

DOI: 10.12401/j.nwg.2023022

泌阳凹陷栗园地区基岩油藏石油地质特征

李智¹, 岳欣欣², 杨云飞², 李双建¹, 张志业², 罗家群²

(1. 中国石化深部地质与资源重点实验室, 北京 102206; 2. 中石化河南油田分公司, 河南 南阳 473400)

摘要: 泌阳凹陷栗园地区在基岩露头发现油气显示并钻遇基岩油藏, 研究其地质条件和油气成藏过程对指导凹陷油气勘探具有重要意义。以露头、地震、钻井、测录井、岩心、地化资料为基础, 深入分析栗园地区基岩油藏形成的油气成藏要素和成藏过程。研究认为: 生烃洼陷内核桃园组地层形成的油气在鼻状构造背景下通过断裂-砂体复合输导体系向基岩内运移并聚集成藏。中元古界大河群蔡家凹组大理岩在构造作用下发育高角度剪切构造缝和溶蚀孔洞, 孔渗性能良好, 是主要基岩储层。上覆孤山头组片岩、边界断层泥、上盘泥页岩和稳定基岩内幕水动力条件为油气提供有效保存条件。栗园地区基岩油藏成藏模式分析可为同类型断陷盆地基岩油藏油气勘探提供借鉴。

关键词: 泌阳凹陷; 蔡家凹组; 大理岩; 封盖条件; 输导体系

中图分类号: P618.13; TE112.23 文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)05-0343-08

Petroleum Geological Characteristics of Base Rock Pools in Liyuan Area, Biyang Depression

LI Zhi¹, YUE Xinxin², YANG Yunfei², LI Shuangjian¹, ZHANG Zhiye², LUO Jiaqun²

(1. SINOPEC Key Laboratory of Geology and Resources in Deep Stratum, Beijing 102206, China; 2. SINOPEC Henan Oilfield Company, Nanyang 473400, Henan, China)

Abstract: Oil and gas shows are found in bedrock outcrop and bedrock reservoirs are discovered by drilling in Liyuan area of Biyang Depression. Studying its geological conditions and hydrocarbon accumulation process is of great significance for guiding oil and gas exploration in sags. Based on outcrop, seismic, drilling, logging, mud logging core, and geochemical data, the oil and gas accumulation factors and formation process of bedrock pools in Liyuan area are analyzed. It is considered that the oil and gas formed in the hydrocarbon-generating depression of the Hetaoyuan Formation migrated into bedrock and accumulated in the nose-like tectonic setting through the fault-sand complex transport system. The overlying Gushantou Formation schist, boundary fault gouge, upper wall shale and stable hydrodynamic conditions provide effective capping for oil and gas. The marble of Caijiawa Formation of Dahe Group in Mesoproterozoic developed high-angle shear fracture and dissolution hole under the action of structure. The pore permeability is good and it is the main bedrock reservoir. The analysis of hydrocarbon forming model of bedrock reservoirs in Liyuan area can provide reference for hydrocarbon exploration of bedrock reservoirs in the same type of fault basins.

收稿日期: 2021-12-23; 修回日期: 2022-09-12; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 国家自然科学基金企业重点联合基金“盆地深部地质作用过程与资源效应”(U20B6001), 国家自然科学基金企业创新发展联合基金“海相深层油气富集机理与关键工程技术基础研究”(U19B6003)联合资助。

作者简介: 李智(1989-), 男, 博士, 助理研究员, 从事盆地构造解析及石油地质综合研究。E-mail: lizhicug@163.com。

Keywords: Biyang depression; Caijiawa formation; marble; sealing conditions; pathway system

基岩油藏指赋存在沉积盆地边界大断裂或基底不整合面之下、盆地形成之前古老变质岩或岩浆岩裂缝、溶蚀孔洞内的油气藏(Landes et al., 1960; 陈文玲等, 2012)。随着勘探进程日趋深入, 在中国的酒泉、柴达木、松辽等多个盆地均取得基岩油气勘探突破, 展示了巨大勘探潜力(谢恭俭, 1981; 潘建国等, 2007; 吴彦雄等, 2014; 姜亭等, 2022)。随着东部老区勘探程度的提高, 基岩油藏日益受到勘探家重视, 成为资源接替和增储稳产的重要领域。

泌阳凹陷位于华北地块和扬子地块碰撞缝合形

成的秦岭-桐柏-大别褶皱造山带之上, 是一个受南部唐河-栗园-泌阳断裂控制的、以古近系沉积为主的中新生代箕状扇形富油气断陷。根据剖面形态, 可自北向南将凹陷划分为北部斜坡带、中部深凹带、南部陡坡带(图 1)。凹陷面积为 $1\ 000\ \text{km}^2$, 油气资源量为 $4.13 \times 10^8\ \text{t}$, 已探明地质储量为 $28\ 152 \times 10^4\ \text{t}$, 资源探明率达 68%, 目前已进入高成熟勘探阶段(李智等, 2020a)。在泌阳凹陷, 把中上元古界及上下古生界褶皱变质, 以及岩浆岩侵入的结晶基底称为基岩, 其内部储集的油气称为基岩油藏。

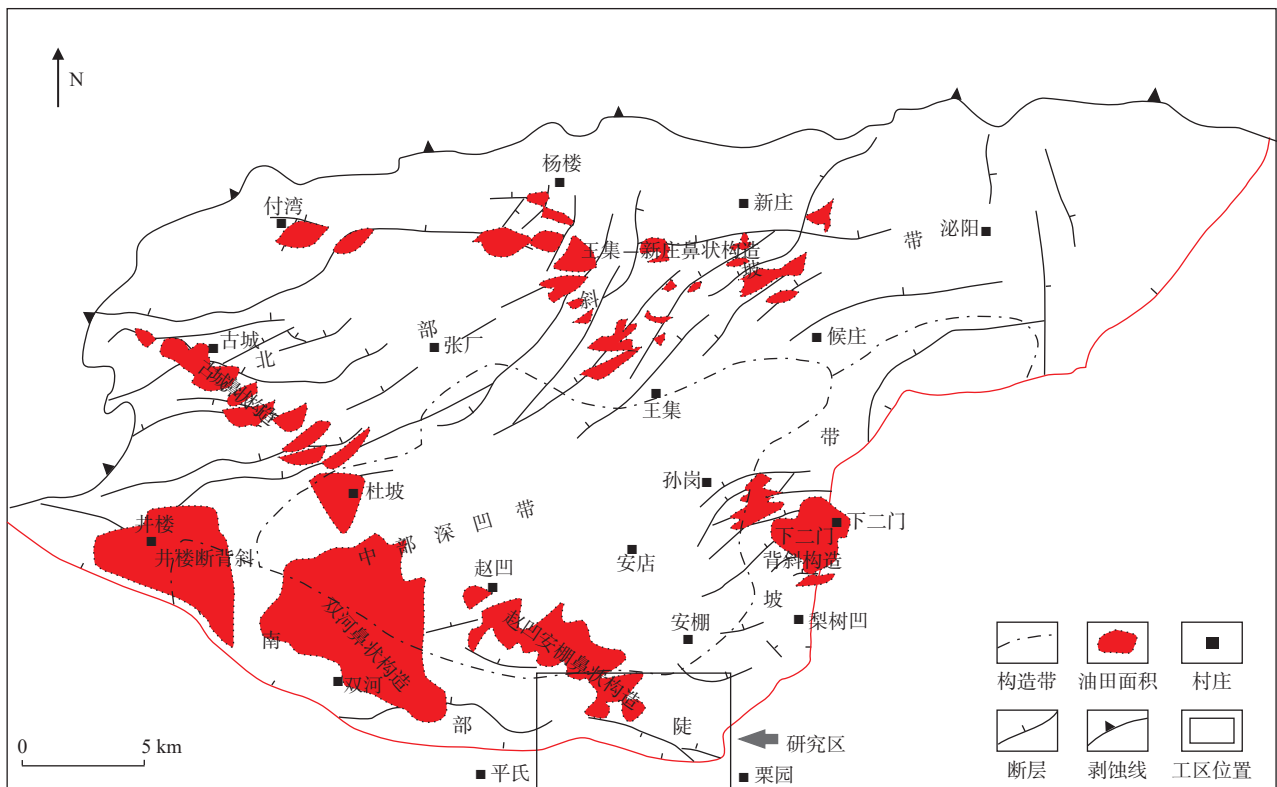


图 1 泌阳凹陷构造纲要、油气田分布及研究区位置图

Fig. 1 Structural outline, distribution of oil and gas fields and location of study area in Biyang depression

栗园地区位于泌阳凹陷南部陡坡带唐河-栗园断裂与栗园-下二门断裂交汇处, 紧邻深凹区, 北与安棚鼻状构造毗邻(图 1)。在野外地质踏勘中, 发现该地区的大理岩基岩露头中分布有刘碾油苗、小南庄油苗、南庄气苗及栗园沥青等地面油气显示。泌 301 井在基岩内中元古界大河群蔡家凹组(Pt_2c)钻遇灰白色荧光大理岩, 抽汲日产油量为 2.93 t, 酸压抽汲日产油量为 4.83 t, 获得基岩油气藏勘探新突

破。笔者以露头、地震、钻井、测录井、岩心和地化资料为基础, 分析泌阳凹陷栗园地区及周缘基岩地层展布, 蔡家凹组大理岩储层缝洞发育特征及孔渗物性特征。根据油源对比, 建立栗园地区核桃园组富油洼陷供烃, 上覆孤山头组片岩和断层泥封盖, 边界断裂-近岸水下扇砂体复合输导的基岩油藏油气成藏模式, 对同类型断陷盆地基岩油藏勘探具有一定借鉴作用。

1 泌阳凹陷基底特征

根据重磁、地震深反射资料, 结合区域露头 and 基岩钻井资料, 认为泌阳凹陷发育镇平-唐河-松扒断裂、字母沟-二郎山-大河断裂等北西-南东向展布的基底主干断裂, 活动时间长, 切割深度大, 将凹陷基底分割为北西-南东走向呈带状展布的基岩构造岩相带(李智等, 2020b)。晚白垩世以来, 凹陷南缘受

近南北向伸展应力场作用, 沿唐河-栗园断裂表现为东西向岩脉展布; 凹陷东缘受近东西向伸展应力场作用, 沿栗园-泌阳断裂表现为北北东-南南西向岩脉展布(李宗耀等, 2017; 李承东等, 2018; 李运冬等, 2018)。

泌阳凹陷南缘栗园地区出露基岩为中元古界大河群彭家寨组(Pt₂p)、蔡家凹组(Pt₂c)、孤山头组(Pt₂g), 上元古界信阳群龟山组(Pt₃g)和南湾组(Pt₃n), 局部见花岗斑岩、花岗岩、角闪辉绿岩出露(图 2)。

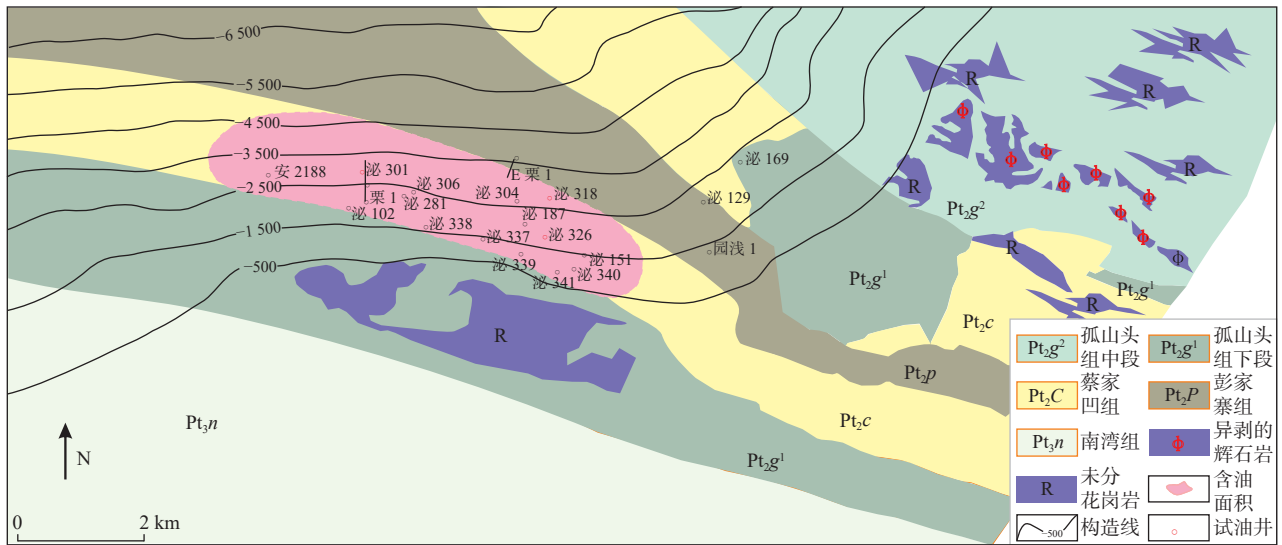


图 2 栗园地区基岩平面展布及蔡家凹组顶面构造图

Fig. 2 Plane distribution of bedrock in Liyuan area and structural map of top surface of Caijia'ao formation

(1) 彭家寨组(Pt₂p): 岩性为黑云斜长混合片麻岩、蚀变含石墨黑云斜长片麻岩、黑云二长片麻岩、斜长角闪片麻岩夹石榴砂线石岩及大理石薄层。

(2) 蔡家凹组(Pt₂c): 岩性下段为蛇纹石化白云石大理石夹斜长角闪岩, 中段为条带状含石墨白云岩大理石、白云岩大理石, 上段为条带状含石墨大理石岩夹斜长角闪片岩。

(3) 孤山头组(Pt₂g): 岩性下段北部为混合岩化斜长角片麻岩、绿帘斜长角闪岩、透辉斜长角闪岩夹绢云石英片岩及条带状大理石; 南部为混合岩化斜长角片岩夹钙质绢云石英片岩、钙质绿泥片岩、二云石英片岩、黑云石英片岩、黑云片岩。中段为混合岩化斜长片麻岩、混合岩化白云变粒岩夹斜长角闪片岩及绢云长石片岩。上段为混合岩化斜长角闪片麻岩及绿帘斜长角闪岩夹混合岩化斜长片麻岩。

(4) 花岗岩: 岩性为斑状花岗岩, Rb-Sr 全岩等时线年龄为 82 Ma, 为燕山期侵入。

栗园地区基岩储集空间主要为蔡家凹组(Pt₂c)大

理岩内缝洞。根据钻井层位标定在三维地震资料解释蔡家凹组顶面构造, 认为栗园地区蔡家凹组基岩顶面为鼻状构造形态, 构造长约为 10 km, 宽约为 5 km, 面积约为 50 km², 轴向近南北向, 向凹陷中倾没。构造隆起幅度上大下小, 浅层接近 1 000 m, 在深层约为 260 m; 鼻状构造两翼倾角差异明显, 东部较陡达 45°, 西部较缓为 40°, 核部倾角 55°~63°(图 2)。

2 基岩油藏基本特征

2.1 油源条件

基岩本身不具有生烃能力, 其储集的油气来源于毗邻生烃洼陷的富有机质泥页岩中(黄第藩等, 2005)。栗园地区紧邻安棚-安店深凹区, 沉积了巨厚的深湖-半深湖相古近系核桃园组, 为纹层发育的褐色、褐灰色及黑色页岩, 最厚达 3 000 m, 分布面积达 640 km²; 烃源岩母质类型好, 有机质丰度高, 生烃条件优越, 为基岩油气藏的形成提供了坚实物质基础。

通过对泌 301 井基岩原油的油源对比分析,认为原油显示了高成熟特征,其甾烷分布呈高熟型,具有“低伽马蜡烷含量、高三环萜烷及相对高的 $Ts/(Ts+Tm)$ 值”的特征,与核桃园组核三段 IV 砂组原油特征一致,进一步证明了基岩油气来源于核桃园组核三段(图 3)。

2.2 储层特征

2.2.1 基岩储层裂缝特征

栗园地区基岩油藏主要储集空间为基岩缝洞,是前白垩纪碰撞造山期挤压构造裂缝、晚白垩世基岩风化缝洞和新生代以来伸展构造裂缝的综合体;以构造裂缝为主,还包括非构造片理缝以及微裂缝、溶蚀洞和晶间隙等。

受北西西向和北东向基底断裂影响,基岩裂缝以 $340^{\circ}\sim 350^{\circ}$ 和 55° 两组裂缝最为发育。裂缝性质以剪切缝为主,约占 90%;张性缝较少,约占 10%;倾角大多在 70° 以上(图 4);构造裂缝发育强度与地层时代、基岩坚硬程度、发育构造部位等均有关。地层或岩层时代越老,裂缝越发育。同时期地层或岩层中,块状岩石比片状、片麻状岩石裂隙发育;块状岩石中较软岩石比较硬岩石裂缝密度高,但延伸短、产状不稳定。基岩岩性不同,裂缝发育程度有所差异,据钻井岩心

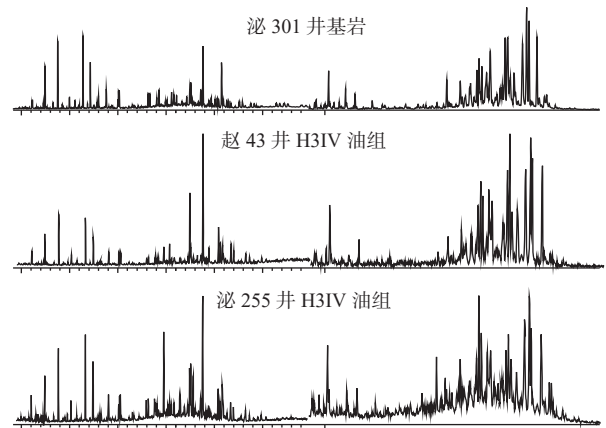


图 3 泌 301 基岩与赵 43 井、泌 255 井 H3IV 砂组原油的甾萜烷分布特征图

Fig. 3 Distribution characteristics of steranes in B301 bedrock and H3IV sand formation crude oil of Z43 and B255 wells

观察,大理岩裂缝密度大于 27 条/m,花岗岩裂缝密度为 25 条/m,细碧岩裂缝密度为 15 条/m,片岩仅为 2 条/m。同时期同岩性地层,裂缝在断裂附近、褶皱轴部及倾没端相对更为发育(朱伟鸿, 2016)。

构造缝通常直立、平行或低角度斜交岩心轴,普遍充填、半充填矿物质,张开缝少见;片理缝通常陡倾,很少充填。早期构造缝多为方解石、石英、黄铁矿、



a. 栗 1 井(2 686.4 m)大理岩“X”型共轭缝; b. 栗 1(2 686.25 m)大理岩垂直缝; c. 泌 334 井(2 475.6 m)大理岩“X”型共轭缝; d. 栗 2(2 015.2 m)大理岩、溶蚀孔洞、方解石充填

图 4 泌阳凹陷基岩岩心裂缝特征图

Fig. 4 Fracture characteristics of bedrock core in Biyang depression

绿泥石等全充填; 晚期构造缝充填程度低, 多为方解石半充填或无充填物(图 4)。

由此可见, 栗园地区蔡家凹组发育时代早, 经历多期构造运动影响, 位于唐河-栗园断裂和栗园-泌阳

断裂交汇处, 且位于基岩鼻状构造轴部; 岩性以大理岩为主, 易发生破裂; 多种因素决定其应为泌阳凹陷基岩油藏主要储集层。现阶段钻遇基岩的探井油气显示和油气分布也多集中于蔡家凹组(图 5)。

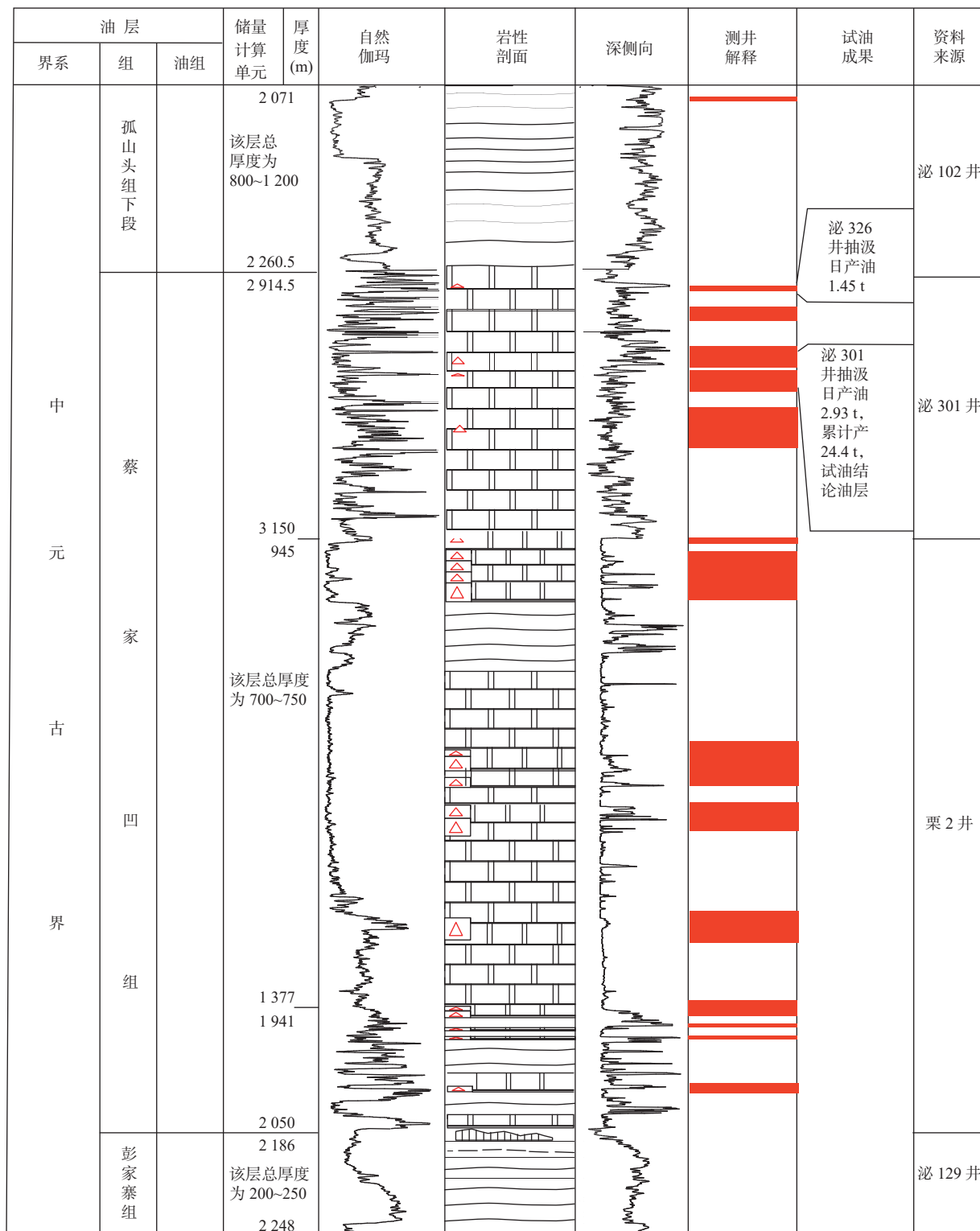


图 5 泌阳凹陷栗园区块基岩油藏储层柱状图

Fig. 5 Histogram of bedrock reservoir in Liyuan block, Biyang depression

2.2.2 基岩储层物性特征

根据栗园地区及周缘部分基岩岩心物性数据分析可知,大理岩孔隙度最高,大多为0.38%~9.34%,平均为5.14%;其次是花岗岩孔隙度为0.35%~6.41%,平均为2.5%;辉绿岩孔隙度为0.25%~1.45%,平均为0.65%;片岩孔隙度最小,大多为0.30%~0.93%,平均为0.52%。各类岩层渗透率大多小于1 mD,仅个别样品最大值达2.14 mD。但由于取样样品裂缝不发育,实际地下基岩孔渗物性应优于上述实验结论。

基岩内的构造缝和溶蚀孔洞对渗透率影响也有不同。发育构造微裂缝的岩心样品,渗透率较高;而溶蚀孔洞发育的岩心样品,孔隙度虽较高,渗透率反而较低。

2.3 保存条件

基岩油气藏能否形成,封闭条件的好坏是关键问题之一,而决定封闭条件的关键因素是东南部边界断裂的活动特征、基岩水动力条件及基岩上覆有无一定厚度的泥岩或上覆的砂砾岩层有无封盖能力。

2.3.1 基岩内幕盖层

根据钻井揭示基岩岩性,蔡家凹组中下部为大理岩,上部及上覆孤山头组岩性主要为片岩。根据岩心物性资料,片岩在各类基岩岩性中构造裂缝最不发育,仅为2条/m,且孔隙度也最小,仅为0.30%~0.93%,平均为0.52%,具备为其下大理岩储层封盖的能力。

2.3.2 基岩上覆沉积盖层封闭能力

栗园地区沉积地层为新生界砂、砾岩与泥岩互

层。其中,泥质岩类+泥质白云岩类累计厚度一般大于500 m,占总岩类30%~40%,单层泥岩厚度一般为3~6 m,该地区除核桃园组内有自生自储式油藏外,新近系未见油气显示,说明盖层封闭性良好。

2.3.3 断层封闭

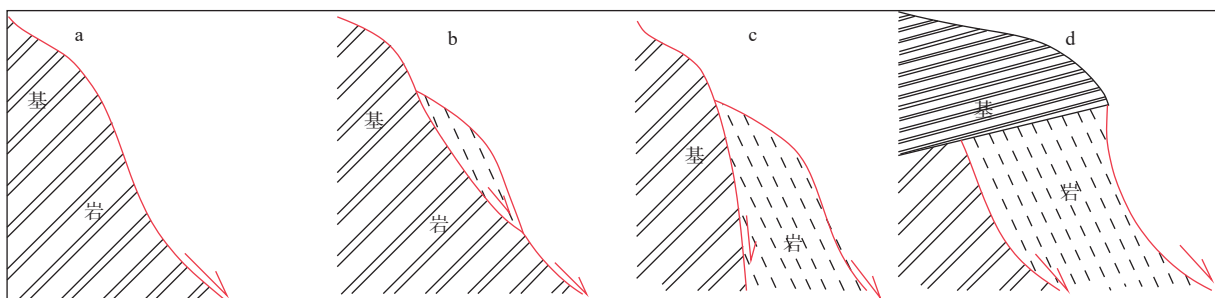
廖庄组沉积期后,泌阳凹陷由断陷向拗陷转化,断裂活动减弱。栗园地区边界断裂由张扭性质反转为压扭性质,断层封闭,对油气起遮挡作用。这从东南缘油苗终止于廖庄组砂岩得到佐证。

2.3.4 水文地质条件

基岩内水动力可分为活跃区、过渡区和稳定区3个区。栗园地区为古地貌低洼带,基岩埋藏深度较大,在2000 m以下,是水动力环境相对稳定区,有利于油气聚集和保存(程学峰,2006)。

2.4 圈闭特征

根据地震解释及钻井资料,认为泌阳凹陷南部陡坡带基岩断块存在4种基本样式:①简单断裂、风化壳不发育式,分布于杨桥以东和东缘断裂带,断层单一,破碎带不发育。②转换带破碎断块式,分布于平氏一带,在2条断层之间,断裂破碎严重。③多级断裂破碎断块式,分布于平氏东西两侧。④基岩内复杂断层切割断块式,分布在栗园一带,顶部断块破碎较轻,只发育风化壳,下部靠近新生代地层的断块破碎严重,而远离新生代地层的断块破碎较轻,有可能形成山内断块圈闭(图6)。



a.简单断裂风化型; b.转换带破碎断块型; c.多级断裂破碎断块型; d.基岩内复杂断块型

图6 基岩潜山样式图

Fig. 6 bedrock buried hill style

栗园地区基岩圈闭为第四种模式,即蔡家凹组以糜棱岩化大理岩为主,小段夹片麻岩和片岩,构造缝和溶蚀孔洞比较发育,可作为油气储层;内部片岩夹层则是局部盖层;其上的孤山头组以浅灰色片岩、斜长角闪片麻岩和斜长角闪岩为主,裂缝和孔隙不发育,可作为区域盖层;边界断裂在廖庄组沉积后呈压扭封

闭状态,与上覆泥岩和断层泥共同构成了栗园地区基岩屋脊式断块圈闭条件。

3 基岩油藏油气成藏模式

栗园地区基岩油藏属于以块状大理岩为储集空

间的断层-岩性油藏,多种油气成藏作用共同控制了基岩油藏的成藏过程和富集规律。华北板块和扬子板块的多期碰撞拼合及晚白垩世以来泌阳凹陷成盆期的多个伸展-聚敛构造旋回,使泌阳凹陷基底受多次构造运动影响,构造裂缝发育,形成非均质性较强但具有较好储集能力的大理石基岩储层。栗园地区毗邻的安棚-安店深凹区,沉积了巨厚的核桃园组泥页岩层,埋藏深,是泌阳凹陷的生烃中心。核三上段烃源岩在核二段沉积期开始时即进入生油门限,廖庄组沉积期进入生油高峰阶段。核三段沉积期沿栗

园地区边界断裂向凹陷方向发育的一系列小型近岸水下扇砂体,与该时期呈张扭性质的犁式边界断裂配置形成的断层-砂体复合输导体系,沿单斜构造背景将油气由深凹区运移至蔡家凹组大理岩基岩中。廖庄组末期,受区域构造运动影响,泌阳凹陷由断陷向拗陷转化,边界断裂由开启型张性断裂变为具封闭性的压性断裂。大理岩上覆的片岩、压性边界断裂内的断层泥、断裂上盘的泥岩和白云岩及稳定的基岩内幕水动力条件,共同构成了基岩的封盖条件(图7)。

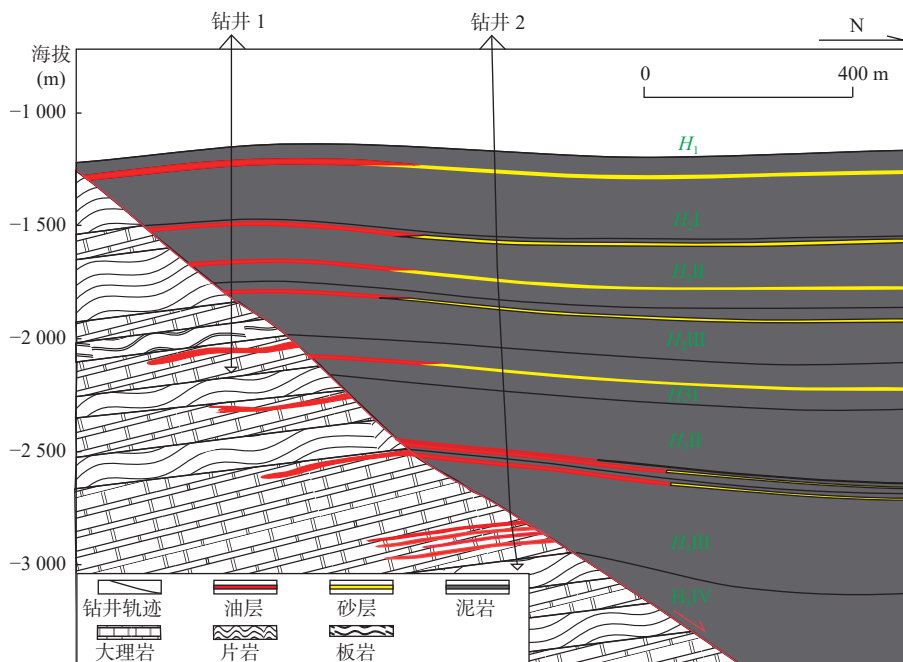


图7 泌阳凹陷栗园地区基岩油藏成藏模式图

Fig. 7 Reservoir forming model of bedrock reservoir in Liyuan area, Biyang depression

4 结论

(1)泌阳凹陷发育北西向基底断裂将凹陷基底切割为北西-南东走向的基岩构造岩相带。栗园地区基岩地层自下而上为中元古界大河群彭家寨组、蔡家凹组、孤山头组,上元古界信阳群龟山组、南湾组。

(2)栗园地区蔡家凹组大理岩基岩位于基底构造轴部,受边界大断裂影响,发育高角度剪切构造缝和溶蚀孔洞,孔渗性能好,是凹陷主要基岩储层。

(3)深凹区核桃园组油气在单斜背景下沿边界断裂-近岸水下扇砂体复合输导跨断层至蔡家凹组大理岩,在稳定基岩水动力条件及上覆片岩、断层泥、上盘泥岩和白云岩共同作用下封盖,是栗园地区基岩油藏成藏主要模式。

参考文献(References):

- 陈文玲,周文. 含油气盆地重要勘探领域-基岩油气藏[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2012, 34(5): 17-24.
- CHEN Wenling, ZHOU Wen. Important Exploration Areas in Petroleum Basins-The Basement Hydrocarbon Reservoirs[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2012, 34(5): 17-24.
- 程学峰. 泌阳凹陷基岩油气成藏条件分析[J]. 新疆石油地质, 2006, 27(3): 294-298.
- CHENG Xuefeng. A study on Petroleum Accumulation in Basement Reservoir, Biyang Sag[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2006, 27(3): 294-298.
- 黄第藩,梁狄刚. 关于油气勘探中石油生成的理论基础问题-与

- 无机生油论者商榷[J]. *石油勘探与开发*, 2005, 32(5): 1-10.
- HUANG Difan, LIANG Digang. Basic theoretical questions of oil generation in petroleum plays: discussing with oil inorganogenic[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2005, 32(5): 1-10.
- 姜亭, 周俊林, 牛亚卓, 等. 西北公益性油气地质调查进展和展望[J]. *西北地质*, 2022, 55(3): 64-80.
- JIANG Ting, ZHOU Junlin, NIU Yazhuo, et al. Progress and Prospect of Public Petroleum Geological Survey in Northwest China[J]. *Northwestern Geology*, 2022, 55(3): 64-80.
- 李智, 张志业, 何登发, 等. 南襄盆地泌阳凹陷与南阳凹陷油气地质特征类比及勘探启示[J]. *地质科技通报*, 2020a, 39(2): 74-84.
- LI Zhi, ZHANG Zhiye, HE Dengfa, et al. Comparison in petroleum geology between Biyang Depression and Nanyang Depression in Nanxiang Basin and its exploration significance[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2020a, 39(2): 74-84.
- 李智, 张志业, 何登发, 等. 唐河—栗园—泌阳断层的几何学和运动学特征——兼论桐柏造山带与泌阳凹陷的盆—山关系[J]. *地质科学*, 2020b, 55(3): 921-938.
- LI Zhi, ZHANG Zhiye, HE Dengfa, et al. Geometry and kinematics of the Tanghe-Liyuan-Biyang fault and its implication on the relationship between Tongbai orogenic belt and Biyang Depression[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2020b, 55(3): 921-938.
- 李宗耀, 裴先治, 李瑞保, 等. 东秦岭商丹地区武关岩群变沉积岩碎屑锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *西北地质*, 2017, 50(1): 151-164.
- LI Zongyao, PEI Xianzhi, LI Ruibao, et al. Detrital Zircon U-Pb Ages and Geological Significances of Meta-Sedimentary Rocks from Wuguan Group in the Shangdan Area of East Qinling[J]. *Northwestern Geology*, 2017, 50(1): 151-164.
- 李承东, 赵利刚, 徐雅雯, 等. 北秦岭宽坪岩群变质沉积岩年代学及地质意义[J]. *中国地质*, 2018, 45(5): 992-1010.
- LI Chengdong, ZHAO Ligang, XU Yawen, et al. Chronology of metasedimentary rocks from Kuanping Group Complex in North Qinling Belt and its geological significance[J]. *Geology in China*, 2018, 45(5): 992-1010.
- 李运冬, 张盼, 何孝良, 等. 桐柏地区北秦岭地体中片麻状花岗岩的锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及地质意义[J]. *西北地质*, 2018, 51(4): 82-96.
- LI Yundong, ZHANG Pan, HE Xiaoliang, et al. Zircon U-Pb Dating, Geochemical Characteristics of the Gneissic Granite from North Qinling Terrain in Tongbai Area and their Geological Significance[J]. *Northwestern Geology*, 2018, 51(4): 82-96.
- 吴彦雄, 马达德, 刘君林, 等. 柴西地区基岩油藏形成的石油地质条件分析[J]. *天然气地球科学*, 2014, 25(11): 1689-1696.
- WU Yanxiong, MA Dade, LIU Junlin, et al. Geological conditions of basement oil pools in western Qaidam Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2014, 25(11): 1689-1696.
- 潘建国, 郝芳, 张虎权, 等. 花岗岩和火山岩油气藏的形成及其勘探潜力[J]. *天然气地球科学*, 2007, 18(3): 380-385.
- PAN Jianguo, HAO Fang, ZHANG Huquan, et al. Formation of granite and volcanic rock reservoirs and their accumulation model[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2007, 18(3): 380-385.
- 谢恭俭. 酒泉盆地西部鸭儿峡变质基岩油藏的形成条件[J]. *石油学报*, 1981, 2(3): 23-30.
- XIE Gongjian. Occurrence of the oil pool in the metamorphosed basement in Yaerhe in the western part of the Jiuquan Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1981, 2(3): 23-30.
- 朱伟鸿, 蒲洪果, 曾明. 栗园地区基岩油气储层特征[J]. *石油地质与工程*, 2016, 30(4): 39-41.
- ZHU Weihong, PU Hongguo, ZENG Ming. Characteristics of bedrock oil and gas reservoirs in Liyuan area[J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2016, 30(4): 39-41.
- Landes K K, Amoroso J J, Charlesworth L J, et al. Petroleum resources in basement rocks[J]. *AAPG Bulletin*, 1960, 10(44): 1682-1691.