

陆镜辉, 冯昭懿, 徐行, 等. 不同水深海底的变化地磁场特征 [J]. 华南地震, 2020, 40 (3): 116-123. [LU Jinghui, FENG Zhaoyi, XU Xing, et al. The Characteristics of changing Geomagnetic Field in Ocean Water at Different Depths [J]. South China journal of seismology, 2020, 40 (3): 116-123]

不同水深海底的变化地磁场特征

陆镜辉¹, 冯昭懿², 徐行², 邱杰¹

(1. 广东省地震局, 广州 510070; 2. 广州海洋地质调查局, 广州 510070)

摘要: 摘要: 认识海洋水体中变化地磁场特征可更好地探索与研究海洋, 进而保护海洋资源和环境。选取了布设在南海北部水下 740 m、1829 m、2788 m 和 3788 m 深处的四个海底地磁观测站地磁总场值所记录的数据, 并收集整理了同时间段位于陆地的广东省肇庆地磁基准台和海南省琼中地磁基准台的观测数据; 利用对比陆地和海洋中地磁观测记录在不同磁场环境下的同步观测记录的差异方法, 分析不同水深环境下的观测记录与陆地之间差异及其主要影响因素。结果表明: 在磁静时, 变化地磁场海洋中地磁观测记录与陆地台站相比相差不大, 而在变化地磁场比较活跃时, 两者之间差异较大; 在磁扰严重时间段中, 水深越深的海陆台之间的差异则更明显; 变化地磁场中的高频成分缺少会随水深加大而愈加得以突显。引起变化地磁场记录在海陆之间差异的主要因素是地球外界的变化地磁场与水体中的感应地磁场共同作用所致。

关键词: 变化地磁场; 海洋; 海底地磁观测站; 磁扰; 观测

中图分类号: P318.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662 (2020) 03-00116-08

DOI: 10.13512/j.hndz.2020.03.016

The Characteristics of Variable Geomagnetic Field in Ocean Water at Different Depths

LU Jinghui¹, FENG Zhaoyi², XU Xing², QIU Jie¹

(1. *Guangdong Earthquake Agency, Guangzhou 510070, China*; 2. *Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510075, China*)

Abstract: Understanding the characteristics of the variable geomagnetic field in ocean water can not only better explore and study the ocean, but also protect marine resources and environment. In this paper, the total geomagnetic field data of four submarine geomagnetic observatories located at depths of 740 m, 1829 m, 2788 m and 3788 m in the north of the South China Sea are selected, and the observation data of Zhaoqing geomagnetic reference station in Guangdong Province and Qiongzong geomagnetic reference station in Hainan Province in the same time period are collected. Using the method of comparing the differences between the synchronous data of geomagnetic observation records on land and in the ocean under different magnetic conditions, the diversities

收稿日期: 2020-01-10

基金项目: 中国地震局监测、预测、科研三结合课题 (编号: CEA-JC/3JH-161901); 国家重大仪器研发专项 (2014YQ100817) 联合资助

作者简介: 陆镜辉 (1977-), 男, 工程师, 从事地球物理观测和数据分析整理工作。

E-mail: 942930104@qq.com

通信作者: 徐行 (1963-), 教授级高工, 主要从事地球物理学、海洋地质 - 地球物理勘探技术与方法研究。

E-mail: gz_xuxing@163.com

between observation records in different water depths and on land and their main influencing factors were analyzed. The results show that the geomagnetic observation records in the ocean do not differ much from those of land stations when the variable geomagnetic field is calmer, and the difference gets obvious when the variable geomagnetic field is more active. During periods of severe magnetic disturbance, the differences are somewhat greater for deeper water depths. The absence of a high-frequency component in the variable geomagnetic field appears to be rising with increasing water depth. The main factor that causes the diversity in the variable geomagnetic field record between land and sea is due to the combination of the variable geomagnetic field outside the Earth and the induced geomagnetic field in the water column.

Keywords: Variable geomagnetic field; Ocean; Submarine geomagnetic station; Magnetic disturbance; Observation

0 引言

基本地球磁场是地球固有的属性，主要源于地球外核磁流体发电机的动力学过程，它具有复杂的空间分布特征和时间变化尺度；而变化地磁场主要源于外部电离层及以上磁层电流体系的变化^[1]。海洋的总面积占地球表面积的70.8%，平均深度-3729 m。由于受海洋地磁观测技术发展的研制，海域的地磁场观测能力及其相应研究程度远不如陆域，这不仅改善了人们对于海洋水体中的地磁场特征的认识水平，而且也影响了人们利用地磁场特性去研究探索和开发海洋。

现代海洋地磁场的连续观测实践要追溯到1962年英国海域的地磁浮标观测^[2]，安装在浮标中的地磁总场观测磁力仪受水面波浪运动影响，记录中叠加了较强感应电磁场成分。在20世纪七、八十年代，澳大利亚和日本学者先后就开展海底地磁观测科学实践^[3-4]。我国海底地磁观测起步比较晚，直至2004年，我国学者首次用Overhauser磁力仪在南海北部陆坡890 m的海底连续记录了19 d的地磁场总场变化。初期的海底地磁观测成果主要应用到海洋地磁测量，去解决在深远海区磁测中的地磁日变改正问题^[5]。随着该技术方法在海洋调查中的推广，一些特殊现象得以发现，利用调查工区附近的深海底地磁观测数据去做海洋磁测的日变改正处理，发现其效果不如采用远处陆地地磁台的观测记录^[6]。通过对南海海盆的400 m超长潜标的地磁观测实践，发现了当磁静时段，同一

地点不同深度的地磁观测结果比较相近；而在磁扰严重时段，两者之间存在较大的差异^[6]。显然，在海洋水体中的变化地磁场观测记录中，除外源场产生的变化地磁场信息，还有受内源场中的地球感应地磁场的影响。不同水深的海流不仅会对变化地磁场的高频信息产生抑制作用，而且变化地磁场活动性也影响着相应的感应地磁场变化特征；因此，在海洋水体中的变化地磁场特征比陆地观测所得更为复杂。

为探讨不同水深环境下的地磁观测成果与陆地台站之间的差异及规律，研究导致这些差异的主控因素，本文将通过选取在南海海域中4个不同水深的海底地磁台观测数据，与相近纬度的海南琼中地磁台记录对比，分析对比不同磁情环境下的观测记录，为深入开展海洋对变化地磁场和地磁活动性也有一定程度的影响提供科学依据。

1 数据来源

本文选用数据来源分三部分：①海洋台站数据选自广州海洋地质调查局的历史调查数据，分别来自2008年南海北部陆坡中1829 m（T2台）和中沙北海隆附近3798 m（T4台）水深的的数据，2013年南海中沙北海隆附近2800 m（T3台）和2015年南海北部陆坡中740 m水深（T1台）的观测记录四个台站的数据；②陆地台站数据选自海南省地震局琼中地磁台（19.000°N, 109.800°E）；③广东省地震局肇庆地磁台（22.970°N, 112.45°E）的磁情指数。海陆地磁观测台站位置见图1所示，采集数据时间信息见表1所列。

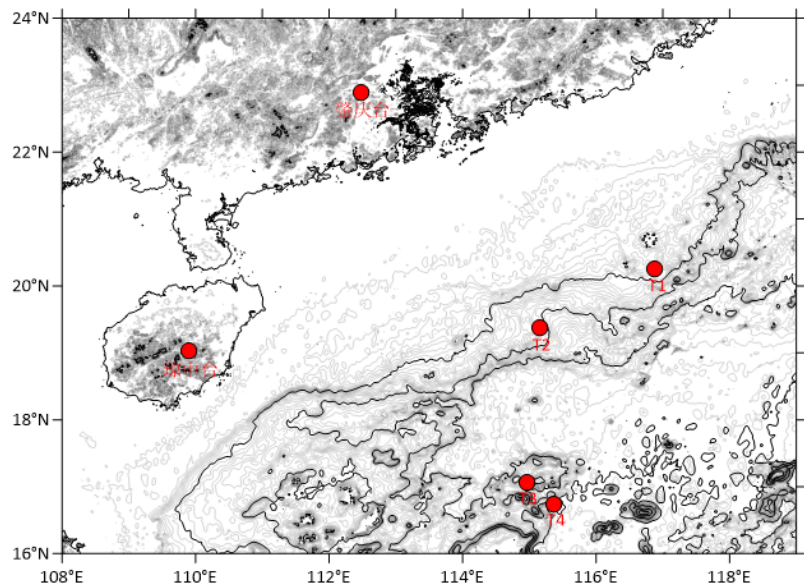


图 1 研究区内的海—陆地磁台站分布图
Fig.1 Distribution map of sea-land magnetic stations in the study area

表 1 陆地和海洋地磁观测台站的信息表
Table 1 Information table of land and ocean geomagnetic observation stations

台站名	经度 / (°E)	纬度 / (°N)	高程 / (m)	备注
肇庆台	112.45	22.97	14.0	拥有连续观测记录
琼中台	109.80	19.00	227.0	拥有连续观测记录
T1	116.96	20.26	-740.0	2015 年 4 月 3 日—5 月 9 日
T2	115.19	19.37	-1829.0	2008 年 6 月 20 日—7 月 13 日
T3	115.00	17.00	-2789.0	2013 年 3 月 22 日—4 月 6 日
T4	115.42	16.67	-3788.0	2008 年 3 月 24 日—5 月 6 日

海南地震局琼中地磁台数据是采用 GSM-19F 型 Overhauser 质子增强型磁力仪记录所得。广州海洋地质调查局海底地磁台的地磁场总场的连续观测数据是有 SENTINEL Overhauser 质子增强型磁力仪自动采集得到的。海底地磁观测采用潜标观测方式,投放方式和详细结构与早期方式^[5,7]一致。GSM-19F 型磁力仪与 SENTINEL 磁力仪的仪器技术指标一致,分别属于位于加拿大多伦多市的 GEM 公司生产的陆地磁力仪和海洋磁力仪。其主要技术指标如下:直接测程:18 000~120 000 nT,灵敏度:0.015 nT,分辨率:0.001 nT,绝对精度:0.2 nT,梯度容限制>10 000 nT;该设备的工作温度范围在-25℃~+60℃之间。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。MAG-01H 磁通门经纬仪的技术指标:观测精密度:δ_D≤1"、δ_λ≤1",分辨率:0.1nT,零场漂移:±1~±5

nT。海陆地磁观测设备的技术指标相同,符合数据对比分析的要求。

2 研究方法

2.1 数据选取

在地磁学中,为描述地磁场活动引入了许多指数,K 指数,也称磁情指数,是单个地磁台用来描述每日每个 3 h 内的地磁扰动强度的指数。每个时段确定一个 K 值,K 值大小由各个时段的纯干扰变化的幅度而定;其中的纯干扰变化的幅度就是消除太阳静日变化和太阴日变化之后的纯属地磁扰动的幅度^[8]。本文笔者通过广东肇庆台的 K 指数判断外部空间引起的变化磁场的磁扰强度,抽取陆地台中的 K 总和的最大值和最小值时间段内的 24 h 的 4 个不同水深台站海洋中地磁观测记录,和琼中台作为典型的资料进行系统分析,共 8 d 记录。又因海洋地

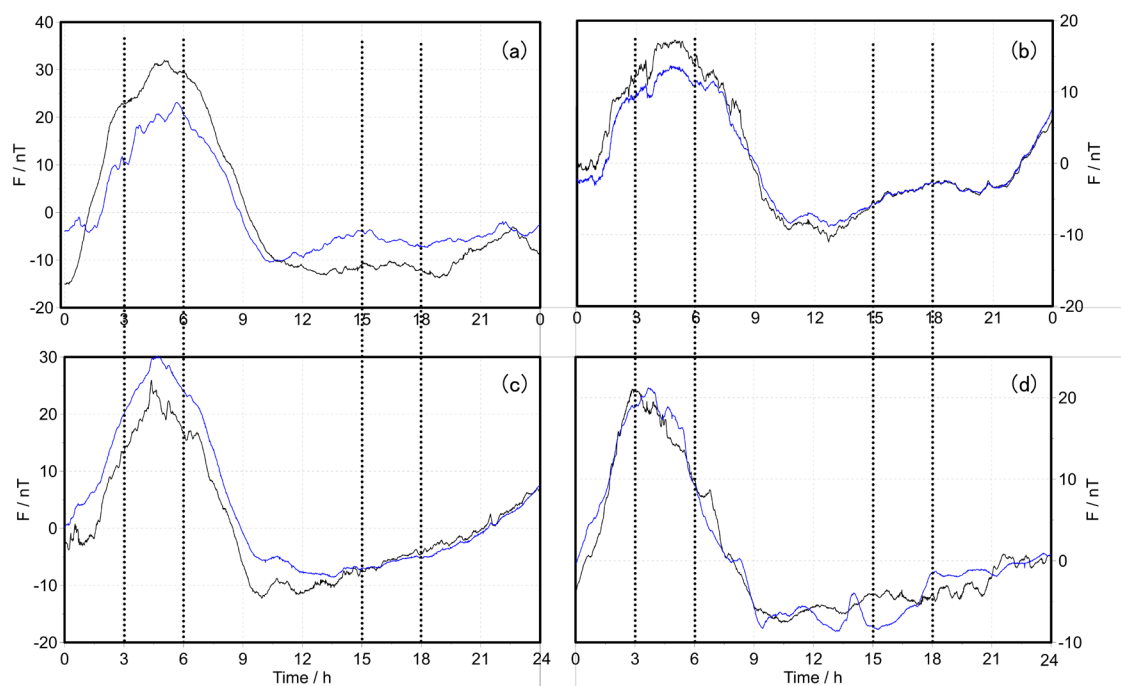
磁观测资料仅为地磁场总场观测值，难以精细地描绘海洋中变化地磁场的时空变化特征，故又参考陆地基准台中 D 、 H 和 Z 同步观测记录信息。

本文选取世界时为时间制。根据地磁活动情况，将这 8 d 的海陆台站数据分三类情况进行分析。分别是：①在磁静日中，四个水深不同的海底地磁台与陆地台的同步观测数据对比；②在磁扰和③在磁暴期间，两个水深不同的海陆地磁台

的同步观测数据对比。

2.2 磁静日的地磁特征对比

根据表 2 所列的四个海洋台在典型磁静日 K 指数，T1 台选 2015-04-25、T2 台选 2008-06-23、T3 台选 2013-03-26、T8 台选 2008-04-02。这 4 天的海陆地磁台的 ΔF 对比曲线见下图 2 所列。



(a) (b) (c) (d) 分别为 T1、T2、T3 和 T4 与琼中台在磁静日的典型记录曲线对比图。

图 2 琼中台与四个海洋台在磁静日期间的观测曲线对比图

Fig.2 Comparison of observation curves between Qiongzong station and four ocean stations during magnetostatic period

表 2 四个海洋台在典型磁静日 K 指数

Table 2 K index of four ocean stations on typical magnetostatic days

时间段	水深 /m	$K1$	$K2$	$K3$	$K4$	$K5$	$K6$	$K7$	$K8$	K 总和
2015-04-25	740	2	2	0	1	0	0	0	2	7
2008-06-23	1829	2	1	1	1	1	0	0	1	7
2013-03-26	2788	2	2	1	1	1	0	0	2	9
2008-04-02	3788	2	1	1	0	0	0	1	1	6

2.3 磁扰日的地磁特征对比

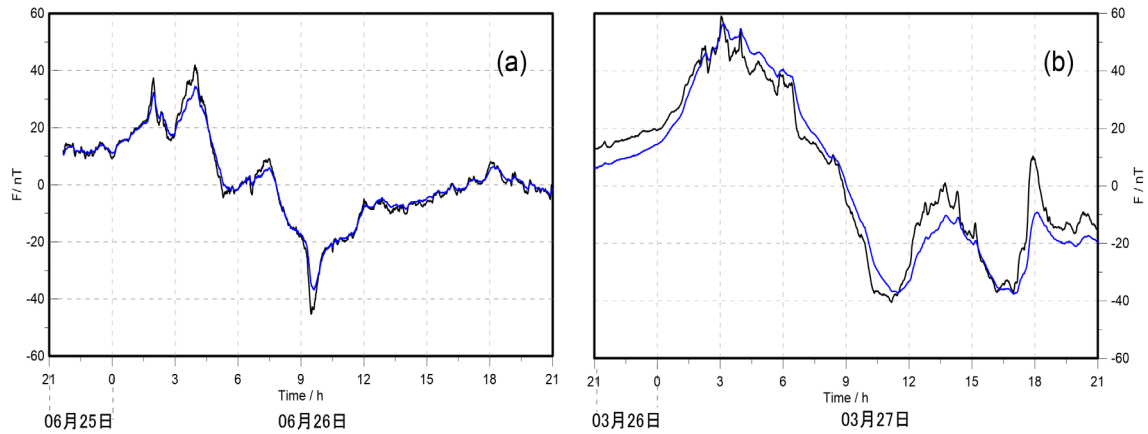
参照表 3，选用 T2 台的 2008-06-26 和 T3 台

的 2013-03-27 作为磁扰日典型曲线，这二天海陆地磁台的 ΔF 对比曲线见下图 3 所示。

表 3 四个海洋台在典型磁扰日 K 指数

Table 3 K index of four ocean stations on typical magnetic disturbance days

时间段	水深 /m	$K1$	$K2$	$K3$	$K4$	$K5$	$K6$	$K7$	$K8$	K 总和
2015-04-15	740	3	3	3	6	5	3	5	4	32
2008-06-26	1829	3	4	3	4	2	2	2	2	22
2013-03-27	2788	3	3	3	3	3	4	3	3	25
2008-04-23	3788	3	5	5	5	3	4	3	2	30



(a) 和 (b) 分别为 T2 和 T3 与琼中台在磁扰期间的典型记录曲线对比图。蓝色线为海洋台的记录曲线，黑色线为陆地台的记录曲线。

图 3 琼中台与 T2 和 T3 台磁暴期间的观测曲线对比图

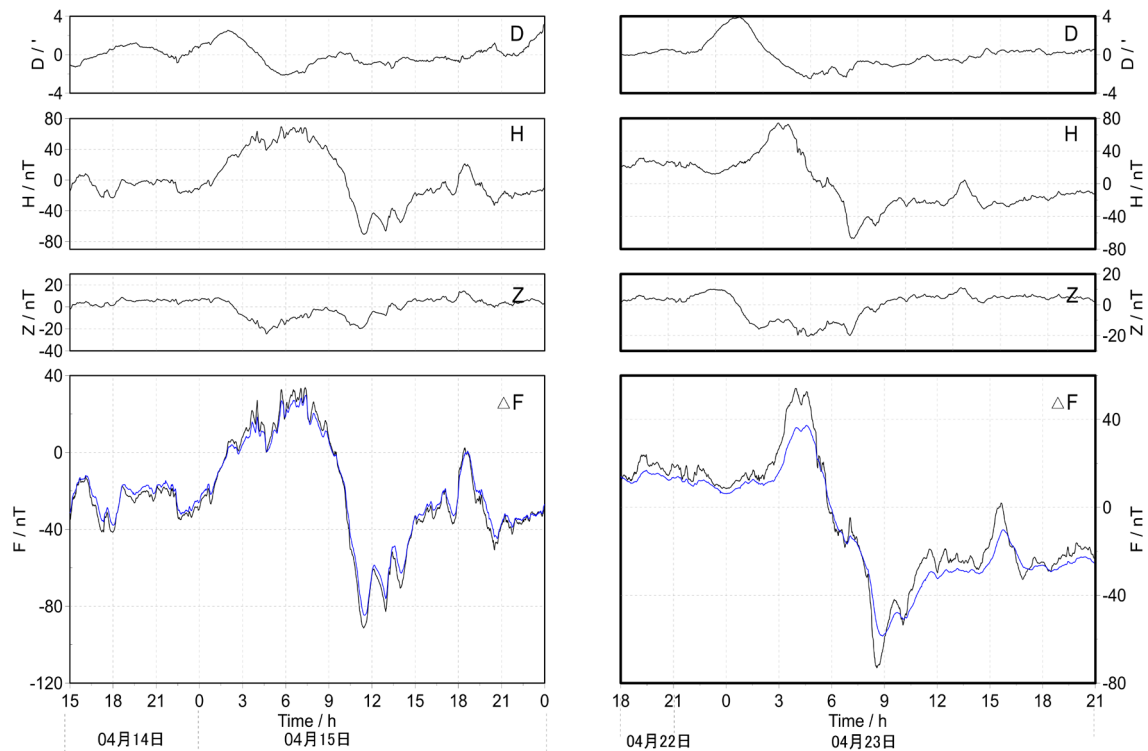
Fig.3 Comparison of observation curves between the Qiongzong station and T2 and T3 stations during magnetic storms

2.4 磁暴期间的地磁特征对比

磁暴是一种剧烈的全球性磁扰现象，是日地能量耦合链中的一个重要环节。具有变化幅度大，形态复杂，持续时间长，全球同步性好等特点。在磁暴的发生和发展过程中，地磁要素都发生了剧烈变化，尤其是在中低纬度地区的 H 分量变化特征影响了磁暴的形态学和统计学特征。图 5 琼中台与 T1 和 T4 台磁暴期间的观测曲线对比图。

根据 T1 和 T4 台的 ΔF 典型曲线形态分析，参考肇庆地磁台的 K 指数，选用的观测记录达到了中常磁暴水平。

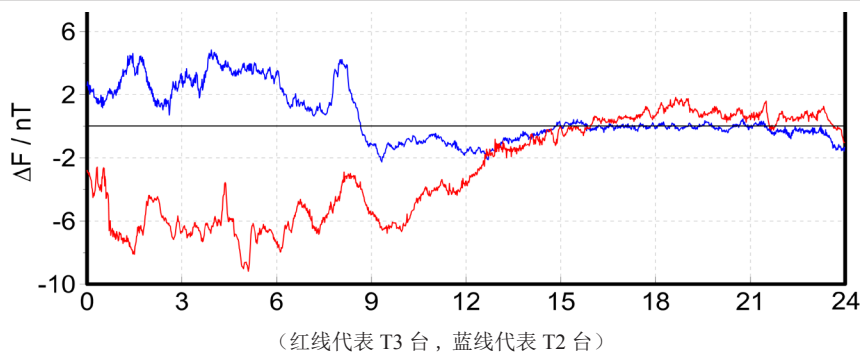
参照表 3，选用 T1 台的 20150415 和 T4 台的 20080423 作为磁扰日典型曲线，这二天海陆地磁台的 ΔF 对比曲线见下图 4 所示。为了便于分析对比，还添加了琼中地磁台的 $D-H-Z$ 三要素的信息。



(a) (b) 分别为 T1 和 T4 与琼中台在磁暴期间的典型记录曲线对比图。蓝色线为海洋台的记录曲线，黑色线为陆地台的记录曲线。

图 4 琼中台与 T1 和 T4 台磁暴期间的观测曲线对比图

Fig.4 Comparison of observation curves between the Qiongzong station and T1 and T4 stations during magnetic storms



(红线代表 T3 台, 蓝线代表 T2 台)

图 5 典型台站的地磁场总场差值曲线

Fig.5 The difference curve of total geomagnetic field of typical stations the

3 分析和讨论

3.1 海陆台的 ΔF 曲线形态变化特征

本文从不同水深环境和不同地磁活动情形的角度来探讨海陆地磁台 ΔF 曲线形态变化特征。图 2 描述在磁静日四个海洋台与琼中台 ΔF 曲线形态的对比结果。在磁静日中, 四个台的共性是海陆台的 ΔF 日变曲线比较接近, 具有一定的规律性平缓变化, 也存在有微小的地磁变化; 其源于电离层中较为稳定的电流体系。他们之间差异是水深较浅的台高频成分丰富, 随着水深加大, 高频成分缺失程度越来越大。

图 4 是在磁扰日中 2 个海洋台与琼中台的 ΔF 曲线形态的对比曲线, 而图 5 是在磁暴日中的对比曲线。从这四个海洋台站与琼中台的 ΔF 日变对比曲线中, 形态相似程度比磁静日的要差一些。 ΔF 起伏变化既无规则性, 又无周期性; 出现的干扰变化主要源于太阳粒子流在磁层和电离层中形成的各种短暂的电流体系, 导致了各种短暂的、复杂的干扰变化。随着水深加大, 四个不同水深海洋台和陆地台对比出现了以下几个特征: ①高频成分越来越少, 水深较大的两个海洋台的曲线比较光滑; ②海陆台之间形态受外源场活动性的影响, 当磁扰加剧时, 相似性越来越差。

3.2 海陆台的 ΔF 曲线幅度变化特征

在幅度变化方面, 在磁静日, 4 个海陆台的 ΔF 变化曲线是有周期和规律的。在地方时的正午时刻前后, 两者差异比较明显, 而在子夜时刻前后两者差异较小。T1 和 T2 的 ΔF 总体上要比琼中地磁台的要小一些, T3 和 T4 台的 ΔF 总体上要比琼中地磁台的要大一些。各个海陆

台的对比, 均遵循了平静日变化 (Sq) 随纬度变化的规律, 说明记录时段的变化地磁场与赤道环电流影响有一定的联系^[10]。如图 3 所示, T2 台与琼中台的差值曲线和 T3 台与琼中台的差值曲线规律近似, 幅度差在 $\pm 3 \sim 4$ nT 之间, 正负差异是有海洋台与琼中台在纬度上相对位置关系所致。

在磁扰日和磁暴期间, 4 个海陆台对比的 ΔF 变化曲线在幅度变化方面不再具有规律。在强磁扰情况下, T2 与 T3 台两者 ΔF 的极大值和极小值差异均在 $80 \sim 90$ nT 之间, 幅度相差较大。在磁暴期间, T1 和 T4 台的 ΔF 的极大值和极小值相差约 130 nT, 幅度相差更大; 其中, 两个磁暴均属于急始磁暴, 规模不大, T1 的持续时间比 T4 更长。海陆台的 ΔF 幅度差明显。T1 台与琼中台的幅度差最大将近 ± 8 nT; T2 台为 10 nT, T3 台为 20 nT, T4 台的最大 ± 20 nT 左右。显然, 在磁扰期间, 海陆台的幅度差随着水深不断扩大。

D 的变化主要与 ΔF 幅度变化趋势相关。 ΔZ 分量只是在正午时刻有变小趋势, 其它时刻变化不明显。而 H 分量的形态和幅度变化曲线与 ΔF 的比较近似; 值得注意的是, 它的过程变化全面反映了磁扰的发生发展过程, 也揭示了在低纬度地区的 H 分量是磁日变的主要贡献者。

3.3 海陆台的 ΔF 曲线相位变化特征

在相位变化上, 相对于琼中台, T1 和 T2 的 ΔF 在上升过程中往往滞后, 而在下降过程中反而是超前的; 而 T3 和 T4 台出现的现象则相反。无论是幅度还是相位, T1、T2、T3 和 T4 台与海南琼中地磁台的差异主要是来自海陆地磁台的在纬度上相互关系。T1 和 T2 台位于地磁台

以北,而 T3 和 T4 台的纬度要低于琼中台。海陆台站的相位和幅度差异的主要原因是在纬度上的差异。

磁扰期间,在磁扰的主相和磁暴的初相与主相阶段中,海陆地磁台 ΔF 曲线相位变化特征是在 ΔF 曲线上升过程中海洋台相位滞后,其相位于下降过程中表现为超前为主。在磁暴的恢复相阶段或磁扰的次级磁扰过程中,海陆台的相位变化特征比较复杂。这些现象除磁层受赤道环电流以外,场向电流、越尾电流等对地海洋中的变化地磁场都会有重要影响。

4 讨论

随着水深的增大,海洋台的 ΔF 曲线显得越来越光滑。水深较大的海洋台的 ΔF 的高频成分与水深较浅的台对比,缺失程度要大一些,说明了流动的海水并具有良好的液态导电介质,较厚的海水层屏蔽掉了 10~20 CPH 以上的外源高频电磁场变化。归咎于海水切割地磁场运动产生动生电动势的发电机过程和产生感生电动势的电磁感应过程两种表现方式的体现^[9]。磁扰强弱程度直接影响到了地磁日变曲线形态、幅度和相位变化特征。当磁扰程度加大和水深加大时,海陆台之间形态的相似性差别也加大;海陆台之间幅度差不断增大;相位变化规律变得愈加复杂。海洋水介质中的变化地磁场除对应着外源场变化之外,叠加了环境中的感应地磁场。这种情况与深井中的地磁观测情况相似^[11]。外源场活动加剧导致在海水介质中的环境感应地磁场变化激烈和复杂;此外,海水中温度、压力、电导率和磁导率等物理特性是随水深的深度变化的函数也是主要的影响因素。例如,深海的底部处于恒温状态,电导率约为 3 S/m;温暖海面的电导率可以达到或者超过 6 S/m。在这种多源电磁场的共同作用,使得了不同深度海底地磁场变化特征显得比较复杂^[11-14]。

在分析琼中台的 DHZ 和海洋台的总场变化之间的关系时, H 分量变化和海洋台的总场变化对应一致,说明了本文研究区所在的中低纬度地区的 H 分量变化磁日变的主要贡献者。

5 结语

本文通过选取在南海海域中 4 个不同水深的海底地磁台观测数据,与相近纬度的海南琼中地磁台观测记录进行对比分析,得到以下几点认识:

(1) 磁扰大小影响了海洋台地磁观测曲线在形态上的规律性。在磁静日时,形态变化具有规律性;而在磁扰或者磁暴阶段,与陆地台相比的形态差异越来越大。

(2) 磁扰强弱程度影响了海陆台对比曲线的幅度差异程度。在磁静日中,两者的幅度差在很小,而在磁扰或磁暴阶段,幅度差随深度不断增加。

(3) 磁扰强弱程度影响了海陆台对比曲线的相位变化规律。磁静日时,两者之间是具有规律的,而在磁扰或磁暴阶段,对比曲线相位变化相位对比显得规律性不强,很复杂。

综上,海洋台地磁观测记录的高频成分随水深增加而变得缺失越来越严重的情况是受海水层的滤波效应所致;而在强磁扰阶段,海陆台地磁观测记录在形态、幅度和相位对比中突显出的规律性差,差异随深度而加大等现象是受多源外源场的共同作用而产生的。

致谢: 本文成果受中国地震局监测、预测、科研三结合课题(编号:CEA-JC/3JH-161901)和国家重大仪器研发专项(2014YQ100817)联合资助,使用国家重大科技基础设施子午工程科学数据。特别感谢匿名审稿人和编辑部老师对本文提出的意见和建议。广东省地震局王建格和柴剑勇两位高级工程师提供了建设性的意见;广州海洋地质调查局涂君、邢琮琮和徐东海等提供了技术支持;谨此一并衷心致谢!

参考文献

- [1] 王振东,王粲,袁浩浩,等.中国及邻近地区地磁长期变化分析[J].地震研究,2009,42(1):103-111.
- [2] Hill M N, Mason C S. Diurnal variation of the earth's magnetic field at sea[J]. nature., 1962(195): 365-366.
- [3] White A. A sea floor magnetometer for the continental shelf[J]. Marine Geophysical Researches, 1979, 4(1): 105-114.
- [4] Tomoda Y, Fujimoto H, Uchiyama A, et al. Ocean bottom proton magnetometer (design and test) [J]. Journal of

- Geomagnetism and Geoelectricity, 1981 (33)335-339.
- [5] 徐行, 廖开训, 盛堰. 海底地磁日变观测站的设计与应用 [J]. 海洋测绘, 2005, 25 (1): 67-69.
- [6] 张锡林. 海水层对地磁日变的影响 [J]. 海洋测绘, 2011, 31 (5): 21-23.
- [7] 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
- [8] 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
- [9] Xu W Y. Introduction to geomagnetic activity (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [10] 赵旭东, 杨冬梅, 何宇飞, 等. Sq 等效电流在太阳活动周中的分析研究 [J]. 地球物理学报, 2014, 57 (11): 3777-3788.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 杨诺夫斯基. 地磁学 [M], 北京: 地质出版社, 1982.
- [14] 邢琮琮, 徐行, 陆镜辉, 等, 南海北部陆海台站地磁观测与磁场模型计算的对比分析 [J]. 华南地震, 2019, 39 (4): 60-68.