

doi: 10.11720/wtyht.2017.6.01

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.http://doi.org/10.11720/wtyht.2017.6.01

Fang H, Sun Z J, Xu M C, et al. Main achievements of gas hydrate exploration technology in permafrost regions of China[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2017, 41(6): 991-997. http://doi.org/10.11720/wtyht.2017.6.01

冻土区天然气水合物勘查技术研究 主要进展与成果

方慧^{1,2,3}, 孙忠军^{1,2,4}, 徐明才^{1,2}, 林振洲^{1,2,3}

(1. 国家现代地质勘查技术研究中心, 河北 廊坊 065000; 2. 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 河北 廊坊 065000; 3. 国土资源部地球物理电磁法探测技术重点实验室, 河北 廊坊 065000; 4. 中国地质科学院地球表层碳-汞地球化学循环重点实验室, 河北 廊坊 065000)

摘要: 青藏高原多年冻土区分布在中纬度地带, 天然气水合物赋存环境和基本特征既不同于海域水合物, 也不同于极地冻土区水合物, 缺少有效的勘探技术成为制约我国陆域天然气水合物资源调查与评价工作的主要技术瓶颈。在国家 863 计划、国土资源部行业科研专项和水合物国家专项共同支持下, 开展了陆域冻土区天然气水合物勘查技术攻关, 初步建成了陆域永久冻土区天然气水合物勘查的高精度地震勘探技术、音频大地电磁测深技术、超深探地雷达技术、地球化学勘查技术和综合地球物理测井技术; 总结了冻土区天然气水合物地震学和电磁学识别标志, 优选出了水合物地球化学勘查的有效指标, 研发了水合物储层测井识别技术和储层参数评价技术; 初步建立了冻土区天然气水合物物化探有效方法组合和物化探综合勘查模型; 预测了水合物成藏有利区, 提出的建议井位钻遇天然气水合物, 方法有效性得到初步检验和应用。研究成果对推动陆域冻土区天然气水合物勘查技术进步、支撑我国冻土区天然气水合物资源评价与开发工作有重要意义。

关键词: 天然气水合物; 永久冻土区; 物化探方法技术; 水合物识别标志; 勘查模型

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2017)06-0991-07

0 引言

天然气水合物是在一定条件下由水和天然气组成的类冰的、非化学计量的、笼形结晶化合物, 在自然界广泛分布于海底沉积物和陆上永久冻土区中, 其全球潜在资源量相当于 $(1.8 \sim 2.1) \times 10^{16} \text{ m}^3$ 的甲烷气, 是已知煤、石油和天然气等化石燃料资源量总和的 2 倍^[1], 其中全球冻土带天然气水合物资源量可能高达 $(1.4 \sim 3\ 400) \times 10^{13} \text{ m}^3$ ^[2], 主要分布于极地环北冰洋冻土区^[3]。中国是世界第三冻土大国, 多年冻土面积达 $2.15 \times 10^6 \text{ km}^2$, 调查结果表明青藏高原的羌塘盆地、祁连山地区、风火山—乌丽地区和东

北漠河盆地都具备良好的天然气水合物形成条件和找矿前景, 初步估算中国冻土区天然气水合物资源量可能高达 $3.8 \times 10^{13} \text{ m}^3$ ^[4]。2008 年, 我国在祁连山木里地区首次钻获天然气水合物实物样品^[5], 成为第一个在中纬度高山冻土区发现天然气水合物的国家。天然气水合物不仅是潜在的清洁能源, 由于气候转暖导致多年冻土退化, 还可能会造成甲烷气水合物分解并释放, 对全球气候转暖产生重要影响。因此调查与评价多年冻土区天然气水合物具有极为重要的能源意义和环境意义。然而, 与天然气水合物巨大的资源储量及应用前景相矛盾的是, 当前缺乏十分有效的, 特别是针对陆域冻土带天然气水合物富集带的勘查技术方法。

收稿日期: 2017-09-15

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)课题(2012AA061403); 国土资源部公益性行业科研专项项目(201111019); 国家 127 专项项目(GZHL20110324, GZH201400305); 中国地质调查局地质调查项目(DD20160224)

作者简介: 方慧(1965-), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事冻土区天然气水合物勘查技术研究。Email: fanghui@igge.cn

海域天然气水合物调查实践表明,地球物理、地球化学等技术在水合物资源调查与评价中发挥了不可或缺的作用。地震学的似海底反射层(BSR)、电磁学的高阻异常和地球化学的甲烷异常等识别标志已经成为判断海域水合物存在与否、成藏规模等方面的重要依据。永久冻土区天然气水合物成藏直接受冻土、构造、气源、地下水等条件的控制,必须要查明这些情况,才有可能预测水合物成藏有利区,再对水合物矿体进行空间定位。无论是在探测控制水合物成藏的地质环境,还是在探测水合物矿体位置及规模、评价水合物资源分布及资源量等工作中,地球物理、地球化学等勘查技术都是重要的技术手段。自极地冻土区发现天然气水合物以来,国际上在加拿大马更些三角洲地区、美国阿拉斯加北坡地区以及俄罗斯西伯利亚麦索雅哈地区针对天然气水合物矿藏开展了大量地球物理、地球化学以及测井技术的研究。由于冰胶结永冻层与水合物层的地震波传播速度相当,似海底反射层(BSR)等天然气水合物识别标志基本不适合多年冻土区天然气水合物勘查。当前,天然气水合物矿藏的勘探已转向对整个石油天然气水合物系统的综合评价,以降低勘探的不确定性,但开发精准探测水合物矿藏的技术依然是本领域研究的热点。

我国冻土区天然气水合物在成藏条件和发育特征等方面与极地和海域天然气水合物相比存在很大差异。极地和海域水合物主要赋存在新生界未固结的松散地层中,地层孔隙度大,产状平缓,构造简单,水合物含量高,厚度大。我国青藏高原属中纬度高海拔多年冻土区,冻土(岩)层较薄、地层产状陡、断裂发育、岩性复杂,发现的水合物主要赋存在中生界砂岩、泥岩、页岩等硬岩石的孔隙或裂隙内,具有埋深浅、饱和度低、水平及纵向分布不连续等特点。成藏条件和发育特征的差异必然会造成水合物储层表现出不同的地球物理和地球化学响应特征,造成海域和极地水合物勘查技术难以直接应用于我国陆域天然气水合物勘查工作中,必须要结合我国实际情况开展方法技术研究,发展适合我国陆域天然气水合物勘查的有效技术,而更加复杂的成藏条件决定了这一探索过程必将充满挑战。自2009年起,中国地质调查局物化探研究所开始在青海木里地区开展了少量物化探探测水合物方法有效性实验^[6-9],2011~2015年,又先后牵头完成了国家863计划课题“冻土带天然气水合物地球物理勘查技术”、国土资源部行业科研专项“冻土区天然气水合物物化探技术攻关”和水合物国家专项下的“陆域天然气水

合物勘查技术与集成”等项目,参加单位还有中科院广州能源研究所、中国地质大学(武汉)、中科院电子学研究所、中科院遥感与数字地球研究所、中国科学技术大学等,主要任务是研发陆域冻土区天然气水合物地球物理、地球化学和遥感等勘查技术,探索与冻土区天然气水合物有关的异常标志,集成有效的资源勘查与评价技术体系,为我国冻土区天然气水合物资源勘查及潜力评价提供技术支撑。项目实施过程中,针对青藏高原冻土区水合物成藏环境的特殊性,在祁连山木里水合物发现区开展了物化探方法技术攻关,围绕直接找矿和间接找矿两条主线部署了方法有效性实验研究工作,实验的主要方法包括地震、音频大地电磁测深、高密度电法、低频探地雷达、地面核磁共振、综合地球物理测井、土壤地球化学、岩屑地球化学测井、遥感等。从解剖物化探异常特征及成因入手,研究了木里地区水合物成藏模式及主要控矿要素,建立了水合物矿体的物化探指示标志和勘查模型,优选了有效探测方法,通过钻探验证检验了方法技术的有效性。本文对几年来所取得的主要进展和成果进行概述。

1 陆域永久冻土区天然气水合物勘查的高精度地震勘探技术

在天然气水合物勘探中,反射地震方法是一种最有效的方法,在加拿大Mackenzie(马更些)三角洲Mallik地区利用反射地震勘探技术取得了较好的探测效果^[10]。青藏高原地质条件复杂,低信噪比、静校正难、成像效果差等一直是水合物地震勘探面临的难题。经过几年来的野外实验和理论研究,攻克了高原复杂地震地质条件、高速冻土层屏蔽效应、可控震源谐波干扰、低信噪比等技术难题,提出了可控震源激发、冬季施工、小道间距、长排列、高覆盖次数、中高频检波器点组合、全通频带接收的高分辨率地震数据采集技术和小参数多方法去噪的高保真地震数据处理技术,在高原冻土区取得了高质量的反射地震资料^[11-13]。

开展了冻土区天然气水合物地震学属性特征研究。由于木里地区硬岩层中天然气水合物含量较低,含天然气水合物储层的速度与储层的岩性及地层的破碎程度有关,与天然气水合物的含量关系不是很大;在断裂破碎带内,天然气水合物以晶体形态出现,所产生的高频散射波经叠加后呈现相对高频、弱振幅的特征,没有发现类似海洋地震剖面上的BSR特征。通过野外方法实验、数值模拟分析和理

论研究,初步确定了地震反射波“高频”和“弱振幅”两大特征为木里地区硬岩类水合物储层的地震学识别标志,利用地震波组的振幅、频率和速度特征进行综合解释,有利于识别天然气水合物储层^[14-17]。

2 陆域永久冻土区天然气水合物勘查的电磁探测技术

由于水合物具有“排盐效应”,导致纯水合物具有较高的电阻率,当固体水合物占据了储层内一部分孔隙,使储层表现为高电阻率特征;冻土(岩)层相比非冻结地层也表现出高电阻率特征,这些特征是电磁法用于探测水合物和冻土的物理前提。为优选有效方法,开展了高密度电法、可控源音频大地电磁测深(CSAMT)和音频大地电磁测深(AMT)探测水合物方法有效性对比实验,综合探测深度、空间分辨能力,结合高原冻土区的接地条件、供电条件、电磁干扰等环境因素,优选出音频大地电磁法为探测冻土和水合物方面的有效方法。研究中实验了季节、天气、冻土、观测时间窗口、极距等因素对电磁法数据采集的影响规律,总结出采用高叠加次数、远参考站等噪声压制技术,选择春夏季、下午至晚间测量等措施,可以有效解决“死频段”电磁场数据采集问题^[18-20]。

研究了冻土区天然气水合物电性响应特征,初步确定了水平展布的中高阻异常、水平中高阻异常带与地层产生的斜向低阻带存在的相交现象、中高阻异常带出现在气源通道(断裂)附近等三大特征可以作为识别水合物储层的电学标志,电磁法在探测水合物和冻土(岩)层方面是有效的方法^[21,17]。

3 陆域永久冻土区天然气水合物勘查的低频探地雷达技术

在水合物物性研究中人们早就发现探地雷达具有探测水合物储层的物理基础,但受制于水合物成藏条件和技术本身,地面探地雷达技术一直没有在海域和极地水合物探测研究中获得应用。通过开展方法实验和理论研究,首次应用基于伪随机编码技术的低频探地雷达系统在中纬度永久冻土区实现探测深度达到200 m以上,在水合物储层发现明显的雷达波反射信号,反射信号的“高频、强振幅”特征可以作为天然气水合物储层的电磁学识别标志。结合野外实验和理论研究,总结了f-k二维滤波抑制地表杂波、Hilbert-Huang变换方法处理非稳态信号、

加强相干法提高空间分辨率等低频探地雷达探测水合物的数据处理方法^[22-23]。将探地雷达技术应用于青藏高原永久冻土区天然气水合物储层勘探,是探地雷达应用领域的一次扩展,也是天然气水合物勘探领域有效探测方法技术创新。

4 陆域永久冻土区天然气水合物地球化学勘查技术

地球化学勘查技术作为天然气水合物勘探的重要手段之一愈来愈受到关注。一些学者早期曾在青藏高原冻土区开展了天然气水合物地球化学勘查试验^[24-27],但还处于起步阶段,并没有形成行之有效的勘查技术。为了探索中纬度带天然气水合物地球化学勘查技术的有效性,选择祁连山木里三露天天然气水合物矿藏开展了多种地球化学方法试验。试验的常规油气地球化学方法主要包括顶空气法、酸解烃法、碳酸盐法、微生物法、热释烃法、热释汞法、微量元素法、游离气、化探井等。研究了天然气水合物地球化学概查、普查、详查、精查和井中化探技术。发现水合物矿藏上方存在明显的地球化学异常,浅表地球化学方法既可以判断水合物成因类型,也可以圈出水合物矿藏远景区和靶区^[28-35]。试验结果还发现祁连山木里天然气水合物地球化学勘查受到地表微生物和地下煤层气的影响,沼泽区夏季微生物活动强烈,冬季微生物活动减弱,是开展水合物化探采样的最佳季节^[36]。除常规油气地球化学方法外,还实验了甲烷碳同位素在线测量、土壤热释光、惰性气体、卤族元素等地球化学勘查新技术,开发的新技术能有效解决沼泽地区微生物和煤层气的影响,取得了明显的找矿成果,值得进一步推广使用^[37-39]。开展了天然气水合物地球化学异常成因研究^[40],提出了天然气水合物地球化学调查的地气迁移理论,包括烃类气体、惰性气体和放射性核素迁出水合物矿藏,地气穿过永久冻土层垂向迁移和近地表表生地球化学作用,总结了冻土区天然气水合物地球化学勘查的有效指标,包括土壤酸解烃、顶空气、稀有气体、土壤热释烃、甲烷碳同位素等,其中酸解烃和热释烃比值不受天然气藏的影响,是天然气水合物矿藏的直接探测指标^[41]。开发了天然气水合物分形-GIS资源潜力预测新技术。

5 陆域冻土区天然气水合物综合地球物理测井技术

地球物理测井技术是天然气水合物勘探的重要

方法,在天然气水合物储层识别、储层参数评价等方面是最有效的方法之一。木里地区水合物储层岩性种类较多,主要包括中砂岩、细砂岩、粉砂岩、泥岩和页岩,岩性致密,呈低孔低渗的特点,不同岩性和岩石结构会诱发不同的水合物赋存状态。为优选有效的地球物理测井技术,对研究区内实施的 12 口水合物调查井的综合地球物理测井数据进行了精细处理、统计分析和综合研究,主要参数包括自然伽马、视电阻率、密度、纵波速度、井径和超声波成像等。研究了木里地区天然气水合物综合地球物理测井响应特征,发现木里地区水合物储层总体表现为“高视电阻率、高纵波速度、低密度、低自然伽马”的特征,但不同储层类型之间又存在一定的差别。砂岩孔隙型水合物储层,电阻率增大,自然伽马明显变低,纵波速度和密度变化不明显;泥岩裂隙型水合物储层,电阻率增大,密度值略低,纵波速度和自然伽马变化不明显;页岩裂隙型水合物储层,电阻率增大,纵波速度明显增高,但密度和自然伽马变化不明显;视电阻率和自然伽马对孔隙型水合物反映灵敏,视电阻率和纵波速度对裂隙型水合物反映灵敏^[17,42-43]。研究了水合物储层测井识别技术和储层参数评价技术,提出在复杂围岩的情况下,以电阻率、声波、密度和自然伽马为样本进行贝叶斯判别可较好的识别出水合物储层^[44];利用密度计算孔隙度最适用^[45]。在这些研究的基础上,开发了冻土区水合物测井评价系统^[46]。

6 陆域永久冻土区天然气水合物勘查的地面核磁共振技术

地面核磁共振(SNMR)是一种在地面上直接探测液态氢质子存在性和含量多少的地球物理方法。SNMR 方法主要用于找水研究,应用 SNMR 方法探测天然气水合物是一次全新的尝试。木里地区进行的核磁共振试验研究表明,核磁共振信号对冻土层发育区表现出含水率较低、纵向弛豫时间常数 $T1^*$ 较小和渗透系数变化不明显等特征,这些特征可以作为划分冻土层与非冻土层的标志^[47]。地下水的存在是形成水合物必不可少的物质条件,地下水的发育状况还会对水合物的成藏环境产生重要影响。利用 SNMR 方法能有效地探测地层的含水率和地下水空间分布状况,还可从时间参数解译得到与岩石孔隙相关的信息,为水合物储层描述提供参考,在中纬度永久冻土区天然气水合物勘查中是一种有效方法。研究中还提出了一种结合实验数据、

野外测量数据和钻孔资料来评估天然气水合物存在可能性的方法,但方法的有效性还需要进一步研究。探测深度偏浅也是影响 SNMR 在水合物探测领域应用效果的重要因素。

7 陆域永久冻土区天然气水合物勘查的遥感探测技术

开展冻土区天然气水合物遥感探测技术试验是一项有益尝试。利用 MODIS 数据,反演了青海木里和北羌塘地区的冻土分布状况;利用碳卫星 SCIAM-ACHY 数据,分析了青藏高原冻土区近地面甲烷浓度分布^[48];采用主成分分析方法解译了木里地区气源条件,分析了水合物成藏有利区。遥感作为一项太空时代的高新技术,可远距离、大范围、快速获取与水合物成藏相关的信息,是一项值得进一步探索的冻土区天然气水合物快速概查技术。

8 水合物合成与物性参数同位测量系统开发

水合物的物性包括密度、比热容、导热系数、声学速率、电导率等,由于其非计量性,其物性受多种因素影响,加上硬岩储层孔隙致密、成分结构复杂,使得天然气水合物系统物性测定和研究异常困难。自主开发和改造升级了适合硬岩中水合物合成与导热、声速、电阻率、介电常数、密度等 5 套物性参数同位测量系统,其中水合物密度测试系统是国际上第一次尝试用物理实验方式同位测定水合物密度的装置。利用这些装置完成了纯水合物、含水合物石英砂、含水合物砂岩、含水合物泥岩、含水合物石英砂岩等样品的物性测试,应用实验和理论模拟,结合了热力学、声学、电学等多学科的理论和技术,研究了沉积物中天然气水合物的热、声、电等基础性质,揭示了天然气水合物多维物性响应机制^[49-50]。

9 陆域天然气水合物勘查技术体系集成

从解剖钻遇水合物和未钻遇水合物井区的地球物理、地球化学场异常特征及成因入手,研究了木里地区水合物成藏模式及主要控矿要素。提出冻土、气源、断裂构造、稳定的地下水环境是控制水合成为藏的重要因素。深部烃类气体沿断裂构造向上运移,在冻土的封盖下,在断裂破碎带内富集,在稳定的地下水环境下,于适合的温压条件下成藏是木里地区

水合物成藏的主要模式之一。

依据直接找矿技术和间接找矿技术并重的原则,围绕探测水合物矿体和评价控制水合物成藏的主要地质条件等地质目标,通过方法实验和理论研

究,优选了有效的勘探方法,提出了冻土区天然气水合物地球物理、地球化学有效方法组合(表1),建立了冻土区天然气水合物勘查模型^[51]。

表1 陆域天然气水合物物化探有效方法组合

序号	探测目标	物化探异常主要特征	有效方法
1	主要控矿条件	冻土层发育状况	高频大地电磁测深(AMT)
2		断裂构造特征	浅层反射地震
3		地下水环境	地面核磁共振
4		气源条件	顶空气、酸解烃、游离气法等
5	水合物矿体	弱振幅、高频地震反射信号 高电阻率异常 高电阻率、低声波时差、低密度、低自然伽马异常 强振幅、高频电磁信号 甲烷、重烃、惰性气体异常	浅层反射地震 音频大地电磁测深(AMT) 综合地球物理测井 大功率低频探地雷达 岩屑地球化学测井

在青藏高原羌塘盆地和木里盆地开展了地球物理、地球化学探测冻土区天然气水合物应用示范。根据水合物地球物理和地球化学识别标志,并进一步结合地球物理、地球化学测量结果所确定的冻土、气源、断裂构造及地下水条件,在木里地区圈定出3个水合物I级有利区、7个II级有利区和7个III级有利区。在有利区预测的基础上,进一步提出了水合物建议井位。中国地质调查局油气中心组织专家依据地质、地球物理、地球化学异常及控矿因素等认识对建议井位进行了反复论证,并确定为DK9井。经钻探,在井下发现4层水合物,单层厚度超过20m,累计厚度45.56m,方法有效性得到初步检验和应用。

10 结语

木里地区水合物成藏环境和成藏模式十分特殊。天然气水合物矿体空间尺度小、含量低,与围岩之间的物性差异弱,构造、岩性复杂,加之实验工作量有限,给水合物物化探异常响应特征研究和方法有效性评价带来不小困难。经过5年多的实验研究工作,对中纬度带冻土区天然气水合物勘查技术进行了有益探索,在水合物有效勘查技术、识别标志、勘查模型、资源评价与预测以及基础研究平台开发等方面取得了阶段性成果,这些成果将为我国正在开展的陆域冻土区天然气水合物资源勘查与试采工作提供有力的技术支撑。

尽管在勘查技术研究工作取得了一定进展,但一些关键问题有待完善。一是对陆域冻土区水合物形成过程、赋存状态及微观结构与地球物理、地球化

学参数间的响应关系认识还不够深入,使得水合物勘查工作中的数据处理、定性分析与定量解释缺少充分的基础理论支撑。二是尚未开展高精度三维探测,以满足对水合物矿藏空间展布的精细刻画。地震、电磁法、测井和地球化学是目前水合物勘查工作的主要方法,但主要用于探测与水合物成藏密切相关的冻土、气源、地下水、地温梯度、构造条件等目标。要实现对水合物矿藏空间展布进行精细刻画,还需要开展三维高精度测量,提高对水合物藏的探测精度。三是水合物矿藏综合预测与评价系统还未建立。以往工作主要集中在调查方面,回答有没有的问题,定量评价工作相对落后,水合物储层识别、储层参数定量计算等主要沿用石油勘探领域的相关技术,但两者的成藏模式、物化指标可能存在很大差别,急待建立适于陆域天然气水合物的精细测量、识别与定量评价技术。

青藏高原拥有十分复杂、独特的地理、地质环境,天然气水合物成矿地质背景尚不明了,青藏高原可能还存在新生界储层等其他类型的水合物,这些储层类型的水合物地球物理、地球化学响应特征是什么?文中所优选的方法和所建立的识别标志是否具有普适性?还有待进一步检验、不断探索和发现。

致谢:感谢国家863计划、国土资源部行业科研专项和水合物国家专项对研究工作的资助与支持;感谢祝有海研究员、卢海龙教授、吴能友研究员、张永勤研究员、卢振权研究员、赵省民研究员、谭富文研究员、苏新教授、刘学伟教授、付修根研究员、王平康副研究员等老师和专家对研究工作给予的指导和帮助;感谢研究团队各位同仁所做出的努力、辛劳和奉献。

参考文献:

- [1] Sloan E D. Clathrate hydrates of natural gases[M]. 2nd ed. New York: Marcel Dekker Inc., 1998.
- [2] Collett T S, Johnson A H, Knapp C C, et al. Natural gas hydrates; a review, in T. Collett, A. Johnson, C. Knapp, et al., eds., Natural gas hydrates—Energy resource potential and associated geologic hazards. AAPG Memoir 89, 2009:146–219.
- [3] 王平康, 祝有海, 赵越, 等. 极地天然气水合物勘探发现现状及对中国的启示[J]. 极地研究, 2014, 26(4): 502–514.
- [4] 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.
- [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): 1762–1771.
- [6] 徐明才, 刘建勋, 柴铭涛, 等. 青海省天峻县木里地区天然气水合物地震响应特征[J]. 地质通报, 2011, 30(12): 1910–1917.
- [7] He M X, Fang H, Zhong Q, et al. An experimental study of natural gas hydrate in permafrost by the electromagnetic method[C]//The 10th Ocean Mining & Gas Hydrates Symposium, Szczecin, Poland, Sep. 22–26, 2013:99–103.
- [8] 姚大为, 王书民, 雷达, 等. CSAMT 在祁连山永久冻土区天然气水合物调查中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2013, 10(2): 132–137.
- [9] 杨志斌, 孙忠军, 李广之, 等. 青海省天峻县木里地区天然气水合物发现区浅表地球化学特征[J]. 地质通报, 2011, 30(12): 1883–1890.
- [10] Riedel M, Bellefleur G, Mair S, et al. Acoustic impedance inversion and seismic reflection continuity analysis for delineating gas hydrate resources near the Mallik research sites, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada[J]. Geophysics, 2009, 74(5): B125–B137.
- [11] 刘建勋, 张保卫, 王小江, 等. 羌塘盆地浅层地震探测方法技术[J]. 物探与化探, 2015, 39(4): 678–685.
- [12] 刘建勋, 徐明才, 王小江, 等. 高原冻土区三分量地震探测方法试验[J]. 物探与化探, 2015, 39(2): 327–333.
- [13] 徐建宇, 姜春香, 张保卫, 等. 浅层地震技术在陆域天然气水合物勘探中存在的问题及对策[J]. 物探与化探, 2017, 41(6): 1127–1132.
- [14] Xu M C, Sun Z J, Liu J X, et al. Validity experiment of natural gas hydrate in permafrost detected by seismic method[C]//The 10th Ocean Mining & Gas Hydrates Symposium, Szczecin, Poland, Sep. 22–26, 2013:121–125.
- [15] 徐明才, 刘建勋, 柴铭涛, 等. 青海木里地区天然气水合物反射地震试验研究[J]. 地质与勘探, 2012, 48(6): 1180–1187.
- [16] 姜春香, 李培, 王小江, 等. 木里地区天然气水合物地震属性分析[J]. 物探与化探, 2017, 41(6): 1019–1026.
- [17] Fang H, Xu M C, Lin Z Z, et al. Geophysical characteristics of gas hydrate in the Muli area, Qinghai province[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2017, 37: 539–550.
- [18] 裴发根, 方慧, 杜炳锐, 等. AMT 正演模拟及反演求导方法在探测冻土厚度中的应用——以青海木里地区多年冻土层为例[J]. 物探与化探, 2016, 40(2): 405–410.
- [19] 裴发根, 何梅兴, 仇根根, 等. 青藏高原冻土区 AMT 探测天然气水合物采集试验研究[J]. 物探与化探, 2017, 41(6): 1113–1120.
- [20] 裴发根, 方慧, 仇根根, 等. 青海木里冻土区 AMT 探测天然气水合物正演模拟研究[J]. 物探与化探, 2017, 41(6): 1175–1182.
- [21] 方慧, 裴发根, 何梅兴, 等. 音频大地电磁测深法探测冻土区天然气水合物有效性实验[J]. 物探与化探, 2017, 41(6): 1068–1074.
- [22] 白大为, 杜炳锐, 方慧, 等. 低频探地雷达探测冻土带天然气水合物正演模拟研究[J]. 物探与化探, 2017, 41(6): 1060–1067.
- [23] 白大为, 杜炳锐, 张鹏辉. 基于希尔伯特-黄变换的低频探地雷达弱信号处理技术及其在天然气水合物勘探中的应用[J]. 物探与化探, 2017, 41(6): 1248–1254.
- [24] 坚润堂, 王造成. 青藏高原多年冻土区活动带天然气水合物地球化学特征[J]. 甘肃冶金, 2006, 28(2): 33–35.
- [25] 卢振权, 吴必豪, 饶竹, 等. 青藏铁路沿线多年冻土区天然气水合物的地质、地球化学异常[J]. 地质通报, 2007, 26(8): 1029–1040.
- [26] 吴自成, 吕新彪, 王造成. 青藏高原多年冻土区天然气水合物的形成及地球化学勘查[J]. 地质科技情报, 2006, 25(4): 9–14.
- [27] 张志攀, 祝有海, 苏新. 羌塘盆地沉积物热释光特征及潜在意义[J]. 现代地质, 2008, 22(3): 452–456.
- [28] 孙忠军, 杨志斌, 秦爱华, 等. 中纬度带天然气水合物地球化学勘查技术[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2014, 44(4): 1063–1070.
- [29] Sun Z J, Yang Z B, Mei H, et al. Geochemical characteristics of the shallow soil above the Muli gas hydrate reservoir in the permafrost region of the Qilian Mountains, China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2014, 139: 160–169.
- [30] 杨志斌, 周亚龙, 孙忠军, 等. 祁连山木里地区天然气水合物地球化学勘查[J]. 物探与化探, 2013, 37(6): 988–992.
- [31] 张富贵, 唐瑞玲, 杨志斌, 等. 陆域天然气水合物地球化学勘查技术试验研究[J]. 物探与化探, 2013, 37(6): 1043–1048.
- [32] 张富贵, 杨志斌, 唐瑞玲, 等. 酸解烃技术在青海祁连山天然气水合物勘探中的应用[J]. 中国矿业, 2016, 25(Suppl.2): 227–233.
- [33] 周亚龙, 孙忠军, 张富贵, 等. 青海木里三露天天然气水合物土壤热释光技术应用研究[J]. 现代地质, 2015, 29(5): 1173–1179.
- [34] 孙忠军, 杨志斌, 卢振权, 等. 青海木里三露天天然气水合物矿藏土壤微量元素地球化学特征[J]. 现代地质, 2015, 29(5): 1164–1172.
- [35] 周亚龙, 张富贵, 杨志斌, 等. 祁连山冻土区天然气水合物游离气测量技术试验[J]. 物探与化探, 2017, 41(6): 1075–1080.
- [36] 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.
- [37] Sun Z J, Han Z Y, Fan H, et al. Natural thermoluminescence prospecting of gas hydrate in the Qilian mountains permafrost [C]//Qinghai. The 21th international ocean and polar engineering conference, Busan, Korea, June 15–20, 2014:34–39.
- [38] Sun Z J, Zhang F G, Yang Z B, et al. Inert gas—an effective tool for natural gas hydrate exploration[C]//The 9th international conference on gas hydrate, Denver, Colorado USA, Jun 25–30, 2017.
- [39] 唐瑞玲, 孙忠军, 张舜尧, 等. 冻土区天然气水合物的探途元

- 素——卤族元素 I 和 CL[J].物探化探计算技术,2016,38(4): 553-559.
- [40] 杨志斌,周亚龙,普嘎.祁连山木里冻土区天然气水合物地球化学异常成因分析[J].物探化探计算技术,2014,36(6):723-729.
- [41] 秦爱华,周亚龙,李永红,等.青海木里三露天天然气水合物地球化学远景评价[J].现代地质,2015,29(5):1242-1250.
- [42] 林振洲,李洋,高文利,等.祁连山冻土区天然气水合物层位测井物性分析[J].物探与化探,2013,37(5):834-838.
- [43] 林振洲,刘东明,潘和平,等.木里地区天然气水合物测井响应特征[J].物探与化探,2017,41(6):1012-1018.
- [44] 覃瑞东,林振洲,潘和平,等.木里地区水合物及岩性测井识别方法[J].物探与化探,2017,41(6):1088-1098.
- [45] 林振洲,孔广胜,潘和平,等.木里地区天然气水合物储层参数计算[J].物探与化探,2017,41(6):1099-1104.
- [46] 秦臻,林振洲,潘和平,等.木里水合物测井评价系统[J].物探与化探,2017,41(6):1275-1280.
- [47] 彭耀,李振宇,郑宗祺,等.羌塘盆地冻土层结构核磁共振信号响应研究与实践[J].CT理论与应用研究,2015,24(1):37-46.
- [48] Cen Y, Wu T X, Zhao H Q, et al. Methane analysis using SCIAMACHY data in permafrost area of China [J]. SPIE Asia-Pacific Remote Sensing, 2012(10).
- [49] 李栋梁,卢静生,梁德青.祁连山冻土区天然气水合物形成对岩芯电阻率及介电常数的影响[J].新能源进展,2016,4(3):179-183.
- [50] Li D L, Lu J S, Liang D Q. P-Wave velocity of gas hydrate based on the DK-8 drilling cores from the qilian mountain permafrost [C]//Proceedings of the 8th International Conference on Gas Hydrates, Beijing, China, 2014.
- [51] 孙忠军,方慧,刘建勋,等.祁连山冻土区三露天天然气水合物矿藏勘查模型[J].物探与化探,2017,41(6):998-1004.

Main achievements of gas hydrate exploration technology in permafrost regions of China

FANG Hui^{1,2,3}, SUN Zhong-Jun^{1,2,4}, XU Ming-Cai^{1,2}, LIN Zhen-Zhou^{1,2,3}

(1. National Modern Geological Exploration Technology Research Center, Langfang 065000, China; 2. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, CAGS, Langfang 065000, China; 3. Electromagnetic Detection Technology Key Laboratory of Ministry of Land and Resources, Langfang 065000, China; 4. Key Laboratory of Geochemical Cycling of Carbon and Mercury in the Earth's Critical Zone, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, China)

Abstract: The permafrost regions of the Tibetan Plateau are distributed in the middle latitudes of China, where the gas hydrate is different from the gas hydrate in sea area and polar permafrost area in existing environment and basic characteristics. The lack of effective exploration technology has become the major technical bottleneck that restricts the investigation and evaluation of natural gas hydrate resources in permafrost regions of China. Supported by National 863 Program, Special Research Project of Ministry of Land and Resources and National Special Project of Gas Hydrate, the authors studied the development of key technologies of natural gas hydrate exploration in the permafrost regions of China. The prorated exploration methods for China's terrestrial gas hydrate exploration in permafrost areas have been initially established, which include the high resolution seismic method, the audio magnetotelluric sounding technology, the ultra-deep ground penetrating radar (GPR) technology, geochemical exploration technology and integrated geophysical logging technology. The seismology and electromagnetism identifications of gas hydrate reservoir have been found, the effective index of hydrate geochemical exploration is optimized, and the logging identification technology and reservoir parameter evaluation technology of gas hydrate reservoir are developed. An effective combination method for geophysical and geochemical exploration and a comprehensive geophysical and geochemical exploration model have been tentatively established in permafrost regions. The favorable area of gas hydrate accumulation is predicted, and several gas hydrate reservoirs have been found in the well suggested by the authors, which shows that the validity of methods proposed by the authors are tentatively tested and applied. The research results have great significance for promoting the progress of gas hydrate exploration and for supporting the exploration and development of natural gas hydrate resources in permafrost regions of China.

Key words: gas hydrate; permafrost region; geophysical and geochemical method; identifications of gas hydrate; exploration model

(本文编辑:沈效群)