



北黄海盆地东部坳陷下白垩统层序地层及沉积演化

王文娟, 张银国, 陈建文, 杨艳秋

Sequence stratigraphy and sedimentary evolution in the Lower Cretaceous of the Eastern Depression in the North Yellow Sea Basin

WANG Wenjuan, ZHANG Yinguo, CHEN Jianwen, and YANG Yanqiu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2023100701>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

北黄海盆地东部坳陷中生界次生孔隙的发育规律

Development of Mesozoic secondary pore zones in the Eastern Depression of North Yellow Sea Basin

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 194-201

珠江口盆地西江凹陷南部文昌组层序地层及沉积体系研究

Study on sequence stratigraphy and sedimentary systems of the Wenchang Formation in the southern Xijiang depression of the Pearl River Mouth Basin

海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(1): 146-158

珠江口盆地白云凹陷北坡第四纪层序地层和沉积体系演化及其控制因素

Quaternary sequence stratigraphic evolution of the Pearl River Mouth Basin and controlling factors over depositional systems

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(1): 25-37

下刚果盆地北部海域海相碳酸盐岩沉积储层特征

Characteristics of marine carbonate reservoirs in the Northern Lower Congo Basin

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(2): 148-157

南黄海盆地东北凹构造特征及伸缩率研究

Tectonic characteristics and extensional-compressional rates of the North-east Sag of South Yellow Sea Basin

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(2): 118-125

南黄海崂山隆起石炭系一下二叠统孔隙型碳酸盐岩储层预测

Prediction of pore-dominated Carboniferous-Lower Permian carbonate reservoir at the Laoshan Uplift, South Yellow Sea Basin

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(5): 136-148



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王文娟, 张银国, 陈建文, 等. 北黄海盆地东部坳陷下白垩统层序地层及沉积演化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2024, 44(3): 125-135.

WANG Wenjuan, ZHANG Yinguo, CHEN Jianwen, et al. Sequence stratigraphy and sedimentary evolution in the Lower Cretaceous of the Eastern Depression in the North Yellow Sea Basin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2024, 44(3): 125-135.

北黄海盆地东部坳陷下白垩统层序地层及沉积演化

王文娟^{1,2,3}, 张银国^{1,2}, 陈建文^{1,2}, 杨艳秋^{1,2}

1. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266237

2. 青岛海洋科技中心海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266237

3. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100

摘要:北黄海盆地东部坳陷下白垩统是一套有利的油气勘探储集层, 对其精细的地层划分及沉积演化的研究薄弱, 制约了对东部坳陷油气勘探前景的深入认识。本文通过对东部坳陷钻井的岩芯观察, 测井、录井分析及地震层序的井震标定, 认为北黄海盆地东部坳陷下白垩统发育典型的陆相层序, 可划分为3个三级层序, 从底部向上依次为 K_1SQ_1 、 K_1SQ_2 和 K_1SQ_3 。在钻井上仅可见 K_1SQ_1 和 K_1SQ_2 两个三级层序, 且 K_1SQ_2 层序的下降半旋回不完整, 只残留该层序的上升半旋回。 K_1SQ_1 时期为湖盆断陷伸展期, 发育一个完整的湖进—湖退旋回。早期盆地边缘发育河流相, 南部主控断裂带发育扇三角洲相, 北部缓坡带发育辫状河三角洲相; 中后期由于湖平面上升, 发育泥岩为主的湖泊沉积; 晚期北部缓坡带见小规模辫状河三角洲沉积。 K_1SQ_2 时期为湖盆稳定裂陷期, 继承了 K_1SQ_1 时期的沉积特征并略有收缩。 K_1SQ_3 时期为湖盆断陷萎缩期, 以发育大范围的河流相沉积为特征。

关键词:层序特征; 沉积相; 断陷湖盆; 下白垩统; 北黄海盆地

中图分类号: P736

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2023100701

Sequence stratigraphy and sedimentary evolution in the Lower Cretaceous of the Eastern Depression in the North Yellow Sea Basin

WANG Wenjuan^{1,2,3}, ZHANG Yinguo^{1,2}, CHEN Jianwen^{1,2}, YANG Yanqiu^{1,2}

1. Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266237, China

2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao Marine Science and Technology Center, Qingdao 266237, China

3. College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

Abstract: The Lower Cretaceous of the Eastern Depression in the North Yellow Sea Basin is a favorable reservoir for hydrocarbon exploration. However, scarce studies on its fine stratigraphic delineation and sedimentary evolution have restricted the deep understanding of the prospect of hydrocarbon exploration in the eastern depression. Through the core observation, logging and recording analyses, and well-seismic calibration in the eastern depression, it is concluded that the Lower Cretaceous mainly developed 3 third-order sequences, K_1SQ_1 , K_1SQ_2 , and K_1SQ_3 in bottom-up order. Only 2 third-order sequences, K_1SQ_1 and K_1SQ_2 , are visible in the drilling, and the descending half-circle of the K_1SQ_2 sequence is always incomplete, with only the ascending half-cycle of the sequence remaining. The K_1SQ_1 was in the period of faulting extension, and the vertical lithological sequence exhibited a complete depositional cycle with progradation-retrogradation. In the early stage, there were fluvial phases which developed at mainly the basin margins, the fan-delta phases were in the southern rift zone of the basin, and the braided river-delta phase was in the northern slow-slope zone. Due to the uprising of the lake level, mudstone-dominated lake deposits were developed in the middle and late stages. In the advanced stage, small-scale braided river delta deposits developed in the northern slow-slope zone. The K_1SQ_2 was in the period of stabilized rupture, which inherited the depositional characteristics of the K_1SQ_1 period and contracted slightly. The K_1SQ_3 was in the period of faulting abortion, which was characterized by the development of a large area of fluvial phase deposits.

Key words: sequence stratigraphy; sedimentary phase; faulted lake basin; Lower Cretaceous; North Yellow Sea Basin

资助项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20221723, DD20211353)

作者简介: 王文娟(1980—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为海洋油气地质, E-mail: wangwenj04@163.com

通讯作者: 张银国(1973—), 男, 博士, 正高级工程师, 主要研究方向为海洋油气地质, E-mail: 82069747@qq.com

收稿日期: 2023-10-07; 改回日期: 2023-11-20. 周立君编辑

层序是指一套内部相对统一,成因上有联系、顶底以不整合或与之相当的整合面为界的等时地层单元^[1]。经典海相层序地层学理论认为海平面变化、区域构造沉降以及沉积物的供给对可容纳空间变化的影响,控制了层序的堆积样式,形成了海相层序。经典海相层序从下到上以其底界面、初次海泛面、最大海泛面和顶界面为界划分为低位体系域、海侵体系域和高位体系域^[2],即三分体系域层序模式。在此基础上,有学者将强制海退楔体系域从高位体系域中剥离,提出四分体系域法也被认为是合理的^[3-4]。陆相层序地层学虽借鉴于海相层序地层学的理论和方法而产生,但相对于海相层序,陆相层序具有受构造活动的控制更明显、相带窄且变化快等特点^[5-8]。在陆相盆地研究中,层序的关键界面及沉积体系域的划分及命名基本沿用海相层序沉积体系的“三分法”,以及类似前述的层序顶/底界面、初次湖泛面、最大湖泛面;低位体系域、水进体系域和高位体系域等名称术语,也有学者将陆相层序的高位体系域以湖平面始降面为界面细分出下降体系域,以强调层序演化过程中湖平面快速下降的阶段特点,即陆相层序“四分法”^[9]。

早白垩世北黄海盆地东部坳陷发育典型的陆相断陷湖盆沉积,下白垩统是重要的有利储集层段^[10-11],但总体具有低孔隙度和低渗透率的特点^[12]。因此在层序地层格架内对下白垩统沉积充填样式和沉积演化进行分析,圈定出孔隙度和渗透率相对较高的三角洲前缘和滨浅湖砂坝作为有利甜点层段和甜点区,具有重要的油气勘探指导意义。前人对北黄海盆地东部坳陷下白垩统层序地层的划分存在1个三级层序和5个三级层序的不同方案^[13-16],表明对该套下白垩统地层沉积演化存在不同认识,这会影响到东部坳陷有利甜点层和甜点区的预测。

笔者等近年来对盆地东部坳陷地震资料进行了精细解释,结合钻井岩芯观察与测/录井分析,以陆相层序地层学理论为指导,重新厘定了东部坳陷下白垩统三级层序,在三级层序地层格架下,分析了东部坳陷早白垩世沉积相发育类型及分布和演化特征,为东部坳陷进一步的油气勘探提供基础地质依据。

1 区域地质背景

北黄海盆地位于中朝地台,北部与辽东-狼林隆起相邻,南部与胶东-京畿隆起相接,为叠置于元古界变质岩和古生界海相残留地层之上的中-晚中生代走滑-裂陷盆地。其二级构造单元可划分为东部坳陷、中部坳陷、中-西部隆起、南部坳陷群和西部坳陷5个单元(图1)。东部坳陷是最具油气勘探前景的单元,钻井主要以中、新生代为目的层。其中有5口井揭示了基底,主要为太古宇-古元古界变质岩、寒武系及奥陶系碳酸盐岩、板岩等。根据区域构造演化,北黄海盆地经历了裂前阶段、中生代断陷-反转阶段、古近纪断陷-反转阶段以及新近纪区域沉降阶段^[13-17]。中生代东部坳陷受南部断裂带控制,发育典型的南断北超型断陷湖盆沉积,北部缓坡带受伴生小断层调控^[18-19]。总之,东部坳陷在前中生界之上依次发育了侏罗系、白垩系、古近系、新近系及第四系;其中侏罗系主要发育中侏罗统和上侏罗统,白垩系主要残留下白垩统,古近系主要发育始新统至渐新统。

现有钻井资料及地震解释成果证实,东部坳陷中-新生代地层沉积厚度大,其中下白垩统的最大残留厚度可达2 000 m。下白垩统与下伏侏罗系及前中生界地层呈角度不整合接触,总体发育红色陆

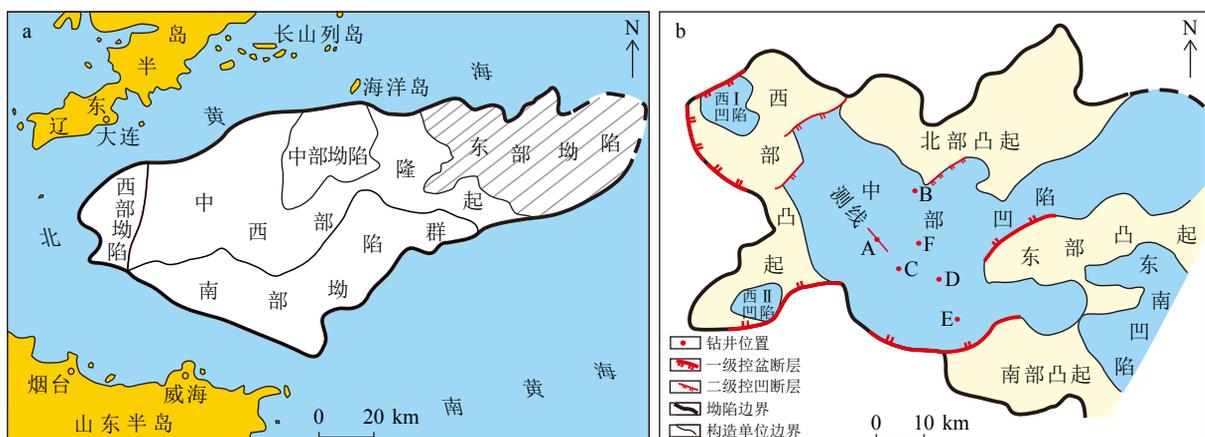


图1 北黄海盆地东部坳陷地理位置及构造区划图^[15]

Fig.1 Geographic location and tectonic units of the Eastern Depression in the North Yellow Sea Basin^[15]

相碎屑岩地层。钻井揭示下白垩统底部发育杂色砂砾岩、含砾砂岩、粗砂岩、粉细砂岩夹薄层泥岩, 个别钻井钻遇生物灰岩; 向上渐变为红褐色泥岩夹薄层泥质粉砂岩、粉细砂岩, 偶夹灰色、深灰色泥岩; 顶部可见含砾中砂岩、细砂岩、泥质粉砂岩、红褐色泥岩。发育早白垩世早—中期 *Lygodiumsporites-Cicatricosisporites-Schizaeoisporites* 孢粉组合^[20](图 2)。

2 层序界面识别与层序划分

层序是建立沉积演化序列的对比格架, 其顶、底界面的形成基本控制了层序的内部结构^[9]。依据 Vail 等^[21]提出将相邻两个海平面下降拐点之间的地层作为一个层序, 其层序界面是由于海平面下降所造成的不整合或与之相当的整合面的原则进行层序地层界面的识别; 同时引用 Cross 等^[22]基准面旋回变化和可容纳空间的对应关系理念, 考虑沉积物的体积分配, 进行沉积旋回划分。根据层序边界类型和层序内部特征可将层序划分为不同的级次^[23]。一级层序常与区域构造事件相对应, 其界面为古构造运动或海(湖)平面大幅下降造成的大规模不整合; 二级层序是盆地内幕式构造运动的表现, 界面常表现为角度不整合; 三级层序是盆地内构造升降、沉积物供给、气候及海(湖)平面变化等因素的综合反映, 盆缘不整合面及与其对应的盆内整合面可追踪对比^[24]。

2.1 三级层序界面

利用已有的 VSP 资料和合成地震记录资料, 建立地震剖面和钻井剖面之间的联系, 并利用地震剖面上典型反射波组特征, 进行全盆地范围纵、横向剖面追踪、对比和闭合^[25-26], 建立了北黄海盆地区域性层序地层格架。东部坳陷过 A 井的剖面下白垩

统发育最厚最全, 以此为标准确定该区下白垩统发育 3 个三级层序, 在钻井上通常仅可见 2 个三级层序, 且第 2 个三级层序的上部已被剥蚀, 只保留该层序的上升半旋回。通过对盆地钻井岩芯的观察、测井/录井分析及地震资料分析^[25-26], 确定下白垩统自下而上 4 个三级层序界面为 SB1、SB2、SB3、SB4。SB1 和 SB4 层序界面与年代地层单位(界或系)界面相一致, 界面沉积间断的时间长, 地层暴露和剥蚀明显, 易于识别。SB2 和 SB3 界面为下白垩统内部的三级层序界面, 分布局限, 易被忽视。以 SB1、SB2、SB3、SB4 为界将下白垩统划分为 3 个三级层序, 从底部向上依次为 K_1SQ_1 、 K_1SQ_2 和 K_1SQ_3 (图 3)。

2.1.1 SB1 层序界面

SB1 界面是 K_1SQ_1 的底界, 在坳陷内与盆地二级层序界面之白垩系与侏罗系分界面(R_5 波组)重合。 R_5 地震波组全区内稳定分布, 通常表现为两个相互平行的相位, 能量强, 中频、连续性好。在坳陷内该界面多表现为假整合接触, 界面之上的下白垩统波组中等连续, 而下伏的上侏罗统波组大多连续性好(图 3)。该界面上下地层岩电性表现为突变接触, 界面之上的下白垩统底部发育中-粗砂砾岩, 为冲刷滞留底砾岩, 自然伽马曲线值低, 电阻率值高, 表现为箱型特征。界面之下的上侏罗统泥岩, 自然伽马曲线值高, 表现为低幅平直, 电阻率值低, 分界特征明显。钻井 C 在 3082 m 钻遇侏罗系风化壳为泥岩含钙质结核^[27], 风化壳之上白垩系底砾岩直径 0.2~1.5 cm, 杂色, 呈正韵律叠置发育, 与其下部侏罗系风化壳呈假整合接触(图 4)。

SB1 界面在坳陷边缘与盆地一级层序界面之中生界与前中生界分界面(R_g 波组)重合。盆地前中生界发育古生界、元古界及太古界, 皆已发生不同程度的变质, 是盆地中、新生代沉积地层的基底。 R_g 波多表现为较强的连续波组, 且具较高角度的削

地层	岩性	岩性描述	孢粉组合	三级层序旋回	沉积相
下白垩统		红褐色泥岩夹粉砂岩	<i>Lygodiumsporites</i> <i>Cicatricosisporites</i> <i>Schizaeoisporites</i>		滨浅湖
		含砾中砂岩、细砂岩夹粉砂质泥岩			辫状河三角洲
		红褐色泥岩夹薄层泥质粉砂岩、粉细砂岩, 偶夹灰色、深灰色泥岩			滨浅湖
		杂色砂砾岩、含砾砂岩、粗砂岩、粉细砂岩夹薄层泥岩			辫状河三角洲

图 2 东部坳陷下白垩统沉积地层综合柱状图

Fig.2 Comprehensive stratigraphic column of the Lower Cretaceous sedimentary strata in the East Depression

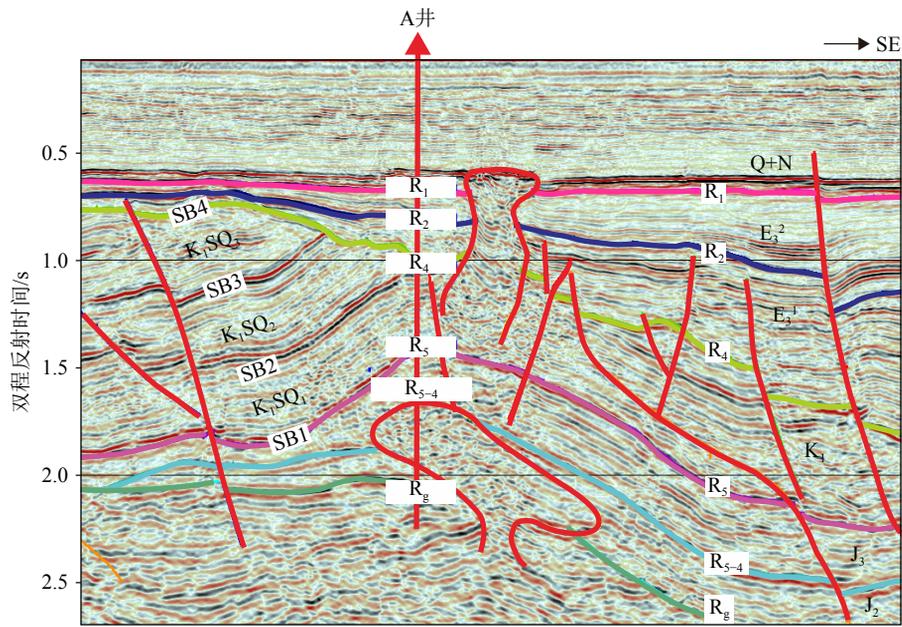


图3 层序地层地震和钻井标定

Fig.3 Seismic and drilling calibration for the sequence stratigraphic

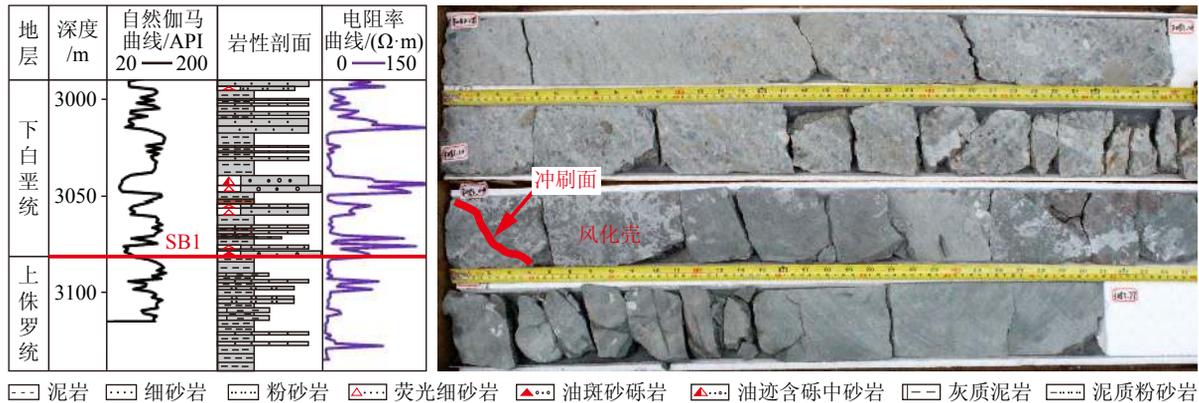


图4 C井SB1层序界面岩电性特征(左)及古风化壳特征(右)

Fig.4 Lithology and electrical characteristics of the SB1 sequence boundary in Well C (left) and the characteristics of the paleoweathering crust (right)

截现象,主要发育在北部斜坡高部位。多口井钻遇该类界面,界面上下岩电性变化大,常为下白垩统砂岩与古生界碳酸盐岩或太古界变质岩或岩浆岩接触,在自然伽马曲线和电阻率曲线上该界面均具明显的突变。如B井R_g界面之上的下白垩统为含砾砂岩,测井曲线呈箱型。界面之下为寒武系灰色、暗灰色石灰岩和泥质灰岩、暗灰色泥岩互层,自然伽马值突降,电阻率值突增,界面上下岩电性界面突变明显(图5)。

2.1.2 SB2和SB3层序界面

SB2和SB3层序界面均为下白垩统内部的三级层序界面,分布局限,集中在研究区南部;其中SB2为K₁SQ₂的底界面,SB3为K₁SQ₃的底界面。地震剖面上SB2和SB3层序界面特征明显,波组多

表现为一强波峰,连续性较强,易于追踪,层序内部波组振幅弱,总体为平行、亚平行结构;向西北延伸至盆地边缘,向东被R₄削截(图3)。钻井上SB2界面之下K₁SQ₁泥岩自然伽马值高,多表现为低幅平直;与其上的K₁SQ₂底部砂岩低自然伽马曲线和高电阻率曲线特征呈现出台阶式变化(图6)。钻井上未钻遇SB3界面。

2.1.3 SB4层序界面

SB4层序界面为K₁SQ₃的顶界面,与本区一级界面之新生界与中生界的分界面(R₄)重合。该层序界面波由两个相位组成,连续性好,波形稳定,可在全区范围内追踪对比,是全区稳定分布的重要不整合界面,其上、下地层有不同的地震反射特征,具明显的上超下削特征(图7)。

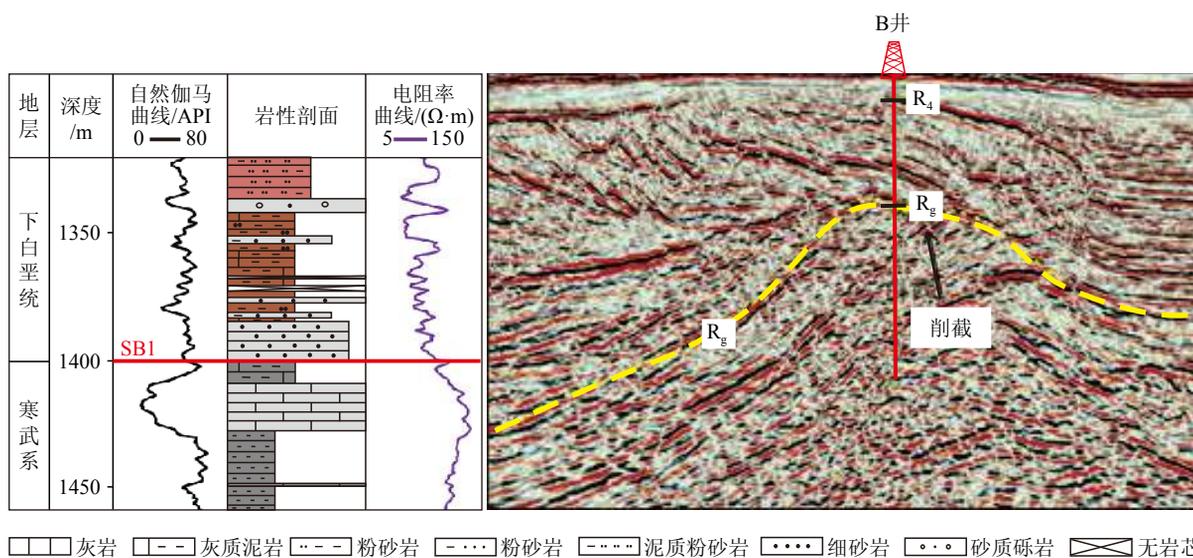


图 5 SB1 层序界面 B 井岩电性特征 (左) 和地震反射波特征 (右)

Fig.5 Lithology and electrical characteristics of the SB1 sequence boundary in Well B (left) and the characteristics of the seismic reflected waves (right)

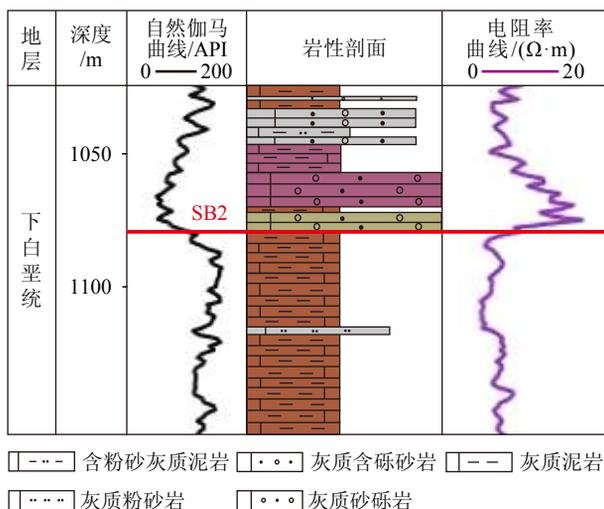


图 6 SB2 层序界面的 A 井岩电性特征

Fig.6 Lithologic and electrical characteristics of the SB2 in Well A

钻井显示 SB4 层序界面上覆古近系粗粒沉积与下伏白垩系红色泥岩为主的地层直接接触, 岩性

表现为突变接触关系。这种突变接触在自然伽马及电阻率曲线上呈现出台阶式变化。SB4 界面之下白垩系泥岩自然伽马呈高值, 多表现为低幅平直; 界面之上渐新统底部粗粒沉积则表现为齿化钟型或箱型特征(图 8)。

2.2 三级层序特征

根据钻井和地震层序界面特征, 下白垩统划分出 3 个三级层序, 剖面上 3 套地震层序界面结构清晰; 钻井上 K₁SQ₁ 层序揭示齐全, K₁SQ₂ 层序部分揭示, K₁SQ₃ 层序未揭示。

地震剖面上在湖相沉积区 3 套层序结构明显, 外形均呈席状, 内部同相轴呈平行、亚平行分布, 振幅较弱、频率中等。K₁SQ₂ 层序内部同相轴比 K₁SQ₁ 连续性略好; K₁SQ₃ 层序内部明显可分为上下两部分, 层序上部地震同相轴连续性变差, 呈现出断续、局部较连续的特征; 层序顶部与上覆地层

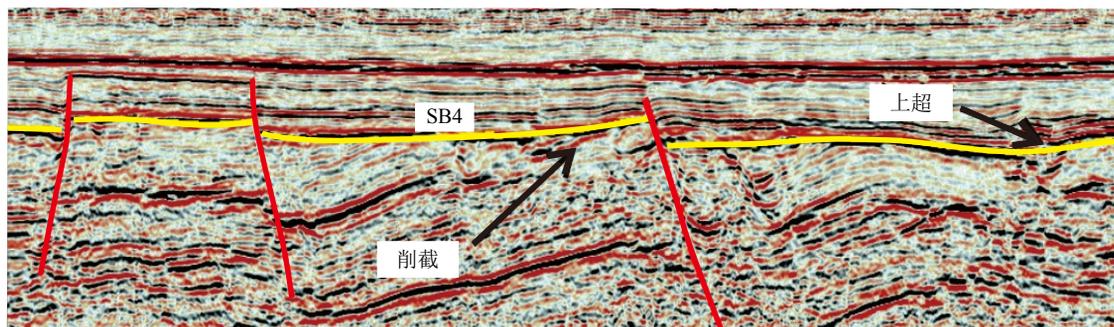


图 7 SB4 层序界面地震反射波特征

Fig.7 Characterization of seismic reflected waves of the SB4 sequences interface

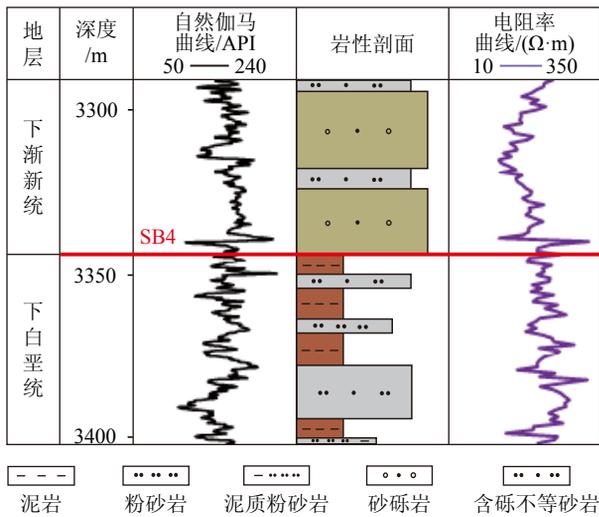


图8 SB4层序界面的D井岩电性特征

Fig.8 Lithologic and electrical characteristics of the SB4 in Well D

呈角度不整合接触(图3)。

根据钻井中的岩芯和测井、录井曲线特征, K_1SQ_1 层序中除了顶、底界面, 在层序内部还可识别出首次湖泛面、最大湖泛面和始降面。以上述界面为界划分出了低位体系域、湖侵体系域、高位体系域和下降体系域, 认为 K_1SQ_1 是典型的四分层序^[9]。首次湖泛面是低位体系域和湖侵体系域的分界面。该界面之下发育杂色河流相砂砾岩, 界面之上岩性开始变细, 发育褐红、紫红色泥质粉砂岩, 偶见生物灰岩。界面之下测井曲线呈钟型, 电阻率曲线值高, 自然伽马曲线值低。界面之下发育退积式准层序组, 界面之上发育加积式准层序组。最大湖泛面是湖侵体系域与高位体系域的分界面。该界面上发育相当于凝缩段的褐红、紫红色泥岩, 粉砂质泥岩夹深色泥岩, 测井曲线较平直略带齿状, 自然伽马曲线值高, 电阻率曲线值低。始降面为高位体系域和下降体系域的分界面, 在湖盆边缘区表现明显。此时由于湖盆岸线退向湖盆中心, 三角洲沉积发育。在此界面上下准层序组模式由加积式变为进积式, 界面之上测井曲线变为漏斗型, 自然伽马曲线值变低, 电阻率曲线值变高(图9)。

3 沉积特征及沉积演化

3.1 沉积相类型

在三级层序地层格架下, 通过对岩芯、测井/录井及地震相的综合分析^[25-26], 认为东部坳陷早白垩世陆相断陷湖盆沉积体系主要发育了河流相、辫状

河三角洲相、滨浅湖相及扇三角洲相四种沉积相类型(图10), 主要特征如下。

河流相: 地震上呈断续、局部较连续的河流平原亚相沉积特征; 西北部河流下游辫状河三角洲的杂色砾岩沉积具分选磨圆程度高的特征, 指示了河流长距离搬运输送的结果。

辫状河三角洲相: 岩芯观察砂泥比较大, 岩性较粗, 主要为砾岩、砂砾岩、粗砂岩、中砂岩及细砂岩; 分流河道特征明显, 底部冲刷, 中部呈正韵律特征, 顶部发育细粒泥岩; 岩电性组合下部呈箱型、上部呈漏斗型, 中间为钟型和指状交替; 地震上可见丘状反射特征。

滨浅湖相: 岩芯观察发育大套泥岩, 颜色总体偏红, 主要为红褐色; 测井曲线总体表现为低幅平直, 局部指状; 地震剖面上见平行-亚平行、弱-强振幅、中等连续-较连续相。

扇三角洲相: 地震上见丘状反射特征, 钻井上未揭示。

3.2 沉积相分布

根据沉积相类型, 研究区在早白垩世主要发育了河流沉积体系、辫状河三角洲沉积体系、扇三角洲沉积体系和滨浅湖沉积体系。结合各沉积类型地震相范围, 明确了3个三级层序沉积相的分布特征。

K_1SQ_1 层序沉积时期, 湖盆周缘多发育河流相, 南部断裂带主要发育扇三角洲相, 北部缓坡带发育辫状河三角洲沉积, 湖盆区发育滨浅湖沉积。 K_1SQ_2 层序继承了 K_1SQ_1 沉积体系, 湖盆周缘河流相范围向湖区方向有所增大; 辫状河三角洲和扇三角洲相范围变小; 湖相沉积范围略有减小。 K_1SQ_3 层序沉积时期, 湖区沉积范围最小, 仅在南部控盆断裂区残留极小面积的滨浅湖相沉积; K_1SQ_3 层序后期河流作用增强, 研究区发育大面积河流相, 取代了前期的滨浅湖相和三角洲相沉积(图11)。

3.3 沉积演化

晚中生代中国东部海域及邻区受古太平洋板块俯冲、回卷及俯冲方向的转变, 构造演化经历了三展三挤共6个阶段。其中莱阳期发育近南北向拉伸, 其后在 125 ± 1 Ma 热隆挤压微构造反转^[28-29]。早白垩世北黄海盆地东部坳陷受南北向拉伸构造影响发育典型的南断北超型箕状断陷湖盆, 残留地层沉积时代与莱阳期裂谷时限相当。3个三级层序代表了东部坳陷在早白垩世发育3期幕式沉降并

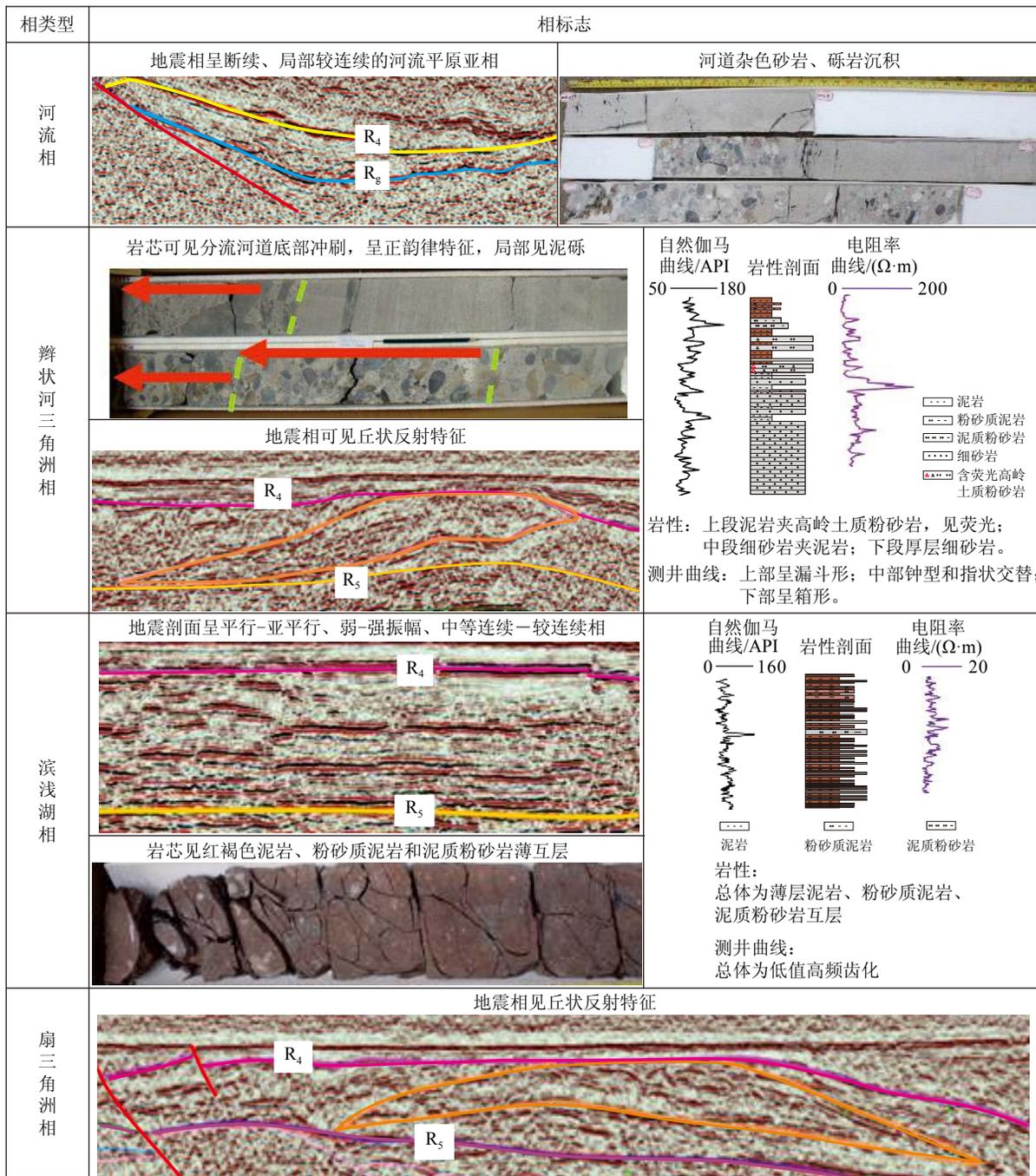


图 10 北黄海盆地东部凹陷沉积相标志

Fig.10 Indicators of sedimentary facies in the Eastern Depressions of the North Yellow Sea

发生构造反转(图 12)。

K₁SQ₁ 时期为湖盆断陷期：湖盆发育主要受南部断裂带控制，在北部缓坡带伴生调控小断层^[18-19]，形成断裂坡折型层序结构样式^[30-31]。该时期控盆断层强烈伸展，可容空间的增长速度超过沉积物的供给速度，湖盆总体处于欠补偿状态，发育河流砂体、辫状河三角洲砂体、滨浅湖滩坝砂体和滨浅湖泥岩，偶见生物灰岩。

K₁SQ₂ 时期为湖盆稳定裂陷期：湖盆在强烈伸

展后保持稳定沉降，控盆断裂活动强度比 K₁SQ₁ 期弱，盆内次级断裂不活动，形成了古地形坡折型层序^[30-31]，可容空间的增长速度慢。岩芯虽未揭示全部层序，但钻遇的岩芯显示该层序沉积时期沉积物粒度变细，以细砂岩、泥质粉砂岩和泥岩沉积为主，显示物源供给不充足。G 井在 K₁SQ₂ 层序低位体系域发育碎屑砂岩偶夹灰质泥岩取代了 K₁SQ₁ 层序相应时期的生物灰岩，反映了 K₁SQ₂ 层序较 K₁SQ₁ 层序湖盆水体变浅，河流和三角洲沉积体系

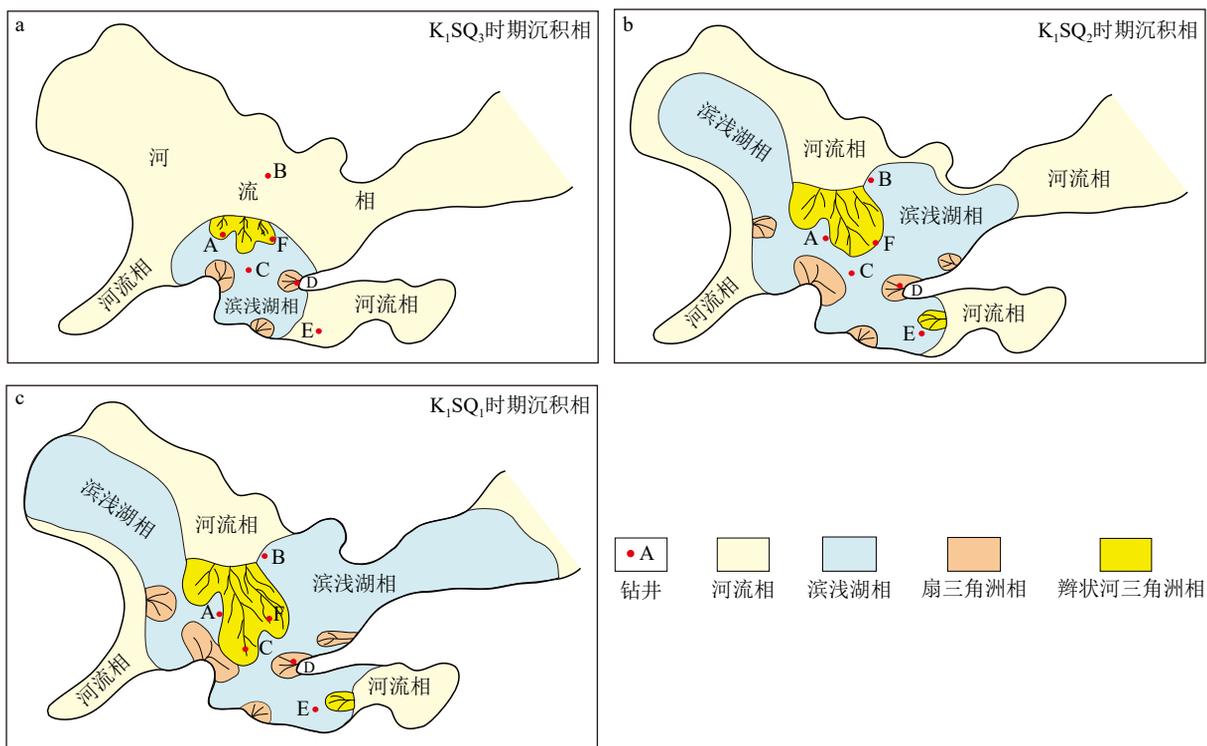


图 11 K₁SQ₁—K₁SQ₃ 时期沉积相平面展布图

Fig.11 Sedimentary phase distribution in the K₁SQ₁-K₁SQ₃ period

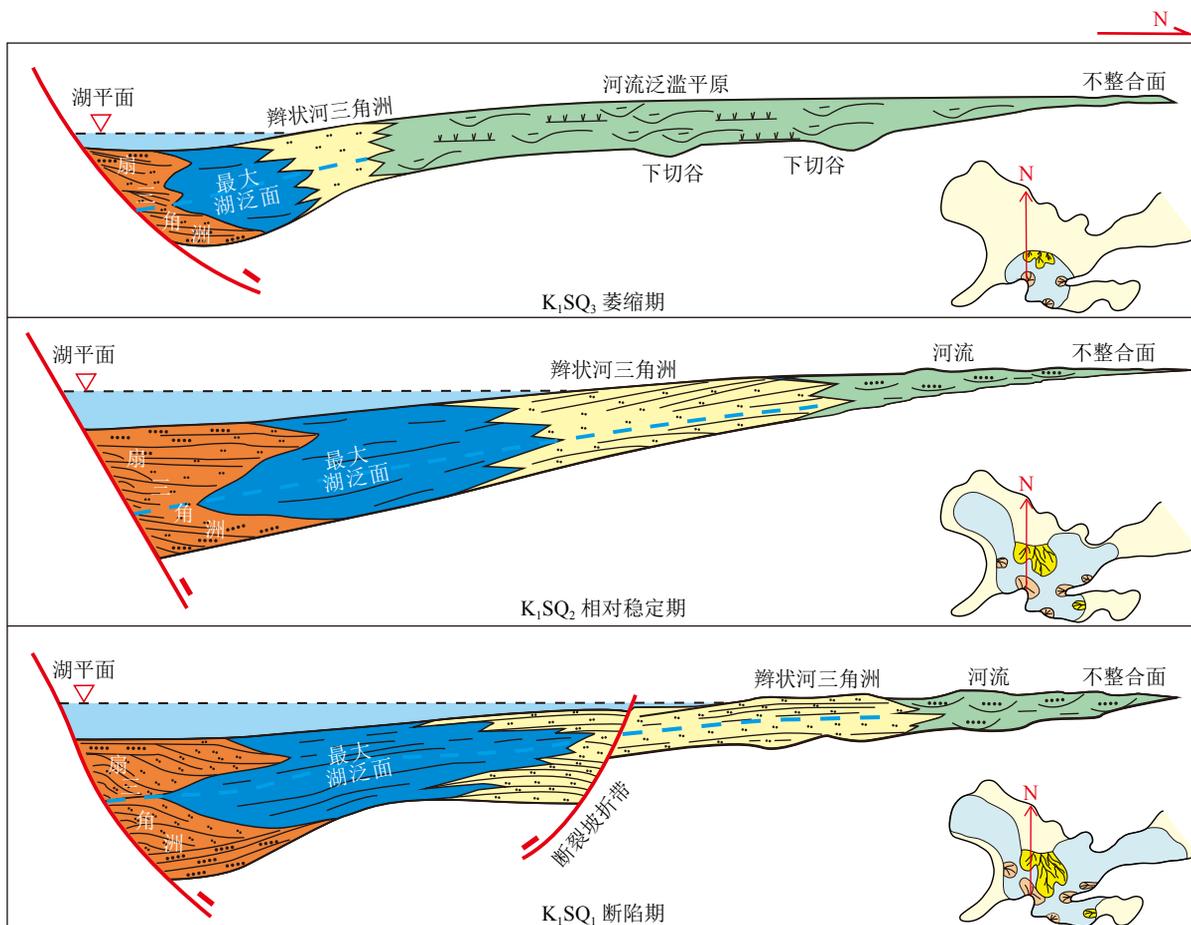


图 12 早白垩世三级层序及沉积充填模式图

Fig.12 The third-order sequences and sedimentary filling patterns in the early cretaceous

开始向湖区推进。

K₁SQ₃ 时期为湖盆断陷萎缩期: 这应与早白垩世中期 125±1 Ma 中国东部黄海及周边海域发生热隆挤压微构造反转时限相吻合^[28]。该时期受局部构造抬升作用影响, 可容纳空间急剧缩小, 物源供给相对增强, 盆地周缘河流泛滥平原向湖区急剧推进, 导致湖盆萎缩消亡。

4 结论

(1) 北黄海盆地东部坳陷下白垩统从底部向上依次发育了 K₁SQ₁、K₁SQ₂ 和 K₁SQ₃ 三级层序, 其中 K₁SQ₃ 低位体系域、湖侵体系域、高位体系域和下降体系域发育完整, 为典型的陆相四分层序。

(2) 北黄海盆地东部坳陷主要发育 4 种沉积类型。在盆地边缘主要发育河流相, 在南部断裂带发育扇三角洲相, 在北部缓坡带发育辫状河三角洲相, 在湖盆区发育红色滨浅湖沉积相。

(3) 三级层序中 K₁SQ₁ 时期为湖盆断陷期, K₁SQ₂ 时期为稳定裂陷期, K₁SQ₃ 时期为断后萎缩期。四种沉积相类型在 3 个三级层序中均有不同程度的发育, K₁SQ₁、K₁SQ₂ 时期湖盆滨浅湖相发育范围大, K₁SQ₃ 期湖盆萎缩至最小, 主要发育了大范围的河流相。

参考文献 (References)

- [1] Mitchum R M, Sangree J B, Vail P R, et al. Recognizing sequences and systems tracts from well logs, seismic data, and biostratigraphy: examples from the late Cenozoic of the Gulf of Mexico[M]//Weimer P, Posamentier H. Siliciclastic Sequence Stratigraphy: Recent Developments and Applications. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1993.
- [2] Van Wagoner J C, Mitchum R M, Campion K M, et al. Siliciclastic Sequence Stratigraphy in Well Logs, Cores, and Outcrops: Concepts for High-Resolution Correlation of Time and Facies[M]. Tulsa: Association of Petroleum Geologists, 1990: 7-66.
- [3] Hunt D, Tucker M E. Stranded parasequences and the forced regressive wedge systems tract: deposition during base-level fall—reply[J]. *Sedimentary Geology*, 1995, 95(1-2): 147-160.
- [4] Helland-Hansen W, Gjelberg J G. Conceptual basis and variability in sequence stratigraphy: a different perspective[J]. *Sedimentary Geology*, 1994, 92(1-2): 31-52.
- [5] Shanley K W, McCabe P J. Perspectives on the sequence stratigraphy of continental strata[J]. *AAPG Bulletin*, 1994, 78(4): 544-568.
- [6] 李思田, 林畅松, 解习农, 等. 大型陆相盆地层序地层学研究: 以鄂尔多斯中生代盆地为例 [J]. *地学前缘*, 1995, 2(3-4): 133-136, 148. [LISITIAN, LIN Changsong, XIE Xinong, et al. Approaches of nonmarine sequence stratigraphy: a case study on the Mesozoic Ordos Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 1995, 2(3-4): 133-136, 148.]
- [7] 顾家裕, 郭彬程, 张兴阳. 中国陆相盆地层序地层格架及模式 [J]. *石油勘探与开发*, 2005, 32(5): 11-15. [GU Jiayu, GUO Bincheng, ZHANG Xingyang. Sequence stratigraphic framework and model of the continental basins in China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2005, 32(5): 11-15.]
- [8] 于兴河, 姜辉, 李胜利, 等. 中国东部中、新生代陆相断陷盆地沉积充填模式及其控制因素: 以济阳坳陷东营凹陷为例 [J]. *岩性油气藏*, 2007, 19(1): 39-45. [YU Xinghe, JIANG Hui, LI Shengli, et al. Depositional filling models and controlling factors on Mesozoic and Cenozoic fault basins of terrestrial facies in eastern China: a case study of Dongying sag of Jiyang depression[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2007, 19(1): 39-45.]
- [9] 操应长. 断陷湖盆层序地层学 [M]. 北京: 地质出版社, 2005: 36-59. [CAO Yingchang. Rift Lacustrine Basin Sequence Stratigraphy[M]. Beijing: Geology Press, 2005: 36-59.]
- [10] 刘振湖, 高红芳, 胡小强, 等. 北黄海盆地东部坳陷中生界含油气系统研究 [J]. *中国海上油气*, 2007, 19(4): 229-233. [LIU Zhenhu, GAO Hongfang, HU Xiaoqiang, et al. A study on the Mesozoic petroleum system in East depression, North Yellow Sea basin[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2007, 19(4): 229-233.]
- [11] 龚承林, 雷怀彦, 王英民, 等. 北黄海盆地东部坳陷构造演化与油气地质特征 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2009, 29(1): 79-86. [GONG Chenglin, LEI Huaiyan, WANG Yingmin, et al. Hydrocarbon geologic characters and structural evolution in the eastern depression of North Yellow sea Basin[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2009, 29(1): 79-86.]
- [12] Zhang Y G, Chen Q H, Sun K, et al. Characteristics and influencing factors of Cretaceous reservoir in eastern depression of North Yellow Sea basin[J]. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2022, 12(7): 1907-1918.
- [13] 杜民, 胡小强, 王改云. 北黄海盆地东部坳陷东南部层序地层特征及沉积体系 [J]. *海洋地质前沿*, 2014, 30(1): 25-33. [DU Min, HU Xiaoqiang, WANG Gaiyun. Sequence stratigraphic characteristics and depositional systems in the southeast of the eastern depression of the North Yellow Sea Basin[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2014, 30(1): 25-33.]
- [14] 王改云, 刘金萍, 王后金, 等. 北黄海盆地东部坳陷中生界沉积特征及演化 [J]. *沉积学报*, 2015, 33(3): 561-567. [WANG Gaiyun, LIU Jinping, WANG Houjin, et al. Sedimentary characteristics and evolution of Mesozoic in the eastern depression, North Yellow Sea Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2015, 33(3): 561-567.]
- [15] 王改云, 刘金萍, 王曦亮, 等. 北黄海东部次盆地白垩统沉积环境及沉积充填 [J]. *中国地质*, 2018, 45(1): 69-80. [WANG Gaiyun, LIU Jinping, WANG Liaoliang, et al. Early Cretaceous sedimentary environment and filling in the Eastern Sub-basin, North Yellow Sea[J]. *Geology in China*, 2018, 45(1): 69-80.]
- [16] 王任, 石万忠, 肖丹, 等. 北黄海盆地地下白垩统层序构成特点及控制因素 [J]. *石油学报*, 2015, 36(12): 1531-1542. [WANG Ren, SHI Wanzhong, XIAO Dan, et al. Architecture characteristics and control

- factors of Lower Cretaceous sequence in North Yellow Sea Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(12): 1531-1542.]
- [17] 蔡乾忠. 黄海含油气盆地地区地质与大地构造环境 [J]. *海洋地质动态*, 2002, 18(11): 8-12. [CAI Qianzhong. Regional geology and geotectonic environment of petroliferous basins in the Yellow Sea[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2002, 18(11): 8-12.]
- [18] 简晓玲, 刘金萍, 王改云. 北黄海东部次盆地中新代原型盆地分析 [J]. *中国海上油气*, 2019, 31(1): 22-31. [JIAN Xiaoling, LIU Jinping, WANG Gaiyun. Analysis of Meso-Cenozoic prototype basins in the East sub-basin, northern Yellow Sea[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2019, 31(1): 22-31.]
- [19] 胡小强, 唐大卿, 王嘹亮, 等. 北黄海盆地东部坳陷断裂构造分析 [J]. *地质科技情报*, 2017, 36(1): 117-127. [HU Xiaoqiang, TANG Daqing, WANG Liaoliang, et al. Fault structures in the eastern depression of the North Yellow Sea basin[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2017, 36(1): 117-127.]
- [20] 陈书伟, 魏文艳, 龚胜利, 等. 北黄海东部坳陷中侏罗世-早白垩世孢粉组合序列 [J]. *地层学杂志*, 2019, 43(1): 51-62. [CHEN Shuwei, WEI Wenyan, GONG Shengli, et al. Middle Jurassic to early cretaceous palynological assemblages in the eastern depression, North Yellow Sea basin[J]. *Journal of Stratigraphy*, 2019, 43(1): 51-62.]
- [21] Vail P R. Seismic stratigraphy interpretation using sequence stratigraphy: Part 1: seismic stratigraphy interpretation procedure[M]//Bally A W. *Atlas of Seismic Stratigraphy*. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1987: 1-10.
- [22] Cross T A, Baker M R, Chapin M A, et al. Applications of high-resolution sequence stratigraphy to reservoir analysis[M]//Eschard R, Dolozeg B. *Subsurface Reservoir Characterization from Outcrop Observation*. Paris: Editions Technip, 1993: 11-33.
- [23] Catuneanu O. *Principles of Sequence Stratigraphy*[M]. Amsterdam: Elsevier, 2006: 1-369.
- [24] 李绍虎. 浅议层序边界 [J]. *地学前缘*, 2012, 19(1): 20-31. [LI Shaohu. About sequence boundary[J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(1): 20-31.]
- [25] 于兴河. 碎屑岩系油气储层沉积学 [M]. 2 版. 北京: 石油工业出版社, 2008. [YU Xinghe. *Clastic Hydrocarbon Reservoir Sedimentology* [M]. 2nd ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008.]
- [26] 朱筱敏. 层序地层学 [M]. 2 版. 青岛: 中国石油大学出版社, 2023. [ZHU Xiaomin. *Sequence Stratigraphy*[M]. 2nd ed. Qingdao: China University of Petroleum Press, 2023.]
- [27] 邹才能, 侯连华, 杨帆, 等. 碎屑岩风化壳结构及油气地质意义 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2014, 44(12): 2652-2664. [ZOU Caineng, HOU Lianhua, YANG Fan, et al. Structure of weathered clastic crust and its petroleum potential[J]. *Science China Earth Sciences*, 2014, 57(12): 3015-3026.]
- [28] 周瑶琪, 张悦, 周腾飞, 等. 黄海及邻区晚中生代构造转换与原型盆地构造格局 [J]. *地球科学*, 2023, 48(4): 1461-1480. [ZHOU Yaoqi, ZHANG Yue, ZHOU Tengfei, et al. Tectonic transition of the Late-Mesozoic Yellow Sea and adjacent region and its tectonic framework of the proto-basin[J]. *Earth Science*, 2023, 48(4): 1461-1480.]
- [29] Yu H T, Xu Z J, Cheng R H, et al. Late Mesozoic transformation from the compressive to extensional tectonic regime of the Eastern North China Craton: sedimentary records from the North Yellow Sea Basin[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2023, 256: 105809.
- [30] 张自力, 朱筱敏, 张锐锋, 等. 典型箕状断陷湖盆层序划分及层序结构样式: 以霸县凹陷古近系为例 [J]. *地球科学*, 2020, 45(11): 4218-4235. [ZHANG Zili, ZHU Xiaomin, ZHANG Ruifeng, et al. Sequence framework and sequence filling style in lacustrine rift basin: taking Paleogene in Baxian sag as an example[J]. *Earth Science*, 2020, 45(11): 4218-4235.]
- [31] 朱筱敏, 康安, 王贵文. 陆相坳陷型和断陷型湖盆层序地层样式探讨 [J]. *沉积学报*, 2003, 21(2): 283-287. [ZHU Xiaomin, KANG An, WANG Guiwen. Sequence stratigraphic models of depression and faulted-down lake basins[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2003, 21(2): 283-287.]