

钟建华,倪良田,邵珠福,等. 辽西凹陷古近纪沙三中期 1 000 m 极超深水的发现及其地质意义[J]. 地球科学与环境学报, 2018, 40(1): 11-23.

ZHONG Jian-hua, NI Liang-tian, SHAO Zhu-fu, et al. Discovery and Its Geological Significance of Ultra-water: 1 000 m in the Middle of Member 3 of Shahejie Formation During Paleogene in Liaoxi Depression, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2018, 40(1): 11-23.

辽西凹陷古近纪沙三中期 1 000 m 极超深水的发现及其地质意义

钟建华¹, 倪良田¹, 邵珠福², 孙宁亮¹, 郝兵¹, 孙洪滨³, 刘宝³, 刘闯¹,
杨冠群¹, 王滨¹, 李伟华¹, 于艳玲¹, 罗可¹

(1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580; 2. 东北石油大学地球科学学院,
黑龙江 大庆 163318; 3. 中国石油辽河油田分公司, 辽宁 盘锦 124010)

摘要:辽西凹陷是辽河油田重要的油气产区,发育了世界上最好的烃源岩。优质烃源岩主要发育在古近系。辽西凹陷古近纪覆水深度可达 1 000 m,是一个极超深水凹陷;超深水的发现主要是通过地震剖面解析古近纪齐家扇体来获得,通过解析 1518 和 1631 两条测线(结合岩芯沉积特征)获得了沙三中期扇三角洲前缘前积层的最大高度为 1 000 m,并将其反演成古水深,发现辽西凹陷在古近纪沙三中期最大水深约为 1 150 m,在这种极超深水的条件下发育了非常特殊的以含大量泥漂砾的砂砾重力流为主的沉积;扇三角洲前积层倾角为 26°~29°;辽西凹陷古近纪的水深变化经历了一个极快速变深和缓慢变浅的演化过程,其快速沉降是岩浆底辟热侵蚀塌陷及地表侵蚀使得盆地基底快速大幅沉降所致;辽西凹陷的极超深水在这种极端的裂谷快速沉降的动力背景下形成的,为沙三段优质烃源岩及油气藏的形成奠定了基础;辽西凹陷沙三中期与东营凹陷沙三中期极超深水的发现还揭示了渤海湾盆地沙三中期可能存在超大规模的深水或超深水拗陷,进而揭示了渤海湾盆地和黄海可能存在大范围的优质烃源岩和油气资源。

关键词:极超深水;古近系;沙三段;前积层;裂谷;油气;辽西凹陷

中图分类号:P618.13

文献标志码:A

文章编号:1672-6561(2018)01-0011-13

Discovery and Its Geological Significance of Ultra-water: 1 000 m in the Middle of Member 3 of Shahejie Formation During Paleogene in Liaoxi Depression, China

ZHONG Jian-hua¹, NI Liang-tian¹, SHAO Zhu-fu², SUN Ning-liang¹, HAO Bing¹,
SUN Hong-bin³, LIU Bao³, LIU Chuang¹, YANG Guan-qun¹, WANG Bin¹,
LI Wei-hua¹, YU Yan-ling¹, LUO Ke¹

(1. School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao 266580, Shandong, China; 2. School of
Earth Sciences, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, Heilongjiang, China;
3. Liaohe Oilfield Company, PetroChina, Panjin 124010, Liaoning, China)

Abstract: Liaoxi depression is an important petroleum producing area in Liaohe oilfield, in which

收稿日期:2018-01-02;修回日期:2018-01-14

投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目:国家自然科学基金项目(41572088)

作者简介:钟建华(1957-),男,山东东营人,教授,博士研究生导师,理学博士,E-mail:zhongjh@upc.edu.cn.

the high-quality source rocks develop in Paleogene. Paleogene overlying water depth in Liaoxi depression is up to 1 000 m, and it is an ultra-deep water depression. The ultra-deep water is found primarily by seismic analysis of Paleogene Qijia fan; mainly through the analysis of lines 1518 and 1631 (combined with the sedimentary characteristics of drill core), the maximum height of foreset bed of fan delta front in the middle of member 3 of Paleogene Shahejie Formation is 1 000 m; through the inversion of paleo-water depth, the maximum water depth of member 3 of Paleogene Shahejie Formation in Liaoxi depression is about 1 150 m; a large number of mud gravel gravity flow dominated sedimentary boulders develop specially in the condition of ultra-deep water. The dip angles of delta foreset bed are 26° - 29° . The change of Paleogene water depth in Liaoxi depression experiences a rapid deepening and a slow shallowing evolution; the magma erosion diapiric thermal subsidence and surface erosion make the basin basement rapid subsidence substantially. The ultra-deep water in Liaoxi depression, which is formed under the dynamic background of the extremely rapid subsidence of rift valley, lays the foundation for the formation of high-quality source rocks and petroleum reservoirs in member 3 of Shahejie Formation. The discovery of ultra-deep water in the middle of member 3 of Shahejie Formation in Liaoxi and Dongying depressions reveals the possible existence of a lot of depressions with deep or ultra-deep water in the middle of member 3 of Shahejie Formation in Bohai Bay Basin, and then reveals the potential of high-quality source rocks and petroleum resources in Bohai Bay Basin and Yellow Sea.

Key words: ultra-deep water; Paleogene; member 3 of Shahejie Formation; foreset bed; rift; petroleum; Liaoxi depression

0 引言

含油气盆地最重要成藏因素是烃源岩,控制烃源岩优劣的主要因素是水深,因此,水深研究是油气盆地研究的主要内容。古水深研究同时又是古海平面恢复的一个重要研究方面^[1],但定量重建古水深难度较大,到目前为止,对湖泊古水深的定量研究没有很好的测定方法。目前研究古水深的方法主要有古生物学、地球化学、地震学和数学模拟等^[2-3]。Iryu 等通过研究 Maraa Tahiti 珊瑚藻来确定古水深和海平面变化^[4]。郭秋麟等主要利用不同时代的水生生物组合定性判断水深相带^[5-6]。近年来也有不少学者利用微体生物分异程度,结合数学统计方法,定量计算古水深^[5-6]。李守军等用介形类优势分异度结合地震剖面恢复湖盆古水深方法,得到东营凹陷古近系沙三期最大水深为 107.16 m^[7]。Baldi 利用浮游生物和深湖生物的比例结合碳氧稳定同位素来研究古水深^[8]。Perry 等通过研究牙买加北部生物礁群落潜穴来探讨古水深,发现生物礁的最大水深可达 30 m^[9]。苏新等用多门类微体生物分异叠合加权综合分析法恢复东营凹陷沙四段上亚段沉积早期最大古水深为 30 m^[10]。Chappell 等通过¹⁴C

测年方法对巴布亚新几内亚 Huon Peninsula 珊瑚礁进行了研究,探讨了 10 000 多年来珊瑚礁的覆水深度及海平面上升速率和幅度^[11]。此后,Edwards 等用 U-Th 测年和¹⁴C 测年方法也研究了 Huon Peninsula 珊瑚礁的覆水深度及海礁与冰川融平面变化^[12]。Bard 等通过 U-Pb 测年及 C-O 同位素方法研究了 Barbados Tahiti 障壁化引起的海平面及海水深度变化^[13]。Thomas 等利用地球化学结合岩芯的方法,得出 Tahiti reefs 的最大平均水深可达 70 m^[1]。Glorstad-Clark 等从地震剖面反演的三角洲前积层(高度)来研究古水深,发现西巴伦支海的三叠系台缘三角洲形成时的深水可达 600 m 左右^[14]。国内学者应用地层厚度、古生物等方法来研究古水深;董刚等利用地层厚度法半定量恢复扬子地区晚奥陶世和湘西—黔东南寒武纪沉积时期古水深^[15];康波等利用基于滨线轨迹计算方法定量恢复东营凹陷古近纪沙三期最大古水深为 180 m^[16]。应用这些方法恢复古水深一是存在多解性,二是数据缺乏可靠性。

用三角洲前积层的厚度或高度来研究水深是一种比较可靠的定量方法。这一方法的关键要在地震剖面上识别出可靠的三角洲相,尤其是三角洲前缘

相。地震剖面上有很好的三角洲前缘相反射,这种三角洲前缘相反射可以提供非常清晰的三角洲前积层影像;这种影像的重要特点是一系列倾斜的反射轴在顶部和底部被近水平或倾角明显小于倾斜反射轴的反射轴所夹持,且倾斜反射轴在上部和下部有上突或下突弯曲,形成典型的双曲面(Sigmoidal geometries)^[14]。上部的弯曲是由于近水平的三角洲平原相向倾斜的三角洲前缘相转变形成的弯折;下部的弯曲是由于倾斜的三角洲前缘相向近水平的前三角洲相转变形成的弯曲。上前积层顶部的三角洲平原相略低于水面;而前积层底部对应的是前三角洲相,是湖泊或海洋的沉积底面,因此,三角洲前积层的高度或厚度就基本与水体的深度接近(实际上总是略小于三角洲前缘相的实际水深)^[14,17-18],因而可以用三角洲前积层的高度来定量研究(古)水深。如果能够通过加载过井的地震剖面求解古水深则效果更好,因为钻井提供的深度信息是非常准确可靠的。东营凹陷的古近纪沙三中期发育了很好的三角洲前积层,且多条地震剖面上可以加载多口钻穿沙三中期的钻井,为本文提供了很好的研究当时古水深的材料^[17]。钟建华等对整个渤海湾盆地古近纪的超深水及极超深水也做了研究^[18],但精细程度不够,也没有对成因动力学做过剖析。基于此,本文运用东营凹

陷古近纪沙三中期古水深的研究方法来探讨辽西凹陷古近纪沙三中期古水深,并对其形成的动力学进行探讨。

1 研究区地质概况

辽西凹陷是辽河油田重要的油气产区,该区古近系有世界上最丰富的烃源岩($8\,400\times 10^4\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$),天然气为 $540\times 10^8\text{ m}^3\cdot\text{km}^{-2}$ ^[19-20]。辽西凹陷主要由 3 个次级洼陷组成,自北向南依次为陈家庄洼陷、清水沟洼陷和鸳鸯沟洼陷,其中以清水沟洼陷最大,研究区位于清水沟洼陷内(图 1)。

辽西凹陷的地层由基底与盖层两部分组成^[21-23]。基底的岩性组成主要有:太古宇到古元古界的混合花岗岩、花岗岩、片麻岩等古老的深变质岩系,中、上元古界的石英岩、黑色页岩、板岩、白云岩、灰岩与陆源碎屑岩等,古生界白云岩、泥页岩、灰岩以及中生界火山喷出岩、凝灰岩与碎屑岩等^[24]。辽西凹陷的盖层指的是新生代地层,该套地层厚度很大,最厚可达 9 400 m,自下而上为古近系房身泡组、沙四段、沙三段、沙一段、沙二段、东营组以及新近系馆陶组、明化镇组与平原组。沙三期为辽西凹陷的主成盆期,沉积厚度大,沉积范围广,发育烃源岩和储集层^[25]。

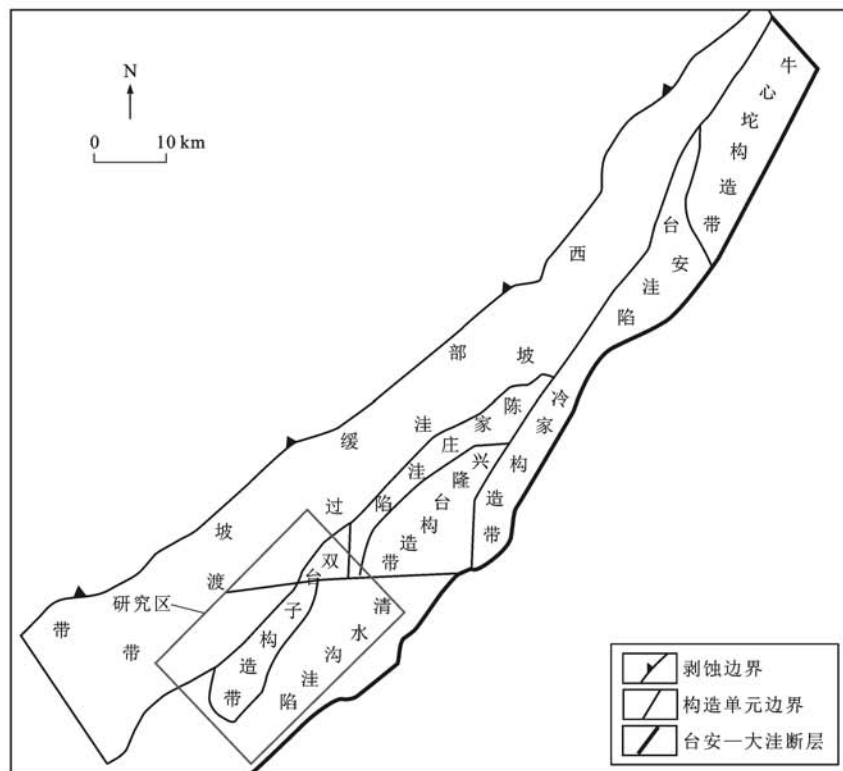


图 1 辽西凹陷及邻区地质图

Fig. 1 Geological Map of Liaoxi Depression and Its Adjacent Area

沙三段自下而上可细分上、中、下3个亚段。沙三段下亚段在全凹陷分布很广,在凹陷边缘部位主要发育灰白色厚层砂砾岩、长石砂砾岩及钙质砂岩,在辽西凹陷中部主要以灰黑色泥岩夹油页岩、钙质页岩薄互层为主。沙三段中亚段沉积时期(沙三中期)是全凹陷沉降速率最大的时期,该地层在全凹陷均有分布,主要以深灰、褐灰色泥岩和灰白色砂岩互层为特征。沙三段中亚段(大凌河油层段)是盆地大幅度剧烈下降条件下的沉积物,发育了大套的块状砾岩、砂砾岩和较厚的暗色泥岩。根据岩性及沉积的旋回性,本段可分为下组和上组,下组以大套块状砂砾岩为主,表现为快速堆积的特征,上组则大段泥岩比例有所增加,呈稳定沉陷的特征。化石组合以深水相的华北介和兴隆台纺锤玻璃介为特征。沙三段地震解释厚度大于2 500 m,最大钻井解释厚度为2 089 m(未穿),始新世晚期有4次火山活动,火山岩绝对年龄为39.5~42.4 Ma,平均沉积速度为 $500 \text{ m} \cdot \text{Ma}^{-1}$ 。其与下伏沙四段上亚段为整合或假整合接触^[26]。

辽西凹陷沿斜坡一侧发育了3个砂体,由北至南分别是曙光砂体、齐家—欢喜岭砂体和西八千砂体。通过对一系列相标志的研究分析,这3个砂体均认为是扇三角洲砂体。本次研究的对象是齐家—欢喜岭扇体。

2 古水深分析

本次研究古水深主要是从地震剖面出发,同时结合了沉积学资料和地球化学资料。研究区已有三维地震信息,为研究提供了很好的基础材料。由于地震资料提供的定量信息非常丰富,所以沉积学资料和地球化学资料仅做参考。在讨论之前有必要先给水深做一个定义,本文把水深分为5种:浅水(0~10 m)、半深水(10~50 m)、深水(50~200 m)、超深水(200~500 m)和极超深水(>500 m)。浅水沉积常受季节的变化引起水位的涨退,对有机沉积物产生深度降解,因此,这种环境只有生物生产量,生物保存量微乎其微;海相半深水环境一般会受大的潮汐或一般风暴的影响,部分有机沉积物得以保存,而湖相半深水环境有机沉积物一般可以保存或大部分保存;海相深水环境仅受特大潮或特大海啸影响,沉积有机质基本可以保存,湖相深水环境一般不受任何因素影响,沉积有机质完全可以保存;海相超深水环境仅受洋流、浊流影响,沉积有机质完全可以保存,湖相超深水环境不受任何因素影响,沉积有机质

完全可以保存;如果水深大于500 m,水体则处于一种完全封闭的静止状态,水体中可以溶解甲烷等气态烃,形成水溶性天然气,因此,把500 m以下的水深称为极超深水。本文主要涉及辽西凹陷极超深水(>500 m)。

2.1 地震资料解析

本次研究采用的地震资料是近期完成的双台子高精度三维资料,该资料正好覆盖了齐家扇体。通过连续切片发现1518和1631两条主干测线信息最好,由于三角洲的结构与其部位有关,只有在主干道的加积方向,三角洲前积层最为发育,在两侧则表现为侧向加积,很难获得能反映古深水的三角洲前积层高度。测线的方向为NW—SE向。这两条测线很好地切过了齐家扇体的主结构面,扇体的主要信息基本上都在这两条地震剖面上,尤其是三角洲前缘相的信息更加丰富,为本文研究古水深提供了不可多得的地震资料。由于新近纪该区还遭受了构造运动,尤其是新近纪的拗陷和侧向伸展导致齐家扇体发育了一系列断阶,使得古近系的地层也发生了沉降,原先的三角洲沉积体系尤其是三角洲前缘相发生了旋转变陡,使得在利用三角洲前积层恢复古水深时出现误差。为了消除和减少这种误差,使用了3种方法:第一种方法是对未做拉平处理的原地震剖面直接进行解析,求沙三中期的最大和最小前积层厚度;第二种是把沙三中期上部的S32-p界面拉平,然后解析其下的沙三中期前积层;第三种是把沙二期顶界(S2-p)拉平,然后再解析沙三中期前积层。

从Glorstad-Clark等的研究可知,在一个地震剖面上如果出现了一组倾斜的具有双曲或“S”形的反射轴就有可能代表的是三角洲前积层^[14],或者是两套平行反射轴夹了一套倾斜反射轴^[17]。在双曲或“S”形的反射轴上部的拐点处是滨线所在的位置,在下部的拐点处是三角洲前缘相与三角洲底积层的所在位置,两者之间代表的是三角洲前缘相^[14]。而滨线以上的平坦或近平坦部分代表的是三角洲平原相(图2、3)。从图2可以看出,1631测线上有一系列呈双曲或“S”形的反射轴,代表了三角洲前缘相,因此,可以通过解析该剖面来获取三角洲前缘相的高度等信息,进而可以获得古水深的信息。

2.1.1 1518测线的原测线解析

(1)齐家扇体类型的确定。齐家扇体是辽西凹陷沙三中期的四大扇体之一,该扇体在地震剖面上

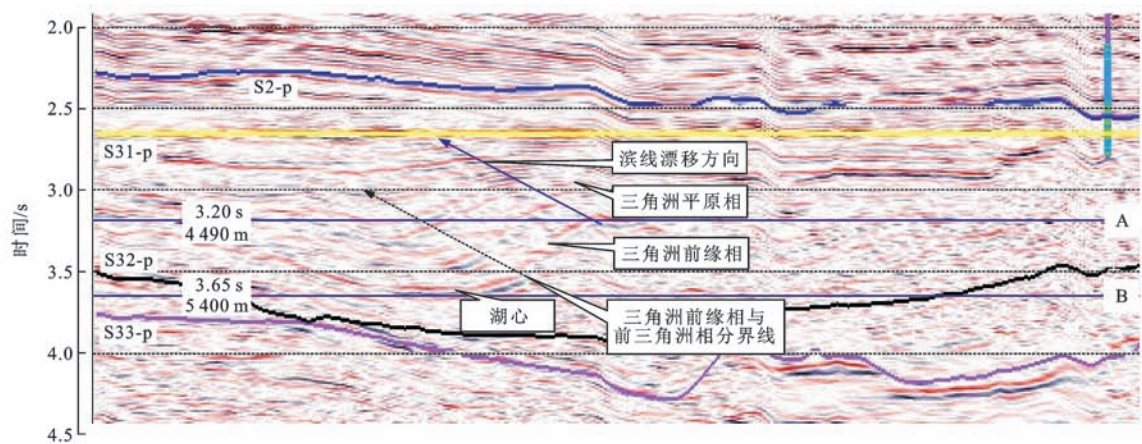


图 2 1631 测线沙三中期底部“S”形反射轴沉积相解释

Fig. 2 Sedimentary Facies Interpretation of Bottom “S” Shape Reflection Axis in the Middle of Member 3 of Shahejie Formation at Line 1631

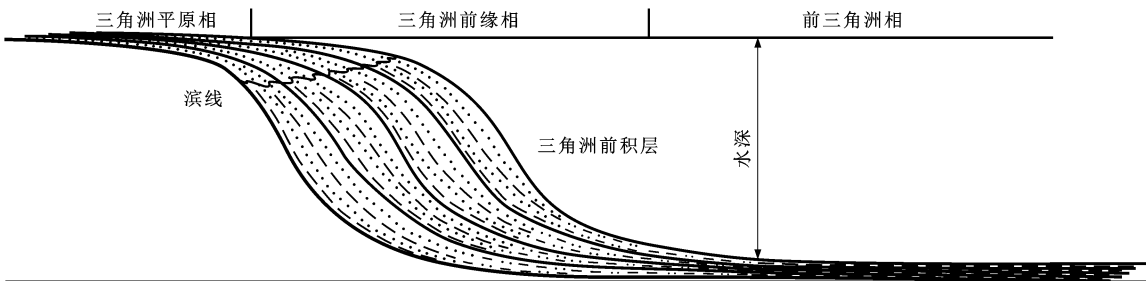


图 3 三角洲前缘相与水深的关系

Fig. 3 Relationship Between Delta Front Facies and Water Depth

显示得非常完美。现在关键问题是沙三中期齐家扇体是水上扇体还是水下扇体。对柴达木盆地现代水上扇体进行多年研究,分析对比沙三中期齐家扇体与柴达木盆地现代水上扇体的差异。在形态与构型方面,柴达木盆地现代水上扇体是一个简单的锥体,围绕扇体从扇根到扇缘均是一个斜面,一般扇根的坡度较陡,经扇中到扇缘的坡度较缓(图 4),沉积层在扇根较厚,向扇缘逐渐收敛合并,直至尖灭消失(图 4);而沙三中期齐家扇体的外形则是一个“厂”字形,其地震反射轴明显可以分为两个部分,顶部具

有一个较平坦的水平层,水平层的末端是倾斜层,且倾斜层向下呈撒开的帚状(图 5、6)。在这点上,柴达木盆地现代水上扇体与沙三中期齐家扇体大相径庭,因此,仅从这点看沙三中期齐家扇体不是水上扇体。沙三中期齐家扇体顶部的削截面代表了三角洲稳定进积的过程和结果,是三角洲平原相与前缘相的结合面,是沉积基准面在三角洲上的反映;而柴达木盆地现代水上扇体没有这种削截面,沉积层是一种倾斜的简单垂向叠置和水道下切叠置关系,沉积基准面在扇缘的末端(图 4)。沙三中期齐家扇体以



图 4 柴达木盆地冷湖北侧水上扇体

Fig. 4 Overwater Fan in the North Side of Lenghu, Qaidam Basin

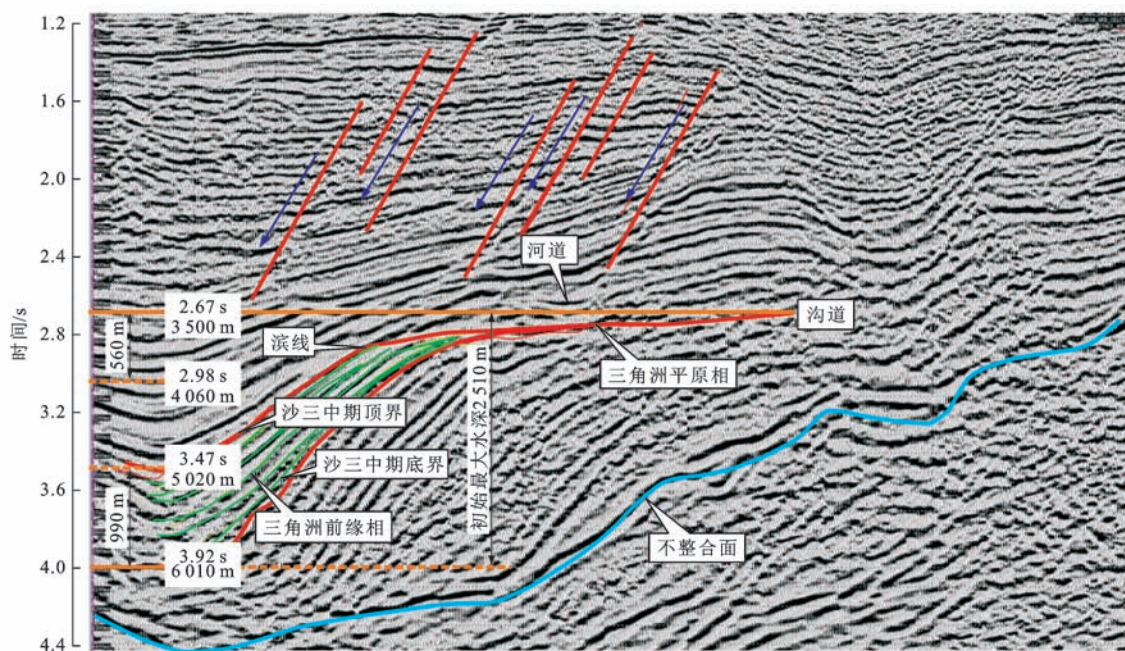


图5 1518测线沙三中期第二前积层组解析

Fig. 5 Interpretation of the Second Foreset Bed in the Middle of Member 3 of Shahejie Formation at Line 1518

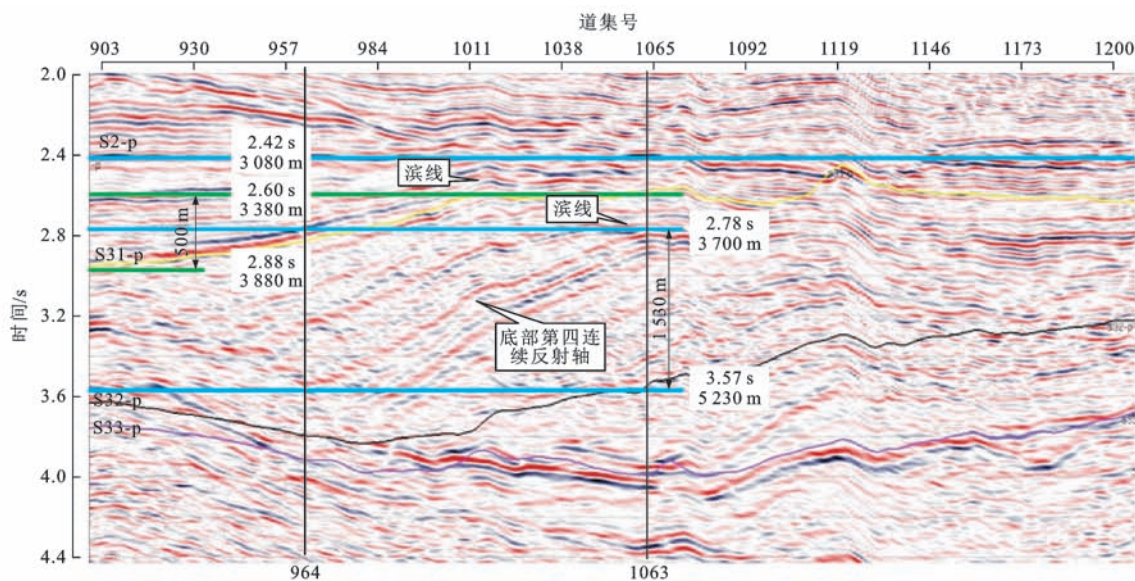


图6 1518测线S2-p界面拉平后的剖面

Fig. 6 Section of Interface S2-p Flatten at Line 1518

泥岩为主,倾斜层(三角洲前缘相)岩芯以暗色泥和暗色泥(角)砾为主,可以夹薄层状砂岩或砂砾岩,但在倾斜层的底部常有大套密度流形成的砂砾岩,为水下还原相,且未见任何暴露性构造(如泥裂),而滑动塌塌构造非常发育;而柴达木盆地现代水上扇体以砂砾为主,泥相对很少,仅见于扇中外缘和扇缘。扇缘一般不见砂砾,但强降雨时,扇缘有窄条带状的砂砾或孤立的大巨砾;扇缘多是氧化相,以黄褐色或棕红色薄层泥为主,且多发育泥裂、雨痕、生物足迹或草本植物沼泽;河道相的沉积构造经常可见,如各

种斜层理及冲刷充填面,但变形构造极不发育;砂砾具明显的牵引流成因特点。综上所述,有充足的理由证明沙三中期齐家扇体是水下扇体,而不是水上扇体。

(2)最大、最小前积层高度的确定。由于1518测线的三角洲前积层反射轴发育非常清晰,所以选择该测线为研究对象。沙三中期中上部有一个厚度最大的强反射轴组发育了很好的削截面(图5中三角洲前缘相)。从图5可以看出:削截部分平坦,基本上代表三角洲平原相;前积层呈倾斜斜状,在上部

收敛,在下部发射,符合三角洲前缘相的构型。通过地震分析可以获得前积层最低点到削截面的高度为2 510 m,这一高度可以视为三角洲形成时的可能最大水深(不考虑压实减量和断层及坳陷增量的情况下),其后一直到沙一期都是在“填平补齐”。从图5还可以看出,在上部发育了一系列左倾的正断层,这些正断层的垂向断距会使前积层的倾角变陡,从而加大前积层的高度,进而加大前积层反演的水深,因此,2 510 m这个水深值受到后期构造沉降而加大,放大了当时的水深。此外,从区域资料和图7、8可以知道,研究区新近纪发生了坳陷作用,这种作用无疑同样会使前积层的倾角变陡,从而也加大前积层的高度,进而也会加大前积层反演的水深。因此,这种方法获得的古水深不可靠,只能作为一个参数来考虑。

再来探讨一下最小前积层高度,以便获得最小古水深。可以假设图5中的上部线条原来是一条直线,代表的是三角洲前积层沉积完成后的三角洲平原相,该线的弯曲完全是后期的构造运动引起的。那么,从上部线条到下部线条的最大距离就是前积层高度,约990 m。如果用该值代表古水深,那么当时的古水深就是990 m,这个数值可以看成是沙三中期反射轴组对应的前积层形成的最小古水深。

从上述分析可知,辽西凹陷古近纪沙三中期的古水深为990~2 510 m。

2.1.2 1518测线拉平后解析

(1) S2-p界面拉平后的前积层高度。图7是1518测线S2-p界面(沙二期顶界)拉平后的局部放

大剖面图。把该界面拉平后可以理解为沙二期结束时整个坳陷已被充满,因此,其下的反射轴状态均是没有经过沙二期后构造改造的原始沉积状态,可以把沙二期以后的构造影响剥离,但可以受到沙二期构造运动的影响。从图7可知,沙二期构造运动的影响不大,因此,前积层的高度代表沙二期前的最小原始高度。把1518测线上的S2-p界面(图6)拉平后可以获得沙三中期的一个前积层的高度。从图6可以看出,第四前积层反射轴的高度为1 530 m。如果简单地利用三角洲前积层的高度来判定水深,那么当时的水深(1 530 m)应该代表当时的古水深(不考虑压实)。但是,仔细研究图7后可以发现,在S31-p界面与S2-p界面之间是一套近于平行的强反射轴,具有明显的上超(图7),揭示这套地层是在S31-p界面之后又发生了快速沉降,其后由水侵形成的。S31-p界面已经是一套近水平的冲积平原相沉积,由于是长期沉积缺失界面,其后又发生了快速沉降,形成了新的沉降和沉积中心,在凹陷边缘发生明显上超,所以将其称为沉积不整合面。上述现象表明辽西凹陷到沙三中晚期已基本填平补齐。因此,应该把S31-p界面拉平后进行沙三中期的水深研究,这样才有可能剔除沙三中晚期到沙三早期的构造沉降的影响,从而获得沙三中期本身的相关信息。因此,本文做了S31-p界面的拉平地震剖面图。

(2) S31-p界面拉平后的前积层高度。把S31-p界面(沙三中期顶界)拉平后可以理解为沙三中期结束时整个坳陷被充满。事实正是如此,仔细观察

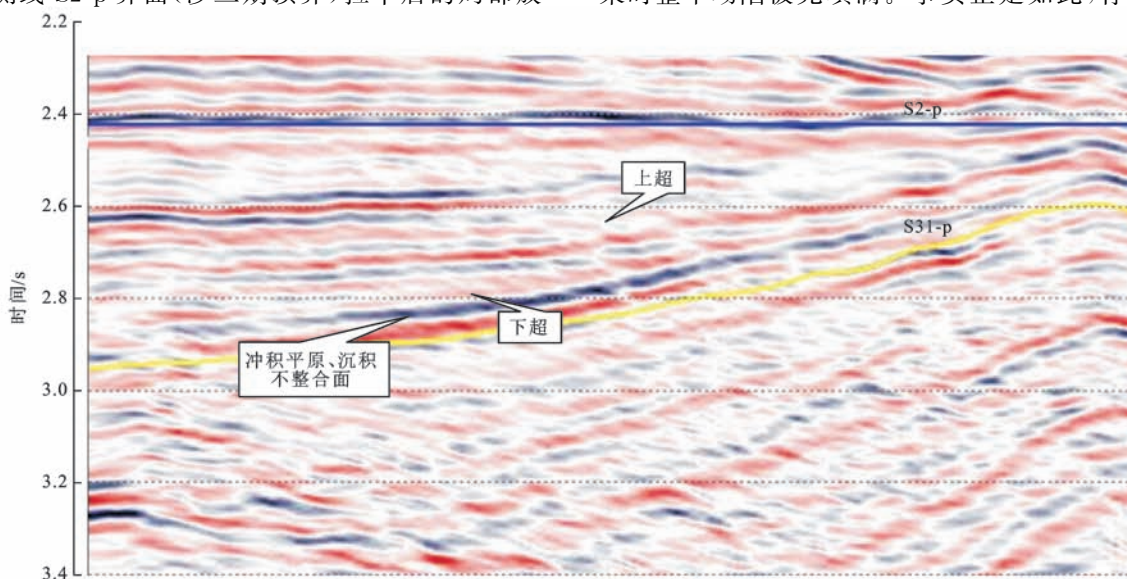


图7 1518测线S2-p界面拉平后的局部放大剖面

Fig. 7 Partial Enlarged Section of Interface S2-p Flatten at Line 1518

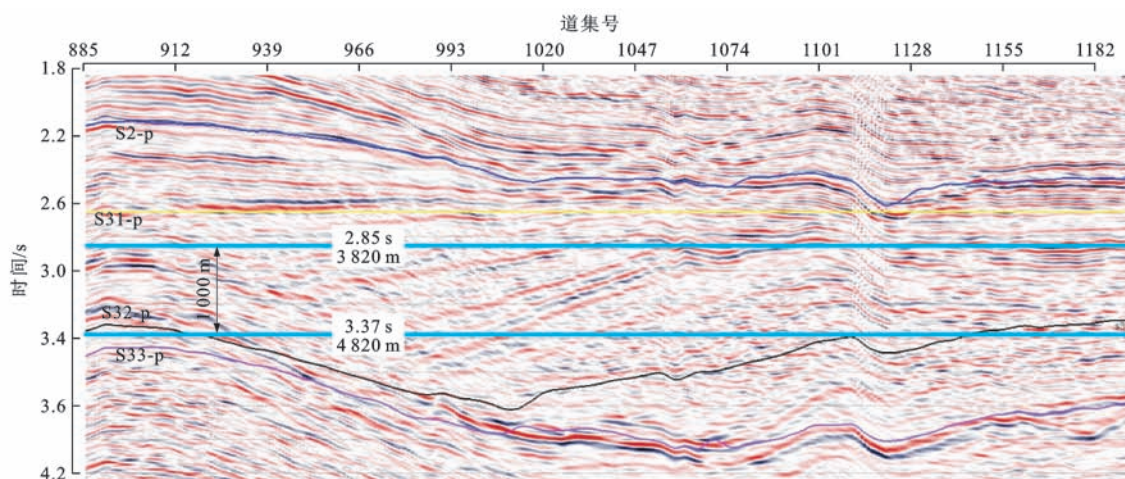


图8 1518测线S31-p界面拉平后的剖面

Fig. 8 Section of Interface S31-p Flatten at Line 1518

图7中S31-p界面上部的上超,其下的反射轴状态均是没有经过沙三中期后构造改造的原始沉积状态,可以把沙三中期以后的构造影响剥离。因此,前积层的高度代表沙三中期前的最小原始高度。从图8可以看出,第四反射轴的高度为2.85~3.37 s,对应的深度为3820~4820 m,倾斜反射轴的高度为1000 m。比较图6和图8便会发现,同一个反射轴的高度在不同图上相差甚远,图6的第四反射轴高度为1530 m,而图8的第四反射轴高度仅为1000 m,两者相差530 m。前者肯定不准确,因为拉平S2-p界面后叠加了S2-p与S31-p界面之间沙三早期S31-p界面的沉降分量,这一分量最大约有500 m,所以必须减去这500 m的叠加分量;拉平S32-p界面,后者500 m的叠加分量就消除了(图8),而这时的第四反射轴的高度就基本可以是当时的沉积状态,基本可以代表当时的水深,因此,后者揭示了当时的古水深至少在1000 m(不考虑压实)。如果把压实率定在15%,那么辽西凹陷古近纪沙三中期的最大水深约为1150 m。该深度与现代贝加尔湖(平均水深730 m,最深1620 m)比较接近,两者都是裂谷湖泊,因此,辽西凹陷古近纪沙三中期存在1000 m超深水的可能性也很大。

2.2 前积层的倾角

三角洲前缘前积层的倾角大小也是检验三角洲前缘相解释是否正确的参数之一。图8中沙三中期最明显的反射轴下部拐点的道集号是969,上部拐点的道集号是1052,每一道的距离是25 m,两者之间的距离为2075 m,且两个拐点之间的垂距是1000 m,因此,倾斜反射轴的倾角接近26°,揭示三角洲前缘相的倾角也在26°左右。如果以15%压实

率进行校正(齐家扇体沉积时厚度巨大,在沉积时就发生了压实作用,导致三角洲的前积层高度减小,因此,压实率定在15%比较合适),校正后的三角洲前缘相的倾角在29°左右。该倾角比较大,但对于扇三角洲来说可以成立,因为只有扇三角洲的前积层倾角最大超过30°,如果是一般的三角洲就不成立了。因此,从前积层大倾角可以看出,齐家扇体是一个扇三角洲。

2.3 岩石学与沉积学特点

辽西凹陷钻遇沙三中期的钻井不少,但是钻穿沙三中期的钻井很少(齐115井等),大部分仅钻遇沙三中期上部,少部分进入中部,因此,岩芯提供的信息仅为沙三中期上部或中部,缺少沙三中期下部。但从目前观察到的岩芯来看,大部分为砾质、砂质或砂砾质碎屑流沉积(图9),具有明显的重力流特点。几乎所有的砾岩、砂岩和砂砾岩中都含有暗色泥砾(图9),暗色泥砾一般来自于水下还原带。暗色泥砾基本为漂砾状,悬浮在砾石、砂或砂砾中,且泥砾多具有撕裂[图9(e)、(f)、(j)]或软变形[图9(b)]特征,表明其在流动过程中受到了应力作用,进而揭示砾质、砂质或砂砾质碎屑流具有一定黏力,是一种宾汉体(黏性流-密度流或重力流),而非牛顿流体(牵引流),揭示砾质等碎屑流在流动过程中受本身重力和颗粒之间的黏力紧密粘在一起,紧贴地表移动,对沉积底形进行“推土机”式的刨耕,可把大量半固结的泥“捕获”到砂砾中来,而牵引流无法形成这种砂砾与泥砾的混合沉积,进一步揭示当时的三角洲前缘相要具有一定的坡度,否则这种具有黏性的重力流难以运动,这与地震解析的三角洲前缘最大坡度(27°~33°)是一致的。地球化学分析表明,暗色泥



图 9 辽西凹陷沙三中期岩芯照片

Fig. 9 Photos of Cores in the Middle of Member 3 of Shahejie Formation, Liaoxi Depression

砾均是在还原条件下形成的,砾质等碎屑流是在较深水环境下形成的。除了上述特点外,从单井相可以看到砂砾质等重力流是产在大套暗色泥岩中的,有时大套暗色泥岩(准)单层厚度可超过 190 m(如齐 233 井 2 420~2 610 m 深度处均为暗色泥岩),说明辽西凹陷古近纪沙三中期维持了长期的深水环境。这种环境可能是三角洲前缘相和前三三角洲相。值得一提的是,双 225 井 4 121 m 深度处发育了非常致密的黑色泥岩[图 9(c)],应该是深湖相的凝缩层。

3 超深水成因分析

辽西凹陷古近纪沙三中期的最大水深极大,但从本文采用的方法和分析过程来说没有理由去怀疑这个深度(可能在决定前积层反射轴的上、下界线时有一定误差)。在现代湖泊中也有实例可以借证,如俄罗斯的贝加尔湖最大水深为 1 620 m,因此,辽西凹陷的极超深水有一定的可能性。形成这种极超深水与辽西凹陷当时的地质背景和地质过程密切相关。决定一个盆地的覆水深浅主要有 3 个因素:一是构造运动;二是气候(主要是降雨量);三是沉积充填。其中,构造运动最为重要。辽西凹陷在古近纪处于辽河拗陷内,辽河拗陷自晚白垩纪末开始进入裂谷演化阶段^[27],深部岩浆开始上涌形成底辟(图 10);进入古近纪,地幔岩浆上隆使得地壳隆起成高

地,隆起使地壳受到拉张伸展(地壳由直线变曲线),导致一系列切穿岩石圈的深大断裂(图 10)形成,使深部的岩浆顺断层上侵喷发,由于受地壳污染形成碱性玄武岩(表 1)。随着深部底辟岩浆作用增强,对岩石圈的底部产生热侵蚀而使岩石圈减薄,与此同时底辟岩浆对流对岩石圈的牵引使地壳进一步拉张伸展,使得断层的开度加剧,深部的岩浆顺大型张性断层快速直达地表,使岩浆受地壳污染相对减小,形成拉斑玄武岩和碱性玄武岩共存的局面(表 1)。辽河盆地东部的热河台—欧利坨子地区发育的粗面岩表明岩浆来自于上地幔深部^[27],揭示了辽西凹陷古近纪岩浆来自于深部,具有非常深的热对流场和非常强烈的热动力,使岩石圈上隆并对地幔岩石圈进行热侵蚀(图 10)。汪集旻等发现辽河拗陷早第三纪时的古热流约为 2.0 HFu^[28],无疑当时的地幔热流值亦相当高,从另一个侧面论证了辽西凹陷古近纪岩浆作用的存在和强烈性。进入古近纪晚期,岩浆底辟作用逐渐减弱,导致岩浆柱回落,使地壳塌陷(图 10),塌陷导致断层由张变挤,使岩浆上侵速度骤然降低,同时使岩浆受地壳污染程度增加,导致岩浆变成以碱性玄武岩为主,拉斑玄武岩逐渐消失(表 1)。与此同时,地壳大幅塌陷导致辽河拗陷基底快速大幅沉降,形成裂谷的极超深水(>500 m)环境。由于紧邻辽西隆起,近物源的快速搬运和沉积使辽西裂谷在紧邻古陆的地方发育了大量扇三角

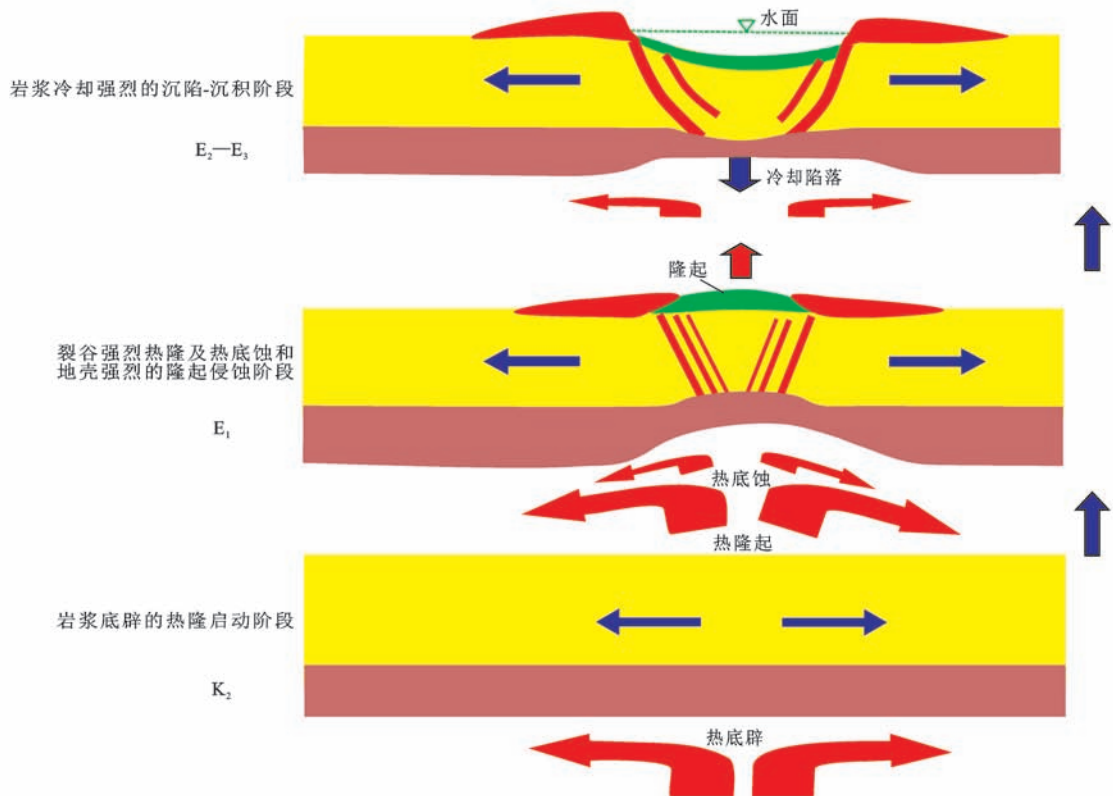


图 10 辽河裂谷古近纪构造-岩浆演化动力

Fig. 10 Dynamic Sketch of Paleogene Tectono-magmatic Evolution in Liaohe Rift

表 1 辽河裂谷古近纪火山岩类型

Tab. 1 Types of Paleogene Volcanic Rocks in Liaohe Rift

层位	中碱性火山岩 样品数占比	碱性火山岩 样品数占比	强碱性火山岩 样品数占比	拉斑玄武岩 样品数占比	高铝玄武岩 样品数占比
东营组		72.0%	16.0%	8.0%	4.0%
沙一段、沙二段	6.7%	60.0%	16.6%	10.0%	6.7%
沙四段		40.0%	20.0%	40.0%	
房身泡组		46.6%	8.2%	41.1%	4.1%

注：表中数据引自文献[26]。

洲,并快速充填拗陷、凹陷和洼陷,并在沉积充填时因热塌陷引起基底还在不断沉降,维持了辽西凹陷长期的极超深水环境(图 10),形成了沙河街组及东营组的巨厚沉积,催生了优质烃源岩发育。因此,辽西凹陷古近纪的极超深水环境的发育有着深刻的构造-岩浆背景。这种极超深水湖泊的现代实例可以以贝加尔湖为例(贝加尔湖平均水深为 730 m,最大水深为 1 620 m,也为裂谷型湖泊,在大地构造背景上与辽西凹陷相似)。因此,贝加尔湖的现代实例可以间接地证实辽西凹陷的极超深水也有存在的可能性。此外,东非大裂谷内的现代基伍湖(面积 2 700 km²,最大水深达 489 m)也是一个可以参考类比的实例。

4 讨 论

辽西凹陷古近纪沙三中期的极超深水是超级裂谷发育的结果,这种超级裂谷的发育可能与西太平洋板块的松弛有关。在 39~42 Ma 期间,太平洋板块可能停止了向西的俯冲,使中国北部大陆边缘出现了应力松弛状态,进入了一种类似被动大陆边缘的状态,使得渤海湾盆地在辽河拗陷和济阳拗陷(在辽西凹陷以南 500 km 左右的渤海湾,另一个东营凹陷沙三中期也发育了 486~700 m 的(极)超深水湖泊^[17-18])沙三中期出现超深水和极超深水环境,形成了沙三中期的优质烃源岩。辽河拗陷和济阳拗陷的极超深水环境均是裂谷发育的结果,两者目前的

水平距离约500 km,因此,推测在两者之间还存在着类似的极超深水或超深水。在渤海湾和黄海腹地可能是地幔羽的所在,而辽河拗陷和济阳拗陷仅仅只是地幔羽和裂谷的一个小分支,真正的更大裂谷应在渤海湾和黄海腹地。如果真如此,那么在渤海湾和黄海腹地应该有更好的古近纪烃源岩和油气资源,值得今后关注。

辽西凹陷古近纪沙三中期的超深水最大覆水深度约1 000 m,地震测线图像和解析过程均无问题。这一深度使水体的物理化学性质出现了本质变化,深部水体几乎处于“死水一潭”,垂向对流消失,水底完全处于高度还原状态,从沙三中期的岩芯含黄铁矿可以知道这一点;此外,泥岩均为暗色甚至黑色块状[图9(c)],也能说明这一点。沙三中期的大多数岩芯都是含泥砾的砂质碎屑流或砾质碎屑流,泥砾的变形和撕裂现象明显。泥砾大部分为暗色,地球化学研究表明其为还原相。在辽西凹陷以南700 km左右的东营凹陷沙三中后期也发育了486~700 m的超深水湖泊^[17-18]。基于此,推测渤海湾盆地古近纪极有可能广泛发育超深水湖泊。

5 结 语

(1)辽西凹陷极超深水的发现揭示了大陆内部也能发育深达1 000 m的凹陷。这种极超深凹陷有利于优质烃源岩发育,是辽河拗陷发育优质烃源岩的基础。

(2)辽西凹陷极超深水的发育与地幔岩浆底辟隆起密切相关,在这种动力背景下形成的地壳热蚀减薄塌陷引起的基底大幅沉陷造就了辽西凹陷古近纪的超深水和极超深水。这种超深水和极超深水形成的机制不是普通构造拗陷和构造断陷所能企及的。

(3)在这种极超深水的条件下,以碎屑流为代表的岩性油气藏是主体,在辽西凹陷中央可以形成以砂砾岩为代表的碎屑流油气藏,是一种致密油气藏。近源的扇三角洲和以扇三角洲前缘为物源的砂砾碎屑流在形成过程中对泥质基底的侵蚀导致杂基过高,使砂砾岩储层致密。

(4)在整个渤海湾盆地和黄海古近纪可能有大范围的优质烃源岩和更多大型的油气田发育,因此,渤海湾盆地深部和黄海海上的古近系将有可能成为今后油气勘探的重点。

(5)通过辽西凹陷极超深水的研究,提供了重要的地震勘探启示:如果一个新的勘探区块的地震剖

面上有厚度较大或极大的三角洲前积层存在,那么就可以肯定有深水或超深水和(优质)烃源岩发育,进而可以肯定有油气资源。

(6)从地震剖面角度研究古水深肯定还存在不少问题,需进一步完善和提高。现代也存在这种极超深水湖泊,如里海、塔葛尼喀湖及贝加尔湖深度都在1 000 m以上,其中贝加尔湖的最大深度甚至超过1 600 m,因此,从现代类比来看,辽西凹陷古近纪沙三中期的极超深水湖泊也可能存在。

中国石油辽河油田分公司勘探开发研究院提供了地震及岩芯资料,在此表示感谢。

参 考 文 献:

References:

- [1] THOMAS A L, FUJITA K, IRYU Y, et al. Assessing Subsidence Rates and Paleo-water Depths for Tahiti Reefs Using U-Th Chronology of Altered Corals[J]. *Marine Geology*, 2012, 295/296/297/298: 86-94.
- [2] 陈泓君, 黄文凯, 邱 燕. 海南岛西南海域晚第四纪古水深反演[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2017, 37(6): 128-139.
- CHEN Hong-jun, HUANG Wen-kai, QIU Yan. The Inversion of Late Quaternary Paleo-water Depth in Southwestern Offshore Hainan Island[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2017, 37(6): 128-139.
- [3] 李银强, 余克服, 王英辉, 等. 西沙群岛永乐环礁琛科2井的珊瑚藻组成及其水深指示意义[J]. *微体古生物学报*, 2017, 34(3): 268-279.
- LI Yin-qiang, YU Ke-fu, WANG Ying-hui, et al. The Composition of Coralline Algae from Well Chenke2 in Xisha Islands, South China Sea, China and Its Implication on the Water Depth[J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 2017, 34(3): 268-279.
- [4] IRYU Y, TAKAHASHI Y, FUJITA K, et al. Sealevel History Recorded in the Pleistocene Carbonate Sequence in IODP Hole 310-M0005D, off Tahiti[J]. *Island Arc*, 2010, 19(4): 690-706.
- [5] 郭秋麟, 倪丙荣. 利用化石群分异度探讨古水深[J]. *石油大学学报: 自然科学版*, 1990, 14(2): 1-7.
- GUO Qiu-lin, NI Bing-rong. Determination of Palaeodepth with Diversity of Fossil Community[J]. *Journal of the University of Petroleum, China: Natural Science Edition*, 1990, 14(2): 1-7.
- [6] 纪友亮, 冯建辉, 王声朗, 等. 东濮凹陷古近系沙河街组沙三段沉积期湖岸线的变化及岩相古地理特征[J]. *古地理学报*, 2005, 7(2): 145-156.
- Ji You-liang, FENG Jian-hui, WANG Sheng-lang, et al.

- Shifting of Lake Shoreline and Lithofacies Palaeogeographic Characters During Sedimentary Period of the Member 3 of Shahejie Formation of Paleogene in Dongpu Sag[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2005, 7(2): 145-156.
- [7] 李守军, 郑德顺, 姜在兴, 等. 用介形类优势分异度恢复古湖盆的水深: 以山东东营凹陷古近系沙河街组沙三段湖盆为例[J]. *古地理学报*, 2005, 7(3): 399-404.
LI Shou-jun, ZHENG De-shun, JIANG Zai-xing, et al. Water Depth of Palaeo-lacustrine Basin Recovered by Dominance Diversity of Ostracoda: An Example from Sedimentary Period of the Member 3 of Shahejie Formation of Paleogene in Dongying Sag, Shandong Province[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2005, 7(3): 399-404.
- [8] BALDI K. Paleooceanography and Climate of the Badenian (Middle Miocene, 16.4-13.0 Ma) in the Central Paratethys Based on Foraminifera and Stable Isotope ($\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$) Evidence[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2006, 95(1): 119-142.
- [9] PERRY C T, MACDONALD I A. Impacts of Light Penetration on the Bathymetry of Reef Micro-boring Communities: Implications for the Development of Microendolithic Trace Assemblages[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2002, 186 (1/2): 101-113.
- [10] 苏新, 丁旋, 姜在兴, 等. 用微体古生物定量水深法对东营凹陷沙四上亚段沉积早期湖泊水深再造[J]. *地学前缘*, 2012, 19(1): 188-199.
SU Xin, DING Xuan, JIANG Zai-xing, et al. Using of Multi-microfossil Proxies for Reconstructing Quantitative Paleo-water Depth During the Deposit Period of LST of Es₄ in Dongying Depression[J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(1): 188-199.
- [11] CHAPPELL J, POLACH H. Post-glacial Sea-level Rise from a Coral Record at Huon Peninsula, Papua New Guinea[J]. *Nature*, 1991, 349: 147-149.
- [12] EDWARDS R L, BECK J W, BURR G S, et al. A Large Drop in Atmospheric $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ and Reduced Melting in the Younger Dryas, Documented with ^{230}Th Ages of Corals[J]. *Science*, 1993, 260: 962-968.
- [13] BARD E, HAMELIN B, ARNOLD M, et al. Deglacial Sea-level Record from Tahiti Corals and the Timing of Global Meltwater Discharge[J]. *Nature*, 1996, 382: 241-244.
- [14] GLORSTAD-CLARK E, BIRKELAND E P, NYSTUEN J P, et al. Triassic Platform-margin Deltas in the Western Barents Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2011, 28(7): 1294-1314.
- [15] 董刚, 何幼斌. 根据地层厚度恢复古水深的研究[J]. *长江大学学报: 自然科学版*, 2010, 7(3): 484-486.
DONG Gang, HE You-bin. The Research of Recovering Palaeobathymetric According to Stratigraphic Thickness[J]. *Journal of Yangtze University: Natural Science Edition*, 2010, 7(3): 484-486.
- [16] 康波, 解习农, 杜学斌, 等. 基于滨线轨迹的古水深定量计算新方法: 以古近系沙三中段东营三角洲为例[J]. *沉积学报*, 2012, 30(3): 443-450.
KANG Bo, XIE Xi-nong, DU Xue-bin, et al. A New Paleobathymetric Approach Based on Shoreline Trajectory: An Example from Dongying Delta in the Third Member of Paleogene Shahejie Formation[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2012, 30(3): 443-450.
- [17] 钟建华, 李勇, 邵珠福, 等. 东营凹陷古近纪沙三中期超深水湖泊的研究[J]. *高校地质学报*, 2015, 21(2): 320-327.
ZHONG Jian-hua, LI Yong, SHAO Zhu-fu, et al. The Ultra-water Lake of Middle Sha-3 Formation During Paleogene in Dongying Sag, NE China[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2015, 21(2): 320-327.
- [18] 钟建华, 倪良田, 邵珠福, 等. 渤海湾盆地古近纪超深水与极超深水沉积及油气地质意义[J]. *高校地质学报*, 2017, 23(3): 521-532.
ZHONG Jian-hua, NI Liang-tian, SHAO Zhu-fu, et al. Identification of the Ultra Deep Water Deposition of the Bohai Bay Basin During the Paleogene and Its Significance for Oil and Gas Geology[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2017, 23(3): 521-532.
- [19] 牛聪, 刘志斌, 王彦春, 等. 应用地球物理技术定量评价辽西凹陷沙河街组烃源岩[J]. *石油地球物理勘探*, 2017, 52(1): 131-137.
NIU Cong, LIU Zhi-bin, WANG Yan-chun, et al. Quantitative Evaluation of Shahejie Formation Source Rocks in Liaoxi Sag with Geophysical Approaches[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2017, 52(1): 131-137.
- [20] 刘志斌, 牛聪, 刘方. 基于地震反演的烃源岩定量评价方法: 以渤海湾盆地辽西凹陷为例[J]. *中国海上油气*, 2016, 28(5): 16-21.
LIU Zhi-bin, NIU Cong, LIU Fang. A Method to Quantitatively Evaluate Source Rocks Based on Seismic Inversion: A Case Study of Liaoxi Sag in Bohai Bay Basin[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2016, 28(5): 16-21.
- [21] 孟元林, 张磊, 曲国辉, 等. 异常低压背景下储集层成岩特征: 以渤海湾盆地辽河坳陷西部凹陷南段古近

- 系为例[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(4): 669-674.
- MENG Yuan-lin, ZHANG Lei, QU Guo-hui, et al. Diagenetic Characteristics Under Abnormally Low Pressure: A Case from the Paleocene of Southern Western Sag of Liaohe Depression, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(4): 669-674.
- [22] 孟元林, 王志轩, 张凤莲, 等. 辽河拗陷西部凹陷南段古近系沙河街组致密砂岩特征与成因机制[J]. 古地理学报, 2016, 18(4): 569-580.
- MENG Yuan-lin, WANG Zhi-xuan, ZHANG Feng-lian, et al. Characteristics and Forming Mechanism of Tight Sandstones in the Paleogene Shahejie Formation of Southern West Sag, Liaohe Depression[J]. Journal of Palaeogeography, 2016, 18(4): 569-580.
- [23] 王珏. 辽河西部凹陷古近系扇三角洲前缘沉积特征[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2017, 39(4): 25-35.
- WANG Jue. Sedimentary Characteristics of Paleogene Period, Fan Delta Front, Liaohe Western Depression[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science and Technology Edition, 2017, 39(4): 25-35.
- [24] 郑孟林, 吴铁生, 王桂梁, 等. 辽河拗陷断层的选择性反转特征[J]. 石油地球物理勘探, 2004, 39(2): 228-231.
- ZHENG Meng-lin, WU Tie-sheng, WANG Gui-liang, et al. Selective-inverted Characters of Faults in Liaohe Depression[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2004, 39(2): 228-231.
- [25] 李应暹. 辽河裂谷渐新世初期的扇三角洲[J]. 石油勘探与开发, 1982(4): 17-23.
- LI Ying-xian. Early Oligocene Fan-deltas in Liaohe Rift[J]. Petroleum Expoloration and Development, 1982(4): 17-23.
- [26] 梁鸿德, 申绍文, 刘香婷, 等. 辽河断陷火山岩地质年龄及地层时代[J]. 石油学报, 1992, 13(2): 35-41.
- LIANG Hong-de, SHEN Shao-wen, LIU Xiang-ting, et al. The Age of the Vocanic Rocks and Their Geological Time in Liaohe Depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 1992, 13(2): 35-41.
- [27] 蔡国刚. 辽河裂谷东部凹陷粗面岩成因机理探讨[J]. 地球学报, 2010, 31(2): 245-250.
- CAI Guo-gang. Genetic Mechanism of Trachyte in the Eastern Depression of Liaohe Rift[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2010, 31(2): 245-250.
- [28] 汪集旸, 汪缉安. 辽河裂谷盆地地壳上地幔热结构[J]. 中国科学: B辑, 1986(8): 856-866.
- WANG Ji-yang, WANG Ji-an. The Thermal Structure of Liaohe Rift in the Exomantle of the Earth Crust[J]. Science in China: Series B, 1986(8): 856-866.

《地球科学与环境学报》2018 年度约稿函

尊敬的各位专家学者:

《地球科学与环境学报》(以下简称《学报》)自 1979 年创刊以来,得到了各位专家学者的大力支持,使期刊得到了快速发展。《学报》系地学综合性权威学术期刊,刊登的主要内容有基础地质与矿产地质、水资源与环境、工程地质、应用地球物理和地球信息科学等。为了不断提升《学报》的学术质量和影响力,特向各位专家学者约稿,诚盼各位专家学者能鼎力支持《学报》的发展。

《学报》目前的优势包括:

1. 中国科技论文与引文数据库(CSTPCD)刊源;
2. 特约稿不收取版面费,并且刊出后向作者支付一定稿酬;
3. 发表周期短;
4. 对学术质量高、有重大基金项目支持的论文优先发表;
5. 刊登综述类论文;
6. 可同期刊登同一主题的系列成果。

联系地址:西安市南二环路中段长安大学杂志社《地球科学与环境学报》编辑部

邮政编码:710064

电 话:029-82334686

E-mail:dkyhxb@chd.edu.cn;jesechd@163.com

投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

《地球科学与环境学报》编辑部