

白驹凹陷泰州组层序地层及沉积特征

魏祥峰¹ 张廷山¹ 梁 兴² 姚秋昌² 汤兴友³

(1.西南石油大学资源与环境学院,四川 成都 610500;2.中国石油浙江油田公司,浙江 杭州 310023;
3.川庆钻探工程公司地球物理山地勘探二队,四川 成都 610225)

摘要:运用地震、岩心、钻测井和古生物等资料,对苏北盆地白驹凹陷泰州组进行了层序地层和沉积相分析,在泰州组地层中可识别出 3 个层序界面,划分出 2 个三级层序(SQ1、SQ2)和 4 个体系域。根据沉积相标志,在泰州组沉积体中识别出了辫状河三角洲、(曲流河)三角洲及湖泊 3 种沉积相类型,并进一步划分为 8 种亚相和 17 种微相。其中, SQ1 沉积于盆地初始断陷期,以发育辫状河三角洲为特征;SQ2 低位体系域沉积时期,盆地的拉张作用增加,湖盆范围扩大,(曲流河)三角洲沉积最为发育;SQ2 湖侵体系域和高位体系域沉积时期,盆地发育由断陷湖盆转为坳陷湖盆,湖侵体系域湖泊沉积范围最广,主要为半深湖—深湖亚相沉积环境,高位体系域湖平面略有下降,以滨浅湖沉积环境为主。指出白驹凹陷生油层主要发育于 SQ2 湖侵体系域,其本身又是良好的盖层;而储集层则主要发育在 SQ1—SQ2 低位体系域以及 SQ2 高位体系域,之间相互组合形成了 2 套生储盖组合,生储盖的良好配置使白驹凹陷发育的辫状河三角洲前缘水下分流河道、三角洲前缘水下分流河道、席状砂以及滨浅湖砂滩、砂坝砂体成为有利的油气勘探区。

关键词:层序地层;沉积特征;泰州组;白驹凹陷

中图分类号:P539.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2012)02-0400-14

近年来,随着白驹凹陷石油勘探开发与综合地质研究的深入,中石油浙江油田分公司在深部地层泰州组的钻探取得了重大突破,除了在三角洲水下分流河道砂体等有利储集体中获得高产油流外,在滨浅湖砂体中也见良好的油气显示,这些发现揭示了白驹凹陷泰州组具有很大的勘探潜力。前人对该地区泰州组做过大量研究^[1-5],但多把注意力集中在泰州组生物地层、物源分析、油气富集规律与成藏模式等研究上,但对其沉积特征缺乏系统研究,对沉积相在纵向上的演化规律和横向上的展布特征都没有系统的认识。而邻区海安凹陷的泰州组沉积特征研究却成果丰硕^[6-8],因此,作者在借鉴邻区研究成果的基础上,运用沉积学^[9-10]和经典层序地层学^[11-12]基本原理和方法,借鉴前人对陆相盆地层序地层的研究^[13-21],通过白驹凹陷三维测线的精细地震解释,并

结合研究区钻井的录井、测井和岩心资料的综合分析,建立了白驹凹陷泰州组层序地层框架,并对各体系域的沉积类型、平面展布以及发育演化特征进行了深入研究,以期预测有利砂体的发育地区和分布规律提供依据。

1 地质背景

白驹凹陷位于苏北盆地东台坳陷东北部,是一个中、新生代充填的南断北超的箕状断陷,东临裕华凸起、小海凸起,南以吴堡低凸起、梁垛低凸起与溱潼凹陷、海安凹陷相对,西以柘垛低凸起为界与高邮凹陷相隔,北与建湖隆起接壤,面积约为 2 180 km²^[2-3](图 1-A)。根据断裂和地层发育特征,可将白驹凹陷自北向南进一步划分为大丰次凹、施家舍断阶带、洋心次凹和草埝断阶带 4 个次级构造单元(图 1-B);自

收稿日期:2011-05-04;改回日期:2012-02-06

基金项目:四川省重点学科建设项目(SZD0414)资助。

作者简介:魏祥峰,男,1984年生,博士生,从事沉积学、层序地层学研究;E-mail:weixiangfeng1984@163.com。

晚白垩世以来其构造演化经历了晚白垩世区域拗陷成盆期、古近纪的拉张断陷成盆期、新近系以来的整体沉降拗陷成盆期^[22-23],其中古近纪拉张断陷成盆期又可分为初始断陷、断陷-拗陷、强烈断陷和萎缩等 4 个阶段,基本形成了白驹凹陷南断北超的构造格局。上白垩统及其以上层位的陆相沉积层序为凹陷的主体沉积,最大沉积厚度达 5 000 m,从老到新依次是:白垩系上白垩统浦口组(K_{2p})、赤山组(K_{2c});古近系古新统泰州组(E_{1t})、阜宁组(E_{1f});始新统三垛组(E_{2s})、新近系盐城组(N_{2y})、第四系东台组(Qd),凹陷缺失始新统戴南组(E_{2d})以及渐新统(E_3)地层。

白驹凹陷泰州组发育于古近纪拉张断陷成盆期的早期,依据岩性、电性特征并结合古生物资料,可以划分为 3 段,自下而上分别为泰 0 段(E_{2t}^0)、泰 1 段(E_{2t}^1)和泰 2 段(E_{2t}^2)。泰 0 段岩性主要为灰色砂砾岩、含砾砂岩、中-粉砂岩与灰黑色、深灰色泥岩不等厚互层,厚 0~250 m,凹陷边缘高部位缺失该套地层,向凹陷沉降中心地层厚度逐渐增大;相对于泰 0 段,泰 1 段岩性具有较明显的变化,沉积物粒度变细、颜色变浅,岩性以灰色、棕色粉砂岩、泥质粉砂岩与灰色泥岩薄互层为特点,厚 100~250 m;泰 2 段中、下部为灰黑色、深灰色泥岩,底部为灰质泥岩、泥灰岩,灰质含量 20%~50%,上部岩性为深灰色泥岩夹薄层灰色粉砂岩、泥质粉砂岩,其间介形虫化石种属及数量较丰富,轮藻及孢粉化石较少,厚 80~150 m。

2 层序界面的识别及层序地层序列

2.1 层序界面的识别与划分

陆相盆地层序分析的关键是识别不同级别层序地层单元的界面^[24]。地层中的层序地层界面的识别是划分层序、进行层序结构及体系域特征研究的基础。本次研究对白驹凹陷泰州组进行层序界面的划分与识别主要依据包括:①地震剖面上显示的反射不整合关系,如削顶或下切冲刷造成的不整合面、上超不整合面和顶超界面等;②合成地震记录、层速度等反映的突变界面;③利用测井曲线和岩心识别出的下切水道充填和古暴露面;④沉积体系的演化过程,尤其是缺少明显的侵蚀不整合面时需要依据沉积体系与盆地的演化过程进行划分^[25];⑤生物数量和种属的发生明显的断代现象。在陆相断陷盆地中,一个完整断陷期的沉积充填常作为一个超层序组,断陷期内的一个断陷幕期的沉积充填作为一个超层

序,而白驹凹陷泰州组—阜宁组充填地层对应苏北盆地古近系断陷期断陷 I 幕,为一个超层序,因此,在白驹凹陷泰州组地层中识别出的层序界面为三级层序界面,分别为 SB1、SB2、SB3(图 2~3)。

SB1 为上白垩统与古近系之间的不整合面,在地震剖面上对应 T_4^+ 反射层(图 3),其上覆地层表现为上超,下伏地层表现为明显的削截、侵蚀现象,该界面之下发育上白垩统赤山组色砂岩与紫色泥岩不等厚互层,具有小-中幅“钟形”或“指状”的自然电位曲线特征,界面之上发育高幅“箱形”自然电位曲线的泰 0 段灰色砂砾岩、含砾砂岩、砂岩夹灰色、灰黑色泥岩(图 2-A)。SB2 为泰 0 段与泰 1 段之间的不整合面,在地震剖面上对应 T_3^+ 反射层(图 3),其上覆地层表现为上超,该界面上下岩性、岩相的发生明显的变化,界面之下为辫状河三角洲近源、粒粗的沉积物,界面之上则为三角洲(曲流河三角洲,下同)远源、粒细的沉积物(图 2-B)。SB3 为泰州组与阜宁组之间的不整合面,在地震剖面上对应 T_2^+ 反射层(图 3),其上覆地层表现为上超,同时该层序界面为泰 2 段上部“漏斗形”向上变粗、变厚的逆旋回序列,与阜宁组下部“齿化钟形”自然伽马曲线所反映的三角洲前缘沉积环境向上变细、变薄的正旋回序列之间的分界面(图 2-C),另外,该层序界面之间的介形类、轮藻类等化石种属发生明显的断代现象^[26](图 4),这与地质界公认的 K-R 界面是灾变事件相一致。

2.2 层序地层序列及体系域的划分

2.2.1 层序地层序列

根据以上层序界面(SB1、SB2、SB3)的识别,结合白驹凹陷构造演化、古生物、古气候和湖平面的相对变化特征等因素的分析,笔者把白驹凹陷泰州组划分为 2 个三级层序(SQ1、SQ2),SQ1 对应泰州组 0 段(E_{1t}^0);SQ2 对应泰州组 1 段-2 段($E_{1t}^1-E_{1t}^2$)(图 3)。SQ1 仅在白驹凹陷较深部位(丰探 1 井、丰探 9 井、丰参 1 井为代表)发育,在边缘斜坡高部位(合 1 井为代表)发生沉积物过路现象,缺失该层序,地层厚度在 0~270 m,由凹陷边缘向中心逐渐增大。SQ2 在白驹凹陷发育稳定,地层厚度在 150~300 m,全区厚度变化不大(图 8)。

2.2.2 体系域的划分

在陆相断陷湖盆中,体系域为同期沉积体系的组合,是构成层序的基本单位。在湖泊相层序中,体系域的划分关键是识别出初始湖泛面(FFS)与最大

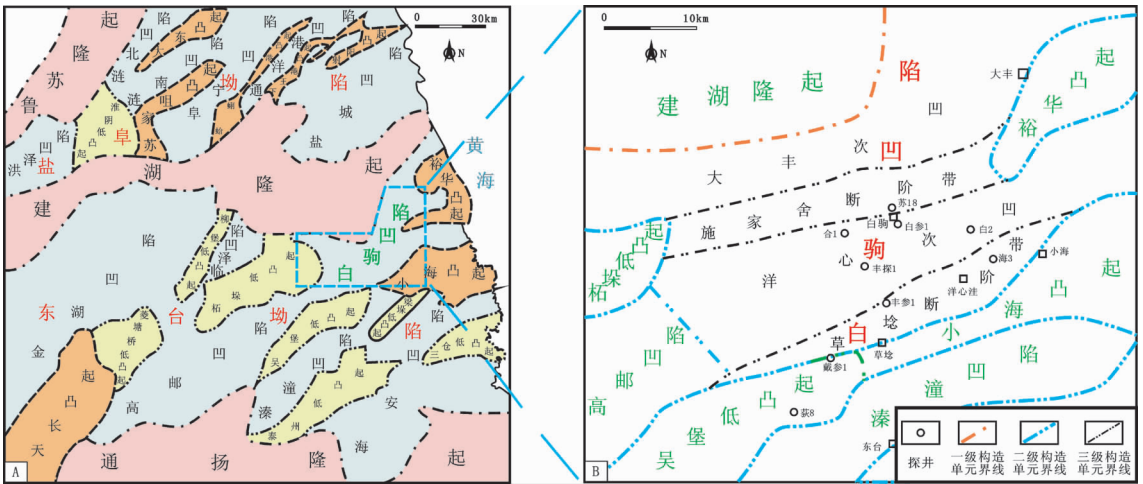


图1 白驹凹陷位置及构造区划图

A—苏北盆地构造区划图;B—白驹凹陷构造区划图

Fig. 1 Location and tectonic division of Baiju sag

A—Tectonic division of Subei basin; B—Tectonic division of Baiju sag

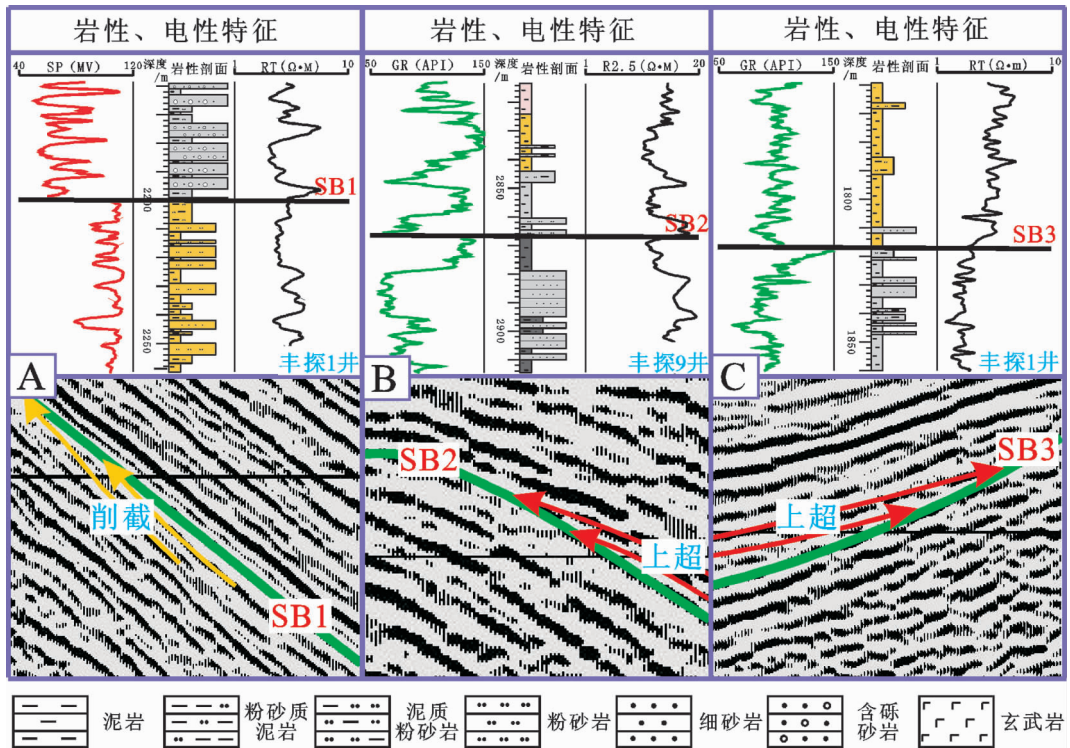


图2 白驹凹陷泰州组三级层序界面特征及识别标志

Fig.2 Third-order sequence boundary characteristics and identification marks of Taizhou Formation in Baiju sag

湖泛面(MFS)。

由于泰州组沉积厚度薄, 在 seismic 上无法划分体系域, 因此对体系域的划分主要是在单井上进行, 在钻井剖面上, 主要是根据准层序的叠置样式来确定

初次湖泛面和最大湖泛面的。初次湖泛面之下的低位体系域主要呈加积到弱进积式的地层叠置样式, 初始湖泛面与最大湖泛面之间的湖侵体系域则以退积式为主, 而最大湖泛面之上的高位体系域主要为

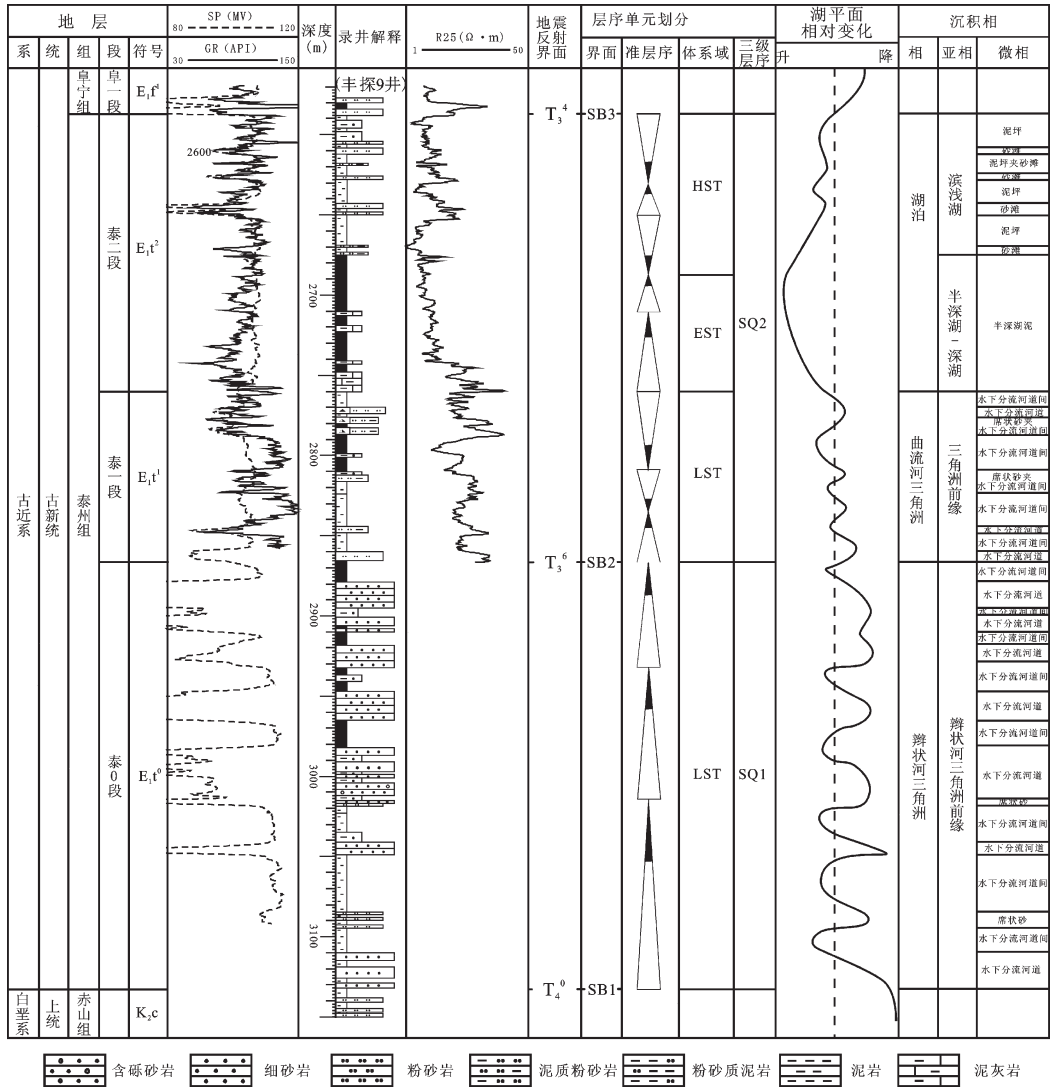
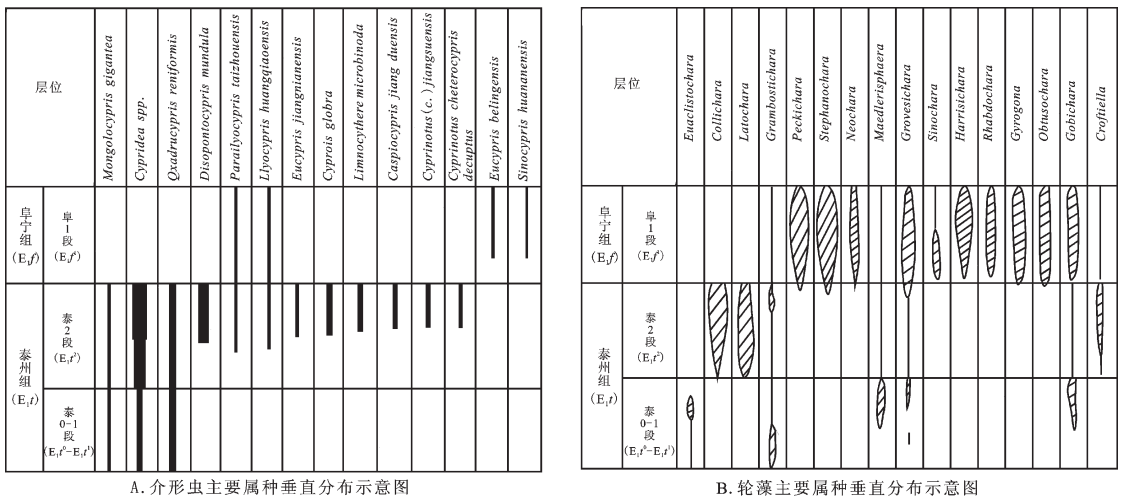


图 3 白驹凹陷泰州组层序划分及沉积相分析

Fig.3 Sequence division and sedimentary facies of Taizhou Formation in Baiju sag



A. 介形虫主要属种垂直分布示意图

B. 轮藻主要属种垂直分布示意图

图 4 白驹凹陷泰州组与阜宁组之间生物种属断代现象

Fig.4 Generation discontinuity of biological species between Taizhou and Funing Formation in Baiju sag

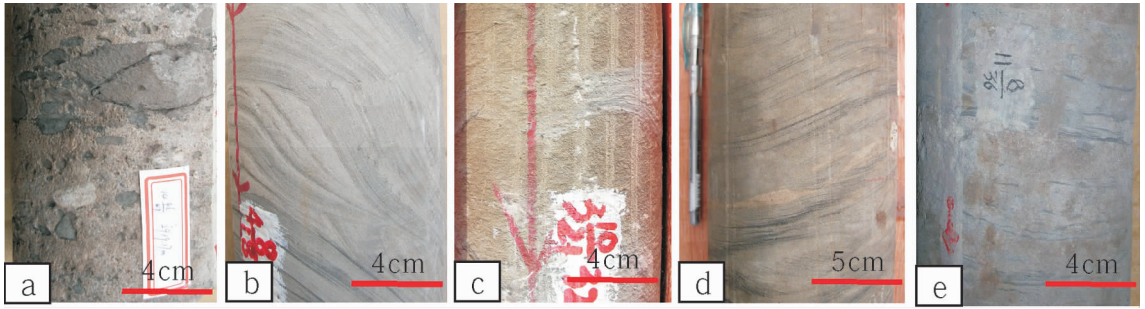


图5 白驹凹陷泰州组岩心沉积特征

a—辫状河三角洲前缘水下分流河道底部灰白色含砾粗砂岩。砾石成分主要为石英砾,含少量泥砾,分选差,呈次棱角状。块状层理。丰参1井,泰0段,2 919.17 m。b—三角洲前缘水下分流河道浅灰色粉砂岩。发育槽状交错层理,上攀交错层理。丰探9井,泰1段,2 784.30 m。c—三角洲前缘河口砂坝灰白色粉砂岩,向上递变为粉细砂岩。逆递变层理。丰探9井,泰1段,2 779.10 m。d—三角洲前缘席状砂灰色粉细砂岩。下部发育上攀交错层理,上部发育平行层理。丰探1井,泰1段,2 002.3 m。e—滨浅湖砂滩灰色粉砂岩与泥岩薄互层。发育砂纹层理,泥岩中见生物扰动构造。丰参1井,泰2段,2 52.75 m

Fig.5 Core sedimentary features of Taizhou Formation in Baiju sag

a—Grayish white pebbly coarse sandstone at the bottom of the underwater distributary channels of braided-river delta front. The main component of Gravel being quartz gravel, with a small amount of silt gravel. Gravels with poor sorting and a second angular shape. Massive bedding developed. Fc1 well, E1t0, 2 919.17 m. b—Gray siltstone in the underwater distributary channels of meandering-river delta front. Trough cross bedding and climbing cross bedding developed. Ft9 well, E1t1, 2 784.30 m. c—Grayish white siltstone and fine sandstone in the mouth bar of meandering-river delta front. Inverse graded bedding developed. Ft9 well, E1t1, 2 779.10 m. d—Gray siltstone and fine sandstone in the sheet sand of meandering-river delta front. Climbing cross bedding developed in the lower part and parallel bedding developed in the upper part. Ft1 well, E1t1, 2 002.30 m. e—Gray siltstone interbedded with thin-layer shale in the sandy beach of shallow-shore lake. Sand ripple bedding developed, and bioturbation structures seen in mudstone. Fc1 well, E1t2, 2 652.75 m

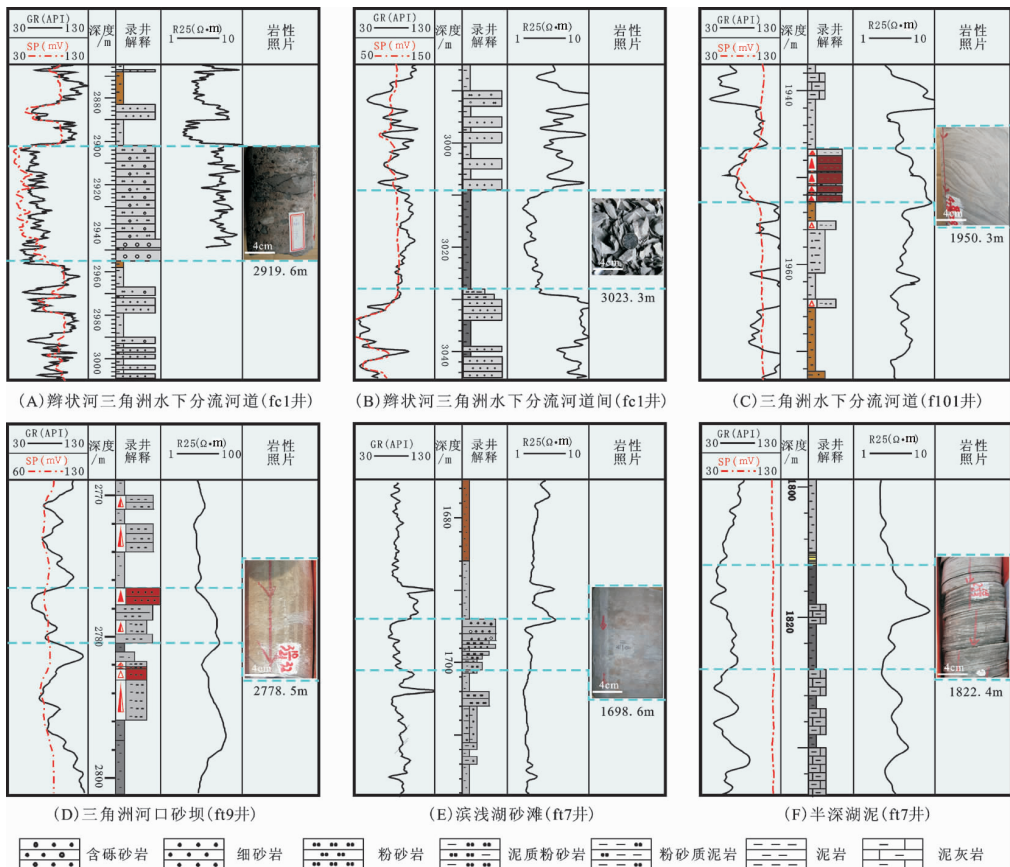


图6 白驹凹陷泰州组重点微相岩电关系模版

Fig.6 Rock-electricity relation templates of important microfacies of Taizhou Formation in Baiju sag

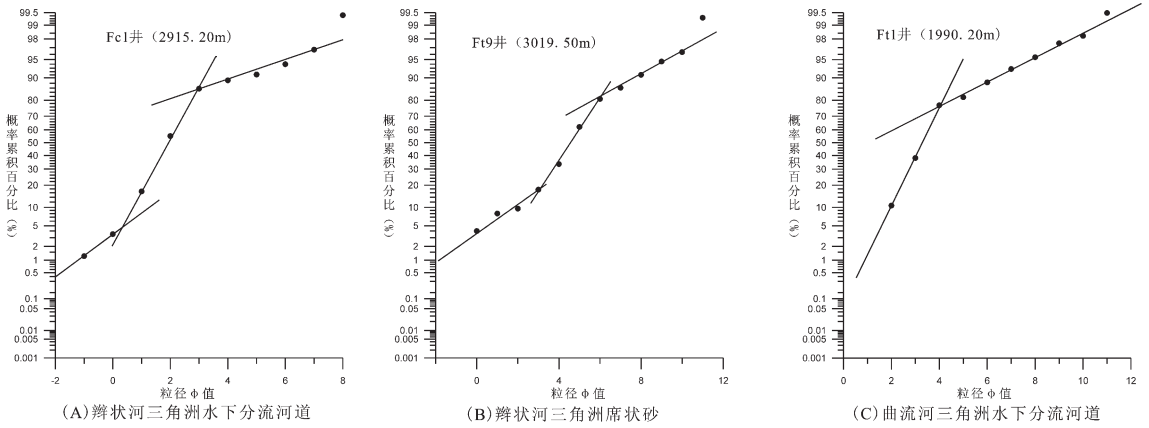


图 7 白驹凹陷泰州组重点微相粒度概率曲线特征

Fig.7 Characteristics of grain size curve of important microfacies of Taizhou Formation in Baiju sag

进积式；同时湖侵体系域顶部常存在薄层的凝缩层沉积,代表了最大湖泛时期的沉积产物。根据对白驹凹陷 60 多口井的录井、测井和岩心等资料的综合分析,SQ1 仅包含低位体系域(图 3),由于 SQ1 处于盆地形成的初始裂陷期,研究区与物源区间的距离短、高差大,因此该层序以辫状河三角洲沉积体系为主,在垂向上呈加积到弱进积式的地层叠置样式。SQ2 是一套完整的“水进-水退”沉积旋回,自下而上可分为低位、湖侵、高位 3 个体系域(图 3),泰 1 段沉积早期为三角洲充填沉积,随凹陷进一步的下沉,沉积物粒度逐渐变细,泰二段早期为“湖泛期”,沉积了一套厚 60~80 m 的半深湖—深湖亚相深灰色、灰黑色泥岩,底部为灰色灰质泥岩、泥灰岩,是泰州组主要的生油层段;之后凹陷再次缓慢上返,湖平面下降,最终过渡为滨浅湖亚相浅色泥岩夹薄层粉砂岩、泥质粉砂岩。

3 沉积相类型及特征

以区内钻井岩心、录井、电测曲线为基础,结合研究区所处的地理位置和区域沉积背景等因素,根据沉积相识别标志,在研究区泰州组内沉积体内共识别出辫状河三角洲、三角洲、湖泊 3 种沉积相类型,并进一步划分出 8 种亚相、17 种微相(表 1)。

3.1 辫状河三角洲

辫状河三角洲是由辫状河体系前积到停滞水体中形成的富含砂和砾石的三角洲。它是一种粗粒的三角洲,通常形成在湖盆的短轴方向^[26],当盆地长轴方向斜坡较窄、物源较近时也可发育。辫状河三角洲

表 1 白驹凹陷泰州组沉积相类型

Table 1 Sedimentary facies types of Taizhou Formation in Baiju sag

沉积相	沉积亚相	主要沉积微相
辫状河三角洲	辫状河三角洲平原	分流河道、分流河道间
	辫状河三角洲前缘	水下分流河道、席状砂、水下分流河道间
	前辫状河三角洲	前三角洲泥
三角洲	三角洲平原	分流河道、分流河道间
	三角洲前缘	水下分流河道、河口砂坝、席状砂、水下分流河道间
	前三角洲	前三角洲泥
湖泊	滨浅湖	砂坝、沙滩、泥坪
	半深湖-深湖	半深湖泥

沉积特征介于正常三角洲与扇三角洲之间,既有正常三角洲的某些特征,亦有扇三角洲的部分特征(如距物源近、沉积物粒度粗),但更具有自身沉积作用的显著特点^[6-7,27-28]。泰州组 0 段南沉积期白驹凹陷处于初始裂陷期,研究区与物源区间的距离短、高差大,辫状河三角洲发育。可进一步识别出下辫状河三角洲平原、辫状河三角洲前缘和前辫状河三角洲 3 个亚相。

3.1.1 辫状河三角洲平原亚相

由分流河道、分流河道间等微相组成。由于分流河道不断迁移,这些微相在剖面上频繁叠置。①分流河道,岩性以浅灰色砂砾岩、含砾砂岩、含砾中—粗砂岩、粗—细砂岩为主,有时顶部可见粉砂岩。砾石

呈次棱角一次圆状,并有一定规律的定向排列。沉积构造以块状层理、大型槽状交错层理和板状交错层理为主,上部可见平行层理、楔状交错层理,砂体底部具有冲刷面,SP 曲线负异常明显,呈箱形或钟形。②分流河道间,沉积物主要为棕色、褐色的泥岩或粉砂质泥岩,局部夹粉砂岩、泥质粉砂岩薄层。发育水平层理、缓波状层理,GR 曲线呈平行于基线的低幅平直或微齿化状。

3.1.2 辫状河三角洲前缘亚相

辫状三角洲前缘亚相主要发育的微相由水下分流河道、水下分流河道间和席状砂等微相组成。①水下分流河道:是辫状河三角洲平原亚相中分流河道入湖后在水下的延续部分,沉积物粒度相对较粗,底部冲刷面上多见砾石层,自下而上由灰色、灰白色含砾中—粗砂岩(图 5-a)、中砂岩、细砂岩和粉砂岩等组成,显示下粗上细的变化特征,单层厚度 3~8 m。常发育块状层理(图 5-a)、平行层理,在粉砂岩中见沙纹层理、波状层理。SP 曲线常呈明显负异常的箱形或钟形(图 6-A),底部具有明显的突变接触。在研究区其粒度概率曲线(图 7-A)常为三段式,滚动组分含量低(<10%),跳跃总体含量为 20%~85%,斜率 60°~80°,悬浮总体含量较少,一般为 10%~20%;截点介于 3~4 ϕ ,反映分选较好、以牵引流为主的搬运方式。②水下分流河道间:沉积物粒度较细,岩性主要为深灰色、灰色泥质粉砂岩、粉砂质泥岩和泥岩,砂、泥岩呈薄互层出现。沉积构造主要为小型波状层理和水平层理,沿层面分布较多的植物碎屑,SP 曲线呈平行于基线的低幅平直或微齿化状(图 6-B)。③席状砂:多以细砂岩、粉砂岩与泥岩的薄互层出现,常呈反韵律或均质韵律结构,横向延伸远,分布范围广,但厚度一般较薄,为 1~4 m;主要发育水平层理和小型波状层理、块状层理。在研究区其粒度概率曲线(图 7-B)常为两跳加一悬的三段式,跳跃总体含量约 80%,两跳跃次总体斜率相近,斜率 45°~60°,分选中等偏好;悬浮次总体含量接近 20%,分选中等偏差;反映河流与波浪综合作用的水动力环境,但由于波浪作用较弱造成跳跃组分的分选性不如海滩砂高,且跳跃组分含量较高。

3.1.3 前辫状三角洲亚相

位于辫状三角洲前缘末端前方,水体相对较深,主要为前三角洲泥微相沉积,岩性为深灰色泥岩和粉砂质泥岩,具水平纹理、透镜状层理和块状层理,

生物扰动构造发育。

3.2 三角洲

正常三角洲是在沉积坡度较缓的条件下,由曲流河携带沉积物经过较长距离的搬运在湖盆中沉积的富细粒沉积物的三角洲。白驹凹陷的正常三角洲相主要发育于泰州组 1 段,由三角洲平原、三角洲前缘和前三角洲 3 个亚相构成。

3.2.1 三角洲平原亚相

三角洲平原亚相由分流河道、分流河道间等微相组成。①分流河道:其沉积特征与河流体系的河床沉积基本相同。岩性以棕黄色粉—细粒砂岩和含砾砂岩为主,垂向上具下粗上细的间断性正韵律。常发育平行层理、板状交错层理、槽状交错层理及冲刷充填构造,电性特征常表现为 Sp、Gr 曲线为中高幅齿化箱形或钟形组合,钟形和箱形与分流河道位置沉积有关,也与分流河道沉积作用方式有关,箱形代表主河道沉积,钟形代表分流河道侧缘,通常在钟形的顶部有较厚的天然堤沉积,韵律变化比较明显,但有时在测井上难于将天然堤与分流河道分开。②分流河道间:是指在三角洲平原亚相中除分流河道微相以外的其他沉积微相,其含砂量较分流河道低,以含泥为主。自然电位曲线幅度差较小,明显不同于分流河道微相。

3.2.2 三角洲前缘亚相

三角洲前缘亚相由水下分流河道、水下分流河道间、河口砂坝、席状砂等微相组成。①水下分流河道:沉积物以棕褐色或灰黄色粉砂岩、泥质粉砂岩为主,泥质极少,具正粒序,砂岩单层厚 1~5 m,Sp、Gr 曲线为中高幅齿化箱形—钟形组合,底为突变接触(图 6-C)。常发育正递变层理、槽状交错层理、上攀交错层理(图 5-b)、波状层理及冲刷—充填构造。在研究区其粒度概率曲线(图 7-C)常为两段式,即只有跳跃总体(含量在 70%以上)和悬浮总体,其倾斜角为 70°,分选好,截点 Φ 值为 3~4,属于细粉砂级,是水下分流河道砂体的典型曲线特征。②水下分流河道间:水下分流河道间沉积物颗粒较细,主要以暗色粘土沉积为主,含少量粉砂和细砂,具水平层理和透镜状层理,虫孔及生物搅动构造发育,也常见植物化石。其电性特征常常表现为 Gr、Sp 曲线为近似直线状,幅值变化小,曲线光滑到微齿。③河口砂坝:位于水下分流河道的前缘及侧缘。岩性主要为分选好、质地纯净的细砂和粉砂组成。但由于波浪作用的影响,沉积物发生了再分配,河口砂坝的形成受到阻

碍,因此相对不发育。以反粒序粉细砂岩为主(图 5-c),Sp、Gr 曲线为中高幅漏斗型(图 6-D)。**④席状砂:**由于湖泊作用的影响,河口砂坝及其他沉积物受波浪和岸流的淘洗和簸选,并发生侧向迁移,使之呈席状或带状广泛分布在三角洲前缘,形成前缘席状砂。其砂质纯,分选好,成熟度较高,显示反韵律或均质韵律,主要由粉—细砂岩组成,有时夹薄层泥岩,发育上攀交错层理,上部发育平行层理(图 5-d)。

3.2.3 前三角洲亚相

前三角洲亚相沉积物以暗色泥岩为主,具水平层理和波状层理,虫孔发育。

3.3 湖泊相

泰州组 2 段主要发育湖泊相沉积,中下部以半深湖—深湖相为主,上部以滨浅湖相为主。

3.3.1 滨浅湖亚相

因滨湖与浅湖亚相难区分,故合称滨浅湖亚相。为洪水期湖岸线以下,浪基面以上浅水地带。以紫红色、灰色、红褐色泥岩夹灰绿色粉砂岩、细砂岩组成的条带层为特征。发育水平层理、波状层理、生物潜穴和生物扰动构造。稳定重矿含量较高,化石丰富,含菱铁矿等自生矿物。可分为滨浅湖沙滩、砂坝、泥坪等微相。**①沙滩:**主要为灰绿色粉砂岩、细砂岩与泥岩呈频繁的薄互层沉积,砂岩层数多但厚度薄,一般小于 5 m,宽厚比较大。发育砂纹层理,泥岩中见生物扰动构造(图 5-e),其电测特征常表现为 Gr 曲线为中幅漏斗型(图 6-E)。**②砂坝:**砂坝呈条带状,主要为灰绿色粉砂岩、细砂岩,有时与泥岩呈频繁的薄互层沉积,厚度较大,一般为几米至十几米厚,宽厚比较小。发育小型交错层理、砂纹层理。**③泥坪:**当水动力较弱,波浪作用不能波及岸边,物质供应以泥质为主,常发育水平层理、块状层理,并常见有泥裂、雨痕、生物扰动构造以及植物碎片等。

3.3.2 半深湖、深湖亚相

深湖—半深湖以半深湖泥微相的灰黑、深灰泥页岩为主,以发育大面积的泥灰岩为特征,SP 曲线呈平行于基线的低幅平直或微齿化状(图 6-F),发育水平层理,含菱铁矿、分散状黄铁矿等,介形虫化石较丰富。

4 沉积相演化规律及平面展布特征

通过全面研究,在进行单井相分析基础上,建立了白驹凹陷泰州组的沉积相连井剖面图(图 8),并以体系域为单元,编制了泰州组各层序不同体系域沉

积期段沉积相平面展布图(图 9)。从图中可以看出,白驹凹陷泰州组沉积相类型较为丰富,其平面展布特征具有一定的规律性,并且随着时间的推移,相类型及展布特征不断演化。研究发现,苏北盆地白驹凹陷泰州组沉积相展布以及纵向演化主要受构造沉降、湖平面的升降以及沉积物的供给等 3 个因素的控制。

4.1 SQ1 沉积时期

SQ1 沉积时期,受燕山期仪器运动的影响,苏北盆地统一的湖盆开始拉张断陷,与晚白垩赤山组沉积期相比,湖盆仍处于半干旱亚热带气候,但范围明显减小,沉积区与北部建湖隆起物源区距离短、高差大,这造成了研究区主要沉积的是辫状河三角洲较粗粒的沉积物,扇体呈朵状自北西向南东方向插入湖区,辫状河三角洲平原亚相不发育,仅在 F1-23—F1-32 井一线以南、F1-12—F103 井一线以北出现,相带展布范围较窄,分流河道砂岩厚度大,一般为 60~80m,主河道处砂地比可达 50%以上(图 8、图 9-A);而在 F1-12—F103 井一线以南辫状河三角洲前缘亚相纵向延伸长,伸入湖泊腹地;水下分流河道砂体构成了前缘亚相的格架,其砂岩百分含量相对较高,主河道处砂地比一般在 30%以上,在 Fc1 井甚至达到 52.63%(图 9-A)。

4.2 SQ2 低位体系域沉积时期

SQ2 低位体系域沉积时期,盆地拉张作用加强,湖平面持续上升,湖水加深,北侧建湖隆起提供的沉积物在研究区具有远源、粒细的特点,为三角洲充填沉积(图 8),扇体总体呈北西—南东向展布,分布面积广,几乎充填了整个凹陷,三角洲平原、三角洲前缘和前三角洲亚相在凹陷内都有发育,三角洲平原亚相主要分布于 He1—Su18 井以北,三角洲前缘则主要发育于 He1—Su18 井以南的大片区域,砂地比相对较小,一般在 20%~40%(图 9-B)。

4.3 SQ2 湖侵体系域沉积时期

由于地壳的弹塑性和应力积累的周期性,SQ2 湖侵体系域沉积时期,为盆地剧烈拉张阶段,盆地发育由断陷湖盆转为坳陷湖盆,湖泊发育达到鼎盛时期,建湖隆起的碎屑物质供给减少,整个白驹凹陷砂岩的含量平均小于 5%,三角洲在研究区完全退出,沉积了一套厚 20~40 m 的岩性主要为深灰色、灰黑色泥岩,底部为灰色灰质泥岩、泥灰岩,在巨厚泥岩段内可见黄铁矿结核,反映了半深湖—深湖微相的

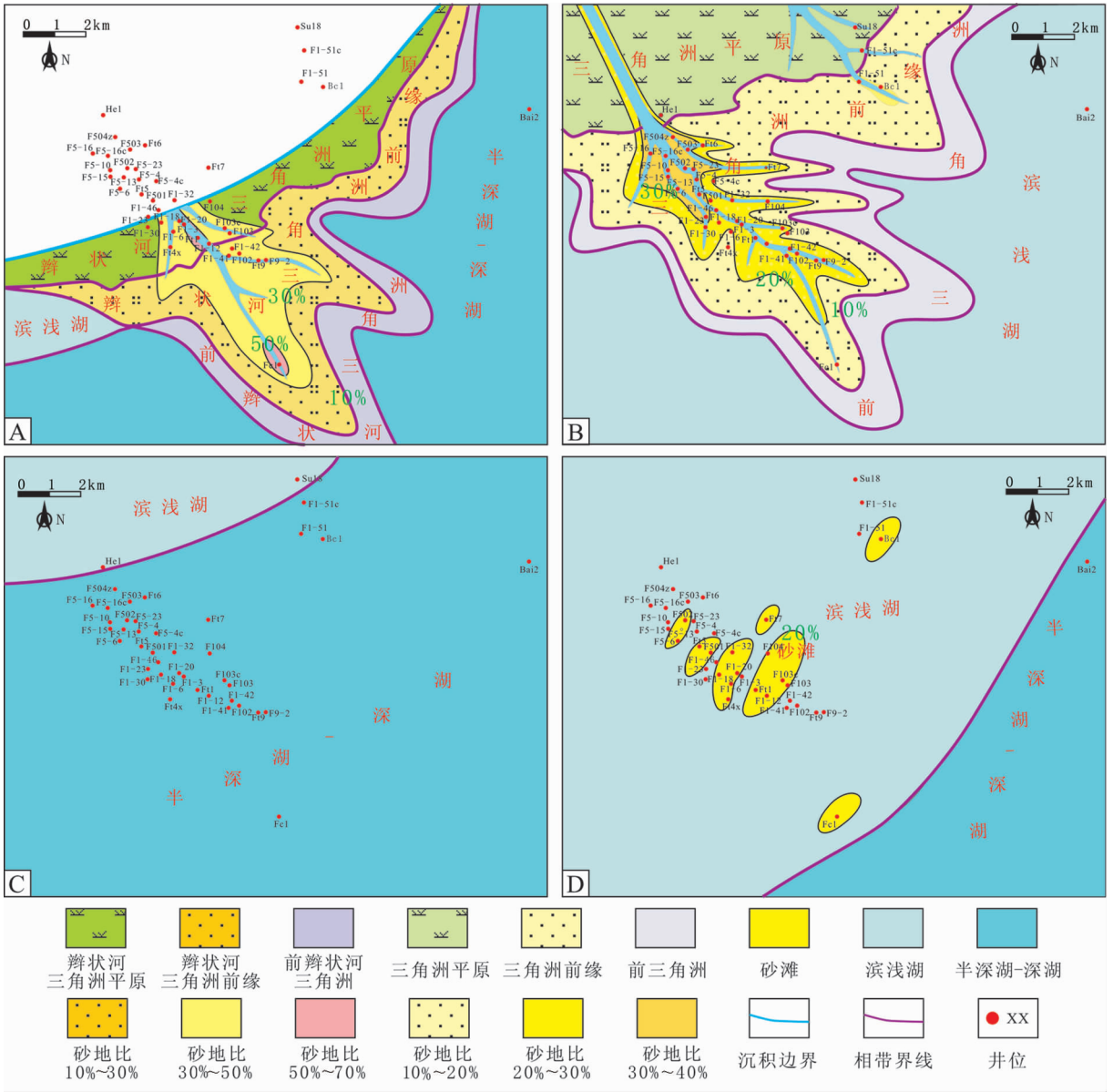


图 9 白驹凹陷泰州组沉积相平面展布图

A—SQ1 低位体系域;B—SQ2 低位体系域;C—SQ2 湖侵体系域;D—SQ2 高位体系域

Fig.9 Sedimentary facies distribution of Taizhou Formation in Baiju sag

A—Highstand systems tracts of SQ1; B—Lowstand systems tracts of SQ2;

C—Lacustrine transgressive systems tracts of SQ2; D—Highstand systems tracts of SQ2

沉积特点,是泰州组主要的烃源层段(图 8、图 9-C)。

4.4 SQ2 高位体系域沉积时期

SQ2 高位体系域沉积期盆地拉张作用略有减弱,但仍延续了泰二段湖侵体系域的沉积,该时期湖泊基准面有所下降,水体逐渐变浅,但全凹陷依然是湖泊沉积环境(图 8),在 Fc1—Bc1 井一线西北方向的滨浅湖地区发育了大面积的由波浪作用形成的砂

滩、砂坝沉积;而在凹陷较深部位 Bai2 井等半深湖—深湖地区发育深灰色、灰黑色泥岩(图 9-D)。

5 层序格架与生储盖的关系

白驹凹陷泰州组生油层主要发育于 SQ2 湖侵体系域深灰色、灰黑色泥灰岩、泥岩段,有机质类型主要为 I 型或 I-II 型,在区域上已进入成熟门限,为

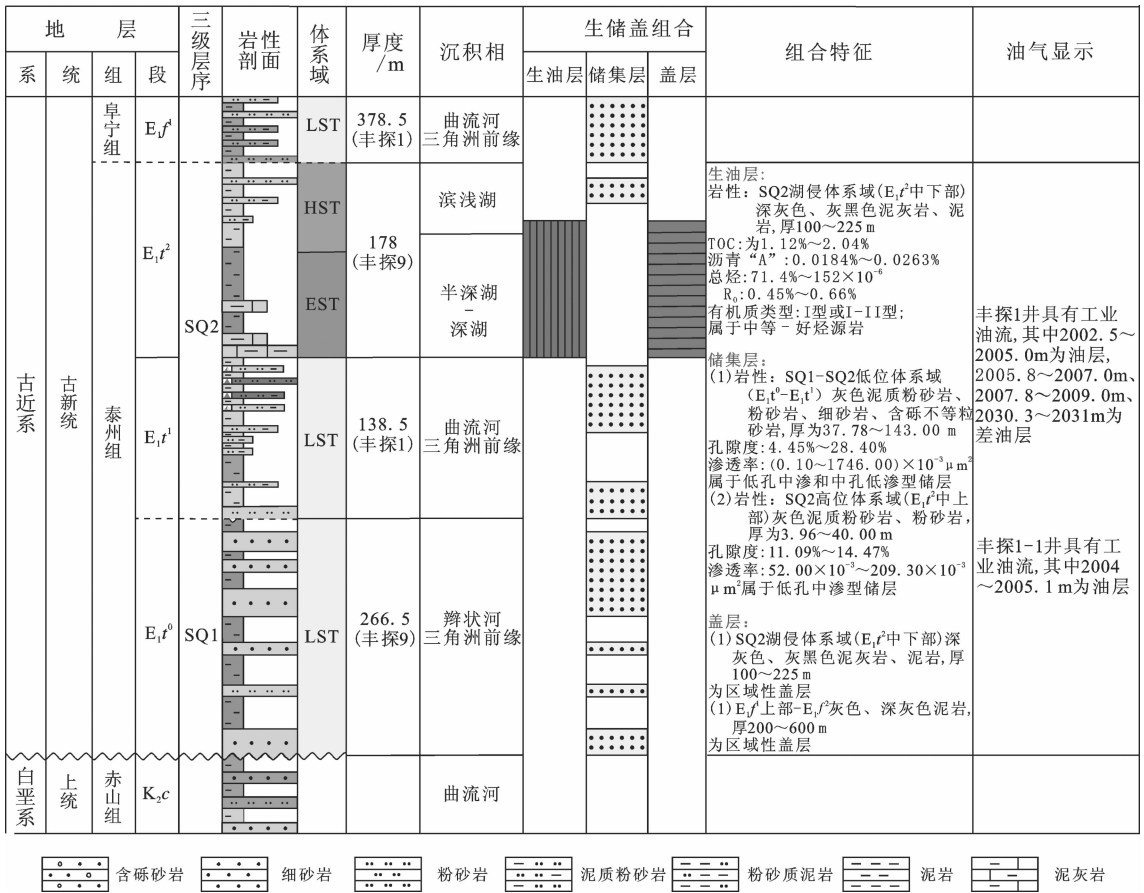


图 10 白驹凹陷泰州组生储盖组合图

Fig.10 Source-reservoir-cap assemblages of Taizhou Formation in Baiju sag

中等—好烃源岩；储集层则主要发育 SQ1—SQ2 低位体系域、SQ2 高位体系域，其中 SQ1—SQ2 低位体系域储集体主要为辫状河三角洲前缘水下分流河道以及三角洲前缘水下分流河道、席状砂砂体，孔隙度为 4.45%~28.40%，渗透率为 $0.10 \times 10^{-3} \sim 1746.00 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，属于低孔中渗和中孔低渗型储层，SQ2 高位体系域储集体主要为滨浅湖沙滩、砂坝砂体，孔隙度为 11.09%~14.47%，渗透率为 $52.00 \times 10^{-3} \sim 209.30 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，属于低孔中渗型储层(图 10)。根据以上生油层、储集层的性质和质量以及它们纵、横向分布特征，可以把白驹凹陷泰州组划分为以下 2 套生储盖组合：一是由 SQ2 湖侵体系域形成的生油层和盖层与下伏 SQ1—SQ2 低位体系域储层所共同组成的“新生古储”生储盖组合，二是由 SQ2 湖侵体系域的生油层与上覆的 SQ2 高水位体系域甚至更上边的阜宁组下部储层组成的“正常式”生储盖组合，其盖层既可以是 SQ2 高水位体系域晚期的泥岩段，也可以是阜宁组 1

段上部—阜宁组 2 段灰色、深灰色泥岩段。

6 结论

(1)根据地震、岩心、钻测井和古生物等资料的分析，白驹凹陷泰州组可识别出 3 个层序界面、划分为 2 个三级层序(SQ1、SQ2)。SQ1 可划分为低位体系域，SQ2 则由低位体系域、湖侵体系域和高位体系域组成。

(2)根据沉积相标志，在泰州组沉积体中，识别出了辫状河三角洲、(曲流河) 三角洲及湖泊 3 种沉积相类型，并进一步划分为 8 种亚相和 17 种微相，并建立了重点微相的岩电关系模板。

(3)沉积相演化与构造沉降、湖平面的升降以及沉积物的供给等因素密切相关。SQ1 沉积时期为盆地的初始断陷阶段，湖盆范围小，沉积物供给充分，辫状河三角洲沉积最为发育；SQ2 低位体系域沉积时期盆地的拉张作用增加，湖盆范围扩大，(曲流河)

三角洲沉积最为发育;SQ2 湖侵体系域沉积时期为盆地的剧烈拉张阶段,盆地发育由断陷湖盆转为拗陷湖盆,沉积物供给量不断减少,加之湖平面持续上升,半深湖—深湖亚相分布范围达到最大,SQ2 高位体系域沉积时期盆地拉张作用略有减弱,湖平面下降幅度不大,滨浅湖亚相最为发育。

(4)白驹凹陷泰州组生油层主要发育于 SQ2 湖侵体系域,其本身既是良好的生油层又是良好的盖层,而储集层则主要发育在 SQ1—SQ2 低位体系域以及 SQ2 高位体系域,可形成“新生古储”、“正常式”2 套生储盖组合。生储盖的良好配置使白驹凹陷发育的辫状河三角洲前缘水下分流河道、三角洲前缘水下分流河道、席状砂以及滨浅湖沙滩、砂坝砂体成为有利的油气勘探区。

参考文献 (References):

- [1] 李哲, 张锡南. 苏北拗陷泰州组微古生物组合及其石油地质学意义[J]. 石油实验地质, 1985, 7(4):313-318.
Li Zhe, Zhang Xi'nan. The micropaleontology assemblage of Taizhou Formation, northern Jiangsu depression, and its significance to petroleum stratigraphy [J]. Experimental Petroleum Geology, 1985, 7(4):313-318(in Chinese with English abstract).
- [2] 刘成林, 朱筱敏, 费安玮, 等. 苏北盆地白驹凹陷中浅层油气成藏研究[J]. 油气地质与采收率, 2003, 10(3):28-30.
Liu Chenglin, Zhu Xiaomin, Fei Anwei, et al. Study on hydrocarbon reservoir forming of mid shallow strata in Baiju sag of Subei basin [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2003, 10(3):28-30(in Chinese with English abstract).
- [3] 刘成林, 朱筱敏, 费安玮, 等. 苏北盆地白驹凹陷深层油气成藏研究[J]. 西南石油学院学报, 2003, 25(5):23-25.
Liu Chenglin, Zhu Xiaomin, Fei Anwei, et al. A study on petroleum accumulation of deep strata in Baiju depression of Subei basin[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2003, 25(5):23-25(in Chinese with English abstract).
- [4] 陶丽, 张廷山, 戴传瑞, 等. 苏北盆地白驹凹陷泰州组一段沉积物源分析[J]. 中国地质, 2010, 37(2):414-420.
Tao Li, Zhang Tingshan, Dai Chuanrui, et al. The sediment source of 1st Member of Taizhou Formation in Baiju depression, Subei basin[J]. Geology in China, 2010, 37(2):414-420(in Chinese with English abstract).
- [5] 罗怀忠, 梁兴, 张介辉, 等. 苏北盆地白驹凹陷油气富集规律与成藏模式[J]. 天然气工业, 2010, 30(9):22-24.
Luo Huaizhong, Liang Xing, Zhang Jiehui, et al. Hydrocarbon enrichment patterns and pooling modes in Baiju sag, Subei Basin[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30 (9):22-24 (in Chinese with English abstract).
- [6] 刘长利, 朱筱敏, 王兴明, 等. 苏北盆地海安凹陷泰州组层序地层及沉积特征 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 2010, 40 (3):519-526.
Liu Changli, Zhu Xiaomin, Wang Xingming, et al. Sequence Stratigraphic Framework and Sedimentary Characteristics of Taizhou Formation in Haian Depression of Subei Basin [J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2010, 40(3):519-526(in Chinese with English abstract).
- [7] 徐田武, 王英民, 曾澹辉, 等. 苏北盆地高邮—海安地区晚白垩世泰州组沉积相及物源分析[J]. 地球学报, 2007, 28(6):627-634.
Xu Tianwu, Wang Yingmin, Zeng Jianhui, et al. Sedimentary facies and provenance analysis of Late Cretaceous Taizhou Formation in Gaoyou-Haian Depression, North Jiangsu (Subei) Basin [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2007, 28(6): 627-634(in Chinese with English abstract).
- [8] 徐田武, 王英, 魏水建, 等. 苏北盆地海安凹陷下白垩统层序地层和沉积相研究[J]. 天然气地球科学, 2008, 19(3):351-355.
Xu Tianwu, Wang Yingmin, Wei Shuijian, et al. Characteristics and evolution of Late Cretaceous Sequence Stratigraphy and Sedimentary Facies in Hai'an Sag [J]. Natural Gas Geoscience, 2008, 19(3):351-353(in Chinese with English abstract).
- [9] 赵澄林, 朱筱敏, 等. 沉积岩石学 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2000.
Zhao Chenglin, Zhu Xiaomin, et al. Sedimentary Petrology [M]. Beijing:Petroleum Industry Press, 2000(in Chinese).
- [10] 姜在兴. 沉积学[M]. 北京:石油工业出版社, 2003.
Jiang Zaixing. Sedimentary [M]. Beijing:Petroleum Industry Press, 2003(in Chinese).
- [11] Vail P R. Seismic stratigraphy interpretation using sequence stratigraphy, Part 1: seismic stratigraphy interpretation procedure [C]//A.W.Bally. Atlas of Seismic stratigraphy. AAPG Studies in Geology, 1987, 27:1-10.
- [12] 纪友亮. 陆相断陷湖盆层序地层学[M]. 北京:石油工业出版社, 1996.
Ji Youliang. The Sequence Stratigraphy of the Fault-depression Lake Basin [M]. Beijing:Petroleum Industry Press, 1996 (in Chinese).
- [13] 付国民, 李永军, 梁志录, 等. 柴达木盆地阿尔金斜坡层序地层及湖盆充填型式[J]. 中国地质, 2002, 29(2):172-177.
Fu Guoming, Li Yongjun, Liang Zhilu, et al. Sequence stratigraphy and lake basin-filling model on the Altun slope in the Qaidam basin[J]. Geology in China, 2002, 29(2):172-177 (in Chinese with English abstract).
- [14] 董国臣, 孙景民, 张守鹏, 等. 廊固凹陷古近系层序地层特征及油气储集规律探讨[J]. 中国地质, 2002, 29(4):397-400.
Dong Guochen, Sun Jingmin, Zhang Shoupeng, et al. Paleogene sequence stratigraphy and oil-gas accumulation in the Langgu subdepression [J]. Geology in China, 2002, 29 (4):397-400 (in Chinese with English abstract).
- [15] 赵永刚, 陈景山, 雷卞军, 等. 川西邛崃县白马庙气田上侏罗统蓬萊镇组高分辨率层序地层分析 [J]. 中国地质, 2005, 32 (4):

- 674-681.
- Zhao Yonggang, Chen Jingshan, Lei Bianjun, et al. Analysis of high-resolution sequence stratigraphy of the Upper Jurassic Penglaizhen Formation in the Baimamiao gas field, Qionglai County, western Sichuan[J]. *Geology in China*, 2005, 32(4):674-681 (in Chinese with English abstract).
- [16] 倪超, 纪友亮. 饶阳凹陷古近系沙河街组层序地层分析及沉积体系研究[J]. *中国地质*, 2006, 33(1):193-200.
- Ni Chao, Ji Youliang. Sequence stratigraphy and sedimentary system of the Paleogene Shahejie Formation in the Raoyang subbasin[J]. *Geology in China*, 2006, 33(1):193-200 (in Chinese with English abstract).
- [17] 靳松, 朱筱敏, 钟大康. 扇三角洲高分辨率层序地层对比及砂体分布规律[J]. *中国地质*, 2006, 33(1):212-220.
- Jin Song, Zhu Xiaomin, Zhong Dakang. High-resolution sequence stratigraphic correlation of fan deltas and distribution characteristics of sandbodies[J]. *Geology in China*, 2006, 33(1):212-220 (in Chinese with English abstract).
- [18] 倪新锋, 陈洪德, 韦东晓. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组层序地层格架与油气勘探[J]. *中国地质*, 2007, 34(1):73-80.
- Ni Xinfeng, Chen Hongde, Wei Dongxiao. Sequence stratigraphic framework of the Triassic Yancang Formation in the Ordos basin and petroleum exploration[J]. *Geology in China*, 2007, 34(1):73-80 (in Chinese with English abstract).
- [19] 郭艳琴, 李文厚, 陈全红, 等. 陇东地区延长组层序地层特征及油气勘探意义[J]. *中国地质*, 2007, 34(3):406-413.
- Guo Yanqin, Li Wenhong, Chen Quanhong, et al. Sequence stratigraphic characteristics of the Yanchang Formation in the Longdong area and their significance for petroleum exploration[J]. *Geology in China*, 2007, 34(3):406-413 (in Chinese with English abstract).
- [20] 苗顺德, 李秋芬. 黄骅拗陷古近系层序地层格架特征及模式研究[J]. *中国地质*, 2008, 35(2):256-263.
- Miao Shunde, Li Qiufen, Ouyang Cheng. Paleogene sequence stratigraphic framework and model in the Huanghua depression[J]. *Geology in China*, 2008, 35(2):256-263 (in Chinese with English abstract).
- [21] 谢利华, 林畅松, 董伟, 等. 珠江口盆地番禺低隆珠江组—韩江组高精度层序地层[J]. *中国地质*, 2009, 36(2):366-377.
- Xie Lihua, Lin Changsong, Dong Wei, et al. High-resolution sequence stratigraphy of Zhujiang Formation and Zhuhai Formation in Panyu low uplift of the Zhujiang River mouth basin[J]. *Geology in China*, 2009, 36(2):366-377 (in Chinese with English abstract).
- [22] 邱旭明, 刘玉瑞, 付强. 苏北盆地上白垩统一第三系层序地层与沉积演化[M]. 北京:地质出版社, 2006.
- Qiu Xuming, Liu Yurui, Fu Qing. Stratigraphy and Sedimentary Evolution of Upper Cretaceous-Tertiary Sequence in Northern Jiangsu Basin[M]. Beijing:Geological Publishing House, 2006 (in Chinese).
- [23] 邱海峻, 许志琴, 乔德武. 苏北盆地构造演化研究进展[J]. *地质通报*, 2006, 25(9-10):1117-1120.
- Qiu Haijun, Xu Zhiqin, Qiao Dewu. Progress in the study of the tectonic evolution of the Subei basin[J]. *Geological Bulletin of China*, 2006, 25(9-10):1117-1120 (in Chinese with English abstract).
- [24] 李思田, 杨士恭, 林畅松. 论沉积盆地等时地层格架和基本建造单元[J]. *沉积学报*, 1992, 10(4):11-22.
- Li Sitian, Yang Shigong, Lin Changsong. On the chronostratigraphic framework and basic building blocks of sedimentary basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1992, 10(4):11-22 (in Chinese with English abstract).
- [25] 严德天, 王华, 王清晨, 等. 中国东部第三系典型断陷盆地幕式构造旋回及层序地层特征[J]. *石油学报*, 2008, 29(2):185-190.
- Yan Detian, Wang Hua, Wang Qingchen, et al. Episodic tectonic cycles and sequence pattern of the Tertiary rifted basins of East China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 29(2):185-190 (in Chinese with English abstract).
- [26] 薛良清, Galloway W E. 扇三角洲、辫状河三角洲与三角洲体系的分类[J]. *地质学报*, 1991, 65(4):141-152.
- Xue Liangqing, Galloway W E. Fan-delta, braid delta and the classification of delta systems[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1991, 65(4):141-152 (in Chinese with English abstract).
- [27] 顾家裕, 方辉, 贾进华. 塔里木盆地库车坳陷白垩系辫状河三角洲砂体成岩作用和储层特征[J]. *沉积学报*, 2001, 19(4):517-523.
- Gu Jiayu, Fang Hui, Jia Jinhua. Diagenesis and reservoir characteristics of Cretaceous braided delta sandbody in Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2001, 19(4):517-523 (in Chinese with English abstract).
- [28] 何幼斌, 高振中. 海南岛福山凹陷古近系流沙港组沉积相[J]. *古地理学报*, 2006, 17(3):366-368.
- He Youbin, Gao Zhengzhong. Sedimentary facies of the Liu Shagang Formation of Paleogene in Fushan Sag of Hainan Island[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2006, 17(3):366-368 (in Chinese with English abstract).

Sequence stratigraphy and sedimentary characteristics of Taizhou Formation in Baiju sag

WEI Xiang-feng¹, ZHANG Ting-shan¹, LIANG Xing², YAO Qiu-chang², TANG Xing-you³

(1. Institute of Resources and Environment, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, Sichuan, China; 2. Zhejiang Oilfield Company of PetroChina, Hangzhou 310023, Zhejiang, China; 3. No. 4 Geophysical Mountain Exploration Party, Sichuan Changqing Drilling Engineering Corporation, Chengdu 610225, Sichuan, China)

Abstract: Using seismic data, drilling core, well logs and paleontology data, the authors studied the sequence stratigraphy and sedimentary facies of Taizhou Formation in Baiju sag of Subei basin, identified three sequence boundaries in Taizhou Formation and divided Taizhou Formation into 2 third-order sequences (SQ1, SQ2) and 4 system tracts. According to sedimentary signatures, the authors recognized three facies types in Taizhou Formation, i.e., braided-river delta, meandering-river delta and lacustrine facies, which can be subdivided into 8 types of sedimentary subfacies and 17 types of sedimentary microfacies. SQ1 was deposited during the initial faulting period of the basin, characterized by the development of braided-river delta. In the period of the low-stand system tracts of SQ2, the extension of basin was increased, and the area of lake was enlarged, and meandering-river delta was developed. In the period of the transgressive system tracts and high-stand system tracts of SQ2, the development of basin transformed the faulting period into the shrinking period, the area of lake was the biggest and semi-deep and deep lake subfacies were developed in the period of the transgressive system tracts of SQ2, the water-level was declined slightly and shallow-shore lake facies was developed in the period of the high-stand system tracts of SQ2. The main source rocks were developed in the transgressive system tracts of SQ2 which also served as good capping formation. The sand body reservoirs composed of underwater distributary channels of braided-river delta front, underwater distributary channels and sheet sand of meandering-river delta front were developed in the low-stand system tracts of SQ1-SQ2, sandy beach and sandy bar of shallow-shore lake in the high-stand system tracts of SQ2, which constitute the potential areas for oil and gas.

Key words: sequence stratigraphy; sedimentary characteristics; Taizhou Formation; Baiju depression.

About the first author: WEI Xiang-feng, male, born in 1984, doctor candidate, engages in the study of sedimentology and sequence stratigraphy; E-mail: weixiangfeng1984@163.com.