

西湖凹陷西斜坡 K 地区古近系始新统宝石组 —平湖组层序格架及沉积模式

谢才铸^{1,2}, 王健伟³, 严曙梅³, 刘舒³, 傅恒², 韩建辉², 孙莉³, 左一苇³,
郑欣³, 于春野³, 陈生华², 史俊鹏², 苏芳芳²

(1. 广州海洋地质调查局, 广东 广州 511458; 2. 成都理工大学 能源学院, 四川 成都 610059; 3. 中国石化上海海洋油气分公司 勘探开发研究院, 上海 200120)

摘要:古近系始新统宝石组、平湖组是东海陆架盆地主力产层。利用岩心、钻井、三维地震等资料,以西湖凹陷西斜坡带 K 地区为例,结合同期全球海平面变化,重新划分古近系始新统宝石组、平湖组层序,分析内部沉积特征,探讨层序发育的控制因素。结果表明:西湖凹陷 K 地区宝石组、平湖组划分为 2 个二级层序,宝石组为 1 个二级层序,内部可划分为 4 个三级层序;平湖组为 1 个二级层序,内部可划分为 5 个三级层序,每个三级层序内部发育海侵体系域与高位体系域。K 地区宝石组、平湖组沉积模式可划分 3 种,低位期,前一个高位体系域暴露剥蚀夷平,发育层序界面;海侵期,全区被海水淹没,内部发育退积型前三角洲;高位期,海平面开始下降,受潮汐作用影响,内部发育进积型潮控三角洲,潮汐作用强烈地区还发育潮坪沉积。K 地区宝石组、平湖组三级层序及其内部沉积特征发育的主要控制因素是构造运动、海平面升降、物源供给及古气候。该结果为西湖凹陷的油气勘探提供地质依据。

关键词:西湖凹陷;宝石组;平湖组;层序格架;体系域;沉积模式;古近系;始新统

中图分类号:TE122.2;P618.13 **文献标识码:**A **文章编号:**2095-4107(2025)04-0062-18

0 引言

东海陆架盆地是中、新生代形成的叠合含油气盆地,发育在元古界、古生界复杂基底上,整体形态呈菱形^[1-5]。西湖凹陷位于东海陆架盆地东北部,是盆地内部油气含量最丰富的构造带,也是东海陆架盆地油气勘探开发重点区块^[6-9]。古近系始新统是西湖凹陷油气储量较为丰富的地层。对西湖凹陷始新统平湖组和宝石组层序地层及沉积环境开展研究,层序方面,宝石组、平湖组分别划分为 1 个二级层序的方案已被广泛接受,但对每个二级层序内部的三级层序划分出现多种方案。ABBAS A 等^[10]结合三维地震、钻井、岩心等资料,研究西湖凹陷西斜坡层序地层,将平湖组划分为 3 个三级层序。周瑞琦等^[11-12]结合井震数据,对西湖凹陷花港组及平湖组划分三级层序,平湖组划分为 3 个三级层序。基于高精度三维地震、钻井岩心及锆石测年等资料,赵谦^[13]将西湖凹陷西斜坡带平湖组划分为 3 个三级层序。人们研究同期全球海平面变化及其对三级层序发育时间和空间尺度的影响不充分,研究区宝石组、平湖组三级层序划分出现差异。平湖组沉积期,全球冰期的出现使海平面变化更为频繁,三级层序发育时间更短,发育频率更高。以西湖凹陷西斜坡带 K 地区为例,根据井震资料,笔者结合同期全球海平面变化,重新划分古近系始新统宝石组、平湖组层序,分析内部沉积特征,探讨层序发育的控制因素,为西湖凹陷的油气勘探提供地质依据。

1 区域地质背景

东海陆架盆地位于欧亚板块东部边缘,主要受始新世—渐新世菲律宾板块向欧亚板块由南向北斜向

收稿日期:2024-04-06;编辑:关开澄

基金项目:中国石化上海海洋油气分公司科技攻关项目(3400000222-ZC0613-0008);广州海洋地质调查局地质调查项目(DD20230501);广州海洋地质调查局地质调查项目(DD20230107)

作者简介:谢才铸(1999—),男,硕士,助理工程师,主要从事沉积学、石油地质学方面的研究。

通信作者:王健伟, E-mail: wjw_shhy@sinopec.com

俯冲的影响, 盆地整体处于(琉球)弧后扩张状态, NE 向张裂活动明显, 形成东西分带、南北分块的构造格局^[14-16]。西湖凹陷属于东部拗陷带内的次一级凹陷, 东邻钓鱼岛隆褶带, 西部从南到北分别与渔山低凸起、台北凹陷、海礁凸起、长江凹陷和虎皮礁凸起相接, 北、南分别与福江凹陷和钓北凹陷相连^[17-20]。西湖凹陷内部由东向西划分为 5 个次一级构造单元, 分别为东部断阶带、东次凹、中央反转构造带、西次凹和西部斜坡带^[21]。K 地区位于西湖凹陷西部斜坡带(见图 1)。

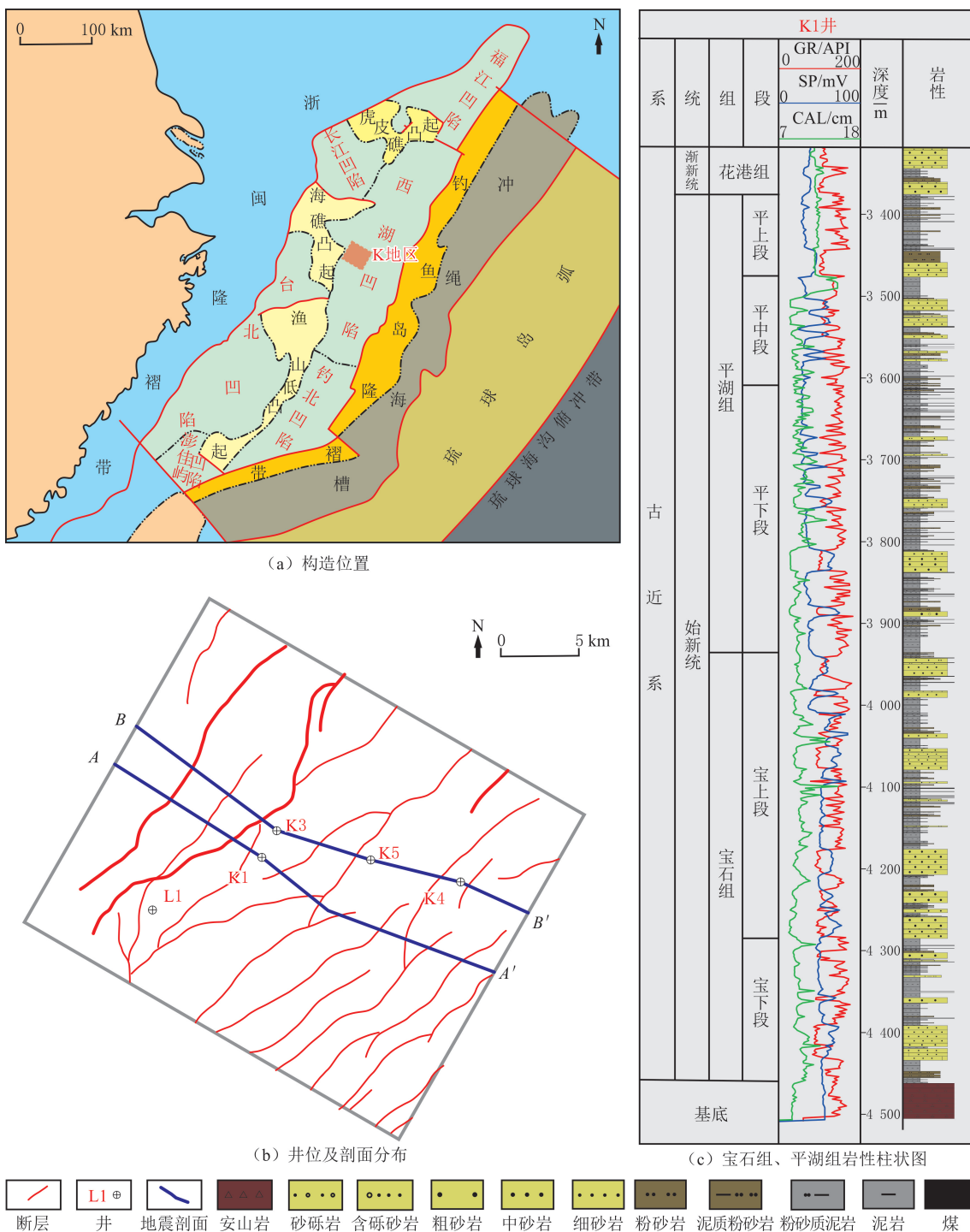


图 1 西湖凹陷 K 地区构造位置及宝石组、平湖组地层柱状图

Fig. 1 Tectonic location of K Area and stratigraphic histogram of Baoshi and Pinghu Formation in Xihu Sag

东海陆架盆地新生代沉积演化受整体构造沉降(断陷—拗陷)和全球海平面变化控制, 分阶段由陆相

变为海陆交互相—海相^[22-27]。东海陆架盆地新生代构造及沉积演化明显叠加新生代全球海平面变化影响,整体拉张背景下,盆地新生代重要构造—沉积界面对应新生代全球气候变化引起的全球海平面显著下降(海平面降幅多大于100 m),为东海陆架在冰期暴露后形成的构造—沉积剥蚀夷平面。这些对东海陆架盆地构造—沉积演化有重要影响的“构造运动”共有7次(见图2)^[28-30]。西湖凹陷的主要断陷层序始于古新世,受板块碰撞和俯冲的影响,东海陆架盆地(西湖凹陷)从裂陷开始主要经历4次区域性的构造运动,由老到新分别是初始裂陷阶段、拗陷阶段、构造反转阶段、稳定沉降阶段^[13]。

古新世末期瓯江运动后,东海陆架盆地进入强烈断陷期,内部由一系列的隆起和凹陷组成,欧亚板块与太平洋板块的作用导致东海陆架盆地周缘局部隆起的抬升、火山作用和盆地内部的伸展。在此影响下,西湖凹陷与周缘海礁隆起、渔山低凸起和东部的钓鱼岛隆褶带共同形成典型的半封闭海湾环境^[31](见图3)。西湖凹陷西斜坡带位于东海陆架海湾西侧滨岸,宝石组、平湖组沉积期为海陆过渡带沉积,同时,受河流作用及潮汐作用影响。海陆过渡相沉积明显受相对海平面变化作用的控制,在海平面上升和下降阶段潮汐作用和河流作用的相对强弱变化显著。

受构造特征及后期剥蚀的影响,K地区始新统宝石组、平湖组由南东向北西方向分为低、中、高带,厚度逐渐减小。地震反射特征显示,宝石组为一套低频连续性差的弱反射,平湖组为一套中频连续性好的强反射,二者以明显的微角度不整合面为界。

宝石组与下伏基底(高带)或瓯江组(中—低带)呈(微)角度不整合或平行不整合(地震 T_4^0),与上覆平湖组呈微角度不整合或平行不整合接触(地震 T_3^4)。古生物特征显示,时代属始新世卢泰特期^[31](见图2)。宝石组在高带2口井钻穿,中带3口井钻遇,低带多未钻遇,自下而上分为宝下段和宝上段(见图1)。宝石组发育三角洲沉积体系,岩性组合为灰、绿色泥岩夹棕黄色粉砂质泥岩、泥质粉砂岩,偶夹薄煤层(0.5~1.0 m),与黄色细砂岩、含砾粗砂岩组成4个下细上粗的(三级)旋回。

平湖组与下伏宝石组呈微角度不整合或平行不整合接触(地震 T_3^4),与上覆花港组呈微角度不整合或平行不整合(地震 T_3^0)。古生物特征显示,时代为始新世巴顿期—普利亚本期(见图2)。平湖组在高带探井基本全部钻穿,中、低带探井基本钻遇,自下而上分为平下段、平中段和平上段(见图1)。平湖组主要发育三角洲—湖坪沉积体系,岩性组合为灰、绿色泥岩夹粉砂质泥岩、泥质粉砂岩及薄煤层,与黄色细—中砂岩、含砾中砂岩组成5个下细上粗的(三级)旋回,广泛分布,厚度为450~1 000 m。

2 层序格架

综合年代地层(同期全球海平面变化)、岩石地层(生物地层)及地震地层研究,结合沉积序列及区域构造运动分析,根据同期全球二级、三级海平面变化,将K地区宝石组、平湖组划分为2个二级层序、9个三级层序。宝石组1个二级层序内部可划分为4个三级层序,平均时限为1.65 Ma。平湖组1个二级层序内部可划分为5个三级层序,平均时限为1.46 Ma。每个三级层序内部,可进一步划分为海侵体系域(TST)和高位体系域(HST)。K地区宝石组、平湖组沉积期位于陆架坡折带之上,低位体系域(LST)为暴露剥蚀夷平期,是形成三级层序界面(侵蚀不整合)的时期。

2.1 层序界面

K地区宝石组、平湖组包含3个二级层序界面、7个三级层序界面。

2.1.1 二级

二级层序界面(Supersequence Boundary,简称SSB)的形成受控于二级海平面下降与区域构造运动,是由两种因素叠加形成的隆升剥蚀不整合界面。通常,界面上下地层接触关系为平行不整合或微角度不整合,代表的沉积间断为0.5~1.0 Ma。K地区宝石组、平湖组3个二级层序界面从老到新依次为SSBT₄⁰、SSBT₃⁴和SSBT₃⁰(见图4和图5)。

SSBT₄⁰(地震界面 T_4^0)为二级层序界面(隆升不整合),对应伊普里斯晚期的显著海退(海平面约下降130 m,持续0.5 Ma),对东海陆架的剥蚀夷平形成 T_4^0 ,为古近系主伸展(裂陷二幕)末期沉积填的底界面—裂陷沉降不整合面,与下伏地层(基底或瓯江组)呈区域性不整合面—裂陷沉降不整合面,存在

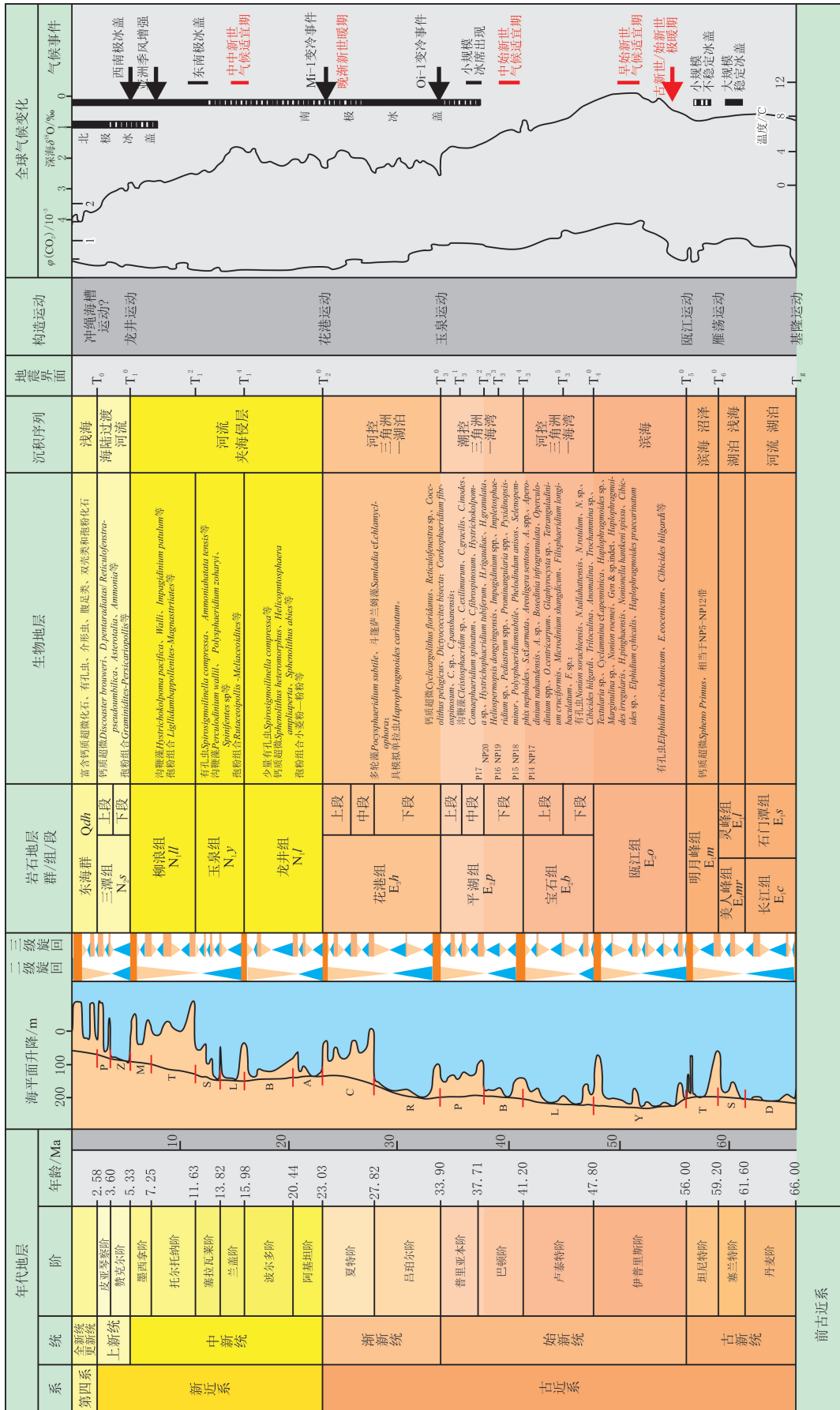


图 2 东海陆架盆地新生代构造沉积演化特征 (据文献[32-33]修改)
 Fig. 2 Evolution characteristics of Cenozoic tectonic sediments in the East China Sea Shelf Basin (modified by references[32-33])

1.0~18.2 Ma 以上的沉积间断(见图 6)。该界面对应瓯江运动末期,区域动力学背景指示印度板块与欧亚大陆碰撞,盆地构造形变从伸展转向走滑伸展的起始响应^[28-29]。目前,SSBT₄⁰ 仅在高带 K1 和 L1 井钻遇,为前新生界基底(火山岩)\E₂b(碎屑岩)界面,至少存在 18.2 Ma 以上的沉积间断。测井曲线极易识别,界面上下具岩性突变,GR 曲线在界面之下为中—低值锯齿状,界面之上为中—低值指状。电阻率、AC、DEN 和 CNL 曲线有较大变化(见图 4 和图 6)。SSBT₄⁰ 在中带和低带过渡为 E₂o(碎屑岩)\E₂b(碎屑岩)界面,未钻遇。SSBT₄⁰ 在地震剖面上为宝石组底界面反射(T₄⁰),为广泛的上超底削的区域性不整合,断陷不同部位有上超、下超和对下伏层的削蚀、削截及断层破裂的错落现象,区域上较易追踪对比(见图 6)。

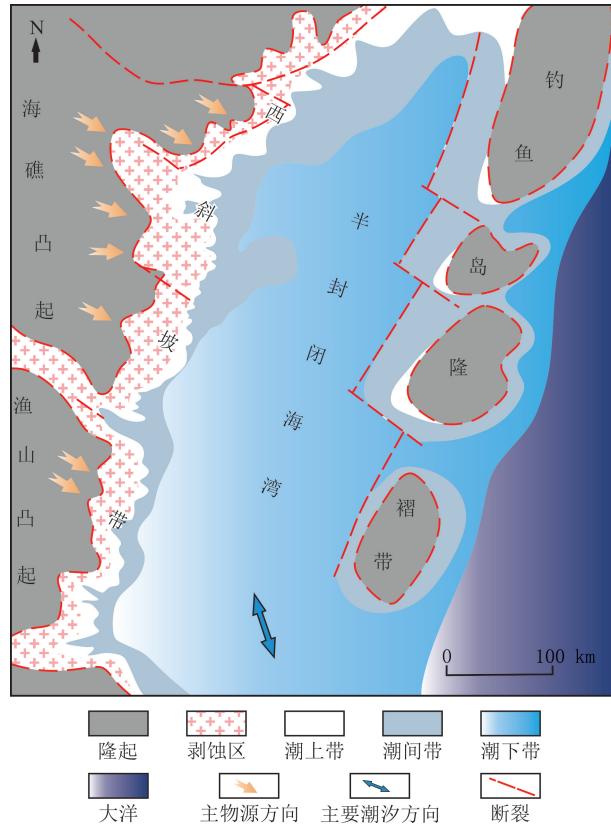


图 3 西湖凹陷宝石组、平湖组沉积时期沉积背景
Fig. 3 Sedimentary setting of the Baoshi Formation and Pinghu Formation in the Xihu Sag

SSBT₃⁴(地震界面 T₃⁴)为二级层序界面(隆升不整合),对应卢泰特晚期—巴顿早期的显著海退(海平面约下降 50 m,持续约为 1.2 Ma),对东海陆架的剥蚀夷平形成 T₃⁴,其间存在约为 1.2 Ma 沉积间断(见图 5)。该界面为宝石组与平湖组分界面(E₂b\E₂p),为弱裂陷沉降不整合面(见图 5)。该界面与下伏宝石组为明显的区域相转换和不整合。界面之下宝石组为弱走滑—最大伸展断陷时期充填沉积,界面之上平湖组开始进入走滑伸展弱断陷充填沉积。SSBT₃⁴ 界面上下发育一次规模较大的二级海退海侵,界面上下岩性岩相的变化明显,界面下伏宝石组发育进积型三角洲平原—前缘砂岩,界面上覆平湖组发育厚度较大的退积前三角洲(粉砂质)泥岩。测井曲线较易识别,GR 曲线在界面之下为低值箱形、指形,界面之上变为中—高值微幅锯齿状。电阻率、AC、DEN 和 CNL 曲线有变化(见图 4 和图 6)。SSBT₃⁴ 在整个工区范围内表现为上超与削截的特征,位于一套强波组底部,其上地震反射能量强,连续性好;其下波组连续性差,同相轴出现合并、分叉的现象较严重。由于 SSBT₃⁴ 界面被断层严重错断,层位连续性较差,对比与追踪有一定难度(见图 5)。

SSBT₃⁰(地震界面 T₃⁰)为二级层序界面(隆升不整合),对应始新世普利亚本末次冰期的显著海退(Oi-1 变冷事件,海平面约下降 100 m),其间存在至少 1.0 Ma 沉积间断。该界面为始新统平湖组与花港

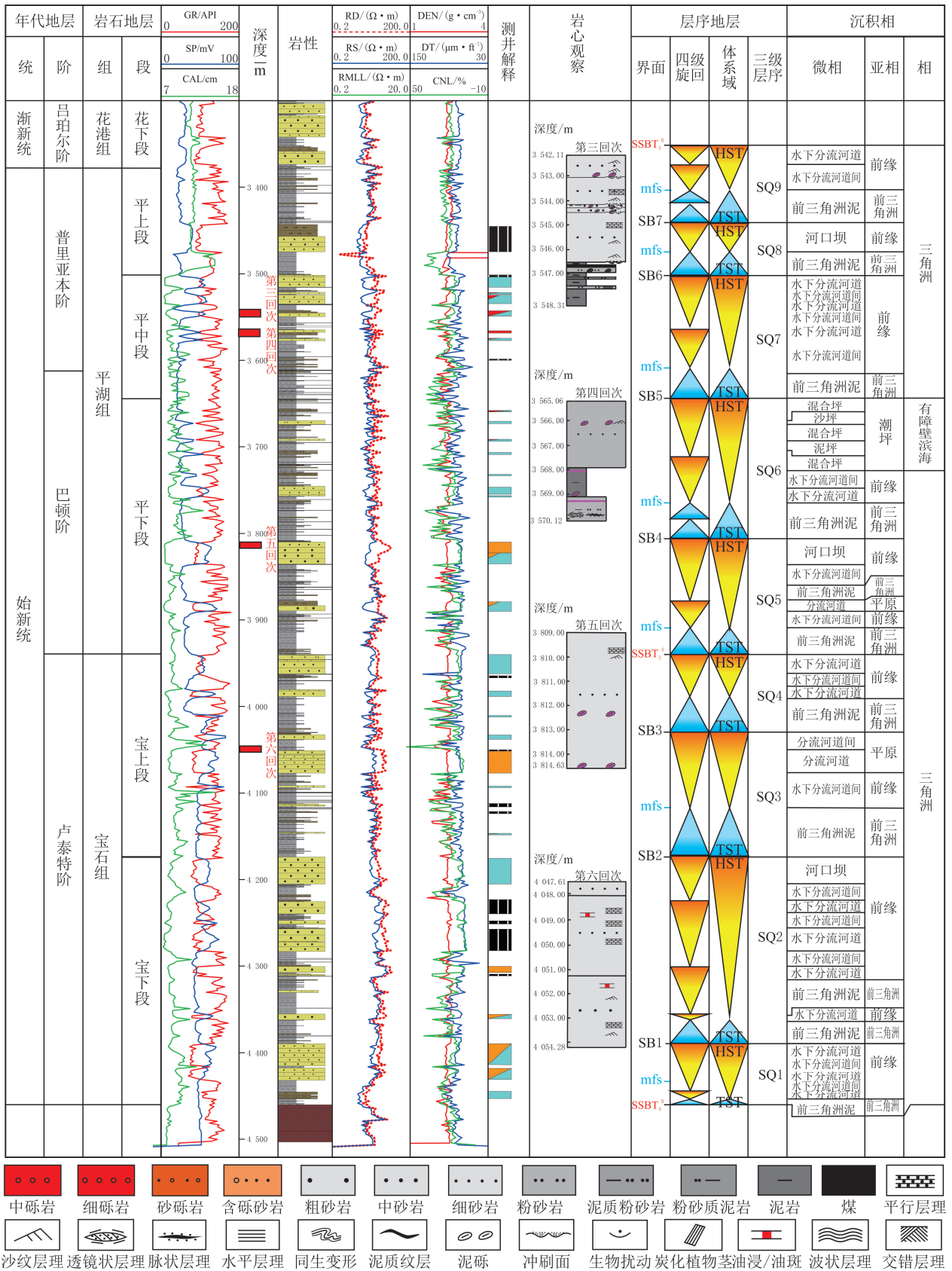


图 4 K1 井宝石组、平湖组单井层序及沉积相综合柱状图
 Fig. 4 Comprehensive histogram of single well sequence and sedimentary facies of well K1 in Baoshi Formation and Pinghu Formation

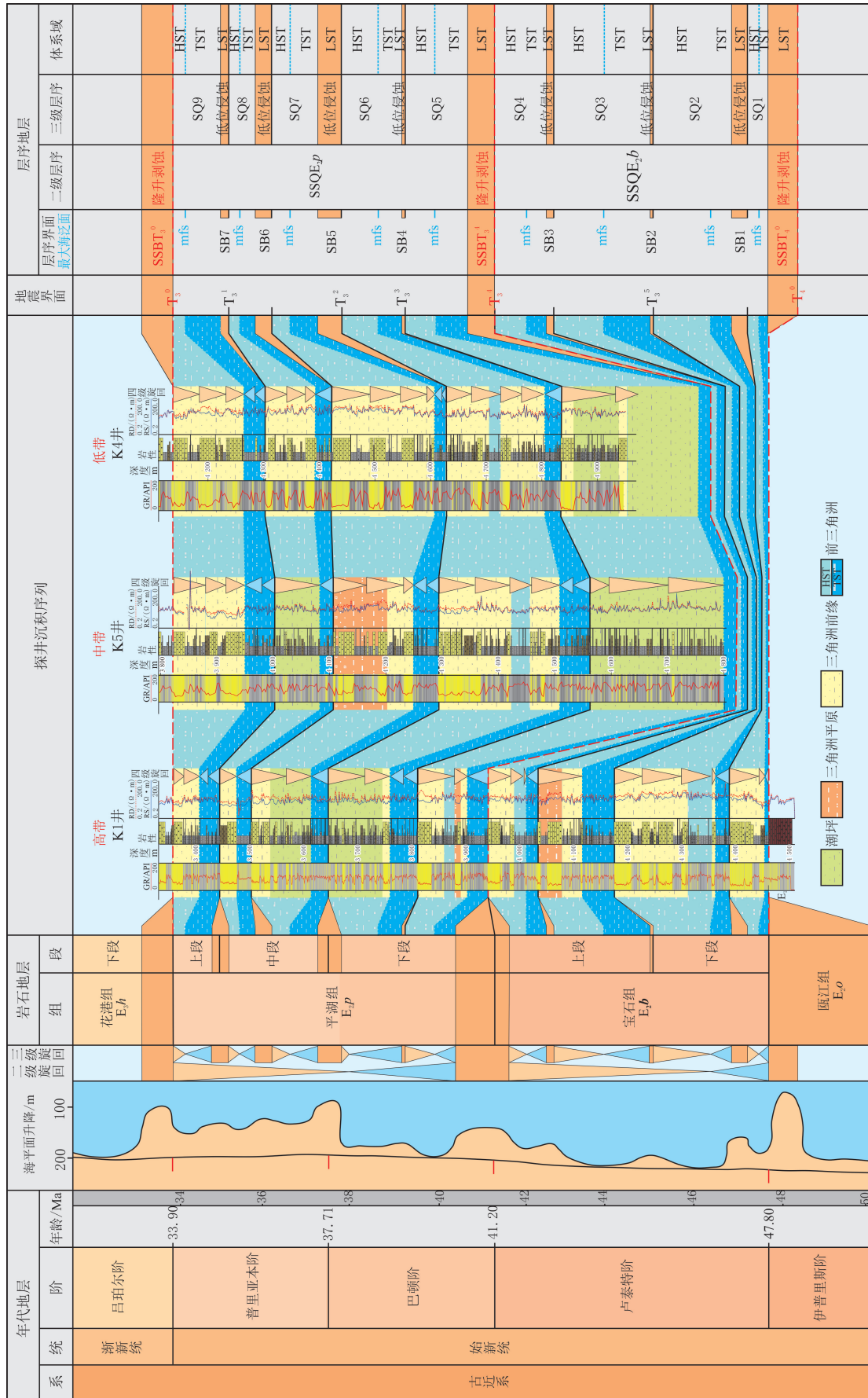


图 6 K 地区宝石组、平湖组层序划分

Fig. 6 Sequence division of the Baoshi Formation and Pinghu Formation in the K Area

组分界面($E_2p \setminus E_3h$),是西湖凹陷古近系断陷盆构造层序和坳陷盆构造层序分界的一级构造不整合面,表现为掀斜、顶削蚀、大规模超覆特征(见图5),对应玉泉运动,动力学机制为古近系始新世末菲律宾板块楔入太平洋板块和欧亚板块之间,导致东海盆地整体抬升,海水退出西湖凹陷并开始渐新世花港组大型坳陷湖盆的沉积充填^[28-29]。界面下伏始新统平湖组(海湾)三角洲平原—前缘(含砾)砂岩,上覆花港组(湖泊)前三角洲(粉砂质)泥岩,测井曲线较易识别,GR曲线在界面之下为低值箱形、指形,界面之上变为中—高值微幅锯齿状。电阻率、AC、DEN和CNL曲线有变化(见图4和图6)。SSBT₃⁰在工区内为强振幅—高连续性地震反射,与下伏反射波组呈削截关系,较易对比追踪(见图5)。

2.1.2 三级

三级层序界面(Sequence Boundary,简称SB),是海平面下降到坡折带之下的低位期后,在陆架上剥蚀夷平面形成的层序侵蚀不整合界面,叠加新层序的海侵上超。垂向上表现为岩性岩相突变,多为界面下伏沉积水体相对较浅的岩相(三角洲平原—前缘或潮坪)突变为上覆沉积水体相对较深的岩相(前三角洲)^[34-36]。K地区宝石组、平湖组三级层序界面为侵蚀不整合,为砂岩\泥岩的岩性突变面,界面之下为三角洲平原—前缘或潮坪砂岩或砂泥互层,界面之上为前三角洲泥岩;钻井、测井和地震较易识别。K地区宝石组、平湖组7个三级层序界面从老到新依次为SB1、SB2、SB3、SB4、SB5、SB6和SB7(见图4-6)。

SB1(SQ1\SQ2)为三级层序界面侵蚀不整合界面,对应卢泰特期第1次三级海退(海平面下降30~60 m,持续约为0.5 Ma),为宝下段内部分界面,也是三级层序SQ1和SQ2的分界面。界面下伏SQ1高位体系域进积三角洲平原—前缘砾岩或砂岩,界面上覆SQ2海侵体系域退积前三角洲泥岩,为岩性岩相转换面。该界面测井曲线表现为突变,极易识别。界面之下GR曲线为低值指状尖峰、箱形,界面之上突变增大为高值微幅齿状。电阻率曲线有变化(见图4和图6)。SB1地震反射特征为中振幅、中连续,区域上较易对比追踪(见图5)。

SB2(SQ2\SQ3)为三级层序界面侵蚀不整合界面,对应卢泰特期第2次三级海退(海平面下降30~50 m,持续约为0.1 Ma),为宝下段和宝上段的分界面,也是三级层序SQ2和SQ3的分界面。界面下伏宝下段顶部SQ2高位体系域进积三角洲平原—前缘砾岩或砂岩,界面上覆宝上段底部SQ3海侵体系域退积前三角洲泥岩,为岩性岩相转换面。该界面测井曲线表现为突变,极易识别。界面之下GR曲线为低值指状尖峰、箱形、漏斗形,界面之上突变增大为高值微幅齿状。电阻率曲线有变化(见图4和图6)。SB2地震反射特征为中—强振幅、中—好连续,区域上较易对比追踪(见图5)。

SB3(SQ3\SQ4)为三级层序界面侵蚀不整合界面,对应卢泰特期第3次三级海退(海平面约下降50 m,持续约为0.2 Ma),为宝上段内部分界面,也是三级层序SQ3和SQ4的分界面。界面下伏SQ3高位体系域进积三角洲平原—前缘砾岩或砂岩,界面上覆SQ4海侵体系域退积前三角洲泥岩,为岩性岩相转换面。该界面测井曲线表现为突变,极易识别。界面之下GR曲线为低值指状尖峰、箱形、漏斗形,界面之上突变增大为高值微幅齿状。电阻率曲线有变化(见图4和图6)。SB3地震反射特征为中振幅、中连续,区域上较易对比追踪(见图5)。

SB4(SQ5\SQ6)为三级层序界面侵蚀不整合界面,对应巴顿期第1次三级海退(海平面下降30~50 m,持续约为0.1 Ma),为平下段内部分界面,也是三级层序SQ5和SQ6分界面。界面SQ5高位体系域进积受潮汐影响的、三角洲平原—前缘砾岩或砂岩或潮坪砂泥互层,界面上覆平下段底部SQ6海侵体系域退积前三角洲泥岩,为岩性岩相转换面。该界面测井曲线表现为突变,极易识别。界面之下GR曲线为低值指状尖峰、箱形、漏斗形、钟形,界面之上突变增大为高值微幅齿状。电阻率曲线有变化(见图4和图6)。SB4地震反射特征为中—强振幅、中连续,区域上较易对比追踪(见图5)。

SB5(SQ6\SQ7)为三级层序界面侵蚀不整合界面,对应巴顿期第2次三级海退(海平面约下降100 m,持续约为0.5 Ma至普里亚本初期),为平下段与平中段的分界面,也是三级层序SQ6和SQ7的分界面。界面下伏平下段顶部SQ6高位体系域进积受潮汐影响的、三角洲平原—前缘砾岩或砂岩或潮坪砂泥互层,界面上覆平中段底部SQ7海侵体系域退积前三角洲泥岩,为岩性岩相转换面。该界面测井曲线表现为突变,极易识别。界面之下GR曲线为低值指状尖峰、箱形、漏斗形、钟形,界面之上突变增大为高值微

幅齿状。电阻率曲线有变化(见图4和图6)。SB5地震反射特征为中—强振幅、中连续,区域上较易对比追踪(见图5)。

SB6(SQ7\SQ8)为三级层序界面侵蚀不整合界面,对应普里亚本期第1次三级海退(海平面下降约20 m,持续约为0.4 Ma),为平中段内部的分界面,也是三级层序SQ7和SQ8的分界面。界面下伏SQ7高位体系域进积受潮汐影响的、三角洲平原—前缘砾岩或砂岩或潮坪砂泥互层,界面上覆SQ8海侵体系域退积前三角洲泥岩,为岩性岩相转换面。该界面测井曲线表现为突变,极易识别。界面之下GR曲线为低值指状尖峰、箱形、漏斗形、钟形,界面之上突变增大为高值微幅齿状。电阻率曲线有变化(见图4和图6)。SB6地震反射特征为连续性较好、可大范围对比追踪的强轴(见图5)。

SB7(SQ8\SQ9)为三级层序界面侵蚀不整合界面,对应普里亚本期第2次三级海退(海平面约下降20 m,持续0.2~0.3 Ma),为平中段与平上段的分界面,也是三级层序SQ8和SQ9的分界面。界面下伏平中段顶部SQ8高位体系域进积受潮汐影响的、三角洲平原—前缘砾岩或砂岩或潮坪砂泥互层,界面上覆平上段底部SQ9海侵体系域退积前三角洲泥岩,为岩性岩相转换面。该界面测井曲线表现为突变,极易识别。界面之下GR曲线为低值指状尖峰、箱形、漏斗形、钟形,界面之上突变增大为高值微幅齿状。电阻率曲线有变化(见图4和图6)。SB7地震反射特征为中—强振幅、中连续,区域上较易对比追踪(见图5)。

2.2 层序内部沉积充填特征

K地区宝石组、平湖组三级层序从东南低带到西北高带逐渐变薄或缺失。高带紧邻大陆边缘,靠近西部物源区,层序格架内的沉积充填主要受缓坡和下伏断阶影响,可容纳空间较小或为过路沉积;同时,存在低位期剥蚀作用,残留的三级层序较薄或缺失,主要发育高位体系域三角洲平原。中低带层序格架内的沉积充填主要受控于断控坡折,容纳空间较高带的大,层序内部体系域构成齐全,发育海侵体系域和高位体系域。海侵体系域为退积前三角洲泥质沉积,高位体系域为进积型三角洲平原—前缘砾岩、砂岩与泥岩或潮坪薄层砂泥互层沉积(见图7-8)。宝石组发育4个三级层序,层序发育和内部体系域沉积相展布,受同期4次三级海平面变化和同沉积生长断裂形成的多级断坡、垒堑控制。海侵体系域全区发育退积型前三角洲,测井曲线SP与GR曲线相对高值且呈顺直状或微幅齿状(见图4和图6)。地震反射有明显特征(见图7)。高位体系域主要发育进积型三角洲平原—前缘。高位期,三角洲平原局限分布在西北高带,岩性为杂色砾岩与灰白色砂岩互层;大部分地区被三角洲前缘所覆盖,发育分流河道(间)和河口坝等微相。测井曲线SP与GR曲线为相对低值波动的锯齿状及指状尖峰,电阻率呈锯齿状(见图4和图6)。地震剖面上反射明显(见图7)。潮坪主要发育在宝上段SQ4高位体系域局部地区,反映宝石组从下至上潮汐作用逐渐增强的特征(见图7)。

平湖组发育5个三级层序,层序发育和内部体系域沉积相展布,主要受同期5次三级海平面变化、原始缓坡型地貌和多级断阶或垒堑的控制。海侵体系域全区发育退积型前三角洲,测井曲线SP与GR曲线为相对高值且呈顺直状或微幅齿状(见图4和图6)。地震反射特征明显(见图7)。高位体系域发育进积型三角洲平原—前缘和潮坪。测井曲线与地震反射特征明显(见图4和图6-7)。高位期,三角洲平原局限分布在西北高带,大部地区被三角洲前缘覆盖,发育分流河道(间)和河口坝等微相(见图7)。三角洲平原杂色砾岩与灰白色砂岩互层,分选差,砾石以次棱—次圆为主,可见砾岩定向排列,发育冲刷面^[37],受潮汐作用影响发育脉状、波状和透镜状等潮汐层理(见图9(a))。三角洲前缘灰白色砂岩与浅灰、棕褐色泥岩互层,一般不含砾石,但可见泥砾,发育平行层理、水平层理和砂纹层理(见图9(b))。潮坪主要发育于平下段SQ5、SQ6高位体系域,规模较大,连片性较好,平中段—平上段高位体系域潮坪也发育,但规模逐渐减少并零星分布(见图8),反映平湖组从平下段沉积期高位体系域二级海侵叠加三级海退,到平中段—平上段沉积期高位体系域二级海退叠加三级海退沉积背景的变化。潮坪沉积为灰色、灰绿色砂岩与紫红泥岩互层,发育脉状、波状和透镜状等潮汐层理(见图9(c))。

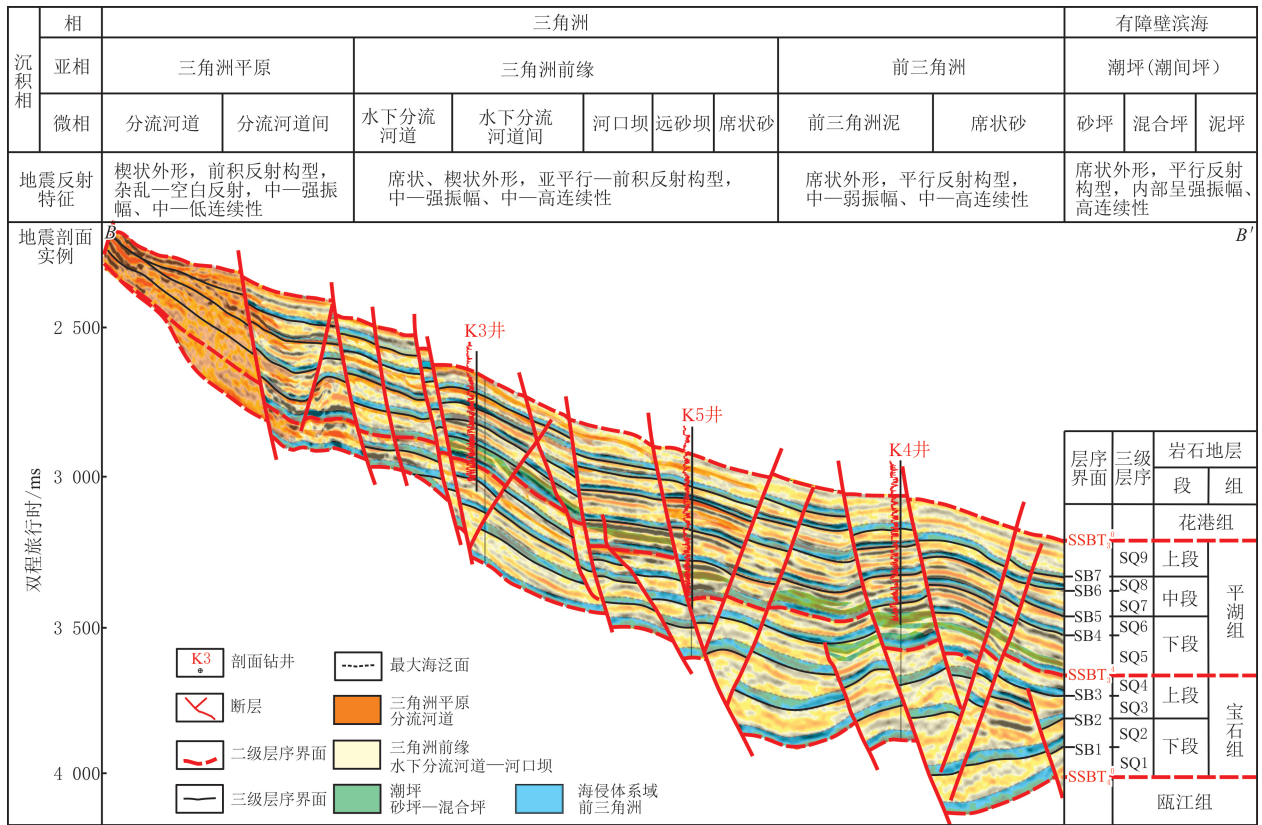


图 7 K 地区宝石组、平湖组层序格架内沉积相地震反射特征

Fig. 7 Seismic reflection characteristics of sedimentary facies in the sequence lattice of the Baoshi Formation and Pinghu Formation in the K Area

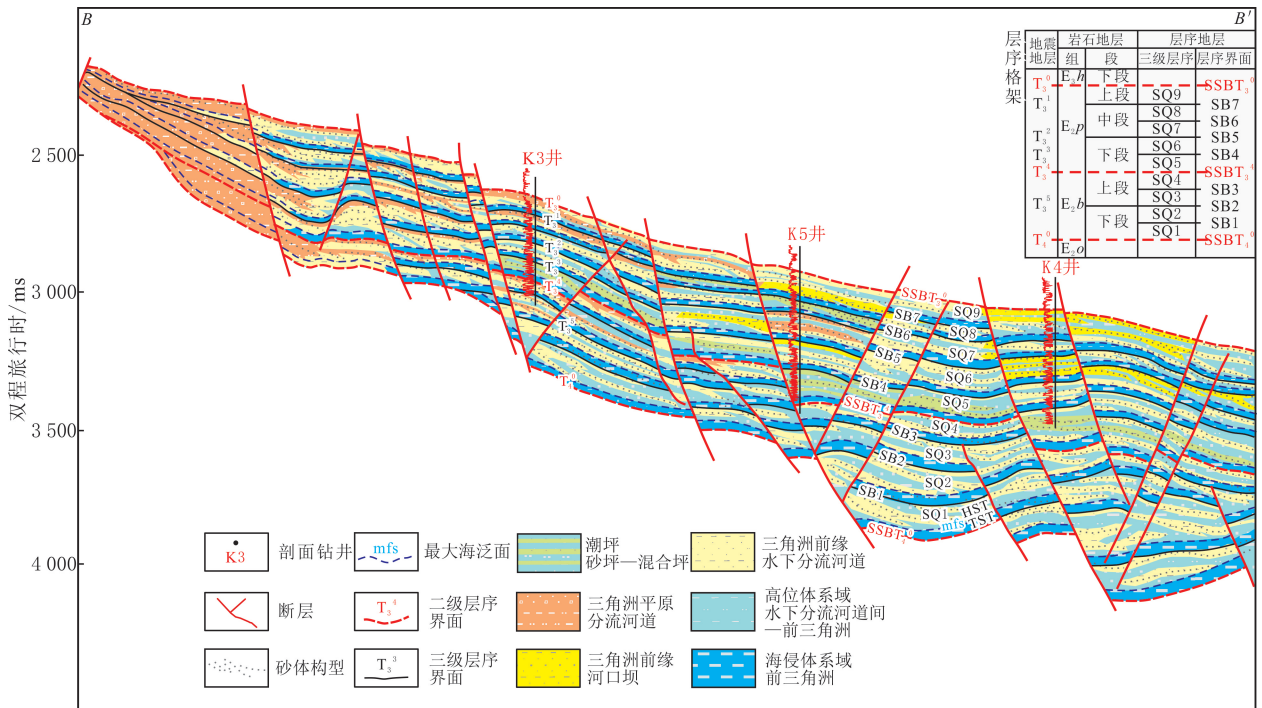


图 8 K 地区宝石组、平湖组地震层序沉积相剖面

Fig. 8 Seismic sequence sedimentary facies profile of the Baoshi Formation and Pinghu Formation in the K Area

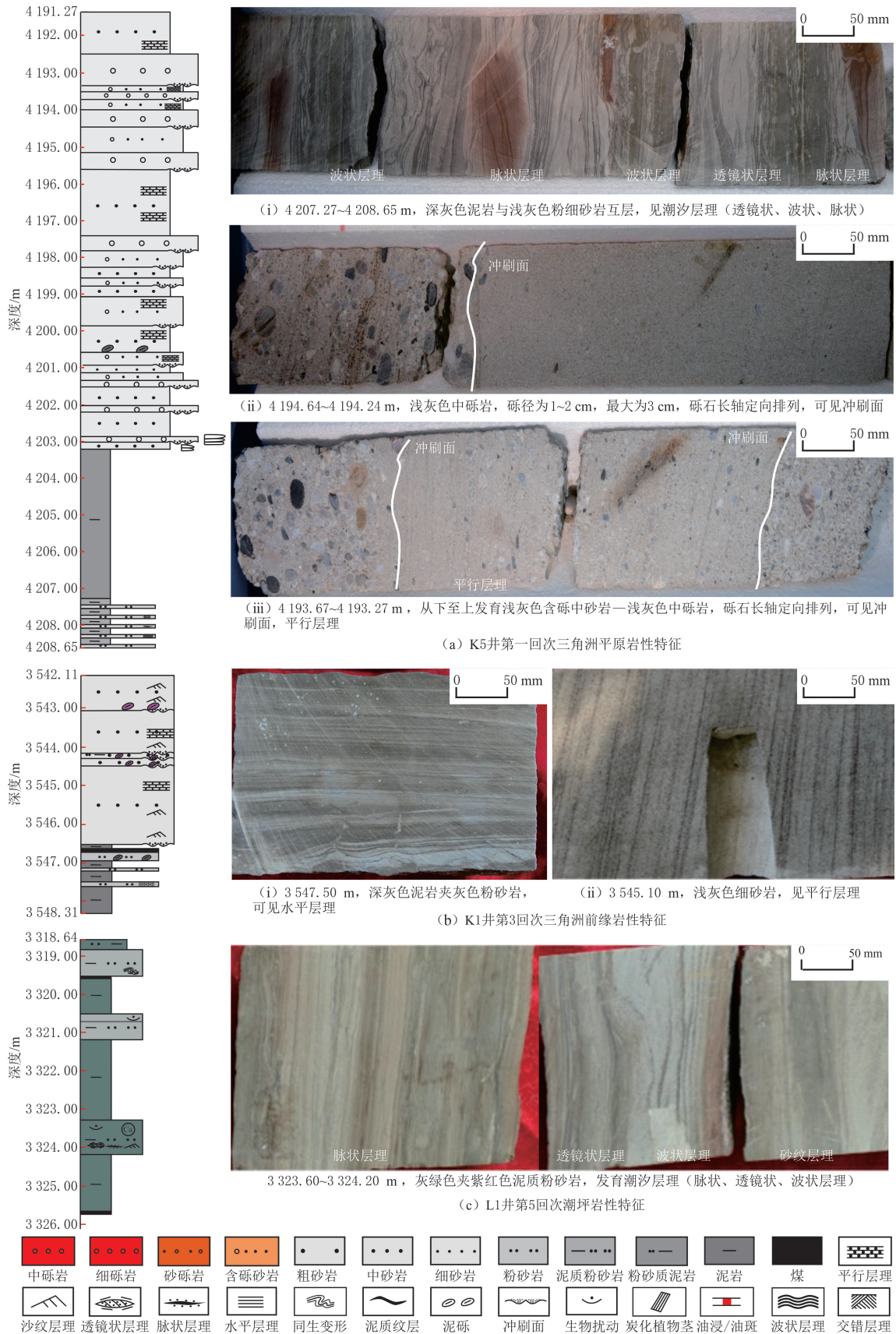


图 9 K 地区宝石组、平湖组典型岩心照片

Fig. 9 Typical core photos of the Baoshi Formation and Pinghu Formation in the K Area

3 沉积模式及主控因素

3.1 沉积模式

根据偏心率中、长周期控制的三级海平面变化,K 地区宝石组、平湖组三级沉积模式可归纳为 3 种。

3.1.1 低位体系域(平面图为 SQ9—TST)

低位体系域发育期,海平面下降到陆架坡折带之下①→②→③,海平面约下降 30 m,位于坡折带之上的研究区全部暴露,下伏高位体系域沉积被剥蚀夷平,或为过路沉积,形成三级层序底界面侵蚀不整合界。K 地区全区为剥蚀区,前期高位体系域(水下分流河道间)低地势或形成低位早期(①→②)下切谷及低位晚期(②→③)下切谷充填,形成三级层序底界面(见图 10)。

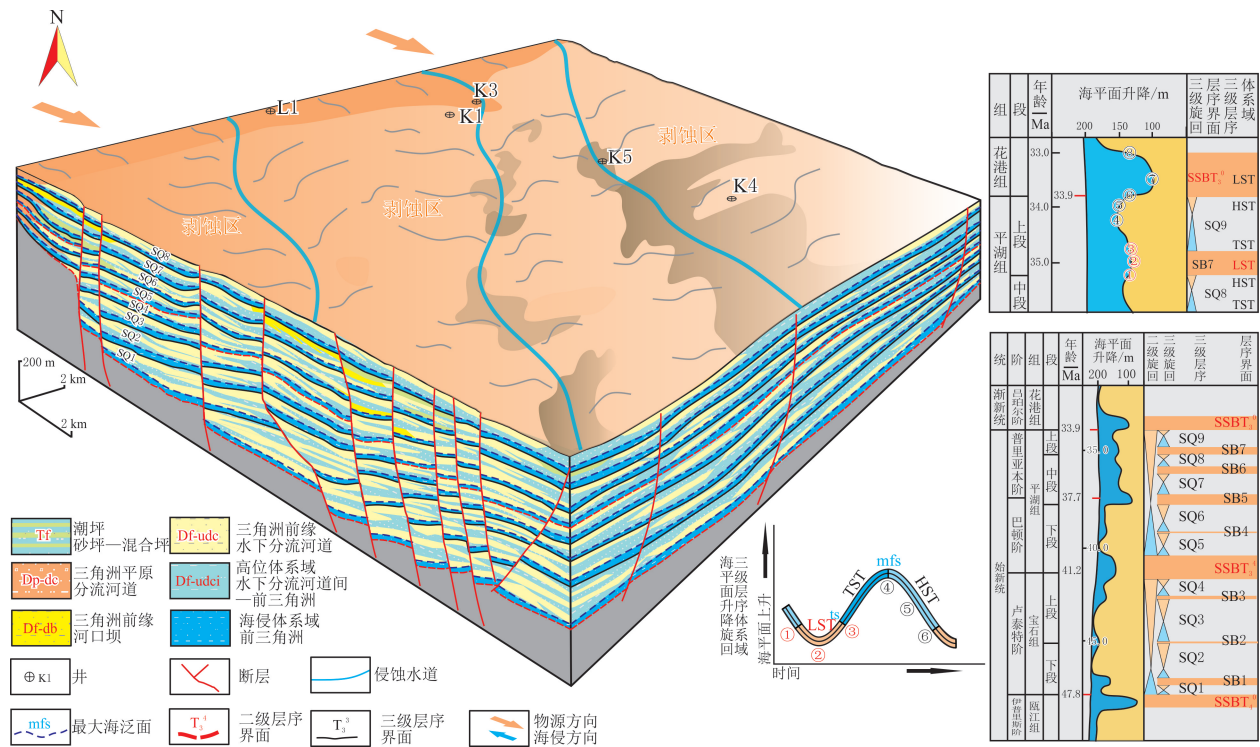


图 10 低位体系域沉积模式

Fig10 Sedimentary pattern of the low-level system

3.1.2 海侵体系域(平面图为 SQ9—TST)

海侵体系域发育期,海平面上升到陆架坡折带之上,从③初始海泛面→④最大海泛面,海平面约上升 30 m,研究区被海水淹没,形成向南开口的海湾(潟湖、内陆棚),西北剥蚀区逐渐缩小,海湾西侧边缘的 K 地区海侵体系域全区为退积型前三角洲泥质沉积(见图 11)。

3.1.3 高位体系域(平面图为 SQ9—HST)

高位体系域发育期,东海陆架盆地,海水开始下降,海平面从④最大海泛面→⑤→⑥陆架坡折带附近,海平面约下降 30 m。西北剥蚀区逐渐扩大,K 地区发育进积潮控辫状河三角洲平原—三角洲前缘—前三角洲,三角洲平原—前缘相带扩大,发育从北向南流向的分流河道—水下分流河道及潮坪砂质、泥质沉积(见图 12)。

3.2 主控因素

构造沉降、全球海平面升降、沉积物供应和气候 4 种因素控制地层单元几何形态、沉积作用和岩性^[38-39]。

3.2.1 构造运动

构造运动对研究区宝石组和平湖组层序发育的控制有二个方面。一方面,区域拉张构造运动形成的断阶斜坡古地貌对沉积物的堆积分布产生影响。始新世初期,东海陆架盆地处于拉张作用下,西湖凹陷

小,为过路不沉积,而剥蚀作用导致高带三级层序发育不全,中低带地貌趋于平缓,加之同沉积断裂形成的断阶,可容纳空间逐渐增大、层序发育趋于完整并逐渐增厚(见图5)。另一方面,始新世发生的三次显著海退和构造运动的共同作用控制二级层序界面形成,进而对研究区宝石组底部、宝石组和平湖组顶部的沉积物发生剥蚀作用。瓯江运动时,盆地构造开始从伸展状态转变为走滑伸展的初始响应,研究区始新统部分地层和古新统在高带被剥蚀,导致始新统宝石组碎屑岩地层超覆在前新生界基底(火山岩)之上,形成区域性的角度不整合。加之伊普里斯晚期的显著海退(海平面下降130 m,持续约为0.5 Ma)对东海陆架的剥蚀夷平,中低带部分被剥蚀,形成区域的二级层序不整合界面SSBT₄⁰。平湖组沉积期,西湖凹陷逐渐由宝石组最大伸展断陷时期过渡到走滑伸展弱断陷充填沉积的开始阶段,卢泰特晚期—巴顿早期的显著海退(海平面下降50 m,持续约为1.2 Ma)对东海陆架的剥蚀夷平,形成大范围区域剥蚀不整合界面,对应二级界面SSBT₃⁴。始新世晚期玉泉运动后,西湖凹陷由断拗转换期开始进入拗陷期,古近系始新世末菲律宾板块楔入太平洋板块和欧亚板块之间,导致东海盆地整体抬升,海水退出西湖凹陷并开始渐新世花港组大型拗陷湖盆的沉积充填。同时,始新世普利亚本末次冰期的显著海退(Oi-1变冷事件,海平面下降100 m)对东海陆架的剥蚀夷平,形成西湖凹陷古近系断陷盆构造层序和拗陷盆构造层序分界的构造不整合面,其间存在至少1.0 Ma沉积间断,对应二级界面SSBT₃⁰(见图2)。

3.2.2 海平面变化、沉积物供给及古气候

海平面变化、沉积物供给及古气候的控制更综合。受古气候影响,宝石组、平湖组沉积期,全球三级海平面变化逐渐趋于频繁,规模逐渐增大,研究区沉积中心发生迁移,三级层序内部各体系域沉积相带的展布明显不同。海侵期,海平面上升至坡折带之上,东海陆架淹没,研究区为退积型前三角洲泥质沉积。由于近源剥蚀区淹没,物源区缩小,物源供给不充分,沉积厚度薄,一般为20~40 m(最厚为80 m)。高位期,东海陆架(K地区)逐渐海退,研究区发育退积型三角洲平原—前缘或潮坪砂泥质沉积。由于近源剥蚀区暴露逐渐加大,物源供给充分,沉积厚度普遍较大,一般为50~120 m(高带)、100~200 m(中带、低带),最厚为285 m。同时,气候控制沉积物类型。研究区宝石组和平湖组发育在潮湿气候条件下,岩心见薄煤层、煤线或炭质泥岩,砂岩、泥岩主要为灰色,推测降雨量充沛;发育河控—潮控三角洲,高位体系域三角洲平原分流河道、三角洲前缘水下分流河道及河口坝砂体大面积分布。

4 油气地质意义

在层序格架约束下,研究目的层的沉积特征并建立沉积充填和演化模式,能有效提高砂体分布预测精度,对预测有利储集相带具有重要意义^[40]。宝石组—平湖组总共划分为9个三级层序。9套高位体系域发育9期三角洲平原—前缘砂体,岩性为砂砾岩至粉砂岩,为油气聚集提供良好的储集空间;9套海侵体系域暗色泥岩中,每套厚度为10~60 m,中带—低带累计厚度超过300 m,是良好的烃源岩,也可作为良好的盖层。垂向上,宝石组、平湖组海侵体系域和高位体系域构成一套“千层饼”状的(生)储盖组合良好的体系,而高位体系域作为砂质储层发育的优势单元,是主要的勘探开发目标层段。

研究区宝石组和平湖组产气层主要分布于三角洲平原分流河道(含砾)砂体、三角洲前缘河口坝及水下分流河道砂体,3类沉积微相是最有利储层。在三级层序格架的约束下,以体系域为单元开展砂体展布特征分析,能有效指导砂体对比和利于储集相带预测。宝石组经历6.6 Ma的二级海平面升降旋回,4套高位体系域发育三角洲平原和前缘砂体,砂体厚度较大(单砂体厚度为10~30 m),是砂质储层发育的优势地区(见图13(a-c))。平湖组经历7.3 Ma的二级海平面升降旋回,平下段二级海侵期的2套高位体系域发育潮坪砂体(单砂体厚度小于10 m)及三角洲平原—前缘砂体(单砂体厚度为10~30 m);平中段和平上段二级海退期的3套高位体系域河流作用增强,主要发育三角洲平原和前缘砂体,砂体厚度大(单砂体厚度为10~80 m),是砂质储层发育的优势地区(见图13(d-h))。

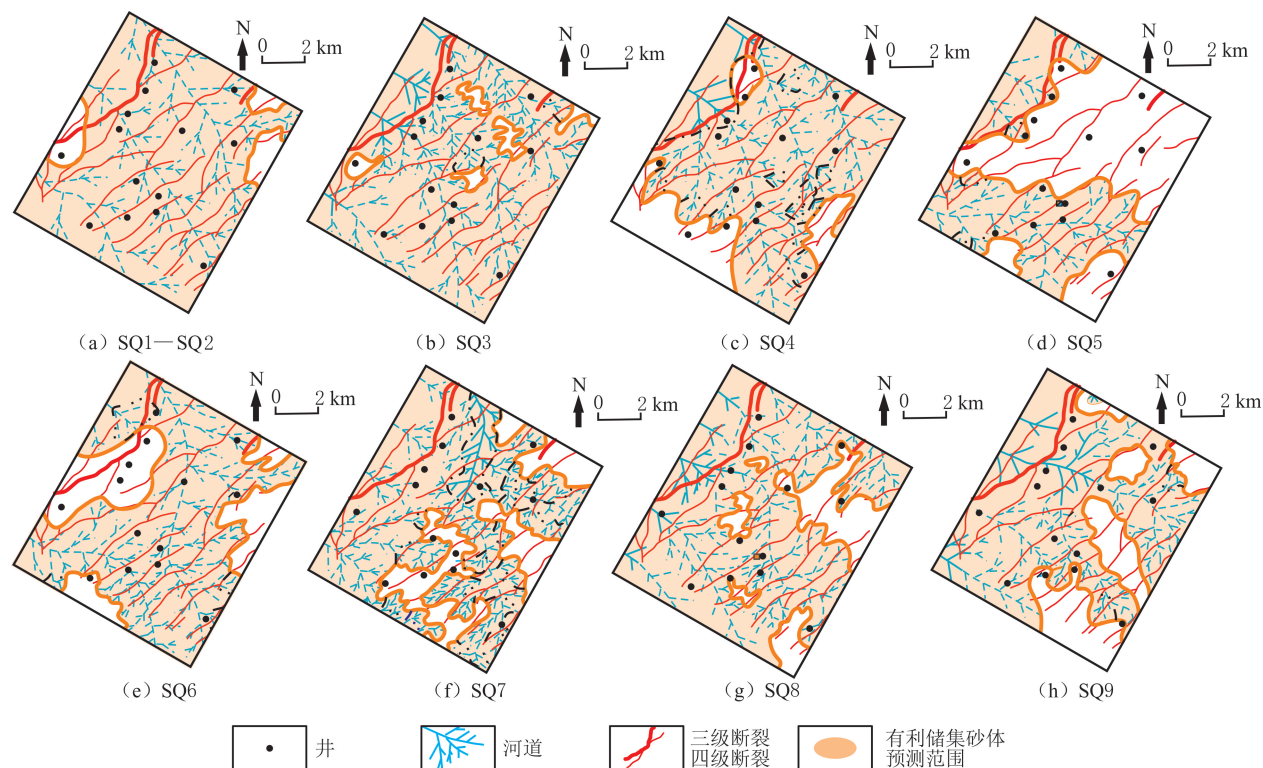


图13 有利储集相带分布

Fig. 13 Distribution of favorable reservoir facies zones

5 结论

(1) 西湖凹陷西斜坡K地区宝石组、平湖组划分为2个二级层序和9个三级层序。宝石组1个二级层序内部可划分为4个三级层序。平湖组1个二级层序内部可划分为5个三级层序。每个三级层序内部可划分海侵体系域(TST)和高位体系域(HST)。低位期作用与前一个高位体系域为层序界面发育期。

(2) K地区宝石组、平湖组内部主要发育潮控三角洲—有障壁滨海潮坪体系, 沉积物源为西部海礁凸起。K地区宝石组、平湖组沉积模式分为3种: 低位期, 前一个高位体系域暴露剥蚀夷平, 发育层序界面; 海侵期, 全区被海水淹没, 内部发育退积型前三角洲; 高位期, 海平面开始下降, 受潮汐作用影响, 内部发育进积型潮控三角洲, 潮汐作用强烈地区还发育潮坪沉积。

(3) K地区宝石组、平湖组三级层序发育的主要控制因素是构造运动、海平面升降、沉积物供给及古气候。这4种因素控制地层、层序发育单元几何形态、沉积作用和岩性。K地区宝石组和平湖组发育在潮湿气候条件下, 发育河控—潮控三角洲, 高位体系域三角洲平原分流河道、三角洲前缘水下分流河道及河口坝砂体大面积分布, 为砂质储层发育的优势地区。

参考文献(References):

- [1] 姜亮. 东海陆架盆地油气资源勘探现状及含油气远景[J]. 中国海上油气(地质), 2003, 17(1): 3-8.
JIANG Liang. Exploration status and perspective of petroleum resources in East China East Shelf Basin[J]. China Offshore Oil & Gas (Geology), 2003, 17(1): 3-8.
- [2] 付振群. 东海陆架盆地西湖凹陷平湖组层序地层及沉积特征研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2018: 8-15.
FU Zhenqun. The study of sequence stratigraphy and sedimentary characteristics of Pinghu Formation in Xihu Sag of East China Sea Basin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018: 8-15.
- [3] 付振群, 赵军, 周瑞琦, 等. 东海盆地西湖凹陷平湖—黄岩地区花港组上二亚段高分辨率层序地层分析[J]. 地层学杂志, 2015, 39(4): 416-422.
FU Zhenqun, ZHAO Jun, ZHOU Ruiqi, et al. High-resolution sequence stratigraphy of the second-upper submember of Huangyan

- Formation in the Pinghu-Huangyan Area of the Xihu Sag in the East China Sea Basin[J]. *Journal of Stratigraphy*, 2015,39(4):416-422)
- [4] 葛海波. 东海陆架盆地西湖凹陷天外天—黄岩地区平湖—花港组层序地层及沉积相研究[D]. 成都:成都理工大学,2014:15-25.
GE Haibo. The study of Pinghu and Huangang Formation sequence stratigraphy and sedimentation facies feature in Tianwaitian and Huangyan Region of Xihu Sag, East China Sea[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014:15-25.
- [5] 江东辉,杜学斌,李昆,等. 东海西湖凹陷保俶斜坡带平湖组“古地貌—古水系—古坡折”特征及其对沉积体系的控制[J]. *石油实验地质*,2022,44(5):771-779.
JIANG Donghui, DU Xuebin, LI Kun, et al. Distribution of sedimentary system multi-controlled by palaeo-geomorphology, water system and break during the deposition of Pinghu Formation, Baochu slope belt, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2022,44(5):771-779.
- [6] 吕炳全,王红罡,李维显,等. 东海陆架油气勘探的新领域[J]. *古地理学报*,2002,4(2):88-97.
LYU Bingquan, WANG Honggang, LI Weixian, et al. New prospect for hydrocarbon exploration in the shelf of the East China Sea [J]. *Acta Palaeogeography*, 2002,4(2):88-97.
- [7] 张兰,何贤科,段冬平,等. 东海陆架盆地西湖凹陷平湖斜坡带平湖组煤系地层地震沉积学研究[J]. *海洋地质与第四纪地质*,2023,43(4):140-149.
ZHANG Lan, HE Xianke, DUAN Dongping, et al. Seismic sedimentological analysis of coal stratigraphy of Pinghu Formation in the Pinghu slope belt, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2023,43(4):140-149.
- [8] 李泽超,鲁法伟,王雷. 东海陆架盆地西湖凹陷气测录井半定量评价研究[J]. *石油天然气学报*,2017,39(4):1-9.
LI Zechao, LU Fawei, WANG Lei. Semi-quantitative evaluation of reservoirs with gas logging data in Xihu Sag of East China Sea Shelf Basin[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2017,39(4):1-9.
- [9] 杨彩虹,周兴海,金臻,等. 河控—湖控三角洲体系地球物理识别表征及其油气地质意义:以东海陆架盆地西湖凹陷平北地区为例[J]. *石油实验地质*,2022,44(5):761-770.
YANG Caihong, ZHOU Xinghai, JIN Can, et al. Geophysical identification of river-tide controlled deltaic sedimentation and its implication for petroleum geology: a case study of Pingbei Area, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2022,44(5):761-770.
- [10] ABBAS A, ZHU Hongtao, ZENG Zhiwei, et al. Sedimentary facies analysis using sequence stratigraphy and seismic sedimentology in the Paleogene Pinghu Formation, Xihu Depression, East China Sea Shelf Basin[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2018: 287-297.
- [11] 周瑞琦,傅恒,徐国盛,等. 东海陆架盆地西湖凹陷平湖组—花港组沉积层序[J]. *沉积学报*,2018,36(1):132-141.
ZHOU Ruiqi, FU Heng, XU Guosheng, et al. Eocene Pinghu Formation-Oligocene Huangang Formation sequence stratigraphy and depositional model of Xihu Sag in East China Sea Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2018,36(1):132-141.
- [12] 周瑞琦. 西湖凹陷平湖组—花港组低孔渗储层层序地层与沉积相研究[D]. 成都:成都理工大学,2015:12-24.
ZHOU Ruiqi. Sequence stratigraphy and sedimentary facies of the low porosity and low permeability reservoirs of Pinghu Formation-Huangang Formation, Xihu Sag[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015:12-24.
- [13] 赵谦. 东海陆架盆地西湖凹陷西部斜坡带平湖组潮河联控沉积体系研究[D]. 武汉:中国地质大学(武汉),2022:31-145.
ZHAO Qian. Tidal and river joint-dominated sedimentary system analysis of the Pinghu Formation in the west slope belt of Xihu Depression, East China Sea Shelf Basin[D]. Wuhan: China University of Geosciences(Wuhan), 2022:31-145.
- [14] 苗清. 东海陆架盆地西湖凹陷花港组层序地层与沉积相研究[D]. 成都:成都理工大学,2014:10-20.
MIAO Qing. The study of sequence stratigraphy and depositional facies of Huangang Formation in of Xihu Depression East China Sea [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014:10-20.
- [15] 徐昉昊. 西湖凹陷古近系花港组低孔渗储层特征及形成机制研究[D]. 成都:成都理工大学,2014:11-19.
XU Fanghao. Characteristics and forming mechanisms of Paleogene reservoir of Huangang Formation with low porosity and low permeability in Xihu Depression[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014:11-19.
- [16] 刘春锋,蒋一鸣,李宁,等. 西湖凹陷西次凹古近系花港组—平湖组深层油气成藏过程[J]. *地质学报*,2024,98(1):231-246.
LIU Chunfeng, JIANG Yiming, LI Ning, et al. Hydrocarbon accumulation process in the deep of Paleogene Huangang Formation and Pinghu Formation in the western subsag of Xihu Sag[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2024,98(1):231-246.
- [17] 付行,杜学斌,徐国盛,等. 东海宁波构造带深层花港组砂岩储层致密性特征及控制因素[J]. *海洋石油*,2018,38(1):1-8.
FU Xing, DU Xuebin, XU Guosheng, et al. Characteristics and controlling factors of tight sandstone reservoir of Huangang Formation in the Ningbo Tectonic Belt of Xihu Sag[J]. *Offshore Oil*, 2018,38(1):1-8.
- [18] 李顺利,李竞,陈彬滔,等. 西湖凹陷渐新统花港组大型沿岸砂坝沉积特征及主控因素[J]. *古地理学报*,2020,22(3):493-503.
LI Shunli, LI Jing, CHEN Bintao, et al. Sedimentary characteristics and controlling factors of large-scale longshore bar in the Oligocene Huangang Formation, Xihu Sag[J]. *Acta Palaeogeography*, 2020,22(3):493-503.

- [19] 赵志兴, 徐国盛, 赵林海, 等. 西湖凹陷西部斜坡带花港组、平湖组储层裂缝发育特征及有效裂缝测井识别[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2021, 48(3): 337-346.
ZHAO Zhixing, XU Guosheng, ZHAO Linhai, et al. Characteristics of fracture development in the Huagang Formation and Pinghu Formation tight sandstone reservoirs and effective fracture logging identification and prediction in the western slope zone of Xihu Sag, East China Sea[J]. Journal of Chengdu University of Technology(Natural Science Edition), 2021, 48(3): 337-346.
- [20] 李众. 东海西湖凹陷孔雀亭气田平湖组砂体微相及展布分析[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2018: 11-19.
LI Zhong. Sedimentary microfacies characteristics and distribution of Pinghu Formation in Kongqueting Region, Xihu Sag of East China Sea[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2018: 11-19.
- [21] 刘晓晨. 西湖凹陷平湖斜坡带平湖组砂体精细刻画及时空演化研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2018: 14-21.
LIU Xiaochen. Fine characterization and evolution of sand body of Pinghu Formation in Pinghu Slope, Xihu Sag[D]. Wuhan: China University of Geosciences(Wuhan), 2018: 14-21.
- [22] 李纯洁, 李上卿, 许红. 西湖凹陷中—下始新统宝石组油气地质与勘探潜力[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2004, 24(4): 81-87.
LI Chunjie, LI Shangqing, XU Hong. Petroleum geologic characteristics and exploration potential of Middle-Lower Eocene Baoshi Formation in the Xihu Sag[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2004, 24(4): 81-87.
- [23] 徐亚东, 梁银平, 江尚松, 等. 中国东部新生代沉积盆地演化[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2014, 39(8): 1079-1098.
XU Yadong, LIANG Yinping, JIANG Shangsong, et al. Evolution of Cenozoic sedimentary basins in Eastern China[J]. Earth Science(Journal of China University of Geosciences), 2014, 39(8): 1079-1098.
- [24] ZHU W, ZHONG K, FU X W, et al. The formation and evolution of the East China Sea Shelf Basin: a new[J]. Earth Science Reviews, 2019, 190: 89-111.
- [25] 刘金水, 李树霞, 秦兰芝, 等. 东海盆地西湖凹陷古近系煤的生烃动力学[J]. 石油学报, 2020, 41(10): 1174-1187.
LIU Jinshui, LI Shuxia, QIN Lanzhi, et al. Hydrocarbon generation kinetics of Paleogene coal in Xihu Sag, East China Sea Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(10): 1174-1187.
- [26] 刘金水, 许怀智, 蒋一鸣, 等. 东海盆地中、新生代盆架结构与构造演化[J]. 地质学报, 2020, 94(3): 675-691.
LIU Jinshui, XU Huaizhi, JIANG Yiming, et al. Mesozoic and Cenozoic basin structure and tectonic evolution in the East China Sea Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(3): 675-691.
- [27] 娄敏, 蔡华, 何贤科, 等. 地震沉积学在东海陆架盆地西湖凹陷河流-三角洲相储集层刻画中的应用[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(1): 125-138.
LOU Min, CAI Hua, HE Xianke, et al. Application of seismic sedimentology in characterization of fluvial-deltaic reservoirs in Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(1): 125-138.
- [28] 周心怀, 蒋一鸣, 唐贤君. 西湖凹陷成盆背景、原型盆地演化及勘探启示[J]. 中国海上油气, 2019, 31(3): 1-10.
ZHOU Xinhuai, JIANG Yiming, TANG Xianjun. Tectonic setting, prototype basin evolution and exploration enlightenment of Xihu Sag in East China Sea Basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 2019, 31(3): 1-10.
- [29] 蒋一鸣, 邹玮, 刘金水, 等. 东海西湖凹陷中新世末反转背斜构造成因机制: 来自基底结构差异的新认识[J]. 地球科学, 2020, 45(3): 968-979.
JIANG Yiming, ZOU Wei, LIU Jinshui, et al. Genetic mechanism of inversion anticline structure at the end of Miocene in Xihu Sag, East China Sea: a new understanding of basement structure difference[J]. Earth Science, 2020, 45(3): 968-979.
- [30] 蒋一鸣, 邵龙义, 李帅, 等. 西湖凹陷平湖构造带平湖组沉积体系及层序地层研究[J]. 现代地质, 2020, 34(1): 141-153.
JIANG Yiming, SHAO Longyi, LI Shuai, et al. Deposition system and stratigraphy of Pinghu Formation in Pinghu Tectonic Belt, Xihu Sag[J]. Geoscience, 2020, 34(1): 141-153.
- [31] 张年念, 程超, 余逸凡, 等. 西湖凹陷古近系致密砂岩气“三元耦合控藏”特征[J]. 非常规油气, 2024, 11(3): 27-34.
ZHANG Niannian, CHENG Chao, YU Yifan, et al. Characteristics of ternary factors coupling for controlling reservoir of Paleogene tight sandstone gas in Xihu Sag[J]. Unconventional Oil & Gas, 2024, 11(3): 27-34.
- [32] HAQ B U, SCHUTTER S R. A chronology of Paleozoic sea-level changes[J]. Science, 2008, 322(5898): 64-68.
- [33] 周鑫, 郭正堂. 浅析新生代气候变化与大气温室气体浓度的关系[J]. 地学前缘, 2009, 16(5): 15-28.
ZHOU Xin, GUO Zhengtang. On the Cenozoic climate changes and greenhouse gases[J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16(5): 15-28.
- [34] 朱梦琦. 塔河石炭系卡拉沙依组层序及沉积相研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2021: 19-38.
ZHU Mengqi. Sequence and sedimentary facies of Carboniferous Kalashayi Formation in the Tahe[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2021: 19-38.
- [35] 谢才铸, 傅恒, 朱梦琦, 等. 塔里木盆地塔河地区石炭系卡拉沙依组层序格架内沉积模式[J]. 地层学杂志, 2023, 47(1): 34-48.
XIE Caizhu, FU Heng, ZHU Mengqi, et al. Sedimentary patterns and sequence stratigraphy of the Carboniferous Kalashayi Formation in Tahe Area, Tarim Basin[J]. Journal of Stratigraphy, 2023, 47(1): 34-48.