

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2020.04.01

引用格式: 祝有海,张永勤,方慧,等. 中国陆域天然气水合物调查研究主要进展[J]. 中国地质调查,2020,7(4): 1-9.

中国陆域天然气水合物调查研究主要进展

祝有海¹, 张永勤², 方慧³, 卢振权¹, 庞守吉¹, 张帅¹, 肖睿¹

(1. 中国地质调查局油气资源调查中心, 北京 100083; 2. 中国地质科学院勘探技术研究所, 廊坊 065000; 3. 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 廊坊 065000)

摘要: 我国是世界上既有海域水合物也有陆域水合物的少数几个国家之一。中国地质调查局高度重视陆域水合物调查研究,2016年正式设立“陆域天然气水合物资源勘查与试采工程”,通过对我国重点冻土区开展地质、地球物理和钻探调查,研发有效的陆域水合物调查、钻探和资源评价技术,初步摸清资源家底,评价资源潜力。自2002年开始探索性调查以来,已在青海省发现木里天然气水合物产地1处、昆仑山垭口盆地和乌丽地区疑似产地2处及系列找矿线索,评价出南祁连盆地、羌塘盆地及漠河盆地三大成矿远景区、12个成矿区带,资源潜力巨大;在祁连山木里地区成功实施单直井和水平对接井试采,并取得了陆域天然气水合物成矿理论、勘采技术、环境调查和平台建设系列成果。以上成果有力推进了我国天然气水合物资源勘查试采进程,支撑国务院将天然气水合物设为第173个新矿种,初步形成“海陆并举、资环并重”的良好局面。

关键词: 天然气水合物; 冻土; 资源调查评价; 试采; 中国

中图分类号: P618.13; TE122

文献标志码: A

文章编号: 2095-8706(2020)04-0001-09

0 引言

天然气水合物是低温高压条件下由气体与水形成的固态类冰状物质,主要产于海底沉积物和陆上永久冻土带。我国是世界第三大冻土国,冻土区面积达 $215 \times 10^4 \text{ km}^2$,占国土面积的22.4%^[1]。中国地质调查局高度重视陆域天然气水合物的调查研究,2002年趁青藏铁路建设之机开始探索性调查。初步的地质、地球物理、地球化学和遥感调查结果显示,我国冻土区具备较好的天然气水合物成矿条件和找矿前景。2008年在祁连山木里地区成功钻获天然气水合物实物样品,证实我国是世界上既有海域水合物也有陆域水合物的少数几个国家之一^[2];2011年全面启动了陆域天然气水合物资源调查、试采及其配套的研发工作,在青海南部乌丽地区发现天然气水合物赋存标志,在青南藏北、祁连山和东北冻土区发现一系列泥火山、冷泉碳酸

盐、高压浅层气、富烃异常等找矿线索和良好的油气显示;分别于2011年和2016年在祁连山木里地区成功实施单直井、“山”字型水平对接井试采工程,取得了试采技术的重大突破,有效推进了我国天然气水合物资源勘查试采进程。

1 总体目标与主要任务

“陆域天然气水合物资源勘查与试采工程”隶属于“海洋地质调查计划”,是“天然气水合物资源勘查与试采工程(‘127’工程)”国家专项的重要组成部分。陆域天然气水合物资源勘查与试采工程自2011年开始实施,2011—2015年为计划项目,2016—2018年改为工程,由中国地质调查局油气资源调查中心、中国地质科学院勘探技术研究所和中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所等单位承担。

工程总体目标任务是:对我国重点冻土区开展

收稿日期: 2020-07-10; 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勘查与试采工程(编号: 0429)”项目资助。

第一作者简介: 祝有海(1963—),男,研究员,“陆域天然气水合物资源勘查与试采工程”首席专家,主要从事天然气水合物、油气地质调查与评价。Email: 1768210693@qq.com。

地质、地球物理和钻探调查,尽快实现陆域水合物战略性新发现,评价资源潜力,初步摸清资源家底;研发有效的陆域水合物调查、钻探、试采和资源评价技术,为陆域水合物资源调查与评价提供技术支撑。

2 主要进展与成果

2.1 发现木里天然气水合物产地1处、昆仑山垭口盆地和乌丽地区疑似产地2处及系列找矿线索

2008年11月,在祁连山木里地区成功钻获天然气水合物实物样品,我国是世界上第一个在中纬度高山冻土区发现天然气水合物的国家(图1)。木里地区天然气水合物均产于冻土层之下,埋深133~396 m,主要赋存于中侏罗统江仓组,水合物以薄层状、片状、团块状赋存于粉砂岩、泥岩、油页岩的裂隙面中,或是以浸染状赋存于细粉砂岩的孔隙中。水合物中的气体组分较为复杂,除甲烷外还含有较高的乙烷、丙烷等重烃组分,部分样品还含有一定量的CO₂,是一种较为罕见的水合物类型^[3]。

昆仑山垭口盆地为上新世—中更新世断陷盆地,面积约50 km²,沉积了约600 m厚的新近纪至第四纪沉积物。2013年施工的昆钻3井,发现了一系列天然气水合物赋存证据,如在250 m以下的多个岩层中发现大量气体释放现象,甲烷含量达22%~32%,且具有天然气水合物分解的间歇性释放特征,这些气体释放层位还伴有密度降低、侧向电阻率和声波波速增大等测井标志,并发现有与水合物分解有关的自生碳酸盐、黄铁矿等自生矿物标志,显示这一地区可能赋存有天然气水合物^[4]。

2015年,青海南部乌丽地区TK-2并于52~241 m间的二叠系那益雄组岩心中,发现有强烈冒泡、“冒汗”现象(水合物分解后释放出气体和水),并有红外低温异常、点火助燃等标志,测井曲线上呈现出密度降低、声波速度增大、侧向电阻率增高等标志,并有泄气构造、自生矿物及盐析现象等,具有明显的天然气水合物赋存标志^[5]。此外,2016年施工的TK-3井也有类似现象,且气测录井结果显示,在那益雄组多层段发现丰富的CO₂显示,CO₂含量最高达91.09%,平均为31.03%,暗示该地区有可能存在CO₂水合物。

此外,在羌塘盆地、南祁连盆地和漠河盆地发现一系列天然气水合物和油气找矿线索,主要包括:①羌塘盆地雀莫错地区发现厚层烃源岩和良好的烃类气体显示,其中,QK-8井三叠系巴贡组深灰、灰黑色泥岩厚度达342 m,总烃最高5.425%(甲烷最高0.825%),波里拉组总烃最高5.349%(甲烷最高3.596%);②羌塘盆地鸭湖地区发现浅层高压气体;③羌塘盆地戈木错、喷呐湖、吐错地区发现泥火山群,有些泥火山还有气体正在冒出,为现代泥火山;④班公湖—怒江缝合带及新疆甜水海盆地发现大规模泥火山群及伴生的现代冷泉、冷泉碳酸盐;⑤藏北尼玛盆地发现良好含油显示,其中盆地东部发现东西长约80 km的地表沥青显示带,藏双地1井古近系牛堡组二段油页岩中发现一厚1.04 m的油斑、油迹显示层;⑥南祁连盆地木里坳陷发现良好油气显示,其中DK-9并于362.79~370.58 m钻遇厚约7.8 m的含油层段^[6],DK-10井钻进至52.9 m时出现气体持续涌出现象,现场简易测量显示气体流量约4 800 m³/d,达到工业气流标准;⑦南祁连盆地疏勒坳陷发现油迹油气显示现象;⑧漠河盆地MK-2井700 m以下发现多层烃类气体异常,MK-4井发现厚度超过300 m的漠河组湖相泥质烃源岩^[7]。

2.2 初步评价了陆域天然气水合物资源潜力

天然气水合物资源量是指地层(沉积物)中所蕴藏的水合物资源总量,不管发现与否以及能否被开发利用。国内外早期估算的水合物资源量均先依据温度、压力、气源等条件圈定出天然气水合物的潜在分布区分布面积,计算出稳定带厚度,再假定一些参数估算出潜在资源量^[8]。我国陆域天然气水合物资源量的早期估算结果差异较大,陈多福等^[9]估算的青藏高原资源量为0.12 × 10¹² ~ 240 ×

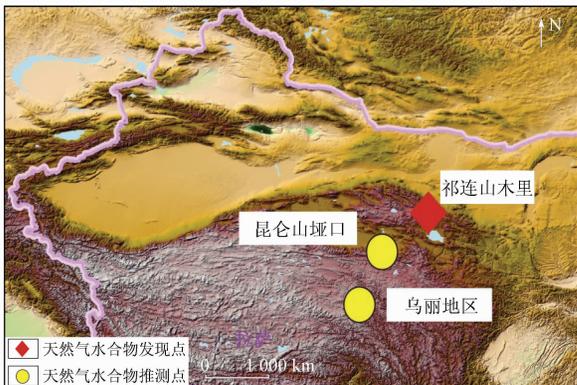


图1 中国天然气水合物主要分布

Fig.1 Distribution of natural gas hydrate in Chinese mainland

10^{12} m^3 , 库新勃等^[10]估算的青藏高原资源量为 $4.5 \times 10^{12} \sim 298 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。祝有海等^[11]预测羌塘盆地为 I 级远景区, 风火山—乌丽地区、祁连山和漠河盆地为 II 级远景区, 并运用体积法估算出青藏高原资源量为 $10.8 \times 10^{12} \sim 90.7 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 运用蒙特卡罗法估算出的资源量则为 $21.9 \times 10^{12} \sim 153 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 综合体积法和蒙特卡罗法后青藏高原的资源量约为 $70 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 漠河盆地资源量约为 $5.5 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 我国陆域总资源量约为 $75.5 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。

近年来, 系统梳理了我国陆域天然气水合物调查研究成果, 并依据冻土条件、气源条件、地质构造条件和已发现的各项异常标志(如泥火山、冷泉、自生矿物等)等, 共评价出南祁连盆地、羌塘盆地及漠河盆地三大成矿远景区, 并展开成矿区带划分与评价, 共圈定 12 个成矿区带, 其中羌塘盆地 7 个、南祁连盆地 2 个(图 2)、漠河盆地 3 个, 在调查程度较高的地区进一步评价到成矿区块。

同时, 选取勘查程度较高并已发现水合物实物的南祁连盆地木里坳陷聚乎更矿区作为刻度区, 运用体积法评价出天然气水合物资源量, 再运用类比法和成因法推广到南祁连盆地、羌塘盆地及漠河盆地, 计算出三大远景区的资源量接近十万亿立方

米, 显示出巨大的资源潜力。

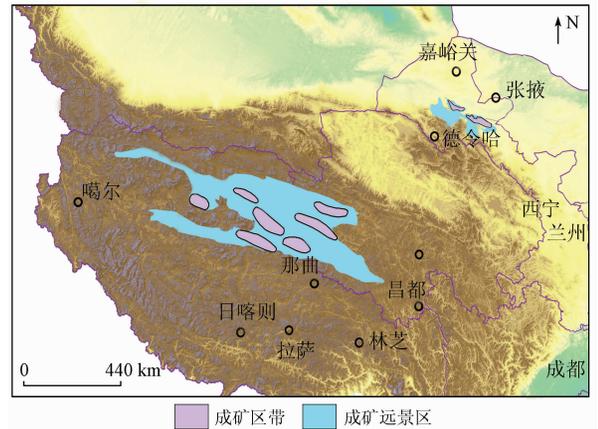


图 2 中国陆域冻土区天然气水合物成矿区带分布
Fig. 2 Classification of natural gas hydrate zones in permafrost regions of China

2.3 成功实施单直井、“山”字型水平对接井试采

近年来, 国内外均非常重视天然气水合物的试验性开采, 先后在俄罗斯索雅雅哈、加拿大马更些三角洲、中国祁连山、美国阿拉斯加北坡冻土区、日本南海海槽和中国南海神狐地区进行过开采试验(表 1), 水合物领域调查研究的重点有从资源调查逐渐向试采转变的发展趋势, 且水合物试采都从陆域冻土区先行试验, 再推广到海域水合物中。

表 1 全球天然气水合物试采状况

Tab. 1 Summary of global natural gas hydrate test production

区域	试采地点	试采时间	试采方法	试采井型	试采时长	最高日产量/ m^3	总产气量/ m^3
陆域冻土区	俄罗斯索雅雅哈 ^[12]	1971	降压 + 注入化学试剂	未知	断续生产近 50 a	未知	
	加拿大马更些 ^[13]	2002	加热	单直井	123.65 h	未知	516.0
		2007	降压 + 加热	单直井	12.5 h	搅乱	830.0
	中国青海木里	2008	降压	单直井	6.8 d (139 h)	未知	13 000.0
		2011	降压 + 加热	单直井	101 h	未知	95.0
美国阿拉斯加 ^[14]	2012	CO_2 置换 + 降压	水平井 (3 井对接)	23 d	136.6	1 078.4	
海域	日本南海海槽 ^[15-16]	2013	降压	单直井	6 d	20 000.0	120 000.0
		2017	降压	直井 (2 井)	(12 + 24) d	8 330.0	235 000.0
	中国南海神狐 ^[17-18]	2017	降压	单直井	60 d	35 000.0	309 000.0
		2017	固态硫化法	直井	未知	未知	81.0
		2020	降压	水平井	30 d	日均 28 700.0	861 400.0

2011 年 9—10 月, 运用降压法和加热法对祁连山木里地区天然气水合物成功进行了单直井试采。在 DK-8 试采井确定水合物产出层位后, 安装开采套管(花管)并固井止水, 然后在井底安装高压潜水泵, 对井深约 205 m 间的水合物层进行分层试采。

试采过程中, 启动孔底潜水泵进行排水, 随着水位的降低, 水合物储层的压力下降, 促使水合物分解释放出甲烷气体(图 3), 然后在地表回收。降压开采结束后, 采用电磁加热、太阳能加热和水蒸气加热进行试采。试采共断续进行 9 d, 累计 101 h, 产气量为 95 m^3 。

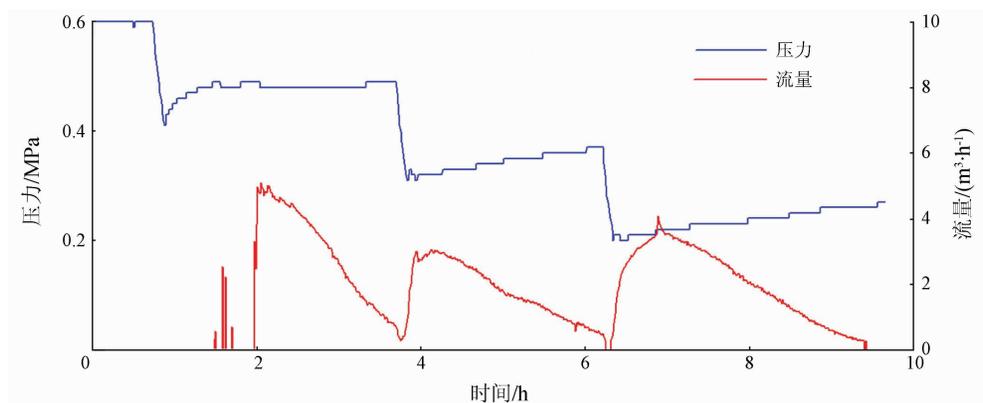


图3 祁连山木里地区DK-8试采井降压法试采的产气量及井底压力曲线

Fig. 3 Gas production by depressurization and bottomhole pressure curve of Hole DK-8, Muli area of Qilian Mountains

2016年10—11月,为提高开采效率和产气量,我们创新运用“山”字型水平对接井对祁连山木里地区的天然气水合物再次进行试采,由1口主井(SK-0)和水平距达629.7 m的2口分支井(SK-1和SK-2)组成(图4)。试采目标层为地下350 m

处的水合物富集层,试采方法为排水降压法。试采分2个阶段进行,累计生产23 d,总产气量1 078.4 m³,最高日产量136.55 m³。与2011年的单井试采相比,水平井试采产量明显提高,说明水平井是提高产量的有效方法。

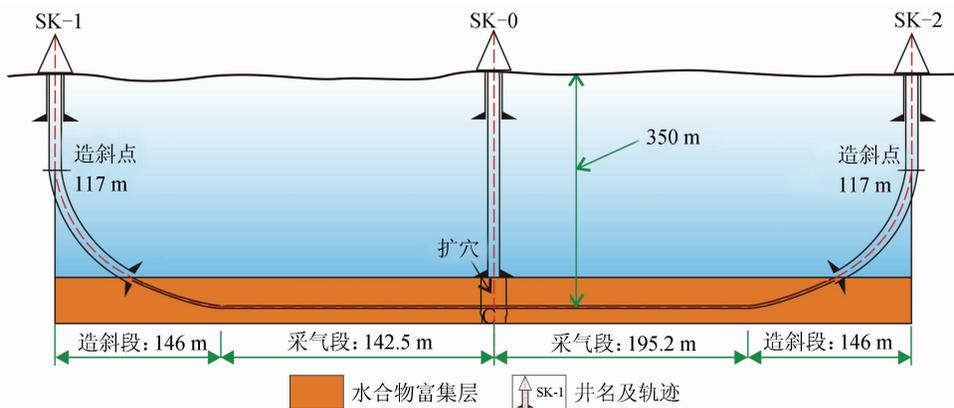


图4 祁连山木里地区“山”字型水平对接井结构

Fig. 4 Epsilon - type horizontal butt well structure in Muli area of Qilian Mountains

2.4 初步集成陆域天然气水合物成矿理论和勘查、钻采技术

我国陆域天然气水合物可能存在2种成矿模型(图5):一是以祁连山木里地区为代表的气源、断裂、冻土“三位一体”耦合的断裂式成矿模型,木里水合物的成矿气源应是来自于下伏侏罗系、三叠系、二叠系烃源岩的热解气,经断层或破碎带向上运移到水合物稳定带,在冻土层及压性断层的封堵作用下,形成天然气水合物;二是推测青藏高原还有可能存在泥火山式天然气水合物成矿模型,泥火山的形成需塑性地层、异常高压和运移通道3个要素,但要形成天然气水合物,还需深部含气流体缓慢运移到水合物稳定带等良好的匹配条件,否则,泥火山快速喷发并不利于形成天然气水合物,甚至其带来的高热量含气流体会引

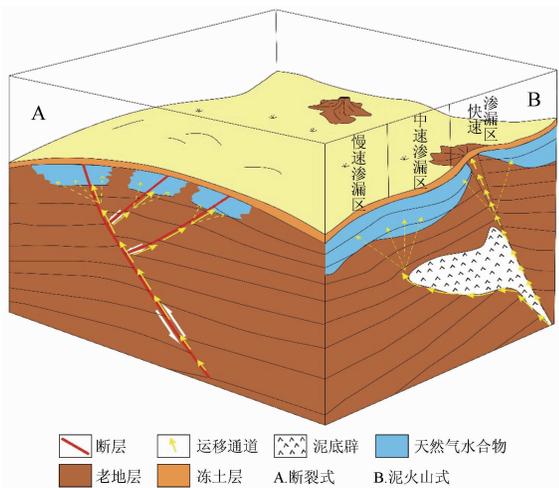


图5 青藏高原天然气水合物成矿模型
 Fig. 5 Natural gas hydrate formation model of Qinghai - Tibet Plateau

起热异常,可能导致天然气水合物的分解。

初步集成陆域水合物勘查技术^[18](图6)、试采技术^[19]和资源评价技术,主要包括:①集成了有效的冻土探测技术,运用温度测井、音频大地电磁(Audio - Frequency Magnetotellurics, AMT)技术,结合核磁共振、电磁频谱(Electro Magnetic Susceptibility, EMS)等新技术可有效探测冻土层厚度;②攻关高原冻土区地震采集技术,集成低频可控震源及3炮1线宽线观测系统,采用冬季施工、小道距、长排列、高覆盖次数和全频带接收等采集技术,能克服冻土层的屏蔽效应,在羌塘盆地获得较高品质的浅部地震数据;③探索创新了超深低频探地雷达技术、光谱

遥感化探技术、微生物化探等新技术并取得了初步成效;④形成了较完善的陆域水合物钻探取心及低温泥浆技术,能基本满足实际需要;⑤深化了陆域水合物“排水降压+井内加热”的组合试采技术,创新运用加热气体回灌井筒而不是传统上的加热液体回灌目的层的加热试采法,极大提高了试采效能;⑥创新研发浅层水平对接井施工技术,采用随钻测斜(Measure While Drilling, MWD)、慧磁引导系统,研发小直径单弯短螺杆马达、小直径外平钻杆,实现了全球首例水平对接井试采天然气水合物;⑦研发了陆域天然气水合物物化探靶区预测系统和基于大数据技术的陆域水合物资源评价方法。

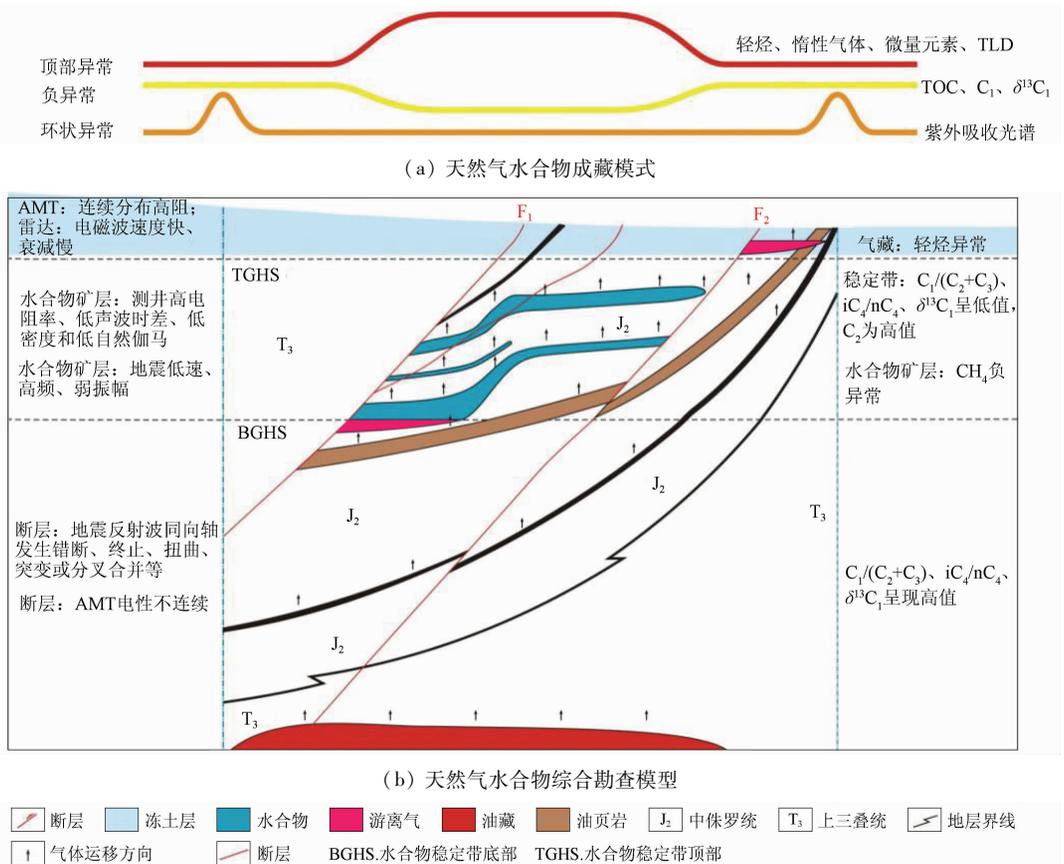


图6 祁连山木里天然气水合物成藏模式及综合勘查模型

Fig.6 Schematic diagram of the natural gas hydrate reservoir formation model and the comprehensive exploration model in Muli area of Qilian Mountains

2.5 天然气水合物相关的环境调查

(1)木里地区天然气水合物的形成与晚更新世以来的气候变迁密切相关。晚更新世末次冰期期间,木里地区处于严寒、干旱的冰缘环境,总体气候寒冷,形成大面积冻土,且冻土层较厚,有利于天然

气水合物的形成^[20-21]。晚更新世以来的几次冷事件中,这种耦合关系更为明显。冰消期及全新世期间,虽仍有短暂的冷事件发生,但气候总体转暖,导致冻土区收缩,冻土层厚度减薄,对下部游离气体的封盖效果也会下降,不利于天然气水合物的形

成,甚至可导致已形成的天然气水合物发生分解。

(2)天然气水合物试采前后近地表大气中甲烷含量未发生明显变化。在2011年天然气水合物试采过程中,我们在试采孔附近2 km 范围内部署了64个网格状监测点,对试采前、试采中、试采后的近地表大气中甲烷含量、二氧化碳含量进行监测。监

测结果表明,试采前近地表大气甲烷含量平均为4.65 μL/L,试采中和试采后则为4.26 μL/L,甲烷含量在试采期间未发生明显变化(表2),说明这次天然气水合物试采并未造成甲烷的明显排放,但二氧化碳含量有所升高,这可能与试采中的甲烷直接点火燃烧有关。

表2 祁连山天然气水合物试采前后大气中甲烷、二氧化碳含量变化

Tab.2 Summary of atmospheric methane and carbon dioxide content before and after natural gas hydrate test production in Qilian Mountains

时间	近地表大气甲烷含量/(μL·L ⁻¹)					近地表大气二氧化碳含量/(μL·L ⁻¹)				
	最大值	最小值	平均值	标准偏差	变异系数	最大值	最小值	平均值	标准偏差	变异系数
试采前	7.20	2.24	4.65	1.44	0.31	712	434	575	74.7	0.13
试采中	4.99	2.82	4.26	0.46	0.11	1 089	581	754	129.0	0.17
试采后	6.44	3.29	4.26	0.79	0.19	1 110	541	754	166.0	0.22

(3)初步掌握了木里地区甲烷、二氧化碳排放规律。在祁连山木里地区开展了“单日一月度一季一年度一多年”的环境监测工作,获取了大量的环境监测数据。结果表明:木里地区甲烷、二氧化碳通量的日变化曲线呈单峰状态,午后均为极大

值,温度是其主要影响因子。从年度尺度上看,木里地区甲烷总体上处于吸收状态,夏季的吸收能力较强,冬季则基本处于平衡状态;二氧化碳则全年处于排放状态,冬季排放量最低,春季不断升高,夏季最高^[22](图7)。

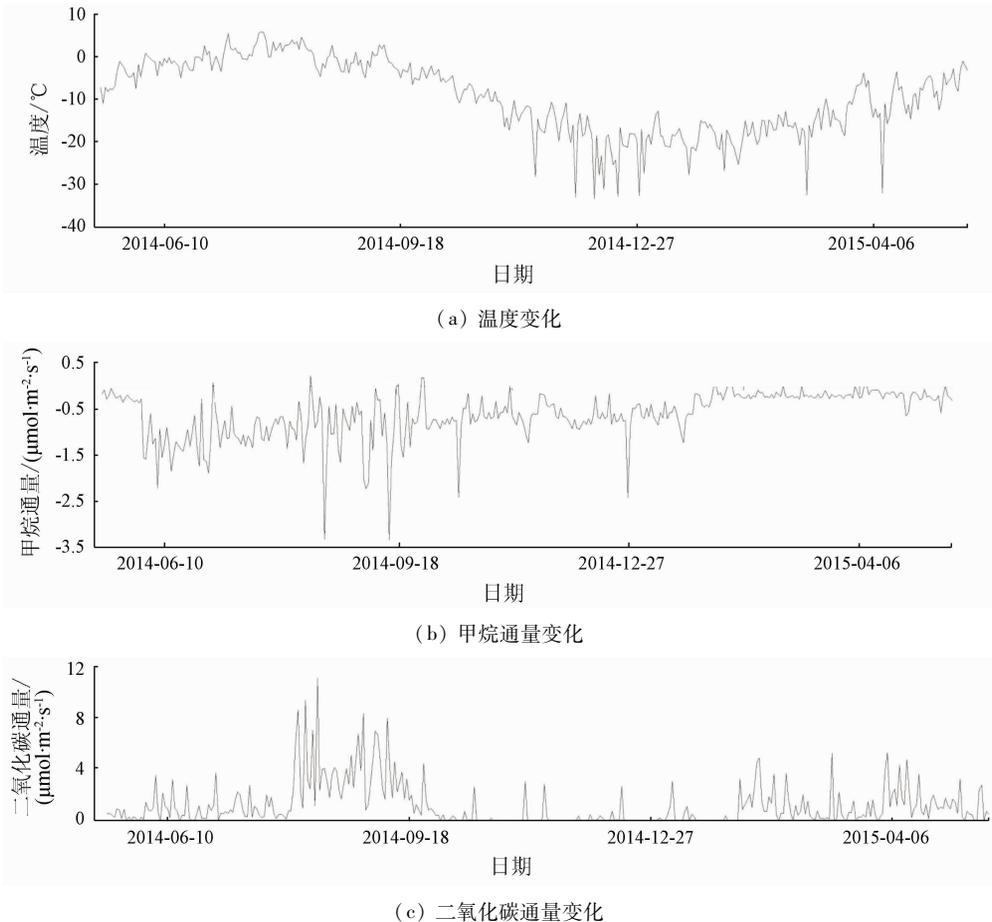


图7 祁连山木里地区温度、甲烷通量和二氧化碳通量变化

Fig.7 Variation diagram of the temperature, methane flux and carbon dioxide flux in Muli area of Qilian Mountains

相关分析结果表明,甲烷、二氧化碳的排放受温度、湿度、pH 值等影响,温度是最重要的影响因素,甲烷、二氧化碳通量与大气温度具有明显的正相关关系。

2.6 初步建成木里天然气水合物野外站

木里地区是我国陆域首个水合物发现地、全球中纬度高山冻土区首个水合物发现地、国内首次水合物试采地、国际首次水合物水平对接井试采地,更是我国天然气水合物矿种(173 号矿种)唯一的陆域矿产保护地,是目前陆域天然气水合物调查研究程度较高的地区,同时该区地处青藏高原北缘,对气候变化高度敏感,是不同圈层相互作用的天然实验室。为充分发挥木里地区在天然气水合物勘查、试采、科学研究和环境监测等方面

的优势,于 2013 年启动野外站建设,现已初步建成占地面积约 5 000 m²、科研用房 23 套的野外站(图 8),并于 2019 年成功入选中国地质调查局首批野外站建设名单。

木里天然气水合物野外站位于青海省天峻县木里镇(38°05′34.74″N、99°10′16.18″E,海拔 4 060 m),现拥有国际上最深的冻土观测孔,安装有深达 600 m 的井下原位测温系统,并配备有井下水体原位监测系统、气体组分/通量监测系统、甲烷/二氧化碳分析仪等长期观测设备 17 台套,可开展水合物、冻土、环境和地层稳定性等长期观测,现已初步实现低空-地表-地下“三位一体”、共约 30 项参数的长期监测,积累各类观测数据约 6 GB,并取得一系列原创性发现。



图 8 祁连山木里天然气水合物野外站

Fig. 8 Field station of natural gas hydrate in Muli area of Qilian Mountains

3 地质调查成果支撑服务成效

3.1 助推国家设立天然气水合物专项(“127”工程)

我国是世界上既有海域水合物也有陆域水合物的少数几个国家之一,鉴于天然气水合物具有重要的能源、环境和地质灾害防治意义,我国政府高度重视天然气水合物的调查研究,于 2011 年正式设立为期 10 a 的天然气水合物资源勘查试采国家专项(“127”工程),坚持海陆并举、资环并重的原则部署各项工作,其中陆域水合物资源调查、试采、环境调查及综合研究是其重要组成部分。

3.2 有效支撑国务院将天然气水合物设为第 173 号新矿种

国务院于 2017 年 11 月 3 日正式批准将天然

气水合物列为我国第 173 号新矿种,其中南海神狐海域和祁连山木里地区分别作为我国海陆水合物发现地予以公布。同年 11 月 16 日,原国土资源部召开的新闻发布会上对陆域水合物的发现予以充分肯定,认为 2008 年在青海省祁连山冻土区首次钻获天然气水合物实物样品,使得我国成为世界上第一个在中纬度高山冻土带钻获天然气水合物实物样品的国家,2009—2015 年在祁连山冻土区多次发现天然气水合物,显示出良好的资源前景,并于 2011 年和 2016 年成功实施 2 次天然气水合物试采试验,形成了具有自主知识产权的陆域天然气水合物试采技术。

3.3 拉动商业资金投入天然气水合物勘查

陆域天然气水合物的系列进展吸引了多家企业的高度关注,2013 年由神华集团、青海省木里煤

业开发集团有限公司、青海省煤炭地质局联合成立神华青海能源发展有限责任公司,投资近7 000万元开展木里天然气水合物调查评价工作,在天然气水合物开发领域首次实现了“公益先行、商业跟进”的模式。同时,在木里地区钻获的厚层含油层与浅层高压气层(达到工业气流标准)也引起石油公司的关注,中国地质调查局油气资源调查中心与中国石油玉门油田分公司先后合作在该地区部署实施2口油气参数井,探索木里坳陷油气前景。

4 未来展望

我国陆域天然气水合物调查研究虽然起步较晚,但在资源调查和试采等方面快速发展,且水合物类型独特,资源环境耦合密切,为开展资源调查、试采及科技创新研究提供了得天独厚的条件。下一步将全方位、多层次、多学科地开展各项调查研究,尽快查明资源家底,同时加强试采技术研究,并进行经济和环境评价,加快推进商业化进程,使这一潜在能源真正造福于人类社会,形成“海陆并举、两翼齐飞”的良好局面。

(1)转变思路,加强陆域天然气水合物(含油气)综合调查。青藏高原,特别是羌塘盆地是我国陆域天然气水合物调查的重点地区,同时也是我国陆域勘探程度较低、油气资源潜力巨大的地区。近年来的调查研究已取得一系列新发现和进展,显示出良好的天然气水合物、油气资源前景。接下来将转变过去单打一的思路,加强天然气水合物、常规油气和非常规油气等能源矿产的综合调查,并加强综合评价工作。同时逐步开拓新区调查,近年来在新疆、内蒙等地的调查有重要进展,如在新疆甜水海地区发现的泥火山群、冷泉碳酸盐,在内蒙古自治区拉布达林盆地发现的大量风铃洞等,均可能与水合物有关,近期将开展气源、冻土、构造等基础地质调查,进而优选重点地区开展地球物理、钻探调查。

(2)探索创新,建实建强木里天然气水合物野外站。木里地区野外站具有得天独厚的优势,现已成功入选中国地质调查局首批野外站建设名单。拟继续运用全球最深的冻土观测孔等长观设备,并陆续购置和研制新设备,开展水合物、冻土、环境等参数的长期观测,积累各项长观数据,取得系列原创性成果,并努力争取将木里站建成“特色鲜明、国内领先、国际先进、开放共享”的部级、国家级天然

气水合物野外观测研究站,进一步提升我国陆域天然气水合物调查研究水平。

(3)夯实基础,构建青藏高原隆升、冻土演化、水合物成生和全球变化科学体系。青藏高原隆升、冻土形成演化、水合物形成及分解过程彼此息息相关,相互作用结果也势必影响全球变化过程。拟以时间为序列,以全球变化为背景,分析青藏高原隆升、冻土演化、水合物形成及分解的耦合过程及空间展布关系,并探索其对全球变化的反馈作用,构建统一的科学体系。

致谢:“陆域天然气水合物资源勘查与试采工程”全体成员为本文做出了重要贡献,匿名审稿人提出了宝贵的修改意见,中国地质调查局木里天然气水合物野外站为野外工作提供了部分数据,在此一并感谢。

参考文献:

- [1] 周幼吾,郭东信,邱国庆,等.中国冻土[M].北京:科学出版社,2000:1-450.
- [2] 张洪涛,祝有海.中国冻土区天然气水合物调查研究[J].地质通报,2011,30(12):1809-1815.
- [3] 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.
- [4] 吴青柏,蒋观利,张鹏,等.青藏高原昆仑山垭口盆地发现天然气水合物赋存的证据[J].科学通报,2015,60(1):68-74.
- [5] 刘晖,祝有海,庞守吉,等.青海乌丽地区发现天然气水合物赋存的重要证据[J].中国地质,2019,46(5):1243-1244.
- [6] 卢振权,祝有海,刘晖,等.祁连山冻土区含天然气水合物层段的油气显示现象[J].现代地质,2013,27(1):231-238.
- [7] 赵省民,邓坚,饶竹,等.漠河盆地浅部气体特征及对天然气水合物形成的意义[J].石油学报,2018,39(3):266-277.
- [8] Milkov A V. Global estimates of hydrate-bound gas in marine sediments:how much is really out there? [J]. Earth - Sci Rev, 2004,66(3/4):183-197.
- [9] 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.
- [10] 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[J].天然气地球科学,2007,18(4):588-592.
- [11] 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.
- [12] Makogon Y F, Holditch S A, Makogon T Y. Natural gas - hydrates: A potential energy source for the 21st Century [J]. J Petrol Sci Eng, 2007,56(1/2/3):14-31.
- [13] Yamamoto K, Dallimore S. Aurora - JOGMEC - NRCan Mallik 2006 - 2008 gas hydrate research project progress [J]. Fire Ice, 2008,8(3):1-5.

- [14] Ignik Sikumi Gas Hydrate Exchange Trial Project Team. Ignik Sikumi gas hydrate field trial completed [J]. *Fire Ice*, 2012, 12(1): 1-3.
- [15] 张炜,邵明娟,田黔宁. 日本海域天然气水合物开发技术发展[J]. *石油钻探技术*, 2017, 45(5): 98-102.
- [16] Ye J L, Qin X W, Qiu H J, et al. Preliminary results of environmental monitoring of the natural gas hydrate production test in the South China Sea[J]. *China Geol*, 2018, 1(2): 202-209.
- [17] 周守为,赵金洲,李清平,等. 全球首次海洋天然气水合物固态流化试采工程参数优化设计[J]. *天然气工业*, 2017, 37(9): 1-14.
- [18] 方慧,孙忠军,徐明才,等. 冻土区天然气水合物勘查技术研究主要进展与成果[J]. *物探与化探*, 2017, 41(6): 991-997.
- [19] 张永勤,李鑫森,李小洋,等. 冻土天然气水合物开采技术发展及海洋水合物开采技术方案研究[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2016, 43(10): 154-159.
- [20] 任建武. 青海天峻木里冻土区末次冰期以来的气候变化研究[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2015.
- [21] 王青,孙洪艳,任建武,等. 祁连山南坡木里地区晚更新世晚期的气候变迁[J]. *古地理学报*, 2015, 17(3): 417-426.
- [22] 张富贵,张舜尧,唐瑞玲,等. 青藏高原湿地冻土区活动层甲烷排放特征[J]. *物探与化探*, 2017, 41(6): 1027-1036.

Main progress of investigation and test production of natural gas hydrate in permafrost of China

ZHU Youhai¹, ZHANG Yongqin², FANG Hui³, LU Zhenquan¹, PANG Shouji¹, ZHANG Shuai¹, XIAO Rui¹
 (1. *Oil and Gas Survey, China Geological Survey, Beijing 100083, China*; 2. *Institute of Exploration Technology, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, China*; 3. *Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, China*)

Abstract: China is one of the few countries in the world that have both marine and permafrost hydrates. China Geological Survey attaches great importance to the investigation and research of natural gas hydrate in permafrost areas, and officially established the project of Exploration and Test Production of Natural Gas Hydrate Resources in permafrost in 2016. It aims to realize the strategic new discovery of hydrate in permafrost regions as soon as possible and evaluate the resource potential, by carrying out geological, geophysical and drilling investigations in key permafrost regions in China, and to develop effective investigation, drilling and resource evaluation techniques for natural gas hydrate in permafrost regions. Since the beginning of the explorative survey of natural gas hydrate in permafrost in 2002, Muli natural gas hydrate producing area has been found in Qinghai, 2 suspected places have been found in Yakou Basin of Kunlun Mountains and Wuli area, with a series of prospecting clues and 12 potential hydrate belts with great resource potential have been evaluated in three metallogenic prospective areas of South Qilian Basin, Qiangtang Basin and Mohe Basin. The first single vertical well test in China and the first horizontal butt well test in the world were successfully carried out in Muli area of Qilian Mountains, and a series of achievements were obtained in gas hydrate formation, prospecting technology, environmental survey and platform construction. These achievements strongly promote the process of natural gas hydrate resources exploration test, and provide powerful support in State Council setting natural gas hydrate as the 173rd new mineral, initially forming a good situation of both land and sea investment and environmental protection.

Keywords: natural gas hydrate; permafrost; resource survey and evaluation; test production; China

(责任编辑: 常艳)