

doi: 10.11720/wtyht.2016.6.07

杨明国,邢学文,刘松.木里冻土带天然气水合物瞬变电磁法应用研究[J].物探与化探,2016,40(6):1097-1102.<http://doi.org/10.11720/wtyht.2016.6.07>

Yang M G, Xing X W, Liu S. The application of transient electromagnetic method to gas hydrate exploration in Muli permafrost area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2016, 40(6): 1097-1102. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2016.6.07>

木里冻土带天然气水合物瞬变电磁法应用研究

杨明国¹, 邢学文², 刘松²

(1. 中国地质大学(武汉)资源学院, 湖北 武汉 430074; 2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘 要: 天然气水合物是一种绝缘固体,与围岩电阻率差异大,具有电磁法勘探的物性基础。在青海木里天然气水合物赋存区,开展了瞬变电磁法的勘探试验研究,发现电阻率断面图上部为连续较厚高阻层,下部低阻背景之间存在不连续高阻层。根据木里天然气水合物钻井的测井资料,上部连续高阻层可以确定为冻土层,而下部不连续高阻层位于非冻土层之间,深度上与科学钻井的天然气水合物赋存层位基本对应,处于天然气水合物稳定带,因此认为瞬变电磁法探测的下部非冻土层内不连续高阻层指示了木里天然气水合物的赋存层。研究结果表明:瞬变电磁法具有探测常年冻土带深部高阻的能力,可用于天然气水合物的勘探。

关键词: 天然气水合物;瞬变电磁法;冻土带;高阻层;青海木里

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2016)06-1097-06

天然气水合物(俗称可燃冰)作为新兴能源,受到高度重视。天然气水合物是水分子和甲烷等气体分子在低温(一般 0℃ 左右)、高压(一般大于 3~5 MPa)、气体浓度大于其溶解度条件下形成的结晶状固体物质。在自然界,天然气水合物储藏于水深大于 300 m 的海底沉积物和地表 130 m 以下的多年冻土带中^[1]。目前陆上共发现 4 个天然气水合物储藏区,分别为俄罗斯的 Messoyakha 气田区^[2]、美国阿拉斯加北坡 Prudhoe Bay 油田区^[3]、加拿大马更些三角洲地区^[4]和我国青海木里聚乎更矿区^[5]。

天然气水合物是一种绝缘固体,与围岩存在显著的电性差异,具有电磁法勘探的物性基础^[6]。利用电阻率测井进行深部天然气水合物的识别,仍是目前天然气水合物勘探常用的一种手段,其他地球物理方法还处于探索研究阶段^[7]。青海木里聚乎更矿区是我国冻土带目前唯一发现天然气水合物的地区,地震、电磁、化探等方法在这里开展了天然气水合物勘探的可行性研究,但由于沼泽化地表环境,严重影响各技术方法的实施和效果。

1 电磁法应用于天然气水合物的研究现状

C.Hyde 等认为:瞬变电磁法(TEM)不仅在冻土

层调查中非常有用,而且在冻土层足够厚的区域还有可能用于描述天然气水合物层的电阻率特征^[8]。以寻找天然气水合物为目的,我国在冻土带开展了多次电磁法的应用研究。韩江涛等在漠河永久冻土区,使用美国 Zonge 公司制造的 GDP-32^{II} 型多功能电测仪进行永久冻土层的分布规律研究,采用拟地震成像法反演瞬变电磁法野外数据,有效地划分出反射界面和电性层位,成功地推断出漠河地区永久冻土层的分布^[9-10]。姚大伟等在青海木里冻土带,使用 V8 多功能电法仪开展了可控源音频大地电磁法(CSAMT)的天然气水合物探测实验,这种方法很好地分辨出天然气水合物形成、运移所需要的冻土盖层和断裂构造,但没有识别出天然气水合物的电阻率异常区,认为主要原因是区内天然气水合物分布零散,藏储个体规模有限,而且紧伏在冻土层之下难以形成足够的电阻率差异^[11]。

笔者通过瞬变电磁法应用于木里聚乎更长年冻土区天然气水合物探测的应用研究实例,证实方法的可行性,为寻找天然气水合物提供一种有效的途径。

2 研究区概况

研究区位于祁连山冻土带,行政区划上属于青海省天峻县木里镇(图 1),沼泽地表覆盖绝大部分研究区。祁连山冻土带地处青藏高原北缘,冻土面积约 1 万 km²,以山地多年冻土为主,在山谷、山麓也发育有中—深季节性冻土。连续冻土区内的年平均地温为-1.5~-2.4℃,冻土层厚度为 50~139 m;岛状冻土区内的年平均地温为 0.0~1.5℃,冻土层厚度几米、十几米至几十米不等^[12]。祁连山侏罗纪小型含煤盆地较为发育,沿疏勒河—大通河流域就

分布有瓦乌寺、雪霍立、聚乎更、木里、江仓、热水等 11 个含煤盆地,均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 向带状分布。

木里煤田是青海省最大的煤田,面积约 650 km²,其主体包括西部的聚乎更矿区、弧山矿区、江仓矿区和东部的热水矿区以及外围的外力哈达矿区、海德尔矿区、默勒矿区等,是青海重要的煤炭基地。聚乎更矿区更因煤层厚、储量丰富和煤质好而受到广泛关注^[13],我国首个陆上钻获天然气水合物样品的科学钻井就位于该矿区。

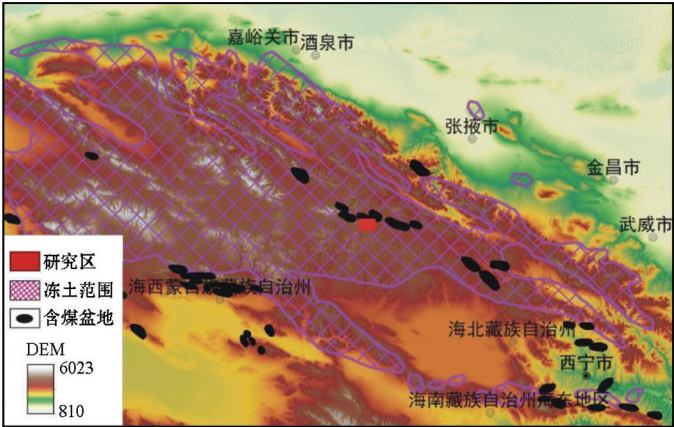


图 1 木里冻土区地理位置及地质环境简图

3 木里冻土及天然气水合物物性特征

木里聚乎更矿区多年来的测井工作证实,电阻率参数在冻土层上的反映相对明显,其原因主要是冻土层岩石孔隙水呈冻结状态,其导电能力明显下降,造成电阻率的高异常反映。表 1 是木里聚乎更矿区 4 口钻孔的测井资料^[14],可以看出,多年冻土与非冻土之间的电阻率差别明显,冻土层的电阻率明显高于非冻土层的电阻率,冻土电阻率平均值是非冻土电阻平均率值的 2.79 倍。

表 1 冻土段与非冻土段岩层电阻率对比 ^[14] Ω·m			
孔号	岩性	冻土段	非冻土段
6-4	泥岩	100	60
0-4	粉砂岩	504	78
12-2	细砂岩	375	237
6-4	粗砂岩	800	250
5-1	粗砂岩	500	190
平均值		455.8	163

木里聚乎更矿区天然气水合物储藏于冻土层之下非冻土地层中的侏罗统江仓组粉砂岩、细砂岩、粗砂岩的孔隙及裂隙中。研究区科学钻井 DK-1 电阻

率测井数据显示,水合物储藏层电阻率值平均为 57~378.4 Ω·m、56.8~349.9 Ω·m^[5,7]。相比之下,加拿大马更些三角洲 Mallik 5L-38 钻孔砂岩中天然气水合的电阻率值介于 10~120 Ω·m 之间^[8],低于木里聚乎更矿区天然气水合物的电阻率值,这可能是地层中水合物饱和度的差异或水合物的赋存状态不同造成的^[15]。木里聚乎更矿区长年冻土层厚度一般在 50~70 m,最厚 95 m^[16],均小于俄罗斯 Messoyakha 气田区(320 m)^[2]、美国阿拉斯加 Prudhoe Bay 油田区(176~630 m)^[3]、加拿大马更些三角洲地区(510~740 m)^[4]的冻土层厚度,天然气水合物储藏深度相应变浅(115~396 m)。

4 木里聚乎更研究区纵向电性分带特征

图 2 给出了木里科学钻井 DK-1 的电阻率测井结果。根据钻孔资料综合分析,纵向由表及深的沼泽层、长年冻土层、非冻土层的岩性特征、电性特征、电磁波响应应具有明显的分带性(表 2)。沼泽层以土壤和液态水体组成,厚度 0~1.0 m 左右,电阻率极低,是良导层,对电磁波有吸收作用;沼泽层之下的冻土层由粉砂岩、细砂岩、粗砂岩及含煤层地层组

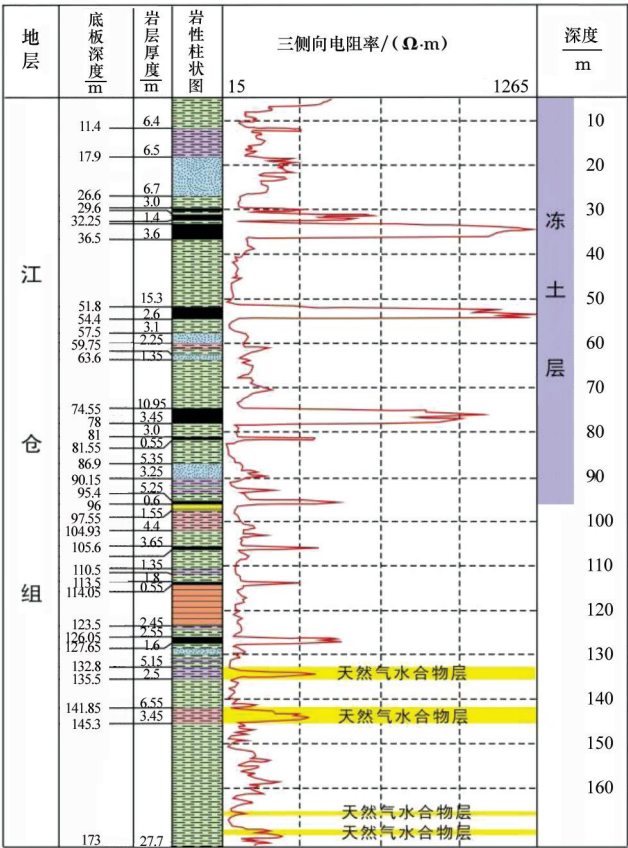


图2 木里科学钻 DK-1 电阻率测井曲线
(据文献[5]修编)

表2 木里冻土区岩性和物性特征

纵向分层	厚度	岩性特征	电性特征	电磁波响应特性
沼泽层	0~1 m	土壤、液态水	低阻	吸收效应
长年冻土层	50~70 m, 最厚 95 m	细砂岩、粗砂岩、煤层, 岩石及构造孔隙被结晶水充填	高阻	易于传播
非冻土层	深度 115 ~ 396 m 是天然气水合物赋存的有利层位	细砂岩、粗砂岩、泥岩, 岩石及构造孔隙被液态水充填	低阻(砂岩类);高阻(天然气水合物)	二次电磁场差异大

成,冻土厚度一般 50~70 m,最厚见于 DK-1 钻孔,冻土厚 95 m。岩石及构造孔隙以结晶水的形式赋存,整体呈现高电阻率层(不同岩性的电阻率受孔隙结晶水的影响,使得电阻率趋同),导电性差,但电磁波易于传播;冻土层之下的非冻土层由细砂岩、粉砂岩、泥岩、油页岩及少量中砂岩组成,电阻率相对较低,但天然气水合物赋存层电阻率较高。据木里 DK-1、DK-2、DK-3、DK-4 钻孔所见天然气水合物的深度位置^{万方数据},推断深度在 115~396 m 是天然气

水合物赋存的有利层位,理论上都可以形成天然气水合物。但由于岩石孔隙度和裂隙发育的不同,造成烃类气体富集程度存在差异,形成木里天然气水合物横向和纵向上的不连续赋存特征^[17-18]。

木里聚乎更研究区纵向电性特征可归纳为:①浅表沼泽的良导层,电磁波吸收效应明显;②冻土层包含煤层的高阻层,电磁波易于传播;③冻土层以下非冻土层低阻背景内,赋存天然气水合物的局部高阻层位,电阻率差异明显,具备瞬变电磁法应用的物性基础。

5 瞬变电磁法探测天然气水合物的应用

瞬变电磁法(TEM)是一种以地壳岩(矿)石的导电性与磁性差异为物质基础的时间域电磁探测方法^[19-21],其优势之一是对高阻地质体穿透能力强,克服了高阻屏蔽效应;优势之二是不接地发射及接收回线装置克服了接地电磁法在富含水地表布设装置的难题及数据采集带来的干扰,但表层潮湿环境会影响其探测深度。

5.1 野外剖面设计及数据采集

实验剖面布置于木里聚乎更矿区,设计剖面全

长 1 125 m,点距 25 m,有效测点 46 个,剖面线经过天然气水合物科学研究钻井 DK-1(图 3),便于验证方法的有效性。实验剖面起于凸起的坡底基岩裸露部位,1~3 号测点位于基岩裸露区,其他测点均位于沼泽地表之上,地势相对平缓(图 4)。

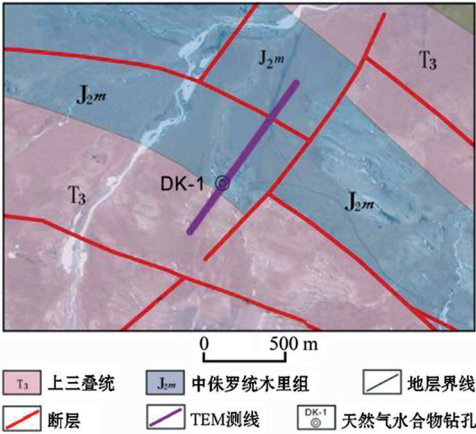


图 3 TEM 实验剖面及钻孔位置



图 4 木里冻土区沼泽地表环境

瞬变电磁法因发射线圈和接收线圈的相对位置不同而有多种装置形式,重叠回线和中心回线装置是常用的组合方法。本次实验使用中国地质大学(武汉)高科资源探测仪器研究所生产的 CUGTEM-8 智能深部勘查型瞬变电磁仪,采用重叠回线装置,发射回线和接收回线边长 25 m×25 m,通过实验确定供电电流 200 A,供电脉宽 20 ms,采样率 4 μs,测点数据记录自动 20 次叠加平均值。

5.2 数据处理

5.2.1 滤波

实验剖面与聚乎更露天煤矿开采区相邻,矿山电力、矿山机械都可能产生干扰电磁波,选择合适的滤波方法是瞬变电磁数据处理的前提,合适的滤波处理后的归一化电位时间道多测道曲线应协调性好,无交叉。此次直接采用仪器自带程序选择滤波组合方法,图 5 为 TEM 野外采集数据滤波处理后的时间道归一化电位多测道曲线。

5.2.2 地形及深度校正

滤波后的时间道归一化电位多测道数据通过专用反演软件反演各测点不同深度的电阻率值。为了便于与 DK-1 的测井数据对比,将 DK-1 钻孔的地表高程值设置为 0 m,其他 TEM 测点 GPS 高程值减去 DK-1 钻孔地表的 GPS 高程值,得到各测点的高程差用于电阻率断面图的地形改正。

经过地形改正后各测点的垂向深度非真实深度,它是与二次场电磁波在介质中传播时长相关的视深度,与实际深度存在误差,还需依据钻孔标志界线进行深度校正。木里聚乎更研究区确切的深度标志是钻孔所见冻土层与非冻土层的分界线,这一分界线在 DK-1 钻孔中的深度为 95 m^[5],对比经反演及地形改正后电阻率断面(图 6)上 DK-1 钻孔位置上部高阻底界的深度值,将二者比值作为深度校正系数,校正各测点的视深度值。由于瞬变电磁法本身浅部探测盲区的不可改变,经过地形及深度校正后会形成地表浅部一定深度的空白区。由于沼泽地表富水环境的电磁波吸收效应导致探测深度有所降低,未能探测到更深部地质体的电性信息。

6 TEM 天然气水合物探测分析

图 6 中存在上部连续的较厚高阻层和基于下部低电阻率背景之间的不连续较薄高阻层,由浅及深的电阻率变化符合木里聚乎更研究区纵向电性分带特征(表 2),与天然气水合物科学钻 DK-1 的电阻率测井结果基本一致(见图 2)。上部连续高阻层电阻率值为 100~320 Ω·m,下部低阻背景电阻率值为 0~60 Ω·m,电阻率差异明显,分层清楚,符合表 1 木里地区长年冻土层电阻率平均值是非冻土电阻率平均值 2.79 倍的电性规律;认为电阻率断面上部高阻层是长年冻土层的电性响应,下部低阻背景是非冻土层的电性响应。

图 6 下部低阻背景之间的不连续高阻层,其电阻率值在 80~240 Ω·m 之间,是非冻土层电阻率值的 4 倍左右,与木里天然气水合物赋存层电阻率高于非冻土层电阻率的结果一致,且储藏深度符合钻孔推断 115~396 m 是木里聚乎更矿区天然气水合物赋存层位的认识;认为 TEM 剖面电阻率断面上位于 110~200 m 之间横向不连续的高阻层位是天然气水合物赋存的电性响应。

由于瞬变电磁法与电阻率法测井的原理不同,且瞬变电磁法存在体积效应,测点纵向电性分辨率较电阻率法测井的电性分辨率要低。

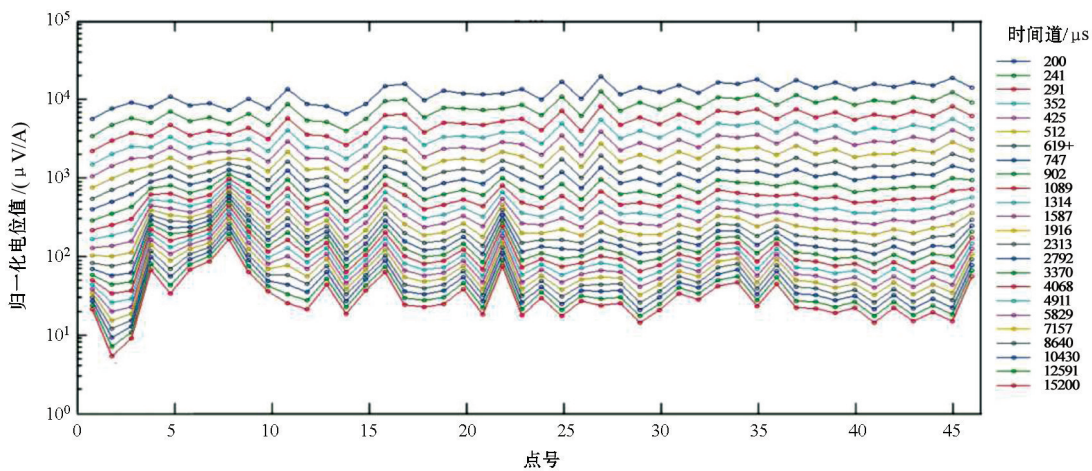


图 5 TEM 实验剖面时间道多测道曲线

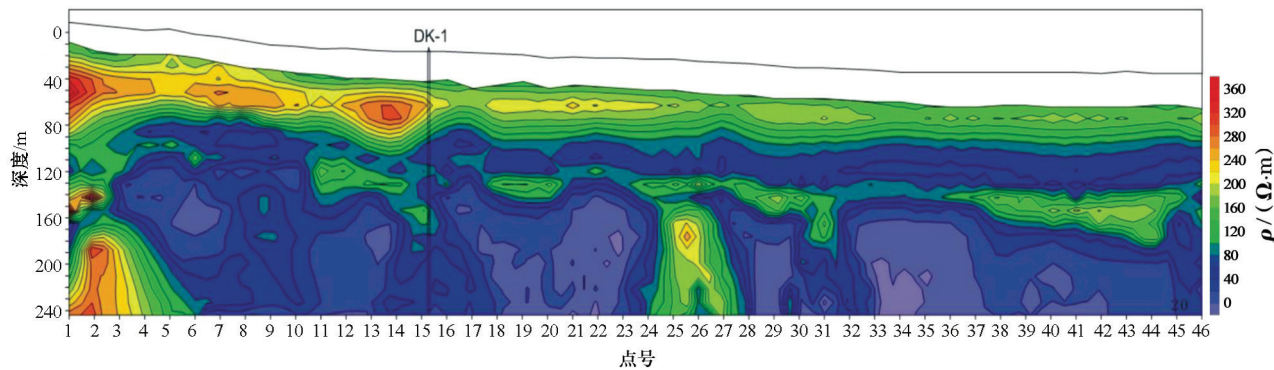


图 6 TEM 实验剖面反演电阻率断面

7 结论

1) 天然气水合物赋存层的电阻率明显高于围岩非冻土层的电阻率,具备瞬变电磁法探测天然气水合物的物性基础。木里聚乎更矿区瞬变电磁法实验研究表明:瞬变电磁法不仅可以探测到冻土层之下的非冻土层,而且可以探测到非冻土层内不连续的高阻异常体。

2) 瞬变电磁法在非冻土层内探测出的不连续高阻层位与实际钻孔资料所推断的天然气水合物的储藏层位具有高度可比性,认为该不连续高阻层位指示了天然气水合物赋存层位,值得进一步关注。

3) 瞬变电磁法工作方便,周期短,效率高,天然气水合物赋存层电性响应明显,是沼泽覆盖长年冻土区探测天然气水合物的有效方法。

参考文献:

[1] Kvenvolden K A. A review of the geochemistry of methane in natural gas hydrate [J]. Organic Geochemistry, 1995, 23(11/12): 997-1008.

[2] Makogon T F, Holditch S A, Makogon T Y. Natural gas hydrate

— a potential energy source for the 21st century [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2007, 56: 14-31.

[3] Collett T S. Natural gas hydrates of the Prudhoe Bay and Kuparuk River Area, North Slope, Alaska [J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1993, 77(5): 793-812.

[4] Dallimore S R, Collett T S. Intrapermafrost gas hydrates from a deep core hole in the Mackenzie Delta Northwest Territories, Canada [J]. Geology, 1995, 23(6): 527-530.

[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] 许振奎,张胜业. 天然气水合物模型的瞬变电磁响应[J].地球物理学进展,2008,23(5):1568-1574.

[7] 郭星旺,祝有海. 祁连山冻土区 DK-1 钻孔天然气水合物测井响应特征和评价[J].地质通报,2011,30(12):1868-1873.

[8] Hyde C, Dallimore S, Hunter J, et al. Results from a TEM survey for gas hydrate delineation in permafrost [R]. Society of Exploration Geophysicists, 2000 SEG Annual Meeting, 6-11 August, Calgary, Alberta.

[9] 韩江涛,刘国兴,唐君辉. TEM 拟地震成像法在漠河地区探测永久冻土层的应用[J].吉林大学学报:地球科学版,2008,38(6):1060-1064.

[10] 祝有海,赵省民,卢振权,等. 我国陆域永久冻土带天然气水合物资源远景调查[R].中国地质科学院矿产资源研究所,2007.

[11] 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.

[12] 周幼吾,郭东信,程国栋,等.中国冻土[M].北京:科学出版社,2000.

[13] 文怀军,鲁静,尚潞君,等.青海聚乎更矿区侏罗纪含煤岩系层序地层研究[J].中国煤田地质,2006,18(5):19-21.

[14] 王佟,王庆伟.中国陆域天然气水合物勘查技术理论与实践[J].煤炭科学技术,2012,40(10):27-29,60.

[15] 郭星旺,祝有海.祁连山冻土区 DK-1 钻孔天然气水合物测井响应特征和评价[J].地质通报,2011,30(12):1868-1873.

[16] 张凤鸣.木里煤田的冻土[J].煤田地质与勘探,1989,3:50-54.

[17] 卢振权,祝有海,张永勤,等.青海省祁连山冻土区天然气水合物基本地质特征[J].矿床地质,2010,29(1):182-191.

[18] 王平康,祝有海,卢振权,等.祁连山冻土区天然气水合物岩性和分布特征[J].地质通报,2011,30(12):1839-1850.

[19] 张胜业,潘玉玲.应用地球物理学原理[M].武汉:中国地质大学出版社,2004.

[20] 朴化荣.电磁测深法原理[M].北京:地质出版社,1990.

[21] 方文藻,李予国,李貅.瞬变电磁测深法原理[M].西安:西北工业大学出版社,1993.

The application of transient electromagnetic method to gas hydrate exploration in Muli permafrost area

YANG Ming-Guo¹, XING Xue-Wen², LIU Song²

(1. China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China)

Abstract: Gas hydrate, an insulated solid with high resistivity, has the basic physical property for electromagnetic exploration. In Muli permafrost area, TEM experiments were performed where gas hydrate samples were acquired by core. In the apparent resistivity pseudo-sections of TEM line, there exist a continuous high resistivity layer in the shallow part and a discontinuous high resistivity layer in the deep part. The shallow high resistivity layer is confirmed as tundra depending on the temperature logging of gas hydrate hole in Muli permafrost. The deep high resistivity layer, which is under the tundra, lies in the gas hydrate stability zone (GHSZ) of Muli area. Its depth corresponds to the depth of gas hydrate-bearing layer in known drill holes. According to the experiment, the preliminary conclusion is that transient electromagnetic method can be used in gas hydrate exploration in permafrost area based on its high resistivity detection capability.

Key words: gas hydrate; transient electromagnetic method; permafrost; high resistivity layer; Muli area

作者简介: 杨明国(1961-),男,工程师,毕业于中国地质大学(武汉),长期从事地质与物探应用等方面的研究工作。
通讯作者: 邢学文(1976-),男,高级工程师,中国地质大学(北京)博士后,主要从事遥感油气勘探方面的研究工作。