

龚永俭, 程立康, 张长轩, 等. 天津地区地电暴与磁暴的对比分析[J]. 华南地震, 2019, 39(4): 75–83. [GONG Yongjian, CHENG Likang, ZHANG Changxuan, et al. Comparative Analysis of Geo-Electric Storm and Geomagnetic Storm in Tianjin Area[J]. South China journal of seismology, 2019, 39(4): 75–83]

## 天津地区地电暴与磁暴的对比分析

龚永俭, 程立康, 张长轩, 刘学领, 徐学恭, 康 健, 王建国  
(天津市地震局, 天津 300201)

**摘要:** 通过对磁暴、地电暴要素的识别和统计, 结合磁暴期间同台站地磁场  $H$  分量变化率与地电场 NS 向、EW 向数据的相关性分析, 对 2016 年 7 月至 2018 年 6 月天津地区宝坻新台、静海台、徐庄子台 3 个台站记录到的 7 次急始磁暴与地电暴进行了对比分析, 结果表明: ①天津地区 3 个台站地磁场  $H$  分量在同一磁暴期间的变幅大致相同, 但地电场相应测项在同一地电暴期间的最大变幅却有较大差异; ②暴时地磁场  $H$  分量变幅、地电场各测项最大变幅与地磁  $K$  指数的大小均有一定关联, 但并非完全成正比例关系; ③3 个台站暴时地磁场  $H$  分量变化率与同台站地电场各测项的相关系数相比, 宝坻新台最高, 徐庄子台次之, 静海台最低, 暴时磁场变化率与同台站地电场 EW 向的相关性较高, NS 向的相关性则较低。

**关键词:** 地电场; 地磁场; 地电暴; 磁暴;  $K$  指数; 天津

中图分类号: P315.7

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662(2019)04-0075-09

DOI: 10.13512/j.hndz.2019.04.011

## Comparative Analysis of Geo-Electric Storm and Geomagnetic Storm in Tianjin Area

GONG Yongjian, CHENG Likang, ZHANG Changxuan, LIU Xueling,  
XU Xuegong, KANG Jian, WANG Jianguo  
(Tianjin Earthquake Agency, Tianjin 300201, China)

**Abstract:** Based on the identification and statistics of the elements of magnetic storm and geoelectric storm, combined with the correlation analysis of the  $H$  component variation rate of geomagnetic field at the same station during the magnetic storm and the NS and EW direction data of geoelectric field, the seven abrupt initial magnetic storms recorded at new Baodi station, Jinghai station and Xuzhuangzi station in Tianjin from July 2016 to June 2018 were compared and analyzed. The results show that: the amplitude of  $H$  component of geomagnetic field at three stations in Tianjin region is approximately the same during the same geomagnetic storm, but the

收稿日期: 2019-01-10

基金项目: 中国地震局地震科技星火计划攻关项目“天津地球物理台网智能化产出与应用研究”(XH20002); 中国地震局地震监测、预报、科研三结合课题“利用地磁相对记录对比研究天津地区地电场变化特征”(CEA-JC/3JH-170308); 前兆数据跟踪分析产品产出系统升级完善(8801)

作者简介: 龚永俭(1972-), 男, 高级工程师, 主要从事地震台站电磁、流体观测以及网络管理技术的研究。

E-mail: gong\_123@126.com.

maximum amplitude of the corresponding items of geoelectric field varies greatly during the same geoelectric storm; the amplitude of  $H$  component of geomagnetic field and the maximum amplitude of each item of geoelectric field are related to the magnitude of geomagnetic  $K$  index, but not completely proportional to it; the variation of  $H$  component of geomagnetic field during three station storms compared with the correlation coefficients of each item of geoelectric field measured at the same station, new Baodi station has the highest correlation coefficient, Xuzhuangzi station takes the second place, Jinghai station has the lowest correlation coefficient. The correlation between the change rate of magnetic field and the EW direction of geoelectric field at the same station is higher, while the correlation of NS direction is lower.

**Keywords:** Electric field; Earth's magnetic field; Electrical storm; Geomagnetic storm;  $K$  index; Tianjin

## 0 引言

地电场和地磁场均是地球固有的物理场,它们相互结合成为人类认识与研究地球电磁环境的一门基础科学和应用科学——地球电磁学。地电场根据场源不同可以分成大地电场和自然电场:大地电场由地球外部的各种场源作用在地球表面感应产生,一般具有广域性;自然电场由地下场源产生,是地下介质电性结构、地表、裂隙流体及地下金属体的物理、化学变化引起的局部性电场变化,一般具有局部性(或称为地域性)<sup>[1-2]</sup>。地磁场根据场源不同可以分成外源场和内源场:外源场起源于地表以上的空间电流体系,主要分布在电离层和磁层中,又称为变化磁场;内源场起源于地表以下的磁性物质和电流,可以进一步划分为地核场(又称为主磁场)、地壳场(由地壳、上地幔产生)和感应场<sup>[3]</sup>。由于地电场和地磁场均包含了空间电流体系影响的成份,因此均会受到空间环境的影响。空间环境的变化通常用“空间天气”来衡量,“空间天气”指的是太阳表面、太阳风、磁层、电离层和热层中能够影响太空和地面技术系统的运行与可靠性,以及能够危及人类健康与生命的条件。恶劣的“空间天气”会引起空间飞行器、无线电通讯、导航和电力系统、输油管道的事故,造成重大的社会经济损失<sup>[4-10]</sup>。空间环境的扰动性在地磁场和地电场上均有反映,达到规定量级的现象在地磁学中称之为磁暴,在地电学中称之为地电暴。对磁暴、地电暴的研究,在大地构造研究、活动构造监测、生命线工程防护、通信等领域均有应用前景。

学界对磁暴和地电暴的研究,经历了从磁暴、地电暴的单一研究到综合研究的过程。单纯的磁暴研究,历史较长,技术成熟,积淀深厚;单纯

的地电暴的研究,则时间较短,方兴未艾,从最初的定性化识别和描述到定量化的频谱特征分析等,研究方面不断拓展,深度也不断增加<sup>[4][11-16]</sup>。对磁暴和地电暴的综合性研究,近年来也有更多学者加入,并取得了一些令人欣喜的成果:张素琴等<sup>[9]</sup>对2003年10月29日、10月30日两个典型大磁暴进行了分析,研究了磁暴期间磁场变化率与地电场的关系,以及磁暴期间磁暴、磁场变化率及地电场的周期成分,结果表明,磁暴期间 $H$ 分量变化率与地电场东向分量观测数据显著相关,并且周期成分相同;孙君嵩等<sup>[10]</sup>应用中国大陆地区11个地电台站5.5年中磁静日和磁扰日的观测数据,并联系地电场变化敏感响应地下介质非均匀性和空间电磁活动的特点,发展了地电扰动指数,即消除静日地电变化的幅值比地电指数(GEI),指出该指数可服务于地球电磁环境监测、科学研究等领域,并可以用来评估地电场观测数据的质量。但是,截至目前,对磁暴和地电暴的综合性研究,特别是对同一地区磁暴和地电暴的对比研究还远远不够。为此,笔者以天津地区宝坻新台、静海台、徐庄子台3个电磁台站的地磁、地电场观测资料为基础,对天津地区地电暴与磁暴进行了对比分析。

## 1 磁暴和地电暴概述

磁暴是一种剧烈的全球性地磁扰动现象,是最重要的一种磁扰变化类型。这是学界给出的关于磁暴的最为典型的概念。这一概念指出磁暴是非正常的磁场变化及其全球同步发生性,但实践中根据该定义却不能直接判定磁暴,还需要以下相关理论的配合:①磁暴时,磁场水平分量 $H$ 突然增加,呈现一种正脉冲变化,变化最大幅度一般可达50 nT(一般磁暴为10~20 nT);②磁暴包

含初相(磁暴开始之后,  $H$  分量保持在高于暴前值的水平上起伏变化)、主相(初相之后, 磁场迅速大幅度下降, 几个小时到半天下降到最低值, 并伴随着剧烈的起伏变化)、恢复相(主相之后, 磁场逐渐向暴前水平恢复, 在此期间仍有起伏变化, 经历 2~3 d 完全恢复平静) 3 个部分; ③地磁  $K$  指数一般为 5 以上(学界按地磁  $K$  指数对磁暴进行分类,  $K=5, 6$  为中常磁暴;  $K=7, 8$  为中烈磁暴;  $K=9$  为强烈磁暴); ④ $D_s \leq -30$  nT(在中低纬度的测站使用的地磁指数称之为  $D_s$  指数。这个指数每小时量测一次, 最主要是量测地磁水平分量的强度变化。由于在磁赤道附近的磁场强度主要是受到环型电流影响, 因此所量测到的  $D_s$  指数也可以用来估算环型电流的变化量。这种指数主要是为了描述环电流扰动场  $DR$  的强度, 亦即描述  $DR$  环电流的强度)。在磁暴期间, 地磁  $H$  分量的变化表现的最为突出, 因此, 磁暴的大部分形态学和统计学特征是依据中低纬度  $H$  分量的变化得到的。

地电暴是指磁暴期间与磁暴同步出现的地电场水平方向的变化<sup>[7]</sup>。从上述定义可知: 地电暴与磁暴相对应; 磁暴时地磁场  $H$  分量(水平分量)变化明显, 地电场的观测量也恰是水平分量, 二者有很好的对应关系。对地电暴的识别, 有人提出

以地磁指数  $K \geq 5$  时为认定地电暴发生的标准, 但是磁暴的认定并非单纯依靠  $K \geq 5$  这一前提, 故前述作法有时会导致结果不正确。地电暴识别应以磁暴发生为基础, 也即没有磁暴发生, 就没有地电暴发生。

## 2 台站概况及数据

### 2.1 台站概况

本研究选取了既有地磁相对记录, 又有地电场观测的天津宝坻新台和静海、徐庄子台。

宝坻新台位于天津市宝坻区方庄镇老鸦台村南, 地理坐标为东经  $117.400^\circ$ , 北纬  $39.698^\circ$ , 海拔高程 2.5 m。地电场采用“多方向、多极距”观测方法, L 型布极方式, NS 向、EW 向长极距均为 400 m, 短极距均为 200 m, 并进行斜边观测, 电极埋深 10 m(图 1)。布极中心点距离台站 900 m, 观测仪器为 ZD9A-2B 地电场仪。地磁相对记录仪器为 GM-4 磁通门磁力仪。台站东侧、南侧均有食用菌厂, 其中东侧的食用菌厂因发生火灾现已停业; 而南侧的食用菌厂有部分电器设备在室外, 受风吹雨淋日渐破旧, 存在着漏电的可能。

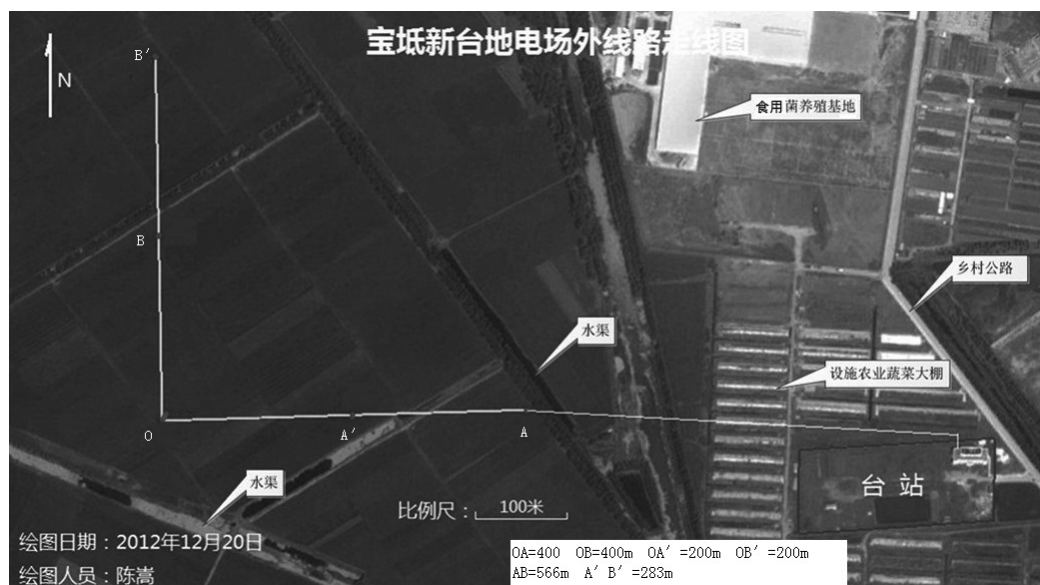


图 1 宝坻新台地电场外线布线图

Fig.1 Outer wiring map of geoelectric field in new Baodi station

静海台位于天津市静海区梁头镇小李庄村, 地理坐标为东经  $116.858^\circ$ , 北纬  $38.942^\circ$ , 海拔高程 3.0 m。地电场采用“多方向、多极距”观测方法, L 型布极方式, NS 向、EW 向长极距均为 400 m, 短极距均为 200 m, 并进行斜边观测, 电极埋

深 10 m(图 2)。布极中心点距离台站 150 m。地电场观测仪器为 ZD9A-2B 地电场仪。地磁相对记录仪器为 GM-4 磁通门磁力仪。台站周边有工厂, 工业游散电流对地磁观测与地电场观测均有影响。



图 2 静海台地电场外线布线图

Fig.2 Outer wiring map of geoelectric field in Jinghai station

徐庄子台坐落在天津市滨海新区大港徐庄子村南 350 m，地理坐标为东经 117.192°，北纬 38.660°，海拔高程为 3.8 m。地电场采用“多方向、多极距”观测方法，L 型布极方式，NS 向、EW 向长极距为 400 m，短极距为 200 m，并进行斜边观测，电极埋深 3 m(图 3)。布极中心点距离

台站 140 m。地电场观测仪器为 ZD9A-2B 地电场仪。地磁场观测仪器为 GM-4 磁通门磁力仪。随着滨海新区的快速发展，附近民营企业的飞速建立，测区外部不远小型工厂已成林立之势，影响因素日趋严重。

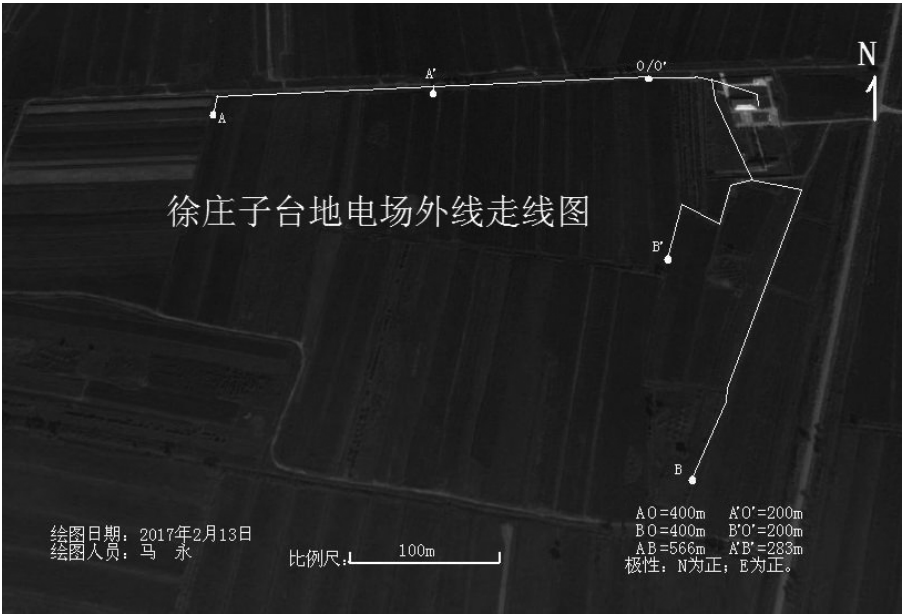


图 3 徐庄子台地电场外线布线图

Fig.3 Outer wiring map of geoelectric field in Xuzhuangzi station

2.2 磁暴和地电暴观测数据

磁暴有急始磁暴和缓始磁暴之分,相对应,地电暴也应有急始地电暴和缓始地电暴之分。急始磁暴的起始时间容易判定,对于初相、主相及恢复相也容易把握,以急始磁暴的初相、主相及恢复相对应地电暴的相应阶段进行研究的准确度

更高些。因此,重点对2016年7月至2018年6月共7次急始磁暴与地电暴对比研究(表1)。磁暴的起止时间为世界时,地电暴起止时间为相对应的北京时(即:世界时+08 h)。研究数据选用了宝坻新台、静海台、徐庄子台地磁GM-4磁通门磁力仪预处理数据和ZD9A-2B地电场仪预处理数据(均为分钟值)。

表1 急始磁暴信息一览表  
Table 1 Information of sudden onset magnetic storms

磁暴编号	起始日期/年-月-日	起始时间/h:min	终止日期/年-月-日	终止时间/h:min	最大K指数
1	2016-07-19	23:50	2016-07-21	17:00	5
2	2016-10-12	22:12	2016-10-19	23:00	5
3	2017-01-26	08:15	2017-01-27	17:00	5
4	2017-05-27	15:35	2017-05-29	23:00	5
5	2017-07-16	06:01	2017-07-18	14:00	6
6	2017-08-31	05:39	2017-09-01	19:00	6
7	2018-04-20	00:22	2018-04-20	21:00	5

3 磁暴与地电暴的变化特征分析

3.1 磁暴变化特征

图4是宝坻新台记录到的磁暴,是一次典型的磁暴。从图4可以清楚地看到磁暴有以下特征:①磁暴发生期间,磁场各分量均发生明显变化,其中磁场水平分量 $H$ 表现最为突出;②初相、主相、恢复相较完整,其中初相在磁场水平分量 $H$ 观测曲线上呈现一种正脉冲变化,整个磁暴短时在1日内完结,但一般要经历2~3 d;③磁暴包含初相、主相、恢复相(主相之后,磁场逐渐向暴前水平恢复,在此期间仍有起伏变化,经历2~3 d完全恢复平静)3个部分;④ $K$ 指数一般为5以上(学界按 $K$ 指数对磁暴进行分类, $K=5, 6$ 为中常磁暴; $K=7, 8$ 为中烈磁暴; $K=9$ 为强烈磁暴);⑤ $D_{st} \leq -30$  nT(在中低纬度的测站使用的地磁指数称之为 $D_{st}$ 指数。这个指数每小时量测一次,最主要是量测地磁水平分量的强度变化。由于在磁赤道附近的磁场强度主要是受到环型电流影响,因此所量测到的 $D_{st}$ 指数也可以用来估算环型电流的变化量。这种指数主要是为了描述环电流扰动场DR的强度,亦即描述DR环电流的强度)。

通常磁暴的大小用主相最低点的幅度来衡量。主相的幅度为磁暴起始点与主相最低点的地磁 $H$ 分量变幅。初相变幅(磁暴起止点与初相最高点地

磁 $H$ 分量的变幅)、磁暴期间数据的最大变幅(磁暴期间地磁 $H$ 分量最大、最小值之差)也能反映出磁暴的特征。因此,对天津地区磁暴的变化特征统计分析全面涉及初相变幅、主相变幅及最大变幅。对7个急始磁暴在宝坻新台、静海台、徐庄子台地磁 $H$ 分量上的变化进行统计分析结果如表2。

通过表2可以看出:①天津地区3个台站磁暴初相变幅、主相变幅及最大变幅无明显差异。从微观角度考察,对于每次磁暴,不论是初相变幅,还是主相变幅和最大变幅,宝坻新台均稍小,其次是静海台,徐庄子台则最大,这与3个台站的纬度有密切关联:3个台站纬度接近,但又有微小差异;②磁暴的变幅与地磁 $K$ 指数有一定的关联性,往往地磁 $K$ 指数大,磁暴主相变幅和最大变幅也会大些,但也有例外。地磁 $K$ 指数相同时,地磁场 $H$ 分量的变幅有时差别却很大,例如1号磁暴与2号磁暴最大地磁 $K$ 指数均为5,但2个磁暴在3个台站的主相变幅和最大变幅均相差甚远,这显示出磁暴变幅与地磁 $K$ 指数并非简单地成正比例关系。

3.2 地电暴变化特征

图5是与图4对应的地电暴数据跟踪分析图(注:磁暴为世界时,地电暴为北京时)。图5与图4对应,可以清楚地看到:地电暴表现为地电场数据的大幅波动,形似“突跳”,这种“突跳”

不仅在地电场 EW 向上有反映,在地电场 NS 或地电场斜边观测(NE 向、NW 向等)上也有明显反映;在长极距上有反映,在短极距上也有反映。地电暴的“突跳”表现在磁暴初相期间,强度与磁暴的急始程度有关联,急始程度高的,“突跳”往

往更大,更集中。在磁暴主相期间,也有明显的“突跳”,特别是地磁  $H$  分量急速下降时;而在地磁恢复相期间,地电场“突跳”会逐渐减弱,直到平缓,特别是接近地电暴时间终点时,变化最为平缓。

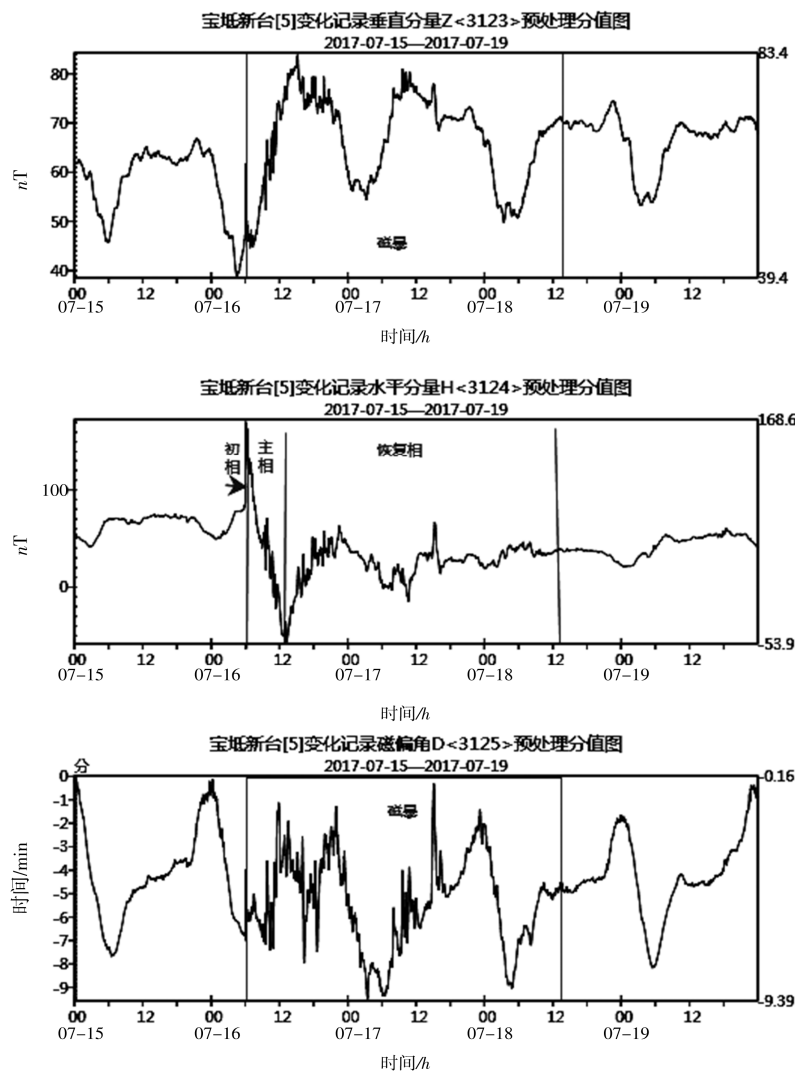


图 4 宝坻新台磁暴数据跟踪分析图

Fig.4 Tracking and analysis chart of magnetic storm data at new Baodi station

表 2 磁暴初相变幅、主相变幅及最大变幅统计表

Table 2 Statistics of the initial and main phase amplitudes and maximum amplitudes of magnetic storm

编号	初相变幅/nT			主相变幅/nT			最大变幅/nT		
	宝坻	静海	徐庄子	宝坻	静海	徐庄子	宝坻	静海	徐庄子
1	37.2	40.0	41.6	11.9	12.1	14.8	49.1	52.1	56.4
2	21.6	22.8	23.8	127.4	130.6	131.6	149.0	153.4	155.4
3	14.9	16.6	16.6	41.5	43.0	43.4	56.4	59.6	60.0
4	46.1	49.6	49.2	139.8	147.2	147.2	185.9	196.8	196.4
5	74.9	79.7	86.8	147.5	152.7	158.6	222.4	232.4	245.4
6	77.5	80.8	82.1	104.8	112.9	116.2	182.3	193.7	198.3
7	20.3	22.6	23.0	125.2	132.1	136.0	145.5	154.7	159.0

地电暴期间,数据呈现大幅高频波动的“突跳”是其根本特征,这种波动由于幅度大,影响了正常的日变,因此成为衡量地电暴的主要指标

之一。对天津宝坻新台、静海台、徐庄子台 7 次地电暴期间地电场长、短极距 NS 向、EW 向的变幅统计结果如表 3、表 4 所示。

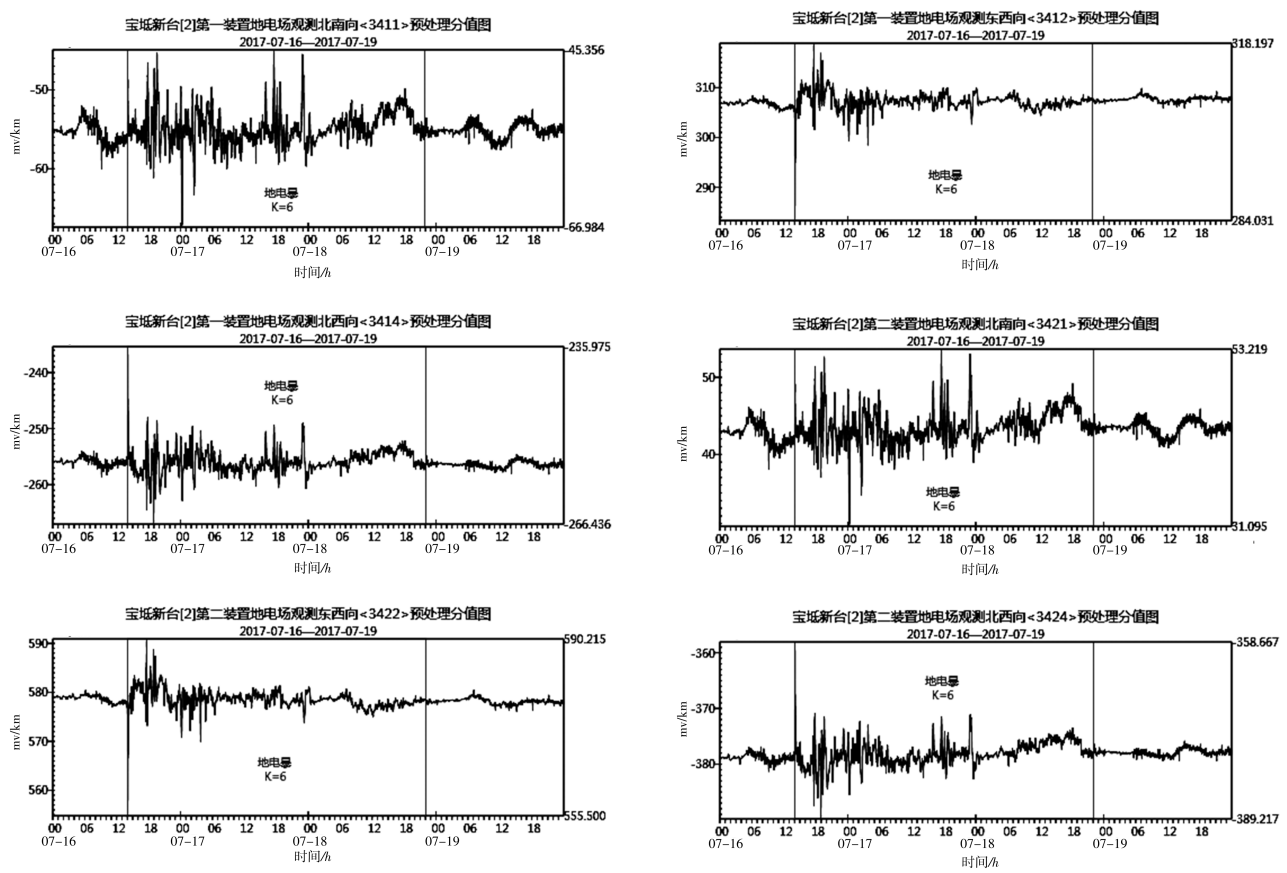


图 5 宝坻新台地电暴数据跟踪分析图

Fig.5 Tracking and analysis chart of geoelectric storm data at new Baodi station

表 3 地电暴期间各台站长极距地电场最大变幅统计表 (单位: mV/km)

编号	宝坻新台		静海台		徐庄子台	
	NS 向变幅	EW 向变幅	NS 向变幅	EW 向变幅	NS 向变幅	EW 向变幅
1	26.984	15.911	25.547	18.090	4.417	15.041
2	26.999	20.241	14.444	18.235	5.447	13.566
3	16.586	8.762	7.570	10.715	2.560	7.889
4	19.318	9.620	10.987	14.281	3.736	9.923
5	21.628	34.166	25.159	39.633	7.480	6.103
6	25.098	17.844	17.614	19.456	7.106	16.830
7	20.109	11.513	10.432	13.941	4.345	10.406

表 4 地电暴期间各台站短极距地电场最大变幅统计表 (单位: mV/km)  
Table 4 Statistics of the maximum amplitude of geoelectric field at short pole distance of stations during geoelectric storms (Unit: mV/km)

编号	宝坻新台		静海台		徐庄子台	
	NS 向变幅	EW 向变幅	NS 向变幅	EW 向变幅	NS 向变幅	EW 向变幅
1	26.847	8.514	23.475	16.420	4.369	14.627
2	37.413	22.370	11.495	17.335	5.756	12.867
3	16.408	9.102	7.423	10.159	2.293	7.474
4	19.165	9.706	11.763	13.948	3.713	9.208
5	22.124	34.715	24.691	37.480	36.573	35.126
6	21.032	17.921	7.1301	19.071	7.003	16.194
7	19.630	11.417	11.389	13.732	4.250	10.249

对表 3、表 4 对比分析可以看出: ①天津地区 3 个台站的地电场对地电暴的反映在幅度方面相去甚远, 不像磁暴那样, 在每个台站  $H$  分量的变幅都相当。地电暴的这一特征, 表明了地电场更易受到地下电性结构的影响, 而且甚至成为主导的因素; ②暴时地电场的变幅与地磁  $K$  指数有一定的关联性, 往往地磁  $K$  指数大, 地电场的变幅也越大, 但也有例外。地磁  $K$  指数相同时, 地电场的变幅有时差别也很大, 幅度差别有些是单点突跳导致, 有时则不然。这显示出地电暴变幅与地磁  $K$  指数并非简单地成正比例关系。③暴时同一方向长、短极距地电场上的变化有高度的相似性, 以致在有地电暴的日期, 地电场同向的相关系数往往会比平时要高得多。

4 地电暴与磁暴的关联性分析

根据地球电磁感应的理论, 当研究地区远小于源场尺度时, 源场可以近似看作是均匀的、无限的平面电磁波<sup>[9]</sup>。因此, 对于定点台站, 所研究的问题是平面问题。这时

$$\Delta \times E = \frac{B B_x}{B t}$$

变成

$$\frac{B E_y}{B Z} = \frac{B B_x}{B t}$$
$$\frac{B E_x}{B Z} = \frac{B B_y}{B t}$$

即地电场的南北向分量对应于地磁场东向分量的时间变化; 地电场的东西向分量对应于地磁场北向分量的时间变化<sup>[9]</sup>。磁暴发生时, 所有地磁要素都发生剧烈变化, 其中水平分量  $H$  (或  $X$  分量) 变化最大, 选择磁暴期间  $H$  分量与地电暴期间

地电场  $EW$  向进行相关性分析有充分的理论基础。但为检验理论, 笔者也同步对暴时磁场  $H$  分量与地电场  $NS$  向作了关联性研究。

对同台站暴时磁场与地电场的对比研究, 不能直接将磁场  $H$  分量与地电场作相关性分析。因为依据电磁理论, 地电场与地磁场之间存在着二阶差分的关系, 故应当以磁场  $H$  分量的变化率与地电场的分量进行相关性分析, 从而确定磁暴与地电暴的关联性。

暴时磁场  $H$  分量变化率的计算方法是: 将磁暴期间地磁  $H$  分量分钟值记录数据的后 1 min 数据减去前 1 min 数据, 即第 2 min 数据减去第 1 min 数据、第 3 min 数据减去第 2 min 数据, 依次类推, 形成新的时间序列。笔者对选定的 7 个急始磁暴  $H$  分量计算变化率, 并与同台站地电场  $NS$  向、 $EW$  向观测数据进行相关性分析, 结果如表 5 所示。

由相关系数显著性检验可知, 在显著性水平  $\alpha=0.05$ , 观测数据  $N=1000$  的情况下,  $r \geq 0.062$  即认为两者相关; 在显著性水平  $\alpha=0.01$ , 观测数据  $N=1000$  的情况下,  $r \geq 0.077$  即认为两者相关; 随着观测数据的增加,  $r$  的要求会变的越小。磁暴 (地电暴) 的持续时间基本 1 d 以上, 绝大多数会持续达到 2~3 d, 甚至多日, 分钟值数据个数会远超过 1000, 因此相关性认定的要求在统计的数值上将会较低。从表 5 可以看出: 不同台站磁暴期间磁场变化率与地电场的相关性有较大差异, 总体来看宝坻新台相关性好, 徐庄子台次之, 静海台的相关性较差, 这可能与布极区地下介质电性结构不同有关; 暴时磁场变化率与地电场  $EW$  向相关性好, 与  $NS$  向相关性差。



表 5 磁暴期间磁场变化率与地电场短极距相关系数统计表

Table 5 Statistics of correlation coefficient between magnetic field change rate and short pole distance of geoelectric field during magnetic storm

编号	宝坻新台		静海台		徐庄子台	
	与 NS 向相关	与 EW 向相关	与 NS 向相关	与 EW 向相关	与 NS 向相关	与 EW 向相关
1	0.0384	0.2300	0.0890	0.0799	0.0853	0.1378
2	0.0394	0.4752	0.0658	0.0941	0.1764	0.2897
3	0.0389	0.2410	0.2496	0.2699	0.0079	0.0362
4	0.1343	0.5206	0.2486	0.2824	0.0034	0.2584
5	0.1131	0.4212	0.0776	0.0609	0.1602	0.3609
6	0.0796	0.3966	0.2237	0.2209	0.0140	0.2687
7	0.0595	0.4885	0.3540	0.3823	0.0080	0.2469

5 结语

(1)磁暴在地磁  $H$  分量上表现明显, 有完整的初相、主相、恢复相, 地电暴在地电场各测项均有明显反映。3 个台站相同磁暴初相变幅、主相变幅及最大变幅并无明显差异, 而暴时不同台站以及同台站不同测项地电场变幅却有较大差异, 前者与台站纬度接近有关, 后者则与地下介质结构不同有关。

(2)暴时地磁  $H$  分量变幅、地电场最大变幅与地磁  $K$  指数大小有一定关联, 往往地磁  $K$  指数大, 磁暴主相变幅、最大变幅以及地电场的最大变幅也会越大, 但也有个例, 并非简单地成正比例关系。

(3)不同台站磁暴期间磁场变化率与地电场的相关性有较大差异, 总体来看宝坻新台相关性好, 徐庄子台次之, 静海台相关性较差。暴时磁场变化率与地电场 EW 向相关性好, 与 NS 向相关性较差。

致谢: 审稿老师认真、细致地审阅了我们的论文稿, 提出了诸多宝贵建议, 对我们修改、完善论文起到了重要作用, 在此衷心地表示感谢。另外, 文中图 1~图 3 来源于中国地震前兆数据管理系统数据库, 在此向绘图者陈嵩、李宁、马永同志一并致谢。

参考文献:

[1] 中国地震局监测预报司. 地震电磁学理论基础与观测技术[M].北京:地震出版社,2010.

[2] 钱家栋,赵玉林,桂燮泰,等. 国内外地电预报地震研究动态与展望[M]. 北京:地震出版社,1991.

[3] 徐文耀. 地球电磁现象物理学[M]. 安徽合肥:中国科学技术大学出版社,2009.

[4] 叶青. 地电场变化的基本要素研究与物理解释[D]. 兰州:兰州地震研究所,2007.

[5] 张素琴,杨冬梅. 磁暴时磁场变化率与地电场相关性研究[J]. 地震地磁观测与研究,2010,31(3):7-12.

[6] 郑宽, 刘连光,Boteler D H,等. 多电压等极电网的 GIC Benchmark 建模方法[J]. 中国电机工程学报,2013,33(16):179-186.

[7] 刘连光,吴伟丽. 电网磁暴灾害风险影响因素研究综述[J]. 地球物理学报,2014,57(6):1709-1719.

[8] 章鑫,杜学彬,王丽,等. 南北地震带大地电流分布与地震活动关系探讨[J]. 地学前缘,2017,24(2):202-211.

[9] 章鑫,杜学彬,刘君. 华北地区地电暴时 GIC 及涡旋电流响应分析[J]. 地球物理学报,2017,60(5):1800-1810.

[10] 孙君嵩,杜学彬,王丽,等. 地电扰动指数 GEI 研究[J]. 地球物理学报,2018,61(11):4493-4503.

[11] 郭建芳,李非,张秀霞,等. 地电场日变幅与地电暴分析[J]. 地震地磁观测与研究,2010,31(3):18-22.

[12] 卫定军. 宁夏石嘴山和固原大地电场资料对比分析[J]. 内陆地震,2010,24(1):64-72.

[13] 董晓娜,鲁成义,曲利,等. 山东地区地电场观测资料分析研究[J]. 地震研究,2012,35(3):420-428.

[14] 李颖楠,龚永俭,胡雪琪,等. 宝坻地震台新旧场地地电场观测资料对比分析[J].高原地震,2015,27(4):20-26.

[15] 刘长生,段莉莉,高岩. 黑龙江省大地电场观测数据的分析与应用[J]. 防灾减灾学报,2016,32(1):38-46.

[16] 孙君嵩,杜学彬. 中国大陆地电暴时频特征[J]. 地震学报,2017,39(4):615-632.

[17] 克拉耶夫. 中央人民政府地质部编译室,译. 地电原理[M]. 北京:地质出版社,1954.