

文章编号: 0253-2697(2024)01-0069-30 DOI:10.7623/syxb202401005

渤海湾盆地冀中坳陷新领域、新类型油气 勘探潜力及有利方向

李志军 肖阳 田建章 李晓燕 王元杰 王海燕 焦亚先
汤小琪 贾颖超 任春玲 严梦颖 王成云 任艺

(中国石油华北油田公司勘探开发研究院 河北任丘 062552)

摘要:冀中坳陷油气资源丰富,历经40余年勘探开发,是华北油田的主要油气生产基地和增储上产的重要战场。近年来,冀中坳陷的油气勘探在新领域、新类型取得了多项重要突破,展现出良好的勘探前景,但仍面临着油气成藏条件认识不清、规模接替领域和区带不明的问题。基于对冀中坳陷油气成藏条件的系统解剖,通过分析油气成藏的控制因素,总结油气富集规律,重新认识了坳陷的油气成藏特征与勘探潜力,指出了冀中坳陷在今后一个时期的勘探新领域、新类型。综合评价认为,冀中坳陷发育古近系和石炭系—二叠系2套烃源层,形成海相碳酸盐岩和古近系碎屑岩2种主要储集体,具备新生古储、自生自储、下生上储、古生古储4类成藏组合,构成了以古潜山为主体的中央隆起型、陡坡型、斜坡型和洼槽型4种复式油气聚集带。冀中坳陷石油与天然气资源的探明率分别为45.7%和11.0%,剩余油气资源十分丰富。整体研究认为,深潜山及其内幕、古近系深层、页岩油、深部煤层气、新凹陷5大领域的整体成藏条件好,资源潜力大,勘探前景广阔。冀中坳陷北部在廊固凹陷河西务潜山、武清凹陷和文安斜坡等潜山及内幕落实了13个有利目标,预测天然气圈闭资源量为 $1453 \times 10^8 \text{ m}^3$,是冀中坳陷天然气勘探的有利区带;在饶阳凹陷留楚—皇甫村、武清凹陷武清背斜带、深县凹陷榆科—深南背斜带、文安斜坡内带、廊固凹陷和晋县凹陷陡坡带等地区发育12个有利构造,预测石油圈闭资源量为 $2.4 \times 10^8 \text{ t}$,是冀中坳陷古近系深层领域勘探的主攻区带;保定凹陷在2个有利构造区的预测圈闭资源量为 $2.3 \times 10^8 \text{ t}$ 、武清凹陷的剩余天然气资源量达 $836 \times 10^8 \text{ m}^3$,是凹陷新区勘探突破的现实地区;束鹿凹陷沙河街组三段下亚段和饶阳凹陷沙河街组一段下亚段的页岩油可动资源量为 $9.1 \times 10^8 \text{ t}$,文安斜坡外带深部煤层气有利勘探区的总资源量为 $1.53 \times 10^{12} \text{ m}^3$,是冀中坳陷非常规领域战略接替的有利勘探目标。

关键词:冀中坳陷;成藏条件;深潜山及内幕;页岩油;煤层气;新凹陷;勘探方向

中图分类号:TE132.1

文献标识码:A

Potentials and favorable directions for new fields, new types of oil-gas exploration in Jizhong depression, Bohai Bay Basin

Li Zhijun Xiao Yang Tian Jianzhang Li Xiaoyan Wang Yuanjie Wang Haiyan Jiao Yaxian
Tang Xiaoqi Jia Yingchao Ren Chunling Yan Mengying Wang Chengyun Ren Yi

(Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Huabei Oilfield Company, Hebei Renqiu 062552, China)

Abstract: Jizhong depression is rich in oil-gas resources. After more than 40 years of exploration and development, it has been the main oil-gas production base and a crucial area for increasing reserves and production in Huabei oilfield. In recent years, multiple important breakthroughs have been made in new fields and new types of hydrocarbon exploration, showing good exploration prospects. However, it still faces problems such as unclear understanding of hydrocarbon accumulation conditions, as well as undetermined replacement areas and plays. Based on systematically analyzing the hydrocarbon accumulation conditions and their controlling factors in Jizhong depression, the paper summarizes the oil-gas enrichment regularities, recognizes the hydrocarbon accumulation characteristics and exploration potentials of the depression, and further points out the prospects and directions for new fields and new types of future exploration in the depression. Comprehensive assessment indicates that Jizhong depression has developed the Paleogene and Carboniferous-Permian source beds, forming two main reservoirs including marine carbonate rocks and Paleogene clastic rocks. Moreover, it has four types of hydrocarbon plays, i. e., new-generation and paleo-reservoir, self-generation and self-reservoir, lower generation and upper reservoir, paleo-generation and paleo-reservoir, constituting four types of composite hydrocarbon accumulation belts dominated by paleo-buried hills, i. e., central uplift, steep slope, slope, and trough, for which the proved rates of oil-gas resources are 45.7% and 11.0% respectively, and where the remaining hydrocarbon resources are abundant. The holistic research suggests that the five major fields of deep buried-hills and their inners, deep Paleogene layers, shale oil, deep coalbed methane, and

基金项目:中国石油天然气股份有限公司华北油田公司“揭榜挂帅”项目“冀中坳陷剩余油气资源分布及勘探接替方向研究”(2022-HB-A01)资助。

第一作者及通信作者:李志军,男,1968年12月生,2010年获中国科学院研究生院矿物学、岩石学、矿床学专业博士学位,现为中国石油华北油田公司勘探开发研究院院长、高级工程师,主要从事油气、煤层气勘探开发技术及管理工作。Email: hzb_lzj@petrochina.com.cn

new sags generally have good accumulation conditions, great resource potentials, and broad exploration prospects. Thirteen favorable targets, as favorable plays for natural gas exploration in Jizhong depression, have been implemented in the buried-hills and inner, such as Hexiwu buried-hill of Langgu sag, Wuqing sag, and Wen'an slope in northern Jizhong depression, with the predicted natural gas resources of $1.453 \times 10^8 \text{ m}^3$. Twelve favorable structures, as the main plays for the exploration of deep Paleogene layers in Jizhong depression, are developed in the Liuchu-Huangfucun area of Raoyang sag, Wuqing anticline belt of Wuqing sag, Yuke-Shennan anticline belt of Shexian sag, inner belt of Wen'an slope, Langgu sag, and steep slope of Jinxian sag, with the predicted oil resources of $2.4 \times 10^8 \text{ t}$. The predicted trap resources of $2.3 \times 10^8 \text{ t}$ in two favorable tectonic belts in Baoding sag and the remaining natural gas resources of $836 \times 10^8 \text{ m}^3$ in Wuqing sag demonstrate that they are realistic areas achieving exploration breakthroughs in new wellblocks of sags. The available shale oil resources in the lower submember of Member 3 of Shahejie Formation in Shulu sag and the lower submember of Member 1 of Shahejie Formation in Raoyang sag are estimated to be $9.1 \times 10^8 \text{ t}$, and the total resources of the favorable exploration area for deep coalbed methane in the outer belt of Wen'an slope amount to $1.53 \times 10^{12} \text{ m}^3$, indicating the favorable exploration targets for strategic replacement in unconventional fields in Jizhong depression.

Key words: Jizhong depression; accumulation condition; deep buried-hill and inner; shale oil; coalbed methane; new sag; exploration direction

引用:李志军,肖阳,田建章,李晓燕,王元杰,王海燕,焦亚先,汤小琪,贾颖超,任春玲,严梦颖,王成云,任艺.渤海湾盆地冀中坳陷新领域、新类型油气勘探潜力及有利方向[J].石油学报,2024,45(1):69-98.

Cite:LI Zhijun, XIAO Yang, TIAN Jianzhang, LI Xiaoyan, WANG Yuanjie, WANG Haiyan, JIAO Yaxian, TANG Xiaoqi, JIA Yingchao, REN Chunling, YAN Mengying, WANG Chengyun, REN Yi. Potentials and favorable directions for new fields, new types of oil-gas exploration in Jizhong depression, Bohai Bay Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(1): 69-98.

冀中坳陷是渤海湾盆地的主要富油气坳陷之一。1975年7月,该坳陷在任丘构造带钻探R4井,在中、新元古界蓟县系雾迷山组获得1014 t/d的特高产油流,发现了中国东部最大的海相碳酸盐岩古潜山油田。冀中坳陷自油气勘探开发40余年来,通过不断深化综合地质研究和勘探实践,逐步探索形成了“新生古储”潜山成藏理论^[1-2],丰富发展了“断裂构造带复式油气聚集理论”^[3-4],创新提出了油气分布“互补性”^[5-6]和陆相断陷“洼槽聚油”^[7-8]等油气地质理论认识,创新形成了富油凹陷“二次勘探”新方法^[9],相继发现了43个油气田,在太古界、元古界、古生界、新生界等共发现了14套含油气层系,是华北油田的主要产油气区。

近年来,通过进一步创新发展地质理论认识,强化配套工程技术攻关,积极开展新领域、新类型含油气领域勘探,在奥陶系深潜山、沙河街组三段(沙三段)下亚段深层、保定凹陷、武清凹陷以及束鹿凹陷页岩油等领域均取得重要发现,展现了良好的勘探前景,但也面临着新领域多、油气成藏条件复杂、具有引领意义的发现少、发现后规模展开难度较大、勘探成效波动大等高效勘探压力。进一步厘清冀中坳陷新领域、新类型的勘探潜力,明确下一步有利勘探方向具有重要意义。笔者在系统解剖冀中坳陷石油成藏条件,分析成藏控制因素,总结不同地区、不同层系富集规律的基础上,面对油气勘探在凹陷间、区带间、层系间、油藏类型间存在的“四个不均衡性”^[10],以及具有在老凹陷、正向构造带、中—浅层、常规油气、潜山顶领域勘探程度高,而在“新区”凹陷、斜坡洼槽区、深层、非常规油气、隐蔽型潜山领域勘探程度低的“五高五低”勘探现状,通过重

新认识冀中坳陷低勘探程度区带、层系油气成藏特征与勘探潜力,指出了今后一个时期新领域、新类型的勘探前景与方向。综合评价认为,冀中坳陷在深潜山及内幕、古近系深层、页岩油、深部煤层气、新凹陷5大接替领域的勘探前景广阔,是其未来油气勘探的重点方向,将对加快成熟探区的高效勘探和效益规模发现起到重要的指导作用。

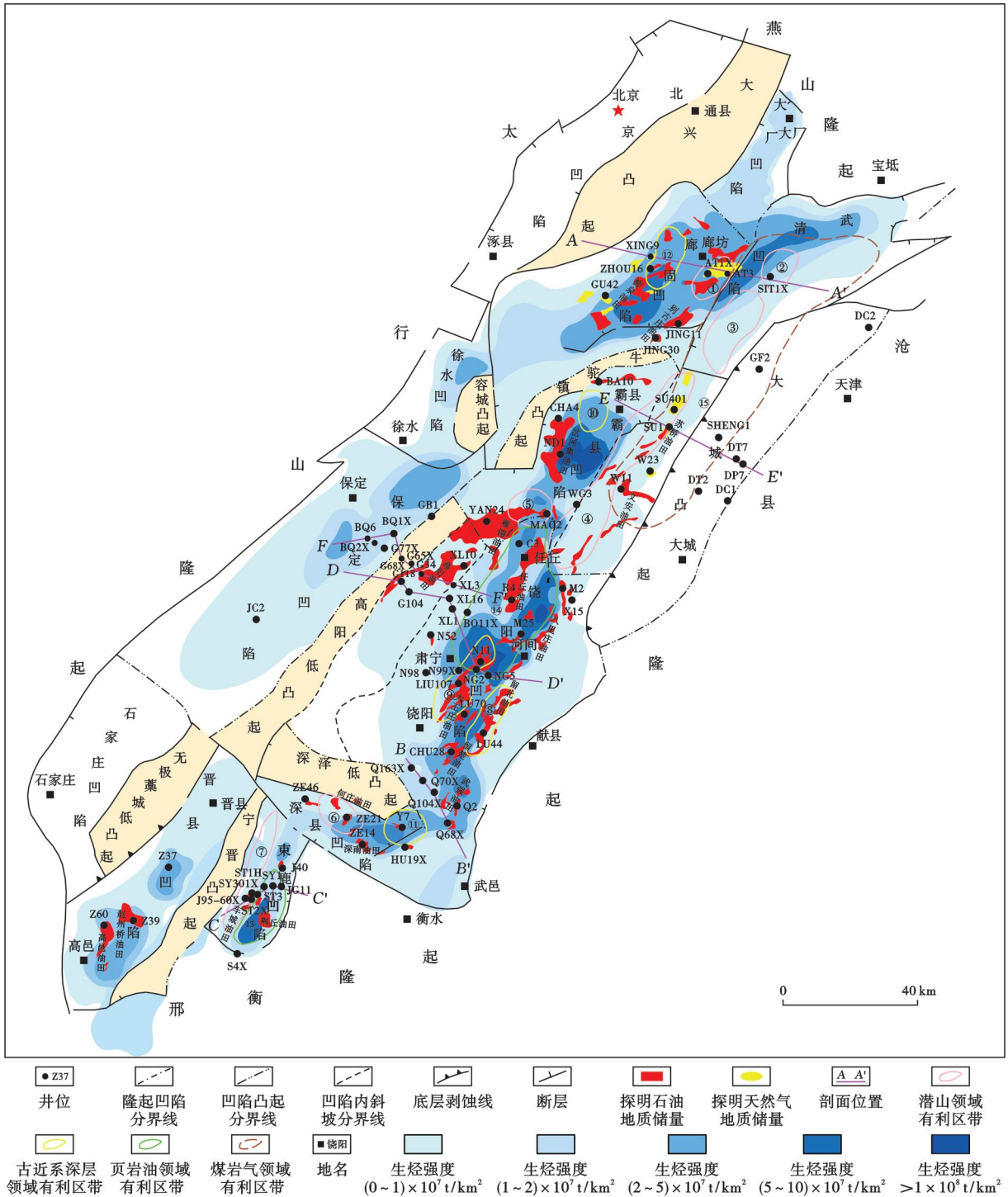
1 区域地质概况

冀中坳陷位于渤海湾盆地西部,北依燕山隆起、南抵邢衡隆起、西临太行山隆起、东至沧县隆起,呈NE—SW走向,南北长为300 km,东西宽为80~130 km,面积约为 $3.2 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图1)。

冀中坳陷的构造演化经历了结晶基底(太古宙)、克拉通盆地(元古宙—古生代)、裂陷盆地(中生代)、断陷盆地(古近纪)、坳陷盆地(新近纪—第四纪)5个阶段^[11]。冀中坳陷在太古宙至元古界变质岩系基岩之上,自下而上发育了中元古界—新元古界、古生界、中生界和新生界等多套沉积地层。中、新元古界较渤海湾盆地其他坳陷更为发育,有长城系、蓟县系和青白口系,但缺失震旦系;古生界有寒武系、奥陶系、上石炭统和二叠系,因抬升和遭受剥蚀而缺失志留系、泥盆系和下石炭统。中、新元古界—下古生界以海相碳酸盐岩沉积为主,厚度为4000~6000 m。上古生界以发育石炭系—二叠系海陆交互相—陆相砂泥岩和煤系为主,主要残留于冀中坳陷东北部和中南部,厚度为0~1300 m。中生界—新生界为一套陆相碎屑岩建造,以断陷沉积为主,岩性、岩相变化较大。其中,中生界主

要发育侏罗系和白垩系,分布局限,为含火山岩的陆相碎屑岩,厚度为 1 000~3 000 m,缺失三叠系。新生界发育古近系、新近系和第四系,为河湖相碎屑岩,最厚处可超过 10 000 m。古近系的沉积厚度为 3 000~8 000 m,沉

积中心经历了从西向东、从北向南、从南向中的 3 次转移,并于沙三段沉积中晚期、沙河街组一段(沙一段)沉积早期发生了 2 次大规模的湖侵。新近系为河流相泛滥平原沉积,下部为馆陶组,上部为明化镇组(图 2)。



注:①—河西务潜山带;②—泗村店潜山带;③—杨村斜坡潜山带;④—文安斜坡—南马庄潜山带;⑤—长洋淀—郑州潜山带;⑥—深西—何庄潜山带;⑦—束鹿斜坡潜山带;⑧—留楚—皇甫村构造带;⑨—大王庄—肃宁构造带;⑩—叶家庄背斜带;⑪—榆科—深南背斜带;⑫—旧州—固安沙河街组三段下亚段深层岩性圈闭;⑬—束鹿凹陷沙河街组三段下亚段;⑭—饶阳凹陷沙河街组一段下亚段;⑮—冀中坳陷东北部石炭系—二叠系。

图 1 冀中坳陷油气勘探成果及有利区分布

Fig. 1 Oil-gas exploration achievements and favorable area distribution in Jizhong depression

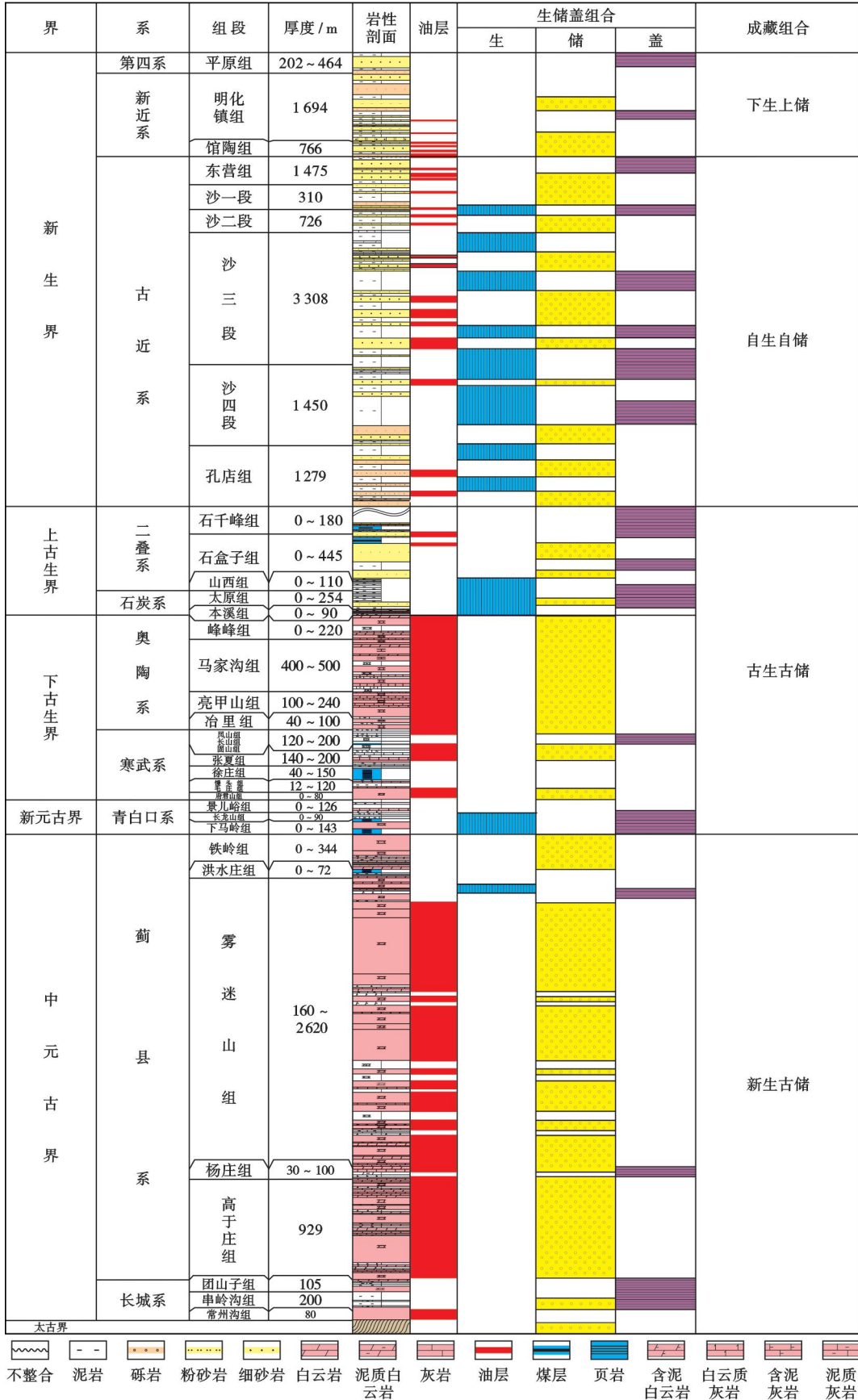


图2 冀中拗陷地层综合柱状图

Fig. 2 Comprehensive stratigraphic column in Jizhong depression

拗陷内发育 12 个凹陷、7 个凸起,自西向东发育西部凹陷带、中央凸起带和东部凹陷带,呈现出“两凹夹一凸”的构造特征(图 1)。西部凹陷带靠近太行山隆起边缘,包括北京凹陷、徐水凹陷、保定凹陷、石家庄凹陷;中央凸起带包括大兴凸起、牛驼镇凸起、容城凸起和高阳低凸起、刘村—深泽低凸起、无极—藁城低凸起等,呈斜列式排列,北高南低;东部凹陷带主要包括大厂凹陷、廊固凹陷、武清凹陷、霸县凹陷、饶阳凹陷、深县凹陷、束鹿凹陷、晋县凹陷。

2 勘探历程

冀中拗陷自 1955 年开始,先后开展了重力、磁力、电法、地震、化探、钻探等油气勘探工作。截至 2022 年底,冀中拗陷完成二维地震测线的长度为 97 278.18 km,三维地震满覆盖面积为 17 909.7 km²,在拗陷东部的廊固凹陷、霸县凹陷、饶阳凹陷、深县凹陷、束鹿凹陷、晋县凹陷 6 个富油气凹陷,主体已完成三维地震连片,共有 1 205 口井获得工业油、气流,发现了任丘、岔河集、大王庄等 43 个油气田,石油探明地质储量为 11.8 × 10⁸t,天然气探明地质储量为 374.33 × 10⁸m³。

冀中拗陷的勘探历程自 1955 年开始,可划分为区域地质普查、突出古潜山油藏勘探、主攻新生界构造油藏勘探、加强岩性地层油藏勘探和多领域油气藏精细勘探 5 个阶段^[12-13]。

2.1 区域地质普查阶段(1955—1972 年)

该阶段原石油工业部和原地质部先后在冀中拗陷开展了区域油气普查、定凹选带。查清了冀中拗陷东部 6 大沉积凹陷具有良好的生油条件,JING1 井等 4 口探井获得工业油流。

2.2 突出古潜山油藏勘探阶段(1973—1985 年)

1975 年 7 月,R4 井在藁县系雾迷山组碳酸盐岩试油中获得产油量达 1 014 t/d 的特高产工业油流,随后采取“占山头、打高点、探含油边界”的布井方法,接连钻探了 R6 井、R7 井、R9 井、R11 井和 R13 井,每口井均为千吨产量井,称为“六口井定大局”,发现了古潜山高产大油田——任丘油田。1975—1985 年,相继在雁翎、苏桥、八里庄、留北、荆丘、何庄等地区发现了一批古潜山油气田,开创了古潜山找油新领域^[14],同时也在岔河集、大王庄、柳泉、别古庄、文安等发现多个古近系—新近系油田。该阶段是冀中拗陷提交油气储量和油气产量增长的高峰期。

2.3 主攻新生界构造油藏勘探阶段(1986—1999 年)

该阶段提出了古潜山与新生界并举、油气并举、深浅层并举的“三个并举”勘探方针,深化断裂潜山复式油气聚集带认识,先后钻探的 XL10 井、G29 井、Y7

井、QUAN241 井等一批井在古近系获得工业油气流,在高阳、留楚、武强、深南、车城、赵州桥、高邑等地区发现多个复杂断块油田。

2.4 加强岩性地层油藏勘探阶段(2000—2009 年)

该阶段提出了“构造与隐蔽油藏并重,以隐蔽油藏为主”的勘探战略,创新提出了油气分布具有“互补性”,指导钻探的 LU43 井、LU44 井、LU70 井、SU70 井等井均获得成功,在留西地区、大王庄东部地区、蠡县斜坡、文安斜坡等多个区带实现了隐蔽油藏勘探的新发现。

2.5 多领域油气藏精细勘探阶段(2010—2022 年)

该阶段加强新区、新类型的勘探力度,取得了 5 项重要勘探成果:①突出深潜山及内幕勘探,获得一批重要突破^[15-17]。如 2011 年 5 月,霸县凹陷 ND1 井超深潜山在 5 639~6 027 m(雾迷山组)完井测试,获得产油量为 497.87 t/d、产气量为 56.228 × 10⁴m³/d 的特高产工业油气流;2016 年 11 月,风险探井 AT1X 井对奥陶系实施大型酸压改造,获得产气量为 40.89 × 10⁴m³/d、凝析油产量为 57.85 t/d 的高产工业油气流;2017 年,束鹿西斜坡钻探了 JG21 井、JG22X 井等 5 口潜山井,获得工业油流。②积极探索页岩油取得新进展。2011—2012 年,束鹿凹陷洼槽区钻探 ST1H 井、ST2X 井和 ST3 井 3 口井,获得高产油气流^[18]。③强化新区勘探,实现了保定凹陷新区重大突破^[19]。如 2022—2023 年,保定凹陷钻探的 BQ1X 井、BQ6 井、G77X 井等井在东营组浅层获得高产油流,发现了保定油田。④加强深层勘探获得高效新发现。如饶阳凹陷钻探的 Q104X 井在沙三段下亚段新层系(深度为 4 300 m)试油,获得产油量为 75.84 t/d 的高产工业油流;武清凹陷钻探的风险钻探 SIT1X 井在沙河街组四段(沙四段)5 000 m 压裂后求产,获得产油量为 68.3 t/d 的高产工业油流。⑤深化老区精细勘探,实现规模增储。如廊固凹陷大柳泉构造带钻探的 CAO29 井、GU41 井、ZHOU29 井等 28 口井获得成功,复杂断块勘探取得新进展^[20];饶阳凹陷蠡县斜坡外带钻探的 GB1X 井、G13 井、G68X 井等井和马西—大王庄地区钻探的 N75X 井、X582X 井和 X53X 井等井获得工业油流,对岩性地层油气藏的勘探取得了规模发现。以上勘探成果既保障了冀中拗陷油气储量稳定增长,也展现出新领域、新类型良好的勘探前景。

3 基本石油地质条件与资源潜力

3.1 烃源岩特征

冀中拗陷主要发育古近系湖相烃源岩和石炭系—二叠系煤系烃源岩 2 套烃源岩。其中,古近系为最主要的烃源岩,石炭系—二叠系为主要气源岩。油源对

比表明^[21-22],目前探明的石油储量均来自于古近系烃源岩,探明的天然气储量主要为石炭系—二叠系与古近系的混合气源。

3.1.1 古近系湖相烃源岩

古近系湖相泥岩主要发育沙一段下亚段、沙三段和沙四段—孔店组3套烃源岩^[23]。在冀中拗陷古近纪湖盆的发育史上,西部太行山区始终是主要物源补给区,远离主物源区的饶阳凹陷、霸县凹陷、廊固凹陷、深县凹陷、束鹿凹陷、晋县凹陷等东部凹陷带是继承性

的古湖盆沉积中心,大多为缺氧的强还原环境,是主力烃源岩发育区。

沙一段下亚段烃源岩发育于冀中拗陷中部的饶阳凹陷、霸县凹陷和保定凹陷。烃源岩的最大厚度为320 m、平均为120 m,厚度大于10 m的烃源岩分布区的面积为4000 km²[图3(a)]。其中,饶阳凹陷烃源岩最为发育,有机质丰度高,总有机碳(TOC)含量平均为1.07%,氯仿沥青“A”含量最高可达0.7%,有机质类型为II₁型,是一套好烃源层[图4(a)]。

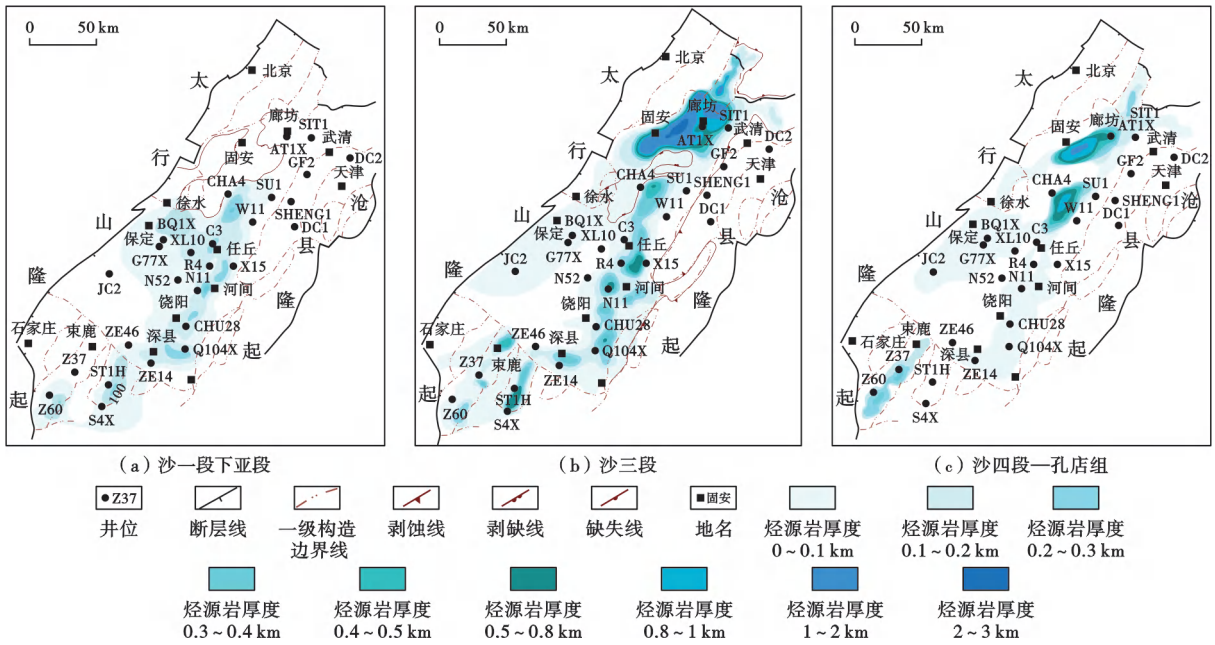


图3 冀中拗陷古近系烃源岩厚度

Fig. 3 Thickness of Paleogene source rocks in Jizhong depression

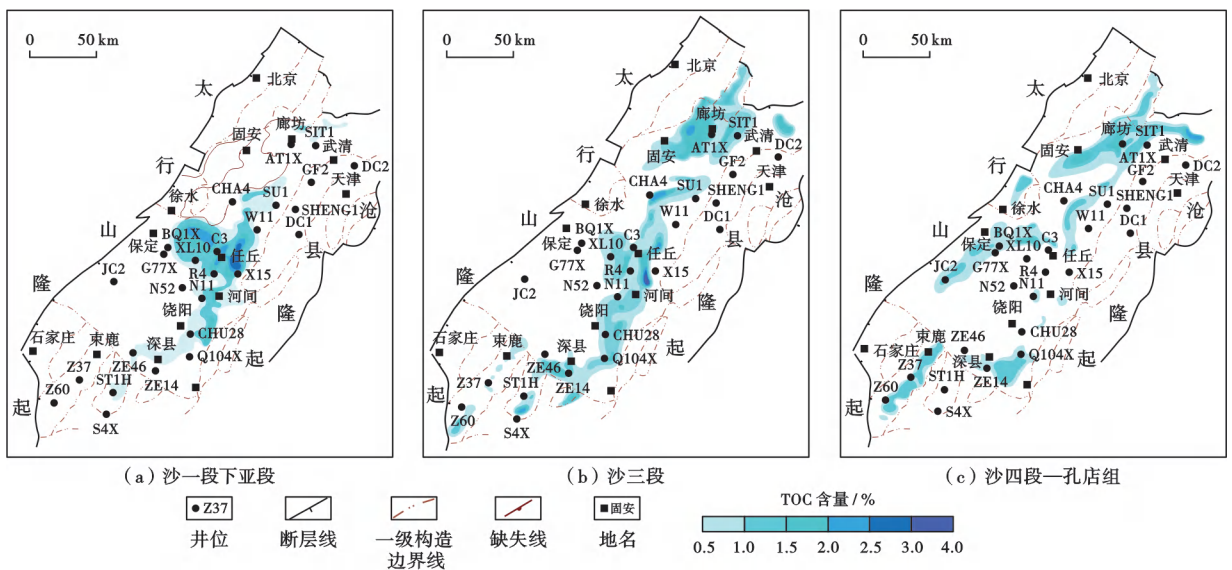


图4 冀中拗陷古近系生油岩 TOC 含量

Fig. 4 TOC content of Paleogene source rocks in Jizhong depression

沙三段烃源岩发育厚度最大,分布区域广。北起廊固凹陷、武清凹陷、霸县凹陷,南抵深县凹陷、束鹿凹陷,构成贯通拗陷南北的优质烃源岩发育带。烃源岩在廊固凹陷的最大厚度为 2 200 m、平均为 600 m,主要集中在沙三段中、下亚段;其次为霸县凹陷、饶阳凹陷、束鹿凹陷,其中,马西洼槽的烃源岩发育最厚,厚度为 700 m、平均为 300 m,主要集中在沙三段上、下亚段。厚度大于 10 m 的烃源岩分布区的面积为 7 500 km²[图 3(b)]。TOC 含量一般为 1.0%~1.5%,最高可达 3.0%[图 4(b)],有机质类型为 II₁ 型,是区域主力烃源层。

沙四段一孔店组烃源岩主要分布于冀中拗陷北部的廊固凹陷、霸县凹陷和南部的晋县凹陷,北部地区烃源岩最厚可达 800~1 000 m、平均为 350 m,厚度大于 10 m 的烃源岩分布面积为 3 800 km²[图 3(c)]。该套烃源岩的 TOC 含量为 0.5%~1.5%,有机质类型以 II₂—III 型为主,为中等烃源岩[图 4(c)];但在湖盆中心区以及最大湖泛面的上、下层段,如在霸县凹陷、廊固凹陷的沙四段上亚段以及晋县凹陷南洼槽的孔店组二段(孔二段)都发育了一定规模的优质烃源岩,TOC 含量>1.5%,氯仿沥青“A”含量为 0.15%~0.25%,有机质丰度较高,被证实为已发现油气藏的烃源层。

烃源岩的热演化受地温场和烃源岩类型控制。冀中拗陷古近系湖相优质烃源岩的成熟门限浅、油窗跨度大,多处于生油高峰阶段,以生油为主;中等一差烃源岩的成熟门限深、油窗跨度小,多处于高成熟—过成熟热演化阶段,以生气为主。饶阳凹陷沙一段下亚段是典型的半咸水—咸水湖相优质烃源岩,在古埋深>2 600 m、古地温>95℃、镜质体反射率(R_o)>0.5%的地区,有机质已进入成熟阶段;在古埋深为 3 500~3 800 m、 R_o 为 0.8%~1.0%的地区,有机质进入生油高峰阶段。饶阳凹陷沙三段为偏腐泥的混合型(II 型)烃源岩,在古埋深为 2 800~4 000 m、古地温为 101~130℃、 R_o 为 0.5%~0.9%的地区,有机质已进入成熟阶段;在古埋深为 4 000~5 300 m、 R_o 为 0.8%~1.3%的地区,有机质已进入生油高峰阶段;在古埋深>5 300 m、 R_o >1.3%的地区,有机质处于凝析油湿气生成阶段。廊固凹陷沙三段是以 II₂ 型母质为主的中等一差烃源岩发育区,在古埋深为 3 100~4 400 m、古地温为 101~145℃、 R_o 为 0.5%~1.1%的地区,有机质开始进入成熟阶段;在古埋深为 4 400~4 850 m、 R_o 为 1.1%~1.7%的地区,有机质处于凝析油湿气生成阶段;在古埋深>4 850 m、古地温>160℃、 R_o >2.0%的地区,有机质进入生干气阶段。因此,冀中拗陷的成藏相态具有南油北气的特征:北部廊固凹陷、武清凹陷发育巨厚的倾气型烃源岩,是天然气成藏有利区;中南

部发育 3 套优质烃源岩,为石油成藏有利区。

3.1.2 石炭系—二叠系煤系烃源岩

石炭系—二叠系煤系烃源岩主要残留于冀中拗陷东北部和南部地区,面积约为 12 000 km²(图 5)。煤系烃源岩发育于石炭系太原组和二叠系山西组,包括煤层、碳质泥岩和深灰色泥岩 3 种岩性^[24](图 2)。煤系地层在冀中拗陷东北部的廊固凹陷河西务潜山带、武清凹陷、霸县凹陷苏桥—文安地区和大城凸起等地区分布,厚度一般为 0~200 m、最大厚度为 300 m(图 2),其中,单煤层的厚度一般为 15~35 m、最大厚度为 50 m;冀中拗陷南部地区的煤层厚度较薄,一般为 10~30 m。碳质泥岩分布广泛而稳定,一般厚度为 50~80 m,最厚为 100 m。深灰色泥岩在全区的分布比较均匀,厚度一般为 100~150 m,最厚达 200 m。

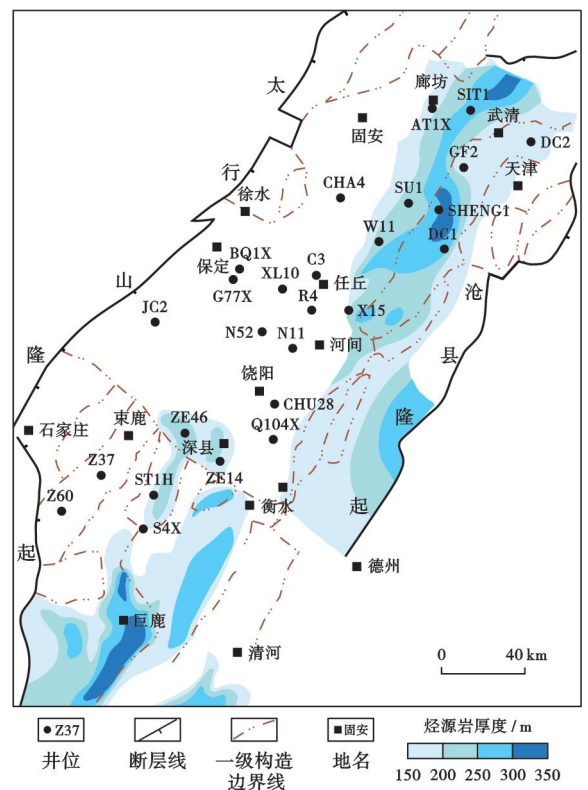


图 5 冀中拗陷石炭系—二叠系煤系烃源岩厚度
Fig. 5 Thickness of Carboniferous-Permian coal measure source rocks in Jizhong depression

煤系烃源岩的有机质丰度普遍较高(表 1)。相比之下,冀中拗陷东北部霸县凹陷、武清凹陷、廊固凹陷和大城凸起的有机质丰度和生烃潜要优于拗陷南部束鹿凹陷、深县凹陷^[25]。

冀中拗陷东北部地区的煤系地层为较好—好气源岩(表 1)。煤层的 TOC 含量为 41.02%~56.11%,碳质泥岩的 TOC 含量为 14.41%~15.43%,暗色泥岩的 TOC 含量为 1.36%~2.65%;煤层的生烃潜量($S_1 +$

表1 冀中坳陷石炭系一二叠系煤系烃源岩有机质丰度

Table 1 Organic abundance of Carboniferous-Permian coal measure source rocks in Jizhong depression

构造单元	岩性	TOC 含量/%	$S_1 + S_2$ /(mg/g)	氯仿沥青“A”/%	总烃/%	综合评价
霸县凹陷	煤岩	50.14(65)	111.50(53)	2.0548(4)	0.4796(6)	煤系好气源岩
	碳质泥岩	15.43(51)	35.47(48)	0.1988(5)	0.0588(5)	
	暗色泥岩	2.65(85)	3.05(85)	0.1037(7)	0.0296(7)	
廊固凹陷	煤岩	41.02(16)	50.05(13)	1.1378(4)	0.5390(4)	煤系较好气源岩
	碳质泥岩	14.85(6)	22.50(4)	0.5628(1)	0.1738(1)	
	暗色泥岩	1.36(21)	2.23(13)	0.0711(2)	0.0497(2)	
武清凹陷	煤岩	56.11(6)	130.50(6)	3.4400(3)	0.1062(4)	煤系好气源岩
	碳质泥岩	14.41(2)	36.86(2)	0.0534(7)	0.0244(7)	
	暗色泥岩	1.65(15)	1.65(15)	0.0534(7)	0.0244(7)	
大城凸起	煤岩	54.47(21)	86.67(18)	2.9983(13)	0.7251(10)	煤系好气源岩
	碳质泥岩	8.29(8)	10.89(8)	0.2272(5)	0.0965(3)	
	暗色泥岩	2.10(47)	6.04(34)	0.0878(23)	0.0448(5)	
束鹿凹陷	煤岩	24.39(7)	40.28(7)		0.0958(1)	中等气源岩
	暗色泥岩	2.03(38)	2.89(37)		0.0407(6)	

注: TOC—总有机碳; $S_1 + S_2$ —生烃潜量; 数据为平均值; 括号内为样品数。

S_2) 为 50.05~130.50 mg/g, 碳质泥岩的 $S_1 + S_2$ 为 22.50~36.86 mg/g, 暗色泥岩的 $S_1 + S_2$ 为 1.65~6.04 mg/g; 煤层的氯仿沥青“A”含量为 1.14%~3.44%, 碳质泥岩的氯仿沥青“A”含量为 0.20%~0.56%, 暗色泥岩的氯仿沥青“A”含量为 0.05%~0.10%; 煤层的总烃含量为 0.11%~0.73%, 碳质泥岩的总烃含量为 0.06%~0.17%, 暗色泥岩的总烃含量为 0.02%~0.05%。冀中坳陷南部束鹿凹陷的煤系为中等气源岩(表 1)。煤层的 TOC 含量平均为 24.39%, 暗色泥岩的 TOC 含量平均为 2.03%; 煤层和暗色泥岩的生烃潜量分别为 40.28 mg/g 和 2.89 mg/g, 总烃含量分别为 0.0958% 和 0.0407%。煤系烃源岩的有机质类型总体为 III 型, 个别暗色泥岩的有机质类型为 II₂ 和 III 型, 主要为生气型烃源岩。

3.2 储集层特征

冀中坳陷发育碳酸盐岩、碎屑岩、火成岩和变质岩 4 类储集岩^[26], 均已获得工业油气流。其中, 中、新元古界一下古生界海相碳酸盐岩和新生界碎屑岩储层分布广、厚度大、物性好, 是主要的 2 类油气储集体; 古近系火成岩和太古宇变质岩等储层的分布局限, 是次要的油气储集体。

3.2.1 中、新元古界一下古生界海相碳酸盐岩储层

冀中坳陷从中、新元古代至古生代末期为稳定地台发育阶段, 沉积了厚度达 7500 m 以海相碳酸盐岩为主的沉积体系, 主要发育在中、新元古界蓟县系高于庄组、雾迷山组和下古生界寒武系、奥陶系, 是冀中坳陷重要的潜山油气储集层。据岩心观察、岩石薄片鉴定、岩矿分析, 蓟县系高于庄组、雾迷山组储集层的岩性主要为角砾状隐藻白云岩、泥晶—粉晶白云岩、硅质白云

岩; 寒武系府君山组主要为细晶白云岩夹白云质灰岩; 奥陶系主要为泥晶—粉晶灰岩、细晶—粉晶白云岩^[27]。此类储层年代古老, 受构造活动影响, 发生的次生变化强烈, 储集空间类型多样。根据 28 个潜山碳酸盐岩油气藏的储渗空间的组合关系分析, 可将中、新元古界一下古生界海相碳酸盐岩储层划分为缝-洞-孔复合型、溶洞-裂缝型、似孔隙型和微缝-孔隙型 4 种储层类型。储层类型受埋深、岩性及构造改造作用控制, 具有明显的规律性: 浅层潜山油气藏(埋深 < 2000 m) 岩溶发育, 以发育溶洞-裂缝型储集类型为主; 中等埋深(2000~3500 m) 的潜山油气藏以发育缝-洞-孔复合型储集类型为主; 深层(埋深 > 3500 m) 潜山储层中岩溶不发育, 多发育微缝-孔隙型和似孔隙储集类型。

3.2.2 新生界碎屑岩储层

冀中坳陷新生界发育多种陆相河湖沉积体系, 碎屑岩储层分布于新近系明化镇组、馆陶组和古近系东营组、沙河街组、孔店组。新生界碎屑岩(以砂岩为主) 是冀中坳陷储集体分布最广、层系最多、厚度较大、物性较好的一类储集岩。研究表明: 碎屑岩储层受构造、沉积、成岩作用控制, 储层的岩相岩性有洪(冲)积扇砂砾岩体, 以及河道、辫状河三角洲、扇三角洲、近岸水下扇、滩坝、浊积扇等多种成因的沉积砂体^[28]。储集岩的粒间孔、粒间溶孔、粒内溶孔、铸模孔和超大孔是主要的储集空间。

根据古近系主要油田中的储层物性资料统计, 沉积微相控制了储集体的储集性能和油气富集。辫状河道、扇中主水道、辫状沟道等沉积微相砂体分布最广、发育时期最多、成藏条件最好, 储层含油性最好, 孔隙度为 13.0%~35.4%, 渗透率为 20~1000 mD, 主要

控制着整装规模油气储量油气藏的形成;分支河道、分流水道、沟道等沉积微相砂体的水动力条件较强,岩性较细,砂地比为 35%~55%,孔隙度一般为 13%~18%,渗透率一般为 2~144 mD,储集性能和含油性为中等—较好,主要控制着厚层状油气藏的高产富集;楔状砂、沟道侧翼、河漫滩、生物滩、河泛平原、水道间、浊积砂等沉积微相与外扇亚相砂体,由于水动力条件较弱,岩性主要为粉砂岩和泥质粉砂岩,砂地比为 10%~35%,孔隙度一般为 6%~13%,渗透率一般为 0.7~29.7 mD,砂体横向变化快,其储集性能和含油性较差,主要形成薄层状油藏。

近年来,中—深层储层的研究结果也表明^[29-30];超压是保护中—深层储层物性的重要因素;洼槽区的超压带控制了油气成藏;异常高压带对(次生)孔隙发育带和油气运聚具有明显的控制作用;在埋深为 5 000~

6 000 m 的地段,深部砂岩储层仍可保持较好的物性,具有良好的成藏条件和勘探前景。这些因素使得碎屑岩的储集下限相对以往向深部得到了很大程度的延伸。

3.3 成藏组合

综合研究表明,冀中坳陷的油气藏形成受区带构造特征、烃源层、储层、盖层、圈闭和油气运移通道等要素控制,油气在生烃期、排烃期、运移期、聚集期和圈闭形成期这“5 期”时空上的相互配置关系较好。主要烃源层的主要生烃期、运聚期均出现在新近纪前和新近纪。沙四段—孔店组烃源岩于沙三段沉积早期进入生油阶段,在沙三段沉积后期—东营组沉积期进入生烃高峰;沙三段—沙一段烃源岩的主要排烃和运移发生在东营组—馆陶组沉积期^[31-33]。潜山和新生界主要圈闭的形成期在新近纪或新近纪之前,成藏要素的配套最佳(图 6),有利于油气成藏。

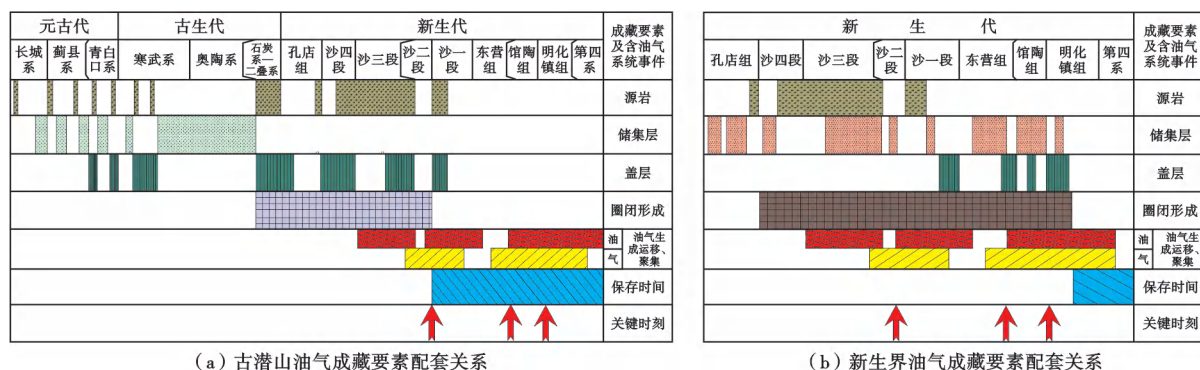


图 6 冀中坳陷油气成藏要素配套关系

Fig. 6 Relationship between hydrocarbon accumulation elements in Jizhong depression

冀中坳陷主要发育石炭系—二叠系煤系以及古近系沙三段、沙一段下亚段、东营组二段(东二段)湖相泥岩 4 套良好的区域性盖层,与多套有利储集层匹配,主要形成“新生古储、自生自储、下生上储、古生古储”4 类成藏组合(图 2)。

3.3.1 “新生古储”成藏组合

生油层是新生界古近系湖相烃源岩,谓之“新生”;储集层为古生界、中元古界、新元古界和太古界储集岩,谓之“古储”。在“新生古储”成藏组合中,古近系湖相烃源层逐层超覆于古潜山之上,通过不整合面和断面使烃源岩与古潜山储层直接对接,生成的油气可直接向潜山及内幕运聚成藏。潜山上覆的古近系不同层段泥岩或石炭系—二叠系煤系地层可以作为良好盖层,从而构成良好的新生古储成藏组合,这是古潜山油气藏最主要的油气藏类型^[34]。冀中坳陷已发现太古界、长城系、蓟县系、寒武系、奥陶系和石炭系—二叠系等多套潜山及潜山内幕含油气层系。

3.3.2 “自生自储”成藏组合

此类成藏组合广泛分布于古近系孔店组和沙河街组,尤其是沙四段上亚段、沙三段下亚段、沙一段下亚段等在多期次构造运动作用下,碎屑岩、湖相碳酸盐岩储层与泥页岩烃源岩层、封盖层在纵向上呈频繁的交互叠合,构成了 9 套自生自储型成藏组合^[35]。该组合通过断裂或渗透性砂体沟通源、储,形成近源充注成藏,是冀中坳陷最主要的含油层系。

3.3.3 “下生上储”成藏组合

该组合中,古近系沙四段—孔店组、沙三段、沙一段下亚段的生油层为“下生”,上覆沙一段上部、东营组和新近系馆陶组和明化镇组等非生油层为“上储”,油气通过断层、不整合面、储集体等通道自烃源层运移并聚集到浅层的储集层内,从而形成“下生上储”型油气藏^[36]。

3.3.4 “古生古储”成藏组合

该组合在古生界石炭系—二叠系煤系烃源岩中生成油气(以天然气为主),在中元古界—新元古界—古生界碳酸盐岩和石炭系—二叠系碎屑岩中储集油

气^[37-38],油气通过断层、不整合面向附近的潜山及内幕圈闭充注形成“古生古储”型油气藏。此类油气藏主要分布于冀中拗陷东北部的廊固凹陷东部、武清凹陷和文安斜坡。

3.4 油气分布

冀中拗陷具有“多凸多凹、凸凹相间”的构造格局,发育多个生油洼槽和洼边正向构造带^[39]。每个生油洼槽在地质结构上都自成一体,形成相对独立的烃源岩发育区、聚油气单元和含油气系统^[40]。受生油洼槽控制,在区域上形成“油气围绕生油洼槽聚集、东富西贫、南油北气”的分布特征,构成了以古潜山为主体的中央隆起型、陡坡型、斜坡型和洼槽型4种复式油气聚集带^[41]。

3.4.1 油气分布特征

烃源岩是冀中拗陷油气藏形成与分布的主要控制因素,油气在侧向上多以短距离运移、就近聚集为主,围绕生油洼槽及其周缘形成环状分布(图1)。

冀中拗陷的油气分布具有东部凹陷带油气富集,西部凹陷带油气相对贫乏的特征。东部凹陷带内烃源岩层系多,古近系深湖及较深湖烃源岩的厚度及体积大、分布范围广、有机质丰度高,因而油气资源丰富^[12]。目前,冀中拗陷已探明的油气储量全部分布在东部凹陷带,而西部凹陷带近年来已在保定凹陷清苑

构造带钻探的BQ1X井、G77X井等多口井中获得了勘探重要突破,证实了西部也具有一定的勘探潜力。其他还未获得工业油气流的凹陷则需要重新认识。

冀中拗陷既有油藏,也有气藏。其中南部以油为主,探明石油总地质储量的占比为79.6%;北部为油、气共存区,天然气资源相对富集,探明石油地质储量占冀中拗陷的20.4%,探明天然气地质储量为 $374.33 \times 10^{12} \text{ m}^3$,占总地质储量的99%。

3.4.2 油气聚集带

(1) 中央隆起型复式油气聚集带。该带处于富油凹陷中心,四周被多个生油洼槽包围,属于“洼中隆”潜山构造带,具有近源多向供烃、断裂高效输导、多层系立体成藏的有利条件,是冀中拗陷最主要的油气聚集带,已发现的石油探明地质储量占冀中拗陷潜山总探明地质储量的60%以上^[42-43]。以任丘潜山带为例,相继在潜山和古近系发现了多套含油层系,形成了潜山山头雾迷山组块状油藏、潜山坡奥陶系楔状体油藏、潜山腹寒武系潜山内幕层状油藏;在潜山之上,古近系沙河街组一东营组断块、岩性等多种油藏类型呈披覆、叠置分布(图7)。其中,以廊固凹陷河西务、霸县凹陷郑州一雁翎、饶阳凹陷大王庄、肃宁等地区的潜山复式油气聚集带最为典型。

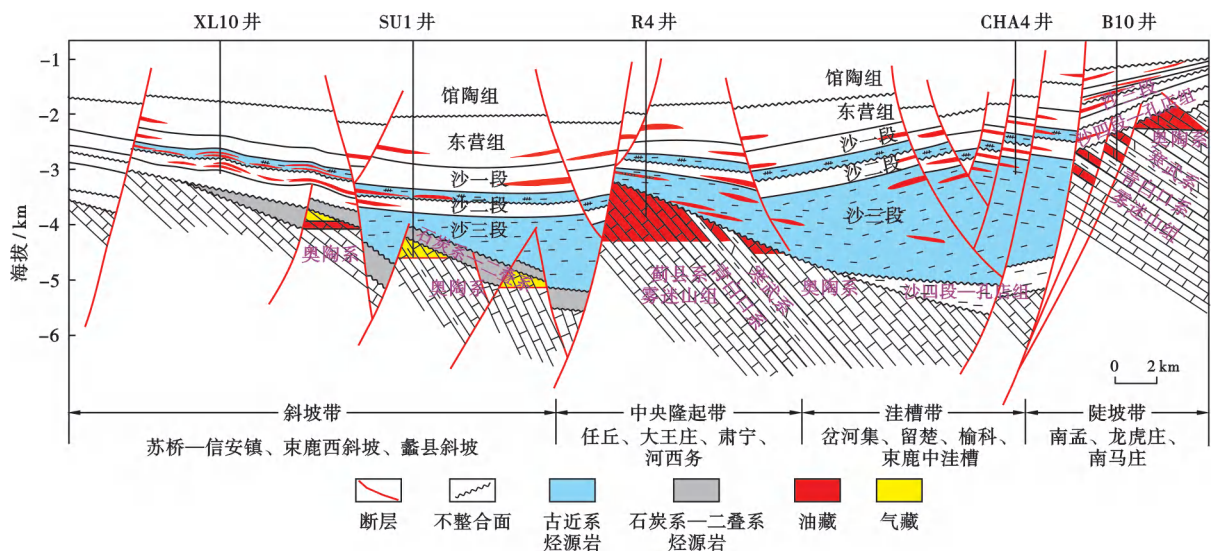


图7 冀中拗陷不同复式油气聚集带

Fig. 7 Composite hydrocarbon accumulation belts in Jizhong depression

(2) 陡坡型复式油气聚集带。该带位于控凹大断层两侧,受控凹主断裂和多条派生断层控制,形成了断阶型潜山、新生界断块及岩性地层等圈闭。在紧邻主生油洼槽处,油气源充足,构造样式丰富,砂体类型多样,有利于潜山-新生界复式油气聚集。例如:霸县凹

陷西部陡坡带在牛东断层上升盘南孟一龙虎庄一顾辛庄地区形成了寒武系和奥陶系断阶潜山油藏,其上覆则为古近系岩性-地层油藏(图7);在饶阳凹陷东部马西一河间一留北、深县凹陷何庄一深西、东鹿凹陷荆丘一台家庄等地区的多个陡坡断阶上形成了潜山-新

生界复式油气聚集带。

(3) 斜坡型复式油气聚集带。该带通过不整合面或顺地层倾向的基底大断裂侧向供油,依靠基底反向断层遮挡可形成潜山及古近系构造油气藏,而广泛发育的多种砂体也有利于形成大面积的地层油藏和岩性油藏。例如:在霸县凹陷文安斜坡苏桥—信安镇潜山复式油气聚集带上主要发育奥陶系和二叠系潜山气藏,在潜山之上发育古近系构造油气藏和岩性地层油气藏^[44](图 7);此外,在饶阳凹陷的蠡县斜坡、束鹿凹陷西斜坡带也发现此类油气复式聚集带。

(4) 洼槽型复式油气聚集带。该带以中—浅层发育滑塌挤压背斜构造为主体,位于主力生烃洼槽内,通过断层纵向输导、多源供烃,可形成一系列复杂断块油气藏。例如:在霸县凹陷牛东断层下降盘的岔河集逆牵引背斜构造带上,古近系发育东营组—沙四段 8 套含油层,形成了冀中拗陷最大的新生界油田(图 7);在饶阳凹陷留楚塌陷背斜、廊固凹陷柳泉—曹家务、霸县凹陷高家堡、深县凹陷榆科、深南以及晋县凹陷赵县等地区也存在一大批背斜复式油气聚集带。该带内还发育受同生大断层下降盘控制的由负地貌河流相砂体、湖底扇砂砾岩等构成的上倾尖灭岩性油藏,以饶阳凹陷大王庄东断层下降盘 LU70 井东营组、廊固凹陷大兴砾岩体的岩性油藏为代表^[45-46]。此外,该带在中—深层广泛分布优质烃源岩,油页岩、泥灰岩等脆性岩性发育,构造稳定,页岩油、致密油成藏条件有利^[47-48],如在束鹿凹陷中洼槽 ST1H 井,沙三段下亚段已发现页岩油藏。

3.5 资源潜力

第 4 次油气资源评价结果表明,冀中拗陷的石油资源量为 $25.8 \times 10^8 \text{ t}$,天然气资源量为 $3364 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。截至 2022 年底,冀中拗陷的探明石油地质储量为 $11.8 \times 10^8 \text{ t}$ 、资源探明率为 45.7%,探明天然气地质储量为 $374 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、资源探明率为 11%。冀中拗陷古近系发育 3 套主力烃源岩(沙四段上亚段、沙三段、沙一段下亚段),饶阳凹陷、束鹿凹陷、霸县凹陷和廊固凹陷 4 个凹陷的页岩油资源量为 $15.2 \times 10^8 \text{ t}$,剩余油气资源比较丰富。

从冀中拗陷的勘探现状与剩余资源分布的整体评价情况来看,油气勘探在富油凹陷间、不同构造单元或区带间、不同勘探层系间以及不同勘探领域间的勘探程度存在不均衡性,具有在老凹陷、正向构造带、中—浅层、常规油气、潜山顶领域勘探程度高,在“新区”凹陷、斜坡洼槽区、深层、非常规油气、隐蔽型潜山领域勘探程度低的“五高五低”特征。剩余石油资源主要集中在富油凹陷,其中,古近系共有 4 个亿吨级以上的凹

陷(饶阳凹陷、霸县凹陷、廊固凹陷和晋县凹陷),合计石油资源量占冀中拗陷总剩余石油资源量的 81%;剩余天然气资源主要集中在冀中拗陷北部的廊固凹陷、霸县凹陷和武清凹陷,合计天然气资源量占天然气总剩余资源量的 74.1%;中—深层、超深层剩余石油、天然气地质资源量分别占总剩余石油、天然气资源量的 80.3%和 88.4%,具有较大勘探空间。石炭系—二叠系的剩余天然气资源量为 $1303 \times 10^8 \text{ m}^3$,应用体积法计算得到煤层气资源量为 $2447.9 \times 10^8 \text{ m}^3$,天然气勘探潜力较大。

4 新领域、新类型有利勘探方向

围绕未来勘探接替新领域,结合“十四五”(2021—2025 年)规划油气勘探的总体发展目标,通过深化成藏理论认识,依据油气勘探新成果,综合评价出 5 个新领域和新类型有利勘探方向:①深潜山及其内幕勘探领域;②老区富油凹陷古近系深层勘探领域;③页岩油勘探领域;④石炭系—二叠系深部煤层气勘探领域;⑤保定凹陷、武清凹陷等凹陷新区勘探领域。

4.1 深潜山及其内幕勘探领域

潜山油气藏是冀中拗陷油气勘探的重要领域。经过多年大规模持续勘探,规模大、埋藏浅、构造简单、容易发现的山头型块状潜山油气藏已被发现殆尽。近年来,通过加强潜山及其内幕的成藏研究,在潜山部位钻探的 C3 井、WG3 井、ND1 井、AT1 井等一批井均获得了高产油气流,如在廊固凹陷杨税务潜山钻探的 AT1 井在奥陶系 5023.4~5203 m 井段试油获得产油量为 56.25 t/d、产气量为 $40.9 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的高产工业油气流,从而发现了杨税务潜山天然气藏,证实了深潜山及其内幕油气藏具有较大的勘探潜力。而埋藏更深(5000~7000 m)、外形更隐蔽、成藏更复杂的深潜山及其内幕也有望成为下一步的主要勘探对象。综合分析认为,深潜山及其内幕油气藏具有 3 方面主要成藏特征。

(1) 储集类型多样,有利储-盖组合多。冀中拗陷内可以划分出多套主要的碳酸盐岩潜山内幕储-盖组合,即以奥陶系白云岩、中寒武统张夏组—一崮山组鲕粒灰岩、下寒武统府君山组白云岩、蓟县系雾迷山组与高于庄组碳酸盐岩、长城系常州沟组石英砂岩作为有效储层,与石炭系—二叠系煤系地层、中寒武统徐庄组+毛庄组+馒头组、青白口系下马岭组、蓟县系洪水状组和杨庄组等泥页岩地层形成的多套有利潜山内幕储-盖组合^[49](图 2、图 7)。研究表明,在深潜山及其内幕,尽管中、新元古界—下古生界的埋藏深度达到 4000~6000 m,但在奥陶系、寒武系府君山组以及蓟县系雾迷山组、高于庄组等碳酸盐岩储层中

仍发育溶孔、晶间孔、构造缝、溶蚀缝等多种有利储集空间(图8),而不同类型的岩石组合则形成了岩溶-孔洞型、断裂-孔缝型和白云岩孔隙型3种储集类

型^[50]。雾迷山组储层的物性分析(图9)显示,物性在纵向上随深度变化不大,这表明深潜山储层依然具有较好的储集性能。

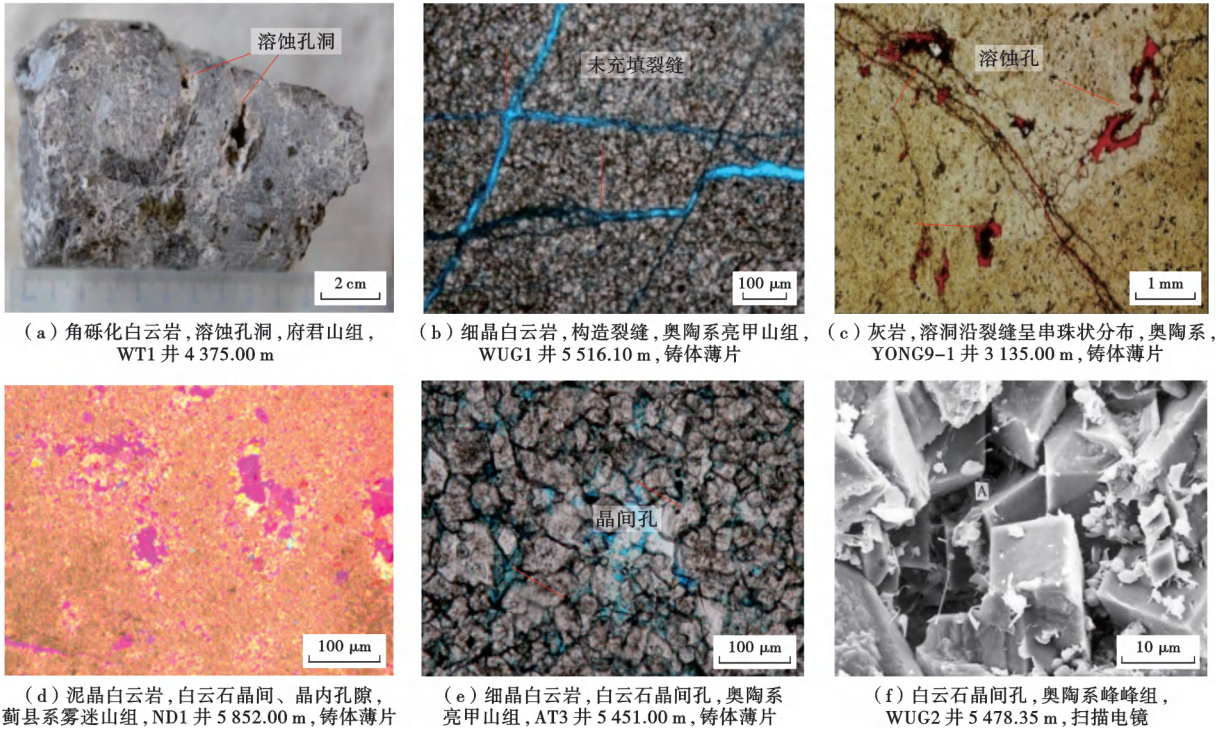


图8 冀中坳陷碳酸盐岩储层储集空间特征

Fig. 8 Reservoir space characteristics of carbonate reservoirs in Jizhong depression

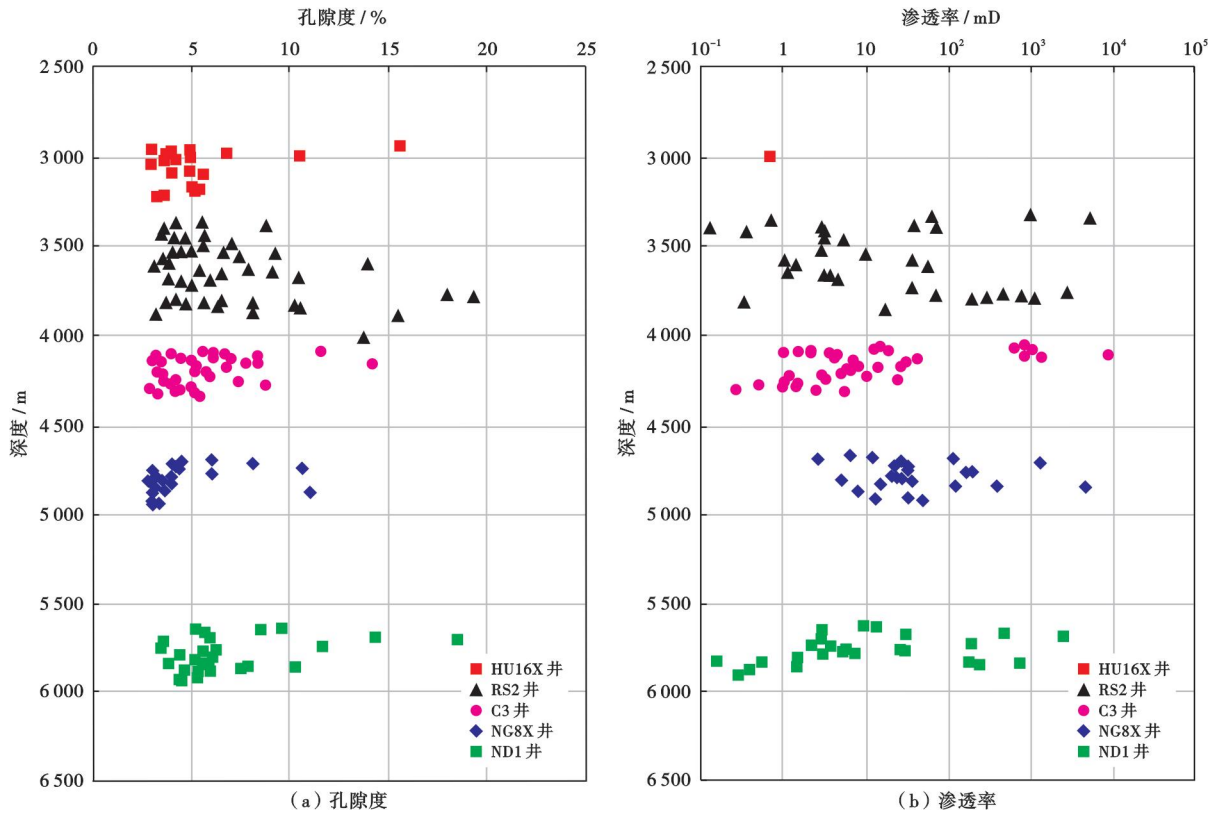


图9 冀中坳陷雾迷山组潜山储层的物性分布

Fig. 9 Reservoir physical property distribution of Wumishan Formation buried-hill in Jizhong depression

(2) 邻近主力生烃洼槽, 油气运聚条件优越。综合前人的研究成果认为, 深潜山及其内幕油气藏具有“近源多灶供烃、断裂高效输导、优质储层控藏”的成藏特征(图 10)。冀中坳陷烃源岩层位老、埋藏深, 主要发育古近系沙三段、沙四段和孔店组湖相烃源岩, 以及上古生界石炭系一二叠系海陆交互相煤系烃源岩, 深层油气资源十分丰富。深潜山多属于深洼-低隆型潜山, 一般在凹陷形成早期就已具备潜山雏形, 古近纪以来始终作为油气运移的有利指向区, 具有“源近、储优、充注强”的优势成藏条件。以廊固凹陷、武清凹陷深潜山为例, 根据 AT1 井和 SIT1X 井奥陶系天然气藏的生物标志化合物和碳同位素等指标分析, 潜山的油气主要来源于沙三段下亚段、沙四段和石炭系一二叠系等多套烃源岩, 而邻近河西务潜山、泗村店潜山两侧的

柳泉洼槽区、大孟庄洼槽区则是主要的油气供烃区; 古近系和石炭系一二叠系深层高成熟烃源岩生成的轻质油或天然气通过控制潜山的深大通源断裂首先被就近运移至深潜山及其内幕圈闭内的奥陶系亮甲山组、下马家沟组和上马家沟组优质储层中聚集, 并在达到圈闭溢出点后再继续沿断裂等通道纵向运移至中一浅层潜山圈闭。AT3 井的包裹体分析结果表明, 潜山的成藏期可分为沙一段—东营组沉积期和明化镇组沉积期 2 期, 以第 2 期成藏为主, 捕获压力为 38.6~57.3 MPa, 压力系数为 1.3~1.6, 具有高压、强充注的成藏条件^[51](图 10)。总之, 深潜山及其内幕具备近源早期供烃、多期充注、多套优质储层富集成藏的优越条件^[29-30], 油气藏具有纵向差异聚集、深层充满程度高、规模大的特征。

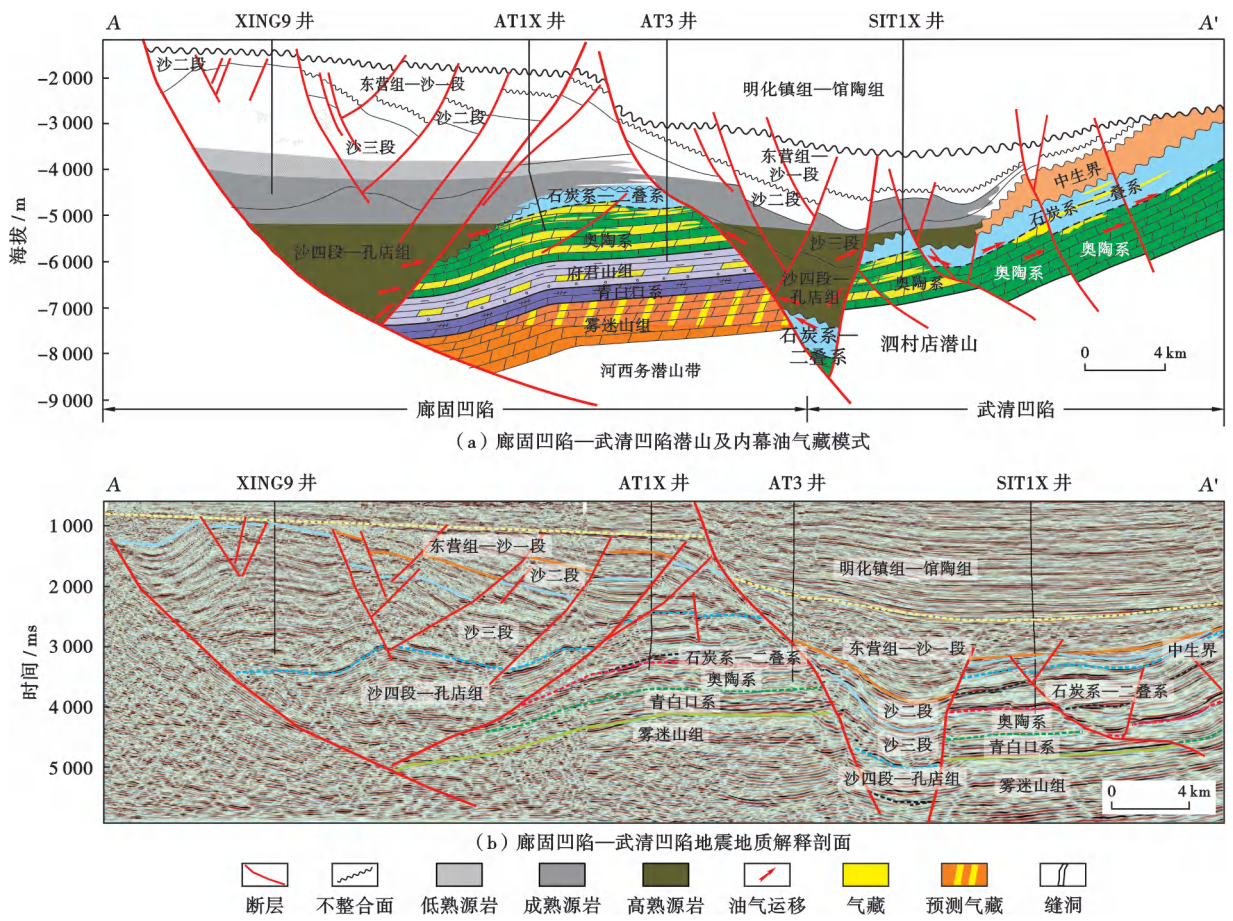


图 10 廊固凹陷—武清凹陷潜山及内幕成藏模式(剖面位置见图 1)

Fig. 10 Hydrocarbon accumulation mode of buried-hill and inner in Langgu-Wuqing sags

(3) 发育多种潜山及内幕成藏模式, 勘探领域多。潜山内幕油气的富集成藏主要受优质储层、有效盖(隔)层、高效供烃方式和优越圈闭条件等关键因素控制。基于这些成藏关键因素分析认为, 冀中坳陷具备层状、块状等多种潜山及内幕油气藏的成藏模式(图 10)。目前, 已运用冀中坳陷新的三维地震叠前深度偏移连

片资料对潜山及其内幕开展整体构造解释以及圈闭精细落实与评价, 在多个区带发现了一批有利圈闭目标, 并根据已有研究成果确定出成为有利勘探区的基本地质条件, 包括: ①邻近主力生烃洼槽, 烃源岩供烃窗口大、油气源充足; ②区内优势储层发育, 储-盖(隔)组合最佳; ③具有发育继承性潜山古隆起带的构造背景;

④具有有利的输导体系,以断裂直接供烃为主,多级输导体系间接供烃为辅。据此,可优选出奥陶系低位准层状潜山及其内幕、寒武系府君山组层状潜山及其内幕、蓟县系雾迷山组块状潜山及其内幕以及中、新元古界自生自储原生油气藏4个最有利的勘探领域(图10);优选杨税务、泗村店、杨村斜坡、文安斜坡—南马庄、长洋淀—郑州、深西—何庄、束鹿斜坡7个区带作为有利勘探方向。目前,在冀中拗陷北部廊固凹陷河西务潜山带、武清凹陷和文安斜坡已发现落实13个有利目标区,预测天然气圈闭资源量为 $1\,453 \times 10^8 \text{ m}^3$,是天然气规模勘探的现实有利区(图1)。

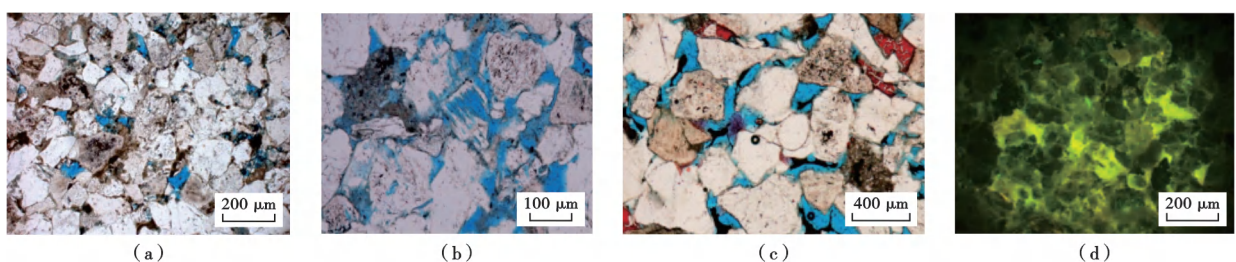
4.2 古近系深层勘探领域

在冀中拗陷埋藏深度大于3500 m的深层碎屑岩领域,勘探程度较低,油气成藏条件好。针对古近系深层领域,油公司在饶阳凹陷钻探了Q104X井,在沙三段下亚段新层系4300 m深度试油,获产油量为75.84 t/d的高产工业油流;在武清凹陷钻探了SIT1X井,在沙四段5000 m深度压裂后求产,获产油量为68.3 t/d的高产工业油流,揭示了古近系深层具备效益规模增储的勘探潜力。研究认为,充足的油气源、优质储层和有利的构造背景是深层油气成藏的主控因素。古近系深层主要具备3方面成藏优势。

(1)发育多套优质烃源岩,资源潜力大。冀中拗陷古近系深层主要发育沙三段和沙四段—孔店组2套烃源岩。近年来钻探的XLONG1井、WA1井、ND1井、Q68X井等深井已证实在冀中拗陷深层发育巨厚的优质烃源岩^[52-53]。其中,沙三段烃源岩厚度最大,分布区域广,除传统沙三段上亚段为优质烃源岩外,在饶阳凹陷南部武强洼槽钻探的Q68X井,其深层新层系沙三段下亚段钻遇的优质烃源岩厚度达400 m,在冀中拗陷南部地区分布面积为1200 km²。有机地球化学分析结果表明,烃源岩的TOC含量>2.0%, $S_1 + S_2$ 最大可达31.05 mg/g,氯仿沥青“A”含量为0.289%,有机质类型以II₂型为主,最高热解峰温(T_{max})为430~455℃,

为中—好成熟烃源岩,估算石油资源量为 $2 \times 10^8 \text{ t}$ 。沙四段—孔店组烃源岩主要发育在冀中拗陷南、北两区,北区霸县凹陷、廊固凹陷的烃源岩为沙四段上亚段,南区晋县凹陷南洼槽的烃源岩为孔二段;烃源岩的TOC含量>1.5%,氯仿沥青“A”含量为0.15%~0.25%,被证实为已发现油藏的有利烃源层。资源评价表明,冀中拗陷深层的石油地质资源量为 $6.13 \times 10^8 \text{ t}$ 、天然气地质资源量为 $1\,843 \times 10^8 \text{ m}^3$,但资源转化率分别仅为3.3%和4.1%,剩余油气资源量大,深层油气勘探具备雄厚的资源基础。

(2)深层储层受“四主元”(沉积相带、有机酸、油气充注、流体超压)控制,发育多个异常高的孔隙发育带。通过分析冀中拗陷深层储层发育的控制因素,研究认为,深层碎屑岩优质储层主要受沉积相带、有机酸、油气充注、流体超压“四主元”控制,形成了多个异常孔隙发育带,并具有原生孔隙与次生孔隙共存的特点,其中,古近系深层的储层物性以中—低孔、低渗—特低渗为主。①有利沉积相是深层发育优质储层的物质基础。统计结果表明,辫状河三角洲前缘水下分流河道及河口坝砂体的刚性颗粒含量高、分选好、粒度粗,普遍发育粒间溶孔、粒内溶孔[图11(a)],储层物性最好,有效储层的发育率最高。②烃源岩在生烃前期产生的大量有机酸会对长石、岩屑、碳酸盐胶结物等产生溶蚀作用,形成大量次生溶蚀孔隙[图11(b)]。③油气充注有利于原生孔隙的保存,如早期充注的油气占据孔隙空间、抑制碳酸盐岩的胶结作用,油气充注后粒间溶孔发育,且在荧光薄片可观察到粒内溶孔中含油气[图11(c)、图11(d)]。④洼槽区普遍发育超压,压力系数为1.1~1.6,超压流体的释放不仅带出溶解物质、增强了长石的溶解作用,而且减缓了上覆沉积物的压实作用,有利于深层砂砾岩储层孔隙保存。2022年,在饶阳凹陷杨武寨构造带深层钻探的Q104X井获高产油流,其储层孔隙度平均为11.9%,渗透率平均为23 mD,证实4000 m以深依然可以发育优质储



(a)分流河道砂体,岩屑石英砂岩发育粒间溶孔、粒内溶孔,沙三段,XINGL1井4282.93 m,铸体薄片;(b)长石石英砂岩见长石颗粒溶蚀孔,沙三段中亚段,Q68X井3491.00 m,铸体薄片;(c)油气充注粒间溶孔,沙三段下亚段岩屑石英砂岩,Q104X井4375.29 m,铸体薄片;(d)粒内溶孔见油气,沙四段,XINGL1井4963.00 m,荧光薄片。

图11 冀中拗陷深层碎屑岩微观储集空间特征

Fig. 11 Microscopic characteristics of reservoir space in deep clastic rocks in Jizhong depression

层。通过对冀中坳陷深层碎屑岩的储层下限深度开展研究,对有效储层下限深度的认识从之前的 3 600 m 扩大至 4 200~5 000 m,极大地拓展了深层的勘探空间。

(3) 具备多种成藏模式,油气藏的时空配置关系良好。研究认为,“自源、相优、背景好”是深层油气富集成藏的主控因素,大型正向构造带、斜坡内带—洼槽区、陡坡带均具备发育深层油藏的有利条件。深层构造带主要发育在生油洼槽内或紧邻深洼槽一侧的大型斜坡内带,其构造背景好,始终是油气运移的有利指向

区。洼槽区普遍发育超压,可以为油气向大型三角洲前缘优势相带内的砂岩储层提供充注动力,具备“源-储-势”高效耦合的良好成藏条件。例如,饶阳凹陷武强洼槽深层沙三段下亚段发育“近源供烃—砂体控储—构造高富集”的自生自储成藏模式,沙三段下亚段的优质烃源岩优先向深层近源圈闭供油,并随着圈闭充满程度提高,下部烃源岩生成的油气通过断层及砂体组成的输导路径向上部圈闭供烃,从而形成大型断垒构造复式油气聚集区带^[32](图 12)。冀中坳陷陡坡

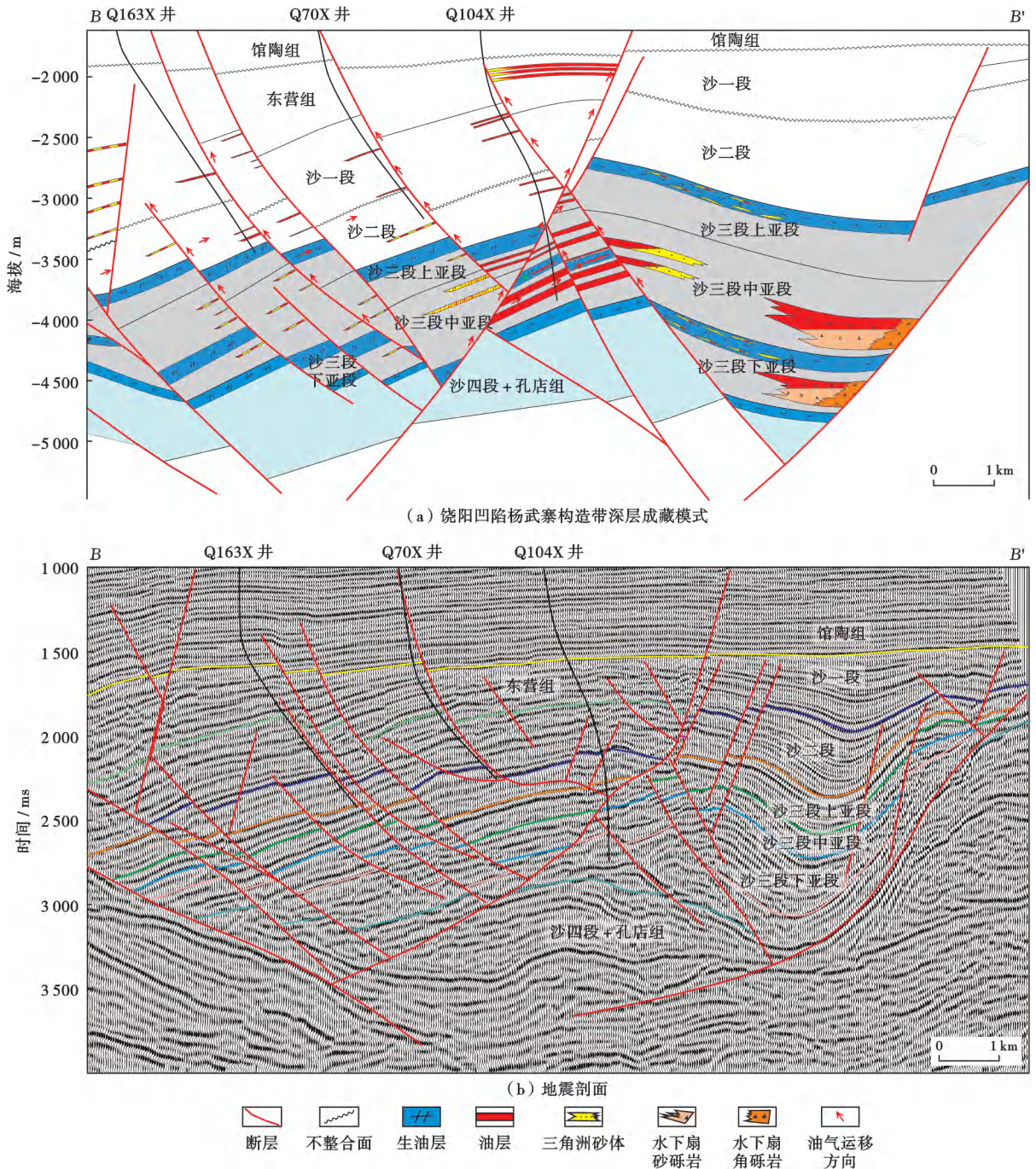


图 12 冀中坳陷古近系深层成藏模式(剖面位置见图 1)

Fig. 12 Hydrocarbon accumulation mode of Paleogene deep reservoir in Jizhong depression

带在沙三段—沙四段沉积期、孔店组沉积期普遍发育大套近岸水下扇沉积,砂砾岩体由于物性侧向变化可形成岩性圈闭;此外,陡坡带上继承性发育的控凹大断层使得地层遭受挤压反转,由此可形成砂砾岩上倾尖灭的岩性圈闭;这些圈闭被大套的深层优质烃源岩包围,具备源-储一体、近源供烃的优势,从而形成一大批砂砾岩岩性油气藏^[45-46](图12)。斜坡区为油气运移的主要指向区,斜坡内带和外带的斜坡上倾方向存在大量的三角洲前缘超覆、尖灭砂体,可形成岩性、地层等多种类型的圈闭和油气藏,是岩性、地层油气藏勘探的有利区带。

结合冀中坳陷的深层成藏条件及勘探现状,综合评价认为,邻近生油洼槽周缘的大型正向构造带、斜坡区和陡坡带的深层构造、岩性、地层圈闭是寻找大规模油气藏的新方向。冀中坳陷富油洼槽深层发育12个具备一定规模的正向构造带,总面积为700 km²,预测圈闭资源量为 2.4×10^8 t。饶阳凹陷留楚—皇甫村地区、武清凹陷武清背斜带、深县凹陷榆科—深南背斜带为近期预探的有利方向;霸县洼槽深层油气资源丰富,为文安斜坡提供了得天独厚的资源条件,加之斜坡内带的沙三段、沙四段具备近源供烃和断层、不整合面输导的成藏优势,已形成WA1岩性油藏,因而在文安斜坡内带大面积发育的三角洲前缘沉积相区是岩性-地层油藏的勘探有利目标;廊固凹陷和晋县凹陷陡坡带分别在沙三段下亚段、孔店组发育大套砂砾岩群,具备自生自储的优越成藏条件,已发现了XING9、T43、Z46等多个砂砾岩油藏,是深层岩性油气藏的勘探有利区带。

4.3 页岩油勘探领域

冀中坳陷古近系发育沙一段、沙三段和沙四段—孔店组3套主力烃源岩,整体上具有分布范围广、发育厚度大、成熟度适中的特征;优质烃源岩发育区也是页岩油发育的潜力区带。华北油田自2011年开始探索冀中坳陷页岩油,针对束鹿凹陷沙三段下亚段泥灰岩钻探了ST1H井、ST2X井和ST3井,相继获得高产工业油流,取得了页岩油勘探突破^[54]。根据源-储配置和岩相组合特征,冀中坳陷的页岩油主要包括单一型和夹层型2种类型。依据烃源岩、储层甜点、流动性“三品质法”对冀中坳陷页岩油开展的综合评价结果表明,冀中坳陷 $R_o > 0.7\%$ 的页岩油可动资源量为 15.22×10^8 t,其中,饶阳凹陷页岩油的可动资源量为 6.8×10^8 t,束鹿凹陷页岩油的可动资源量为 2.3×10^8 t,为最有利的勘探潜力区。

4.3.1 沙三段页岩油

沙三段是冀中坳陷的主力烃源层,TOC含量 $>$

2.0%的优质烃源岩广泛分布于饶阳凹陷、霸县凹陷、束鹿凹陷和廊固凹陷等凹陷,烃源岩最大厚度为280 m,平均为130 m。束鹿凹陷沙三段下亚段泥灰岩作为烃源岩,具有有机碳含量高、有机质类型好、转化率高、排烃能力强等特征,加之束鹿凹陷发育泥灰岩、砾岩甜点储层,可形成泥灰岩源-储一体页岩油和砾岩致密油共生的连续型成藏序列^[54],是勘探的重点区带。束鹿凹陷的沙三段页岩油具有以下成藏条件和特点。

(1) 泥灰岩厚度大,有机质丰度高,生烃能力强。束鹿凹陷沙三段下亚段在中、南洼槽发育了扇三角洲砂砾岩与内源湖相碳酸盐岩共生的大套深湖相泥灰岩沉积,厚度为300~1500 m,面积 >300 km²。泥灰岩是优质烃源岩,其TOC含量为0.6%~3.0%,最高可达7.0%以上;氯仿沥青“A”平均含量为0.2253%,普遍大于0.2%; $S_1 + S_2$ 大于6 mg/g;干酪根类型主要为II₁型;埋深一般大于3000 m, R_o 为0.7%~1.3%,处于成熟—高成熟演化阶段, $R_o > 0.7\%$ 的面积为230 km²。沙三段下亚段在馆陶组沉积末期进入成熟门限,目前整体上处于大量生油阶段。

(2) 发育纹层状泥灰岩和陆源砾岩2种优势储集岩性。沙三段下亚段共划分5个三级层序,自下而上依次为SQ1、SQ2、SQ3、SQ4和SQ5,其岩性组合以纹层状泥灰岩、块状泥灰岩、颗粒支撑砾岩、杂基支撑砾岩为主。SQ1、SQ2层序的低位体系域以扇三角洲砂砾岩沉积为主,5个层序的湖侵体系域和高位体系域主要发育纹层状泥灰岩和块状泥灰岩^[55](图13)。

根据岩石类型、储集性能、含油性和脆性等特征,纹层状泥灰岩和颗粒支撑陆源砾岩为束鹿凹陷页岩油、致密油储层的优势岩性。纹层状泥灰岩分布比较广泛、厚度大,面积达200 km²,累计厚度一般为50~200 m,如ST3井的测井解释厚度可达168.2 m。泥灰岩储层的孔隙度一般为0.50%~2.95%,平均为1.47%;渗透率一般为0.06~2.47 mD,平均为1.06 mD;储集空间主要为粒内溶蚀孔、有机孔、纹层缝、黏土矿物晶间孔和黄铁矿晶间孔[图14(a)—图14(c)],表现为纹层缝-孔隙型双重孔隙介质特征^[56];孔缝连通体积高达68.27%,孔喉结构较复杂,以纳米级孔隙为主,发育一定量的微米级孔隙;碳酸盐矿物含量较高,一般为50%~100%,平均为79.3%,脆性较好,有利于储层体积压裂改造。实际钻井证实,纹层状泥灰岩的含油性较好,产能较高,如SY1井在4109~4755 m井段分9段的压裂试油中获产油量为19.88 t/d的高产工业油流。

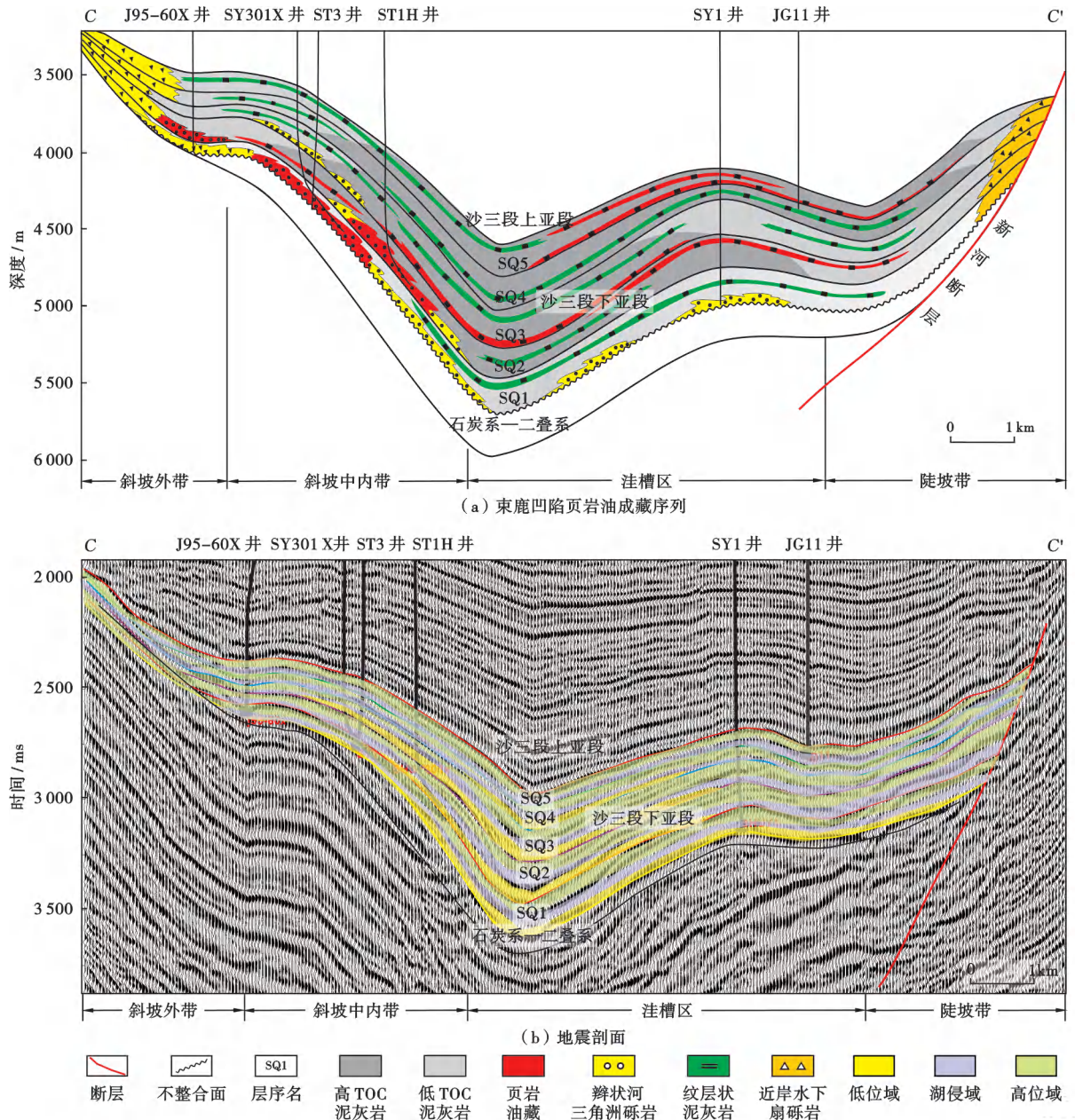


图 13 东鹿凹陷沙三段下亚段页岩油成藏模式(剖面位置见图 1)

Fig. 13 Hydrocarbon accumulation mode of shale oil from lower submember of Member 3 of Shahejie Formation in Shulu sag

颗粒支撑陆源砾岩在 SQ1、SQ2 层序分布,多个砾岩体的叠加面积达 150 km² 以上;砾岩体的累计厚度最大可达 152.6 m。砾岩储层的孔隙度一般为 0.60%~5.80%,平均为 2.76%;渗透率一般为 0.04~5.03 mD,平均为 0.85 mD,为典型的致密性储层;储集空间以粒间孔、粒间溶孔、晶间孔、溶蚀孔洞和构造溶蚀缝为主,溶蚀孔的发育与裂缝密切相关,沿构造裂缝呈串珠状分布^[57][图 14(d)~图 14(f)];孔缝的连通体积高达 70.02%,孔喉结构较好^[57];岩石脆性较好,碳酸盐矿物含量一般为 65%~100%,平均为 96%,有利于储层的体积压裂改造。实际钻井证实,此类砾岩

具有较好的含油性,原油主要分布在溶蚀孔洞、粒间杂基内微孔、粒内溶孔和裂缝中,渗流通道主要为裂缝。

(3) 形成“源-储一体”纹层状泥灰岩页岩油和“源-储共生”砾岩致密油油藏。纹层状泥灰岩油藏主要为发育在东鹿凹陷斜坡中带—内带 SQ2、SQ3 层序的水进体系域—高位体系域以及洼槽区 SQ4、SQ5 层序的半深湖、深湖亚相混合沉积中。受沉积环境影响,暗色薄层泥灰岩与泥晶灰岩呈不等厚互层,纹层界限明显,陆源物质少,以盆内化学成因为主。泥灰岩油藏具有压力大、气油比高、呈广覆式连续分布的特点。ST1H 井为典型的泥灰岩页岩油(图 13),油气显示最好,裂缝、孔

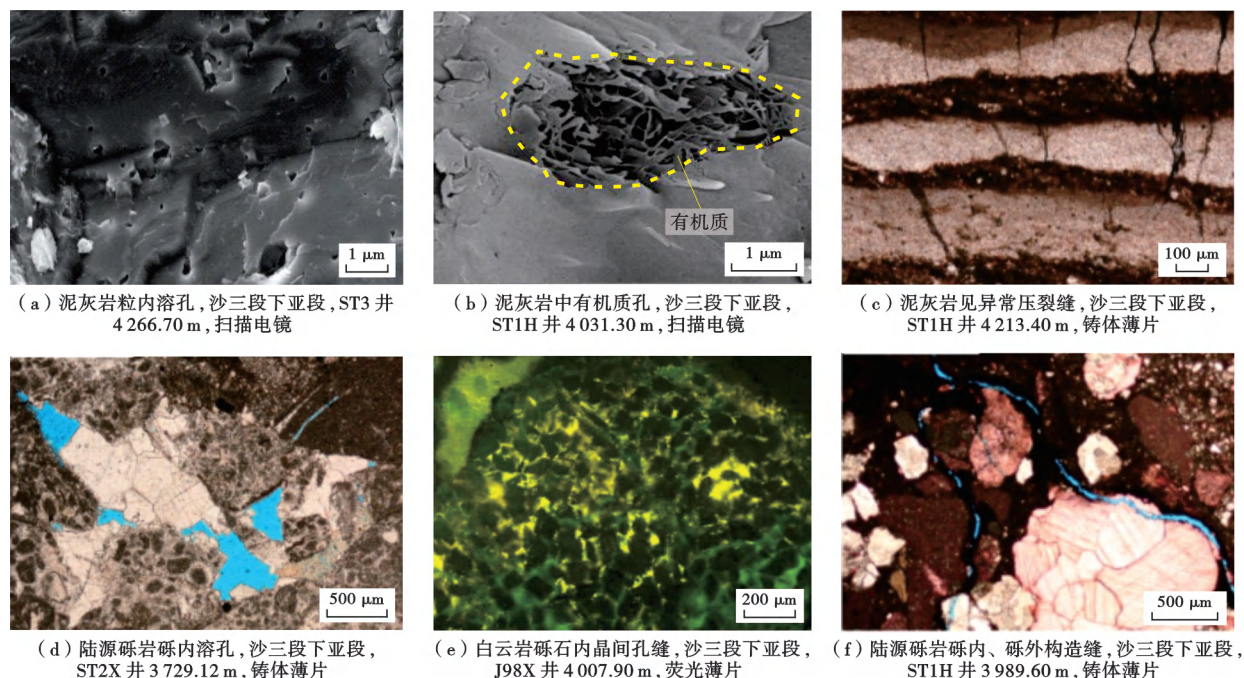


图 14 束鹿凹陷沙三段下亚段泥灰岩-砾岩储集空间类型

Fig. 14 Reservoir space types of marl-conglomerate from lower submember of Member 3 of Shahejie Formation in Shulu sag

洞复合发育,在 4 620.00~4 953.18 m 井段,压裂试油自喷,产油量为 201 t/d、产气量为 74 121 m³/d。

颗粒支撑陆源砾岩主要发育在斜坡中带—内带 SQ1、SQ2、SQ3 层序低位体系域—水进体系域的扇三角洲和滑塌扇相(图 13),为泥灰岩地层中的“夹层型致密甜点”储层,具有储层不含水、存在高压异常、压降快的特点。ST3 井为典型的夹层型致密油藏,试油产油量为 59.63 t/d,自 2014 年 6 月开始投产,截至 2023 年 10 月底已累计产油 8 642 t。

(4) 有利勘探区带。束鹿凹陷中洼槽沙三段下亚段泥灰岩页岩油是冀中拗陷规模勘探和效益建产的首选区带。目前,针对沙三段下亚段的泥灰岩页岩油和砾岩型致密油已实施钻探井位 6 口,分别采用大位移斜井和直井方式获得了工业油气流,试采也保持了一定的产能,展现出良好的勘探开发前景。按照优质烃源岩分布和储层甜点控制因素分析,束鹿凹陷页岩油下一步效益勘探开发动用的现实目标:在斜坡中带—内带为 ST1 井区和 ST3 井区 SQ2、SQ3 层序的纹层状泥灰岩以及 SQ2 层序的颗粒支撑砾岩体;在洼槽区为 SY1 井区 SQ4 和 SQ5 层序的纹层状泥灰岩甜点。

另外,饶阳凹陷马西、河间、杨武寨等地区为沙三段优质烃源岩发育区,烃源岩的岩性主要为暗色泥岩、油页岩夹致密碳酸盐岩或薄层砂岩,有机质丰度高、类型好、成熟度适中,具备页岩油形成的有利条件,是下一步重点预探的有利区带。

4.3.2 沙一段下亚段页岩油

沙一段下亚段烃源岩主要发育在饶阳凹陷和霸县凹陷,优质烃源岩的最大厚度为 180 m,平均为 80 m,是冀中拗陷有机质丰度最高、干酪根类型最好的烃源岩层段。饶阳凹陷在沙一段下亚段特殊岩性段钻遇较厚泥页岩,且有 200 余口井在泥页岩层系中见到油气显示,并获工业油流或低产油流,展现出沙一段下亚段具有良好的页岩油勘探前景。

饶阳凹陷沙一段下亚段主要发育在蠡县斜坡内带—洼槽区,埋深为 2 400~4 500 m;TOC 含量为 1.0%~9.7%,有机质类型为 I—II₁ 型,热演化程度中等(R_o 为 0.5%~0.9%),其中 $R_o > 0.7%$ 的面积约为 650 km²。沙一段下亚段特殊岩性段的岩相类型丰富,具有多种岩性组合。细粒沉积岩相区形成连续厚层的泥岩、页岩、油页岩岩性组合的单一型页岩油;云灰坪—泥灰坪岩相区形成厚层泥页岩夹白云岩、灰岩薄层岩性组合以及席状砂—生物滩岩相区形成生物灰岩、砂岩、泥页岩互层岩性组合的夹层型页岩油。发育纹层状页岩和白云岩、砂岩等多种甜点岩性,页岩发育页理缝、构造缝、生烃增压缝等多种储集空间(图 15)。BO11 井的岩心观察结果表明,沙一段下亚段的平均纹层密度为 3 580 条/m,纹层厚度为 0.2~1.0 mm,断面和页岩层理缝可见原油渗出[图 15(a)—图 15(c)]。白云岩储层发育粒间溶孔、粒内溶孔、铸模孔和构造缝等储集空间类型,原油主要赋存于粒间溶孔、构造裂缝

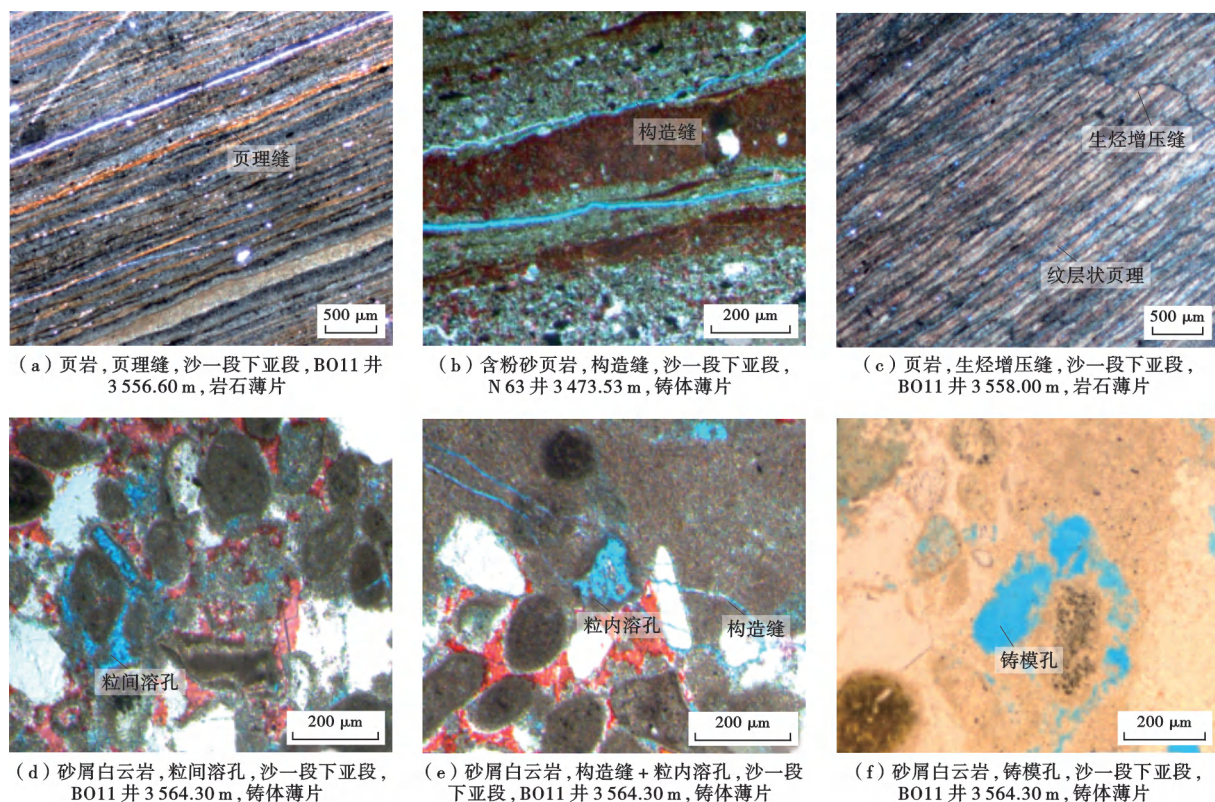


图 15 饶阳凹陷沙一段下亚段页岩、白云岩储集空间类型

Fig. 15 Reservoir space types of shale and dolomite from lower submember of Member 1 of Shahejie Formation in Raoyang sag

之中[图 15(d)—图 15(f)]。BO11 井的核磁共振分析结果表明,沙一段下亚段的页岩储层以小孔占主体,孔喉半径为 $1\sim 10\ \mu\text{m}$,孔隙度为 $3\%\sim 7\%$;白云岩储层以大孔占主体,孔喉半径为 $1\sim 60\ \mu\text{m}$,孔隙度为 $10\%\sim 17\%$;白云岩储层优于页岩储层。储层的渗透率一般小于 $1\ \text{mD}$;脆性矿物含量高,普遍大于 60% 。饶阳凹陷从斜坡区—洼槽区局部形成了常规油—致密油—页岩油有序分布的成藏序列(图 16),其中,蠡县斜坡内带—洼槽区是页岩油勘探的有利区。

应用 104 口井的钻井、测井、试油、地震等资料,构建了基于“五参数”(含油量、可动比例、压力系数、渗透率、脆性指数)的页岩油评价体系。将沙一段下亚段的页岩厚度、TOC 含量、 R_o 和埋深等参数叠合综合评价,优选出蠡县斜坡西柳地区、河间洼槽、任西洼槽和马西洼槽 4 个页岩油甜点有利区(图 17),预测甜点有利区总面积为 $650\ \text{km}^2$,预测石油资源量为 $3.2\times 10^8\ \text{t}$ 。综合评价认为,河间洼槽—赵皇庄地区为最有利区带,其页岩厚度大($30\sim 70\ \text{m}$),TOC 含量高($2.0\%\sim 3.0\%$),具有中等程度热演化程度(R_o 为 $0.7\%\sim 0.8\%$),预测页岩油资源量达 $1.2\times 10^8\ \text{t}$ 。

4.4 石炭系—二叠系煤层气勘探领域

石炭系—二叠系主要残存于冀中坳陷东北部,残

留面积约为 $7\ 500\ \text{km}^2$ 。该地区是渤海湾盆地最早发现石炭系—二叠系煤成气藏的地区,通过 1982—1984 年的集中勘探,在文安斜坡斜坡内带发现了苏桥气田,由 SU1、SU4、SU401 奥陶系潜山气藏和 WEN23 二叠系上石盒子组砂岩断块型气藏组成(图 18),探明天然气地质储量为 $150.64\times 10^8\ \text{m}^3$,由此成为华北油田最早的天然气生产基地^[25]。其后,针对煤成气潜山构造油气藏开展的多轮勘探连续失利,勘探进入低谷期。以往的研究认为,煤系地层的二次生烃门限埋深为 $3\ 500\ \text{m}$ (煤岩 $R_o > 0.8\%$),有效生烃面积小,资源潜力不大是主要制约因素。借鉴中国西部盆地煤层气的研究成果^[58]并结合工区地质状况分析认为,研究区的深部煤层气具有较大的勘探潜力,其有利成藏条件主要有以下 4 个方面。

(1) 煤岩有机质丰度高,二次生烃范围广,资源潜力大。研究区内煤岩的有机质丰度较高,山西组煤岩的 TOC 含量平均为 48.62% , $S_1 + S_2$ 平均为 $95.66\ \text{mg/g}$;太原组煤岩 TOC 含量平均为 82% , $S_1 + S_2$ 平均为 $141\ \text{mg/g}$,煤岩的有机质类型以 $\text{II}_2\text{—III}$ 型为主,有机显微组分中的镜质组含量为 $73.5\%\sim 89.0\%$ (平均为 77.5%),惰质组含量为 $8.0\%\sim 26.5\%$ (平均为 22.3%),大部分为好—极好烃源岩,为有利的生气岩。

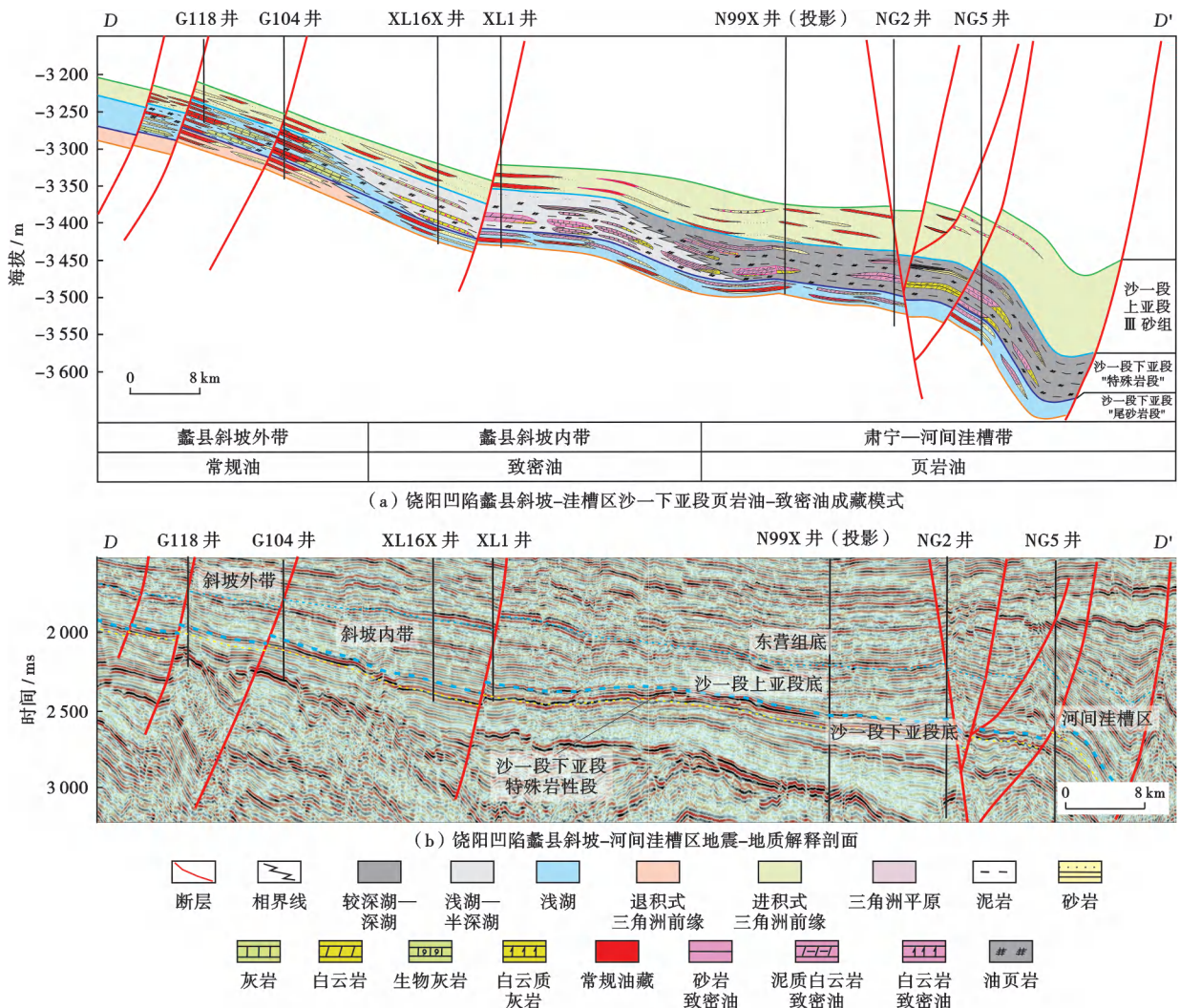


Fig. 16 Hydrocarbon accumulation mode of lower submember of Member 1 of Shahejie Formation from slope belt to trough belt in Raoyang sag

煤系烃源岩经历了两次生烃过程,二次生烃期是主要成藏期^[59]。以往在生烃量计算过程中认为古近纪火成岩侵入只是局部事件,只考虑常规地温场变化对煤系烃源岩热演化的影响,二次生烃门限的埋深为 3 500 m,二次生烃面积为 1 780 km²。结合近几年对大城凸起煤层的热演化分析认为,尽管没有钻遇火成岩,但煤层在 1 400~1 900 m 埋深处的 R_o 为 1.0%~1.2%,远远高于常规地温场的热演化程度(图 18)。孟元林等^[59]通过对文安斜坡的流体包裹体分析认为,在古新世辉绿岩侵入上古生界时,高温热流体使得从大城凸起到文安斜坡一带在 1 600~5 000 m 埋深处已进入二次生烃期。这一特征与区域剩余磁异常和断裂分布具有较好的对应性,由此可构建煤层受地温场和岩浆热场叠加控制的二次生烃热演化模型,其计算的二次生气量为 $8.51 \times 10^{12} \text{ m}^3$,比原来的生气量增加了 60%,其中,煤岩的生气量达 $6.29 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。二次生烃强度最高

为 $(70 \sim 80) \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$,生烃强度大于 $30 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 的生烃面积达 4 000 km²,展示出较大的勘探潜力。

(2) 煤岩储集空间类型多,储层分布面积大。煤岩储层发育山西组三角洲河间沼泽相和太原组滨岸潟湖沼泽相,煤岩储层的孔隙类型多样。岩心观察与微观分析结果表明,太原组煤岩以半亮煤为主,具备面割理、端割理、基质孔等储集空间[图 19(a)—图 19(c)];扫描电镜分析结果表明,太原组煤岩发育气孔、铸模孔、组织孔等有机孔[图 19(d)—图 19(f)]以及微裂缝[图 19(g)、图 19(h)],面孔率为 0.5%~4.5%。SHENG1 井等 8 口井的煤岩岩心物性分析结果显示,太原组煤岩在 2 000~3 800 m 井段的 R_o 为 1.0%~1.3%,孔隙度一般为 6.37%~11.60%、平均为 8.99%,渗透率为 0.7130~1.8689 mD、平均为 0.9345 mD,为低孔、特低渗储层,且随着埋深及成熟度增大,孔隙度呈逐渐降低的趋势。煤层的顶底板岩性以泥岩为主,局

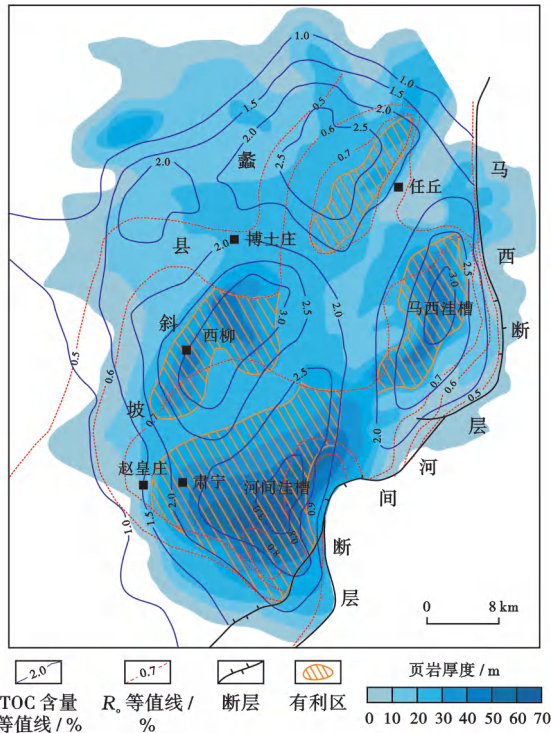


图 17 饶阳凹陷沙一段下亚段页岩油关键参数叠合评价与有利区预测

Fig. 17 Superimposed key parameter evaluation and favorable area prediction of shale oil from lower submember of Member 1 of Shahejie Formation in Raoyang sag

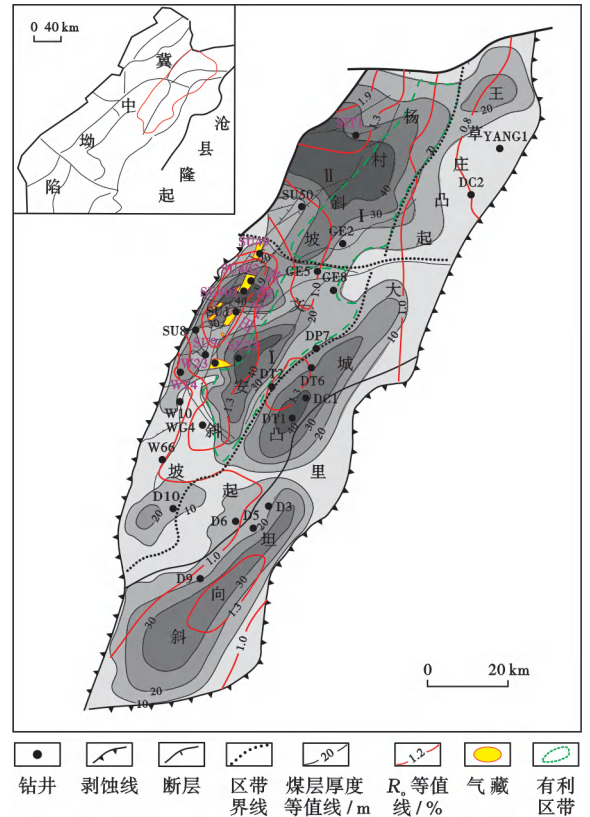
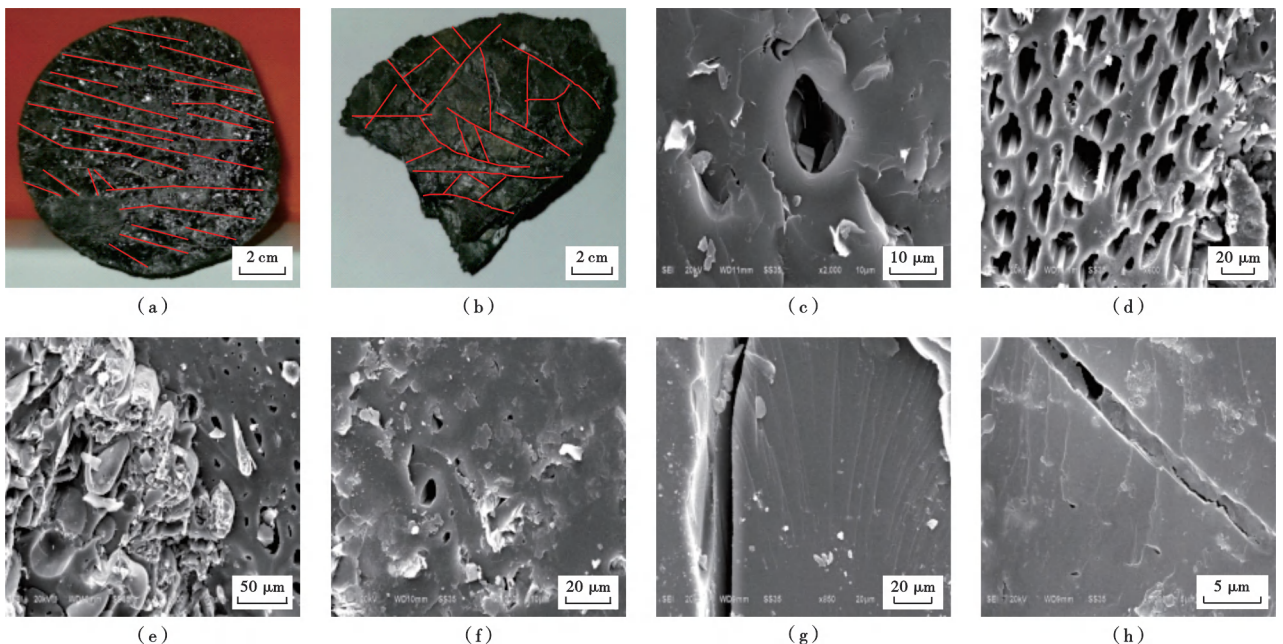


图 18 冀中坳陷北部石炭系一二叠系煤层综合评价
Fig. 18 Comprehensive evaluation of Carboniferous-Permian in Jizhong depression



(a)面割理 6~7 条/5 cm,端割理 7~8 条/5 cm,太原组,SHENG1 井 2290 m;(b)面割理 6~10 条/5 cm,端割理 7~15 条/5 cm,太原组,DT3 井 1862 m;(c)孔隙,太原组,DT1 井 1261 m,扫描电镜;(d)气孔、组织孔,太原组,DT1 井 1223 m,扫描电镜;(e)组织孔、气孔,扫描电镜,太原组,DT6 井 1749 m,扫描电镜;(f)铸膜孔,太原组,DT6 井 1750 m,扫描电镜;(g)微裂缝,太原组,DT3 井 1225 m,扫描电镜;(h)微裂缝、断口、铸膜孔,太原组,DT3 井 1229 m,扫描电镜。

图 19 石炭系一二叠系煤岩储集空间类型

Fig. 19 Reservoir space types of Carboniferous-Permian coal rocks

部为致密砂岩和薄层灰岩,隔/盖层的条件较好。太原组煤岩发育稳定,煤层厚度为15~45 m,单层厚度为5~13 m,在杨村地区、文安地区、里坦地区形成了3个聚煤中心,累计厚度大于10 m的煤层分布面积达5 200 km²(图18)。

(3) 形成了煤成气—深部煤层气—浅部煤层气成藏序列,深部煤层气是主要气藏类型。受构造活动、热演化和保存条件等因素控制,研究区发育3种成藏类型(图20)。第1种是煤成气:煤成气主要指煤系中的煤岩、碳质泥岩和暗色泥质等烃源岩生成的游离天然气,运移至附近其他储层及圈闭中聚集成藏。煤成气发育在斜坡内带深埋区,其埋深>3 500 m,断裂发育,煤系源岩通过断层与奥陶系潜山对接,形成旁生侧储式潜山构造油气藏(SU1、SU4潜山气藏)和下生上储式石炭系—二叠系砂岩天然气藏(W23、SU20气藏)。

第2种是深部煤层气:煤层气来源多样,既可能来自煤岩自生气,也可能来自其他产气层,或多种来源气体并存,是介于常规气和煤层气之间的一种储存于煤岩中的新天然气资源类型,具有常规储层和非常规储层共存、游离气和吸附气共生、自源气和他源气互补聚集并有序分布的特征。在文安斜坡、杨村斜坡、大城凸起3带结合的构造稳定斜坡区,煤层的埋深在2 000~3 500 m,随着煤的热演化程度升高($R_o > 1.0\%$),煤岩大量生气。大城地区DC1井等8口井的实测含气量显示,埋深在1 000~2 000 m的煤岩含气量一般为6~16 m³/t,且随着煤层埋深增加呈现出明显增大的趋势;约在1 800 m埋深处煤岩的含气量为14~18 m³/t,其中甲烷含量为81%~98%,含气饱和度>60%。DT7井在1 903 m埋深处利用兰氏法实测得到的含气饱和度为109%,其中,游离气占比为6.1%,且随着深度加大,游离气

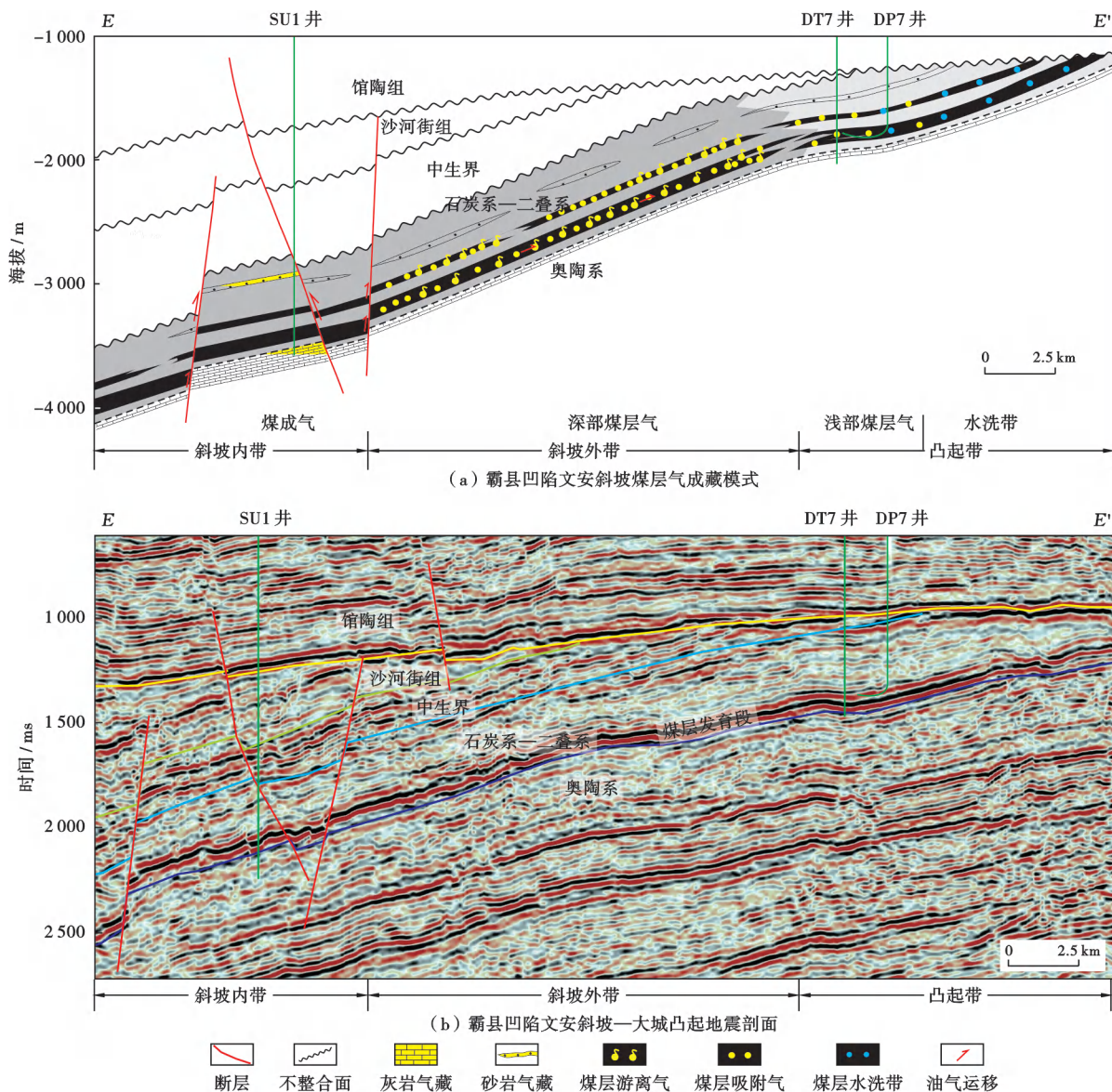


图20 霸县凹陷文安斜坡石炭系—二叠系煤型气成藏模式(剖面位置见图1)

Fig. 20 Hydrocarbon accumulation mode of Carboniferous-Permian coal-type gas in Wen'an slope of Baxian sag

含量呈现逐渐增高的趋势。由于处于滞留水封闭环境,深部煤层气赋存于煤层气孔、铸模孔、组织孔等有机孔以及面割理、端割理等储集空间内,具有大面积含气的勘探潜力。第3种是浅部煤层气:煤层气即在煤层内自源生成的煤型气,主要以吸附状态储存于煤岩中。浅部煤层气的有利区主要分布在凸起带或向斜带,其埋深 $<2000\text{ m}$,且受地层逐层剥蚀影响,处于地表水径流区,保存条件差,天然气以吸附气状态赋存于煤岩中,需要降压解析排采。已完钻的DC1井等5口井的煤层气产量为 $2898\sim 6392\text{ m}^3/\text{d}$;DP7井的煤层气试采产气量为 $9135\text{ m}^3/\text{d}$,累计产气量为 $155\times 10^4\text{ m}^3$,已见到较好的勘探效果。

(4)文安斜坡外带和杨村斜坡外带是深部煤层气勘探有利区带。根据煤层厚度(厚度 $>10\text{ m}$)、热演化程度($R_o>1.0\%$)、埋深(I类区埋深为 $2000\sim 3500\text{ m}$ 、II类区埋深 $>3500\text{ m}$)、保存条件等指标,评价出文安斜坡外带和杨村斜坡外带2个区带为I类区,杨村斜坡内带为II类区(图18),有利勘探区面积为 3000 km^2 ,深部煤层气的总资源量为 $1.53\times 10^{12}\text{ m}^3$ 。优选文安斜坡外带和杨村斜坡外带为最有利的勘探区带(图18),其具有4个有利成藏条件:①煤岩发育,太原组具备2个煤岩发育区,煤储层厚度为 $10\sim 65\text{ m}$,面积为 1650 km^2 ;②热演化程度高,区内煤岩的 R_o 为 $1.0\%\sim 1.4\%$,处于大量生/排烃期;③区内上覆中生界、新生界,构造为相对稳定的斜坡,断层不发育[图20(a)],埋深适中(埋深为 $2000\sim 3500\text{ m}$),保存条件好;④深部煤层气资源规模大,总资源量为 $1.35\times 10^{12}\text{ m}^3$,其中,太原组的资源量为 $1.1\times 10^{12}\text{ m}^3$,是深部煤层气勘探的有利区。

4.5 凹陷新区勘探领域

冀中拗陷新区包括东部的武清凹陷、大厂凹陷等凹陷,以及西部的北京凹陷、徐水凹陷、保定凹陷、石家庄凹陷等凹陷,以往认为此类凹陷位于拗陷的边缘,受物源注入和构造活动影响,成藏条件复杂,勘探潜力有限。近年来,通过重新开展凹陷结构、烃源岩生烃潜力和输导体系等关键成藏要素研究,保定凹陷和武清凹陷均实现了勘探突破,成为冀中拗陷下一步增储上产的重点勘探方向。

4.5.1 保定凹陷

保定凹陷位于冀中拗陷西部,其西邻太行山、东接饶阳凹陷,勘探面积约为 4000 km^2 。保定凹陷自1964年钻探JC2井以来,针对深潜山和古近系深层已钻探了多口井,但仅见到零星油气显示,一直未获得勘探突破。近两年来,广大科研人员从构造成因、早熟生烃、浅层成藏机制研究入手,创新了地质认识,勘探思路由深层向浅层转移,钻探的BQ1X井、G77X井等并在东

营组分别获得产油量为 98.37 t/d 和 37.80 t/d 的高产工业油流,发现了埋藏浅、产量高、油层厚、规模大的清苑构造浅层富集油田,展示出凹陷新区巨大的勘探潜力^[19]。保定凹陷具有如下成藏特点。

(1)断陷幕式活动控盆,沙一段下亚段湖盆向西扩大,奠定了生烃的物质基础。通过重新开展冀中拗陷地质结构与构造演化研究,分析渤海湾盆地古近纪裂陷演化过程,揭示出盆地西部的太行山东断层具有明显的阶段性和分期性活动特征,控制了冀中拗陷的构造沉积演化。保定凹陷深层构造与浅层构造具有显著的非继承性,为“双层结构”。孔店组一沙二段沉积期,随着太行山东断裂活动剧烈,太行山快速隆升,使得保定凹陷西部物源充足,沉积了大套巨厚的近物源红色粗粒沉积建造,但缺乏生烃物质基础。古近纪晚期(沙一段一东营组沉积期)为断陷末期,太行山东断裂基本停止活动,断裂对湖盆的控制作用减弱。沙一段下亚段沉积期,冀中拗陷进入大规模的湖侵期,饶阳凹陷的湖相岸线越过高阳低凸起,向保定凹陷扩展,使得饶阳凹陷与保定凹陷形成统一的湖盆沉积体系(图21),其中,保定凹陷北部处于封闭强还原的半深湖—深湖亚相沉积环境,沙一段下亚段湖盆面积向西扩展了 1500 km^2 ,形成了大套暗色泥岩和油页岩咸化湖相沉积,为油气生产奠定了物质基础。

(2)咸化富藻控烃,沙一段下亚段早熟、低熟的生烃资源量大。通过岩心样品的地球化学测试分析和重新评价,保定凹陷近年钻探的GB1X井揭示了沙一段下亚段发育高丰度强还原咸化湖富藻优质烃源岩,深灰色泥岩、油页岩的TOC含量平均为 4.11% , S_1+S_2 平均为 27.46 mg/g ,氯仿沥青“A”含量平均为 0.265% (图22),全烃平均含量为 0.2479% ,有机质类型为II₁型^[19]。显微组分分析显示烃源岩中腐泥组含量高达 80% ,且见到孢粉体;干酪根镜检发现富氢藻质体发育。在同一湖盆的西15井,沙一段下亚段烃源岩的生、排烃热压模拟实验结果证实:该烃源岩在成岩早期阶段(R_o 为 $0.4\%\sim 0.6\%$)即可排烃(图23);TOC含量大于 2% ,结构藻和菌解无定形组分含量大于 80% 的烃源岩具备早期生烃能力;同时,藻腐泥组分含量高,生烃活化能(门槛值)低,易于在低温演化阶段(地层温度约为 $95\text{ }^\circ\text{C}$)大量生烃。烃源岩在早成岩阶段(R_o 为 $0.4\%\sim 0.74\%$)的生油量达 50% ,这揭示了沙一段下亚段咸化湖富有机质藻源岩具有早期生烃机制,即可溶有机质和富氢藻类在成岩早期阶段可形成大量的早熟、低熟油^[60]。受高阳低凸起潜山基底影响,保定凹陷东部斜坡带处于高地温异常区^[61],地温梯度为 $3.7\sim 4.2\text{ }^\circ\text{C/hm}$ 。区域高地温场背景提升了早熟油、低熟油

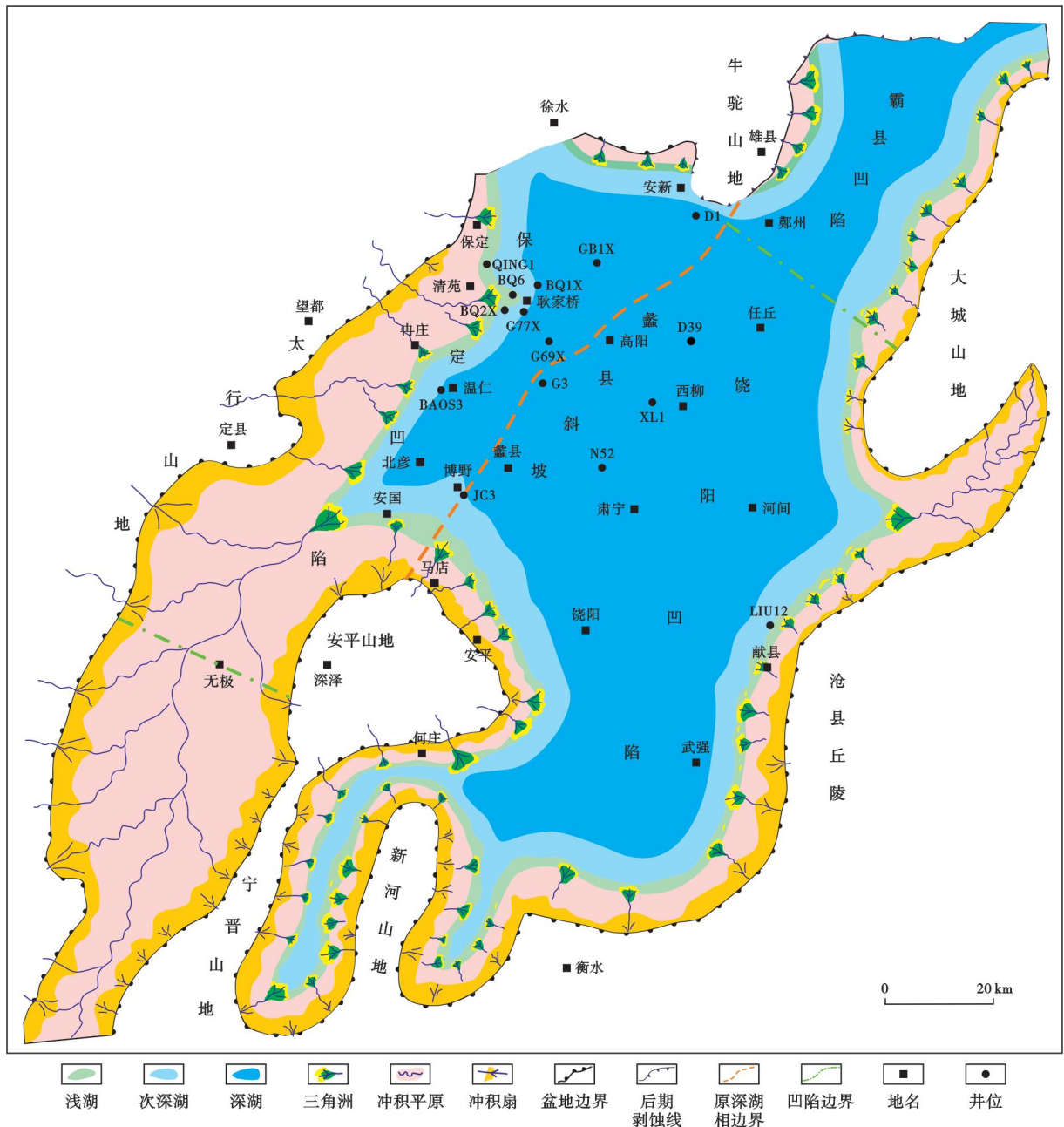


图 21 冀中坳陷沙一段下亚段岩相古地理

Fig. 21 Lithofacies paleogeography of lower submember of Member 1 of Shahejie Formation in Jizhong depression

形成的规模。沙一段下亚段咸化湖富有机质藻源岩的早期生烃提升了保定凹陷中北部沙一段下亚段烃源岩的资源潜力,其生油门限由以往的 2 800 m 提升到 2 100 m,从而使有效烃源岩面积扩大了 1 500 km²,烃源岩最大生烃强度为 $150 \times 10^4 \text{ t/km}^2$,新增石油资源量为 $2 \times 10^8 \text{ t}$,这为保定凹陷的勘探提供了有利资源条件。

(3) 构造反转控藏,形成“多向供烃、断砂输导、构造岩性富集”浅层成藏模式。古近纪末期,保定凹陷发生构造翘倾反转,构造格局由早期的东抬西倾转变为东营组一沙一段沉积期的西抬东倾,并在右旋走滑应

力场作用下,早期的先存断裂被激活,发育多个向西掉落的反向正断层。清苑构造带在断层控制下自北而南形成了老河头、耿家桥、冉庄等一系列浅层大型断鼻构造,发育多个断鼻、断块圈闭群,为油气聚集创造了有利条件(图 24)。

冀中坳陷在东营组沉积期开始进入湖盆萎缩期,河流相发育,河网遍布全区。东营组三段发育了曲流河滩与河道砂相互叠合的大面积连片分布的砂体,储层岩性以细砂岩为主,厚度一般为 80~100 m,砂地比为 30%~40%。储层的岩石类型主要为细粒岩屑长石砂岩,孔隙类型以原生粒间孔和粒间溶孔为主,面

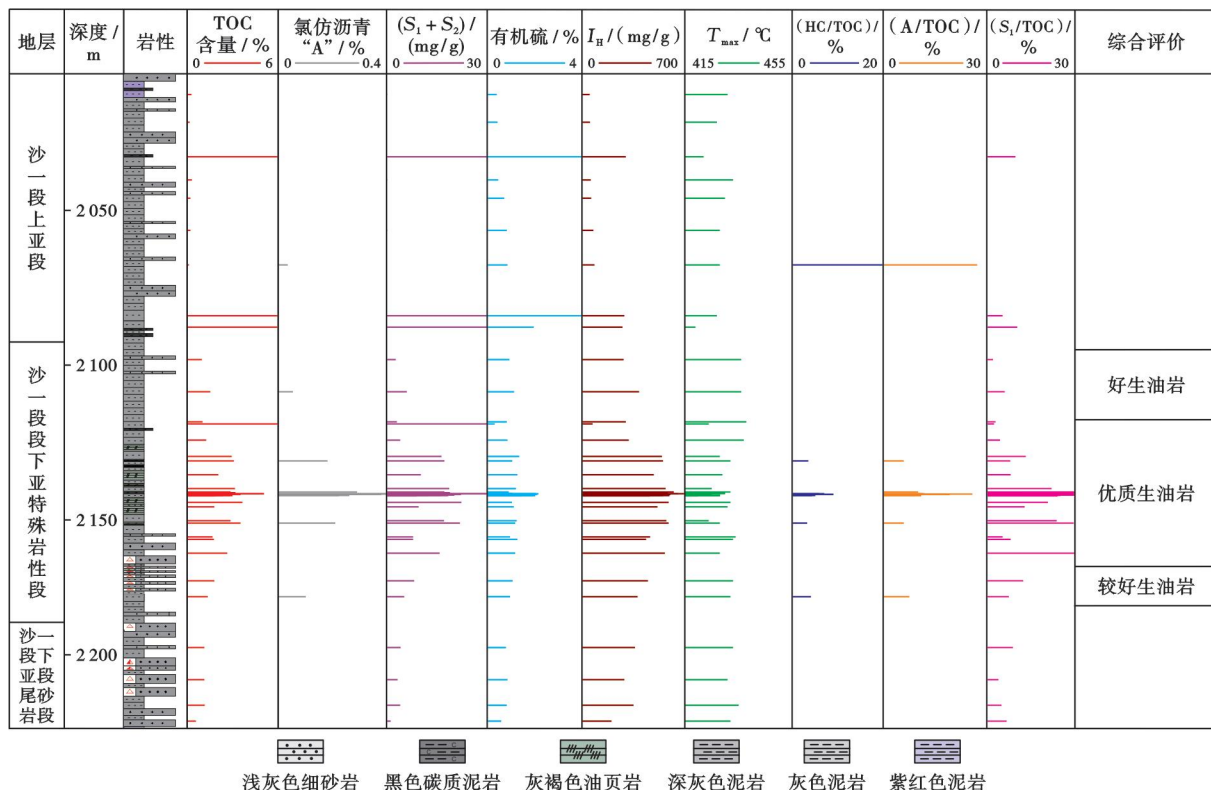


图 22 GB1X 井沙一段下亚段烃源岩综合评价

Fig. 22 Comprehensive evaluation of source rocks from lower submember of Member 1 of Shahejie Formation in Well GB1X

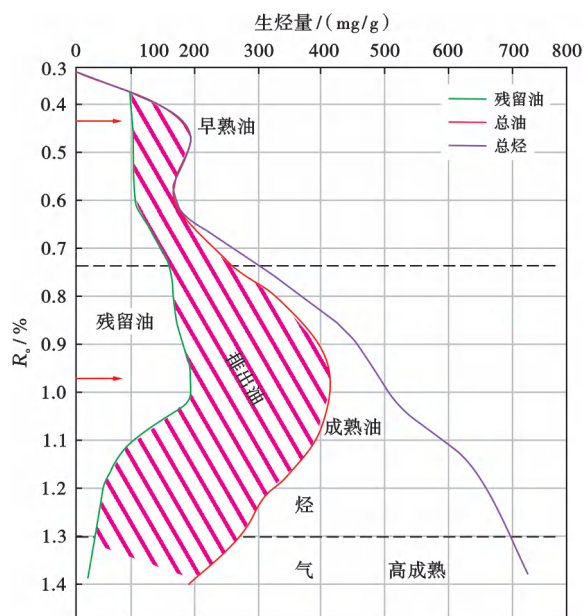


图 23 X15 井沙一段下亚段生烃模拟实验演化模式

Fig. 23 Evolution pattern of lower submember of Member 1 of Shahejie Formation in Well X15 by hydrocarbon generation simulation experiment

孔率为 15%~20%;岩石颗粒呈次棱状一次圆状,颗粒间以点接触为主,压实作用较弱;储层的孔渗性好,孔隙度为 21.6%~31.4%、中值为 26.8%,渗透率为

42.6~9690.8 mD、中值为 763.5 mD,形成了高孔高渗的优质储层,与上覆东营组二段稳定分布的泥岩组成了有利的储-盖组合(图 25)。

保定凹陷的多条断层与东营组大规模分布的优质储层组成了断-砂匹配的油气输导体系,沙一段下亚段烃源岩的主排烃期在馆陶组沉积晚期—明化镇组沉积早期。在西抬东倾的构造背景上,凹陷内的清苑构造带具备了近源下生上储纵向输导和远源旁生侧储阶梯状传递输导等多向油气运聚条件^[62]。在保定凹陷东部地区,由沙一段下亚段早熟烃源岩生成的近源原油优先通过断层向上运移至东营组;在饶阳凹陷蠡县斜坡,由于断层不发育,由沙一段下亚段成熟烃源岩生成的远源烃类首先横向运移至高阳断鼻构造中聚集,然后在后期构造改造作用下,原油再次通过高阳断鼻构造的输导断层,向上传递运移到东营组,并呈阶梯状自东向西依次运聚(图 24)。保定凹陷清苑构造带具备从多向油源向浅层多个大型鼻状构造汇聚成藏的有利条件。目前,在保定凹陷耿家桥断鼻构造上钻探的 BQ1X 井等一批井已在东营组、沙一段获高产工业油流,保定油田发现了预测储量近亿吨的规模浅层油藏,开辟了新凹陷的勘探新领域。冉庄构造和老河头断鼻构造是下一步扩大勘探的有利目标区,其预测圈闭资源量为 2.3×10⁸t。

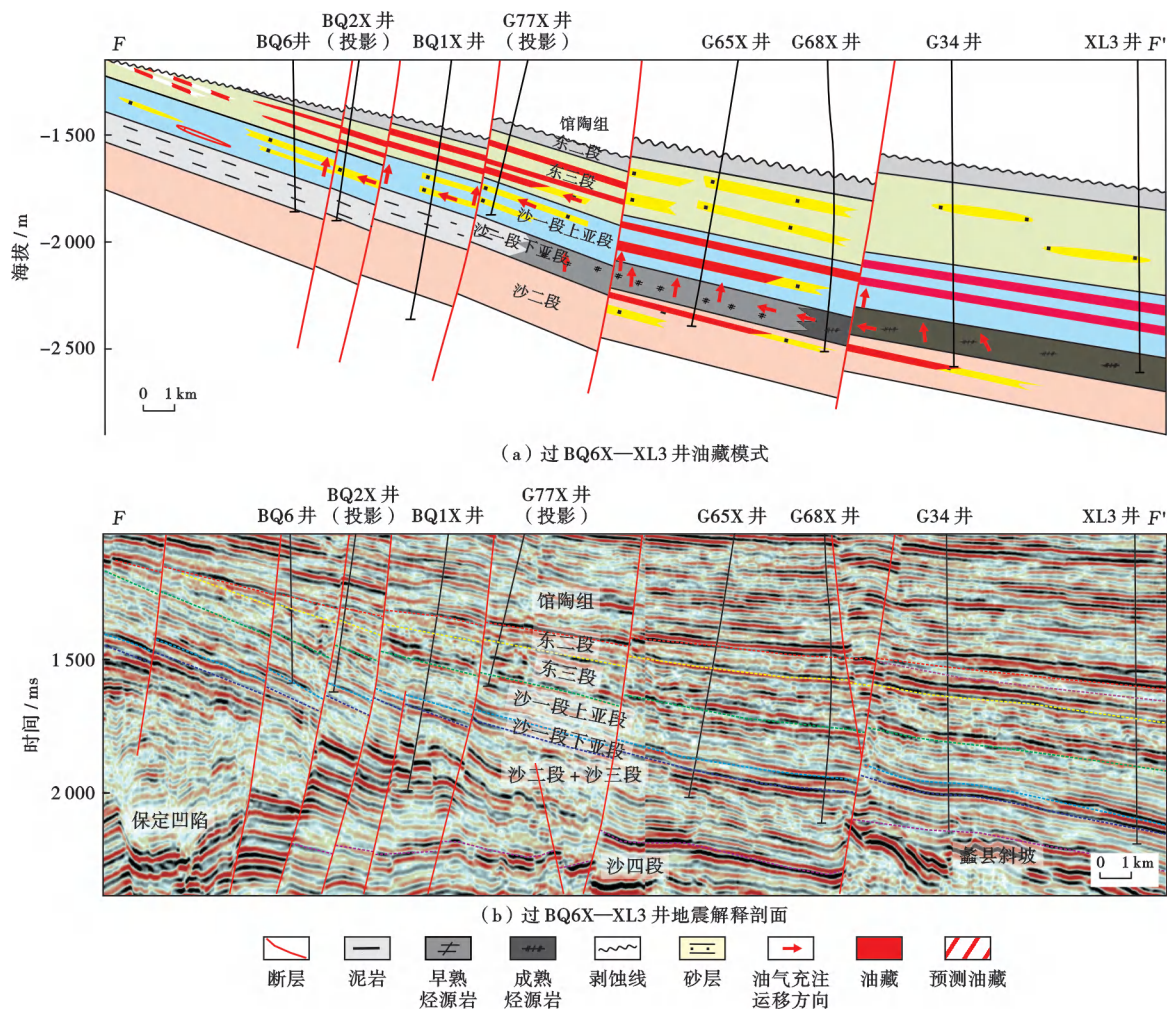
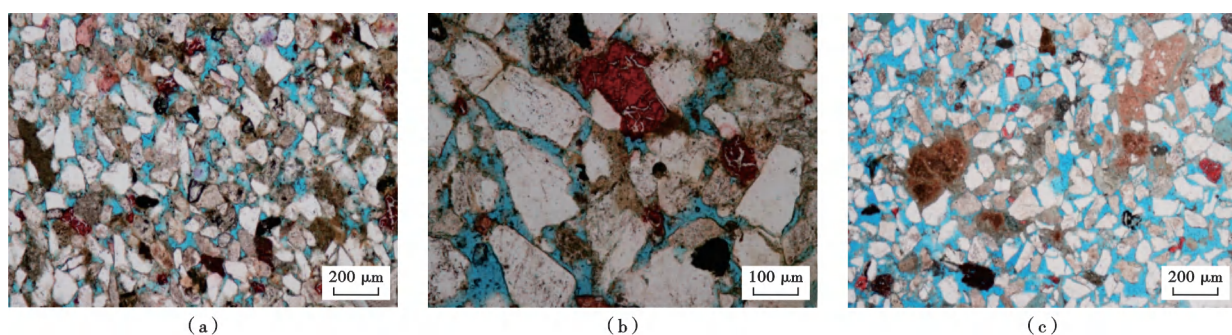


图 24 保定凹陷清苑构造带成藏模式(剖面位置见图 1)

Fig. 24 Hydrocarbon accumulation mode of Qingyuan structural belt in Baoding sag



(a) 细粒岩屑长石砂岩, 粒间孔、粒间溶孔, 东营组二段, G77-10X 井 1691.49 m, 铸体薄片; (b) 细粒岩屑长石砂岩, 粒间孔、粒间溶孔, 东营组二段, G77X 井 1904.71 m, 铸体薄片; (c) 细粒岩屑长石砂岩, 粒间孔, 东营组二段, G77-50X 井 1765.03 m, 铸体薄片。

图 25 保定凹陷东营组微观储集空间类型

Fig. 25 Microscopic reservoir space types of Dongying Formation in Baoding sag

4.5.2 武清凹陷

武清凹陷位于冀中坳陷北部, 西邻廊固凹陷, 勘探面积为 2600 km², 是新近系沉积厚度达 3000 m 的“厚皮”凹陷, 其沙三段、沙四段—孔店组受西部河西务断

层、大北尹断层和北部宝坻边界断层控制, 构成了西断东超、北断南超的构造格局, 西为大孟庄洼槽, 东为杨村斜坡(图 1)。武清凹陷前期已有 14 口井在潜山及新生界多个层段见到油气显示或气测异常。近两年,

基于创新深层领域成藏研究,经重新评价后认为,武清凹陷发育沙三段、沙四段和石炭系一二叠系 3 套烃源岩;烃源岩的第四次油气资源评价结果显示,石油资源量达 $8\,500 \times 10^4 \text{ t}$ 、天然气资源量达 $836 \times 10^8 \text{ m}^3$,油气资源丰富。武清凹陷古近系沙三段、沙四段发育东部物源的大型三角洲沉积,深层发育优质储层;此外,发育武清背斜、后奕断鼻、大良镇背斜和杨村斜坡等多个大型正向构造带,成藏背景有利,具备规模勘探潜力。2022 年,武清背斜钻探了 SIT1X 风险探井,于深层沙四段 4 837.9~4 854.6 m 井段试油,获得产油量为 68.3 t/d 的高产工业油流,取得了勘探的重要突破,成为冀中拗陷又一个凹陷新区勘探有利区。

5 结 论

(1) 冀中拗陷发育多套古近系和石炭系一二叠系优质烃源层,形成了以海相碳酸盐岩为特色的多类型有效储集体,具备新生古储、自生自储、下生上储、古生古储 4 类成藏组合,为深化勘探奠定了良好的石油地质基础。

(2) 冀中拗陷具有“多凸多凹、凸凹相间”的构造格局,构成了以古潜山为主体的中央隆起型、陡坡型、斜坡型和洼槽型 4 种复式油气聚集带。冀中拗陷的油气环生油洼槽聚集,呈现东富西贫、南油北气的分布特征;石油资源探明率为 45.7%,天然气资源探明率仅为 11%,具备多个低勘探程度领域,剩余油气资源比较丰富。

(3) 近年来,通过加大基础地质研究,创新地质认识,加强新区、新类型勘探力度,在隐蔽型潜山、页岩油/致密油、凹陷新区、古近系深层、老区新带均取得了重大进展和突破,实现了油气勘探的有序接替,也证实了新领域具有良好的勘探潜力。

(4) 整体研究和综合评价认为,冀中拗陷在深潜山及内幕、古近系深层、页岩油、深部煤层气、新凹陷 5 大领域整体成藏条件好,资源潜力大,勘探前景广阔。冀中拗陷北部在廊固凹陷河西务潜山带、武清凹陷和文安斜坡等潜山及其内幕落实了 13 个有利目标,预测天然气圈闭资源量为 $1\,453 \times 10^8 \text{ m}^3$,是天然气勘探有利区带。冀中拗陷在饶阳凹陷留楚—皇甫村、武清凹陷武清背斜带、深县凹陷榆科—深南背斜带、文安斜坡内带、廊固凹陷和晋县凹陷陡坡带发育 12 个有利构造带,总面积为 700 km^2 ,预测圈闭资源量为 $2.4 \times 10^8 \text{ t}$,是深层构造、地层-岩性油藏勘探的主攻区带。保定凹陷冉庄断鼻构造和老河头断鼻构造的预测圈闭资源量为 $2.3 \times 10^8 \text{ t}$ 、武清凹陷的剩余天然气资源量达 $836 \times 10^8 \text{ m}^3$,是凹陷新区勘探突破的现实地区。束鹿凹陷

沙三段下亚段、饶阳凹陷沙一段下亚段页岩油的可动资源量为 $9.1 \times 10^8 \text{ t}$ 。文安斜坡外带深部煤层气的有利勘探区面积为 $3\,000 \text{ km}^2$,总资源量为 $1.53 \times 10^{12} \text{ m}^3$,是非常规领域战略接替的有利勘探目标区。

参 考 文 献

- [1] 陈国达,费宝生. 任丘潜山油田的基本地质特征及其形成的大地构造背景[J]. 石油实验地质,1983,5(4):241-249.
CHEN Guoda, FEI Baosheng. Typical features and geotectonic background of the formation of the Renqiu buried-hill oilfield [J]. Petroleum Geology & Experiment, 1983, 5(4): 241-249.
- [2] 杜金虎,邹伟宏,费宝生,等. 冀中拗陷古潜山复式油气聚集区[M]. 北京:科学出版社,2002.
DU Jinhui, ZOU Weihong, FEI Baosheng, et al. Complex hydrocarbon accumulation in buried hill of Jizhong depression [M]. Beijing: China Science Publishing, 2002.
- [3] 李德生. 中国石油地质学的理论与实践[D]. 北京:石油工业出版社,2002.
LI Desheng. Theory and practice of petroleum geology in China [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002.
- [4] 梁生正,杨国奇,田建章,等. 渤海湾叠合盆地大中型天然气田的勘探方向[J]. 石油学报,2001,22(6):1-4.
LIANG Shengzheng, YANG Guoqi, TIAN Jianzhang, et al. The exploration orientation of large and medium sized natural gas pools in Bohai Wan polymerized basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2001, 22(6): 1-4.
- [5] 杜金虎,易士威,卢学军,等. 试论富油凹陷油气分布的“互补性”特征[J]. 中国石油勘探,2004,9(1):15-22.
DU Jinhui, YI Shiwei, LU Xuejun, et al. Oil and gas distribution of oil-enriched depression characterized with “reciprocity” [J]. China Petroleum Exploration, 2004, 9(1): 15-22.
- [6] 杜金虎,易士威,王权. 华北油田隐蔽油藏勘探实践与认识[J]. 中国石油勘探,2003,8(1):1-10.
DU Jinhui, YI Shiwei, WANG Quan. In-depth study and exploration practice of subtle oil reservoirs of Huabei oilfield [J]. China Petroleum Exploration, 2003, 8(1): 1-10.
- [7] 赵贤正,金凤鸣. 陆相断陷洼槽聚油理论与勘探实践——以冀中拗陷及二连盆地为例[M]. 北京:科学出版社,2009.
ZHAO Xianzheng, JIN Fengming. Theory and exploration practice of hydrocarbon accumulation in troughs within continental faulted depression: a case study on Jizhong depression and Erlian Basin [M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [8] 赵贤正,金凤鸣,王权,等. 陆相断陷盆地洼槽聚油理论及其应用——以渤海湾盆地冀中拗陷和二连盆地为例[J]. 石油学报,2011,32(1):18-24.
ZHAO Xianzheng, JIN Fengming, WANG Quan, et al. Theory of hydrocarbon accumulation in troughs within continental faulted basins and its application: a case study in Jizhong depression and Erlian Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(1): 18-24.
- [9] 赵贤正,金凤鸣,王权,等. 断陷盆地富油凹陷二次勘探工程[M]. 北京:石油工业出版社,2016.
ZHAO Xianzheng, JIN Fengming, WANG Quan, et al. Secondary

- exploration engineering in oil rich sags of faulted basins[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2016.
- [10] 易士威, 王权. 冀中坳陷富油凹陷勘探现状及勘探思路[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(3): 82-85.
YI Shiwei, WANG Quan. New concept of exploration strategy for the oil-rich Jizhong depression[J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(3): 82-85.
- [11] 张以明, 田建章, 杨德相, 等. 冀中坳陷潜山内幕寒武系府君山组成藏条件与勘探方向[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(3): 297-312.
ZHANG Yiming, TIAN Jianzhang, YANG Dexiang, et al. Accumulation conditions and exploration direction of Cambrian Fujunshan Formation inside buried hills in Jizhong depression[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(3): 297-312.
- [12] 华北油气区编纂委员会. 中国石油地质志(卷七): 华北油气区(上册)[M]. 2版. 北京: 石油工业出版社, 2022.
North China Oil and Gas Region Compilation Committee. China petroleum geology of China (Volume 7): North China oil and gas region (Part D)[M]. 2nd ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 2022.
- [13] 沈华, 范炳达, 王权, 等. 冀中坳陷油气勘探历程与启示[J]. 新疆石油地质, 2021, 42(3): 319-327.
SHEN Hua, FAN Bingda, WANG Quan, et al. Petroleum exploration history and enlightenment in Jizhong depression[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(3): 319-327.
- [14] 费宝生, 汪建红. 中国海相油气田勘探实例之三渤海湾盆地任丘古潜山大油田的发现与勘探[J]. 海相油气地质, 2005, 10(3): 43-50.
FEI Baosheng, WANG Jianhong. Cases of discovery and exploration of marine fields in China (Part 3): Renqiu buried-hill oilfield, Bohaiwan Basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2005, 10(3): 43-50.
- [15] 赵贤正, 金凤鸣, 王权, 等. 渤海湾盆地牛东1超深潜山高温油气藏的发现及其意义[J]. 石油学报, 2011, 32(6): 915-927.
ZHAO Xianzheng, JIN Fengming, WANG Quan, et al. Niudong 1 ultra-deep and ultra-high temperature subtle buried hill field in Bohai Bay Basin: discovery and significance[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(6): 915-927.
- [16] 杜金虎, 何海清, 赵贤正, 等. 渤海湾盆地廊固凹陷杨税务超深超高温奥陶系潜山油气勘探重大突破实践与启示[J]. 中国石油勘探, 2017, 22(2): 1-12.
DU Jinhu, HE Haiqing, ZHAO Xianzheng, et al. Significant exploration breakthrough in Yangshuiwu ultra-deep and ultra-high temperature Ordovician buried-hill in Langgu sag, Bohai Bay Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2017, 22(2): 1-12.
- [17] 张锐锋, 田建章, 黄远鑫, 等. 冀中坳陷奥陶系潜山油气藏形成条件与成藏模式[J]. 地学前缘, 2023, 30(1): 45-54.
ZHANG Ruifeng, TIAN Jianzhang, HUANG Yuanxin, et al. Formation conditions and reservoir forming models of Ordovician buried hill reservoirs in Jizhong depression [J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(1): 45-54.
- [18] 赵贤正, 姜在兴, 张锐锋, 等. 陆相断陷盆地特殊岩性致密油藏地质特征与勘探实践——以东鹿凹陷沙河街组致密油藏为例[J]. 石油学报, 2015, 36(增刊1): 1-9.
ZHAO Xianzheng, JIANG Zaixing, ZHANG Ruifeng, et al. Geological characteristics and exploration practices of special-lithology tight oil reservoirs in continental rift basins: a case study of tight oil in Shahejie Formation, Shulu sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(S1): 1-9.
- [19] 张锐锋, 何海清, 朱庆忠, 等. 渤海湾盆地保定凹陷东营组油气勘探重要发现与启示[J]. 中国石油勘探, 2023, 28(2): 11-23.
ZHANG Ruifeng, HE Haiqing, ZHU Qingzhong, et al. Major discovery and enlightenment from petroleum exploration of Dongying Formation in Baoding sag, Bohai Bay Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2023, 28(2): 11-23.
- [20] 田建章, 李先平, 李小冬, 等. 廊固凹陷大柳泉鼻状构造带精细勘探与油气发现[J]. 中国石油勘探, 2012, 17(6): 16-22.
TIAN Jianzhang, LI Xianping, LI Xiaodong, et al. Detailed exploration of Daluquan nose structural belt in Langgu depression and oil and gas discovery[J]. China Petroleum Exploration, 2012, 17(6): 16-22.
- [21] 梁狄刚, 曾宪章, 王雪平, 等. 冀中坳陷油气的生成[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001.
LIANG Digang, ZENG Xianzhang, WANG Xueping, et al. Hydrocarbon generation in Jizhong depression[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001.
- [22] 王建, 马顺平, 罗强, 等. 渤海湾盆地饶阳凹陷烃源岩再认识与资源潜力分析[J]. 石油学报, 2009, 30(1): 51-55.
WANG Jian, MA Shunping, LUO Qiang, et al. Recognition and resource potential of source rocks in Raoyang sag of Bohai Bay Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(1): 51-55.
- [23] 马学峰, 杨德相, 王建, 等. 渤海湾盆地冀中坳陷石油地质条件、资源潜力及勘探方向[J]. 海相油气地质, 2019, 24(3): 8-20.
MA Xuefeng, YANG Dexiang, WANG Jian, et al. The geological conditions, resource potential and exploration direction of oil in Jizhong depression, Bohai Bay Basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2019, 24(3): 8-20.
- [24] 秦建中, 贾蓉芬, 郭爱明. 华北地区煤系烃源层油气生成、运移、评价[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
QIN Jianzhong, JIA Rongfen, GUO Aiming. Hydrocarbon generation, migration and evaluation of coal measure source rocks in North China[M]. Beijing: China Science Publishing, 2000.
- [25] 赵贤正, 金强, 张亮, 等. 渤海湾盆地冀中坳陷北部石炭一二叠系煤成油气成藏条件及勘探前景[J]. 石油实验地质, 2010, 32(5): 459-464.
ZHAO Xianzheng, JIN Qiang, ZHANG Liang, et al. Accumulation conditions and perspectives of coal-derived hydrocarbon of Carboniferous-Permian in northern Jizhong depression, Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2010, 32(5): 459-464.
- [26] 张文朝, 崔周旗, 降栓奇, 等. 冀中坳陷古近系沉积、储层与油气[M]. 北京: 石油工业出版社, 2011.
ZHANG Wenchao, CUI Zhouqi, JIANG Shuanqi, et al. Paleogene sedimentation, reservoir and hydrocarbon in Jizhong depression [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011.
- [27] 崔永谦, 汪建国, 田建章, 等. 华北地台中北部寒武系一奥陶系白云岩储层特征及主控因素[J]. 石油学报, 2018, 39(8): 890-901.
CUI Yongqian, WANG Jianguo, TIAN Jianzhang, et al. Reser-

- voir characteristics and main controlling factors of Cambrian-Ordovician dolomite in the north central part of North China Platform[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2018, 39(8): 890-901.
- [28] 梁宏斌, 崔周旗, 卢学军, 等. 冀中坳陷沉积演化与岩性油气藏勘探[J]. *石油钻采工艺*, 2009, 31(增刊1): 1-8.
LIANG Hongbin, CUI Zhouqi, LU Xuejun, et al. Depositional evolution and lithologic reservoir exploration in Jizhong depression[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2009, 31(S1): 1-8.
- [29] 侯凤香, 董雄英, 吴立军, 等. 冀中坳陷马西洼槽异常高压与油气成藏[J]. *天然气地球科学*, 2012, 23(4): 707-712.
HOU Fengxiang, DONG Xiongying, WU Lijun, et al. Abnormal overpressure and hydrocarbon pooling in Maxi sag, Jizhong depression[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2012, 23(4): 707-712.
- [30] 操应长, 张会娜, 惠克来, 等. 饶阳凹陷南部古近系中深层有效储层物性下限及控制因素[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2015, 45(6): 1567-1579.
CAO Yingchang, ZHANG Huina, XI Kelai, et al. Petrophysical parameter cutoff and controlling factors of medium-deep effective reservoirs of Palaeogene in southern Raoyang sag[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2015, 45(6): 1567-1579.
- [31] 田建章, 陈勇, 侯凤香, 等. 储层沥青拉曼光谱特征及其对油气成藏期次的约束——以冀中坳陷杨税务潜山为例[J]. *光谱学与光谱分析*, 2021, 41(1): 131-135.
TIAN Jianzhang, CHEN Yong, HOU Fengxiang, et al. Raman spectroscopic characteristics of reservoir bitumen and its constrain on stages of hydrocarbon accumulation: take Yangshuiwu buried hill of Jizhong depression as an example[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2021, 41(1): 131-135.
- [32] 肖丽华, 孟元林, 李臣, 等. 冀中坳陷文安斜坡古生界成藏史分析[J]. *石油勘探与开发*, 2004, 31(2): 43-45.
XIAO Lihua, MENG Yuanlin, LI Chen, et al. The Paleozoic reservoir-forming history in the Wen'an slope of Jizhong depression, Bohai Gulf Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2004, 31(2): 43-45.
- [33] 邹华耀, 张春华. 廊固凹陷河西务潜山带永清—刘其营潜山油气成藏时间与成藏模式[J]. *石油勘探与开发*, 2001, 28(3): 25-28.
ZOU Huayao, ZHANG Chunhua. History of oil migration and accumulation in the Yongqing-Liuqiying buried hill (Middle Ordovician) pool, Hexiwu buried hill zone, Langgu depression[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2001, 28(3): 25-28.
- [34] 高长海, 张新征, 查明, 等. 冀中坳陷潜山油气藏特征[J]. *岩性油气藏*, 2011, 23(6): 6-12.
GAO Changhai, ZHANG Xinzheng, ZHA Ming, et al. Characteristics of buried hill reservoir in Jizhong depression[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2011, 23(6): 6-12.
- [35] 赵贤正, 王权, 金凤鸣, 等. 冀中坳陷隐蔽型潜山油气藏主控因素与勘探实践[J]. *石油学报*, 2012, 33(增刊1): 71-79.
ZHAO Xianzheng, WANG Quan, JIN Fengming, et al. Main controlling factors and exploration practice of subtle buried-hill hydrocarbon reservoir in Jizhong depression[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(S1): 71-79.
- [36] 易士威, 蒋有录, 范炳达, 等. 渤海湾盆地饶阳凹陷古近系源岩特征与新近系油气来源[J]. *石油实验地质*, 2010, 32(5): 475-479.
YI Shiwei, JIANG Youlu, FAN Bingda, et al. Neogene Petroleum source and characteristic of paleogene hydrocarbon source rock in the Raoyang sag, Bohai Bay Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2010, 32(5): 475-479.
- [37] 杨克绳, 党晓春, 戴福贵. 渤海湾盆地及周边的古生古储油气藏——以双洞背斜古油藏与刘其营、苏桥潜山油气藏为例[J]. *海相油气地质*, 2007, 12(3): 27-32.
YANG Kesheng, DANG Xiaochun, DAI Fugui. Paleo-source/paleo-reservoir typed reservoirs: cases of anticlinal paleoreservoir and buried hill reservoirs in Bohaiwan Basin region[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2007, 12(3): 27-32.
- [38] 赵贤正, 金凤鸣, 崔周旗, 等. 冀中坳陷隐蔽型潜山油藏类型与成藏模拟[J]. *石油勘探与开发*, 2012, 39(2): 137-143.
ZHAO Xianzheng, JIN Fengming, CUI Zhouqi, et al. Types of subtle buried-hill oil reservoirs and their accumulation simulation in Jizhong depression, Bohai Bay Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(2): 137-143.
- [39] 杨明慧, 刘池阳, 孙冬胜, 等. 冀中坳陷的伸展构造系统及其构造背景[J]. *大地构造与成矿学*, 2002, 26(2): 113-120.
YANG Minghui, LIU Chiyang, SUN Dongsheng, et al. Extensional tectonic system and its deep-seated setting of Jizhong Basin, China[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2002, 26(2): 113-120.
- [40] 姜福杰, 郭婧, 庞雄奇, 等. 渤海湾盆地南堡凹陷全油气系统3类油气资源联合评价[J]. *石油学报*, 2023, 44(9): 1472-1486.
JIANG Fujie, GUO Jing, PANG Xiongqi, et al. Joint evaluation of three types of oil-gas resources in whole petroleum system of Nanpu sag, Bohai Bay Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(9): 1472-1486.
- [41] 张以明, 王余泉, 刘井旺, 等. 冀中坳陷复杂断块油藏成藏模式研究[J]. *中国石油勘探*, 2006, 11(2): 15-18.
ZHANG Yiming, WANG Yuquan, LIU Jingwang, et al. Reservoir-forming pattern of complex fault-block oil reservoirs in Jizhong depression[J]. *China Petroleum Exploration*, 2006, 11(2): 15-18.
- [42] 易士威, 赵淑芳, 范炳达, 等. 冀中坳陷中央断裂构造带潜山发育特征及成藏模式[J]. *石油学报*, 2010, 31(3): 361-367.
YI Shiwei, ZHAO Shufang, FAN Bingda, et al. Development characteristics of buried hill and reservoir forming pattern in central faulted structural belt of Jizhong depression[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2010, 31(3): 361-367.
- [43] 赵贤正, 金凤鸣, 王余泉, 等. 冀中坳陷长洋淀地区“古储古堵”潜山成藏模式[J]. *石油学报*, 2008, 29(4): 489-493.
ZHAO Xianzheng, JIN Fengming, WANG Yuquan, et al. Buried-hill reservoir-forming mode of “old reservoir-old sealing formation” in Changyangdian area of Jizhong depression[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2008, 29(4): 489-493.
- [44] 田建章, 李先平, 崔永谦, 等. 断陷湖盆缓坡带岩性地层油藏模式及勘探实践——以冀中坳陷文安斜坡和蠡县斜坡为例[J]. *中国石油勘探*, 2010, 15(2): 24-28.
TIAN Jianzhang, LI Xianping, CUI Yongqian, et al. Lithostratigraphic reservoir models and exploration practice in gentle slope zone of rift lacustrine basins[J]. *China Petroleum Exploration*, 2010, 15(2): 24-28.
- [45] 朱庆忠, 李春华, 杨合义. 廊固凹陷大兴砾岩体成因与油气成藏[J]. *石油勘探与开发*, 2003, 30(4): 34-36.

- ZHU Qingzhong, LI Chunhua, YANG Heyi. The origin and hydrocarbon accumulation of Daxing conglomerate body in Langgu sag[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2003, 30(4): 34-36.
- [46] 宋荣彩, 张哨楠, 董树义, 等. 廊固凹陷陡坡带古近系砂砾岩体控制因素分析[J]. *成都理工大学学报: 自然科学版*, 2006, 33(6): 587-592.
- SONG Rongcai, ZHANG Shaonan, DONG Shuyi, et al. An analysis of the characteristic and controlling factors of the Paleogene glutenite fan in the actic area of the Langgu depression in Bohaiwan Basin, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition*, 2006, 33(6): 587-592.
- [47] 陶士振, 胡素云, 王建, 等. 中国陆相致密油形成条件、富集规律与资源潜力[J]. *石油学报*, 2023, 44(8): 1222-1239.
- TAO Shizhen, HU Suyun, WANG Jian, et al. Forming conditions, enrichment regularities and resource potentials of continental tight oil in China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(8): 1222-1239.
- [48] 赵贤正, 朱洁琼, 张锐锋, 等. 冀中坳陷东鹿凹陷泥灰岩-砾岩致密油气成藏特征与勘探潜力[J]. *石油学报*, 2014, 35(4): 613-622.
- ZHAO Xianzheng, ZHU Jieqiong, ZHANG Ruifeng, et al. Characteristics and exploration potential of tight calcilutite-rudstone reservoirs in Shulu sag, Jizhong depression, North China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2014, 35(4): 613-622.
- [49] 吴小洲, 牛嘉玉, 吴丰成, 等. 渤海湾盆地奥陶系潜山内幕油气成藏主控因素研究[J]. *海相油气地质*, 2013, 18(1): 1-12.
- WU Xiaozhou, NIU Jiayu, WU Fengcheng, et al. Major control factors of hydrocarbon accumulation in Ordovician interior buried hills, Bohaiwan Basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2013, 18(1): 1-12.
- [50] 吴兴宁, 李国军, 田继强, 等. 冀中坳陷碳酸盐岩潜山内幕储层特征及其形成主控因素[J]. *特种油气藏*, 2011, 18(2): 22-25.
- WU Xingning, LI Guojun, TIAN Jiqiang, et al. Characteristics of inner buried hill carbonate reservoirs and their main controlling factors in the Jizhong depression[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2011, 18(2): 22-25.
- [51] 杨德相, 陈勇, 李小冬, 等. 渤海湾盆地廊固凹陷杨税务潜山油气成藏的流体包裹体证据[J]. *石油学报*, 2021, 42(10): 1325-1336.
- YANG Dexiang, CHEN Yong, LI Xiaodong, et al. Evidence from fluid inclusions for hydrocarbon accumulation of Yangshuiwu buried hill in Langgu sag, Bohai Bay Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(10): 1325-1336.
- [52] 李欣, 郑署泓, 彭宁, 等. 冀中霸县凹陷古近系深层油气资源潜力研究[J]. *石油实验地质*, 2008, 30(6): 600-605.
- LI Xin, ZHENG Shuhong, PENG Ning, et al. Analysis of deep-seated hydrocarbon resource potential of Palaeogene in the Baxian sag, central Hebei Province[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2008, 30(6): 600-605.
- [53] 张林炎, 范昆, 黄臣军, 等. 冀中坳陷深层油气成藏潜力与勘探方向[J]. *地质力学学报*, 2011, 17(2): 144-157.
- ZHANG Linyan, FAN Kun, HUANG Chenjun, et al. Potential of the deep oil-gas reservoir-forming and exploitation direction in Jizhong depression[J]. *Journal of Geomechanics*, 2011, 17(2): 144-157.
- [54] 张锐锋, 田然, 李名, 等. 东鹿凹陷沙河街组三段下亚段层序地层与油气藏类型[J]. *石油学报*, 2015, 36(增刊1): 10-20.
- ZHANG Ruifeng, TIAN Ran, LI Ming, et al. Stratigraphic sequence and types of oil and gas reservoirs in the lower part of Member 3 of Shahejie Formation in Shulu sag[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(S1): 10-20.
- [55] 梁宏斌, 旷红伟, 刘俊奇, 等. 冀中坳陷东鹿凹陷古近系沙河街组三段泥灰岩成因探讨[J]. *古地理学报*, 2007, 9(2): 167-174.
- LIANG Hongbin, KUANG Hongwei, LIU Junqi, et al. Discussion on origin for marls of the Member 3 of Shahejie Formation of Paleogene in Shulu sag of central Hebei depression[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2007, 9(2): 167-174.
- [56] 韩超, 田建章, 赵蕊, 等. 东鹿凹陷沙河街组三段下亚段泥灰岩-砾岩致密储层储集空间类型及成因[J]. *石油学报*, 2015, 36(增刊1): 31-39.
- HAN Chao, TIAN Jianzhang, ZHAO Rui, et al. Reservoir space types and its genesis in tight calcilutite-rudstone reservoir of the lower part of Member 3 of Shahejie Formation, Shulu sag[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(S1): 31-39.
- [57] 崔周旗, 郭永军, 李毅遼, 等. 东鹿凹陷沙河街组三段下亚段泥灰岩-砾岩岩石学特征[J]. *石油学报*, 2015, 36(S1): 21-30.
- CUI Zhouqi, GUO Yongjun, LI Yikui, et al. Calcilutite-rudstone petrological characteristics in the lower part of Member 3 of Shahejie Formation, Shulu sag[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(S1): 21-30.
- [58] 郭绪杰, 支东明, 毛新军, 等. 准噶尔盆地煤层气的勘探发现及意义[J]. *中国石油勘探*, 2021, 26(6): 38-49.
- GUO Xujie, ZHI Dongming, MAO Xinjun, et al. Discovery and significance of coal measure gas in Junggar Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2021, 26(6): 38-49.
- [59] 孟元林, 肖丽华, 殷秀兰, 等. 渤海湾盆地文安斜坡高温热流体活动与油气藏形成[J]. *岩石学报*, 2003, 19(2): 337-347.
- MENG Yuanlin, XIAO Lihua, YIN Xiulan, et al. The activity of high-temperature hydrothermal fluids and the formation of the hydrocarbon reservoirs in the Wen'an slope of the Bohaiwan basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2003, 19(2): 337-347.
- [60] 秦建中, 王静, 李欣, 等. 渤海湾盆地饶阳凹陷未熟-低熟油成烃成藏条件研究[J]. *石油实验地质*, 2003, 25(增刊1): 566-572.
- QIN Jianzhong, WANG Jing, LI Xin, et al. Study on the hydrocarbon-generating and pool-forming conditions of immature oil in the Raoyang depression of the Bohaiwan Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2003, 25(S1): 566-572.
- [61] 单帅强, 何登发, 方成名, 等. 渤海湾盆地冀中坳陷高阳低凸起构造特征及成因机制[J]. *石油实验地质*, 2022, 44(6): 989-996.
- SHAN Shuaiqiang, HE Dengfa, FANG Chengming, et al. Structural characteristics and genetic mechanism of Gaoyang low uplift in Jizhong depression, Bohai Bay Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2022, 44(6): 989-996.
- [62] 刘华, 蒋有录, 徐昊清, 等. 冀中坳陷新近系油气成藏机理与成藏模式[J]. *石油学报*, 2011, 32(6): 928-936.
- LIU Hua, JIANG Youlu, XU Haoqing, et al. Accumulation mechanisms and modes of Neogene hydrocarbons in Jizhong depression[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(6): 928-936.