

磁暴与电离层总电子含量扰动相关关系的统计研究

李义红, 刘代志, 王红霞, 牛超, 王百合

(第二炮兵工程大学 907室, 西安 710025)

摘要: 利用 1996~2004 年中纬度地区的地磁和电离层总电子含量(TEC)数据, 对发生的 119 次磁暴期间电离层 TEC 扰动与地磁扰动的相关关系进行统计研究, 详细分析磁暴期间 TEC 发生扰动的频次以及 TEC 扰动与磁暴发生的先后关系, 不同磁暴强度与 TEC 扰动频次的相关性以及磁暴发生的季节、地方时与 TEC 扰动频次的相关性。结果表明: 有 99.1%的磁暴会伴随发生 TEC 扰动, 其中 TEC 超前扰动占 71.4%, TEC 滞后扰动占 27.7%; 急始磁暴与 TEC 超前扰动的相关性为 80%, TEC 负相扰动与超前扰动的相关性为 100%; 中烈磁暴和强烈磁暴下 TEC 发生扰动的概率为 100%, 磁暴和 TEC 扰动在秋季出现的频次最高, 在春季出现的频次最低; 磁暴次数年变化与 TEC 扰动次数年变化的相关系数为 0.763 2, 日变化相关系数为 0.739 9。

关键词: 磁暴; 电离层 TEC 扰动; 相关性; 统计分析

中图分类号: P318.2; P352 **文献标志码:** A

Statistical study on correlation between geomagnetic storms and ionospheric total electric content disturbance

LI Yi-hong, LIU Dai-zhi, WANG Hong-xia, NIU Chao, WANG Bai-he

(Section 907, The Second Artillery University of Engineering, Xi'an 710025, China)

Abstract: The correlation between ionospheric and geomagnetic variations during the geomagnetic storms was studied statistically. The geomagnetic data and ionospheric total electric content (TEC) data were observed in mid-latitude area from 1996 to 2004. The occurrence rate of TEC disturbance, the time of magnetic storms and TEC disturbance appearing, the correlation between magnetic disturbance intense and TEC disturbance occurrence rate, and the correlations among the seasons and local time (LT) of magnetic disturbance and TEC disturbance were analyzed. The results show that the TEC disturbance occurrence rate during magnetic storms is 99.1%, in which TEC disturbance occurring earlier than magnetic storm is 71.4%, and later than magnetic storm is 27.7%. The correlation coefficient between sudden commencement magnetic storm and leading-forward TEC disturbance is 80%, the correlation coefficient between negative phase TEC disturbance and the leading-forward TEC disturbance is 100%. The occurrence rate of TEC disturbance of middle strong (MS) storms and strong storms is 100%. The occurrence rate of magnetic storms and TEC disturbance is the highest in autumn and the lowest in spring. The annual times correlation coefficient between magnetic storms and TEC disturbance is 0.763 2, and the daily times correlation coefficient is 0.739 9.

Key words: geomagnetic storm; ionospheric TEC disturbance; correlation; statistical analysis

电离层 TEC 是描述电离层形态和结构的重要参量之一, TEC 变化受太阳活动和地磁活动影响较大, 尤其是太阳爆发, 地磁暴发生时, TEC 也会发生扰动,

当 TEC 出现剧烈扰动, 就会发生电离层暴^[1-2]。

磁暴与电离层扰动都是空间环境变化的重要表征量, 它们之间具有一定的相关性, 研究这种相关性也

是军事地球物理学的分枝学科——军事空间天气的重要内容。LUIS 等^[3]分析高纬度地区磁暴和亚暴对电离层 TEC 的影响, 认为磁暴对电离层的影响与经度、纬度及磁暴发生的时间都有关系。SHARMA 等^[4]和 SANJAY 等^[5]研究印度低纬度台站观测的电离层 TEC 对 2005 年 8 月 24 日磁暴的响应, 电离层出现扰动并发生了电离层暴, 且其主相与磁暴主相几乎同时发生, 均滞后于磁暴急始约 3 h 左右。高琴等^[6]针对用 1957~2006 年间 515 个主相单步发展的磁暴事件, 分析东亚扇区 4 个中低纬台站的电离层扰动类型及电离层暴开始时间, 得到该地区电离层暴随纬度、季节和地方时的分布规律。

VIJAYA 等^[7]对两个太阳活动周内中低纬度的磁暴和电离层暴进行了统计分析, ZHAO 等^[8-10]分析超级磁暴期间美洲地区 GPS TEC 的扰动, 统计分析磁暴期间电离层扰动的气候学特性, SZUSZEZCZEWICZ 等^[11]、夏淳亮等^[12]、李强等^[13]、SONG 等^[14]以及 LI^[15-18]等分别研究不同典型磁暴期间电离层 TEC 的扰动变化特点, BALAN 等^[19-20]和 WANG 等^[21]从统计角度和物理机制上对磁暴在不同发展阶段期间的电离层 TEC 扰动特性进行了分析。研究表明, 对于不同磁暴, TEC 变化差异较大, TEC 扰动与地磁扰动的时间对应关系也有较大差异。

本文作者从统计的角度, 分析 1996~2004 年发生的 119 次磁暴期间的电离层 TEC 扰动, 并详细分析磁暴类型与 TEC 扰动类型的相关性。

1 磁暴分类与 TEC 扰动检测

1.1 磁暴分类

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, 具有特殊的变化形态, 按照磁暴的形态特点或者强度大小把磁暴分为不同的类型。

1) 按起始特点磁暴可分为急始型磁暴和缓始型磁暴两种类型。急始型磁暴在磁暴开始时水平分量突然增加, 呈现一种正脉冲变化; 缓始型磁暴在磁暴开始时没有脉冲, 表现为平缓上升。

2) 按强度磁暴可分为中常磁暴、中烈磁暴和强烈磁暴。将表征磁暴扰动强度的 3 h 扰动 K 指数分成 3 类: K 为 5 时为中常磁暴, 记为 M; K 为 6 和 7 时为中烈磁暴, 记为 MS; K 为 8 和 9 时为强烈磁暴, 记为 S。根据北京地磁台的磁暴报告, K 指数和地磁水

平(H)分量的最大扰幅对应关系如表 1 所列。

表 1 K 指数对应的 H 分量扰幅

Table 1 Disturbance magnitude of H component corresponding to K index

K 指数	5	6	7	8	9
地磁(H)分量扰幅/nT	40	70	120	200	300

1.2 TEC 扰动检测

分析磁暴与 TEC 扰动的相关关系, 必须了解磁暴发生期间, TEC 是否也产生了异常扰动、扰动何时发生以及扰动程度有多大, 因此, 需要对 TEC 进行扰动检测, 量化地衡量电离层的扰动程度。扰动指数法是常用的 TEC 扰动检测方法, 其定义式为

$$I(t) = \frac{f(t) - f_m(t)}{f_m(t)}$$

式中: $I(t)$ 为扰动指数, 表征 TEC 的观测值对背景值的偏离; $f(t)$ 为观测值, $f_m(t)$ 为背景值。

本文作者采用滑动中值的方法计算 $f_m(t)$, 将滑动窗口内所有天的 TEC 进行由小到大排序, 取最中央的数值作为检测资料, 由于低于或高于此中位数的数值各占一半, 即使资料中有异常值, 只要异常值不超过一半, 中位数就不受影响。本研究选择的滑动窗口为 27 d, 原因有二, 一是 27 d 与一个太阳旋转周期长度一样; 二是可以避免月中值在月初和月末时出现大的、不真实的扰动效应^[6]。

当 $I > 0.15$ 或 $I < -0.15$ 且持续时间在 4 h 以上, 定义为发生扰动。为了分析磁暴与不同 TEC 扰动的相关性, 对 TEC 扰动进行了如下分类:

1) 按照 TEC 扰动正负, 在一次扰动事件中, I 为正的扰动称为正相扰动, I 为负的扰动称为负相扰动, I 正负值都出现的扰动称为正负相扰动。

2) 按照 TEC 扰动强度, 采用王世凯等^[22]对电离层暴的等级划分标准, 如表 2 所列。

3) 按照 TEC 扰动与磁暴开始时间的先后关系,

表 2 电离层暴的等级划分标准

Table 2 Grading standard of ionosphere storm

类型	正相扰动	负相扰动
小型暴	0.15~0.50	-0.40~-0.15
中型暴	0.51~0.80	-0.60~-0.41
大型暴	0.81~1.00	-0.80~-0.61
特大型暴	≥ 1.00	≤ -0.81

将先于磁暴的 TEC 扰动称为超前扰动, 后于磁暴的 TEC 扰动称为滞后扰动。

2 研究数据

在本研究中, 利用 1996~2004 年 120°E 子午链上中纬度地区的地磁和电离层 TEC 数据, 对磁暴期间电离层 TEC 扰动与地磁扰动的相关关系进行统计研究。

地磁数据和磁暴报告来自于北京地磁台(40°02'22"N, 116°10'30"E), 根据北京地磁台的磁暴报告, 1996~2004 年共发生了 119 次磁暴, 经统计, 各类磁暴出现频次分别为急始型 90, 缓始型 29, M 型 28, MS 型 75, S 型 16。

TEC 数据来自于中科院地质与地球物理研究所在 120°E 子午链上的 TEC 监测台站实测数据的归算值(纬度分辨率为 2.5°, 时间分辨率为 1 min), 本研究主要选取距离北京地磁台最近位置上(40°N, 120°E)的 TEC 时间序列作为研究对象。

3 磁暴与 TEC 扰动统计相关性分析

3.1 磁暴期间 TEC 是否扰动统计

在本研究中, 所指的磁暴期间的电离层扰动是磁暴发生的前后 3 d 时间内, 电离层 TEC 的扰动指数 $DI > 0.15$ 或 $DI < -0.15$ 且持续时间在 4 h 以上。统计结果表明, TEC 发生扰动的有 118 次, 所占比率为 99.1%, 其中仅有 1 次没有出现扰动, 正相扰动频次有 37 次, 负相扰动频次有 18 次, 正负相扰动频次有 63 次, 所占比例如表 3 所列。可见 TEC 扰动会伴随磁暴而出现, 而且正相扰动比负相扰动出现的频次高, 大部分情况下正负扰动均出现。

表 3 119 次磁暴期间 TEC 正相、负相扰动频次

Table 3 Disturbance occurrence frequency of TEC positive and negative phases during 119 geomagnetic storms

扰动类型	扰动频次	百分比/%
正相扰动	37	31.1
负相扰动	18	15.1
正负相扰动	63	52.9
无扰动	1	0.9

3.2 TEC 扰动与磁暴发生的时间先后关系

在 119 次磁暴期间有 118 次出现 TEC 扰动, 其中

超前扰动有 85 次, 占 71.4%; 滞后扰动频次有 33 次, 占 27.7%。

1) TEC 扰动先后与扰动正负的关系

85 次 TEC 超前扰动中, 正相扰动频次有 22 次, 负相扰动频次有 18 次, 正负相扰动频次有 45 次。

33 次 TEC 滞后扰动中, 正相扰动频次有 15 次, 负相扰动频次有 0 次, 正负相扰动频次有 18 次。

扰动时间先后与 TEC 扰动正负相的关系表 4 所列。由表 4 可以看出, 超前扰动在正相、负相和正负相扰动中所占的比率分别为 59.5%、100%和 71.43%, 即所有负相扰动均为超前扰动。

表 4 扰动时间与 TEC 正负相扰动频次的关系

Table 4 Relationship of disturbance time and disturbance occurrence frequency of TEC positive and negative phases

扰动类型	正相扰动	负相扰动	正负相扰动
超前扰动	22	18	45
滞后扰动	15	0	18
总计	37	18	63

2) TEC 扰动先后与磁暴起始类型的关系

85 次 TEC 超前扰动中, 有 68 次磁暴为急始, 缓始为 17 次; 急始与超前的相关性为 80%, 与滞后的相关性为 66.67%。

33 次 TEC 滞后扰动中, 有 22 次磁暴为急始, 缓始为 11 次; 缓始与超前的相关性为 20%, 与滞后的相关性为 33.33%。

可见, 急始型磁暴与 TEC 超前扰动的相关性最强。

3) TEC 扰动最大值时间与磁暴最大扰幅时间先后关系

在 118 次 TEC 扰动中, TEC 扰动最大值时间超前于磁暴最大扰幅时间的频次为 23, 比率为 19.33%; TEC 扰动最大值时间滞后于磁暴最大扰幅时间的频次为 95, 比率为 79.83%。

3.3 磁暴强度与 TEC 扰动的相关性分析

1996~2004 年发生的 119 次磁暴中 M 型磁暴有 29 次, MS 型磁暴有 75 次, S 型磁暴有 16 次。

在磁暴期间发生的 TEC 扰动中, TEC 小型暴 26 次, TEC 中型暴 55 次, TEC 大型暴 12 次, TEC 特大型暴 24 次。

对不同磁暴强度下 TEC 扰动的频次和百分比进行统计, 分别如表 5 和图 1 所示。中常磁暴频次 28, TEC 扰动发生频次 27, 相关程度 96.43%; 中烈磁暴

表 5 不同强度磁暴下各类 TEC 扰动的频次统计

Table 5 TEC disturbance occurrence frequency statistic during geomagnetic storms with different intense

磁暴强度	TEC 扰动强度				TEC 扰动正负相			TEC 扰动先后	
	小型暴	中型暴	大型暴	特大型暴	正相	负相	正负相	超前	滞后
中常 M, 28	7	11	4	5	11	6	11	18	9
中烈 MS, 75	15	37	8	14	22	10	42	54	21
强烈 S, 16	4	7	0	4	4	2	10	13	3
总计	26	55	12	23	37	18	63	85	33

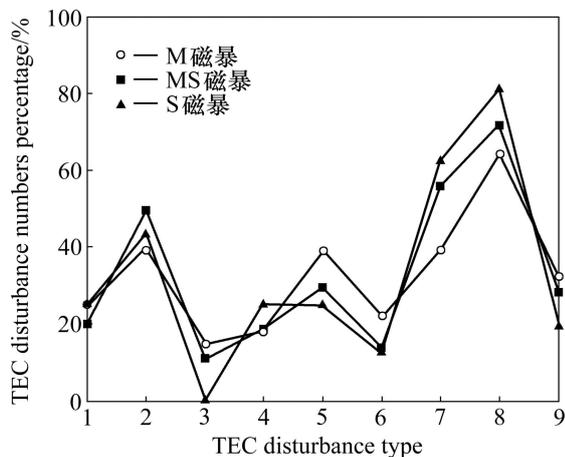


图 1 不同磁暴强度对应 TEC 扰动的频次百分比(横坐标中: 1—TEC 小型暴, 2—TEC 中型暴, 3—TEC 大型暴, 4—TEC 特大型暴, 5—TEC 正相扰动, 6—TEC 负相扰动, 7—TEC 正负相扰动, 8—TEC 超前扰动, 9—TEC 滞后扰动)

Fig. 1 TEC disturbance occurrence frequency percentage out of geomagnetic storms with different intense (Horizontal axis: 1—TEC small storm; 2—TEC median storm; 3—TEC strong storm; 4—TEC severe strong storm; 5—TEC positive phase storm; 6—TEC negative phase storm; 7—TEC positive phase and negative phase storm; 8—TEC time leading-forward storm; 9—TEC time lag storm)

频次 75, TEC 扰动发生频次 75, 相关程度 100%; 强烈磁暴频次 16, TEC 扰动发生频次 16, 相关程度 100%。

从图 1 可得出以下结论。

- 1) 3 类磁暴下, TEC 小型暴发生比率相当, 在 20% 左右;
- 2) S 型磁暴下, TEC 大型暴出现的比率最低, 为 0; 而 TEC 特大型暴出现的比率最高, 为 25%;
- 3) M 型磁暴下, TEC 正相和负相扰动比率较高, 而正负相扰动最低, 为 39.29%;
- 4) S 型磁暴下, TEC 正相和负相扰动比率较低, 而正负相扰动最高, 为 62.5%;

5) M 型磁暴下, TEC 超前扰动比率最低, 为 64.29%, 而滞后扰动最高, 为 32.14%;

6) S 型磁暴下, TEC 超前扰动比率最高, 为 81.25%; 而滞后扰动最低, 为 18.75%;

7) MS 型磁暴下, TEC 小型暴的比率最低, 为 20%; 而 TEC 中型暴的比率最高, 为 49.33%。

3.4 磁暴发生的季节与 TEC 扰动的关系

将季节所对应的月份进行如下划分: 春季为 2、3、4 月, 夏季为 5、6、7 月, 秋季为 8、9、10 月, 冬季为 11、12、1 月。

3.4.1 不同类型磁暴次数随季节变化

统计不同类型的磁暴次数年变化, 得到磁暴次数的年变化曲线如图 2 所示。

对统计结果分析可得以下结论。

- 1) 急始型、MS 型和 S 型磁暴次数的年变化曲线趋势与磁暴总数的年变化曲线趋势一致, 在 4 月和 11 月为峰值期; 2 月、6 月和 12 月为谷值期;
- 2) 缓始型磁暴次数在 5 月和 9 月为谷值期, 而在 7 月为峰值期;
- 3) M 型磁暴次数在 4 月和 9 月为峰值期, 而在 11 月为谷值期。

按季节进行统计, 得到的结果如表 6 所列。由表 6 可见, 各类磁暴在秋季出现的频次最高; 急始型磁暴在春季、夏季和冬季出现频次相当; 缓始型和 M 型磁暴在冬季出现频次最低; MS 型磁暴在秋季和冬季出现频次最高, 在春季出现频次最低; S 型磁暴在春季和冬季出现频次最低。

3.4.2 不同类型 TEC 扰动次数随季节变化

统计不同类型的 TEC 扰动次数年变化, 得到 TEC 扰动次数的年变化曲线如图 3 所示。

对统计结果分析可得:

- 1) 正相、负相和正负相扰动与 TEC 扰动总次数的年变化曲线趋势一致, 在 4 月和 11 月为峰值期; 2 月、6 月和 12 月为谷值期。

2) TEC 超前扰动次数在 4 月和 11 月为峰值期, 而在 3 月和 12 月为谷值期。
 3) TEC 滞后扰动次数在 9 月为峰值期, 而在 1 月

和 8 月为谷值期。

按季节进行统计, 得到的结果如表 7 所列。由表 7 可见, 各类 TEC 扰动在秋季出现的频次最高; 正相

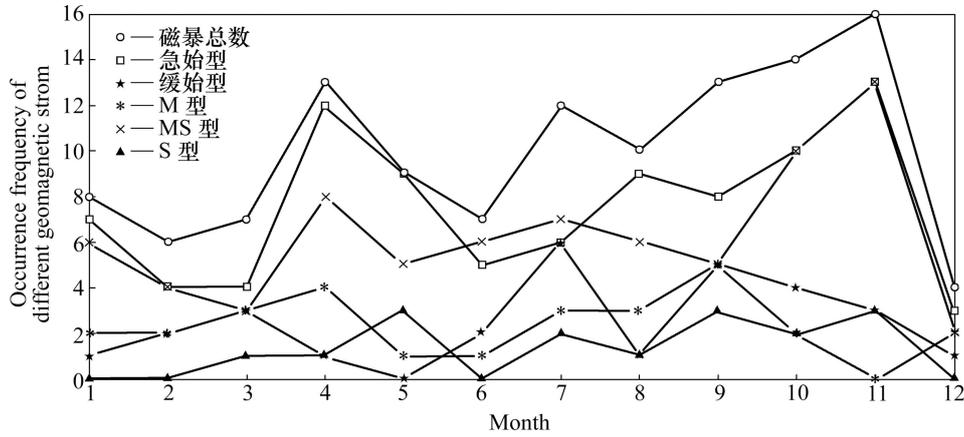


图 2 不同类型磁暴次数的年变化曲线

Fig. 2 Annual variations of geomagnetic storms number with different types

表 6 各类磁暴的季节频次统计

Table 6 Occurrence frequency statistic of geomagnetic storms in different seasons

季节	急始磁暴	缓始磁暴	磁暴总数	季节	M 磁暴	MS 磁暴	S 磁暴	磁暴总数
春季	20	6	26	春季	9	15	2	26
夏季	20	8	28	夏季	5	18	5	28
秋季	27	10	37	秋季	10	21	6	37
冬季	23	5	28	冬季	4	21	3	28

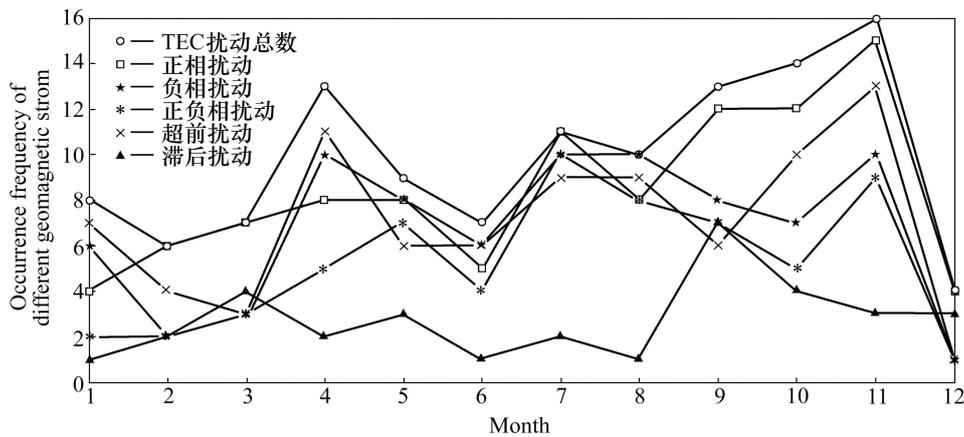


图 3 不同类型 TEC 扰动次数的年变化曲线

Fig. 3 Annual variations of TEC disturbance number with different types

表 7 各类 TEC 扰动的季节频次统计

Table 7 Occurrence frequency statistic of different types TEC disturbance in different seasons

季节	正相扰动	负相扰动	TEC 扰动总数	正负相扰动	季节	超前扰动	滞后扰动	TEC 扰动总数
春季	11	5	26	10	春季	18	8	26
夏季	3	3	27	21	夏季	21	6	27
秋季	12	5	37	20	秋季	25	12	37
冬季	11	5	28	12	冬季	21	7	28

扰动在春季、秋季和冬季出现频次相当, 在夏季出现频次最低; 负相扰动在四季出现频次相当; 正负相扰动在春季和冬季频次低, 而在夏季和秋季出现频次高; 超前扰动在春季出现频次最低, 在夏季和秋季出现频次相当; 滞后扰动在春季、夏季和冬季出现频次相当。

3.4.3 磁暴扰动次数年变化与 TEC 扰动次数年变化的相关性分析

按季节对各类磁暴和 TEC 扰动出现频次进行相关性分析, 统计结果如表 8 所列。由表 8 可见, 夏季相关性最弱; 春季、秋季和冬季的季节相关性都较强, 达到 0.9 以上。

磁暴扰动次数年变化与 TEC 扰动次数年变化的相关系数为 0.7632, 相关系数大于 0.8 的各类磁暴和各类 TEC 扰动如表 9 所列。

表 8 磁暴和 TEC 扰动出现频次的季节相关性

Table 8 Season correlation between geomagnetic storms and TEC disturbance

季节	春季	夏季	秋季	冬季
相关系数	0.941 5	0.622 5	0.920 9	0.924 7

表 9 年变化相关系数大于 0.8 的各类磁暴和各类 TEC 扰动对应表

Table 9 Correspondence table of different types of geomagnetic storms and TEC disturbance with annual variation correlation coefficient over 0.8

磁暴类型	TEC 扰动类型	相关系数	磁暴类型	TEC 扰动类型	相关系数
磁暴总数	TEC 扰动总数	0.996 9	急始型磁暴	TEC 正相扰动	0.888 5
磁暴总数	TEC 正相扰动	0.906 2	急始型磁暴	TEC 负相扰动	0.808 7
磁暴总数	TEC 超前扰动	0.889 1	MS 型磁暴	TEC 超前扰动	0.933 4
磁暴总数	TEC 负相扰动	0.818 9	MS 型磁暴	TEC 扰动总数	0.864 8
急始型磁暴	TEC 超前扰动	0.893 8	S 型磁暴	TEC 正相扰动	0.858 4

3.5 磁暴发生地方时与 TEC 扰动的关系

3.5.1 不同类型磁暴次数随地方时变化统计

不同类型的磁暴次数日变化, 得到磁暴次数的日变化曲线如图 4 所示。

对统计结果分析可得:

1) 急始型、缓始型、M 型和 MS 型磁暴次数的日变化曲线趋势与磁暴总数的日变化曲线趋势一致, 在地方时(LT)1: 00~3:00, 8:00~10:00, 12:00~14:00, 17:00~ 19:00 为峰值期; 在 4:00~8:00 和 10:00~12:00, 20:00~ 21:00 为谷值期。

2) S 型磁暴在地方时(LT)3:00~5:00, 10:00~13:00 发生次数为 0, 为禁期。

3.5.2 不同类型 TEC 扰动次数随地方时变化

统计不同类型的 TEC 扰动次数的日变化, 得到 TEC 扰动次数的日变化曲线如图 5 所示。

对统计结果分析可得:

1) TEC 正相扰动、负相扰动、正负相扰动和超前扰动次数的日变化曲线趋势与 TEC 扰动总数的日变化曲线趋势一致, 在 LT1:00~3:00, 8:00~10:00, 12:00~14:00, 17:00~19:00 为峰值期; 在 4:00~8:00, 10:00~12:00, 14:00~15:00, 20:00~21:00 为谷值期。

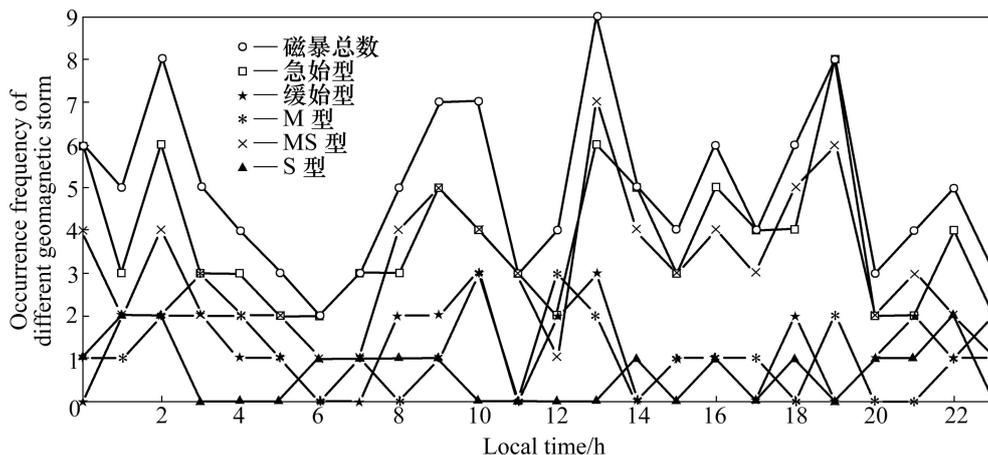


图 4 不同类型磁暴次数的日变化曲线

Fig. 4 Daily variation curves of geomagnetic storms number with different types

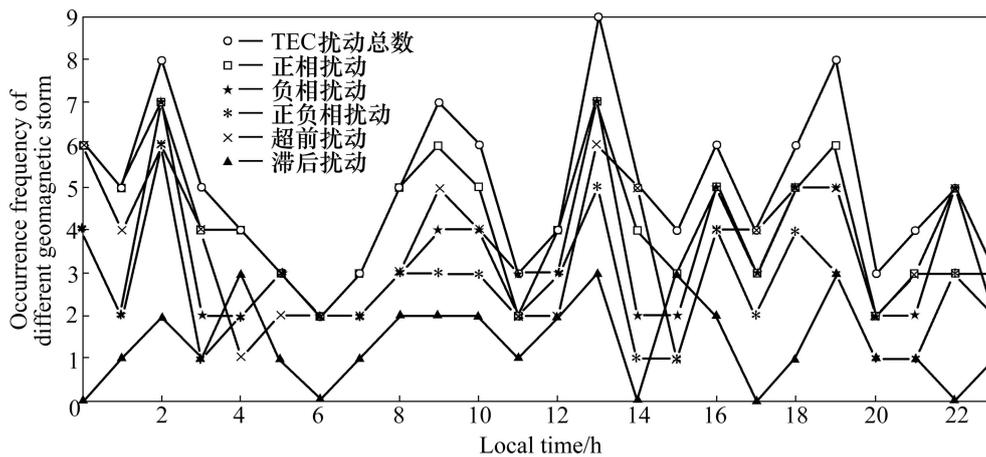


图5 不同类型 TEC 扰动次数的日变化曲线

Fig. 5 Daily variations of TEC disturbance number with different types

2) TEC 滞后扰动在 LT2:00~4:00, 8:00~10:00, 13:00, 15:00, 18:00~20:00 发生次数为峰值期; 在 6:00, 14:00, 17:00 为禁期。

3.5.3 磁暴次数日变化与 TEC 扰动次数日变化的相关性分析

磁暴次数日变化与 TEC 扰动次数日变化的相关系数为 0.739 9。相关系数大于 0.85 的所有磁暴类型与所有 TEC 扰动类型对应关系如表 10 所列。

表 10 日变化相关系数大于 0.85 的各类磁暴和各类 TEC 扰动对应表

Table 10 Correspondence table of different types of geomagnetic storms and TEC disturbance with daily variation correlation coefficient over 0.85

磁暴类型	TEC 扰动类型	相关系数
磁暴总数	TEC 扰动总数	0.994 0
磁暴总数	TEC 正相扰动	0.927 2
急始型磁暴	TEC 正相扰动	0.863 7
MS 型磁暴	TEC 扰动总数	0.859 1

4 结论

1) 伴随磁暴发生, TEC 出现扰动的比率为 99% 以上, 且正相扰动比负相扰动出现的比率高, 大部分情况下正负扰动均出现, TEC 扰动超前于磁暴的比率较滞后于磁暴的比率高。TEC 最大值出现时间滞后于磁暴最大扰幅出现时间的可能性较大。

2) TEC 超前扰动与磁暴急始相关性高, TEC 滞后扰动与磁暴缓始相关性高。

3) 不同强度的磁暴与 TEC 扰动的相关性存在较大差异。

4) 各类磁暴和 TEC 扰动均在秋季出现的频次最高, 在其他季节的频次规律有差异。磁暴与 TEC 扰动次数的年变化相关性和日变化相关性都大于 0.7, 出现峰值和谷值的时间具有较大的相似性。

5) 分别统计出年变化次数、日变化次数的相关系数大于 0.8 的不同类型的磁暴与 TEC 扰动的对应关系。

REFERENCES

- [1] HARGREAVES J K. The solar-terrestrial environment [M]. London: Cambridge University Press, 1992.
- [2] MENDELO M. Storms in the ionosphere: Patterns and processes for total electron content [M]. America: Rev Geophys, 2006.
- [3] LUIS G M, JUAN I S, MARIA A V Z, AMALIA M, CLAUDIO B. Determination of a geomagnetic storm and substorm effects on the ionospheric variability from GPS observations at high latitudes [J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2007, 69(8): 955-968.
- [4] SHWETA S, GALAV P, DASHORA N, DABAS R S, PANDEY R. Study of ionospheric TEC during space weather event of 24 August 2005 at two different longitudes [J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2012, 75: 133-140.
- [5] SANJAY K, SINGH A K. GPS derived ionospheric TEC response to geomagnetic storm on 24 August 2005 at Indian low latitude stations [J]. Advances in Space Research, 2011, 47(4): 710-717.
- [6] 高 琴, 刘立波, 赵必强, 万卫星, 张满莲, 宁百齐. 东亚扇区中低纬地区电离层暴的统计分析[J]. 地球物理学报, 2008, 51(3): 626-634.

- GAO Qin, LIU Li-bo, ZHAO Bi-qiang, WAN Wei-xing, ZHANG Man-lian, NING Bai-qi. Statistical study of the storm effects in middle and low latitude ionosphere in the East Asian sector [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 51(3): 626–634.
- [7] LEKSHMI D V, BALAN N, RAM S T, LIU J Y. Statistics of geomagnetic storms and ionospheric storms at low and mid latitudes in two solar cycles [J]. J Geophys Res, 2011, 116(A11): A11328.
- [8] ZHAO B, WAN W, LIU L. Responses of equatorial anomaly to the October–November 2003 superstorms [J]. Ann Geophys, 2005, 23: 693–706.
- [9] ZHAO B, WAN W. Ionosphere disturbances observed throughout Southeast Asia of the superstorm of 20–22 November 2003 [J]. J Geophys Res, 2008, 113: A00A04.
- [10] ZHAO B, WAN W, LIU L, MAO T. Morphology in the total electron content under geomagnetic disturbed conditions: Results from global ionosphere maps [J]. Ann Geophys, 2007, 25: 1555–1568.
- [11] SZUSZCZEWICZ E P, LESTER M, WILKISON P, BLANCHARD P, ABDU M, HANBABA R, IGARASHI K, PULINETS S, REDDY B M. A comparative study of global ionospheric responses to intense magnetic storm conditions [J]. J Geophys Res, 1998, 103: 11665–11684.
- [12] 夏淳亮, 万卫星, 袁洪, 赵必强, 丁锋. 2000年7月和2003年10月大磁暴期间东亚地区中低纬电离层的GPSTEC的响应研究[J]. 空间科学学报, 2005, 25(4): 259–266.
- XIA Chun-liang, WAN Wei-xing, YUAN Hong, ZHAO Bi-qiang, DING Feng. Analysis of the intense magnetic-storm of July, 2000 and of October, 2003 using the technique for now casting of GPS TEC data [J]. Chinese Journal of Space Science, 2005, 25(4): 259–268.
- [13] 李强, 张东和, 覃健生, 谢世标, 赵迎新, 叶锦凤, 莫晓华, 肖佐. 2004年11月一次磁暴期间全球电离层TEC扰动分析[J]. 空间科学学报, 2006, 26(4): 440–446.
- LI Qiang, ZHANG Dong-he, QIN Jian-sheng, XIE Shi-biao, ZHAO Ying-xin, YE Jin-feng, MO Xiao-hua, XIAO Zuo. Analysis of ionospheric TEC disturbance during the magnetic storm in Nov. 2004 [J]. Chinese Journal of Space Science, 2006, 26(6): 440–444.
- [14] SONG Q, DING F, WAN W, NING B, LIU L. Global propagation features of large-scale traveling ionospheric disturbances during the magnetic storm of November 7–10, 2004 [J]. Ann Geophys, 2012, 30: 683–694.
- [15] LI G, NING B, ZHAO B, LIU L, WAN W, DING F, XU J S, LIU J Y, YUMOTO K. Characterizing the 10 November 2004 storm-time middle-latitude plasma bubble event in Southeast Asia using multi-instrument observations [J]. J Geophys Res, 2009, 114(A7): A07304.
- [16] LI G, NING B, HU L, LIU L, YUE X, WAN W, ZHAO B, IGARASHI K, KUBOTA M, OTSUKA Y, XU J S, LIU J Y. Longitudinal development of low-latitude ionospheric irregularities during the geomagnetic storms of July 2004 [J]. J Geophys Res, 2010, 115: A04304.
- [17] LI G, NING B, LIU L, WAN W, LIU J Y. Effect of magnetic activity on plasma bubbles over equatorial and low-latitude regions in East Asia [J]. Annales Geophysicae, 2009, 27: 303–312.
- [18] LI G, NING B, ZHAO B, LIU L, LIU J Y, YUMOTO K. Effects of geomagnetic storm on GPS ionospheric scintillations at Sanya [J]. J Atmos Sol Terr Phys, 2008, 70(7): 1034–1045.
- [19] BALAN N, SHIOKAWA K, OTSUKA Y, KIKUCHI T, VIJAYA D L, KAWAMURA S, YAMAMOTO M, BAILEY G J. A physical mechanism of positive ionospheric storms at low latitudes and midlatitudes [J]. J Geophys Res, 2010, 115: A02304.
- [20] BALAN N, OTSUKA Y, NISHIOKA M, LIU J Y, BAILEY G J. Physical mechanisms of the ionospheric storms at equatorial and higher latitudes during the recovery phase of geomagnetic storms [J]. J Geophys Res Space Physics, 2013, 118: 2660–2669.
- [21] WANG W, LEI J, BURNS A G, SOLOMON S C, WILTBERGER M, XU J, ZHANG Y, PAXTON L, COSTER A. Ionospheric response to the initial phase of geomagnetic storms: Common features [J]. J Geophys Res, 2010, 115(A7): A07321.
- [22] 王世凯, 柳文, 鲁转侠, 郭延波, 孔庆颜, 冯静. 电离层暴时经验模型 STORM 在中国区域的适应性研究[J]. 空间科学学报, 2010, 30(1): 132–140.
- WANG Shi-kai, LIU Wen, LU Zhuan-xia, GUO Yan-bo, KONG Qin-yan, FENG Jing. Study on the adaptability of the empirical storm-time ionospheric correction model STORM in China region [J]. Chinese Journal of Space Science, 2010, 30(1): 132–140.

(编辑 李艳红)