

文章编号: 0253-2697(2023)12-2160-19 DOI:10.7623/syxb202312010

渤海湾盆地黄骅坳陷油气勘探新领域、新类型及资源潜力

周立宏¹ 陈长伟¹ 崔宇^{1,2} 杨飞¹ 刘国全¹ 李宏军¹ 邹磊落¹ 王文庆¹ 周凤春¹

(1. 中国石油大港油田公司 天津 300280; 2. 中国地质大学(武汉)高等研究院 湖北武汉 430074)

摘要:随着多年高强度的勘探开发,老探区将不得不面对资源枯竭、资源劣质化的问题,大港油田所处的渤海湾盆地黄骅坳陷就是其中最典型的代表。黄骅坳陷的资源探明率已超过50%,在其近年来的新增探明储量中,深层、低渗透的储量占比在90%以上,这使得油田的原油稳产和可持续发展面临着更加紧迫的局面。近年来,中国在深层致密油气、页岩油气、煤层气等新类型油气勘探中接连获得突破,为老探区指明了勘探方向。对黄骅坳陷开展的深入、综合分析认为,黄骅坳陷在古近系深凹区、潜山内幕、页岩油、煤层气4个勘探领域仍具有重要的勘探潜力。基于对沉积体系和烃源岩分布特征的再认识,提出了深凹区发育源-储匹配良好的大型砂体,油气的强充注可形成大规模成藏;构建了潜山内幕层状油气成藏新模式,指出潜山内幕发育的白云岩储集层是除风化壳之外另一类全新的勘探领域;通过深化页岩油富集规律的认识,明确了纹层型页岩的“甜点层”和混合质页岩具有较大的页岩油勘探潜力;鉴于黄骅坳陷的石炭系—二叠系煤层分布面积广、厚度大、埋藏适中、具有良好生气潜力的特征,以及已发现源自煤系烃源岩的天然气藏的现实状况,深部煤层气是下一步天然气勘探的重要新领域。黄骅坳陷4个领域的预计石油资源量为 5.6×10^8 t,天然气资源量为 1397×10^8 m³,若获得勘探突破将夯实老探区可持续发展的资源基础。

关键词:黄骅坳陷;资源潜力;页岩油;煤层气;古近系深凹区;潜山

中图分类号: TE132.1

文献标识码: A

New fields, new types and resource potentials of oil-gas exploration in Huanghua depression of Bohai Bay Basin

Zhou Lihong¹ Chen Changwei¹ Cui Yu^{1,2} Yang Fei¹ Liu Guoquan¹ Li Hongjun¹
Zou Leiluo¹ Wang Wenqing¹ Zhou Fengchun¹

(1. PetroChina Dagang Oilfield Company, Tianjin 300280, China; 2. Institute of Advanced Studies, China University of Geosciences, Hubei Wuhan 430074, China)

Abstract: With years of intensive exploration and development, the problems of resource exhaustion and deterioration are encountered in old exploration areas, typically represented by Huanghua depression of Bohai Bay Basin, where Dagang oilfield is located. The ratio of proven resources in Huanghua depression has exceeded 50%. Among the newly proven reserves in recent years, deep and low-permeability reserves account for over 90%. As a result, it is urgent to maintain the stable production and sustainable development of crude oil in the oilfield. In recent years, China has successively made breakthroughs in exploring new types of oil and gas such as deep tight oil-gas, shale oil-gas, and coal rock gas, indicating the exploration direction for old exploration areas. Through in-depth and comprehensive analysis, it is concluded that there is still great exploration potential in 4 exploration areas of Huanghua depression, i. e., Paleogene deep depression, inner buried-hill, shale oil, and coal rock gas. Based on the re-understanding of sedimentary system and source rocks distribution characteristics, it is proposed that large sand bodies with well-matched source-reservoir assemblages are developed in deep depression, and strong oil-gas charging can lead to large-scale hydrocarbon accumulation. Moreover, the paper constructs a new model of layered petroleum accumulation in inner buried-hill, and it is pointed out that besides weathering crust, the dolomite reservoirs developed in inner buried-hill represent another new exploration field. By deepening the understanding of shale oil enrichment regularities, it has been clarified that the sweet spot layers of laminar shale and mixed shale have great potential for shale oil exploration. Boasting of wide distribution area, large thickness, moderate burial depth, and good gas production potential of the Carboniferous-Permian coal seams in Huanghua depression, as well as the discovered natural gas reservoirs from coal-measure source rocks, deep coal rock gas is a new important area for further natural gas exploration. The oil resources in four fields in Huanghua depression are estimated to be $5.6 \times$

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司前瞻性基础性战略性科技项目“大港探区斜坡带油气藏分布序列与富集高产规律研究”(2021DJ0702)和中国石油油气与新能源分公司重点科技项目“大港沧东孔二段页岩油效益开发技术研究与先导试验”(2022KT1002)资助。

第一作者: 周立宏,男,1968年7月生,2005年获中国科学院地质与地球物理研究所博士学位,现为中国石油大港油田公司执行董事、党委书记、教授级高级工程师,主要从事油气勘探研究与生产管理工作。Email:zhoulh@petrochina.com.cn

通信作者: 崔宇,男,1988年7月生,2014年获中国石油大学(北京)硕士学位,现为中国石油大港油田公司高级工程师,主要从事油气勘探研究工作。Email:dg_cuiyu@petrochina.com.cn

10⁸ t, and the natural gas resources amount to 1 397 × 10⁸ m³. The breakthroughs in petroleum exploration can lay the resource foundation for the sustainable development of old exploration areas.

Key words: Huanghua depression; resource potential; shale oil; coalbed methane; Paleogene deep sag; buried-hill

引用:周立宏,陈长伟,崔宇,杨飞,刘国全,李宏军,邹磊落,王文庆,周凤春.渤海湾盆地黄骅坳陷油气勘探新领域、新类型及资源潜力[J].石油学报,2023,44(12):2160-2178.

Cite:ZHOU Lihong, CHEN Changwei, CUI Yu, YANG Fei, LIU Guoquan, LI Hongjun, ZOU Leiluo, WANG Wenqing, ZHOU Fengchun. New fields, new types and resource potentials of oil-gas exploration in Huanghua depression of Bohai Bay Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(12):2160-2178.

经过 50 余年的勘探,黄骅坳陷目前已进入中—高勘探程度阶段。截至 2022 年,黄骅坳陷已累计采集三维地震 11 157 km²,二维地震 44 003.3 km,形成了覆盖坳陷主体区的 7 654 km² 连片三维地震数据体,完钻探井 2 400 口,发现油气流井 1 165 口,其中,主要构造带的探井密度已超过 1.25 口/km²,并在北大港、孔店等正向构造带及歧北、埕北等斜坡区找到了北大港、板桥、埕海、枣园、王官屯等 25 个油气田^[1-6],其油气层的埋深最浅为 300 m,最深为 5 500 m,基本实现了连片分布。根据第四次油气资源评价成果,大港探区常规石油和天然气的总资源量分别为 26.5 × 10⁸ t 和 5 610 × 10⁸ m³。截至 2022 年底,累计石油探明地质储量为 13.5 × 10⁸ t,探明率为 50.9%;天然气探明地质储量为 774.25 × 10⁸ m³,探明率为 13.8%。

“十三五”规划(2016—2020 年)以来,大港油田新增探明储量区块破碎,单块新增储量规模小于 100 × 10⁴ t 的区块有 63 个,占总区块数的 65%,且以深层、低渗特征为主(中深层—深层的储量为 12 241.8 × 10⁴ t,占总储量的 89.2%;低渗—特低渗储量为 11 802.06 × 10⁴ t,占总储量的 86.0%)。当前,可供效益升级动用的储量越来越少,这使得大港油田未来的生存发展面临着严峻的挑战。为此笔者借鉴近年来中国油气勘探领域的最新成果认识,结合油田自身勘探实践,通过深入分析,优选黄骅坳陷大港探区古近系深凹区、潜山内幕、页岩油、煤层气 4 大勘探程度低、勘探潜力大的领域展开讨论,以期为大港探区及其他地区的勘探提供帮助。

1 区域地质背景

黄骅坳陷位于渤海湾盆地腹部,夹持于沧县隆起和埕宁隆起之间,为地幔上涌和裂陷作用下形成的多期叠合负向构造单元^[7-8],地层总厚度达 14 000 余米,包括中元古界/新元古界、古生界、中生界和新生界。以孔店凸起为界,黄骅坳陷在新生代发育歧口凹陷和沧东凹陷两个富油气凹陷(图 1),斜坡发育程度高,超过凹陷总面积的 70% 以上,“洼多凸少”、“大型斜坡发育”、“断裂发育”是歧口、沧东两大凹陷显著的结构特点^[9-11]。

2 近年的勘探成果与剩余资源分布

2.1 “十三五”规划以来取得的勘探成果

2.1.1 中—浅层精细勘探实现的效益增储与建产

中—浅层一直是大港油田原油生产的主力。“十三五”规划以来,为了寻找效益增储、快速建产区,创新构建优势油源断裂与多类型砂体相互配置的“断裂—砂体”组合控藏新模式^[12-13],在滨海断鼻构造带、歧南斜坡、孔店构造带等区带实施“藏间找藏”、“藏下找藏”,累计发现探明储量 6 042 × 10⁴ t,新建产能 104 × 10⁴ t,围绕 G17104 井、Zao1508 井、Xi1602 井、ZH506 井等建成了多个高产高效区块(表 1)。例如:2017 年,滨海断鼻构造带的港东断层下降盘钻探了 G17104 井,在沙河街组一段(沙一段)上亚段试油中获得产油量达 161.7 t/d、产气量达 21 468 m³/d 的高产油气流;2020 年,滨海断鼻构造带北翼钻探的 Bin117X1 井在东营组试油中获得 53 t/d 的高产油流,整体在滨海断鼻构造区形成了 2000 万吨级的高效增储建产区,探索出老区精细勘探的新途径。

2.1.2 多层系潜山内幕油气藏勘探取得的新发现

大港探区潜山勘探历经 50 余年,勘探早期主探大型高位潜山,未获得勘探突破;之后,预探低位潜山,发现了千米桥、埕海、乌马营等潜山油气藏,但由于油气水关系复杂、高含硫化氢等因素,难以实现开发动用^[14-17]。“十三五”规划以来,继承和发展煤系烃源岩生烃理论,对上古生界煤系烃源岩的分布特征、有机质类型、热演化程度、二次生烃潜力等进行研究后认为,煤成气资源量十分丰富,并重点开展了以煤系烃源岩为源岩的潜山圈闭评价工作。2017 年,在乌马营潜山以二叠系为主要目的层钻探的 Yg1 井获得重大突破,二叠系下石盒子组 4 789 ~ 4 874 m 在试气中获得 80 122 m³/d 的产气量;之后钻探的 Yg2 井和 Wt1 井同样获得高产,并在大港油田区发现了原生煤成气成因的气田——莲花气田^[18-20]。2018 年,在歧北潜山钻探 Qg8 井,奥陶系风化壳中试气获得 162 800 m³/d 的产气量,展示了潜山具有良好的勘探前景(表 1)。

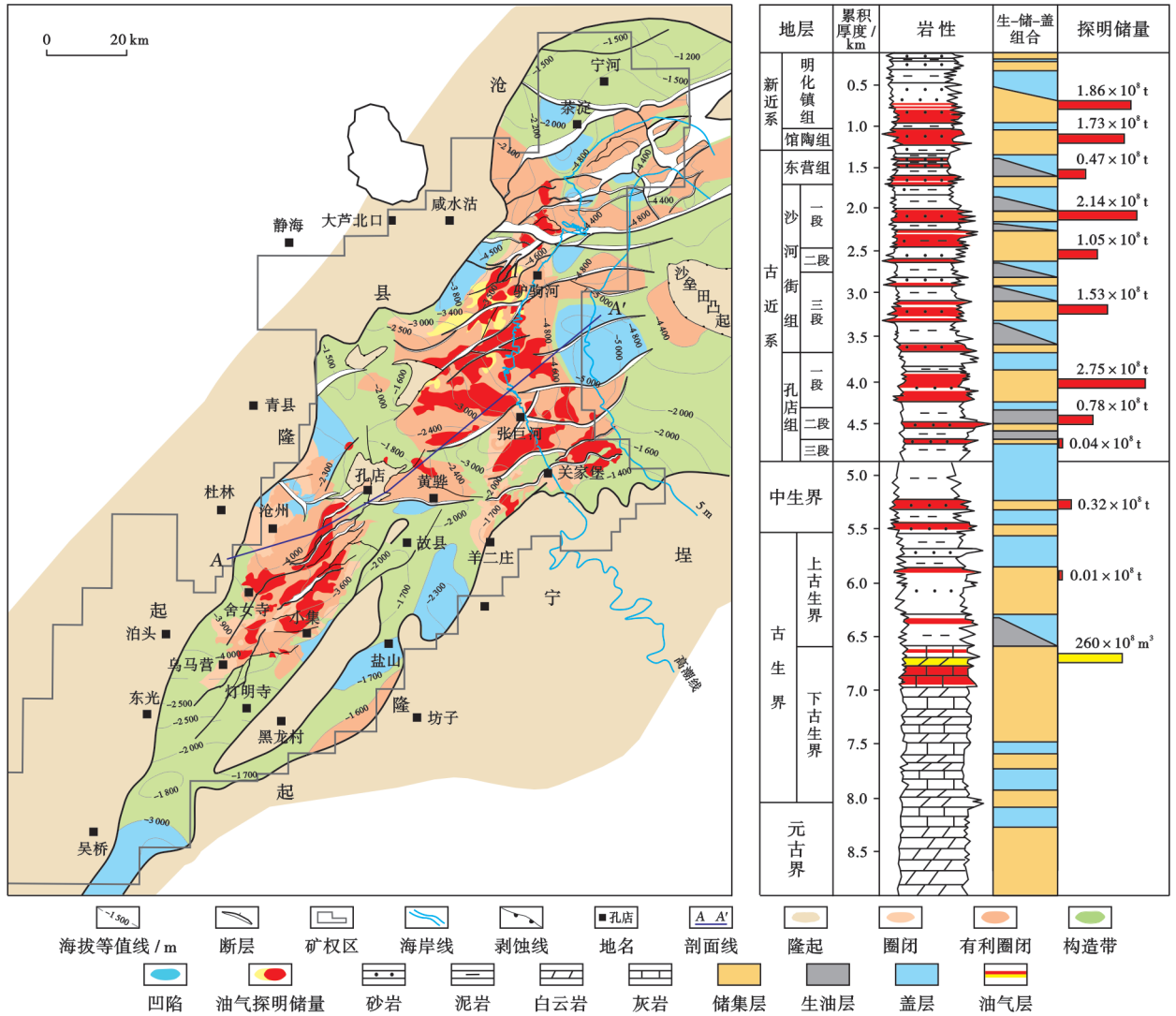


图 1 黄骅坳陷勘探程度及综合地层特征

Fig. 1 Exploration degree and comprehensive stratigraphic characteristics of Huanghua depression

表 1 “十三五”规划以来黄骅坳陷高产井的试油数据

Table 1 Oil test data of high-yield well in Huanghua depression since the 13th Five Year Plan

领域	井号	地层	深度/m	试油方式	产油量/ (t/d)	产气量/ (m ³ /d)	累积产油量/ 10 ⁴ t	累积产气量/ 10 ⁴ m ³
页岩油	GD1702H	孔店组二段	3 952.4~5 229.5	体积压裂	61.00	800	1.2080	64.10
	QY11-1-1	沙河街组三段	3 883.5~5 290.7	体积压裂	45.80	8 614	1.0345	120.93
	QY1H	沙河街组一段下亚段	5 179.0~5 249.9	体积压裂	49.86	1 216	0.9740	48.02
	GY5-1-9H	孔店组二段	4 110.8~5 367.6	体积压裂	56.98		2.1038	
	GY5-3-6H	孔店组二段	4 153.0~5 993.0	体积压裂	96.25		0.9827	
中—浅层 精细勘探	G17104	沙河街组一段上亚段	3 391.2~3 424.0	油管自喷 8 mm	161.70	21 468	159.2200	21 509.00
	Zao1508	中生界	2 661.0~2 710.1	泵抽 6.2 m, 2.7 次/min	16.91		118.0000	
	Xi1602	沙河街组	1 707.7~1 740.5	油管自喷 5 mm	54.90		122.5000	
	ZH506	沙河街组二段	3 118.0~3 179.3	油管自喷 5 mm	40.12	1 951	103.4000	6 387.00
	Bin117X1	东营组三段	2 999.1~3 016.7	螺杆泵 8 mm	38.46	19 860		
潜山	Yg1	下石盒子组	4 959.4~4 987.7	压裂后自喷 6 mm	24.46	80 122	85.0300	360 331.00
	Yg2	下石盒子组	4 702.8~4 734.2	油管自喷 12 mm	18.80	178 897	5.3900	149 759.00
	Qg8	峰峰组	3 834.7~3 842.0	油管自喷 12 mm	35.70	162 800	11.7000	70 760.00
	Z1502	二叠系	2 477.7~2 536.3	油管自喷 5 mm	4.15	47 406	13.8000	145 490.00

2.1.3 沧东凹陷孔店组二段(孔二段)页岩油取得的重大突破

中国石油大港油田公司从 2013 年开始探索页岩油,经历研究探索、勘探突破、产能评价、先导试验 4 个阶段,实现效益开发^[21-25]。2013 年,对孔二段的长井段开展了 500m 连续取心,进行了 8 项 52 类 12000 余块次分析联测,系统分析了岩性、脆性、物性、含油性等;2017 年,在官东地区部署 GD1701H 井和 GD1702H 井两口水平井,率先对纹层型页岩实施了水平井+体积压裂,实现了勘探突破(表 1);2019—2020 年,利用 11 个平台实施水平井 42 口,探索在不同“甜点层”、成熟度、水平段长度、水平井方位、井间距、储层改造方式下的页岩油产能,总结形成了适合黄骅拗陷的页岩油开发模式,单井产量逐年向好,并率先在渤海湾盆地实现了陆相页岩油工业化开发,其中,GY5-1-9H 井累积产油量突破 2×10^4 t,而大港油田的页岩油产量在之后的 2021—2022 年连续两年突破 10×10^4 t/a;2022 年,在产能评价的基础上,优选沧东凹陷页岩油 5 号平台开

展先导试验,测试单井峰值产量为 39.6~122.3 t,单井评估的最终可采储量(EUR)为 $(4.34 \sim 4.47) \times 10^4$ t,建成了 10 万吨级效益开发示范平台。

以上勘探实践表明,依靠理论认识的创新和工程技术的进步,老区仍然可以获得新的勘探发现,这也坚定了老区可持续发展的信心。

2.2 剩余资源分布

虽然黄骅拗陷已达到高勘探程度,但勘探程度总体不均衡,仍具有一定的潜力,主要表现在 3 方面:①剩余资源的深、浅分布不均,深层(埋深大于 3500 m)的资源量为 9.25×10^8 t,探明程度仅为 19.7%,剩余常规资源的勘探潜力大[图 2(a)];②油、气剩余资源不均^[26],其中,天然气资源量为 5610×10^8 m³,探明程度仅为 13.6%,潜山和古近系深层的天然气勘探潜力巨大[图 2(b)];③常规、非常规剩余资源不均,在陆相页岩油勘探理论的指导下,黄骅拗陷歧口凹陷沙河街组三段(沙三段)、沙一段下亚段、沧东凹陷孔二段 3 套页岩层系中页岩油的总资源量达 36.15×10^8 t,具有广阔的勘探前景[图 2(c)]。

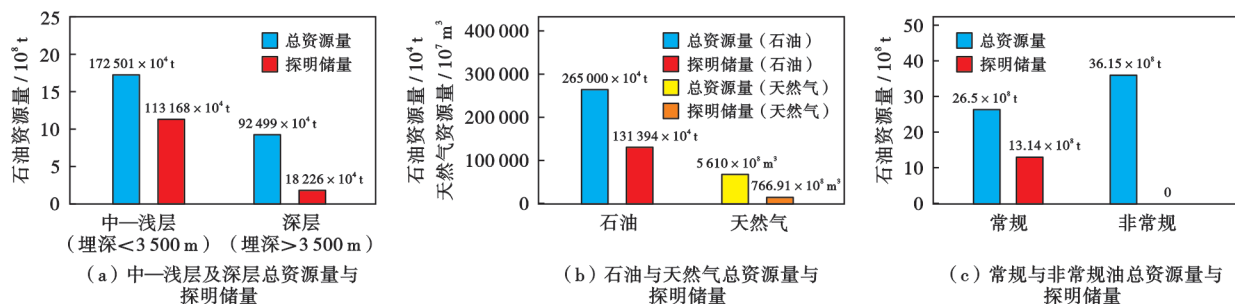


图 2 黄骅拗陷剩余资源分布特征

Fig. 2 Distribution characteristics of residual resources in Huanghua depression

此外,随着鄂尔多斯盆地、准噶尔盆地等盆地在深部煤层气勘探中接连获得突破,渤海湾盆地大港探区石炭系—二叠系以其煤层分布面积广、厚度大、埋藏适中的条件,以及煤岩良好的生气潜力分析,其深部煤层气的勘探前景同样广阔。从剩余资源量及近年来的勘探成果的角度分析,黄骅拗陷存在潜山内幕、页岩油气、古近系深层、煤层气等潜力领域,值得进一步探索实践。

3 油气地质条件

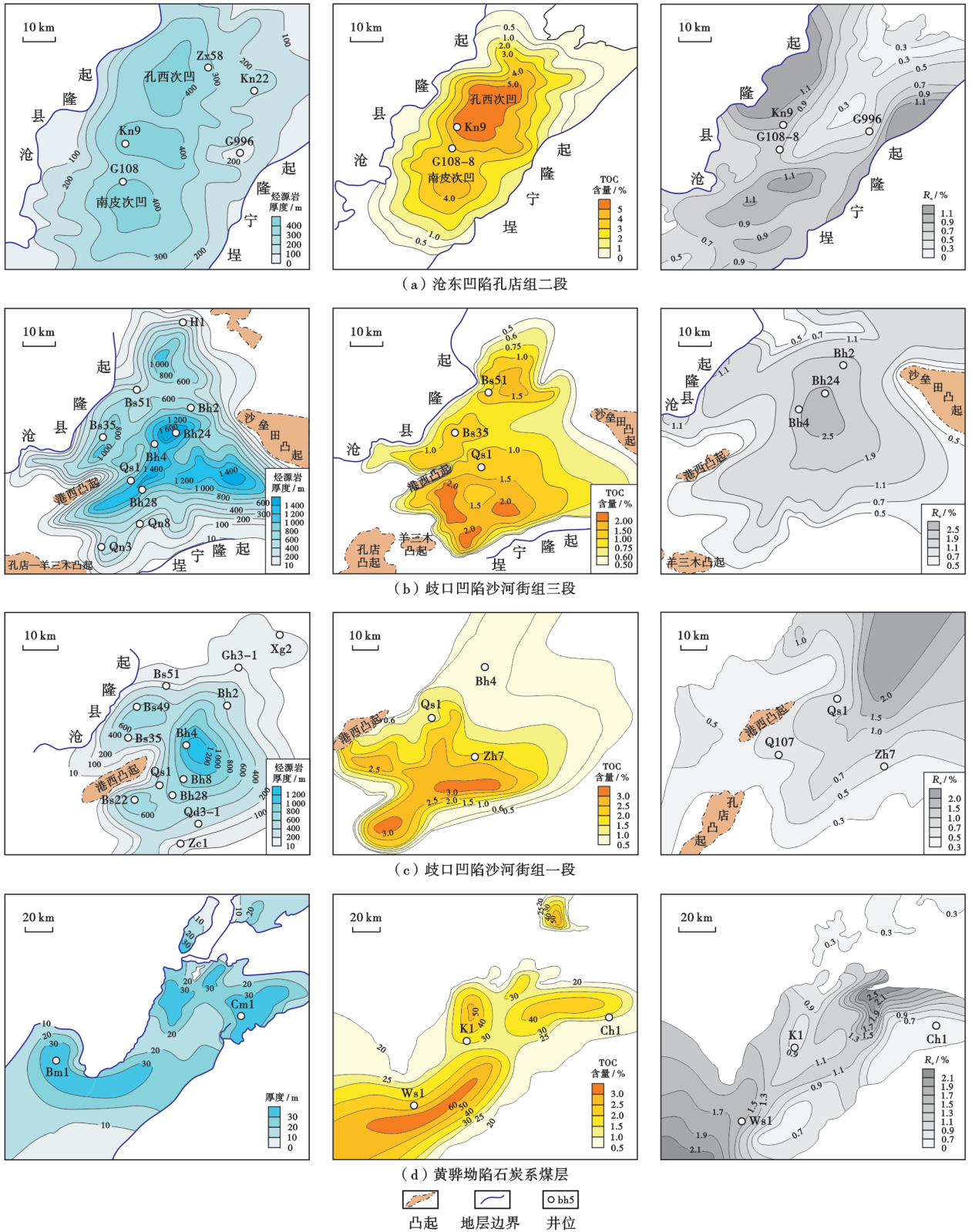
黄骅拗陷自下至上发育石炭系、孔二段、沙三段、沙一段等多套生烃层系,既是常规油气的资源基础,也是良好的页岩油勘探层系。黄骅拗陷主要发育新生界—上古生界砂岩、下古生界—中元古界/新元古界碳酸盐岩以及中生界、新生界火成岩等储集岩,与烃源岩匹配,形成了新近系明化镇组—馆陶组、古近系东营

组—沙河街组—孔店组、中生界、上古生界、下古生界等多套常规成藏组合。

3.1 主要烃源岩

孔二段烃源岩主要在沧东凹陷发育,其岩性主要为暗色泥岩和油页岩,厚度在 100~250 m,在孔西次凹和南皮次凹有两个厚度分布中心,有机质丰度高,总有机碳(TOC)含量最高可达 6.0%,热演化程度[以镜质体放射率(R_o)为指标]在 0.5%~1.3% [图 3(a)],有机质类型为腐泥型,以大量生油为主^[22]。

沙三段烃源岩是歧口凹陷烃源岩中厚度最大、分布最广泛的生烃层系,有效烃源岩厚度在 400~1500 m,厚度的峰值位于歧口主凹部分[图 3(b)]。沙三段烃源岩的 TOC 含量为 0.5%~2.0%, R_o 最大值可达 2.5% [图 3(b)],目前已达到大量生油气阶段;沙三段的有机质类型以 II_1 — II_2 型为主,既可以生油,也可以生气^[27]。



注: TOC—总有机碳; R_0 —镜质体反射率。

图3 黄骅坳陷主要烃源岩层系的厚度、TOC含量和 R_0 分布特征

Fig. 3 Thickness, TOC content and R_0 distribution characteristics of the main hydrocarbon source rock strata in Huanghua depression

沙一段烃源岩的厚度为 200~1200 m,在歧口主凹区的厚度达 800~1200 m; TOC 含量为 0.5%~3.0%; 热演化程度适中, R_0 一般为 0.6%~1.3% [图 3(c)], 以大

量生油为主, 在深凹区沙一段烃源岩 R_0 一般大于 1.3%, 以大量生气为主 [28-29]。

石炭系烃源岩在全区均有分布, 主要由煤层、碳质

泥岩和暗色泥岩 3 种岩性构成,其中,煤层占据主导地位,在孔西—埕海地区、沧南—乌马营地区有两个厚度分布中心,煤层的累计厚度大于 30 m[图 3(d)]。煤层的 TOC 含量为 20%~50%;经历了两期生烃,有机质热演化程度高,形成歧北—埕海、沧南—乌马营两个高演化程度中心[图 3(d)],总生气量达 $54 \times 10^{12} \text{ m}^3$,最大生气强度为 $62.5 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ [30-31]。

3.2 主要储层

黄骅坳陷主要发育砂岩、碳酸盐岩、火成岩和页岩 4 类储集层。

砂岩储层在上古生界二叠系、中生界和新生界广泛发育,储层的岩石类型有长石砂岩、岩屑砂岩和石英砂岩,储集空间类型主要为次生孔隙、残余原生粒间孔、混合孔隙和裂缝[图 4(a)~图 4(d)]。对于同一层系而言,随着埋深增加,储层物性整体上呈现降低的趋势,但孔隙度随深度的变化并非呈线性关系;受控于沉

积相带、成岩动力环境、成岩作用和烃类充注等多因素影响,深层的砂岩储层存在异常孔隙发育带,这为中—深层的油气聚集提供了有利条件[16,18,32-33]。

火成岩也是黄骅坳陷的主要储层类型,在上古生界、中生界和新生界均有分布。火成岩储层的岩性以玄武岩、安山岩、凝灰岩和辉绿岩为主,储集空间以溶蚀孔、气孔、晶内孔和裂缝为主[图 4(e)~图 4(h)],储层物性差异巨大,强次生改造的爆发相与溢流相为优质储层[34-36]。

碳酸盐岩储层主要分布于下古生界奥陶系及其以下地层中,岩性主要为泥晶灰岩、粉晶—泥晶白云岩、石灰岩和白云岩,储集空间主要包括晶间孔隙、溶孔和裂缝[图 4(i)~图 4(l)]。储层物性变化较大,孔隙度为 0.33%~22.90%,平均为 3.68%;渗透率为 0.001~36.000 mD,平均为 1.067 mD。奥陶系储层主要受控于岩性、沉积环境、水动力条件、古地形、断裂发育程度和风化淋滤时间等因素的影响[37]。

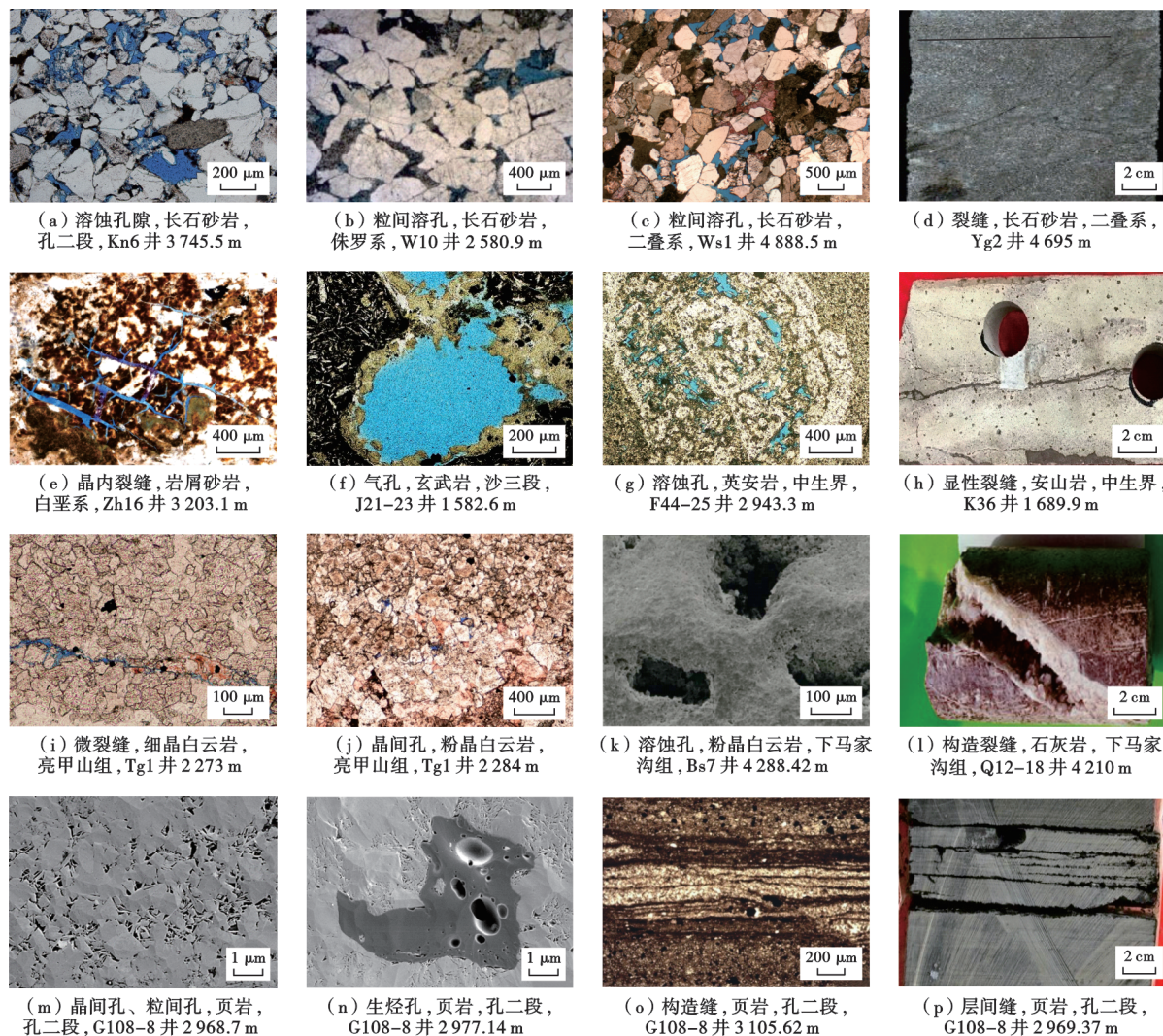


图 4 黄骅坳陷主要储集层的储集空间特征

Fig. 4 Reservoir space characteristics of main reservoirs in Huanghua depression

页岩为近年来通过水平井+体积压裂技术开发的人造储层,主要分布于新生界孔二段、沙三段、沙一下等烃源岩层系中。按照岩石组分可分为长英质、灰质/白云质、黏土质和混合质4个亚类,储集空间以矿物粒间孔、晶间孔、有机质生烃孔和微裂缝为主[图4(m)—图4(p)]。页岩储层不具备自然产能,须进行大规模体积压裂^[22,38]。

3.3 区域盖层

黄骅拗陷古生界—新生界均发育区域稳定性盖层。下古生界区域盖层主要包括馒头组、徐庄组和长山组+崮山组,厚度在20~120 m,岩性以泥页岩为主,该套盖层作为华北地台的一部分,分布稳定,为蓟县系雾迷山组、寒武系府君山组等储层提供了良好的封盖条件。上古生界石炭系煤系地层广泛分布,煤层、泥岩、碳质泥岩的厚度可达200~300 m,与下伏奥陶系碳酸盐岩储层形成了良好的盖-储组合。新生界古

近系区域性盖层主要包括孔二段、沙一段中亚段和东营组二段等页岩层系,具备极强的封盖能力^[39]。

4 勘探新领域、新类型及资源潜力

4.1 古近系深凹区

4.1.1 勘探概况

目前,在歧口和沧东富油气凹陷的构造带主体与中—高斜坡地区基本实现了含油层连片勘探,但埋深大于3500 m的深凹区仍处于勘探空白区^[40-41]。2022年,歧口深凹区和沧东深凹区针对古近系深凹区分别钻探了Ht1井和Ct1井(图5),均取得了良好效果。Ct1井在孔二段试油(4426~4754 m深度段)中获得了118 t/d的高产,Ht1井在东营组三段(东三段)试油(4058~4221 m深度段)中获得了36 t/d的高产,深凹区有望开辟亿吨级规模增储新战场。

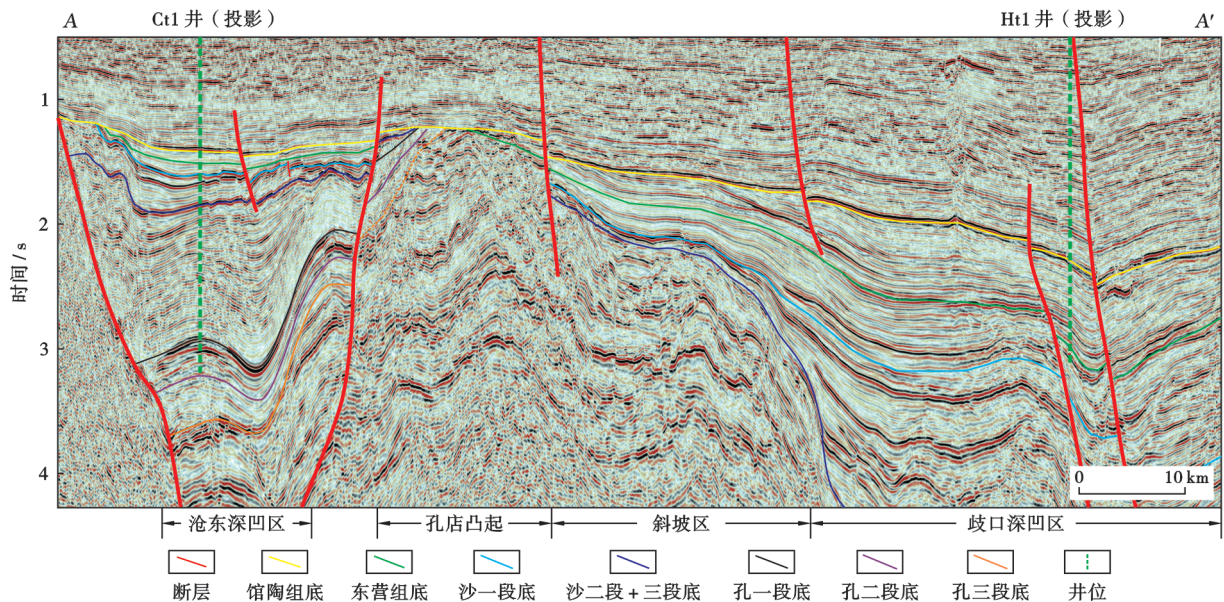


图5 过黄骅拗陷歧口凹陷和沧东凹陷深凹区的地震解释剖面(剖面位置见图1)

Fig. 5 Seismic interpretation profile of deep subsag areas across Qikou sag and Cangdong sag in Huanghua depression

4.1.2 有利成藏条件分析

(1) 古近系深凹区存在大型三角洲砂体,具备良好的油气储集条件

以往的研究认为,深凹区主要为泥岩沉积,大型砂体不发育,不具备形成规模油气藏条件^[22-24]。系统的物源方向、沉积体系展布、沉积微相研究表明,歧口凹陷和沧东凹陷的主凹区分别在东三段和孔二段发育大型辫状河三角洲砂体。东三段沉积期,湖盆萎缩,来自燕山的物源充足,可远距离输送至歧口凹陷的主凹区,形成辫状河三角洲水下沉积[图6(a)],沉积砂体的岩性以块状中砂岩、细砂岩为主,分选和磨圆较好。沧东凹陷深凹区同样具备发育大型砂体的有利条件。目

前,利用地震+重力资料在沧县隆起上识别出舍女寺、沧州市两个物源,分别在沧东凹陷的下降盘形成舍女寺、沧州市两大三角洲沉积体系,二者岩性组合相似。南部舍女寺砂体的岩性组合为厚层中砂—细砂岩夹灰色泥岩,发育三角洲前缘水下分流河道及河口坝砂体[图6(b)],已获得规模发现;北侧沧州市砂体尚无钻井钻遇,由于埋深超过4000 m,勘探程度低。

受储层长石含量高且易溶蚀、异常高压保孔、油气早期充注等因素影响,深凹区的砂体在埋深超过4000 m后仍具备良好的储集性能。在歧口凹陷深凹区,东三段的岩性以岩屑长石砂岩为主,长石含量为41.7%,溶蚀孔隙发育,孔隙度为9.3%~21.8%、平均为17.5%,渗

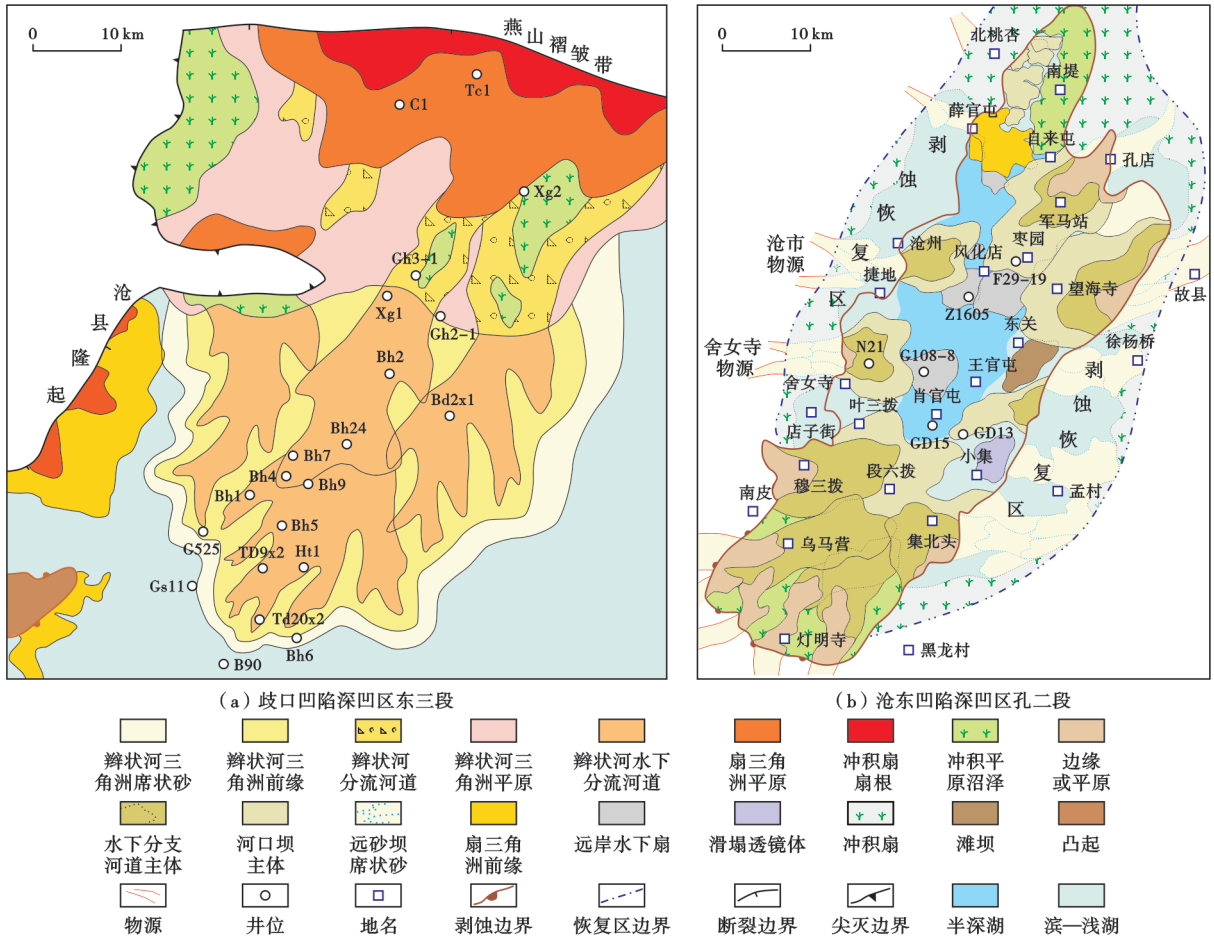


Fig. 6 Sedimentary system of deep subsag areas in Huanghua depression

透率为 0.01~58.64 mD、平均为 3.3 mD;在东三段之上,上覆东二段泥岩盖层的厚度为 250~400 m,这导致东三段普遍存在异常高压,压力系数为 1.30~1.59,在 TD9x2 井中东三段的实测压力系数为 1.59,有利于保孔。在沧东凹陷深凹区,孔二段烃源岩的热压模拟实验表明,当埋深为 2700 m 时其 R_o 达到 0.6% 并开始排烃,当埋深为 4300 m 时,其 R_o 达到 1.1% 并出现大规模排烃,油气充注早(从孔店组一段上亚段沉积期开始),充注时间长(从孔店组一段上亚段沉积期至今),烃源岩早生早排、持续充注的特征有利于孔隙保存,因而在埋深约 4800 m 处储层的孔隙度仍可达 12%。

(2) 深凹区烃源岩厚度大、演化程度高、生烃条件优越

黄骅坳陷古近系深凹区的沉积以深湖一半深湖亚相为主,烃源岩厚度大、埋藏深、演化程度高,具有良好的生烃条件,生油强度为 $(500\sim 2000) \times 10^4 \text{ t/km}^2$ (表 2)。深凹区 Ht1 井的钻探结果证明了东三段的生烃能力。在东三段沉积期,歧口凹陷主凹的泥岩厚度超过 300 m,其 TOC 含量平均为 4.0%,游离烃含量(S_1)平均为 2.8 mg/g,干酪根类型以混合型($\text{II}_1\text{—II}_2$ 型)为主,演化程度处于生油窗($R_o > 0.7\%$)的烃源岩面积为 135 km²。钻探和分析测试结果拓展了深凹区的含油气规模。

表 2 黄骅坳陷深凹区的烃源岩参数

Table 2 Source rock parameters of deep subsag areas in Huanghua depression

层位	面积/ km ²	埋深/m	暗色泥岩厚度/ m	TOC/%	($S_1 + S_2$)/ (mg/g)	R_o /%	生油强度/ (10^4 t/km^2)
歧口凹陷沙一段	400	>5000	800~1000	2.44~5.00	10.80~43.90	1.5~1.8	600~1200
歧口凹陷沙三段	500	>6000	300~500	1.43~4.00	20.31~63.80	>1.8	800~1400
歧口凹陷东三段	240	4000~6000	160~200	4.00~5.00	13.00~15.00	0.7~1.2	500~800
沧东凹陷孔二段	150	4300~6000	300~500	3.60~6.00	26.80~57.20	1.1~1.6	800~2000

注:TOC—总有机碳;($S_1 + S_2$)—生烃潜量; R_o —镜质体反射率。

(3) 深凹区优质烃源岩与大砂体的耦合可形成大型岩性油气藏

只有深层砂体与烃源岩具有良好的匹配关系, 油气才能聚集成藏。2011年, 歧口凹陷深凹区钻探了Qt1井, 在沙三段2亚段钻遇辫状河三角洲砂体, 试气获得低产气流。分析认为, 沙三段2亚段砂体下伏于沙三段1亚段主力烃源岩之下, 源-储匹配关系差, 油气充满程度低。因此, 供储关系良好的大型

砂体是古近系深层勘探的重要方向。歧口凹陷深凹区的东三段与沧东凹陷深凹区的孔二段均为源-储互层沉积, 砂层被烃源岩层包裹, 其“旁生侧储、自生自储”的条件优越; 同时, 由于深凹区断裂不发育, 高成熟烃源岩可形成生烃增压(Ct1井证实孔二段的压力系数达1.4~1.6), 并在稳定泥页岩封盖条件下形成流体封存箱, 从而有利于形成大型岩性油气藏(图7)。

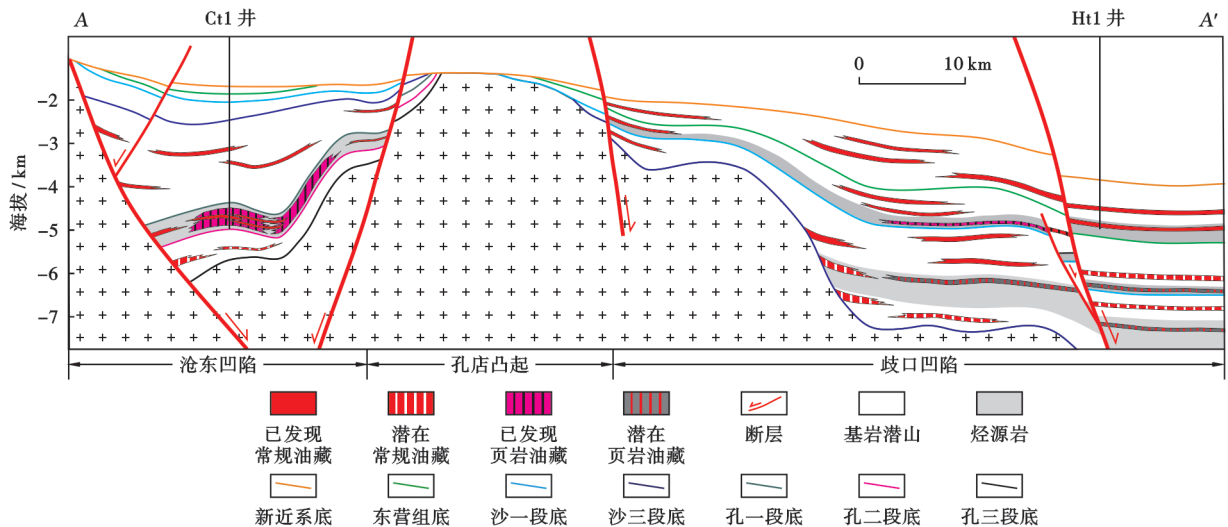


图7 黄骅拗陷深凹区油气藏发育模式(剖面位置见图1)

Fig. 7 Development model of hydrocarbon reservoir of deep subsag areas in Huanghua depression

4.1.3 勘探潜力

综上所述认为, 歧口凹陷和沧东凹陷的主凹区是深层岩性油气藏勘探的最有利目标区, 具备亿吨级规模增储的潜力。歧口凹陷深凹区东三段的含油砂体面积为70 km², 油藏埋深为3500~4500 m, 油层厚度为63 m, 预估资源量超过1.4×10⁸ t; 沧东凹陷深凹区孔二段落落的含油砂岩面积为46 km², 油藏埋深为4200~4900 m, 油层厚度为75 m, 预估资源量可达1.01×10⁸ t。

深凹区的页岩油气资源值得关注。深凹区烃源岩埋藏深度大、成熟度高, 页岩油的成藏条件有利。根据Ct1井的钻探分析, 沧东凹陷深凹区具有高丰度、高演化的孔二段烃源岩灶, 其中, 孔二段3亚段泥页岩的厚度为226 m, 有机质丰度高(TOC含量为2%~5%)、类型好(I—II₁型干酪根为主)、成熟度高(壁心实测的R_o平均为1.51%), 揭示发育规模优质烃源岩, 预估页岩油资源量为2.23×10⁸ t。

4.2 潜山内幕

4.2.1 勘探概况

大港探区潜山内幕的二叠系和奥陶系已获得勘探突破, 目前正在按计划开展前期评价及效益开发先导

试验。为持续扩大潜山内幕的勘探成果, 油公司系统开展了新一轮潜山构造与宏观成藏研究。分析认为, 大港探区潜山内幕下古生界—中元古界/新元古界的成藏背景有利, 具备规模油气成藏潜力; 大港探区地处沧津复向斜, 下古生界—中元古界/新元古界发育齐全。目前, 渤海湾盆地冀中、济阳等拗陷已在蓟县系雾迷山组、寒武系府君山组、奥陶系亮甲山组获得规模发现^[42-43], 但大港探区对此的勘探程度低, 钻遇中元古界/新元古界的探井仅有9口且大部分位于盆地边缘及凸起区, 尚未获得勘探发现。

4.2.2 有利成藏条件分析

(1) 背斜圈闭完整、规模大

通过对黄骅拗陷潜山内幕奥陶系、寒武系、中元古界/新元古界3套层系进行分层系解释, 初步落实了8个潜山圈闭(图8), 圈闭规模大。其中, 寒武系落实的有利圈闭面积为294.9 km², 断背斜/背斜圈闭3个、断鼻型圈闭5个(表3)。由于黄骅拗陷为新生代断陷盆地, 受晚期断层持续活动影响, 圈闭形态对于圈闭是否成藏具有重要作用。断鼻型潜山的边界断层虽然可沟通源、储, 但断层的持续活动不利于潜山油气藏保存; 背斜型潜山有利于油气成藏。

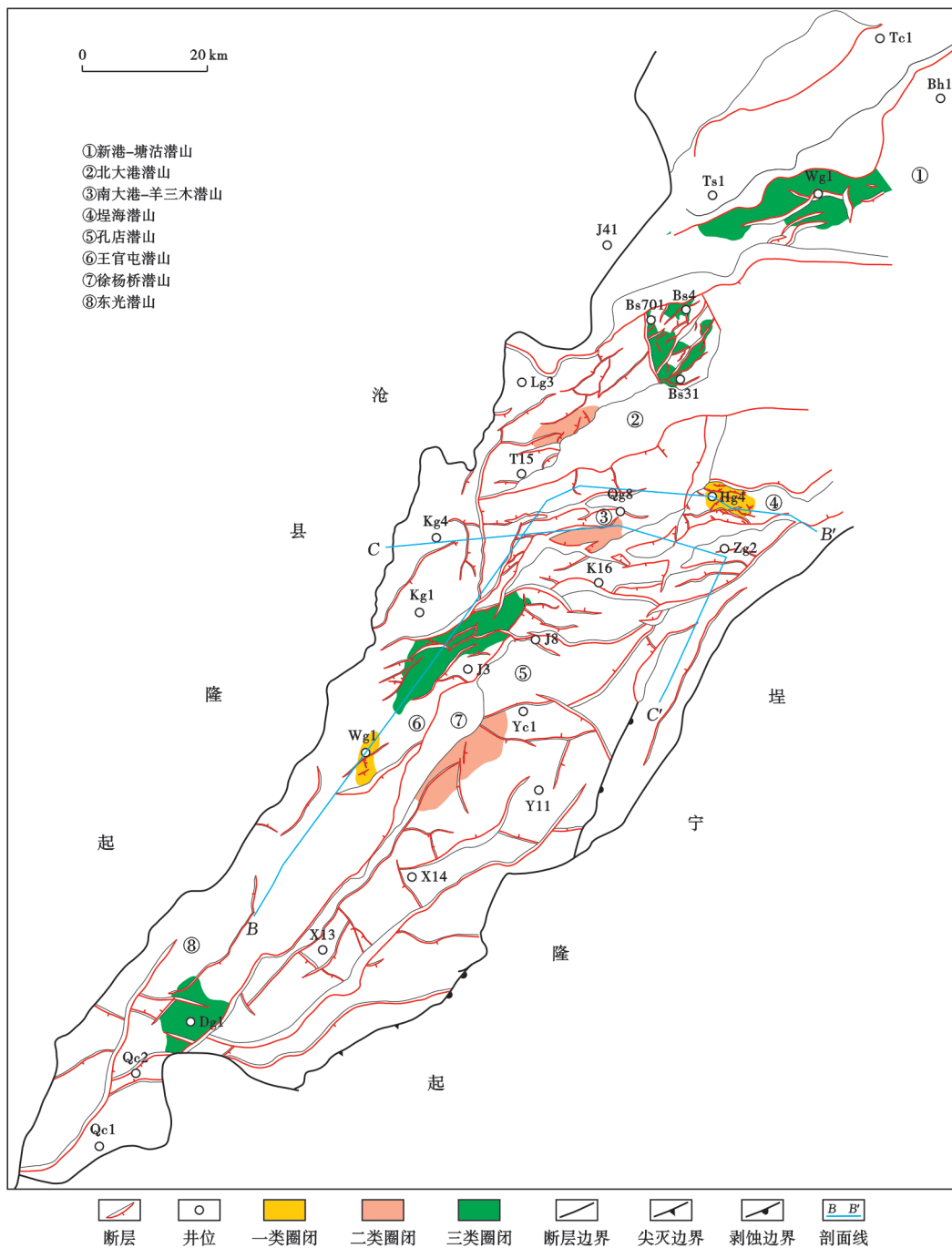


图 8 黄骅坳陷下古生界—中元古界/新元古界潜山内幕圈闭构造分布

Fig. 8 Trap structure distribution of Lower Paleozoic to Meso-Neoproterozoic buried-hills in Huanghua depression

表 3 黄骅坳陷寒武系圈闭评价

Table 3 Evaluation of Cambrian traps in Huanghua depression

区带名称	潜山名称	地层	圈闭形态	圈闭面积/ km ²	与烃源岩对接关系	断裂晚期 活动性	圈闭评价 类别
北部 潜山区	埕海潜山	寒武系顶部	断背斜	32.1	与沙河街组三段对接	弱	I
	北大港潜山	寒武系顶部	断鼻	35.0	与沙河街组三段对接	较强	II
	南大港—羊三木潜山	寒武系顶部	断鼻	35.6	与沙河街组三段对接	较强	II
	新港—塘沽潜山	寒武系顶部	断鼻	45.4	与沙河街组三段对接	较强	III
南部 潜山区	孔店潜山	寒武系顶部	背斜	76.3	与石炭系对接	较强	III
	王官屯潜山	寒武系顶部	背斜	24.7	与石炭系对接	弱	I
	徐杨桥潜山	寒武系顶部	断鼻	25.3	与孔店组二段对接	弱	II
	东光潜山	寒武系顶部	断鼻	20.5	无对接	较强	III

(2) 继承性发育多套内幕白云岩储层

黄骅拗陷下古生界—中元古界/新元古界发育奥陶系亮甲山组、寒武系府君山组、蓟县系雾迷山组 3 套有利白云岩储层。

奥陶系亮甲山组为在区域性云坪—云灰坪沉积环境下形成的广泛分布的原生沉积型白云岩储层^[37,44-45],与上覆下马家沟组泥质灰岩可形成一套良好的储-盖组合。黄骅拗陷亮甲山组白云岩沉积的厚度达 80~120 m,岩性主要为细晶、粉晶白云岩,发育微裂缝、晶间孔和溶蚀孔洞等储集空间[图 4(i)—图 4(l)],总体表现为孔隙-裂缝型储层。Qt2 井亮甲山组的孔隙度平均为 4.7%;Tg1 井壁心的实测孔隙度为 6.4%,渗透率为 0.15 mD。

下寒武统府君山组沉积期,大港探区处于华北海东部台地区,广泛发育云坪相,控制了白云岩的分布,与上覆徐庄组为一套良好的储-盖组合。探井揭示,大港探区府君山组白云岩的厚度为 10~60 m,其中,Tg1 井钻

遇府君山组白云岩的厚度为 35 m,溶蚀孔及裂缝发育,壁心的实测孔隙度为 8.2%,渗透率为 0.11 mD。

中元古界蓟县系雾迷山组与其上覆洪水庄组为一套良好的储-盖组合。Tg1 井蓟县系雾迷山组的钻揭厚度为 897 m,岩性为硅质白云岩,有效孔隙度为 1.2%~3.4%,渗透率为 0.13~0.46 mD。

(3) 古近系烃源岩和煤系烃源岩双源供烃

下古生界—中元古界/新元古界潜山群的供烃受古近系烃源岩和煤系烃源岩控制,大型边界断层是油气充注的良好通道。歧口凹陷潜山区油气藏主要受控于古近系含油气系统,埕海潜山、北大港潜山、南大港—羊三木潜山、新港—塘沽潜山均通过边界断裂与沙三段烃源岩对接(图 9),油气源充沛,有利于油气规模运聚;沧东凹陷潜山区油气藏主要受控于上古生界煤系含油气系统,孔店潜山、王官屯潜山通过边界断裂与石炭系—二叠系烃源岩侧向对接,有利于形成煤成天然气藏。

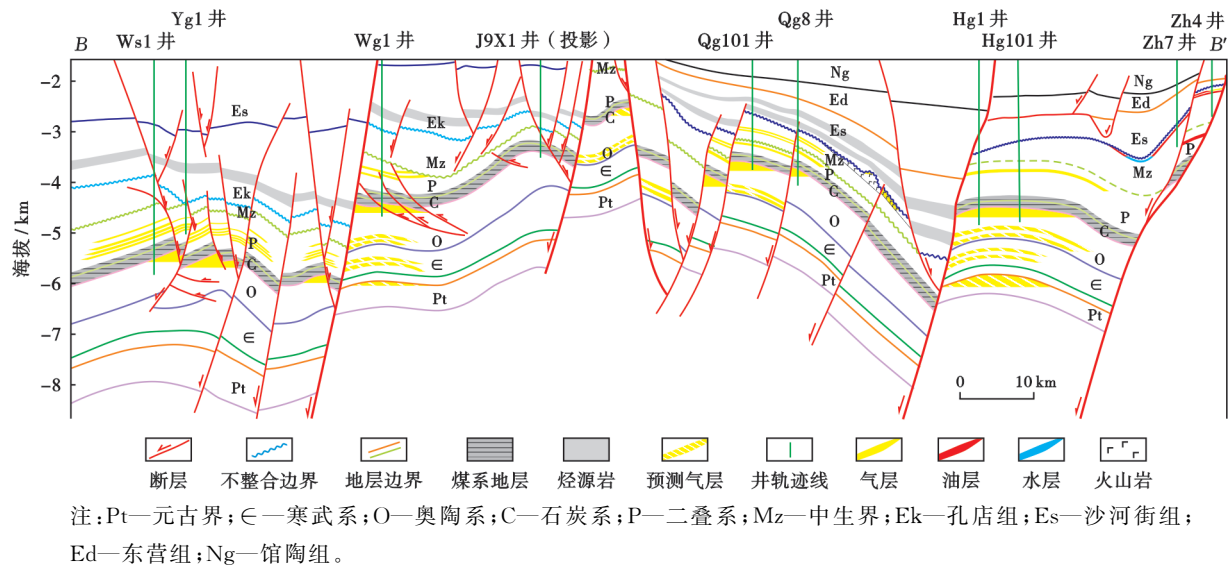


图 9 黄骅拗陷下古生界—中元古界/新元古界潜山成藏模式(剖面位置见图 8)

Fig. 9 Accumulation pattern of Lower Paleozoic to Meso-Neoproterozoic buried-hill in Huanghua depression

4.2.3 勘探潜力

根据圈闭形态、圈闭面积、与烃源岩的对接关系、断裂晚期活动性等要素,针对黄骅拗陷下古生界—中元古界/新元古界潜山圈闭进行评价(表 2),结果表明黄骅拗陷潜山圈闭有 5 个有利区,其中, I 类潜山圈闭有 2 个、II 类潜山圈闭有 3 个。2 个 I 类潜山圈闭中,埕海潜山和王官屯潜山的下古生界—中元古界/新元古界均发育大型完整背斜构造,亮甲山组、府君山组、雾迷山组 3 套有利储-盖组合呈继承性发育,与古近系烃源岩或煤系烃源岩侧向对接,供烃条件好,勘探潜力大。

(1) 埕海潜山

埕海潜山位于歧口凹陷主生油凹陷南缘,潜山内

幕发育奥陶系下马家沟组和亮甲山组、寒武系府君山组背斜构造圈闭,其 EW 向表现为大型宽缓背斜构造,SN 向受张东断层与 Hg101 井断层控制,发育地垒构造。石炭系从北、西、南 3 个方向向潜山供烃,水平方向的有效供烃窗口范围在 2.3~19.0 km;古近系沙河街组向潜山西侧供烃,水平方向的有效供烃窗口范围在 3.5 km。埕海潜山合计圈闭面积为 72.5 km²,资源量达 408.5 × 10⁸ m³。

(2) 王官屯潜山

王官屯潜山位于孔南地区石炭系生烃中心,其 SN 向为一个依附于孔东断层的大型断背斜构造。潜山内幕具有良好的继承性,发育奥陶系峰峰组、马家沟

组、亮甲山组,以及寒武系府君山组、蓟县系雾迷山组储层,合计圈闭面积为 97.1 km²。王官屯潜山部署的 Wg1 井在峰峰组、马家沟组获得高产气流,同位素资料证实气源来自煤系地层,预测潜山内幕的奥陶系马家沟组—亮甲山组、寒武系府君山组和蓟县系雾迷山组具有形成规模气藏的可能性。王官屯潜山预测圈闭资源量为 547.1 × 10⁸ m³。

4.3 页岩油

4.3.1 勘探现状

大港探区发育孔二段(包括 C1—C7“甜点层”)、沙三段(包括 C1—C6“甜点层”)和沙一段下亚段(包括“上甜点层”和“下甜点层”)3 套主力生烃层系,纵向上发育 15 个“甜点层”,“甜点层”的叠合面积为 1 800 km²、厚度为 200~500 m。目前,孔二段 C1、C3“甜点层”^[46],沙三段 C1“甜点层”^[33]和歧口凹陷沙一段下亚段“下甜点层”^[29]已取得页岩油勘探突破。

4.3.2 有利成藏条件分析

(1) 近物源沉积和中—高成熟度页岩储层的脆性条件好

沧东凹陷孔二段发育乌马营、叶三拔、舍女寺等 10 个环湖碎屑物源体系^[47];歧口凹陷古近系发育燕山、沧县隆起和埕宁隆起 3 大坳陷外物源和港西凸起、孔店—羊三木凸起等多个坳陷内物源^[48],坳陷内滨/浅湖区以(扇)三角洲沉积为主,半深湖—深湖区发育细粒沉积。古近纪,受多物源、断陷成因古地理环境和气候等条件控制,坳陷内频繁发生湖退、湖进,陆源长英质碎屑(含量一般在 20%~42%)、黏土矿物(含量一般在 16%~29%)和生物化学成因碳酸盐(含量一般在 26%~39%)发育,形成了纹层型互层、混合沉积和夹层状结构,陆源碎屑和碳酸盐矿物改善了储层的脆性。在成岩演化过程中,沧东凹陷孔二段黏土矿物的方沸石化^[49]、歧口凹陷沙河街组蒙脱石的伊利石化^[27,29]降低了储层的水敏性,适合后期大规模体积压裂改造,形成人造油藏。

(2) 高频旋回结构的源-储匹配关系好

复杂断陷湖盆中的页岩在毫米—微米级尺度下可见纹层结构较发育^[18]。孔二段以发育厚度小于 2 mm 的微米级薄纹层为主,沙三段以发育厚度在 2~10 mm 的中—厚纹层为主,沙一段下亚段以发育厚度小于 1 mm 的微米级纹层为主。微观扫描电镜观察+元素能谱分析表明,页岩层段存在富有机质纹层、富长英质纹层、富灰质/白云质纹层和混合质纹层 4 类纹层。应用全息扫描荧光技术+微钻(针对 2 mm 纹层)技术对不同纹层开展的含油性分析表明,长英质纹层、碳酸盐纹层的含油量高于富有机质纹层,其中,长英质纹层的含油量

可达 27.1 mg/g,富有机质纹层的含油量为 6.3 mg/g。CT 扫描、核磁共振实验分析结果显示:在长英质纹层的页岩中,孔隙发育、连通性好、可动流体饱和度高(46.7%)、易于烃类渗流;混合质纹层页岩的孔渗性居中,灰质/白云质纹层页岩的孔渗性次之。页岩中富有机质纹层与长英质矿物纹层呈高频互层。有机质在热作用下生成烃,大部分烃类运移并富集在邻近长英质矿物纹层中,部分烃类滞留于同层的无机、有机纳米孔隙中。页岩油在厘米—毫米级甚至微米级不同纹层间呈“源-储”耦合富集。

(3) 中等成熟度高丰度有机质页岩中滞留烃含量高

环湖物源在为湖盆输入腐殖型有机质的同时,也携带了丰富的营养物质,促使生物勃发、形成腐泥型有机质,这导致湖相细粒沉积岩中有机质类型多样。沧东凹陷孔二段的有机质类型以 I、II₁ 型为主,TOC 含量为 4%~6%。歧口凹陷沙三段 1 亚段的有机质类型以 II₁ 和 II₂ 型为主,TOC 含量为 2%~3%;沙一段下亚段的有机质类型以 I 型为主,TOC 含量为 2%~5%。多类型的有机质及高丰度为页岩油的形成提供了充足的物质基础。孔二段低成熟页岩(R_o 为 0.3%、TOC 含量为 5.24%)的热压模拟实验结果表明,在中等热演化阶段(R_o 为 0.7%~1.2%),页岩中滞留的可动烃含量较高,占整个生烃量的 20%~60%,是页岩油富集的最有利区间。勘探开发实践表明,将水平井按千米水平段折算,180 d 内平均页岩油产油量 > 20 t/d 的钻井,其目的层的 R_o 主要分布在 0.8%~1.1%,这为页岩油勘探有利区间的分析提供了佐证。

4.3.3 勘探潜力

(1) 纹层型页岩

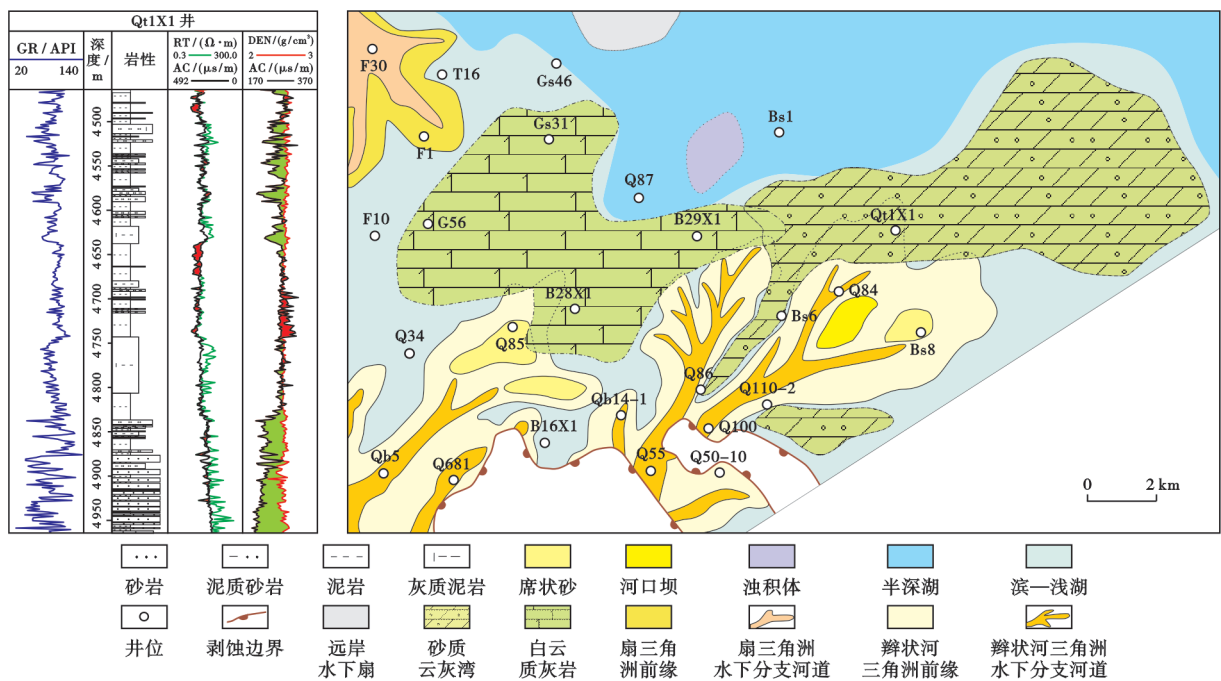
纹层型页岩油具有连续分布的特征。页岩层系在进入生烃门限后表现为整体含油,勘探阶段选择厚度为 30~40 m 的“甜点箱体”实施水平井钻探,但人工体积压裂改造后的单井 EUR 一般小于 2 × 10⁴ t,需进一步提高单井产量才能实现效益开发。GD1702H 井的产液剖面测试结果显示,该井水平段内的纹层状长英质页岩占 40%,其对该井产量贡献率达 75%^[21],因而纹层状长英质页岩是页岩油的主要产层。GY5-1-9 井聚焦 GD1702H 井控制的 C1“甜点层”③小层中 8~10 m 厚的箱体实施水平井钻探,压裂改造后的单井 EUR 提高至 3 × 10⁴ t。为进一步提高产量,GY5-1-3 井、GY5-1-4 井和 GY5-1-5 井针对 C1“甜点层”③小层中的箱体,通过增加水平段长度和优化压裂工艺,单井 EUR 提高至 4 × 10⁴ t,实现了效益开发。在大港探区古近系的 15 个“甜点层”中,目前已落实官东地区孔二段 C1“甜点层”③小层、C3“甜点层”⑤小层和 C5“甜点

层”小层共3个效益“甜点箱体”,落实的I类效益资源量为 1.54×10^8 t。下一步将拓展勘探其他“甜点层”,优选钻探箱体,预计可新增I类效益资源量 1.24×10^8 t,进一步夯实页岩油资源。

(2) 混积型页岩

歧北斜坡沙三段发育一套典型湖相深灰色块状细粒混合沉积岩,垂向厚度为80~100m,平面分布面积

为 66 km^2 (图10),岩性以砂质泥晶灰岩、泥晶—粉晶灰岩、泥晶灰岩和泥晶粒屑白云岩为主,块状结构,矿物成分以陆源长石、石英碎屑和生物化学成因碳酸盐为主,黏土矿物含量一般 $<20\%$,储层脆性条件好。下一步将借鉴页岩油水平井大规模体积压裂提产的思路,针对该区部署实施水平井勘探,预计新增页岩油资源量为 9700×10^4 t。



注:GR—自然伽马;RT—电阻率;AC—声波时差;DEN—补偿密度。

图10 歧北斜坡区沙三段细粒混合沉积岩的分布特征

Fig. 10 Distribution characteristics of fine-grained mixed sedimentary rocks in the Member 3 of Shahejie Formation, Qibei slope area

4.4 深部煤层气

4.4.1 研究背景

渤海湾盆地和鄂尔多斯盆地同处华北地台,其上古生界具有相似的成煤背景。目前,鄂尔多斯盆地已实现深部煤层气勘探突破^[50],而渤海湾盆地黄骅拗陷的石炭系煤层分布广,煤层普遍进入二次生烃阶段、生气量大,是深部煤层气勘探的有利地区,但目前还未展开勘探。

4.4.2 有利成藏条件

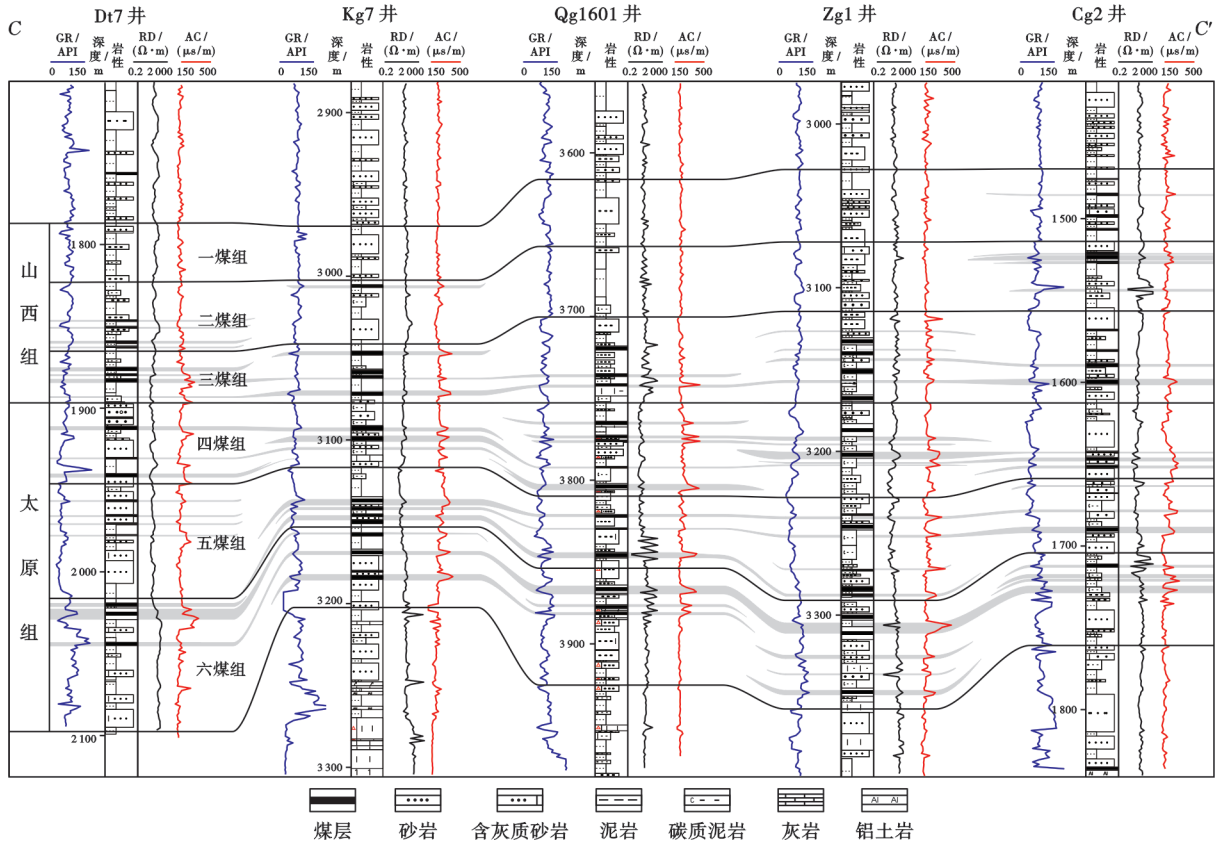
(1) 上古生界煤层分布广、累计厚度大

目前,黄骅拗陷共有115口井钻遇上古生界煤层,分布面积约为 12000 km^2 ,发育埕海、乌马营—沧南两大聚煤带,纵向上揭示了太原组、山西组两套含煤层系,可划分为6个煤组(图11),煤层总厚度为15~36m。其中,太原组四煤组—六煤组是深部煤层气的主力勘探层系。北部埕海聚煤带山西组—太原组煤层的累计厚度为26~32m,其中,太原组六煤组横向分布稳定,单

煤层的最大厚度为6.2m;南部乌马营—沧南聚煤带煤层的累计厚度为15~27m,太原组四煤组和六煤组煤层分布稳定,单煤层的最大厚度为5.9m。

(2) 煤层品质好、演化程度高

上古生界煤层形成于咸化还原环境;有机质类型以 II_2 — III 型为主,部分为 II_1 — I 型;煤层的显微组分以镜质组为主(68.45%~85.82%),含少量壳质组(1.94%~2.13%),与鄂尔多斯盆地相当;具有较强的生气潜力和吸附能力(表4)。上古生界煤层的TOC含量平均为56.5%,生烃潜量($S_1 + S_2$)平均为107.2 mg/g,氯仿沥青“A”含量平均为0.9825 mg/g,总烃量为 $(134 \sim 856) \times 10^{-6}$,具有高TOC含量、高生烃潜量等特征,评价为好—极好烃源岩。受中生代晚期构造抬升及新生代快速断陷活动影响,上古生界煤层存在二次规模生气过程,其 R_o 一般为0.7%~1.3%,局部地区受中生代—新生代火成岩热烘烤作用影响,烃源岩热演化程度高, R_o 可达2.0%以上。



注:GR—自然伽马;RD—电阻率;AC—声波时差。

图 11 黄骅坳陷上古生界煤层分布及重点井对比(剖面位置见图 8)

Fig. 11 Distribution of Upper Paleozoic coal seams and correlation of key wells in Huanghua depression

表 4 渤海湾盆地与鄂尔多斯盆地煤层组分对比

Table 4 Comparison of coal seam composition between Bohai Bay Basin and Ordos Basin

盆地	区块	镜质组/%	惰质组/%	壳质组/%	矿物质/%
渤海湾	黄骅	68.45~85.82	2.50~28.79	1.94~2.13	0.42~3.60
	冀中	72.63~81.00	7.54~21.60	0.80~13.64	1.20~6.80
	保德	67.30	9.50	21.30	1.90
鄂尔多斯	大宁—吉县	43.70~86.80	11.20~40.40		10.60~32.00
	韩城	46.47~87.54	6.54~35.21		1.15~18.32
	柳林	77.30~77.70	17.80~21.20	<1.00	
	临兴—神府	52.90~86.20	8.80~37.60	0.80~12.00	0.80~12.00
	石楼南	74.90~84.90	15.10~25.20		6.20~22.80

(3) 太原组煤层中孔隙发育,煤-泥组合有利于煤层气保存

岩心观察和扫描电镜观测显示,大港探区太原组煤层的煤体结构好,微裂缝、基质孔、割理、植物组织孔、溶蚀孔和气孔发育;Gg1607 井太原组煤层的埋深为 2330~2400 m,煤层厚度为 29.6 m/18 层,核磁共振测井结果显示双峰特征,小孔发育,孔隙度为 11%~13%。Qg101 井太原组煤层的埋深为 3530~3775 m,累计厚度为 22.7 m/12 层,电成像测井显示煤层中孔隙和缝洞发育,计算的有效孔隙度为 9.1%~10.4%。

较浅埋深煤的孔隙形态以开放性透气孔及半封闭透气孔为主,大孔隙发育,中孔部分发育,有利于煤储层中流体流动,孔径 > 50 nm 的大孔的体积占比平均为 85%。

黄骅坳陷煤层与盖层的组合存在煤泥、煤灰、煤砂 3 种组合类型(图 12),以煤泥组合为主。煤泥组合主要发育于潟湖泥炭坪,煤层的顶板以泥岩、泥质岩为主,底板以泥岩、粉砂岩为主,地震相以强振幅中频、连续性好为主要特征。煤泥组合分布广泛,保存条件较好;煤灰组合和煤砂组合分布范围小,保存条件较差。

组合类型	岩性组合典型剖面	沉积亚相	岩性组合	顶板厚度	底板厚度	地球物理特征	分布特征
煤泥组合		潟湖泥炭坪	顶板: 泥岩为主 底板: 以泥岩、粉砂岩	泥岩 2~30 m	1~15 mm	强振幅中频、连续性较好	广泛分布
煤灰组合		局限台地	顶板: 灰岩为主 底板: 粉砂岩、泥岩	灰岩 1~15 m	1~4 m	弱振幅低频、连续性差	局部
煤砂组合		障壁岛砂坝	顶板: 中砂岩、粉砂岩为主 底板: 泥岩、粉砂岩	砂岩 2~15 m	2~20 m	强振幅高频、连续性较好	局部

煤层 砂岩 含灰质砂岩 泥岩 碳质泥岩

图 12 大港探区上古生界煤层及其顶、底板组合

Fig. 12 Combination of Upper Paleozoic coal seams with their roof and floor in Dagang exploration area

4.4.3 勘探潜力

上古生界煤层埋深差异大。当埋深小于 2 000 m 时,煤层处于风化-降解带,受风化淋滤作用及生物降解作用影响,含气量较低;当埋深为 2 000~3 000 m 时,煤层以吸附气为主;当埋深大于 3 000 m 时,煤层具

有“超饱和”含气特征,游离气占比大幅度提升,此时具有构造成藏的特征(图 13)。上古生界煤层气的资源总量估算可达 $1.75 \times 10^{12} \text{ m}^3$,其中,在 3 000 m 以浅,以吸附气为主,资源量为 $6\ 245 \times 10^8 \text{ m}^3$,3 000 m 以深,煤层吸附气与游离气并存,资源量为 $1.12 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。

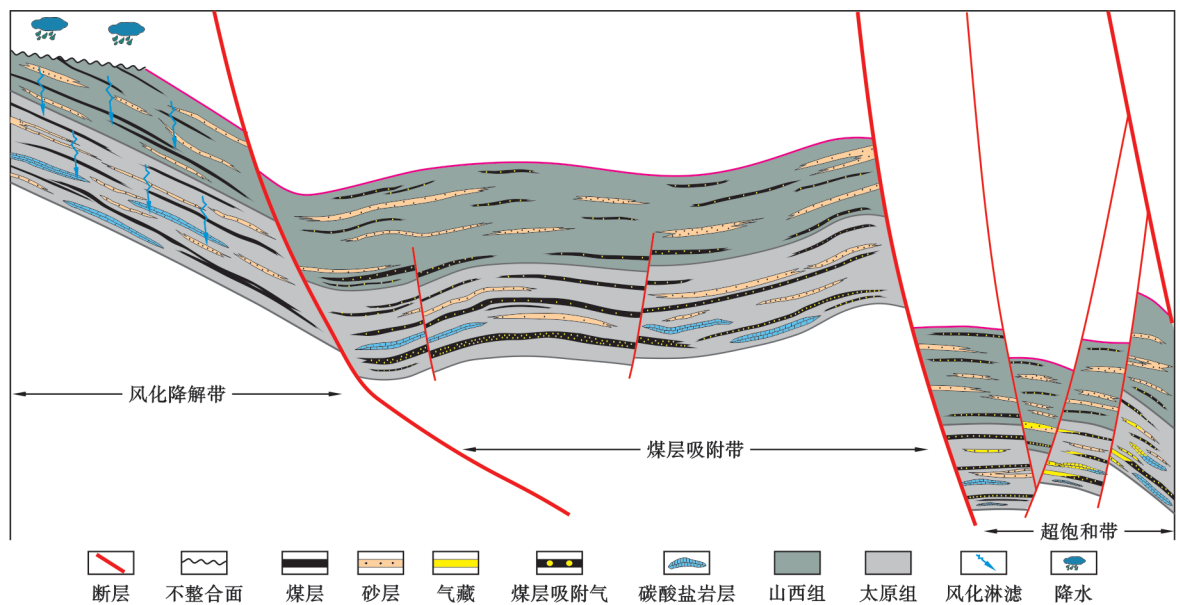


图 13 大港探区深部煤层气发育模式

Fig. 13 Development model of deep coalbed methane in Dagang exploration area

孔西一歧北地区、埕海一歧南地区、王官屯—乌马营地区、徐黑—盐山地区位于煤层二次生气中心,煤层埋深超过 3 000 m,存在 16 个有利勘探靶区,面积达 539 km²,煤层气的总资源量为 1.12 × 10¹² m³,其中,王官屯—乌马营地区的埋深适中(3 500~4 000 m)、资源量最大(4 424 × 10⁸ m³),是首选勘探靶区。

5 结 论

(1) 黄骅坳陷古近系深凹区发育大型砂岩体,受储层长石含量高且易溶蚀、异常高压保孔、油气早期充注等因素影响,4 000 m 以深仍可发育有效储集层,与深凹区良好的烃源岩构成源-储配置,形成大面积分布的岩性油气藏。

(2) 黄骅坳陷下古生界—中元古界/新元古界潜山内幕存在继承性发育的大型背斜圈闭,发育多套白云岩储层,其与古近系和石炭系烃源岩侧向对接,具有良好的天然气藏勘探潜力。

(3) 黄骅坳陷古近系孔二段、沙三段和沙一段下亚段 3 套主力生烃层系均具备页岩油富集条件;受近物源供给条件控制,储层脆性条件相对较好,在中等成熟高丰度有机质页岩中滞留烃含量高,纹层型页岩和混积型页岩的页岩油勘探潜力大。

(4) 黄骅坳陷上古生界煤层分布面积广、厚度大、品质优,普遍进入二次生烃阶段,生气量大,同时,煤层中孔隙发育,煤泥组合有利于煤层气保存,是下一步天然气勘探的重要新领域。

(5) 黄骅坳陷古近系深凹区、潜山内幕、页岩油、煤层气 4 个领域合计的石油资源量为 5.6 × 10⁸ t,天然气资源量为 1 397 × 10⁸ m³,对于老油田的可持续发展具有重要作用,值得进一步探索。

参 考 文 献

- [1] 大港油田石油地质编辑委员会. 中国石油地质志(卷四):大港油田[M]. 北京:石油工业出版社,1991.
Editorial Board of Petroleum Geology of Dagang Oilfield. Petroleum geology of China (Volume 4):Dagang oilfield[M]. Beijing: Petroleum Industry Press,1991.
- [2] 李丕龙. 陆相断陷盆地油气地质与勘探(卷四):陆相断陷盆地油气成藏组合[M]. 北京:石油工业出版社,2003.
LI Pilong. Petroleum geology and exploration of continental fault basin (Vol 4): Hydrocarbon accumulations of continental fault basins[M]. Beijing: Petroleum Industry Press,2003.
- [3] 赵贤正,金凤鸣,李玉帮,等. 断陷盆地斜坡带类型与油气运聚成藏机制[J]. 石油勘探与开发,2016,43(6):841-849.
ZHAO Xianzheng, JIN Fengming, LI Yubang, et al. Slope belt types and hydrocarbon migration and accumulation mechanisms in rift basins[J]. Petroleum Exploration and Development,2016,43(6):841-849.
- [4] 胡见义,徐树宝,童晓光. 渤海湾盆地复式油气聚集区(带)的形成和分布[J]. 石油勘探与开发,1986,13(1):1-8.
HU Jianyi, XU Shubao, TONG Xiaoguang. Formation and distribution of complex petroleum accumulation zones in Bohaiwan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development,1986,13(1):1-8.
- [5] 国建英,付立新,肖鑫,等. 黄骅坳陷大港探区高含 H₂S 天然气地球化学特征及成因[J]. 石油学报,2006,37(S2):31-38.
GUO Jianying, FU Lixin, XIAO Xin, et al. Geochemical characteristics and genesis of high-H₂S natural gas in the Dagang exploration area, Huanghua depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006,37(S2):31-38.
- [6] 蒲秀刚,吴永平,周建生,等. 歧口凹陷岩性地层油气藏特征及勘探潜力[J]. 石油学报,2007,28(2):35-39.
PU Xiugang, WU Yongping, ZHOU Jiansheng, et al. Characteristics and exploration potential of lithologic-stratigraphic hydrocarbon reservoirs in Qikou sag of Dagang oilfield[J]. Acta Petrolei Sinica,2007,28(2):35-39.
- [7] 张津宇,付立新,周建生,等. 渤海湾盆地黄骅坳陷古潜山的宏观展布特征与演化过程[J]. 地质学报,2019,93(3):585-596.
ZHANG Jinying, FU Lixin, ZHOU Jiansheng, et al. Macroscopic distribution characteristics and evolution process of buried hill in the Huanghua depression, Bohai Bay Basin[J]. Acta Geologica Sinica,2019,93(3):585-596.
- [8] 吴永平,付立新,杨池银,等. 黄骅坳陷中生代构造演化对潜山油气成藏的影响[J]. 石油学报,2002,23(2):16-21.
WU Yongping, FU Lixin, YANG Chiyin, et al. Effect of Mesozoic tectonic evolution on hydrocarbon accumulation in buried hills in Huanghua depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 2002,23(2):16-21.
- [9] 李三忠,索艳慧,郭玲莉,等. 渤海湾盆地大歧口凹陷变换构造与板内变形差异[J]. 海洋地质与第四纪地质,2017,37(4):98-109.
LI Sanzhong, SUO Yanhui, GUO Lingli, et al. Transfer zones and differences in intra-plate deformation in great Qikou sag of the Bohai Bay Basin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2017,37(4):98-109.
- [10] 李三忠,索艳慧,周立宏,等. 华北克拉通内部的拉分盆地:渤海湾盆地黄骅坳陷结构构造与演化[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2011,41(5):1362-1379.
LI Sanzhong, SUO Yanhui, ZHOU Lihong, et al. Pull-apart basins within the North China craton: structural pattern and evolution of Huanghua depression in Bohai Bay Basin[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition,2011,41(5):1362-1379.
- [11] 王海潮,王余泉,秦云龙,等. 渤海湾盆地沉积斜坡及其含油气性[J]. 地质力学学报,2006,12(1):23-30.
WANG Haichao, WANG Yuquan, QIN Yunlong, et al. Sedimentary slopes of the Bohai Gulf Basin and their oil potential[J]. Journal of Geomechanics,2006,12(1):23-30.
- [12] 周立宏,韩国猛,董越崎,等. 渤海湾盆地歧口凹陷滨海断断-砂组合模式与油气成藏[J]. 石油勘探与开发,2019,46(5):869-882.
ZHOU Lihong, HAN Guomeng, DONG Yueqi, et al. Fault-sand combination modes and hydrocarbon accumulation in Binhai fault

- nose of Qikou sag, Bohai Bay Basin, East China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(5): 869-882.
- [13] 赵贤正, 蒲秀刚, 王家豪, 等. 断陷盆地缓坡区控砂控藏机制与勘探发现——以歧口凹陷歧北缓坡带为例[J]. *石油学报*, 2017, 38(7): 729-739.
ZHAO Xianzheng, PU Xiugang, WANG Jiahao, et al. Sand and reservoir controlling mechanism and exploration discovery in the gentle slope of fault basin; a case study of Qibei slope in Qikou sag[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38(7): 729-739.
- [14] 国建英, 周立宏, 李剑, 等. 黄骅坳陷乌马营潜山天然气地球化学特征及差异聚集[J]. *石油学报*, 2021, 42(08): 1039-1052.
GUO Jianying, ZHOU Lihong, LI Jian, et al. Geochemical characteristics and differential accumulation of natural gas in Wumaying buried-hill, Huanghua depression[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(08): 1039-1052.
- [15] 肖敦清, 姜文亚, 蒲秀刚, 等. 渤海湾盆地歧口凹陷中深层天然气成藏条件与资源潜力[J]. *天然气地球科学*, 2018, 29(10): 1409-1421.
XIAO Dunqing, JIANG Wenya, PU Xiugang, et al. Natural gas formation conditions and resource potential in mid-deep strata of the Qikou sag, Bohai Bay Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2018, 29(10): 1409-1421.
- [16] 付立新, 吴雪松, 赵敏, 等. 歧口凹陷埋海潜山地质构造及奥陶系天然气成藏特点[J]. *东北石油大学学报*, 2013, 37(5): 63-72.
FU Lixin, WU Xuesong, ZHAO Min, et al. Structural geology and gas accumulation in Ordovician reservoir in Chenghai buried-hill in Qikou sag[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2013, 37(5): 63-72.
- [17] 吴永平, 杨池银, 付立新, 等. 中国海相油气田勘探实例之九: 渤海湾盆地千米桥凝析油气田的勘探与发现[J]. *海相油气地质*, 2007, 12(3): 44-52.
WU Yongping, YANG Chiyin, FU Lixin, et al. Case of discovery and exploration of marine fields in China (part 9): Qianmiqiao Ordovician condensate field in Bohaiwan Basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2007, 12(3): 44-52.
- [18] 赵贤正, 李宏军, 付立新, 等. 渤海湾盆地黄骅坳陷古生界煤成凝析气藏特征、主控因素与发育模式[J]. *石油学报*, 2021, 42(12): 1592-1604.
ZHAO Xianzheng, LI Hongjun, FU Lixin, et al. Characteristics, main controlling factors and development mode of Paleozoic coal-formed condensate gas reservoirs in Huanghua depression, Bohai Bay Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(12): 1592-1604.
- [19] 金凤鸣, 王鑫, 李宏军, 等. 渤海湾盆地黄骅坳陷乌马营潜山内幕原生油气藏形成特征[J]. *石油勘探与开发*, 2019, 46(3): 521-529.
JIN Fengming, WANG Xin, LI Hongjun, et al. Formation of the primary petroleum reservoir in Wumaying inner buried-hill of Huanghua depression, Bohai Bay Basin, China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(3): 521-529.
- [20] 周立宏, 王鑫, 付立新, 等. 黄骅坳陷乌马营潜山二叠系砂岩凝析气藏的发现及其地质意义[J]. *中国石油勘探*, 2019, 24(4): 431-438.
ZHOU Lihong, WANG Xin, FU Lixin, et al. Discovery and geological significance of the Permian sandstone condensate gas reservoir in Wumaying buried hill, Huanghua depression[J]. *China Petroleum Exploration*, 2019, 24(4): 431-438.
- [21] 赵贤正, 周立宏, 蒲秀刚, 等. 断陷盆地洼槽聚油理论的发展与勘探实践——以渤海湾盆地沧东凹陷古近系孔店组为例[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(6): 1092-1102.
ZHAO Xianzheng, ZHOU Lihong, PU Xiugang, et al. Development and exploration practice of the concept of hydrocarbon accumulation in rifted-basin troughs; a case study of Paleogene Kongdian Formation in Cangdong sag, Bohai Bay Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(6): 1092-1102.
- [22] 赵贤正, 周立宏, 蒲秀刚, 等. 陆相湖盆页岩层系基本地质特征与页岩油勘探突破——以渤海湾盆地沧东凹陷古近系孔店组二段一亚段为例[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(3): 361-372.
ZHAO Xianzheng, ZHOU Lihong, PU Xiugang, et al. Geological characteristics of shale rock system and shale oil exploration in a lacustrine basin; a case study from the Paleogene 1st sub-member of Kong 2 Member in Cangdong sag, Bohai Bay Basin, China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(3): 361-372.
- [23] 周立宏, 赵贤正, 柴公权, 等. 陆相页岩油效益勘探开发关键技术与工程实践——以渤海湾盆地沧东凹陷古近系孔二段为例[J]. *石油勘探与开发*, 2020, 47(5): 1059-1066.
ZHOU Lihong, ZHAO Xianzheng, CHAI Gongquan, et al. Key exploration & development technologies and engineering practice of continental shale oil; a case study of Member 2 of Paleogene Kongdian Formation in Cangdong sag, Bohai Bay Basin, East China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(5): 1059-1066.
- [24] 周立宏, 蒲秀刚, 陈长伟, 等. 陆相湖盆细粒岩油气的概念、特征及勘探意义: 以渤海湾盆地沧东凹陷孔二段为例[J]. *地球科学*, 2018, 43(10): 3625-3639.
ZHOU Lihong, PU Xiugang, CHEN Changwei, et al. Concept, characteristics and prospecting significance of fine-grained sedimentary oil gas in terrestrial lake basin; a case from the second member of Paleogene Kongdian Formation of Cangdong sag, Bohai Bay Basin[J]. *Earth Science*, 2018, 43(10): 3625-3639.
- [25] 赵贤正, 蒲秀刚, 周立宏, 等. 深盆湖相区页岩油富集理论、勘探技术及前景——以渤海湾盆地黄骅坳陷古近系为例[J]. *石油学报*, 2021, 42(2): 143-162.
ZHAO Xianzheng, PU Xiugang, ZHOU Lihong, et al. Enrichment theory, exploration technology and prospects of shale oil in lacustrine facies zone of deep basin; a case study of the Paleogene in Huanghua depression, Bohai Bay Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(2): 143-162.
- [26] 吴永平, 于学敏. 黄骅坳陷天然气资源潜力与勘探开发对策[J]. *天然气地球科学*, 2003, 14(4): 235-239.
WU Yongping, YU Xuemin. Natural gas resource potential and the strategy of exploration and development in Huanghua depression[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2003, 14(4): 235-239.
- [27] 周立宏, 韩国猛, 杨飞, 等. 渤海湾盆地歧口凹陷沙河街组三段一亚段地质特征与页岩油勘探实践[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(2): 443-455.
ZHOU Lihong, HAN Guomeng, YANG Fei, et al. Geological characteristics and shale oil exploration of Es₃(1) in Qikou sag, Bohai Bay Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(2): 443-455.
- [28] 周立宏, 陈长伟, 韩国猛, 等. 渤海湾盆地歧口凹陷沙一下亚段地质

- 特征与页岩油勘探潜力[J]. 地球科学, 2019, 44(8): 2736-2750.
- ZHOU Lihong, CHEN Changwei, HAN Guomeng, et al. Geological characteristics and shale oil exploration potential of lower first Member of Shahejie Formation in Qikou sag, Bohai Bay Basin[J]. Earth Science, 2019, 44(8): 2736-2750.
- [29] 周立宏, 何海清, 郭绪杰, 等. 渤海湾盆地歧口凹陷古近系沙一下亚段中等成熟页岩油富集主控因素与勘探突破[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(5): 1073-1086.
- ZHOU Lihong, HE Haiqing, GUO Xujie, et al. Main factors controlling the medium-mature shale oil enrichment and exploration breakthrough in the Paleogene lower E₃S₁^L in Qikou sag, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(5): 1073-1086.
- [30] 龚训, 王延斌, 于赟. 渤海湾盆地黄骅坳陷上古生界煤系烃源岩地球化学特征及生烃特性——以大港探区为例[J]. 天然气地球科学, 2022, 33(6): 1013-1024.
- GONG Xun, WANG Yanbin, YU Yun. Geochemical characteristics and hydrocarbon generation characteristics of Upper Paleozoic coal measures source rocks in Huanghua depression, Bohai Bay Basin: case study of Dagang exploration area[J]. Natural Gas Geoscience, 2022, 33(6): 1013-1024.
- [31] 李传明, 曾溅辉, 刘海涛, 等. 渤海湾盆地黄骅坳陷上古生界暗色泥岩地球化学特征及其发育机制[J]. 地球科学与环境学报, 2023, 45(2): 306-321.
- LI Chuanming, ZENG Jianhui, LIU Haitao, et al. Geochemical characteristics and development mechanism of Upper Paleozoic dark mudstone in Huanghua depression of Bohai Bay Basin, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2023, 45(2): 306-321.
- [32] 国建英, 齐雪宁, 侯连华, 等. 渤海湾盆地特低渗一致密砂(砾)岩天然气成因及成藏模式[J]. 天然气地球科学, 2022, 33(2): 181-194.
- GUO Jianying, QI Xuening, HOU Lianhua, et al. Origin and accumulation model of ultra-low permeability-tight sandstone (gravel) gas in Bohai Bay Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2022, 33(2): 181-194.
- [33] 蒲秀刚, 周立宏, 王文革, 等. 黄骅坳陷歧口凹陷斜坡区中深层碎屑岩储集层特征[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(1): 36-48.
- PU Xiugang, ZHOU Lihong, WANG Wen'ge, et al. Medium-deep clastic reservoirs in the slope area of Qikou sag, Huanghua depression, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(1): 36-48.
- [34] 孟凡超, 周立宏, 魏嘉怡, 等. 渤海湾盆地黄骅坳陷潜山中生界火山岩储层特征及成储机制[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2021, 52(3): 859-875.
- MENG Fanchao, ZHOU Lihong, WEI Jiayi, et al. Characteristics and formation mechanism of Mesozoic volcanic reservoirs from buried hills in Huanghua depression, Bohai Bay Basin[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2021, 52(3): 859-875.
- [35] 周立宏, 吴永平, 肖敦清, 等. 黄骅坳陷第三系火成岩与油气关系探讨[J]. 石油学报, 2000, 21(6): 29-34.
- ZHOU Lihong, WU Yongping, XIAO Dunqing, et al. Characteristics of the Tertiary igneous rocks and investigation of their relationships with hydrocarbon in Huanghua depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 2000, 21(6): 29-34.
- [36] 石彦民, 肖敦清. 黄骅坳陷枣北地区火山岩综合油藏描述[J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(1): 87-91.
- SHI Yanmin, XIAO Dunqing. The integrated reservoir description of volcanic rock in Zaobei area of Huanghua depression[J]. Petroleum Exploration and Development, 2000, 27(1): 87-91.
- [37] 崔宇, 李宏军, 付立新, 等. 歧口凹陷北大港构造带奥陶系潜山储层特征、主控因素及发育模式[J]. 石油学报, 2018, 39(11): 1241-1252.
- CUI Yu, LI Hongjun, FU Lixin, et al. Characteristics, main controlling factors and development model of Ordovician buried-hill reservoir in Beidagang structural belt, Qikou sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39(11): 1241-1252.
- [38] 周立宏, 蒲秀刚, 肖敦清, 等. 渤海湾盆地沧东凹陷孔二段页岩油形成条件及富集主控因素[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(9): 1323-1332.
- ZHOU Lihong, PU Xiugang, XIAO Dunqing, et al. Geological conditions for shale oil formation and the main controlling factors for the enrichment of the 2nd Member of Kongdian Formation in the Cangdong sag, Bohai Bay Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(9): 1323-1332.
- [39] 郭美洁, 时保宏, 董雄英, 等. 黄骅坳陷埕海斜坡古近系油气成藏条件及主控因素[J]. 岩性油气藏, 2022, 34(3): 82-92.
- GUO Meijie, SHI Baohong, DONG Xiongying, et al. Hydrocarbon accumulation conditions and main controlling factors of Paleogene in Chenghai slope, Huanghua depression[J]. Lithologic Reservoirs, 2022, 34(3): 82-92.
- [40] 韩国猛, 陈冬霞, 马建英, 等. 黄骅坳陷歧北斜坡油气成藏机制与成藏模式[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2021, 51(6): 1636-1653.
- HAN Guomeng, CHEN Dongxia, MA Jianying, et al. Hydrocarbon accumulation mechanism and accumulation model of Qibei slope in Huanghua depression[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2021, 51(6): 1636-1653.
- [41] 赵贤正, 周立宏, 肖敦清, 等. 歧口凹陷斜坡区油气成藏与勘探实践[J]. 石油学报, 2016, 37(S2): 1-9.
- ZHAO Xianzheng, ZHOU Lihong, XIAO Dunqing, et al. Hydrocarbon accumulation and exploration practice of slope area in Qikou sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(S2): 1-9.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] 袁立, 姚君波, 温宏雷, 等. 渤海及周边地区早古生代岩相古地理[J]. 海相油气地质, 2019, 24(3): 55-64.
- YUAN Li, YAO Junbo, WEN Honglei, et al. Lithofacies paleogeography of Early Paleozoic in Bohai Sea and its surrounding ar-

- eas[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2019, 24(3): 55-64.
- [45] 崔永谦,汪建国,田建章,等.华北地台中北部寒武系—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. Reservoir 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.
- [46] 周立宏,陈长伟,杨飞,等.渤海湾盆地沧东凹陷页岩油效益开发探索与突破[J]. *中国石油勘探*, 2023, 28(4): 24-33.
ZHOU Lihong, CHEN Changwei, YANG Fei, et al. Research and breakthrough of benefit shale oil development in Cangdong sag, Bohai Bay Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2023, 28(4): 24-33.
- [47] 周立宏,蒲秀刚,韩文中,等.沧东凹陷南皮斜坡孔二段沉积特征与油气勘探[J]. *成都理工大学学报:自然科学版*, 2015, 42(5): 539-545.
ZHOU Lihong, PU Xiugang, HAN Wenzhong, et al. Sedimentary characteristics and hydrocarbon exploration of Ek₂ of Nanpi slope area, Cangdong sag, Huanghua depression, North China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition*, 2015, 42(5): 539-545.
- [48] 蒲秀刚,陈长伟,柳飒,等.歧口凹陷歧北斜坡沙三段挠曲坡折体系与岩性油气藏勘探[J]. *成都理工大学学报:自然科学版*, 2011, 38(6): 611-618.
PU Xiugang, CHEN Changwei, LIU Sa, et al. Lithologic reservoir exploration of Es₃ flexure slope break systems in Qibei slope of Qikou sag, Bohai Bay, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition*, 2011, 38(6): 611-618.
- [49] 韩国猛,王丽,肖敦清,等.渤海湾盆地枣园油田古近系孔店组沸石矿物的岩浆热液成因[J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48(5): 950-961.
HAN Guomeng, WANG Li, XIAO Dunqing, et al. Magmatic hydrothermal fluid genesis of zeolite in the Paleogene Kongdian Formation of Zaoyuan oilfield, Bohai Bay Basin, China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(5): 950-961.
- [50] 牛小兵,赵伟波,史云鹤,等.鄂尔多斯盆地本溪组天然气成藏条件及勘探潜力[J]. *石油学报*, 2023, 44(8): 1240-1257.
NIU Xiaobing, ZHAO Weibo, SHI Yunhe, et al. Natural gas accumulation conditions and exploration potential of Benxi Formation in Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(8): 1240-1257.

(收稿日期 2023-07-31 改回日期 2023-10-16 编辑 雷永良)

(上接第 2103 页)

- [34] 张帆,冀晓珊,吴玉明,等.松辽盆地北部深层天然气多层位成藏要素耦合度研究与有利区带预测[J]. *世界地质*, 2022, 41(4): 815-825.
ZHANG Fan, JI Xiaoshan, WU Yuming, et al. Study on coupling degree of multi-layer accumulation key factors and prediction of favorable zones of deep natural gas in northern Songliao Basin [J]. *World Geology*, 2022, 41(4): 815-825.
- [35] 刘超,付晓飞,李扬成,等.松辽盆地北部双城地区白垩系营城组—登娄库组石油勘探突破及地质意义[J]. *石油勘探与开发*, 2023, 50(1): 65-76.
LIU Chao, FU Xiaofei, LI Yangcheng, et al. Petroleum exploration breakthrough and geological significance in Cretaceous Yingcheng and Denglouku formations of Shuangcheng area, northern Songliao Basin, NE China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2023, 50(1): 65-76.
- [36] 贾雨华.松辽盆地深部中央隆起带发育特征与成藏条件分析[D].长春:吉林大学,2018.
JIA Yuhua. Developmental characteristics and accumulation conditions of deep central uplift belt in Songliao Basin [D]. Changchun: Jilin University, 2018.
- [37] 范代军.松辽盆地徐家围子断陷白垩系沙河子组古气候古环境及烃源岩发育模式[D].长春:吉林大学,2022.
FAN Daijun. Research on paleoclimate, paleoenvironment and source rock development model of the Cretaceous Shahezi Formation in Xujiaweizi fault depression, Songliao Basin [D]. Changchun: Jilin University, 2022.
- [38] 朱映康.断陷盆地致密砂砾岩储层成岩相分析:以松辽盆地北部徐家围子断陷沙河子组为例[J]. *世界地质*, 2019, 38(4): 1044-1053.
ZHU Yingkang. Diagenetic facies analysis of tight sandstone reservoir in fault depression basins; a case study of Shahezi Formation in Xujiaweizi fault depression of northern Songliao Basin [J]. *Global Geology*, 2019, 38(4): 1044-1053.
- [39] 白雪峰,梁江平,张文婧,等.松辽盆地北部深层天然气地质条件、资源潜力及勘探方向[J]. *天然气地球科学*, 2018, 29(10): 1443-1454.
BAI Xuefeng, LIANG Jiangping, ZHANG Wenjing, et al. Geologic conditions, resource potential and exploratory direction of deep gas in the northern Songliao Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2018, 29(10): 1443-1454.

(收稿日期 2023-08-30 改回日期 2023-10-27 编辑 雷永良)