西藏羌塘盆地鸭湖地区天然气水合物成藏条件

王平康¹,祝有海¹,张 帅¹,付修根²,吴纪修³,李 宽³,王大勇⁴,姚大为⁴, 肖 寄¹,张旭辉⁵,罗大双⁵,范瑞宝⁶,李国江⁶ WANG Pingkang¹, ZHU Youhai¹, ZHANG Shuai¹, FU Xiugen², WU Jixiu³, LI Kuan³, WANG Dayong⁴, YAO Dawei⁴, XIAO Rui¹, ZHANG Xuhui⁵, LUO Dashuang⁵, FAN Ruibao⁶, LI Guojiang⁶

1.中国地质调查局油气资源调查中心,北京100029;2.中国地质调查局成都地质调查中心,四川成都610081;

3.中国地质科学院勘探技术研究所,河北 廊坊 065000; 4.中国地质科学院地球物理地球化学研究所,河北 廊坊 065000;

5.中国科学院力学研究所,北京100190; 6.中石化胜利石油工程有限公司地质录井公司,山东东营 257064

1. Oil and Gas Survey, China Geological Survey, Beijing 100029, China;

2. Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610081, Sichuan, China;

3. Institute of Exploration Techniques, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, Hebei, China;

4. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, Hebei, China;

5. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

6. Shengli Geological Logging Company, Sinopec, Dongying 257064, Shandong, China

摘要:近年来中国陆域冻土区天然气水合物调查研究结果表明,气源条件是制约羌塘盆地天然气水合物找矿突破的关键因素。为明确鸭湖地区天然气水合物成藏潜力,基于近年来的钻探调查成果,从陆域冻土区天然气水合物成藏系统理论出发,系统分析了影响天然气水合物成藏的冻土、气源、储集、构造等地质因素。分析结果显示,鸭湖地区局部具有较好的冻土、地温、气源、储集、构造及水源条件,具备一定的天然气水合物成藏潜力,继续寻找充足的烃类气源是下一步天然气水合物调查的主要方向。同时,选取钻探调查获取的地温梯度、气体组分等参数,结合音频大地电磁测深(AMT)冻土厚度调查成果,对鸭湖地区天然气水合物稳定带的厚度和底界深度进行了预测。结果显示,当甲烷为85%、乙烷为9%、丙烷为6%时,天然气水合物稳定带厚度与冻土厚度分布变化基本一致,稳定带厚度400~630m,底界深度400~680m。当甲烷为98%、乙烷为2%时,天然气水合物稳定带厚度急剧减薄,大部分地区仅有0~30m,最厚仅有150m,局部地区稳定带底界最深仅为240m。结合气测录并结果,认为渐新世唢呐湖组比上三叠统土门格拉组更具备天然气水合物成藏潜力,土门格拉组自身具备较强的生排烃能力,可作为寻找常规油气或页岩气的一个重要层位。

关键词: 夭然气水合物; 成藏条件; 鸭湖地区; 羌塘盆地 中图分类号: P618.13 文献标志码: A 文章编号: 1671-2552(2017)04-0601-15

Wang P K, Zhu Y H, Zhang S, Fu X G, Wu J X, Li K, Wang D Y, Yao D W, Xiao R, Zhang X H, Luo D S, Fan R B, Li G J. An analysis of gas hydrate accumulation condition in the Duck Lake area, Qiangtang Basin, northern Tibet. *Geological Bulletin of China*, 2017, 36(4): 601–615

Abstract: In recent years, the gas hydrate investigation in the permafrost region of China shows that the gas source condition is the key factor for controlling the breakthrough of gas hydrate exploration in the Qiangtang Basin. In order to further clarify the potential of gas hydrate accumulation in the Duck Lake area, the authors systematically analyzed such geological factors as permafrost, gas

收稿日期:2016-10-18;修订日期:2017-03-27

资助项目:中国地质调查局项目《青南藏北冻土区天然气水合物调查》(编号:DD20160222)

作者简介:王平康(1982-),男,硕士,副研究员,从事冻土区天然气水合物调查研究。E-mail: wangpk@cags.ac.cn

source, reservoir and structure based on the drilling results in recent years. The results show that there are good conditions of permafrost, geothermal gradient, gas source, reservoir, structure and water source in some areas, indicating that Duck Lake area has a certain gas hydrate accumulation potential. Finding sufficient hydrocarbon gas sources will be the main direction of the next gas hydrate investigation. In addition, the thickness of the gas hydrate stability zone (GHSZ) and the depth of bottom of GHSZ in the Duck Lake area were predicted by the data of the geothermal gradient and the gas composition obtained from the drilling and AMT results. Predictive results show that, when the methane is 85%, ethane is 9% and propane is 6%, the thickness distribution of GHSZ is basically the same as that of the permafrost. The thickness of GHSZ is between 400m and 630m, and the depth of the bottom of GHSZ is between 400m and 680m. Where methane is 98% and ethane is 2%, the thickness of GHSZ is only 240m. Based on the results of gas logging, it is concluded that the Oligocene Suonahu Formation has more potential gas hydrate accumulation potential than the Upper Triassic Tumengela Formation in Duck Lake area, while Tumengela Formation has strong hydrocarbon generation and expulsion capability, which thus can be regarded as an important horizon for exploration of conventional oil and gas or shale gas.

Key words: gas hydrate; accumulation condition; Duck Lake area; Qiangtang Basin

天然气水合物是由具有相对较低分子质量的 气体(如甲烷、乙烷、丙烷、二氧化碳、氮气等)和水 在低温高压条件(通常T为0~10℃,p>10MPa)下形 成的一种内含笼形结构的固态类冰状物质,主要赋 存于海底沉积地层、极地和青藏高原永久冻土带及 深水湖泊底部沉积物中[1-5]。天然气水合物因其能 量密度高、分布广、规模大、埋藏浅、成藏物化条件 优越,被视为21世纪最具潜力的接替煤炭、石油和 天然气的新型洁净能源之一16-71,也是目前尚未开发 的储量巨大的一种新能源。2008—2009年,中国地 质调查局在位于青藏高原东北缘的祁连山冻土区 成功钻获天然气水合物实物样品,实现了中国陆域 天然气水合物找矿的重大突破。与祁连山冻土区 相比,西藏羌塘盆地具有更低的年平均地温、相对 较厚的冻土层、较低的地温梯度和较好的成油成气 条件,被认为是中国陆域天然气水合物成矿条件和 找矿前景最好的地区[8-9]。

西藏羌塘盆地天然气水合物的科学研究始于 20世纪90年代中后期。许多学者基于羌塘盆地冻 土层厚度、地温梯度、生烃等条件,从不同方面进行 了研究,认为羌塘盆地有条件形成天然气水合物矿 藏^[10-20]。自2011年起,中国地质调查局启动羌塘盆 地天然气水合物资源勘查项目,在多个重点地区陆 续开展了地质、地球物理、地球化学和钻探调查,其 中,位于羌塘盆地中央隆起带中部的鸭湖地区是近 年来天然气水合物调查的重点地区之一。2012— 2015年,中国地质调查局在鸭湖地区先后实施了3 口天然气水合物调查井,其中2口钻井在浅层钻遇 高压烃类气体,指示该区可能存在较好的天然气水 合物成矿气源,为该区寻找天然气水合物和常规油 气提供了良好线索。本文主要基于鸭湖地区近年 来的钻探调查成果,通过分析影响天然气水合物成 藏的冻土、气源、储层、构造等地质因素,探讨天然 气水合物成藏潜力。

1 区域地质背景

羌塘盆地位于青藏高原中北部,介于昆仑山、 冈底斯山、唐古拉山之间,南北宽约300km,东西长 640km,平均海拔4500m以上,是青藏高原年平均地 表温度最低和冻土最发育的地区。该区发育大片 连续的多年冻土,面积约18.5×10⁴km²,地质构造上 位于拉竹龙-金沙江缝合带和班公湖-怒江缝合带 之间[18-23],由北向南分为北羌塘坳陷带、中央隆起 带、南羌塘坳陷带3个二级构造单元[24](图1)。盆地 具有长期复杂的演化历史,其构造演化过程可分为 前奥陶纪基底形成阶段、古生代被动大陆边缘演化 阶段和白垩纪一新近纪陆相盆地形成、演化、改造 阶段[25-26],是发育在前泥盆纪结晶基底之上,以中生 界海相沉积为主体的残留盆地四,沉积了泥盆系、石 炭系、二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系、古近系、新 近系和第四系八大沉积层,总厚度大于3000m。盆 地内发育12套烃源岩,其中上侏罗统索瓦组(Jss)、 中侏罗统夏里组(J_x)、布曲组(J_b)和上三叠统肖茶 卡组(T_sx)为分布最广的4套烃源岩,具有良好的油 气形成条件[23]。目前,这4套烃源岩亦是天然气水 合物勘探的主要目标层。

鸭湖地区位于羌塘盆地中央隆起带中部,平均 海拔4960m,主要出露地层有二叠系鲁谷组、上三叠



Fig. 1 Division of tectonic units in the Qiangtang Basin and location of the Duck Lake area

统土门格拉组、中侏罗统夏里组、上侏罗统索瓦组、 始新世康托组、渐新世唢呐湖组,以及第四系更新统 和全新统(图2)。其中,上三叠统土门格拉组对应肖 茶卡组上段,为一套海陆交互相含煤碎屑岩沉积。 土门格拉组依据岩性分为上、下两部分,下部以深灰 色、灰色泥岩为主,夹灰色薄层状岩屑石英砂岩,泥 岩中含铁质结核,发育Trigonia (Kumatrigonia) huhxiliesia, Cardium (Tulongocardium) sp.等晚三叠 世双壳类化石;上部为含煤碎屑岩沉积,以灰色中薄 层状岩屑石英砂岩为主,夹泥岩和劣质煤线,砂岩中 发育平行层理、斜层理、楔状交错层理等,泥岩、粉砂 岩中见细砂岩透镜体,产植物碎片和孢粉化石,地质 时代为晚三叠世诺利期¹⁰。2012—2013年,中国地质 调查局在鸭湖地区先后完成1:5万专项区域地质调 查700km²、音频大地电磁测深调查110km和二维反 射地震调查16km。调查结果显示,该区多年冻土发 育,上三叠统土门格拉组泥页岩有机质丰度较高,达 到了较好烃源岩的标准,具备较好的生排烃能力,有 机质成熟度偏高,处于成熟-过成熟热演化阶段。同 时,存在有利于烃类气体向上运移的断裂系统,指示 该区具有天然气水合物成藏潜力。据此,为进一步 查明该区土门格拉组烃源岩特征,评价烃源岩生烃

(气)潜力,落实天然气水合物成矿气源条件及寻找 与天然气水合物有关的异常标志,中国地质调查局 于2012—2015年,先后部署实施了QK-2、QK-6和 QK-7三口天然气水合物调查井(图2;表1)。QK-2 井完钻井深389.85m,钻遇第四系和土门格拉组,在 土门格拉组除钻遇泥岩烃源岩外,随钻还伴生HS气 体及发现大量裂隙充填型的自生黄铁矿和方解石, 指示存在过一定的烃类活动。QK-6井在220.13~ 246.40m 处第四系沉积物中发现强烈烃类气体异常, 但因井壁坍塌事故而终孔。为了继续杳证气体异常 并进行岩心取样,在QK-6井以东约230m处部署施 工 QK-7 井, 并利用气测录井技术全程进行在线烃 类气体检测。QK-7井目前井深684m,钻遇第四系、 渐新世唢呐湖组和上三叠统土门格拉组,在多个层 段发现丰富烃类气体。QK-6和QK-7井在浅层钻 遇高压烃类气体,在羌塘盆地尚属首次,指示该区 可能存在较好的天然气水合物成矿气源。

2 陆域冻土区天然气水合物成藏系统

天然气水合物不管在海域沉积物中还是在陆 域冻土区环境形成、聚集和成藏,均有着自身的成 藏系统^[28-34]。自2008—2009年中国在祁连山冻土

					J	8			
钻井	海北/	十次/	冻土层	冻土层以内地温	冻土层以下地温	た理地日	宁 田 山 枳	日告柱征	
编号	(母1)又/111	开环/III	厚度/m	梯度/(℃·100m ⁻¹)	梯度/(℃·100m ⁻¹)	拍匜地层	土安石住	开币付任	
OV 2	4970	389.85	38.0	未测得	2.15	Q,T ₃ t	第四系沉积物、细-中砂岩、泥	H ₂ S气体,自生黄	
QK-2							岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥岩	铁矿和方解石	
QK-6	4960	246.4	未测井	未测井	未测井	Q	第四系沉积物	烃类气体异常	
QK-7	4960	684.0	120.0	1.24	3.66	$Q, E_{2\delta}, T_{3t}$	第四系沉积物、泥灰岩、泥岩、	丰富烃类气体	
							泥质粉砂岩、粉砂质泥岩		

表1 鸭湖地区天然气水合物调查井钻探概况 Table 1 Overview of gas hydrate investigation wells in Duck Lake area

注:地层代号同图2

区成功钻获天然气水合物实物样品以来,有关针 对中国陆域冻土区天然气水合物成藏系统地研究 也在不断深入。王平康等^[5]基于祁连山冻土区天 然气水合物勘探实践,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,并 指出,这四大控矿因素的精细研究,对于了解天然 气水合物分布规律具有重要的指导作用。卢振权 等™通过对祁连山冻土区已知天然气水合物钻孔 资料的详细研究,认为祁连山冻土区由于烃类生 成体系、流体运移体系、成藏富集体系的耦合与匹 配关系在不同钻探区具有很大的差异性,从而影 响该区天然气水合物在横向平面上和纵向剖面上 的成藏与分布不均性。翟刚毅等阿运用由烃类生 成体系、流体运移体系、成藏富集体系构成的天然 气水合物成矿系统理论,阐述了祁连山冻土区天 然气水合物成藏作用过程,总结提出了天然气水 合物成矿系统模式,进而探讨了天然气水合物成 矿的控制因素。在不断完善陆域冻土区天然气水 合物成藏系统和指导下,祁连山冻土区近年来在 天然气水合物"扩边"勘查中取得了一系列找矿新 发现。可见,有关陆域冻土区天然气水合物成藏 系统的研究,虽然在表述角度和形式上有所差异, 但实质上都是围绕影响天然气水合物成藏的冻 土、气源、储集及构造等地质因素展开的。基于 此,通过对西藏羌塘盆地鸭湖地区冻土条件、气源 条件、储集条件、构造条件等的分析,将有助于进 一步明确该区天然气水合物的成藏潜力。

- 3 天然气水合物成藏条件
- 3.1 **冻土条件**

冻土是陆域冻土区天然气水合物形成的必要

条件,主要通过控制p-T条件限制天然气水合物稳 定带的空间范围。在中国陆域冻土区天然气水合 物调查中,因音频大地电磁测深(AMT)对冻土层反 映灵敏,能有效探测到冻土层底界展布,常利用 AMT开展面上冻土调查,同时,通过实钻井温测井 测得的冻土厚度对AMT数据进行校正,最终获得 一个地区面上的冻土层厚度分布图。鸭湖地区 AMT 冻土调查结果显示,该区冻土层整体厚度为 55~90m,最厚处约为120m,冻土发育状况明显受断 层和水系分布影响,局部发育季节性冻土(图3)。 该区冻土地貌发育,见数个呈丘状隆起的冻胀丘, 底部直径大小不一,最大直径可达20m,高2m,表面 存在纵横交错的裂缝,最大裂缝宽度可达20cm,局 部裂缝见地下水溢出。根据对同一冻胀丘不同时 间段的观察,随地表气温不断上升,冻胀丘规模逐 渐缩小,甚至消失(图4)。可见,鸭湖地区地表温度 随季节变化存在明显的升温现象。钻探调查结果 显示,鸭湖地区冻土层自上而下由冻融层、含冰沉 积物冻土层、含冰基岩冻土层和非含冰基岩冻土层 组成[38]。其中,含冰沉积物冻土层发育特征最明显, 在含冰沉积物冻土层中,含冰量与沉积物粒度密切 相关,粗沙、砾沉积物中的含冰量明显多于细沙和 粘土中的含冰量;粗粒沉积物中冰产状主要以脉 状、网状、块状为主,而细粒沉积物中冰产状主要以 浸染状、层状和裂隙状为主,这主要与细粒粘土层 均质性程度高于粗粒沙砾层有关(图版 I)。同时, 含冰冻土层的发育除影响天然气水合物p-T条件 外,还对浅层烃类气体封盖具有重要的作用。实验 结果表明,随着含冰饱和度的增加,甲烷气体渗透 率降低,当含冰饱和度达到80%时,能完全有效地封 盖住甲烷气体^[38]。钻井井温测井结果显示,QK-2



图 2 鸭湖地区地质图^①及天然气水合物地质调查井位置 Fig. 2 Geological map of Duck Lake area and location of gas hydrate investigation wells

井冻土层厚度为38.0m,QK-7井冻土层厚度达 120.0m,与AMT冻土调查结果较为一致,冻土层以 下地温梯度介于2.15~3.66℃/100m之间。仅QK-7 井测得冻土层以内地温梯度为1.24℃/100m(表1)。

3.2 气源条件

QK-2井钻探过程中,由于未引进气测录井技



图 3 鸭湖地区冻土厚度分布 Fig. 3 Thickness distribution of permafrost in Duck Lake area



图 4 鸭湖地区地表季节性冻胀丘发育 Fig. 4 Status of seasonal frost heave hill in Duck Lake area

术,仅利用现场气相色谱仪对岩心顶空气样品进行 测试,测试结果显示,岩心顶空气中甲烷含量较低, 但有随深度增加的趋势。在QK-6井钻探过程中, 井口涌气现象明显,利用可燃气体检测仪测试井口 存在较高浓度的可燃气体(图5),特别在井深 220.13~246.40m的第四系沉积物中发现强烈烃类气 体异常,可燃气体检测仪报警不断,检测值(LEL)经 折算成纯甲烷浓度介于4680×10⁻⁶~5960×10⁻⁶之间。QK-7井气测录井结果显示,在192~640m多个 岩层段发现烃类气体异常,气体异常层段累计厚度 达135m,唢呐湖组全烃含量最高为4010×10⁻⁶,甲烷 含量最高为1409×10⁻⁶,土门格拉组全烃含量最高为 4544×10⁻⁶,甲烷含量最高为3309×10⁻⁶。对比3口井 的气测结果(图6),发现在浅部地层,甲烷浓度在区



图 5 QK-6井浅层钻遇高压烃类气体 Fig. 5 High pressure hydrocarbon gases intersected by QK-6 in the shallow formation a—井口见强烈气体溢出;b—井口检测显示存在烃类气体异常



图版 I Plate I

a.QK-6井在井深4.40m发育浸染状冰;b.QK-6井在井深4.50m发育块状冰;c.QK-6井在井深6.03m发育网状冰; d.QK-6井在井深7.60m发育裂隙状冰;e.QK-6井在井深13.22m发育块状冰;f.QK-6井在井深14.70m发育层状冰

域上有由东往西逐渐增大的趋势;在QK-7井中, 土门格拉组甲烷所占全烃比重明显高于唢呐湖 组,全烃及甲烷含量具有随深度逐渐增大的趋 势。钻井出口泥浆和岩心顶空气样品C同位素测 试结果显示,在气体异常层段,QK-7井泥浆顶空 气甲烷同位素值分布范围为-19.676‰~-18.302‰, 平均值为-18.9837‰,岩心顶空气甲烷同位素值分布 范围为-19.632‰~-18.137‰,平均值为-18.5438‰。 据戴金星¹³⁹建立的天然气成因类型划分图版(图7), 投点结果显示,样品点主要集中于煤成气区域内,说 明鸭湖地区发现的烃类气体具有煤成气成因,指示其 来自深部的土门格拉组的含煤地层。QK-2井土门



investigation wells in Duck Lake area

1一第四系;2一渐新世唢呐湖组;3一上三叠统土门格拉组;4一第四纪沉积物;

5--泥岩;6--粉砂质泥岩;7--泥质粉砂岩;8--细砂岩;9-中砂岩

格拉组烃源岩评价结果显示^{№0},土门格拉组烃源岩有 机质丰度总体不高,其中一套以深灰色-灰黑色为主 的泥质岩总有机碳含量较高(TOC介于0.70%~0.83% 之间),为中等烃源岩,局部甚至可达好烃源岩(TOC 含量达到5.95%),有机质类型主要为Ⅲ型,其热演化 程度较高(*R*。介于1.16%~1.19%之间),已进入成熟-高成熟阶段,可能已经开始形成湿气。QK-7井21个 泥岩样品测试结果显示,TOC介于0.21%~9.58%之 间,平均值为1.82%,为中等-好烃源岩;有机质类型 以ⅡB型为主,热解温度大于450℃,为成熟-高成熟 阶段。可见,目前在鸭湖地区浅层发现的烃类气体虽 以煤成气为主,但也不排除发现油型气的可能。由于 目前钻井揭露的地层较浅,虽然QK-7井在635.5m 处钻遇厚约10cm的劣质煤层,但对于该区气源条件 的深入认识,以及煤成气和油型气对于成矿气源的贡 献还有待进一步调查和研究。

3.3 储集条件

鸭湖地区钻探调查结果显示(表1;图6),第四



图 7 鸭湖地区 QK-7井烃类气体δ¹³C₁-C₁/C₂₊₃关系 Fig. 7 Relationship of δ¹³C₁-C₁/C₂₊₃ of hydrocarbon gases from QK-7 in Duck Lake area

系、渐新世唢呐湖组和上三叠统土门格拉组均可作 为潜在的天然气水合物储集层(表2)。研究区第四 系主要以松散沉积物为主,成岩作用差,孔隙连通 性好,储集类型以孔隙型为主,因局部第四系沉积 厚度大,故可作为天然气水合物优质储层。唢呐湖 组岩性主要为泥岩、泥灰岩、粗砂岩、中砂岩、细砂 岩和粉砂岩,但局部层段岩石胶结程度低,成岩作 用较差,因此,储集类型以孔隙型为主,裂隙型次 之,储集性较好。上三叠统土门格拉组岩性主要为 粗砂岩、中砂岩、细砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩和泥 岩,成岩作用强。QK-2井土门格拉组多个层段发 育泥质充隙裂隙、且多以高角度裂隙为主,最大裂 隙宽度约8mm,局部层段发育开启性裂缝,不含充 填物,岩心提至地面后,岩心多沿裂隙面开裂(图 8)。土门格拉组砂岩样品孔隙度、渗透率测试结果 表明,孔隙度为1.7%~8.7%,平均值为5.28%,气体渗

透率为 0.0146×10⁻³~0.78×10⁻³µm²,平均值为 0.115×10⁻³µm²,属于特低孔超低渗储层类型。与 祁连山木里冻土区含天然气水合物钻井岩心砂岩 孔隙度(平均值为5.08%)和气体渗透率(平均值为 0.051×10⁻³µm²)相比,孔隙度相当,气体渗透率略 高。另外,岩石水平和垂直方向孔隙度和渗透率测 试结果也相同,其中垂直方向渗透率明显高于水平 方向渗透率,有利于烃类气体的垂向运移。由此可 见,土门格拉组亦可作为天然气水合物储层,储集 类型以裂隙型为主,孔隙型次之,但储集性一般。

3.4 构造条件

鸭湖地区在区域上主体构造方向为北西一南 东向,多为逆冲断层(图2)。钻探调查结果显示, QK-2井和QK-7井岩心中存在多个断层破碎带及 多层断层泥,QK-2井中,在54.14~62.14m、75.85~ 76.50m、96.95~99.55m和223.20~223.70m发育断层

表2 鸭湖地区天然气水合物潜在储集岩类型

Table 2 Types of gas hydrate potential reservoir rocks in Duck Lake area

地 层	岩石类型	成岩作用	主要储集类型	储集性
第四系(Q)	松散沉积物	差	孔隙型	好
渐新世唢呐湖组(E2s)	泥岩、泥灰岩、粗砂岩、中砂岩、细砂岩、粉砂岩	较差	孔隙型为主,裂隙型次之	较好
上三叠统土门格拉组(T ₃ t)	粗砂岩、中砂岩、细砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩、泥岩	强	裂隙型为主,孔隙型次之	一般



图 8 QK-2井土门格拉组多层段发育高角度泥质充填和开启性裂缝 Fig. 8 High-angle mud-filling and opening fractures in the Tumengela Formation in QK-2 a一井深 117.95~118.10m;b一井深 185.7~189.35m

破碎带,最大厚度达8m,以灰色断层泥夹杂砾石碎块 并见明显擦痕为特征,且岩心破碎较严重。断层泥主 要发育在深度224m以浅,见10层,厚度介于0.19~ 1.8m之间,平均厚度0.76m,以弱固结的黄褐色、灰 色、深灰色泥状岩石为特征,局部夹泥砾碎块。在 QK-7井中,仅在深度347.95~350.4m和深度355.21~ 356.75m发育2层断层破碎带,局部见滑塌构造,含粉 砂质砾石,岩心破碎。可见,钻探区受构造作用影响 明显,断裂系统发育,不仅能为气体运移提供通道,还能提供有效的储集空间。二维地震调查结果显示(图9),在大的地质构造背景下,钻探区存在着多期逆冲断层,而且切穿多套沉积地层。QK-6井和QK-7井在浅层钻遇丰富烃类气体,进一步证实这类断层为深部烃类气体向浅层运移提供了有效通道。

3.5 其他条件

自 2009年 Collett 等³⁴提出天然气水合物含油



气系统(Gas hydrate petroleum system)以来,目前 该系统已被用来评价地质条件对自然界天然气 水合物产出的控制。该系统在评价天然气水合 物成藏时,除要求分析温-压稳定条件(冻土、地 温条件)、气源、气的运移(构造条件)、储集条件 外,还强调了水的来源及系统要素的形成时间的 重要性。

鸭湖地区地表水系发育,河流展布多沿断裂方 向(图2)。OK-2和OK-6井在钻探过程中,不仅在 浅层钻遇含冰的沉积物冻土层,还在深层钻遇涌水 层,可见地下水较丰富。通过对QK-6井5个不同 深度含冰沉积物样品冰融水的H、O同位素分析,显 示H同位素 δD 值介于-124‰~108‰之间,平均 115.8‰;O同位素δ¹⁸O值介于-15.1‰~-13.3‰之 间,平均为-13.94‰。对比各种不同水体的H、O同 位素分布范围^[41-42]可以发现,冰融水的H、O同位素 值指示水来源于大气降雪。可见,大气降雪融水是 钻探区主要的补给水源。冰融水地球化学分析结 果显示,冰融水矿化度为65.533~752.826mg/L,平均 为378.538mg/L,表现为淡水特征。样品中阳离子 主要由 Ca²⁺、Na⁺、Mg²⁺和少量 K⁺组成,其中 Ca²⁺浓度 为 29.480~68.610mg/L, 平均为 47.722mg/L; Na⁺浓 度为3.290~90.940mg/L,平均为45.240mg/L;Mg²⁺浓 度为6.800~68.170mg/L,平均为40.082mg/L。阴离 子主要由 Cl⁻、SO₄²⁻和 NO₃⁻组成,其中 Cl⁻浓度介于 10.630~223.400mg/L之间,平均为117.806mg/L; SO4²浓度为5.520~241.200mg/L,平均为96.046mg/L; NO3⁻浓度为3.820~42.930mg/L,平均为21.620mg/L。 此外,样品还检出少量的B和Sr及微量的Fe、Li、Ba、 Mn等元素。因此从水的来源和矿化度角度看,鸭 湖地区水源补给是有效的,且淡水有利于天然气水 合物的形成。

因鸭湖地区地处青藏高原羌塘盆地的中央隆 起带中部,构造运动引起的地形隆升时间、烃源 岩生排烃史、冻土形成时间,新构造运动产生的 断裂系统形成时间的相互匹配、耦合关系在系统 形成时间中至关重要。QK-6和QK-7井在浅层 钻遇高压烃类气体,表明深部烃源岩生排烃产生 的烃类气体沿断裂系统向上运移至浅部地层,后 被含冰冻土层或致密泥岩层封盖。可见,鸭湖地 区烃类生成体系、流体运移体系、成藏富集体系 是相对完整的。虽然各系统要素形成时间各有 前后,但各要素间仍存在一定的耦合关系,这对 于天然气水合物形成、聚集、成藏非常有利。

4 讨 论

基于鸭湖地区天然气水合物成藏条件的分析 可知,在冻土条件方面,鸭湖地区局部冻土条件较 好,冻土厚度可达120m,并且浅层含冰冻土层发育, 对于浅层气的封盖具有重要作用;在地温梯度方 面,冻土层以内地温梯度为1.24℃/100m,冻土层以 下地温梯度介于2.15~3.66℃/100m之间,地温相对 较低;在气源条件方面,已发现具有煤成气成因的 丰富烃类气体。据土门格拉组烃源岩评价结果,不 排除发现油型气的可能,可见气源条件良好;在储 集条件方面,厚层第四系松散沉积物储集性最好, 成岩作用较差的唢呐湖组次之,土门格拉组含煤岩 系一般;在构造条件方面,区域上大的逆冲断层能 为深部烃类气体向上运移提供良好通道,新构造运 动产生的次生断裂系统既便于烃类气体在浅部运 移,又可以提供良好的储集空间;在水的来源方面, 以淡水补给为主,便于天然气水合物形成;在系统 要素的形成时间方面,虽然各系统要素形成时间各 有前后,但仍存在一定的耦合关系。

为了进一步探讨鸭湖地区天然气水合物成藏 潜力,利用QK-7井钻探调查获得地温梯度、气体 组分等实测参数,结合AMT冻土厚度调查成果,开 展天然气水合物稳定带厚度和底界深度预测。模 拟时,采用的地温梯度参数包括:冻土层以内地温 梯度为1.24℃/100m,冻土层以下地温梯度为 3.66℃/100m。在气体组分参数选择方面,考虑到唢 呐湖组和土门格拉组中甲烷所占全烃比重明显不 同,推测2套地层中发现的烃类异常可能受控于2 个不同的断裂系统。因此,分别选取唢呐湖组和土 门格拉组甲烷含量最高值进行2组预测研究。气测 录井显示,在唢呐湖组,甲烷浓度最高为1409×10-6 时,乙烷浓度为155×10⁻⁶,丙烷浓度为99×10⁻⁶,其他 烃类及二氧化碳浓度极低可忽略,气体组分归一化 后,甲烷为85%,乙烷为9%,丙烷为6%;在土门格拉 组,甲烷浓度最高为3309×10⁻⁶时,乙烷浓度为72× 10⁻⁶,丙烷等烃类及二氧化碳浓度极低可忽略,气体 组分归一化后,甲烷为98%,乙烷为2%。

采用的计算模型包括静岩压力与静水压力计 算模型和温压模型。



图 10 鸭湖地区 85%甲烷水合物稳定带厚度 Fig. 10 Thickness of 85% methane hydrate stability zone in Duck Lake area

静岩压力:p_j=p₀+ ρ_jgh_f· 10⁶;
静水压力:p_s=p_j+ ρ_sgh_s· 10⁶
式中:
p₀为地表大气压力(0.05MPa); ρ_j为冻土层密

度,采用2.0×10³kg/m³;g为重力加速度(9.81m/s²); h_f 为冻土层内深度,单位为 $m;h_s$ 为冻土层底界向 下深度,单位为 $m;\rho_s$ 为冻土层下孔隙流体密度, 采用1.0×10³kg/m³。



图 11 鸭湖地区 85%甲烷水合物稳定带底界埋深 Fig. 11 The depth of bottom of the 85% methane hydrate stability zone in the Duck Lake area



图 12 鸭湖地区 98%甲烷水合物稳定带厚度 Fig. 12 Thickness of 98% methane hydrate stability zone in Duck Lake area

温压模型则利用 Solan 的 CSMHYD 相平衡曲 线计算程序,获得了不同气体组分下水合物形成的 温压条件,即相平衡条件。

在天然气水合物稳定带厚度及底界深度计算时,由于AMT冻土厚度调查数据量大,本文采用分

区间计算,线性插值获得各点水合物厚度,即将冻 土层分为15个区间,分别为0、10m、20m、30m、40m、 50m、60m、70m、80m、90m、100m、110m、120m、 130m、140m、150m,计算冻土层在该厚度不同温度、 不同深度下产生的静岩或静水压力,与相平衡条件



图 13 鸭湖地区 98%甲烷水合物稳定带底界埋深 Fig. 13 The depth of the bottom of the 98% methane hydrate stability zone in the Duck Lake area

对比,计算出水合物上下临界点温度,根据地温梯度,计算出水合物赋存厚度与深度,从而获得冻土 层厚各个区间关于水合物上下临界点的不同线性 插值函数。然后把各个冻土层厚数据代到对应插 值函数,从而获得所有点位水合物赋存厚度与深度 数据。

模拟结果显示,当甲烷为85%、乙烷为9%、丙烷 为6%时,天然气水合物稳定带厚度分布变化与冻土 厚度分布变化基本一致,稳定带厚度为400~630m, 大多数地区稳定带厚度为480~530m(图10),稳定 带底界埋深的海拔高程为4280~4560m(图11),按 鸭湖地区平均海拔4960m推算,稳定带底界深度为 400~680m。当甲烷为98%、乙烷为2%时,天然气水 合物稳定带厚度急剧减薄,大部分地区仅有0~30m, 局部最厚仅150m,在南部局部区域已不存在天然气 水合物稳定带(图12),稳定带底界埋深海拔高程为 4720~5140m(图13),大多与鸭湖地区平均海拔 4960m相当,局部地区稳定带底界最深仅达240m。 可见,随着甲烷所占全烃比重增加,天然气水合物 稳定带厚度缩减明显,局部地区已不具备形成天然 气水合物的条件。QK-7并气测录井结果显示(图 6),唢呐湖组气测异常主要出现在340m以浅,而土 门格拉组气测异常主要出现在560m以深,虽然唢 呐湖组的气体来源及受构造的控制作用仍需要深 入探究,但结合模拟结果,认为唢呐湖组比土门格 拉组更具备天然气水合物成藏潜力,而土门格拉组 自身具备较强的生排烃能力,可作为寻找常规油气 或页岩气的一个重要层位。

5 结 论

(1)鸭湖地区局部地区具有较好的冻土、地温、 气源、储集、构造、水源等条件,具备一定的天然气 水合物成藏潜力。浅层烃类气体的发现为天然气 水合物找矿提供了良好线索。但是充足气体的持 续供应是形成天然气水合物的一个必要条件,即只 有充足的气体供应,气体浓度大于其在水中的溶解 度时,天然气水合物才能在稳定带内产出。因此, 在鸭湖地区继续寻找充足的烃类气源是下一步天 然气水合物调查的主要方向。

(2)基于钻井实测参数的天然气水合物稳定带 厚度及底界深度预测结果显示,当甲烷为85%、乙烷 为9%、丙烷为6%时,天然气水合物稳定带厚度变化 与冻土厚度变化基本一致,稳定带厚度为400~630m,底界深度为400~680m。当甲烷98%、乙烷为2%时,天然气水合物稳定带厚度急剧减薄,大部分地区仅有0~30m,最厚仅有150m,局部地区稳定带底界最深仅为240m。结合气测录井结果,认为鸭湖地区渐新世唢呐湖组比上三叠统土门格拉组更具备天然气水合物成藏潜力,而土门格拉组自身具备较强的生排烃能力,可作为寻找常规油气或页岩气的一个重要层位。

致谢:野外工作期间得到西藏地勘局地热地质 大队顿珠经理、米玛经理、普次主任、屈志强机长、 何兴国副机长,中石化胜利石油工程有限公司地质 录井公司王昊经理,贵仁科技有限公司方纬总监, 西藏金轩汽车租赁咨询公司金开活经理等同志的 大力帮助,在此一并表示衷心的感谢。

参考文献

- [1]Kvenvolden K A. A primer in gas hydrate[C]//Howell D G. The future of energy gases. U. S. Geological Survey, 1993, 1570: 279–292.
- [2]Sloan E D. Clathrate Hydrate of Natural Gases (Second edit) [M]. New York: Marcel Dekker Inc., 1998: 1–628.
- [3]Collett T S. Permafrost-associated gas hydrate[C]//Max M D. Natural gas hydrate in oceanic and permafrost environments. The Netherlands, Kluwer Academic Publishers, 2000: 43–60.
- [4]Kvenvolden K A, Lorenson T D. The global occurrence of natural gas hydrate[J]. American Geophysical Union, 2001, 124: 3–18.
- [5]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):1761-1770.
- [6]Dallimore S R, Collett T S. Summary and implication of the Mallik 2002 gas hydrate production research well program[C]//Dallimore S R, Collett T S. Scientific Results from the Mallik 2002 Gas Hydrate Production Research Well Program, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada. Geological Survey of Canada, 2005, 585: 1–36.
- [7]Makogon Y F, Holditch S A, Makogon T Y. Natural gas-hydrates— A potential energy source for the 21st Century[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2007, 56: 14–31.
- [8]祝有海,卢振权,谢锡林.青藏高原天然气水合物潜在分布区预测[J].地质通报,2011,30(12):1918-1926.
- [9]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.
- [10]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.
- [11]张立新,徐学祖,马巍. 青藏高原多年冻土区与天然气水合物[]].天然气地球科学,2001,12(1/2):22-26.
- [12]黄朋,潘桂棠,王立全,等.青藏高原天然气水合物资源预测[J]. 地质通报,2002,21(11):794-798.
- [13]伊海生,时志强,刘文军.青藏高原多年冻土区天然气水合物形

成潜力及远景[]]. 西藏地质, 2002, 20(1): 46-49.

- [14]刘怀山,韩晓丽.西藏羌塘盆地天然气水合物地球物理特征识别 与预测[J].西北地质,2004,37(4):33-38.
- [15]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[]].地球物理学报,2005,48(1):165-172.
- [16]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[]]. 地质通报, 2006, 25(1/2): 29-33.
- [17] 库新勃, 吴青柏, 蒋观利. 青藏高原多年冻土区天然气水合物可能分布范围研究[]]. 天然气地球科学, 2007, 18(4): 588-592.
- [18]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.
- [19]He J, Wang J, Fu X, et al. Assessing in the conditions favorable for the occurrence of gas hydrate in the Tuonamu area Qiangtang Basin, Qinghai–Tibetan, China[J]. Energy Conversion and Management, 2012, 53: 11–18.
- [20]Fu X, Wang J, Tan F, et al. Gas hydrate formation and accumulation potential in the Qiangtang Basin, northern Tibet, China[J]. Energy Conversion and Management, 2013, 73: 186–194.
- [21]刘增乾, 徐宪, 潘桂棠. 青藏高原大地构造与形成演化[M]. 北京: 地质出版社, 1990: 9-34.
- [22]余光明, 王成善. 西藏特提斯沉积地质[M]. 北京: 地质出版社, 1990: 94-98.
- [23]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.
- [24]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.
- [25]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, 2000.
- [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,2001:224-225.
- [27]王成善, 伊海生, 刘池洋, 等. 西藏羌塘盆地古油藏发现及其意义[J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(2): 139-143.
- [28]Xu W, Ruppel C. Predicting the occurrence, distribution, and evolution of methane gas hydrate in porous marine sediments[J]. Journal of Geophysical Research, 1999, 104(B3): 5081–5095.

- [29]Bunz S, Mienert J, Bemdt C. Geological controls on the storage gas-hydrate system of the mid-Norweigian continental margian[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2003, 209: 291–307.
- [30]Milkov A V, Clapool G, Lee Y J, et al. Gas hydrate systems at Hydrate Ridge offshore Oregon inferred from molecular and isotopic properties of hydrate-bound and void gases[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2005, 69(4): 1007–1026.
- [31]吴能友, 张海啟, 杨胜雄, 等. 南海神狐海域天然气水合物成藏系 统初探[J]. 天然气工业, 2007, 27(9):1-6.
- [32]吴能友,梁金强,王宏斌,等.海洋天然气水合物成藏系统研究进展.现代地质,2008,22(3):356-362.
- [33]卢振权,吴能友,陈建文,等.试论天然气水合物成藏系统.现代 地质,2008,22(3): 363-375.
- [34]Collett T S, Johnson A, Knapp C, et al. Natural Gas Hydrate– A Review[C]//Collett T S, Johnson A, Knapp C, et al. Natural Gas Hydrates–Energy Resource Potential and Associated Geologic Hazards. AAPG Memoir, 2009, 89: 153–162.
- [35]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,2010: 52.
- [36]卢振权, 祝有海, 张永勤,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, 2013: 459-461.
- [37] 翟刚毅, 卢振权, 卢海龙, 等. 祁连山冻土区天然气水合物成矿系 统[]]. 矿物岩石, 2014, 34(4):79-92.
- [38]王平康, 祝有海, 张旭辉, 等. 羌塘盆地冻土结构特征及其对天然 气水合物成藏的影响[J]. 沉积与特提斯地质, 2015, 35(1): 57-67.
- [39]戴金星. 各类天然气的成因鉴别[J]. 中国海上油气: 地质, 1992, 1: 11-19.
- [40]肖睿. 西藏羌塘盆地天然气水合物气源研究[D]. 中国地质科学 院硕士学位论文, 2015.
- [41]杨润田,林凤桐. 多年冻土区水文地质及工程地质学[M]. 哈尔滨:东北林业大学出版社, 1986: 134.
- [42]陈俊, 王鹤年. 地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 116.
- ①成都地质矿产研究所.《吐错幅》(145C003004)(比例尺1:250000) 地质调查报告.2010.