

文章编号:1000-0550(2017)02-0299-16

doi: 10.14027/j.cnki.cjxb.2017.02.009

西湖凹陷渐新世层序地层格架与沉积充填响应

于兴河¹,李顺利²,曹冰³,侯国伟³,王亚凤¹,皇甫志远¹

1.中国地质大学(北京)能源学院,北京 100083

2.中国石油大学(北京)地球科学学院,北京 102249

3.中海油上海分公司勘探开发研究院,上海 200032

摘要 东海陆架盆地是中国近海最大的沉积盆地,而西湖凹陷又是其中规模最大的富油气凹陷。多年的勘探实践证明渐新统花港组为西湖凹陷主力产气层段,但其层序地层划分长期存在较大争议。在分析了西湖凹陷盆地结构与构造格局的基础上,依据测井、岩芯以及地震反射特征,将西湖凹陷渐新统划分出5个三级层序与12个体系域,建立了其等时地层格架;并通过大量岩芯的写实性描述,结合沉积构造与遗迹化石鉴别以及地球化学资料分析对沉积环境进行了判识,分析结果认为西湖凹陷渐新统花港组沉积时期发生过两次较大的海侵事件,形成“南海北陆”的沉积格局,并发育了河流、三角洲、潮控河口湾以及无障壁海岸四种沉积体系,其沉积体系类型较多,从南到北变化巨大。西湖凹陷渐新世整体表现为“东西短轴三角洲”、“南部潮汐河口湾”、“东北缓岸滩坝”的沉积体系展布格局。系统分析了沉积相在各层序中的展布特征及其对海平面变化的响应、层序演化过程及其对海平面变化的响应,构建了东海陆架盆地西湖凹陷构造—沉积成因模式,明确了“断拗转换,海陆交替”的盆地构造背景与沉积充填的响应关系。

关键词 西湖凹陷;花港组;层序划分;沉积响应

第一作者简介 于兴河,男,1958年出生,教授,沉积学与石油地质学,E-mail:billyu@cugb.edu.cn

中图分类号 P618.13 **文献标识码** A

西湖凹陷是东海陆架盆地最大的古近系含油气盆地,具有较好的油气地质条件,是该盆地内具有较大勘探潜力的地区^[1],也是我国近海天然气重点勘探区域之一^[2-6]。随着地质资料的不断丰富和勘探工作的逐渐深入,人们对西湖凹陷渐新统层序划分和沉积环境的认识产生了较大的分歧,主要表现在巨厚的渐新统花港组(最大厚度超过2 500 m)划分为两个三级层序是否合适?通常来说,新生代三级层序的时间跨度为0.5~3 Ma^[7-9],而现有的花港组划分方案过粗,显然超出了该范围,为简单的岩性地层划分,无法反映层序格架对沉积环境变迁的响应特征,更不利于对其沉积演化规律与油气勘探的深入研究。另外,渐新世到底为局限海环境还是陆相淡水湖泊环境,有无海侵事件发生,沉积体系类型为河流、三角洲还是滨岸滩坝,前人观点较多,但演化规律不明。众所周知,数万平方公里的凹陷只发育一种沉积体系的认识本身就存在明显的偏颇,关键是不同沉积体系的发育与展布特征及其演化规律则是当前亟待解决并明确的

核心。

目前,前人对西湖凹陷花港组的沉积类型主要存在以下几种认识:武法东通过对海绿石的研究,认为西湖凹陷花港组总体为不同程度受到海水或咸水—半咸水影响的滨岸湖泊三角洲—河流环境^[10];陈琳琳与谢月芳通过岩石学特征、古生物及微量元素等研究提出西湖凹陷整体为遭受海侵的陆相湖盆,发育有冲积扇、河流及湖泊沉积体系^[11];沉积相的研究争议比较明显;王果寿等^[12]认为渐新统花港组以陆相沉积为主,发育近岸湖泊沉积与河流沉积体系,其中花下段为海侵湖相;孙思敏等^[13]认为西湖凹陷花港组为一套辫状河与曲流河交互的陆相沉积体系;胡明毅等^[14]认为凹陷西部缓坡带为正常河流和三角洲沉积,东部陡坡带为扇三角洲与湖泊沉积体系;张绍亮等^[15]认为花港组下段发育曲流河扇、辫状河扇、曲流河三角洲及辫状河三角洲四种相类型。由此可见,关于花港组的沉积相认识众说纷纭,受勘探程度与地质资料分布限制、主要证据(直接)与次要证据(间接)

收稿日期: 2016-07-18; **收修改稿日期**: 2016-12-02

基金项目: 国家科技重大专项项目(2011ZX05023-001-009); 中国博士后科学基金项目(2015M581269); 国家自然科学基金项目(41572080) [Foundation: National Science and Technology Major Project, No. 2011ZX05023-001-009; China Postdoctoral Science Foundation, No. 2015M581269; National Natural Science Foundation of China, No. 41572080]

权衡等问题,本研究从直接证据出发,对西湖凹陷的沉积特征进行重新厘定。

1 区域地质概况

东海陆架盆地位于亚洲板块东南缘,以新生代沉积为主,长约1400 km,总面积为26.7 km²。西湖凹陷位于东海陆架盆地东部坳陷带,西侧以海礁隆起、鱼山凸起为界,东部以钓鱼岛隆褶带为界,南部以钓北凹陷为界,北部与长江凹陷、虎皮礁凸起毗邻,面积约为4.6×10⁴ km²,西湖凹陷的构造单元可进一步划分为西部斜坡带、西部次凹、中央反转带、东部次凹及东部断阶带。西湖凹陷具有复杂的盆地结构与构造样式,其中一个重要表现就是反转构造样式复杂,且分布于盆地各个构造区带,整体上具东西分带和南北分块的格局。凹陷西斜坡发育的构造主要有断阶、地堑及地垒;中央凹陷带主要以复合“Y”字型、花状断裂及羽状断裂组合,东部断裂带以发育“Y”字型断裂及梳状、羽状组合特征(图1),这些断裂形成了油气的主要运移通道或者构造圈闭^[17-19]。

古近系是西湖凹陷重要的地层单元,也是烃源岩较发育的层位。其中花港组发育于渐新世,是在渐新世早期玉泉运动的基础上沉积形成的^[4,11]。花港组岩性由下粗上细的两个旋回组成,因而前人根据岩性、测井、地震资料将其划分为上、下两段^[13,20-22];下段为深灰色泥岩与灰白色中—细砂岩互层,上段为深

灰色泥岩与浅灰色砂岩互层,夹少量煤线。花港组厚度在1000~2000 m之间,花上段厚度总体上大于花下段厚度。其中花上段在东部断阶区中部达到最厚,向西部及两侧呈现逐渐减薄的趋势;而花下段在西次凹中部达到最厚,向两侧减薄^[15]。

2 层序识别与划分

2.1 钻井层序识别标志

(1) 岩芯层序界面识别。在西湖凹陷南部春晓井区的取芯井中,可识别出花港组底部的层序界面与旋回特征(图2)。该界面为典型的岩性突变面,见弱的冲刷作用。层序界面以下为灰色至浅灰色粉砂质泥岩,其泥岩色深质纯,反映水体较深,向上泥岩颜色变浅,成层性变差,并见大量植物叶片化石,为滨岸浅水沼泽沉积,总体上反映了水体逐渐变浅的湖平面下降旋回特征;而界面之上则为灰白色块状中细砂岩(图2),且砂岩厚度较大,叠置砂体厚度可达数十米,砂岩粒度向上变细,见流水沙纹层理;总体反映出相对湖平面缓慢下降再上升、地层单元整体呈退积的特点。

(2) 测井层序界面识别。通过分析研究区钻井资料的测井曲线特征,并结合岩性界面的分析结果与地震上的标定,明确了花港组的各层序界面及其几何特征,进而划分出层序格架内的沉积旋回及其组合形式。花港组底部的层序界面在伽马曲线上表现为箱

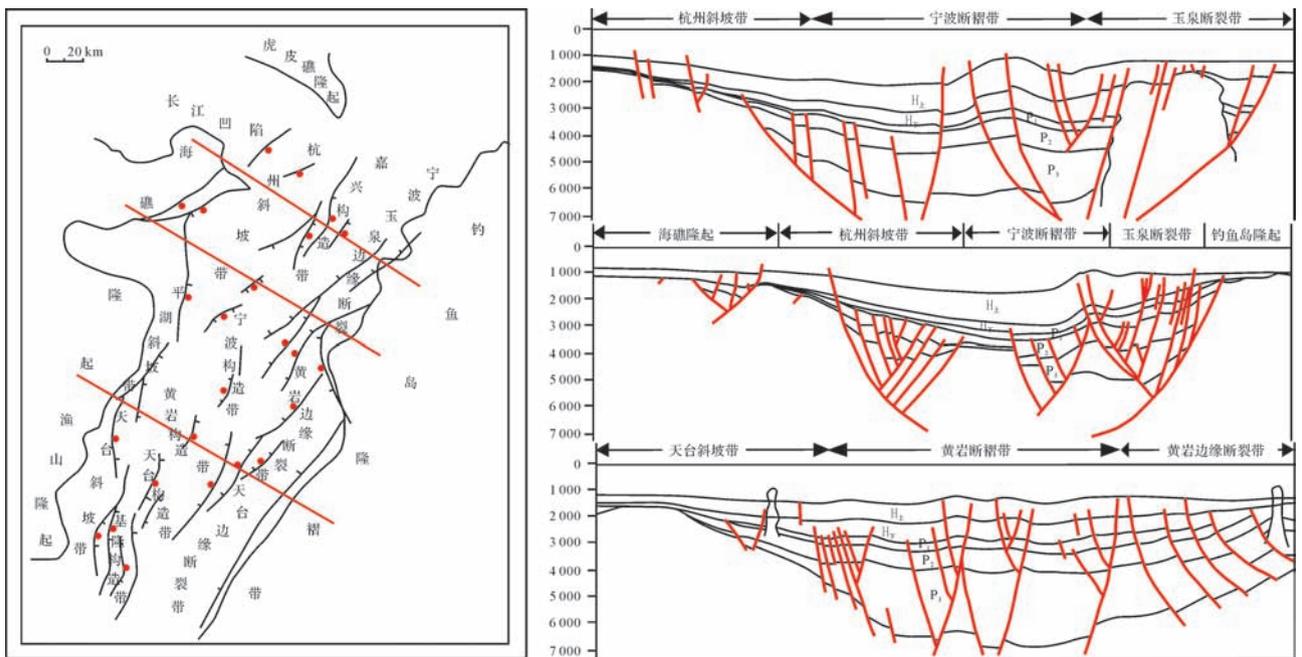


图1 东海陆架盆地西湖凹陷渐新世构造单元划分与盆地结构特征(据文献[16]修改)

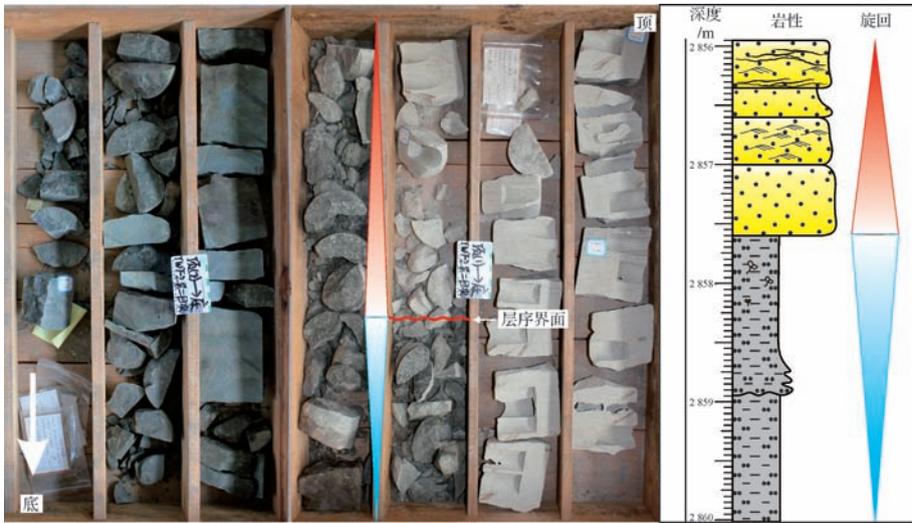


图 2 西湖凹陷 T-2 井花港组岩芯层序界面与旋回特征

Fig.2 Lithological sequence boundary and cyclic characteristics of the Huangang Formation, Well T-2, Xihu sag

型或钟形底部的突变(图 3A),表明岩性与沉积环境的突然变化,反映出相对海平面下降期出现侵蚀作用所形成的界面特征。该界面为始新统平湖组与渐新统花港组的分界,为盆内的区域不整合,即为典型的陆上不整合面^[23]。而花港组内部的层序界面则通常为伽马曲线的漏斗形与钟形的转换处,为退积与进积的转换面或称为水退冲刷面(图 3A,B)。该界面处偶尔发育较薄的细粒沉积(图 3A),其上部被砂岩所侵蚀(应为滨岸侵蚀面),由于泥岩通常为下部旋回后期的次级洪泛沉积或者浅水低能环境产物,之后被下一期相对海平面上升半旋回部分的地层单元侵蚀或削蚀。

洪泛面作为划分不同旋回的界限,同样需要在测井曲线上准确识别,并进行侧向对比。洪泛面在测井曲线上多位于伽马测井曲线的峰值与电阻率测井的低值位置,曲线为突出的锯齿状(图 3)。垂向上通常为沉积物粒度由正粒序与反粒序的转换处,反映相对海平面的稳定上升向缓慢下降的转换过程。另外,除最大洪泛面之外,层序内部还存在多期次级的洪泛面,这些界面的识别是划分准层序组、准层序的基础。

2.2 地震层序识别标志

地震层序是以不整合及其与之对应的整合的地震反射为界,内部反射相对整齐的地震反射单元^[24-25]。地震层序的识别与划分是根据地震反射界

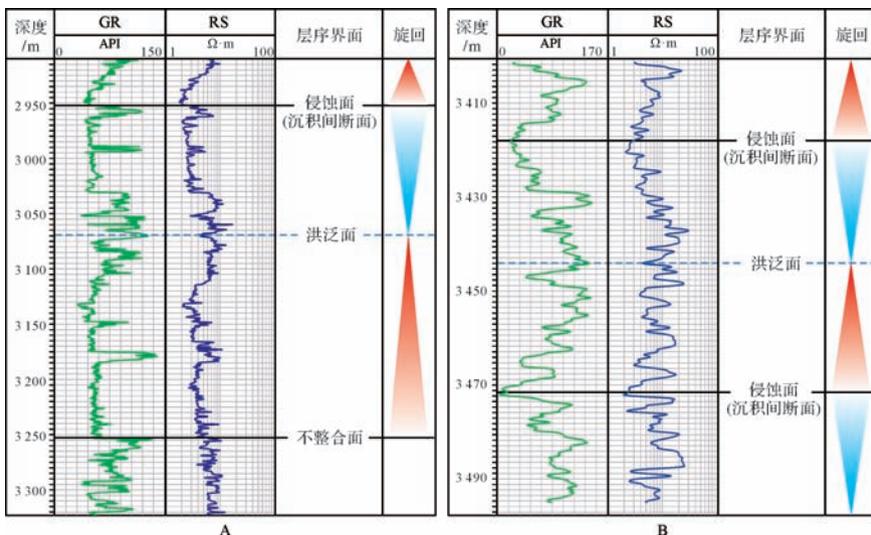


图 3 西湖凹陷 A-3 井花港组测井层序界面与旋回识别标志

Fig.3 Well-log sequence boundaries and cyclic indicators of the Huangang Formation, Well A-3, Xihu sag

面的等时性、覆盖范围广及三维空间延伸的特征将盆地或者凹陷内沉积体划分为不同级别的地层单元^[26-28]。本文根据研究区地震反射结构特征,在渐新统识别出了六种界面类型(图4)。

2.2.1 层序界面(不整合)

西湖凹陷中,渐新统主要发育三个不整合面,由下至上分别为花港组下段底界(T30)、花港组下段顶界(T21)、花港组上段顶界(T20)。

在地震剖面上,T30表现为地层削截与上超,对应于地质历史时期的玉泉运动^[29]。该构造运动发生于始新世与渐新世之间,使花港组与平湖组呈角度不整合接触关系。东海陆架盆地自渐新世开始,构造背景由之前的拉张应力场转化为挤压应力场^[30],使盆地(凹陷)由裂陷阶段向坳陷阶段转换,凹陷内剥蚀作用普遍,但剥蚀量相对较小^[10]。该不整合面为裂后隆起与断—坳构造调整型不整合,可能与岩石圈的拉伸末期绝热熔融导致的热隆起和断陷向热冷却坳

陷沉降转换作用有关^[31]。

T21为花港组下段与花港组上段的分界线,在地震上主要表现为上超现象。该不整合面反应了花港组上段与花港组下段之间存在一次较大规模的湖(海)退事件,先前沉积的花港组下段暴露并遭受一定程度地剥蚀,形成较为广泛的沉积间断^[31]。随后凹陷发生沉降,发生大规模湖(海)侵作用,在此不整合面之上形成一系列上超地层单元。

T20为渐新统花港组的顶界,在地震反射剖面上为平行或削截特征,形成于古近纪与新近纪中新世之间的花港运动^[32]。西湖凹陷中西部地层在该界面上下表现为平行不整合接触,而凹陷东部发育削截,地层呈角度不整合接触。此时构造应力场仍主要为挤压,强烈的挤压作用导致构造发生反转,并伴有大规模岩浆侵入活动^[29]。区域地质背景分析显示,该时期中国东部盆地渐新世普遍受到强烈的挤压作用或压扭作用,并伴随岩浆侵入作用,从而形成不整合接触^[32-34]。

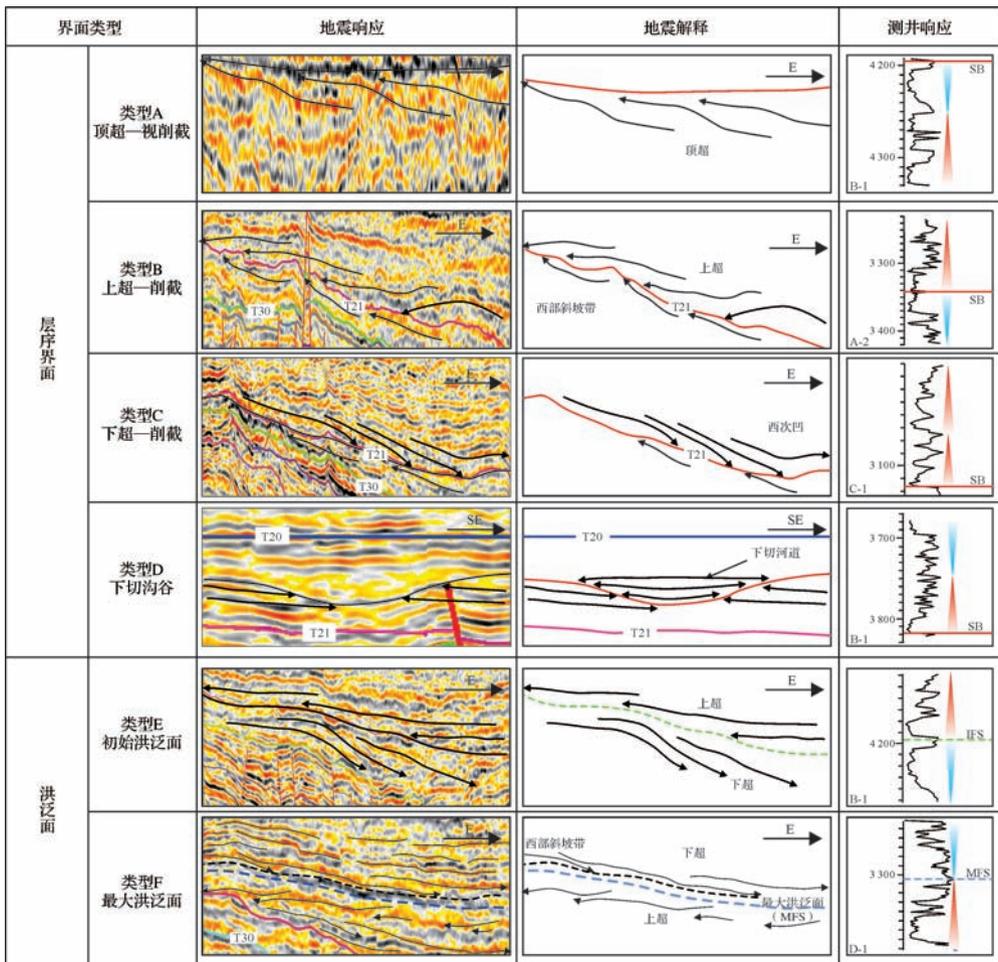


图4 西湖凹陷渐新统地震层序界面类型、及其识别特征

Fig.4 Seismic sequence boundaries and their indicators of the Oligocene in the Xihu Sag

2.2.2 洪泛面

层序地层划分和对比中,洪泛面包括初始洪泛面(IFS)与最大洪泛面(MFS),是三级层序内部体系域的重要的分界面。因此,本文中利用区域地震反射资料,以界面特征(振幅、频率、连续性)与上下的反射结构为基础,分别识别出花港组各段的初始洪泛面与最大洪泛面,其中最为显著的两次最大海侵分别发生在 29.5 Ma 与 24.3 Ma 左右^[15](图 5)。在地震剖面上,初始洪泛面可越过沉积坡折,该面之下地层反射特征为前积结构(低位体系域),而该洪泛面之上地层则为退积结构(水进体系域)。在地震剖面上,最大洪泛面在西湖凹陷边缘往往与下超包络面对应,即地层下超终止点的连线。西湖凹陷中最大洪泛面是渐新世层序中水进体系域与高位体系域的分界,代表了西湖凹陷范围内沉积时期的最大水深,表现为具有一定厚度且广泛分布的泥岩沉积,在地震反射剖面上为振幅较强,连续性好的特征。

2.3 层序划分方案

通过地震反射剖面、测井相以及岩芯识别出渐新

统底界(构造面 T30)为区域性侵蚀不整合面是玉泉运动形成的古构造运动不整合面。而顶部构造面 T20 则为区域性沉积间断不整合面,代表了 II 级层序界面,后期受花港运动影响,在西湖凹陷东西部形成角度不整合。而花港组内的构造面 T21 则为局部沉积间断面,在斜坡部位具有明显的剥蚀与低角度不整合,向凹陷中心则过渡为整合接触除此三个层序界面以外,通过测井和岩芯还识别出三个沉积转换面和五个最大湖泛面。在层序界面识别的基础上,渐新统花港组共划分为 5 个三级层序,结合精细的钻井资料与地震剖面的解释,进一步划分出花港组内 12 个体系域(图 5)。

3 沉积环境与体系

3.1 沉积环境

西湖凹陷生物标志化合物甾烷 C₂₇-C₂₈-C₂₉ 分析结果显示,早渐新世早期存在着陆相与海湾环境均有发育的证据。而在渐新世中期,生物标志化合物主要指示海湾环境,中央反转带与西次凹中部全部为海相

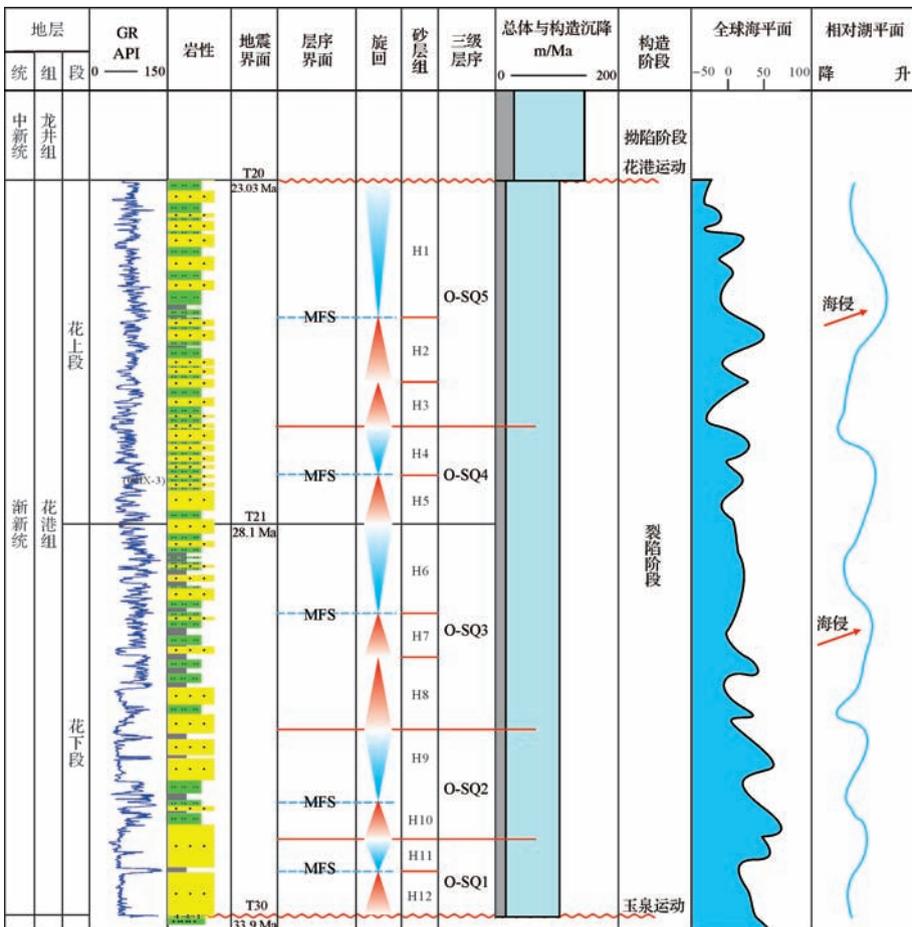


图 5 东海陆架盆地西湖凹陷渐新统层序界面类型

Fig.5 Sequence stratigraphic boundaries of the Oligocene in the Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin

沉积环境,由此说明渐新世西湖凹陷发生了海侵作用。另外,花港组在中央反转带中部多口井、多个层位发现海绿石^[10],且通过对其 Al₂O₃与 K₂O 的分析发现,西湖凹陷海绿石是受海侵作用影响的咸水环境成因,反映了渐新世海侵作用主要发生在西湖凹陷的中东部与南部。西湖凹陷南部发育大量咸水—半咸水环境下的遗迹化石(图6),主要类型为U型迹(Arenicolites)、蛇形迹(Ophiomorpha)、漫游迹(planolites)及针管迹(Skolithos),代表前滨—临滨浅水环境,再次证明西湖凹陷中南部受到较为明显的海侵影响。

3.2 沉积体系类型

花港组的海绿石、微量元素等方面的研究成果指示西湖凹陷海侵范围有限,北部为陆相沉积,南部为过渡沉积环境^[10],因而受海侵范围的影响,沉积时期整体沉积格局出现分异特征,河流沉积体系主要发育在凹陷西部斜坡带与东部断阶带,以近源辫状河为主,沉积物粒度较粗,河道底部见砾石,以高含量的牵引与跳跃组份为主,箱状厚层的河道—砂坝砂体相互叠置,垂向序列表现出槽板交替的砂包泥特征(图7A),是下游三角洲沉积体系的主要供源通道(图8)。

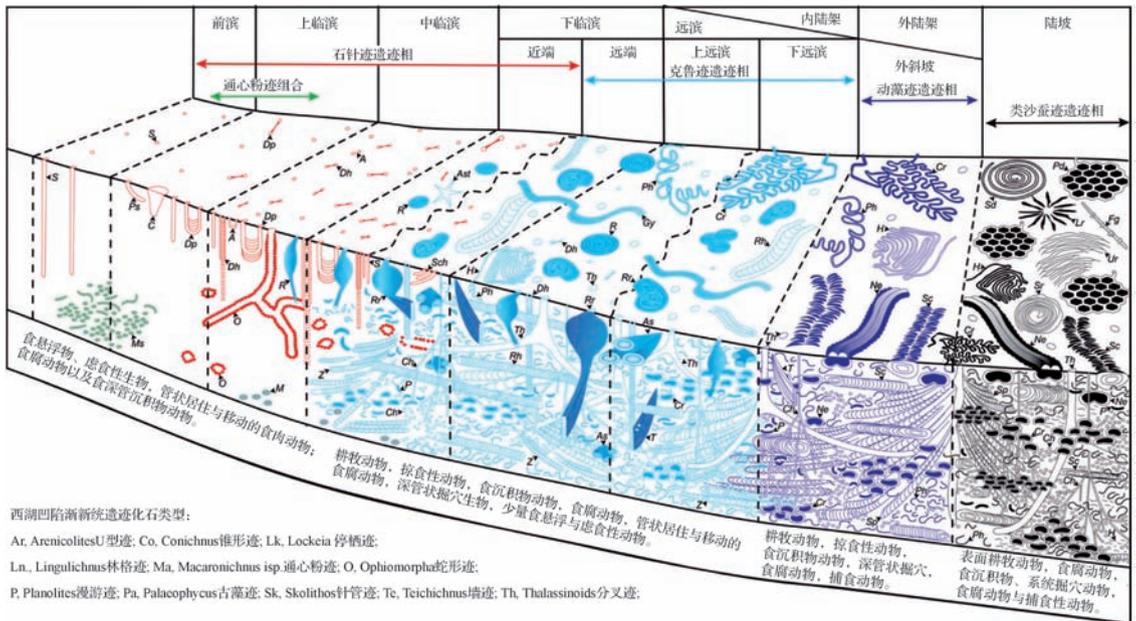


图6 西湖凹陷渐新世遗迹化石类型与对应的沉积环境(模式图据文献[35]修改)

Fig.6 Trace fossils and corresponding sedimentary environments in the Oligocene, Xihu sag (modified from reference [35])



图7 东海陆架盆地西湖凹陷渐新统典型沉积序列

A.河流沉积序列;B.三角洲沉积序列;C.潮控河口湾序列;D.无障碍海岸序列

Fig.7 Typical sedimentary sequences of the Oligocene in the Xihu sag, East China Sea Shelf Basin

A. fluvial sequence; B. deltaic sequence; C. tidal-estuary sequence; D. non-barrier

河流沉积体系的发育主要受地形坡度与物源区距离等因素控制。西湖凹陷花港组的河流沉积体系主要发育在西部斜坡带靠近海礁隆起区一带, 地形坡度较大, 且离物源较近, 河流类型以辫状河为主, 也发育少量曲流河。在层序地层格架内, 低位体系域的河流砂体主要表现为箱形, 且相互叠置, 砂体连通性好, 泥岩层较少且薄, 形成“砂包泥”的特征, 河道砂体在垂直物源方向上多呈对称性, 为辫状河; 而高位体系域中, 细粒的泛滥平原沉积增多, 呈“泥包砂”的特征, 河道砂体多为钟形, 以曲流河为主, 且由于河道的迁移作用, 砂体在垂直物源方向上呈非对称性特征, 砂体之间叠置较少, 多呈孤立形态。

三角洲沉积体系包括辫状三角洲与扇三角洲, 其

中辫状三角洲主要发育在西湖凹陷西侧, 而扇三角洲分布在西湖凹陷的东部断阶带。辫状河三角洲沉积体系粒度相对扇三角洲来说较细, 以含砾砂岩、中粗砂岩为主, 跳跃和悬浮组份相对扇三角洲较高, 分流河道和水下分流河道发育, 河口坝较少, 垂向上整体以砂泥间互的多期正粒序叠置而成的反旋回为特征 (图 7B)。三角洲在 seismic 剖面上主要表现为楔形的地质体, 地震相沿三角洲的顺物源方向多表现为前积结构, 而在垂直物源方向, 地震反射为丘形, 内部反射结构为双向下超 (图 9)。三角洲不同部位的 seismic 反射结构不同, 其顶积层主要表现为振幅强度中等与连续性中等的特征; 前积层振幅和连续性有所增强, 主要是由于泥岩沉积增多, 沉积界面的波阻抗差增大; 而

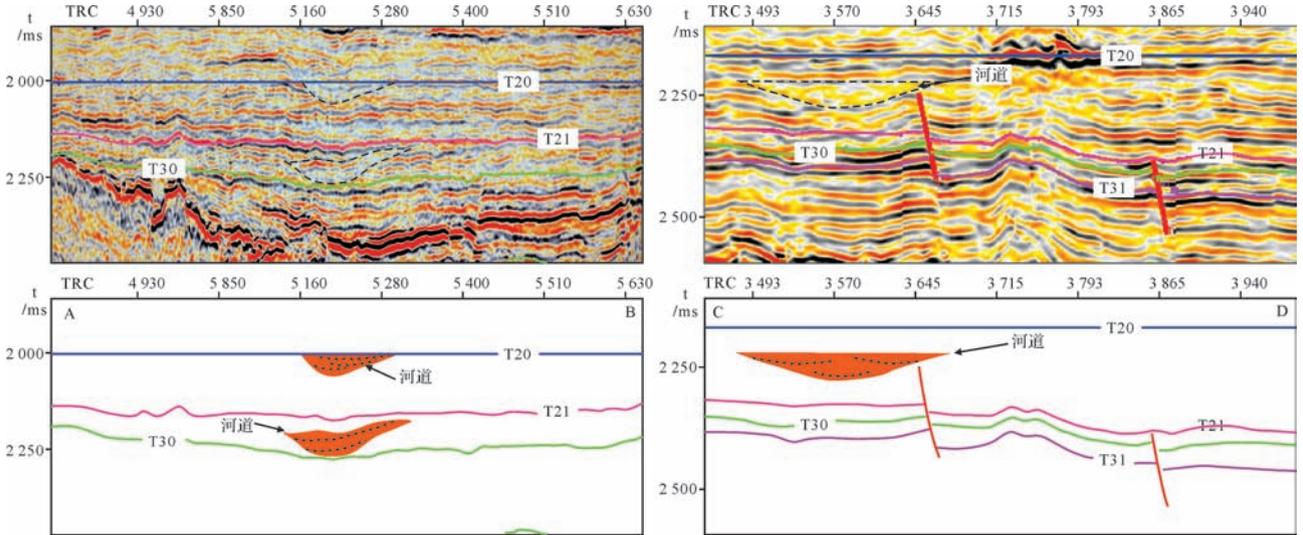


图 8 西湖凹陷花港组河流沉积体系的地震反射特征

Fig.8 Seismic reflection characteristics of fluvial systems of the Huagang Formation, Xihu Sag

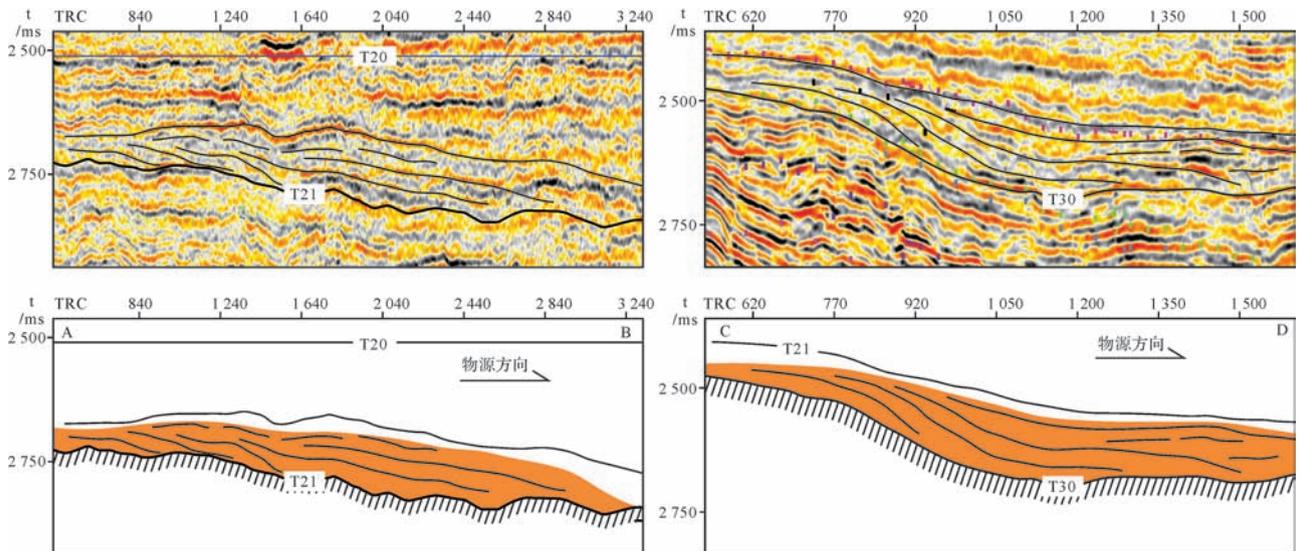


图 9 西湖凹陷花港组三角洲沉积体系的地震反射特征

Fig.9 Seismic reflection characteristics of deltaic systems of the Huagang Formation, Xihu Sag

底积层则以弱振幅、连续性差为特征,主要是前三角洲主要为厚层泥岩沉积,反射界面不明显。滨岸带三角洲体系主要是河流作用占主导,前积结构明显,但由于处于凹陷缓坡区域,通常见顶积层与前积层,底积层不明显^[36]。平面上,辫状三角洲体系以朵叶状为主,其展布方式也受同生断层形成的构造调节带控制,多为斜列入湖。

潮控河口湾沉积体系主要发育在西湖凹陷南部春晓井区。受潮汐作用影响,河口湾体系形成于半封闭的海湾环境,沉积物粒度不一,牵引、跳跃及悬浮组份均发育。该沉积体系垂向上以厚层正粒序为特征,测井上表现出明显的锯齿大钟形。沉积单元主要包括潮汐水道、潮汐砂坝、砂质潮坪、泥质潮坪以及盐沼,平面上呈喇叭口状(图7C)。河口湾沉积体系在地震反射的横向剖面上以中等振幅与连续性为特征,表现为顶平底凹与底平顶凹的透镜状地质体,分别代表了潮汐水道与潮汐砂坝。砂体横向上(垂直水道方向)对称性较好,但由于内部缺少连续的泥岩层,砂体内部尤其是水道砂体内部结构不明显;而在纵向剖面上(平行水道方向)则以连续性好、砂体厚度稳定为特征。砂质潮坪与泥质潮坪在地震上表现为中等振幅、连续性好的反射特征(图10)。河口湾通常是指在地形较缓的海陆过渡带,海水与淡水共同作用的近岸半封闭环境^[37]。因此,河口湾通常具有两种互为消长的沉积作用:河流作用与潮汐作用。河流将沉积物向海方向搬运,而河流作用向海方向逐渐减弱;潮汐将沉积物向陆方向搬运,且潮汐作用逐渐增强,二者在河口湾中间部位交汇,形成兼具河流与潮

汐作用的河口湾沉积体系。河口湾通常形成相对海平面上升,特别是海侵时期,相对海平面下降时期则消失,甚至被河流下切或充填^[38]。

滨岸滩坝沉积体系主要发育在凹陷东部宁波井区,沉积体系规模大,分布范围较广。其中滨岸滩坝沉积物成分与结构成熟度高,发育牵引、跳跃及悬浮组份,但与河口湾体系的区别在于滨岸滩坝的跳跃组份高,而牵引与悬浮组份均较低。滨岸滩坝垂向上以粒序不明显的箱状砂体为主,且多期滨岸滩坝叠置形成巨厚的砂岩组(图7D)。西湖凹陷花港组滨岸滩坝砂岩复合体厚度巨大(最厚可达80 m)。砂体在地震剖面上较为明显,其特征主要为中等振幅与连续性的、底平顶凸的透镜状反射。滨岸滩坝主要是由巨厚的砂岩组成,其内部波阻抗界面不明显,因而其内部反射结构不明显,多为空白反射。而滨岸滩坝之间泥质沉积因与砂岩波阻抗差大,则表现为强振幅、连续性好的特征(图11)。在垂直滨岸滩坝轴向方向的剖面上,底平顶凸的透镜状砂坝相互叠置,分布范围从数百米至数公里;而在平行滨岸滩坝轴向方向的剖面上表现为相互平行的长条状砂坝复合体,延伸范围可达数十公里。

4 层序格架与沉积作用

4.1 层序地层格架

本文在确定层序地层划分方案的基础上,通过地震剖面与连井剖面进一步识别不同三级层序内的体系域。下降体系域(Falling-Stage System Tract)形成于西湖凹陷内相对海平面快速下降时期,以出现强制

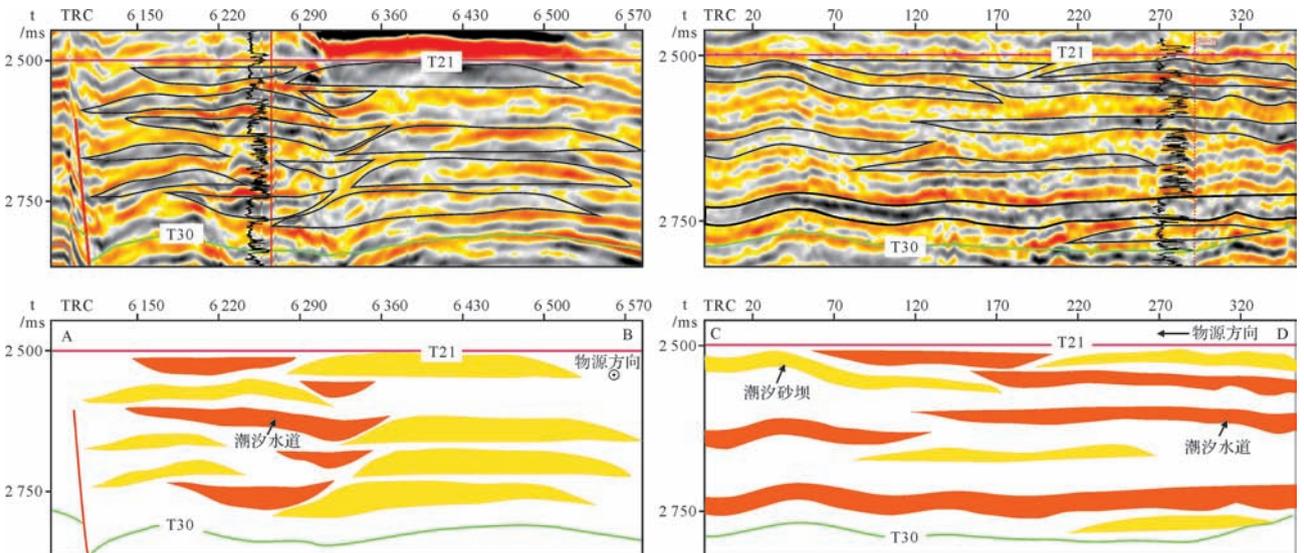


图10 西湖凹陷花港组下段潮控河口湾体系的地震反射特征

Fig.10 Seismic reflection characteristics of tidal-estuary systems of the Huangang Formation, Xihu Sag

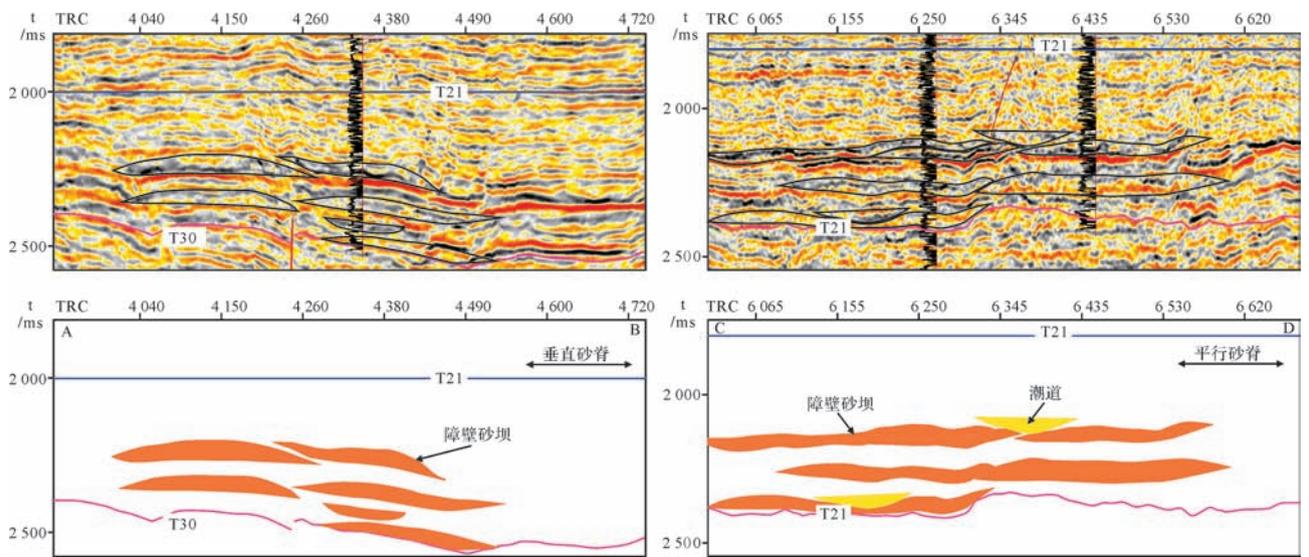


图 11 西湖凹陷花上段滨岸滩坝的地震反射特征

Fig.11 Seismic reflection characteristics of coastal beach-bar systems of the Huagang Formation, Xihu sag

性海退面为标志。在花港组下段沉积结束之后,西湖凹陷出现了一次沉积间断(对应于构造面 T21),即相对海平面快速下降,在西部斜坡带出现了强制性海退面,进而形成了一套较薄的、分布范围较为局限的下降体系域(图 12)。

低位体系(Lowstand System Tract)形成于西湖凹陷相对海平面下降至缓慢上升时期,下部以层序界面或者下降体系域的顶面为界,形成一套楔形砂质的沉积体,地层呈向盆地方向进积的特征。从西湖凹陷地震剖面来看,花港组的低位体系域厚度均较薄,以弱振幅、连续性差为特征。

湖侵体系域(Transgressive System Tract)是指形成于西湖凹陷内相对海平面快速上升时期的一套向陆地方向退积的沉积体,该时期受湖(海)侵作用的影响,沉积体以泥质为主,在地震上初始洪泛面与最大洪泛面均表现为强振幅、连续性好的特征(图 12)。从西湖凹陷花港组的最大洪泛面的分布范围来看,湖盆范围或海侵范围从渐新世早期向渐新世晚期逐渐扩大。

高位体系域(Highstand System Tract)形成与相对海平面缓慢上升至缓慢下降时期,形成一套不断向盆地方向进积的砂泥互层的沉积体,在地震上表现为中等振幅与连续性的特征。从地震剖面上看,西湖凹陷花港组高位体系域的厚度均较大,反映了凹陷内沉积物供给充足,可容纳空间充足(图 12)。

4.2 湖平面变化与沉积作用

湖平面的升降对凹陷滨岸带的沉积体系的形成与结构具有重要影响。本文根据研究区地震剖面反

射特征与层序地层 Wheeler 变换理论^[25],通过识别地层上超尖灭点位置,绘制了研究区的相对海平面变化曲线(图 13)。从层序地层学与沉积环境分析来看,渐新世西湖凹陷共有五次完整的相对湖平面升降旋回,分别发生两次大范围的湖侵作用(SQ3 与 SQ5 最大洪泛面)。因此,在相对海平面升降旋回中形成的不同时期的体系域,具有不同的沉积体系类型特征。从西湖凹陷渐新世相对海(湖)平面变化特征来看,该地区的相对海(湖)平面与可容纳空间整体呈上升趋势,并表现为持续的岸线上超(图 13)。

西湖凹陷渐新世早期主要为湖泊沉积,凹陷西斜坡的滨岸带可容纳空间迅速减少,向陆方向的区域甚至暴露并遭受剥蚀,西湖凹陷西斜坡的滨岸带主要发育具有较强下切侵蚀能力的河流沉积体系。而在随着相对湖平面缓慢上升,可容纳空间逐渐增加,在凹陷滨岸带逐渐形成三角洲沉积体系,且由于相对湖平面上升与可容纳空间增加速率的升高,三角洲的加积作用大于前积作用,形成上升型的沉积坡折点趋势(图 13)。

西湖凹陷渐新世中期(29.5 Ma 与 24.3 Ma 左右)湖平面上升与构造沉降共同产生的相对湖平面快速上升的阶段。湖侵体系域以沉积作用缓慢、砂泥比值低、一组或多组退积型地层结构为特征,整体为一套泥岩为主的沉积,发育大量自生海绿石与浮游有孔虫。西湖凹陷南部受海侵影响,潮汐作用明显增加,地形坡度较缓的南部地区形成海陆过渡的潮控河口湾沉积体系(图 13);西湖凹陷渐新世晚期,湖平面由

相对上升转为相对下降,该时期沉积物供给速率常大于可容纳空间增加的速率,因此形成多组以向盆地方向进积的准层序组。西湖凹陷滨岸带河流作用逐渐增强,发育大型三角洲沉积体系,而受可容纳空间的限制,其前积作用大于加积作用,形成下降型的沉

积坡折点趋势(图13)。此时海水逐渐退出西湖凹陷,波浪与潮汐作用的影响变小,河口湾与滩坝砂坝体系不发育。

综上所述,三角洲体系可以发育在不同体系域中,而不同层序时期体系域中三角洲的沉积特征有所

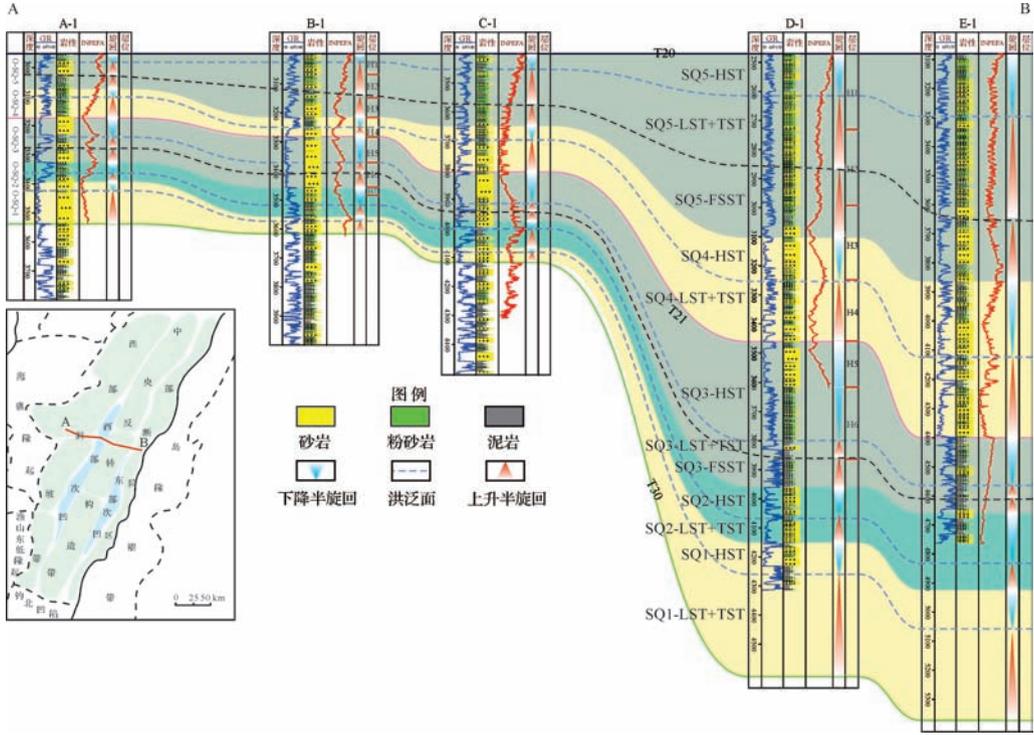


图12 西湖凹陷花港组连井层序地层格架

Fig.12 Well correlation showing sequence stratigraphic framework of the Huangang Formation, Xihu sag

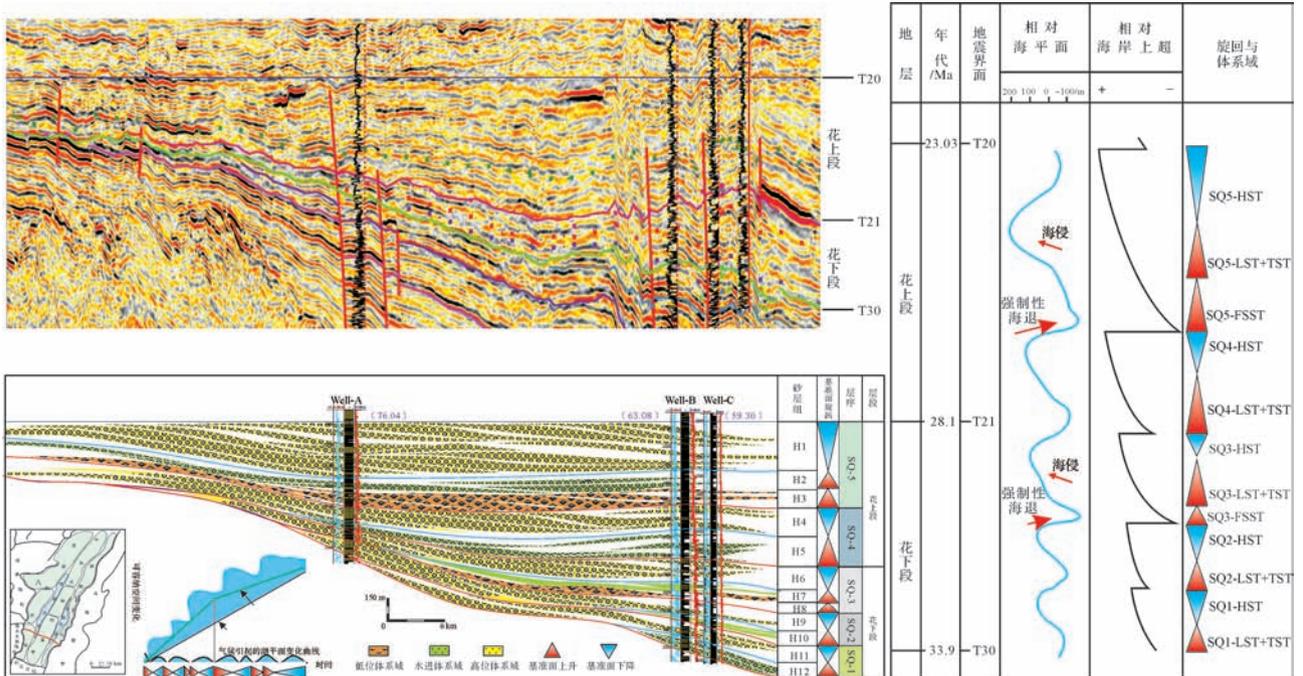


图13 东海陆架盆地西湖凹陷渐新世海平面变化的地震响应

Fig.13 Seismic response of sea level change in the Oligocene, Xihu sag, East China Sea Shelf Basin

不同。如低位域时期由于湖盆水体相对较低,湖岸线多向盆地方向迁移,导致三角洲向湖盆进积明显,沉积物向湖搬运较远,河道的作用较强,由于地形变缓,三角洲通常呈朵叶状或鸟足状。海侵时期,岸线被水体淹没并快速向陆方向撤退,易形成潮控河口湾体系。而高位域时期,由于岸线变化较小,水位通常较高,三角洲总体以加积与进积为主,波浪与河流共同影响三角洲的形成与发育,三角洲外观形态通常多呈

扇形或尖嘴状。因此,不同类型的三角洲首先在外观形态上有所差异,也导致其沉积砂体的分布形式有所不同,其与影响三角洲结构—成因的坡度大小、物源远近、粗度粗细及河道发育程度有关。

4.3 层序格架内沉积体系分布与演化

在西湖凹陷层序格架建立的基础上,基于地震与钻井资料,明确了各层序内沉积体系类型与展布规律(图14)。

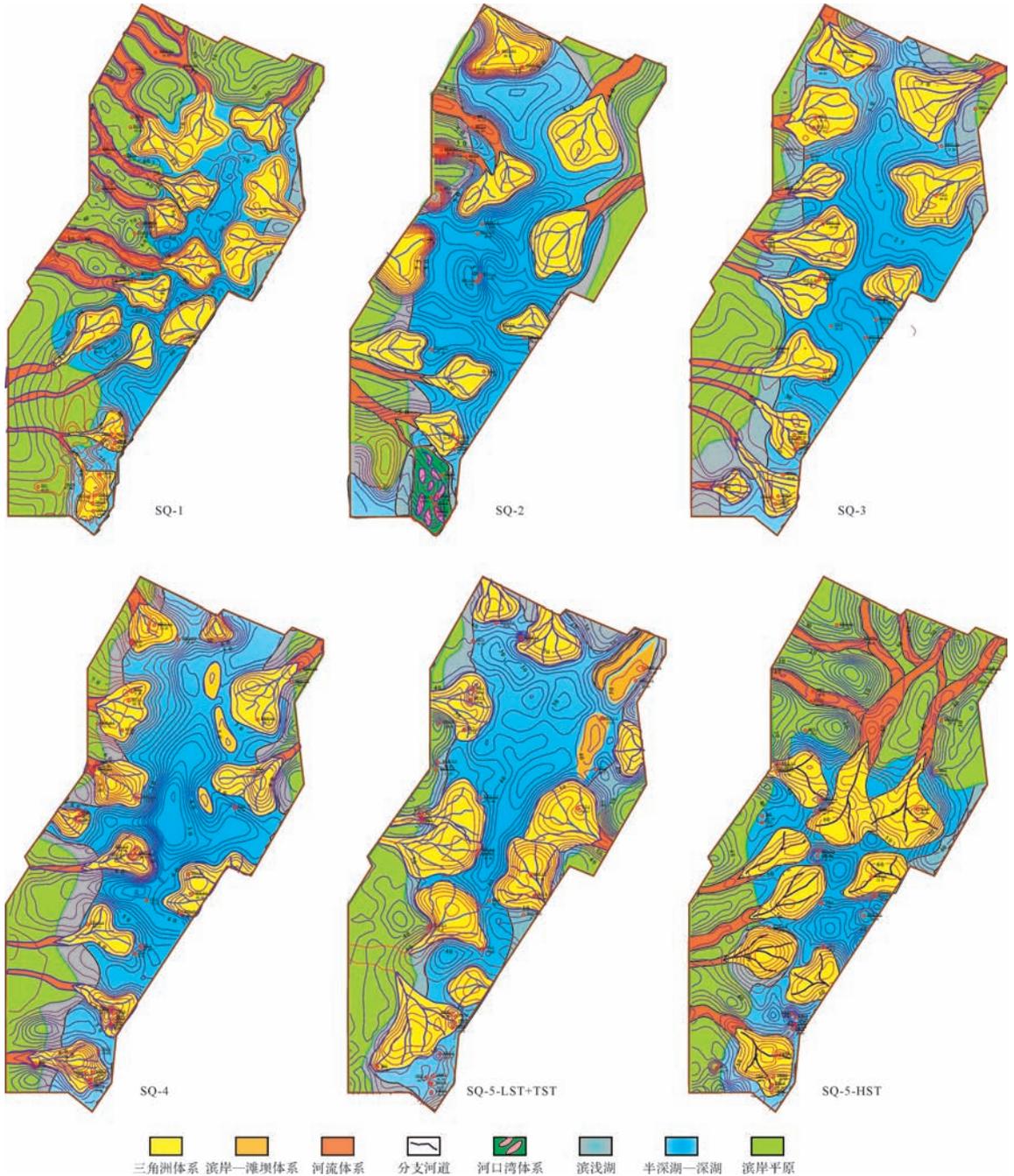


图14 东海陆架盆地西湖凹陷渐新世层序格架内沉积体系分布特征

Fig.14 Distribution of sedimentary systems within sequence stratigraphic framework of the Oligocene, Xihu sag, East China Sea Shelf Basin

(1) SQ-1。西湖凹陷主要为海陆过渡相背景,低位与湖侵体系域时期,凹陷周缘广泛发育河流—三角洲沉积体系。河流类型主要为近源砂质辫状河,河流下切作用明显,在西部斜坡带与东部断阶带均形成明显的下切谷充填,砂岩粒度粗、厚度大,下切河谷中河道砂体相互叠置,形成厚层箱状的叠置复合砂体。高位体系域时期,三角洲体系主要沿凹陷坡折带以上的斜坡区域分布,多为斜列入湖,前积结构明显,由于地形坡度较大,惯性作用明显,三角洲多呈扇形或朵叶状。在凹陷坡折以下,可能发育小规模透镜状砂质碎屑流或浊流体系。

(2) SQ-2。低位体系域时期,主要发育河流—三角洲体系。海侵体系域时期,随着相对海平面的快速上升,以南部与东部地区最为明显。受海侵作用影响,凹陷南部发育潮控河口湾体系。而凹陷西部斜坡带与东部断阶带等区域,岸线后撤,河流—三角洲体系萎缩,形成一套以泥岩为主的细粒沉积。高位体系域时期,主要以河流—三角洲体系为主。

(3) SQ-3。低位与湖侵体系域时期,西湖凹陷滨岸带主要为河流—三角洲沉积体系,随着三角洲体系不断地向盆地方向进积,而受可容纳空间增加速率的限制,加积作用较弱。高位体系域时期,西湖凹陷形成了广泛的三角洲平原(或泛滥平原)沉积,以薄的砂泥互层为特征,并发育薄煤层或煤线等。

(4) SQ-4。该时期主要为河流—三角洲体系、受潮汐影响的三角洲以及滨岸滩坝体系。低位体系域时期,河流—三角洲体系主要分布在西湖凹陷西部,三角洲体系多以垂直滨岸线入湖,沉积规模比SQ3大。凹陷东北部,早期形成的三角洲沿岸砂坝暴露出水面,受到波浪作用的强烈改造,砂岩成分与结构成熟高,发育多组冲洗层理,形成一套滨岸滩坝体系。湖侵体系域时期,凹陷南部地区的海水未完全退去,滨岸带形成的三角洲受到一定的潮汐作用影响,发育指状砂坝,形成受潮汐影响的三角洲体系。高位体系域时期,凹陷周缘主要为三角洲体系。

(5) SQ-5。低位体系域时期,西湖凹陷主要发育河流—三角洲体系。海侵体系域时期,凹陷受第二次海侵作用的影响,水体范围扩大,滨岸带岸线再次后撤,河流—三角洲沉积体系发育速率急剧降低,滩坝体系被淹没,停止增长,在凹陷范围内形成一套泥岩为主的细粒沉积。高位体系域时期,随着相对海平面从缓慢上升转变为缓慢下降,西湖凹陷周缘的河流发生回春作用,携带大量陆源碎屑物质,在凹陷周缘形

成广泛的三角洲沉积。该阶段西湖凹陷沉积地形坡度最缓,三角洲规模大,分布广,受河流作用的驱动,三角洲多为大型朵叶状,同时发育大范围的三角洲平原、泛滥平原及沼泽沉积,煤层较为常见。

4.4 沉积充填模式

东海陆架盆地大地构造背景为区域板块碰撞与俯冲^[39],东海陆架盆地西湖凹陷的构造演化必定与区域的板块构造密切相关。全球海平面变化对西湖凹陷的沉积充填具有重要的影响。这两个重要的因素的演化决定了西湖凹陷内宏观的构造格局与充填样式。而盆地内部构造样式、地形坡度、相对海平面变化等因素的演化直接决定了凹陷的微观沉积构型特征。本文以东海陆架盆地内构造样式、相对海平面与可容纳空间变化、地形地貌特征等为基础,建立了西湖凹陷构造—沉积充填模式(图15),并分析了构造作用与海平面变化的演化对凹陷内沉积作用的控制机理,总结了渐新世西湖凹陷滨岸带沉积动力学机制的演化规律。

4.4.1 SQ1—SQ3

渐新世开始,东海陆架盆地裂陷作用停止,东侧出现向西或西北向的仰冲作用,使东海陆架盆地处于左旋压扭或挤压环境,东部钓鱼岛隆褶带抬升,盆地在热冷却与挤压应力的驱动下开始拗陷下沉^[40],西湖凹陷中央反转带西侧可能存在挤压挠曲沉降作用。拗陷初期,西湖凹陷内的大多数断层停止活动(东界断层除外),但凹陷内继承了早期裂陷作用形成的构造格局,其断裂体系(断阶)对早渐新世的沉积起到一定的控制作用,其构造调节带的发育使得西湖凹陷滨岸带的三角洲体系多呈斜列入湖方式。SQ1时期,全球海平面的下降,使得凹陷内的相对海平面下降,可容纳空间减少,形成一套侵蚀—充填的低位体系域,主要为河流—三角洲沉积体系。SQ2时期,大约在29.5 Ma时,全球海平面发生一次较大幅度的上升(图15),使得渐新世西湖凹陷内发生第一次海侵作用,形成了一套海陆过渡沉积。西湖凹陷南部地区潮汐作用明显,形成了潮控河口湾体系。随后,SQ3时期,全球海平面持续下降,西湖凹陷内的相对海平面上升速率减小直至缓慢下降,潮汐作用消失,河流作用增强,滨岸带形成了一套以河流—三角洲体系为主的砂泥互层沉积。

4.4.2 SQ4—SQ5

早渐新世沉积结束后,受太平洋板块俯冲影响,西湖凹陷内出现一次沉积间断,形成了T21构造面。

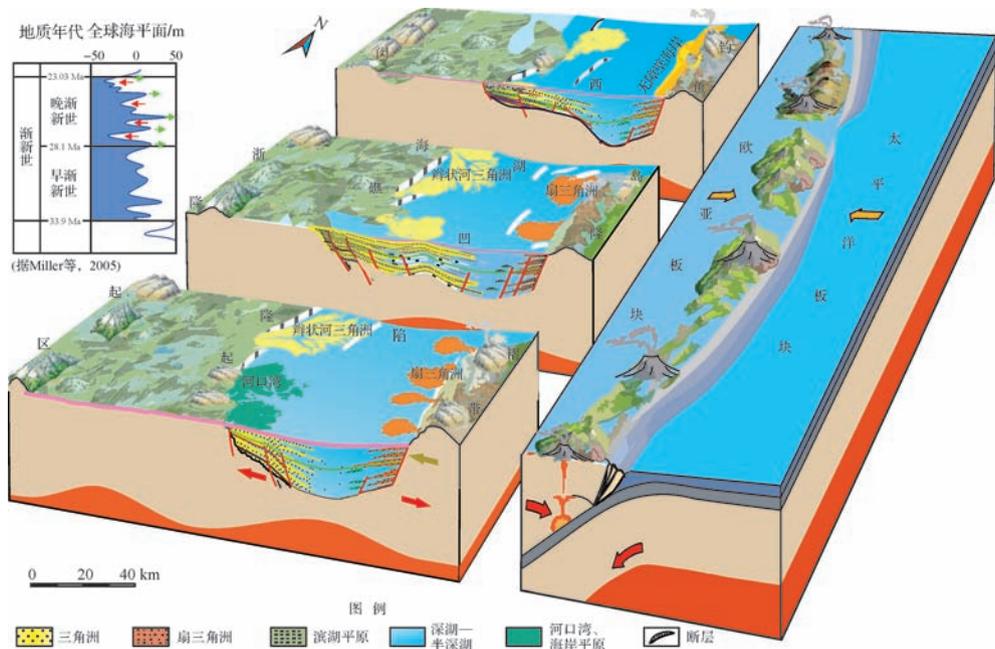


图 15 东海陆架盆地渐新世构造背景与沉积充填模式图

Fig.15 Tectonic setting and depositional model in the Oligocene, East China Sea Shelf Basin

在西斜坡的局部地区出现微角度不整合,随后进入快速拗陷阶段,湖盆范围扩大。SQ4 时期凹陷内活动断裂体系较少,沉积地形主要受构造沉降以及先前沉积的底形控制,西部海礁隆起与东部钓鱼岛隆褶带为主要的碎屑剥蚀区,物源供给充足,西部斜坡带与东部断阶带均形成近源河流与三角洲沉积体系,而三角洲体系由于受构造调节带影响小,多为垂直入湖,因凹陷东、西地形坡度差异,三角洲沉积体系呈陡坡小而多、缓坡大而少的特征。晚渐新世早期,全球海平面发生大幅度的下降(图 15),这也可能是 SQ3 与 SQ4 之间形成沉积间断的原因之一。然后全球海平面开始振荡上升,加之构造沉降作用,西湖凹陷内可容纳空间开始增加,形成了一套低位河流—三角洲沉积体系。值得指出的是, SQ5 的低位时期,西湖凹陷中央反转构造带北部宁波地区先前沉积的沿岸砂坝在海平面下降时期暴露水面,而在相对海平面缓慢上升过程中,受到波浪作用的强烈改造,形成碎屑滨岸滩坝沉积体系。在此之后,全球海平面又发生了一次较大幅度的上升,是西湖凹陷内发生第二次海侵作用,河流—三角洲沉积体系发育减缓甚至停滞,形成细粒的泥岩沉积段。SQ5 末期,由于区域挤压应力逐渐增强,物源区剥蚀作用加强,供给速率与供给量增加,加之全球海平面整体不断下降,西湖凹陷内可容纳空间开始迅速减小,进入沉积萎缩期,滨岸带河流作用占

主导地位,形成广泛的河流—三角洲沉积体系,且三角洲沉积不断向凹陷中心推进,沉积中心不断向凹陷中心迁移。最终在渐新世末期沉积作用停止,发生花港运动,东海陆架盆地东部拗陷带整体抬升遭受剥蚀,并形成了区域性的反转构造带。

5 结论

(1) 以岩芯、测井及地震界面识别为基础,划分了单井高精度层序旋回,以地震剖面为基础,识别了海平面升降与岸线上超规律,厘定了西湖凹陷渐新统层序划分方案,建立了其层序地层格架,共划分出渐新统 5 个三级层序,12 个体系域,明确了西湖凹陷两大海侵期次与体系域演化规律。

(2) 根据精细岩芯观察与描述,结合测井响应,识别了西湖凹陷渐新统 4 类主要的沉积体系。河流体系:以正粒序为主的,呈透镜状特征;三角洲体系:以多期叠置的反粒序为主,具有明显的前积结构;潮控河口湾体系:以厚层叠置锯齿状正粒序为主;以及滨岸滩坝体系:以巨厚箱状砂岩为主,具有典型的冲洗层理。

(3) 渐新世早期,西湖凹陷主要为陆相湖盆背景,凹陷周缘广泛发育河流—三角洲沉积体系,随着相对海平面的快速上升,西湖凹陷发生了明显的海侵作用,凹陷南部发育潮控河口湾体系。渐新世晚期,

凹陷北部受波浪改造影响,形成一套滩坝体系。最后,渐新世末期,西湖凹陷内广泛发育河流体系与缓坡性三角洲体系。

(4) 结合盆地类型、凹陷结构及构造演化阶段,建立了渐新统弧后裂谷盆地的构造—沉积成因充填模式,明确了西湖凹陷滨岸带早期潮汐、后期波浪改造的沉积动力学机制与沉积演化规律。再现了渐新世西湖凹陷“西部缓坡大而少”、“东部陡坡小而多”、“南部长轴河口湾”、“东北滨岸滩砂坝”的沉积体系展布格局,并按层序再现了凹陷内的沉积体系展布特征与演化规律。

参考文献 (References)

- [1] 张银国. 东海西湖凹陷花港组油气地质条件与油气分布规律[J]. 石油实验地质, 2010, 32(3): 223-226, 231. [Zhang Yinguo. Petroleum geology and hydrocarbon distribution pattern of Huagang Formation in the Xihu sag of the East China Sea[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2010, 32(3): 223-226, 231.]
- [2] 黄志超, 叶加仁. 东海海域油气资源与选区评价[J]. 地质科技情报, 2010, 29(5): 51-55. [Huang Zhichao, Ye Jiaren. Petroleum resources and regional selection evaluation in the East China Sea[J]. Geological Science and Technology Information, 2010, 29(5): 51-55.]
- [3] 林志强, 周平. 东海西湖凹陷新生界沉积相的演化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1994, 14(2): 63-70. [Lin Zhiqiang, Zhou Ping. Evolution of Cenozoic sedimentary facies of Xihu depression in the shelf basin of the East China Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1994, 14(2): 63-70.]
- [4] 刘金水, 曹冰, 徐志星, 等. 西湖凹陷某构造花港组沉积相及致密砂岩储层特征[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2012, 39(2): 130-136. [Liu Jinshui, Cao Bing, Xu Zhixing, et al. Sedimentary facies and the characteristics of tight sandstone reservoirs of Huagang Formation in Xihu depression, East China Sea Basin[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2012, 39(2): 130-136.]
- [5] 叶加仁, 顾惠荣, 贾健谊. 东海西湖凹陷油气地质条件及其勘探潜力[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2008, 28(4): 111-116. [Ye Jiaren, Gu Huirong, Jia Jianyi. Petroleum geological condition and exploration potential of Xihu depression, East China Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2008, 28(4): 111-116.]
- [6] 张功成, 邓运华, 吴景富, 等. 中国近海新生代叠合断陷煤系烃源岩特征与天然气勘探方向[J]. 中国海上油气, 2013, 25(6): 15-25. [Zhang Gongcheng, Deng Yunhua, Wu Jingfu, et al. Coal measure source-rock characteristics and gas exploration directions in Cenozoic superimposed faulted depressions, offshore China[J]. China Offshore Oil and Gas, 2013, 25(6): 15-25.]
- [7] Goldhammer R K, Lehmann P J, Dunn P A. Third-order sequences and parasequence stacking patterns of Lower Ordovician platform carbonates of the El Paso Group, Franklin Mountains, west Texas [J]. AAPG Bulletin, 1991, 75(3): 3-5.
- [8] 贾强, 吕大炜. 山东聊城石炭二叠系层序划分及海平面变化响应[J]. 西北地质, 2009, 42(2): 108-115. [Jia Qiang, Liu Dawei. Sequence division and eustatic sea level change of Carboniferous-permian systems in Liaocheng, Shandong province[J]. Northwestern Geology, 2009, 42(2): 108-115.]
- [9] 梅冥相. 从旋回的有序叠加形式到层序的识别和划分: 层序地层学进展之三[J]. 古地理学报, 2011, 13(1): 37-54. [Mei Mingxiang. From vertical stacking pattern of cycles to discerning and division of sequences: the third advance in sequence stratigraphy [J]. Journal of Palaeogeography, 2011, 13(1): 37-54.]
- [10] 武法东, 陆永潮, 陈平, 等. 东海西湖凹陷渐新统花港组海绿石的发现及其意义[J]. 沉积学报, 1997, 15(3): 158-161. [Wu Fadong, Lu Yongchao, Chen Ping, et al. The discovery and significance of glauconites in the Huagang Formation of the Oligocene, Xihu depression, East China Sea[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1997, 15(3): 158-161.]
- [11] 陈琳琳, 谢月芳. 东海西湖凹陷花港组沉积模式初探[J]. 海洋石油, 1998(4): 15-21. [Chen Linlin, Xie Yuefang. Discussion on depositional mode of Huagang Formation in Xihu depression, the East China Sea[J]. Offshore Oil, 1998(4): 15-21.]
- [12] 王果寿, 周卓明, 肖朝辉, 等. 西湖凹陷春晓区带下第三系平湖组、花港组沉积特征[J]. 石油与天然气地质, 2002, 23(3): 257-261, 265. [Wang Guoshou, Zhou Zhuoming, Xiao Zhaohui, et al. Sedimentary characteristics of Eocene Pinghu Formation and Huagang Formation in Chunxiao zone of Xihu Lake depression[J]. Oil & Gas Geology, 2002, 23(3): 257-261, 265.]
- [13] 孙思敏, 彭仕宓. 东海西湖凹陷平湖油气田花港组沉积相及沉积演化[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2006, 36(增刊1): 63-67. [Sun Simin, Peng Shimi. Sedimentary facies and evolution of Huagang Formation of Pinghu oilfield in Xihu sag, the East China [J]. Journal of Northwest University: Natural Science Edition, 2006, 36(Suppl.1): 63-67.]
- [14] 胡明毅, 柯岭, 梁建设. 西湖凹陷花港组沉积相特征及相模式[J]. 石油天然气学报, 2010, 32(5): 1-5. [Hu Mingyi, Ke Ling, Liang Jianshe. The characteristics and pattern of sedimentary facies of Huagang Formation in Xihu depression[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2010, 32(5): 1-5.]
- [15] 张绍亮, 秦兰芝, 余逸凡, 等. 西湖凹陷渐新统花港组下段沉积相特征及模式[J]. 石油地质与工程, 2014, 28(2): 5-8. [Zhang Shaoliang, Qin Lanzhi, Yu Yifan, et al. Sedimentary facies characteristics and its mode of lower member of Oligocene Huagang Formation in Xihu sag [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2014, 28(2): 5-8.]
- [16] 宋小勇, 储望林, 芮志峰. 东海盆地西湖凹陷构造样式及其演化[J]. 高校地质学报, 2010, 16(1): 86-93. [Song Xiaoyong, Chu Chenglin, Rui Zhifeng. Structural framework and evolution of Xihu sag in East China Sea Basin[J]. Geological Journal of China Universities, 2010, 16(1): 86-93.]
- [17] 刘景彦, 林杨松, 姜亮, 等. 东海西湖凹陷第三系反转构造及其对油气聚集的影响[J]. 地球学报, 2000, 21(4): 350-355. [Liu

- Jingyan, Lin Changsong, Jiang Liang, et al. Characteristics of Tertiary inversion structures and their influence on oil-gas accumulation in Xihu depression, East China Sea[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2000, 21(4): 350-355.]
- [18] 张建培, 张涛, 刘景彦, 等. 西湖凹陷反转构造分布与样式[J]. *海洋石油*, 2008, 28(4): 14-20. [Zhang Jianpei, Zhang Tao, Liu Jingyan, et al. Distribution and style of inverted structures in Xihu depression[J]. *Offshore Oil*, 2008, 28(4): 14-20.]
- [19] 郭真, 刘池洋, 田建锋. 东海盆地西湖凹陷反转构造特征及其形成的动力环境[J]. *地学前缘*, 2015, 22(3): 59-67. [Guo Zhen, Liu Chiyang, Tian Jianfeng. Structural characteristics and main controlling factors of inversion structures in Xihu depression in Donghai Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2015, 22(3): 59-67.]
- [20] 王丽顺, 陈琳琳. 东海西湖凹陷下第三系层序地层学分析[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1994, 14(3): 33-42. [Wang Lishun, Chen Linlin. Sequence stratigraphic analysis of Eocene system, Xihu sag, East China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1994, 14(3): 33-42.]
- [21] 魏恒飞, 陈践发, 张铜磊, 等. 西湖凹陷花港组层序地层划分和聚煤特征[J]. *煤炭学报*, 2012, 37(增刊1): 149-156. [Wei Hengfei, Chen Jianfa, Zhang Tonglei, et al. Sequence stratigraphic division and concentrating coal characteristics of Huagang Formation in Xihu depression[J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(Suppl.1): 149-156.]
- [22] 张建培, 徐发, 钟韬, 等. 东海陆架盆地西湖凹陷平湖组—花港组层序地层模式及沉积演化[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2012, 32(1): 35-41. [Zhang Jianpei, Xu Fa, Zhong Tao, et al. Sequence stratigraphic models and sedimentary evolution of Pinghu and Huagang Formation in Xihu depression[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2012, 32(1): 35-41.]
- [23] Embry A F. Practical sequence stratigraphy[J]. *Canadian Society of Petroleum Geologists*, 2009.
- [24] Posamentier H W, Allen G P, James D P. Forced regressions in a sequence stratigraphic framework: concepts, examples, and exploration significance[J]. *AAPG Bulletin*, 1992, 76(11): 1687-1709.
- [25] Vail P R, Mitchum R M, Jr, Thompson S III. Seismic stratigraphy and global changes of sea level: Part 4. Global cycles of relative changes of sea level.: Section 2. Application of seismic reflection configuration to stratigraphic interpretation[M]//PAYTON C E. *Seismic Stratigraphy—Applications to Hydrocarbon Exploration*. Tulsa: AAPG Memoir, 1977: 83-97.
- [26] 王存志. 渤西地区明下段地震层序地层研究[J]. *中国海上油气(地质)*, 1998, 12(1): 65-68. [Wang Cunzhi. Seismic sequence stratigraphy study of lower member in the Minghuazhen Formation in western Bohai Bay Basin[J]. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 1998, 12(1): 65-68.]
- [27] 王文娟, 李刚, 杨长青, 等. 东海陆架盆地地震层序特征及地质属性[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2013, 33(3): 117-122. [Wang Wenjuan, Li Gang, Yang Changqing, et al. Characteristics of seismic sequences in the East China Sea shelf basin and their geological attributes[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2013, 33(3): 117-122.]
- [28] 王永刚, 宋建国, 徐春明. 基于地震层序模型的地震资料高分辨率处理方法[J]. *中国海上油气(地质)*, 2000, 14(5): 358-362. [Wang Yonggang, Song Jianguo, Xu Chunming. High resolution processing of seismic data based on a seismic sequence model[J]. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 2000, 14(5): 358-362.]
- [29] 张国华, 张建培. 东海陆架盆地构造反转特征及成因机制探讨[J]. *地学前缘*, 2015, 22(1): 260-270. [Zhang Guohua, Zhang Jianpei. A discussion on the tectonic inversion and its genetic mechanism in the East China Sea shelf basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2015, 22(1): 260-270.]
- [30] 武法东, 张燕梅, 周平, 等. 东海陆架盆地第三系沉积—构造动力背景分析[J]. *现代地质*, 1999, 13(2): 157-161. [Wu Fadong, Zhang Yanmei, Zhou Ping, et al. Tertiary basin setting analysis and sedimentary dynamics of the East China Sea shelf basin[J]. *Geoscience*, 1999, 13(2): 157-161.]
- [31] 林畅松, 刘景彦, 张英志, 等. 构造活动盆地的层序地层与构造地层分析——以中国中、新生代构造活动湖盆分析为例[J]. *地学前缘*, 2005, 12(4): 365-374. [Lin Changsong, Liu Jingyan, Zhang Yingzhi, et al. Sequence stratigraphy and tectono-stratigraphic analysis of tectonically active basins: A case study on the Cenozoic-Mesozoic lacustrine basins in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(4): 365-374.]
- [32] 冯晓杰, 蔡东升. 东海陆架盆地中生代构造演化对烃源岩分布的控制作用[J]. *中国海上油气*, 2006, 18(6): 372-375. [Feng Xiaojie, Cai Dongsheng. Controls of Mesozoic and Cenozoic tectonic evolution on source rock distribution in East China Sea shelf basin[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2006, 18(6): 372-375.]
- [33] 杨长清, 杨传胜, 李刚, 等. 东海陆架盆地南部中生代构造演化与原型盆地性质[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2012, 32(3): 105-111. [Yang Changqing, Yang Chuansheng, Li Gang, et al. Mesozoic tectonic evolution and prototype basin characters in the southern East China Sea shelf basin[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2012, 32(3): 105-111.]
- [34] 祝建军, 王琪, 梁建设, 等. 东海陆架盆地南部新生代地质结构与构造演化特征研究[J]. *天然气地球科学*, 2012, 23(2): 222-229. [Zhu Jianjun, Wang Qi, Liang Jianshe, et al. Cenozoic geological structure and tectonic evolution of southern East China Sea shelf basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2012, 23(2): 222-229.]
- [35] MacEachern J A, Bann K L. The role of ichnology in refining shallow marine facies models[M]//Hampson G J, Steel R J, Burgess P M, et al. *Recent Advances in Models of Siliciclastic Shallow-Marine Stratigraphy*. SEPM Special Publication, 2008.
- [36] 于兴河, 李胜利, 李顺利. 三角洲沉积的结构—成因分类与编图方法[J]. *沉积学报*, 2013, 31(5): 782-797. [Yu Xinghe, Li Shengli, Li Shunli. Texture-genetic classifications and mapping

- methods for deltaic deposits [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(5): 782-797.]
- [37] Pritchard D W. What is an estuary: physical viewpoint[M]//Lauff G H. *Estuaries*. Washington, DC: American Association for the Advancement of Science, 1967: 149-176.
- [38] Boyd R, Dalrymple R, Zaitlin B A. Classification of clastic coastal depositional environments[J]. *Sedimentary Geology*, 1992, 80(3/4): 139-150.
- [39] 朱伟林, 吴景富, 张功成, 等. 中国近海新生代盆地构造差异性演化及油气勘探方向[J]. *地学前缘*, 2015, 22(1): 88-101.
- [Zhu Weilin, Wu Jingfu, Zhang Gongcheng, et al. Discrepancy tectonic evolution and petroleum exploration in China offshore Cenozoic basins [J]. *Earth Science Frontiers*, 2015, 22(1): 88-101.]
- [40] 张建培, 张田, 唐贤君. 东海陆架盆地类型及其形成的动力学环境[J]. *地质学报*, 2014, 88(11): 2033-2043. [Zhang Jianpei, Zhang Tian, Tang Xianjun. Basin type and dynamic environment in the East China Sea shelf basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2014, 88(11): 2033-2043.]

Oligocene Sequence Framework and Depositional Response in the Xihu Depression, East China Sea Shelf Basin

YU XingHe¹, LI ShunLi², CAO Bing³, HOU GuoWei³, WANG YaFeng¹, HUANGFU ZhiYuan¹

1. School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. College of Geological Sciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

3. China National Offshore Oil Corporation Limited Shanghai Branch, Shanghai 200032, China

Abstract: The East China Sea Shelf Basin (ECSSB) is the largest sedimentary basin in offshore China, which contains the largest hydrocarbon bearing unit of Xihu Depression. However, after years of exploration practices, the Huagang Formation in Oligocene has been proven as a major gas reservoir, which has undergone controversy on subdivision of sequence stratigraphy and types of sedimentary systems for a long time. Combining with basin structure and tectonic context, this study subdivides the Oligocene into 5 third-order sequences and 12 system tracts in the Xihu Sag on the basis of base level cycle analysis, core calibration, and seismic reflection features. Furthermore, sedimentary environments were identified by core description, sedimentary structures, trace fossils, and geochemical analysis. Typical sedimentary sequences were established including fluvial, delta, tidal estuary, and beach-bar systems. Sedimentary system types and distribution have been clarified of the Huagang Formation in the Xihu Sag. In the Oligocene, the Xihu Sag was in a transitional environment (mainly in lacustrine environment), which experienced two major times of marine transgressions (around 29.5 Ma and 24.3 Ma). Depositional systems were diverse from south to north, mainly consisting of deltas in the short axis from east to west, tidal estuaries in the south, and beach-bars in the northeast gentle slope. Finally, tectonic-sedimentary genetic model has been established in the ECSSB, showing basin tectonic setting and depositional response under the context of rifting-depression transition and marine-continental alternation.

Key words: Xihu Sag; Huagang Formation; sequence subdivision; depositional response