

孙六一, 蒲仁海, 马占荣, 等. 河套盆地吉兰泰凹陷烃源岩展布与勘探潜力[J]. 地球科学与环境学报, 2018, 40(5): 612-626.

SUN Liu-yi, PU Ren-hai, MA Zhan-rong, et al. Source Rock Distribution and Exploration Prospect of Jilantai Sag in Hetao Basin, China [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2018, 40(5): 612-626.

河套盆地吉兰泰凹陷烃源岩展布与勘探潜力

孙六一¹, 蒲仁海^{2*}, 马占荣¹, 王 飞²

(1. 中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院, 陕西 西安 710018; 2. 西北大学 地质学系, 陕西 西安 710069)

摘 要: 河套盆地吉兰泰凹陷西北坡的金属探矿井在数百米深的元古界变质岩裂缝中发现轻质原油, 揭示了该凹陷存在一定生烃潜力。利用地震相分析来解决固阳组沉积相带和烃源岩展布已成为评价该凹陷勘探潜力的重要问题。根据露头、钻井和地震等资料重点开展了地层对比、地震相和烃源岩展布等综合研究。结果表明: 河套盆地吉兰泰凹陷下白垩统固阳组为断陷盆地近源旱地扇沉积, 在固一段发育两期扇三角洲—半深湖沉积, 松探1井、松探2井和吉参1井在固一段钻遇薄层暗色泥岩; 暗色泥岩波阻抗高于砂岩, 在地震剖面上形成强振幅反射; 地震模型和属性分析表明湖相暗色泥岩沿NE向凹陷中心分布, 最大累计厚度为45 m, 一般为20~30 m; 暗色泥岩总有机碳介于0.31%~2.63%, 为Ⅱ_s-Ⅲ型, 露头区烃源岩过成熟, 松探1井为未熟—低熟状态; 金属探矿井(ZK500井)540 m深度处变质岩裂缝原油和松探1井2270 m深度处的4 m油砂含油属于同一油源, 生烃期为上新世末期; 地震剖面 and 航磁异常指示了ZK500井附近存在上拱的侵入体, 导致了凹陷烃源岩成熟度的横向快速变化; 有利生烃和勘探区应位于埋深较大的吉兰泰凹陷北部深凹带。

关键词: 烃源岩; 烃源对比; 地层对比; 固阳组; 地震相; 沉积相; 勘探潜力; 河套盆地

中图分类号: P618.13

文献标志码: A

文章编号: 1672-6561(2018)05-0612-15

Source Rock Distribution and Exploration Prospect of Jilantai Sag in Hetao Basin, China

SUN Liu-yi¹, PU Ren-hai^{2*}, MA Zhan-rong¹, WANG Fei²

(1. Research Institute of Exploration and Development, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an 710018, Shaanxi, China; 2. Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China)

Abstract: In the northwest slope of Jilantai sag, Hetao Basin, the light crude oil display is found in the fractures of Proterozoic metamorphic rocks buried in hundreds of meters. This reveals that there is a certain hydrocarbon generating potential in the area. Using seismic facies analysis to solve sedimentary facies belts and distribution of source rocks of Guyang Formation is an important issue for evaluating the exploration potential of Jilantai sag. According to the outcrops, drilling and seismic data, the stratigraphic correlation, seismic facies and distribution of source rocks were comprehensively studied. The results show that the Lower Cretaceous Guyang Formation in Jilantai sag of Hetao Basin is a rift basin with dry climate proximal fan deposits intercalated by two periods of fan delta-semi deep lacustrine facies; wells TS1, TS2 and JC1 drilled in the sag have a number of thin layers of dark mudstone in Gul Member; the acoustic

收稿日期: 2018-05-04; 修回日期: 2018-07-05 投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金项目(41390451); 中国石油长庆油田分公司区域勘探项目(技2016-66)

作者简介: 孙六一(1961-), 男, 甘肃平凉人, 高级工程师, E-mail: sly_cq@petrochina.com.cn。

* 通讯作者: 蒲仁海(1962-), 男, 陕西宝鸡人, 教授, 博士研究生导师, 理学博士, E-mail: purenhai@nwu.edu.cn。

impedance of lacustrine shale and limestone is higher than that of sandstone, and the lacustrine deposition forms strong amplitude reflection on seismic sections; the thickness of dark shale is 20-30 m with the maximum of 45 m, and it distributes along the center of NE sag; the total organic carbon(TOC) of dark shale is 0.31%-2.63% with the type of II_a-III; the source rocks in outcrop are overmature, but well ST1 is immature-low mature; the oil from fractures of metamorphic rock at the depth of 540 m in metal exploration well ZK500 belongs to the same source of oil from 4 m oil sand at the depth of 2 270 m in well ST1, and the hydrocarbon generation periods should be the end of Pliocene; the aeromagnetic anomaly and seismic reflection suggest that there is upwarp intrusion near well ZK500, resulting in the fast lateral change of source rock maturity in Jilantai sag; the favorable hydrocarbon generating and exploration areas should be located in a fault convex zone with greater depth, the northern part of Jilantai sag.

Key words: source rock; oil source comparison; stratigraphic correlation; Guyang Formation; seismic facies; sedimentary facies; exploration prospect; Hetao Basin

0 引言

20世纪80年代,中国石油长庆油田分公司在河套盆地西南部吉兰泰凹陷二维地震解释的一个断鼻构造钻探了吉参1井,虽在2 600 m附近揭示了下白垩统固一段累计厚度36 m的湖相暗色泥岩,但其镜煤反射率只有0.4%~0.6%,属于未熟—初熟演化阶段^[1],加之没有发现油气显示,对该区的勘探工作暂停了下来。2013年,冶金探矿系统在吉兰泰凹陷西北缘露头高航磁异常区钻探浅井ZK230井、ZK240井和ZK500井,3口井均在埋深数百米的元古界变质岩取芯裂缝中发现可流动原油和油珠。根据这一情况,2015年中国石油长庆油田分公司在吉兰泰凹陷加密了二维地震勘探,并在一小型断背斜构造上部署了松探1井,该井钻遇暗色泥岩累计厚度26 m,取芯获4 m油浸砂岩,多处见油斑、油迹显示;2016年又钻探了松探2井,该井不但没有发现油气显示,而且与松探1井的暗色泥岩对应的层位相变为浅湖灰岩,反映了该区生油地质条件的复杂变化。由此可见,吉兰泰凹陷的主要问题是烃源岩分布和生烃能力如何,变质岩裂缝中的原油与松探1井的原油来自何处、是否同源以及勘探前景如何等。

赵重远等根据地震资料研究了盆地地层结构及形成演化,认为河套盆地为一不对称的地堑盆地^[2-7]。2000年以来,河套盆地新生界发现了生物气,杨华等就生物气有机质类型与来源、储量、圈闭条件等方面进行了研究,认为在临河凹陷北部可能存在好的生烃条件^[8-11]。近年来,张永谦等对该盆地的深层构造和后期演化方面取得了一些新研究进

展^[12-14]。除白垩纪发育湖相沉积外,在344 ka以来的河套盆地第四纪发生过一次古大湖的形成和消亡^[15],120~150 ka为最大湖泛期^[16-17]。赵希涛等认为河套盆地晚第三纪以来的湖泊演化与黄河的形成及演化存在一定关联^[18],但总体以冲积和风成堆积为主^[19]。随着计算机技术的进一步发展,各种地震模拟、波形分类和神经网络等技术在地震相分析中的应用^[20-31]为该区目的层沉积相和烃源岩展布分析提供了技术支撑。该区二维地震测网密度约4 km×8 km。本文通过露头、钻井和二维地震综合解释研究,对河套盆地吉兰泰凹陷生油目的层沉积相、烃源岩展布、生烃和运聚情况进行了探讨,指出了下一步的勘探方向。

1 地质背景

河套盆地处于华北板块的西北缘,东西长约600 km,南北宽30~90 km,呈弧形分布。盆地由“两隆三拗”组成,自西向东分别发育临河拗陷、乌拉山隆起、乌前拗陷、包头隆起及呼和拗陷(图1)。盆地沉积盖层主要由白垩系、古近系、新近系及第四系组成,沉积厚度为3 000~8 000 m。河套盆地古生代及以前与鄂尔多斯盆地连为一体,基本处于隆升剥蚀状态,缺失三叠系及以前的地层。中生代以来,由于太平洋板块俯冲消减与欧亚大陆解体,河套盆地处于隆升剥蚀状态。早白垩世,河套盆地与鄂尔多斯盆地脱离,形成单独盆地。燕山运动进入第二幕,河套盆地边界断层开始沉降,沉积了下白垩统固阳组。最下部的固三段沉积以角度不整合超覆于老地层之上,由于凹陷边界断层强烈拉伸,在干旱气候条件下,固三段呈明显的半地堑红色冲积充填。固

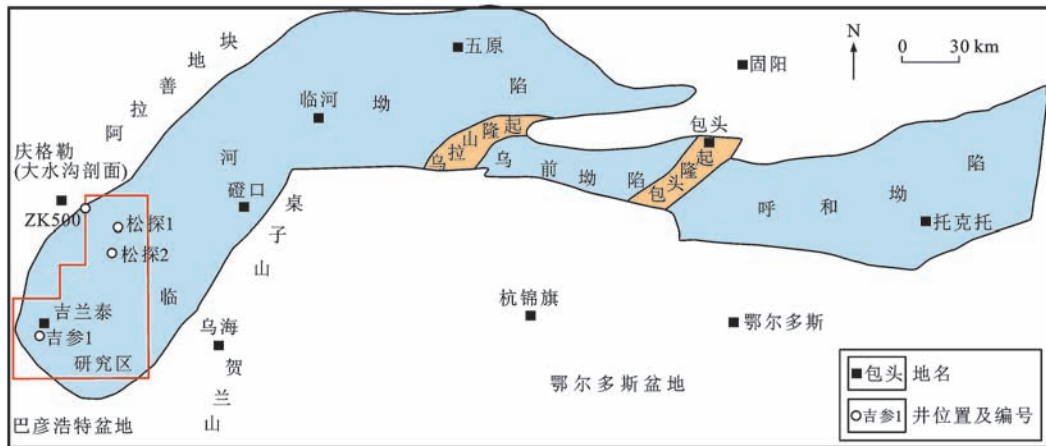


图1 河套盆地构造单元划分与吉兰泰凹陷位置

Fig. 1 Division of Tectonic Units in Hetao Basin and Location of Jilantai Sag

二段及其以后断裂活动减弱,凹陷由断陷向坳陷过渡,并逐渐填平。到固一段沉积时,盆地经历了两次气候潮湿阶段,接受了深灰色—黑色泥页岩沉积,夹于干旱河流相沉积之间。早白垩世末期,河套盆地与鄂尔多斯盆地一起抬升,缺失上白垩统一始新统。渐新世以来,受喜马拉雅运动及太平洋板块俯冲方向变化的影响,河套盆地再次进入强烈的断陷-坳陷沉降阶段^[1-2]。

吉兰泰凹陷位于弧形河套盆地的西南部,属于NE向延伸的临河坳陷西南部分,其南与巴彦浩特盆地相接,西为阿拉善前寒武系地块,东为贺兰山和桌子山(图1)。

2 钻井地层划分对比

下白垩统为主要的勘探目的层系,吉兰泰凹陷已钻石油探井3口(松探1井、松探2井、吉参1井),金属探矿浅井4口,均钻穿沉积地层进入了太古界变质岩系。吉参1井、松探1井和松探2井揭示了吉兰泰凹陷在元古界变质岩基底上发育了下白垩统固阳组、渐新统临河组、上新统和第四系^[2-6]。地震剖面揭示凹陷东南部局部可能残存类似于巴彦浩特盆地的侏罗系断陷^[32],但3口探井均未钻遇。固阳组自上而下分为固一段(K_1g_1)、固二段(K_1g_2)和固三段(K_1g_3)(图2)。钻井地层划分对比主要依据古生物标志、固二段棕红色泥岩标志层、临河组底部正旋回、基底下元古界变质岩、胶结程度、层位标定与不整合反射等。

(1)古生物标志。吉参1井2 081~2 499 m深度处含介形虫、轮藻、孢粉化石,孢粉组合以裸子植物占绝对优势,以没有被子植物花粉为特征。由蕨类植物孢子和裸子植物花粉组成的克拉梭粉-无突

助纹孢-薄壁粉属及克拉梭粉-无突助纹孢-徐氏孢属反映早白垩世面貌组合,特别是高含量的海金沙科孢子出现,被确定为早白垩世的重要依据。介形虫化石以原始假伟星女星介、固阳女星介、长椭圆女星介等各种白垩系常见的女星介为主。轮藻化石主要有三褶奇翼轮藻三褶亚种,广见于世界各地下白垩统中^[33]。由此可见,吉参1井无上白垩统,渐新统临河组直接覆盖在下白垩统固阳组之上^[34]。

(2)固二段棕红色泥岩标志层。吉参1井、松探1井与松探2井均钻遇了200~230 m厚的棕红色泥岩段,纵向上与上覆、下伏砂泥岩地层相比,其沉积细、岩性稳定、对比性好,是一个较明显的泥质岩标志层段,目前被划为固二段。

(3)临河组底部正旋回。吉参1井1 600~2 081 m深度处钻遇的底砂(砾)岩、含砾砂岩向上逐渐变细,该段较厚的底砂岩在松探1井和松探2井也存在,变为细砂岩夹泥岩,它们可能是不整合面上异旋回下部粗粒沉积,具有构造抬升间歇成因的等时地层意义,其底界作为下白垩统固阳组与上覆渐新统临河组的界线较合适(图2)。

(4)基底下元古界变质岩。研究区3口探井和2口金属探矿浅井均钻遇下元古界变质岩,变质岩呈深蓝灰、绿灰、肉红色的中、深变质程度的变粒岩、片麻岩等,测井上表现为低声波时差、高电阻率等特征,与固阳组砂砾岩直接接触,将其作为盆地基底与盖层的界线十分清晰,容易确认。

(5)胶结程度。庆格勒大水沟露头 and ZK500井全取芯观察表明,固阳组和临河组红色砂泥岩基本均属于半成岩状态,砂泥岩一般用手可以捏碎,几乎难以制成薄片。因此,在缺乏古生物标志的情况下,这套红色泥岩标志层归于新近系还是白垩系缺乏证

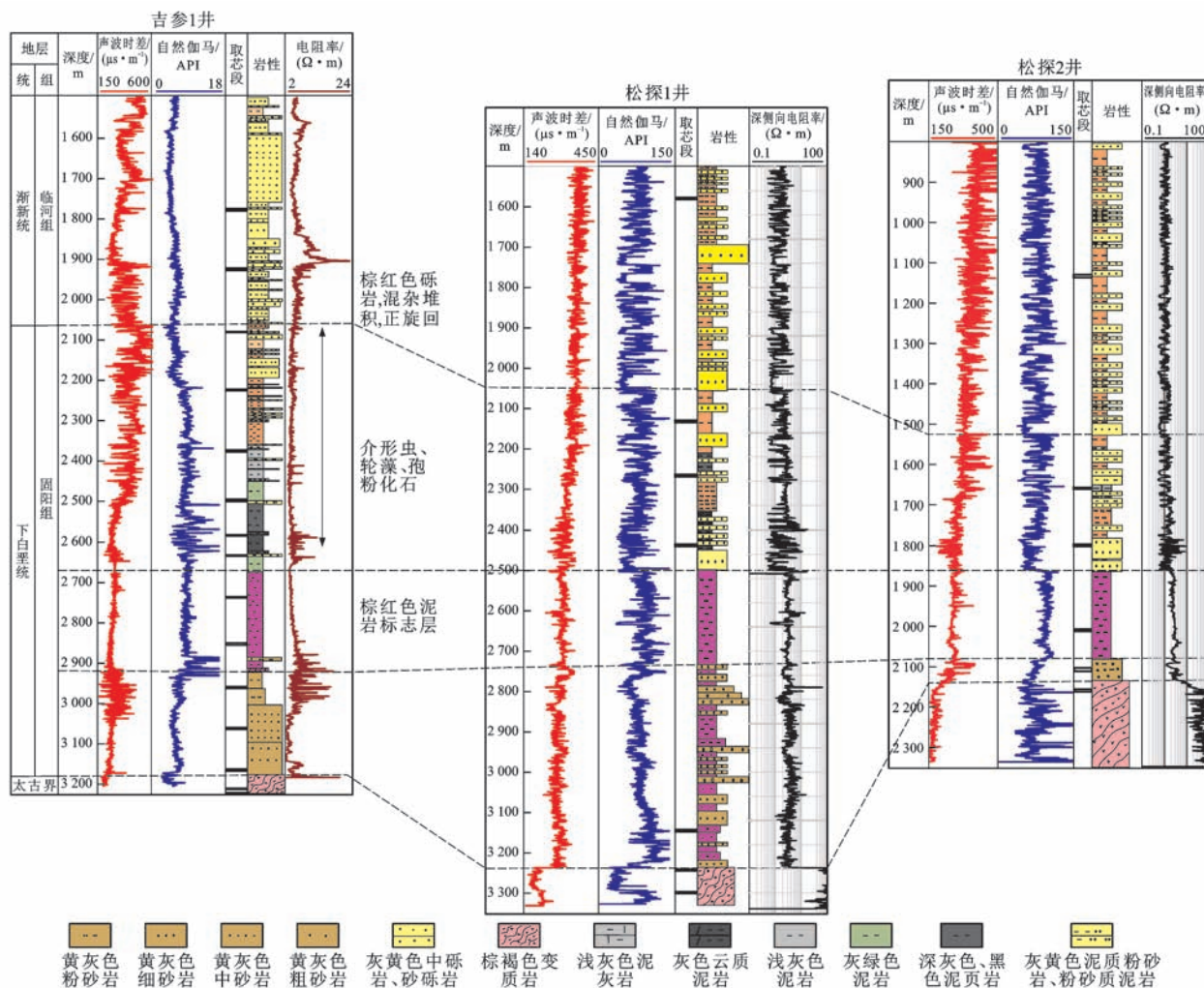


图2 吉参1井、松探1井和松探2井下白垩统固阳组对比剖面

Fig. 2 Correlation Cross-sections of Lower Cretaceous Guyang Formation from Wells JC1, ST1 and ST2

据。但有时候白垩系砂岩比较结实,这时一般砂岩为钙质胶结,疏松者为黏土胶结。钙质或白云质胶结强度较好的坚硬砂岩是白垩系区别于新近系疏松砂岩的一个标志。然而,该区侏罗系却异常坚硬致密,露头用榔头采样几乎难以砸碎。从巴彦浩特盆地的地震剖面看,侏罗纪末期与白垩纪沉积前有一次造山运动,形成很多逆冲断裂和高角度不整合,挤压造山可能是侏罗系十分致密坚硬的原因。

(6)层位标定与不整合反射。通过人工合成地震记录将单井层序划分结果标定到地震剖面上,进行井震层序相互匹配,以建立正确的对比关系,确定了井震之间的唯一关系后则可以用地震界面标志反推钻井分层界线的大趋势。采用地震验证大段(厚度50 m以上)的分层对比可靠性,用测井验证小段(厚度小于50 m)的对比及具体分层界线。地震剖面观察解释共发现了包括下白垩统固一段顶面、下白垩统固二段底面、下白垩统固三段底面、渐新统

临河组顶面和上新统顶面等5个不整合面。部分地震反射不整合面见图3、4。研究区以上5个地震不整合反射中,既有上超又有削截的不整合分别位于固三段顶面、底面,反映了两次较强的构造运动,尤其可能存在水平挤压作用,造成了一定厚度的地层剥蚀,其主要存在于固三段顶面和底面。其他3个不整合面均为上超不整合,反映了相对升降构造运动和沉积间断。尤其明显的是,吉兰泰凹陷地层厚度和构造变形与ZK500井附近的航磁异常活动关系密切。

3 固一段两期湖相泥岩沉积特征

吉兰泰凹陷绝大部分白垩系和第三系均为干旱气候条件下的紫红、褐红色砂泥岩、砾岩沉积^[35-36],具备 Galloway 等提出的早地扇沉积特征^[37]。

固一段厚度为200~600 m,在断裂下降盘的凹陷中心厚度较大。本区仅在下白垩统固一段下部和

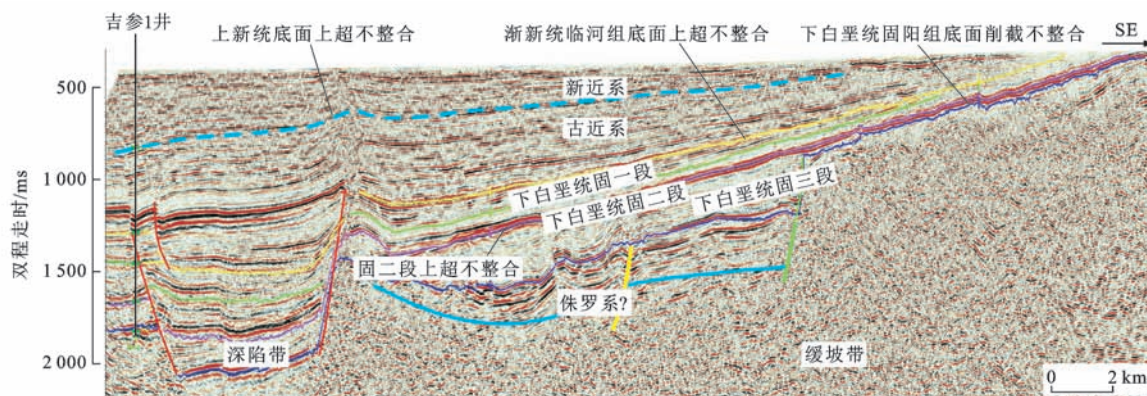


图3 过吉参1井SE向地震剖面解释

Fig. 3 Interpretation of SE-extending Seismic Section Through Well JC1

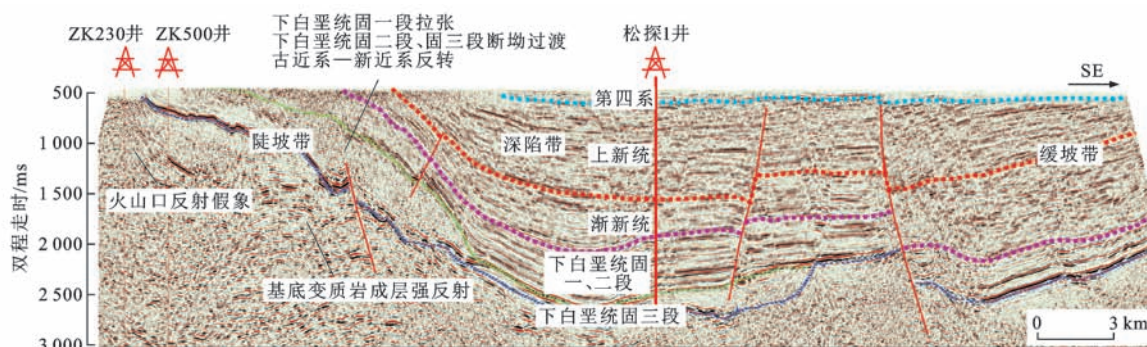


图4 过松探1井SE向地震剖面解释

Fig. 4 Interpretation of SE-extending Seismic Section Through Well ST1

中部分别发育两套暗色泥岩。大水沟露头 and 松探1井固一段下部和中部的两套暗色泥岩进行对比(图5)发现:下部暗色泥岩较纯,为灰黑色页岩、水平层理泥岩;上部暗色泥岩为浅灰色泥岩、泥灰岩等。泥页岩单层厚度为2~5 m,呈多层间夹于褐色泥质粉砂岩和砂岩之中。固一段暗色泥岩中含10%~30%的方解石、文石或白云石,局部有约1%的石膏。

与固一段中部湖相泥岩相比,固一段下部暗色泥岩厚度大、沉积细、分布广,存在深湖页岩、泥岩、泥灰岩、浅湖鲕粒灰岩等沉积。中部暗色泥岩主要为浅湖灰绿色泥岩、钙质泥岩、粉砂质泥岩等,水体偏浅。

松探1井灰色、深灰色泥岩有17层,测井曲线上识别深灰色泥岩厚度总计为29 m(图6)。松探2井固一段只发育浅湖砂屑灰岩、薄皮鲕粒灰岩,缺乏深灰色泥页岩等深水沉积。灰岩单层厚度为2~3 m,累加厚度近20 m。鲕粒核主要由石英颗粒组成,少量为泥晶灰岩,亮晶方解石胶结,砂屑灰岩中见介形虫化石。吉参1井固一段钻遇了36 m厚深灰色泥岩,主要发育在固一段下部。

总体上,3口井和露头均反映了固一段的两期湖相沉积,其中下部湖相水体深、沉积细、分布广,中上部湖相水体浅、分布小。两期湖泊均沉积了暗色泥岩和灰岩,但下部的暗色泥岩更发育。

4 固一段烃源岩正演地震响应与展布

吉兰泰凹陷固一段暗色泥岩相对于上、下砂岩和红色泥岩具有高自然伽马、高电阻率、低声波时差和高密度等测井特征(图5)。经合成地震记录标定,松探1井暗色泥岩在地震剖面上对应于一组“两峰一谷”的强振幅反射,易于识别。松探1井朝NE向延伸约3 km后变为中振幅连续反射,反映岩性组合和沉积相存在一定的变化(图7)。

为探索暗色泥岩厚度变化与地震振幅之间的关系,本文在松探1井合成地震记录上制作了暗色泥岩厚度变化的一维正演模型(图8)。固一段的暗色泥岩波阻抗(速度与密度乘积)稍高于上、下砂岩波阻抗,这一特征与时代较老的固二段和固三段有所不同,这可能与白垩系整体埋藏浅、成岩程度低、岩石疏松和含碳酸盐岩等有关^[38]。改变暗色泥岩段的声波时差与密度,以模拟暗色泥岩厚度增加或减

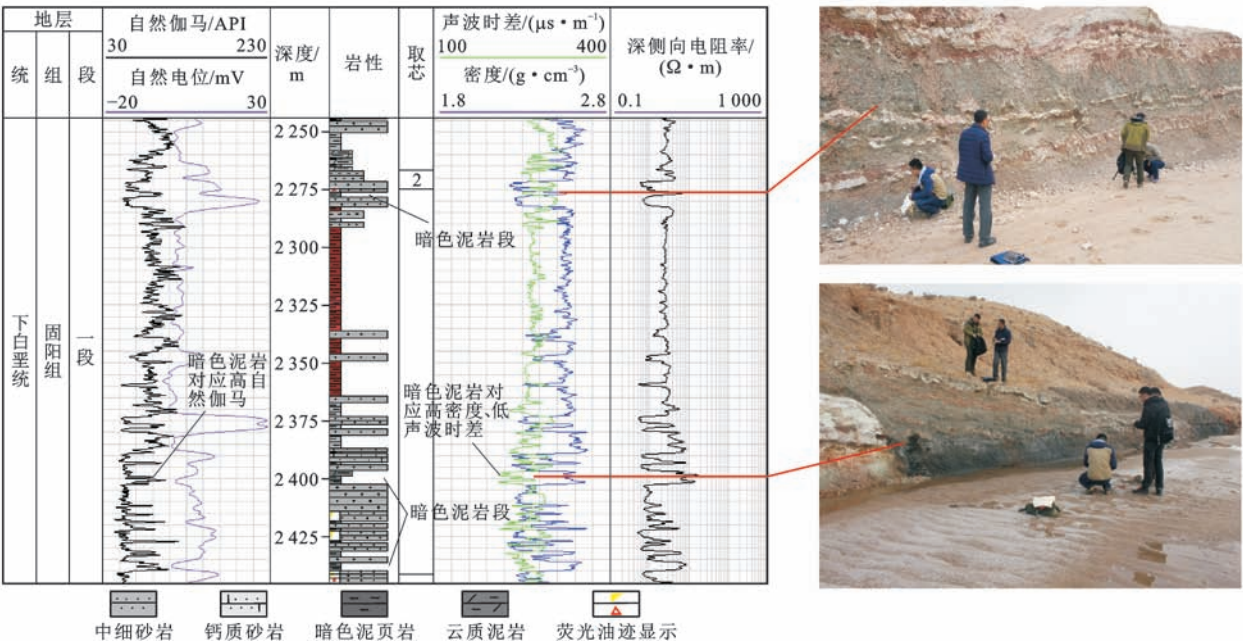


图 5 松探 1 井固一段下部和中部两套烃源岩与大水沟露头剖面的对比

Fig. 5 Comparison of Two Sets of Source Rocks in the Lower and Middle Parts of Gu1 Member and the Section of Dashuigou Outcrop in Well ST1

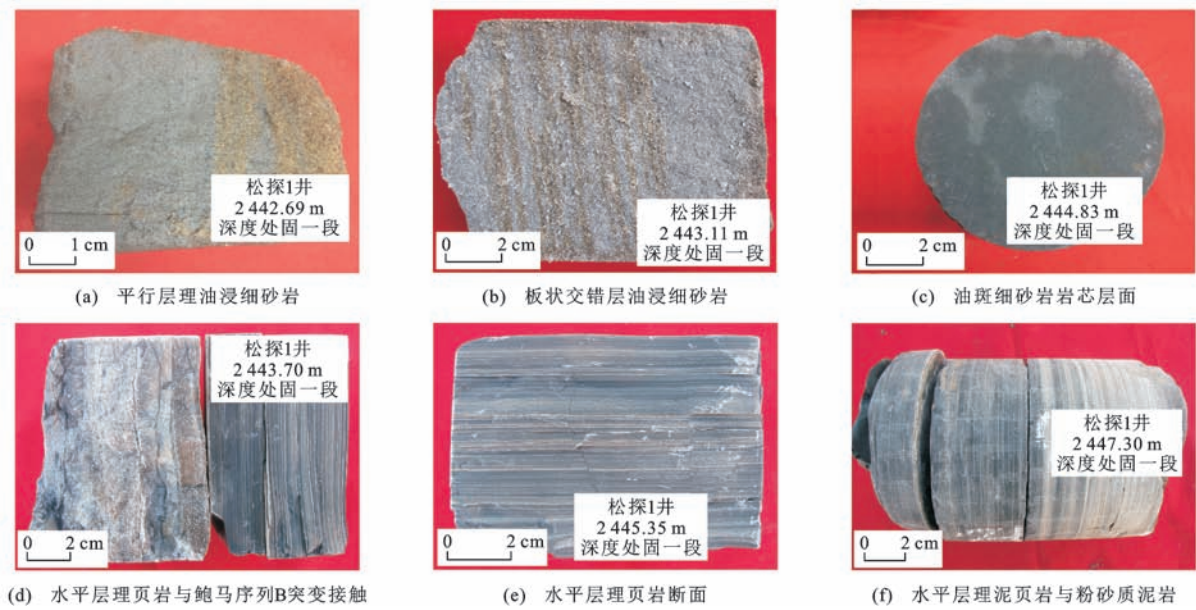


图 6 松探 1 井固一段第 3 回次取芯照片

Fig. 6 Photographs of the Third Coring of Gu1 Member in Well ST1

小后的地震响应,可以看出暗色泥岩增厚 5 m 后,合成记录中的振幅则分别增强,反之减弱,说明地震振幅与暗色泥岩厚度成正相关关系。

固一段两层暗色泥岩的二维正演模型也说明了泥岩形成强振幅反射。二维正演模型中,松探 1 井固一段暗色泥岩大致分为两期,两期暗色泥岩之间为约 120 m 厚红色粉砂岩、砂岩,单层暗色泥岩厚度 20 m 左右,上覆砂岩与灰质砂岩,灰质砂岩厚度

有限。根据暗色泥岩层的测井曲线特征与厚度及上覆、下伏岩层性质,制作正演模型[图 9(a)]。根据其声波时差、密度测井曲线,统计出不同岩层的速度与密度。其中,普通砂岩层速度为 $3\,435\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,密度为 $2\,265\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$;灰质砂岩速度为 $3\,952\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,密度为 $2\,530\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,厚度约为 80 m;暗色泥岩速度为 $4\,761.9\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,密度为 $2\,580\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,两层暗色泥岩总厚度为 40 m。

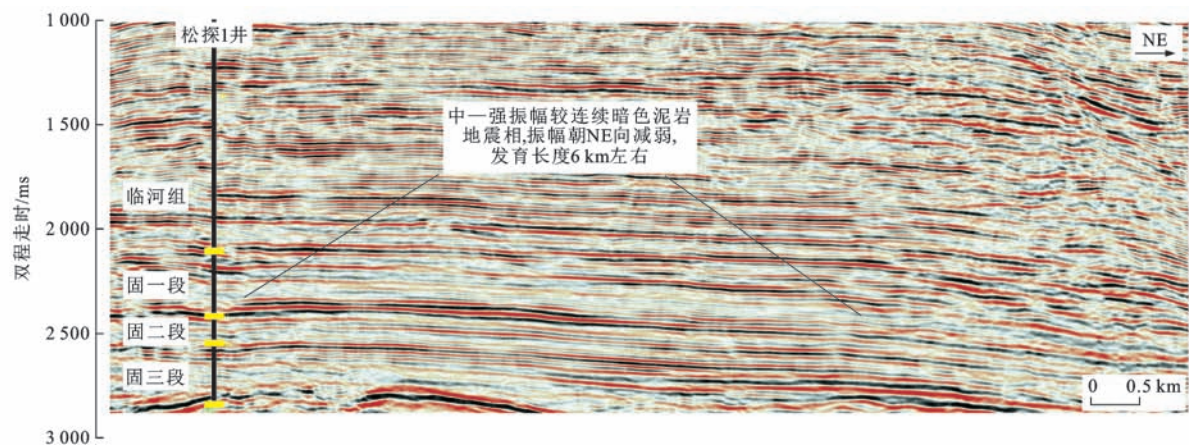


图 7 过松探 1 井 NE 向地震剖面东南段暗色泥岩中一强振幅连续反射地震相

Fig. 7 Seismic Facies of Medium to Strong Amplitude Continuous Reflection of Dark Shale on the Southeast Segment of NE-extending Seismic Section Through Well ST1

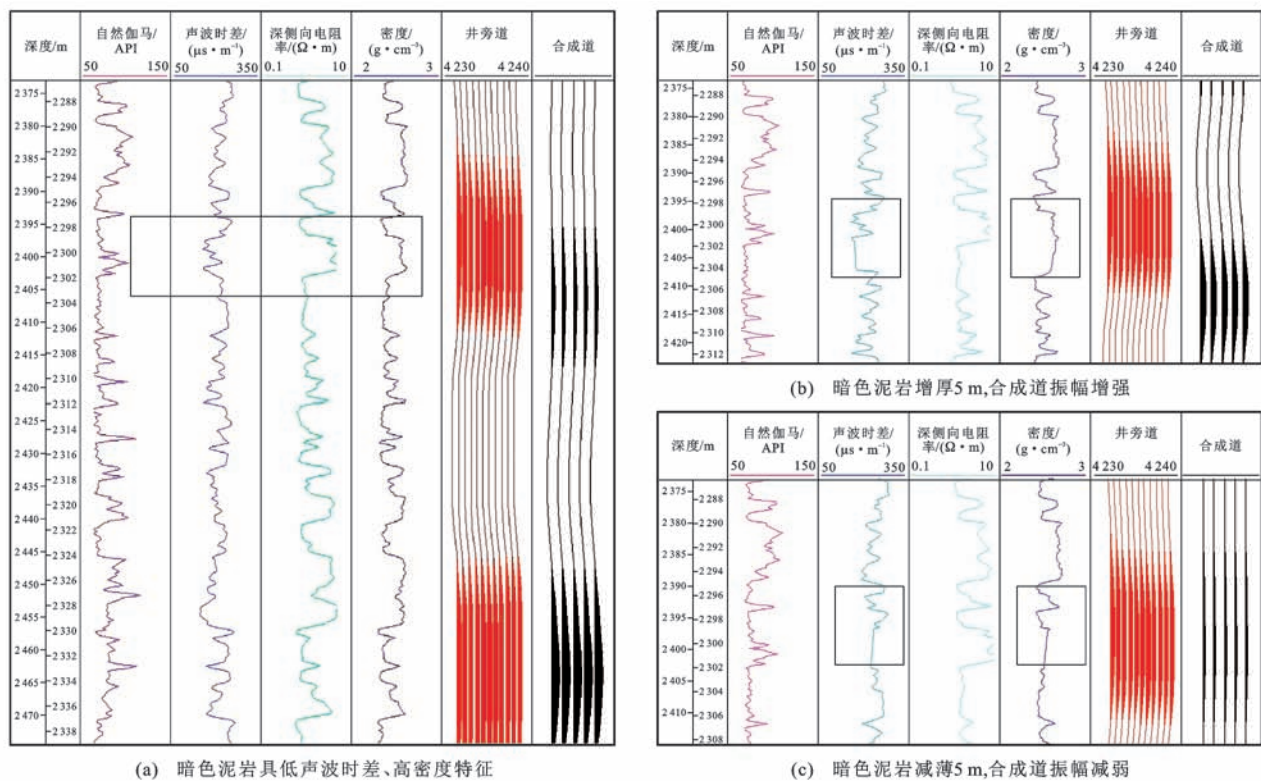


图 8 松探 1 井固一段暗色泥岩厚度变化的一维正演模型

Fig. 8 One Dimensional Forward Model of Thickness Variation of Dark Shale of Gu1 Member in Well ST1

正演模型中,让两层暗色泥岩厚度呈现楔状与阶梯状变化,模拟其厚度对振幅影响。暗色泥岩在地震记录中表示为“一谷两峰”的反射特征。利用 25 Hz 雷克子波模拟出的地震响应也表现出典型的“一谷两峰”反射特征。无论楔状还是阶梯状厚度变化,都呈现出固一段暗色泥岩厚度越大、振幅越大的特点。

上述模拟表明,振幅属性是反映湖相暗色泥岩含量或厚度的重要依据,即在砂泥岩波阻抗有较大

差异情况下,振幅属性即可反映岩性组合和沉积相的变化^[39]。因此,提取固一段振幅属性,根据振幅强度将研究区分为强、中、弱振幅带 3 个地震相类型。通过露头、岩芯和测井等综合分析认为,固一段沉积环境包括扇三角洲、滨浅湖、半深湖以及生物碎屑滩坝等。根据不同沉积区岩性特征与振幅的关系,以及不同地震相在平面上的分布位置和形态^[40],可以推断强振幅带代表半深湖,中一强振幅带代表生物碎屑滩坝,中一弱振幅带代表扇三角洲前

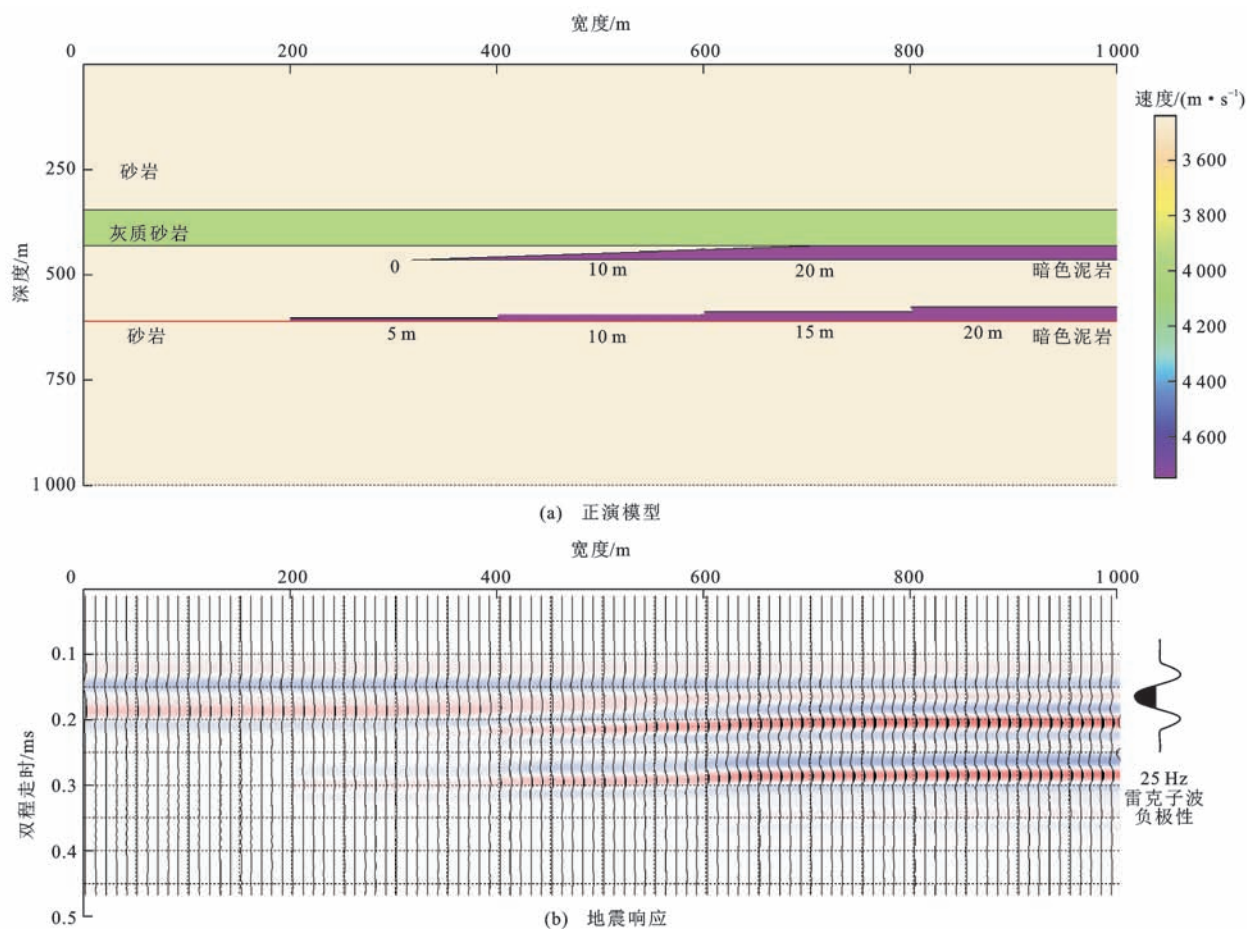


图 9 暗色泥岩正演模型与地震响应

Fig. 9 Forward Model and Seismic Response of Dark Shale

缘—滨浅湖,弱振幅带代表扇三角洲平原(图 10)。

根据 3 口井的合成地震记录拟合了该区综合平均速度,制作了吉兰泰凹陷固一段顶面、底面构造图,用底面构造图减去顶面构造图得出固一段厚度图。在已知固一段厚度、3 个井点的固一段暗色泥岩厚度和暗色泥岩厚度占地层厚度百分比的基础上,根据正演模型提供的厚度与振幅成正比的关系,在井点厚度标定下,可以制作出固一段暗色泥岩厚度图(图 11)。具体做法为:8 位数据体地震振幅最大绝对值为 127,固一段振幅大于 75 的时间厚度在井点与测井统计的暗色泥岩厚度较一致,从而用该厚度大致反映固一段暗色泥岩厚度,与 3 口井的暗色泥岩厚度吻合,分别为 36、29、2 m。据此可以推算出暗色泥岩累计厚度,最大厚度为 40 m 左右,在凹陷中央呈沿 NE 向条带展布,位置与沉积相平面图上的半深湖位置一致(图 10)。

5 烃源岩成熟度与烃源对比

吉兰泰凹陷烃源岩存在的主要问题是钻井样品虽埋深在 2 500~2 600 m,但却处于未熟—低熟演

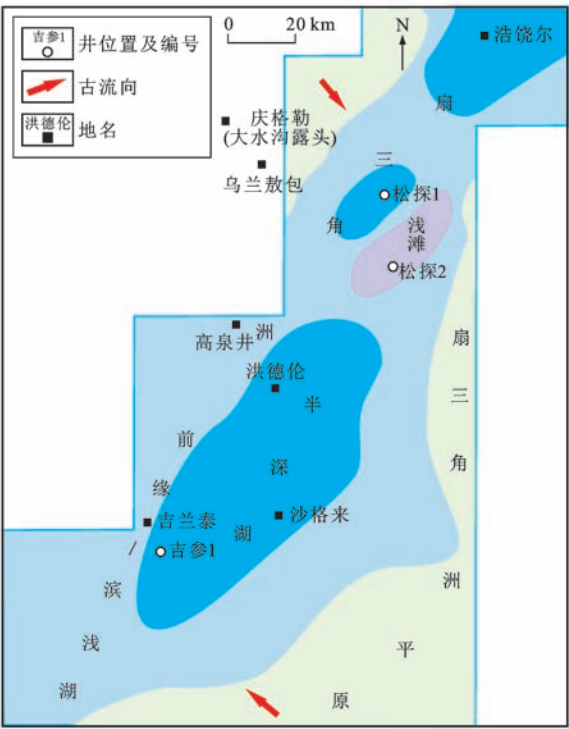


图 10 固一段沉积相平面图

Fig. 10 Plane Map of Sedimentary Facies of Gu1 Member

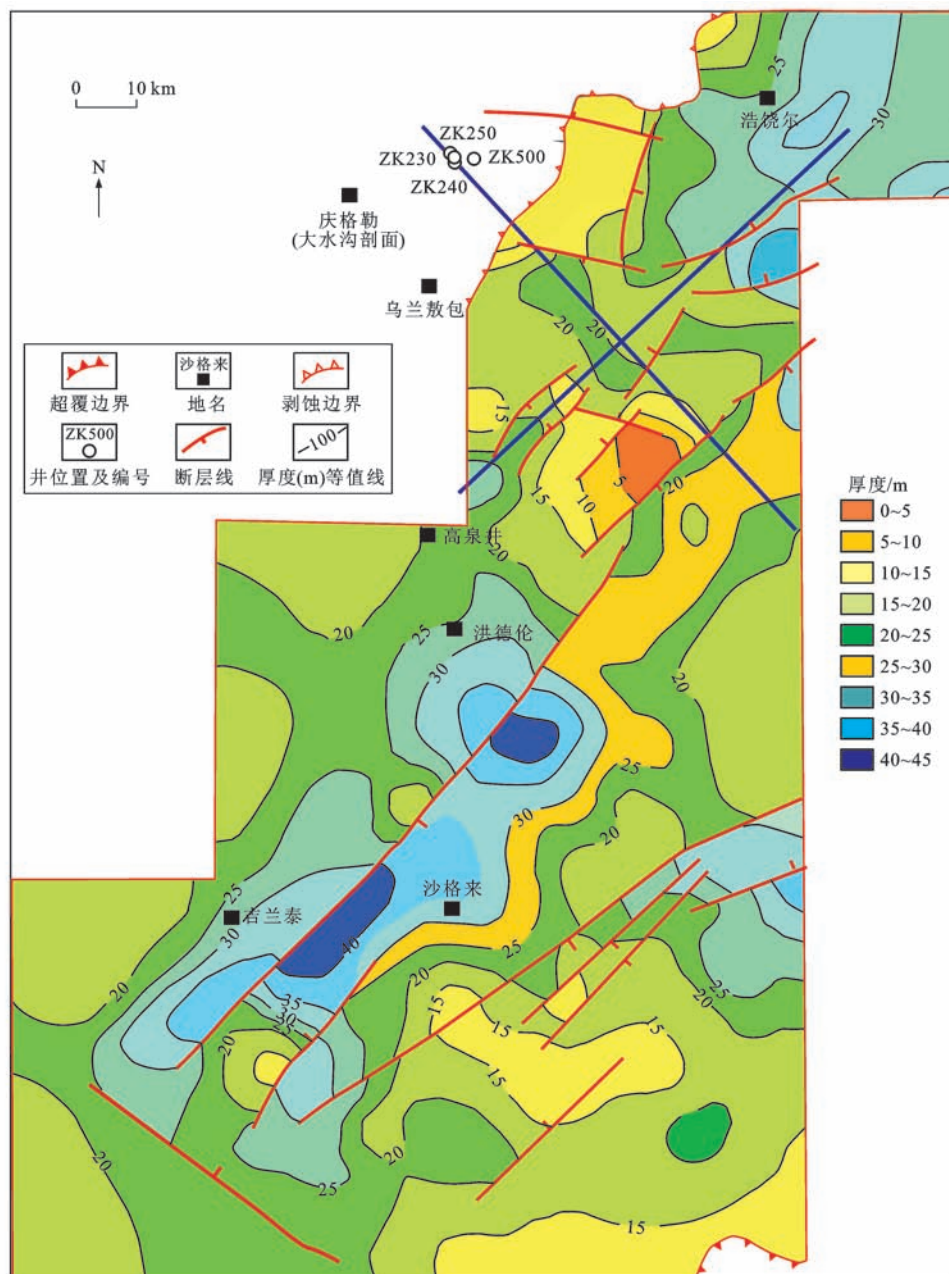


图 11 固一段暗色泥岩厚度图

Fig. 11 Dark Shale Thickness Map of Gu1 Member

化阶段,而露头样品却处于过成熟状态,其他地球化学指标类似。对庆格勒大水沟剖面深灰色泥岩、灰绿色泥岩、松探 1 井固一段、松探 2 井固一段深灰色泥岩取芯共 5 个样品进行热解实验。两个露头样品换算总有机碳为 0.31%~0.70%,母质类型为Ⅲ类,最大热解峰温度达到了 472℃,属于过成熟^[41-42]。松探 1 井和吉参 1 井 12 个岩芯样品地球化学分析的总有机碳介于 0.37%~2.63%,平均为 0.94%,母质类型为Ⅱ_a类,最大热解峰温度平均只有 408℃,属于未熟—低熟。由于露头黑色页岩样品采自长期风化的小河边,有机质散失严重,有机质

含量和类型均有偏差^[43]。

色谱图分析对比表明,ZK230 井、ZK500 井元古界变质岩裂隙中的原油地球化学指标与松探 1 井固一段原油饱和烃色谱图正构烷烃组分齐全,具有相同的主峰优势和植烷优势,峰型完整,主峰碳以 C₂₂为主,3 口井的 4 个样品原油应来源于同一烃源岩(图 12),但二者成熟度却有明显差异。露头区的变质岩裂缝中的 5 个原油样品奇偶优势指数(OEP)介于 1.01~1.17,平均为 1.08;而松探 1 井固一段原油奇偶优势指数高达 2.36,为未熟—低熟状态^[44],与烃源岩热解结果一致。

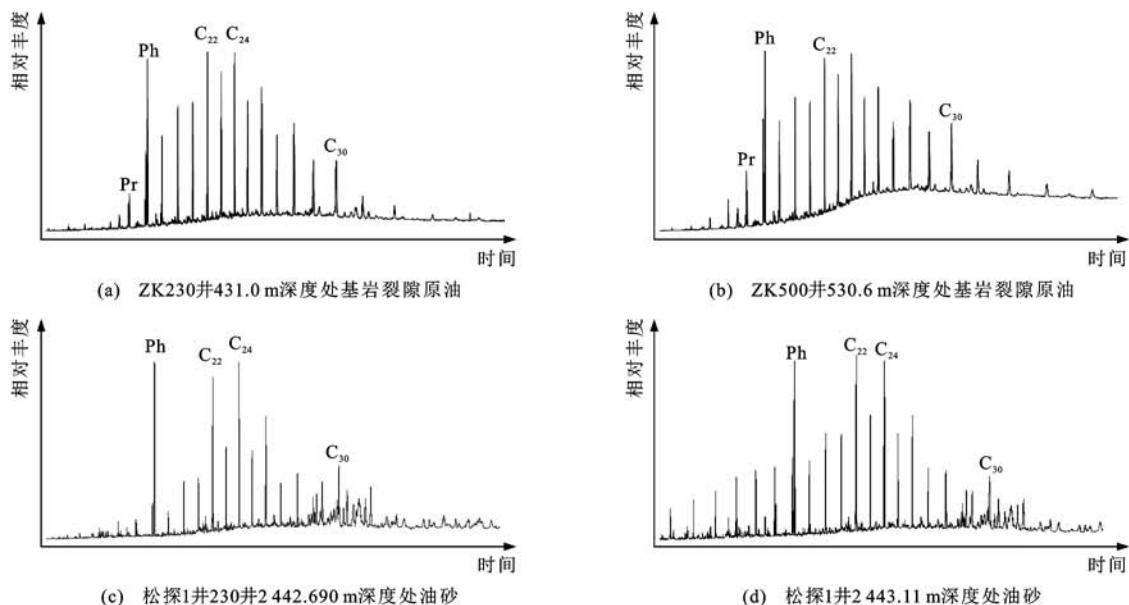


图 12 近露头区的 ZK230 井、ZK500 井变质岩裂缝原油与松探 1 井固一段油浸原油色谱对比

Fig. 12 Comparisons of Chromatograms of Fractured Crude Oil of Metamorphic Rock in Wells ZK230 and ZK500 of Outcrop Area and Immersed Crude Oil of Gu1 Member in Well ST1

钻井和大水沟露头烃源岩热解结果在有机质成熟度方面差异较大,但从砂岩含油色谱对比图来看,二者又是相同的。吉参 1 井和松探 1 井固一段底面埋深分别为 2 600 m 和 2 500 m 左右,目的层经过的埋藏史类似,后期均未发生过地层抬升剥蚀,用声波法恢复剥蚀厚度均为 0 m^[45]。

上新世末期的构造运动造成了吉兰泰凹陷西北缘固阳组及其以上渐新统至上新统地层的全部剥蚀,因此,ZK500 井区油气的高成熟度应是在这次抬升剥蚀之前发生的。把地震剖面上上新统顶面不整合拉平,即可看出剥蚀厚度、烃源岩成熟期的剖面构造^[46](图 13)。图 13 显示 ZK500 井附近的固一段已被剥蚀,抬升剥蚀前的最大埋深的双程走时为 1 500~2 000 ms,用松探 1 井合成地震记录换算成

深度为 1 300~2 000 m,这一深度仍小于松探 1 井的最大埋深 2 500 m。该深度作为成藏期的最大深度仍然小于松探 1 井烃源岩深度,而前者的有机质成熟度却远大于后者。

ZK500 井变质岩裂缝的高成熟度原油可能与其他热事件有关。局部存在的岩浆或热液活动可能导致烃源岩和原油的高成熟。岩浆或热液作用对油气成熟和油藏改造在塔河油田就有报道^[47-48]。ZK500 井附近存在一个平面上呈圆形展布的航磁异常,直径约 15 km(图 14),其中心与图 13 地震剖面上给 ZK500 井基底供油的固一段残余位置吻合。图 13 的基底上拱杂乱反射可能是与高航磁异常有关的岩浆侵入所形成。虽然在该区露头附近没找到上新世火山岩或岩浆岩,但该区以南具类似构造背

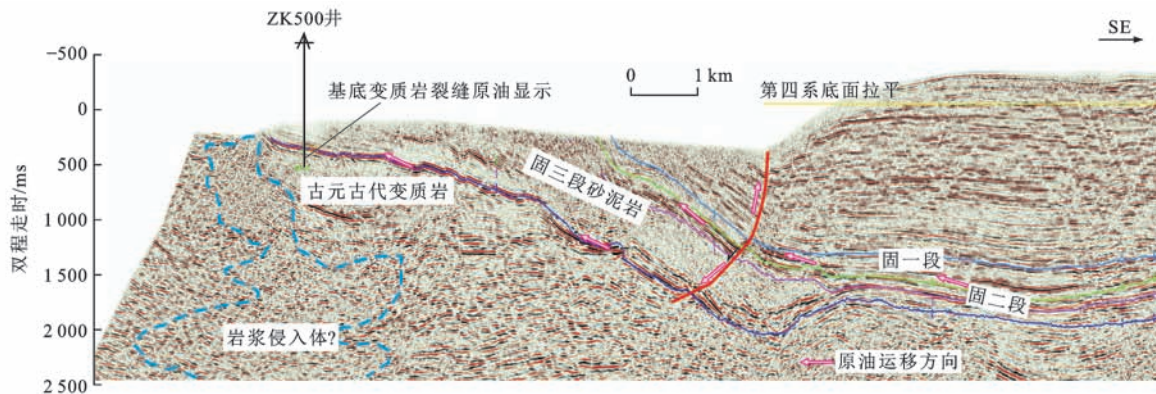


图 13 上新统顶面不整合拉平显示的过 ZK500 井 SE 向地震剖面

Fig. 13 SE-extending Seismic Section Through Well ZK500 After the Top Pliocene Unconformity Flatted

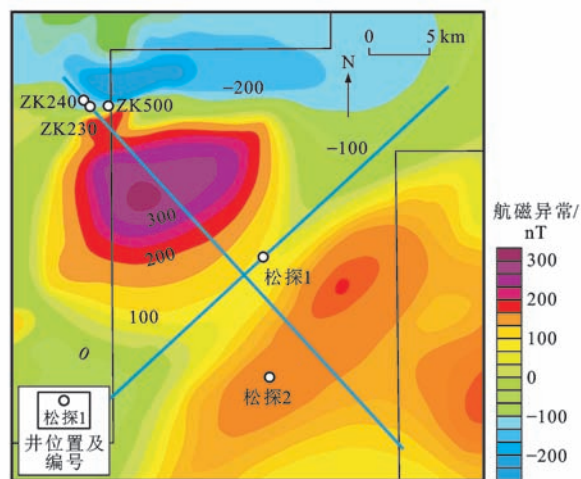


图 14 吉兰泰凹陷航磁异常化极等值线平面图

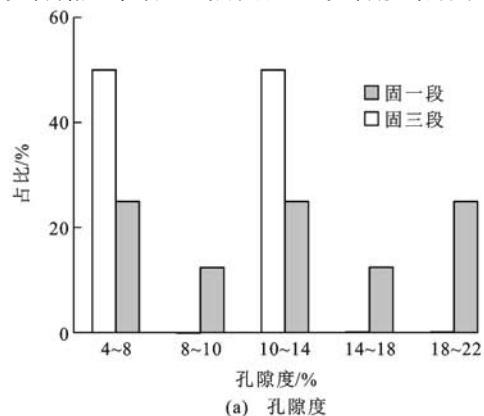
Fig. 14 Contour Plane Map of Aeromagnetic Anomaly in Jilantai Sag

景的巴彦浩特盆地存在燕山晚期的辉长岩和凝灰岩^[32]。地震剖面上的上拱杂乱反射和航磁异常共同暗示了某种岩浆侵入活动,其形成时间应当是造成白垩系及其上覆所有地层被剥蚀的上新世末期(图 13),可能正是该岩浆热事件促使了 ZK500 井区原油的高成熟。埋藏史研究表明,远离该热侵入体的吉参 1 井固一段烃源岩埋深超过 3 500 m 以下才可能进入成熟阶段^[1]。

6 有利勘探区

从固一段暗色泥岩厚度来看,吉兰泰凹陷中部浅凹带厚度最大,分布广,累计厚度最大超过 40 m,其次为北部深凹带,累计厚度最大可能超过 35 m。但从埋深来看,北部深凹带固一段底面埋深为 3 500~6 000 m^[49],中部浅凹带埋深为 2 000~3 000 m。综合考虑烃源厚度和成熟度,北部深凹带相对更有利。

从砂岩储层来看,虽然固阳组砂岩胶结疏松,但



孔隙度并不大。在孔隙度分布直方图上,主峰孔隙度为 10%~14%,呈多峰分布,可能反映河道、重力流漫滩等不同微相的砂岩物性特征。渗透率分布呈单峰状,主要为 1~10 mD。总体来看,固一段和固三段物性没有明显差别,总体属于中低孔低渗储层(图 15)。

从沉积亚相平面展布来看,固一段和固三段具有砂泥岩互层特点,扇三角洲前缘呈片状大面积分布,与中部浅凹带相比,北部深凹带这一砂泥岩互层有利相带稍变窄,但依然是主体相带(图 10)。

从油气运移和聚集来看,图 13 显示上新世成藏期固阳组地层倾角虽然比现今要缓,但也为 SE 向,因此,当初形成的油气就已经朝 NW 向的高部位运移,随着后期继续抬升剥蚀,吉兰泰凹陷西北凸起区的油气在二次运移中可能发生部分散失。吉兰泰凹陷西北次凸地区的油气自生成以来一直朝 NW 向运移聚集直至散失状态,运移路径中存在岩性圈闭则可成藏。在北部深凹带 SE 向缓坡上,2017 年新采集地震剖面上存在一个近 SN 向延伸断凸带,EW 向剖面上表现为一个屋脊断块,西临生烃深凹,应属于有利油气聚集带。其次,松探 1 井与松探 2 井所在的继承性浅凸是南、北凹陷油气生成后的运移指向区。

综合以上生烃岩厚度面积、成熟度、沉积相带和构造对油气运移的控制,将吉兰泰凹陷划为两个有利勘探区、两个较有利勘探区和其他低潜力区(图 16)。

第一个有利勘探区位于北部深凹带,埋深 3 500~6 000 m,烃源岩厚 30~40 m,应达到了成熟条件。缓坡上发育一个较大面积朝 NE 向延伸的断凸-断鼻构造带,是夹持在两个反向断层之间的屋脊断块,应为有利油气聚集区。

第二个有利勘探区即为图 12 所指示的吉兰泰西北次凸地区,平面图上松探 1 井西北部固阳组顶

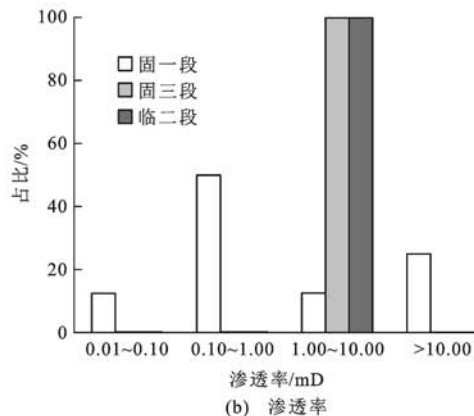
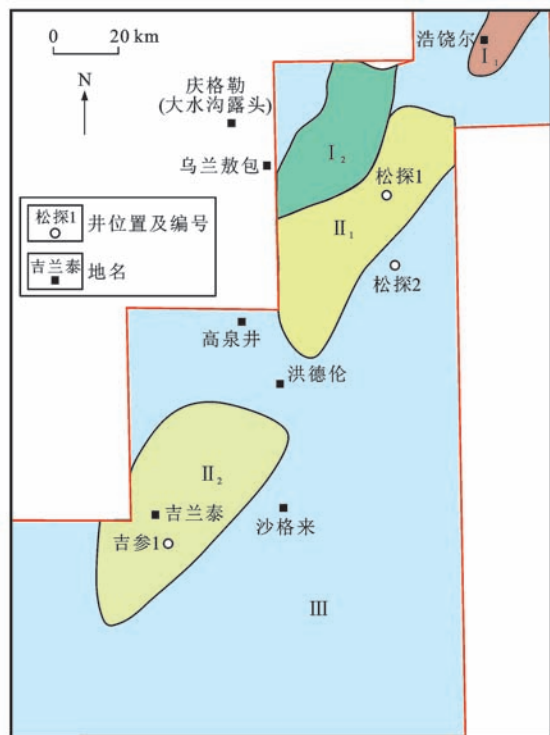


图 15 松探 1 井固阳组砂岩孔隙度和渗透率分布直方图

Fig. 15 Distribution Histograms of Porosity and Permeability of Sandstone of Guyang Formation in Well ST1



I₁、I₂ 为有利勘探区; II₁、II₂ 为较有利勘探区; III 为低潜力区

图 16 吉兰泰凹陷勘探有利区分布

Fig. 16 Distribution of Favorable Area for Exploration in Jilantai Sag

面东南倾地区均属于该区域。油气自上新世末期生成以来一直处于朝 NW 向地表运移、聚集成藏和最终散失状态。

两个较有利勘探区分别属于中北次凸地区和西部断鼻构造单元,前者已完钻松探 1 井,后者已完钻吉参 1 井。需要说明的是,松探 1 井两回次取芯揭示固一段中下部烃源岩附近存在约 4 m 的油斑-油浸砂岩(图 6),反映该井点已经成藏,只是规模有限,其上、下其他砂岩含油不普遍,不排除圈闭落实后有望取得工业突破的可能。吉参 1 井为 20 世纪 80 年代所钻,钻井工艺水平有限,虽然该井显示差,也不能排除西部断鼻构造的成藏可能。

其他低潜力区是指除了以上 2 类地区以外的凹陷周边斜坡区,由于埋藏过浅(小于 2 000 m),烃源岩未熟。

有利勘探区(北部深凹带)是值得继续勘探的区域,较有利勘探区(中北次凸地区和西部断鼻构造单元)如果能实施三维地震和落实圈闭的话,也可能会取得突破。

7 结 语

(1)河套盆地吉兰泰凹陷下白垩统固一段湖相

暗色泥岩形成于扇三角洲一半深湖沉积环境,具有高自然伽马、高电阻率和低声波时差测井特征,在地震剖面上为平行连续强振幅反射,地震相预测其沿 NE 向吉兰泰凹陷中心加厚,累计厚度一般为 20~30 m,最厚约 45 m。

(2)近露头的 ZK500 井基底变质岩裂缝和松探 1 井固一段砂岩含油属同一油源,但 ZK500 井原油成熟度和露头暗色泥岩的成熟度都远高于松探 1 井的烃源岩和原油成熟度。ZK500 井附近存在一个近圆形的高航磁异常体在上新世末期强烈抬升可能是深部岩浆上拱所造成,这次热事件可能导致其周围附近烃源岩成熟度明显偏高和横向非均匀变化。

(3)吉兰泰凹陷北部深凹带固一段最大埋深为 3 500~6 000 m,烃源岩应属于成熟阶段,其附近缓坡带上发育的 NE 向断凸-断鼻构造带是最有希望的勘探前景区。

参考文献:

References:

- [1] 长庆油田石油地质志编写组. 中国石油地质志: 长庆分册[M]. 北京: 石油工业出版社, 1992.
Compiling Group of Petroleum Geological Records in Changqing Oilfield. Chinese Petroleum Geology: Changqing Branch [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1992.
- [2] 赵重远, 郭忠铭, 惠斌耀. 河套弧形构造体系及其形成和演化机制[J]. 石油与天然气地质, 1984, 5(4): 349-361.
ZHAO Zhong-yuan, GUO Zhong-ming, HUI Bin-yao. Hetao Arcuate Tectonic Systems and Their Mechanism of Formation and Evolution[J]. Oil and Gas Geology, 1984, 5(4): 349-361.
- [3] 赵孟为. 河套盆地断裂活动的特征及其与油气的关系[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 1988, 18(2): 85-94.
ZHAO Meng-wei. Characteristics of Fault Activity in Hetao Basin and Its Relation with Oil and Gas[J]. Journal of Northwest University: Natural Science Edition, 1988, 18(2): 85-94.
- [4] 郭忠铭, 于忠平. 河套弧形地堑系构造特征和演化机制及其油气勘探[J]. 石油勘探与开发, 1990, 17(3): 11-20.
GUO Zhong-ming, YU Zhong-ping. Structural Characteristics, Mechanism of Evolution and Petroleum Prospecting of Hetao Graben System[J]. Petroleum Exploration and Development, 1990, 17(3): 11-20.
- [5] 蔡友贤. 内蒙古河套盆地白垩纪地层层序及生油层时代讨论[J]. 石油勘探与开发, 1988, 25(3): 27-32.

- CAI You-xian. A Discussion on the Cretaceous Stratigraphic Sequence and the Age of Source Rocks, Hetao Basin in Inner Mongolia[J]. Petroleum Exploration and Development, 1988, 25(3): 27-32.
- [6] 蔡友贤. 内蒙古河套盆地晚白垩世地层新资料[J]. 地层学杂志, 1988, 12(4): 273-280.
- CAI You-xian. New Data of Late Cretaceous Strata in Hetao Basin, Inner Mongolia[J]. Journal of Stratigraphy, 1988, 12(4): 273-280.
- [7] 张以明, 张锐锋, 王少春, 等. 河套盆地临河坳陷油气勘探重要发现的实践与认识[J]. 中国石油勘探, 2018, 23(5): 1-11.
- ZHANG Yi-ming, ZHANG Rui-feng, WANG Shao-chun, et al. Practice and Understanding of Great Discovery in Oil and Gas Exploration in Linhe Depression of Hetao Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2018, 23(5): 1-11.
- [8] 杨 华, 李民才, 崔永平. 河套盆地生物气成藏条件及勘探前景[J]. 中国石油勘探, 2005, 10(3): 16-21.
- YANG Hua, LI Min-cai, CUI Yong-ping. Accumulation Condition and Exploration Prospects of Biogenic Gas in Hetao Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2005, 10(3): 16-21.
- [9] 高胜利, 任战利, 崔君平. 河套盆地古气候演化与生物气勘探[J]. 地质科技情报, 2007, 26(2): 35-39.
- GAO Sheng-li, REN Zhan-li, CUI Jun-ping. Paleoclimate Evolution and Biogas Exploration in Hetao Basin[J]. Geological Science and Technology Information, 2007, 26(2): 35-39.
- [10] 孔庆芬, 李剑锋, 李民才, 等. 河套盆地生物气源岩有机地球化学特征及生气演化模式[J]. 天然气地球科学, 2008, 19(2): 238-243.
- KONG Qing-fen, LI Jian-feng, LI Min-cai, et al. Geochemical Characteristics of Gas Source Rock and Generation-evolution Model of Biogenic Gas in Hetao Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2008, 19(2): 238-243.
- [11] 左智峰, 赵俊兴, 陈洪德, 等. 河套盆地呼和坳陷浅层生物气气源条件分析[J]. 天然气工业, 2009, 29(3): 41-44.
- ZUO Zhi-feng, ZHAO Jun-xing, CHEN Hong-de, et al. An Analysis on Source Conditions of Shallow Biogas Reservoirs in Huhe Depression, Hetao Basin[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(3): 41-44.
- [12] 张永谦, 滕吉文, 王谦身, 等. 河套盆地及其邻近地域的地壳结构与深层动力学过程[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(5): 2264-2272.
- ZHANG Yong-qian, TENG Ji-wen, WANG Qian-shen, et al. Crustal Structure and the Geodynamic Process Beneath the Hetao Basin and Adjacent Area[J]. Progress in Geophysics, 2013, 28(5): 2264-2272.
- [13] 公王斌, 胡健民, 李振宏, 等. 河套盆地西缘山前低台地沉积特征对“吉兰泰—河套”古湖消退过程及其控制因素的指示意义[J]. 地学前缘, 2013, 20(4): 190-198.
- GONG Wang-bin, HU Jian-min, LI Zhen-hong, et al. The Sediment Features of Lower Piedmont Platforms Along Western Hetao Basin and Implication for Subsiding Process and Controlling Factors of “Jilantai-Hetao” Megalake[J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(4): 190-198.
- [14] 陈发虎, 范育新, MADSEN D B, 等. 河套地区新生代湖泊演化与“吉兰泰—河套”古大湖形成机制的初步研究[J]. 第四纪研究, 2008, 28(5): 866-873.
- CHEN Fa-hu, FAN Yu-xin, MADSEN D B, et al. Preliminary Study on the Formation Mechanism of the “Jilantai-Hetao” Megalake and the Lake Evolutionary History in Hetao Region[J]. Quaternary Sciences, 2008, 28(5): 866-873.
- [15] 蔡茂堂, 叶培盛, 杨星辰, 等. 河套盆地北部 344 ka 以来沉积环境演化[J]. 地质力学学报, 2018, 24(2): 253-262.
- CAI Mao-tang, YE Pei-sheng, YANG Xing-chen, et al. Evolution of Sedimentary Environment in the North Hetao Basin Since 344 ka[J]. Journal of Geomechanics, 2018, 24(2): 253-262.
- [16] 杨星辰, 叶培盛, 蔡茂堂, 等. 150 ka 以来内蒙古河套古大湖沉积物粒度记录的湖泊水位变化[J]. 地质通报, 2017, 36(6): 1043-1050.
- YANG Xing-chen, YE Pei-sheng, CAI Mao-tang, et al. Variation of Lake Water Level Recorded by Grain Sizes of Sediments from Hetao Paleolake Since 150 ka[J]. Geological Bulletin of China, 2017, 36(6): 1043-1050.
- [17] 李建彪, 冉勇康, 郭文生. 河套盆地托克托台地湖相层研究[J]. 第四纪研究, 2005, 25(5): 630-639.
- LI Jian-biao, RAN Yong-kang, GUO Wen-sheng. Research on the Lacustrine Strata of the Tuoketuo Mesa, Hetao Basin, China[J]. Quaternary Sciences, 2005, 25(5): 630-639.
- [18] 赵希涛, 贾丽云, 胡道功. 内蒙河套地区黄河阶地与新近纪砾石层的发现及其对黄河发育、中国河流古老性与河湖共存论的意义[J]. 地质学报, 2018, 92(4): 845-886.
- ZHAO Xi-tao, JIA Li-yun, HU Dao-gong. Discoveries of Fluvial Terraces and Neogene Gravels in the Hetao Area, Inner Mongolia: Implications for the Develop-

- ment of the Yellow River, Antiquity of Chinese Rivers, and Coexistence Theory of Rivers and Lakes[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2018, 92(4): 845-886.
- [19] 牟雪松, 马俊, 王永达, 等. 粒度分布的端元建模分析及检验: 以“吉兰泰—河套”盆地西部 DK-12 钻孔晚第四纪沉积物为例[J]. *古地理学报*, 2018, 20(3): 489-500.
- MOU Xue-song, MA Jun, WANG Yong-da, et al. End-member Modeling Analysis and Test of Grain-size Distribution: A Case from the Late Quaternary Sediments of Borehole DK-12 in the Western Jilantai-Hetao Basin[J]. *Journal of Paleogeography*, 2018, 20(3): 489-500.
- [20] THIERRY C, MANUEL P, KOSTLA A. Unsupervised Seismic Facies Classification: A Review and Comparison of Techniques and Implementation[J]. *The Leading Edge*, 2003, 22(10): 942-953.
- [21] 朱剑兵, 赵培坤. 国外地震相划分技术研究新进展[J]. *勘探地球物理进展*, 2009, 32(3): 167-171.
- ZHU Jian-bing, ZHAO Pei-kun. Advances in Seismic Facies Classification Technology Abroad[J]. *Progress in Exploration Geophysics*, 2009, 32(3): 167-171.
- [22] ZENG H L. Seismic Geomorphology-based Facies Classification[J]. *The Leading Edge*, 2004, 23(7): 644-688.
- [23] WEST B P, MAY S R, EASTWOOD J E, et al. Interactive Seismic Facies Classification Using Textural Attributes and Neural Networks[J]. *The Leading Edge*, 2002, 21(10): 1042-1049.
- [24] GAO D L. Application of Three-dimensional Seismic Texture Analysis with Special Reference to Deep-marine Facies Discrimination and Interpretation: Off-shore Angola, West Africa[J]. *AAPG Bulletin*, 2007, 91(12): 1665-1683.
- [25] 赵忠泉, 贺振华, 万晓明, 等. 基于敏感地震属性波形分类的流体预测研究[J]. *西南石油大学学报: 自然科学版*, 2016, 38(3): 75-81.
- ZHAO Zhong-quan, HE Zhen-hua, WAN Xiao-ming, et al. A Study on Fluid Prediction Based on the Classification of Sensitive Seismic Attributes[J]. *Journal of Southwest Petroleum University: Science and Technology Edition*, 2016, 38(3): 75-81.
- [26] 罗亚能, 黄捍东, 王玉梅, 等. 地震波形反演与测井联合的三维建模方法[J]. *石油地球物理勘探*, 2016, 51(5): 947-954.
- LUO Ya-neng, HUANG Han-dong, WANG Yu-mei, et al. Three-dimensional Modeling Based on Integration of Full Wave Inversion and Well Logging Data[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2016, 51(5): 947-954.
- [27] 顾雯, 徐敏, 王铎翰, 等. 地震波形指示反演技术在薄储层预测中的应用: 以准噶尔盆地 B 地区薄层砂岩气藏为例[J]. *天然气地球科学*, 2016, 27(11): 2064-2069.
- GU Wen, XU Min, WANG Duo-han, et al. Application of Seismic Motion Inversion Technology in Thin Reservoir Prediction: A Case Study of the Thin Sandstone Gas Reservoir in the B Area of Junggar Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(11): 2064-2069.
- [28] 高君, 毕建军, 赵海山, 等. 地震波形指示反演薄储层预测技术及其应用[J]. *地球物理学进展*, 2017, 32(1): 142-145.
- GAO Jun, BI Jian-jun, ZHAO Hai-shan, et al. Seismic Waveform Inversion Technology and Application of Thinner Reservoir Prediction[J]. *Progress in Geophysics*, 2017, 32(1): 142-145.
- [29] 杜伟维, 金兆军, 邸永香. 地震波形指示反演及特征参数模拟在薄储层预测中的应用[J]. *工程地球物理学报*, 2017, 14(1): 56-61.
- DU Wei-wei, JIN Zhao-jun, DI Yong-xiang. The Application of Seismic Waveform Indicator Inversion and Characteristic Parameter Simulation to Thin Reservoir Prediction[J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2017, 14(1): 56-61.
- [30] 刘财, 裴思嘉, 郭智奇, 等. 地震波形反演技术在砂泥岩薄互层结构表征中的应用[J]. *地球物理学报*, 2017, 60(5): 1893-1902.
- LIU Cai, PEI Si-jia, GUO Zhi-qi, et al. The Application of Seismic Amplitude Inversion for the Characterization of Interbedded Sand-shale Reservoirs[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, 60(5): 1893-1902.
- [31] 韩长城, 林承焰, 任丽华, 等. 基于地震波形指示的碳酸盐岩储集体反演方法: 以塔河油田中—下奥陶统为例[J]. *石油与天然气地质*, 2017, 38(4): 822-830.
- HAN Chang-cheng, LIN Cheng-yan, REN Li-hua, et al. Waveform-indication-based Seismic Inversion of Carbonate Reservoirs: A Case Study of the Lower-Middle Ordovician in Tahe Oilfield, Tarim Basin[J]. *Oil and Gas Geology*, 2017, 38(4): 822-830.
- [32] 张世晖, 刘天佑, 顾汉明, 等. 巴彦浩特盆地火成岩的综合地球物理解释[J]. *物探与化探*, 2003, 27(5): 383-386.
- ZHANG Shi-hui, LIU Tian-you, GU Han-ming, et al. A Synthetic Geophysics Interpretation of the Igneous Rocks in Bayan Haote Basin[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2003, 27(5): 383-386.

- [33] 傅智雁. 河套盆地白垩系古生物地层及其划分对比[R]. 西安: 中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院, 1986.
- FU Zhi-yan. Cretaceous Paleostratigraphy and Its Subdivision Correlation in Hetao Basin[R]. Xi'an: Research Institute of Exploration and Development, Changqing Oilfield Company, PetroChina, 1986.
- [34] 傅智雁, 袁效奇, 耿国仓. 河套盆地第三系及其生物群[J]. 地层学杂志, 1994, 18(1): 24-29.
- FU Zhi-yan, YUAN Xiao-qi, GENG Guo-cang. The Tertiary of the Hetao Basin and Its Biotas[J]. Journal of Stratigraphy, 1994, 18(1): 24-29.
- [35] 袁效奇, 傅智雁, 耿国仓. 河套盆地第三系有孔虫的发现及其生态环境的分析[J]. 石油学报, 1992, 13(2): 109-115.
- YUANG Xiao-qi, FU Zhi-yan, GENG Guo-cang. The Discovery of Tertiary Foraminifera and an Analysis of Their Ecological Enviroment in Hetao Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 1992, 13(2): 109-115.
- [36] 门相勇, 赵文智, 张 研, 等. 河套盆地临河坳陷石油地质特征[J]. 天然气工业, 2006, 26(1): 20-22.
- MEN Xiang-yong, ZHAO Wen-zhi, ZHANG Yan, et al. Characteristics of Petroleum Geology of Linhe Depression in Hetao Baisn[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(1): 20-22.
- [37] GALLOWAY W E, HOBDAI D, K. Terrigenous Clastic Depositional Systems: Applications to Petroleum, Coal, and Uranium Exploration[M]. New York: Springer-Verlag, 1983.
- [38] BROWN A R. Interpretation of Three-dimensional Seismic Data[J]. AAPG Memoir, 1999, 42: 147-188.
- [39] BROWN L F, FISHER W L. Seismic Stratigraphy Interpretation of Depositional Systems[J]. AAPG Memoir, 1977, 26: 213-248.
- [40] PU R H, ZHU L, ZHONG H L. 3-D Seismic Identification and Characterization of Ancient Channel Morphology[J]. Journal of Earth Science, 2009, 20(5): 858-867.
- [41] 邬立言, 顾信章. 热解技术在我国生油岩研究中的应用[J]. 石油学报, 1986, 7(2): 13-19.
- WU Li-yan, GU Xin-zhang. The Application of Pyrolysis Technique in Source Rock Research[J]. Acta Petrolei Sinica, 1986, 7(2): 13-19.
- [42] 王剑秋, TURNER T F, MIKNIS F P, 等. 以热解特征判别干酪根类型[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 1992, 16(1): 108-114.
- WANG Jian-qiu, TURNER T F, MIKNIS F P, et al. A New Method for Identifying Kerogen Types Based on Pyrolysis Characteristics[J]. Journal of the University of Petroleum: Edition of Natural Science, 1992, 16(1): 108-114.
- [43] 张振苓, 邬立言, 脱 奇, 等. 烃源岩热解分析参数 T_{\max} 异常值的还原[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(5): 580-584.
- ZHANG Zhen-ling, WU Li-yan, TUO Qi, et al. Abnormal Value Recovery of Maturity Parameter T_{\max} for Rock Eval[J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(5): 580-584.
- [44] 张厚福, 张万选. 石油地质学[M]. 2版. 北京: 石油工业出版社, 1989.
- ZHANG Hou-fu, ZHANG Wan-xuan. Petroleum Geology[M]. 2nd ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 1989.
- [45] 彭清华, 周江羽, 揭异新. 声波时差法对南堡凹陷东营组剥蚀量的恢复[J]. 断块油气田, 2009, 16(6): 50-53.
- PENG Qing-hua, ZHOU Jiang-yu, JIE Yi-xin. Erosion Thickness Restoration of Dongying Formation Reservoir in Nanpu Depression by Using Interval Transit Time Method[J]. Fault-block Oil and Gas Field, 2009, 16(6): 50-53.
- [46] 袁玉松, 郑和荣, 涂 伟. 沉积盆地剥蚀量恢复方法[J]. 石油实验地质, 2008, 30(6): 636-642.
- YUAN Yu-song, ZHENG He-rong, TU Wei. Methods of Eroded Strata Thickness Restoration in Sedimentary Basins[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2008, 30(6): 636-642.
- [47] PU R H, ZHONG H L, ZHANG Y L. Preliminary Study on the Effects of Permian Volcanism on the Tahe Ordovician Oil Pools in Tarim Basin[J]. Marine and Petroleum Geology, 2013, 44: 13-20.
- [48] LI K B, LU H T, PU R H, et al. Relationships Among Volcanic and Hydrothermal Activity and Faults from the Shunnan 3-D Well Zone in the Tadong Area (Tarim Basin, China) [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2016, 9(17): 692.
- [49] 刘 嵘, 马见青, 李庆春, 等. 重磁电综合地球物理探测河套盆地深部结构[J]. 地质力学学报, 2016, 22(4): 943-954.
- LIU Rong, MA Jian-qing, LI Qing-chun, et al. Gravity, Magnetic and Electric Comprehensive Geophysical Prospecting for Deep Structures in Hetao Basin[J]. Journal of Geomechanics, 2016, 22(4): 943-954.