

祁连山冻土区天然气水合物科学钻探工程概况

祝有海¹, 张永勤², 文怀军³

ZHU You-hai¹, ZHANG Yong-qin², WEN Huai-jun³

1. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;

2. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000;

3. 青海煤炭地质 105 勘探队, 青海 西宁 810007

1. *Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;*

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

3. *Qinghai No.105 Coal Geological Exploration Team, Xi'ning 810007, Qinghai, China*

摘要:2008~2009 年, 中国地质调查局组织中国地质科学院矿产资源研究所、勘探技术研究所、青海煤炭地质 105 勘探队等单位, 在祁连山木里地区实施“祁连山冻土区天然气水合物科学钻探工程”, 迄今共完成 DK-1、DK-2、DK-3 和 DK-4 4 个钻探试验井, 总进尺 2059.13m, 并在井深 133~396m 区间钻获多层天然气水合物, 取得了找矿工作的重大突破, 证实中国冻土区存在规模巨大的天然气水合物潜在能源。祁连山冻土区天然气水合物具有埋深浅、冻土层薄、气体组分复杂、以热解气为主等特征, 应是一种新类型的水合物。初步研发集成出一套冻土区天然气水合物调查方法、钻探施工工艺和配套装备, 为下一步的调查研究奠定了基础。

关键词:天然气水合物; 冻土区; 钻探工程; 祁连山

中图分类号: P618.13

文献标志码: A

文章编号: 1671-2552(2011)12-1816-07

Zhu Y H, Zhang Y Q, Wen H J. An overview of the Scientific Drilling Project of Gas Hydrate in Qilian Mountain Permafrost, northwestern China. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30(12):1816-1822

Abstract: Four scientific drilling wells, namely DK-1, DK-2, DK-3 and DK-4, with a total footage of 2059.13m, for The Scientific Drilling Project of Gas Hydrate in Qilian Mountain Permafrost, were performed and completed by China Geological Survey and some other units during 2008-2009. Samples of gas hydrate were collected separately in the 133-396m interval from holes DK-1, DK-2 and DK-3. It was for the first time to discover gas hydrate in the permafrost of China as well as in the middle latitude permafrost of the world. Gas hydrate from the Qilian Mountain is a new type hydrate characterized by a relatively thin permafrost zone, shallow buried depth, complex gas components, and dominant thermogenic gas. In addition, geological, geophysical, geochemical and drilling techniques and essential equipment for gas hydrate in permafrost have been developed, thus providing a foundation for further investigation and research.

Key words: gas hydrate; permafrost; drilling; Qilian Mountain

中国是世界第三冻土大国, 在青藏高原和大兴安岭地区存在着大片冻土区, 多年冻土面积达 $215 \times 10^4 \text{ km}^2$, 约占国土总面积的 22.4%^[1]。鉴于冻土区天然气水合物的重要意义, 中国地质调查局非常重视冻

土区天然气水合物的调查研究工作, 自 2002 年开始已设立了多个地质调查项目, 对中国冻土区天然气水合物的成矿条件、异常标志和找矿前景开展调查研究。初步调查研究成果显示, 中国冻土区, 尤其是

收稿日期: 2011-08-31; 修订日期: 2011-09-16

资助项目: 中国地质调查局项目《青藏高原冻土带天然气水合物调查评价》(编号: 1212010818055)

作者简介: 祝有海(1963-), 男, 硕士, 研究员, 从事天然气水合物和海洋地质研究。E-mail: zyh@mx.cei.gov.cn

羌塘盆地、祁连山、风火山—乌丽地区、漠河盆地等地区,具备较好的天然气水合物成矿条件和找矿前景,但一直未进行钻探验证,无确切的证据证实中国的冻土区是否存在天然气水合物。因此,中国地质调查局决定实施冻土区天然气水合物科学钻探工程,试图寻找与天然气水合物有关的地质、地球物理、地球化学异常标志,同时探索冻土区天然气水合物的钻探施工技术和工艺,为中国冻土区天然气水合物调查研究奠定基础。

2008~2009年,中国地质调查局组织中国地质科学院矿产资源研究所、勘探技术研究所和青海煤炭地质105勘探队等单位,在祁连山天峻县木里地区施工“祁连山冻土区天然气水合物科学钻探工程”。2008年11月5日DK-1孔首次发现天然气水合物,之后分别在DK-2、DK-3孔中再次钻遇天然气水合物,并经激光拉曼测试证实为天然气水合物,取得了找矿工作的重大突破。这是中国冻土区首次发现天然气水合物,同时也是世界中纬度高山冻土区首次发现天然气水合物,具有重要的科学、经济和环境意义。本文拟对“祁连山冻土区

天然气水合物科学钻探工程”的实施情况及主要成果作一概略性介绍,具体细节和详细成果请参见本专辑其它有关文章。

1 科学钻探工程选区

1.1 工程选区

根据对中国冻土区天然气水合物的成矿条件和找矿前景分析,羌塘盆地无疑优于祁连山、风火山和漠河盆地,但羌塘盆地的调查研究程度较低,海拔较高,施工环境极为恶劣,所需费用也较大,作为冻土区天然气水合物科学钻探工程的首选地有许多不利因素。因此,选择成矿条件相对有利、调查研究程度相对较高、海拔相对较低、施工条件相对容易的祁连山冻土区作为科学钻探工程的首选地。

祁连山冻土区地处青藏高原北缘,冻土面积约 10^4km^2 (图1),以山地多年冻土为主,在山谷、山麓中也发育有季节性的冻土。连续冻土区内的年平均地温为 $-1.5\sim-2.4^{\circ}\text{C}$,冻土层厚度为 $50\sim 139\text{m}$;岛状冻土区内的年平均地温为 $0.0\sim-1.5^{\circ}\text{C}$,冻土层厚度几米、十几米至几十米不等^[1]。

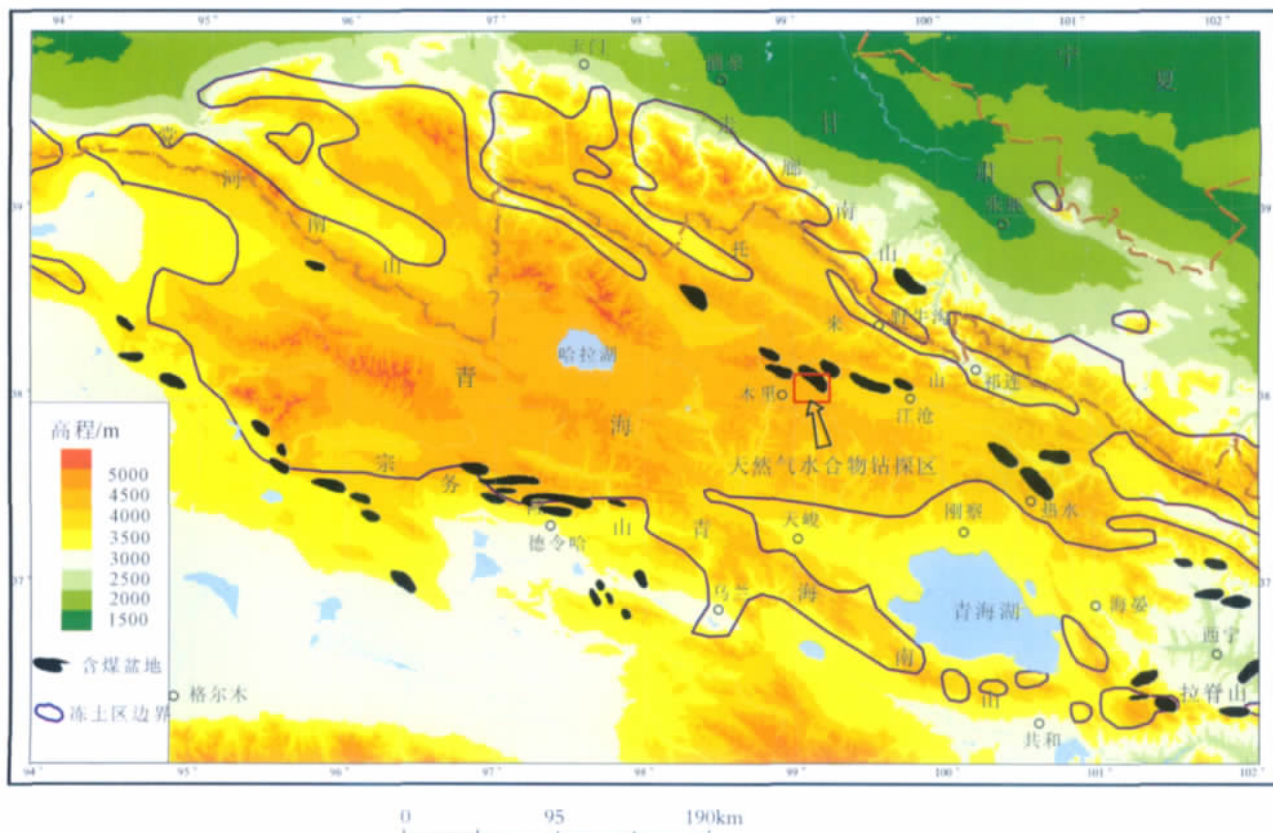


图1 “祁连山冻土区天然气水合物科学钻探工程”钻探区位置

Fig. 1 Location of the Scientific Drilling Project of Gas Hydrate in Qilian Mountain Permafrost

祁连山侏罗纪小型含煤盆地星罗棋布,组成祁连山含煤盆地群,其中疏勒河—大通河流域就分布有木里、瓦乌寺、雪霍立等 11 个含煤盆地(图 1)。这些含煤盆地都是北祁连深大断裂体系在燕山期再度复活形成的裂堑式断陷盆地,呈 NW—SE 向狭长带状断续分布^[2]。木里煤田是青海省最大的煤田,面积约 650km²,其主体包括西部的聚乎更矿区、弧山矿区、江仓矿区,东部的热水矿区和外围的外力哈达矿区、海德尔矿区、默勒矿区等,是青海省最重要的煤炭基地。聚乎更矿区因煤层厚、储量丰富和煤质好而受到广泛关注^[3]。

木里煤田的煤类较齐全,从长焰煤到低级无烟煤均能见到,煤的变质作用以深成变质为主,有利于形成煤层气^[4]。青海煤炭地质 105 勘探队^①对聚乎更矿区和江仓矿区的煤层气资源进行了初步评价,结果表明其资源量达 72.55×10⁸m³,显示出丰富的煤层气潜力。同时,南祁连盆地是一潜在的油气盆地,又可细分成疏勒、木里、哈拉湖、下日哈和天峻 5 个次级拗陷,其中木里拗陷是最具勘探前景的拗陷,下石炭统臭牛沟组的碳酸盐岩、泥岩和上三叠统尕勒得寺组的灰黑色泥岩、页岩均属于好烃源岩,已进入成熟、过成熟阶段,具有良好的生油生气潜力^[5-7]。此外,聚乎更矿区的大量钻探资料证实,在煤层上下都赋存有规模不等的油页岩,其中江仓组上段(煤层之上)油页岩分布较为稳定,厚度也较厚,有利于形成烃类气体。由此可见,祁连山冻土区,特别是木里煤田,具有良好的气源条件,煤层气、烃源岩、油页岩均有可能形成充足的烃类气体,为形成天然气水合物提供了丰富的气源条件。更为可喜的是,青海煤炭地质 105 勘探队近年来在木里煤田聚乎更矿区一井田、三露天等的多个钻孔中曾发现异常气体,井口点燃即可燃烧,说明聚乎更矿区有丰富的烃类气体,非常有利于形成天然气水合物。

依据有限的地温梯度数据,结合实测的气体组分,笔者初步计算了祁连山冻土区天然气水合物的温压条件,结果表明木里煤田聚乎更矿区基本具备形成天然气水合物的温压条件^[8]。据此选择木里煤田聚乎更矿区作为科学钻探工程的首选地,并正式命名为“祁连山冻土区天然气水合物科学钻探工程”。

1.2 井位优选

木里煤田聚乎更矿区呈 NWW—SEE 向展布,东西长约 19km,南北平均宽约 4km,面积约 76km²,

总体上为一复式背斜构造,由 1 个大背斜和 2 个小向斜组成。其中北向斜分布有三井田、二井田和一露天 3 个井田,南向斜由四井田、一井田、三露天和二露天组成(图 2)。

前述的成矿条件讨论结果表明,木里煤田聚乎更矿区具备形成天然气水合物的冻土条件、温压条件和水源条件,且这些条件在区内大同小异,能否形成天然气水合物的关键取决于是否有充足的气源和气源运移的地质构造条件。同时,由于本区地球物理资料较少,所发现的异常标志不多,气体异常也成为本区最重要的异常标志。

木里煤田发现的 3 处气体异常均位于聚乎更矿区(图 2),分别是一井田 5 号勘探线的 33 号钻孔(2004 年施工)、三露天 7 号勘探线的 10 号钻孔(2007 年施工)和 12 号勘探线的 42 号钻孔(2008 年施工)。这 3 个钻孔均有明显的气体漏泄现象,点火也能燃烧,特别是一井田 5—33 号孔在冻土层内发生漏泄现象,且持续时间将近 1 年,说明这里有充足的气源形成天然气水合物,甚至这些气体有可能本身就来自于天然气水合物。

这 3 个气体异常钻孔均位于聚乎更复式背斜的南翼,且被 F₂、F₂₅ 断裂带所局限的狭长地带内(图 3),东西相距不足 6km。F₂ 断层为北西西向的区域性逆冲断层,在聚乎更复式背斜南翼连续分布,断裂面向南西倾斜,倾角 70°,断距约 700m,在野外露头、地震剖面和钻孔中均有该断层的明显显示,钻孔中见及的破碎带厚度达 51.40m。F₂₅ 断层位于 F₂ 断层北部,也是区域性逆冲断层,断裂面倾向南西,倾角 50~60°,在探槽和钻孔中均有所见及。与 F₂、F₂₅ 断裂带平行分布的还有 F₁、F₂₆、F₂₇、F₂₈ 等断裂,构成聚乎更复式背斜南翼的逆冲断裂带。

根据青海煤炭地质 105 勘探队的钻探结果,目前发现的 3 个气体异常孔均位于 F₂ 断层的下盘,且切穿了多套煤层和断裂带,说明多套煤层能提供丰富的煤层气,而多组断裂则能为这些气体提供运移通道,从而有可能出现强烈的气体异常,有利于形成天然气水合物。因此,选择 3 个气体异常孔中部,也切穿多套煤层和断裂带的 DK-1 孔作为天然气水合物钻探试验井的预选井位(图 2、图 3)。

2 科学钻探工程施工

鉴于“祁连山冻土区天然气水合物科学钻探工

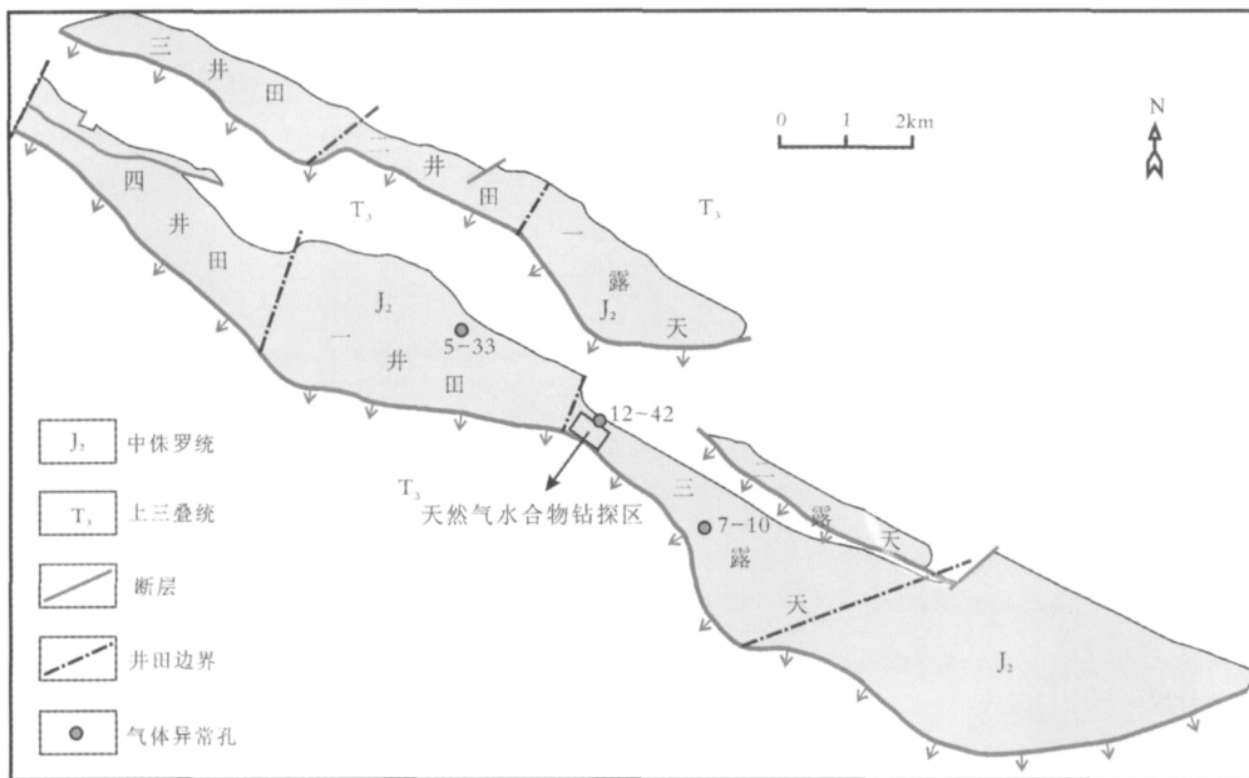


图2 “祁连山冻土区天然气水合物科学钻探工程”气体异常井位(据参考文献①编制)

Fig. 2 Locations of gas anomalies from drilling holes of the Scientific Drilling Project of Gas Hydrate in Qilian Mountain Permafrost

程”的艰巨性、复杂性,中国地质调查局依托地质调查项目《青藏高原冻土带天然气水合物调查评价》和《陆地永久冻土天然气水合物钻探技术研究》,于2008~2009年期间组建了以张洪涛为组长、叶建良为副组长的“冻土区天然气水合物领导小组”。领导小组的职责为统筹中国冻土区天然气水合物长远发展规划,负责资金筹措与分配,组织协调各部门、地方、单位之间的关系,指导项目组开展调查研究等工作。同时设立了“祁连山冻土区天然气水合物科学钻探工程指挥部”,由祝有海担任总指挥兼首席科学家,其职责为全面负责、协调各项调查研究工作,承担项目的总体设计、井位选择、地质研究等工作;由文怀军担任副总指挥,负责现场钻探、后勤保障和安全生产工作;由张永勤担任总工程师,负责科学钻探试验工程的钻探、测井等工作。“祁连山冻土区天然气水合物科学钻探工程指挥部”下设地质、钻探和后勤保障3个小组,分别由卢振权、张永勤和贾志耀担任组长,承担相应的地

质研究、钻探施工和后勤保障任务。

“祁连山冻土区天然气水合物科学钻探工程”由中国地质科学院矿产资源研究所、中国地质科学院勘探技术研究所、青海煤炭地质105勘探队等单位承担,吉林大学、中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所、中国地质大学(北京)、北京化工大学、青岛海洋地质研究所和国家地质实验测试中心等单位参加。

2008年10月18日,“祁连山冻土区天然气水合物科学钻探工程”DK-1科学钻探试验孔(图3)开始施工,其地理坐标为北纬 $38^{\circ}05.591'$ 、东经 $99^{\circ}10.260'$,海拔4057m。11月5日于井深133.5~135.5m区间首次钻获天然气水合物实物样品,随后又相继于11月7日和11月10日再次钻获天然气水合物。至150余米后因遭遇异常高压气体,且引发岩心破碎和塌孔事故,加上钻探区已全面封冻,缺乏生产生活用水,于2008年11月26日决定停钻,终孔进尺182.25m。

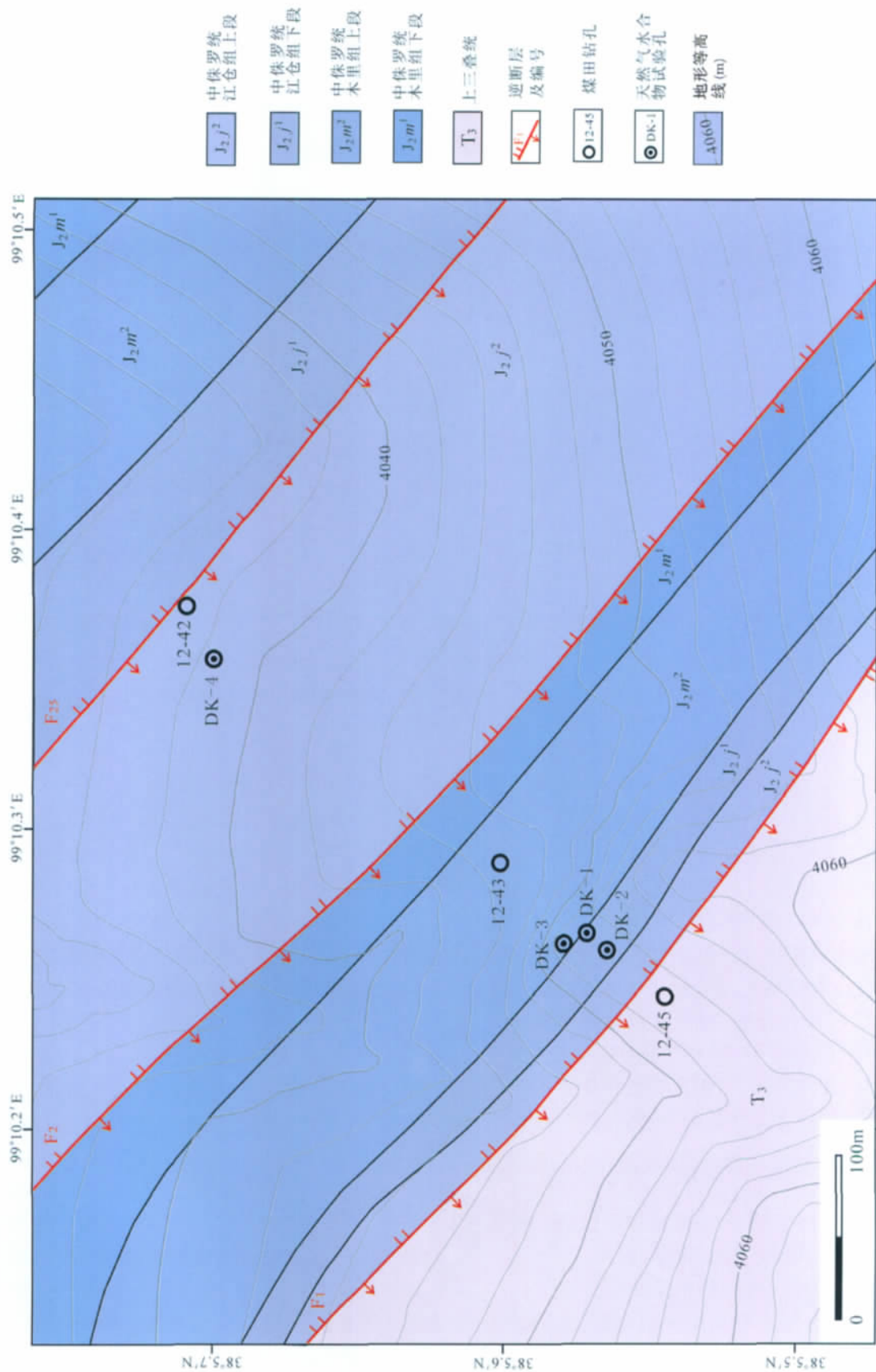


图3 “祁连山冻土区天然气水合物科学钻探工程”钻孔位置
Fig. 3 Locations of drilling holes of the Scientific Drilling Project of Gas Hydrate in Qilian Mountain Permafrost

表 1 “祁连山冻土区天然气水合物科学钻探工程”各钻孔概况
Table 1 Data of various drilling holes for the Scientific Drilling Project
of Gas Hydrate in Qilian Mountain Permafrost

钻孔	经度	纬度	海拔/m	孔深/m	施工日期	施工队伍
DK-1	99°10.250'E	38°05.575'N	4053.34	182.25	2008-10-18~11-26	502 钻机
DK-2	99°10.244'E	38°05.565'N	4053.46	645.22	2009-05-31~08-12	502 钻机
DK-3	99°10.260'E	38°05.572'N	4054.76	765.01	2009-08-16~10-11	502 钻机
DK-4	99°10.372'E	38°05.700'N	4038.45	466.65	2009-09-04~10-01	501 钻机

尽管 DK-1 孔钻获了天然气水合物实物样品,且获得了野外观测、点火燃烧、测井等 7 项天然气水合物存在的直接证据,但因液氮罐准备不周,样品未能保存下来,中国地质调查局决定于 2009 年继续实施“祁连山冻土区天然气水合物科学钻探工程”,于 DK-1 孔附近施工 2~3 个钻探试验井,以获取水合物样品为主要目标,且要求打穿水合物稳定带,以探测水合物的分布特征和赋存状态。同时,对钻探技术和工艺予以改正,加强配套装备研发,为下一步的调查研究奠定基础。

2009 年 5 月 31 日,在 DK-1 孔南南西向约 22m 处开始施工 DK-2 孔,并在井深 144.4~152.0m、152.3~156.6m、235.0~245.0m、275.0~291.3m 处发现 4 层天然气水合物,至 2009 年 8 月 12 日终孔,进尺 645.22m。2009 年 8 月 16 日在 DK-1 孔南东东向约 12m 处开始施工 DK-3 孔,并在井深 133.0~156.0m、231.0~240.0m 和 392.0~396.0m 处发现 3 层天然气水合物,至 10 月 11 日终孔,进尺 765.01m。2009 年 9 月 4 日~10 月 1 日,在 DK-1 孔北北东向约 250m 处施工 DK-4 孔,进尺 466.65m。

2008~2009 年,“祁连山冻土区天然气水合物科学钻探工程”共在木里煤田聚乎更矿区完成 DK-1、DK-2、DK-3 和 DK-4 孔的钻探施工任务(图 3,表 1),总进尺 2059.13m,实际施工 199 个工作日(含测井),共调用青海煤炭地质 105 勘探队 502、501 两台钻机相继施工,圆满地完成了钻探施工及其配套研究任务。

3 科学钻探工程主要成果

3.1 在祁连山冻土区发现天然气水合物

目前共在“祁连山冻土区天然气水合物科学钻探工程”的 DK-1、DK-2、DK-3 三个孔中发现天然

气水合物实物样品,在 DK-4 孔中发现一系列与天然气水合物有关的异常标志。迄今发现的天然气水合物证据和异常标志主要包括:①岩心裂隙面上发现白色、乳白色的天然气水合物晶体;②水合物晶体点火能直接燃烧;③样品经青岛海洋地质研究所用 inVia 型激光拉曼光谱仪检测,结果表明为特征的天然气水合物激光拉曼光谱曲线;④含天然气水合物的岩心经红外热像仪测温后显示出明显的低温异常(水合物分解为吸热过程);⑤含天然气水合物层段的测井曲线中呈现出较明显的高电阻率和高波速标志;⑥干净的岩心面上能不断冒出气泡和水滴(水合物分解后释放出甲烷和水);⑦含天然气水合物岩心放进水里能强烈冒泡;⑧含天然气水合物岩心放进瓦斯罐内能解析出大量的气体;⑨在天然气水合物层段的岩心中发现水合物分解后残留的蜂窝状构造;⑩在岩心裂隙面上发现晶形完好的自生碳酸盐和黄铁矿矿物。

3.2 初步查明祁连山冻土区天然气水合物的基本特征

3 个科学钻探试验孔的结果显示,目前钻获的天然气水合物均位于冻土层之下,产出深度 133~396m,层位属中侏罗统江仓组。天然气水合物主要以薄层状、片状、团块状赋存于砂岩、粉砂岩、泥岩的裂隙面中,部分以浸染状赋存于细粉砂岩的孔隙中。

初步测试结果显示,祁连山天然气水合物中的气体组分以甲烷为主(55%~76%),此外还含有较高的乙烷、丙烷等重烃组分,部分样品中甚至还含有一定量的 CO₂。气体成因主要为深部迁移上来的热解气。与国外相比,祁连山冻土区天然气水合物具有埋深浅、冻土层薄、气体组分复杂、热解气为主等明显的特征,初步分析应作为一种新类型的水合物,具有重要的科学意义。

3.3 初步探索集成出冻土区天然气水合物的调查方法和钻探施工工艺

经过近 2 年的努力,项目组初步探索出一套以钻探为主,结合地质、地球物理、地球化学、分析测试等方法在内的冻土区天然气水合物调查研究方法。具体包括:①初步集成出包括大孔径钻进、低温泥浆、半合板钻具、PVC 内管等的钻探施工工艺和取心技术;②初步摸索出包括岩心观测、红外测温、样品采集、液氮罐保存、激光拉曼光谱仪测试等的样品采集、处理、保存、测试技术;③初步探索了二维反射地震、高密度电阻率、可控源音频大地电磁、音频大地电磁等的地球物理探测方法;④初步探索了浅钻取样、样品采集、保存、测试、数据处理等的地球化学探测方法;⑤初步探索了包括煤田测井、地质雷达测井等测井方法和数据处理、解释技术。为中国冻土区天然气水合物调查研究奠定了初步基础。

3.4 初步研发集成出冻土区天然气水合物的调查研究装备

根据现场工作的迫切需要,项目组在 2009 年度内已研发出部分必需的装备,主要包括:①初步研发出冻土区天然气水合物泥浆制冷系统一套;②初步研发出包括制冷、岩心切割、样品处理设施等的可拆卸式冻土区天然气水合物现场简易实验室一个;③初步完成了 $\Phi 108$ 孔底冷冻取样器一套;④初步研发出天然气水合物样品快速冷冻装置一套;⑤初步

研发出天然气水合物样品低温高压保存运输装置一套,能基本上满足工作的需要。

致谢:“祁连山冻土区天然气水合物科学钻探工程”得到各参与单位的大力支持,野外施工期间得到青海省委省政府、青海省国土资源厅、青海省煤炭地质局、海西蒙古族藏族自治州、天峻县的大力支持,钻探施工由青海煤炭地质 105 勘探队 502、501 钻机承担,在此一并表示衷心的感谢。

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,2000:450.
- [2]白生海.青海省侏罗纪含煤盆地及含煤地层[J].中国煤田地质,1993,5(3):20-23.
- [3]文怀军,鲁静,尚路君,等.青海聚乎更矿区侏罗纪含煤系层序地层研究[J].中国煤田地质,2006,18(5):19-21.
- [4]王嵩,张廷江.青海煤层气资源概况及找气方向[J].青海地质,1997,6(2):43-49.
- [5]符俊辉,周立发.南祁连盆地石炭—侏罗纪地层区划及石油地质特征[J].西北地质科学,1998,19(2):47-54.
- [6]符俊辉,周立发.南祁连盆地三叠纪地层及石油地质特征[J].西北地质科学,2000,21(2):64-72.
- [7]任拥军,纪友亮,李瑞雪.南祁连盆地石炭系可能烃源岩的甾萜烷地球化学特征及意义[J].石油实验地质,2000,22(4):341-345.
- [8]祝有海,刘亚玲,张永勤.祁连山多年冻土区天然气水合物的形成条件[J].地质通报,2006,25(1/2):58-63.
- ① 青海煤炭地质 105 勘探队,中国矿业大学(北京)(文怀军、邵龙义).青海省木里煤田江仓矿区、聚乎更矿区煤层气资源调查评价报告.2006:124.