

台风期间电离层 TEC 的扰动响应分析

陈焯^{1,2} 杜亚军^{1,3} 程国生¹

摘要

针对台风期间的电离层的扰动,利用1996—2004年在福建登陆的台风事件,选择电离层电子总含量(TEC)为对象进行研究,再选择参考点为同纬度不同经度地区的TEC为对照,分析两地TEC差值情况,以及台风期间两者的扰动响应.结果表明:在台风风速达到极值的时段内,部分区域内TEC会出现类似锯齿状的扰动,在之后一段时间内消亡;在风速逐渐趋于极值到极值消失的时段内,风速与TEC日平均值之间存在较强的负相关关系.

关键词

电离层电子总含量;台风;电离层扰动

中图分类号 P42

文献标志码 A

收稿日期 2011-05-17

资助项目 国家自然科学基金(10804053)

作者简介

陈焯,男,硕士生,主要从事空间天气学方面的研究. cy_js@yahoo.com.cn

程国生(通信作者),男,教授,主要研究空间天气学. gs_cheng6991@sina.com

1 南京信息工程大学 物理与光电工程学院, 南京,210044

2 河北省大城县气象局,廊坊,065900

3 湖南省岳阳市气象局,岳阳,430600

0 引言

早期的大量研究表明电离层与中低层大气之间存在耦合机制,自1960年Hines^[1]首先提出重力波对研究高层大气的重要意义以来,人们通过理论、观测实验及数值模拟等手段对其进行了广泛研究.文献[2-4]研究发现,台风、寒潮、特大暴雨等都在不同程度上影响着电离层.此外有学者认为,低层大气气象活动有可能通过大气环流来影响电离层. Bauer^[5]在其研究中提出,如果中低层大气之间存在某种耦合辐散模型和动力学耦合,那么低层大气气象活动的耦合辐散运动就可能上传到中间层甚至电离层高度,通过抬升湍流层顶或改变局地环流、风场结构和气体成分比来影响电离层的状态.

台风这种激烈的对流层天气,其在低层大气中激起的扰动可以向上传播并影响电离层. Huang等^[6]使用高频多普勒频移的方法探测台风引起的声重力波,结果表明可以用高频多普勒探测阵探测由台风引起的声重力波,但是可探测性不高.刘依谋等^[7]结合北京大学高频多普勒台站多年来的一些典型资料,针对几次台风登陆事件的高频多普勒资料及相关的台风资料进行了分析.结果表明,台风过境期间,电离层中出现明显的波状扰动,波逐渐由高频向较低频率过渡,形成中尺度的电离层行扰(TIDs),并在夜晚激发了电离层中的不规则结构.这些研究表明在台风期间电离层受到明显的扰动,为了进一步研究台风对电离层的影响情况,分析这期间的电离层变化,本文着重分析了福建地区1996—2004年期间的台风天气与电离层电子总含量(Total Electron Content, TEC)之间的变化关系,并对分析结果进行了讨论.

1 资料选择

1.1 台风数据

台风事件选自气象出版社出版的《热带气旋年鉴》(1996—2004年),根据中国气象局采用国际标准,将中心最大风速大于32.6 m/s定义为台风,相当于风力12级.经过数据的筛选,在此期间在福建登陆的台风共6次(表1).

1.2 TEC数据

电离层电子总含量是表征电离层的重要参量,可以反映外部事件对电离层造成的影响. TEC(表示每 m^2 上从电离层底部到顶部的电子数浓度,记其量值为 C_{TE} ,单位TECU)与F2层临界频率 f_{or2} 的关系为^[8-10]:

表 1 事件特征

Table 1 Basic information of typhoon events

台风事件	起止日期	最大风速极值/ (m/s)	登陆地点	风速极值/ (m/s)
9607	1996年7月21—28日	40	福建晋江	20
9608	1996年7月23—8月4日	55	福建福清	33
9914	1999年10月3—10日	40	福建龙海	35
0010	2000年8月18—26日	55	福建晋江	38
0102	2001年6月20—25日	40	福建福清	35
0418	2004年8月18—27日	40	福建石狮	35

注:9607号事件虽然风速极值为20,但是在福建登陆期间其风速最大值超过32.6 m/s. 风速极值是在福建期间的风速最大值,最大风速极值是在此台风整个过程中的最大值.

$$C_{TE} = 4.13 \times 1.24 \times 10^{10} \times H_0 \times (f_{0F2}),$$

其中 H_0 是 O 原子的标高. 因此 f_{0F2} 与 TEC 之间存在同步变化.

本文采用中国区域的 25 个观测站获取 TEC 观测数据,根据经验正交函数(EOF)建立电离层经验模式,并采用一种电离层 TEC 算法^[11],对观测数据进行 Matlab 数据分析与插值计算,将中国区域(70~140°E,0°~60°N)划分成 2.5°×2.5°的网格,以 30 min 的时间间隔,得到各个网格点上的分时 TEC 数据(<http://geospace.geodata.cn>),见表 2.

太阳活动、地磁扰动是 TEC 起伏指数 σ_{GDEC} 的主要影响因素,太阳活动的起伏变化会直接影响电离层离子产生率,造成电离层 TEC 的相应变化.当地磁活动比较强时,地球磁层的高能粒子在高纬注入高层大气,能量的增加改变高层大气的温度,并进一步引起大气环流的变化以及固定高度大气密度的变化,影响电离层离子的产生率、损失率.此外大气环流等也会影响电离层 TEC 的起伏变化^[12].为考查地磁扰动情况,从考查的结果来看,除 0418 号事件未能找到 Kp 指数,其余期间地磁均处于相对平静时期.在表 3 中同时给出风速最大时期内的平均 Kp 指数.

表 2 TEC 数据采集选择地点

Table 2 Collection area of TEC data during typhoon events

台风事件	发生地点	TEC 采集地点	风速达到极值时段
9607	(132.2°E,11.8°N)	(120°E,20°N)	1996年7月25日14时—7月26日8时
9608	(154°E,15.5°N)	(127.5°E,20°N)	1996年7月30日14时—7月31日20时
9914	(131.5°E,17°N)	(117.5°E,20°N)	1999年10月5日2时—10月6日2时, 1999年10月7日14时—10月9日8时
0010	(137°E,11.5°N)	(120°E,20°N)	2000年8月21日8时—8月23日8时
0102	(136.4°E,11.9°N)	(120°E,20°N)	2001年6月23日2时—14时
0418	(142°E,9.7°N)	(125°E,25°N)	2004年8月23日20时—8月25日20时

表 3 Kp 指数

Table 3 Kp index during typhoon events

台风事件	中心风速达到最大日期	平均 Kp 指数
9607	1996年7月25,26日	1.30
9608	1996年7月30,31日	2.33
9914	1999年10月5,6,7,8,9日	1.21
0010	2000年8月21,22,23日	1.48
0102	2001年6月23日	1.38
0418	2004年8月23,24,25日	—

注:2001年6月23日发生太阳耀斑,耀斑等级为1.2级,持续时间为0.15 h^[13].

2 数据分析

根据台风发生日为基准,向后推延 8 d,选择 TEC 数据.本文将各个事件的 TEC 取日平均值,横坐标为事件时段,纵坐标为 TEC 日均值,结果如图 1 所示.

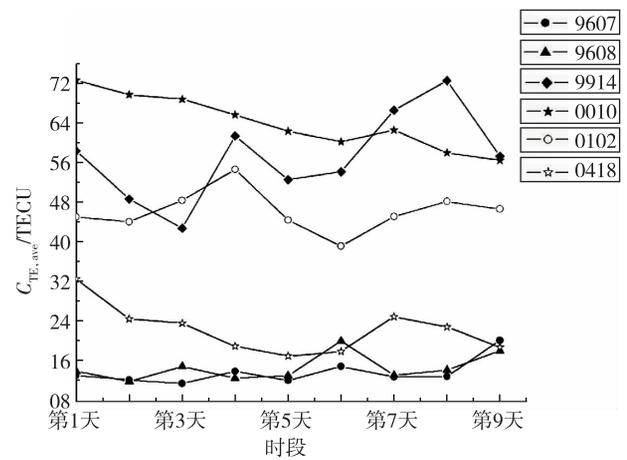


图 1 各事件 TEC 日平均值

Fig. 1 Daily average TEC variation during typhoon events

从图 1 中发现每个台风事件都会表现出类似“锯齿峰”的形状,但出现的时段却不相同.另外,从

早期沈长寿^[3]研究台风登陆前后 f_{0F2} 的变化中发现台风登陆前后 f_{0F2} 的变化虽然具有一定的规律^[3],但是 Δf_{0F2} 的浮动是较小的,这说明在台风期间电离层的扰动是有范围的,而且这种扰动幅度并不是很大,再加上TEC本身也具有一定的变化规律^[4],因此为了更准确地分析图1中锯齿产生的时段,将TEC数据做进一步处理.

采集 $100^{\circ}\text{E}, 20^{\circ}\text{N}$ 地区的TEC数据分别与9607号,9608号,9914号,0010号,0102号的TEC做比较,并求得日平均值;采集 $100^{\circ}\text{E}, 25^{\circ}\text{N}$ 地区的TEC数据与0418号台风的TEC做比较,并求得差值的日平均值,将所得的结果进行分析,从而得到差值后的数据图2.

2.1 结果分析

用以上方法处理后,在台风风速渐渐趋于最大值时,9607号事件的第5天到第6天,9608号事件的第7天到第8天,9914的第3天到第4天,第5天到第7天,0010号事件的第4天到第5天,0102号

事件的第5到第6天,0418号事件的第7到第8天,TEC所表现的“锯齿状”更加明显(除9914号台风有2段区域).那么不管是因为声重力波的激发,还是某种动力学耦合,抑或由于中低层大气之间存在某种辐合辐散,中低层大气与高层之间确实存在一定的关系,而且在剧烈天气系统的影响下更为明显,并且这种影响会有延时.

9914号台风从产生到消亡这段时间内有两次风速极值,第1次是10月5日2时—10月6日2时,第2次是10月7日14时—10月9日8时,第1次达到极值是 $122.4^{\circ}\text{E}, 18.2^{\circ}\text{N}$;第2次是 $118.2^{\circ}\text{E}, 20.7^{\circ}\text{N}$.由于采集点的限制,选择的TEC数据参考点是 $117.5^{\circ}\text{E}, 20^{\circ}\text{N}$,参考点与发生点相差较大,可能会造成误差.另外该台风10月5日达到的极值和10月7日达到的极值相同(40 m/s),在此期间风速维持 35 m/s ,因此可能对TEC的影响已经产生,并在渐渐消亡.

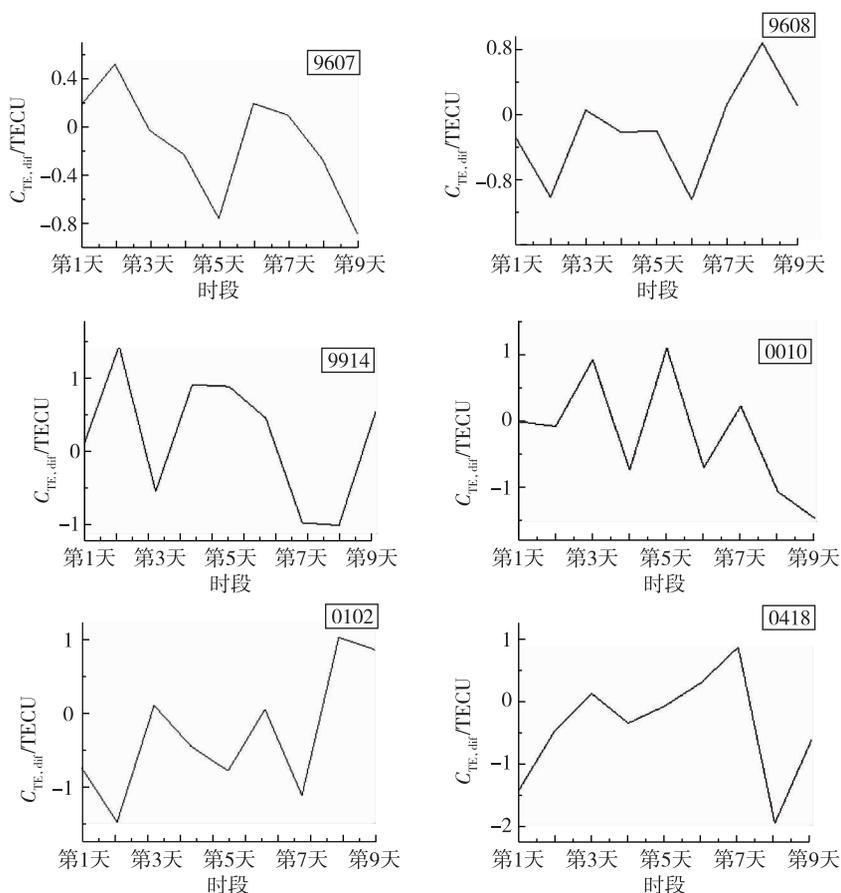


图2 差值后的TEC日均值

Fig. 2 The difference TEC value variation during typhoon events

为了验证这种类似锯齿的变化情况会反应在实际日平均 TEC 上, 将 TEC 日平均值与差值后的值进行比较分析. 图 3 及图 4 分别是 9607 号事件与 9608 号事件的比较. 在图 3、4 中标记区域明显表现出 TEC 日均值与差值后的均值, 在台风风速逐渐趋向于最大值这段时间内, 具有相同的变化趋势.

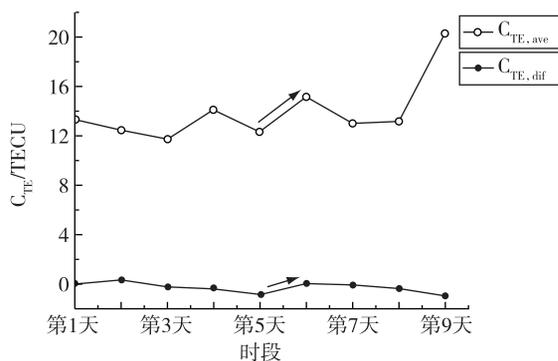


图 3 9607 事件 TEC 日平均与差值对比
Fig. 3 Contrast between daily average TEC and difference TEC value of 9607 event

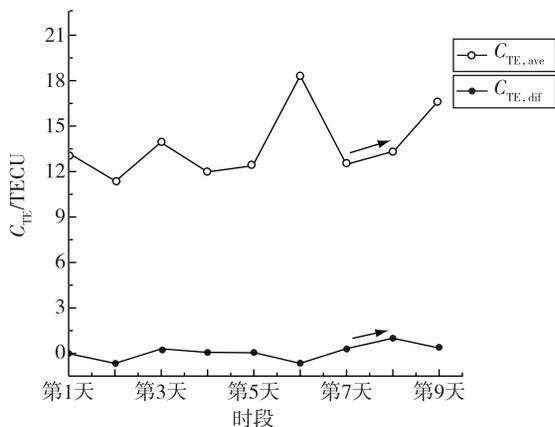


图 4 9608 事件 TEC 日平均与差值对比
Fig. 4 Contrast between daily average TEC and difference TEC value of 9608 event

进一步分析 9607 号台风发生到消亡期间的情况如图 5、6、7 所示, 红色台风标志表示该台风发生地点在 (132. 2°E, 11. 8°N), 黑色框中表示台风影响的范围, 黑色圈点表示台风风速达到最大时的位置 (121. 2°E, 20°N). 分析发现, 在台风极值渐渐趋于最大到消亡这段时间内 (大致从 25 日—27 日), 在受台风影响的这片区域内 TEC 的日均值发生了先增大后减小的明显变化, 即在图 3 中显示的锯齿段. 图 5 为 1996 年 7 月 25 日—27 日台风经过路径上 TEC 的变化情况.

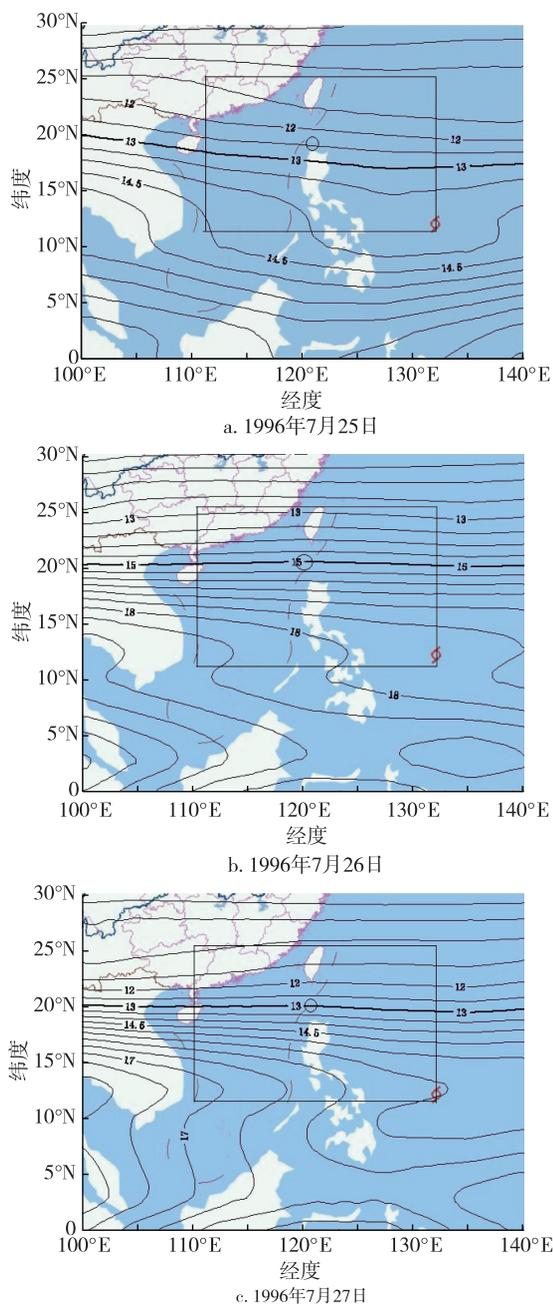


图 5 9607 事件 TEC 日均值(黑色框表示台风影响的范围)
Fig. 5 Daily average of TEC value of 9607 event

2.2 相关性分析

相关系数是变量之间相关程度的指标, 可以直观地反应变量之间的相关度. 如果有 x 和 y 的 n 对观测资料 x_1, x_2, \dots, x_n 和 y_1, y_2, \dots, y_n , 则 x 和 y 的样本简单相关系数可这样计算:

$$r_{xy} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

其中 \bar{x}, \bar{y} 是样本平均值. 简单相关系数有 $-1 \leq r_{xy} \leq 1$. 当 r_{xy} 为正时, 表示 x 与 y 之间有正相关; r_{xy} 为负时, x 与 y 有负相关; 当 $r_{xy} = \pm 1$ 时, 表示 x 与 y 之间有一一对应的函数关系. 所以, $|r_{xy}|$ 越大, 表示 x 与 y 的关系越密切^[14].

为了进一步分析风速与 TEC 之间的变化关系, 将各个事件中风速逐渐趋向于极值到该最大值消失这段时期内的风速日平均值和对应时间段内的 TEC 日平均值进行相关性分析, 求得的相关系数如表 4 所示. 结果表明在该段时间内, 风速与 TEC 日平均值之间存在很强负相关性(除 0418 事件相关性为正).

表 4 风速极值与 TEC 日均值相关系数

Table 4 Correlation coefficient of TEC and maximum wind speed of typhoon

台风事件	风速极值与 TEC 日均值相关系数
9607	-0.165 281 935
9608	-0.403 533 139
9914	-0.802 240 619
0010	-0.324 289 817
0102	-0.847 510 169
0418	0.717 475 092

3 结论

在台风天气系统下, 由于在中低层大气中激发的剧烈扰动, 随着声重力波的影响或者因大气中的某种辐合辐散, 抑或是动力学耦合, 使得这种扰动向上传播. 沈长寿^[3] 曾经提出湍流层顶的移动是中低层大气与电离层耦合的可能机制, 从而导致高层出现扰动. 从统计的台风事件分析看来, 这种扰动导致电离层中 TEC 会出现类此“锯齿状”的波动, 当台风风速趋于极值时开始形成锯齿, 并在接下来的一段时间内锯齿消亡. 从目前的分析来看, 在风速逐渐趋向于极值到最大值消失这段时间内, 大部分事件中风速变化与 TEC 变化之间存在很强的负相关关系.

然而究其扰动诱因, 以及为什么会在这段时间内风速与 TEC 扰动存在负相关关系, 还需要建立在大量的数据支持以及理论上深入研究. 另外本研究时段的事件相对较少, 今后通过研究其他地面站点事件, 才能更充分地说明低层大气与高层之间的影响.

参考文献

References

- [1] Hines C O. Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights [J]. Canadian Journal of Physics, 1960, 38(11): 1441-1481
- [2] 肖赛冠, 张东和, 肖佐. 台风激发的声重力波的可探测性研究 [J]. 空间科学学报, 2007, 27(1): 35-40
XIAO Saiguan, ZHANG Donghe, XIAO Zuo. Study on the detectability of typhoon-generated acoustic-gravity waves [J]. Chinese Journal of Space Science, 2007, 27(1): 35-40
- [3] 沈长寿. 台风与电离层 f_{0F2} 相关性的探讨 [J]. 空间科学学报, 1982, 2(4): 335-340
SHEN Changshou. The correlations between the typhoon and the f_{0F2} of ionosphere [J]. Chinese Journal of Space Science, 1982, 2(4): 335-340
- [4] 徐桂荣. 中低纬电离层的气象控制研究 [D]. 武汉: 中国科学院武汉物理与数学研究所, 2007
XU Guirong. Meteorological effects in mid-and low-latitude ionosphere [D]. Wuhan: Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Sciences, 2007
- [5] Bauer S J. A possible troposphere-ionosphere relationship [J]. Journal of Geophysical Research, 1957, 62(3): 425-430
- [6] Huang Y N, Cheng K, Chen S W. On the detection of acoustic-gravity waves generated by typhoon by use of real time HF Doppler frequency shift sounding system [J]. Radio Science, 1985, 20(4): 897-906
- [7] 刘依谋, 王劲松, 肖佐, 等. 台风影响电离层 F_2 区的一种可能机制 [J]. 空间科学学报, 2006, 26(2): 92-97
LIU Yimou, WANG Jingsong, XIAO Zuo, et al. A possible mechanism of typhoon effects on the ionospheric F_2 layer [J]. Chinese Journal of Space Science, 2006, 26(2): 92-97
- [8] Ezquer R G, de Adler N O, Heredia T. Predicted and measured total electron content at both peaks of the equatorial anomaly [J]. Radio Science, 1994, 29(4): 831-838
- [9] 陈艳红. 武汉地区电离层电子浓度总含量的模式研究 [D]. 武汉: 中国科学院武汉物理与数学研究所, 2002
CHEN Yanhong. A study on local ionospheric model of total electron content over Wuhan [D]. Wuhan: Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Sciences, 2002
- [10] 施能. 气象科研与预报中的多元分析方法 [M]. 北京: 气象出版社, 2002
SHI Neng. Multivariate analysis for scientific research and forecast of meteorology [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2002
- [11] 万卫星, 宁百齐, 刘立波, 等. 中国电离层 TEC 现报系统 [J]. 地球物理学进展, 2007, 22(4): 1040-1045
WAN Weixing, NING Baiqi, LIU Libo, et al. Nowcasting the ionospheric total electron content over China [J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(4): 1040-1045
- [12] 余优, 万卫星, 刘立波, 等. 全球电离层 TEC 起伏特性分析 [J]. 地球物理学学报, 2009, 52(9): 2189-2194
YU You, WAN Weixing, LIU Libo, et al. A global iono-

- spheric TEC perturbation index [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(9): 2189-2194
- [13] 陈斌, 刘立波, 万卫星, 等. 1996—2003 年大耀斑事件引起的 TEC 突然增强的统计分析 [J]. 空间科学学报, 2005, 25(1): 6-16
CHEN Bin, LIU Libo, WAN Weixing, et al. A statistical analysis of SITEC caused by intense solar flares during 1996-2003 [J]. Chinese Journal of Space Science, 2005, 25(1): 6-16
- [14] 施能. 气象科研与预报中的多元分析方法 [M]. 北京: 气象出版社, 2002
SHI Neng. Multi-analysis method in weather forecast [M]. Beijing: Meteorological Press, 2002

Disturbance response analysis of ionospheric TEC account for typhoon event

CHEN Ye^{1,2} DU Yajun^{1,3} CHENG Guosheng¹

1 School of Physics and Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

2 Dacheng Meteorological Administration in Hebei Province, Liangfang 065900

3 Yueyang Meteorological Administration in Hunan Province, Yueyang 430600

Abstract The typhoon events landed in Fujian province during 1996—2004 are investigated for ionospheric disturbance analysis. The ionospheric Total Electron Content (TEC) is chosen as evaluation index, and the reference region has same latitude but different longitude compared with research region. The TEC difference between research region and reference region is calculated, then the TEC disturbance response is analyzed hereby. The results show that in some regions the TEC is disturbed like being serrated when the typhoon speed reached maximum, and the disturbance disappears after a period of time. And negative correlation exists between the wind speed of typhoon and daily average TEC when the wind speed reaches maximum value.

Key words Total Electron Content (TEC); typhoon; ionospheric disturbance