TEM 拟地震成像法在漠河地区探测永久冻土层的应用

韩江涛, 刘国兴, 唐君辉
吉林大学 地球探测科学与技术学院, 长春 130026

摘要: 利用瞬变电磁法(TEM)研究永久冻土层的分布规律, 为中国东北天然气水合物远景调查的进一步研究提供依据。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。反演结果表明, 漠河SN(2)测线永久冻土发育良好, 厚度较大, 且具有一定的连续性, 与直流电测深法揭示的结果相一致。

关键词: 漠河地区; 瞬变电磁; 拟地震解释; 永久冻土层
中图分类号: P631.4 文献标识码: A 文章编号: 1671-5888(2008)06-1060-05

Application of Transient Electromagnetic Pseudo-Seismic Interpretation Imaging Method to Explore Permafrost Strata in Mohe Region

HAN Jiang-tao, LIU Guo-xing, TANG Jun-hui
College of GeoExploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China

Abstract: TEM method is used to study the space distribution regularity of permafrost strata in order to offer the base for further research of the northeast natural gas hydrate prospective investigation. This method gets better geological result by using pseudo-seismic interpretation imaging technology to inverse TEM field data to divide the reflect interface and electric level and then inferred the distribution of permafrost strata of Mohe region successfully. The inverse result shows that the permafrost strata of the south-north second measurement line developed well with large thickness, had certain continuity, and was consistent with the result of VES.

Key words: Mohe region; transient electromagnetic method; pseudo-seismic interpretation; permafrost strata

天然气水合物(gas hydrate)是由天然气(主要是甲烷)和水所形成的一种类似冰一样的矿体, 被誉为21世纪石油天然气的理想替代能源, 已经引起了国内外的广泛关注[1]。天然气水合物主要分布在永久冻土带及大陆架、深海平原沉积物中[2]。加拿大曾在北极圈附近的Mackenzie三角洲地区, 利用时间域电磁法(TDEM)在长达30 km的剖面内探测永久冻土的深度变化, 取得良好的地质效果[3]。我国东北和青藏高原是永久冻土分布的主要区域, 对东北永久冻土区域性规律研究也有很多相关报道。

收稿日期: 2008-03-30
基金项目: 中国地质调查局项目(200410100001)
作者简介: 韩江涛(1982—), 男, 辽宁凌源人, 博士研究生, 主要从事地球探测与信息技术研究, E-mail: hanjiangtao@email.jlu.edu.cn
通讯联系人: 刘国兴(1951—), 男, 内蒙古库伦旗人, 教授, 博士生导师, 从事电法勘探教学与应用研究, E-mail: guoxing@jlu.edu.cn。

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

永久冻土的分布, 总的规律是服从于自然地理纬度变化规律, 随纬度的增高, 多年冻土分布的连续性增大, 厚度亦增大; 其它各种自然因素, 如雪盖、植被、岩性、含水量、坡向、地表水和地下水等, 都会影响冻土的发育[4]。2004 年 8—9 月期间, 在漠河地区进行了瞬变电磁法和直流电测深法探测永久冻土层的研究工作, 目标是推断出沿剖面水平方向和垂直方向永久冻土层的分布规律。

1　工作区概况及地质特征

工作区地处大兴安岭北端, 地理坐标为东经 122°00′ ~ 122°25′, 北纬 53°20′ ~ 53°28′, 行政区划属于黑龙江省漠河县漠河乡管辖。

工作区内地形起伏较大, 最高海拔为 783.5 m, 最低为 400 余 m, 一般为 600 余 m。区内全部为森林所覆盖。气候属于我国最寒冷的寒温带气候, 年平均气温 - 4.9 ℃, 极端最低气温达 - 49.5 ℃, 结冻期长达 7 个月左右, 有利于连续冻土层的发育。

工作区位于兴安岭—内蒙地槽褶皱区额尔古纳地块额木尔山中间隆起带东部。区内分布的地层主要为中侏罗统额木尔河组(J_2e) 的一套灰、灰黑、黑色长石岩屑砂岩, 石英长石砂岩; 在工区南端金沟林场附近分布有中侏罗统二十二站组(J_2er) 地层, 主要岩性为浅黄、浅灰色岩屑长石砂岩、石英长石砂岩、夹砾岩、煤层和煤线(图 1)。

2　瞬变电磁拟地震成像方法

瞬变电磁法反演的方法很多: 苏朱刘[5] 等以 Bostick 反演法的结果为初始模型, 用正演修正法对“虚拟全区视电阻率曲线”进行了反演, 解决了全区视电阻率解的唯一性和存在性等问题; 蒋邦远[6] 分析了烟圈理论一维反演的缺陷, 提出了磁源 TEM 测深一维反演的经验公式; 杨长福[7] 等根据烟圈理论, 导出三维瞬变电磁近似反演方法; 李创社[8] 等采用人工神经网络法反演瞬变电磁数据, 简化了反演过程; 熊彬[9] 提出了一种方便快捷的瞬变电磁全区视电阻率逆样条插值法, 为瞬变电磁自动反演中初始模型的构制奠定了基础。

近年来对瞬变电磁法拟地震成像法的研究越来越多: 薛国强[10] 等研究了瞬变电磁测深数据到平面电磁波场数据的等效转换问题; 李貅[11] 等提出了中心回线装置瞬变电磁拟地震解释的思路, 总结出瞬变电磁数据进行时- 频转换的经验公式; 刘继东[12] 等详细讨论了 TEM 反射系数函数的求取方法。基于电磁波在导电介质中传播的运动相似性建立起来的拟地震解释, 在一定程度上缩小了解的非唯一性问题, 扩大了电磁法的应用范围, 并可从观测资料中提取常规反演方法得不到的更多、更准确的地下信息[12]。

瞬变电磁拟地震解释成像的处理过程是[12]: 直

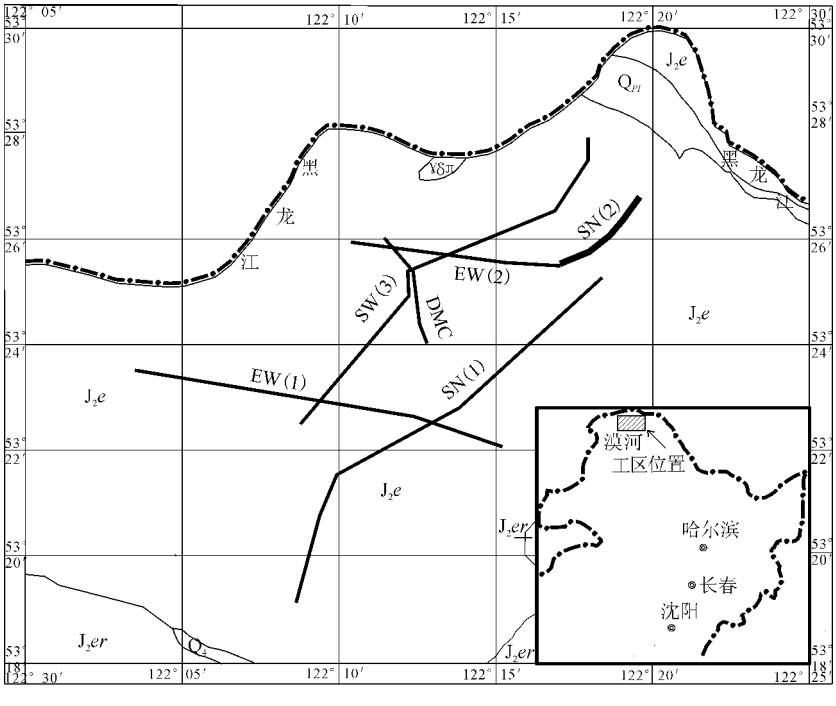


图 1　工区区域地质概况

Fig. 1　Map of areal geology

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

接由野外实测的感应电动势数据,经过线性数字滤波求出传输函数,对含有未知数(反射系数)的方程组做适当的变换后,使用线性规划法再加上特定的地球物理约束条件求解含有反射系数的线性方程组,从而实现瞬变电磁拟地震解释成像方法技术。

在水平层状介质表面,回线源形成的瞬变电磁响应表达式为[12]

$$\frac{dB(t)}{dt} = \frac{2}{\pi}\int_0^{\infty} \mathrm{Re}\left[I_0 a \int_0^{\infty} \frac{\lambda Z^{(1)}}{Z^{(1)} + Z_0} J_1(\lambda a)\, d\lambda \right] \cos \omega t\, d\omega 。 \quad (1)$$

式中:I_0 为线圈发送电流;Z_0 为自由空间的特征波阻抗;$Z^{(1)}$ 为地面接收的某一频率所对应的层状介质的综合波阻抗。(1)式左边为野外实测磁场数据,通过反褶积和线性数字滤波可以从(1)式中求出波阻抗。

设从地下反射回地表的总的反射函数为 R。由于空气的电阻率为无限大,所以由空气向地下的反射也为 R。故下行波函数为 $D_1 = 1 + R$,而上行波函数为 R,这里设源的强度为1,令反射函数 $R(\omega) = \left(\frac{Z^{(1)}}{Z_0} - 1\right)/2$,则由(1)式可得[12]

$$R(\omega) = \sum_{m=1}^{\infty} q_m \mathrm{e}^{-2\sqrt{i\omega t_0} m} = \sum_{m=1}^{\infty} q_m P^m 。 \quad (2)$$

上式为右边含有反射序数 q_m 的方程组,可以采用线性规划法在时间域内求取。

本文对漠河地区探测永久冻土的实测资料进行拟地震成像处理,结果表明瞬变电磁拟地震成像解释方法效果明显。

3 实测资料处理结果

本次探测使用仪器为美国 Zonge 公司制造的 GDP-32$^{\mathrm{II}}$ 型多功能电测仪。瞬变电磁法采用中心回线装置,发射线圈为 20 m × 20 m 的方形回线,接收用多匝空心探头。对图1中 SN(2)测线直流电测深数据和瞬变电磁数据进行对比分析。

图2是由电测深一维反演推断的电性分层定量解释结果。对该测区直流电测深曲线进行分层:第一层为地表腐殖层和很薄的碎石层(几米),第二层是电阻率相对较低的电性层,这一层厚度也不大,有的测深曲线反映明显,有的则没有该层反映,前两层在图2中合并成一层;第三层是厚度较大(几十米到上百米)、电性相对较稳定的中高阻层(几百到上千 Ω·m),推断为永久冻土层;测深曲线的尾枝视电阻率值大多已经开始或已明显下降,这表明冻土层之下为一低阻层。电测深结果的第三层所反映冻土厚度与霍拉盆地钻孔所揭示的实际厚度相一致[4]。

图3为电测深结果二维反演断面图。从图中可以看出,整条剖面从表层至 150 m 深处电阻率沿垂向上部为高阻,下部为低阻的特征。中高阻等值线显示自南向北有逐渐变深的趋势。考虑到东北永久冻土的最大深度不超过 150 m 且具有高阻特征[4],综合电测深一维分层情况和二维反演断面图的电性变化趋势,推断图3中所示虚线即为冻层与非冻层的界线。

图4为瞬变电磁拟地震成像法获得的深度剖面图,电磁响应在不同的电性界面发生多次反射,一次反射与多次反射的识别主要依据多次反射出现的位置及其振幅大小。从图中可以看出,贯穿整个剖面存在着一条明显的电性分界面,其反射序列为负,表明第一层电阻率高于第二层电阻率,电性分层整体效果较好。瞬变电磁深度剖面为 50~100 m 中存在一条较为清晰明显的电性分界层,结合前述推断,判断该层为永久冻土层的下界。在测线北端揭示的冻土厚度比直流电测深结果稍薄一些,但基本上显示了测线从南到北永久冻土层厚度逐渐增大的规律,与直流电测深反演结果有较好的一致性,这说明本文的拟地震解释法是正确的,达到了成像解释的目的,取得了较理想的应用效果。

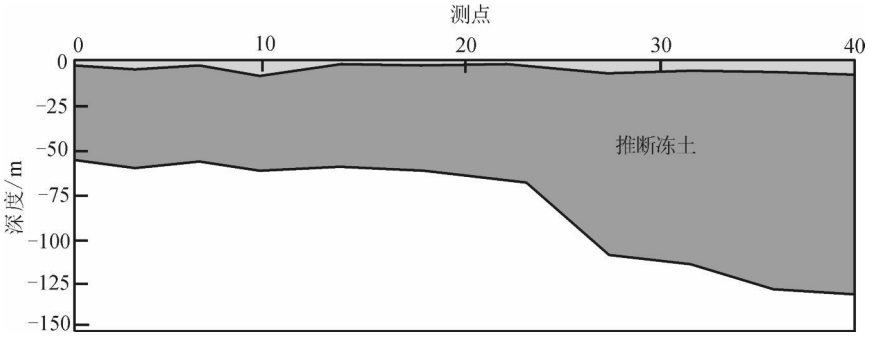


图2 漠河 SN(2)测线电测深一维定量解释结果

Fig. 2 1D quantitative interpretation of VES in Mohe south-north section(2)

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

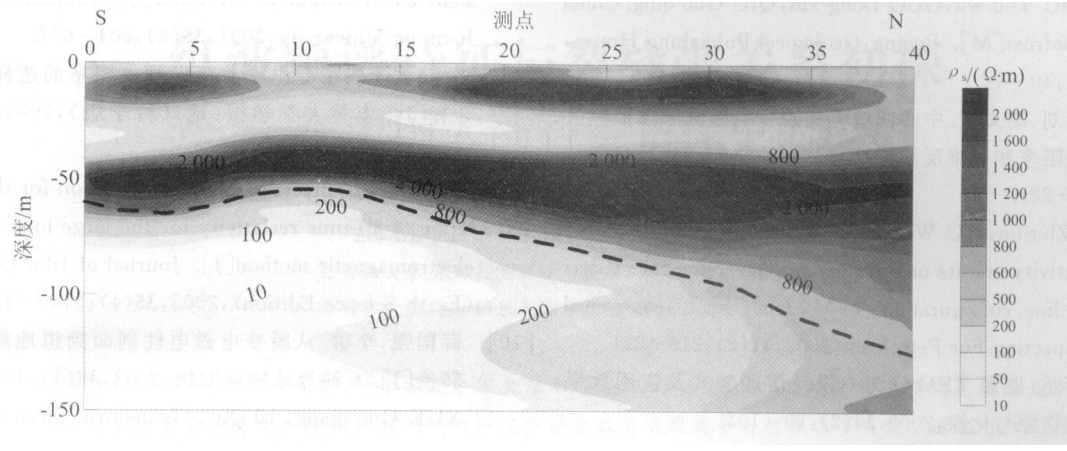


图 3　漠河 SN(2) 测线电测深二维反演断面图

Fig. 3　2D inversion result of VES in Mohe south north section(2)

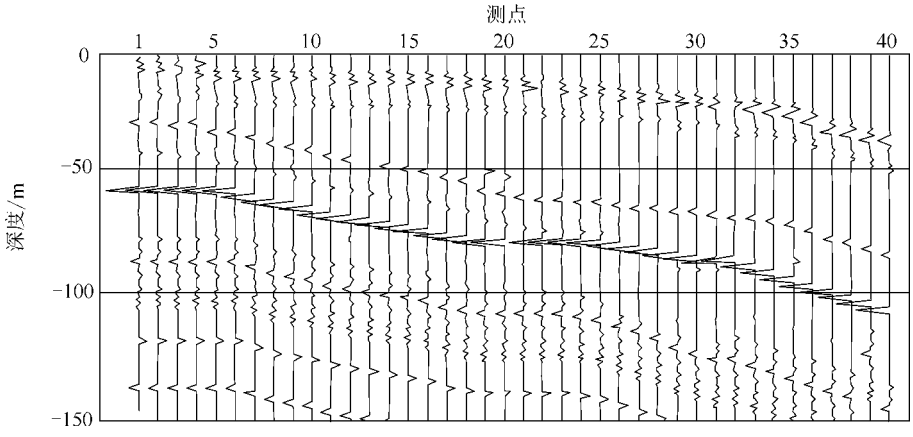


图 4　漠河 SN(2) 测线 TEM 拟地震成像深度剖面

Fig. 4　Pseudo seismic deep section of TEM in Mohe south north section(2)

4　结论与建议

(1) 瞬变电磁法拟地震成像法在一定程度上缩小了解的非唯一性问题, 从观测资料中提取常规反演方法得不到的地下信息。

(2) 对瞬变电磁数据经过时深转换后, 得出随深度变化的地电结构断面, 在 SN(2) 测线北端揭示的冻土厚度比直流电测深结果稍薄一些, 但基本上显示了测线从南到北永久冻土层厚度逐渐增大的趋势。

(3) 综合直流电测深和瞬变电磁法反演结果, 可看出漠河 SN(2) 测线永久冻土发育良好, 厚度较大, 最厚可达 130 余 m, 且具有一定的连续性。

多次反射在拟地震时间剖面中不仅存在而且较为严重, 影响了解的判断, 降低了解的精度。因此选择有效压制多次反射的方法还将是今后的一项重要工作。

参考文献(**References**):

[1] 赖枫鹏, 李治平. 天然气水合物勘探开发技术研究进展[J]. 中外能源, 2007, **12**(5): 28-32.
LAI Feng-peng, LI Zhi-ping. Progress in research of exploration and development technologies for gas hydrates[J]. Sino-Global Energy, 2007, **12**(5): 28-32.

[2] 张俊霞, 任建业. 天然气水合物研究中的几个重要问题[J]. 地质科技情报, 2001, **20**(1): 44-48.
ZHANG Jun-xia, REN Jian-ye. Several important problems in the research of gas hydrates[J]. Geological Science and Technology Information, 2001, **20**(1): 44-48.

[3] Zhu Y, Rao Z, Wu B. Organic and gas geochemistry of gas hydrate-bearing sediments from Mallik 5L-38 production research well[J]. Mackenzie Delta, Canada Geological Survey of Canada Bulletin, **68**(2): 311-319.

[4] 周幼吾, 郭东信, 邱国庆. 中国冻土[M]. 北京: 地质出版社, 2000: 40-62.

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

ZHOU You-wu, GUO Dong-xin, QIU Guo-qing. China permafrost[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2000: 40-62.

[5] 苏朱刘, 胡文宝. 中心回线方式瞬变电磁测深虚拟全区视电阻率和一维反演方法[J]. 石油物探, 2002, **41**(2): 216-221.
SU Zhu-liu, HU Wen-bao. Pseudo-full-region apparent resistivity and its one-dimensional inversion for center-loop-line configuration TEM data[J]. Geophysical Prospecting For Petroleum, 2002, **41**(2): 216-221.

[6] 蒋邦远. 磁源TEM测深一维反演经验式及应用效果[J]. 物探与化探, 2000, **24**(2): 99-104.
JIANG Bang-yuan. A rapid 1-D empirical inversion formula and its application results in TEM sounding[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2000, **24**(2): 99-104.

[7] 杨长福, 林长佑, 陈军营, 等. 三维瞬变电磁近似反演[J]. 地震学报, 2000, **22**(4): 377-384.
YANG Chang-fu, LIN Chang-you, CHEN Jun-ying, et al. 3-D approximate inversion for transient electromagnetic soundings[J]. Acta Seismologica Sinica, 2000, **22**(4): 377-384.

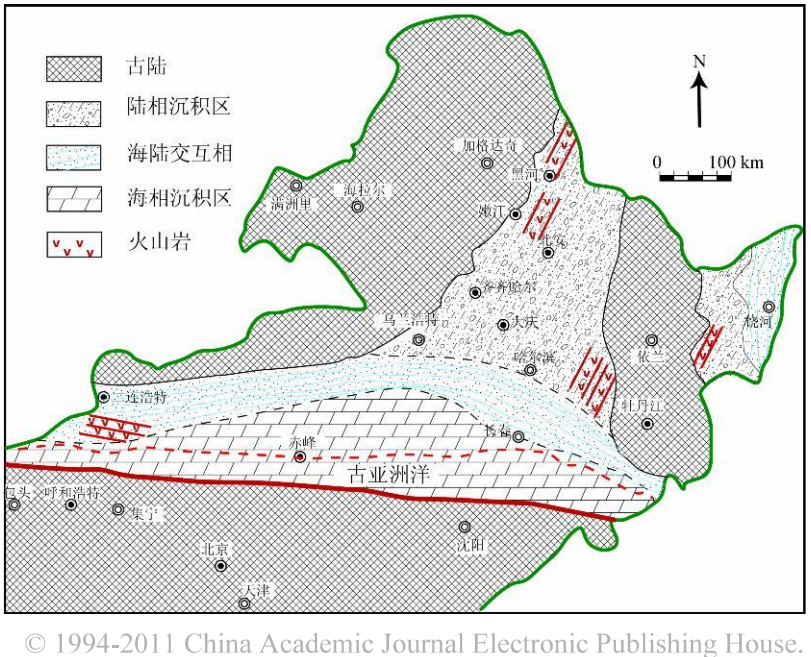
[8] 李创社, 张彦鹏, 李实, 等. 瞬变电磁勘探中的人工神经网络反演法[J]. 西安交通大学学报, 2001, **35**(6): 604-607.
LI Chuang-she, ZHANG Yan-peng, LI Shi, et al. New inversion method of artificial neural network in transient electromagnetic inversion[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2001, **35**(6): 604-607.

[9] 熊彬. 大回线瞬变电磁法全区视电阻率的逆样条插值计算[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2005, **35**(4): 515-519.
XIONG Bin. Inverse spline interpolation for the calculation of all-time resistivity for the large-loop transient electromagnetic method[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2005, **35**(4): 515-519.

[10] 薛国强, 李貅. 从瞬变电磁电性剖面到拟地震剖面的转换[J]. 石油地球物理勘探, 2003, **38**(4): 444-446.
XUE Guo-qiang, LI Xiu. Transform from transient electro-magnetic (TEM) electric section into pseudo-seismic section[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2003, **38**(4): 444-446.

[11] 李貅, 郭文波. 瞬变电磁测深快速拟地震解释方法及应用效果[J]. 西安工程学院学报, 2001, **23**(3): 42-45.
LI Xiu, GUO Wen-bo. The method and application effects of pseudo-seismic interpretation of TEM[J]. Journal of Xi'an Engineering University, 2001, **23**(3): 42-45.

[12] 刘继东, 林长佑, 杨长福. 瞬变电磁资料反演解释方法[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 2001: 115-137.
LIU Ji-dong, LIN Chang-you, YANG Chang-fu. Method of TEM inversion and explaination[M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 2001: 115-137.



更 正

由于工作疏忽, 本刊2008年第5期721页图2有误, 正确图件如左图所示。特此更正。

本刊编辑部

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net