

磁暴期间地磁场数据与地电场数据的相关性研究

史舒婷^{1,2}, 宫静芝^{1,2}, 郭宇^{1,2}, 范磊^{1,2}, 张亮娥^{1,2}, 吴昊昱^{1,3*}

¹太原大陆裂谷动力学国家野外科学观测研究站, 山西 太原

²太原地震中心站, 山西 太原

³山西省地震局, 山西 太原

收稿日期: 2022年11月4日; 录用日期: 2022年12月15日; 发布日期: 2022年12月23日

摘 要

通过研究山西省太原站、大同站、忻州站、临汾站四个台站在磁暴发生期间地磁场数据和地电场数据的变化特征, 将2015年6月23日和2015年8月15日磁暴期间的地磁场一阶差分后的数据、地电场观测数据作为研究数据, 对其进行相关性分析和傅里叶变换后幅值的相关性分析, 研究结果表明: ① 本次研究中两次磁暴中地磁场的一阶差分与地电场的观测值表现出明显的相关性; ② 在地磁场一阶差分与地电场原始值的相关性研究中, 临汾站的相关系数明显低于其他台站场地; 在地磁场幅值与地电场幅值的相关性研究中, 未表现出明显的场地差异。

关键词

地磁场, 地电场, 磁暴, 傅里叶变换, 相关性分析

Research on the Correlation between the Geomagnetic Field Data and the Geoelectric Field Data during Magnetic Storm

Shuting Shi^{1,2}, Jingzhi Gong^{1,2}, Yu Guo^{1,2}, Lei Fan^{1,2}, Liang'e Zhang^{1,2}, Haoyu Wu^{1,3*}

¹Taiyuan Earthquake Monitoring Center Station, Taiyuan Shanxi

²National Continental Rift Valley Dynamics Observatory of Taiyuan, Taiyuan Shanxi

³Shanxi Earthquake Agency, Taiyuan Shanxi

Received: Nov. 4th, 2022; accepted: Dec. 15th, 2022; published: Dec. 23rd, 2022

*通讯作者。

文章引用: 史舒婷, 宫静芝, 郭宇, 范磊, 张亮娥, 吴昊昱. 磁暴期间地磁场数据与地电场数据的相关性研究[J]. 地球科学前沿, 2022, 12(12): 1614-1624. DOI: 10.12677/ag.2022.1212157

Abstract

The Research studies the change characteristics of the geomagnetic field data and geoelectric field data of four stations in Shanxi Province during the magnetic storm, namely Taiyuan Station, Datong Station, Xinzhou Station and Linfen Station. The research data are from the first order difference data of the geomagnetic field and the observation data of the geoelectric field during the magnetic storm on June 23, 2015 and August 15, 2015. And the research method is to carry out correlation analysis on research data and correlation analysis on amplitude of research data after Fourier transform. Results show that: ① In this study, the first-order difference data of the geomagnetic field in the two geomagnetic storms has an obvious correlation with the observed value of the geoelectric field; ② In the study of the correlation between the first order difference of the geomagnetic field and the original value of the geoelectric field, the correlation coefficient of Linfen Station is obviously lower than the other stations; In the study of the correlation between the amplitude of geomagnetic field and the amplitude of geoelectric field, there is no obvious difference between the stations.

Keywords

Geomagnetic Field, Geoelectric Field, Magnetic Storm, Fourier Transform, Correlation Analysis

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

磁暴是由空间环境的扰动引起的全球性的剧烈的磁扰动现象。太阳活动期间,携带高能粒子的太阳风与地球的电离层相互作用,这种扰动在地磁场和地电场上均有反映。

地磁场和地电场均是地球固有的物理场。地磁场根据场源不同可以分成外源场和内源场,外源场起源于地球表层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。地电场根据场源不同可以分成大地电场和自然电场:大地电场是由地球外部的各种场源在地球表面感应所生成的电场,其特点是具有广域性。太阳活动期的高能粒子影响的便是外源场与大地电场,地磁场受到太阳风与电离层相互作用的影响产生了变化磁场、地电场受到此影响产生了感应地电场,故而磁暴可以影响地磁场与地电场的观测数据。根据电磁感应理论,电场与磁场在相互感应时应互成 90° 夹角,即地磁场数据中的 H 分量与地电场数据中的北南分量存在对应关系、地磁场数据中的 D 分量与地电场数据中的东西分量存在对应关系[1] [2] [3] [4] [5]。

学界对于磁暴期间地磁场与地电场数据的研究取得了很大的成果,张素琴等研究了磁暴期间磁场变化率与地电场的关系,发现地磁观测中 H 分量的变化率与地电场东向分量观测数据显著相关[6];龚永俭等对天津地区三个台站记录到的磁暴期间数据进行分析,发现同一磁暴中地磁场 H 分量的变幅大致相同,而地电场的变幅却存在较大差异[7]。然而对磁暴时地磁场数据与地电场数据的综合性研究,特别是在山西地区对磁暴期间地磁场数据与地电场数据的相关性研究还远远不够。为此,笔者以山西省太原地震监测中心站、大同地震监测中心站、忻州地震监测中心站、临汾地震监测中心站(以下简称太原站、大同站、忻州站、临汾站)4个台站的地磁场、地电场观测资料为基础,对山西地区磁暴期间地电场与地磁场之间

的数据进行综合分析。

2. 台站概述

2.1. 地磁场与地电场观测仪器概述

山西省太原站、大同站、忻州站、临汾站均有地磁场与地电场观测。山西省地磁场观测存在有多种型号的仪器，临汾站有 FHD 质子矢量磁力仪，其余三个台站均有 GM4 磁通门磁力仪，本次研究中的地磁数据主要以临汾站的 FHD 及其余三个台站的 GM-4 的数据进行分析[8]。

山西省的地电场观测主要起源于 2005 年在山西建设的“十五数字地震网络工程”项目，现今除太原站是以 GEF-2 作为地电场的观测仪器外，其他三个台站均以 ZD9A-2 作为地电场的观测仪器，本次研究中的地电数据主要由以上仪器产出。大同站的地电场观测包括北南、东西、北东三个测项，忻州站、太原站、临汾站的地电场观测包括北南、东西、北西三个测项，本次研究主要研究北南、东西两个测项[9]。

2.2. 地电场与地磁场观测场地概述

太原站磁电场观测位于汾河西岸冲击平原区，第四系厚约 800 m，区域磁场平静，未发现隐伏磁性岩体，结晶基底埋深约 3000 m，地磁仪器的相对记录室为半地下室石材拱形结构。地电场观测采用地埋方式，“L”型布极方式，北南、东西分量长极距为 240 m，北东方向的长极距为 339 m [10]。

Table 1. Introduction to basic conditions of observation stations about the geomagnetic and the geoelectric in Shanxi
表 1. 山西各地电场、地磁场观测台站基础条件介绍

台站名称	经度	纬度	高程	布极方式	地磁场梯度	地磁测项
大同站观测场地	117.242	40.137	1179.0	倒“L”型布极方式	<3 nT/m	H, D, Z
忻州站观测场地	113.057	39.051	946.1	“L”型布极方式	<2 nT/m	H, D, Z
太原站观测场地	112.503	37.687	772.0	“L”型布极方式	<2 nT/m	H, D, Z
临汾站观测场地	111.372	36.083	492.2	“L”型布极方式	<10 nT/m	H, D, F

大同站磁电观测点的出露岩性为太古界花岗伟晶岩、蚀变花岗伟晶岩和蚀变片麻岩，以酸性岩为主，其磁化程度与剩余磁性较低。地磁观测室为半地下室，地电观测采用地埋方式，倒“L”型布极方式，采用固体不极化专用电极，埋深 3 m，场地南北向长极距(本文选用长极距的数据来进行研究) 300 m、东西向长极距 300 m、北东向长极距 424 m。

忻州站磁电观测场地的出露岩性为片麻岩系，主要有黑云斜长片麻岩、黑云二长片麻岩、黑云角闪斜长片麻岩夹灰白色石英岩及角闪片麻岩，属于中等磁性矿物，符合国标对三类流动地磁台站的建设要求。其电场观测采用地埋方式。

临汾站磁电观测场地的岩性以奥陶中统马家河组灰岩为主，灰岩属于弱磁性岩石。其地电场观测系统布极采用地埋式“三个方向、多种极距”的观测方法[11]。观测场地的具体情况见表 1。

3. 磁暴发生时地磁数据与地电数据的特征分析

磁暴中的急始磁暴具有起始相变化幅度明显、且起始时间容易确定的特点，因而用急始磁暴来进行研究可以使研究结果更加准确。根据统计，2015~2020 年山西省地磁观测仪器共记录到急始磁暴 $K_{\max} = 7$ 的磁暴 4 次， $K_{\max} = 6$ 的磁暴 7 次， $K_{\max} = 5$ 的磁暴 9 次。

2015年6月23日(北京时间2022年6月23日~2022年6月24日)的磁暴最大K指数为7,山西省四个磁电台站对本次磁暴均有明显记录,北京时间6月23日01:00起的地磁K值指数一次为7、4、6、5、6、4、5(每3小时一个K值)。以忻州站地磁仪器GM4数据和地电仪器ZD9A-2数据为例,来进行磁暴期间的地磁和地电数据描述。

忻州站的地磁场数据从北京时间2015年6月23日02:29开始出现急始变化,H分量的即始变幅为174.11 nT,D分量的即始变幅为96.54',F分量的即始变幅为16.71 nT。在该次磁暴中,H分量的最大变幅为381.04 nT,D分量的最大变幅为151.617',F分量的最大变幅为46.48 nT。

从图1中可以看出,忻州站地磁观测数据中的背景大小与K值的大小呈现正相关性;在急始相中Z值数值急剧下降,短期后恢复,H值数值急剧上升,并在短期恢复,在初相、主相和恢复相中三个分量均表现为出现毛刺、数据曲线背景增大;磁偏角D值在H值和Z值的数据出现急始相变化后,才出现本次磁暴中范围最大的一次畸变。

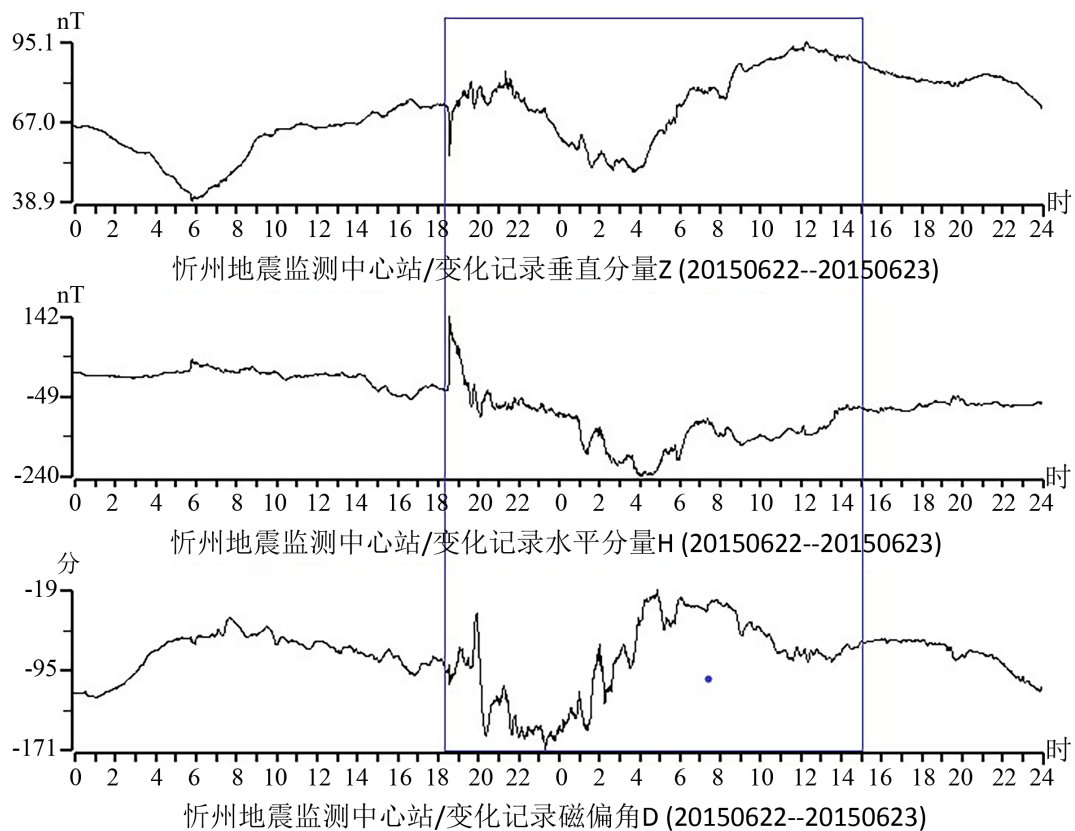


Figure 1. Minute value curve of the geomagnetic field data at Xinzhou Station (Universal Time)

图 1. 忻州站地磁场分钟值曲线(世界时)

北京时间2022年6月23日2时,忻州站地电场数据清晰地记录到磁暴的完整变化。忻州站的地电场数据从北京时间2015年6月23日02:29开始出现急始变化,北南分量的即始变幅为9.184 mV/km,东西分量的即始变幅为21.241 mV/km,北西分量的即始变幅为21.877 mV/km。在该次磁暴中,北南分量的最大变幅为14.106 mV/km,东西分量的最大变幅为35.512 mV/km,北西分量最大变幅为33.925 mV/km。忻州站三个分量与地磁观测曲线同时出现了向下的阶变,之后缓慢恢复;同时伴有毛刺增加、出现小幅畸变的情况(见图2)。忻州站地电观测数据中的背景大小与K值的大小亦呈现正相关性。

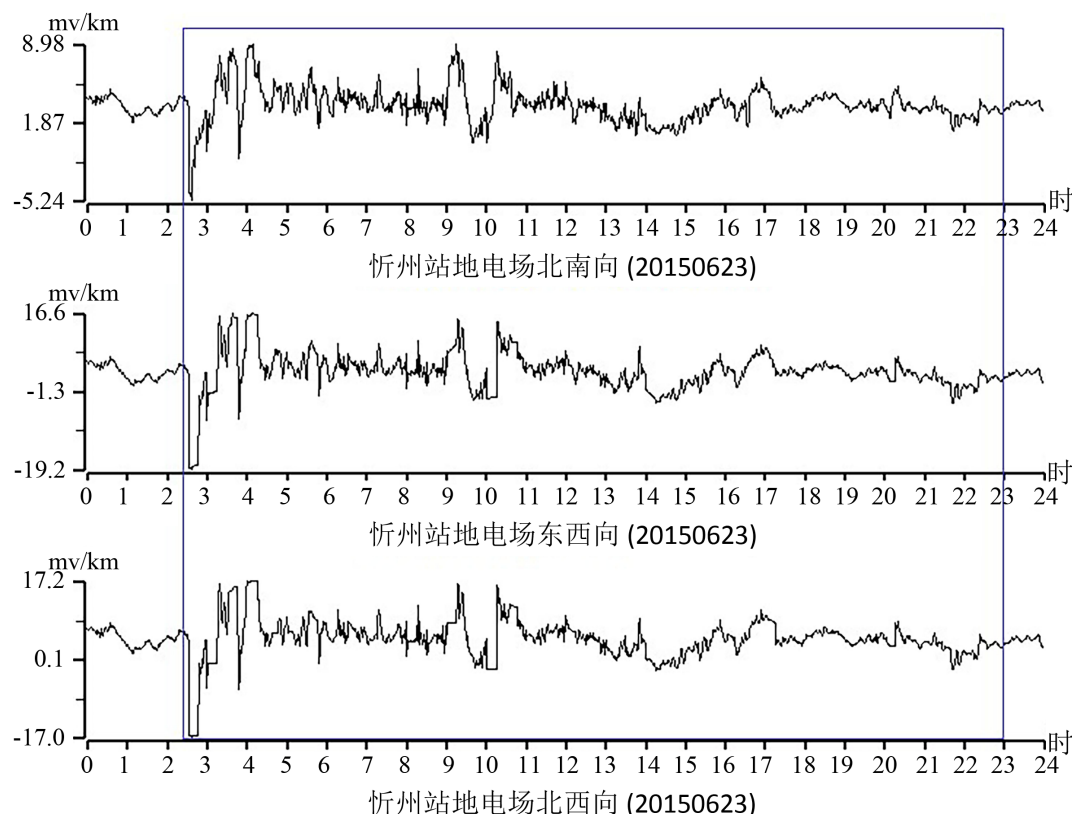


Figure 2. Minute value curve of the geoelectric field data at Xinzhou Station (Beijing Time)
图 2. 忻州地电场分钟值曲线(北京时间)

4. 相关性研究

4.1. 磁暴时间段选取

为使数据更加有效, 本文选取 $K_{\max} = 7$ 且观测数据完整的磁暴期作为研究时段, 重点选取北京时间 2015 年 6 月 23 日(2022 年 6 月 23 日~2022 年 6 月 24 日)与 2015 年 8 月 15 日(2022 年 8 月 15 日~8 月 18 日)的磁暴进行研究。

由于在同一磁暴期间内时间段较长, 其中不乏包含 $K = 2$ 或 $K = 3$ 的时间段。在 K 值较小时, 地磁与地电数据所受到磁暴干扰的影响较小, 与其受场地环境的其他干扰较难区分, 故对磁暴中 K 指数较大的时段再次进行截取, 使研究结果更加准确、最终选择北京时间 2015 年 6 月 23 日 02:20~23:00 和北京时间 2015 年 8 月 15 日 16:20~2015 年 8 月 16 日 5:00 的磁暴来进行研究。

4.2. 磁暴时段的地磁场与地电场数据的相关性研究

由于地磁场中 H 值的一阶差分与地电场东西分量具有对应关系, 地磁场中 D 值的一阶差分与地电场北南分量具有对应关系, 故对其在磁暴期间的观测数据进行相关性分析, 为了探究磁暴期间的地磁场观测与地电场观测数据的相关性, 对地磁场观测数据做一阶差分, 即后一分钟的观测值减去前一分钟的观测值, 第一组数为第二分钟观测值减去第一分钟观测值、第二组数为第三分钟观测值减去第二分钟观测值, 以此类推, 从而形成新的一阶差分序列, 即

$$b_n = a_{n+1} - a_n \quad (1)$$

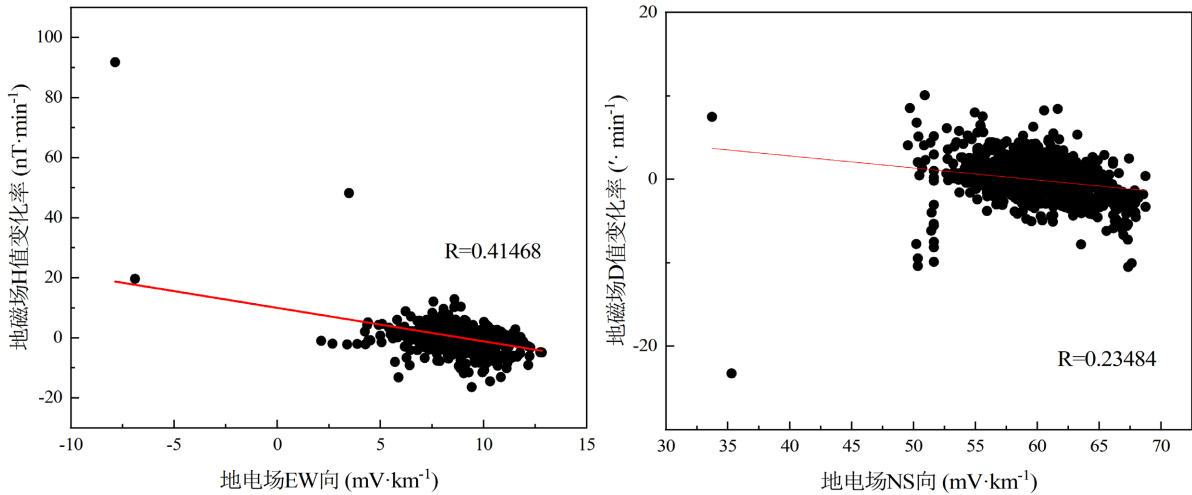
其中 b_n 代表新的一阶差分序列, a_n 代表原始地磁场观测值。

Table 2. Correlation coefficient table of different stations during the same magnetic storm
表 2. 不同场地在磁暴期间内的相关性系数表

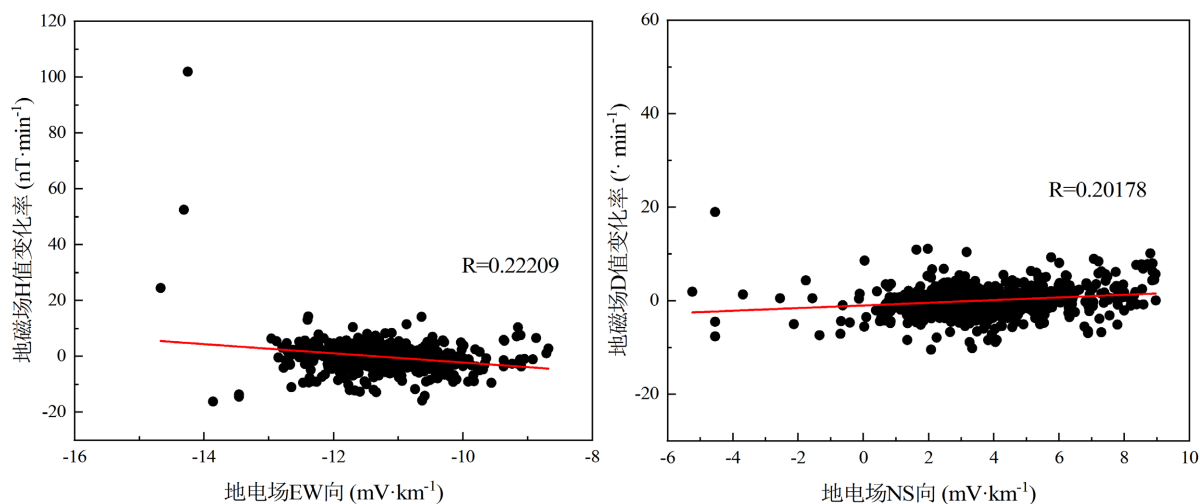
场地名称	磁暴时间段	地磁场 H 测项一阶差分与地电场 EW 测项差分的相关系数	地磁场 D 测项一阶差分与地电场 NS 测项差分的相关系数	备注
太原站	2015 年 6 月 23 日	0.41468	0.23484	
太原站	2015 年 8 月 15 日	0.31269	0.06840	D 值收到干扰，相关系数较低
大同站	2015 年 6 月 23 日	0.22209	0.20178	
大同站	2015 年 8 月 15 日	0.21741	0.41432	
忻州站	2015 年 6 月 23 日	0.16369	0.22762	
忻州站	2015 年 8 月 15 日	0.40915	0.23381	
临汾站	2015 年 6 月 23 日	0.14770	0.08670	
临汾站	2015 年 8 月 15 日	0.16615		D 测项受干扰严重，不进行相关研究

用地磁观测值进行一阶差分后的数据与地电场的观测值进行相关性分析(图 3、图 4)，本文中用 Δy_H 和 Δy_D 来表示 H 测项与 D 测项的一阶差分。横坐标表示地电场的观测值、纵坐标表示地磁场观测值一阶差分后的数据，其中太原站和临汾站的地磁观测 D 值在 2015 年 8 月份的磁暴中受到干扰，不进行研究。从表 2 中可以看出，① 在 $N = 1000$ ， $\alpha = 0.05$ 时 $r \geq 0.062$ ，或 $\alpha = 0.01$ 时 $r \geq 0.081$ 即可代表二者具有相关性，本次研究中 2015 年 6 月 23 日的磁暴中共有研究数据 1240 组，其最小相关性 $r_{\min} = 0.08670$ ；在 $N = 700$ ， $\alpha = 0.05$ 时 $r \geq 0.074$ ，或 $\alpha = 0.01$ 时 $r \geq 0.097$ 即可代表二者具有相关性，本次研究中 2015 年 8 月 15 日的磁暴共有研究数据 760 组，排除受干扰外其最小相关性 $r_{\min} = 0.16615$ ；可认为本次研究中地磁场的一阶差分与地电场的观测值是存在相关关系的。② 除大同站 2015 年 6 月 23 日的磁暴外，同一场地同一场磁暴中的地磁 H 测项一阶差分与地电场东西测项的相关系数明显大于地磁 D 测项一阶差分与地电场南北测项的相关系数，即 $r(\Delta y_H, E_{EW}) > r(\Delta y_D, E_{NS})$ 。③ 太原站、大同站、忻州站的相关系数明显高于临汾站相关系数。④ 不同磁暴中的大同站 $r(\Delta y_H, E_{EW})$ 、忻州站 $r(\Delta y_D, E_{NS})$ 、临汾站 $r(\Delta y_H, E_{EW})$ 数值相近。

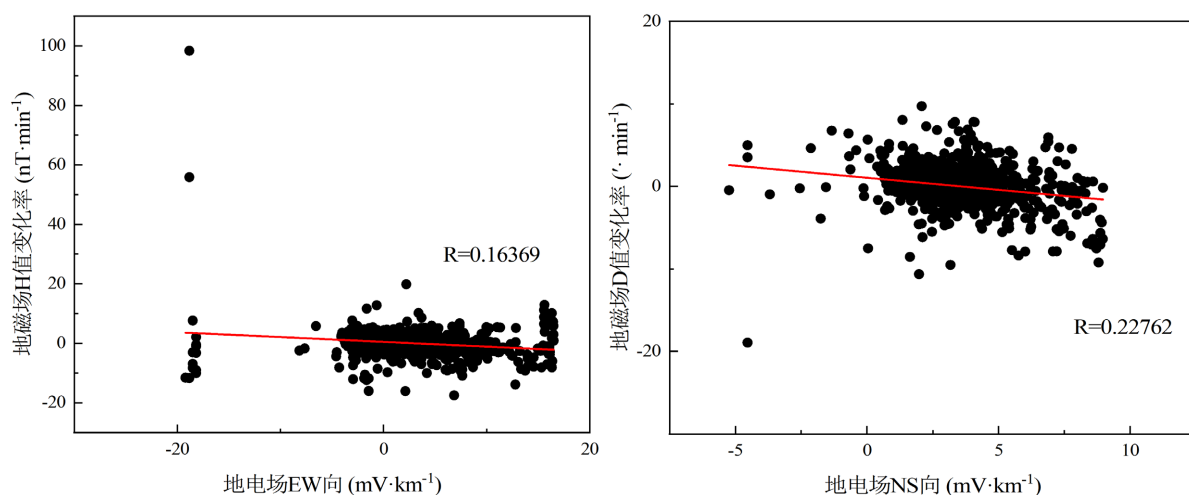
虽然在本次研究中同一场地在不同期磁暴中相关系数相近，但本次研究中的磁暴数较少，所以同场地在不同磁暴期间地磁场的变化率与地电场原始数据间的相关系数是否更加相似，还需要进一步研究。



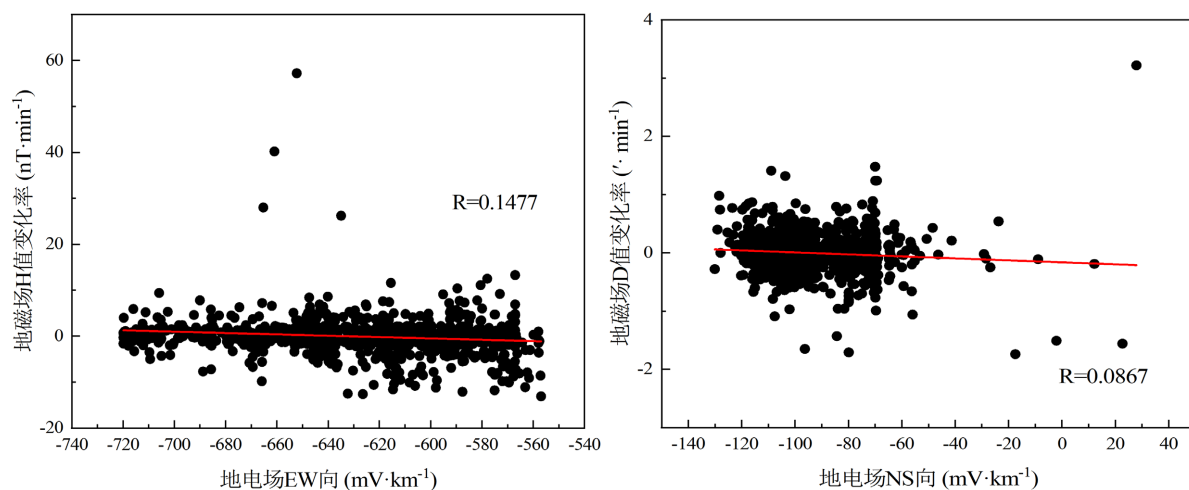
太原 2015 年 6 月 23 日(左为地磁场 H 值变化率与地电场 EW 向，右为地磁场 D 值变化率与地电场 NS 向)



大同 2015 年 6 月 23 日(左为地磁场 H 值变化率与地电场 EW 向, 右为地磁场 D 值变化率与地电场 NS 向)



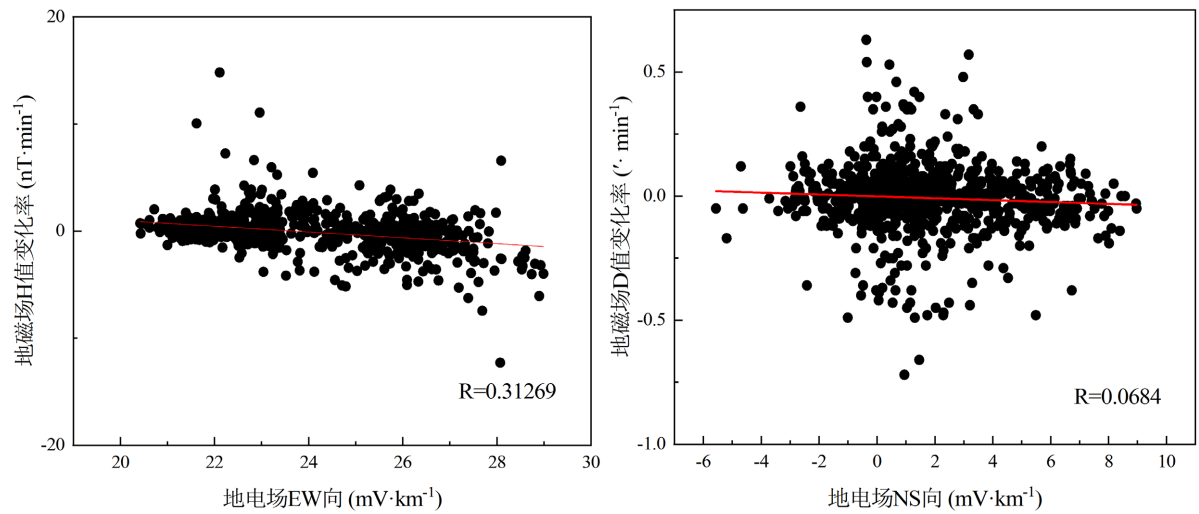
忻州 2015 年 6 月 23 日(左为地磁场 H 值变化率与地电场 EW 向, 右为地磁场 D 值变化率与地电场 NS 向)



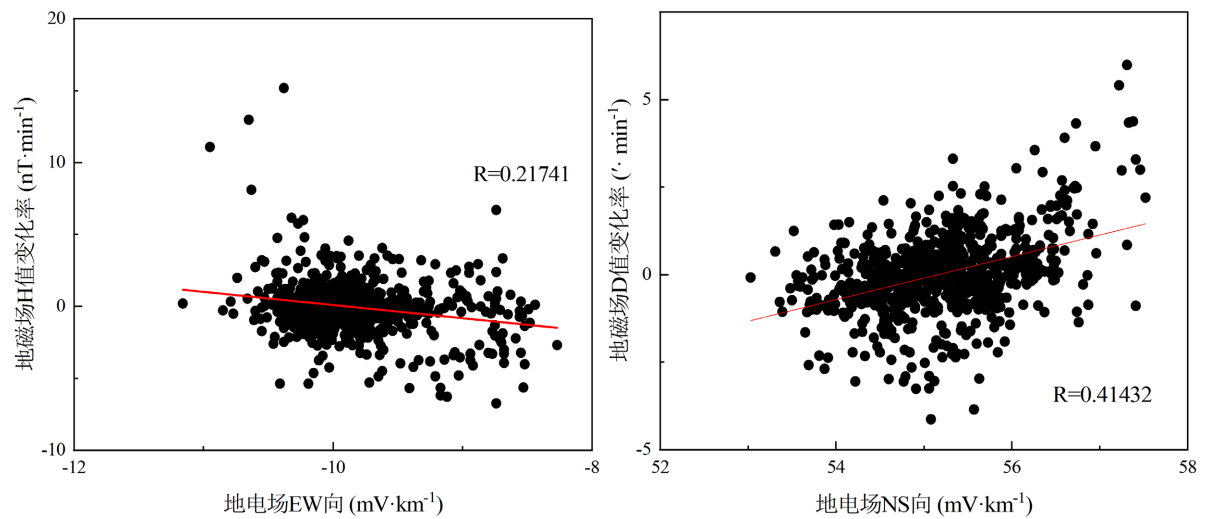
临汾 2015 年 6 月 23 日(左为地磁场 H 值变化率与地电场 EW 向, 右为地磁场 D 值变化率与地电场 NS 向)

Figure 3. Correlation analysis of magnetic field change rate and geoelectric field during magnetic storm on June 23, 2015

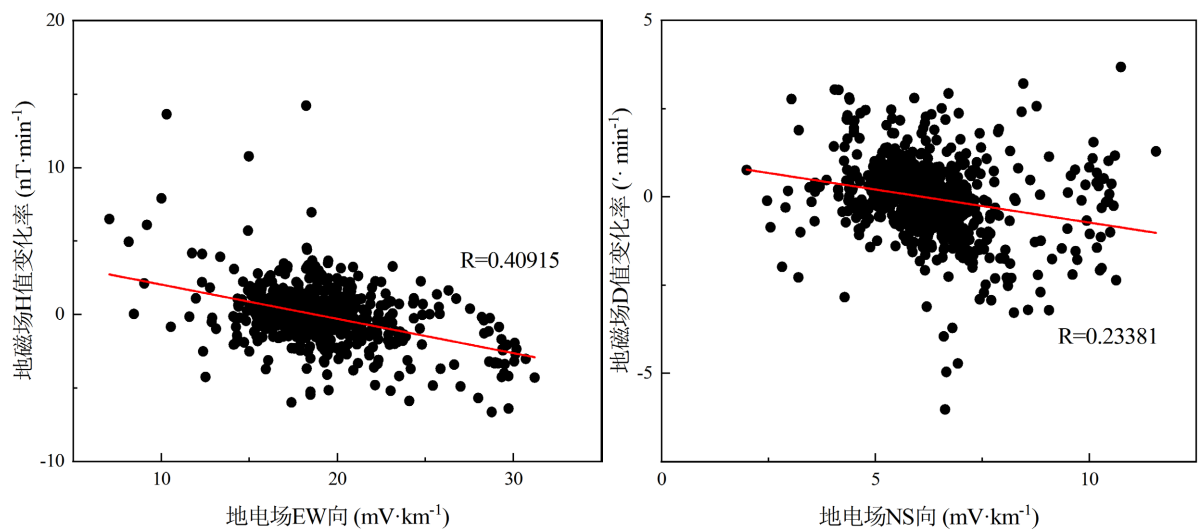
图 3. 2015 年 6 月 23 日磁暴时磁场变化率及地电场相关性分析



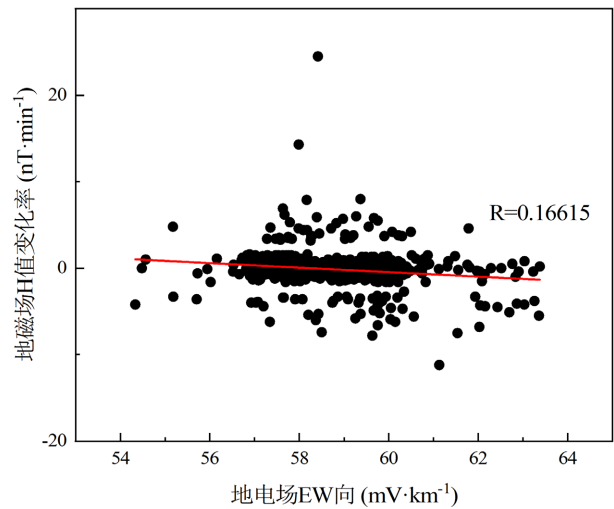
太原 2015 年 8 月 15 日(左为地磁场 H 值变化率与地电场 EW 向, 右为地磁场 D 值变化率与地电场 NS 向)



大同 2015 年 8 月 15 日(左为地磁场 H 值变化率与地电场 EW 向, 右为地磁场 D 值变化率与地电场 NS 向)



忻州 2015 年 8 月 15 日(左为地磁场 H 值变化率与地电场 EW 向, 右为地磁场 D 值变化率与地电场 NS 向)



临汾 2015 年 8 月 15 日(图为地磁场 H 值变化率与地电场 EW 向)

Figure 4. Correlation analysis of magnetic field change rate and geoelectric field during magnetic storm on August 15, 2015
图 4. 2015 年 8 月 15 日磁暴时磁场变化率及地电场相关性分析

4.3. 磁暴时段的地磁场与地电场数据的频谱相关性研究

运用 MATLAB 对山西地区 4 个台站在磁暴期间的地磁场观测数据后的一阶差分值和地电场观测数据进行傅里叶变换, 采样频率为 $F_s = 1/60$, 2015 年 6 月 23 日期间磁暴的信号长度 1240 组, 2015 年 8 月 15 日期间磁暴的信号长度 760 组, 傅里叶变换的展开公式如下:

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{n\pi x}{L} + b_n \sin \frac{n\pi x}{L} \right) \tag{2}$$

并对同一台站的地电场原始观测值傅里叶变换后的幅值(地电场傅里叶变换后的幅值以下简称地电场幅值)与地磁场原始观测值进行一阶差分后再进行傅里叶变换后的幅值(地磁场原始观测值进行一阶差分后再进行傅里叶变换后的幅值以下简称地磁场幅值)进行相关性研究[12] [13] [14] [15]。

以 2022 年 6 月 23 日的磁暴为例, 选取山西省太原站、大同站、忻州站、临汾站的地电场幅值与地磁场幅值进行同坐标绘图(图 5、图 6), 为使图像更加方便直观, 图中横坐标表示周期, 纵坐标表示幅度, 采用双对数坐标系。从图中可以看出, 四个台站中的不同观测项的记录数值幅度在周期上具有重合性, 其中 H 值的重合性最高。

对同台站的地磁场 H 值幅值与地电场东西向幅值、地磁场 D 值幅值与地电场北南向幅值进行相关性分析, 除太原站地磁场 D 值幅值与地电场北南向幅值、忻州站地磁场 H 值幅值与地电场东西向幅值外, 可以发现其相关性系数多在 0.20~0.28 之间, 分布区间更加集中; 同时在不同观测场地中未能表现明显的差异(见表 3)。

Table 3. Correlation coefficient between amplitude of geoelectric field and amplitude of change rate of geomagnetic field
表 3. 地电场幅值与地磁场幅值相关性系数表

观测场地	地磁场 H 值幅值与地电场东西向幅值	地磁场 D 值幅值与地电场北南向幅值
太原	0.20711	0.09390
大同	0.24037	0.27854
忻州	0.01648	0.24162
临汾	0.21304	0.26799

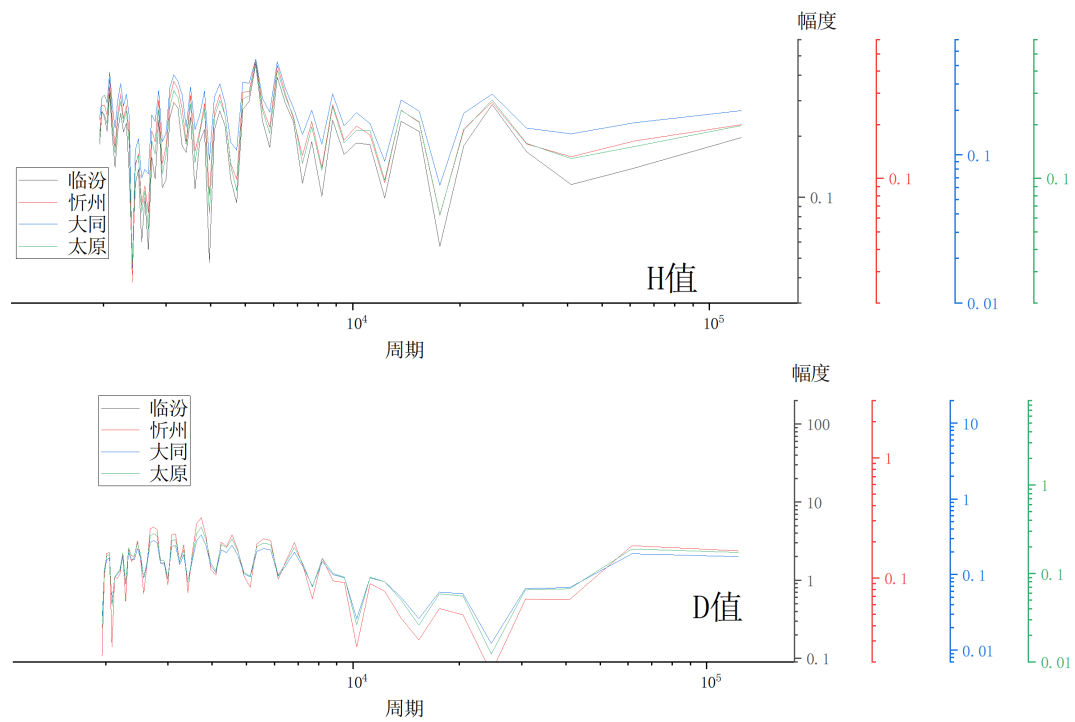


Figure 5. The same coordinate graph of geomagnetic field amplitude at different stations
图 5. 不同观测场地的地磁场幅值同坐标曲线图

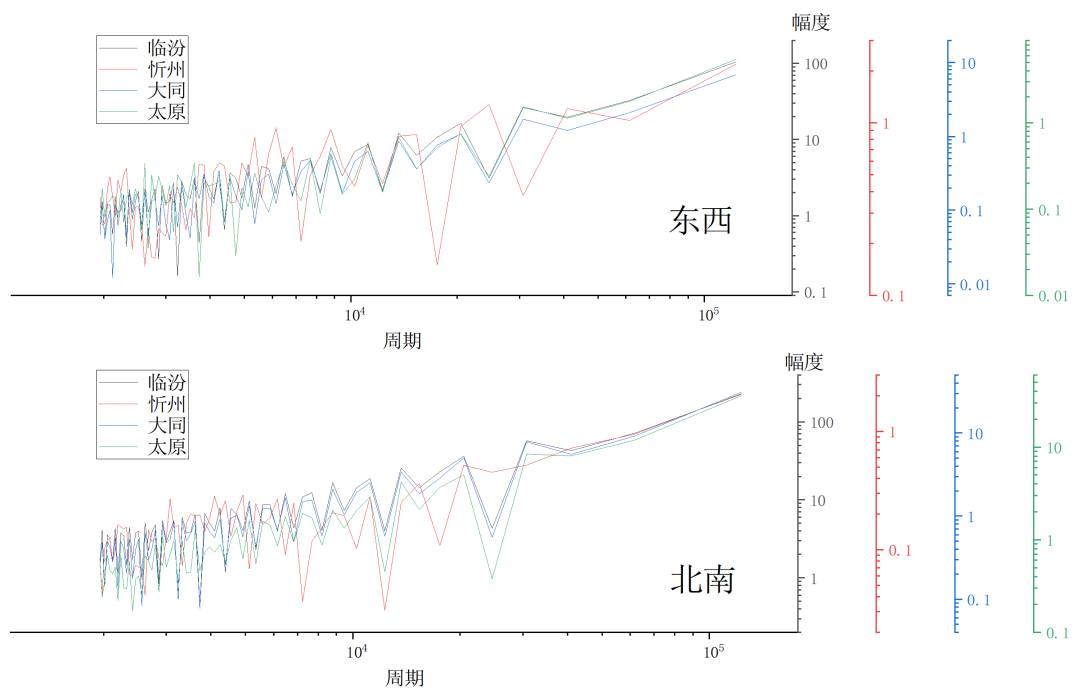


Figure 6. The same coordinate graph of geoelectric field amplitude at different stations
图 6. 不同观测场地的地电场幅值同坐标曲线图

5. 结论与建议

本次研究得出以下结论：

1) 山西四个磁电观测站虽总间隔 600 Km, 但对于本次研究中的磁暴均有明显记录, 地电场与地磁场的记录曲线相似, 当磁暴扰动强度剧烈时, 特别是在磁暴的急始相中, 地磁场、地电场数据可以较清晰地记录到磁暴的变化, H 分量曲线记录尤其清晰, F 分量、Z 分量较为清晰, 地电场数据、地磁场数据次之, 记录形态以较大的数据突变和高频突跳为主。

2) 本次研究中地磁场的一阶差分与地电场的观测值表现出明显的相关性; 同一场地同一磁暴中的地磁场 H 分量一阶差分与地电场东西分量原始值的相关系数、地磁场 D 分量一阶差分与地电场北南分量原始值的相关系数无明显关联。

3) 在地磁场一阶差分与地电场原始值的相关性研究中, 临汾站的相关系数明显低于其他观测场地; 在地磁场幅值与地电场幅值的相关性研究中, 未表现出明显的场地差异。

基金项目

山西太原大陆裂谷动力学国家野外科学观测研究站研究课题(NORSTY20-11); 山西太原大陆裂谷动力学国家野外科学观测研究站研究课题(NORSTY20-08); 山西省地震局科研项目(SBK-2213)。

参考文献

- [1] 乐新安. 中低纬电离层模拟与数据同化研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 中国科学院武汉物理与数学研究所, 2008.
- [2] 马学俊, 何凤霞. 磁暴数据的多尺度分析[J]. 地震地磁观测与研究, 2011, 32(1): 29-32.
- [3] 张彩艳, 雷功明. 甘肃嘉峪关、瓜州地电场日变化与地电暴差异机理分析[J]. 地震工程学报, 2020, 42(3): 671-679.
- [4] 张梓丹. 基于地磁暴的地磁数据与 GIC 的关联机理及规律性研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学机电与信息工程学院, 2020.
- [5] 李云龙. 中低纬电网地磁感应电流影响因素研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2014.
- [6] 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.
- [7] 龚永俭, 程立康. 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.
- [8] 张亮娥, 陈常俊. 山西地磁台阵观测数据评价[J]. 山西地震, 2017(1): 22-25.
- [9] 殷志刚, 宋美萍. 山西地电场弱日变分析[J]. 山西地震, 2010(3): 14-16.
- [10] 范磊, 闫美蓉. 流动地磁通化使用自架日变与 FHD 数据对比分析[J]. 山西地震, 2016(3): 1-5.
- [11] 张聪聪, 冯建琴. 临汾中心地震台地磁 FHD 质子磁力仪运行质量分析[J]. 山西地震, 2019(3): 25-27.
- [12] M. 巴特. 地球物理学中的谱分析[M]. 北京: 地震出版社, 1978.
- [13] 竺可桢. 物理学[M]. 北京: 科学出版社, 1973: 1-3.
- [14] 钱家栋, 林云芳, 等. 地震电磁观测技术[M]. 北京: 地震出版社, 1995.
- [15] 范淑瑞, 王晓峰. 基于最小二乘拟合的地磁场测量误差补偿方法[J]. 探测与控制学报, 2013, 35(4): 40-42.
- [16] 杨云张, 关贞珍. 基于 EMD 和形态滤波算法的地磁测量抗干扰技术研究[J]. 传感技术学报, 2020, 33(2): 173-179.