文章编号:1674-7070(2013)03-0278-06

寒潮期间电离层 TEC 与地面天气参数的相关性

张雅雯[1]　陈美红[1]　李传起[2]

摘要

利用 1996—2004 年间武汉地区发生的寒潮事件,分析了寒潮过境前后该地区电离层电子总含量 TEC 的变化情况及 TEC 与地面温度、压强之间的相关情况. 结果表明:1)寒潮过境前,TEC 分别有不同程度的波动,在 2 ~ 3 d 内完成一次升高和降低;2)在寒潮来临的标准日 TEC 有明显下降;3)寒潮过境后的 5 d 内,TEC 出现类似"M"形的波动;4)寒潮过境前后,地面温度、压强和 TEC 之间表现出一定的正(负)相关.

关键词

电离层;电离层电子总含量;寒潮;相关系数

中图分类号 P42

文献标志码 A

0　引言

根据电子浓度随高度的分布及其变化特性,电离层大致可以分成 D、E、F 3 个层次,F 层在夏季白天常分裂成为 F1 层和 F2 层. D 层是电离层的最低层,其高度范围约为 60 ~ 90 km,大气成分与地面大气差不多. E 层高度约为 90 ~ 140 km,在 100 km 高度附近,E 层的电子浓度有较大的扰动,这一扰动层只有几千米厚,叫做 Es 层,电子浓度可达上下邻层的 2 倍之多,通常出现在高纬地区夜间和赤道附近的白天,在中纬度地区夏季较冬季多见. F 层是电离层中持久存在的、电子浓度最高的一层,高度范围在 140 ~ 600 km 之间. 电子浓度最大值约在 300 km 高度. F 层是电离层的主要区域,该区域的电子浓度最大,因此,F 层的变化是人们研究电离层变化最为关注的主要研究对象.

对流层天气现象与电离层特性密切相关. 经过长期的观测和研究,我国已在电离层与对流层气象活动的相关联系上得出以下结论:1)电离层 f_{0F2}(F2 区临界频率)对台风过程有明确的影响[1];2)台风登陆期间,电离层 f_{0F2} 下降,h_{mF2}(F2 区峰值高度)上升[2];3)特大暴雨发生时,电离层 Es 层频率参量 f_{bEs} 和 f_{0Es} 出现明显下降,F 层高度参量 h'_F 和 h_{pF} 也明显下降[3]. 对流层大气活动形式多样且有明显的区域特征,因此有必要对电离层对不同对流层天气过程的响应过程进行考查和分析,进一步加深人们对电离层的气象控制过程的认识.

寒潮作为冬季的一种灾害性天气,是北方的冷空气大规模地向南侵袭我国,造成大范围急剧降温和偏北大风的天气过程. 寒潮过境时会伴随着冷锋的生成,冷锋过境会影响该地区上空的电离层状态[4-5]. 研究发现,寒潮过境时,乌鲁木齐和长春两站夜间电离层 f_{0F2} 有下降趋势[6],夜间 Es 层也有明显变化[3].

1　数据与方法

电离层电子总含量(Total Electron Content,TEC)表示每 m^2 上从电离层底部到项部的电子数浓度(记其量值为 C_{TE},单位为 TECU),是重要的电离层参量,可以表征电子浓度变化,反映外部事件对电离层造成的影响. TEC 与 F2 层的峰值浓度 N_{mF2} 的关系可以用下面的经验公式表示[7]:

$$C_{TE} = 4.13 \times H_O \times N_{mF2}.$$

收稿日期 2011-05-17

资助项目 国家自然科学基金(41174165)

作者简介

张雅雯,女,硕士生,研究方向为电离层与低层大气活动的关系. yuwen595998309@126.com

李传起(通信作者),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为光纤通信 OCDMA 网络技术. lcq@mailbox.gxnu.edu.cn

1　南京信息工程大学　物理与光电工程学院,南京,210044

2　广西师范大学　电子工程学院,桂林,541004

其中 H_0 是 O 原子的标高. F2 层的峰值浓度 N_{mF2} 和临界频率 f_{0F2} 的关系为[8]

$$N_{mF2} = 1.24 \times 10^{10} (f_{0F2})^2,$$

则总电子含量 TEC 与 F2 层临界频率 f_{0F2} 的关系为[9]

$$C_{TE} = 4.13 \times 1.24 \times 10^{10} \times H_0 \times (f_{0F2})^2.$$

由此可以看出,TEC 与 f_{0F2} 呈正相关关系,受到寒潮影响时两者应该有相同的变化趋势.

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 $x_1, x_2, \cdots, x_n$ 和 $y_1, y_2, \cdots, y_n$,则 x 和 y 的样本简单相关系数可这样计算:

$$r_{xy} = \frac{\frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n}(x_t - \bar{x})(y_t - \bar{y})}{\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n}(x_t - \bar{x})^2 \cdot \frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n}(y_t - \bar{y})^2}}. \quad (1)$$

其中 $\bar{x}, \bar{y}$ 是样本平均值. 简单相关系数有 $-1 \leqslant r_{xy} \leqslant 1$. 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[10].

1.1 寒潮事件

本文采用武汉气象台的寒潮定义:冷空气过境时,48 h 降温 12 ℃,最低温度低于 5 ℃. 并依据上述寒潮定义,以《中国地面气象资料月册》记录的武汉日平均气温数据为依据,在 1996—2004 年间找到 6 次寒潮事件,同时将地面温度 48 h 下降 12 ℃且最低温度低于 5 ℃的那一天作为标准日,选取标准日前后 10 d 共 21 d 作为一次完整的寒潮事件.

1996—2004 年过境武汉的寒潮过程以及期间地磁指数 *Ap*、*Kp* 的情况. *Ap*、*Kp* 指数过大说明电离层受地磁干扰过大,有必要去除强地磁活动发生时的寒潮过程. 本文选取 $Kp \leqslant 5$ 的寒潮事件,经筛选后有 3 次寒潮事件可用做进一步研究. 如表 1 所示,3 次可用寒潮事件分别是 1996 年 2 月 16 日、3 月 9 日和 1998 年 12 月 2 日的寒潮过程.

1.2 TEC 数据

本文采用中国区域的 25 个观测站获取 GPS TEC 观测数据,根据经验正交函数(EOF)建立电离层经验模式,并采用新近发展的电离层 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).

表 1 1996—2004 年过境武汉的寒潮过程

Table 1 Cold wave processes transit in Wuhan during 1996—2004

日期	最低温度/℃	最大降幅/℃	说明
1996-02-16	2.7	14.7	2 月 11 日和 2 月 24 日 *Ap* 指数大于 20,*Kp* 指数均小于 5,扰动不大.
1996-03-09	3.8	12.7	3 月 11 日和 3 月 13 日 *Ap* 指数大于 20,*Kp* 指数均小于 5,扰动不大.
1998-03-20	1.7	18.1	*Ap* 指数扰动过大.
1998-12-02	1.5	13.0	12 月 11 日 *Ap* 指数大于 20,*Kp* 指数小于 5,扰动不大.
2003-02-11	-1.2	13.4	*Ap*、*Kp* 指数扰动过大.
2003-11-08	4.6	17.5	*Ap*、*Kp* 指数扰动过大.

武汉位于 114°E、31°N,所以将集中于 115°E、30°N 点上的数据作为武汉电离层 TEC 数据,且每 30 min 有一个数据值. 因为 TEC 日变化有很强的规律性,且相关性强[12],为了能更直观地观察寒潮引起的 TEC 变化,取每天 48 个数据的平均值均值作为当天的 TEC 值.

1.3 观测结果

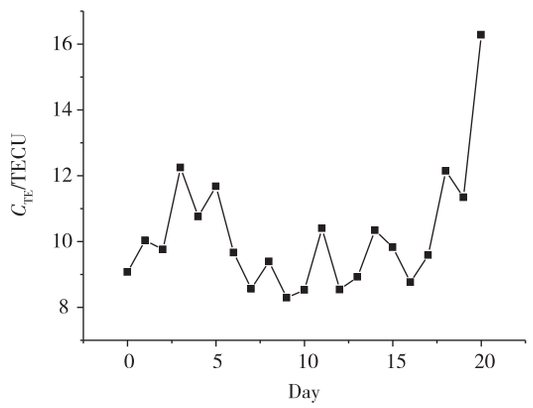
图 1 分别给出了 TEC 在 3 个完整寒潮事件中的变化,其中 Day = 10 的那一天为标准日. 在 1996 年 2 月 16 日和 1996 年 3 月 9 日的事件中,标准日之前 TEC 有小幅度下降,随着寒潮的临近 TEC 又有较大幅度的增加,但增幅和时间范围都有很大不同. 在 1998 年 12 月 2 日事件中,标准日前后的 TEC 变化不明显,相比较整个事件的其他时间 TEC 呈现出很平稳的状态. 由上述分析可以看出 3 个事件在标准日前后都没有明显的变化规律.

2 数据分析

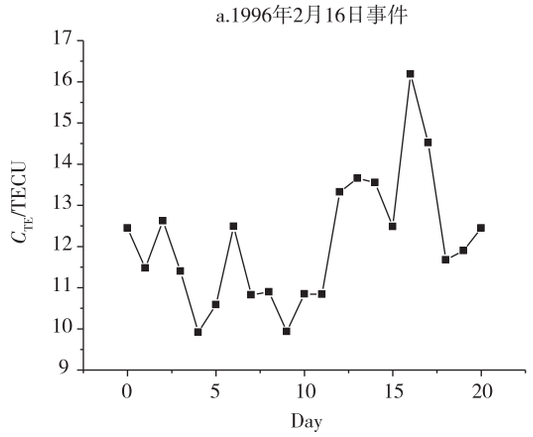
2.1 处理方法和分析

选取具有相近地理或地磁纬度但位于不同经度位置的 2 个测站,将两站的 TEC 做差值处理,以消除太阳及地磁影响.

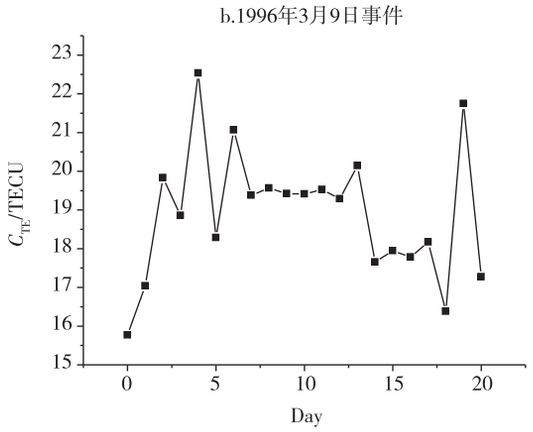
本文选取成都(105°E、31°N)作为辅助站. 武汉和成都的 TEC 做差值,再做平均处理,得到 TEC 差值的日平均,得图 2 所示结果.



a.1996年2月16日事件



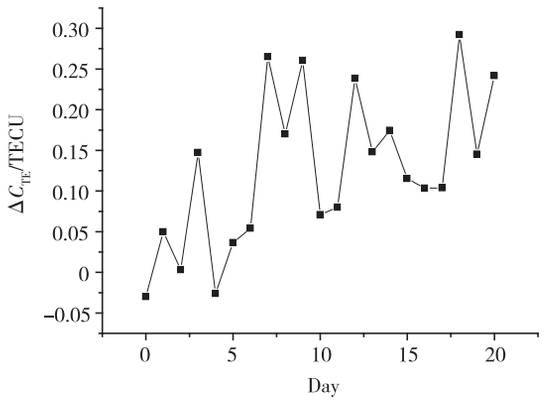
b.1996年3月9日事件



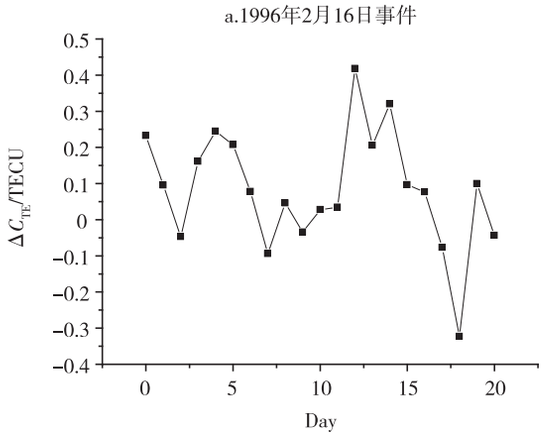
c.1998年12月2日事件

图 1　3 个事件武汉地区未修正的 TEC 变化曲线

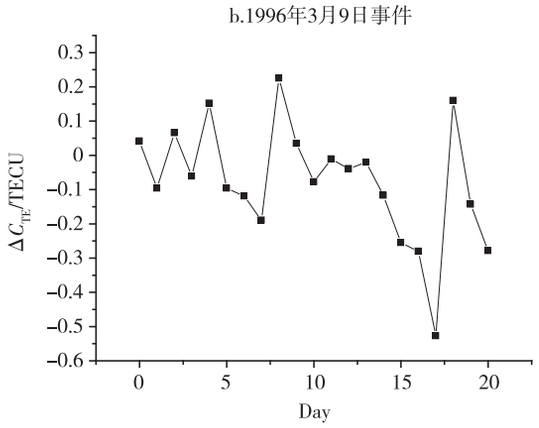
Fig. 1　The uncorrected TEC change curves of Wuhan in three cold wave events



a.1996年2月16日事件



b.1996年3月9日事件



c.1998年12月2日事件

图 2　武汉地区修正后的 TEC 变化曲线

Fig. 2　The revised TEC change curves of Wuhan in three cold wave events

图 2 显示在寒潮来临时 TEC 有明显下降,1996 年 2 月 16 日和 1998 年 12 月 2 日都在 Day = 10 时达到最低,1996 年 3 月 9 日在 Day = 9 时达到最低. 因为 TEC 与 f_{0F2} 呈正相关关系,有相同的变化趋势,所以这一结论与沈长寿等[6]的结论一致.

其次,图 2 还显示在标准日前 2 ~ 3 d 内,3 个事件都出现了一个波动,1996 年 2 月 16 日事件和 1998 年 12 月 2 日事件波动比较明显,1996 年 3 月 9 日事件幅度相对较小. TEC 在这个期间完成了一次增加和降低过程. 在标准日以后的 5 天内,3 幅图出现了一个类似“M”形的波动,1996 年 2 月 16 日事件和 1996 年 3 月 9 日事件较明显,1998 年 12 月 2 日事件波动幅度不大. TEC 在此过程内反复增加和降低.

为了更深入地认识寒潮期间的电离层 TEC 响应,有必要对以上事件做进一步的数理分析. 本文利用简单相关系数对“M”形波动进行直接考查.

进一步计算简单相关系数. 寒潮过境后 Day = 10—16 区间内,3 个事件都出现类似于“M”形的波动,进而计算 3 个事件间 TEC 的相关系数. 得以下结果:1996 年 2 月 16 日事件和 1996 年 3 月 9 日事件之间的相关系数为 98.64%;1996 年 2 月 16 日事件和 1998 年 12 月 2 日事件之间的相关系数为 15.13%;1996 年 3 月 9 日事件和 1998 年 12 月 2 日事件之间的相关系数为 23.91%.

2.2 TEC 与地面温度和压强之间的关系

图 3、图 4 分别为 TEC 与地面日平均气温和 TEC 与地面压强的关系曲线. 可以看出,在寒潮过境期间标准日前后,地面温度和压强都发生了明显变化,可见寒潮所引起的剧烈的大气波动可以通过背景风场和温度场自下而上传播到电离层高度,对电离层电子分布造成一定影响.

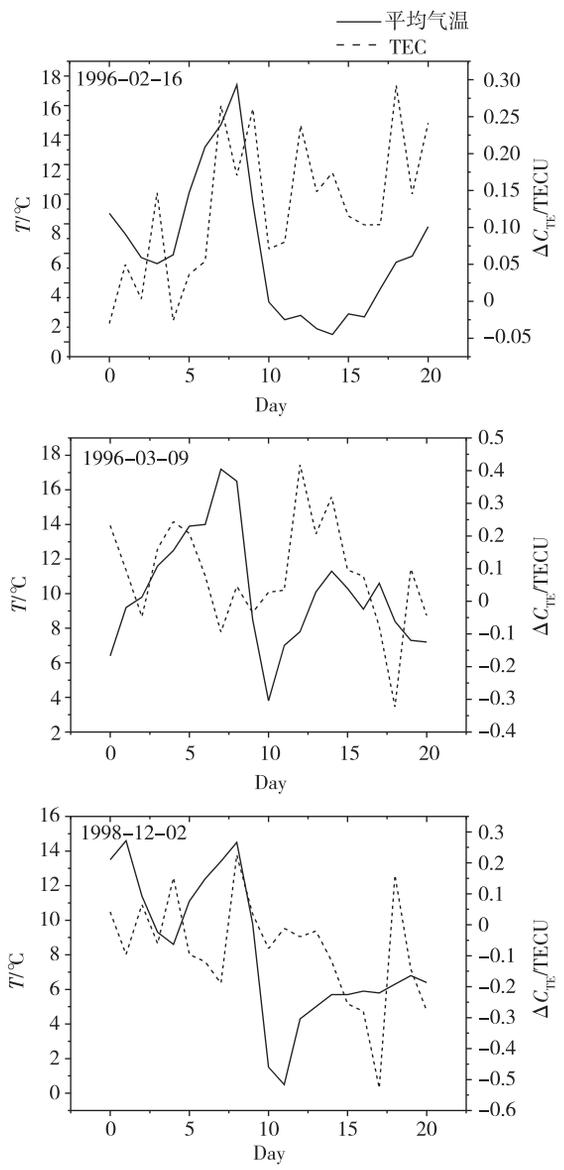


图 3 TEC 及地面日平均气温曲线

Fig. 3 Curves of TEC and average daily ground temperature of Wuhan in three cold wave events

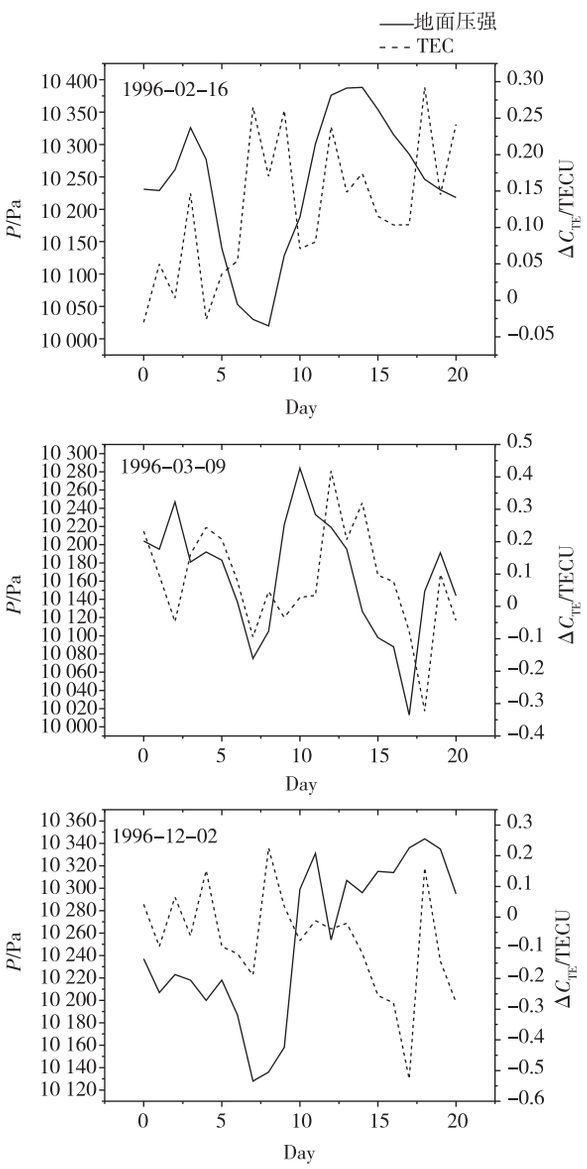


图 4 TEC 及地面压强曲线

Fig. 4 Curves of TEC and ground temperature of Wuhan in three cold wave events

利用式(1)分别计算 TEC 与地面温度、地面压强之间,不同时间段内的相关系数. 计算结果如下:

表 2 和图 5 表明:1)当地面温度与 TEC 呈现正相关时,地面压强与 TEC 呈负相关联系;2)地面温度与 TEC 的相关性在标准日前、后表现出相反变化规律. 当标准日之前的相关性为正(负)相关时,标准日之后则表现出负(正)相关,地面压强与 TEC 的相关性也具有相同的规律;3)在 Day = 7—17 这一时间段内,地面温度与 TEC 表现出比较好的相关性,相关系数基本在 30% 以上;4)在 Day = 8—15 这一时间段内,地面压强与 TEC 表现出较好的相关性,相关系数基本在 30% 以上;5)寒潮过境 5 d 后,地面压强和 TEC 之间的相关性比地面温度和 TEC 的相关性减小更快.

表 2 表明,无论温度还是压强,在 Day = 10—12 时间段内相关性强,其他时间段内的相关弱.

在研究电离层对寒潮事件响应时对标准日前、后进行分开讨论的效果会较好,这可能是由于寒潮过境前后地面气候系统发生很大改变造成的.

3 结论

综上可得,寒潮过境前后 TEC 都会发生波动,在标准日 TEC 出现明显下降,1996 年的 2 个事件在 Day = 10—16 区间内出现“M”形波动,并且呈现出很好的正相关性. 此外,寒潮过境前后,地面温度、地面压强与 TEC 分别在 Day = 7—17、Day = 8—15 时间段内的相关度较高,所以对于这 3 者之间的关系研究可着重选择这个时间段进行.

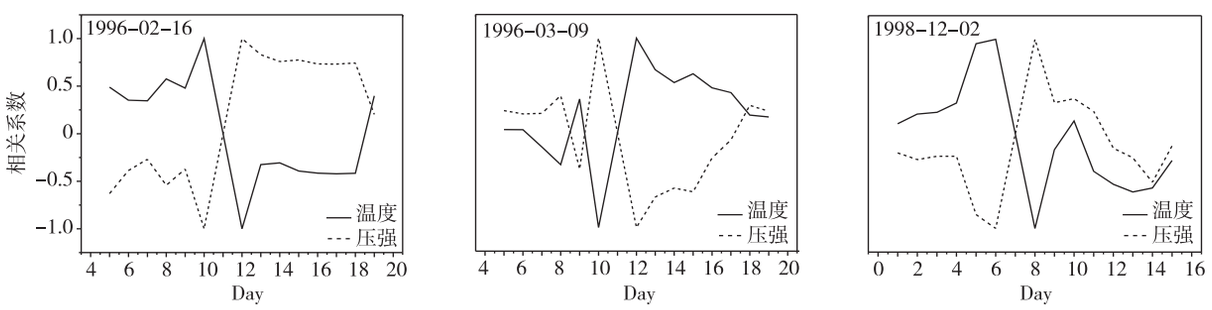


图 5 TEC 与地面温度、地面压强不同时间段内的相关系数

Fig. 5 Correlation coefficient between TEC and ground temperature (real line), TEC and ground pressure (dotted line) of Wuhan in three cold wave events

表 2 以标准日为分界点,标准日前后逐日相关系数

Table 2 The daily correlation coefficient before or after the standard daily which standard for the boundary

时间段	TEC 与地面温度的相关系数			TEC 与地面压强的相关系数		
	1996-02-16	1996-03-09	1998-12-02	1996-02-16	1996-03-09	1998-12-02
Day = 5—11	0. 489 812	0. 034 467	0. 107 724	-0. 629 980	0. 234 447	-0. 201 740
Day = 6—11	0. 352 295	0. 032 600	0. 210 327	-0. 387 150	0. 199 542	-0. 271 540
Day = 7—11	0. 345 685	-0. 148 850	0. 228 569	-0. 269 140	0. 205 406	-0. 236 970
Day = 8—11	0. 576 290	-0. 336 610	0. 326 315	-0. 542 420	0. 394 192	-0. 235 880
Day = 9—11	0. 479 670	0. 357 100	0. 953 331	-0. 371 960	-0. 381 870	-0. 854 050
Day = 10—11	1	-1	1	-1	1	-1
Day = 11—12	-1	1	-1	1	-1	1
Day = 11—13	-0. 324 530	0. 554 416	-0. 166 450	0. 830 779	-0. 677 240	0. 330 675
Day = 11—14	-0. 306 200	0. 531 276	-0. 136 717	0. 759 207	-0. 582 730	0. 372 741
Day = 11—15	-0. 392 280	0. 623 410	-0. 396 110	0. 776 016	-0. 622 270	0. 238 377
Day = 11—16	-0. 415 280	0. 474 708	-0. 533 090	0. 733 003	-0. 266 040	-0. 151 470
Day = 11—17	-0. 421 300	0. 426 495	-0. 613 350	0. 732 192	-0. 075 700	-0. 251 650
Day = 11—18	-0. 416 670	0. 186 971	-0. 572 070	0. 742 889	0. 289 593	-0. 511 430
Day = 11—19	0. 398 345	0. 167 927	-0. 281 030	0. 201 027	0. 227 785	-0. 125 840

1998 年 12 月 2 日寒潮过境后 TEC“M”形波动不明显的现象与过境寒潮的强度、重力波传播所依赖的背景风场和垂直方向上的温度梯度[13]的不同有关.

参考文献
References

[1] 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

[2] 刘依谋,王劲松,肖佐,等. 台风影响电离层 F2 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 F2 layer [J]. Chinese Journal of Space Science,2006,26(2):92-97

[3] 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

[4] Bauer S J. A possible troposphere-ionosphere relationship [J]. Journal of Geophysical Research,1957,62(3):425-430

[5] Shrestha K L. Sporadic-E and atmosheric pressure waves [J]. Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 1971,33(2):205-211

[6] 沈长寿,资民筠. 关于寒潮对夜间 f_{0F2} 影响的探讨[J]. 空间科学学报,1986,6(3):212-216
SHEN Changshou,ZI Minyun. The crossing of cold front and the night f_{0F2}[J]. Chinese Journal of Space Science, 1986,6(3):212-216

[7] 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

[8] Davies K,Liu X M. Ionospheric slab thickness in middle and low latitudes[J]. Radio Science, 1991, 26(4): 997-1005

[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] 毛田,万卫星,刘立波. 用经验正交函数构造武汉地区电子浓度总含量的经验模式[J]. 地球物理学报,2005,48(4):751-758
MAO Tian,WAN Weixing,LIU Libo. An EOF-based empirical model of TEC over Wuhan[J]. Chinese Journal of Geophysics,2005,48(4):751-758

[13] 丁锋,万卫星. 背景风场和温度梯度对重力波传播的影响[J]. 电波科学学报,1998,13(2):110-116
DING Feng,WAN Weixing. Influence of background wind shears and temperature gradients on the propagation of atmospheric gravity waves[J]. Chinese Journal of Radio Science,1998,13(2):110-116

Correlation analysis between ionospheric TEC and ground weather parameters during cold wave

ZHANG Yawen[1] CHEN Meihong[1] LI Chuanqi[2]

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

2 College of Electronic Engineering,Guangxi Normal University,Guilin 541004

Abstract Based on the cold wave events happened in Wuhan during 1996 to 2004,this article analyzes the variation of the ionospheric electronic density TEC and the correlations between TEC and ground temperature,TEC and ground pressure before and after the transit of three cold wave events. The results show that TEC fluctuates in different degrees and completes an increase then decrease process in 2-3 days before the cold wave transit;TEC decreases evidently on the standard day of the cold wave;and TEC possesses a variation in M form in 5 days after the cold wave transit. Some positive or negative correlations exist between TEC and ground temperature,TEC and ground pressure before and after the transit of cold wave.

Key words ionosphere;ionospheric electronic density;cold wave;correlation coefficient