

陈幸莲, 陆镜辉, 徐行, 等. 广东阳江深井中的变化地磁场特征研究[J]. 华南地震, 2019, 39(4): 53–59. [CHEN Xinglian, LU Jinghui, XU Xing, et al. Study of Variable Geomagnetic Field Characteristics in the Deep Boreholes in Yangjiang City, Guangdong Province[J]. South China journal of seismology, 2019, 39(4): 53–59]

广东阳江深井中的变化地磁场特征研究

陈幸莲¹, 陆镜辉², 徐行³, 王雄健¹

(1. 广东省阳江市地震学会, 广东 阳江 529500; 3. 广东省地震局广州地震台, 广州 510070;
2. 广州海洋地质调查局, 广州 510070)

摘要: 深井地磁观测是现今地磁学研究中地磁观测的新技术新方法。通过对广东阳江市双捷、罗阳二个钻孔的井中地磁观测和岩石磁性测量, 结合广东省地震局肇庆地磁基准台的观测数据, 对比分析不同观测环境中的同步地磁观测数据, 得到了几点结果: ① 罗阳台钻井石灰岩的平均剩余磁化强度为 $5.53\text{E}-04 (\text{A}\cdot\text{M}^{-1})$, 平均质量磁化率为 $7.10\text{E}-08 (\text{m}^3/\text{kg})$; 双捷台花岗闪长岩的平均剩余磁化强度为 $1.00\text{E}-01 (\text{A}\cdot\text{M}^{-1})$, 平均质量磁化率为 $1.39\text{E}-06 (\text{m}^3/\text{kg})$; ② 在磁平静时段中深井中的变化地磁场特征和基准地磁台的相近, 但在磁扰时段中两者之间相差较大; 深井中的变化地磁场受其围岩的岩石磁性影响很大, 弱磁性围岩中的响应小, 而强磁性围岩中的响应大。③ 深井中的变化磁场受围岩介质屏蔽和衰减效应影响, 也受介质的感应电磁场影响; 但后者要比前者的影响更大一些。

关键词: 广东阳江; 深井; 地磁观测; 岩石磁学; 变化地磁场

中图分类号: P315.721; P318.6

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662(2019)04-0053-07

DOI: 10.13512/j.hndz.2019.04.008

Study of Variable Geomagnetic Field Characteristics in the Deep Boreholes in Yangjiang City, Guangdong Province

CHEN Xinglian¹, LU Jinghui², XU Xing³, WANG Xiongjian¹

(1. Yangjiang Earthquake Agency, Yangjiang 529500, China; 2. Guangdong Earthquake Agency, Guangzhou 510700, China; 3. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510760, China)

Abstract: Deep borehole geomagnetic observation is a new technique and method in geomagnetic research field. Based on geomagnetic observation and rock magnetism measurement in Shuangjie and Luoyang boreholes in Yangjiang city, Guangdong province, by combining observation data from Zhaoqing Geomagnetic Reference

收稿日期: 2019-08-10

基金项目: 阳江市科技计划项目“阳江深井地磁观测数据与其地下介质磁性特征关系的研究”(2016026); 中国地震局监测、预测、科研三结合课题“阳江深井及其相邻地表地磁对比观测与数据分析”(CEA-KC/3JH-161903); 国家重大科学仪器设备开发专项“海洋地磁场矢量测量仪开发与应用”(2014YQ100817)联合资助。

作者简介: 陈幸莲(1980-), 女, 工程师, 主要从事地球物理观测工作。E-mail: 59272742@qq.com.

通信作者: 徐行(1963-), 男, 教授级高级工程师, 硕士, 主要从事海洋地球物理技术方法研究工作。

E-mail: gz_xuxing@163.com.

Station of Guangdong Earthquake Agency with comparative analysis of synchronous geomagnetic observation data in different observation environments, several results are obtained: the average remanent magnetization of limestone in Luoyang drilling is $5.53\text{E}-04$ ($\text{A}\cdot\text{M}^{-1}$) while the average mass susceptibility is $7.10\text{E}-08$ (m^3/kg); the average remanent magnetization of granodiorite in Shuangjie drilling is $1.00\text{E}-01$ ($\text{A}\cdot\text{M}^{-1}$) while the average mass susceptibility is $1.39\text{E}-06$ (m^3/kg); the variable geomagnetic field characteristics in the deep borehole during the magnetic quiet period is similar to that of the geomagnetic reference station, but there is a big difference between them in the magnetic disturbance period. the variable geomagnetic field in deep borehole is greatly affected by the rock magnetism of its surrounding rock, and the response of weakly magnetic surrounding rock is small while that of strongly magnetic surrounding rock is large; the variable magnetic field in deep borehole is influenced by the shielding and attenuation effects of surrounding rock media, as well as the induced electromagnetic field of the media. However, the latter is more influential than the former.

Keywords: Yangjiang; Guangdong Province; Deep borehole; Geomagnetic observation; Rock magnetism; Variable geomagnetic field

0 引言

地球科学是一种以观测为基础的多学科综合科学。如何提高观测的信噪比一直是观测研究中最重要命题。为减少日益增长的交通、工业和人类活动等地面干扰对传统地面地球物理观测工作的影响,国内外地球物理观测台站开始从地面向地下深井发展。深井地球物理长期观测的主要目的是降低地面干扰,获取高信噪比、高分辨率和高精度的地球物理观测资料^[1]。深井地磁观测的技术方法就是基于上述目的提出和发展起来的。

我国的深井地磁观测迄今为止不到十年。通过对上海和广东阳江两地深井地磁观测实践和资料分析,认为深井地磁观测的等效背景噪声水平明显小于地表地磁观测^[2-3],地表干扰对深井地磁观测基本没有影响^[4]。对比分析阳江和肇庆两台的历史数据,发现在磁扰小的时候,深处地下 200 m 的地磁观测受到围岩的感应地磁场影响不大;但当磁扰剧烈时,出现一定程度的感应地磁场影响^[5],这与深海水体中的地磁观测结果^[6]相似。基于介质中地磁观测记录会受感应地磁场的影响,那么,在围岩岩性不同的深井中,不同介质对于变化地磁场响应所产生“感应地磁场”是如何影响地磁观测记录的?其变化特征和差异又是什么?

本文作者将通过深井围岩的岩石磁性测定、深井地磁观测及其数据对比分析,来研究不同介质中的变化地磁场特征,为我国科学合理地推广深井地磁观测技术、开展相关的技术方法研究提供科学依据。

1 数据采集

本文的基础数据来自三个部分。①深井钻孔样品的岩石磁学参数的实测数据;②深井中的地磁场观测数据;③广东省地震局肇庆地磁基准台的观测数据。其中的深井分别位于广东省阳江市江城区双捷镇的阳江地震局双捷观测站 (21.91°N , 111.93°E),其围岩的岩性为花岗闪长岩,下文简称双捷台;阳春市罗阳小学操场观测站 (21.0000°N , 112.000°E),其围岩为石灰岩,下文简称罗阳台;肇庆地磁基准台的位置 (22.60°N , 111.80°E)位于广东肇庆市高要区莲塘镇,下文简称肇庆台。三者之间的位置示意图见图 1 所示。

1.1 岩石磁学参数的测定

为揭示深井中变化地磁场与感应地磁场的相互关系,了解围岩的岩石磁性,共采集了 4 段钻井岩芯用于样品岩石磁学参数的测定,每个井各 2 段岩芯。在南方科技大学海洋工程系磁学中心,委托加工和测试了样品的岩石磁性。其中,用 KappaBridge MFK-2 磁化率仪测量了样品的磁化率,其主要技术指标是:工作频率: 976 Hz, 3904 Hz, 15616 Hz;绝对校准精度: $\pm 3\%$;精度误差: $\pm 0.1\%$ 。用 JR6-A 旋转磁力仪测量了样品的天然剩余磁化强度,其主要技术指标是:测量量程达 12 500 A / m;灵敏度 2.4×10^{-6} A / m;绝对校准精度 $\pm 3\%$ 。

岩石测定过程是:测试前,按测试要求将岩芯加工成样品。样品的天然剩磁测量在磁屏蔽的环境下测得。样品的体积磁化率的测试和计算步

骤是:先将样品装盒后放置到 KappaBridgeMFK-2 磁化率仪中进行高、低频磁化率的测量,再称重样品,进行高、低频磁化率的质量归一化处理,

最后换算成质量磁化率,以消除样品质量差异对高、低频磁化率计算的影响。

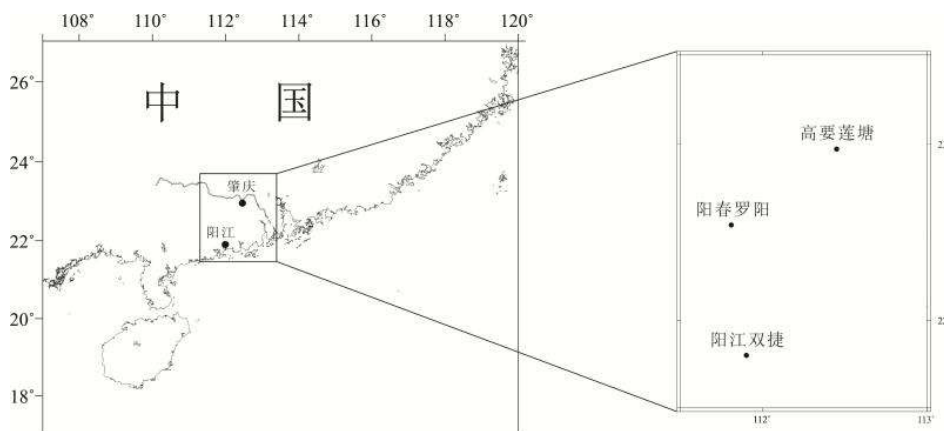


图1 高要莲塘、阳江双捷和阳春罗阳三个地磁观测点的位置示意图

Fig.1 Locations of three geomagnetic observation points of Liantang Gaoyao, Shuangjie Yangjiang and Luoyang Yangchun

1.2 野外地磁场测量

在双捷台和罗阳台2口深井中的地磁观测过程中,采用了同型号的 SeaSPY Overhouse 质子增强型海洋磁力仪做同步观测。在野外工作前,参照了中科院空间物理研究所发布的“空间环境预报”中的太阳活动水平、地磁场的活跃程度预测报告,挑选2019年1月22~23日进行比测。原计划捕捉一个完整的强磁扰过程信息,但因观测台供电故障,提前中止了观测工作,有效记录只有10h,该时段中地磁场变化以平静和微扰为主。2019年8月4日~6日,再次组织人员和设备开展了第二次比测,有效记录时间36h,记录到了一个完整的磁扰过程。

SeaSPY 磁力仪设备的主要技术指标是:直接测程:18 000~120 000 nT;梯度容限: >10 000 nT/m;灵敏度:0.015 nT;分辨率:0.001 nT;采样率:1 Hz;绝对精度:0.25 nT;温度漂移:无;方向误差:无;测量盲区:无;工作温度: -45℃~+60℃。在本次观测实验中,双捷台和罗阳台两个深井中的观测设备均放置在约50 m处。

1.3 广东肇庆地磁基准台站数据

本文收集了与阳江深井地磁观测时间段相同的肇庆台的地磁观测记录。肇庆台的观测设备的技术指标为:① GM4 磁通门磁力仪的技术指标;测量范围:0~±6500 nT,动态范围:0~±2500 nT,

分辨率:0.1 nT。② MAG-01 H 磁通门经纬仪的技术指标:观测精密密度: $\delta_D \leq 1''$ 、 $\delta_I \leq 1''$,分辨率:0.1 nT,零场漂移: $\pm 1 \sim \pm 5$ nT。③ GSM-19F 型磁力仪的技术指标:与 SeaSPY 磁力仪设备的技术指标一致。

K 指数是目前最为通用的地磁活动性指数之一,也是磁层-电离层电流体系引起磁场扰动程度的客观监测指标。 K 值大小由各个时段的纯干扰变化幅度决定,纯干扰变化幅度就是消除了太阳静日变化和太阴日变化之后的纯属地磁扰动的幅度^[7-8]。本文计算 K 指数的思路是:先用台站观测的分钟值数据分别计算两个水平分量 (H 、 D 或者 X 、 Y) 的规则日变化 SR ,然后用分钟值数据减去 SR 得到两者的残差,最后用每3h两个水平分量中的残差较大者来确定 K 值大小。第二次观测相应时段中肇庆台 K 指数见表1。

本次野外地磁观测中,两个深井地磁观测技术和地磁基准台的总场强值观测技术相同,测量分辨率和准确度一致,确保了本文观测数据对比的可靠性。

2 数据分析

2.1 岩石磁学参数的测试结果

本文中的双捷台和罗阳台两口钻孔样品的质量磁化率和剩余磁化强度的测量及其计算结果如表2所列。

表 1 肇庆台的 K 指数
Table 1 The K Index of Zhaoqing Station

时间	台站	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	K_7	K_8	K 总和
2019-08-04	肇庆	2	1	3	1	1	0	1	2	11
2019-08-05	肇庆	2	3	4	5	5	3	2	3	27
2019-08-06	肇庆	2	3	3	2	3	2	1	2	18

表 2 钻孔样品的岩石磁学参数测试结果
Table 2 Test results of rock magnetic parameters of borehole samples

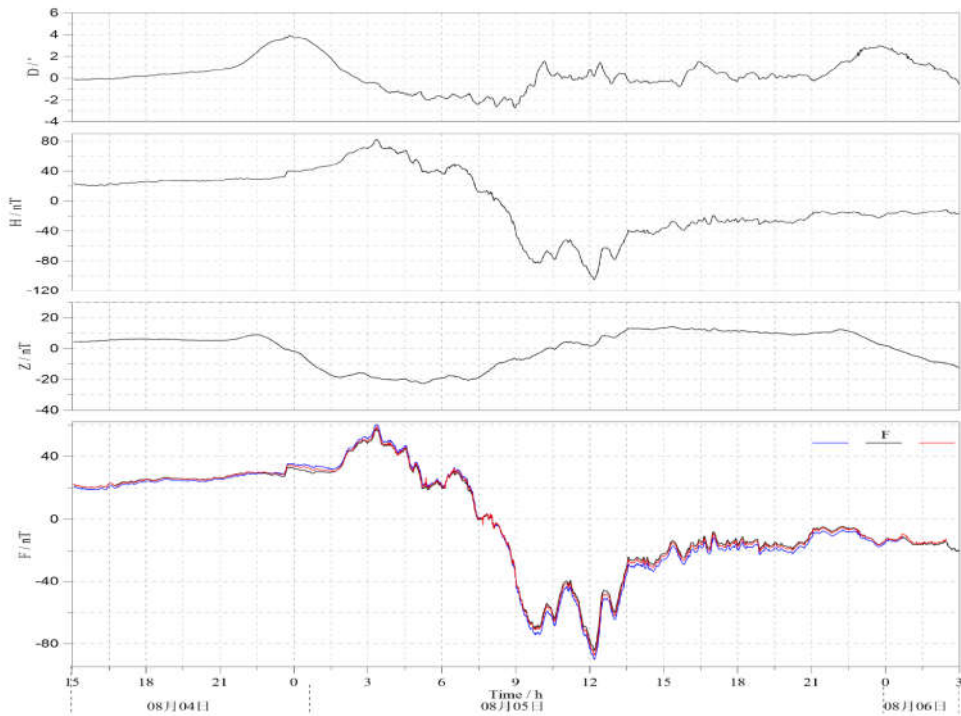
采样位置	样品序号	剩磁强度(A.M ⁻¹)	质量磁化率 χ (m ³ /kg)
罗阳台	Ly-01	5.87E-04	2.70E-08
罗阳台	Ly-02	5.19E-04	1.15E-07
双捷台	SJ-01	9.49E-02	1.36E-06
双捷台	SJ-02	1.06E-01	1.42E-06

在表 2 中,罗阳台钻井岩芯的平均剩余磁化强度为 $5.53\text{E-}04\text{ (A.M}^{-1}\text{)}$, 平均质量磁化率为 $7.10\text{E-}08\text{ (m}^3\text{/kg)}$; 双捷台钻井岩芯的平均剩余磁化强度为 $1.00\text{E-}01\text{ (A.M}^{-1}\text{)}$, 平均质量磁化率为 $1.39\text{E-}06\text{ (m}^3\text{/kg)}$ 。

21 日 15 时至次日 1 时。在该时间段中,地磁场以平静和微扰为主,肇庆台的记录最大值和最小值只相差 14 nT。因时间短,地磁场变化小,深井中的变化地磁场特征不明显,本文不做分析,另做其它研究。

2.2 深井地磁观测与肇庆基准地磁台的数据对比

首次野外观测的时间段为世界时 2019 年 1 月



(黑色为肇庆台, 蓝色为双捷, 红色为罗阳台)

图 2 2019 年 8 月 4 日~6 日罗阳台、双捷台和肇庆台的数据对比图。

Fig.2 Data comparison of Luoyang Station, Shuangjie Station and Zhaoqing Station from August 4th to 6th, 2019

第二次野外观测的时间段为世界时间 2019 年 8 月 4 日 15 时至 6 日 3 时。罗阳台和双捷台深井中获得的观测记录和广东地震局肇庆地磁基准台的观测记录的对比曲线见图 2 所示。图中所示,黑色为肇庆台的观测记录曲线,蓝色为双捷台,红色为罗阳台。肇庆台含有 D 、 H 、 Z 分量的记录。在 D 、 H 、 Z 分量中, H 分量变化最为剧烈;其中的 H 分量是地磁场总场值 F 变化的主要贡献者; Z 分量在初相开始就缓慢下降,直至主相后期;接着才缓慢上扬至恢复相。依照表 1 中 K 指数值的大小,本次磁暴定为中常磁暴。其急始标识始于在 8 月 4 日 23 时 30 分,磁暴的初相时间持续了近 7.5 个小时;8 月 5 日 7 时 30 分起,磁暴的主相开始, H 分量急剧下降,直降了近 140 nT,主相时间持续了近 6 个小时。在 3 时 30 分之后,磁场变化逐渐向暴前水平恢复,进入恢复相,其中的地磁场依然有扰动起伏。在磁暴发生发展过程中,三个观测台站记录曲线的形态总体相似,但细节上依然有些差异;而在暴前,三个观测台站记录曲线是非常接近的。

3 讨论

3.1 岩石磁学参数与感应地磁场的关系

岩石磁性参数包含了岩石磁化率、剩余磁化、 Q 值和磁组构,它所提供的特征信息,会导致各参数有不同的作用^[9]。其中,剩余磁化强度的大小表征着岩性中的铁磁性矿物和结构,可提供时代、地理位置、物质组成、温度以及它们演化的地质信息,而磁化率大小反映岩石种类,所含磁性矿物多寡,颗粒大小等信息^[10]。地球外部电流体系所产生的变化磁场会对地球内部产生电磁感应作用,岩石物性参数不同,相应的感生的磁场强度也不一样。又由于岩石总磁化强度 J 表征了岩石磁性的大小,而总磁化强度是由感应磁化强度 J_i 和剩余磁化强度 J_r 组成,如公式(1),其中的感应强度和岩石磁化率是成正比的。

$$J = J_i + J_r = K_0 T + J_r \quad (1)$$

其中, T 为当地磁化磁场强度, K_0 为岩石磁化率。

分析对比双捷台和罗阳台两口钻孔的岩芯样品岩石磁学参数的测试结果,可认为:双捷台的样品测试数据表明其天然剩磁强度比较大,磁化率大,属于强磁性岩性;而罗阳台的磁化率和天

然剩磁强度明显小许多,属于弱磁性岩性。因此,在罗阳台的深井地磁观测记录对来自外源场变化的感应地磁场会小一些,其地磁场观测记录在形态、相位和幅度变化上会更加接近肇庆地磁基准台的数据。

3.2 深井地磁观测记录与肇庆基准地磁台之间的差异

肇庆台的地磁观测记录曲线是经过高斯滤波之后的数据,而深井地磁观测记录按 5 s 记录抽样出来的数据,其曲线抖动度相对大一些。图 3 是罗阳台与肇庆台 ΔF 值的差值曲线(红色曲线)和双捷台与肇庆台 ΔF 值的差值曲线(蓝色曲线)表示。在暴前,罗阳台与肇庆台 ΔF 值的差值几乎为零,双捷台与肇庆台 ΔF 值的差值虽有差异,但小于 2 nT。初相阶段中,罗阳台 ΔF 值要比肇庆台的大 0~2 nT,而双捷台要比肇庆台的大 0~4 nT,均起伏变化。在磁暴的主相阶段中,罗阳台 ΔF 值要比肇庆台的小 0~2 nT,最大相差 3 nT,呈逐渐下降趋势;而双捷台 ΔF 值要比肇庆台的小 0~6 nT,最大相差 7 nT。进入恢复相之后,罗阳台 ΔF 值要比肇庆台的小 0~2 nT,呈逐渐上升趋势;而双捷台 ΔF 值同样朝暴前值增大。

对比罗阳台和双捷台深井观测记录与肇庆基准地磁台的数据,不同岩性深井的变化地磁场特征有以下几个特点:① 位于石灰岩区的罗阳台的观测记录与肇庆台的地磁场总强度日变化幅度相差较小,而花岗岩区的双捷台的观测记录相差较大。② 在暴前或磁平静期,三者观测记录中的地磁场变化特征相差无异,而在整个磁暴过程中初相、主相和恢复相不同阶段中,三者之间出现了明显的差异。在地磁场强度上升过程中,深井观测记录要比肇庆台的快一些,幅值也大一些;而在下降过程中,幅值要更低一些。③ 在磁暴发生发展过程中,双捷台的观测记录受外源场变化更敏感,相应的变化幅度相对更大一些。产生这些现象的主要原因是深井围岩的岩石磁学特征不同而产生的感应地磁场的差异,特别是强磁性围岩的深井中的变化磁场对外源场变化的响应要更加剧烈一些。

3.3 地下介质对外源场变化的响应

分析罗阳台和双捷台深井观测记录与肇庆基准地磁台之间的差异,还可以发现其高频成分受到了抑制,不够丰富。国内学者在山洞内外地磁观测记录分析研究也发现了类似现象^[12-16],认为这是介质传播电磁场信号受到屏蔽和衰减效应影响。

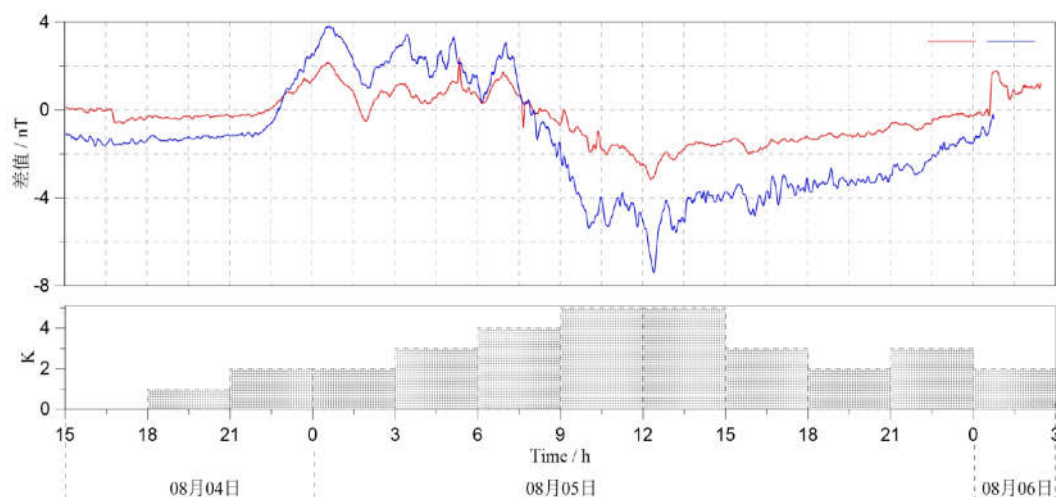


图3 2019年8月4日至6日罗阳台、双捷台与肇庆地磁基准台差值的对比图(蓝色为双捷,红色为罗阳台)

Fig.3 Comparison of the difference between Luoyang Station, Shuangjie Station and Zhaoqing geomagnetic reference station from August 4th to 6th, 2019

图2中磁暴发生发展过程中,肇庆台的 Z 分量幅值变化与总场强相反,反映了地下介质所产生的感应地磁场的影响作用。因变化地磁场是一个矢量场,相应的感应磁场也是一个变化的矢量场。遗憾的是本文研究缺少了深井的矢量观测数据,只能依靠总场强值的信息开展对比。图4是磁暴主相和恢复相时段的三个观测点的 ΔF 的对比曲线局部放大图。在大部分时段中,双捷台和罗阳台与肇庆台观测记录曲线相比,幅度和相位均存在一些差异;其中,在总场强值下降时,深井台的相位滞后;在总场强值上升时,深井台的相位超前。这种现象分析中,围岩磁性强的双捷台比弱磁性的罗阳台更为明显。介质中的变化磁场

主体是受地球高空磁层和电离层中的电流集流体活动的作用,同时也受围岩剩磁的各向异性和感应地磁场的影响。在变化磁场活跃时段中,强磁性介质中的感应磁场也更加活跃。

比较“变化地磁场受介质屏蔽和衰减效应的影响”与“在介质中产生的感应地磁场的影响”,前者只是屏蔽和衰减了其中的高频成分,而后者附加了一个幅值相对高的低频成分。因此,前者的影响要小于后者。由于受技术手段所限,作者采用的只是地磁场总场观测手段,得到的深井地磁场观测信息不够完整。要更清晰去揭示地下介质中的变化地磁场的变化,期待今后井中地磁场矢量观测技术的支持。

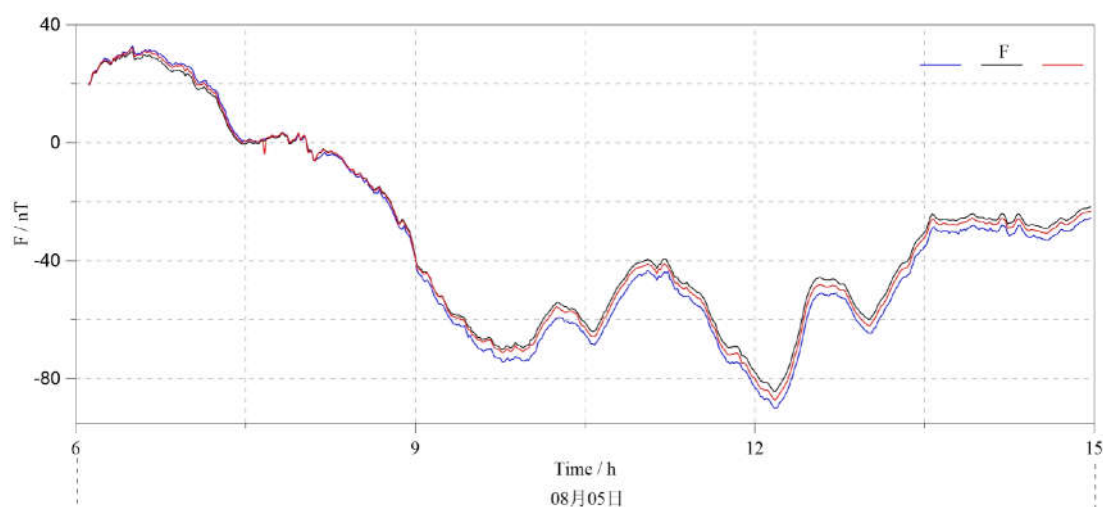


图4 磁暴主相和恢复相时段的三个观测点的 ΔF 的对比曲线(黑色为肇庆台,蓝色为双捷,红色为罗阳台)

Fig.4 Contrast curve of ΔF at three observation points during the main phase and recovery phase of magnetic storm

4 结语

通过对在广东阳江地震局的两个不同岩性的深井中地磁观测及数据分析,主要的几点结论如下:

(1)罗阳台钻井石灰岩的平均剩余磁化强度为 $5.53\text{E}-04 (\text{A}\cdot\text{M}^{-1})$, 平均质量磁化率为 $7.10\text{E}-08 (\text{m}^3/\text{kg})$; 双捷台花岗闪长岩的平均剩余磁化强度为 $1.00\text{E}-01 (\text{A}\cdot\text{M}^{-1})$, 平均质量磁化率为 $1.39\text{E}-06 (\text{m}^3/\text{kg})$ 。

(2)在磁平静时段中深井中的变化地磁场特征和基准地磁台的相近,但在磁扰时段中两者之间相差较大;深井中的变化地磁场受其围岩的岩石磁性影响很大,磁性弱的岩性在外源场变化中所产生电磁感应会微弱些,而磁性强的岩性会受影响更为敏感一些。

(3)深井中的地磁观测不仅受围岩介质的屏蔽和衰减效应影响,压制了高频成分;而且也受介质的感应电磁场的影响,附加了低频成分。相比之下,后者要比前者的影响更大一些。

致谢:本文的研究工作得到了广东省地震局柴剑勇、黄晖和黎珠博高工,广州海洋地质调查局王功祥高工、赵强和别路工程师,阳江地震局吕真光和刘温碧等人的支持,南方科技大学海洋工程系海洋磁性中心博士生王浩森同学帮助样品和数据整理。成文过程中,广州海洋地质调查局王先庆、邢琮琮和涂君帮助清绘论文插图,匿名评审专家对本文提出的宝贵意见,使得本文得到巨大帮助,在此一并致谢。

参考文献:

- [1] 徐纪人,赵志新. 深井地球物理观测的最新进展与中国大陆科学钻探长期观测[J]. 地球物理学进展, 2009, 24(4): 1176-1182.
- [2] 任烨,周华根,刘佳敏,等. 上海崇明长江农场深井综合地震观测系统地磁观测数据质量分析[J]. 地震研究, 2012, 35(3): 353-359.
- [3] 李伟,赵文舟,尹继尧. 2013, 上海深井地震综合观测地磁资料分析[J]. 地震地磁观测与研究, 34(3/4): 89-95.
- [4] 罗玉芬,潘飞儒,徐行,等. 海底地磁观测技术方法研究和展望 [J]. 华南地震, 2017, 37(3): 63-68.
- [5] 陈幸莲,徐行,柴剑勇,等. 广东阳江深井地磁观测系统研究与数据分析[J]. 华南地震, 2017, 37(3): 81-89.
- [6] 徐行,赵旭东,王功祥,等. 南海西南次海盆深海地磁观测潜标的数据分析[J]. 地球物理学报, 2017, 60(3): 1179-1188.
- [7] 徐文耀. 地球电磁现象物理学[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社, 2009.
- [8] 徐文耀. 地磁活动 K 指数值量算和确定方法的改进[J]. 西北地震学报, 2005, 27(S1): 36-41.
- [9] 王建军,李琪,杨冬梅,等. 地磁活动 K 指数自动计算 FMI 方法的改进[J]. 地球物理学报, 2017, 60(7): 2534-2544.
- [10] 倪喆,陈斌,崔兴平,等. 地震孕育过程中地下磁化率结构的变化分析[J]. 地震研究, 2017, 40(3): 382-387.
- [11] 郭友钊,国内外岩石磁性应用状况与展望[J]. 国外地质勘探技术, 1991(1): 19-24.
- [12] 詹志佳,高金田,任熙宪,等. 山洞内地磁观测的日变差异现象[J]. 地震研究, 1990, 13(3): 265-272.
- [13] 陈传华,刘作华,朱飞,等. 磁通门在普通山洞观测数据分析[J]. 地震地磁观测与研究, 2015, 36(4): 88-93.
- [14] 赵育飞,袁洁浩,詹志佳,等. 20 世纪中国地震地磁观测与研究回顾[J]. 地震研究, 2017, 40(3): 422-430.
- [15] 郭明瑞,胡久常,马龙,等. 甘肃岷县 6.6 级地震前地磁垂直分量日变“双低点”异常 [J]. 华南地震, 2018, 38(3): 39-44.
- [16] 倪晓寅,郭雨帆,谢小玲,等. 华南地区地磁加卸载响应比异常指标[J]. 华南地震, 2018, 38(4): 22-28.