

DOI: 10.3724/SP.J.1140.2012.03001

# 东海外陆架晚第四纪若干沉积学问题的研究现状与展望

王中波<sup>1,2</sup>, 杨守业<sup>2</sup>, 张志珣<sup>1</sup>, 李日辉<sup>1</sup>, 蓝先洪<sup>1</sup>, 印萍<sup>1</sup>, 张训华<sup>1</sup>

(1 国土资源部 海洋油气资源与环境地质重点实验室, 青岛海洋地质研究所, 青岛 266071;

2 同济大学 海洋地质国家重点实验室, 上海 200092)

**摘要:**我国东海陆架尤其外陆架的晚第四纪沉积地层、古河道沉积与下切河谷充填沉积、潮流沙脊沉积研究等已经取得较多研究成果, 综述已有的研究认识和关键科学问题, 讨论地层研究中的氧同位素 2 期和 4 期地层划分出现的争议、不同的地层演化模式以及与之紧密相关的末次冰盛期古河道的存在与演化、东海陆架冰后期潮流沙脊成因研究中存在的不同观点, 提出未来东海外陆架晚第四纪沉积学研究的思路和工作展望。

**关键词:**沉积学研究; 现状; 展望; 晚第四纪; 东海外陆架

中图分类号: P736.2

文献标识码: A

文章编号: 0256-1492(2012)03-0001-10

东海是西太平洋典型的开放型边缘海, 面积约 75 万 km<sup>2</sup>, 陆架最宽 600 km 左右, 是世界上最宽阔的陆架之一(图 1); 陆架盆地在第四纪的沉降速率约为 300 m/Ma, 具有充足的沉积物可容空间<sup>[1]</sup>; 长江、黄河入海带来的巨量陆源碎屑物质堆积在陆架地区, 使其成为我国东部大陆边缘主要的陆源沉积汇; 同时, 冰期和间冰期旋回中季风气候、海平面和海洋环流控制陆源沉积物的入海通量和陆架沉积体系发育。末次盛冰期时, 东海海平面曾一度下降到现在陆架 120~140 m 水深处; 盛冰期之后, 海平面开始回升, 在 7 kaBP 形成最高海平面, 伴随海平面上升, 东海陆架发生大规模的海侵, 海岸线在经历多次变迁后到达现在的位置<sup>[2]</sup>。因此, 东海陆架沉积地层中记录了丰富的古环境信息, 是研究晚第四纪海平面变化、海陆相互作用和沉积环境演化的理想区域。

## 1 东海外陆架晚第四纪地层

目前, 东海陆架第四纪沉积研究主要基于冰

基金项目: 国家自然科学基金项目(41040041); “大陆架科学钻探”项目(GZH201100202); 中国地质调查局国土资源大调查项目(GZH200800501, 1212010611301); 中国地质调查局海洋地质调查工作项目(GHZ201100203); 国土资源部海洋油气资源与环境地质重点实验室开放基金(MRE200917)

作者简介: 王中波(1979—), 男, 博士生, 助理研究员, 主要从事海洋沉积研究, E-mail: my\_zhongbo@163.com

收稿日期: 2011-11-04; 改回日期: 2012-03-18. 周立君编辑

期-间冰期旋回理论, 即冰期海平面显著下降, 陆架暴露; 间冰期海平面上升, 提供沉积可容空间, 陆源物质在陆架堆积; 海平面变化导致海岸线和河口进退, 并控制陆架沉积物输运和沉积过程, 形成特征的沉积地层和沉积体系。

过去的二十多年中, 受工作条件和研究手段等制约, 东海陆架第四纪沉积地层研究主要以内陆架及长江水下三角洲地区为主, 晚第四纪地质的相关研究较多。根据一些代表性的钻孔和测年, 建立了比较完整、可靠的年代地层, 对区内晚第四纪地层框架和地层演化有比较深入的认识<sup>[3-11]</sup>。

相对而言, 中、外陆架地区的沉积地层与古环境研究比较薄弱。较早的研究是根据内、外陆架的浅部地球物理测量, 对比外陆架浅钻 YQ1 孔中微体古生物和孢粉组合, 对东海陆架地层进行划分, 讨论各期潮流沙脊的形成和演化, 推断晚更新世以来沉积地层演化模式, 但地层划分缺乏绝对年龄的约束<sup>[12]</sup>。研究认为在末次冰期, 海平面下降, 河口向陆架延伸, 发育多期的前积三角洲复合体沉积, 随着海平面进一步降低, 在末次冰期最盛期(LGM), 中国东部大陆岸线向海退至-120 m 等深线以外, 发育河道沉积和河口沉积, 在强潮流冲刷作用下, 在古长江口开始形成河口潮流沙脊。随后冰消期海平面上升, 潮流沙脊向陆移动, 原来的河口沙脊被改造形成新的沙脊。到了全新世高海平面时期, 中内陆架发育形成浅海相的细粒沉积和前三角洲沉积<sup>[12-13]</sup>。

近十年来, 外陆架的代表性研究成果主要是基于 1996 年中法合作采集的单道地震调查资料, 和

1990年上海地质调查局的外陆架DZQ4孔资料(图1),对比海平面变化曲线,分析地层形成年代、沉积相和沉积环境,讨论第四纪东海的海进-海退层序<sup>[14-19]</sup>、潮流沙脊的分布和演化<sup>[17,20-24]</sup>及沉积层对海平面变化的响应<sup>[25-27]</sup>,建立晚第四纪地层框架。

唐保根综合分析了DZQ4孔的岩性、微体古生物、孢粉、有孔虫壳体的碳、氧同位素数据,分别建立了岩石地层、生物地层和氧同位素地层及热释光年代地层,对比周边的YQ-1孔、PE-1孔、DC-2孔以及长江河口的ch1-3系列钻孔等建立了中更新世晚期以来的地层框架,认为DZQ4孔揭示了中更新统上部(未见底)、上更新统西冷组、全新统海礁

组<sup>[14,28]</sup>。刘振夏等通过东海陆架地震资料解释,对比DZQ4孔研究,认为自190 kaBP以来,东海陆架经历了4次海退-海进沉积旋回,每个海退-海进沉积旋回具有相似的演变规律和发育模式<sup>[25]</sup>。末次冰期中3次亚冰期在外陆架地层中具有明显的侵蚀界面和地层。氧同位素6期陆相地层在东海陆架上分布最为广泛,氧同位素3期气候波动较小,在东海陆架的影响不及氧同位素5期<sup>[16,25-26]</sup>。

由于对DZQ4孔热释光(TL)年龄的理解不同,对相同地震剖面有不同的解释,形成了两种主要观点(表1):其一,根据DZQ4孔的热释光年龄,认为东海外陆架现存地层中,氧同位素2和4期(MIS2

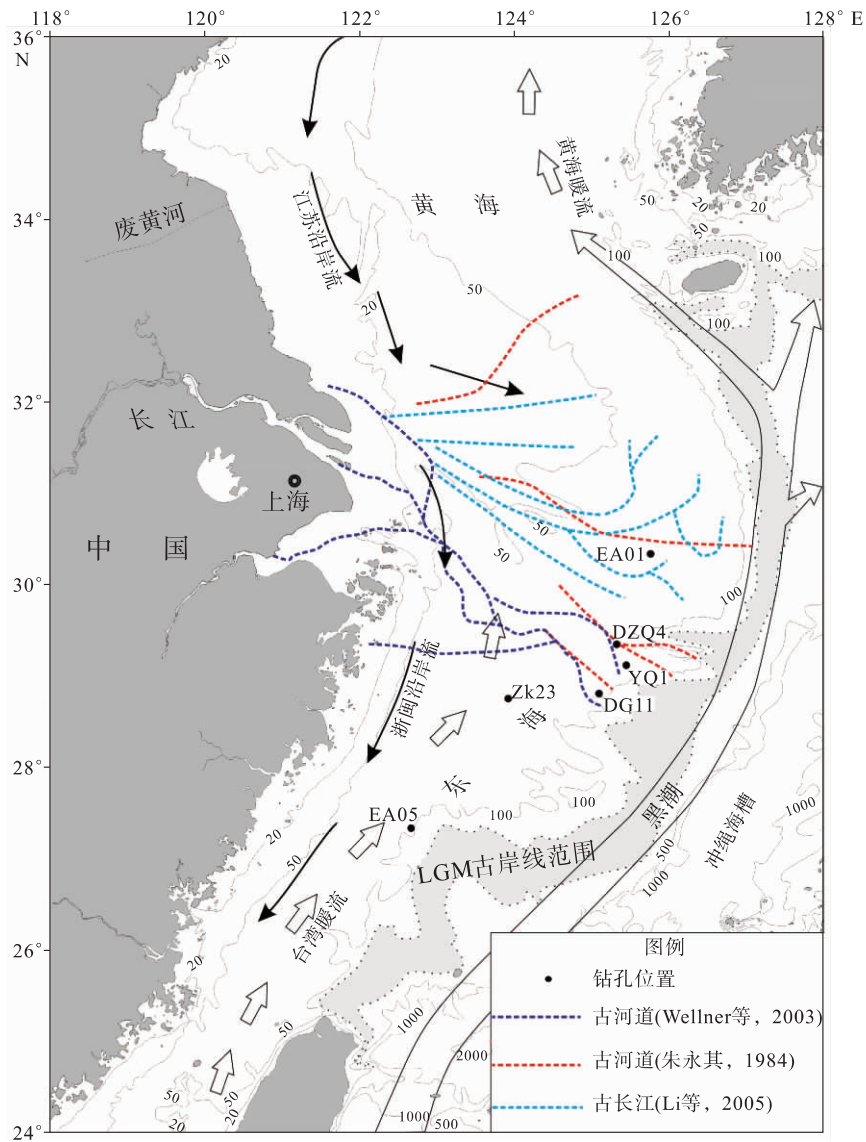


图1 东海外陆架末次冰盛期古河道与古海岸线分布及现有研究钻孔位置分布  
(末次冰盛期(LGM)古岸线范围据文献<sup>[15]</sup>修改)

Fig. 1 The location of paleo-river channels, paleo-coastlines, previous drilling cores and the core location of current studies on the outer shelf of the East China Sea(The coastal lines at LGM were modified from Saito et al.,1998)

和 MIS4)冰期历时短,地层较薄,部分缺失,在地震剖面中无法辨识;MIS3 地层发育,MIS5 地层由于后期较强侵蚀作用,地层无法识别;MIS6 强海退,地层普遍发育,是东海外陆架标志层<sup>[16,19,25-26]</sup>。其二,考虑到 TL 测年的敏感性,只选取 DZQ4 孔下部泥质地层 TL 年龄进行地层框架划分,上部地层划分参考 YQ1 孔沉积相,提出东海外陆架主要由 MIS1、MIS2、MIS3—5.2 (地层难以划分)、MIS5.3—5.5(地层难以划分)和 MIS6 地层组成,其中 MIS3 地层较不发育;MIS5 各期地层均发育,MIS6 地层划分一致<sup>[17]</sup>。基于此,Berné 等通过对比 DZQ4 孔和单道地震剖面提出晚更新世东海外陆架地层演化模式(图 2),自下而上分别发育强制海退三角洲进积楔、河口相和陆相、海侵潮流沙脊,其间主要沉积间断为海侵或海退侵蚀面,由于冰期—海平面变化的非对称性,致使陆架地层仅仅保留着强制海退沉积记录<sup>[17]</sup>。

表 1 东海外陆架晚第四纪地层划分

(1996 年中法东海联合调查单道地震资料和 DZQ4 孔资料,据文献<sup>[16,17,19,25,26]</sup>,其中地震相单元划分一致)

Table 1 Late Quaternary stratigraphy of the outer shelf, East China Sea

Liu 等, 2000, 吴自银等, 2002 <sup>[16,19]</sup>		Berné 等, 2002 <sup>[17]</sup>	
氧同位素 地层划分	地震相 单元	地震相 单元	氧同位素 地层划分
MIS1	U2	U140b	
MIS3.1	U3	U140a	MIS1
MIS3.2	U4	U130	MIS2
MIS3.3	U5	U125	MIS3, MIS4, MIS5.1—5.2
MIS5.1	U6	U120	MIS5.3—5.5
MIS6	U7	U110	MIS6

部分研究表明,LGM 时期东海外陆架并未裸露成陆。东海东北部的 EA01 孔的沉积层序、岩性地层、年代地层和生物地层的综合分析表明,东海外陆架末次冰盛期发育三角洲沉积,钻孔揭示出从下而上为前三角洲、河口沙坝和分流间湾的交替沉积,末次冰期三角洲的存在说明 LGM 低海平面时期东海外陆架仍被海水覆盖,盆地的区域性沉降和海平面相互作用形成了有效的沉积物容纳空间,因而,捕获了河流入海沉积物形成河口三角洲<sup>[29]</sup>。随后,EA05 孔的岩性、微体古生物和地球化学参数研究,也揭露出该岩心所处地区在末次冰盛期并未出露水

面,而一直处于河口滨岸环境,与 DZQ4 孔等研究的认识截然不同<sup>[30]</sup>。

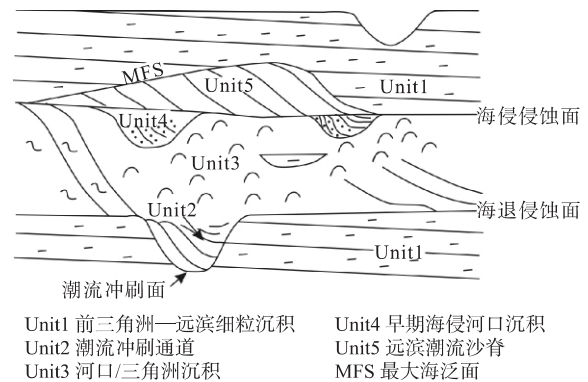


图 2 东海外陆架晚第四纪沉积模式

(据文献<sup>[17]</sup>修改)

Fig. 2 A depositional model of the outer shelf of East China Sea during Late Quaternary

(Modified from Berné et al., 2002)

也有学者运用层序地层学原理对整个中国东部陆架海的地层演化进行概括(图 3)<sup>[31-32]</sup>,认为末次冰期以来发育了 3 期海侵地层<sup>[33]</sup>,其中两期海侵—海退旋回完整,可以在渤海、黄海和东海陆架大范围对比,分别对应 MIS3 和 MIS5,即层序 2 和层序 3(图 3),前者从氧同位素 3 期开始,约 30~50 kaBP,结束于末次冰期最盛期低海平面时期,约 19 ka;后者始于氧同位素 5 期,约 128 kaBP,止于 30~50 kaBP。而层序 1 则仍在发育,并未形成完整的海侵—海退旋回沉积层序,自末次冰盛期以来发育了海侵早期滨岸沉积、随海侵程度不同而在陆架不同地方发育的潮流沙脊、HST 时期泥质沉积和近岸河口三角洲。同时,该模型引入了“海侵边界层”概念,认为东部陆架分布在末次冰期陆相层之上的大面积薄层粗碎屑沉积物,包括滞留沉积、海侵初期的海侵砂及侵蚀面附近的混合沉积,是海侵体系域(TST)的最底部层位,其特点是总与海侵层序的边界相伴随。海侵边界层的认识和理解对了解陆架演化至关重要<sup>[32]</sup>。

此外,还有一些学者依据数条浅地层剖面和柱状样岩心,研究了东海中、外陆架的北部和东南部晚更新世—全新世地层<sup>[15,18,34]</sup>,重建了地层框架,尤其对 LGM 低海平面以来的沉积地层进行了较为详细的探讨<sup>[18]</sup>。东海外陆架东北部浅地层剖面和多个短柱揭示出晚更新世以来的 5 个地层单元,包括低海平面时期的下切河谷充填沉积、海侵河口/三角洲

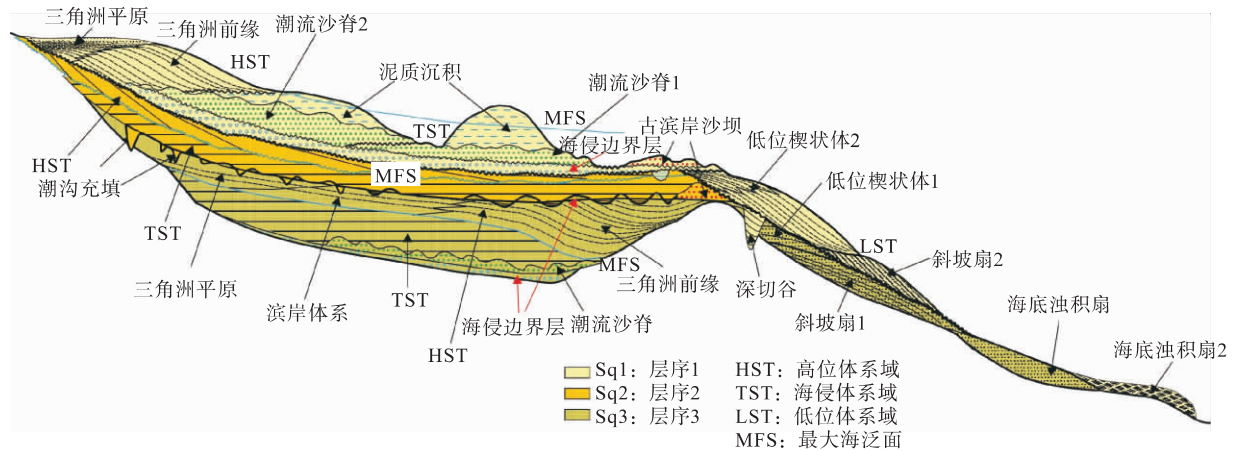


图3 中国东部陆架晚更新世层序地层模型<sup>[31]</sup>

Fig. 3 A sequence stratigraphic model for the East China Sea shelf since late Pleistocene<sup>[31]</sup>

复合体沉积、海侵沙席沉积、潮流沙脊沉积和高海面的楔状泥质沉积(图4)<sup>[18]</sup>。Saito等根据DZQ4孔部分层位TL年龄和部分柱状样<sup>14</sup>C年龄,对比PN系列柱状样的AMS<sup>14</sup>C分析,提出末次海侵以来东海陆架沉积演化模式(图5),25~50 kaBP时期,海平面降低,古长江三角洲向海迁移前积,而由于海平面上升形成的侵蚀作用致使LGM期间海平面最低时期的古长江三角洲沉积缺失,或发育河流的过路沉积,随后在海平面上升的早期(8~11 kaBP),由于海侵冲刷形成脊状形态的砂质沉积,6 kaBP之后的高海面至今,在砂质沉积上覆盖了薄层的泥质沉积物。但由于柱状样中25~8 kaBP地层缺失,未

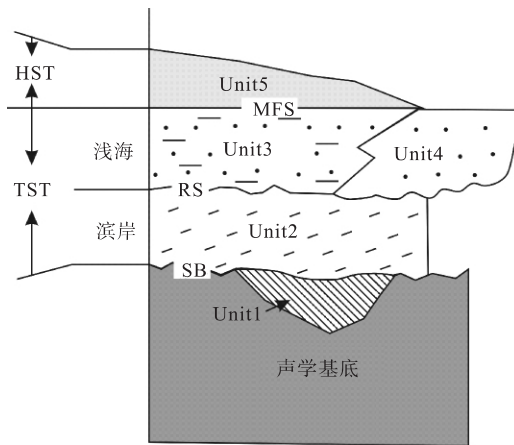
能讨论最低海平面时期的地层<sup>[15]</sup>。

## 2 陆架古河道沉积

由于末次冰期东海海平面曾经后退到陆架的边缘,末次冰盛期最低海平面低于现在海平面以下120 m,因此,古长江的流路以及演化过程也是东海晚第四纪沉积研究的重点内容,以致出现是否存在长江古河道的争论。同样,不同的研究由于基于地层框架的差异,形成截然不同的认识。

一种观点认为,末次冰期气候干冷,冰川发育,东海陆架几乎全部暴露,在强烈的冬季风作用下,发育了大规模的混杂堆积,出现风蚀基面和休止角型沉积结构,形成陆架沙漠,并无大型河流形成<sup>[35-36]</sup>。夏东兴等通过对1996年中法合作的3条典型单道地震剖面的层序地层解释,提出东海陆架末次冰盛期(LGM)不存在长江沉积和古河谷,之前认为的古河道为现代潮流水道,当时古长江并未流经东海陆架入海<sup>[37]</sup>。东海陆架末次冰期早期MIS4和晚期MIS2的河流作用都不及中期,较大的古河道都是发育在末次冰期中亚间冰期的MIS3地层中<sup>[38]</sup>。

Wellner等以东海陆架MIS3晚期以来的下切河谷为切入点讨论地层框架与海平面演化过程(图1)<sup>[21]</sup>,认为MIS2早期,海岸线向海后退550 km,未退到陆坡以下,气候由干变湿,提高了陆源泥沙通过下切河谷的入海能力,河谷持续下切,开始发育大规模的河道迁移,侧向加积,形成广泛的下切河谷复合体;MIS2晚期以来气候迅速由湿变为干冷,河流携带泥沙减少,海平面上升,沉积盆地容积增加,对原来河道中的上部沉积物进行冲刷再搬运,沉



Unit1 下切河谷充填沉积  
Unit2 海侵河口/三角洲复合体  
Unit3 海侵砂席  
Unit4 潮流沙脊  
Unit5 楔状泥  
HST 高位体系域  
TST 海侵体系域  
MFS 最大海泛面  
RS 侵蚀面  
SB 层序界面

图4 东海外陆架东北部晚第四纪地层沉积模式<sup>[18]</sup>

Fig. 4 Late Pleistocene sequence stratigraphic architecture of the mid-shelf of East China Sea

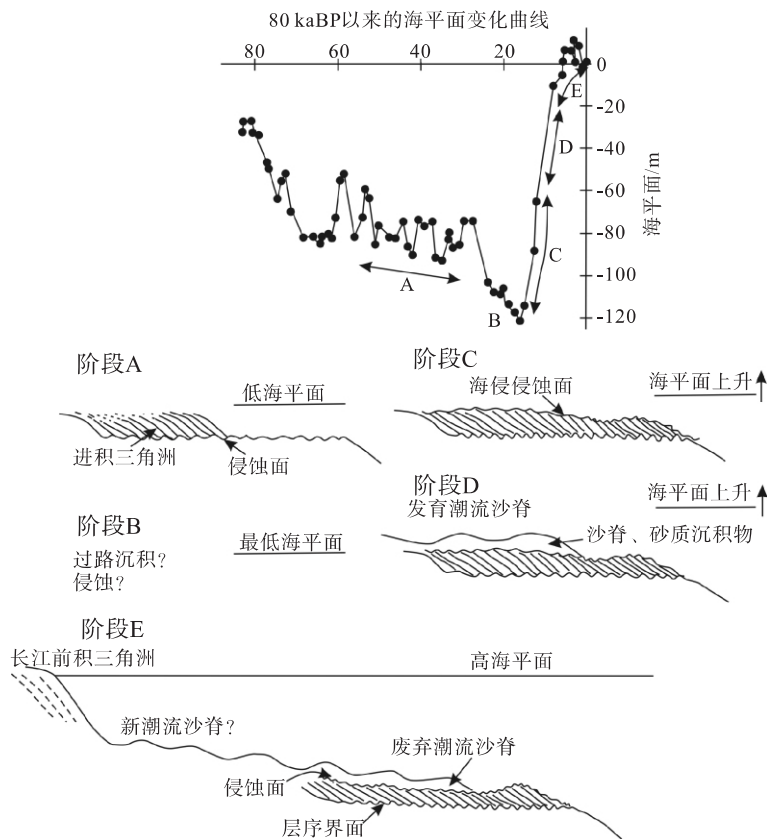


图 5 东海陆架地层模式(据文献[15]修改,1998)

Fig. 5 The schematic model for the East China Sea shelf sequence

积物向岸搬运,形成潮流席状砂复合体。进入全新发世以后,气候潮湿,河流携带泥沙增多,在长江河口地区将潮流砂体覆盖,发育三角洲沉积,部分现代长江搬运物质到达内陆架,加积沉积,中陆架由于现代潮流影响对高位体系域和海侵体系域沉积进行改造,而外陆架地区现代沉积物很难到达。因此,末次海侵过程中形成的潮流沙脊分布与古长江下切河谷路径演化基本一致,认为潮流沙脊复合体为古长江作用的结果<sup>[21]</sup>。

此外,李从先等通过对现代长江三角洲地区大量的第四纪钻孔研究,揭示出存在自镇江、扬州向东延伸至东海陆架的古河谷<sup>[39]</sup>,在古河道之间存在硬黏土分布<sup>[40]</sup>,古河谷地层的放射性碳同位素年龄为10~14 kaBP,其下伏地层年龄超过30 kaBP,有明显的侵蚀界面。长江口外中—内陆架的浅地层剖面、沉积物特征及<sup>14</sup>C测年研究揭示出不同区域的古河道形成年龄(图1),分别为27~12、42~28和11~8 kaBP<sup>[2,41]</sup>。长江三角洲和钱塘江三角洲地区钻孔也均发现,冰后期海平面上升过程中下切河谷充填和三角洲进积,且根据位置形成一系列由河口向陆的下切河谷演化体系<sup>[42]</sup>。

其他学者综合浅部地层地震相研究,提出长江古河道在东海外陆架的大致分布范围<sup>[43-44]</sup>。末次冰期陆架古河道受古地形和构造运动控制,是古长江水系的东延,在虎皮礁东南部的浙东—西湖凹陷发育游荡性河网,形成泛滥平原,汇聚古长江水系,但难以向东进入冲绳海槽(图1)<sup>[43]</sup>。刘奎等则在多个具有古河道特征的单道地震和浅地层剖面断面特征参数计算的基础上,提出对称型古河道、不对称型古河道和复式河道3种类型的古河道断面,并划分出长180 km、宽40 km的古长江河道系及古舟山和古钱塘江两条支流河道,提出当时古长江为辫状分汉河型<sup>[44]</sup>。

### 3 东海外陆架潮流沙脊

目前,多数研究表明东海中—外陆架分布的潮流沙脊是冰后期海侵(15~6 kaBP)过程中形成的<sup>[12,17,45-47]</sup>,主要有两个依据:其一是目前潮流流速,多数海区流速较小,且以旋转流为主;其二是沙脊,表明未见活动明显的沙波或沙丘等微地貌。但亦有不同认识,杨文达根据对东海中南部槽脊状地

形进行了地震剖面和钻孔分析,对沙脊体的地层结构、沉积环境和沉积时代进行了研究,认为海底沙脊群属于海退期三角洲的沉积体系,目前已被冰后期海侵形成的已改造陆架席状砂所覆盖,而非潮流沙脊,也不存在沙脊迁移的迹象<sup>[20]</sup>。

早期的研究表明,在末次冰期最盛期,海平面大幅度下降,中国东部大陆岸线向海退至-100 m等深线以外。此时,受潮流作用,在古长江口开始形成河口潮流沙脊。随后冰消期海平面上升,潮流沙脊向陆移动,随海平面上升,形成新的沙脊,早期沙脊则由于水深增加而成为残留沙脊或死亡沙脊<sup>[12-13]</sup>。

近年来的研究同样认为,东海外陆架古潮流沙脊形成于冰消期的海侵过程中,形成沙脊的水深为30~50 m,但由于海平面升降或沙脊的侧向迁移,发生多次侵蚀和堆积<sup>[26,46]</sup>。吴自银等对比全球海平面变化以及快速融冰事件,进一步认为东海外陆架潮流沙脊明显受到LGM以来的多次融冰事件的影响,沙脊发育的时间应该为14~9.5 kaBP,3次海平面跃升事件MWP-1A、MWP-1B和MWP-1C间的2次间歇期是沙脊发育的主要时间段<sup>[47]</sup>,Berné等也认同陆地冰川的快速融化形成大量融水入海,使海洋的沉积动力环境发生快速变化是致使核心沙脊形成的原因之一<sup>[17]</sup>。

最新的研究在高覆盖率的多波束数据综合分析基础上,对东海外陆架沙脊进行识别和分类,识别出类河口沙脊和开阔陆架沙脊两种类型,提出冰期-间冰期旋回引起的大规模海平面升降是东海外陆架沙脊的主要形成因素<sup>[48]</sup>。而其中,古长江的丰富入海物质为沙脊的形成提供了物源,而海底地形对沙脊的走向提供了约束。Wellner等则认为东海外陆架砂体沉积是在氧同位素2期晚期,海平面上升,对陆架古河道充填沉积物进行冲刷改造,物质由海向岸搬运,形成席状潮流砂复合体。因此,东海外陆架潮流沙脊的形成是与古长江河道演化伴随而生的,且同一等时面中内外陆架的沉积成因及沉积环境不同<sup>[21]</sup>。

有的学者则通过海平面变化和海岸移动过程的分析,提出东海外陆架潮流沙脊的多期性及多成因性,对不同分布位置、形态和动力特征的潮流沙脊进行分类,提出辐射状潮流沙脊、通道型沙脊和发散型沙脊3种体系<sup>[49]</sup>。也有学者通过高分辨率浅地层剖面解释提出不同的认识,东海外陆架存在堆积型沙脊、侵蚀-堆积型沙脊和侵蚀型沙脊3种<sup>[50]</sup>。其中,堆积型沙脊和侵蚀型沙脊各约占15%,而堆积-侵蚀型沙脊则占70%左右。但Berné等认为该研究区的潮流沙脊主要为低海平面发育的三角洲及河

口相沉积物,而只有少量20%左右的沙脊为海侵过程中形成的<sup>[17]</sup>。

此外,有岩心研究也认为东海外陆架沙脊发育形成中即有古长江的河口沙脊成因,又有冰后期海平面快速上升潮流冲刷改造成因。如陆架中部的Zk23孔的粒度、微体古生物和<sup>14</sup>C测年分析表明,中段(2.9~8.5 m)细砂和粉砂质细砂层为埋藏古长江河口沙脊,形成于15~12 kaBP的冰消期,与下伏地层无明显不整合面,为冰消期前快速海平面上升形成的河口-三角洲地层、前三角洲沉积。埋藏古潮流沙脊上部发育冰消期后全新世海平面快速上升(12~7 kaBP)阶段的海相沉积<sup>[51]</sup>。

虽然东海外陆架冰后期潮流沙脊形成与冰后期海侵过程密切相关,但最近研究表明,沙脊顶部较浅范围内仍受现代潮流影响,属于活动再沉积层,刘振夏等称之为“准活动沙脊”<sup>[22-23]</sup>。根据沙脊研究的不同侧重点,对潮流沙脊的沉积类型也有不同认识,如早期Emery提出的残留沉积和最近研究的活动再沉积<sup>[52]</sup>,是注重沙脊发育的时间,而侧重沙脊成因的沉积类型是潮流沉积和改造沉积<sup>[53-54]</sup>,以及根据沙脊的活动性和保存状态分类的活动沙脊、准活动沙脊和埋藏沙脊<sup>[53]</sup>。

## 4 存在的关键问题和展望

### 4.1 关键问题

综上所述,目前东海外陆架晚第四纪地层和沉积古环境研究虽然取得不少成果,但由于条件所限,长江水下三角洲和内陆架地区研究比较成熟,外陆架研究则主要集中在晚更新世,尤其LGM以来的地层,对东海外陆架晚第四纪地层框架存在不同的认识,致使对潮流沙脊的形成与演化、LGM时长江古河道分布和不同时间尺度的海退-海进旋回等科学问题研究出现不同观点。总体来看,东海外陆架晚第四纪沉积地层研究还相当薄弱,主要原因包括:

(1)虽然根据一些钻孔(YQ1、DZQ4、EA01、EA05和DG11孔等)及周边的地球物理剖面地震相特征建立了层序地层,但由于缺少精确可靠的绝对年龄约束,未形成对晚第四纪地层框架的统一认识,尤其是对MIS2—5时期地层的划分存在不同的观点,虽然已有研究对MIS1和MIS6地层认识基本相同<sup>[15-17,19-21]</sup>。

(2)地球物理方法研究较多,而地质钻孔研究比较薄弱。多数钻孔分布在内陆架及长江水下三角洲

地区<sup>[5-6,10,41]</sup>, 外陆架钻孔数量较少, 穿透地层厚度较薄, 且地层划分出现较大争议<sup>[12,15-17,29-30,48,55-56]</sup>。

(3) 现有研究广泛采用的 DZQ4 孔<sup>[15-17,19-21]</sup> 是在 20 世纪 80 年代取得, 受研究条件制约, 测试分析的分辨率和精度都有限, 地层年龄主要参考南海深海碳氧同位素曲线和热释光测年(TL), 且碳氧同位素曲线不连续, 其他地层年龄均根据地震剖面推测, 钻孔无精确的 AMC <sup>14</sup>C 年龄<sup>[14]</sup>, 且与 EA01 和 EA05、YQ1 孔等揭示的地层框架不一致<sup>[12,17,29-30]</sup>。

(4) 东海内外陆架对比研究少, 缺少将外陆架地层发育置于整个东海晚第四纪古环境演化的框架中, 将构造、气候、海平面等多因素综合来深入考虑沉积地层格局的建立过程。

## 4.2 展望

显然, 东海外陆架晚第四纪地层框架的不一致认识已明显地影响到对东海陆架沉积地层的整体认识及古环境演化的重建研究。目前亟需获取多个相对连续的地质岩心, 开展高分辨率的年代地层学研究, 综合对关键钻孔的地球物理剖面的层序地层学研究, 对陆架地层进行高分辨率的地层精确厘定, 进而统一东海晚第四纪地层认识; 通过东海内外陆架第四纪沉积地层的比较研究, 及与国际其他陆架沉积模式的比较, 提炼出东海作为典型的河控型边缘海的大陆架沉积模式特点, 进而丰富对世界不同类型陆架沉积的研究认识。在此基础上, 通过对下切河道沉积的沉积环境和沉积时代, 以及潮流沙脊沉积的成因进行讨论, 重建晚第四纪的古环境及对全球海平面演化的区域响应。

致谢: 感谢李从先、何起祥、陈中原、王强、Serge Berné、刘振夏、杨子赓等教授参与讨论并给以宝贵建议, 作者从中受益匪浅。

### 参考文献 (References)

- [1] Chen Z Y, Stanley D J. Quaternary subsidence and river channel migration in the Yangtze delta plain, eastern China[J]. *Journal Coastal Research*, 1995, 11:927-945.
- [2] 朱永其, 李承伊. 关于东海大陆架晚更新世最低海平面[J]. *科学通报*, 1979, 7: 317-320. [ZHU Yongqi, LI Chengyi. The lowest sea surface of the East China Sea on the continental shelf during Late Pleistocene [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1979, 7:317-320.]
- [3] Chen Z Y, Song B P, Wang Z H, et al. Late Quaternary evolution of the subaqueous Yangtze delta, China: sedimentation, stratigraphy, palynology, and deformation [J]. *Marine Geology*, 2000, 162: 423-441.
- [4] Li C X, Wang P, Sun H P, et al. Late Quaternary incised-valley fill of the Yangtze delta (China): its stratigraphic framework and evolution [J]. *Sedimentary Geology*, 2002, 152: 133-158.
- [5] Hori K, Saito Y, Zhao Q H, et al. Architecture and evolution of the tide-dominated Changjiang (Yangtze) River delta, China [J]. *Sedimentary Geology*, 2002, 146: 249-264.
- [6] Wang Z H, Saito Y, Hori K, et al. Yangtze offshore, China: highly laminated sediments from the transition zone between subaqueous delta and the continental shelf [J]. *Coastal and Shelf Science*, 2005, 62(1-2): 161-168.
- [7] 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): 573-580. [XIAO Shangbin, LI Anchun, CHEN Mubong, 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):573-580.]
- [8] Liu J P, Xu K H, Li A C, et al. Flux and fate of Yangtze River sediment delivered to the East China Sea [J]. *Geomorphology*, 2007, 85:208-224.
- [9] Zhao B C, Wang Z H, Chen J, et al. Marine sediment records and relative sea level change during late Pleistocene in the Changjiang delta and adjacent continental shelf[J]. *Quaternary International*, 2008, 186:164-172.
- [10] 王张华, 赵宝成, 陈静, 等. 长江三角洲晚第四纪年代地层框架及两次海侵问题的初步探讨[J]. *古地理学报*, 2008, 10(1): 99-100. [WANG Zhanghua, ZHAO Baocheng, CHEN Jing, et al. Chronostratigraphy and two transgressions during the late Quaternary in Changjiang delta area[J]. *Journal of Paleogeography*, 2008, 10(1):99-100.]
- [11] 徐方建, 李安春, 肖尚斌, 等. 末次冰消期以来东海内陆架古环境演化 [J]. *沉积学报*, 2009, 27(1): 118-127. [XU Fangjian, LI Anchun, XIAO Shangbin, et al. Paleoenvironmental evolution in the inner shelf of the East China Sea since the Last Deglaciation [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(1):118-127.]
- [12] Yang C S. Active, moribund and buried tidal sand ridges in the East China Sea and the Southern Yellow Sea[J]. *Marine Geology*, 1989, 88: 97-116.
- [13] 石斯器, 杨长恕. 东海外陆架浅地层地震地层的初步研究 [C]//中国近海及沿海地区第四纪进程与事件. 北京: 地质出版社, 1989:62-67. [SHI Siqi, YANG Changsu. The seismic stratigraphy preliminary study of the outer shelf of the East China Sea [C]//Quaternary Processes and Incidents of the Marginal Sea and its Coastal Areas. Beijing: Geological Publishing House, 1989:62-67.]
- [14] 唐保根. 东海陆架第四纪地层 [C]//中国第四纪地层与国际对比. 北京: 地质出版社, 1996:56-75. [TANG Baogen. The Quaternary stratigraphy of the East China Sea shelf [C]//Quaternary Stratigraphy in China and its international Correlation. Beijing: Geological Publishing House, 1996:56-75.]
- [15] 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: 217-232.
- [16] Liu Z X, Bern S, Saito Y, et al. Quaternary seismic stratigraphy and paleoenvironments on the continental shelf of the East China Sea[J]. *Journal of Asian Earth Science*, 2000, 18: 441-452.
- [17] Berné S, Vagner P, Guichard F, et al. Pleistocene forced regressions and tidal sand ridges in the East China Sea[J]. *Marine Geology*, 2002, 188: 293-315.
- [18] Yoo D G, Lee C W, Kim S P, et al. Late Quaternary transgressive and highstand systems tracts in the northern East China Sea mid-shelf[J]. *Marine Geology*, 2002, 187: 313-328.
- [19] 吴自银, 金翔龙, 李家彪. 中更新世以来长江口至冲绳海槽高分辨率地震地层学研究[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2002, 22(2): 9-20. [WU Ziyin, JIN Xianglong, LI Jiabiao. Seismic stratigraphic interpretation of high-resolution seismic profiles between Yangtze estuary and Okinawa Trough[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2002, 22(2): 9-20.]
- [20] 杨文达. 东海海底沙脊的结构及沉积环境[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2002, 22(1): 9-16. [YANG Wenda. Structure and sedimentary environment for submarine dune ridges in the East China Sea [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2002, 22(1): 9-16.]
- [21] Wellner R W, Bartek L R. The effect of sea level, climate, and shelf physiography on the development of incised-valley complexes: a model example from the East China Sea[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2003, 73: 926-940.
- [22] 印萍. 东海陆架冰后期潮流沙脊地貌与内部结构特征[J]. *海洋科学进展*, 2003, 21(2): 182-187. [YIN Ping. Geomorphology and internal structure of postglacial tidal sand ridges on the East China Sea shelf[J]. *Advances in Marine Science*, 2003, 21(2): 182-187.]
- [23] Liu Z X, Bern S, Saito Y, et al. International architecture and mobility of tidal sand ridges in the East China Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 2007, 27(13): 1820-1834.
- [24] Wu Z Y, Jin X L, Li J B, et al. Linear sand ridges on the outer shelf of the East China Sea[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(21): 2517-2528.
- [25] 刘振夏, Berné S, L'ATALANTE 科学考察组. 中更新世以来东海陆架的古环境[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1999, 19(2): 1-10. [LIU Zhenxia, Berné S, L'ATALANTE Scientific Party. Paleoenvironment in the continental shelf of the East China Sea since the Mid Pleistocene[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 1999, 19(2): 1-10.]
- [26] 刘振夏, 印萍, Berné S, 等. 第四纪东海的海进层序和海退层序[J]. *科学通报*, 2001, 46(增刊): 74-79. [LIU Zhenxia, YIN Ping, Berné S, et al. The Quaternary transgression and regression of the East China Sea[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46(sp): 74-79.]
- [27] 张军强, 唐璐璐, 邹昊. 晚更新世以来古气候与海平面变化在东海地区的响应[J]. *海洋湖沼通报*, 2008, 1: 25-31. [ZHANG Junqiang, TANG Lulu, ZOU Hao. The response to the variety of paleoclimate and sea level in the East China Sea after the Late Pleistocene [J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2008, 1: 25-31.]
- [28] 唐宝根. 东海陆架第四纪地层层序的初步研究[J]. *上海地质*, 1996, 58: 22-30. [TANG Baogen. Preliminary study on the Quaternary stratigraphy sequence in the continental shelf of the East China Sea[J]. *Shanghai Geology*, 1996, 58: 22-30.]
- [29] 李绍全, 李双林, 陈正新, 等. 东海外陆架 EA01 孔末次冰期最盛期的三角洲沉积[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2002, 22(3): 19-26. [LI Shaoquan, LI Shuanglin, CHEN Zhengxin, et al. Deltaic sedimentary sequences developed during last Glacial Maximum in the EA01 core on the outer shelf of the East China Sea[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2002, 22(3): 19-26.]
- [30] 余华, 刘振夏, 熊应乾, 等. 末次盛冰期以来东海陆架南部 EA05 岩心地层划分及其古环境意义[J]. *中国海洋大学学报*, 2006, 36(4): 545-550. [YU Hua, LIU Zhenxia, XIONG Yinggan, et al. Stratigraphy of core EA05 from southern East China Sea continental shelf since the Last Glacial Maximum and its paleo-environment implication[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2006, 36(4): 545-550.]
- [31] 杨子赓. *海洋地质学*[M]. 济南: 山东教育出版社, 2004: 236-268. [YANG Zigeng. *Marine Geology*[M]. Jinan: Shandong Education Press, 2004: 236-268.]
- [32] 李广雪, 杨子赓, 刘勇. 中国东部海域海底沉积物成因环境图[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 17-29. [LI Guangxue, YANG Zigeng, LIU Yong. *The Environmental Formation Map of the Seabed Sediments in the East China Marginal Sea*[M]. Beijing: Science Press, 2005: 17-29.]
- [33] Yang Zigeng, Lin Hema. Quaternary Processes in Eastern China and Their International Correlation[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991.
- [34] Uehara K, Saito Y. Late Quaternary evolution of the Yellow/East China Sea tidal regime and its impacts on sediments dispersal and seafloor morphology[J]. *Sedimentary Geology*, 2003, 162: 25-38.
- [35] 赵松岭, 于洪军, 刘敬圃. 晚更新世末期陆架沙漠化环境演化模式的探讨[J]. *中国科学 D 辑*, 1996, 26(2): 142-146. [ZHAO Songling, YU Hongjun, LIU Jingpu. Approach on the evolution model of the desert environment on the continental shelf during the late Pleistocene[J]. *Science in China (Series D)*, 1996, 26(2): 142-146.]
- [36] 赵松岭, 于洪军. 晚更新世末期黄、渤海陆架沙漠化环境的形成[J]. *第四纪研究*, 1996, 1: 42-47. [ZHAO Songling, YU Hongjun. Shelf desertiation environment in the Bohai and Yellow Seas during the Last Glacial Maximum[J]. *Quaternary Sciences*, 1996, 1: 42-47.]
- [37] 夏东兴, 刘振夏. 末次冰期盛期长江入海流路探讨[J]. *海洋学报*, 2001, 23(5): 88-94. [XIA Dongxing, LIU Zhenxia. Tracing the Changjiang River's flowing route entering the sea during the last ice age maximum[J]. *Acta Oceanologica Sinica*



- ca, 2001, 23(5): 88-94.]
- [38] 刘振夏, Berné S, L'ATALANTE 科学考察组. 东海陆架的古河道和古三角洲[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2000, 20(1): 9-14. [LIU Zhenxia, Berné S, L'ATALANTE Scientific Party. Paleochannels and paleodeltas in the continental shelf of the East China Sea[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2000, 20(1): 9-14.]
- [39] 李从先, 张桂甲. 末次冰期时存在入海的长江吗[J]. 地理学报, 1995, 50(5): 459-462. [LI Congxian, ZHANG Guijia. A sea-running Changjiang River during the Last Glaciation[J]. Acta Geographica Sinica, 1995, 50(5): 459-462.]
- [40] 陈庆强, 李从先. 长江三角洲地区晚更新世硬粘土层成因研究[J]. 地理科学, 1998, 18(1): 53-57. [CHEN Qingqiang, LI Congxian. Studies on origin of the late Pleistocene stiff clays at the Yangtze delta[J]. Scientia Geographica Sinica, 1998, 18(1): 53-57.]
- [41] 袁迎如. 东海外陆架外部的晚更新世长江河口[J]. 海洋学报, 1992, 14(6): 85-91. [YUAN Yingru. The late Pleistocene Changjiang estuary on the outer shelf of the East China Sea[J]. Oceanologica Sinica, 1992, 14(6): 85-91.]
- [42] 李从先, 范代读, 杨守业, 等. 中国河口三角洲地区晚第四纪下切河谷层序特征和形成[J]. 古地理学报, 2008, 10(1): 87-97. [LI Congxian, FAN Daidu, YANG Shouye, et al. Characteristics and formation of the Late Quaternary incised-valley sequences in estuary and delta areas in China[J]. Journal of Paleogeography, 2008, 10(1): 87-97.]
- [43] Li G X, Liu Y, Yang Z G, et al. Ancient Changjiang channel system in the East China Sea continental shelf during the last glaciations [J]. Science in China(Series D), 2005, 48(11): 1972-1978.
- [44] 刘奎, 庄振业, 刘冬雁, 等. 长江口外陆架区埋藏古河道研究[J]. 海洋学报, 2009, 31(5): 80-88. [LIU Kui, ZHUANG Zhenye, LIU Dongyan, et al. Study of the buried ancient channels in the continental shelf area out the mouth of the Changjiang River in China [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2009, 31(5): 80-88.]
- [45] Liu Z X, Xia D X, Berné S, et al. Tidal deposition systems of China's continental shelf, with special reference to the eastern Bohai Sea[J]. Marine Geology, 1998, 145(3): 225-253.
- [46] 刘振夏, 余华, 熊应乾, 等. 东海和凯尔特潮流沙脊的对比研究[J]. 海洋科学进展, 2005, 23(1): 35-42. [LIU Zhenxia, YU Hua, XIONG Yingqian, et al. A comparative study on tidal sand ridges in the East China Sea and Celtic Sea[J]. Advances in Marine Science, 2005, 23(1): 35-42.]
- [47] 吴自银, 金翔龙, 曹振轶, 等. 东海陆架两期潮流沙脊的时空对比[J]. 海洋学报, 2009, 31(5): 69-79. [WU Ziyin, JIN Xianglong, CAO Zhenyi, et al. Space-time contrast of two stages sand ridges on the East China Sea shelf[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2009, 31(5): 69-79.]
- [48] 吴自银, 金翔龙, 曹振轶, 等. 东海陆架沙脊分布及其形成演化[J]. 中国科学 D 辑, 2010, 40(2): 188-198. [WU Ziyin, JIN Xianglong, CAO Zhenyi, et al. Distribution, formation and evolution of sand ridges on the East China Shelf[J]. Science in China (Series D), 2010, 40(2): 188-198.]
- [49] 李广雪, 刘勇, 杨子赓. 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[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(4): 13-19. [LI Guangxue, LIU Yong, YANG Zigeng. Sea level rise and sea sedimentary environment response in the East China continental shelf since the Last Glacial Maximum[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2009, 29(4): 13-19.]
- [50] Liu Z X, Yin P, Xiong Y Q, et al. Quaternary transgressive and regressive depositional sequences in the East China Sea [J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(supp): 81-87.
- [51] 杜文博, 叶银灿, 庄振业. 东海 Zk23 孔的古沙脊沉积环境[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2007, 27(2): 11-16. [DU Wenbo, YE Yincan, ZHUANG Zhenye. Sedimentary environment analysis of ancient sand ridges from Zk23 hole in the East China Sea[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2007, 27(2): 11-16.]
- [52] Emery. Relict sediments on continental shelves of world[J]. Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists, 1968, 52(3): 445-464.
- [53] 刘振夏, 夏东兴. 中国近海潮流沙脊沉积体系[M]. 北京: 海洋出版社, 2004. [LIU Zhenxia, XIA Dongxing. Tidal sands in China Seas[M]. Beijing: Ocean Press, 2004.]
- [54] 王张华, 过仲阳, 陈中原. 东海陆架平北地区残留沉积特征及古环境意义[J]. 华东师范大学学报: 自然科学版, 2002, 1: 81-86. [WANG Zhanghua, GUO Zhongyang, CHEN Zhongyuan. Relict sediment and its environmental implication in Pingbei area, East China Sea continental shelf[J]. Journal of East China Normal University(Natural Science), 2002, 1: 81-86.]
- [55] 李双林, 李绍全, 杨文达, 等. 东海陆架 HY126 EA01 孔有孔虫壳体的氧、碳同位素记录[J]. 海洋学报, 2002, 22(4): 21-28. [LI Shuanglin, LI Shaoquan, YANG Wenda, et al. Oxygen and carbon isotopic record of foraminiferal crusts from HY126 EA01 hole in the continental shelf of the East China Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2002, 24(3): 81-87.]
- [56] 金秉福, 林晓彤, 季福武, 等. 东海钓鱼岛北侧 Q43 柱状样上更新统的沉积[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2005, 25(1): 25-31. [JIN Binfu, LIN Zhenhong, JI Fuwu, et al. Mineral characteristics and their environmental implication during the last ice age in core Q43 on the outer shelf of the East China Sea[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2005, 25(1): 25-31.]

## A REVIEW OF THE LATE QUATERNARY SEDIMENTOLOGICAL STUDIES ON THE OUTER SHELF OF THE EAST CHINA SEA

WANG Zhongbo<sup>1,2</sup>, YANG Shouye<sup>2</sup>, ZHANG Zhixun<sup>1</sup>, LI Rihui<sup>1</sup>,  
LAN Xianhong<sup>1</sup>, YIN Ping<sup>1</sup>, ZHANG Xunhua<sup>1</sup>

(1 The Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resources and Environmental Geology, Ministry of  
Land and Resources, Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China

2 State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The current study of Late Quaternary stratigraphy, paleo-river channels, channel-fillings and tidal sand ridges on the outer shelf of the East China Sea are summarized in this paper. Key questions, such as the boundaries of MIS 2 and MIS 4, the different schemes of sequence stratigraphic architectures, the existence and evolution of the paleo-Yangtze River during LGM, and the formation of the tidal sand ridges on the continental shelf of the East China Sea are highlighted and discussed. Comments and suggestions are provided in the paper for the study of the Late Quaternary sedimentation on the East China Sea in the future.

**Key words:** sedimentological studies; review; prospect; Late Quaternary; the outer shelf of East China Sea

### “海洋石油 981”钻井平台首钻成功

2012 年 5 月 9 日 9 时 30 分,我国首座自主设计建造的第六代深水半潜式钻井平台——“海洋石油 981”,在南海荔湾 6-1 区域约 1 500 m 深水下成功探入地层,标志着中国海洋石油工业发展向“深水战略”迈出了坚实的一步,是一个值得纪念的里程碑事件。

由中国海洋石油总公司拥有知识产权、出资 60 亿元建造的这一超深水半潜式钻井平台,自重超过 3 万吨,其甲板面积长 114 m、宽 79 m,相当于一个标准足球场大小,从船底到钻井架顶高达 137.8 m,相当于 45 层楼高,电缆总长度超过 800 km。它的最大作业水深 3 050 m,最大钻井深度 12 000 m。这座设计使用寿命为 30 年的深水半潜式钻井平台,由中国船舶全资子公司上海外高桥造船有限公司承担设计、采购和建造。

这次开钻的预探井,距离香港东南约 320 km,在我国 200 海里专属经济区范围内,井位水深 1 496 m,预计完钻井深将达 2 300 多米。预探井位于珠江口盆地白云凹陷东斜坡,东沙 25 构造带上,探井的目的是打穿“白云凹陷”的含油气构造,验证它有无有价值的发现。

“海洋石油 981”钻井平台的投入使用,对于我国进军深海海洋工程装备开发、提升深水作业能力、实现国家能源战略、推进海洋强国战略和维护我国领海主权等具有重要的战略意义。

(本刊)