

铁路隧道水热害不良地质体大地电磁场特征研究

——以川藏铁路茶洛隧道为例

王维强^{1,2}, 宋洪伟^{1,2}, 尚铭森^{1,2}, 毋海东^{1,2}, 闫丰录^{1,2}

(1. 自然资源部地热与干热岩勘查开发技术创新中心, 河北 石家庄 050061;

2. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061)

摘要:以川藏铁路茶洛隧道水热不良地质体大地电磁场特征为研究对象,利用大地电磁测深多测点-多频点阻抗张量成像分析,分解出电性主轴统计玫瑰图、频率分布云图、测点分布云图及构造维性参数等进行大地线性构造识别,利用精细二维反演技术推测地质结构特征,对不良地质体进行成像,为川藏铁路隧道选线提供地球物理参考。得出结论为:拟建隧道处大地构造二维性强,适宜开展二维大地电磁测深作为隧道水热勘察手段;通过查明研究区构造特征,推测出了研究区热泉群深部地热运移模式机理,且该热害影响茶洛隧道建设的可能性很小,只有在杂马岗-毛垭坝断裂与隧道位置交汇处存在一定规模的水害影响。

关键词:隧道;大地电磁;阻抗张量成像;二维反演;热害;水害;川藏铁路

中图分类号:P631;U452.1 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2021)05-0009-09

Magnetotelluric characteristics of hazardous hydrothermal geological structures at railway tunnels—A case study of Chaluo Tunnel of Sichuan-Tibet Railway

WANG Weiqiang^{1,2}, SONG Hongwei^{1,2}, SHANG Mingsen^{1,2}, MU Haidong^{1,2}, YAN Fenglu^{1,2}

(1. *Technology Innovation Center of Geothermal & Hot Dry Rock Exploration and Development,*

Ministry of Natural Resources, Shijiazhuang Hebei 050061, China;

2. *Institute of Hydrology and Environmental Geology, CAGS, Shijiazhuang Hebei 050061, China)*

Abstract: Taking the magnetotelluric behavior of the adverse hydrothermal geological structures at Chaluo Tunnel of Sichuan-Tibet Railway as the research object, and with magnetotelluric multi-site, multi-frequency tensor decomposition, this paper distinguishes the statistical rose diagram of the geo-electrical strike, frequency-based cloud maps, site-based cloud images and structural dimension parameters, and then uses fine two-dimensional inversion technology to infer the geological structure characteristics, and to image the adverse geo-structures. The purpose of geo-structure imaging is to provide geophysical reference for route selection for the Sichuan-Tibet Railway tunnel. The conclusions are as follows: the Geotectonics at the proposed tunnel is of strong two-dimensional nature; therefore, it is suitable to carry out two-dimensional magnetotelluric sounding as a means of tunnel hydrothermal investigation. With characterization of the geo-structure in the study area, the mechanism of the deep geothermal migration mode of the hot spring group in the study area is deduced, while the possibility of the thermal hazard affecting the construction of Chaluo Tunnel is very small, with only some potential water damage in the position where the fault of Zamagang-Maoyaba passes through the tunnel.

收稿日期:2020-10-27; 修回日期:2021-03-08 DOI:10.12143/j.ztgc.2021.05.002

基金项目:中国地质调查局地质调查项目“全国大地热流值测量与靶区优选”(编号:DD20190128)

作者简介:王维强,男,汉族,1984年生,工程师,地球探测与信息技术专业,硕士,主要从事水工环地球物理探测技术方面的研究工作,河北省石家庄市中华北大街268号,weiq0802@163.com。

引用格式:王维强,宋洪伟,尚铭森,等.铁路隧道水热害不良地质体大地电磁场特征研究——以川藏铁路茶洛隧道为例[J].钻探工程,2021,48(5):9-17.

WANG Weiqiang, SONG Hongwei, SHANG Mingsen, et al. Magnetotelluric characteristics of hazardous hydrothermal geological structures at railway tunnels—A case study of Chaluo Tunnel of Sichuan-Tibet Railway[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(5): 9-17.

Key words: tunnel; magnetotelluric; impedance tensor imaging; two-dimensional inversion; hot damage; water damage; Sichuan-Tibet Railway

0 引言

规划建设川藏铁路对国家经济社会发展具有重大深远意义,然而川藏铁路尤其是雅安至林芝段地形起伏大,地质构造复杂,地质灾害高度频发^[1]。拟建川藏铁路巴塘茶洛隧道段,该区新构造运动活动频繁,在断裂带及不良地质体附近发育泉点、热泉点众多,比如著名的巴塘热坑温泉群,温度达96~98℃,这些高温热害水害对铁路选线造成重大影响^[2]。欧阳涛等^[3]对铁路隧道地质结构勘查进展进行了总结,目前采取的方法主要为地震折射波法、地震反射波法、直流电法(直流电测深、高密度电法)等,主要探测隧道区域第四系厚度、基岩埋深、岩土体波速等。这些方法主要适用于浅埋隧道,且现场施工对地形平整度要求高,对川藏铁路深长埋隧道勘探能力有限。姚志勇等^[4]为解决高海拔艰险地段川藏铁路勘查,采用航空瞬变电磁与航空大地电磁联合使用及反演,实现了对岩性、断裂破碎带、富水高效高精度探测。汤井田等^[5]详细探讨了大地电磁法及瞬变电磁法在铁路隧道勘查中的应用效果,验证了2种方法的可行性和有效性。

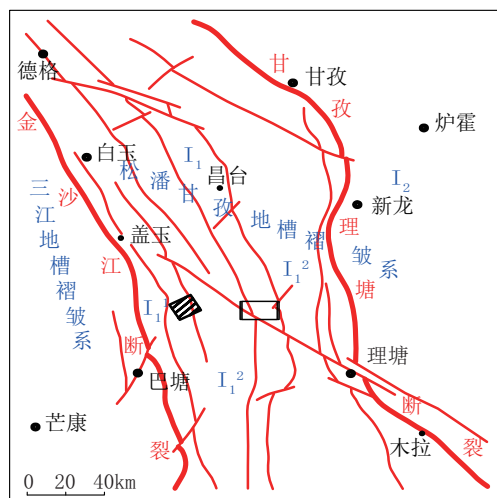
宽频大地电磁法是一种频率域电磁测深法,采用全频段采集,对地下地层、构造等地质体探测精度高,覆盖深度范围广^[6-7],二维处理及正反演理论成熟,因此,为查明铁路隧道附近活跃断裂带及不良地质体分布的特征及性质,本文拟利用大地电磁精细处理解释技术^[8-11]:阻抗张量分解的多测点-多频点统计成像分析、精细二维反演等手段,对这些高温热害水害等不良地质体进行详细研究,为川藏铁路选线提供坚实的地球物理依据。

1 工程概况

1.1 地质概况

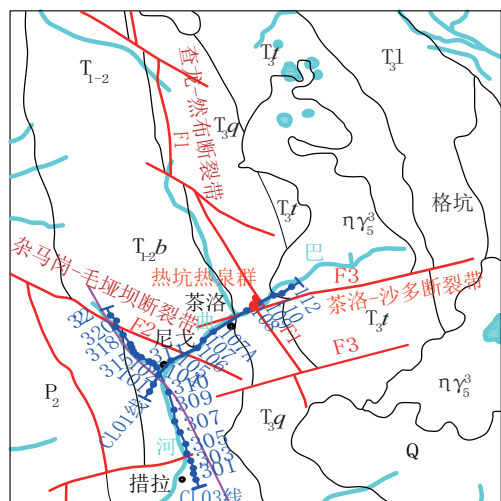
拟建茶洛隧道地貌属川西强烈隆起高山高原的金沙江东岸构造侵蚀高山峡谷区,受南北向断裂控制,形成南北向高山与峡谷。区域构造上位于松潘甘孜地槽褶皱系一级构造单元的二级构造单元义敦优地槽褶皱带^[12]。本构造单元东以甘孜-理塘深断裂带与雅江冒地槽褶皱带相接,西以金沙江断裂带

与三江地槽褶皱系毗邻(见图1a)。



图例
 I₁ 义敦优地槽褶皱系
 I₂ 雅江昌地槽褶皱系
 I₁¹ 中咱地背斜
 I₁² 义敦地向斜
 I₁³ 理塘地背斜

(a) 研究区区域构造简图



图例
 ● 地名
 河流
 物探测线测点及编号
 地质界线及代号
 断层及编号
 茶洛隧道位置

(b) 研究区地质简图

图1 研究区地质构造简图

Fig.1 Geological structure map of the study area

拟建茶洛隧道自措拉至尼戈方向展布,隧道附近存在3条主要断裂构造,包括查龙-然布断裂带(F1)、杂马岗-毛垭坝断裂带(F2)、茶洛-沙多断裂带(F3)(见图1b)。

断裂F1呈北北西向延伸,呈南北向展布。断裂两侧主要出露三叠系上统曲嘎寺组(T_3q)石英砂岩、粉砂质板岩、千枚岩等及图姆沟组(T_3t)板岩、变质砂岩、流纹岩、灰岩地层。断裂东侧出露燕山晚期黑云母二长花岗岩体。

断裂F2南起茶洛,呈北西向展布。该断裂可能控制中部燕山晚期侵入岩带中单个岩体的边界并对岩体有破坏作用,推测为一组活动性构造,沿其至今仍是一个频繁的地震活动带。

断裂F3由茶洛-沙多等2条彼此平行的北东向断裂构成。断裂之间均相距3 km,单条断裂长6~10 km。断裂走向北东东,倾向不定,倾角较陡。该断裂带在茶洛切割燕山晚期岩体和查龙-然布断裂,在茶洛附近两断层交汇处,温(热)泉发育,类型齐全,泉眼大致沿北东东向沟谷分布。

1.2 大地电磁测线野外布设

大地电磁法是一种天然场源的频率域电磁测深法,利用不同频率具有不同趋肤深度以达到测深目的(频率由高到低对应深度由浅到深),通过在地面接收2个相互垂直的天然源平面波电磁场(E_x, E_y, H_x, H_y)来实现数据采集,其中 x 代表南北方向, y 代

表东西方向^[13-15]。由于拟建茶洛隧道附近存在多条活动性断裂、岩体及热泉,这可能对铁路隧道施工造成重要水热害威胁。故为查明这些不良地质体的具体性质及相互关系,综合地质及地形条件在研究区布设大地电磁测深测线2条,分别命名为CL01线、CL03线,采集有效频率10400~0.35 Hz,采集频点共计60个,单点采集时间 ≤ 3 h,其中CL01线垂直隧道沿北北西向断裂布设,CL03线沿隧道方向垂直北东、北西向断裂布设(见图1b)。

2 大地电磁精细处理及反演

本文以2条大地电磁测线为基础,对其进行处理与反演解译。经数据采集后,每个测点经数据处理,均能得到2个方向的视电阻率曲线,即 ρ_{xy}, ρ_{yx} ,若 x 轴与地质体走向垂直,则 ρ_{xy} 为TM极化, ρ_{yx} 为TE极化。图2(a)为侵入岩体大地电磁观测曲线,曲线类型一般为K或KQ型曲线。图2(b)为三叠系地层大地电磁观测曲线,曲线类型一般为KH或H型曲线。完成极化模式识别后^[16],再根据TE及TM模式进行二维反演,对地质构造进行详细解译,但是一般情况下,地下深部地质体的走向是未知的,为探明

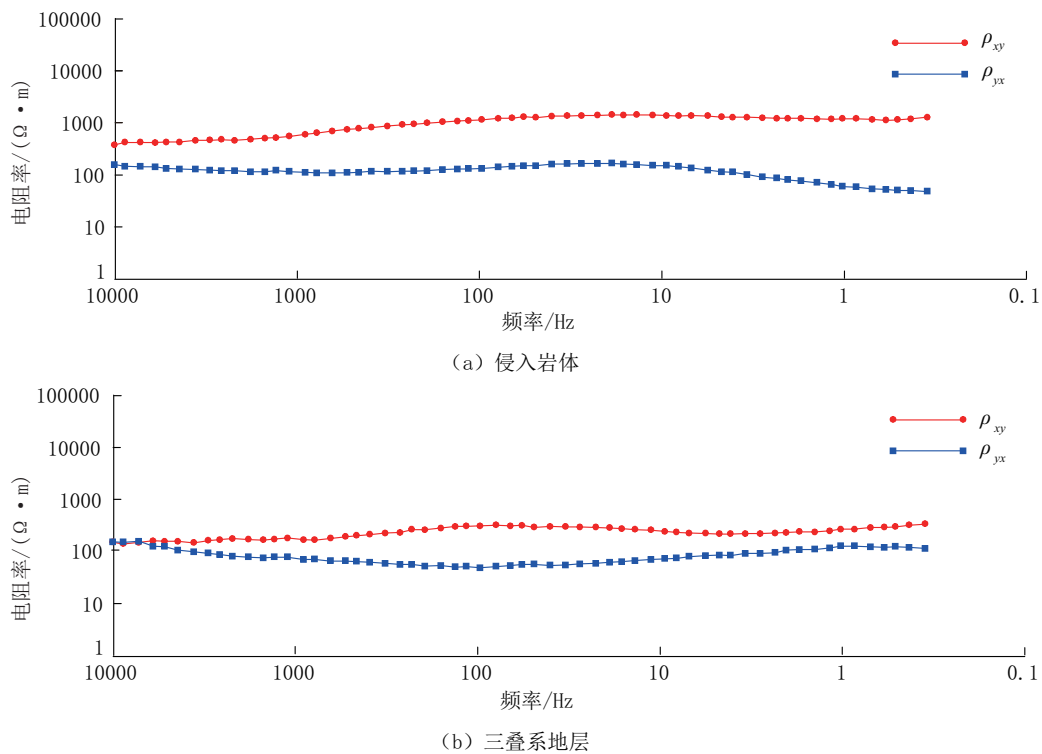


图2 典型测点大地电磁观测曲线

Fig.2 Magnetotelluric observation curve of typical observation points

研究区地层及地质构造走向及倾向,通过阻抗张量成像技术,利用最佳主轴统计成像、构造维性成像,并结合已知地质资料,识别二维性强的大地线性构造^[17],以确定地质体具体走向、倾向及不良地质体分布特征,并在此基础上,将视电阻率曲线旋转到该电性主轴方向上,完成极化模式识别即确定TE、TM,最后通过精细反演技术,对地下地质体进行准确成像。

2.1 阻抗张量成像分析

阻抗张量分解技术能压制近地表三维小异常体的影响^[18],为二维反演提供可靠的区域阻抗张量数据,同时可获得随测点、频点变化的区域电性主轴方位,在对观测数据进行共轭阻抗法(CCZ)分解后,利用多测点-多频点统计成像技术,不仅可以获得用于反演的区域阻抗,还可以获得研究区线性构造的分布图像。

野外时间序列数据采集完成后,通过初步处理

计算单测点的功率谱,在功率谱基础上再进行阻抗张量成像,进行测线测点电性主轴、构造维性分析以识别大地电性构造。下面对CL01线、CL03线开展阻抗张量成像分析。

图3为CL01线多测点-多频点线性主轴统计成像图,主要包括统计玫瑰图、测点分布云图及频率分布云图。从图3(a)可看出,CL01线的电性主轴主要有3个,在第一象限内,约为0°、NNE15°、NE45°(由于电性主轴成像存在90°不确定性,因此当方位为NE时,也同时可能为NW向),其中以NNE15°最为显著,占据绝大部分优势。图3(b)及图3(c)表明,电性主轴沿测点及频率方向均存在一定的变化,说明CL01线的构造方位在纵向及横向上均存在一定的不均匀性。CL101~CL109所对应位置的构造走向以NNE15°方向为主,其中测点CL102~CL105突变为NE45°,测点CL110~CL112以NE50°为主。

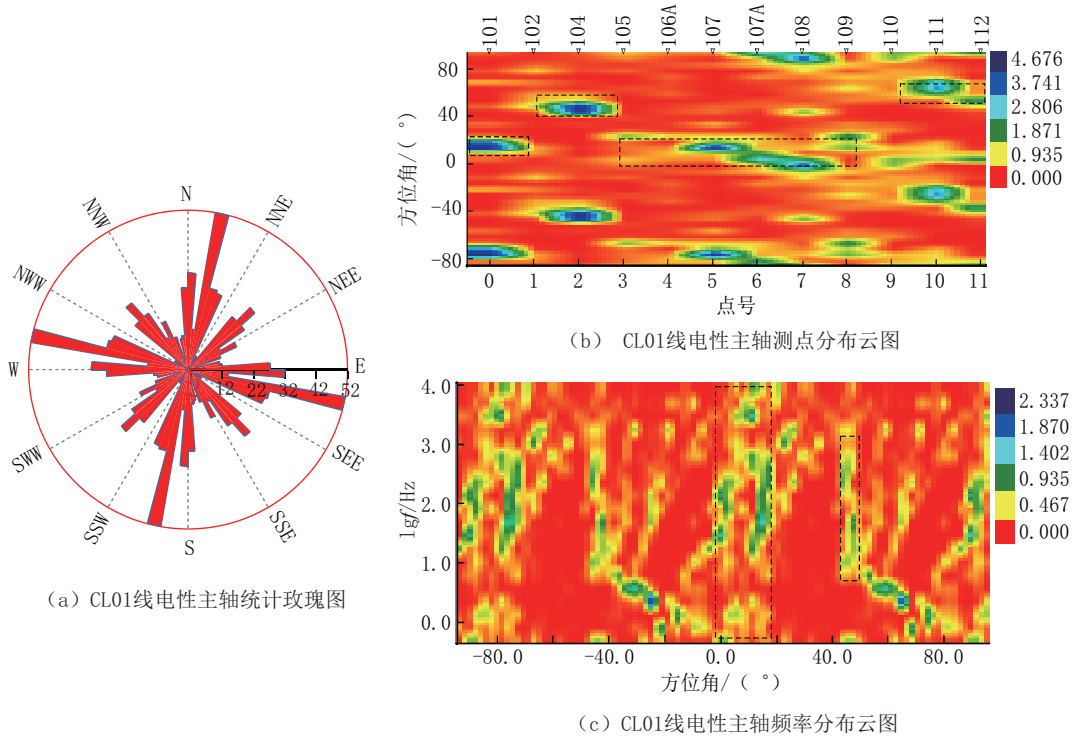
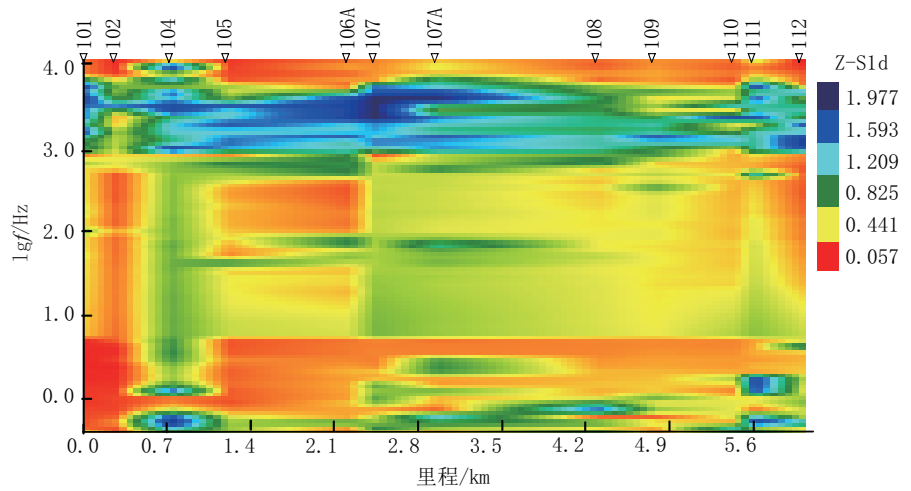


图3 CL01线所有测点、频点电性主轴统计成像

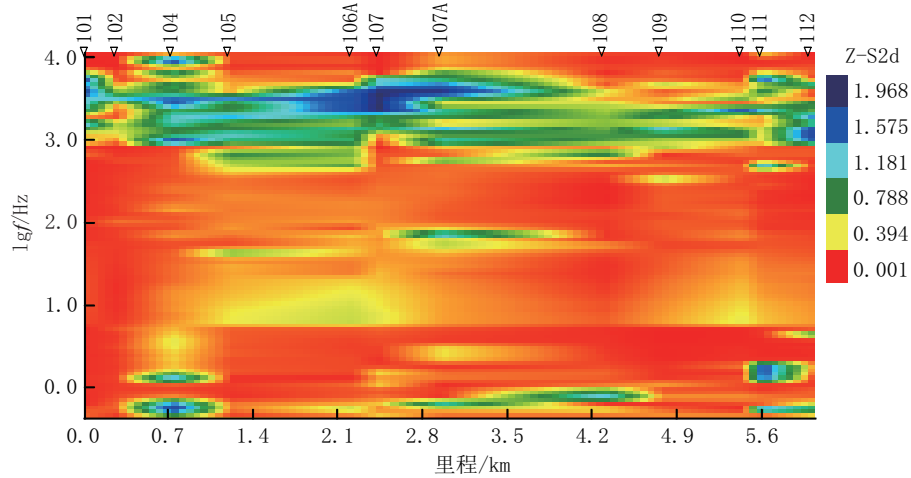
Fig.3 Statistical images of geo-electrical strikes for CL01 line with all site and all frequencies data

图4为共轭阻抗法分解后计算出的阻抗一维偏离度、阻抗二维偏离度及阻抗二维有效因子。从图4可以看出,阻抗一维偏离度相对较大,二维偏离度

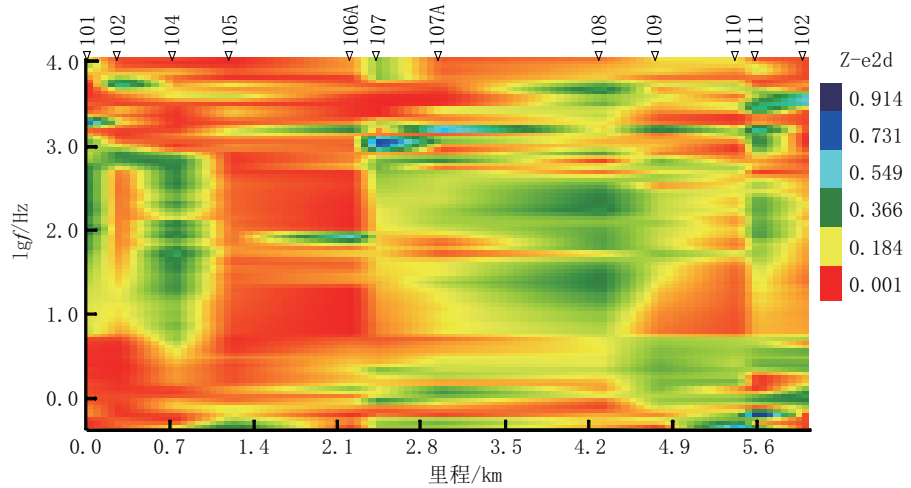
数值最小,二维有效因子值较大,说明对应位置地质体的二维性较强,存在较为明显的大地线性构造体。同时也说明该区域适宜进行二维反演。



(a) CL01线阻抗一维偏离度



(b) CL01线阻抗二维偏离度



(c) CL01线阻抗二维有效因子

图4 CL01线构造维性分布云图

Fig. 4 Cloud maps of structural dimensionality for CL01 line

综上可初步推测,测线上存在2个不同延伸范围的横向边界,一处为测点CL105处的杂马岗-毛垭坝断裂F2,一处为测点CL109处的查龙-然布断裂(F1),均分割了两侧不同走向的地质体构造。同时确定了CL101~CL109所对应位置的地质体走向以NNE15°方向为主,测点CL110~CL112对应位置的地质体走向以NE50°为主。

图5为CL03线多测点-多频点电性主轴统计成像图。从图5(a)可看出,CL03线的电性主轴主要

有3个,在第一象限内,约为NNW6°、N0°、NE47°,其中以NNW6°最为显著,占据绝大部分优势。图5(b)及图5(c)表明,电性主轴沿测点及频率方向均存在一定的变化,说明CL03线的构造方位在纵向及横向上均存在一定的不均匀性,CL301~CL305所对应位置的构造以NE47°测点CL305~CL310突变为NNW2°,测点CL310~CL314以NE47°为主,测点CL314~CL322以NNW6°为主。

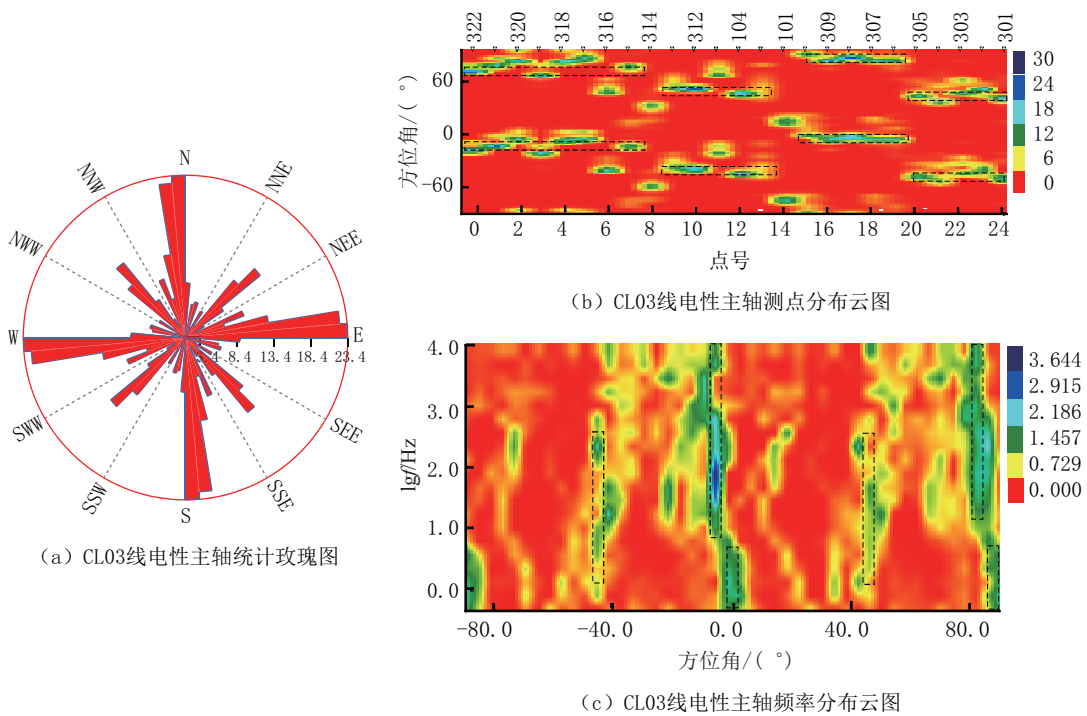


图5 CL03线所有测点、频点电性主轴统计成像

Fig.5 Statistical images of geo-electrical strikes for CL03 line with all site and all frequencies data

从图6可看出,测点CL322~CL305阻抗一维偏离度相对较大,二维偏离度数值最小,二维有效因子值较大,说明对应位置地质体的二维性较强,存在较明显的大地线性构造体。同时也说明该区域进行二维反演的适应性。需要注意的是测点CL301~CL305阻抗一维偏离度相对较大,二维偏离度数值较大,二维有效因子值较小,说明对应位置地质体的三维性较强,地下地质体岩性及结构较复杂,为地质构造及岩性剧烈变化区,推测该位置燕山晚期复杂的岩浆侵入活动导致地下地质结构各向异性强。

综上可初步推测,测线上存在3个不同延伸范围的横向边界,一处为测点CL304处的断裂(F4),

一处为测点CL309处的茶洛-沙多断裂(F3),一处为测点CL314处的杂马岗-毛垭坝断裂(F2),这些断裂均分割了两侧不同走向的地质体构造。CL03线测点CL301~CL315、CL310~CL314地质体走向约为NE47°,其他位置地质体走向均以NNW2°~6°为主。

2.2 二维反演及成果分析

经上节研究表明,研究区内地质构造二维性较强,适合于进行二维反演。本次反演使用中国地震局MT Pioneer软件,反演方法采用经典的带地形二维非线性共轭梯度算法,反演前首先将阻抗数据旋转到了最佳主轴方位上,且由于正则化因子的选取

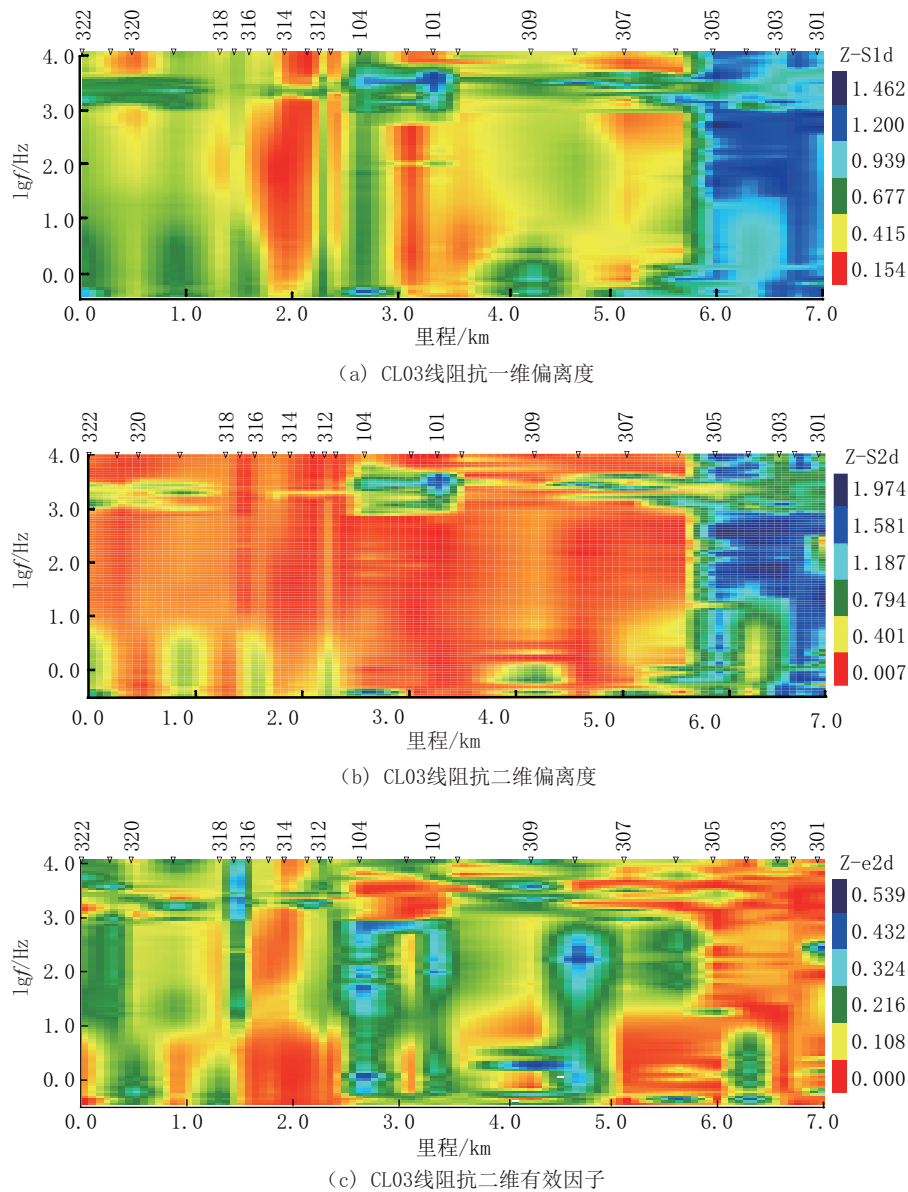


图6 CL03线构造维性分布云图

Fig.6 Cloud maps of structural dimensionality for CL03 line

对二维反演结果影响较大,故采用L曲线分析法对正则化因子优化取值^[19],通过分析,正则化因子取值30效果最好。

依据2条测线二维反演结果并结合阻抗张量初步定性成果,共计发现电性层4个,推测三叠系上统地层呈相对低阻特征,三叠系下统呈相对中阻特征,二叠系地层呈相对中低阻特征,花岗岩体呈高阻特征(见图7);共计发现断裂4条,其中推测断裂F1为查龙-然布断裂,该断裂走向NNE,倾向SE,倾角陡立。推测断裂F2为杂马岗-毛垭坝断裂,该断裂沿

北西向展布,倾角陡立。推测断裂F3为茶洛-沙多断裂,走向NEE,该断裂对两侧地层影响较大,中浅部存在低阻区,为含水破碎带反映,拟建隧道与该断裂交汇处应考虑水害影响;且该断裂向北东向延伸与F1交汇部位存在高温温泉群,推测该处地下水经断裂及岩性接触面裂隙运移至断裂深部加热后,在区域水利系统驱动下沿着有力对流通道上上升至地表,形成地热显示。铁路隧道位置距离控制该热岩体的断裂F1距离较远,缺少控热构造,故推测存在热害可能性较小。

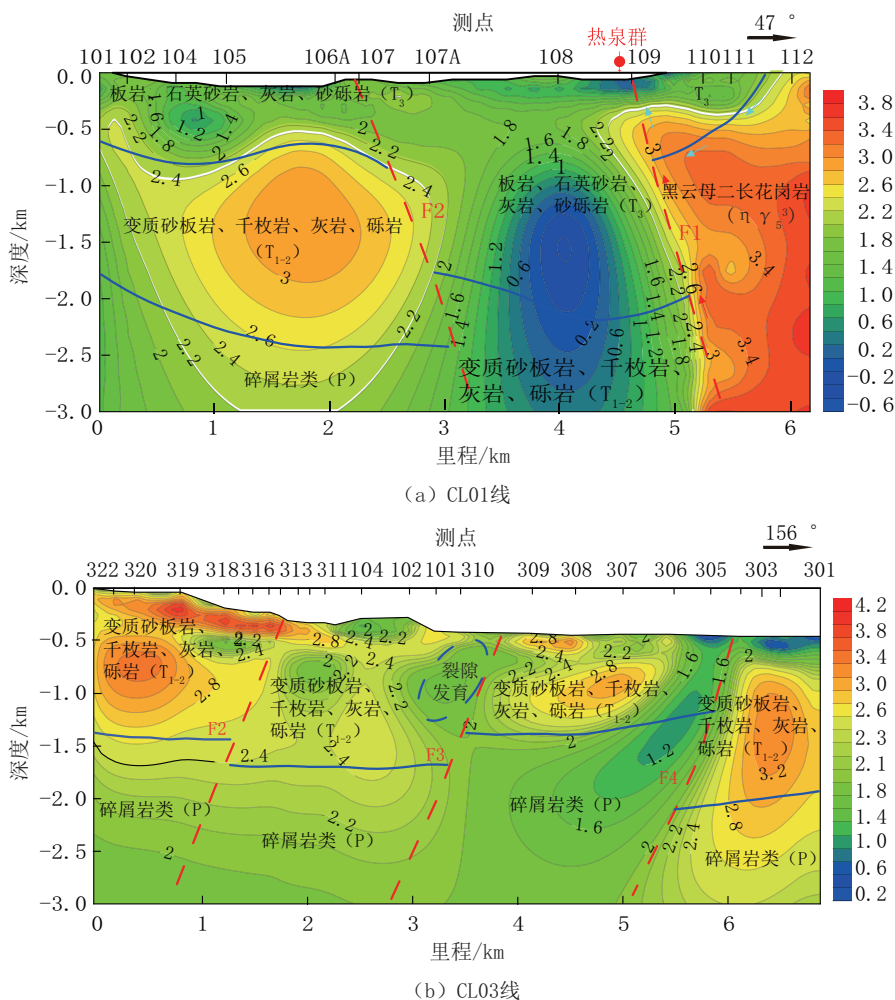


图7 CL01线、CL03线物探综合解译图

Fig.7 Comprehensive geophysical interpretation map for CL01 and CL03 lines

3 结论

(1) 本文通过多测点-多频点大地电磁阻抗张量成像技术及二维反演技术,以拟建茶洛隧道为研究对象,研究表明,研究区内地质构造二维性强,有效识别了测线位置处的大地线性构造,解译出了丰富的电性体的构造几何特征,为进一步的二维精细反演及综合解译提供了丰富信息,大大降低了反演的多解性,解译成果更准确。

(2) 通过查明研究区构造特征,推测出了隧道附近地热泉群的深部成因模式机理,并确定了该处热害对拟建隧道造成影响的可能性较小,只有在断裂F2经隧道位置处存在一定规模的水害影响,在下一步隧道选线工作中,可对该隐患点做进一步详细勘查,评价其影响程度。

参考文献 (References):

- [1] 潘桂棠,任飞,尹福光,等.洋板块地质与川藏铁路工程地质关键区带[J].地球科学,2020,45(7):2293-2304.
PAN Guitang, REN Fei, YIN Fuguang, et al. Key zones of oceanic plate geology and Sichuan-Tibet Railway Project [J]. Earth Science, 2020,45(7):2293-2304.
- [2] 冯涛,蒋良文,张广泽,等.川藏铁路雅康段隧道地热害评估方法探讨[J].铁道工程学报,2016,33(5):11-17.
FENG Tao, JIANG Liangwen, ZHANG Guangze, et al. Discussion about estimation technique of tunnel thermal harm in Ya'an-Kangding section of the Sichuan-Tibet Railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016,33(5):11-17.
- [3] 欧阳涛,底青云,安志国,等.CSAMT法在某铁路隧道勘察中的应用研究[J].地球物理学进展,2016,31(3):1351-1357.
OUYANG Tao, DI Qingyun, AN Zhiguo, et al. Application of CSAMT method in railway tunnel investigation [J]. Progress in Geophysics, 2016,31(3):1351-1357.
- [4] 姚志勇,孟祥连,杜世回,等.川藏铁路昌都至林芝段色季拉山

- 隧道航空物探试验研究[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(2): 1-11.
- YAO Zhiyong, MENG Xianglian, DU Shihui, et al. Experiment research on aero geophysical of Sejila Mountain Tunnel in Changdu to Linzhi section of Sichuan-Tibet Railway[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(2): 1-11.
- [5] 汤井田, 李鹏博, 肖晓. 高频大地电磁法及瞬变电磁法在隧道勘察中的应用[J]. 物探化探计算技术, 2017, 39(5): 605-611.
- TANG Jingtian, LI Pengbo, XIAO Xiao. Application of high frequency electromagnetic and transient electromagnetic method in the tunnel exploration [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2017, 39(5): 605-611.
- [6] 贾国臣, 刘康和, 周明. 大地电磁测深法在深埋隧洞勘察中的应用[J]. 水利水电技术, 2017, 48(10): 18-25.
- JIA Guochen, LIU Kanghe, ZHOU Ming. Application of magnetotelluric sounding method to exploration of deeply buried tunnel[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(10): 18-25.
- [7] 周伟. CSAMT方法在隧道工程前期勘探中的运用与研究[J]. 西部探矿工程, 2016, 28(12): 171-174, 176.
- ZHOU Wei. Application and research of CSAMT method in the early exploration of tunnel project [J]. West-China Exploration Engineering, 2016, 28(12): 171-174, 176.
- [8] Bahr K. Interpretation of the magnetotelluric impedance tensor: regional induction and local telluric distortion[J]. Journal of Geophysics, 1988, 62: 119-227.
- [9] 胡祥云, 金钢燮. 大地电磁六元素张量阻抗理论及应用[J]. 地球科学, 2018, 43(10): 3399-3406.
- HU Xiangyun, Kim Kangsop. A Trial for introducing 6-element tensor impedance in magnetotelluric method and Its application [J]. Earth Science, 2018, 43(10): 3399-3406.
- [10] 蔡军涛, 陈小斌, 赵国泽. 大地电磁资料精细处理和二维反演解释技术研究(一)——阻抗张量分解与构造维性分析[J]. 地球物理学报, 2010, 53(10): 2516-2526.
- CAI Juntao, CHEN Xiaobin, ZHAO Guoze. Refined techniques for data processing and two-dimensional inversion in magnetotelluric I: Tensor decomposition and dimensionality analysis [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(10): 2516-2526.
- [11] 陈小斌, 蔡军涛, 王立凤, 等. 大地电磁资料精细处理和二维反演解释技术研究(四)——阻抗张量分解的多测点-多频点统计成像分析[J]. 地球物理学报, 2014, 57(6): 1946-1957.
- CHEN Xiaobin, CAI Juntao, WANG Lifeng, et al. Refined techniques for magnetotelluric data processing and two-dimensional inversion(IV): Statistical image method based on multi-site, multi-frequency tensor decomposition[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(6): 1946-1957.
- [12] 赵友年, 陈斌. 四川省主要构造单元及其特征[J]. 四川地质学报, 2009, 29(S1): 88-94.
- ZHAO Younian, CHEN Bin. Major tectonic elements and their features in Sichuan province [J]. Acta Geologica Sichuan, 2009, 29(S1): 88-94.
- [13] 刘殿秘. 松辽盆地及其周围典型盆地部分地球物理特征[D]. 长春: 吉林大学, 2008.
- LIU Dianmi. Partial geophysical features of Songliao Basin and its peripheral typical basins [D]. Changchun: Jilin University, 2008.
- [14] 程正璞, 胡祥云, 李焯, 等. 民丰凹陷大地电磁探测研究[J]. 石油地球物理勘探, 2016, 51(2): 391-403.
- CHENG Zhenpu, HU Xiangyun, LI Ye, et al. A magnetotelluric survey in Minfeng Sag [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2016, 51(2): 391-403.
- [15] 余年, 胡祥云, 李坚, 等. 滇西龙陵地区地壳电性结构及其对大瑞铁路地质选线影响研究[J]. 地球物理学报, 2017, 60(6): 2442-2455.
- YU Nian, HU Xingyun, LI Jian, et al. Electrical structure of the Longling area in western Yunnan and its effect on route selection of the Dali-Ruili Railway [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(6): 2442-2455.
- [16] 蔡军涛, 陈小斌. 大地电磁资料精细处理和二维反演解释技术研究(二)——反演数据极化模式选择[J]. 地球物理学报, 2010, 53(11): 2703-2714.
- CAI Juntao, CHEN Xiaobin. Refined techniques for data processing and two-dimensional inversion in magnetotelluric II: Which data polarization mode should be used in 2D inversion [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(11): 2703-2714.
- [17] 陈小斌, 郭春玲. 大地电磁资料精细处理和二维反演解释技术研究(五)——利用阻抗张量成像识别大地线性构造[J]. 地球物理学报, 2017, 60(2): 766-777.
- CHEN Xiaobin, GUO Chunling. Refined techniques for data processing and two-dimensional inversion in magnetotelluric (V): Detecting the linear structures of the earth by impedance tensor imaging [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(2): 766-777.
- [18] 陈小斌, 叶涛, 蔡军涛, 等. 大地电磁资料精细处理和二维反演解释技术研究(七)——云南盈江-龙陵地震区深部电性结构及孕震环境[J]. 地球物理学报, 2019, 62(4): 1377-1393.
- CHEN Xiaobin, YE Tao, CAI Juntao, et al. Refined techniques for data processing and two-dimensional inversion in magnetotelluric (VII): Electrical structure and seismogenic environment of Yingjiang-Longling seismic area [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(4): 1377-1393.
- [19] 陈小斌, 赵国泽, 汤吉, 等. 大地电磁自适应正则化反演算法[J]. 地球物理学报, 2005, 48(4): 937-946.
- CHEN Xiaobin, ZHAO Guoze, TANG Ji, et al. An adaptive regularized inversion algorithm for magnetotelluric data [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2005, 48(4): 937-946.

(编辑 李艺)