

渤海湾盆地辽河坳陷西部冷家—雷家地区中-深层超压成因及其对油气成藏的影响

陈昌^{1,2},邱楠生¹,高荣锦²,周晓龙²,孙永河³,杨琳琳⁴,付健⁴

[1. 中国石油大学(北京)地球科学学院,北京 102249;2. 中国石油辽河油田公司勘探开发研究院,辽宁 盘锦 124010;
3. 重庆科技大学石油与天然气工程学院,重庆 401331;4. 东北石油大学地球科学学院,黑龙江 大庆 163318]

摘要:为了研究渤海湾盆地辽河坳陷西部冷家—雷家地区中-深层超压发育形成机制及油气运移和成藏对该地区中-深层油气勘探的意义,基于实测地层压力和温度数据、测井数据及构造分析,对冷家—雷家地区中-深层超压发育特征、成因机制及超压在成藏过程中的作用进行了综合分析。研究表明:①冷家—雷家地区发育超压型、常压型和低压型3类地层温度-压力系统,其超压段主要集中在洼陷带的沙河街组三段(沙三段)和沙河街组四段(沙四段),深度约为2 500~4 000 m;②超压形成机制以欠压实作用为主,伴有生烃增压、成岩作用和构造挤压作用贡献;③冷家—雷家地区主要存在超压带内部的油气自生自储型运聚和油气从超压带向常压/低压带的跨压力系统运聚2种运聚模式,前者主要发生在洼陷带内的沙三段和沙四段超压带内部,后者则为断裂活动期陈家洼陷沙四段烃源岩中的油气在超压驱动下向雷家和高升构造带充注,及冷家地区沙三段下亚段-沙三段中亚段超压带中的油气通过砂体和断裂输导向东部陡坡带和兴隆台潜山运聚。

关键词:超压;成因机制;成藏模式;中-深层;冷家—雷家地区;辽河坳陷

中图分类号:TE122.3

文献标识码:A

Overpressure in moderately deep to deep strata in the Lengjia-Leijia area, western Liaohe Depression, Bohai Bay Basin: Origin and effects on hydrocarbon accumulation

CHEN Chang^{1,2}, QIU Nansheng¹, GAO Rongjin², ZHOU Xiaolong², SUN Yonghe³, YANG Linlin⁴, FU Jian⁴

[1. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 2. Research Institute of Exploration and Development, Liaohe Oilfield Company, PetroChina, Panjin, Liaoning 124010, China; 3. School of petroleum engineering, Chongqing University of Science & Technology, Chongqing 401331, China; 4. School of Earth Sciences, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China]

Abstract: The moderately deep to deep strata in the Lengjia-Leijia area, western Liaohe Depression exhibit significant overpressure. It's of great significance to understanding its genetic mechanism and its effects on hydrocarbon migration and accumulation in terms of hydrocarbon exploration therein. Based on measured formation pressure and temperature, log data, and structural analysis, we comprehensively investigate the characteristics and genetic mechanisms of overpressure in these strata and explore its role in hydrocarbon accumulation therein. The results indicate that the Lengjia-Leijia area is characterized by composite thermo-pressure system of the overpressure, normal-pressure, and underpressure types, with the overpressure interval predominantly found in the 3rd and 4th members of the Shahejie Formation (also referred to as the Sha 3 Member and the Sha 4 Member, respectively) within the sub-sag zone, at depths ranging from 2 500 to 4 000 m approximately. The overpressure in the area primarily results from undercompaction, followed by a combination of hydrocarbon generation-induced pressurization, diagenesis, and tectonic compression. There exist two major hydrocarbon migration and accumulation modes in the study area: the self-sourced indigenous mode

收稿日期:2023-04-17;修回日期:2023-12-05。

第一作者简介:陈昌(1986—),男,教授级高级工程师,石油地质综合研究。E-mail: chenchang001@petrochina.com.cn。

通信作者简介:付健(1989—),男,博士、讲师,油气地球化学、测井地质和盆地模拟。E-mail: fujian287@gmail.com。

基金项目:中国石油辽河油田重点科技专项(2023KJXM-04);重庆市自然科学基金创新发展联合基金项目(重点项目)(CSTB2022NSCQ-LZX0020);重庆英才创新领军人才项目(教育领域)(0255-19230101042);黑龙江省自然科学基金项目(LH2022D012)。

within overpressure zones and the cross-pressure mode from an overpressure zone to a normal-pressure/underpressure zone. The former is predominantly found within the overpressure zones of the Sha 3 and 4 members in the sub-sag zone. In contrast, the latter occurred during the period of faulting, including overpressure-driven hydrocarbon charging into the Leijia and Gaosheng structural zones from source rocks in the Sha 4 Member in the Chenjia sub-sag, and hydrocarbon accumulation in the eastern steep slope area and Xinglongtai buried hill in the Lengjia area after transporting through faults and sand bodies from the overpressure zones in the lower to middle sub-members of the Sha 3 Member.

Key words: overpressure, genetic mechanism, accumulation mode, moderately deep to deep strata, Lengjia-Leijia area, Liaohe Depression

引用格式:陈昌,邱楠生,高荣锦,等. 渤海湾盆地辽河坳陷西部冷家—雷家地区中-深层超压成因及其对油气成藏的影响[J]. 石油与天然气地质, 2024,45(1):130–141. DOI:10.11743/ogg20240109.

CHEN Chang, QIU Nansheng, GAO Rongjin, et al. Overpressure in moderately deep to deep strata in the Lengjia-Leijia area, western Liaohe Depression, Bohai Bay Basin: Origin and effects on hydrocarbon accumulation [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(1): 130–141. DOI: 10.11743/ogg20240109.

西部凹陷是渤海湾盆地辽河坳陷最大的一个富油气凹陷,古近系陆上分布面积约 2 560 km²(图 1a)。陈

家洼陷是西部凹陷中段的一个生油洼陷。该洼陷地处兴隆台油田、曙北油田、冷东油田和高升油田之间,是

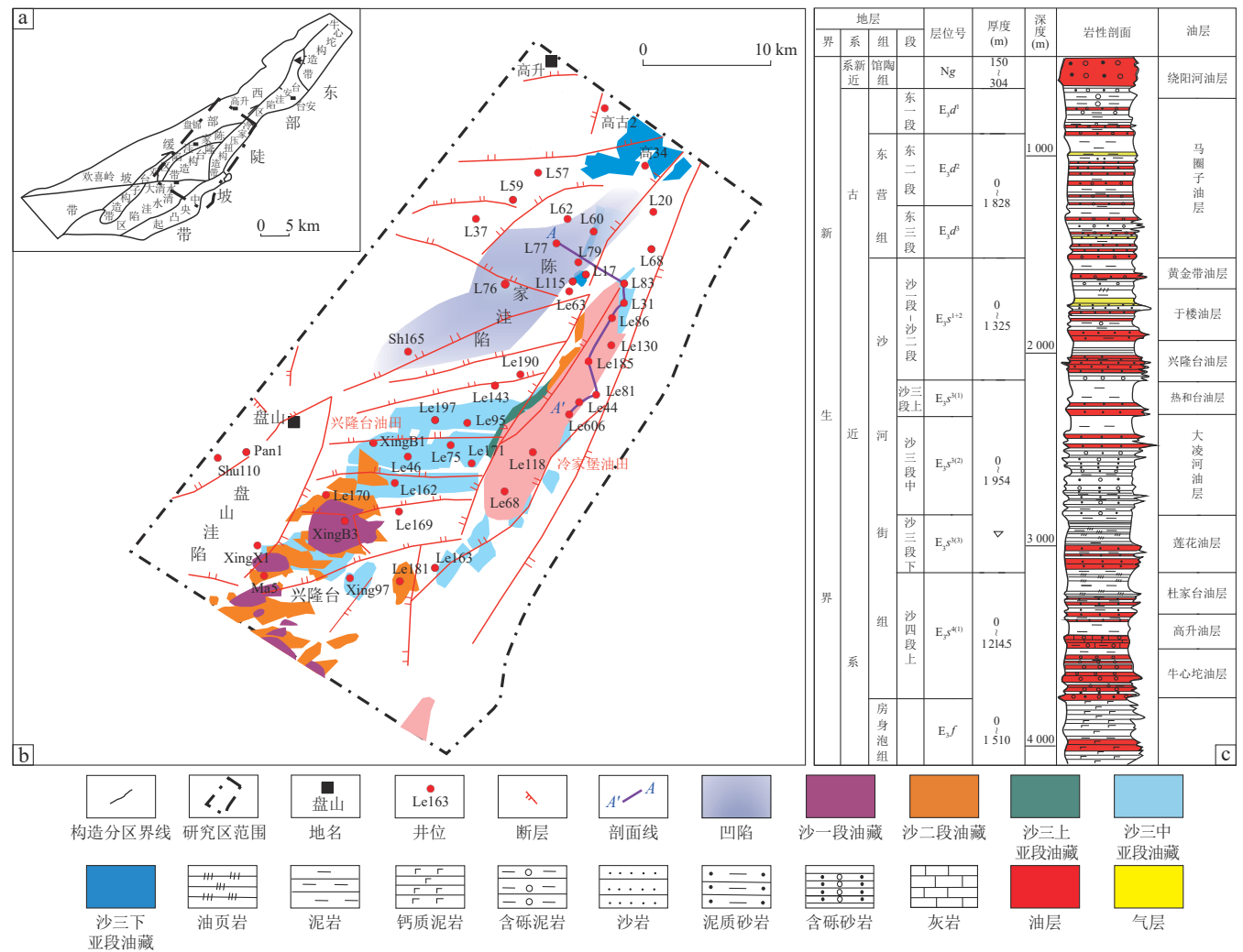


图 1 辽河坳陷西部凹陷(a)冷家—雷家地区区域位置(b)及地层综合柱状图(c)

Fig. 1 Map showing the regional location of the Lengjia-Leijia area in the Western Sag (a), Liaohe Depression (b) and the composite stratigraphic column of the area (c)

几大油田的主要油源区^[1]。冷东-雷家断裂背斜带位于临近陈家洼陷的陡坡高部位上,是陈家洼陷供烃的主要指向单元^[2]。随着勘探和研究程度的加深,前人发现油区内油气的分布与超压关系密切^[3-5],指出超压可能是油气长距离跨层运移的动力源之一。早期针对西部凹陷的超压研究主要集中在中-浅层,研究表明,辽河盆地发育异常压力,目前对盆地浅层(埋深<3 000 m)超压与油气的分布、成藏关系及异常压力对储层成岩作用和物性的研究较多^[6-9],而对于西部凹陷超压顶界面埋深为2 500~4 000 m的中-深层沙河街组超压发育特征及成因机制研究相对较少,随着西部凹陷勘探方向逐渐由浅层向深层转变,明确中-深层超压的成因机制及油气成藏的关系至关重要。

本研究基于西部凹陷中段冷家-雷家地区的地质条件,结合超压测井响应曲线,重点讨论该区中-深层超压的形成机制,以期为西部凹陷地区中-深层超压形成与油气成藏过程提供新的证据,为下步勘探方向的确定提供地质依据以及同类地质背景地区超压成因研究提供参考。

1 地质背景

辽河拗陷属于渤海湾新生代盆地的一部分,是中、新生代以来形成的陆相沉积盆地,面积约为12 400 km²,也是中国东北地区著名的断陷含油气盆地^[10]。西部凹陷位于渤海湾盆地辽河拗陷西南部,西起西部凸起,东至中央隆起,北起牛心坨地区,南至鸳鸯沟洼陷^[11]。在盆地裂谷演化的过程中,各个构造单元构造活动方式和强弱程度差异很大,因此不同地区断裂展布特征和构造格局存在较大的差异。西部凹陷是辽河拗陷乃至整个渤海湾盆地主要的富油凹陷之一,其构造特征为东陡西缓的箕状地堑,呈北窄南宽的葫芦型。凹陷内可分为斜坡带、中央隆起带、洼陷带和陡坡带4个不同的构造区带。

本研究的范围位于西部凹陷中段,包括东部陡坡带和陈家洼陷,与中央凸起相邻。冷家-雷家地区位于辽河西部箕状凹陷北部中段之东部断裂带,西连陈家洼陷,东以台安断层与中央凸起相隔,南为兴隆台古隆起,北为雷家北部低凸起^[12]。研究区自下而上发育太古界、中生界和新生界古近系,包括房身泡组、沙河街组、东营组,新近系馆陶组、明化镇组和第四系平原组。其主要油气富集层位为沙河街组四段(沙四段)和沙河街组三段(沙三段)(图1b),凹陷边缘为扇三角洲相和滨浅湖相沉积,中心为深湖相与滑浊积湖底扇沉

积^[13]。沉积物源来自中央凸起,古地形总体上东高西低,北高南低^[14-15]。冷家-雷家地区断裂也十分发育,主要形成了北东向和近东西向2组断裂,北东向主干断层控制了区域构造与沉积格局,也影响着油气的运移和聚集^[16-20]。

2 中-深层地层超压体系特征

2.1 实测地层压力特征

根据地层压力与静水压力的关系可以将地层压力划分为正常压力、异常高压(超压)和异常低压(负压)。前人基于压力系数建立了不同超压划分方案^[21-22]。本研究基于前人建立的划分标准以及研究区的地质背景,采用负压带压力系数小于0.9、常压带压力系数介于0.9~1.2和压力系数大于1.2为超压带的划分方案。西部凹陷断裂带整体超压主要发育在深度2 500~3 000 m以深的中-深层,且储层压力分布复杂,压力系数和地层压力并非简单的随着埋深逐渐增大。

冷家-雷家地区浅部的地层压力基本符合静水压力趋势(图2a,b)。冷家地区是西部凹陷中段超压作用最为发育的地区,超压主要发育在陈家洼陷向兴隆台潜山一带的沙三段。实测压力从2 500 m开始出现超压,随埋深加深,超压点增多,超压的幅度也明显增大。当深度大于3 000 m时,地层压力值在30~45 MPa,压力系数在1.2~1.5,多为超压或强超压地层(图2a,c)。相比之下,雷家地区整体超压发育不明显,仅在个别井位发育超压。超压发育的主要层位在沙三段及沙四段。超压发育深度在3 000 m以深范围,地层压力普遍大于30 MPa,最高可达到42 MPa,压力系数介于1.2~1.4(图2b,d)。洼陷边缘构造高部位地层普遍发育异常低压,这可能与冷家-雷家地区在东营组时期地层抬升剥蚀作用有关,一方面剥蚀作用导致深部地层上覆载荷降低,地层孔隙发生回弹,孔隙体积增加;另一方面,地层抬升使得地层埋藏深度变浅,地层温度降低,孔隙流体发生收缩而体积变小,进而导致异常低压的形成^[7]。

2.2 压力平面分布特征

本研究采用的实测压力数据为试油阶段通过地层测试和试井两种方法测得的地层压力,其中各层段压力数据均选取研究区内实测地层压力最大值进行表征,根据其垂向分布特征可知冷家-雷家地区浅部地层超压不发育,而中-深部地层存在明显的超压(图2)。在平面上,西部凹陷中段地层高升地区以常

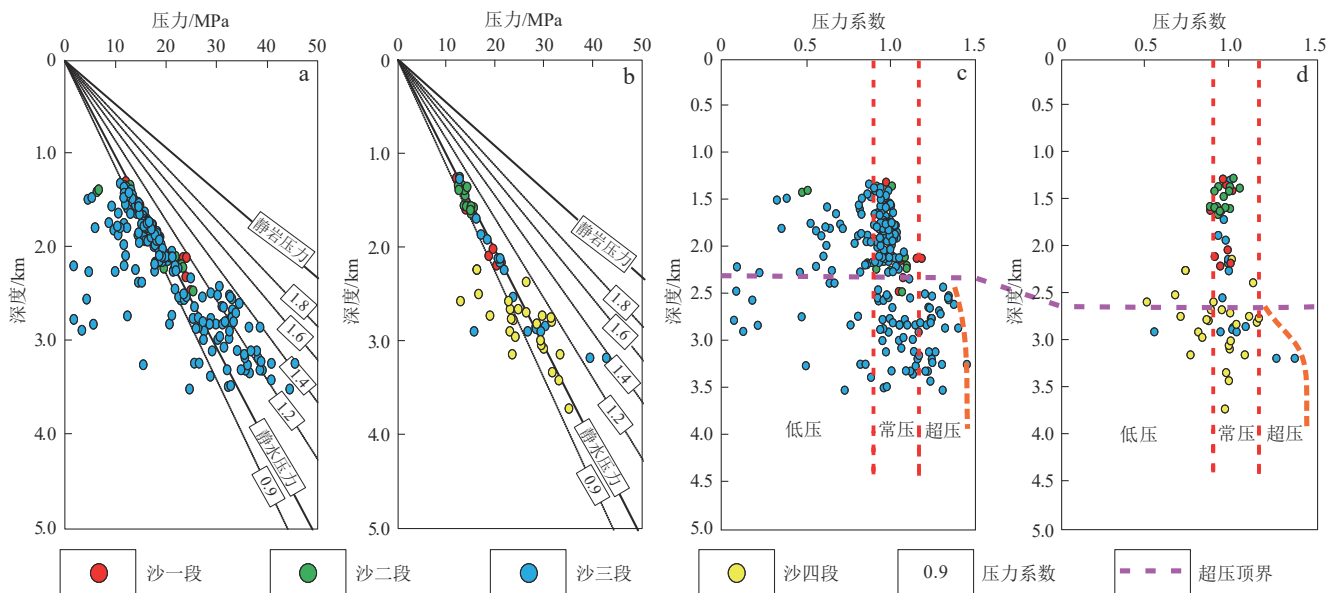


图2 辽河拗陷西部凹陷冷家—雷家地区实测压力和异常压力(超压和低压)与深度关系

Fig. 2 Cross plots of depth versus measured pressure and pressure coefficient (as indicated by overpressure and underpressure) of the Lengjia-Leijia area in the Western Sag, Liaohe Depression

a. 冷家地区压力 vs. 深度; b. 雷家地区压力 vs. 深度; c. 冷家地区压力系数 vs. 深度; d. 雷家地区压力系数 vs. 深度

压带为主,沙四段地层压力系数在1.10左右,沙三段基本不发育超压系统。超压主要发育在陈家洼陷的沙三段,其次为沙四段,压力系数大于1.30,剩余压力值接近8 MPa,其中Sh165井压力系数可达1.71,剩余压力值可达19 MPa,发育强超压系统(图3,图4)。陈家洼陷向西至兴隆台一带沙三段普遍发育超压,超压强度与陈家洼陷中心部位相近。总体上,陈家洼陷—冷家一带沙三段为西部凹陷中段主要超压发育层段,表现为超压区分布范围广,剩余压力较大的特征。沙四段超压段仅在陈家洼陷有发育,向高升地区逐渐转变为常压带。东部陡坡带则发育常压和负压地层,其中负压段的压力系数基本都小于0.90,主要为沙三段及其上部地层。

2.3 地层温度-压力系统划分

温度是影响地层压力重要影响因素之一,在同一压力系统内,地层温度和压力表现为直线关系^[23]。而沉积盆地一般具有2个或2个以上的地层温度-压力系统,通常包括一个浅层地层温度-压力系统和至少一个深层地层温度-压力系统。在每一个地层温度-压力系统中,地层温度-压力保持直线关系,但在不同的地层温度-压力系统中,地层温度和压力直线的斜率不同^[24-25]。

西部凹陷整体存在3类地层温度-压力系统,断裂带中段冷家—雷家地区东部陡坡带和高升地区主要发育超浅层低压型地层温度-压力系统,地层温度-压力

曲线斜率略低于常压型系统,陈家洼陷至兴隆台一带的浅层则以常压型地层温度-压力系统为主,而超压型地层温度-压力系统则在中-深层沙三段,其地层温度-压力曲线斜率显著高于常压系统,表现为在同一温度范围内,随温度升高,压力显著增加(图5)。超压的成因之一是地层发育异常高温,一方面会导致流体发生膨胀,另一方面加速有机质的成熟生烃和液态烃类的裂解,从而促进烃类的充注和异常高压的形成。冷家—雷家地区的低压、常压和超压段地层温度随深度增加,呈现稳定的直线关系,呈现相同的演化趋势且总体上没有明显的异常高温情况(图5)。此外,北段牛心坨地区、中段冷家—雷家地区和南段清水洼陷平均地层温度梯度基本一致,约为37 °C/km,但不同区带和同一区带内均发育多个地层温度-压力系统,由此可知,西部凹陷的超压并非是由异常高温所致。

3 中-深层超压成因机制

西部凹陷冷家—雷家地区中-深段地层存在不同程度的超压现象。首先利用测井法对超压井的泥岩段测井曲线的超压发育情况进行判识,再利用Bowers声波速度-密度交会图来确定超压成因^[26-31]。

3.1 欠压实作用

泥岩欠压实是年轻盆地中最普遍的超压成因,欠

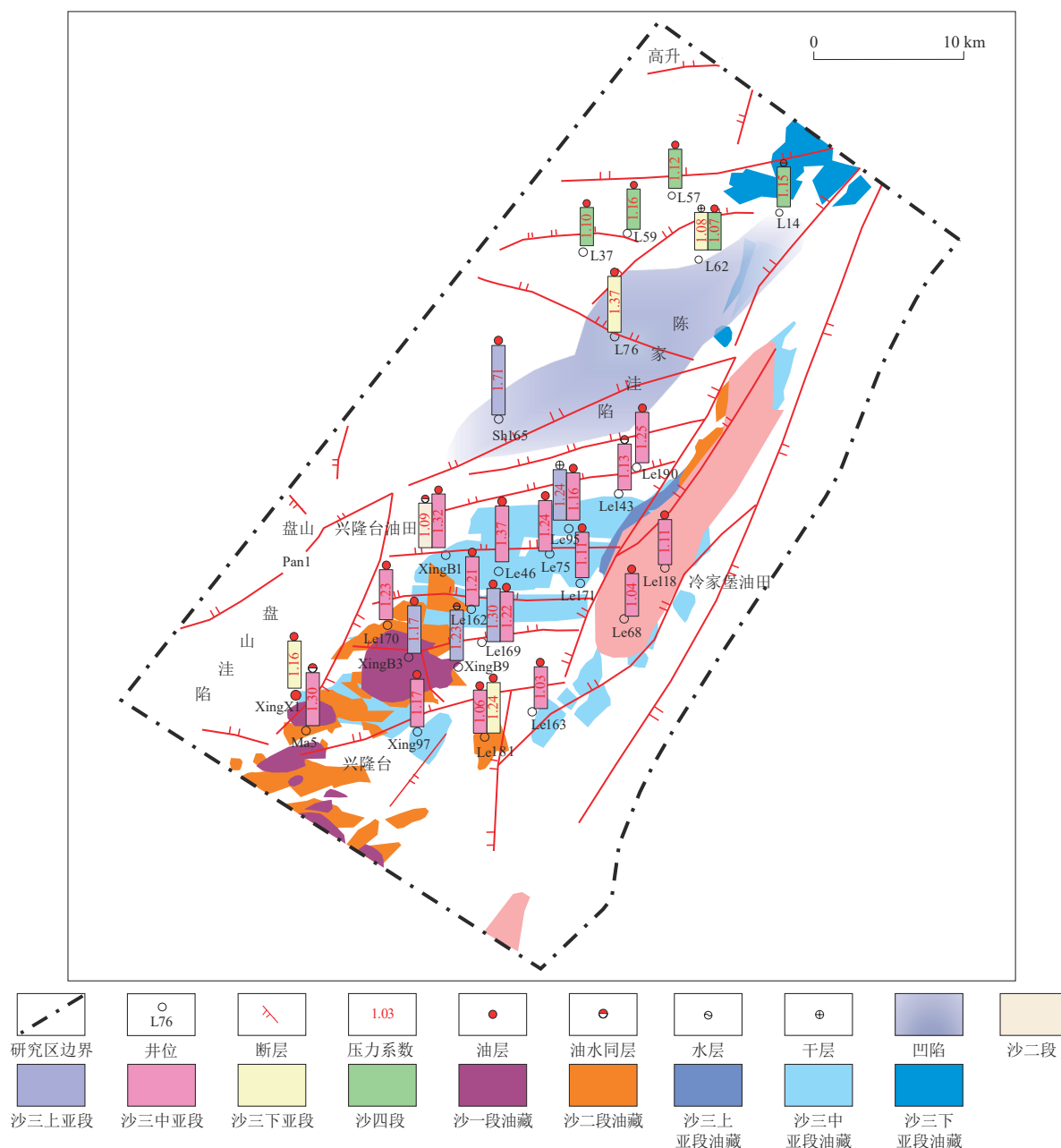


图3 辽河坳陷西部凹陷冷家—雷家地区中-深层压力系数平面分布

Fig. 3 Planar distribution of pressure coefficients of moderately deep to deep strata in the Lengjia-Leijia area in the Western Sag, Liaohe Depression

压实作用形成的封闭条件也被认为是其他地质作用增压的前提^[32-33]。欠压实作用又叫做不平衡压实作用,是快速埋藏的低渗透率地层和形成储层超压的可行机制,其发育程度取决于上覆负荷增加速率与地层渗滤能力间的平衡关系,主导因素包括沉积速率和泥质含量。地层快速沉积过程中,泥岩排出的流体进入泥岩中的砂岩夹层和孤立的砂体孔隙后,承担了一部分上覆载荷,形成欠压实来维持砂岩和泥岩之间的压力平衡,从而导致超压的形成^[34]。因此,欠压实作用不止是针对泥岩地层,而是与之临近的砂岩储层也会发生

欠压实作用,在相同成因机制下,泥岩和砂岩实际上具有相似的压力形成背景,砂岩储层同样也会发生超压。

对泥岩段地层或低渗透型地层,欠压实地层通常具有较高的孔隙度和较低的岩石密度,通过泥岩段声波时差、地层密度和电阻率曲线随深度的变化特征,可以对超压顶界面和超压发育段进行识别。通常当泥岩段声波时差、电阻率和密度曲线发生同步大幅度反转或随着埋深的增加,声波时差增大,电阻率减小,密度显著减小时,则属于不平衡压实成因。冷家—雷家地区在埋深较浅时表现为常压,随着埋深的增加,声波时

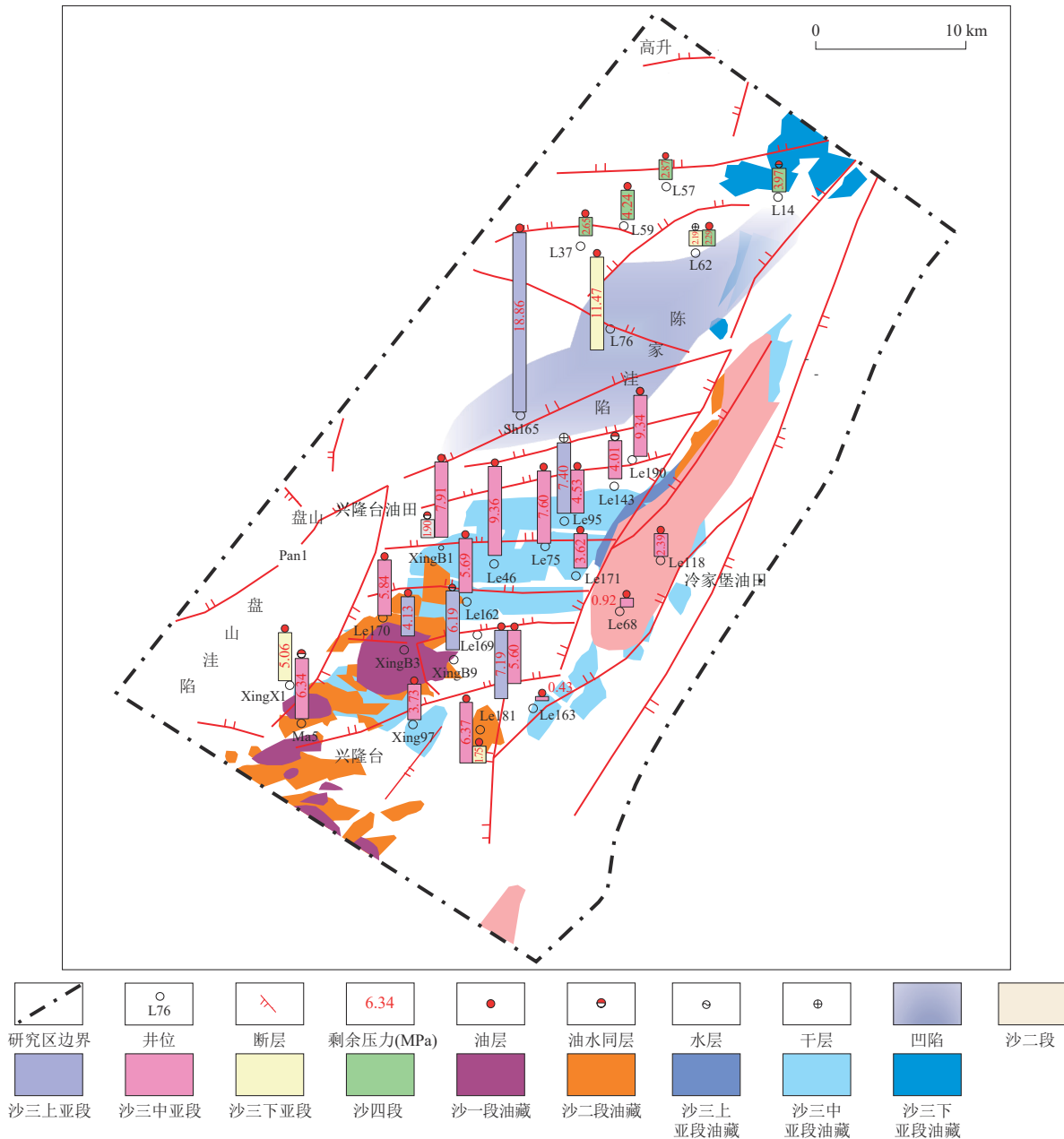


图4 辽河拗陷西部凹陷冷家—雷家地区中-深层剩余压力平面分布

Fig. 4 Planar distribution of residual pressure in moderately deep to deep strata of the Lengjia-Leijia area in the Western Sag, Liaohe Depression

差逐渐减小,密度增加,电阻率亦增加。然而,深度在2 800~3 500 m以深地层测井曲线出现明显异常,与实测和预测超压发育层段相对应(图6),在超压带附近,中段L76井均随着埋深的增加,声波时差、密度和电阻率测井均在2 800 m的深度范围内偏离正常压实趋势出现明显的反转,且整体表现出声波时差偏离正常趋势线增大,电阻率和密度曲线向减小的方向发生偏移,且单井显示沙三段出现很厚的泥岩段,泥质含量高,泥岩层下部的砂岩储层物性好,由此可见,冷家—雷家地区超压的成因机制存在欠压实作用贡献。此

外,在不同井位测井曲线出现异常的深度具有差异,同时,在同一口井的不同深度段存在多个测井曲线异常段,指示了研究区中-深层发育多个超压带。

欠压实作用发生通常伴随着地层的快速沉降或抬升剥蚀,研究表明西部凹陷在东营组—馆陶组沉积时期发生过强烈的构造抬升,主要位于北部牛心坨—高升一带,剥蚀厚度可达千米级别,而冷家地区仅存在百米级别剥蚀,抬升剥蚀作用相对较弱^[35]。相比之下,沙三段时期为西部凹陷的深陷期,该时期盆地经历一次快速沉降作用,伴随湖相细粒沉积物供给,导致沙三

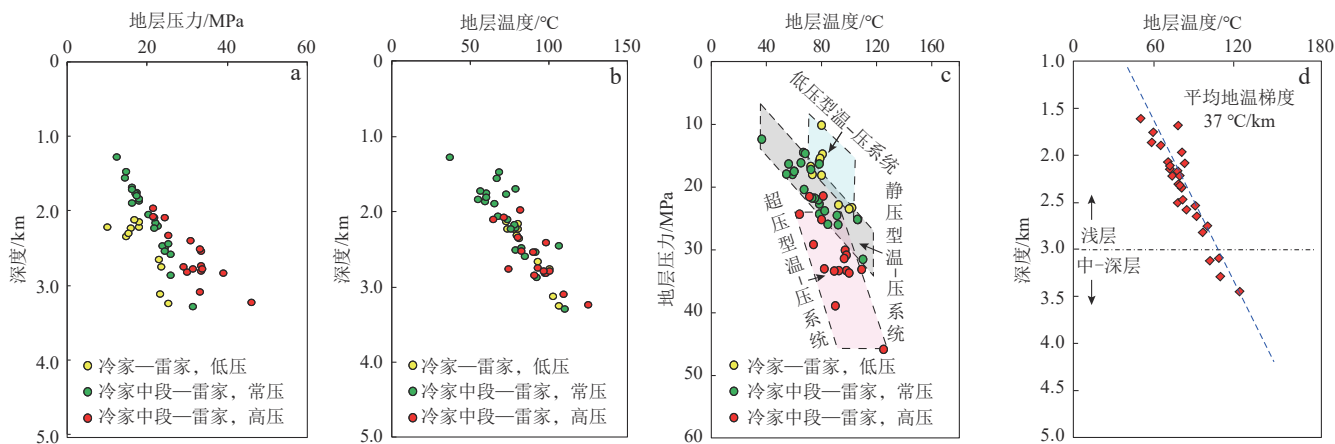


图5 辽河拗陷西部凹陷冷家—雷家地区地层温度-压力系统

Fig. 5 Thermo-pressure systems in the Lengjia-Leijia area in the Western Sag, Liaohe Depression

a. 地层压力 vs. 深度; b. 冷家—雷家地区地层温度 vs. 深度; c. 地层温度 vs. 地层压力; d. 西部凹陷地层温度 vs. 深度

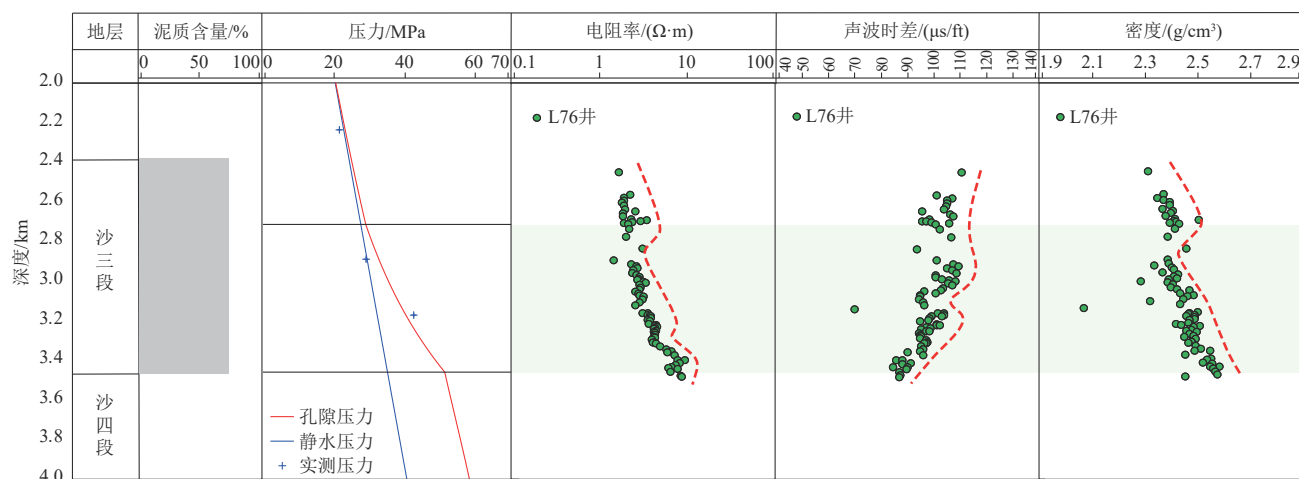


图6 辽河拗陷西部凹陷中段雷家地区测井曲线响应特征

Fig. 6 Log responses of the Leijia area in the central Western Sag, Liaohe Depression

段和沙四段形成以欠压实作用为主的超压带。

3.2 流体膨胀增压

前人研究表明,流体膨胀(如生烃增压)是富油沉积盆地中可以单独形成大规模超压的重要机制,干酪根生烃过程实际上是一个有机组分(干酪根、油和气)总体积增加的过程,在密闭体系中,烃类生成及其转变必然会导致超压的形成。鲍尔斯提出了不同成因的超压可以根据有效应力-声波时差或有效应力-密度的关系图(Bowers图版法)来进行判识^[36]。该方法提出后,得到了广泛应用并取得了良好的应用效果。

Bowers图版能有效地识别非欠压实超压,若超压点位于加载曲线上,表明超压主要来自于临近不均衡压实泥岩的超压传递,超压点落在卸载曲线上,指示卸载型超压,包括流体膨胀和压力传导^[37-39]。冷家—雷家地区超压段和常压段数据在声波速度-有效应力图版

中大部分落在了加载曲线上,指示该地区以欠压实作用为主导的超压成因,值得注意的是位于陈家洼陷中L76井超压段(沙三段)在声波速度-密度图版中数据点向流体膨胀方向偏移,指示流体膨胀作用对超压的贡献(图7),由于该井临近陈家洼陷的生烃中心,地层埋藏较深且有机质含量高,烃源岩具有较好的生烃潜力,且烃源岩已处在生烃阶段并为北部高升地区供烃,此外,该井超压段试油资料显示为油层,上述证据表明陈家洼陷深层具备生烃增压的条件。向西的冷家地区沙三段超压井沿着化学压实方向偏移,反映了生烃增压作用逐渐减弱,而成岩作用对超压的贡献变得明显。

3.3 构造挤压增压

构造挤压产生超压的机制与压实作用大体一致。在构造挤压强烈区,构造挤压对超压形成的贡献已获得广泛的认同^[40-41]。根据台安-大洼断裂带生长特征

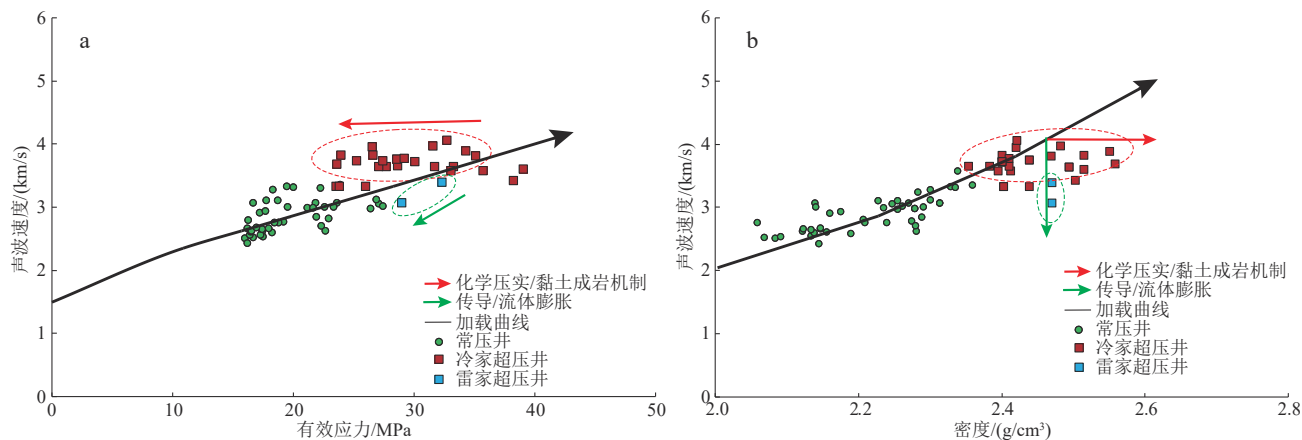


图7 辽河拗陷西部凹陷冷家—雷家地区沙三段地层超压成因判识图版

Fig. 7 Identification plots for the origin of overpressure in the Sha 3 Member in the Lengjia-Leijia area in the Western Sag, Liaoh Depression

a. 有效应力 vs. 声波速度; b. 声波速度 vs. 密度

(图8)。冷家—雷家地区主要位于中段右旋走滑区,构造挤压作用明显,冷家段—雷家段以走滑挤压形成的逆断层为特征,通过对陈家—冷家断裂断距—距离曲线的分析可以看出(图9),冷家段以走滑挤压形成的逆断层为特征,东营组断距最大可达近600 m,雷家段主要活动时期为沙河街组二段(沙二段)、沙河街组一段(沙一段)和东营组沉积时期,断距最大可达1 200 m,指示了

沙二段—东营组沉积时期存在强烈的构造活动。

在侧向挤压构造应力作用下,泥岩孔隙度或声波时差向减小方向偏离正常趋势线,挤压作用越强,偏离幅度越大,且伴随声波时差减小,泥岩电阻率增大,密度升高^[42]。而欠压实泥岩段声波时差则明显向增大方向偏离正常趋势线,偏离幅度越大,欠压实越强。冷家—雷家地区的超压井泥岩电阻率和声波时差相关性较好,主要分布在欠压实区,局部呈现弱挤压或正常压实作用,其中位于陈家洼陷的L67井和冷家地区的Le161井表现出较强的挤压应力作用(图10),这与该区断距曲线分布基本吻合,即冷家段挤压作用强于雷家段(图9),前文指出研究区沙三段沉积时期快速沉降导致的欠压实作用是超压主要原因,而构造挤压主要发生在沙二段—东营组沉积时期,说明构造挤压作用对该区的超压贡献主要发生在构造演化的中、晚期。

综上所述,西部凹陷中段冷家—雷家地区中-深层超压成因主要为欠压实作用所致,陈家洼陷沙三段和沙四段作为烃源岩主要发育带,其超压存在生烃增压成因的贡献,而冷家地区则伴有成岩作用导致的超压贡献。此外,冷家—雷家地区位于西部凹陷的压扭被动走滑区,晚期的走滑变形作用可对冷家—雷家段形成构造挤压,为超压形成和保持提供条件。

4 超压对油气成藏的影响

冷家—雷家地区为超压型、常压型和低压型组成的复合地层温度-压力系统,不同地层温度-压力系统的组合对于油气的运移过程具有控制作用。如超压型地层温度-压力系统内部具有较高的能量,当该系统

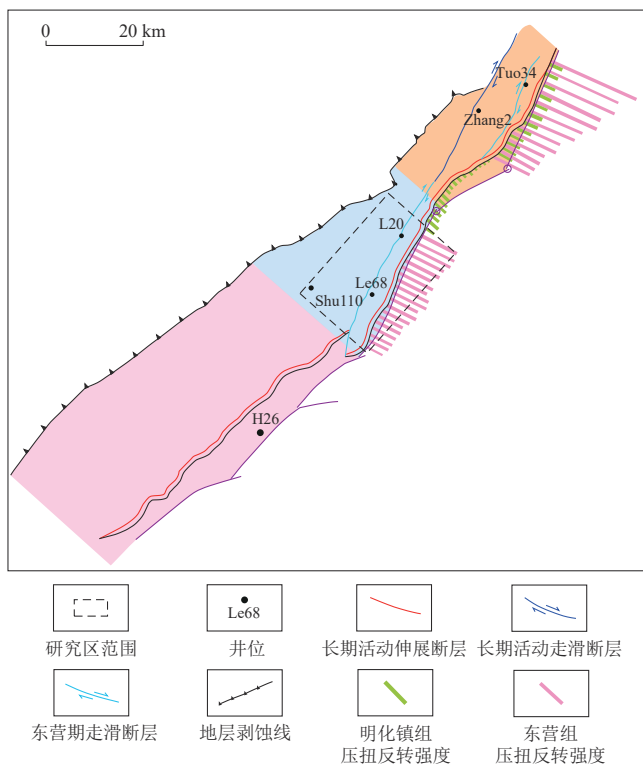


图8 辽河拗陷西部凹陷构造变形分区

Fig. 8 Structural deformation zonation map in the Western Sag, Liaoh Depression

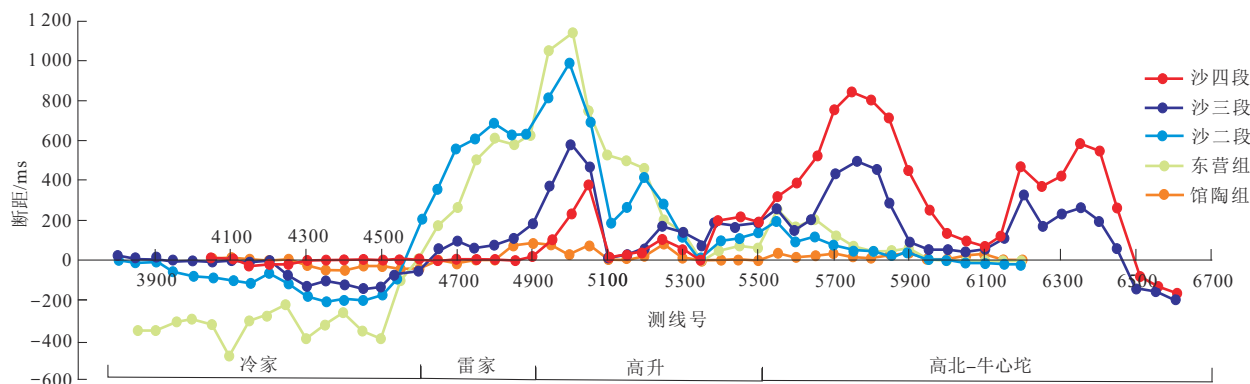


图9 辽河拗陷西部凹陷陈家—冷家断裂断距-距离曲线

Fig. 9 Curves of distance versus the throw of the Chenjia-Lengjia fault in the Western Sag, Liaohe Depression

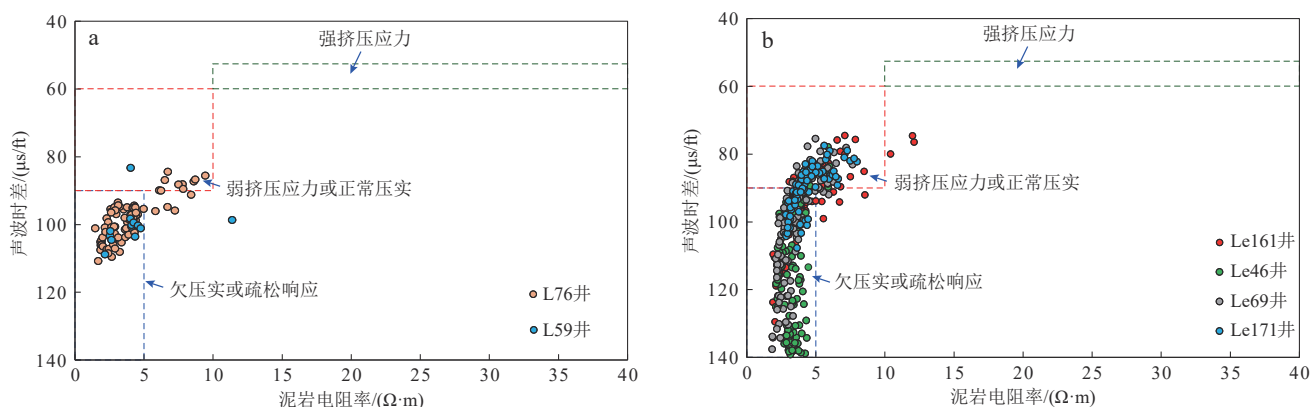


图10 辽河拗陷西部凹陷中段冷家(a)和雷家地区(b)泥岩构造挤压成因超压判别图版

Fig. 10 Identification plots for tectonic compression-induced overpressure in mudstones in the Lengjia (a) and Leijia (b) areas of the central Western Sag, Liaohe Depression

发育在地层深部时,将使深部流体具有向浅部层位运移的趋势。深部的油气会沿着断层、裂隙从深部层位垂向运移到该系统内的浅部层系的圈闭中聚集,或沿跨压力系统断层实现跨系统运移,即运移到其上部的常压或低压型地层温度-压力系统。

西部凹陷生烃高峰期在为沙三段沉积晚期,此时间可作为沙四段和沙三段油气藏的最早成藏时间;在沙二段和沙一段沉积时期,凹陷先整体稳定沉降,此时沙四段和沙三段持续生烃,从沙一段沉积末期—东营组沉积末期,整个凹陷经历了大范围强烈的构造抬升,油气开始大规模运移并成藏^[43-44]。冷家—雷家地区主要的成藏期在东营组沉积时期(30~27 Ma),沙二段、沙一段和东营组沉积时期为主要的排烃期,且发育多套供烃源岩层,为双源供烃。其中沙三段主要为冷家地区供烃,而沙四段则为北部雷家—高升地区供烃(图11)。沙三段和沙四段在洼陷带为深部超压型地层温度-压力系统,在东部陡坡带和雷家段发育常压和低压型地层温度-压力系统,不同区域具有不同的运聚过程。沙三段和沙四段2套源岩均发育超压,但

供烃方向的差异指示这2套超压层中存在分割层,导致沙四段的原油难以垂向跨越分隔层进入沙三段储层,而陈家断层进一步阻止沙四段原油向陡坡带发生侧向运移,因此,沙四段原油在凹陷中的超压带主要是自生自储型聚集,向北部则通过砂体和断裂的输导在雷家—高升地区的高部位聚集成藏。沙三段烃源生成的油气在凹陷中的超压带(沙三下亚段—沙三中亚段)主要是自生自储型聚集,向东南部通过断裂和砂体的输导在冷家地区高部位聚集成藏,实现了跨压力系统运移。目前,西部凹陷中部冷家—雷家地区在洼陷内中—深层沙三段已有规模性油气发现,表现为超压带内部的自生自储型聚集模式,而沙四段勘探程度相对较低,本研究证实烃源岩、成藏动力方面并非制约沙四段成藏的因素,因此,对于研究区中—深层沙四段下一步攻关方向为寻找有效的储层砂体和圈闭。

5 结论

1) 西部凹陷中段冷家—雷家地区为超压型、常压

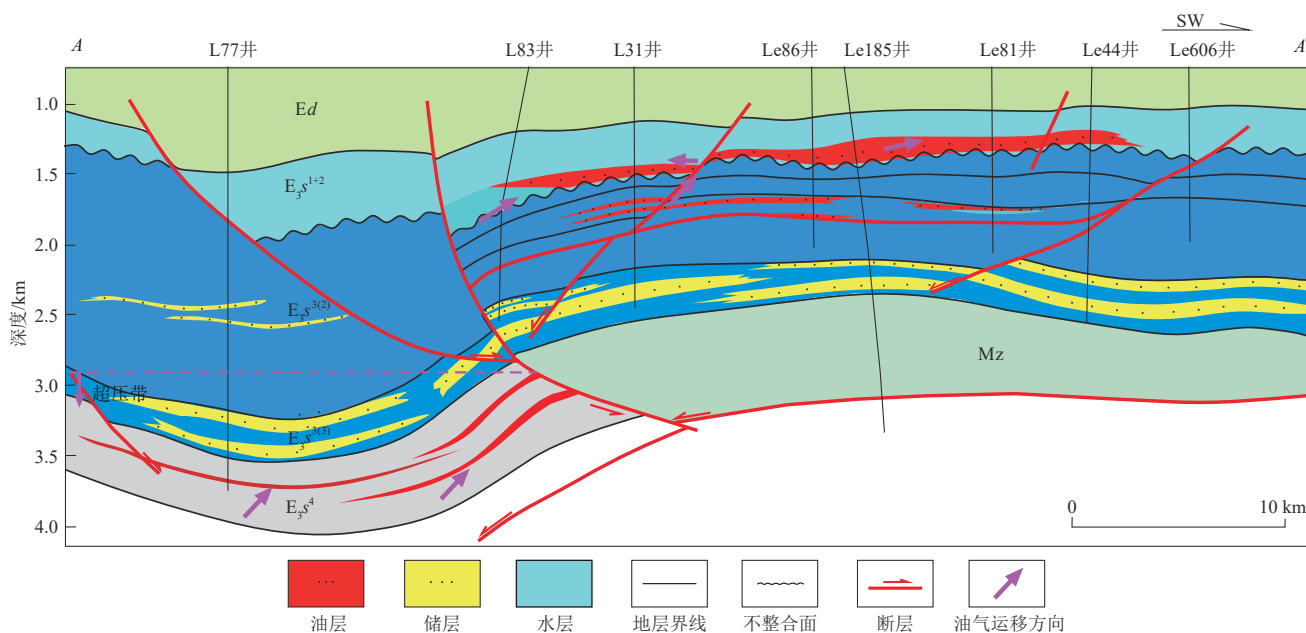


图11 辽河拗陷西部凹陷冷家—雷家地区走滑区陡坡带成藏模式(剖面位置见图1b)

Fig. 11 Hydrocarbon accumulation model of the steep slope zone of the Lengjia-Leijia area in the Western Sag, Liaohe Depression

型和低压型组成的复合型地层温度-压力系统,中-深层超压段主要分布在深度2 500~4 000 m,超压发育层位及分布范围存在差异。冷家地区超压主要发育层位为沙三段,表现为强的超压系统,雷家地区沙四段发育弱超压。

2) 冷家—雷家地区超压以欠压实作用为主,主要形成于沙三段沉积时期,在陈家洼陷的烃灶区存在生烃增压的贡献,冷家地区则伴有成岩作用导致的超压贡献,同时,台安-大洼断裂的沙一段、沙二段和东营组沉积时期的强烈走滑变形作用在冷家—雷家段产生的构造挤压有利于超压形成和保持。

3) 西部凹陷中段主要存在2种运聚成藏模式,分别为洼陷带内沙三段和沙四段超压型地层温度-压力系统内部的自生自储型运聚过程和洼陷带超压区向高位常压/低压带的运聚过程。后者主要表现为陈家洼陷沙四段烃源岩在超压驱动下向雷家和高升构造带的原油充注,和冷家地区沙三下亚段-沙三中亚段超压带通过断裂和砂体的输导在东部陡坡带和兴隆台潜山的充注模式。

参 考 文 献

- [1] 侯彦东. 陈家洼陷沙三段油气藏成藏条件研究[J]. 断块油气田, 2001, 8(4): 1-3.
HOU Yandong. Forming conditions of the third section of sandstone reservoir in Chenjia Depression [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2001, 8(4): 1-3.
- [2] 高喆. 冷家堡地区成藏规律研究[J]. 黑龙江科技信息, 2015

(32): 97.

GAO Zhe. Study on reservoir-forming regularity in Lengjiapu area [J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2015 (32): 97.

- [3] 冯冲, 姚爱国, 汪建富, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷异常高压分布和形成机理[J]. 新疆石油地质, 2014, 35(6): 640-645.

FENG Chong, YAO Aiguo, WANG Jianfu, et al. Abnormal pressure distribution and formation mechanism in Mahu Sag, Junggar Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2014, 35(6): 640-645.

- [4] 阿布力米提·依明, 唐勇, 曹剑, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷下三叠统百口泉组源外“连续型”油藏成藏机理与富集规律[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(2): 241-250.

IMIN Ablimit, TANG Yong, CAO Jian, et al. Accumulation mechanism and enrichment rules of the continuous hydrocarbon plays in the Lower Triassic Baikouquan Formation of the Mahu Sag, Junggar Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(2): 241-250.

- [5] 支东明. 玛湖凹陷百口泉组准连续型高效油藏的发现与成藏机制[J]. 新疆石油地质, 2016, 37(4): 373-382.

ZHI Dongming. Discovery and hydrocarbon accumulation mechanism of quasi-continuous high-efficiency reservoirs of Baikouquan Formation in Mahu Sag, Junggar Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2016, 37(4): 373-382.

- [6] 李志, 方朝亮, 魏立春. 辽河盆地东部凹陷异常高压油气藏成藏模式[J]. 中国石油勘探, 2002, 7(3): 20-24, 6.

LI Zhi, FANG Chaoliang, WEI Lichun. Formation models for oil and gas reservoirs with abnormal high pressure in eastern sag of Liaohe Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2002, 7(3): 20-24, 6.

- [7] MENG Yuanlin, ZHANG Lei, QU Guohui, et al. Diagenetic characteristics under abnormally low pressure: A case from the

- Paleogene of southern Western Sag, Liaohe Depression, Bohai Bay Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(4): 731-736.
- [8] 焦金鹤. 辽河西部凹陷南段异常压力成岩作用研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2013.
- JIAO Jinhe. Diagenesis of abnormal pressure in the southern fault block of Liao He Xi Bu Depression [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2013.
- [9] 张占文, 程敏, 陈永成. 辽河盆地地层流体超压体系特点及封盖能力[J]. *断块油气田*, 1999, 6(1): 13-16.
- ZHANG Zhanwen, CHENG Min, CHEN Yongcheng. Feature and blocking capability of formation fluid geopressured system about Liaohe Basin [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 1999, 6(1): 13-16.
- [10] 李毅, 方石, 孙平昌, 等. 辽河盆地西部凹陷沙河街组古近系页岩气成藏地质条件研究[J]. *地质与资源*, 2017, 26(2): 140-146.
- LI Yi, FANG Shi, SUN Pingchang, et al. Geological conditions of shale gas accumulation of Paleogene Shahejie Formation in the western sag of Liaohe Basin [J]. *Geology and Resources*, 2017, 26(2): 140-146.
- [11] 董甜甜. 辽河坳陷西部凹陷天然气藏分布特征与成藏模式[J]. *河北地质大学学报*, 2017, 40(3): 6-12.
- DONG Tiantian. Distribution and hydrocarbon accumulation mode of natural gas in the west depression, Liaohe Basin [J]. *Journal of Hebei GEO University*, 2017, 40(3): 6-12.
- [12] 张一伟, 方朝亮, 谭时勇, 等. 冷东—雷家地区复杂陡坡带砾岩稠油油藏成油条件及分布模式[J]. *石油学报*, 1994, 15(增刊1): 159-170.
- ZHANG Yiwei, FANG Chaoliang, TAN Shiyong, et al. Formation and distribution of conglomeratic heavy oil reservoir in the complex steep slope zone in Lengdong-Leijia area, Liaohe Depression [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1994, 15(S1): 159-170.
- [13] 周琦, 丁文龙, 刘旭龙, 等. 辽河西部凹陷冷家—雷家地区构造特征与圈闭研究[J]. *石油地质与工程*, 2011, 25(3): 12-14, 5.
- ZHOU Qi, DING Wenlong, LIU Xulong, et al. Structural characteristics and trap research of Liaohe western depression Lengjia-Leijia area [J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2011, 25(3): 12-14, 5.
- [14] 赖生华, 麻建明. 辽河盆地冷家油田沙河街组三段储层岩相古地理[J]. *沉积与特提斯地质*, 2005, 25(3): 46-51.
- LAI Shenghua, MA Jianming. Sedimentary facies and palaeogeography of the third member of the Shahejie Formation in the Lengjia oil field, Liaohe Basin, Liaoning [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2005, 25(3): 46-51.
- [15] 孙洪斌, 张凤莲. 断陷盆地优质储层的成因——以辽河坳陷古近系沙河街组储层为例[J]. *岩性油气藏*, 2009, 21(1): 51-54.
- SUN Hongbin, ZHANG Fenglian. Origin of high-quality reservoir in fault basin: An example from Paleogene Shahejie reservoir in Liaohe Depression [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2009, 21(1): 51-54.
- [16] 陈振岩, 陈永成, 仇劲涛, 等. 辽河盆地新生代断裂与油气关系[J]. *石油实验地质*, 2002, 24(5): 407-412.
- CHEN Zhenyan, CHEN Yongcheng, QIU Jintao, et al. Relationship between the Cenozoic faults and hydrocarbon in the Liaohe Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2002, 24(5): 407-412.
- [17] 孙洪斌, 张凤莲. 辽河坳陷古近系构造-沉积演化特征[J]. *岩性油气藏*, 2008, 20(2): 60-65, 73.
- SUN Hongbin, ZHANG Fenglian. Structural-sedimentary evolution characteristics of Paleogene in Liaohe Depression [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2008, 20(2): 60-65, 73.
- [18] 孟卫工, 陈振岩, 赵会民. 辽河西部凹陷曙光—雷家地区隐蔽油气藏主控因素及分布规律[J]. *中国石油勘探*, 2010, 15(3): 1-7.
- MENG Weigong, CHEN Zhenyan, ZHAO Huimin. Main factors controlling hydrocarbon and distribution rules of subtle reservoirs in Shuguang-Leijia area of western sag of Liaohe Oilfield [J]. *China Petroleum Exploration*, 2010, 15(3): 1-7.
- [19] 李明刚, 漆家福, 童亨茂, 等. 辽河西部凹陷新生代断裂构造特征与油气成藏[J]. *石油勘探与开发*, 2010, 37(3): 281-288.
- LI Minggang, QI Jiafu, TONG Hengmao, et al. Cenozoic fault structure and hydrocarbon accumulation in western sag, Liaohe Depression [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2010, 37(3): 281-288.
- [20] 刘国平, 董少群, 李洪楠, 等. 辽河盆地西部凹陷古潜山天然裂缝特征及其影响因素[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(3): 525-533.
- LIU Guoping, DONG Shaoqun, LI Hongnan, et al. Characteristics of natural fractures and their influencing factors in the paleo-buried-hill reservoirs of the western sag in the Liaohe Basin, China [J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(3): 525-533.
- [21] 杜棚, 郑洪印, 焦秀琼. 异常压力与油气分布[J]. *地学前缘*, 1995, 2(4): 137-148.
- DU Xu, ZHENG Hongyin, JIAO Xiuqiong. Abnormal pressure and hydrocarbon accumulation [J]. *Earth Science Frontiers*, 1995, 2(4): 137-148.
- [22] 《地质科技情报》编辑部. 《超压盆地生烃作用动力学与油气成藏机理》简介[J]. *地质科技情报*, 2005, 24(2): 50.
- Editorial Department of Bulletin of Geological Science and Technology. 《Hydrocarbon generation kinetics and hydrocarbon accumulation mechanism in overpressured basin》Abstract [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2005, 24(2): 50.
- [23] 刘震, 张万选, 曾宪斌, 等. 含油气盆地地温-地压系统浅析[J]. *天然气地球科学*, 1996, 7(1): 34-38.
- LIU Zhen, ZHANG Wanxuan, ZENG Xianbin, et al. A brief analysis of geothermal pressure system in petroliferous basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 1996, 7(1): 34-38.
- [24] 刘震, 曾宪斌, 张万选. 沉积盆地地温与地层压力关系研究[J]. *地质学报*, 1997, 71(2): 180-185.
- LIU Zhen, ZENG Xianbin, ZHANG Wanxuan. Relation between subsurface temperatures and formation pressures in sedimentary basins [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1997, 71(2): 180-185.
- [25] 曾宪斌, 刘震, 张万选. 地下温-压体系相关性理论研究[J]. *天然气地球科学*, 1997, 8(1): 23-27.
- ZENG Xianbin, LIU Zhen, ZHANG Wanxuan. Theoretical study

- on the correlation of subsurface temperature-pressure system[J]. *Natural Gas Geoscience*, 1997, 8(1): 23-27.
- [26] 鲁雪松, 赵孟军, 张凤奇, 等. 准噶尔盆地南缘前陆冲断带超压发育特征、成因及其控藏作用[J]. *石油勘探与开发*, 2022, 49(5): 859-870.
- LU Xuesong, ZHAO Mengjun, ZHANG Fengqi, et al. Characteristics, origin and controlling effects on hydrocarbon accumulation of overpressure in foreland thrust belt of southern margin of Junggar Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2022, 49(5): 859-870.
- [27] LI Chao, ZHANG Likuan, LUO Xiaorong, et al. Overpressure generation by disequilibrium compaction or hydrocarbon generation in the Paleocene Shahejie Formation in the Chechen Depression: Insights from logging responses and basin modeling[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2021, 133: 105258.
- [28] LI Jun, ZHAO Jingzhou, HOU Zhiqiang, et al. Origins of overpressure in the central Xihu Depression of the East China Sea shelf basin[J]. *AAPG Bulletin*, 2021, 105(8): 1627-1659.
- [29] ZHANG Fengqi, LU Xuesong, BOTTERILL S, et al. Horizontal tectonic stress as a cause of overpressure in the southern margin of the Junggar Basin, northwest China[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, 205: 108861.
- [30] 张凤奇, 鲁雪松, 卓勤功, 等. 准噶尔盆地南缘下组合储层异常高压成因机制及演化特征[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(5): 1004-1016.
- ZHANG Fengqi, LU Xuesong, ZHUO Qingong, et al. Genetic mechanism and evolution characteristics of overpressure in the lower play at the southern margin of the Junggar Basin, northwestern China[J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(5): 1004-1016.
- [31] 徐泽阳, 赵靖舟, 李军. 松辽盆地长垣地区白垩系青山口组一段有机质含量对超压分析的影响及校正方法[J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(4): 938-946.
- XU Zeyang, ZHAO Jingzhou, LI Jun. The impact of organic matter content on overpressure analysis and its correction method in the first member of Cretaceous Qingshankou Formation, Placanticline area, Songliao Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(4): 938-946.
- [32] LUO Xiaorong, VASSEUR G. Contributions of compaction and aquathermal pressuring to geopressure and the influence of environmental conditions[J]. *AAPG Bulletin*, 1992, 76(10): 1550-1559.
- [33] 罗晓容. 前陆盆地异常流体压力: 地质作用及其增压效率[J]. *地质科学*, 2013, 48(1): 32-49.
- LUO Xiaorong. Overpressuring in foreland basins: Geological affects and their efficiency[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2013, 48(1): 32-49.
- [34] OSBORNE M J, SWARBRICK R E. Mechanisms for generating overpressure in sedimentary basins: A reevaluation[J]. *AAPG Bulletin*, 1997, 81(6): 1023-1041.
- [35] 赵晓阳, 代宗仰, 李阳, 等. 运用压实模拟实验进行埋藏史恢复: 以辽河西部凹陷雷家地区沙四段为例[J]. *地质科技通报*, 2021, 40(6): 165-177, 215.
- ZHAO Xiaoyang, DAI Zongyang, LI Yang, et al. Using compaction simulation experiment to recover burial history: Taking the Fourth Member of Shahejie Formation in Leijia area, western depression of Liaohe River as an example[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2021, 40(6): 165-177, 215.
- [36] BOWERS G L. Pore pressure estimation from velocity data: Accounting for overpressure mechanisms besides undercompaction[J]. *SPE Drilling and Completion*, 1995, 10(2): 89-95.
- [37] 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.
- [38] 范昌育, 王震亮, 王爱国, 等. 柴达木盆地北缘鄂博梁构造带超压形成机制与高压气、水层成因[J]. *石油学报*, 2015, 36(6): 699-706, 714.
- FAN Changyu, WANG Zhenliang, WANG Aiguo, et al. Mechanisms for overpressure generation and origin of overpressured gas and aquifer layers, Eboliang structure belt, northern Qaidam Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(6): 699-706, 714.
- [39] LI Chao, LUO Xiaorong, ZHANG Likuan, et al. Overpressure generation mechanisms and its distribution in the Paleocene Shahejie Formation in the Linnan Sag, Huimin Depression, eastern China[J]. *Energies*, 2019, 12(16): 3183.
- [40] 赵靖舟, 李军, 徐泽阳. 沉积盆地超压成因研究进展[J]. *石油学报*, 2017, 38(9): 973-998.
- ZHAO Jingzhou, LI Jun, XU Zeyang. Advances in the origin of overpressures in sedimentary basins[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38(9): 973-998.
- [41] 王志宏, 郝翠果, 李建明, 等. 川西前陆盆地超压分布及成因机制[J]. *岩性油气藏*, 2019, 31(6): 36-43.
- WANG Zhihong, HAO Cuiguo, LI Jianming, et al. Distribution and genetic mechanism of overpressure in western Sichuan foreland basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2019, 31(6): 36-43.
- [42] 李军, 张超谟, 王贵文, 等. 挤压盆地泥岩对地应力响应特征机理及地质应用[J]. *测井技术*, 2004, 28(2): 141-144, 179.
- LI Jun, ZHANG Chaomo, WANG Guiwen, et al. Shale responses to terrestrial-stress, response mechanism and application in the tectonic compressive areas[J]. *Well Logging Technology*, 2004, 28(2): 141-144, 179.
- [43] 徐波, 郭华强, 林拓, 等. 辽河坳陷西部凹陷油气成藏期次[J]. *油气地质与采收率*, 2010, 17(1): 12-14.
- XU Bo, GUO Huaqiang, LIN Tuo, et al. Research on hydrocarbon accumulation stage in west Liaohe Depression[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2010, 17(1): 12-14.
- [44] 游国庆, 潘家华, 张可宝, 等. 辽河坳陷西部凹陷高升北部地区古近系油气成藏条件分析[J]. *地球学报*, 2006, 27(3): 241-246.
- YOU Guoqing, PAN Jiahua, ZHANG Kebao, et al. An analysis of the conditions for the formation of oil and gas accumulations in northern Gaosheng area within the western depression of Liaohe Sag[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2006, 27(3): 241-246.