

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2020.04.02

引用格式: 张帅,祝有海,王平康,等.羌塘盆地雀莫错地区天然气水合物成藏条件分析[J].中国地质调查,2020,7(4): 10-19.

羌塘盆地雀莫错地区天然气水合物成藏条件分析

张帅¹, 祝有海¹, 王平康¹, 付修根², 王大勇³, 伍新和¹, 庞守吉¹, 肖睿¹

(1. 中国地质调查局油气资源调查中心, 北京 100083; 2. 中国地质调查局成都地质调查中心, 成都 610081; 3. 中国地质科学院地球物理地球化学研究所, 廊坊 065000)

摘要: 基于天然气水合物钻探试验井 QK-8 井的调查结果, 以雀莫错地区发现的高烃类气体显示为线索, 从影响高山冻土区天然气水合物成藏的关键地质因素出发, 系统分析了影响天然气水合物成藏的冻土厚度、烃源岩特征、储集空间、疏导系统、矿物特征及盖层条件等地质因素, 明确了该区天然气水合物成藏潜力。结果显示: 雀莫错地区冻土厚度较大(约 100 m); 上三叠统主力烃源岩整体表现为有机质丰度高, 为 II₂ 型干酪根, 成熟度较高 (R_o 为 1.3% ~ 1.5%); 储集空间以缝洞型储层为主, 裂隙、孔隙型次之; 具备有效的运移通道和良好的区域盖层, 同时多层段发育方解石和黄铁矿等天然气水合物伴生矿物。综合分析认为, 雀莫错地区具有一定的天然气水合物成藏潜力, 是下一步天然气水合物含油气系统综合能源资源调查的主要方向。

关键词: 天然气水合物; 成藏条件; 储集空间; 疏导系统; 雀莫错地区; 羌塘盆地

中图分类号: P618.130.21; TE122

文献标志码: A

文章编号: 2095-8706(2020)04-0010-10

0 引言

天然气水合物俗称“可燃冰”, 是由水和气体分子(如甲烷、乙烷、丙烷、异丁烷、硫化氢、二氧化碳等)在低温、高压、气体浓度大于其溶解度条件下形成的一种结晶状固体物质, 主要赋存于海底沉积物、极区与青藏高原永冻层之下^[1-4]。基于其重要的能源与环境意义, 天然气水合物已被视为 21 世纪最重要的潜在能源之一^[5-6]。自 1934 年美国科学家首次发现高压输气管道中天然气水合物后, 国际上先后在西伯利亚北部、阿拉斯加北坡、加拿大马更些、日本海域等地开展了天然气水合物综合调查评价、试开采及相关研究^[7-10]。我国天然气水合物研究起步较晚, 但近年来我国海域和陆域天然气水合物调查均取得重要发现: 2007 年和 2015 年在南海北部陆坡神狐探区钻获天然气水合物; 2008 年在青海祁连山冻土区钻获天然气水合物样品, 这是世界上首次在中纬度高山冻土区发现天然气水合物, 实现了我

国陆域天然气水合物找矿突破^[11-14,4]。对羌塘盆地冻土层、地温梯度及生烃条件等研究表明, 相对于水合物勘探取得突破但分布十分有限的祁连山冻土区, 羌塘盆地冻土区具有年平均地温更低、冻土层厚、地温梯度低和成气条件较好等天然气水合物形成条件^[15-24]。

自 2011 年起, 中国地质调查局全面启动羌塘盆地天然气水合物调查, 在多个重点冻土区开展了地质、地球物理、地球化学和钻探等调查工作, 其中位于羌塘盆地北部坳陷带东部的雀莫错地区是近年来天然气水合物调查的重点地区之一。2016 年, 依据前期调查成果在雀莫错地区部署实施的天然气水合物钻探试验井 QK-8 井在上三叠统巴贡组泥岩和波里拉组灰岩中发现了良好烃类气体显示及厚层烃源岩, 证实该区具备较好的天然气水合物成矿气源, 为天然气水合物与油气战略调查提供了重要线索。本文主要基于 QK-8 井及前期调查成果, 从影响天然气水合物成藏的冻土、气源、储层、构造等关键因素出发, 系统分析该区天然气水合物成藏地质条件, 从而进一步明确该区天然气水合物成藏潜力。

收稿日期: 2020-07-09; 修订日期: 2020-07-20。

基金项目: 中国地质调查局“陆域天然气水合物资源综合调查(编号: DD20190102)”项目资助。

第一作者简介: 张帅(1987—), 男, 工程师, 主要从事含油气盆地分析与天然气水合物调查研究。Email: zhangshuai870517@163.com

原最大的沉积盆地,也是我国多年冻土面积最大、最发育的地区。因其构造上位于特提斯带东部,也是世界上石油天然气分布的重要区带^[25-27,17]。根据盆地的地层展布、沉积特征、构造变形及岩浆活动特征,羌塘盆地可划分出“两坳一隆”的构造格局,即北羌塘坳陷、中央隆起带和南羌塘坳陷 3 个二级构造单元^[25-26](图 1)。

羌塘盆地位于青藏高原腹地,地质构造上位于可可西里—金沙江板块缝合带与班公湖—怒江板块缝合带之间,总面积约 $1.8 \times 10^5 \text{ km}^2$,是青藏高

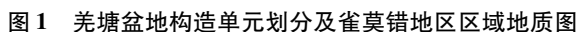


Fig. 1 Division of tectonic units in Qiangtang Basin and the regional geological map of Quemocuo area

羌塘盆地经历了7个演化阶段并形成如今的 万方数据

残留型构造盆地^[28],盆地内发育 12 套烃源岩,其

中上侏罗统索瓦组(J_3s)、中侏罗统夏里组(J_2x)与布曲组(J_2b)和上三叠统肖茶卡组(T_3x)为分布最广的 4 套烃源岩,具有良好的油气形成条件^[29]。近些年勘查实践证实,上三叠统碎屑岩为羌塘盆地天然气水合物和油气勘查的最优烃源岩。

雀莫错地区位于北羌塘坳陷带东部,地理位置在青藏高原腹部的唐古拉山雀莫错湖附近地区,地势相对平缓,平均海拔约 5 100 m。该区隶属于北羌塘地层分区,以中央隆起带为界线,与南侧的南羌塘坳陷遥相呼应,以发育未经变质的中、新生代地层为特征,尤以侏罗系广泛分布为典型。波藏陇巴背斜是研究区最为重要的构造,控制了全区地层的展布,该背斜位于雀莫错湖与格拉丹东雪山之间,背斜核部露地层为上三叠统波里拉组,向两翼出露地层依次为波里拉组(T_3b)、巴贡组(T_3bg)、鄂尔陇巴组(T_3e)、雀莫错组(J_2q)、布曲组(J_2b)、夏里组(J_3x)、索瓦组(J_3s)、雪山组(J_3x)以及第四系(Q)^[30-31](图 1)。

2015—2016 年,中国地质调查局在雀莫错地区完成了二维反射地震调查 50 km、音频大地电磁测深 200 km 调查和区域基础地质调查,调查结果显示:该区多年冻土发育且厚度较大,具备天然气水合物成藏的温压条件,上三叠统巴贡组、波里拉组均达到了较好—好烃源岩的标准,有机质成熟度处于成熟—过成熟热演化阶段,利于生气,同时区域上断层较发育,存在有利于烃类气体向上运移的输导系统,指示该区具有天然气水合物成藏可能。为落实上三叠统烃源岩发育特征与生烃潜力以及发现天然气水合物有关的异常标志,中国地质调查局于 2016 年部署实施了天然气水合物钻探试验井 QK-8 井(图 1),该井完钻井深 702 m,依次钻遇第四系、上三叠统巴贡组和波里拉组。其中,巴贡组岩性上以泥质岩类为主,主要为灰—深灰色泥岩、灰黑色碳质泥岩、钙质泥岩,粉砂质泥岩、粉砂岩,泥岩总厚度 414.24 m,泥地比为 84.5%;波里拉组岩性主要为深灰色、灰黑色泥晶灰岩、泥灰岩、砂屑灰岩,同时,在巴贡组和波里拉组均发现了良好的烃类气体显示。本次发现的羌塘盆地高烃类气体显示与祁连山天然气水合物发现区的钻井气测值相当,指示该区具有形成天然气水合物的气源条件。 万方数据

2 天然气水合物成藏地质条件

基于祁连山冻土区天然气水合物的发现,不同学者对我国陆域天然气水合物的成藏条件与模式的研究不断深入,普遍认为天然气水合物是在“气源—岩性—构造—冻土”耦合机制体系下成藏的。烃类生成体系、流体运移体系、成藏富集体系的耦合与时空匹配关系导致天然气水合物在横向和纵向上分布不均^[32-33],因此,通过对西藏羌塘盆地雀莫错地区冻土厚度、烃源岩特征、储集空间、疏导系统、矿物特征及盖层条件等分析,将有助于明确该区天然气水合物的成藏潜力。

2.1 冻土厚度

冻土是陆域冻土区天然气水合物形成的必要条件,冻土层的厚度决定了地下压力的大小,地下水在岩石和土壤的空隙中冻结形成的厚度受地表温度及地温梯度控制,进而决定了天然气水合物的稳定带范围。在对我国陆域冻土区天然气水合物的不断探索中,发现音频大地电磁测深(Audio-frequency Magnetotellurics, AMT)对冻土层反映灵敏,能有效探测到冻土层底界展布,因此面上冻土调查多用此方法,进而通过实钻测井井温数据确定冻土层厚度对电法数据校正,进而获得一个相对准确的区域冻土展布。AMT 调查结果显示,雀莫错地区冻土层总体厚度为 55~120 m,区内发育多条逆冲断层,包括区域主控断层 F1(夏里断层)、F2(波藏陇巴断层)以及推测断层,冻土的发育状况明显受断层发育的影响,断层周缘冻土分布具有明显减薄趋势(图 2)。

近似稳态井温测井结果显示,QK-8 井全井段可以划分为 2 个温度带:I 温度带为 0~100.70 m,井温变化小且近于 0℃,判断为冻土层;II 温度带为 100.70~697.00 m,井温变化大且升温快,冻土层以下地温梯度为 4.46℃/100 m。在雀莫错地区收集的其他 4 口井测温数据显示:羌资-8 井海拔约为 5 030 m,冻土层厚度为 30.69 m;羌资-16 井海拔约 5 151 m,冻土层厚度约为 147 m;QK-9 井海拔约 5 200 m,冻土层厚度为 109.2 m(表 1)。除羌资-7 井属涌水孔不作参考外,从各井冻土层厚度数据来看,该区域冻土层整体较厚,且冻土厚度明显受海拔和地形地势影响,区域地温梯度普遍偏

高。QK-8 井与羌资-8 井距离约 2 km,但冻土厚度差距较大,除该井为非近似稳态井温测井外,还由于羌资-8 井位于背斜的核部,更靠近区域主控断层,这也印证了上述冻土发育受断层影响这一结论。

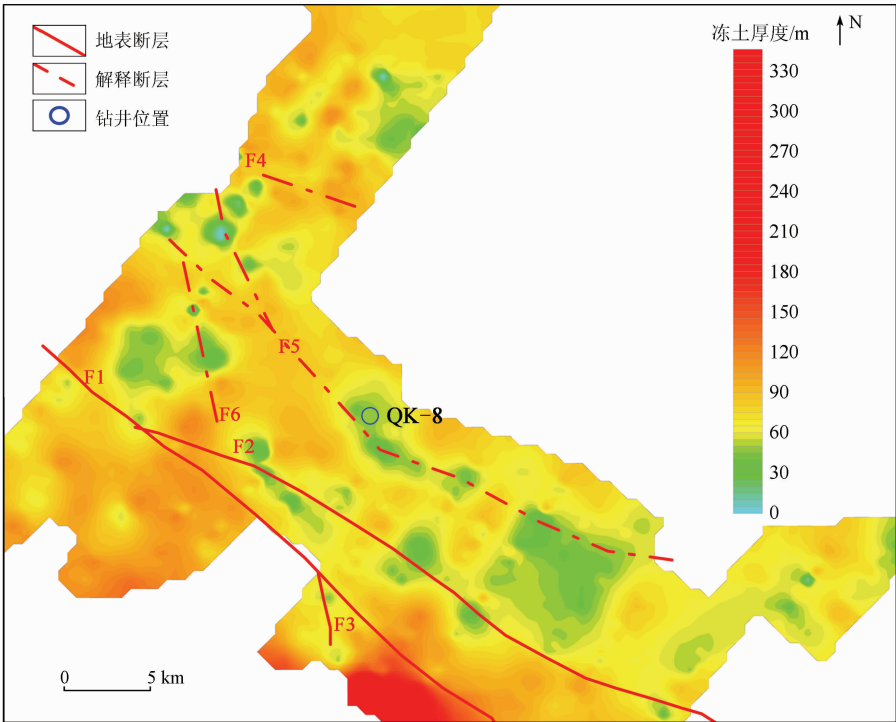


图 2 雀莫错地区 AMT 反演冻土厚度

Fig.2 AMT inversion thickness of the permafrost in Quemocuo area

表 1 雀莫错地区天然气水合物、油气钻井概况

Tab.1 Overview of gas hydrate and oil & gas investigation wells in Quemocuo area

井名	海拔/m	井深/m	冻土层厚度/m	冻土层以下地温梯度/($^{\circ}\text{C}\cdot\text{hm}^{-1}$)	钻遇地层
QK-8 井	5 100	702.00	100.70	4.46	Q, T_3bg , T_3b
QK-9 井	5 200	1 705.60	109.20	4.70	Q, J_2q , T_3e , T_3bg , T_3b , T_{3j}
羌资-7 井	5 070	400.00	—	—	Q, T_3bg , T_3b
羌资-8 井	5 030	500.00	30.69	4.60	Q, T_3bg , T_3b
羌资-16 井	5 151	1 593.00	147.00	4.56	Q, J_2q , T_3e , T_3bg , T_3b , T_{3j}

2.2 烃源岩特征

雀莫错地区主力烃源岩为上三叠统巴贡组泥岩和波里拉组泥灰岩,QK-8 井在钻进过程中具有明显顶钻现象。气测结果显示:巴贡组总烃含量最高 5.425%,平均 0.372%,甲烷含量最高 0.825%,平均 0.133%;波里拉组总烃含量最高 5.349%,平均 0.666%,甲烷含量最高 3.596%,平均 0.434%,波里拉组烃类气体显示明显优于巴贡组(图 3)。其中,巴贡组的烃源岩总有机碳(Total Organic Carbon,TOC)含量均值为 1.37%(介于 0.50%~2.42%),有机质丰度总体较高,多为中等—好烃源岩,有机质类型主要为Ⅱ₂型, R_o 值介于

1.27%~1.43%,均值为 1.37%, T_{max} 平均值为 466 $^{\circ}\text{C}$,已进入成熟—高成熟阶段;波里拉组烃源岩的 TOC 含量均值为 1.79%(介于 1.17%~3.09%),有机质类型也为Ⅱ₂型, R_o 值介于 1.41%~1.59%,均值为 1.51%, T_{max} 平均值为 480 $^{\circ}\text{C}$,处于高成熟—过成熟阶段(表 2)。可见,井中基本为中等及以上级别的有烃效源岩,但烃源岩整体又表现为低“A”、低(S_1+S_2)的特征,结合 TOC 与生烃潜能(S_1+S_2)交会图,综合反映了区内烃源岩具备一定的生气能力(图 4),对于该区气源(烃源岩)条件的深入认识及其对于天然气水合物成矿气源的贡献还有待进一步研究。

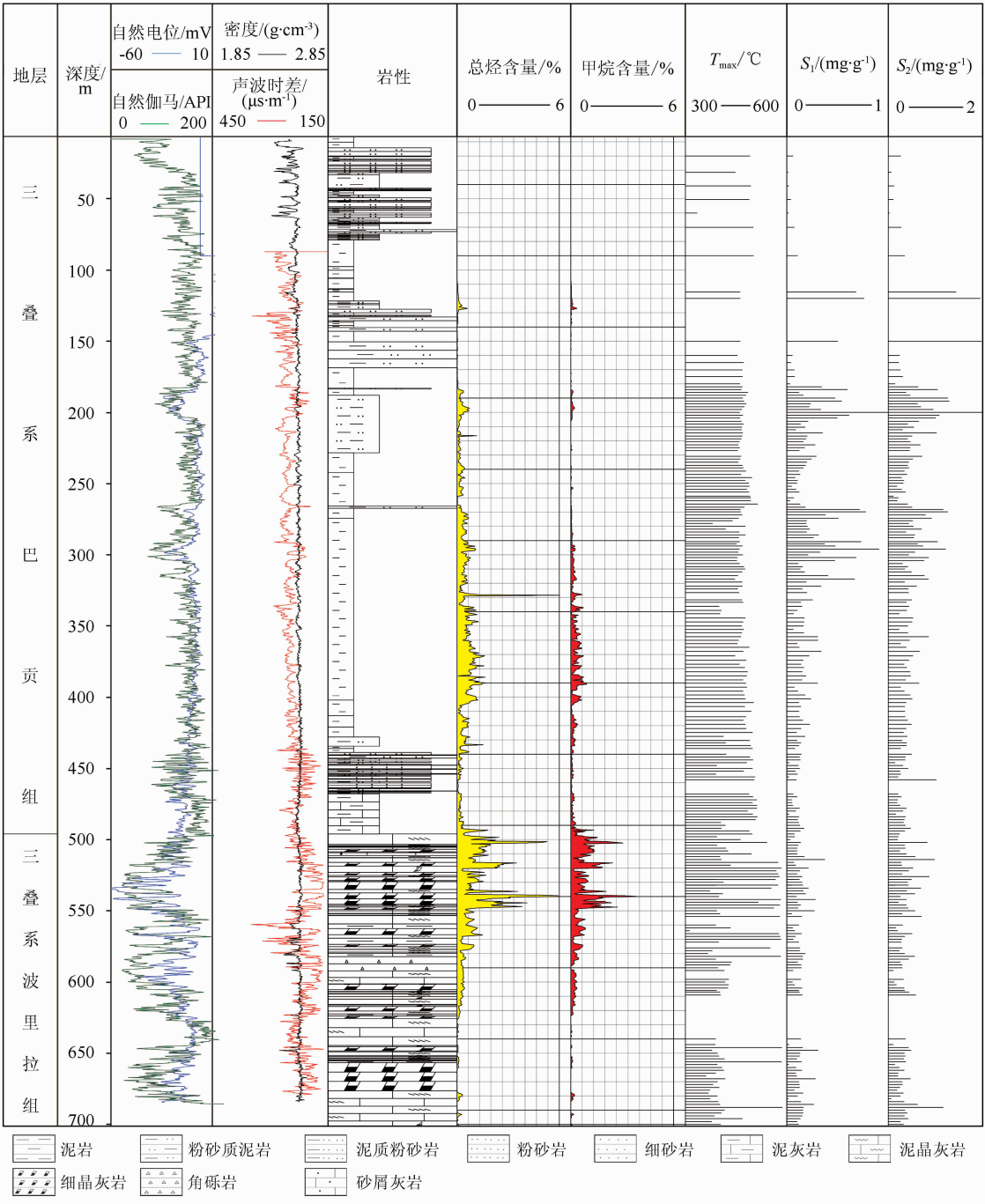


图3 雀莫错地区 QK-8 天然气水合物钻探试验井综合柱状图

Fig.3 Comprehensive chart of QK-8 gas hydrate drilling well in Quemocuo area

表2 雀莫错地区 QK-8 井烃源岩有机地球化学综合表

Tab.2 Geochemical comprehensive table of source rocks in QK-8 drilling well in Quemocuo area

层位	烃源岩岩性	有机质丰度/%	有机质类型	R_o /%	$T_{max}/^{\circ}\text{C}$
T_3b	泥灰岩	1.17 ~ 3.09 (1.79)	Ⅱ ₂	1.41 ~ 1.59 (1.51)	404 ~ 559 (480)
T_2bg	泥岩	0.50 ~ 2.42 (1.37)	Ⅱ ₂	1.27 ~ 1.43 (1.37)	366 ~ 532 (466)

注：括号内数值为均值。

万方数据

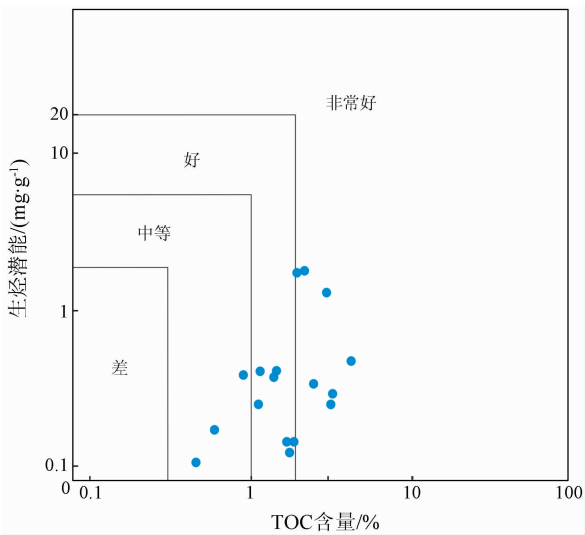


图 4 QK-8 井烃源岩 TOC 含量与生烃潜能 ($S_1 + S_2$) 交会图

Fig.4 Intersection diagram of TOC and ($S_1 + S_2$) of source rocks in QK-8 drilling well

2.3 储集空间

QK-8 井存在巴贡组碎屑岩和波里拉组碳酸

盐岩 2 种储集类型：其中，巴贡组的碎屑岩储层主要以粉砂岩、细砂岩、含泥细砂岩为主，砂岩较不发育，总厚度为 83.64 m，砂岩孔隙度均值为 2.96% (1.86% ~ 4.4%)，渗透率均值为 $0.256 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ($0.167 \times 10^{-3} \sim 0.384 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)，为超致密储层；波里拉组碳酸盐岩孔隙度均值为 2.34%，渗透率平均值为 $0.198 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ($0.125 \times 10^{-3} \sim 0.287 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)，同样为超致密储层。但波里拉组碳酸盐岩溶蚀作用明显，灰色微晶灰岩、砂屑灰岩裂隙发育，充填大量方解石及泥质，方解石溶蚀后形成大量溶蚀孔洞；同时，井中构造裂缝非常发育，早期构造缝被完全充填，晚期构造裂缝多以高角度缝为主，常与断层紧密伴生，成带状展布 (图 5)；因构造裂缝具有控制和促进岩溶作用发育的特点，又是油气垂向运移的主要通道，还可与溶蚀孔洞一起，构成各类缝洞型储层。由此可见，波里拉组碳酸盐岩可为该区天然气水合物成藏提供主要储集空间，而巴贡组砂岩的裂隙型、孔隙型次之。

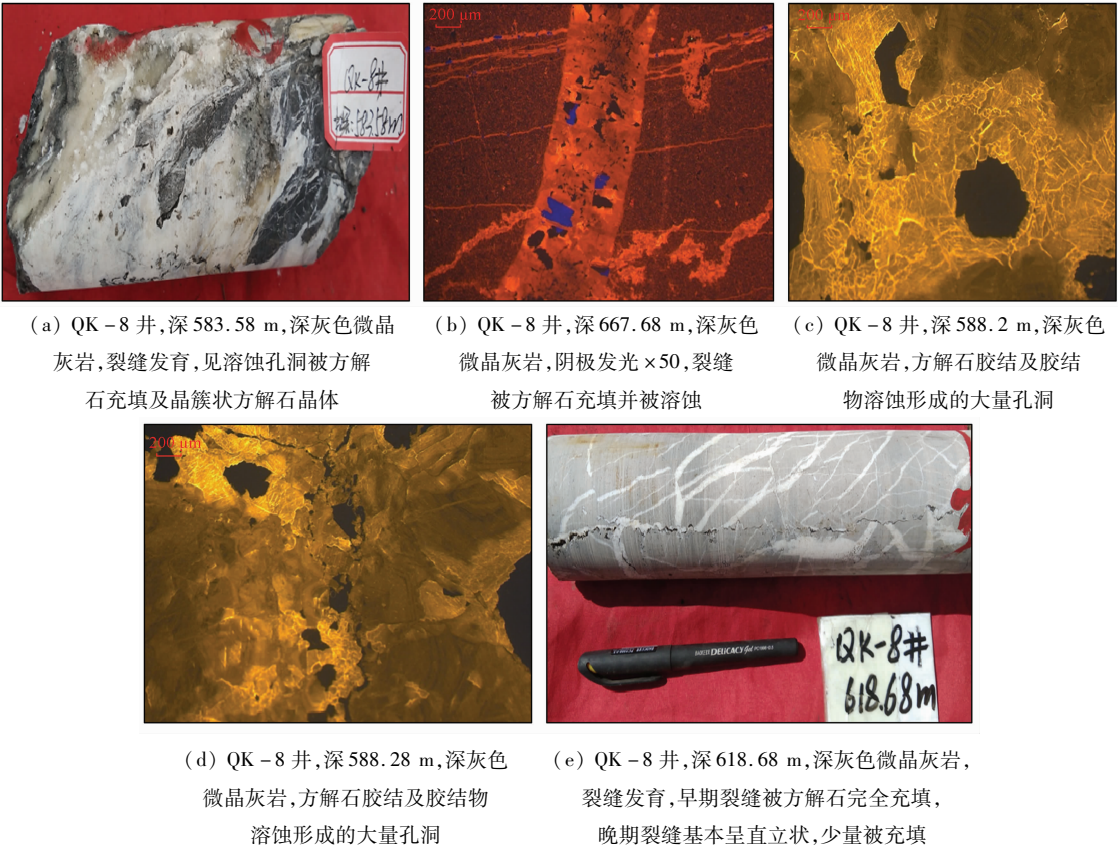


图 5 QK-8 井波里拉组碳酸盐岩主要成岩作用类型

Fig.5 Main diagenesis types of carbonate rocks in Bolila Formation in QK-8 drilling well
万方数据

2.4 疏导系统

输导体是沟通气源和水源至天然气水合物稳定带的必要运移载体,其中断裂和裂缝无疑是最为高效的一种输导体。雀莫错地区共部署了 4 条二维地震测线(图 1),由 QMC-L13 测线过井地震剖面可见波藏陇巴背斜的整体形态,其核部位于 QMC-L13 线,向 QMC-L6 线和 QMC-L20 线方向背斜趋于平缓(图 6)。研究区区域上以挤压机制造为主,走滑为辅,决定了其主控断层为逆断层,从断层的沟通能力上,区域主控断层 F1、F2 为深大断裂,周缘存在火山活动形成的侵入岩条带及温泉,

表明其形成以后一直在强烈活动,故断层附近的天然气水合物成藏条件相对较差;地震剖面 F3 断层与 AMT 解释的 F5 断层相对应,F3、F4 断层为该背斜核部以北油气运移主断层,既能沟通源岩与圈闭,也能作为中转断层运移烃类气体,QK-8 井位于 F3 断层上盘,并在巴贡组与波里拉组发现丰富的烃类气体,进一步证实了这类断层为深部烃类气体向浅层运移提供了有效通道(图 1,图 6)。同时,井中岩心中裂缝较为发育,密度大,条数多,多为高角度缝,并有方解石脉和石英脉部分或全部充填,可作为有效次级运移通道。

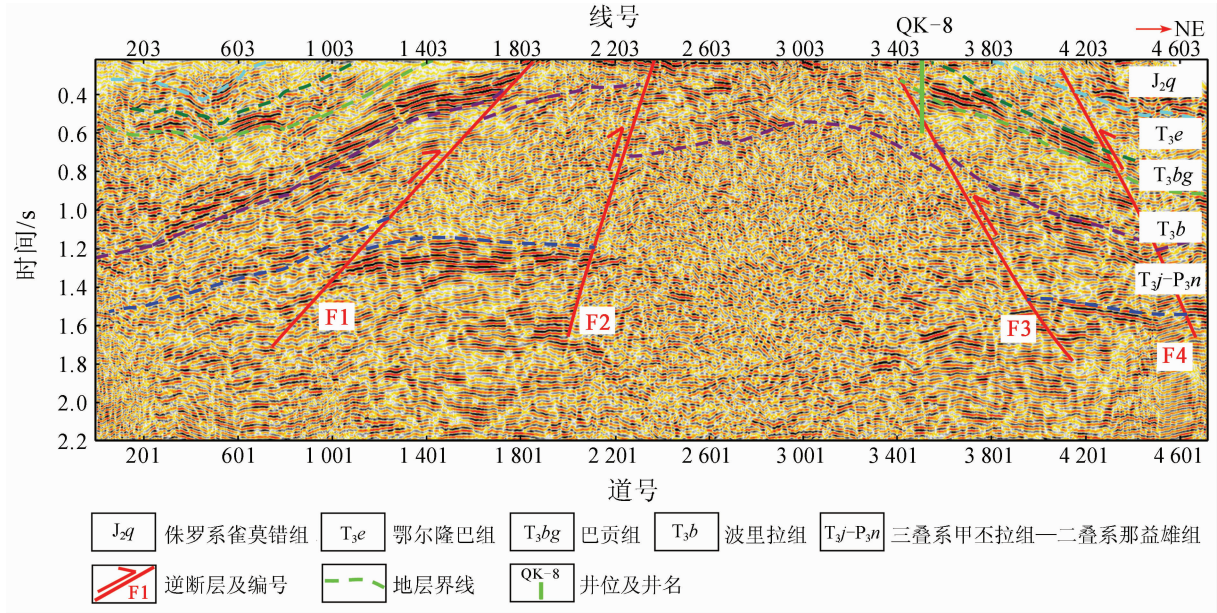


图 6 雀莫错地区过井二维地震解释剖面(QMC-L13)

Fig.6 2D seismic section through the drilling well in Quemocuo area(QMC-L13)

2.5 矿物特征及盖层条件

已有的冻土区天然气水合物研究表明,在天然气水合物成藏体系中方解石和黄铁矿是 2 种常见的伴生矿物,“裂隙型”方解石和黄铁矿常可以指示下方烃类气源或水合物的存在^[34-35]。QK-8 井中发现的特征矿物以方解石和黄铁矿为主,方解石主要以裂隙充填型分布于全井段岩心,黄铁矿全井段同样较发育,主要以浸染状、薄膜状、细脉状产出于巴贡组泥岩和波里拉组泥灰岩中(图 7)。多层段发育的与天然气水合物分解密切相关的自生碳酸盐和黄铁矿矿物与裂隙关系密切,反映其产生与流

体活动密切相关,存在烃类气体的运移,可能为天然气水合物曾经存在的证据。盖层直接影响着油气的聚集和保存,而对于陆域天然气水合物来说冻土层即盖层,除雀莫错地区发育的厚层冻土层外,上三叠统巴贡组上段发育的厚层泥岩(274.05 ~ 401.94 m,单层厚度达 127.44 m),亦对烃类气体起到了很好的封堵作用,有利于天然气水合物聚集成藏,同时,雀莫错地区南缘的 QZ-16 井中揭示在该区中侏罗统雀莫错组存在一套巨厚石膏层(约 372 m),直接表明该区具有非常良好的区域盖层条件。



图 7 QK-8 井天然气水合物伴生矿物发育特征

Fig. 7 Development characteristics of gas hydrate associated minerals in QK-8 drilling well

3 讨论

(1) QK-8 天然气水合物钻探试验井揭示, 雀莫错地区局部地区冻土厚度较大(约 100 m), 上三叠统主力烃源岩巴贡组与波里拉组整体表现为有机质丰度高, 为Ⅱ₂型干酪根, 成熟度较高, 储集空间以缝洞型储层为主, 裂隙、孔隙型次之, 同时具备有效的运移通道。上述结果均表明该区具备一定的天然气水合物成藏潜力, 同时, QK-8 井发现的高烃类气体显示是羌塘盆地天然气水合物调查以来的首次发现, 为天然气水合物、常规油气勘查提供了良好线索。

(2) 与祁连山冻土区天然气水合物已知发现区相比较, 烃源岩条件相当, 储集空间与构造条件相似, 冻土厚度相对较好, 却无天然气水合物的直接发现, 初步分析可能有以下 2 方面原因: 一是祁连山发现井均位于高寒沼泽草甸区, 水源充足, 地下水较丰富, 而 QK-8 井中实钻未见地下冰, 冻土层为非含冰基岩冻土层, 因其位置位于高山区的山坡且离水源地距离远, 导致形成天然气水合物的水源这一要素的缺失; 二是雀莫错地区地温梯度较高, 冻土层下岩石地层多表现为低压

特征, 导致该井冻土层以下形成天然气水合物的温压条件相对较差。

4 结论

(1) 雀莫错地区除 QK-8 井中揭示的上三叠统主力烃源岩外, 该区的侏罗系布曲组泥晶灰岩、索瓦组泥晶灰岩以及雀莫错以东的中下二叠统泥岩(TOC 含量 >1%, Ⅲ型, R_o 为 0.89% ~ 1.44%) 均为潜在烃源(气源)岩, 可为天然气水合物成藏提供较为有利的气源条件。

(2) 通过对雀莫错地区的油气“生、储、盖”初步研究, 结合油气显示的空间分布, 初步确定了雀莫错地区油气成藏存在 3 套有利组合: 一是自生自储型, 即 $T_3bg - T_3bg - J_{1-2}q$ 组合, J_2q 泥岩与雀莫错组石膏层为有效盖层; 二是上生下储型, 即 $T_3bg - T_3b - T_3bg(J_2q)$ 组合, 巴贡组泥岩与雀莫错组石膏层提供有效盖层; 三是下生上储型, 即 $T_3bg - J_2q$ 组合, 雀莫错组石膏层为有效盖层。上述均表明了该区具备良好的油气成藏组合, 但由于后期的构造隆升使油气藏遭到了破坏, 因此, 在保存条件相对较好的区域寻找油气藏以及天然气水合物藏是存在较大可能性的。

(3)我国陆域天然气水合物与含油气系统息息相关,其可以理解为“油气的复杂二次成藏”,气源条件成为羌塘盆地天然气水合物勘查突破的最关键因素,区域油气调查的发现更是关注的焦点。QK-8井结合周缘钻井揭示研究区曾经历大规模的油气生成、运移和聚集,遵循天然气水合物含油气系统理论,雀莫错地区及其东部地区应是下一步天然气水合物及油气综合能源资源调查的主要方向。

参考文献:

- [1] Demirbas A. Methane hydrates as potential energy resource: Part 1—importance, resource and recovery facilities[J]. *Energy Convers Manage*, 2010, 51(7): 1547–1561.
- [2] Sloan E D. *Clathrate Hydrates of Natural Gases*[M]. New York: Marcel Dekker, 1998: 1–730.
- [3] Makogon Y F, Holditch S A, Makogon T Y. Natural gas—hydrates—a potential energy source for the 21st Century[J]. *J Pet Sci Eng*, 2007, 56(1/2/3): 14–31.
- [4] 祝有海, 张永勤, 文怀军, 等. 青海祁连山冻土区发现天然气水合物[J]. *地质学报*, 2009, 83(11): 1762–1771.
- [5] Dickens G R. Hydrocarbon—driven warming[J]. *Nature*, 2004, 429(6991): 513–515.
- [6] Hester K C, Brewer P G. Clathrate hydrates in nature[J]. *Ann Rev Mar Sci*, 2009, 1: 303–327.
- [7] Makogon Y F, Trebin F A, Trofimuk A A. Finding of a pool of gas in the Hydrate State[J]. *Moscow, DAN SSSR*, 1971, 196(1): 197–206.
- [8] Collett T S, Bird K J, Magoon L B. Subsurface temperatures and geothermal gradients on the North Slope of Alaska[J]. *Cold Reg Sci Technol*, 1993, 21(3): 275–293.
- [9] Collett T S. Natural gas hydrates of the Prudhoe Bay and Kuparuk River Area, North Slope, Alaska[J]. *AAPG Bull*, 1993, 77(5): 793–812.
- [10] Koji Y, Scott D. Mallik hydrate research project progress[C]. *Fire in the Ice*, 2008: 1–6.
- [11] 张洪涛, 张海启, 祝有海. 中国天然气水合物调查研究现状及其进展[J]. *中国地质*, 2007, 34(6): 953–961.
- [12] 莫杰, 王文海, 彭娜娜, 等. 我国海洋地质调查研究新进展[J]. *中国地质调查*, 2017, 4(4): 1–8.
- [13] 杨胜雄, 梁金强, 刘昌岭, 等. 海域天然气水合物资源勘查工程进展[J]. *中国地质调查*, 2017, 4(2): 1–8.
- [14] Gong J L, Sun X M, Xu L, et al. Contribution of thermogenic organic matter to the formation of biogenic gas hydrate: Evidence from geochemical and microbial characteristics of hydrate—containing sediments in the Taixinan Basin, South China Sea[J]. *Mar Pet Geol*, 2017, 80: 432–449.
- [15] Lu Z Q, Zhu Y H, Liu H, et al. Gas source for gas hydrate and its significance in the Qilian Mountain permafrost, Qinghai[J]. *Mar Pet Geol*, 2015, 45: 341–348.
- [16] Wang P K, Huang X, Pang S J, et al. Geochemical dynamics of the gas hydrate system in the Qilian Mountain permafrost, Qinghai, Northwest China[J]. *Mar Pet Geol*, 2015, 59: 72–90.
- [17] 祝有海, 赵省民, 卢振权. 中国冻土区天然气水合物的找矿选区及其资源潜力[J]. *天然气工业*, 2011, 31(1): 13–19.
- [18] 祝有海, 张永勤, 文怀军, 等. 祁连山冻土区天然气水合物及其基本特征[J]. *地球学报*, 2010, 31(1): 7–16.
- [19] 徐学祖, 程国栋, 俞祁浩. 青藏高原多年冻土区天然气水合物的研究前景和建议[J]. *地球科学进展*, 1999, 14(2): 201–204.
- [20] 伊海生, 时志强, 刘文均, 等. 青藏高原多年冻土区天然气水合物形成潜力及远景[J]. *西藏地质*, 2002(1): 45–52.
- [21] 陈多福, 王茂春, 夏斌. 青藏高原冻土带天然气水合物的形成条件与分布预测[J]. *地球物理学报*, 2005, 48(1): 165–172.
- [22] 郭祖军, 陈志勇, 胡素云, 等. 天然气水合物分布及青藏高原有利勘探区[J]. *新疆石油地质*, 2012, 33(3): 266–271.
- [23] 吴青柏, 蒋观利, 蒲毅彬, 等. 青藏高原天然气水合物的形成与多年冻土的关系[J]. *地质通报*, 2006, 25(1/2): 29–33.
- [24] He J L, Wang J, Fu X G, et al. Assessing the conditions favorable for the occurrence of gas hydrate in the Tuonamu area Qiangtang basin, Qinghai—Tibetan, China[J]. *Energy Convers Manage*, 2012, 53(1): 11–18.
- [25] 王剑, 丁俊, 王成善, 等. 青藏高原油气资源战略选区调查与评价[M]. 北京: 地质出版社, 2009: 1–22.
- [26] 王成善, 伊海生, 李勇, 等. 西藏羌塘盆地地质演化与油气远景评价[M]. 北京: 地质出版社, 2001: 86–128.
- [27] 李才, 翟庆国, 董永胜, 等. 青藏高原原木错—双湖板块缝合带与羌塘古特提斯洋演化记录[J]. *地质通报*, 2007, 26(1): 13–21.
- [28] 赵政璋, 李永铁, 叶和飞, 等. 青藏高原大地构造特征及盆地演化[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [29] 赵政璋, 李永铁, 叶和飞, 等. 青藏高原羌塘盆地石油地质[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 1–367.
- [30] 青海省地质矿产局. 青海省岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997: 273–287.
- [31] 西藏自治区地质矿产局. 西藏自治区区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1993: 1–707.
- [32] 王平康, 祝有海, 卢振权, 等. 浅析祁连山冻土区天然气水合物成藏体系[C]//海峡两岸天然气水合物学术交流会论文集. 青岛: 中国地质学会, 2010: 52.
- [33] 张永勤, 刘晖, 王婷, 等. 祁连山冻土区天然气水合物成藏系统[C]//中国地质学会 2013 年学术年会论文集. 昆明: 中国地质学会, 2013: 459–461.
- [34] Wang P K, Zhu Y H, Lu Z Q, et al. Gas hydrate stability zone migration occurred in the Qilian mountain permafrost, Qinghai, Northwest China: evidences from pyrite morphology and pyrite sulfur isotope[J]. *Cold Reg Sci Technol*, 2014, 98: 8–17.
- [35] Collett T S, Johnson A H, Knapp C C, et al. Natural gas hydrates: a review[M]//Collett T S, Johnson A, Knapp C, et al. *Natural Gas Hydrates—Energy Resource Potential and Associated Geologic Hazards*. Tulsa, OK: AAPG Memoir, 2009, 89: 153–162.

Analysis of the gas hydrate accumulation condition in Quemocuo area of Qiangtang Basin

ZHANG Shuai¹, ZHU Youhai¹, WANG Pingkang¹, FU Xiugen²,
WANG Dayong³, WU Xinhe¹, PANG Shouji¹, XIAO Rui¹

(1. *Oil and Gas Survey, China Geological Survey, Beijing 100083, China*; 2. *Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610081, China*; 3. *Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, China*)

Abstract: Based on the survey results of QK – 8 gas hydrate drilling test well and the clue of high hydrocarbon gas in Quemocuo area, the authors systematically analyzed the influence of permafrost thickness on natural gas hydrate accumulation, hydrocarbon source rocks characteristics, reservoir space, mitigation system and other geological factors, considering the geological factors affecting gas hydrate accumulation in permafrost regions. The potential of gas hydrate accumulation was also clarified. The results show that the thickness of permafrost is large (100 m). Hydrocarbon source rocks of Triassic have a overall performance of high abundance of organic matter, with kero-gen type II₂ and higher maturity (R_o about 1.3% ~ 1.5%). The reservoir space is mainly composed of cavity – fractured reservoirs, followed by fracture and pore types. It has an effective migration pathway and a good regional cap layer. At the same time, natural gas hydrate associated minerals such as calcite and pyrite were well devel-oped in the multilayer sections. It is concluded that there is a certain potential for gas hydrate accumulation in Quemocuo area after comprehensive analysis, which is the main direction for the comprehensive energy resources investigation of the gas hydrate petroleum system.

Keywords: natural gas hydrate; accumulation conditions; reservoir space; mitigation system; Quemocuo area; Qiangtang Basin

(责任编辑：常艳)