

鄂尔多斯盆地镇泾地区延长组异常压力演化及其成藏意义

马立元¹, 邱桂强¹, 李超², 王欢³, 罗源⁴

MA Liyuan¹, QIU Guiqiang¹, LI Chao², WANG Huan³, LUO Yuan⁴

1. 中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院, 北京 100083;

2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029;

3. 中国地质大学, 北京 100083;

4. 中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司, 天津 300450

1. *Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China;*

2. *Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;*

3. *China University of Geosciences, Beijing 100083, China;*

4. *Engineering Technology Branch of Energy Development Co., Ltd., CNOOC, Tianjin 300450, China*

摘要:鄂尔多斯盆地南部镇泾探区的主力含油层段为延长组长8油层组,油藏类型为以三角洲前缘分流河道砂岩岩性油藏为主,现今延长组地层压力低、含油饱和度小且变化大,开展地层压力演化研究对认识成藏、富集的动力机制和探区评价均具有重要意义。利用测井声波资料和盆地模拟手段,对长7烃源岩段的地层压力演变过程进行了恢复,分析了异常压力在油气成藏中的动力学意义。结果表明,现今地层压力集中分布在17.99~22.46 MPa,压力系数介于0.8~1.05之间,整体处于常压-负压状态;长7烃源岩段在早白垩世快速埋深,由于欠压实作用,泥岩普遍发育超压,早白垩世末期剩余压力增加到4 MPa左右,压力系数介于1.1~1.3之间,形成低幅超压;晚白垩世以来随着地层抬升,压力逐渐释放并演化为现今压力。在鄂南镇泾地区,延长组储集层致密后,浮力不是油气运移的主要动力,异常压力在油气成藏中起着重要的作用。

关键词:异常压力;欠压实;成藏动力;延长组;镇泾地区

中图分类号:P618.13 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2020)04-0503-09

Ma L Y, Qiu G Q, Li C, Wang H, Luo Y. The evolution of abnormal pressure of Yanchang Formation in Zhenjing area of Ordos basin and its reservoir-forming significance. *Geological Bulletin of China*, 2020, 39(4): 503-511

Abstract: The Chang 8 group of Upper Triassic Yanchang Formation is the main oil layer in Zhenjing area of southern Ordos basin. The reservoir rock of Chang 8 group is mainly the delta front distributary channel sandstone and its reservoir type is lithology. Low formation pressure, low oil saturation and wide variation range constitute the characteristics of the Chang 8 group reservoir. Research on the evolution of formation pressure is very important for understanding the dynamic mechanism of hydrocarbon accumulation and enrichment. Logging acoustic data calculation and basin numerical simulation were combined to recover the evolution of Chang 7 source rock formation pressure, and the dynamic significance of abnormal pressure in hydrocarbon accumulation was analyzed. The research result shows that the present formation pressure of Mesozoic strata in Zhenjing area is distributed in 17.99 MPa to 22.46 MPa, and the pressure coefficients range from 0.8 to 1.05. The formation is generally in the atmospheric pressure to weak negative pressure state. In Early Cretaceous, the Chang 7 source rock was quickly buried along with the rapid subsidence of basin. Due to the effect of under-

收稿日期:2019-03-02;修订日期:2019-03-20

资助项目:国家科技重大专项《中西部重点碎屑岩层系油气富集规律与勘探方向》(编号:2016ZX05002-006)

作者简介:马立元(1972-),男,博士,高级工程师,从事油气成藏与富集规律研究。E-mail:maly.syky@sinopec.com

compaction and hydrocarbon generation, the mudstone was commonly subjected to overpressure. In the last phase of Early Cretaceous, the overpressure was increased to 4 MPa. The pressure coefficient ranges from 1.1 to 1.3, which means the strata were subjected to small overpressure. Since the Late Cretaceous, with the uplifting of the formation, the pressure has gradually released and evolved into present pressure state. The buoyancy was not the main motive power for hydrocarbon migration after the formation of tight clastic reservoir, and abnormal pressure played an important role in the hydrocarbon accumulation in Zhenjing area of southern Ordos basin.

Key words: abnormal pressure; under-compaction; reservoir-forming dynamic; Yanchang Formation; Zhenjing area

异常压力的分布、形成和演化与油气生成、运移、聚集具有密切关系,在油气勘探目标评价与预测中起着十分重要的作用^[1-2]。对含油气盆地地质历史时期地层压力的重建,以及异常压力演化、分布特征的刻画,有助于深入理解油气的生、运、聚动力学过程及成藏机理,对油气勘探与开发具有重要的指导意义^[3-4]。

鄂尔多斯盆地是中国典型的致密砂岩油气产区,油气进入致密储层的动力学条件是致密砂岩油气运聚机理研究的焦点问题之一。国内外学者普遍认为,浮力和水动力难以作为致密低渗储层油气运聚的动力,超压应是致密砂岩油气成藏的主要动力^[5-8]。镇泾地区位于鄂尔多斯盆地西南部,区内中生界富含致密砂岩油资源^[9]。前人对镇泾地区上三叠统延长组致密砂岩油成藏机理与成藏模式开展了大量研究,提出超压是油气运移的主要动力^[10-12]。这些研究推动了地质工作者对镇泾地区超压的认识,但研究工作多集中于对现今压力分布特征的刻画、泥岩古压力估算等,而对超压的形成、演化、成因分析及其对油气成藏的控制等的研究很少^[12-14]。目前关于镇泾地区异常压力的研究成果存在很大的不确定性,主要原因是对异常压力形成机制和演化过程缺少定量认识,制约了油气成藏机理和过程的深入分析。本文在系统总结镇泾地区现今地层压力特征的基础上,开展泥岩压实研究,估算延长组在最大埋深时期的泥岩古压力,在多参数约束和标定的基础上,利用数值模拟定量恢复了异常压力的形成演化过程,分析研究区油气成藏的动力构成,对于深化致密低渗油气成藏动力机制认识具有重要意义。

1 基本石油地质特征

鄂尔多斯盆地南部构造格局和演化历史中,对石油地质条件影响最大的是印支期以来的构造运动。印支运动期间形成了重要的烃源岩和主要储集岩,燕山运动则促进了油气的大规模成藏,喜马

拉雅期盆地整体抬升,西北低、东南高的斜坡构造形态形成并保持到现今。在镇泾地区,上三叠统延长组各层面构造特征基本一致,构造面貌具有较强的继承性,整体为东高西低的西倾单斜。

在镇泾地区,上三叠统延长组发育多层深灰色、灰黑色湖泊相泥页岩,其中以长 7 期沉积的暗色泥页岩为最有利的烃源岩^[15]。延长组储层为三角洲前缘分流河道砂体,总体物性差,孔隙度平均值一般为 8%~16%,渗透率平均值一般为 $0.05 \times 10^{-3} \sim 0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,整体属于低孔、特低渗储层,一般无自然工业产量。储层渗透性是油气成藏富集的重要条件,低幅度构造或鼻状隆起为油气的相对富集提供了有利条件。

镇泾地区中生界延长组原油总体具有饱和压力低、气油比小、地饱压差大的特征。油气藏多属正常温压系统,个别存在微弱负压。致密砂岩含油饱和度较低,普遍介于 10%~50% 之间,油气具有“近源充注”的特征。

2 埋藏史分析

地层压力形成演化与地层埋藏密不可分,通常在地层快速沉降期,压力逐渐积累,反之,在地层抬升剥蚀过程中,压力逐渐消散释放^[16]。镇泾地区地层埋藏过程与构造演化密切相关,自三叠纪以来研究区存在 4 次构造抬升^[17]。受印支晚期构造运动的影响,研究区在侏罗纪早期发生第 1 次构造抬升,延长组遭受不同程度的剥蚀。燕山 I 幕构造运动引起第 2 次构造抬升,造成直罗组与延安组之间的沉积间断。发生在安定组沉积之后的燕山 II 幕构造运动导致第 3 次构造抬升与地层剥蚀。这 3 次构造抬升缓慢,幅度较小,抬升幅度为 200~500 m。自白垩纪开始,盆地持续沉降,早白垩世晚期(约 100 Ma)达到最大埋深。晚白垩世开始稳定抬升,新近纪抬升幅度较大,造成强烈的地层剥蚀(图 1)。

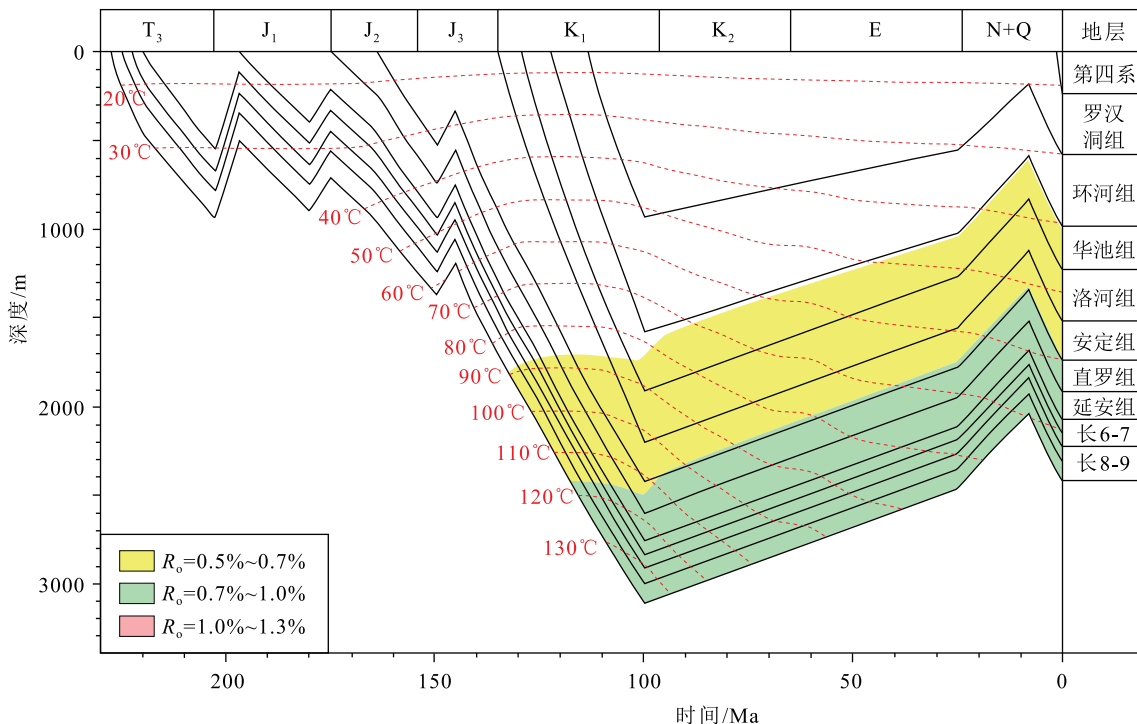


图 1 鄂尔多斯盆地镇泾地区埋藏史图

Fig. 1 Burial history of Zhenjing area in Ordos basin

T_3 —晚三叠世; J_1 —早侏罗世; J_2 —中侏罗世; J_3 —晚侏罗世; K_1 —早白垩世; K_2 —晚白垩世; E —古近纪; $N+Q$ —新近纪+第四纪

3 现今地层压力分布特征

通过对镇泾地区实测地层压力数据统计分析,结果显示,研究区实测地层压力介于 17.99 ~ 22.46 MPa 之间,随埋深增加呈线性增大,大部分处于静水压力线之下(图 2-a);地层压力系数介于 0.8~1.05 之间,平均 0.92(图 2-b)。按照地层压力的划分标准^[18],镇泾地区地层压力整体处于常压—负压状态,这与鄂尔多斯盆地压力状态基本一致^[19]。平面上,镇泾地区西南部压力系数偏低,介于 0.82~0.92 之间,属于负压系统,而东北部压力系数偏高,介于 0.92~1.05 之间,表现为正常地层压力。

4 最大埋深期泥岩古压力分析

目前盆地古压力恢复的方法较多,其中平衡深度法^[20]、流体包裹体 PVT 模拟法^[21]和盆地数值模拟法^[22]应用较广泛。

鉴于鄂尔多斯盆地镇泾地区延长组长 7 油层组欠压实作用是成藏期异常压力的主要成因机制^[14],笔者根据测井资料反映的泥岩欠压实特征,采用平

衡深度法计算研究区目的层的异常压力。由于泥岩压实的不可逆性,由压实曲线估算的流体压力为该区处于最大埋深时期(早白垩世末)的地层压力^[7]。

由于剩余压力发育在烃源岩层段,烃源岩有机质的高声波响应导致了压力估算的不确定性。前人在应用声波时差资料估算泥岩压力时,未考虑有机质对声波时差的影响,因此,求取的地层压力一般偏大^[23]。本次研究对压实曲线进行了有机碳含量的校正,剔除了有机质对声波时差的影响,进而获得更可靠的泥岩古压力。结果表明,对有机质校正前后计算出的泥岩压力具有一定差异,尤其在有机碳含量较高的长 7 中下部页岩段,这种差异很明显(图 3)。从地层压力的纵向变化看,长 6 段以上地层均为常压,长 7 段中下部出现剩余压力,底部页岩段最大,剩余压力为 3~5 MPa,压力系数在 1.1~1.3 之间,页岩段向下剩余压力递减。

通过计算多口井的泥岩古压力,可以获得古压力在横向上的变化(图 4)。无论从单井还是连井剖面的压力分布均可看到,研究区剩余压力主要分布在长 7 油层组内部,以油页岩段最明显,并且剩余

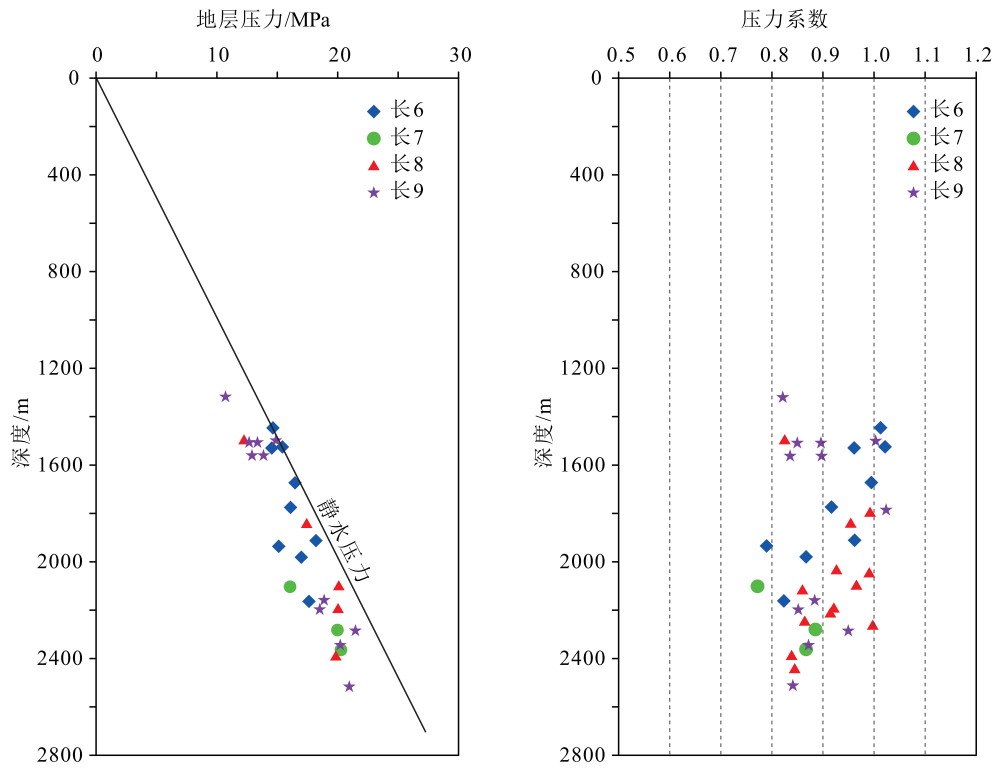


图2 镇泾地区中生界地层压力和压力系数随埋深的变化

Fig. 2 Variation of Mesozoic pressure and pressure coefficient along burial depth in Zhenjing area

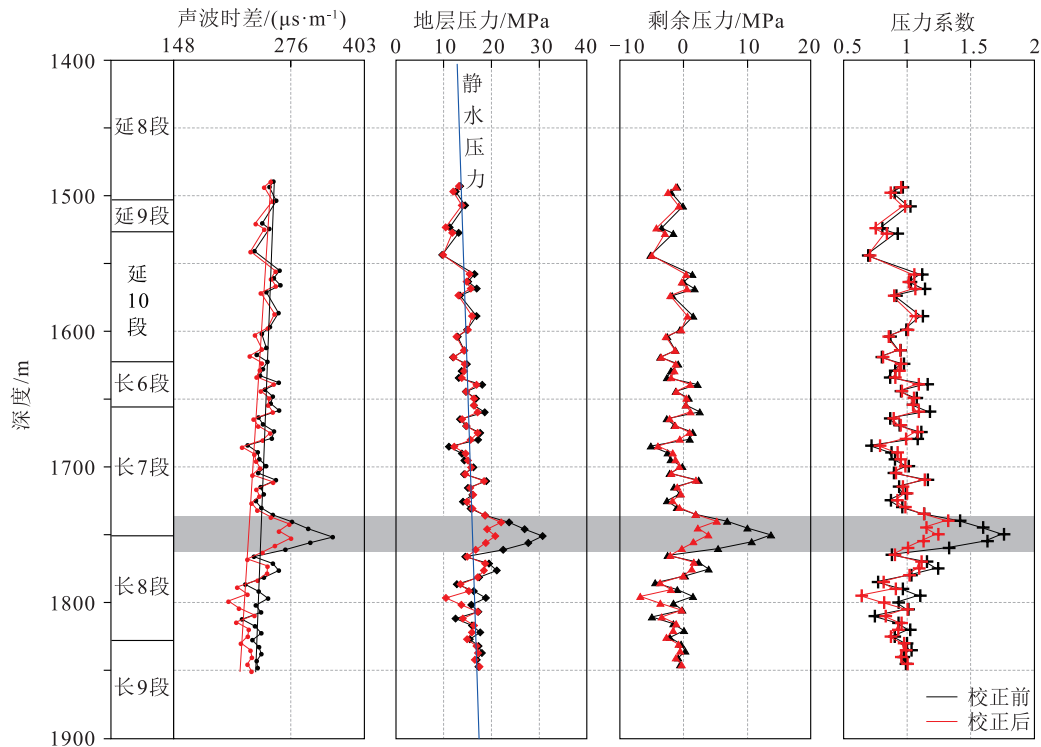


图3 红河21井中计算的泥岩古压力

Fig. 3 Calculated palaeopressure of mudstone in well Honghe21

压力具有向上向下递减的趋势,横向连续性较好。长7段剩余压力高值区位于研究区东北部(约4 MPa),向西南方向剩余压力逐渐减小,这主要是由于向西南方向泥岩厚度减薄所致。

5 地层压力演化

尽管泥岩压实法和流体包裹体法能够较准确地反映特定时期的古压力,但无法确定异常压力形成及完整的演化历史。建立与实际地质情况相近的数学模型和地质模型,在现今实测压力、泥岩压实研究获得的最大埋深时期古压力、流体包裹体古压力等多种数据约束和标定下,通过数值模拟方法模拟盆地演化过程中流体压力的演化历史,是定量恢复异常压力形成和演化过程的有效手段^[24]。

数值模拟结果表明,研究区长6油层组及以上地层在盆地埋藏演化过程中,均未形成明显的剩余压力,而长7与长8油层组曾发育剩余压力。其原因可能是由于长6油层组泥质含量低,缺乏上覆有效盖层,孔隙流体能够顺畅排出,不利于剩余压力的形成。

长7油层组泥岩段剩余压力演化与构造运动具有同步性,地层沉降导致剩余压力增大,构造抬升剩余压力减小。总体上,长7油层组剩余压力的演化大致经历了2个旋回(图5),剩余压力最早形成于中侏罗世(164 Ma),上下页岩段的欠压实作用是造成该阶段剩余压力形成的主要原因,剩余压力较小,约为0.5 MPa;在安定组沉积末期(154 Ma),随着研究区的小幅抬升和剥蚀,压力有所释放;进入白垩纪,剩余压力逐渐升高,早白垩世末(100 Ma),由于地层快速埋藏使剩余压力达到高峰,最大约为4 MPa,压力系数达1.3。尽管延长组长7段底部油页岩为优质烃源岩,有机碳含量为6%~10%,这些优质烃源岩内丰富的有机质在早白垩世晚期由固态干酪根转化为液态烃时可能导致流体体积增加,但考虑到高有机碳含量烃源岩厚度小(6~15 m)、有机质成熟程度较低($R_o < 1.0\%$)等因素,推测延长组烃源岩有机质生烃增压对异常压力的贡献较小。此后地层开始抬升剥蚀,压力释放,最终形成现今的压力状态。

从剩余压力在平面上的演变看(图6),随着上覆地层沉积与抬升,长7段泥岩剩余压力呈现出幕式产生与消亡的变化特点。长7段内部剩余压力形

成时间晚于164 Ma,在此之前尽管有剩余压力出现,但幅度极小。中侏罗世安定组沉积之后(154 Ma),长7段泥岩由于欠压实开始形成剩余压力,此时有机质并未开始生烃,因此无生烃增压。早白垩世末期(100 Ma),地层处于最大埋深,欠压实作用最强。该期也是烃源岩的生烃高峰期,但是由于研究区烃源岩厚度薄、有机质丰度偏低、成熟度不高等原因,生烃作用对研究区剩余压力的产生贡献不大。因此,本区长7段剩余压力主要是由于泥岩欠压实造成的。最大埋深时期形成的剩余压力约为4 MPa,且主要分布在泥岩厚度较大的区域,大部分地区剩余压力仍然较小。晚白垩世以来,地层抬升剥蚀,由于孔隙回弹、地层冷却降温等因素,地层压力大幅下降,剩余压力基本消失^[19]。

6 异常压力的成藏意义

大量的资料证明,不同性质的盆地及同一盆地不同演化阶段,其流体动力系统都存在较大差异^[25-28]。鄂尔多斯盆地在中生代为典型的大型内陆拗陷型湖盆,中生界低渗透致密砂岩岩性油藏形成过程中,浮力、构造力无法为油气的运聚提供足够的动力,运移动力主要来自剩余压力^[5, 29]。前人研究普遍认为,镇泾地区主要为超压成藏,异常压力大小决定了成藏规模^[10-12]。因此,异常压力在该区致密砂岩岩性油藏的形成过程中起着很重要的作用。

通过流体包裹体均一温度测试、自生伊利石K-Ar同位素测年、盆地数值模拟等多种方法对镇泾地区延长组成藏期次进行了分析,认为延长组油藏的形成具有连续充注一期成藏的特点,其中又可分成多个成藏阶段。其过程可从晚侏罗世后期开始延续至晚白垩世中期,主成藏期约为早白垩世(143~95 Ma)、成藏高峰期为早白垩世中晚期(124~110 Ma)。

前已述及,早白垩世中晚期,镇泾地区延长组长7段泥岩的剩余压力达到最大,与长8储层之间形成了剩余压力差,驱动长7烃源岩生成的油气沿着微裂缝从高势区向低势区运移。根据数值模拟结果,计算了长7烃源岩与长8储层之间的剩余压力差,结果显示各时期源储压差均较低,即使在盆地最大埋深时期(100 Ma)源-储压差也不足2 MPa,呈现出较低的成藏动力特征(图7)。在早白

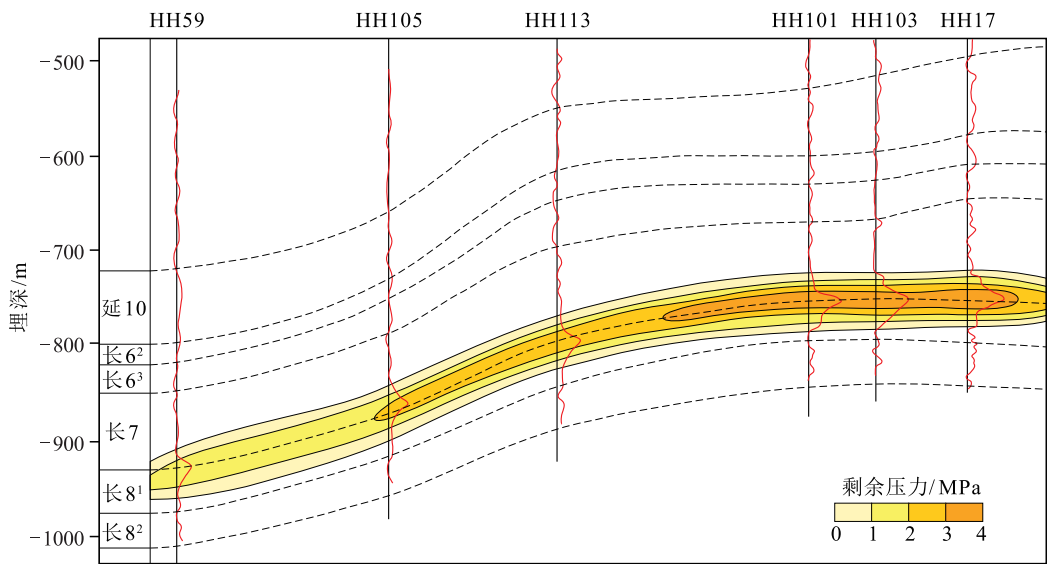


图4 镇泾地区泥岩剩余压力分布剖面(NE—SW向)

Fig. 4 Surplus pressure distribution profile of mudstone in Zhenjing area (in NE-SW direction)

丕世,随着烃源岩内部的剩余压力积累到一定程度,便会间歇性地向储层排烃。由于油水均为压缩率极小的液体,在烃源岩中呈高压存在的流体一旦进入接近静水压力的储层,随着压力的降低,

排出的流体体积膨胀,剩余压力差将不复存在。同时,晚白丕世以来的地层抬升剥蚀和温度降低导致烃源岩压力逐渐下降,最终充注动力与阻力达到平衡。

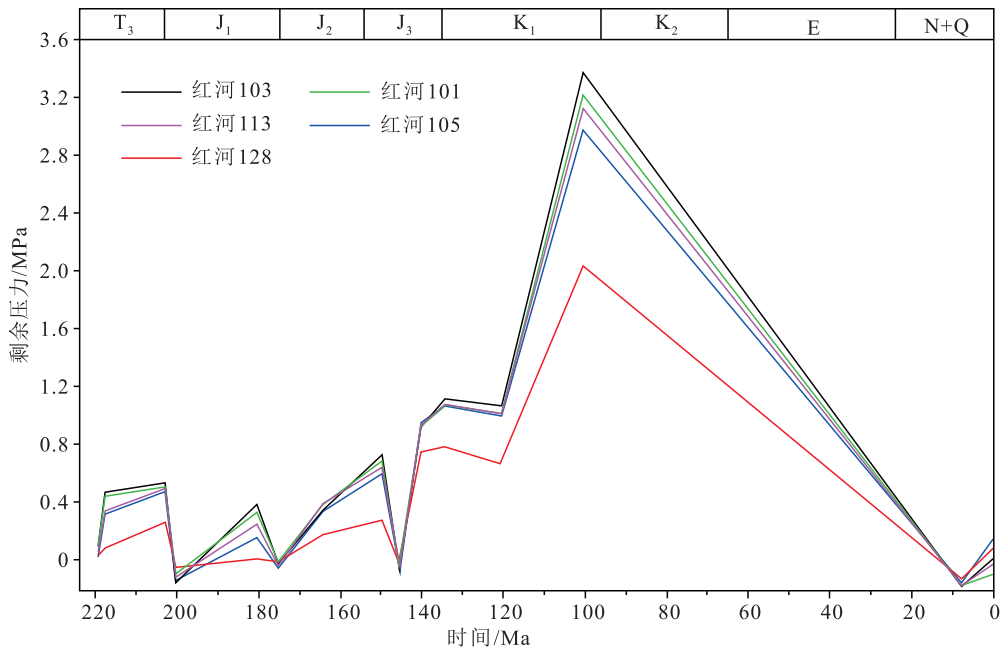


图5 镇泾地区典型井泥岩剩余压力演化史
(地质年代符号注释同图1)

Fig. 5 Evolution history of surplus pressure of typical well mudstones in Zhenjing area

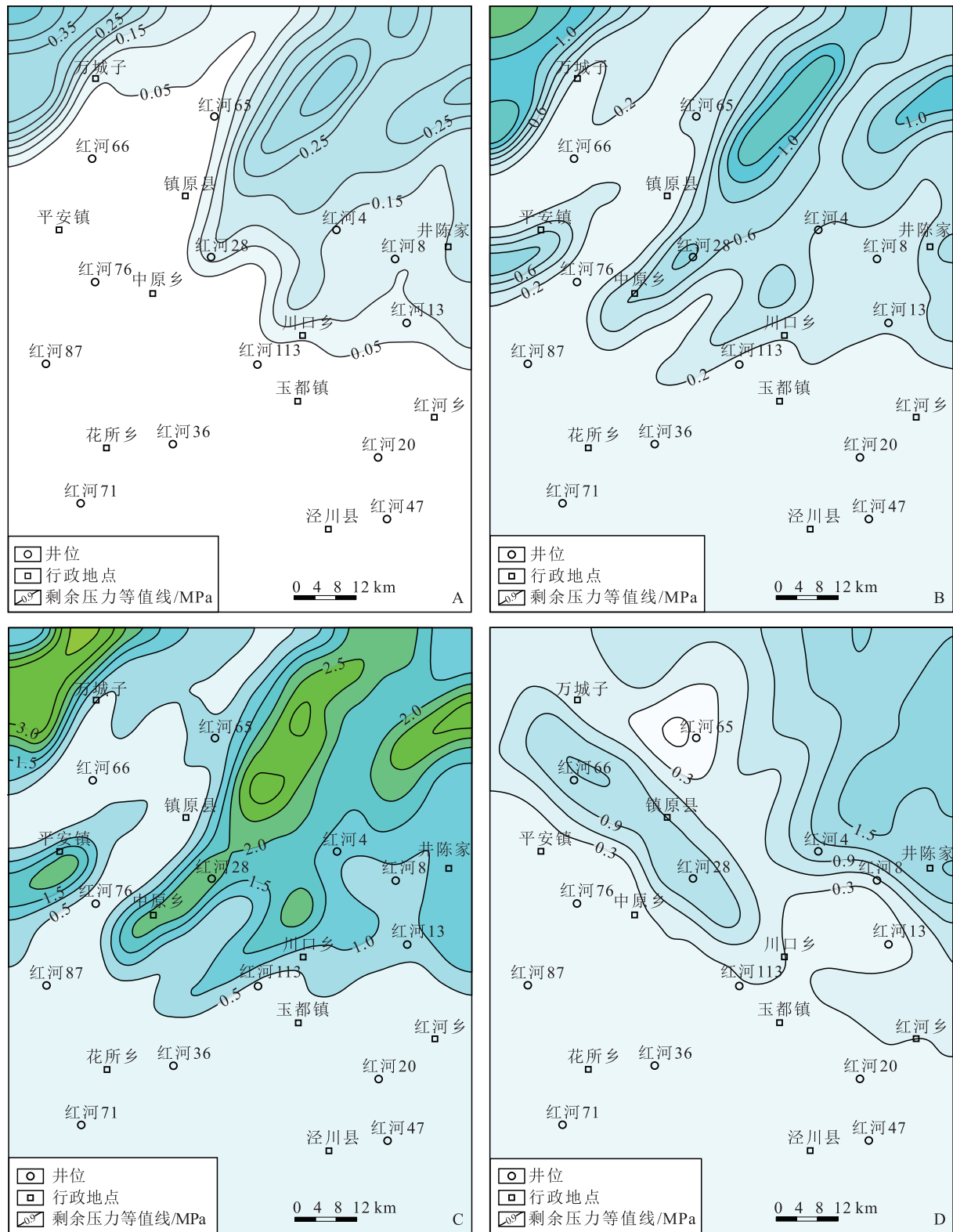


图 6 镇泾地区长 7 段泥岩剩余压力演化

Fig. 6 Evolution of surplus pressure of mudstone of Chang 7 group in Zhenjing area

A—延安组沉积后 (180 Ma); B—安定组沉积后 (154 Ma); C—下白垩统沉积后 (100 Ma); D—现今 (0 Ma)

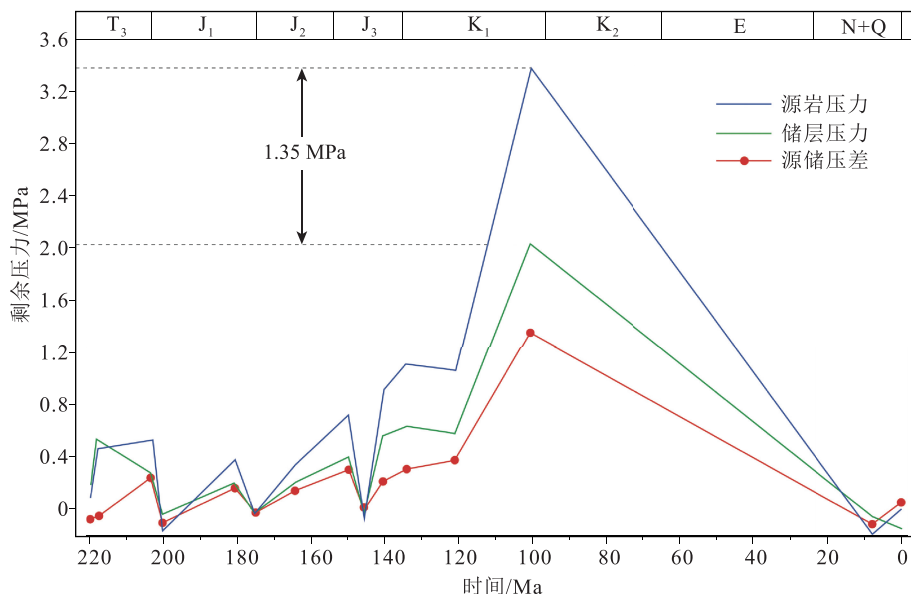


图7 镇泾地区红河103井源储压差演化
(地质年代符号注释同图1)

Fig. 7 Evolution of pressure difference between source rock and reservoir in well Honghe103 in Zhenjing area

7 结 论

(1) 鄂尔多斯盆地西南部镇泾地区现今中生界地层压力集中分布在 17.99~22.46 MPa 之间, 平面上具有西南部低、东北部高的特点, 地层压力系数介于 0.8~1.05 之间, 整体处于常压-弱负压状态。

(2) 镇泾地区长7段烃源层在早白垩世之前由于埋深较浅且地层多次抬升, 地层压力接近静水压力。早白垩世地层快速埋深, 由于欠压实及生烃作用, 烃源岩段普遍发育剩余压力, 早白垩世末期剩余压力达到最大, 在 4 MPa 左右, 压力系数介于 1.1~1.3 之间, 形成低幅超压。晚白垩世以来随着地层抬升, 压力逐渐释放, 至新近纪逐渐演变为正常地层压力。

(3) 在镇泾地区, 延长组特低渗致密岩性油藏的主成藏期在早白垩世中晚期, 该期也是长7段烃源岩剩余压力最大的时期。长7段烃源岩与长8段储层之间的剩余压力差是油气运移的主要动力。

参考文献

- [1] Webster M, O' Conner S, Pindar B, et al. Overpressures in the Taranaki Basin: distribution, causes, and implications for exploration[J]. AAPG Bulletin, 2011, 95(3): 339-370.
- [2] Tingay M R P, Morley C K, Laird A, et al. Evidence for overpressure

- generation by kerogen-to-gas maturation in the northern Malay Basin[J]. AAPG Bulletin, 2013, 97(4): 639-672.
- [3] 解习农, 刘晓峰. 超压盆地流体动力系统与油气运聚关系[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2000, 19(2): 103-108.
- [4] 郝芳, 董伟良. 沉积盆地超压系统演化、流体流动与成藏机理[J]. 地球科学进展, 2001, 16(1): 79-85.
- [5] 刘新社, 席胜利, 黄道军. 鄂尔多斯盆地中生界石油二次运移动力条件[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(2): 143-147.
- [6] 赵靖舟, 白玉彬, 曹青, 等. 鄂尔多斯盆地准连续型低渗透-致密砂岩大油田成藏模式[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(6): 811-827.
- [7] 范玉海, 屈红军, 王辉, 等. 鄂尔多斯盆地西部延长组下组合异常压力与油气分布[J]. 新疆石油地质, 2013, 34(1): 14-16.
- [8] 楚美娟, 李士祥, 刘显阳, 等. 鄂尔多斯盆地延长组长8油层组石油成藏机理及成藏模式[J]. 沉积学报, 2013, 31(4): 683-692.
- [9] 肖承钰, 尹伟, 张颖, 等. 鄂尔多斯镇泾地区延长组成藏体系与油气富集模式[J]. 石油实验地质, 2015, 37(3): 347-353.
- [10] 张克银. 鄂尔多斯盆地南部中生界成藏动力学系统分析[J]. 地质力学学报, 2005, 11(1): 25-32.
- [11] 李滢莲, 刘震, 王伟, 等. 镇泾地区延长组八段低渗岩性油藏形成过程动态分析[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(6): 845-852.
- [12] 丁晓琪, 张哨楠, 易超, 等. 鄂尔多斯盆地镇泾地区中生界油气二次运移动力研究[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(1): 66-72.
- [13] 吴永平, 王允诚, 李仲东, 等. 镇泾地区地层异常压力与油气运聚关系[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2008, 30(1): 47-50.
- [14] 梁吉学, 常象春, 尹伟. 镇泾地区延长组流体过剩压力分布特征及其与油气成藏的关系[J]. 油气地质与采收率, 2017, 24(4): 55-60.
- [15] 邓南涛, 张枝焕, 王付斌, 等. 鄂尔多斯盆地南部镇泾地区中生界原油地球化学特征及油源分析[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(3):

- 604-611.
- [16] Hao F, Zhu W, Zou H, et al. Factors controlling petroleum accumulation and leakage in overpressured reservoirs[J]. AAPG Bulletin, 2015, 99(5): 831-858.
- [17] 李超, 张立强, 张立宽, 等. 鄂尔多斯盆地镇泾地区中生代地层剥蚀厚度估算及古构造恢复[J]. 岩性油气藏, 2016, 28(2): 72-79.
- [18] 郝芳, 等. 超压盆地生烃作用动力学与油气成藏机理[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 4-5.
- [19] 李士祥, 施泽进, 刘显阳, 等. 鄂尔多斯盆地中生界异常低压成因定量分析[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(5): 528-533.
- [20] 杨彬, 张立宽, 张立强, 等. 东营凹陷东南斜坡泥岩压实规律及超压分布[J]. 新疆石油地质, 2015, 36(6): 714-718.
- [21] 陈红汉, 董伟良, 张树林, 等. 流体包裹体在古压力模拟研究中的应用[J]. 石油与天然气地质, 2002, 23(3): 207-211.
- [22] 张立宽, 王震亮, 孙明亮, 等. 库车坳陷克拉2气田异常流体压力演化史[J]. 地质科学, 2007, 42(3): 430-443.
- [23] 李超, 张立宽, 罗晓容, 等. 泥岩压实研究中有有机质导致声波时差异常的定量校正方法[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2016, 40(3): 77-87.
- [24] 罗晓容. 数值盆地模拟方法在地质研究中的应用[J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(2): 6-10.
- [25] 叶加仁, 王连进, 邵荣. 油气成藏动力学中的流体动力场[J]. 石油与天然气地质, 1999, 20(2): 182-185.
- [26] 王永诗, 邱贻博. 济阳坳陷超压结构差异性及其控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(3): 430-437.
- [27] 段毅, 吴保祥, 郑朝阳, 等. 鄂尔多斯盆地西峰油田油气成藏动力学特征[J]. 石油学报, 2005, 26(4): 29-33.
- [28] 吴海生, 郑孟林, 何文军, 等. 准噶尔盆地腹部地层压力异常特征与控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(6): 1135-1146.
- [29] 刘显阳, 惠潇, 李士祥. 鄂尔多斯盆地中生界低渗透岩性油藏形成规律综述[J]. 沉积学报, 2012, 30(5): 964-974.