

引用: 张锐锋, 陈树光, 冯广业, 等. 临河坳陷北部古近系临河组超深层油气藏形成条件与勘探前景[J]. 中国石油勘探, 2024,29(1):119-129.
Zhang Ruifeng, Chen Shuguang, Feng Guangye, et al. Hydrocarbon accumulation conditions and exploration prospects of ultra-deep oil and gas reservoirs in the Paleogene Linhe Formation in the northern Linhe Depression, Hetao Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2024,29(1):119-129.

临河坳陷北部古近系临河组超深层油气藏形成条件 与勘探前景

张锐锋¹ 陈树光¹ 冯广业¹ 师玉雷¹ 胡延旭¹ 孙瑞娜² 万照飞³ 武函¹ 田思思¹
张宇飞⁴ 汪关妹³ 周然然¹ 罗玉财¹ 王孝超¹ 张晰蒙¹

(1 中国石油华北油田公司; 2 中国石油油气和新能源分公司; 3 中国石油集团东方地球物理公司华北研究中心;
4 中国石油集团测井有限公司院士工作站)

摘要: 近年来, 通过加大深层—超深层碎屑岩晚期油气成藏地质认识研究, 在河套盆地临河坳陷实现了超深层碎屑岩油气勘探的重大发现。基于对临河坳陷古近系烃源岩热模拟、钻录试井资料及成储成藏演化分析, 主要形成3点地质认识: (1) 临河坳陷北部古近系发育富含树脂体(陆源)和藻类体(水生)的优质烃源岩, 该烃源岩在低演化阶段开始大量生排烃, 具有生烃强度大、生烃窗口宽的特点, 淖西洼槽带超深层热演化程度相对较高, 油气资源潜力大; (2) 发育远源水浅坡缓大型辫状河三角洲沉积, 砂体广覆式分布, 受低地温、晚深埋、高石英含量、弱压实、弱胶结等弱成岩因素影响, 形成了以弱成岩保孔主导、叠加后生超高压改造扩缝的成储新机制, 储层物性好, 极大拓展了超深层油气勘探空间; (3) 生烃期早充注、持续沉降深埋热演化、加速生排烃和持续充注形成过饱和与超高压油气藏, 而超高压一旦超过储源交互体破裂压力, 形成缝孔连通、源储同聚、连续型大面积展布的常规油气成藏新认识, 有力提高了超深层常规油气藏勘探潜力。临河坳陷北部古近系临河组超深层油气成藏条件优越, 有利勘探区规模大, 展现了良好的勘探前景, 同时进一步丰富了超深层碎屑岩晚期油气成藏理论认识, 对类似盆地尤其是万米超深层的源内勘探具有重要指导意义。

关键词: 临河坳陷; 古近系; 超深层; 超高压; 千吨井

中图分类号: TE112.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-7703.2024.01.009

Hydrocarbon accumulation conditions and exploration prospects of ultra-deep oil and gas reservoirs in the Paleogene Linhe Formation in the northern Linhe Depression, Hetao Basin

Zhang Ruifeng¹, Chen Shuguang¹, Feng Guangye¹, Shi Yulei¹, Hu Yanxu¹, Sun Ruina², Wan Zhaoifei³, Wu Han¹, Tian Sisi¹,
Zhang Yufei⁴, Wang Guanmei³, Zhou Ranran¹, Luo Yucai¹, Wang Xiaochao¹, Zhang Ximeng¹

(1 PetroChina Huabei Oilfield Company; 2 PetroChina Oil, Gas & New energies Company; 3 North China Research Center, BGP Inc.,
CNPC; 4 Academician Workstation, CNPC Logging Co., Ltd.)

Abstract: In recent years, the geological understanding of late hydrocarbon accumulation in deep to ultra-deep clastic rocks has been

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司“攻关性、应用性”重大科技专项“超深层碎屑岩油气规模增储上产与勘探开发技术研究”(2023ZZ14)。

第一作者简介: 张锐锋(1964—), 男, 山西寿阳人, 博士, 2005年毕业于中国地质科学院, 教授级高级工程师, 现从事石油地质综合研究与油气勘探工作。地址: 河北省任丘市会战道华北油田公司, 邮编: 062552。E-mail: ktb_zrf@petrochina.com.cn

通信作者简介: 陈树光(1984—), 男, 山东阳谷人, 博士, 2015年毕业于中国地质大学(武汉), 高级工程师, 主要从事含油气盆地地质综合研究。地址: 河北省任丘市建设路华北油田公司勘探开发研究院, 邮编: 062552。E-mail: wty_csg@petrochina.com.cn

收稿日期: 2023-12-22; 修改日期: 2024-01-06

deepened, and a major oil and gas discovery has been achieved in ultra-deep clastic rocks in Linhe Depression in Hetao Basin. Based on the thermal simulation of the Paleogene source rock, well drilling, logging and testing data, and analysis of reservoir formation and hydrocarbon accumulation evolution, the new geological understanding has been formed in three aspects: (1) The high-quality source rocks rich in resinite (terrestrial) and algae (aquatic) were developed in the Paleogene in the northern Linhe Depression, which generated and expelled a large amount of hydrocarbon in the low thermal evolution stage, and showed characteristics of high intensity and wide window of hydrocarbon generation. The source rock in ultra-deep Naoxi trough has a high thermal evolution degree and great potential of oil and gas resources. (2) The large-scale braided river delta deposits were developed in the far-source shallow and gentle slope, with sand body widely distributed. Affected by weak diagenetic factors such as low formation temperature, late deep burial, high quartz content, weak compaction and weak cementation, a new reservoir formation mechanism is formed, which is dominated by weak diagenesis for pore maintenance, and superimposed by epigenetic ultra-high pressure transformation and fracture expansion. The reservoir has good physical properties, greatly expanding the space for petroleum exploration in ultra-deep formations. (3) A new understanding of hydrocarbon accumulation is put forward, which includes the initial oversaturated and ultra-high pressure oil and gas reservoirs in hydrocarbon generation period formed by the early hydrocarbon charging, continuous subsidence, deep burying and thermal evolution, accelerated hydrocarbon generation, expulsion, and continuous charging, and ultimately the late hydrocarbon accumulation of conventional oil and gas reservoirs once the fracture pressure of reservoir-source rock interaction body is broken through by ultra-high pressure, with characteristics of fracture-pore connection, accumulation in both source rock and reservoir, and continuous and large-area distribution, greatly improving the exploration potential. The hydrocarbon accumulation conditions in the ultra-deep Paleogene Linhe Formation in the northern Linhe Depression are superior, and the favorable exploration area is large, showing promising exploration prospects. Meanwhile, the new theoretical understanding of late hydrocarbon accumulation in the ultra-deep clastic rocks has important guiding significance for the exploration in similar basins, especially for the inside-source exploration in ultra-deep formations with a burial depth of 10000 meters.

Key words: Linhe Depression, Paleogene, ultra-deep formation, ultra-high pressure, oil well with a flow rate of thousand tons

0 引言

随着全球能源需求的日益增长和油气探明程度逐年加深,油气勘探向更复杂领域拓展,深层—超深层及非常规领域已成为未来油气勘探的重要趋势^[1-3]。目前国内外在超深层碎屑岩领域油气勘探方兴未艾,尤其是天然气藏对储集空间要求相对较低,超深层碎屑岩油气勘探下限不断刷新,如国内塔里木盆地库车坳陷克拉苏构造带在 6000~8000m 白垩系超高压裂缝性致密砂岩储层中获高产油气流,成为国内发现的埋藏最深的高产碎屑岩油气藏^[4]。在超深层碎屑岩领域,古近系及更早地层受埋深、高温、压实、胶结等作用影响,现今往往表现出岩性致密、储集物性差和孔隙结构复杂的特征。据统计,全球已发现的深层油气藏以气藏和油气藏为主,真正能保留较高储集物性、以油为主(热演化程度较低)的油藏较少^[5]。

2020 年,在临河坳陷中一深层先后部署风险探井临华 1X 井和预探井兴华 1 井,取得临河坳陷北部石油勘探重大突破后,发现了大型整装碎屑岩规模富集油藏,展现了临河坳陷良好勘探潜力^[6]。同时揭示了该地区古近系临河组受低地温(地温梯度为 2~2.5℃/100m)、晚深埋(5.3Ma 以来快速沉降)、远物源(石英含量高)、弱胶结(3m 以上厚砂体胶结物含量一般小于 5%)等因素影响,储层表现为弱压实、弱胶结主导的弱成岩作用,成岩演化相对滞后,保留了大量原生孔隙,可极大拓展有效储层下限,为

超深层油气勘探提供有利条件。另外,淖西洼槽带超深层发育更厚的优质烃源岩,资源潜力大,受晚深埋、晚生烃(指生烃绝对时间晚——5.3Ma 以来)、晚成藏影响,原油运移距离短,形成环洼近源富集的油气成藏特点^[7]。基于此,2021 年在临洼有利构造高部位部署风险探井河探 1 井^[8],在古近系临河组 6112~6120m 试油获 302m³ 高产油流,地层压力系数达 1.5,形成超高压油藏,自喷试采两年,产量稳定,证实淖西洼槽带超深层巨大的勘探潜力。2022 年向淖西洼槽带超深层进军,部署河探 101 井,2023 年在古近系 6557.0~6566.2m 试油 10mm 油嘴自喷,获得日产油 1285.77m³ (1084.8t)、日产气 1.07×10⁴m³ 的高产油气流,一跃成为国内超深层碎屑岩领域首口千吨油气井,也再次揭示临河坳陷超深层碎屑岩领域巨大的勘探潜力,同时亟须搞清其特高产形成地质条件、控制因素及勘探前景。为此,本文对古近系生烃机理、超深层碎屑岩成储机理及油气成藏演化开展重点研究,以期快速精准落实临河坳陷超深层油气资源规模及为超深层碎屑岩领域油气持续勘探与规模发现提供重要支撑。

1 地质概况

临河坳陷位于河套盆地西部,北邻色尔腾山,东接鄂尔多斯高原,东南与桌子山毗邻,西至狼山,为北北东—东西向弧形展布的中—新生代拗断叠合坳陷,具有面积大(2.24×10⁴km²)、埋藏深(最大基底埋深

超 $1.4 \times 10^4 \text{m}$) 的特点^[9-10]。整体具有东西分带、南北分区结构特征,以吉北变换带为界,南北划分2个凹陷,以北地区为巴彦淖尔凹陷,以南地区为吉兰泰凹陷。其中,自西北向东南,巴彦淖尔凹陷划分为

淖西洼槽带、兴隆断裂构造带、纳林湖断裂潜山带、乌兰布和走滑构造带、黄河断槽带和五原斜坡带;吉兰泰凹陷划分为吉西洼槽、吉兰泰构造带、沙布构造带和吉东斜坡(图1)。

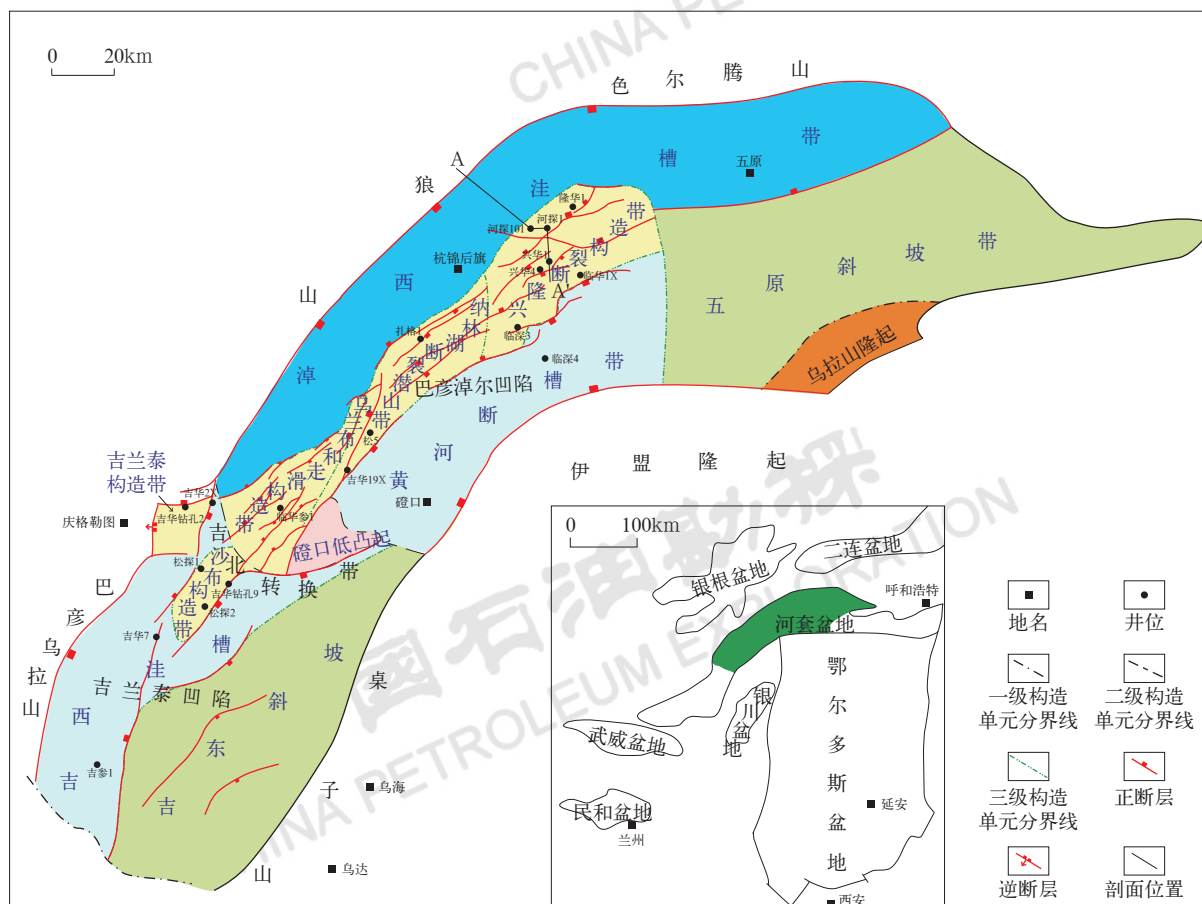


图1 河套盆地临河拗陷构造单元划分图

Fig.1 Division of structural units in Linhe Depression in Hetao Basin

临河拗陷北部超深目的层经历了古近纪弱伸展断拗期(处于沉降/沉积中心,为负向结构)、新近纪强伸展断陷期(沉降中心向狼山断层下降盘迁移,研究区转为正向结构,形成受兴隆大型滑脱断层控制的断鼻构造)及第四纪走滑改造期^[8]。主要目的层为古近系临河组,沉积期盆地处于断拗期,整体地形较为平缓,狼山和伊盟隆起尚未成型,物源主要来自东南部成山较早、高差较大的桌子山、南侧贺兰山、巴彦乌拉山等,形成远源坡缓水浅的大型辫状河三角洲沉积体系。淖西洼槽带超深层砂地比适中(20%~30%),源储互生,生储盖组合好,尤其是新近系五原组发育一套超千米厚、以红色泥岩为主的沉积盖层,形成良好盖层和断层侧向封堵条件,对油气成藏有利。

2 油气成藏条件

2.1 烃源岩特征

关于临河拗陷烃源岩基本特征及分布,不少学者基于早期钻井资料做了相关研究指出^[10-12],临河拗陷主要发育白垩系和古近系两套烃源岩,其中古近系临河组烃源岩主要分布在临河拗陷中北部,表现为咸化湖沉积特点,具有演化程度低、高效生排烃的成烃特征。而关于研究区优质烃源岩的成烃环境及其成烃机制研究较少,本文通过开展地球化学分析及热模拟研究,进一步明确了临河拗陷古近系临河组烃源岩成烃机制,为下一步精准资源潜力评价提供重要参考。

幅提高生烃转化率, 同时最大产烃率超过 600mg/g (HC/TOC), 供油窗口宽 (R_o 在 $0.5\%\sim 3\%$ 之间), 最新评估临河坳陷油气资源量为“十三五”期间的 2.5 倍, 极大提高了临河坳陷油气勘探潜力。另外, 受生烃高峰窗口前移影响, 在低熟演化阶段已生成大量中质原油, 淖西洼槽带超深层 ($>6000\text{m}$) 热演化程度相对较高, 持续生排烃导致生烃增压。研究表明, 生烃作用是引起临河组烃源岩层产生超压的重要因素, 对临河组烃源岩层超压的贡献率为 $56.68\%\sim 89.30\%$; 超压传递主导了临洼构造带临河组储层的超压, 对该区域储层超压的贡献率为 $63.80\%\sim 96.09\%$ [15]。钻井揭示, 临河坳陷北部淖西洼槽带超深层地层压力系数达 $1.5\sim 2.2$, 为淖西洼槽带超深层超高压富集油气藏形成提供了重要条件。

2.2 沉积储层特征

通过露头观察、盆内古水流、轻矿物变化、砂地比及地震相特征分析 [16-17], 提出盆内主要发育以

来自东南部桌子山与南部贺兰山的 3 大物源体系为主的大型浅水辫状河三角洲沉积, 具有扇规模大、延伸距离远、矿物成分及结构成熟度高的特点, 尤其临河坳陷北部淖西洼槽带碎屑组分中石英含量高达 70% 以上 [7], 抗压实作用强, 为深层碎屑岩形成优质有效储层提供了良好的物质基础。

连井对比表明, 超深层砂地比相对较低 (约为 25%), 临一段以滨浅湖和席状砂为主, 岩性为暗色泥岩和粉砂岩, 局部发育以细砂岩为主的水下分流河道和河口坝, 单层砂体厚度较大 ($3\sim 10\text{m}$), GR 曲线表现为箱型或钟型特点, 砂岩岩性较纯, 电阻率相对较低, 平面分布范围较广, 连井对比效果好 (图 4), 是临河坳陷超深层优质储层发育的最有利相带。河探 1 井古近系 6037m 壁心实测孔隙度高达 18.2% , 河探 101 井 $6557\sim 6566\text{m}$ 测井解释孔隙度达 15.7% , 试油测试流动渗透率高达 226mD , 充分反映了储层砂体平面分布广, 横向连通性好, 为超深层寻找规模富集大油藏提供了重要条件。

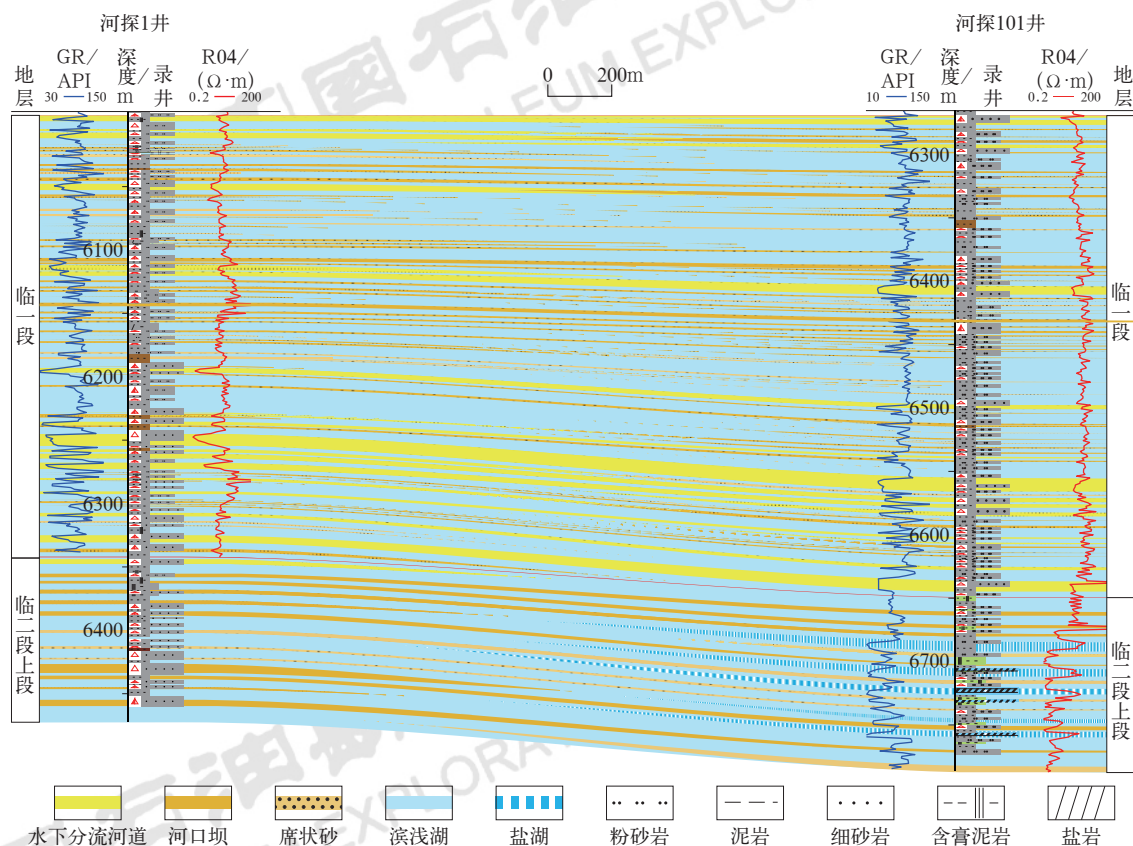


图 4 河探 1 井—河探 101 井临河组连井对比图

Fig.4 Well correlation section of Linhe Formation cross wells Hetan 1-Hetan 101

临河坳陷上新世 (5.3Ma) 以来开始快速沉降 [15], 深埋时间晚, 导致储层压实作用弱, 实际钻井揭示

4500m 以浅深层砂岩岩心较为疏松, 成岩作用不强, 已钻井实测地温梯度低 ($< 2.5^\circ\text{C}/100\text{m}$), 成岩

演化相对滞后,保留大量原生孔隙,具有明显弱成岩特点。河套盆地优质储层的孔隙度随埋深减小率为 $2\% \sim 3\%/1000\text{m}$,明显低于中国东部盆地,如渤海湾盆地冀中坳陷为 $7\%/1000\text{m}^{[7]}$,孔隙度随埋深减小率明显低于其他盆地是河套盆地特有地质背景下由弱成岩作用形成的一种独特现象。大量实验表明碎屑组分的差异对压实减孔效应具有重要影响,高刚性颗粒含量砂岩压实减孔速率明显慢于高塑性颗粒含量砂岩(图5)。刚性颗粒含量为75%和25%的砂岩,在埋深为5000m时,孔隙度差值可达 $10\%^{[16]}$,说明刚性颗粒对粒间体积的有效保护。临河坳陷周缘物源区普遍以花岗片麻岩和石英片岩优质母岩类型为主,各区带砂岩中刚性颗粒总量达到85%以上(其他盆地均为 $30\% \sim 50\%$),抗压实能力强。

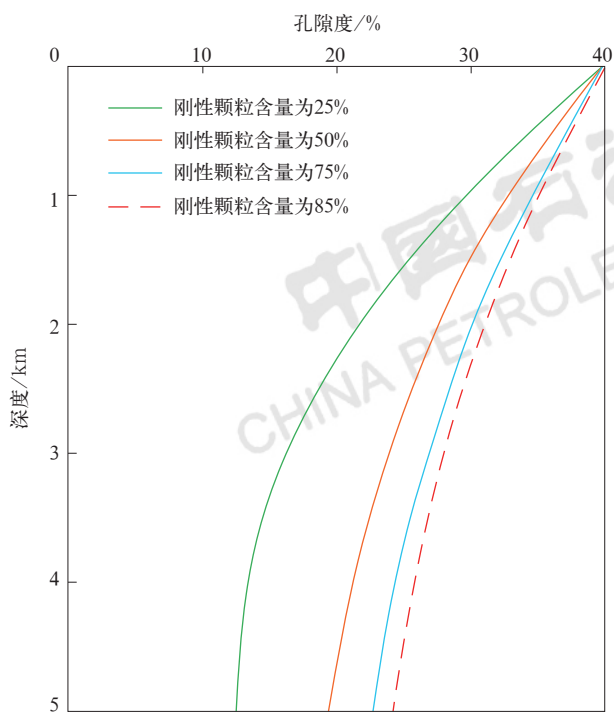


图5 临河坳陷临河组不同刚性颗粒含量储层孔隙度随深度变化图

Fig.5 Porosity change with depth of reservoirs with various contents of rigid particles in Linhe Formation in Linhe Depression

一般来说,胶结作用与砂岩的孔隙度、渗透率呈负相关的关系,主要是由于胶结物占据了砂岩的储集空间,并切割了砂岩的渗流通道,对储层的物性起到严重的破坏作用。河套盆地临河组胶结物含量低,胶结作用弱是深层保留一定原生孔隙、储层物性相对较

好的重要因素。统计不同厚度砂体胶结物含量表明,厚度小于1m的砂体胶结物含量平均大于12%,厚度为1~3m的砂体胶结物含量平均为 $5\% \sim 12\%$,厚度大于3m的砂体胶结物含量普遍小于5%(图6)。究其原因,一方面砂体连通性是控制胶结物含量的重要因素^[18],水下分流河道砂体连通性好,易于流体流动,导致胶结物含量低,临河坳陷临河组沉积期坡度较缓,易于砂体广覆式分布,砂体稳定且连通性好,是导致储层胶结作用弱的重要原因;另一方面,国内外研究表明,在储层埋藏成岩过程中,早期烃类充注后,油气占据大量孔喉空间,能够有效阻碍油气藏中孔隙水的流通和交换,造成孔隙水流动减缓和离子供给障碍,从而抑制甚至停止胶结作用,有效保存储层储集空间^[19-21]。临河坳陷发育早熟早排优质烃源岩,在低演化阶段开始大量生排烃,具有典型的早充注成藏的特点,对超深层原生孔隙和渗透率保存发挥重要的积极作用。因此,尽管晚期快速深埋导致温度达到中成岩A期,但是胶结作用并没有表现出相应强胶结的特征,使河套盆地形成储层胶结强度明显滞后于成岩演化阶段的一种特殊现象。尤其临河坳陷北部兴隆构造带优质储层中胶结物含量整体较低,胶结物未占据太多原生孔隙空间,使原生孔隙得以大量保留。整体上,弱压实、早充注、弱胶结主

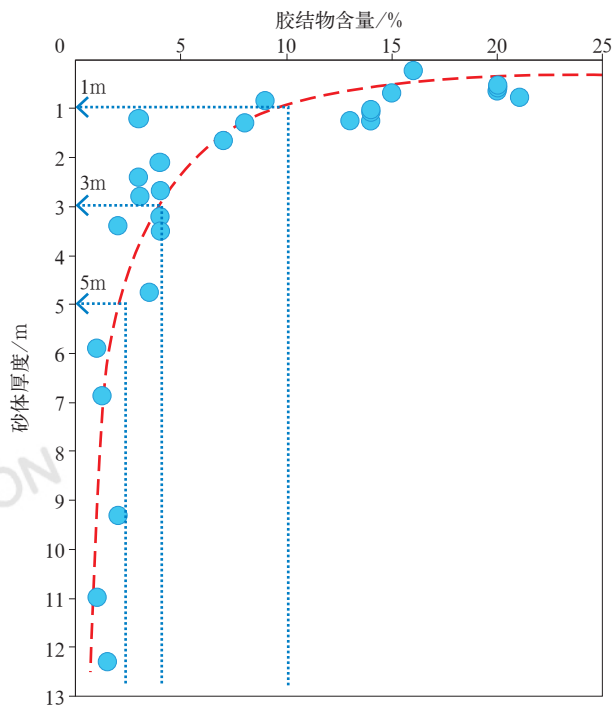


图6 临河坳陷临河组砂体厚度与胶结物含量关系图

Fig.6 Relationship between sandstone thickness and cement content in Linhe Formation in Linhe Depression

导的成储机理控制深层碎屑岩储层物性普遍好于同时期其他盆地。钻井揭示, 古近系临河组 4200~5600m 井段, 最大孔隙度为 27.3%, 有效储层孔隙度中值为 19.3%; 最大渗透率为 1320mD, 有效储层渗透率中值为 166mD, 为中孔—中渗型储层, 河探 1 井临河组井深 6037m 处井壁岩心孔隙度高达 18.2%, 再次证实河套盆地超深层碎屑岩依然可以发育中孔优质储层。

另外, 淖西洼槽带早熟早排优质烃源岩不仅早充注, 且持续强排烃强充注形成超高压油气藏(基于河探 1 井烃源岩过剩压力预测, 发现该井临河组不同层段源储压差为 32~57MPa)。当地层压力达到一定程度超过储层破裂压力下限时, 砂岩储层就很有可能开始由内及外发生破裂, 产生裂缝, 并进一步连通孔隙, 使储层物性尤其渗透率得到进一步改善, 进而形成孔缝型储层。超高压对储源交互体起改造作用, 形成缝孔连通、源储同聚、连续型常规油气藏是超深层形成千吨井特高产的重要原因。

2.3 保存条件

新近系五原组沉积期临河坳陷北部发育双断式地堑结构, 导致淖西洼槽带物源欠发育, 外部水系大量减少, 湖盆急剧萎缩, 发育 1500~1800m 厚、以红色泥岩(泥地比 >90%)为主的滨湖相沉积, 构成了下部临河组良好的盖层条件, 为河探 101 井所在光明构造超深层超高压油气藏形成提供了较好保存条件。同时, 光明构造为受大型顺向滑脱断层(兴隆断层)控制的大型逆牵引断背斜构造, 兴隆滑脱断层断距大(400~1500m), 该断层自古近纪以来开始活动, 但主要活动期为新近纪上新世, 断距在 300~1400m, 其他时期断距合计不足 100m。根据断层封闭机理, 兴隆断层上盘对接断层下盘乌拉特组和临三段以红色泥岩为主的沉积地层, 砂泥对接条件有利; 同时兴隆断层在新近纪上新世发生强伸展滑脱作用, 此时目的层成岩作用弱, 泥岩盖层塑性强, 发生滑脱作用时在断层面可形成良好的泥岩涂抹作用, 使断裂带的排替压力远大于油气运移压力, 断层封堵性好。尽管光明构造在新近纪晚期到第四纪发生走滑活动, 在逆牵引断背斜上部发育了部分负花状断裂, 但其断距(<100m)远小于上覆五原组泥岩盖层厚度, 根据泥岩涂抹因素(SSF)分析, 上覆走滑断层垂向输导能力较弱, 未能破坏超深层超高压油气藏。因此, 良好的盖层保存条件是超深层超高压油气藏形成的重要保障。

2.4 油气成藏演化

古近系临河组沉积期, 临河坳陷为弱伸展断拗期^[22](图 7a), 地层产状较为平缓, 一方面为咸化湖相优质烃源岩大面积广覆式分布提供了有利条件, 同时为烃源岩中陆源高等植物(尤其松科属, 有机质树脂体的主要来源)输入形成早熟早排优质烃源岩提供了可能^[23]; 另一方面, 为盆缘大型辫状河三角洲砂体发育并延伸至湖相洼槽区形成源储互生的沉积格局提供了有利条件, 而源储互生是烃源岩高效排烃快速输导汇聚成藏的关键。

新近系(五原组—乌兰图克组)沉积期, 临河坳陷逐渐转为中—弱断陷期(中新统五原组沉积期)和强伸展断陷期(上新统乌兰图克组沉积期), 狼山断裂活动显著增强, 形成西断东超、地层产状逐渐变陡的构造格局^[24-26]。尤其 5Ma 以来, 随着乌兰图克组快速沉降深埋, 临河组优质烃源岩开始进入生排烃期(图 8)。流体包裹体与埋藏史研究表明, 临河坳陷北部光明构造超深层临一段油气成藏主要发生在上新世以来, 此时盆地结构和光明构造逆牵引断背斜基本定型, 洼槽区烃源岩开始进入大量生排烃期, 远源高成分、高结构成熟度的砂体储层受低地温、晚深埋、弱压实、弱胶结、成岩作用弱的影响, 储层物性好, 形成了咸化湖烃源岩高效供烃、优质储层高效输导、大型断背斜充注、汇聚、成藏的早期油藏(图 7b)。

第四系沉积期(2.3Ma)以来, 随着埋藏深度增加, 烃源岩热演化程度不断升高, 油气加速生成、排出, 形成强源动力、高源储压差(32~57MPa), 使生成油气源源不断汇聚到大型断背斜构造上, 大型圈闭被逐渐充满、增压形成超高压油气藏。在此过程中, 一方面早充注成藏有效抑制胶结作用并减缓压实作用, 延缓储层因埋深增加物性逐渐变差的趋势; 另一方面持续充注有效改善储层渗透率和流动性, 使洼槽区储层连通性保持较高的水平, 促进了流体的充入和油气藏压力的不断攀升, 一旦突破储层排替压力, 砂岩储层便会产生破裂, 形成微裂缝, 进一步改善储集空间。风险探井隆华 1 井在与河探 101 井相同层位同一期砂体和油气层深度处发生失返性漏失, 成像测井显示该井段发育垂向裂缝和水平层理, 进一步证实了超深层超高压油气藏发育微裂缝的事实。随着油气的不断生成排出, 这种储层微裂缝开始向烃源岩扩展延伸, 到达一定程度, 储层附近烃源岩受到储层爆破形成裂缝影响而产生微裂缝, 随着洼槽区大面积广覆式

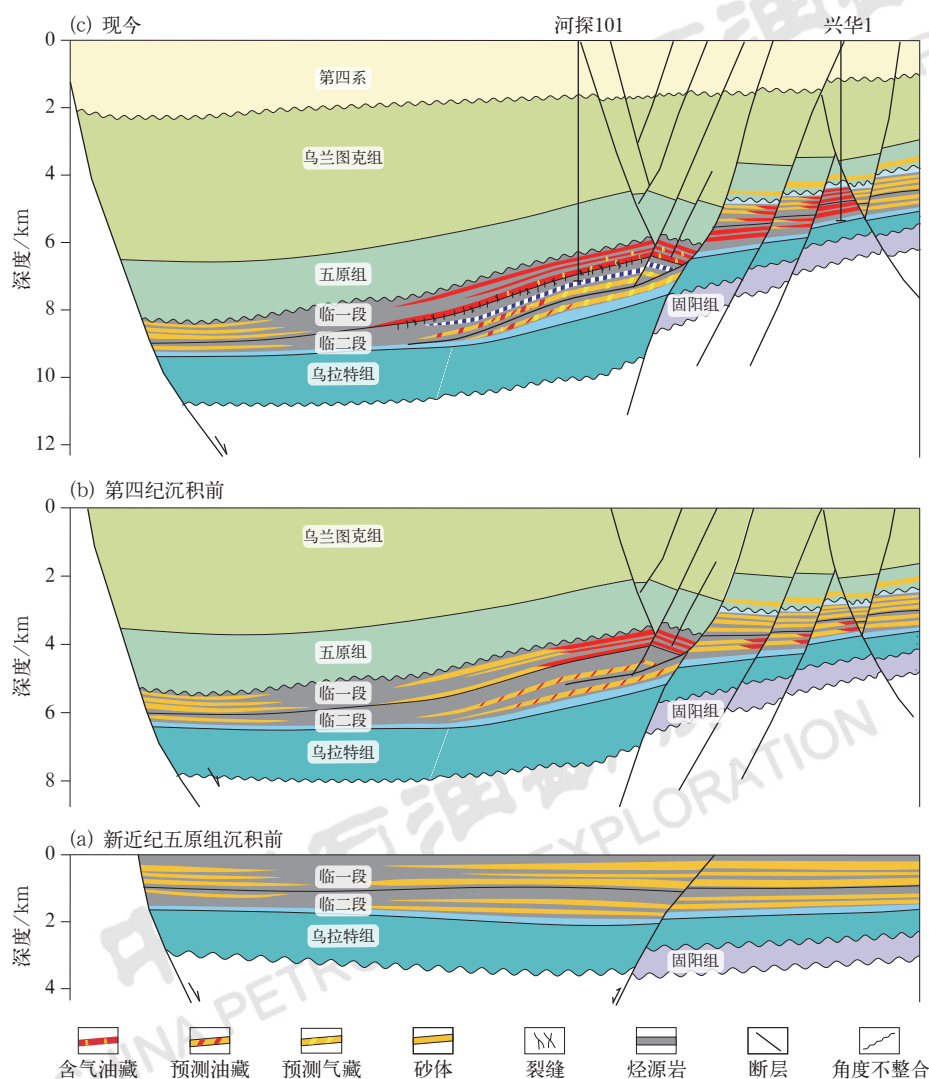


图7 临河拗陷超深层超高压油气成藏演化过程图

Fig.7 Hydrocarbon accumulation and evolution history of ultra-deep and ultra-high pressure oil and gas reservoirs in Linhe Depression

分布的高产烃率烃源岩持续演化排烃,作为洼槽区油气汇聚有利方向 and 良好构造背景的光明构造区便形成了一种新的源储同聚的大规模常规油气藏(图7c),这可能就是超深层超高压油气藏形成特高产的主因,同时也展现了洼槽区良好的勘探前景。

3 勘探前景

临河拗陷中北部受新生代以来持续沉降和晚期强伸展作用影响,临河组埋深大(3000~9000m),超深层(>6000m)碎屑岩主要分布在淖西洼槽带,面积广(>2000km²);为咸化湖相优质烃源岩集中发育区,厚度大(100~350m),热演化程度高(R_o 为0.8%~2.0%),易生烃增压形成超高压地层,为高效勘探提供重要资源基础;主要处于东南部大型辫状河三角洲沉积体系前缘有利相带,钻井揭示砂体成分、

结构成熟度高,抗压实作用强,叠加晚深埋、弱压实、早充注、弱胶结甚至超压扩缝增储等有利条件,储层物性好;同时砂地比相对较低,源储互层沉积,生储盖组合好;晚期受狼山断层强烈活动影响,地层产状整体表现为西断东超、南抬北降的构造格局,断裂整体呈北东向展布,物源砂体主要来自南东方向,有利沉积相带分布及地层产状与断裂体系配置优越,极易形成构造及岩性—构造油气藏。基于目前针对东南部两大三角洲砂体的空间展布,预计有利勘探面积超1000km²(图9),勘探前景广阔。下一步将按照由北向南(北部已突破)、由东(浅)向西(深)、由构造向构造—岩性的整体勘探部署思路,逐步拓展,力争实现洼槽区超深层油气勘探全面突破和规模储量发现,同时为其他类似盆地超深层碎屑岩领域油气勘探提供重要参考。

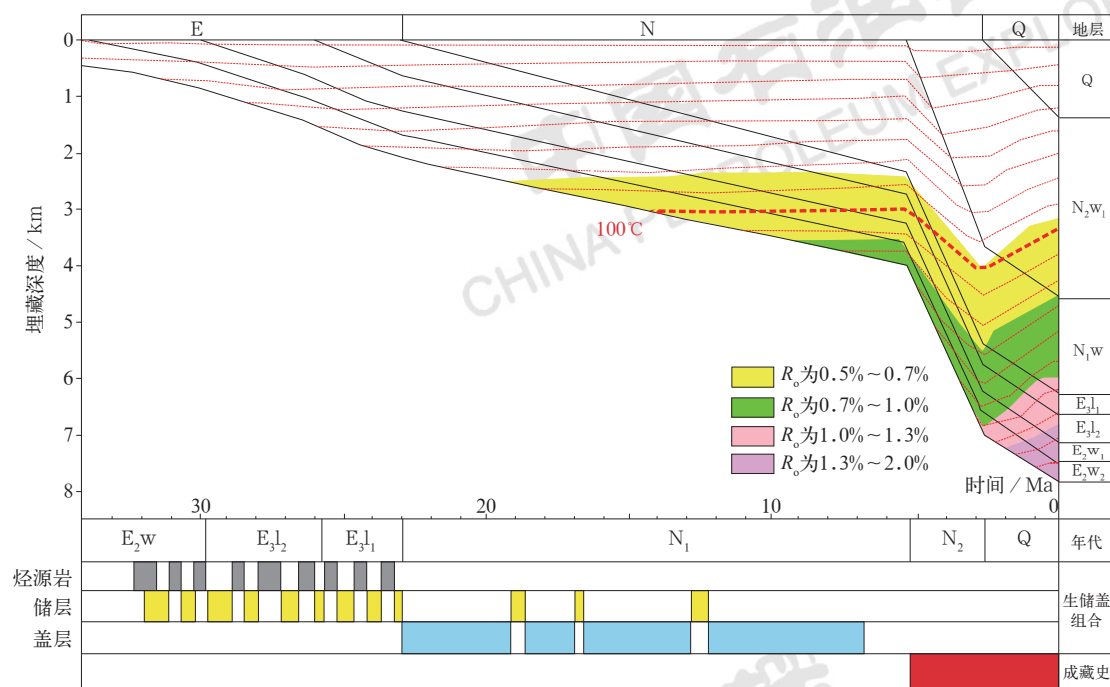


图 8 临河凹陷河探 101 井区超深层含油气系统成藏要素时空配置分析图

Fig.8 Analysis of time-space configuration of hydrocarbon accumulation elements of ultra-deep oil and gas system in Hetan 101 well area in Linhe Depression

N_2w_1 —乌兰图克组; N_1w —五原组; E_3l_1 —临一段; E_3l_2 —临二段; E_2w_1 —乌拉特组一段; E_2w_2 —乌拉特组二段

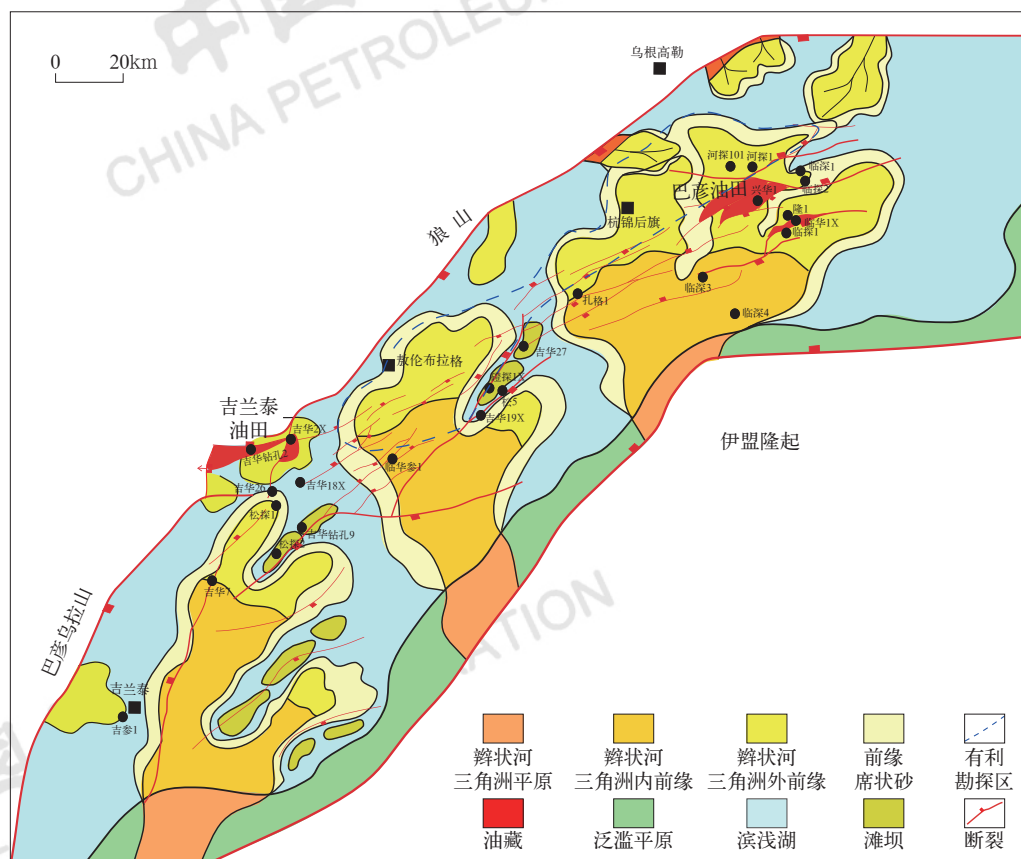


图 9 临河凹陷超深层有利勘探区分布图

Fig.9 Distribution of favorable exploration area for ultra-deep oil and gas reservoirs in Linhe Depression

4 结论

临河拗陷北部古近系临河组超深层碎屑岩面积大、分布广,源储配置有利,成藏条件优越,可形成大型自生自储构造或岩性构造油气藏,展现了洼槽区超深层良好的勘探前景。主要取得3个方面地质认识:

(1) 河套盆地古近系发育早熟早排、高产烃率咸化湖相优质烃源岩,明确了烃源岩有机质中富含陆源树脂体和水生的藻类体是形成早熟早排、高产烃率的关键,为超深层碎屑岩超高压油气藏的形成奠定了良好资源基础。

(2) 明确了古近系临河组沉积期发育广覆式分布的大型辫状河三角洲砂体,石英含量高,抗压实作用强,胶结物含量低,成岩作用弱,洼槽区早充注抑制胶结和压实,后持续充注形成超压扩缝进一步改善储层渗透性,储层物性好,上覆五原组发育巨厚泥岩盖层,形成良好源储盖组合,为超深层超高压特高产油气藏形成提供了重要保障。

(3) 低演化阶段开始大量生烃充注成藏,伴随持续沉降深埋热演化,加速生油持续充注形成过饱和与超高压油气藏,超高压对储源交互体天然压裂,形成缝孔连通、源储同聚、连续型大面积常规油气藏,是洼槽区超深层碎屑岩超高压特高产油气藏形成的关键。

参考文献

- [1] 庞雄奇. 深层油气藏成因机制与分布发育规律[C]. 北京: 第六届石油地质年会, 2015.
Pang Xiongqi. Genetic mechanism and distribution pattern of deep oil and gas reservoirs[C]. Beijing: The 6th CAPG, 2015.
- [2] Zhu Guangyou, Milkov A V, Chen Feiran, *et al.* Noncracked oil in ultra-deep high-temperature reservoirs in the Tarim Basin, China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2018,89:252–262.
- [3] 施和生, 王清斌, 王军, 等. 渤中凹陷深层渤中 19-6 构造大型凝析气田的发现及勘探意义[J]. 中国石油勘探, 2019,24(1):36–45.
Shi Hesheng, Wang Qingbin, Wang Jun, *et al.* Discovery and exploration significance of large condensate gas fields in BZ19-6 structure in deep Bozhong Sag[J]. *China Petroleum Exploration*, 2019,24(1):36–45.
- [4] 贾承造. 含油气盆地深层—超深层油气勘探开发的科学技术问题[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2023,47(5):1–12.
Jia Chengzao. Key scientific and technological problems of petroleum exploration and development in deep and ultra-deep formation[J]. *Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science)*, 2023,47(5):1–12.
- [5] 何治亮, 金晓辉, 沃玉进, 等. 中国海相超深层碳酸盐岩油气成藏特点及勘探领域[J]. 中国石油勘探, 2016,21(1):3–14.
He Zhiliang, Jin Xiaohui, Wo Yujin, *et al.* Hydrocarbon accumulation characteristics and exploration domains of ultra-deep marine carbonates in China[J]. *China Petroleum Exploration*, 2016,21(1):3–14.
- [6] 张锐锋, 何海清, 陈树光, 等. 河套盆地临河拗陷石油地质新认识与重大发现[J]. 中国石油勘探, 2020,25(6):1–12.
Zhang Ruifeng, He Haiqing, Chen Shuguang, *et al.* New understanding of petroleum geology and major exploration break through in Linhe Depression of Hetao Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2020,25(6):1–12.
- [7] 张锐锋, 何海清, 朱庆忠, 等. 河套盆地临河拗陷石油地质特征与油气富集规律[J]. 石油勘探与开发, 2023,50(4):695–705.
Zhang Ruifeng, He Haiqing, Zhu Qingzhong, *et al.* Petroleum geological features and hydrocarbon enrichment of Linhe Depression in Hetao Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2023,50(4):695–705.
- [8] 沈华, 何海清, 张锐锋, 等. 河套盆地洼槽区河探 1 井风险勘探突破及意义[J]. 石油学报, 2022,43(9):1213–1222.
Shen Hua, He Haiqing, Zhang Ruifeng, *et al.* Breakthrough and significance of Well Hetan-1 risk exploration in the sag area of Hetao Basin[J]. *Acta Petroli Sinica*, 2022,43(9):1213–1222.
- [9] 张以明, 张锐锋, 王少春, 等. 河套盆地临河拗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 Yiming, Zhang Ruifeng, Wang Shaochun, *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.
- [10] 付锁堂, 付金华, 喻建, 等. 河套盆地临河拗陷石油地质特征及勘探前景[J]. 石油勘探与开发, 2018,45(5):749–762.
Fu Suotang, Fu Jinhua, Yu Jian, *et al.* Petroleum geological features and exploration prospect of Linhe Depression in Hetao Basin, China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(5):749–762.
- [11] Wang Shaochun, Zhou Zengyuan, Yang Dexiang, *et al.* Study on saturated hydrocarbons in organic rich rocks indicative significance of special compound molecules for hydrocarbons[J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2021,30(7):8109–8116.
- [12] Li Chenxi, Liu Zhen, Wang Shaochun, *et al.* Prediction of major source rocks distribution in the transition from depressed to rifted basin using seismic and geological data: the Guyang to Linhe Formations in the Linhe Depression, Hetao Basin, China[J]. *Journal of Petroleum Science & Engineering*, 2022,214:110472.
- [13] 王盛亮, 杨雪松, 罗胜, 等. 河套盆地临河拗陷北部临河组元素地球化学特征及古环境恢复[J]. 矿物岩石, 2023,43(3):73–82.
Wang Shengliang, Yang Xuesong, Luo Sheng, *et al.* Element geochemical characteristics and paleoenvironment restoration of Linhe Formation in the northern Linhe Depression, Hetao Basin[J]. *Mineralogy and Petrology*, 2023,43(3):73–82.
- [14] 付晓燕, 路俊刚, 师玉雷, 等. 河套盆地临河拗陷成湖烃源岩生烃机理[J/OL]. 天然气地球科学: 1–21[2024-01-02]. <https://kns.cnki.net>.

- net/kcms2/detail/62.1177.TE.20230713.1317.002.html.
- Fu Xiaoyan, Lu Jungang, Shi Yulei, *et al.* Hydrocarbon generation mechanism of saline lake source rocks in Linhe Depression, Hetao Basin[J/OL]. *Nature Gas Geoscience*, 1–21[2024–01–02].<https://kns.cnki.net/kcms2/detail/62.1177.TE.20230713.1317.002.html>.
- [15] 孙越, 谢佩宇, 张凤奇, 等. 河套盆地临河坳陷兴隆构造带临河组超压成因及其演化特征[J/OL]. *天然气地球科学*, 1–19[2023–09–24].<https://link.cnki.net/urlid/62.1177.TE.20230921.1456.004>.
Sun Yue, Xie Peiyu, Zhang Fengqi, *et al.* Mechanism and evolution of overpressure in the Linhe Formation of the Xinglong structural belt in the Linhe Depression of the Hetao Basin[J/OL]. *Natural Gas Geoscience*, 1–19[2023–09–24].<https://link.cnki.net/urlid/62.1177.TE.20230921.1456.004>.
- [16] 张锐锋, 于福生, 刘喜恒, 等. 河套盆地临河坳陷及周边地区中—新生代成盆演化特征[J]. *石油与天然气地质*, 2020,41(6):1139–1150.
Zhang Ruifeng, Yu Fusheng, Liu Xiheng, *et al.* Evolutionary characteristics of Linhe Depression and its surrounding areas in Hetao Basin from the Mesozoic to Cenozoic[J]. *Oil & Gas Geology*, 2020,41(6):1139–1150.
- [17] 陆鹿, 陈树光, 李壮福, 等. 河套盆地临河坳陷白垩纪—古近纪沉积环境演化及油气地质意义[J]. *古地理学报*, 2022,24(2):308–331.
Lu Lu, Chen Shuguang, Li Zhuangfu, *et al.* Sedimentary evolution and petroleum potential of the Cretaceous to Paleogene in Linhe Depression, Hetao Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2022,24(2):308–331.
- [18] Ajdukiewicz J M, Lander R H. Sandstone reservoir quality prediction: the state of the art (Review)[J]. *AAPG Bulletin*, 2010,94(8):1083–1091.
- [19] Bloch S, Lander R H, Bonnell L. Anomalous high porosity and permeability in deeply buried sandstone reservoirs: origin and predictability[J]. *AAPG Bulletin*, 2002,86(2):301–328.
- [20] Aase N E, Walderhaug O. The effect of hydrocarbons on quartz cementation: diagenesis in the Upper Jurassic sandstones of the Miller Field, North Sea, revisited[J]. *Petroleum Geoscience*, 2005, 11(3):215–223.
- [21] 操应长, 远光辉, 杨海军, 等. 含油气盆地深层—超深层碎屑岩油气勘探现状与优质储层成因研究进展[J]. *石油学报*, 2022,43(1): 112–140.
- Cao Yingchang, Yuan Guanghui, Yang Haijun, *et al.* Current situation of oil and gas exploration and research progress of the origin of high-quality reservoirs in deep-ultra-deep clastic reservoirs of petroliferous basins[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(1):112–140.
- [22] Yu Fusheng, Zhang Ruifeng, Yu Jiafu, *et al.* Meso–Cenozoic negative inversion model for the Linhe Depression of Hetao Basin, China[J]. *Geological Magazine*, 2022,159:535–560.
- [23] 付晓燕, 路俊刚, 师玉雷, 等. 河套盆地临河坳陷不同构造带原油地球化学特征及来源[J/OL]. *天然气地球科学*, 1–20[2024–01–02].<https://link.cnki.net/urlid/62.1177.TE.20230821.1722.002>.
Fu Xiaoyan, Lu Jungang, Shi Yulei, *et al.* Geochemical characteristics and sources of crude oil in different structural belts of Linhe Depression, Hetao Basin[J/OL]. *Nature Gas Geoscience*, 1–20[2024–01–02].<https://link.cnki.net/urlid/62.1177.TE.20230821.1722.002>.
- [24] 陈树光, 朱庆忠, 张锐锋, 等. 河套盆地吉兰泰构造带形成演化及控藏作用[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2022,49(5):533–541.
Chen Shuguang, Zhu Qingzhong, Zhang Ruifeng, *et al.* Formation and evolution of Jilantai structural belt in Hetao Basin and its role in reservoir control[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2022,49(5): 533–541.
- [25] 刘天顺, 张锐锋, 丁文龙, 等. 河套盆地临河坳陷下白垩统内部不整合的发现及对构造演化的启示[J]. *中国地质*, 2021,48(2):593–604.
Liu Tianshun, Zhang Ruifeng, Ding Wenlong, *et al.* Discovery of Lower Cretaceous unconformity in Linhe Depression of Hetao Basin and its implication to structural evolution[J]. *Geology in China*, 2021,48(2):593–604.
- [26] 阴钰毅, 郭庆, 李维, 等. 河套盆地临河坳陷构造特征及油气勘探有利区分析[J]. *矿产勘查*, 2020,11(3):427–432.
Yin Yuyi, Guo Qing, Li Wei, *et al.* Structural features and favorable areas of the Linhe Depression in Hetao Basin, Inner Mongolia[J]. *Mineral Exploration*, 2020,11(3):427–432.