

东海陆架全新统高分辨率层序地层学研究

章建雄^① 杨作升^② 梁卫^③ 曾凡刚^④

(^①青岛海洋大学博士后流动站; ^②青岛海洋大学海洋地球科学学院;

^③中国海洋石油总公司东部公司, 广州; ^④北京大学资源环境学院)

[内容提要] 在高分辨率¹⁴C测年、岩石、生物、化学、同位素、气候及磁性地层学研究成果基础上, 通过不同沉积背景典型钻孔的沉积学分析, 运用层序地层学理论, 对东海陆架全新统进行了高分辨率层序划分及对比, 建立了全新世层序地层格架及海平面变化过程, 提出了相应的层序成因模式。研究表明, 东海陆架全新统相当于一个发育中的六级(1~10ka)层序, 可进一步划分为3个七级(0.1~1ka)层序和若干个更次级层序。代表1个六级或3个七级周期相对海平面变化过程中叠加有若干更次级的海平面波动, 它们与地球旋回谱系中的太阳带、历法带密切相关。七级层序具有与三级层序相近的内部构型和成因格架。在东海陆架全新世沉积演化过程中, 长江三角洲至少有3次不同程度地越过东海陆架进入冲绳海槽, 并滞留有至少3层海侵改造“残积砂”沉积。在东海陆架全新世海平面变化期间, 最大海平面时期为约距今6~5ka, 大致高于现今海平面2~4m, 最低海平面在距今10ka左右, 大约低于现今海平面130m。目前, 由于温室效应的影响, 海平面仍呈小幅度波浪式上升。事实证明, 层序地层学不仅丰富了现代海洋沉积学的内容, 而且解决了许多海洋沉积学未能解决的问题。

关键词 高分辨率层序地层学 太阳带 层序地层格架 海平面变化 层序成因模式 全新世 东海陆架

东海陆架作为大陆边缘主要沉积物聚集场所, 其中全新世地层发育全, 保存好, 是研究冰消期以来古海洋、古气候、古环境和古海平面变化, 进而预测未来海平面变化的理想地区, 长期以来, 深受广大海洋地质学家的青睐。秦蕴珊等^[1], 汪品先等^[2], 杨子赓等^[3], 唐保根等^[4], 李绍全等^[5]先后对东海全新统进行了地层学、古环境和古海洋学等的研究, 取得了巨大成果。本文正是在这些成果基础上, 选择自陆向海不同沉积背景的典型钻孔剖面, 结合先期高分辨率年代地层学、生物地层学、岩石地层学、磁性地层学、同位素地层学、化学地层学、气候地层学等资料, 运用层序地层学理论, 对东海陆架全新统进行高分辨率层序划分和对比, 建立全新统高分辨层序地层格架和海平面变化曲线, 进而提出相应的层序发育模式。

1 地质概况

全新统在东海陆架(北纬28°~34°, 东经118°~128°)发育齐全, 钻孔甚多(图1), 自

① 该项目由中国博士后基金资助。

② 本文1998年5月15日收稿。

下而上划分为下全新统(Q_1^3)、中全新统(Q_2^3)和上全新统(Q_3^3)。它们的底界年龄值分别为 10ka、7.5ka 和 2.5ka (表 1)。但在不同的地层区,其沉积特征及厚度略具差异:在长江三角洲平原地层区(如 QC5 孔、Ch4 孔及长江 1 号孔),地层厚度较大,通常 10~50m 不等,如长江口北支(QC5 孔)最大厚度达 70.49m,南岸(长江 1 号孔)厚度 52.3m,以粉砂、粉砂质细砂和细砂沉积为主;在长江三角洲海域地层区(CJ1、CJ2、CJ3、CJ4、CJ5、Ch2、Ch3 孔),地层厚 10~30m,为灰色粉砂质泥和泥质粉砂沉积,厚度较稳定;东海外陆架地层区,地层厚度小,0.5~2.5m 不等,如 QZ504 孔厚 0.84m, DZQ4 孔厚 2.2m,以粉砂和细砂为主,富含孔虫、介形虫及钙质超微化石。可见,不同沉积背景,其地质演化史、环境条件及沉积作用等存在差异性。

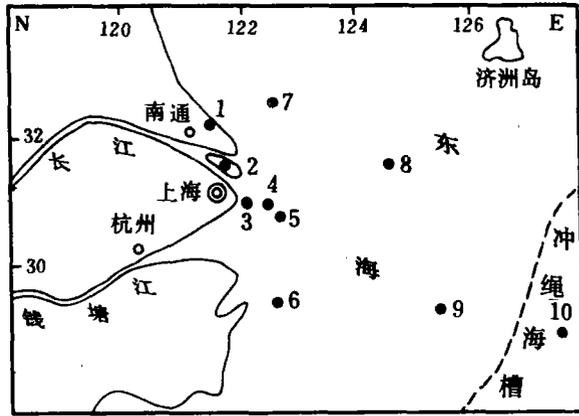


图 1 东海陆架钻孔剖面位置图(据唐保根等^[5],1996,补充)

1. QC5 孔;2. 长江 1 号孔;3. Ch4 孔;4. CJ4 孔;5. CJ5 孔;
6. QC3 孔;7. QC1 孔;8. DZQ4 孔;9. QZ504 孔;10. Z14-3 孔

Fig. 1 Location of the holes on the East China Sea shelf (modified from Tang Baogen et al, 1996)

1=Hole QC5;2=Hole Ch1;3=Hole Ch4;4=Hole CJ4;
5=Hole CJ5;6=Hole QC3;7=Hole QC1;
8=Hole DZQ4;9=Hole QZ504;10=Hole Z14-3

表 1 东海陆架全新世地层格架

Table 1 The stratigraphic framework of the Holocene strata on the East China Sea shelf

地层系统		年限	长江三角洲平原		长江三角洲海域	东海外陆架
全新统	上全新统 (Q_1^3)	2.5ka	平 山 组	上段 ($Q_1^3 p^3$)	嵎酒组 ($Q_1^3 c$)	海 礁 组 ($Q_4 h$)
	中全新统 (Q_2^3)			中段 ($Q_2^3 p^2$)	大戴山组 ($Q_2^3 d$)	
	下全新统 (Q_3^3)	7.5ka		下段 ($Q_3^3 p^1$)	鸡骨组 ($Q_3^3 j$)	
更新统		10ka		达山组 ($Q_3 d$)	余山组 ($Q_3 y$)	西冷组 ($Q_3 x$)

据唐保根 (1996) 补充^[4]

2 层序界面

根据层间侵蚀接触关系、风化壳特征、界面上下岩相差异性、沉积旋回的完整性,结合高分辨率年代地层学、岩石地层学、生物地层学、磁性地层学、同位素地层学、化学地层学及气候地层学资料^[6~9],在东海陆架识别出 3 个高分辨率层序界面,现分述如下。

2.1 I 型界面

即全新统底部不整合界面,在整个东海陆架第四纪地层中广泛分布,具有区域对比性甚至全球成因特点。在东海陆架诸钻孔中均能见及,且向西及西北其特征尤其明显。识别标志主要有:①凹凸不平的冲刷侵蚀间断面,如 Ch4、CJ5、QC5 诸孔剖面;②不整合面上常见砾石层,其中富含褐铁矿斑点,如 QC4、QC5、D3 钻孔中,全新统底分别有 0~5cm 不等的砾石层;③界面上、下岩相截然不同。东海陆架几乎所有的钻孔柱中,该界面之下为陆相沉积,具向上变浅层序。之上普遍为海相沉积,为向上变深序列;④下伏沉积海退

旋回不完整,通常缺失部分顶部或上部,相应时限约数千至数万年,如QC2孔;⑤就孢粉组合而言,界面以下普遍为干冷组合为主,而界面上则广泛发育温湿型组合,如长江1号孔,Ch2孔;⑥在磁性地层方面,界面以上为哥德堡事件(如QC1, QC5孔)或极性漂移(QC2、QC5孔)^[10],界面之下为蒙戈事件(QC2, QC3, QC4孔等);⑦在同位素地层方面,界面附近 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 呈现明显的突变现象,如DZQ4孔碳、氧同位素曲线(唐保根等)^[6]中, $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 的正向漂移事件,此外QC2孔的 $\delta^{18}\text{O}$ 负向漂移事件(郑光膺等)^[7];⑧就生物地层而言,有孔虫、介形虫丰度及分异度在从界面以下的最小值到界面之上的明显增长;⑨各孔 ^{14}C 测年结果表明,该界面为一跨越一定时间段的穿时地层界面(郑光膺等)^[7],但目前逐渐趋于10ka。

2.2 I型界面

大致相当中全新统和上全新统底界,不同钻孔及层位其特征略具差异。在长江三角洲平原区(如Ch4孔、长江1号孔、QC5孔),特征明显;逐渐向三角洲海域,通常表现为—水下冲刷侵蚀面,在东海陆架,识别标志不明显,以岩相转换面为特征。但总的界面标志主要有:①界面处岩相的差异性,即岩相结构转换面之下通常为陆相沉积,其上突变为滨海相,表明为—不连续面,如QC5孔;②中全新统底界面处通常发育0~0.5cm不等的铁质粘土,偶夹褐黄色泥砾,含铁染的铁质斑块及少量钙质结核;③上全新统底界面处常见炭屑、碳质泥屑、泥炭、淤泥质粘土、碳泥质纹层、含少量黄铁矿;④生物地层标志,界面处为一生物波动事件,即生物丰度及分异度到界面以上急剧增大,表明初次海侵伴随有大量新兴生物组合并有利于生物的繁盛;⑤通过孢粉组合研究(郑光膺等)^[7],发现界面处通常为低温事件;⑥界面上、下的岩性组合因不同钻孔而异,如QC1孔的浅海沉积/滨岸沉积, QC4孔的潟湖沉积/盐沼沉积, QC2孔的现代浅海沉积/潮上坪沉积, QC5孔的滨浅海沉积/河口沉积等;⑦在DZQ4孔、QC2孔界面处, $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线(唐保根等^[4], 郑光膺等^[7])发生明显的波动现象。

2.3 最大海泛面或凝缩层

在东海陆架诸钻孔中共识别出3个最大海泛面或凝缩层,它们分别位于上全新统下部、中全新统中部和下全新统上部,其中以第二个凝缩层最典型,它代表东海陆架全新世最高海平面时期,其次是第三个凝缩层,最后是第一个凝缩层,它代表全新统六级层序初次海泛面。总体而言,它们都具有如下识别标志:①沉积相标志,为浅海相沉积,但在不同沉积相带或不同钻孔,岩相略具差异,从外陆架→长江三角洲海域→长江三角洲平原,岩相大致由生物泥质纹层→含生物粉砂泥质薄层→泥质粉砂薄层(如Ch4孔表现为河口-滨岸沉积柱中夹有极薄层—纹层滨浅海相沉积);②生物组合证据,相应层位富含孔虫、介形虫和钙质超微化石,个体保存完整,生物丰度及分异度突然增大;③同位素地层特征,在 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 演化曲域上,相应层位出现 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 正向漂移事件,如DZQ4孔(唐保根)^[6]和QC2孔(郑光膺)^[7];④在孢粉组合上,凝缩层普遍含栲-青刚栎-栎-水龙骨科等的温暖潮湿型孢粉组合^[11];⑤软体动物、温水种浮游相有孔虫丰度明显增大;⑥相应层位中的有机质丰度、氯仿沥青“A”、 S_2 含量剧增,如Ch1孔、Ch2孔等。

2.4 初次海泛面

位于各海侵层或层序底界,代表高分辨率海平面升降旋回的初次海侵产物。由于东海全新世沉积物疏松,初次海侵引起的海底冲刷侵蚀作用通常导致下伏沉积物不同程度的缺

失,使层序界面特征消失殆尽,并造成东海全新世沉积物中周期性出现物理标志不明显的不同级别的沉积间断面,最终导致 I 型层序不整合面与海侵面叠合为一的现象,如第二、三个海侵面。对全新统底部第一个海侵面而言,其与层序不整合面(I型界面)之间呈现局部重合、部分分开的特点,这取决于其沉积古地理背景特征:在相对沉积低地或潟湖区,海侵面和层序界面之间通常出现残积物或砾石层,如 QC5 孔、QC2 孔等;而在沉积高地则缺失相应沉积,使海侵面和层序界面重叠,如 QC2 孔。总的来说,海侵面具有如下识别标志:①沉积相特征,海相沉积超覆于陆相沉积之上,最典型的是全新统底部的初始海侵面,它将上覆滨岸沉积与下伏河流相砾石层分开;②冲刷侵蚀面上通常分布有生物砂—粉砂屑,多见于第二、三个海侵面上,揭示随着海平面上升,先期沉积物底形和水动力状态的平衡遭到破坏,使沉积物表面形态在新的水动力条件下被改造的结果;③海侵面上、下沉积序列的不同,之上为一向上变深变细的海侵序列,其下是向上变粗变浅的海退层序,如 QC1、QC2、QC3 等;④生物组合特征,界面之上通常为高丰度、高分异度的新兴生物群落或组合,界面以下生物单调,数量少;⑤同位素地球化学标志,界面处通常表现为同位素异常事件,即界面以下的负向漂移事件向界面以上的正向漂移事件,如 QC2 孔(杨子赓等)^[5]和 DZQ4 孔(唐保根)^[6];⑥海侵面通常表现为一气候突变面或干冷气候带向湿温气候带的转换面。

3 层序划分及特征

根据层序界面特征、性质及层序内部叠置关系,结合高分辨率生物地层、同位素地层、年代地层、化学地层、气候地层学资料,将东海陆架全新统划分为 3 个高分辨率层序,最大年限为 5ka,最小为 2.5ka,平均为 3.75ka,其中 I 型层序界面 1 个,II 型层序界面 2 个。不同地层区层序划分及特征分述如下。

3.1 长江三角洲平原地层区

现以 QC5 孔柱状剖面为例,探讨长江三角洲平原地层区的层序特征。

层序 1 (Sq1) 相当于下全新统,厚 20~26m

底界面为 I 型 (SB I),界面凹凸不平,之下出现渗滤粉砂和铁质粘土充填,相对年龄值为 10~8ka。

低位体系域 (LST) 分布局限,为冲刷充填河床相砾石层或含砾粗砂或残积相沉积,其形态受层序不整合面底形的控制,厚度 0~5m 不等(图 2)。

海侵体系域 (TST) 由粉砂质泥和泥质粉砂多个沉积韵律构成,厚 5~10m 不等,总体具向上变深序列,常见底栖有孔虫 *Ammonia beccarii*, *Cribronion incertum* 及浮游有孔虫,偶见软体类 *Potamocarbula laevis*,属滨海相为主的沉积。

高位体系域 (HST) 厚 10~14m 不等,由多个泥质粉砂和细砂韵律为主构成,总体具向上变粗变浅趋势。生物主要有浮游有孔虫、底栖有孔虫 *Florilus decorus* 组合、介形虫 *Sinocythere sinensis* 组合和软体类 *Arca subcrenata* 等,以滨海—河口相为主。

层序 2 (Sq2) 相当于中全新统,厚 27~35m。

底界面为 I 型 (SP I),为一冲刷侵蚀面,年龄值约为 7.5ka。

低位体系域 (LST) 缺失。

海侵体系域 (TST) 厚约 15~20m 不等,由 8~10 个细砂—粉砂沉积韵律构成,具明

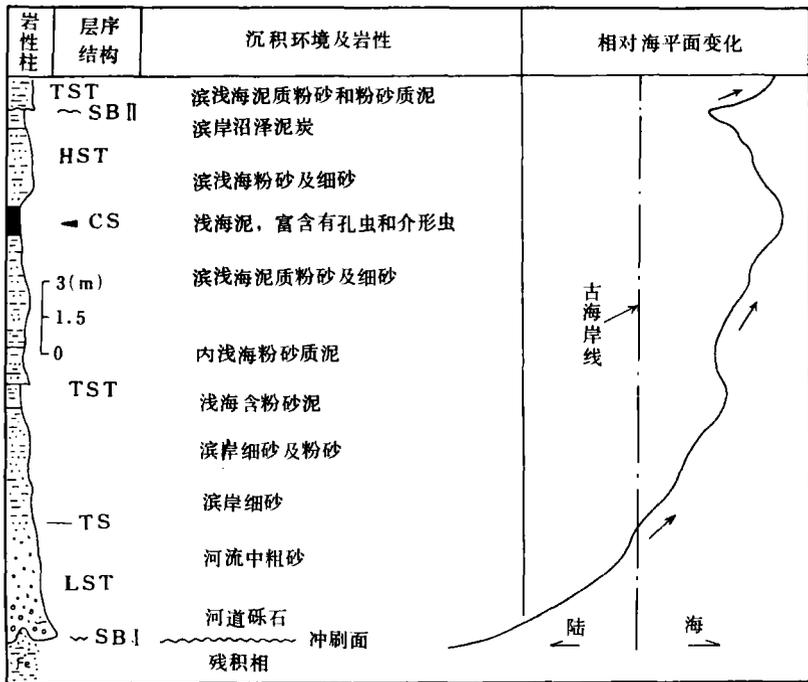


图2 QC5钻孔层序(Sq1)剖面结构

Fig. 2 Sectional architectures of Sq1 in Hole QC5

显的退积序列。以椴、栲、松等孢粉组合为主,向上浮游有孔虫(*Ammonia beccarii-Elphodium magellanicum*组合)、介形虫(如*Sinocythere dongtaiensis*等)及软体类递增。顶为一内浅海粉砂质泥薄层,其中富集浮游有孔虫组合。属滨浅海沉积。

高位体系域(HST)厚约9~14m不等,由滨岸—河口相粉砂、细砂夹泥质粉砂沉积构成,包括5~10个沉积韵律,总体向上变粗变浅,生物丰度及分异度递减。

层序3(Sq3) 相当于上全新统,厚15~22m

底界面属I型,为海侵超覆面,水下冲刷侵蚀标志明显。

低位体系域(LST)缺失。

海侵体系域(TST)厚度为10~17m不等,由滨海、浅海相粘土质粉砂和粉砂质泥构成的沉积韵律组,总体向上变深变细。富含孔虫*Epistominella naraensis-Ammonia multangula*组合,有孔虫、介形虫丰度高,分异度大,常见窄盐性种和半咸水种,个体小,窄盐性底栖类和浮游类有孔虫占优势,表明其广海海侵产物。

高位体系域(HST)的厚度为0~7m,由滨海—河口湾粉砂质泥和泥质粉砂韵律组合构成。多见有孔虫*Epistominella impressa*和*Leptocythere Ventriclivosa*等,软体类有*Terebra* sp. 和陆生种*Stenoyhra* sp. 等。

3.2 长江三角洲海域地层区

现以CJ5孔为例,讨论该地层区层序特征。

层序1(Sq1) 相当于鸡骨组(Q_{1j})地层,厚8~11m

底界面为I型(SBI),冲刷侵蚀面。

低位体系域(LST)厚约0~1cm,由生物贝壳及砾石组成,为底冲刷充填(图3)。

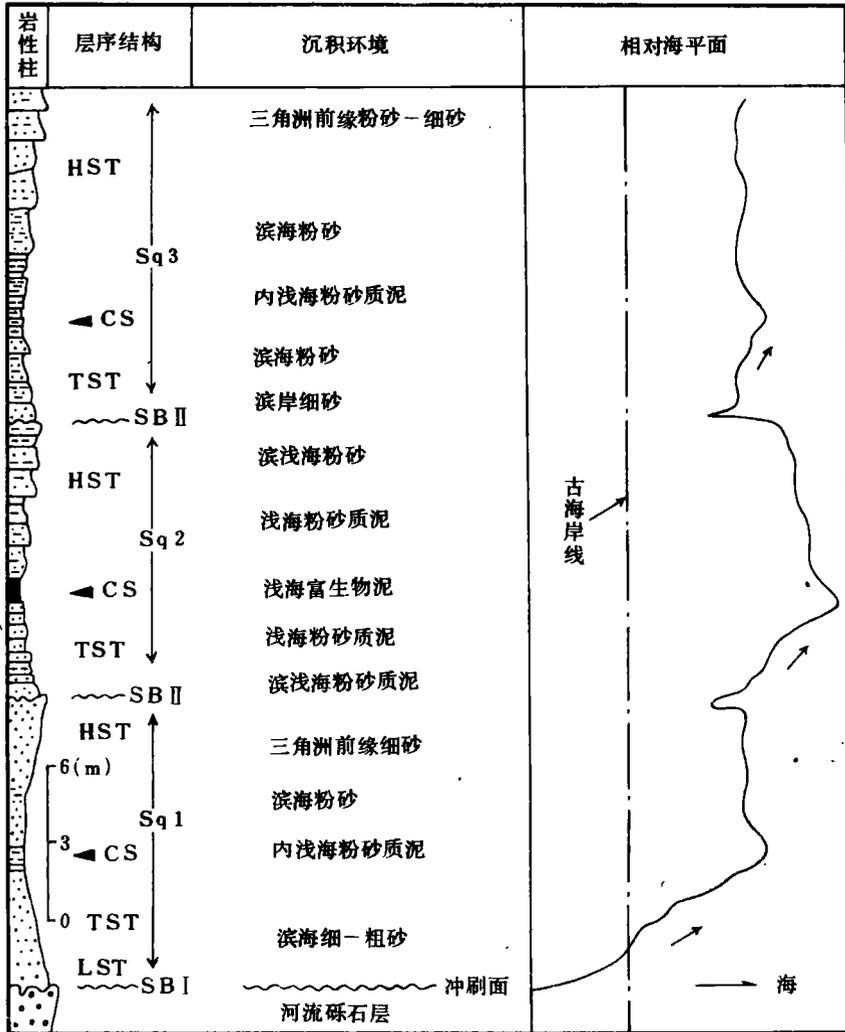


图 3 CJ5 钻孔层序 Sq1~3 剖面结构

Fig. 3 Sectional architectures of Sq1-3 in Hole CJ5

海侵体系域 (TST) 由灰色粉砂质泥和泥质粉砂组成, 共 5~7 个沉积韵律。钙质超微化石: 有孔虫 *Cribronionia incertum*, *Elphiradium magellanicum*, 介形类 *Echinocythereis bradyi* 和 *Cytheriidea sp.* 等发育, 向上泥质沉积增多增厚, 生物分异度增大。厚度 5~7m 不等, 为三角洲前缘浅海沉积。

高位体系域 (HST) 以灰色泥质粉砂沉积为主, 中薄层状, 顶部为褐黄色铁质粉砂夹碳泥质纹层组。与下伏 TST 相比, 生物丰度明显降低, 代表三角洲前缘—平原沉积产物。

层序 2 (Sq2) 相当于大戟山组 (Q²d), 厚 5~14m

底界面为 I 型 (SB I), 水下冲刷侵蚀面。

低位体系域 (LST) 缺失。

海侵体系域 (TST) 厚 5~8m 不等, 灰色泥质粉砂和粉砂质泥构成的 4~6 个沉积韵律, 总体向上泥质增多, 粉砂递减。有孔虫优势种为 *Bulimina marginata*, *Neoglobogadrina*

pachyderma 等, 含量较高的种为 *Epistominella naraensis*, *Hopkinsina* sp. 等; 介形类以 *Sinocytheridea impressa* 为主, 次为 *Echinocytheresis* sp., 偶见 *Munseyella* sp. 和 *Cythero-
peron* sp. 等, 指示水深 20~50m 的浅海环境产物。

高位体系域 (HST) 厚 2~5m 不等, 以碳泥质粉砂为主, 顶为褐黄色铁质粉砂沉积。生物丰度及分异度锐减, 代表短期低幅海平面下降产物。

层序 3 (Sq3) 相当于嵎泗组 (Q₃c), 厚 10~16m。

底界面为 I 型 (SB I), 暴露面。

低位体系域 (LST) 缺失。

海侵体系域 (TST) 由灰色粘土质粉砂和粉砂质粘土构成 3~5 个沉积韵律, 具向上变深序列。生物以滨浅海环境的有孔虫、介形类组合为主。顶部为富生物泥质薄层, 有机质含量高, 呈灰黑色纹层组, 水平层理发育。

高位体系域 (HST) 厚 5~7m, 褐灰、黄色粘土质粉砂沉积, 向上粉砂变粗, 含量递增, 发育虫孔, 常见透镜状粉砂, 底为薄层状贝壳碎片, 富三角洲前缘—三角洲平原有孔虫及介形类组合。

3.3 东海外陆架地层区

以 DZQ4 孔为例描述该地层区层序特征 (图 4)。该区全新世沉积薄, 通常 0~2.7m 不等, QZ504 厚仅 0~8cm。层序界面特征不明显, 仅依据岩相变化和生物组合进行初步的层序划分。总体而言, 该区诸层序特征变化不大, 主要有如下特点: ① 缺失 LST; ② TST 主要由灰绿色富生物细砂和粘土质构成, 向上变细, 含贝壳碎片, 见大个体有孔虫壳体, 有孔虫及介形类含量丰富, 如有孔虫 *Ammonia* sp., *Bolivina* sp., *Bluimina* sp. 等, 介形类 *Hirsutocythere* sp. *Cytheropteron* sp. 等, 代表正常浅海产物; ③ HST 由灰色细砂构成, 顶部见 5~10mm 的泥砾, 有孔虫 *Ammonia beccarii*, *Elphidium* 等, 介形类主要种为 *Aurila* sp., *Bicornucythere* sp. 等, 代表以内浅海为主的沉积产物。

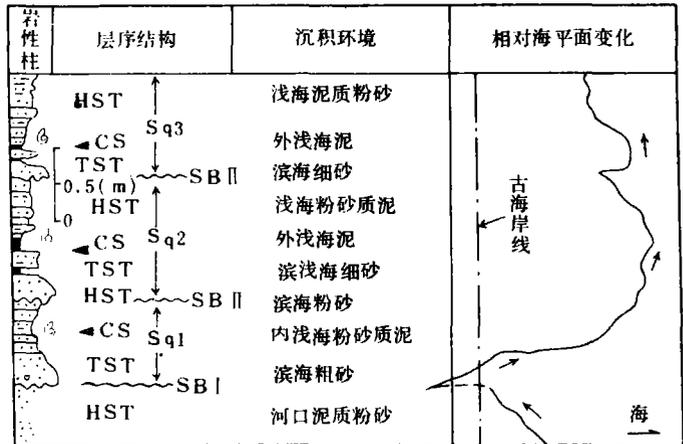


图 4 DZQ4 钻孔层序 1~3 (Sq1~3) 剖面结构
Fig. 4 Sectional architectures of Sq1-3 in Hole DZQ4

成, 向上变细, 含贝壳碎片, 见大个体有孔虫壳体, 有孔虫及介形类含量丰富, 如有孔虫 *Ammonia* sp., *Bolivina* sp., *Bluimina* sp. 等, 介形类 *Hirsutocythere* sp. *Cytheropteron* sp. 等, 代表正常浅海产物; ③ HST 由灰色细砂构成, 顶部见 5~10mm 的泥砾, 有孔虫 *Ammonia beccarii*, *Elphidium* 等, 介形类主要种为 *Aurila* sp., *Bicornucythere* sp. 等, 代表以内浅海为主的沉积产物。

4 层序区域对比

作为建立在岩石地层、年代地层和生物地层学等多重地层学基础上的综合动态学科, 层序地层学在年轻地层划分和对比中具有重要意义。根据层序关键界面、层序内部叠置关系, 辅以生物、磁性、岩石、同位素地层学资料, 东海陆架全新统诸层序在不同地层区、不同钻孔之间均可进行追踪和对比 (图 5)。其主要依据有:

(1) 层序不整合面 作为以海平面下降为主造成的等时地层界面, 是进行全新统层序

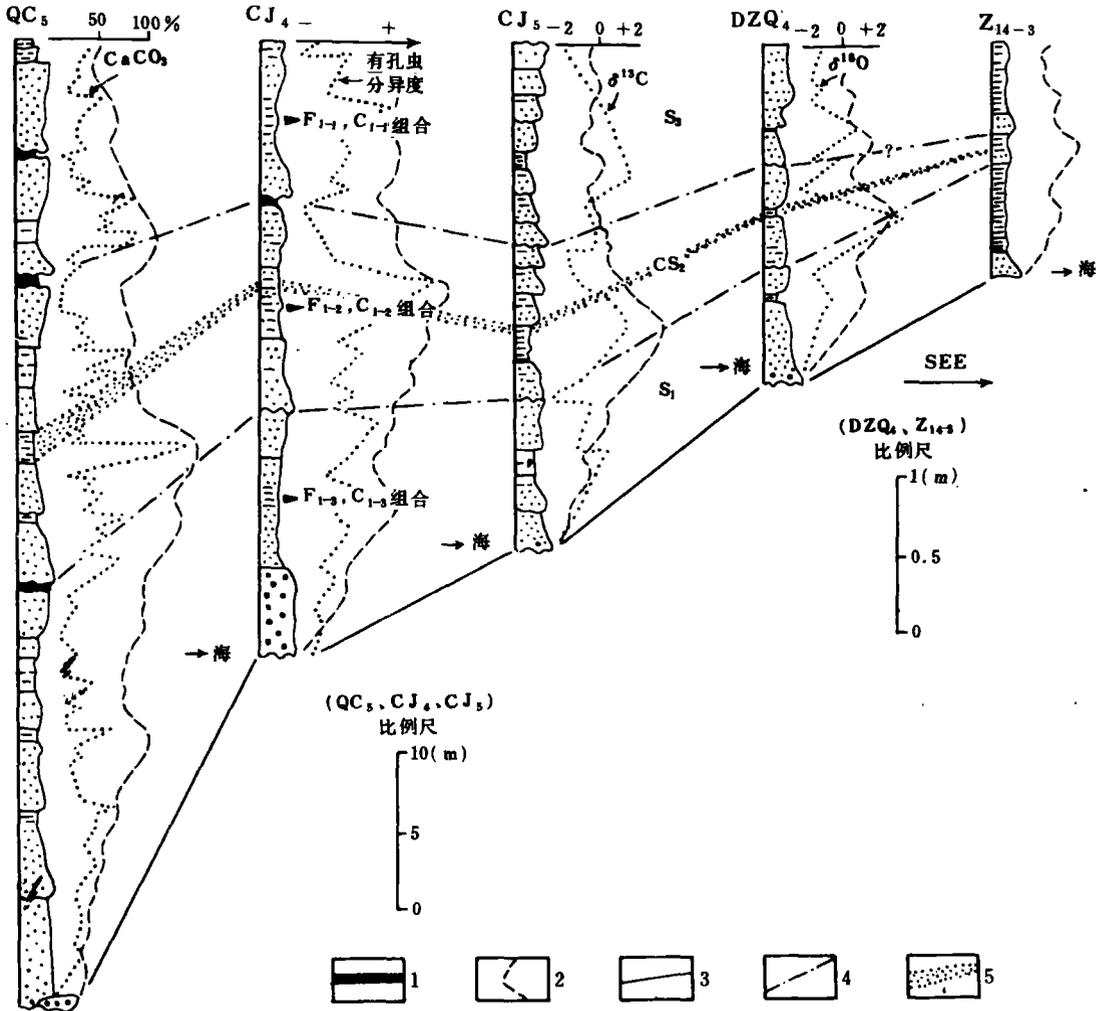


图5 东海陆架典型钻孔层序对比图

1. 泥炭; 2. 海平面曲线; 3. I型界面; 4. I型界面; 5. 凝缩层。(其它图例见图6)

F₁₋₁. *Ammonia Ketiensiensis-Astrononion tasmanensis* 组合; F₁₋₂. *Elphidium magellanicum* 组合;

F₁₋₃. *Ammonia beccarii* 组合; C₁₋₁. *Munseyella japonice-Amphileberis gibbera* 组合;

C₁₋₂. *Neomonocralina chenaе* 组合; C₁₋₃. *Sinocytheridea impressa* 组合

Fig. 5 The sequence correlation of the typical holes on the East China Sea shelf

1=peat; 2=sea-level curve; 3=type I boundary; 4=type I boundary; 5=condensed section

划分和对比的基础。首先是 I 型界面 (SB I)，其识别标志明显，在诸钻孔中均可见及，是确定全新统底界或建立全新世沉积层序总框架的关键。其次是 II 型层序界面 (SB II)，它们通常表现为区域性冲刷侵蚀面，或岩泥质层或铁质粘土层等。它们在各钻孔柱状剖面中均可识别。显然，在 SB I 为底界的全新统总框架内，通过两个 SB I 界面，可将东海陆架全新统划分为 3 个在区域上可进行对比的层序，即 3 个等时的成因地层单元。

(2) 最大海泛面或凝缩层 最大海泛面或相当凝缩层作为最高海平面期的产物，不仅预示着其在区域范围内分布的广泛性、等时性、可对比性，而且富含有关海生物组合。显

然,最大海泛面(或凝缩层)是重要的层序对比标志。在东海陆架诸钻孔中,特征最明显的凝缩层是CS₂(图5),从长江三角洲平原→三角洲海域→东海外陆架,分别表现为陆相—过渡相中富海生物的滨浅海泥质粉砂薄层→滨海沉积中富含浮游生物组合的泥质纹层。此外,分别是CS₃、CS₁,其在层序对比中的作用仅次于CS₂。

(3)层序内部构型 层序中由层序界面和最大海泛面所分割出的LST、TST和HST,是重要的层序对比依据。就层序Sq1而言,其底部的LST陆相砾石沉积或残积相,在诸钻孔中均可见及,显然是层序对比的重要依据。对于TST,由于它是海平面相对快速上升产物,不但富含各种新兴生物组合,生物丰度及分异度明显增大,而且具有向上变深变细的退积序列,无疑可作为层序对比的直接标志,如层序Sq2下部的TST,以具退积型式的陆架浅海粉砂泥质和泥质沉积为主,其中富含大量有孔虫、介形虫新种,且生物丰度及分异度明显增大,这些在东海陆架诸钻孔中都能见到。HST作为海平面相对下降产物,其向上变粗变浅的加积-进积型层序构型亦是有利的层序对比依据,如层序Sq1、Sq3上部的HST滨岸-河口沉积,几乎在各钻孔中均能见到。

(4)孢粉组合-气候地层序列 通过东海陆架诸钻孔剖面孢粉组合及气候序列的研究证实,在长江三角洲平原及其海域中,全新世沉积普遍经历了4个古植被和古气候演化序列^[6],即初期温凉较干气候——以栎、松、桦为主的针阔叶混交林;早期的湿热潮湿气候——含较多常绿成分的落叶阔叶、常绿阔叶混交林;中期的温暖略湿气候——以松栎为主的针阔叶混交林;晚期的温暖湿润气候——以栎、松为主的针阔叶混交林。这些气候波动事件或孢粉序列不仅与渤海、黄海地区钻孔资料相符合,而且与北欧的布列-色尔南德尔气候期相对应^[12~19];北方期——温干,大西洋期——暖温,亚北方期——热干,亚大西洋期——温湿。显然,通过孢粉组合或气候事件可进行大区域大尺度的层序框架的对比。

(5)同位素地层学 研究业已证实, $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值的大小及变化与海平面升降旋回密切相关。LST具有低的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值;TST期随着海平面不断上升, $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值逐渐增大,并在CS处达最大值;HST期随着海平面缓慢下降, $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 值逐渐降低。显然,根据 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 值大小、演化曲线形态、结构特征及变化趋势,可间接地进行层序识别、划分和对比。综观DZQ4孔和QC2孔 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 变化曲线,它们总体具有如下特点:①在层序界面处出现 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 突变事件,如界面SB I附近 $\delta^{18}\text{O}$ 负向→正向漂移事件(DZQ4孔)、 $\delta^{13}\text{C}$ 负向→正向漂移事件(DZQ4孔),或 $\delta^{18}\text{O}$ 的负向→正向漂移事件(图5);②在凝缩层处 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 值明显增大,如DZQ4孔中,层序Sq1的CS $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 值高达1.95‰, $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值达1.90‰,而相应层序的QC2孔中, $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 值为-0.25‰,超过背景值1‰~2‰;③ $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 值在全新世沉积物中具有向上增大趋势,如QC2孔的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 值向上递增,从底部平均-2.56‰→顶部的0.75‰。

(6)生物组合 生物带或组合配合其丰度、分异度是进行大尺度层序划分和对比的重要保证,在全新世层序划分和对比中,其意义尤其重大。研究区层序1(Sq1)中普遍含有孔虫F₁₋₁组合以及介形类C₁₋₁组合,Sq2则富含孔虫F₁₋₂组合和介形类C₁₋₂组合,Sq3常见孔虫F₁₋₃组合和介形类C₁₋₃组合(图5)。显然,根据有孔虫、介形虫组合,结合分异度、优势度、生态等资料,是进行层序划分和对比的重要依据。

(7)其它标志 包括磁性地层、化学地层、¹⁴C测年等资料,如根据极性事件^[20]、极性漂移^[21、22]、磁倾角或磁化强度^[23~26]、磁不溶残余物和CaCO₃含量的纵向变化曲线(图5),

可间接地将东海陆架诸钻孔中的全新统划分为可对比的 3 个高分辨率层序。

5 层序成因格架

在层序划分、特征及对比基础上，作出东海陆架全新世层序地层格架(图 6)。从图中可以看出：①全新统可视为一个 6 级(1~10ka) 高分辨率层；底为 I 型界面。LST 相当于 0~10cm 不等的砾石沉积或相当沉积物。TST 对应于全新统中下部，表现为由河口—滨岸—内陆架—陆架浅海沉积构成的向上变深的退积序列。之上是略具向上变浅的上全新统内浅海—三角洲沉积，即 HST；②在所划分出的更高级别的三个层序中，彼此间均存在 1 至数千年的沉积间断，间断的时间长短由沉积基底地形决定，但总体具有向陆、向上间断时

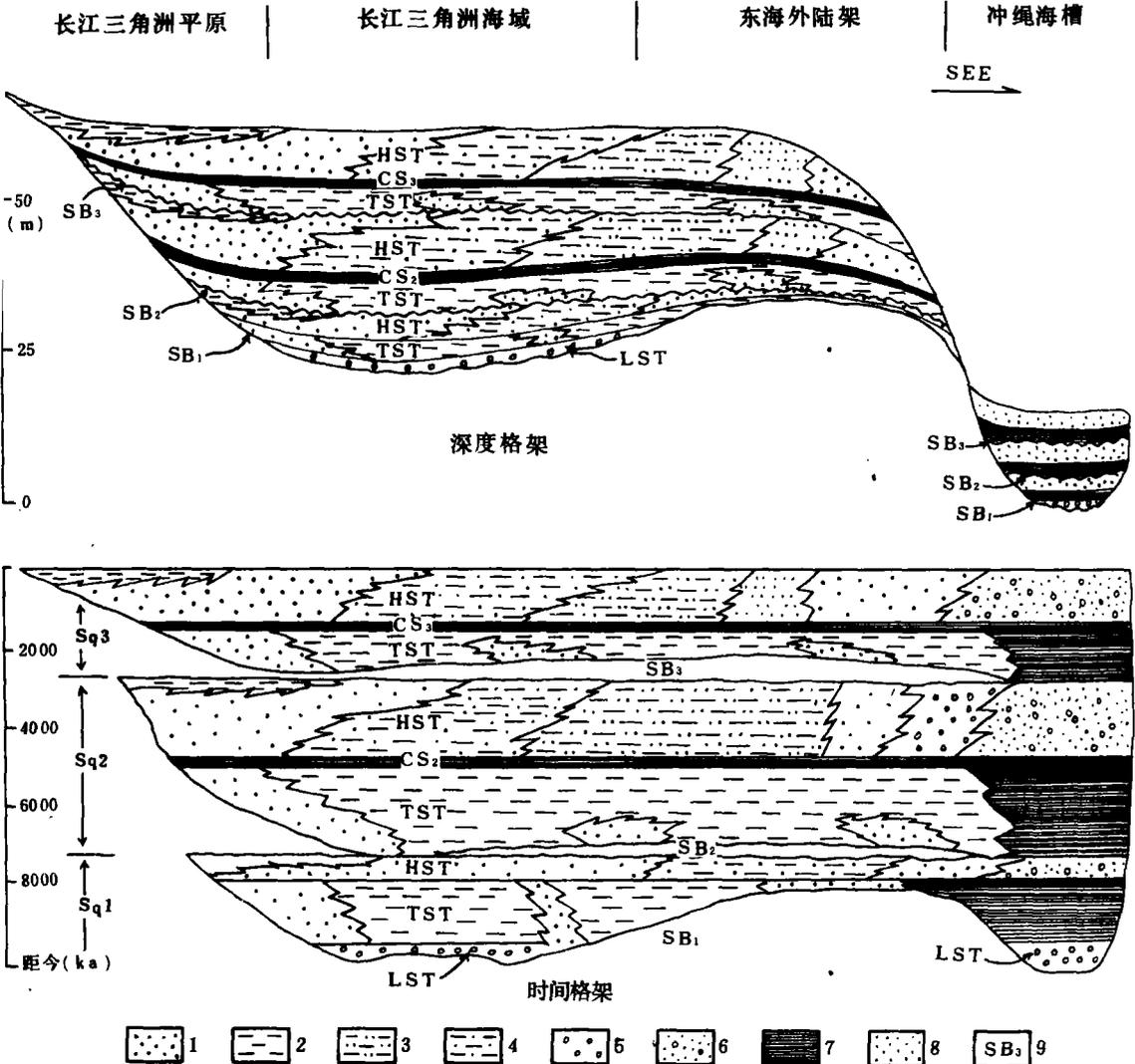


图 6 东海陆架全新世层序地层格架

1. 粗砂; 2. 泥; 3. 泥质粉砂; 4. 粉砂泥; 5. 砾石; 6. 浊流; 7. 软泥; 8. 细中砂; 9. 层序界面编号
 Fig. 6 The sequence stratigraphic framework of the Holocene strata on the East China Sea shelf
 1=coarse sand; 2=mud; 3=muddy silt; 4=silty mud; 5=gravel; 6=turbidity current; 7=ooze; 8=fine and moderate sand; 9=sequence boundary number

间变短的趋势;③所划分出的高分辨率层序具有与普通层序相同的内部构型和成因格架;④不同沉积背景,层序内部构型略具差异,长江三角洲平原地区层序主要由HST和TST上部构成,通常缺失LST和TST下部。三角洲海域—外陆架层序由HST、TST构成,缺失LST。而冲绳海槽层序发育完善,保存完整,由LST、TST、HST构成;⑤全新世层序总体具向陆超覆趋势,越早期层序,分布愈有限,岩相空间变化大。而晚期层序分布广泛且稳定,岩相变化较小。

6 海平面变化

由于更新世末,最后一次冰期气候的结束和全新世冰消期气候的开始,致使全球海平面上升和东海陆架的海侵事件。在高分辨率层序地层学研究成果基础上,结合前人研究成果^[1~11],作出了东海陆架全新世半定量海平面变化曲线(图7)。从图中可看出:①最低海平面位于更新世末期,即为玉木冰期最繁盛时期,当时东海海面要低于现今平均海面130m附近(秦蕴珊等,1987)^[1];②最高海平面时期为距今6~5ka期间,当时海面约高于现今海面2~4m,即时海水可到达太湖地区以及杭嘉湖、肖绍、温瑞等平原,侵入各基岩岸段的

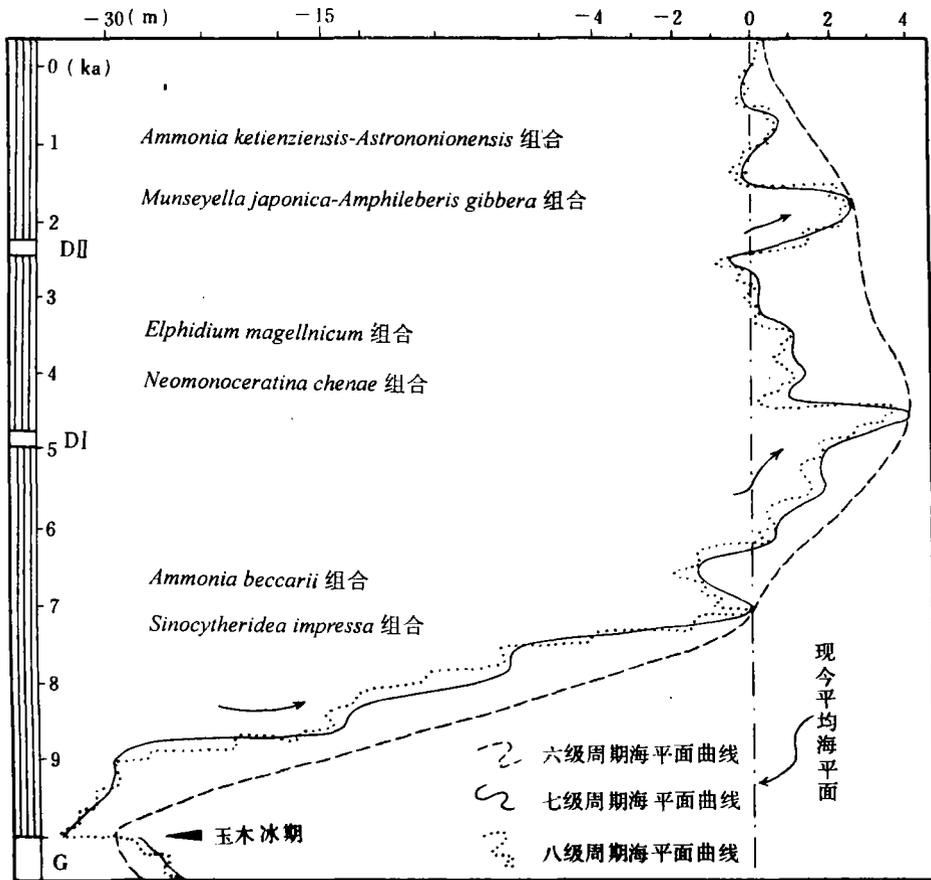


图7 东海陆架全新世海平面变化曲线

Fig. 7 The sea-level curves for the East China Sea shelf during the Holocene

港湾和河口地段；③全新世海平面变化可视周期为 1~10ka 的六级海平面升降旋回，从距今 10~5.5ka 为全新世主体海平面相对快速上升时期，幅度从约距今 10ka 的 -130m 到距今 5.5ka 的 +4m。距今 5.5~0ka 期间为海平面主体缓慢下降时期，其幅度为 4~2m；④在与 3 个七级 (0.1~1ka) 高分辨率层序对应的海平面升降旋回中，第一旋回持续时间从距今 10~7.5ka，TST 从距今 10~7.8ka，HST 从距今 7.8~7.5ka，代表长期主体海平面上升过程中短期海平面静止或低幅下降产物，具明显的不对称特点。第二旋回从距今 7.5~2.5ka，其中 TST 从距今 7.5~5.5ka，HST 从距今 5.5~2.5ka，呈现海平面中高幅上升和中低幅缓慢下超趋势，略具对称性。第三旋回从距今 2.5~0ka，TST 从距今 2.5~1.8ka，而 HST 从距今 1.8~0ka，反映主体海平面缓慢下降过程中的海侵事件，具不对称性；⑤在全新世三次高频海平面升降旋回中，通常叠加有更次一级周期海平面波动 (图 7)，这与地球旋回谱系中的太阳带或历法带密切相关；⑥从全新世半定量海平面变化规律和演化趋势，可以推测在未来的一定时期中海陆架海平面将呈波浪式上升，但上升的幅度并不大。

7 层序成因模式

在上述层序特征、对比、层序地层格架及海平面变化研究成果基础上，作出了东海陆架全新世层序成因模式 (图 8)。从图中可看出：

(1) 前全新世构造古地理控制着东海陆架的沉积模式，层序的发育受沉积古地理、物源供给 (包括古代河流和现代河流)、构造沉降、海平面变化、古气候等综合控制。

(2) 每一层序的发育大致经历了低水位期河流冲刷侵蚀、海侵期海水淹没改造和沉积盆地的构制、高水位期沉积充填 3 个阶段，不同时期其主控因素各异。

(3) 在层序发育的不同时期，层序发育的控制因素不同，因而造成不同的层序内部构型及成因格架 (图 8)。

在低水位时期 (相当于玉木冰期)，海平面下降速率超过陆架沉降速率，并位于坡折带 (即冲绳海槽与东海陆架转折处) 以下附近，陆架广泛暴露地表，遭受风化剥蚀，古海岸向海推进，造成 I 型界面。与此同时，古长江携带大量沉积物越过并切割古陆架，并在古陆架上发育古河道 (三角洲)，其中较细粒碎屑物质 (如粉砂、细砂) 越过陆架以浊流方式充填在冲绳海槽中，而较粗碎屑物质 (如砾和粗砂) 则以古河道充填、海岸残留物或古三角洲残积的方式分散分布于东海古陆架上，如河流进积复合砂体、冲积扇砂体等。

在陆棚边缘期 (约距今 7.5ka 和 2.5ka)，由于海平面下降速率通常小于陆架构造沉降速率，使海平面在中、外陆架之间波动，导致长江三角洲平原及海域 (中内陆架) 暴露地表，而外陆架及冲绳海槽仍被海水淹没。在此背景条件下，长江三角洲平原及其海域部分以风化剥蚀及其相关的古河道充填和古海岸残积作用为主，外陆架以发育滨面浪控三角洲沉积作用为主，而冲绳海槽则以陆屑浊积作用为主，但规模稍小于低水位期。

在海侵期 (约距今 10~7ka, 7~4.5ka 和 2.5~1.8ka)，随着海平面相对快速上升，淹没了整个东海陆架，海岸不断向陆超覆，此时由于海流、海浪、波浪、潮汐及河流等的影响，在陆架上发育各种成因砂体，如改造再沉积的“残积型”残脊、海滩砂、潮控三角洲砂、潮流砂脊、潮道砂、滨岸带状砂等 (图 8)。此期的冲绳海槽因水深大，以富远洋生物的半远洋软泥、凝灰质软泥沉积为主，如 Z14-3 孔。

在高水位期 (约距今 7.5~7ka, 4.5~2.5ka 和 1.8~0ka)，由于海平面及构造相对稳

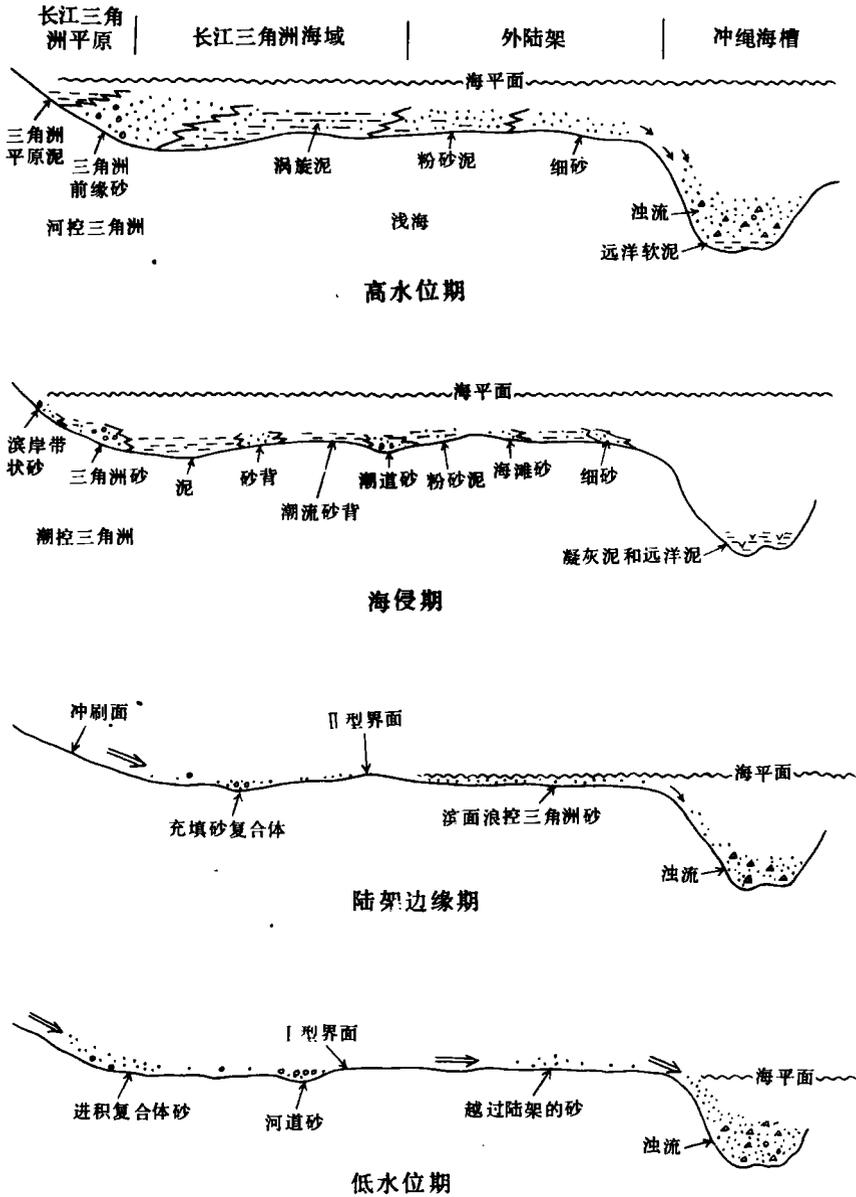


图8 东海陆架全新统层序发育模式

Fig. 8 Model for the sequence development on the East China Sea shelf during the Holocene

定, 长江携带的大量碎屑物质在河口营建堆积, 允许陆架盆地的沉积充填作用。该期的成因相主要有河控三角洲、浪控三角洲、潟湖、潮坪及涡旋泥质沉积等。它们不断向海进积, 沉积厚度大。同期的冲绳海槽以浊流和半远洋软泥质沉积为主。

8 结论

(1) 东海陆架全新统至少可划分为 3 个七级 (1~3ka) 高频层序和若干个更次级 (0.1

~1ka) 的超高频层序, 代表至少 3 次相应周期的相对海平面变化中叠加有更次级周期海平面波动的产物, 其动因与地球旋回谱系中的太阳带有关。

(2) 在每一高分辨率层序成因格架中, 不同沉积背景层序内部构型各异。在东海陆架上, 层序格架主要由 HST 和 TST 构成, 大多缺失 LST。而在冲绳海槽中, 保存有完整的层序地层格架, 由连续的 LST、TST、HST 构成, 能客观地反映东海陆架盆地的发展史。

(3) 在东海陆架全新世沉积演化过程中, 长江等河流至少有 3 次越过东海陆架并进入冲绳海槽, 而向东海陆架推进但未进入冲绳海槽的有若干次 (亦即东海陆架曾经完全暴露至少 3 次, 而不完全暴露的有若干次)。

(4) 东海陆架中的砂体具有多阶段、多成因、多来源的特点。既有低水位期的河流沉积复合砂体、冲积扇及河道充填砂, 又有海侵期的改造再沉积“残积型”砂脊、海滩砂、潮控三角洲砂、潮汐砂、潮道砂、滨岸带状砂等, 以及高水位期的河控-浪控三角洲砂体等。

参 考 文 献

- 1 秦蕴珊等. 东海地质. 北京: 科学出版社, 1987
- 2 汪品先等. 中国东部第四纪海面升降海侵海退与岸线变迁. 海洋地质与第四纪地质, 1985 (4), P. 59~80
- 3 杨子庚等. 中国近海及沿海地区第四纪进程与事件. 北京: 海洋出版社, 1989
- 4 唐保根等. 东海西部晚更新世晚期以来地层特征的初步研究. 上海地质, 1992 (3), P26~34
- 5 杨子庚等. 中国第四纪地层与国际对比. 北京: 地质出版社, 1996
- 6 唐保根. 东海陆架第四纪地层. 杨子庚等主编. 中国第四纪地层与国际对比. 北京: 地质出版社, 1996
- 7 郑光庸等. 黄海第四纪地质. 北京: 科学出版社, 1991
- 8 黄慧玲等. 全新世长江水下三角洲浅层物探资料的地质意义. 海洋地质与第四纪地质, 1985 (4), P. 81~94
- 9 章永昌等. 东海陆架全新统底界及沉积层序, 地层学杂志, 1986 (1), P. 24~33
- 10 Kukla G J. Climatic stratigraphy. Special Proceedings Reports, XIII International Congress INQUA, Beijing, 1991, 128-129
- 11 Sibrava V. Quaternary sequences in Southeast Asia and their regional significance. Quaternary Stratigraphy of Asia and the Pacific, IGCP 296, Escap Atlas of Stratigraphy XII, United Nation, New York, 1993, 1-29
- 12 Bloom A L et al. Quaternary sea level fluctuations on a tectonic coast. Quaternary Resources, 1974, 87 (4): 185-205
- 13 Blum P. Holocene sediment dispersal systems and effects of structural controls and sea-level rise from acoustic facies analysis. Marine Geology, 1992, 108 (4): 297-324
- 14 Boyd R. Sequence stratigraphy of the Mississippi delta. Trans. Gulf Coast Assoc. Geol. Soc. 1989, 39 (4): 331-340
- 15 Boyd R. Relations of sequence stratigraphy to modern sedimentary environments. Geology, 1989, 17 (6): 926-929
- 16 Clark J. Global changes in post-glacial sea-level; a numerical calculation. Quaternary Resources, 1978, 9 (3): 265-287
- 17 Kayanne H. Paleo-mean sea level and its 14^C age of Holocene highstand on Iwase River. Bull. Geol. Surv. Japan, 1991, 42 (2): 125-129
- 18 Kidson C. Sea level changes in the Holocene. Quaternary Resources, 1982, 7 (1): 121-151
- 19 Kraft J C. The transgressive barrier-lagoon coast of Delaware; morphostratigraphy, sedimentary sequence and re-

- ponse to relative sea-level rise. *SEPM Special Publication*, 1987, (41): 129—143
- 20 Leatherman S P. Beach and shoreface response to sea-level rise, Ocean City, Maryland, U. S. A. *Prog. Oceanogr.*, 1987, 18 (2): 139—149
- 21 Maeda Y. Palaeoenvironmental changes during the Holocene on the coastal area along the Sea of Okhotsk, Hokkaido. *Preservation and Natural Science*. 1994, 17 (4): 430—440
- 22 Maeda Y. Crustal tilting derived from Holocene sea-level observation along the east coast of Japan. *Geophys. Res. Lett.*, 1997, 19 (5): 857—860
- 23 Matsumoto H. Sea-level changes during Holocene and geomorphic development of the Sendai coastal plain in Japan. *Geogr. Rev. Japan*, 1981, 54 (1): 71—85
- 24 Matsumoto H. Holocene relative sea-level changes in the Tama and Tsurumi River lowlands. *The Geol. Stud.*, 1987, 7 (2): 125—132
- 25 Moriwaki H. Problem concerning Holocene sea-level changes. *Geogr. Rept. Tokyo Metro Univ.*, 1988, 13 (1): 49—64
- 26 Okamura Y. Sequence stratigraphy of the Quaternary stacked prograding wedges off southwestern Japan. *Int. Assoc. Sed. Spec. Pub.*, 1993, 57—62

High-resolution sequence stratigraphy of the Holocene strata on the East China Sea shelf

Qin Jianxiong

Postdoctoral Research Centre, Qingdao University of Oceanology

Yang Zuosheng

Institute of Geosciences, Qingdao University of Oceanology

Liang Wei

Nanhai Eastern Petroleum Corporation, China National Offshore Oil Corporation

Zeng Fangang

Institute of Resources and Environments, Beijing University

ABSTRACT

The high-resolution sequence stratigraphic division and correlation of the Holocene strata on the East China Sea shelf are made on the sequence stratigraphic theory and ^{14}C dating, litho-, bio-, chemo-, isotopic-, weather-, and magneto-stratigraphy, in conjunction with sedimentological analysis of typical boreholes in different sedimentary settings, resulting in the construction of the sequence stratigraphic framework and sea-level curves and associated sequence stratigraphic model. The Holocene strata on the East China Sea shelf, which correspond to a sixth-order (1–10ka) sequence, may be divided into three seventh-order (0.1–1 ka) sequences and many lower-order sequences, representing one sixth-order or three seventh-order cycles of relative sea-level changes influenced by lower-order sea-level fluctuations. The seventh-order sequences exhibit internal architectures and genetic framework similar to those of third-order sequences. During the sedimentary evolution of the East China Sea shelf in the Holocene, the Yangtze River (delta) once extended at least for three times through the East China Sea shelf into the Okinawa Trough, and brought about three beds of transgressive reworked “eluvial sand” sediments. During the Holocene, the maximum sea level in the East China Sea occurred between 6 and 5 ka B. P., 2 to 4 m higher than the present-day sea level; the minimum sea level appeared about 10 ka B. P., 130 m lower than the present-day sea-level. Moreover the sea level is still rising with a small margin because of the “greenhouse” effects. The fact is that sequence stratigraphy has contribute a lot to the refinement of oceanic sedimentology and better resolution of unresolved problems in oceanic sedimentology.

Key words: high-resolution sequence stratigraphy, solar zone, sequence stratigraphic framework, sea-level change, sequence generation model, Holocene, the East China Sea shelf