砂确有与来自内架的泥混合的现象, 这些混合沉积是由风浪、潮流及风暴条件造成。但从现有泥质区内多个钻孔的粒度组成看砂含量都很少, 有时见细砂或粉砂薄层及有孔虫碎壳薄层(肖尚斌等, 2004, 2005a, b, c; 徐方建等, 2009a, b; 郑妍等, 2010; Mi *et al.*, 2017), 此外, 砂层也不完全是外陆架运输而来有可能是就近由强分选造成, 在泥质沉积中常见富含孔虫壳或介壳碎屑的薄砂层, 被认为是强分选的风暴产物(肖尚斌等, 2004)。这说明外陆架物质向内陆架的运输距离和强度都有限, 而以细粒物质向外输运占绝对优势, 这可从沉积速率近岸高于远岸、泥层厚度由岸向海变薄直至尖灭以及粒度由岸向海变细, 个别地方呈舌状向外延伸等得到证明(Liu *et al.*, 2006, 2007; Xu *et al.*, 2012; Qiao *et al.*, 2017b; Zhang *et al.*, 2019a)。

高分辨率地震剖面还显示在台湾海峡东南、中部和北部也分布楔式沉积体, 厚达 50m 的斜层理沉积, 覆盖在冰后期的海侵海床上。但那里的楔式沉积物粒度较粗, 以粉砂-砂为主。斜层理构造和内部沉积层序指示是来自台湾西部浊水溪物质向西北方向的进积。粒度和矿物数据也表明沉积物主要来自台湾, 在台湾海峡西北部与来自闽浙近岸的细粒物质交汇, 没有进一步向西的迹象。然而, 另有矿物研究结果表明有来自闽浙沿岸的细粒和片状矿物向台湾方向输运(陈华胄, 1993; Xu *et al.*, 2009b), 东海沉积物粒度类型分布图显示这一区域与闽浙沿岸近海一致(刘锡清等, 1997; 李家彪, 2008)。地震剖面连同放射性碳和地磁年代表明, 这套斜层理地层形成于距今 10ka 年以来。总体积约 375km<sup>3</sup>, 年均堆积量约为 60×10<sup>6</sup>t/a, 相当于台湾西部河流平均年输沙量(100×10<sup>6</sup>t/a)的 60%。其余部分去向不明, 推测可能向东北输入冲绳海槽南部, 也可能向南进入南海 (Liu *et al.*, 2008)。

#### 4.3 泥质沉积体及沿岸流形成年代

高分辨率地层和岩心 AMS<sup>14</sup>C 测年及岩性特征表明, 东海内陆架泥质沉积开始形成于全新世中期高海面以来, 内陆架泥质区现有多个钻孔的 AMS<sup>14</sup>C 测年资料, 但底界年龄不够统一, 除了 MD06-3042孔底界年龄为 4208a BP 外, 其他孔的底界年龄在 7281—8179a BP 之间, 大致可代表泥质沉积体的形成时间。这似乎与水深有一定关系, 水深较大的泥质体外部边缘形成较早, 但不很明显(表 2)。造成这种结果的原因可能是多方面的, 如沉积环境的变化, 测年材料的不同及新老材料的混合等。EC2005 钻孔位

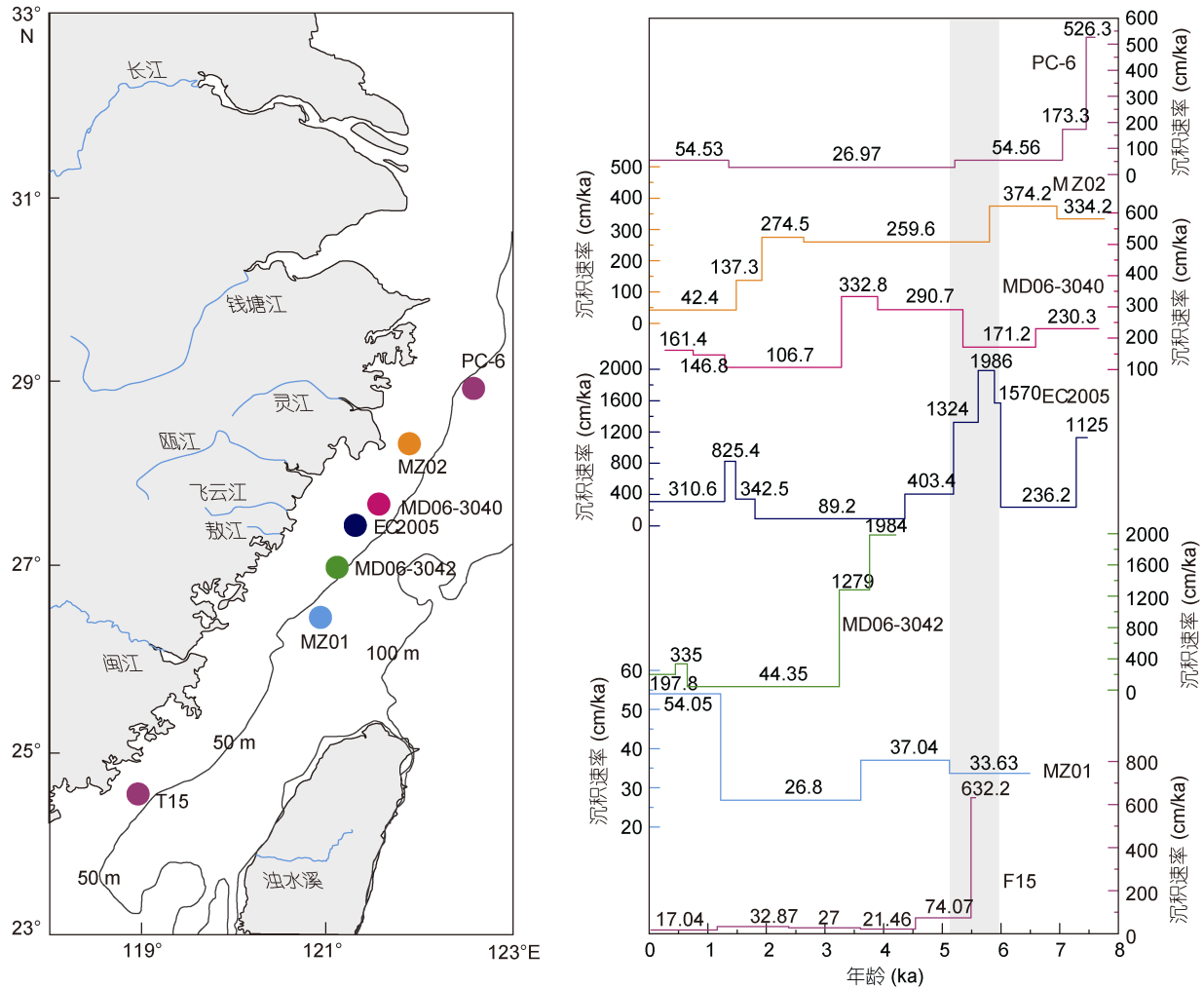


图2 8ka以来东海内陆架泥质沉积体的沉积速率(改自 Liu *et al.*, 2018c)

Fig.2 Sediment accumulation rates at the Zhejiang-Fujian mud belt in the past 8 ka (modified from Liu *et al.*, 2018c)

注: 由北向南: PC-6 参考 Xiao 等(2006); MZ02 参考 Liu 等(2014); MD06-3040 参考 Wang 等(2014); EC2005 参考 Xu 等(2009a); MD06-3042 参考 Zheng 等(2010); MZ01 参考 Liu 等(2011); F15 参考 Chen 等(2017).

于南部沉积中心附近, 是现有几个钻孔当中泥质沉积最厚的, 底层年龄为 7.3ka BP 大致居中, 是在吸取前期经验的基础上, 严格选择近边界层的泥质沉积

中的完整有孔虫壳体分析而得到的数据(徐方建等, 2009b)。现有年代数据和分布可以说明泥质沉积体的形成两侧基本上是一致的。

表2 东海内陆架主要钻孔中泥质沉积底界年龄

Tab.2 The bottom age of mud sediments in main cores on the East China Sea inner shelf

站号	站位水深(m)	底界深度(m)	日历年龄(a BP)	参考文献
PC-6	56.7	4.30	7602	肖尚斌等, 2005a
PC-7	64.0		8179	Xu <i>et al.</i> , 2012
EC2005	36.0	28.06	7281	徐方建等, 2009b
MD06-3040	47.0	15.86	7666	Wang <i>et al.</i> , 2014
MD06-3042	62.0	18.00	4208	郑妍等, 2010
MZ01	64.7	2.96	8279	Liu <i>et al.</i> , 2013
MZ02	32.4	19.70	8126	Mi <i>et al.</i> , 2017



内陆架泥质沉积体开始形成的时间不早于 8.3ka 似乎说明闽浙沿岸流也形成于这个年代, 其实不然。该泥质沉积形成并发育到如此大的规模与全新世中期以来持续的高海面关系最为密切, 为泥质沉积创造了形成发育的空间和时间, 其次才是沿岸流。换句话说, 沿岸流的泥沙输运作用是泥质沉积形成的必要条件, 而持续的高海面是大型泥楔发育的必要环境。因此可以推断闽浙沿岸流形成要早于内陆架泥质沉积, 大约在 12ka BP 前后就已出现, 这在 EC2005 孔有很好的记录(徐方建等, 2010a)。但这也只能代表内陆架的记录, 其实沿岸流的形成主要取决于海平面或海岸线位置。据此推测, 沿岸流一直存在只是位置不同而已。进而可以相信不仅海侵时期可形成沿岸泥质沉积, 而且在海退时期同样可以形成这类沉积, 然而在海平面快速升降阶段, 时空变化较快不利于泥质沉积形成发育, 只有在海平面变化迟缓或较长时间的停顿时期才能大规模发育, 因此楔式泥质沉积体的发育阶段即是海平面和海岸线相对稳定时期。

## 5 物质来源的矿物化学证据

无论是现代沉积还是古老沉积, 物源研究都是一个关键问题, 查明物源有助于判别沉积输运方向和恢复古环境。在东海内陆架泥质区的物源问题上对长江来源的认识比较一致, 然而在老黄河物质有没有参与其中的问题上仍然没有取得统一的认识。一种观点认为东海内陆架沉积物主要来自长江, 其次是沿岸诸小型河流, 浙闽一带沿岸物质影响甚微。老黄河物质没有参与长江口和闽浙泥质区的沉积作用, 苏北近岸的细粒物质和来自黄海其他地区的悬浮体被沿岸流输送到济州岛西南泥质区沉积(秦蕴珊等, 1982; 杨光复等, 1984); 而另一种观点则认为老黄河物质随苏北沿岸流南下长江口和闽浙沿岸并参入了那里的沉积(许东禹, 1985), 部分来自海岸和陆架侵蚀作用的产物。东海外陆架泥质沉积主要来自黄海, 其次由长江供给。围绕沉积物物源问题几十年来不同作者已做了大量工作, 在矿物、地球化学元素、同位素及环境磁学等方面获得丰富的证据和进一步的认识。

### 5.1 碎屑矿物

碎屑矿物是沉积物砂和粉砂粒级的主要成分, 其组成与组合受源区母岩和气候环境的控制, 是物源识别的传统而有效的指标。碎屑矿物在东海内陆架泥质沉积的物源判别中取得良好的效果, 尤其在长

江和黄河的物源判别中发挥了重要作用。由于黄河与长江流域地质和气候环境的不同造成了两条大河泥沙的矿物组成、组合及特征单矿物化学组分等均有明显差别, 正是这些差别为海区物源的区分带来了方便(胡邦琦等, 2011; 范代读等, 2012)。

长江沉积物的白云石、锆石、楣石、钛铁矿(尽管上游和平均值不及黄河, 但下游和河口远大于黄河)、钾长石及石英/长石比值等均高于黄河, 另外, 造岩矿物和副矿物长江也大于黄河, 长江沉积物富含一种厚板状的暗绿色风化云母在黄河沉积物中却未见到, 而黄河的碎屑方解石、云母含量大于长江(陈丽蓉, 2008)。在小于 32 $\mu\text{m}$  的细粒沉积物中黄河的长石/石英、钾长石/石英和斜长石/石英比值都显著大于长江, 在 2—4 $\mu\text{m}$  粒级中甚至高出 3—5 倍, 凸显长江的化学风化作用远大于黄河(杨作升等, 2008)。浙江沿岸河流沉积物重矿物以绿帘石、磁铁矿、钛铁矿、赤铁矿含量高, 而普通角闪石、黑云母含量低, 且不含白云石显著区别于长江物质(孙英等, 1984; Liu *et al.*, 2018c)。

浙江省沿岸河流, 钱塘江沉积物中的重矿物组合以赤铁矿、褐铁矿、绿帘石为主(王昆山等, 2007; Zhang *et al.*, 2015)。来自灵江的重矿物组成主要是绿帘石、角闪石、锆石、磁铁矿等, 锆石含量显著较高, 瓯江、飞云江、鳌江基本都主要由绿帘石、角闪石和黑云母组成(贺松林, 1991), 并富含氧化铁及硫化物(例如: 磁铁矿、赤铁矿、黄铁矿)。福建省沿岸河流, 闽江沉积物中重矿物以磁铁矿、绿帘石、赤铁矿、角闪石、钛铁矿和锆石为主(徐茂泉, 1996)。台湾浊水溪河口的重矿物组合以锆石和石榴石为主(邓凯等, 2016); 而在大陆河流中常见的典型重矿物(如磁铁矿和绿帘石)则由于基岩的不同而在台湾岛河流中不常见。除重矿物组合外, 特征重矿物, 如锆石, 独居石, 石榴石, 电气石, 磷灰石, 金红石, 铁钛氧化物矿物的单矿物成分分析, 已被广泛用于物源研究(Yang *et al.*, 2009)。其中, 长江单颗粒磁铁矿的化学分析具有独特的母岩矿物化学特征(Yue *et al.*, 2016)。

陈丽蓉等(1986)通过中国碎屑矿物组合及其分布模式的研究, 认为现代黄河物质可影响到山东半岛南部海阳县近岸海域。老黄河物质主要分布在连云港至长江口以北的沿岸海域, 而东海陆架区遍布长江物质, 以白云石含量高为显著特征。东海内陆架泥质沉积区白云石和白云母等片状矿物含量高, 平均含

量分别为29.7%与18.1%，其中片状矿物和白云石的最高含量分别可达71%和44.1%。相反，其他重矿物、普通角闪石、绿帘石、钛铁矿等含量低，磁铁矿、锆石、榍石等虽有出现但含量很低，且重矿物和稳定矿物含量也低，轻矿物含量高。这些特征反映了远源及较弱的沉积动力环境，在沉积物的输运过程中受地形的影响和海流的作用矿物经历了水动力的分选，但尽管如此仍具有与长江沉积物一致的矿物组合，即片状矿物、白云石、普通角闪石与绿帘石矿物组合，并仍带有明显的长江物源特征(陈丽蓉等, 1979, 1982, 1984)，此外该区黄铁矿较丰富，南部白云母、白云石含量更高(李家彪, 2008)。这与闽浙沿岸小型山地河流的矿物组合明显不同。最近加密测站后的分析结果表明，轻重矿物组成分布特征除了有些细节和横向跨陆架输运的发现外(图3b)，其他基本一致，说明几十年来尽管人类活动对河流来沙量及粒度组造成了影响，该泥质区的矿物组成依然为长江来源没有发生明显变化，仍保持着长江物源特征，只有局部受到沿岸河流的影响(张凯棣等, 2016; Zhang *et al.*, 2018a)。由上述可知，普通角闪石和绿帘石是东海的常见矿物，而不同物源间存在差异，长江物质角闪石高于闽浙沿岸河流，绿帘石含量则远不及后者。从绿帘石与普通角闪石的比值分布也可看出长江物源特征，并可注意到长江物质从北向南的延伸和南部有所减弱，沿岸河流影响有所显现(图3a)。东海中南部的重矿物分析结果也表明，60m等深线以浅的内陆架海域沉积物来自长江，中外陆架和陆坡的沉积物来源于中国大陆(陆凯等, 2019)。为了更有代表性，扩大粒级(31—250 $\mu\text{m}$ )范围后的EC2005钻孔岩心重矿物

分析结果表明，不仅全新世，而且在末次盛冰期末期以来研究区沉积物一直来自长江，沿岸物质的影响很弱，只有最近1.5ka BP以来由于人类活动导致河流物质增加才有所显现(董江等, 2015)。该钻孔40m以下岩心的X射线衍射分析结果也显示有白云石的存在，具有长江物质特征(徐方建等, 2011b)。贺松林(1991)的重矿物和黏土矿物的聚类分析结果表明，长江口与杭州湾的重矿物相似性高达0.99；长江与杭州湾、浙中沿海和温州湾之间的黏土矿物组分相似系数均在0.99，表明它们具有高度相似性和同源性。但长江口与废黄河口之间黏土矿物的相似性较差。在没有考虑碳酸盐矿物的情况下长江口与老黄河口的重矿物仍然相似性较低(如果考虑碳酸盐矿物相似性会大大降低)。张富元等(1984)和王先兰(1986)分别通过对东海陆架表层和柱状沉积物的研究认为，现代碎屑物质主要来自长江，但也存在着黄海物质的迹象。全新世沉积物的碎屑矿物组成与现代长江和黄河泥沙的矿物组成相一致。王昆山等(2007)对长江水下三角洲沉积物的重矿物分布及组合研究结果显示，那里的重矿物以普通角闪石-绿帘石为优势矿物组合，以低级变质来源的绢云母、白云母为特征矿物，局部富含普通辉石和氧化铁矿物，基本可以代表长江物源。王中波等(2012)的分析结果显示东海陆架表层沉积物主要矿物组合是普通角闪石-绿帘石-不透明矿物(磁铁矿、钛铁矿和赤-褐铁矿等)-稳定矿物(石榴石和锆石等)-片状矿物(绿泥石和云母类矿物)，主要来自长江。陈华胄(1993)的研究表明，台湾海峡重矿物有近源与远源之分，比重大的颗粒状重矿物主要来自两岸河流和附近岛屿，而大量片状矿物来自闽浙沿岸流的输运。

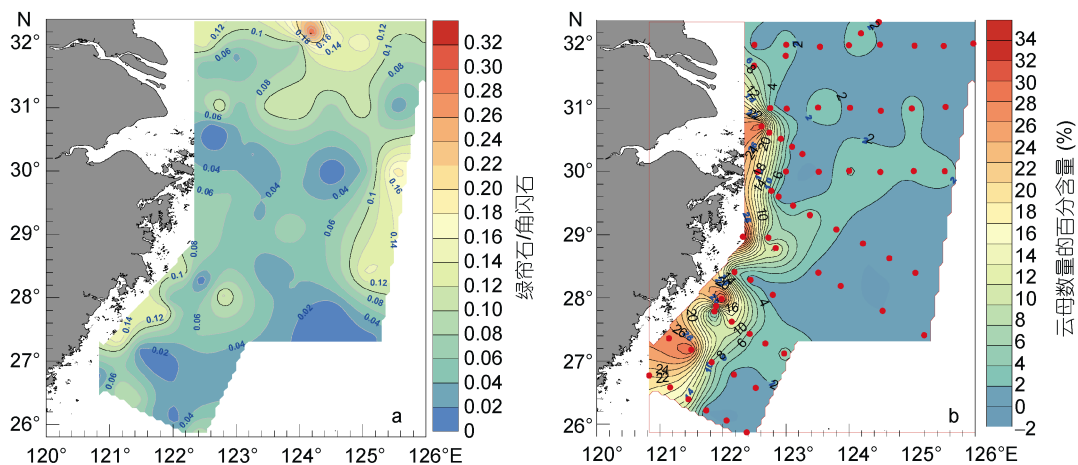


图3 东海陆架绿帘石/普通角闪石含量比值(a)及云母的颗粒百分含量(b)分布

Fig.3 Distribution of epidote vs hornblende ratio (a) and mica percentage (b) on the East China Sea shelf

## 5.2 黏土矿物

黏土矿物产生于不同气候条件下的地表岩石风化, 必然携带沉积物来源和气候环境信息, 在沉积物来源追踪和古环境恢复中得到广泛应用。东海内陆架周边河流黏土矿物组成存在差别, 有利于物源识别。黄河沉积物含有较高的蒙皂石, 矿物组合依次为伊利石>蒙皂石>绿泥石高岭石, 黏土矿物结晶程度较好; 长江沉积物蒙皂石多以膨胀性混合层矿物出现, 高岭石高于黄河, 矿物组合为: 伊利石>高岭石>绿泥石>蒙皂石(膨胀性混合层矿物), 黏土矿物的结晶较差(杨作升, 1988)。浙江沿岸河流物质黏土矿物以较高的伊利石和绿泥石, 较低的高岭和蒙皂石为特征(朱凤冠等, 1988)。两大河流黏土矿物的化学成分也有差别, 黄河主要黏土矿物的化学特征是以富钾、钙, 而长江主要黏土矿物则以贫钾和富铁、镁为特征(何良彪等, 1997)。与大陆河流对比, 台湾河流具有明显不同的黏土矿物组合特征。台湾河流沉积物以伊利石和绿泥石为主, 高岭石含量很低, 几乎不含蒙脱石(李传顺等, 2012)。

东海陆架表层沉积物黏土矿物分析结果显示, 黏土矿物相对含量由高到低为伊利石(平均65.4%)、绿泥石(平均14.4%)、蒙皂石(平均13.3%)和高岭石(平均6.9%); 高岭石含量自浙江沿岸向外陆架东北方向呈逐渐减小的趋势; 陆架区东北部和中南部的伊利石含量较低、蒙皂石含量较高, 东南部的伊利石和蒙皂石含量分布与其相反(周晓静等, 2010)。朱凤冠等(1988)的研究结果也显示从长江口至浙江近岸为高岭石高值区, 指示长江物源特征。Xu等(2009b)用X射线衍射方法进行的黏土矿物和碎屑矿物分析结果表明, 东海陆架泥质沉积物的黏土矿物主要来自长江, 长江的黏土矿物可以到达台湾海峡东部靠近台湾一侧。来自台湾浊水溪的黏土矿物主要分布在靠近台湾近岸海域及台湾海峡中部并向海峡西部延伸至福建近岸海域。然而来自台湾的中粉砂和极细砂粒级的碎屑矿物可扩散至泥质区南部, 主要在夏秋季随台风引发的洪水排泄入海并由台湾暖流向北输送。内陆架泥质区北部DD2孔的黏土矿物分析结果表明, 近2ka以来沉积物来源也为长江。物源的定量计算表明, 内陆架泥质沉积物中长江的贡献基本稳定在83%—85%, 且历史上黄河的改道与北徙并没有对本区的沉积物来源产生明显的影响(肖尚斌等, 2005a)。然而, 蓝先洪等(2011)认为, 长江口外表层沉积物的黏土矿物主要来自黄河和长江。元素Q-型聚类分析显示, 现代黄

河物质及老黄河物质主要沉积于研究区东北部29°30'N以北地区, 长江物质主要在研究区西部及中部区域沉积(章伟艳等, 2013)。Zhao等(2018)注意到2003年三峡水库蓄水以来物质来源很大程度上已转向中下游为主。长江口泥质区和闽浙泥质区北部的物质主要来自长江; 而长江口及其东南部的沉积物是由长江和来老黄河口的物质供给。石学法等(2010)根据黏土矿物分析结果认为内陆架泥质区沉积物主要来自长江, 以富集伊利石为特征; 闽江物质主要分布在闽江口附近小范围区域, 特征为富集高岭石和绿泥石。

## 5.3 元素地球化学

地球化学在物源判别中是不可或缺的重要手段, 随着技术进步和分析仪器的发展近年来这方面的研究发展迅猛。因此在该泥质沉积的物源判别中元素与同位素方法也有不俗的表现。东海内陆架泥质沉积不仅在粒度和矿物组成上与外陆架显著不同, 而且在地球化学上也独树一帜。全样化学分析结果显示, 绝大多数亲碎屑而与黏土矿物有密切关系的元素, 如Al、K、Mg、Fe、Cu、Ni、Cr、Rb及Zr、REE等均在泥质沉积中富集, 而在外陆架的砂质沉积中Si、Ca、Sr较富集, 据此总结出“粒度控制律”概念(赵一阳等, 1982a, b, 1986)。内陆架泥质沉积小于2 $\mu\text{m}$ 细粒组分的元素含量同样具有这种现象, 如高Fe、Ti、Rb, 而低Ca、Sr的特征, 其分布特征不仅有别于外陆架, 而且显著区别于老黄河口海域及济州岛西南泥质区(李国刚, 1988; 陈丽蓉, 2008)。赵一阳等(2002)通过对中国近海沉积物元素地球化学研究总结出元素的物源效应、气候效应和亲陆性, 即“渤海、黄海、东海及南海沿岸泥质沉积的地球化学特征分别与黄河、长江、珠江沉积物的地球化学特征一致, 显示了元素的物源效应; 从渤海到南海, 由于气候的变化使沿岸泥质沉积中某些元素有所流失或富集, 显示了元素的气候效应; 中国沿岸泥质沉积元素的丰度相对接近中国大陆沉积物的丰度, 而不同于西太平洋褐色黏土和深海黏土的丰度, 显示了元素的亲陆性”。郭志刚等(2000)的研究结果也显示内陆架泥质区沉积物的地球化学特征与长江沉积物非常一致。朱爱美等(2012)研究结果显示, 东海内陆架泥质区表层沉积物的REE主要来自长江, 但是浙江沿岸河流也有一定贡献。元素示踪和悬浮体粒径定量计算结果显示长江沉积物主要分布于32°N以南及台湾暖流影响区以西的海域, 黄河沉积物主要分布于32°N以北、台湾暖流影

响区以东海域(范德江等, 2002)。PC-6岩心沉积物化学元素的判别函数计算结果表明, 7.7ka BP以来闽浙沿岸泥质沉积物的元素组成相对稳定, 沉积物主要来源于长江, 而可能并无黄河沉积物的输入(肖尚斌等, 2009)。徐方建等(2009a)根据EC2005钻孔岩心沉积物稀土元素配分模式、稀土内部分馏差异以及与平均粒径关系的分析认为, 研究区不同阶段的沉积物来源有所不同, 从主要来自湖盆流域(17.3—12.3ka BP期间)到以湖盆流域物质为主向长江物质为主转变的过渡阶段(12.3—9.8ka BP), 再到长江物质占主导(10—9.8ka BP起)。既而利用判别函数、Eu异常与稀土元素总量的关系( $\delta\text{Eu}_N$ - $\Sigma\text{REEs}$ )图解以及物源定量识别方法, 综合判别了东海内陆架EC2005钻孔的泥质沉积物来源, 结果表明, 该钻孔上段泥质沉积物的长江平均贡献量达93.7%, 并未识别出黄河物质(徐方建等, 2011b)。长江口东南泥质区边缘CJ43短柱沉积物的 $^{210}\text{Pb}$ 测试及稀土元素分析结果表明, 150年来沉积物REE主要来源于长江流域的风化产物且基本继承了源区的组成特征(冯旭文等, 2011; Xu *et al.*, 2011)。王昕等(2012)对长江口ZM11短柱岩心元素分析结果表明, 近70年来沉积物物源比较稳定, 基本来自长江物质的输入。章伟艳等(2013)通过稀土元素与铂族元素的聚类分析和动力环境分析, 将长江口和杭州湾及邻近海域划分为几个沉积区并分别分析了其物源, 认为长江河口现代沉积区、长江口东北部近岸现代沉积区、杭州湾现代沉积区、济州岛西南冷涡现代沉积区均以长江来源物质输入为主。Sr、Nd同位素分析结果清楚地表明, 取自崇明岛的CM97岩心沉积物和取自东海内陆架泥质沉积中部的MD06-3040孔沉积物均源于长江并得到Cr/Th-Sc/Th关系图的进一步证明, 而受闽浙物质影响较小(Bi *et al.*, 2017)。正烷烃溶源的定量评价结果显示, 长江输入是主要的陆地贡献(Duan *et al.*, 2019)。

然而, Liu 等(2010a)根据长江口外泥质区ECS-0702孔岩心的元素和矿物分析结果认为, 距今540a以来黄河物质对该区有重要贡献。Mi等(2017)根据取自东海内陆架泥质区中部的MZ02钻孔岩心稀土元素分析以及古环境研究认为, 该泥质沉积物具有多源性, 主要来自长江、闽江和台湾岛西部河流的碎屑产物, 但不同阶段来源不同。认为三个主要物源的陆源物质贡献量受海平面变化及东亚季风驱动下的台湾暖流与闽浙沿流的控制。晚更新世和早全新世(13—9.8ka BP)海侵期间沉积速率高, 沉积物由长江、台湾西部河流

和闽江沉积物混合而成。全新世早期(9.8—7.3ka BP)增强的东亚夏季风将闽江和台湾西部河流的物质向东北方向输送成为东海陆架浅水区域细粒沉积物的主要来源, 而长江物质很少。在7.3—3.5ka BP期间增强的台湾暖流将台湾河流沉积物输送到东海内陆架成为那里的主要物源。而自3.5ka BP以来长江源陆源碎屑的突然增加与东亚季风和台湾暖流的减弱有关。

#### 5.4 环境磁学

已有研究表明东海周边河流物质的磁学特征具有明显差异, 例如, 黄河物质的亚铁磁性矿物含量明显低于长江, 闽浙沿岸的河流物质及台湾河流物质的磁学性质也不同, 因此磁学特征适用于东海的物源示踪(王永红等, 2004; 邢云, 2007; 牛军利等, 2008; Zhang *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2009; Li *et al.*, 2012a; Luo *et al.*, 2016; 张凯棣等, 2017; Liu *et al.*, 2018c)。东海东北部泥质区沉积物磁学性质的研究结果显示, 长江和老黄河口为主要物源, 另外还显示出台湾物质及朝鲜半岛物质的磁性信号(Liu *et al.*, 2003; 刘健等, 2007; Wang *et al.*, 2010; Kim *et al.*, 2013)。前人对东海北部、长江口外海域进行了沉积物磁学分类, 并推断黄河物质可影响到长江口北部(Liu *et al.*, 2010b; 周鑫等, 2011; 潘大东等, 2015)。台湾西部河流沉积物以含磁黄铁矿以及较低的 $\chi$ 、SIRM、HIRM为主要特征, 明显区别于闽浙沿岸河流的沉积物(Horng *et al.*, 2011; Liu *et al.*, 2018c)。最近的研究结果表明东海表层沉积物磁学特征分布及其磁学参数与长江、黄河的对比均显示长江物源, 尤其是内陆架, 而外陆架泥质区则呈现出黄河物质特征(图4、图5)。另外, 内陆架泥质区南部部分站位受到人类活动及瓯江物质的影响(张凯棣等, 2017)。

## 6 泥质沉积的环境响应与气候记录

全新世是地质历史上的最新时期, 也是第四纪气候旋回中最近的间冰期阶段, 因此它是认识地质历史的一个重要窗口, 查明这一时期的海洋沉积特征和气候演化规律不仅是地质理论发展的需要, 而且对预测和应对气候变化有重要意义。有效的气候环境替代指标是揭示过去气候变化不可或缺的标尺和追踪环境演化的线索, 虽然已经有许多气候指标被广泛应用, 但是由于不同的指标往往具有区域性和局限性, 仍然需要更多、更有效而且更高分辨率的替代指标, 以满足实际研究工作的需要。大陆架是陆地与海洋的过渡带, 且陆架沉积是陆海相互作用的产

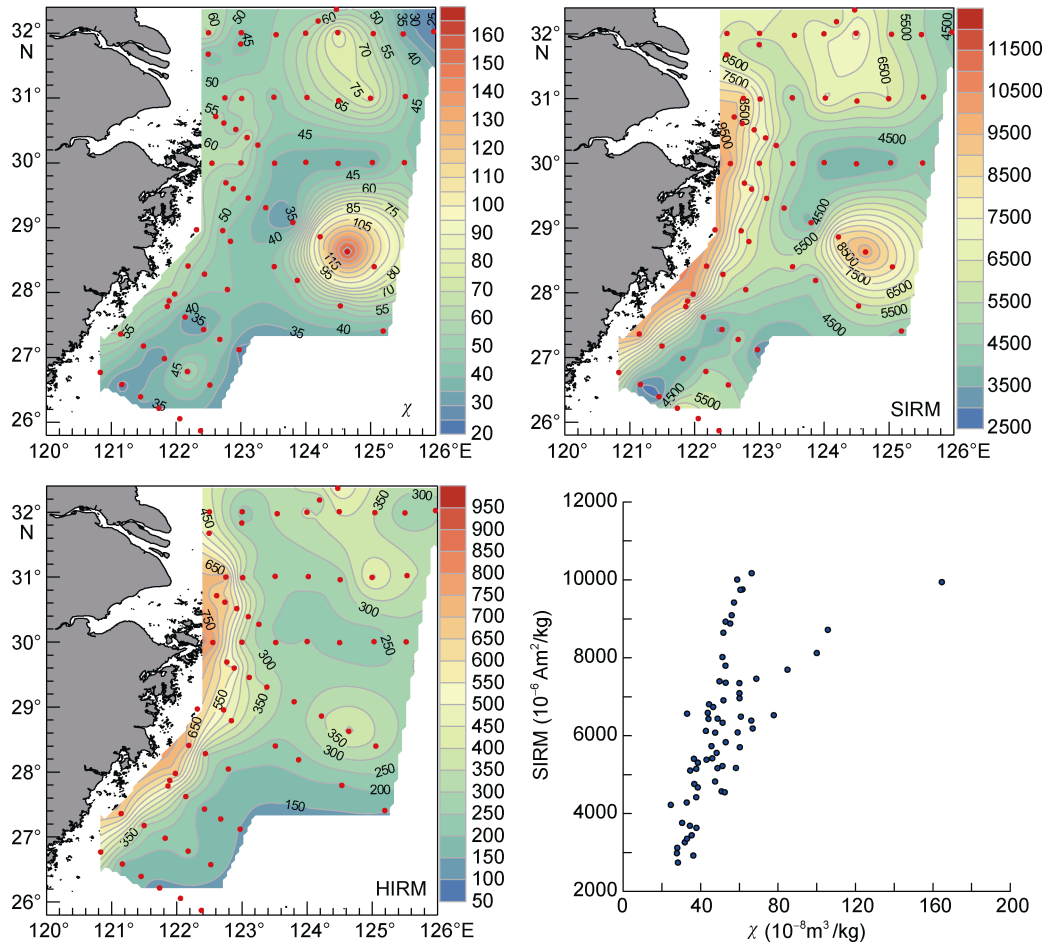


图 4 表层沉积物  $\chi(10^{-8}m^3/kg)$ 、SIRM( $10^{-6}Am^2/kg$ )和 HIRM( $10^{-6}Am^2/kg$ )的平面分布及  $\chi$  与 SIRM 的相关性(引自张凯棣等, 2017)

Fig.4 The contour map of  $\chi$ , SIRM, HIRM and the correlation between  $\chi$  and SIRM (after Zhang *et al*, 2017)  
注:  $\chi$  为磁化率, SIRM 为饱和等温剩磁, HIRM 为硬剩磁

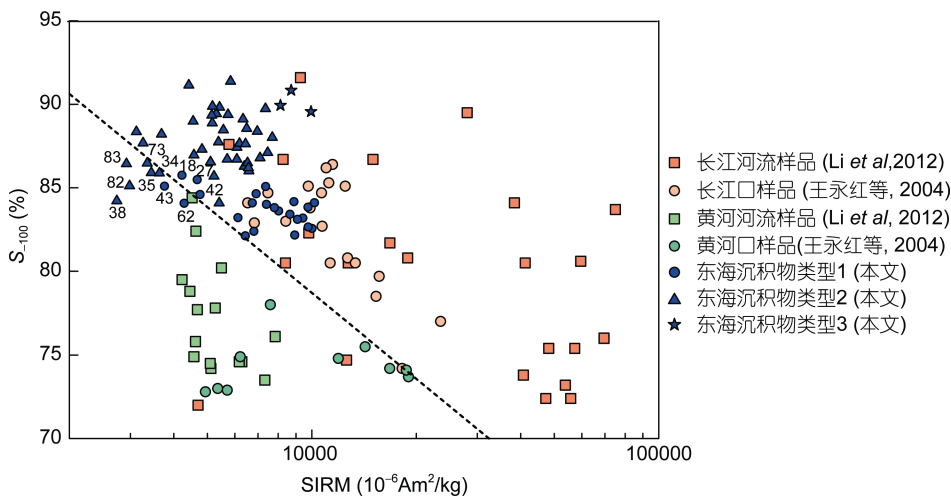


图 5 东海沉积物与长江、黄河沉积物磁学参数对比(引自张凯棣等, 2017)

Fig.5 Ratio of  $S_{100}/SIRM$  of the sediments in the East China Sea and the Changjiang (Yangtze) River and the Huanghe (Yellow) River (after Zhang *et al*, 2017)

物, 在一定的条件下形成和保存, 必然记录着气候环境的演化信息, 尤其是泥质沉积由于其沉积环境相对稳定及其特有的物理、化学性质更有利于环境信息的记录和保存。在我国近海分布的多处沿岸泥质沉积和陆架涡旋泥质沉积中, 记录着高分辨率的气候环境信息。由上述可知, 东海内陆架泥质沉积的形成过程与长江来沙和冬季闽浙沿岸流输送密不可分, 并受台湾暖流的阻挡, 由全新世中期高海面以来长江泥沙的不断供应和沿岸流的季节性输运而形成, 而沿岸流又受到季风的趋动, 因此泥沙输送强度及粒度和矿物化学组分必然受到季风的控制, 在沉积物中留下冬季风和夏季风的烙印。在古季风研究中夏季风的替代性指标比较多, 真正能直接指示冬季风的指标相对匮乏。作为冬季风替代指标的黄土粒度被成功用于研究第四纪冬季风演化, 大洋风尘沉积也被用来重建第四纪冬季风演化和大陆干旱历史, 揭示轨道尺度的气候变化, 但是低的沉积速率限制了高分辨率的气候记录的获取。由于东亚冬季风活动最明显的地区是中国大陆东岸和西太平洋到印度尼西亚一带(孙柏民等, 1997), 且东海陆架位于东亚冬季风下风方向的海陆过渡带上, 内陆架全新世厚层泥质沉积, 将沿岸流与冬季风紧密联系起来, 成为研究冬季风演化的理想高分辨研究材料, 同时也为冬夏季风对比提供了材料, 近十几年来取得了可喜的研究成果(肖尚斌等, 2004; 徐方建等, 2010b; 葛倩等, 2011; 王琳森等, 2014)。

肖尚斌等(2004)根据对东海内陆架泥质区北部的DD2岩心资料研究建立了沉积物敏感粒度与冬季风的关系, 从距今2ka来的沉积记录中识别出9次降温事件和温暖阶段, 其中包含隋唐暖期、小冰期和大降温等气候事件, 与竺可桢气候曲线、古里雅冰心氧同位素曲线和格陵兰冰心氧同位素曲线可很好的对比。张晓东等(2006)通过对该泥质区北部30号柱样高分辨率粒度数据的端元分析模型反演, 分离出的3个端元及其比值用来反映沿岸流强度变化, 及反映东亚冬季风强度和中国温度波动的历史, 结果与近百年来东亚冬季风强度观测记录、竺可桢的中国温度波动曲线以及葛全胜的中国东部冬半年温度变化序列有很好的对应关系。肖尚斌等(2005a)还通过将PC-6岩心敏感粒径作为东亚冬季风演化的替代性指标, 揭示了距今8ka以来东亚古季风的演化。识别出东亚冬季风的3个演化阶段: 7.6—5.1ka BP为中等强度的高频率波动; 5.1—1.7ka BP以多期次、较频繁的强盛活动

为特点; 1.7—0ka BP为稳定而较弱的时期。这些东亚冬季风活动的强盛期, 均在不同区域和材料的记录中找到了相对应降温证据, 表明气候变化的区域性以及全球性联系。肖尚斌等(2005a)进一步研究发现, 冬季风敏感粒径与太阳黑子变化之间存在良好的相关性, 这说明在过去的8ka里, 控制东亚冬季风百年至十年尺度变化的主要因素之一是太阳辐射的变化。同时PC-6岩心敏感粒度时间序列的频率谱分析结果还显示出以2463a、1368a、128a、106a、100a、88—91a、76—78a和70—72a为中心的、具有统计学意义的周期。东亚冬季风和夏季风在这些旋回上有很好的一致性, 东亚季风和印度季风在全新世也有共同的旋回, 这与太阳辐射的变化是一致的(Xiao *et al.*, 2006)。此外肖尚斌等(2006)还从PC-6孔的研究中揭示出70年的变化周期, 经广泛的对比分析后认为也是太阳辐射的结果。Xu等(2009a)通过对东海内陆架泥质沉积区EC2005钻孔上部5.9—5.2ka BP期间的快速沉积层段700年的高分辨率(1.0—1.5ka)东亚冬季风记录研究, 识别出5.5ka BP前后的全球降温事件, 并发现全新世中期的东亚冬季风具有显著周期变化, 主要表现为62年和11年太阳活动周期及6—5年的现代ENSO周期, 认为5.5ka BP左右的降温事件可能起因于轨道驱动和太阳活动变化, ENSO对全球气候系统也有一定影响(徐方建等, 2009b)。Zhang等(2018a)对8个短柱岩心的粒度、 $^{210}\text{Pb}$ 和 $^{137}\text{Cs}$ 进行分析并重建了近70年以来的沉积历史, 揭示了人类活动和气候变化对东海内陆架沉积的影响。分析发现粒度频率谱分析结果表现出与太阳活动周期相对应的10—11年和20—22年周期以及厄尔尼诺南方涛动相对应的3—8年的周期。徐方建等(2011a)从EC2005钻孔岩心中揭示出4次快速沉积事件。在千年时间尺度上大的沉积阶段主要受控于物源供应、海平面变化以及可容空间的大小。而在百年时间尺度上东亚冬季风增强或气候变冷为主要控制因素, 与中国湖光岩玛珥湖沉积物Ti含量以及北大西洋浮冰碎屑具有良好的对比, 并良好地对应于世界范围内存在的新仙女木事件、7.3ka BP冷事件、第二新冰期(5.5ka BP强降温事件)以及北大西洋1.4ka BP浮冰事件(徐方建等, 2011a)。刘升发等(2010)用内陆架泥质区南部的MZ01岩心沉积物敏感粒度、黏土矿物及元素组合为替代性指标揭示了中全新世以来内陆架泥质区的古环境演变。识别出10次极值, 可能主要由东亚冬季风的增强引起, 分别可与中全新世以来的同期降温事件、格陵兰冰心和敦德冰心氧同位

素记录等有良好的对比, 揭示了全球气候变化的区域性响应。进而将中全新世以来研究区东亚冬季风演化过程划分为4个阶段: 8.4—6.3ka BP较强而波动、6.3—3.8ka BP较弱而稳定、3.8—1.4ka BP高波动期、1.4ka BP以来稳定增强。Liu等(2013)通过MZ01岩心的元素地球化学研究发现, 在8.3ka和4.2ka BP期间, 区域气候温湿, 4.2—2.3ka BP期间干冷, 并伴有冷干(3.7、2.85和2.4ka BP)和暖湿(3.25和2.65ka BP)的波动。自2.3ka BP以来, 气候逐渐变暖, 尽管中间发生了小冰河期。他们还从风化指数(Chemical index of alteration, CIA)的记录中发现了有意义的238年周期。MZ02钻孔岩心13—8ka BP期间的CIA、CaO/MgO和Ba/Sr记录则具有显著的80年、89年和100年周期, 意味着中早全新世太阳活动对区域气候变化可能有影响(Liu *et al.*, 2013, 2017b)。Zhou等(2014)从内陆架泥质区中部T08岩心2700年来沉积记录中提取的敏感组分平均粒径与北半球的温度之间显著一致, 特别是中世纪暖期和小冰期尤为明显, 认为该泥质沉积可被用来重建高分辨率东亚冬季风强度历史。同时Zhou等(2014)通过对比不同研究中用敏感粒度重建的冬季风演化结果, 认为不同研究间冬季风替代指标序列的不一致很可能来自粒度标准偏差数据分辨率低及某些研究中河流输入材料的直接影响造成的。Wang等(2014)对东海内陆架MD06-3040孔沉积物的粒度和物源的分析结果表明, 以东亚夏季风降水减少为显著特征的重要变化(推测是干旱事件)发生在6ka BP、5.3ka BP、4.5ka BP以及3.7—3.3ka BP、2.200kaBP、1.4—1.3ka BP、0.800—0.6ka BP, 与东亚夏季风降水相关的长江入海流量被认为是东海内陆架沉积的主控因素。

张在秀等(2010)通过对MD06-3040柱状岩心的分析认为, 研究区有孔虫Mg/Ca和 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化主要受控于浙闽沿岸流和台湾暖流及东亚季风, 并将研究区近8ka BP来的古环境演变过程划分为三个时期: 夏季风盛行时期(8.10—4.11ka BP); 冬季风盛行时期(4.11—0.14ka BP)以及0.14ka BP以来的夏季风再次变强时期。李小艳等(2012)根据MZ02钻孔岩心中底栖有孔虫组合将全新世以来东海内陆架泥质区的沉积环境演化划分为4个阶段: 阶段I(10.8—10.5ka BP)为滨岸沉积环境; 阶段II(10.5—8.3ka BP)随着海面快速上升沉积环境由滨岸向中—内陆架过渡环境; 阶段III(8.3—5.2ka BP)台湾暖流十分靠近的中—内陆架沉积环境; 阶段IV(5.2—0ka BP)为沿岸流较强的内陆架

沉积环境。暖水种丰度在8.4ka BP出现高值, 推测为台湾暖流形成之时。约4.0ka BP以来表生种丰度呈现高值, 底栖有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 变轻, 推测与沿岸流增强关系密切。Li等(2015)基于对东海内陆架泥质区MZ01钻孔岩心的AMS $^{14}\text{C}$ 测年、沉积物粒度及底栖有孔虫的氧同位素和Mg/Ca比值等识别出8次突然降温事件, 分别发生在8.2、7.2、6.2、5.1、4.2、3.2、2.3和1.2ka BP。从该岩心中重建的全新世海表水文突变事件, 特别是8.2ka BP降温事件, 与来自北大西洋, 南海和相邻陆地洞穴以及格陵兰冰心的记录比较一致, 表明全球气候的遥相关关系。全新世的气候突变表现出820—830a和350—420a的周期变化, 推测与太阳活动有关(Li *et al.*, 2015)。对MD06-3040岩心的磁学分析结果显示, 尽管成岩作用造成铁磁性矿物含量显著降低, 但以低磁性矿物浓度和较强的矫顽磁性为特征的时段仍然被识别出来: 0.45—0.6, 1.5—1.7, 2.9—3.1, 4.4—4.7, 5.3—5.7, 5.9—6.1和8.2—8.4ka BP。这些时段与夏季风减弱事件同相位(Zheng *et al.*, 2010)。最近1200年的陆地生物标志物与海洋生物标志物比值记录的频率谱分析结果表现出119、75—85和54a的周期, 分别类似于在太阳活动中看到的116、89和54年的周期。沉积记录和太阳活动之间的关系证实, 在百年尺度上太阳活动和太阳辐射调节下, 气候相关的事件影响着有机物的沿岸运输(Wu *et al.*, 2018)。Shang等(2018)通过对瓯江三角洲钻孔岩心的放射性碳测年及粒度、元素、微化石和孢粉的综合分析, 识别出7个东亚夏季风减弱事件, 中心年龄分别为8.4、7.7、6.3、5.7、4.7、2.8和1.8ka BP。这与东海陆架沉积物和董哥洞穴 $\delta^{18}\text{O}$ 记录相一致, 表明东亚夏季风降水是该地区沉积速率的主控因素。在全新世中期4.9—6.4ka BP东亚夏季风减弱期, 台风活跃, 东亚冬季风相对增强, 沉积速率高。Zhao等(2018)根据长江口北部H5钻孔微动物群优势种的变化研究了长江口的环境演化。黄海沿岸流出现在约7.9ka BP之前, 即长江冲淡水 and 台湾暖流侵入的区域在7.9ka BP之前曾由黄海沿岸流控制。在强盛的亚洲夏季风和黑潮条件下, 7.9—6.3ka BP期间台湾暖流引起强烈的上升流。6ka BP以后, 由于东亚夏季风衰退长江冲淡水明显减弱(Zhao *et al.*, 2018)。

## 7 结束语

由前文可知, 东海内陆架泥质沉积的研究已取得丰富的研究成果, 对其粒度特征、矿物化学组成、

物质来源、形成过程和形成历史、地层厚度与分布以及环境响应与气候记录等有了较全面的认识。同时也存在一些结果不统一、观点不一致和认识不够系统等问题,有待在今后研究中去解决。此外,在重金属、有机污染及自生矿物等方面也有不少报道,因篇幅所限本文没能涉及。以下就有关问题提出几点建议供读者参考。

### 7.1 关于形成过程

东海内陆架泥质沉积的形成过程和形成历史已经做了许多工作,有了一定的认识,但是仍然有不同看法。在现代过程的研究方面研究还较零散,尚缺乏系统综合的调查研究。另外对其形成发育不同阶段的物质来源还有不同认识,尤其是 2—5ka BP 期间的低沉积速率阶段的原因还有待进一步澄清。这些工作有赖于加强现代过程的各种要素的观测(包括定点和大面观测)、沉积记录和数值模拟等不同学科方法的交叉运用和古今结合,以揭示泥质区动力背景及形成过程的时空差异性,这不仅是深化泥质沉积形成机制的需要,也可为古环境恢复提供科学支撑。

### 7.2 关于沉积物来源问题

内陆架沉积物来源问题数十年来做了大量研究工作并取得大批成果,对长江来源为主导的认识是主流,基本达成共识,但对黄河物质有无影响和影响程度还有不同观点,需要进一步的澄清。由上述可知,对长江、黄河物质的区分碳酸盐矿物白云石和方解石起到很好的指示作用。在重矿物分离中常使用的两种比重的重液(三溴甲烷),一种是  $2.80\text{g}/\text{cm}^3$  的配制重液,另一种是原重液,它们对碳酸盐矿物的分离效果截然不同(刘建国等, 2008)。陈丽蓉等通过精确控制重液比重( $2.80\text{g}/\text{cm}^3$ )有效地将白云石与方解石分开,取得了良好的物源示踪结果(陈丽蓉, 2008)。从黄东海轻重矿物的物源示踪效果看,比重  $2.80\text{g}/\text{cm}^3$  的重液明显优于原重液( $2.89\text{g}/\text{cm}^3$ ),值得推广。除传统的方法外还应增加重矿物的分析粒度,扩大样品代表性并将矿物组合与单矿物化学分析和年代测试相结合。在用黏土矿物来判别物源时需注意前处理方法,不同处理方法之间可能存在一定差别,应尽量在相同方法间对比,可提高可信度。在与闽浙沿岸河流黏土矿物进行对比时还需注意长江物质的倒灌问题。把化学元素用来判别物源时需排除“粒度控制律”的干扰。关于台湾河流物质对内陆架泥质区的影响和贡献的问题,研究报道偏少且指标偏单一,仍需进一步的工作。未来的研究应着重研究泥质体形成发育

过程不同阶段各物源的定量贡献及时空差异。这些都有赖于矿物、化学及同位素等物源指标的共同应用与综合分析。

### 7.3 关于气候记录问题

近十多年来泥质沉积高分辨率气候记录研究取得空前的研究成果,尤其在中晚全新世冬季风演化及气候突变事件研究方面取得可喜的成果。但也应看到,不同作者的研究结果所反映的气候演化阶段和短暂气候事件并不能完全对比,反映的时间尺度也不尽一致,造成这种结果的原因可能是多方面的,但推测主要有几方面:沉积记录分辨率存在区域差异。尽管该泥质区沉积环境相对稳定,但近岸和远岸沉积速率差别很大,距离海岸和河口远近的沉积物粒度不尽一致,会对环境替代指标的区域对比造成一定影响;测年精度或误差有差别,我们在研究过程中曾发现,砂层中的有孔虫壳和泥层的有孔虫壳测年结果有较大差别,前者的年龄往往偏老,发现是由次生沉积改造而致的新老介壳混合造成,在古环境研究中应尽量在砂泥界面的泥侧选取完整的介壳作为测年材料,如有条件选取单种有孔虫壳会更好,可降低测年误差;替代指标间的差异,泥质沉积主要通过沿岸流悬浮搬运沉积而成,因此沉积物细粒级敏感组分的粒径大小可反映沿岸流强度进而反映冬季风强度,这种指标反映的是年际的变化甚至季节变化,而如果用粗粒组分的粒径作为季风替代指标很可能代表风暴的短时沉积事件或受其影响。另外矿物、化学指标,如化学风化指数、铷/锶元素比值及黏土矿物比值等反映的时间较长,且往往代表夏季风演化,与粒度必然会有较大差别。因此在实际工作中需区别对待,尽量在相同指标间进行对比。在开展古环境和古气候研究前详细的沉积学分析及研究材料的适用性评估是必不可少的。未来还需加强事件沉积研究,深化气候突变及人类活动的响应研究。

致谢 在成文过程中赵一阳研究员、杨作升教授和肖尚斌教授提出了中肯而富有建设性的修改意见;得到刘敬圆教授和刘喜停博士的帮助,在此一并谨表谢忱。在文献收集中注意到秦蕴珊院士等几位前辈作者已与世长辞,但他们的奠基性科学观点和科学贡献是不朽的,对他们的科学贡献和科学精神深表敬意。

### 参 考 文 献

王 昕, 石学法, 刘升发等, 2012. 近百年来长江口外泥质区



- 高分辨率的沉积记录及影响因素探讨. 沉积学报, 30(1): 148—157
- 王中波, 杨守业, 张志珣等, 2012. 东海西北部陆架表层沉积物重矿物组合及其沉积环境指示. 海洋学报, 34(6): 114—125
- 王永红, 沈焕庭, 张卫国, 2004. 长江与黄河河口沉积物磁性特征对比的初步研究. 沉积学报, 22(4): 658—663
- 王先兰, 1986. 重矿物在东海全新统分层和研究中的应用. 东海海洋, 4(4): 19—31
- 王昆山, 王国庆, 蔡善武等, 2007. 长江水下三角洲沉积物的重矿物分布及组合. 海洋地质与第四纪地质, 27(1): 7—12
- 王敏杰, 郑洪波, 杨守业等, 2012. 长江水下三角洲记录的全新世以来的环境信息. 同济大学学报(自然科学版), 40(3): 473—477
- 王琳森, 李广雪, 2014. 黄海与东海泥质区高分辨率沉积记录研究新进展. 海洋地质与第四纪地质, 34(3): 167—174
- 牛军利, 杨作升, 李云海等, 2008. 长江与黄河河口沉积物环境磁学特征及其对比研究. 海洋科学, 32(4): 24—30
- 邓凯, 杨守业, 王中波等, 2016. 台湾山溪性小河流碎屑重矿物组成及其示踪意义. 沉积学报, 34(3): 531—542
- 石学法, 刘升发, 乔淑卿等, 2010. 东海闽浙沿岸泥质区沉积特征与古环境记录. 海洋地质与第四纪地质, 30(4): 19—30
- 卢健, 李安春, 2015. 南黄海表层沉积物粒度特征季节变化及其影响因素. 海洋科学, 39(3): 48—58
- 叶银灿, 庄振业, 刘杜娟等, 2002. 东海全新世沉积强度分区. 青岛海洋大学学报, 32(6): 941—948
- 冯旭文, 石学法, 黄永祥等, 2011. 长江口东南泥质区百年来稀土元素的组成及控制因素. 地球化学, 40(5): 464—472
- 邢云, 张卫国, 杨世伦等, 2007. 潮滩表层沉积物磁性特征的季节性变化及其对沉积动力作用的响应: 以杭州湾北岸为例. 沉积学报, 25(2): 267—273
- 朱凤冠, 李秀珠, 高水土, 1988. 东海大陆架沉积物中粘土矿物的研究. 东海海洋, 6(1): 40—51
- 朱爱美, 刘季花, 张辉等, 2012. 东海内陆架泥质区表层沉积物稀土元素的分布特征. 海洋地质与第四纪地质, 32(1): 1—10
- 刘健, 秦华峰, 孔祥淮等, 2007. 黄东海陆架及朝鲜海峡泥质沉积物的磁学特征比较研究. 第四纪研究, 27(6): 1031—1039
- 刘升发, 石学法, 刘焱光等, 2010. 中全新世以来东亚冬季风的东海内陆架泥质沉积记录. 科学通报, 55(14): 1387—1396
- 刘升发, 刘焱光, 朱爱美等, 2009. 东海内陆架表层沉积物粒度及其净输运模式. 海洋地质与第四纪地质, 29(1): 1—6
- 刘世东, 乔璐璐, 李广雪等, 2018. 东海内陆架悬浮体输运、通量及季节变化. 海洋与湖沼, 49(1): 24—39
- 刘建国, 李安春, 徐方建等, 2008. 两种密度三溴甲烷分离重矿物效果的对比分析. 海洋科学, 32(1): 32—37
- 刘锡清, 1996. 中国边缘海的沉积物分区. 海洋地质与第四纪地质, 16(3): 1—11
- 刘锡清, 周青伟, 1997. 渤海、黄海、东海地质类型及分布特征. 见: 许东禹等主编. 中国近海地质. 北京: 地质出版社, 95—102
- 许东禹, 1985. 东海陆架泥质沉积作用. 海洋地质与第四纪地质, 5(2): 17—26
- 孙英, 黄文盛, 1984. 浙江海岸的淤涨及其泥沙来源. 东海海洋, 2(4): 34—42
- 孙柏民, 李崇银, 1997. 冬季东亚大槽的扰动与热带对流活动的关系. 科学通报, 42(5): 500—504
- 李军, 胡邦琦, 窦衍光等, 2012. 中国东部海域泥质沉积区现代沉积速率及其物源控制效应初探. 地质论评, 58(4): 745—756
- 李小艳, 翦知潜, 石学法等, 2012. 全新世东海内陆架泥质区有孔虫特征及其古环境意义. 海洋地质与第四纪地质, 32(4): 61—71
- 李广雪, 刘勇, 杨子赓, 2009. 中国东部陆架沉积环境对末次冰盛期以来海面阶段性上升的响应. 海洋地质与第四纪地质, 29(4): 13—19
- 李云海, 陈坚, 黄财宾等, 2010. 浙闽沿岸南部泥质沉积中心表层沉积物粒度特征及其季节性差异. 沉积学报, 28(1): 150—157
- 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, 1988. 中国海细粒沉积物的矿物和化学组成及其来源与运移的研究. 青岛: 中国科学院海洋研究所博士学位论文
- 李家彪, 2008. 东海区域地质. 北京: 海洋出版社
- 杨光复, 董太录, 徐善民, 1984. 东海大陆架现代沉积作用的初步探讨. 海洋科学集刊, (21): 281—290
- 杨光复, 董太录, 徐善民等, 1982. 东海大陆架南部更新世末期以来的沉积特征. 见: 中国科学院海洋研究所地质研究室. 黄东海地质. 北京: 科学出版社, 67—81
- 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, 赵晓辉, 乔淑卿等, 2008. 长江和黄河入海沉积物不同粒级中长石/石英比值及化学风化程度评价. 中国海洋大学学报, 38(2): 244—250
- 杨作升, 郭志刚, 王兆祥等, 1992. 黄东海陆架悬浮体向其东部深海区输送的宏观格局. 海洋学报, 14(2): 81—90
- 肖尚斌, 李安春, 刘卫国等, 2009. 闽浙沿岸泥质沉积的物源分析. 自然科学进展, 19(2): 185—191
- 肖尚斌, 李安春, 陈木宏等, 2005a. 近 8ka 东亚冬季风变化的东海内陆架泥质沉积记录. 地球科学, 30(5): 573—581
- 肖尚斌, 李安春, 陈木宏等, 2006. 全新世东亚季风变化的百年尺度周期. 科技导报, 24(4): 40—43
- 肖尚斌, 李安春, 蒋富清等, 2004. 近 2ka 来东海内陆架的泥质沉积记录及其气候意义. 科学通报, 49(21): 2233—2238
- 肖尚斌, 李安春, 蒋富清等, 2005b. 近 2ka 来东海内陆架泥质沉积物地球化学特征. 地球化学, 34(6): 595—604
- 肖尚斌, 李安春, 蒋富清等, 2005c. 近 2ka 闽浙沿岸泥质沉积物物源分析. 沉积学报, 23(2): 268—274
- 何良彪, 刘秦玉, 1997. 黄河与长江沉积物中粘土矿物的化学特征. 科学通报, 42(7): 730—734
- 张在秀, 赵泉鸿, 陈荣华等, 2010. 东海泥质沉积区 8 千年来的有孔虫 Mg/Ca 和  $\delta^{18}\text{O}$  记录及其古环境意义. 海洋地质与第四纪地质, 30(3): 79—86
- 张凯棣, 李安春, 卢健等, 2017. 东海陆架沉积物环境磁学特征及其物源指示意义. 海洋与湖沼, 48(2): 246—257

- 张凯棣, 李安春, 董江等, 2016. 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. 沉积学报, 34(5): 902—911
- 张晓东, 许淑梅, 翟世奎等, 2006. 东海内陆架沉积气候信息的端元分析模型反演. 海洋地质与第四纪地质, 26(2): 25—32
- 张富元, 王秀昌, 1984. 东海表层沉积物中重矿物聚类分析及其动力分布特征. 台湾海峡, 3(1): 68—77
- 张富元, 冯秀丽, 章伟艳等, 2011. 南海表层沉积物的沉降法和激光法粒度分析结果对比和校正. 沉积学报, 29(4): 767—775
- 陆凯, 秦亚超, 王中波等, 2019. 东海中南部海域表层沉积物碎屑重矿物组合分区及其物源分析. 海洋地质前沿, 35(8): 20—26
- 陈华胄, 1993. 台湾海峡表层沉积物中重矿物特征及其物质来源. 台湾海峡, 12(2): 136—144
- 陈丽蓉, 2008. 中国海沉积矿物学. 北京: 海洋出版社, 121—155
- 陈丽蓉, 申顺喜, 徐文强等, 1986. 中国海的碎屑矿物组合及其分布模式的探讨. 沉积学报, 4(3): 87—96
- 陈丽蓉, 许文强, 申顺喜, 1979. 东海沉积物的矿物组合及其分布特征. 科学通报, (15): 709—712
- 陈丽蓉, 许文强, 申顺喜, 1982. 东海沉积物的矿物组合及其分布特征的研究. 见: 中国科学院海洋研究所地质研究室. 黄东海地质. 北京: 科学出版社, 82—97
- 陈丽蓉, 许文强, 申顺喜等, 1984. 东海沉积物中轻矿物的研究. 海洋科学集刊, (21): 297—304
- 范代读, 王扬扬, 吴伊婧, 2012. 长江沉积物源示踪研究进展. 地球科学进展, 27(5): 515—528
- 范德江, 杨作升, 孙效功等, 2002. 东海陆架北部长江、黄河沉积物影响范围的定量估算. 青岛海洋大学学报, 32(5): 748—756
- 金翔龙, 1992. 东海海洋地质. 北京: 海洋出版社
- 周鑫, 刘毅, 程文翰等, 2011. 黄东海陆架区表层沉积物磁化率空间分布及其影响因素分析. 地球环境学报, 2(2): 356—361
- 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
- 庞重光, 杨扬, 刘志亮, 2010. 黄东海悬浮泥沙输运结构及其形成机制. 泥沙研究, (3): 24—30
- 郑妍, 郑洪波, 王可, 2010. 末次冰期以来东海内陆架沉积反映的海平面变化. 同济大学学报(自然科学版), 38(9): 1381—1386
- 赵一阳, 车承惠, 杨惠兰等, 1982a. 东海沉积物中若干元素的地球化学. 见: 中国科学院海洋研究所地质研究室. 黄东海地质. 北京: 科学出版社, 141—159
- 赵一阳, 张秀莲, 夏青等, 1986. 东海各种沉积物的化学特征. 科学通报, (20): 1573—1575
- 赵一阳, 韩桂荣, 张静等, 1982b. 东海沉积物中锆及稀土元素的若干地球化学特征. 科学通报, (22): 1390—1392
- 赵一阳, 鄢明才, 李安春等, 2002. 中国近海沿岸泥的地球化学特征及其指示意义. 中国地质, 29(2): 181—185
- 胡日军, 吴建政, 朱龙海等, 2009. 东海舟山群岛海域表层沉积物运移特性. 中国海洋大学学报, 39(3): 495—500, 442
- 胡邦琦, 李军, 李国刚等, 2011. 长江和黄河入海沉积物的物源识别研究进展. 海洋地质与第四纪地质, 31(6): 147—156
- 贺松林, 1991. 东海近岸带沉积物陆源矿物组份的比较研究. 华东师范大学学报(自然科学版), (1): 78—86
- 秦蕴珊, 1963. 中国陆棚海的地形及沉积类型的初步研究. 海洋与湖沼, 5(1): 71—85
- 秦蕴珊, 郑铁民, 1982. 东海大陆架沉积物分布特征的初步探讨. 见: 中国科学院海洋研究所地质研究室. 黄东海地质. 北京: 科学出版社, 39—51
- 秦蕴珊, 赵一阳, 陈丽蓉等, 1987. 东海地质. 北京: 科学出版社, 29—37
- 徐方建, 李安春, 2010b. 末次冰消期以来古气候演化研究进展及展望. 科技导报, 28(9): 102—107
- 徐方建, 李安春, 李铁刚等, 2010a. 末次冰消期以来东海内陆架沉积物地球化学特征及其古环境意义. 地球化学, 39(3): 240—250
- 徐方建, 李安春, 李铁刚等, 2011a. 末次冰消期以来东海内陆架沉积速率及其气候环境响应. 地层学杂志, 35(1): 66—74
- 徐方建, 李安春, 李铁刚等, 2011b. 中全新世以来东海内陆架泥质沉积物来源. 中国石油大学学报(自然科学版), 35(1): 1—6, 12
- 徐方建, 李安春, 肖尚斌等, 2009b. 末次冰消期以来东海内陆架古环境演化. 沉积学报, 27(1): 118—127
- 徐方建, 李安春, 徐兆凯等, 2009a. 东海内陆架沉积物稀土元素地球化学特征及物源意义. 中国稀土学报, 27(4): 574—582
- 徐茂泉, 1996. 闽江口表层沉积物中0.125~0.250mm粒级重矿物的分布与组合特征. 台湾海峡, 15(3): 229—234
- 高抒, 2013. 中国东部陆架全新世沉积体系: 过程—产物关系研究进展评述. 沉积学报, 31(5): 845—855
- 郭志刚, 杨作升, 曲艳慧等, 2000. 东海陆架泥质区沉积地球化学比较研究. 沉积学报, 18(2): 284—289
- 郭志刚, 杨作升, 张东奇等, 2002. 冬、夏季东海北部悬浮体分布及海流对悬浮体输运的阻隔作用. 海洋学报, 24(5): 71—80
- 郭志刚, 杨作升, 范德江等, 2003. 长江口泥质区的季节性沉积效应. 地理学报, 58(4): 591—597
- 章伟艳, 张霄宇, 金海燕等, 2013. 长江口—杭州湾及其邻近海域沉积动力环境及物源分析. 地理学报, 68(5): 640—650
- 葛倩, 刘敬圃, 初凤友等, 2011. 全新世高海平面以来东海陆架泥质沉积的东亚季风记录. 海洋科学, 35(7): 100—106
- 董江, 李安春, 徐方建等, 2015. 东海内陆架EC2005孔重矿物组合特征及其物源指示意义. 海洋与湖沼, 46(6): 1292—1303
- 蓝先洪, 张志珣, 李日辉等, 2011. 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
- 潘大东, 王张华, 陈艇等, 2015. 长江口表层沉积物矿物磁性分区特征及其沉积环境指示意义. 海洋学报, 37(5): 101—111
- Bi L, Yang S Y, Zhao Y *et al*, 2017. Provenance study of the Holocene sediments in the Changjiang (Yangtze River) estuary and inner shelf of the East China Sea. Quaternary

- International, 441: 147—161
- Bian C W, Jiang W S, Greatbatch R J, 2013a. An exploratory model study of sediment transport sources and deposits in the Bohai Sea, Yellow Sea, and East China Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118(11): 5908—5923
- Bian C W, Jiang W S, Quan Q *et al*, 2013b. Distributions of suspended sediment concentration in the Yellow Sea and the East China Sea based on field surveys during the four seasons of 2011. *Journal of Marine Systems*, 121—122: 24—35
- Chen Y F, Deng B, Zhang J, 2020. Shallow gas in the Holocene mud wedge along the inner East China Sea shelf. *Marine and Petroleum Geology*, 114: 104233
- Chen J, Ma J Q, Xu K H *et al*, 2017. Provenance discrimination of the clay sediment in the western Taiwan Strait and its implication for coastal current variability during the late-Holocene. *The Holocene*, 27(1): 110—121
- Deng B, Wu H, Yang S L *et al*, 2017. Longshore suspended sediment transport and its implications for submarine erosion off the Yangtze River Estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 190: 1—10
- Ding R B, Huang D J, Xuan J L *et al*, 2016. Cross-shelf water exchange in the East China Sea as estimated by satellite altimetry and in situ hydrographic measurement. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121(9): 7192—7211
- Dong L X, Guan W B, Chen Q *et al*, 2011. Sediment transport in the Yellow Sea and East China Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 93(3): 248—258
- Duan L Q, Song J M, Yuan H M *et al*, 2019. Occurrence and origins of biomarker aliphatic hydrocarbons and their indications in surface sediments of the East China Sea. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 167: 259—268
- Fang Y, Chen Y J, Hu L M *et al*, 2019. Large-river dominated black carbon flux and budget: a case study of the estuarine-inner shelf of East China Sea, China. *Science of the Total Environment*, 651: 2489—2496
- Feng Z B, Liu B H, Zhao Y X *et al*, 2016. Spatial and temporal variations and controlling factors of sediment accumulation in the Yangtze River estuary and its adjacent sea area in the Holocene, especially in the Early Holocene. *Continental Shelf Research*, 125: 1—17
- Gao S, Collins M B, 2014. Holocene sedimentary systems on continental shelves. *Marine Geology*, 352: 268—294
- Gao J H, Shi Y, Sheng H *et al*, 2019. Rapid response of the Changjiang (Yangtze) river and East China Sea source-to-sink conveying system to human induced catchment perturbations. *Marine Geology*, 414: 1—17
- Gao S, Wang D D, Yang Y *et al*, 2015. Holocene sedimentary systems on a broad continental shelf with abundant river input: process-product relationships. In: Clift P D, Harff J, Wu J *et al* eds. *River-Dominated Shelf Sediments of East Asian Seas*. Geological Society, London, Special Publications, 429: 223—259
- Hong C S, Huh C A, 2011. Magnetic properties as tracers for source-to-sink dispersal of sediments: a case study in the Taiwan Strait. *Earth and Planetary Science Letters*, 309(1—2): 141—152
- Hu D X, 1984. Upwelling and sedimentation dynamics. I. The role of upwelling in sedimentation in the Huanghai Sea and East China Sea—A description of general features. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2(1): 12—19
- Kim W, Doh S J, Yu Y *et al*, 2013. Magnetic evaluation of sediment provenance in the northern east china sea using fuzzy c-means cluster analysis. *Marine Geology*, 337: 9—19
- Li X Y, Jian Z M, Shi X F *et al*, 2015. A Holocene record of millennial-scale climate changes in the mud area on the inner shelf of the East China Sea. *Quaternary International*, 384: 22—27
- Li G X, Li P, Liu Y *et al*, 2014. Sedimentary system response to the global sea level change in the East China Seas since the last glacial maximum. *Earth-Science Reviews*, 139: 390—405
- Li G X, Qiao L L, Dong P *et al*, 2016. Hydrodynamic condition and suspended sediment diffusion in the Yellow Sea and East China Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121(8): 6204—6222
- Li Y H, Qiao L L, Wang A J *et al*, 2013. Seasonal variation of water column structure and sediment transport in a mud depo-center off the Zhejiang-Fujian coast in China. *Ocean Dynamics*, 63(6): 679—690
- Li Y H, Wang A M, Qiao L *et al*, 2012b. The impact of typhoon Morakot on the modern sedimentary environment of the mud deposition center off the Zhejiang-Fujian coast, China. *Continental Shelf Research*, 37: 92—100
- Li C, Yang S Y, Zhang W G, 2012a. Magnetic properties of sediments from major rivers, aeolian dust, loess soil and desert in China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 45: 190—200
- Lim D I, Choi I Y, Jung H S *et al*, 2007. Recent sediment accumulation and origin of shelf mud deposits in the Yellow and East China Sea. *Progress in Oceanography*, 73(2): 145—159
- Liu J P, DeMaster D J, Nittrouer C A *et al*, 2017a. A seismic study of the Mekong subaqueous delta: Proximal versus distal sediment accumulation. *Continental Shelf Research*, 147: 197—212
- Liu J P, Li A C, Xu K H *et al*, 2006. Sedimentary features of the Yangtze River-derived along-shelf clinoform deposit in the East China Sea. *Continental Shelf Research*, 26(17—18): 2141—2156
- Liu J P, Liu C S, Xu K H *et al*, 2008. Flux and fate of small mountainous rivers derived sediments into the Taiwan Strait. *Marine Geology*, 256(1—4): 65—76
- Liu J P, Milliman J D, Gao S *et al*, 2004. Holocene development of the Yellow River's subaqueous delta, North Yellow Sea. *Marine Geology*, 209(1—4): 45—67
- Liu J P, Xu K H, Li A C *et al*, 2007. Flux and fate of Yangtze River sediment delivered to the East China Sea. *Geomorphology*, 85(3—4): 208—224
- Liu J P, Kuehl S A, Pierce A C *et al*, 2020. Fate of Ayeyarwady

- and Thanlwin Rivers sediments in the Andaman Sea and bay of Bengal. *Marine Geology*, 423: 106137
- Liu J T, Hsu R T, Yang R J *et al*, 2018a. A comprehensive sediment dynamics study of a major mud belt system on the inner shelf along an energetic coast. *Scientific Report*, 8(1): 4229
- Liu J, Saito Y, Kong X H *et al*, 2010a. 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. *Quaternary Science Reviews*, 29(17—18): 2424—2438
- Liu J, Zhu R X, Li G X, 2003. Rock magnetic properties of the fine-grained sediment on the outer shelf of the East China Sea: implication for provenance. *Marine Geology*, 193(3—4): 195—206
- Liu S D, Qiao L L, Li G X *et al*, 2015. Distribution and cross-front transport of suspended particulate matter over the inner shelf of the East China Sea. *Continental Shelf Research*, 107: 92—102
- Liu S D, Qiao L L, Li G X *et al*, 2018b. Variation in the current shear front and its potential effect on sediment transport over the inner shelf of the East China Sea in winter. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123(11): 8264—8283
- Liu S F, Mi B B, Fang X S *et al*, 2017b. 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 B.P.—8 ka B.P.). *Quaternary International*, 441: 35—50
- Liu S F, Shi X F, Liu Y G *et al*, 2011. Environmental record from the mud area on the inner continental shelf of the East China Sea since the mid-Holocene. *Acta Oceanologica Sinica*, 30(4): 43—52
- Liu S F, Shi X F, Liu Y G *et al*, 2013. Holocene paleoclimatic reconstruction based on mud deposits on the inner shelf of the East China Sea. *Journal of Asian Earth Sciences*, 69: 113—120
- Liu, S.F., Shi, X.F., Fang, X.S., Dou, Y.G., Liu, Y.G., Wang, X.C., 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. *Quat. Int.* 349, 270—279
- Liu S M, Zhang W G, He Q *et al*, 2010b. Magnetic properties of East China Sea shelf sediments off the Yangtze Estuary: influence of provenance and particle size. *Geomorphology*, 119(3—4): 212—220
- Liu X T, Li A C, Dong J *et al*, 2018c. Provenance discrimination of sediments in the Zhejiang-Fujian mud belt, East China Sea: implications for the development of the mud depocenter. *Journal of Asian Earth Sciences*, 151: 1—15
- Lu J, Jiang J B, Li A C *et al*, 2018. Impact of Typhoon Chan-hom on the marine environment and sediment dynamics on the inner shelf of the East China Sea: in-situ seafloor observations. *Marine Geology*, 406: 72—83
- Luo C, Zheng Y, Zheng H B *et al*, 2016. Temporal and spatial variations in magnetic properties of suspended particular matter in the Yangtze River drainage and their implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 124: 204—213
- Mi B B, Liu S F, Shi X F *et al*, 2017. 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. *Quaternary International*, 447: 35—45
- Milliman J D, Beardsley R C, Yang Z S *et al*, 1985. Modern Huanghe-derived muds on the outer shelf of the East China Sea: identification and potential transport mechanisms. *Continental Shelf Research*, 4(1—2): 175—188
- Pang C G, Li K, Hu D X, 2016. Net accumulation of suspended sediment and its seasonal variability dominated by shelf circulation in the Yellow and East China Seas. *Marine Geology*, 371: 33—43
- Pei W Q, Wan S M, Clift P D *et al*, 2020. Human impact overwhelms long-term climate control of fire in the Yangtze River Basin since 3.0 ka BP. *Quaternary Science Reviews*, 230: 106165
- Qiao F L, Huang C J, 2017a. Wave effects in the upper ocean. In: John Carlton, Yoo Sang Choo, Paul Jukes eds. *Encyclopedia of Maritime and Offshore Engineering*. Chichester, West Sussex, PO19 8SQ, United Kingdom: John Wiley & Sons
- Qiao L L, Huang L L, Wang Z *et al*, 2016. Flux and its seasonal variation of suspended particulate matter in the Bohai sea, Yellow sea and East China Sea. *Geological Journal*, 51(S1): 22—34
- Qiao S Q, Shi X F, Wang G Q *et al*, 2017b. Sediment accumulation and budget in the Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea. *Marine Geology*, 390: 270—281
- Shang S, Fan D D, Yin P *et al*, 2018. Late Quaternary environmental change in Oujiang delta along the northeastern Zhe-Min Uplift zone (Southeast China). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 492: 64—80
- Su C C, Huh C A, 2002.  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{239,240}\text{Pu}$  in East china Sea sediments: sources, pathways and budgets of sediments and radionuclides. *Marine Geology*, 183(1—4): 163—178
- Tian Y, Fan D J, Zhang X L *et al*, 2019. Event deposits of intense typhoons in the muddy wedge of the East China Sea over the past 150 years. *Marine Geology*, 410: 109—121
- Wang Y H, Dong H L, Li G X *et al*, 2010. Magnetic properties of muddy sediments on the northeastern continental shelves of China: implication for provenance and transportation. *Marine Geology*, 274(1—4): 107—119
- Wang X, Shi X F, Wang G Q *et al*, 2015. Late Quaternary sedimentary environmental evolution offshore of the Hangzhou Bay, East China—implications for sea level change and formation of Changjiang alongshore current. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 33(3): 748—763
- Wang Y H, Yu Z G, Li G X *et al*, 2009. Discrimination in magnetic properties of different-sized sediments from the Changjiang and Huanghe estuaries of china and its

- implication for provenance of sediment on the shelf. *Marine Geology*, 260(1—4): 121—129
- Wang K, Zheng H B, Tada R *et al*, 2014. 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. *Quaternary International*, 349: 79—89
- Wu H, 2015. Cross-shelf penetrating fronts: a response of buoyant coastal water to ambient pycnocline undulation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120(7): 5101—5119
- Wu X N, Xing L, Zhang T *et al*, 2018. Mid-late Holocene changes in sedimentary organic matter on the inner shelf of the East China Sea. *Journal of Asian Earth Sciences*, 154: 248—254
- Xiao S B, Li A C, Liu J P *et al*, 2006. Coherence between solar activity and the East Asian winter monsoon variability in the past 8000 years from Yangtze River-derived mud in the East China Sea. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 237(2—4): 293—304
- Xu F J, Li A C, Li T G *et al*, 2011. Rare earth element geochemistry in the inner shelf of the East China Sea and its implication to sediment provenances. *Journal of Rare Earths*, 29(7): 702—709
- 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*, 291—294: 176—191
- Xu F J, Li A C, Xu K H *et al*, 2009a. Cold event at 5 500 a BP recorded in mud sediments on the inner shelf of the East China Sea. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 27(4): 975—984
- Xu G, Liu J, Liu S F *et al*, 2016. Modern muddy deposit along the Zhejiang coast in the East China Sea: response to large-scale human projects. *Continental Shelf Research*, 130: 68—78
- Xu K H, Milliman J D, Li A C *et al*, 2009b. Yangtze- and Taiwan-derived sediments on the inner shelf of East China Sea. *Continental Shelf Research*, 29(18): 2240—2256
- Yang S Y, Wang Z B, Guo Y *et al*, 2009. Heavy mineral compositions of the Changjiang (Yangtze River) sediments and their provenance-tracing implication. *Journal of Asian Earth Sciences*, 35(1): 56—65
- Yang W Q, Zhou X, Xiang R *et al*, 2017. Palaeotsunami in the East China Sea for the past two millennia: a perspective from the sedimentary characteristics of mud deposit on the continental shelf. *Quaternary International*, 452: 54—64
- 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(1—2): 134—149
- Yue W, Liu J T, Zhang D *et al*, 2016. Magnetite with anomalously high Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> as a fingerprint to trace upper Yangtze sediments to the sea. *Geomorphology*, 268: 14—20
- Zeng X M, He R Y, Xue Z *et al*, 2015. River-derived sediment suspension and transport in the Bohai, Yellow, and East China Seas: a preliminary modeling study. *Continental Shelf Research*, 111: 112—125
- Zhang X, Dalrymple R W, Yang S Y *et al*, 2015. Provenance of Holocene sediments in the outer part of the Paleo-Qiantang River estuary, China. *Marine Geology*, 366: 1—15
- Zhang X L, Fan D J, Xu J P *et al*, 2018b. Sedimentary laminae in muddy inner continental shelf sediments of the East China Sea: formation and implications for geochronology. *Quaternary International*, 464: 343—351
- Zhang K D, Li A C, Huang P *et al*, 2019b. Sedimentary responses to the cross-shelf transport of terrigenous material on the East China Sea continental shelf. *Sedimentary Geology*, 384: 50—59
- Zhang K D, Li A C, Zhang J *et al*, 2018a. Recent sedimentary records in the East China Sea inner shelf and their response to environmental change and human activities. *Journal of Oceanology and Limnology*, 36(5): 1537—1555
- Zhang K D, Li A C, Zhang J *et al*, 2020. Seasonal variations in the surficial sediment grain size in the East China Sea continental shelf and their implications for terrigenous sediment transport. *Journal of Oceanography*, 76(1): 1—14
- Zhang F L, Wang J L, Liu D T *et al*, 2019a. Distribution of <sup>137</sup>Cs in the Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea: sources, budgets and environmental implications. *Science of the Total Environment*, 672: 1004—1016
- Zhang W G, Xing Y, Yu L Z *et al*, 2008. Distinguishing sediments from the Yangtze and Yellow Rivers, China: a mineral magnetic approach. *The Holocene*, 18(7): 1139—1145
- Zhao Y F, Zou X Q, Gao J H *et al*, 2018. Clay mineralogy and source-to-sink transport processes of Changjiang River sediments in the estuarine and inner shelf areas of the East China Sea. *Journal of Asian Earth Sciences*, 152: 91—102
- Zheng Y, Kissel C, Zheng H B *et al*, 2010. Sedimentation on the inner shelf of the East China Sea: magnetic properties, diagenesis and paleoclimate implications. *Marine Geology*, 268(1—4): 34—42
- Zheng X F, Li A C, Wan S M *et al*, 2015. Formation of the modern current system in the East China Sea since the early Holocene and its relationship with sea level and the monsoon system. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 33(4): 1062—1071
- Zhou X, Yang W Q, Xiang R *et al*, 2014. Re-examining the potential of using sensitive grain size of coastal muddy sediments as proxy of winter monsoon strength. *Quaternary International*, 333: 173—178

## RESEARCH PROGRESS OF MUD WEDGE IN THE INNER CONTINENTAL SHELF OF THE EAST CHINA SEA

LI An-Chun, ZHANG Kai-Di

(Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, CAS, Qingdao 266071, China)

**Abstract** The study of modern mud sediments in the continental shelf sea has important geological, environmental, and climatological significance. Therefore, marine scientists have been paying close attention to the issues for several decades. Especially in the recent years, there has been a great upsurge in the study of continental shelf mud sediments in China, and a large number of important achievements have been made. The research progresses of the largest mud wedge in the East China Sea were reviewed.

The mud sedimentary zone in the inner shelf of the East China Sea extends southward from the underwater delta of the Changjiang (Yangtze) River estuary to the middle of the Taiwan Strait along the shallow coastal waters off Fujian and Zhejiang Provinces. The total length is about 800km, the width is about 100km, and the area is about 80000km<sup>2</sup>, which is about two Taiwan Islands in area. It is the largest wedge-type mud sedimentary body and modern sedimentary area in the China shelf sea and even in the coastal waters of Asia (the second in volume). The middle and late Holocene sedimentary strata in this area are relatively thick, with a local thickness of 40—80m. Generally, they are thicker near-shore, gradually thin out oceanward, and vanish near the 50—60m isobath or even deeper at 75—90m isobath. Mud sediments in this area have a relatively fine grain size and are mainly composed of clay and silt (more than 90%); however, sand content is very low (less than 10%). The clay and silt contents decrease sharply in the outer edge of the mud zone, while sand contents increase suddenly. The type of the sediment is silty clay and clayey silt, which is bounded laterally towards the sea by clay-silt-sand (mixed deposit) or muddy sand. There are some differences in the grain size distribution between the north and the south. In the northern section (from the Changjiang River estuary to the outside of Oujiang River mouth), the grain size is coarser (clayey silt) nearshore, and finer (silty clay) laterally; while in the southern section (from the outside Oujiang River mouth to the north of the Taiwan Strait), the trends are opposite. The distal mud sediment to the middle Taiwan Strait is coarser (clayey silt). The modern deposition rates are higher in the subaqueous delta of the Changjiang River estuary and near the coastal waters off Fujian-Zhejiang Provinces, but they gradually decrease alongshore to the outer continental shelf, which are consistent with the thickness distribution of the Holocene strata. The spatial distribution of the suspended matter concentration, especially in winter, was consistent with the distribution of the deposition rate, which indicates that the sediment was transported from the Changjiang River estuary to the south along coast off Fujian and Zhejiang Provinces and from the nearshore to the sea. The mineral, chemical elements, isotopes, and environmental magnetism indexes further indicate that the mud deposits are derived mainly from the Changjiang River, followed by the old Huanghe River contributes in the north and from Taiwan Island in the south, and the coastal rivers of Fujian and Zhejiang Provinces locally. The formation of this mud sediment wedge was closely related to the continuous high sea level about 7.3ka BP ago since the middle Holocene and the corresponding sedimentation, which includes the continuous southward transport of Changjiang River materials by the Fujian-Zhejiang coastal current, the blocking of the warm current and the upwelling current as well as the lateral transport of the downwelling and the front puncture currents, etc. Transport of the sediment occurs mainly in winter, and enhanced by winter monsoon. Tropical cyclone and typhoon storm have played a dual role in building and destroying the mud wedge. Because of the close relationship between the formation of the mud sediment and the monsoon-driven coastal current, the mud wedge recorded the imprint of the climate environment and became an ideal object of study for the evolution of winter and summer monsoons. In recent years, abundant research results of this region have well revealed the climatic evolution history and events on the scales of millennium, centennial, decadal, and even higher resolution since the middle and late Holocene. The muddy deposit is also very sensitive to human activities, and it documented major anthropological events such as variation in fire about 3000 years ago in the Changjiang

River reaches, and several great migrations of Chinese population in history, etc. Especially in the recent decades, particularly since the impoundment of the Three Gorges reservoir, there has also been an obvious response to the changes in the sediment source from the Changjiang River.

In the future, it is needed to further quantify the contribution and spatial and temporal differences of the substances from the Changjiang River, Huanghe River, and rivers of Taiwan Island and Fujian-Zhejiang lands, and the residual areas at different stages of the formation and development of mud bodies; deepen the understanding the impacts of human activities and environmental change on the mud wedge; strengthen the observation of the modern sedimentary dynamic process with fine numerical simulation; and reveal the spatial difference of the dynamic background in the mud sediment zone. These works will help understand the formation mechanism of the mud sediments, and provide scientific clues for the reconstruction of the paleo environment.

**Key words** East China Sea inner shelf; mud deposits; formation mechanism; material source; climate records; environmental response