0577-6619/2010/68(4)-0569-76 *Acta Meteorologica Sinica* 气象学报

台风期间厦门电离层变化的一次特例分析*

余 涛[1] 王云冈[1] 毛 田[1] 王劲松[1] 王斯宇[1] 帅方红[2] 苏卫东[2] 李建通[2]
YU Tao[1] WANG Yungang[1] MAO Tian[1] WANG Jinsong[1] WANG Siyu[1] SHUAI Fanghong[2] SU Weidong[2] LI Jiantong[2]

1. 国家空间天气监测预警中心,北京,100081
2. 厦门市气象局,厦门,230026
1. *National Center for Spaceweather*, *CMA*, *Beijing* 100081, *China*
2. *Xiamen Meteorological Administration*, *Xiamen* 230026, *China*
2008-06-17 收稿,2009-02-28 改回.

Yu Tao, Wang Yungang, Mao Tian, Wang Jinsong, Wang Siyu, Shuai Fanghong, Su Weidong, Li Jiantong. 2010. A case study of the variation of ionospheric parameter during typhoons at Xiamen. *Acta Meteorologica Sinica*, 68(4):569-576

Abstract The variation of the F2-layer critical frequency (foF2), the frequencies of occurences of the sporadic E-layer(Es) and spread-F during 3 typhoons in 2007 observed by Xiamen Ionosonde Station are investigated in this paper. The results indicate that the foF2 is disturbed, and the Es and spread-F occurring rates increase distinctly during the three typhoons approaching the station. One day before Sepat landing, the foF2 enhancement reached 40% (4 MHz) comparing with the month median value, and the foF2 quickly fell to the month median value after Sepat landing; the foF2 was a little higher than the month median value before Wipha landing, and quickly dropped below the median value after it landing with the decreasing amplitude of about 30% and lasted 4 days. On the other hand, the foF2 was below the month median value 2 days before Krosa landing; the foF2 restored the month median value during its landing, and then foF2 decreased in the following 1 day and increased continuously in the successive 3 days. Based on the preliminary analyses we consider that the interaction between the atmosphere, ocean and land may influence the altitude of the ionosphere, and bring about the foF2, Es, and spread-F variations. Although the foF2 decrease is able to be well explained by the mechanism proposed in Wang (2005), further investigation is necessary to interpret the foF2 increase when the typhoon landing as revealed.
Key words Ionospheric distribution, Typhoon, foF2 variation, Critical frequency

摘 要 文中利用中国气象局厦门电离层监测站的电离层频高图数据,研究了2007年登陆地点在厦门附近地区的3次台风登陆事件期间厦门电离层的变化,分析比较了台风登陆前后F2层临界频率(foF2)的相对变化、电离层Es和扩展F出现率等,结果显示这3次台风登陆均导致电离层foF2扰动,偶发E层(Es)和扩展F的出现率在3次台风临近登陆和登陆后都有明显的增加。台风圣帕(Sepat)登陆前一天,电离层foF2出现了相对月中值达40%(约4 MHz)的增强,登陆后电离层foF2迅速降低到月中值水平;台风韦帕(Wipha)登陆后电离层foF2从登陆前的略高于月中值的水平迅速下降到月中值以下(降幅达30%)并持续4天。台风罗莎登陆前的2天内电离层foF2低于月中值,台风罗莎登陆当天电离层foF2恢复到月中值水平,随后foF2出现了1天的下降和连续3天的增强。初步分析认为由于台风登陆前后,强烈的海气、陆气相互作用可能影响到电离层高度,从而导致对电离层foF2、Es和扩展F等参量发生变化。利用Wang(2005)提出的CoP机制,可以较好地解释台风登陆导致foF2下降,但文中发现在台风临近登陆出现的foF2上升的现象,则需要进一步深入分析研究。
关键词 电离层分布,台风,F2层,临界频率,电离层
中图法分类号 P421.34 P457.8

---

* 资助课题:中国气象局气候变化专项(CCSF2007-12)和国家自然科学基金委员会项目(40534020、40436015)。
作者简介:余涛,主要从事电离层监测预警研究。Email:maotian@cma.gov.cn

1 引 言

电离层中存在各种时空尺度的扰动和变化,其中的大部分都来自于太阳、地磁活动的影响(Liu, 2006, Chen, 2008)。但是,来自于低层大气的变化同样是电离层变化、尤其可能是导致电离层逐日变化不可忽略的因素(Bauer, 1958),有观测资料显示:剧烈的对流层天气过程,如台风、雷暴、寒潮等,可能对电离层产生影响。其中,台风作为最剧烈的地面天气变化之一,对电离层的影响尤其引人关注。Bauer 最早分析了飓风对电离层的影响,他的研究结果表明随着飓风的到来,foF2 开始上升,当飓风离观测台站最接近时 foF2 达到最大值。沈长寿(1982)分析海南岛附近台风也证实了台风对电离层 foF2 有明确的影响,但与 Bauser 不同的是,他发现台风登陆前后电离层 foF2 有明显的下降。Liu(2005)的研究结果也支持台风对电离层能够产生明显影响的结论,其结果显示在台风过境后电离层 foF2 开始减小,并在 2 d 左右达到最小值。

虽然从 foF2 这个参量来看,台风的影响并不一致,但以上观测事实却证实台风对电离层的影响显然是存在的。同时,更多研究者利用其他手段的观测结果也进一步印证了这个观点。Huang 等(1985)利用高频多普勒探测阵探测到由台风引起的声重力波,但他的研究结果显示在 12 次台风中仅有 2 次探测到台风激发的声重力波。肖赛冠等(2006, 2007)分析了北京大学高频多普勒台站多年资料,发现了在 24 次台风登陆事件中有明显扰动记录的就高达 22 次。在此基础上,Xiao 等(2007)很好地总结了台风期间的电离层响应。Sorokin(2005)发现台风时期低纬电离层中电场有较大的增加,从而也会对电离层产生重要的影响。

许多学者也提出理论试图解释台风对电离层参量的影响。Bauer(1958)认为飓风时期对流层内的气流系统会直接发展到电离层高度,从而影响那里的电子密度;沈长寿(1982)认为台风活动导致平流层的大气上升,而中间层内的气温结构又有利于这一气流的继续发展,最终中间层顶附近的上升气流使得湍流层顶抬高并导致电离层光化学背景发生变化。Wang(2005)根据从火星电离层获得的经验,提出了一种 CoP 耦合机制,认为当低层大气中的扰动足够强烈且持续足够长的时间时,这种扰动会改变低层大气的结构,而这种结构变化会通过准静力学方式在一段时间后映射到高层大气,改变电离层的光化学背景,进而影响电离层。基于这种理论,刘依谋(2006)认为台风登陆时强烈的陆气相互作用导致大气湍流加强,最后抬升湍流层顶,从而改变高层大气结构,通过影响高层大气的光化学过程而对电离层造成影响,并且通过一个一维电离层物理模型模拟了台风对电离层 foF2 影响,验证了这种假设。

以上的研究结果显示,即使电离层的同一个参量(如 foF2)在台风期间的响应并不完全一致。本文利用厦门电离层测高仪较高频次的探测资料(1 次/15 min),分析了 2007 年的 3 次登陆地点较近的台风期间电离层响应的全过程,重点考察 foF2 在台风期间的变化细节,以增进台风对电离层影响的理解和认识。

2 事例分析

本文电离层观测数据来自于国家空间天气监测预警中心厦门电离层监测站。该观测站(24°29′N, 118°04′E)于 2007 年开始试验观测(余涛,2009a)。我们选取该站 15 min 1 次的高频次观测数据,将台风所在月份的电离层 foF2 月中值作为参考背景,通过比较台风过境后电离层 foF2 与月中值的差异来分析台风事件对电离层的影响。

2007 年全年有 8 个台风登陆中国东南沿海地区,为了排除太阳和地磁活动的影响,我们选取了地磁较平静期间,登陆地点离厦门较近(800 km 范围内)的台风登陆事例来分析。这样 2007 年符合这个条件的一共有 3 个台风,它们分别是:

(1) 台风圣帕,于 2007 年 8 月 19 日凌晨 2 时登陆福建省泉州市惠安县,登陆地点距厦门站非常近,约数十千米。这次台风形成于 2007 年 8 月 13 日,消失于 2007 年 8 月 19 日。期间地磁活动很平静,Dst 指数最小为 −16 nT。

(2) 台风韦帕,于 2007 年 9 月 19 日凌晨 2 时 20 分登陆浙江苍南县,登陆地点距厦门站 500 多千米。这次台风形成于 2007 年 9 月 16 日,消失于 2007 年 9 月 20 日。此次台风过境期间的地磁非常平静,Dst 指数最小为 −16 nT。

(3) 台风罗莎,于 2007 年 10 月 7 日 15 时 30 分登陆浙江温州苍南县。与台风韦帕相似,登陆地点距厦门站 500 多千米,这次台风形成于 2007 年 10

月 2 日,消失于 2007 年 10 月 8 日。在这次台风期间 Dst 指数最小为 −35 nT,由于前后 Dst 均在 −20 nT 左右且太阳活动非常平静,因此可认为地磁活动也较平静。

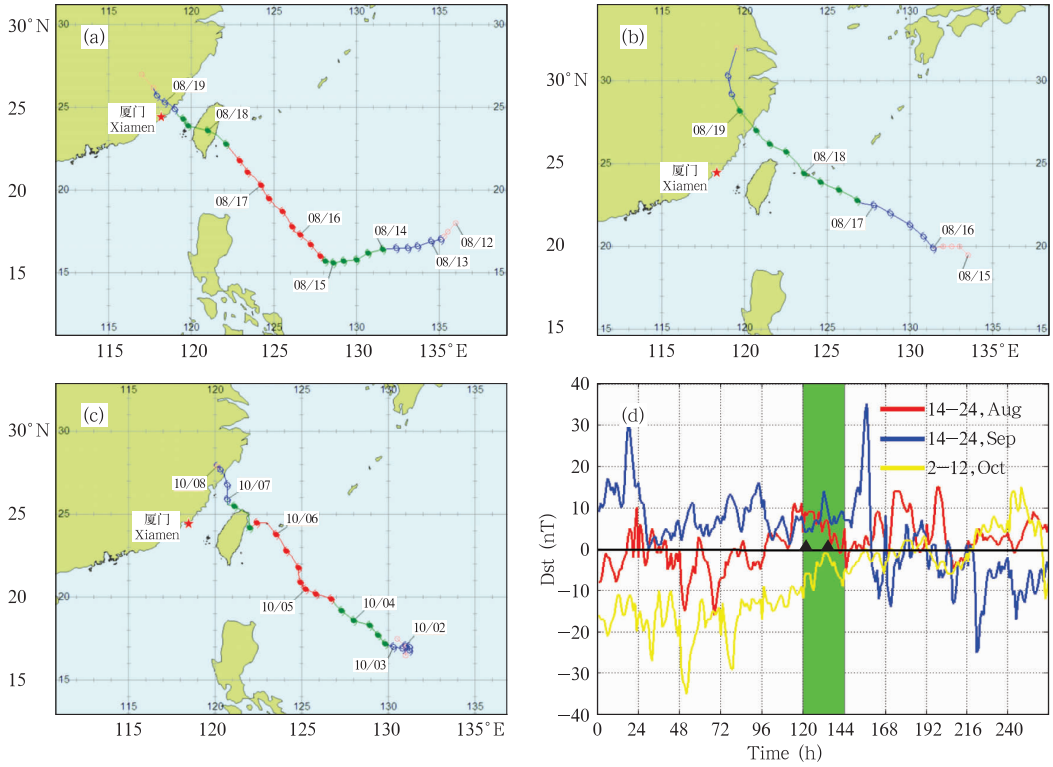

图 1　2007 年台风圣帕(a)8 月 12—19 日、台风韦帕(b)9 月 15—19 日和台风罗莎(c)10 月 2—8 日的路径图(图 a、b、c 中,红色:$v>51$ m/s,绿色:33 m/s$<v\leqslant$51 m/s,蓝色:17 m/s$<v\leqslant$33 m/s,紫色:$v<17$ m/s;图中黑三角表示台风登陆的时刻),以及 3 个台风登陆前后 5 日(2007 年 8 月 14—24 日、9 月 14—24 日和 10 月 2—12 日)Dst 指数的变化(d)

Fig. 1　Tracks for Sepat (a, August 12 − 19), Wipha (b, September 15 − 19), and Krosa (c, October 2 − 8) in 2007. Their speed is indicate by color (red: $v>51$ m/s, green: 33 m/s$<v\leqslant$51 m/s, blue: 17 m/s$<v\leqslant$33 m/s, purple: $v<17$ m/s). The Dst variation 5 days before and after their landing is shown in Fig. 1d, where the typhoon landing time is marked with the black delta

以上 3 次台风的路径、强度及时间信息见图 1,图中台风路径上的红色、绿色、蓝色和紫色分别表示强台风(风速>51 m/s)、中等台风(51 m/s≥风速>33 m/s)、弱台风(33 m/s≥风速>17 m/s)和热带气旋(风速≤17 m/s)。其中台风信息来自中国台湾气象部门的网站,后面分析用到的地面气压等资料来自于中国气象局数据资料中心。从图 1a—1c 中可以看出,3 次台风登陆地点都很靠近厦门站,台风韦帕登陆时风速最大,台风圣帕和罗莎先在台湾岛登陆或擦边,登陆时风速有所下降。3 次台风期间(登陆前后 5 日)的地磁 Dst 指数(图 1d)显示 3 次台风登陆期间地磁均较平静,地磁因素不足以导致剧烈电离层扰动的出现。

2.1　台风圣帕期间电离层扰动

图 2 是台风圣帕过境前后 5 天(8 月 14—24 日)厦门电离层 foF2 的变化情况。其中图 2a 显示了台风过境期间电离层 foF2 的实测值(虚线)和月中值(实线),图中阴影方框表示台风在厦门登陆的当天(即 8 月 19 日),同时,由于台风圣帕在 18 日曾在中国台湾地区登陆,故用黑色三角分别表示台风在台湾花莲和泉州两次登陆的时刻。从图 2a 可以看出,在台风登陆前 2—4 天,电离层 foF2 与月中值

相比偏低,在台风登陆的前 1 天,电离层 foF2 出现显著的增强现象,尤其是前 1 天正午电离层 foF2 相对于月中值增加到 40%。随着台风的登陆,电离层 foF2 迅速下降到与月中值相当的水平,并于登陆后的第 3 天下降达到最大,较月中值下降约 20%,仅为台风登陆前一天电离层 foF2 最大值的 2/3,往后电离层 foF2 逐渐恢复正常。总体来说台风圣帕登陆当天和前 1 天电离层 foF2 扰动最强,登陆后以负扰为主。

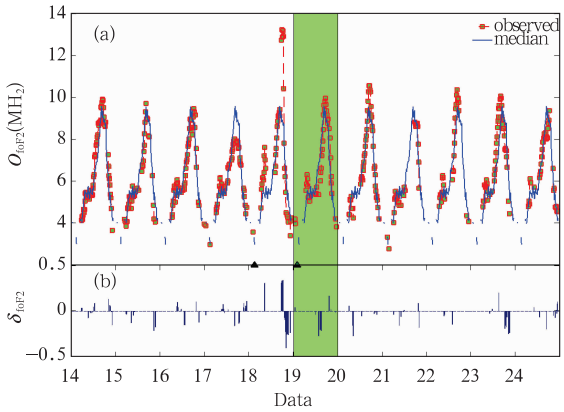

图 2 台风圣帕登陆前后 5 天(2007 年 8 月 14—24 日)厦门电离层(a)foF2 观测值(O_{foF2})和月中值(M_{foF2})以及(b)foF2 相对于月中值的相对扰动幅度(δ_{foF2})(图中黑三角表示台风登陆的时刻)

Fig. 2 The observed foF2 and its month median value 5 days before and after Sepat landing (August 14 - 24, 2007) (a), and the foF2 disturbance against its month median value(b) with the black delta for typhoon landing times

图 2b 中我们给出 foF2 实测值与月中值的相对变化,图中 $\delta_{foF2} = (O_{foF2} - M_{foF2})/O_{foF2}$,其中 M_{foF2} 为参考日中值。由于电离层存在较多的逐日变化,在分析电离层扰动时一般忽略 foF2 观测值在其月上 4 分值(UQ)和月下 4 分值(LQ)之间的变化(Liu, 2000, 余涛,2009b),这种方法可将电离层逐日变化的幅度考虑在内,只有较大幅度的变化才被记录。我们在图 2b 中仅显示 foF2 超过 UQ 和 LQ 的相对变化,从图中我们可以看出台风登陆前后 5 天中每天电离层 foF2 均出现超过其月 4 分值的扰动,但幅度较小且持续时间也较短,这也显示了电离层较强的逐日变化特性。最强的扰动出现在台风登陆的前 1 天(8 月 18 日)和当天(19 日)且时间持续得较长。foF2 在 18 日白天出现了较强的增加(幅度约 40%),随即夜间出现较强的降低。foF2 在随后的 19—24 日均出现一定频次的扰动,以降低为主。在度量频高图时我们发现在台风圣帕登陆前后厦门地区较多次出现 Es 和扩展 F,直接导致图 2 中的 foF2 数据在台风登陆后的可用率减少。我们统计此次台风登陆期间 Es 和扩展 F 出现的次数(表 1)可以看出,Es 在台风登陆当天(8 月 19 日)出现 44 次,扩展 F 约 14 次,占到总观测次数(每小时 4 次,每天 96 次)的一半以上,在台风过境后 Es 和扩展 F 也较登陆前出现次数多。尽管 Es 出现与台风关联的报道较少,但扩展 F 可能与台风登陆激发的声重力波相关(Xiao,2007,Hao,2006),显示出台风过境可能给厦门电离层造成了一定影响。

表 1 台风圣帕登陆前后 5 天(2007 年 8 月 14—24 日)厦门站 Es 和扩展 F 出现次数

Table 1 The occurence rates of Es and spread-F at Xiamen for Typhoon Sepat during 14 - 24 August 2007

日期	8/14	8/15	8/16	8/17	8/18	8/19	8/20	8/21	8/22	8/23	8/24
Es	7	16	19	21	29	44	21	35	41	22	30
扩展 F	1	0	0	2	7	14	2	6	4	0	2

台风是一个显著的低气压过程,气压变化和台风过境有较好的一致性。图 3a 中我们给出厦门站观测到的地面气压,同时将图 2b 中 foF2 的相对变化扰动幅度的绝对值在 12 h 窗口内求平均值,以得到一个与气压数据时间分辨率一致的描述电离层总扰动强度(包括正扰和负扰)的参数,表示电离层 foF2 总扰动强度。由于厦门站距离台风登陆地点很近,台风对地面气压影响较大且持续时间长。图 3a 显示厦门站地面气压随着台风的来临逐渐下降,在台风登陆泉州后数小时到达最小,然后在登陆数天后逐渐恢复到正常水平。图 3b 显示电离层 12 h 总扰动强度也在台风登陆前 1 天(18 日)达到最大,登陆当天(19 日)和后 4 天(23 日)的扰动也较强,其他日总扰动强度无明显规律。

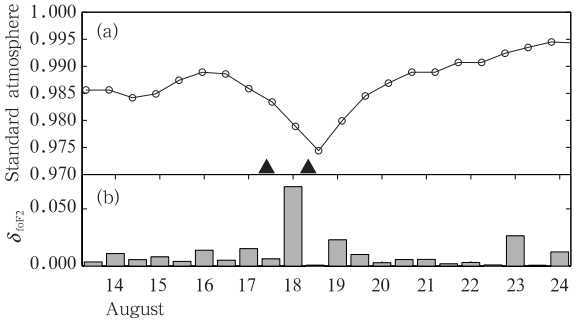

图 3　台风圣帕登陆前后 5 天(2007 年 8 月 14—24 日)厦门站(a)地面气压和(b) foF2 的相对变化幅度绝对值的 12 h 平均值

(图中黑三角表示台风登陆的时刻)

Fig. 3　The surface pressure (a), and (b) the 12-h averaged relative foF2 5 days before and after the Sepat landing (14 - 24 August 2007). The black delta is for the typhoon landing times

2.2　台风韦帕期间电离层扰动

从图 4 可以看出,在该次台风登陆的前 3 天(9 月 16 日)的白天和夜晚出现了较长时间的 foF2 异常增强,与月中值相比增幅达 20%,而此期间的地磁指数未见异常。在台风登陆前 1 天(9 月 18 日) foF2 又出现了短时间的增强现象,幅度达 30%。随着台风的登陆,电离层 foF2 下降逐渐回复到 *UQ* 和 *LQ* 值之间。在登陆后的第 1 天(9 月 20 日),电离层 foF2 出现较长时间(持续 20 多小时)的显著下降(幅度约 30%)。登陆后第 2 天(9 月 21 日)foF2 有所恢复,登陆后第 3、4 天(9 月 22 和 23 日),电离层 foF2 仍有较长时间的负扰,直到第 5 天电离层 foF2 逐渐恢复正常。总体来说台风韦帕登陆后厦门电离层 foF2 扰动大于登陆前,登陆后负扰为主,登陆前正扰为主,登陆当日电离层foF2扰动不显著。

图 5a 的厦门站气压显示台风韦帕对厦门站气压的影响小于台风圣帕。图 5b 的 foF2 平均总扰动强度在台风登陆后第 1 天(9 月 20 日)和第 3、4 天(9 月 22 和 23 日)最强,登陆前第 2、3 天(9 月 16 和 17 日)也有一定的扰动,但在台风登陆当天(9 月 19 日)未见明显扰动。

表 2 给出台风韦帕登陆前后 5 天厦门站 Es 和扩展 F 出现的次数统计,结果显示 Es 最大出现率在 登陆前第1、2天(9月18和17日),登陆当天Es

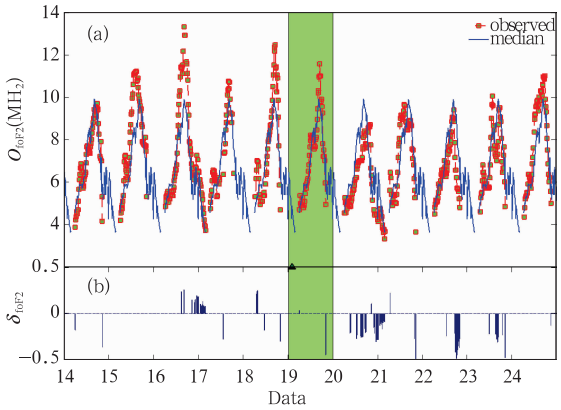

图 4　台风韦帕登陆前后 5 天(2007 年 9 月 14—24 日)厦门电离层(a)foF2 观测值(O_{foF2})和月中值(M_{foF2})以及(b) foF2 相对于月中值的相对扰动幅度(δ_{foF2})

(图中黑三角表示台风登陆的时刻)

Fig. 4　As in Fig. 2 but for Wipha and 14 - 24 Septemer 2007

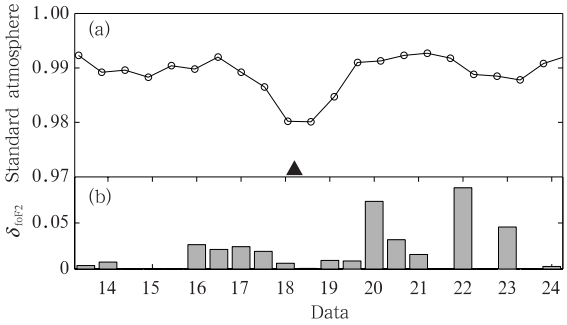

图 5　台风韦帕登陆前后 5 天(2007 年 9 月 14—24 日)厦门站(a)地面气压和(b) foF2 的相对变化幅度绝对值的 12 h 平均值

(图中黑三角表示台风登陆的时刻)

Fig. 5　As in Fig. 3 but for Wipha and 14 - 24 September 2007

表 2　台风韦帕登陆前后 5 天(2007 年 9 月 14—24 日)厦门站 Es 和扩展 F 出现次数

Table 2　As in Table 1 but for Wipha and 14 - 24 September 2007

日期	9/14	9/15	9/16	9/17	9/18	9/19	9/20	9/21	9/22	9/23	9/24
Es	0	1	0	25	29	9	17	14	0	0	6
扩展 F	0	0	0	0	0	0	5	15	4	0	2

出现 9 次,登陆后第 1、2 天(9 月 20 和 21 日)出现次数也较多,其他时间 Es 出现较少。扩展 F 在台风登陆后第 1 天开始出现,登陆后第 2 天达最大(15 次),登陆后第 3 天出现 4 次,其他时间扩展 F 极少出现。

2.3 台风罗莎期间电离层扰动

图 6 是台风罗莎过境前后 5 日(10 月 2—12 日)厦门电离层 foF2 的观测值(图 6a)及 foF2 与月中值的相对变化(图6b),图7给出对应时间厦门站地面观测值(图 7a),以及厦门电离层 foF2 总扰动强度(图 7b),图中黑色三角表示台风在浙江苍南登陆的时刻。

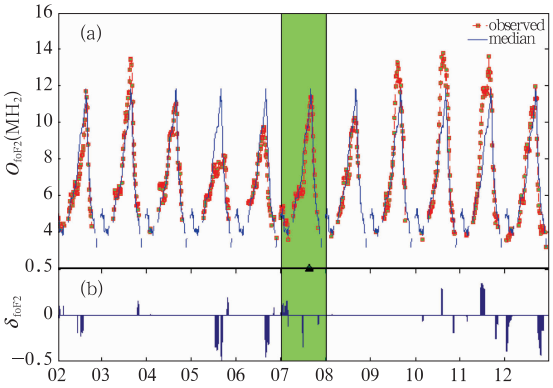

图 6 台风罗莎登陆前后 5 天(2007 年 10 月 2—12 日)厦门电离层(a)foF2 观测值(O_{foF2})和月中值(M_{foF2})以及(b) foF2 相对于月中值的相对扰动幅度(δ_{foF2})(图中黑三角表示台风登陆的时刻)

Fig. 6 As in Fig. 2 but for Krosa and 2 - 12 October 2007

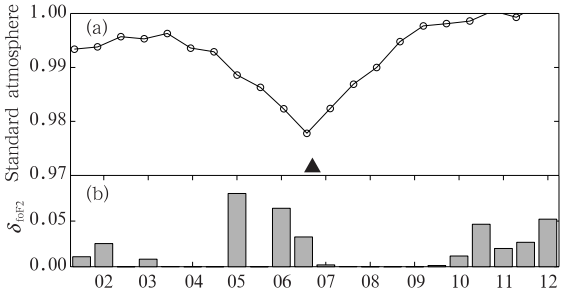

图 7 台风罗莎登陆前后 5 天(2007 年 10 月 2—12 日)厦门站(a)地面气压和(b) foF2 的相对变化幅度绝对值的 12 h 平均值(图中黑三角表示台风登陆的时刻)

Fig. 7 As in Fig. 3 but for Krosa and 2 - 12 October 2007

从图 6 可以看出,在该次台风登陆的前第 2 天(10 月 5 日)厦门 foF2 出现较长时间的异常减小,与月中值相比减小幅度达 40%。在台风登陆前 1 天(10 月 6 日)foF2 又出现了减弱现象,幅度约 30%。台风登陆的当天(10 月 7 日)电离层 foF2 逐渐回复到月中值水平。登陆后第 1 天(10 月 8 日)电离层 foF2 又出现了一定幅度的下降,但未超过 UQ 和 LQ 范围。与台风圣帕和韦帕不同的是在登陆后第 2—4 天(10 月 9—11 日),电离层 foF2 出现较多扰动,其中白天以增强为主,夜间是减弱为主。总体来说台风罗莎登陆前白天电离层 foF2 增强明显,登陆后白天电离层 foF2 增加较多,夜间电离层 foF2 减少为主。

厦门站气压数据(图 7a)显示台风罗莎对厦门站气压的影响小于台风韦帕,与台风圣帕相当,但气压恢复的较快,台风登陆后 4 天已经恢复到标准气压。图 7b 的 foF2 总扰动强度显示在台风登陆前第 1 和 2 天(10 月 6 日和 10 月 5 日),登陆后第 3、4 天(10 月 10 和 11 日)最强,但在台风登陆当天(9 月 19 日)未见明显扰动,总扰动变化与台风韦帕相似。

厦门站 Es 和扩展 F 出现的次数统计结果显示在台风罗莎登陆后 Es 和扩展 F 出现率有所上升,但 Es 最大出现率在登陆后第 1 天(10 月 8 日),扩展 F 最大出现率在登陆后第 4 天(10 月 11 日),其他时间扩展 F 极少出现,总体来说 Es 和扩展 F 出现次数明显少于前 2 次台风。

表 3 台风罗莎登陆前后 5 天(2007 年 10 月 2—12 日)厦门站 Es 和扩展 F 出现次数

Table 3 As in Table 1 but for Krosa and 2 - 12 October 2007

日期	10/2	10/3	10/4	10/5	10/6	10/7	10/8	10/9	10/10	10/11	10/12
Es	0	1	0	12	6	10	22	1	4	3	0
扩展 F	1	0	0	0	1	1	0	2	0	5	3

3 结论和讨论

本文分析了 2007 年 8—10 月 3 次台风(圣帕、韦帕和罗莎)登陆过程对厦门电离层 foF2 的影响,

结果显示：

（1）此3次台风登陆均导致电离层foF2扰动。台风圣帕导致电离层foF2在登陆前1天出现显著增强，台风韦帕则导致电离层foF2在登陆后出现持续4 d的减弱，罗莎导致电离层foF2在登陆后出现1 d的减弱后，连续3 d出现foF2增强。

（2）电离层foF2的总扰动强度在台风圣帕登陆前1天，在台风韦帕和罗莎登陆前3天内出现了明显增加。Es和扩展F也在临界台风登陆当天或登陆后数天内出现率增加。

Bauer结果表明随着飓风的到来，foF2开始上升，当飓风离观测台站最接近时foF2达到最大值，沈长寿（1982）分析海南岛附近台风则发现台风登陆前后电离层foF2有明显的下降，本文的特例研究表明两种可能都存在，在这3次台风登陆期间，厦门电离层foF2均出现先增加然后减少的特点，电离层foF2的增加一般出现台风登陆当天或前1天之内，而foF2下降一般出现在台风登陆后1—3天。说明电离层对台风的响应与背景、台风强度与路径及登录时间等多种因素有关，总体来看由于台风罗莎登陆地点离厦门站较远且登陆时风速较小，对电离层影响稍小。利用Wang（2005）提出的CoP机制，可以较好地解释台风登陆导致foF2下降（liu，et al，2006），但在台风登陆前foF2上升的现象，则需要进一步的理论分析。

3次台风过境期间厦门电离层响应也各有不同，这可能与台风的强度、距厦门站的距离以及登陆方式各不相同有关，其中台风圣帕和台风罗莎在登陆大陆前已经先于台湾登陆，这两次台风在台湾登陆点距厦门站较近，登陆引起的大气扰动仍然可以影响厦门电离层，增加了电离层台风响应的复杂性。不过从以上3次台风过境事例可以得出一些有意思的结论：即台风登陆当天前后，电离层foF2都出现了一定程度的增加（或恢复到月中值）的现象，而在相邻的前后2天foF2均出现不同程度的下降。图8给出3次台风登陆前后5天内厦门站白天foF2最大值的变化，横轴是距台风登陆天数（如“－2”表示离台风登陆前第2天等），纵轴表示该日白天最大foF2值。结果显示3次台风过境前后尽管电离层foF2最大值的变化各异，但均可看到白天最大foF2先增加再减小的过程。图中绿色部分表示foF2增加的日期，黄色表示foF2减少的日期，红色表示有增有减的情况。

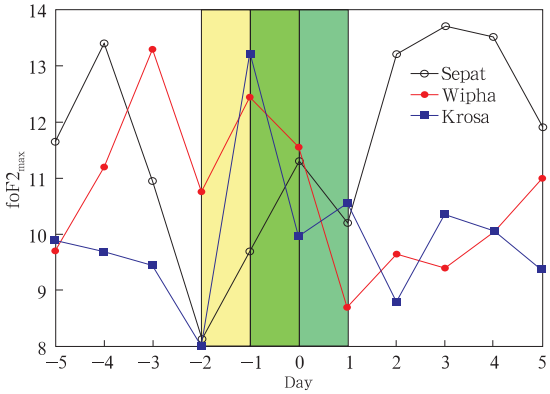

图8　3次台风登陆前后5天内厦门电离层foF2最大值（白天foF2的最大值）的变化

Fig. 8　Variation of peak daytime foF2 during the period from 5 days before to 5 days after landing for the three typhoons

这些结论和以往的研究结果有一定的差异，有趣的是，以往的研究结果也有截然相反的2种结论：Bauer（1958）认为随着飓风的到来foF2上升，Liu等（2006）的研究结果显示台风过境foF2有一定的下降趋势，沈长寿（1982）则发现登陆台风在靠近观测站时foF2偏高、而登陆后foF2偏低，但由于当时的记录资料中断的原因，无法得到确定的结论。我们最近利用GPS-TEC资料研究台风麦莎对电离层响应的结果（毛田，2009）也发现电离层TEC出现了先增加后减弱的特征。本文我们利用厦门最新的高时间分辨率资料，可以看到台风登陆期间对电离层foF2较为细致的影响过程，发现的结论与沈长寿的结果类似。同时我们重新研究Liu等（2006）的资料发现，其分析的2次台风登陆过程前后，均出现了foF2增加的现象，但由于进行24 h滑动平均，突出了台风登陆后foF2下降的特点而忽略了登陆前后foF2上升的现象。因此，我们认为对于登陆的台风，其对附近地区电离层foF2的影响，可能是一个首先增加然后减少的过程。由于foF2增加的过程主要集中在台风登陆前后较短的时间（本文3次台风均在登陆前后1天内），进行24 h平均的低时间分辨率的资料中可能无法分辨这一过程，而台风登陆后电离层foF2的下降现象则较明显且持续时间长，因此大部分研究者注意到这一现象。我们的研究结果显示台风对电离层foF2先增加然后再减小的过程，可以将以往的研究结果很好的统一起来。

从扩展 F 和 Es 出现率来看,台风登陆前后 Es 出现率有增加的趋势,扩展 F 一般在台风登陆后出现得较多。

由于台风强度、距观测站的距离远近等因素,使得台风登陆对电离层 foF2 的影响各有不同。从本文分析的 3 次台风过程来看,台风圣帕和韦帕的影响明显且持续时间长。其中台风圣帕登陆地点距离厦门电离层监测站非常近,其登陆过程中的陆-气相互作用可能对厦门电离层影响较大;台风韦帕登陆地点距离厦门站虽然较远(约 500 km),但由于其登陆期间仍然保持 30—50 m/s 中等台风强度,登陆期间的陆-气相互作用也非常强,因此这两个台风对厦门电离层 foF2 的影响较强。而台风罗莎登陆地点与台风韦帕相近,但登陆期间的风速较台风韦帕小,约 17—30 m/s,且登陆后台风迅速消失,气压数据显示尽管气压降低幅度比台风韦帕大,但气压降低持续的时间较短,因此对厦门电离层 foF2 的影响也较前两次台风过程弱得多,从台风罗莎期间 Es 和扩展 F 出现率的增加较小也可反映这一点。

参考文献

刘依谋,王劲松,肖佐等. 2006. 台风影响电离层 F2 区的一种可能机制. 空间科学学报,26(2):92-97

毛田,王劲松,杨光林等. 2009. 台风"麦莎"对电离层 TEC 的影响. 科学通报,54: 3858-3863

沈长寿. 1982. 台风与电离层 foF2 相关性的探讨. 空间科学学报,2(4):335-340

肖赛冠,郝永强,张东和等. 2006. 电离层对台风响应的全过程的特例研究. 地球物理学报,49(3):623-628

肖赛冠,张东和,肖佐. 2007. 台风激发的声重力波的可探测性研究. 空间科学学报,27(1):35-40

余涛,王云冈,王劲松等. 2010. 厦门电离层垂测站建设及初步结果. 地球物理学进展,25(2):538-542

余涛, 毛田, 王云冈等. 2009b. 汶川特大地震前电离层主要参量变化. 科学通报,54(4): 493-499

Bauer S J. 1958. An apparent ionospheric response to the passage of hurricanes. J Geophys Res, 63: 265-269

Huang Y, Cheng K, Chen S. 1985. On the detection of acoustic-gravity waves generated by typhoon by use of real time HF Doppler frequency shift sounding system. Radio Sci, 20 (4): 897-906

Jan Laštovička. 2006. Forcing of the ionosphere by waves from below. J Atmos Solar-Terrestrial Physics, 68(3-5): 479-497

Liu L, Wan W, Ning B, et al. 2006. Solar activity variations of the ionospheric peak electron density. J Geophy Res, 111: doi:10.1029/2006JA011598

Liu Y M, Wang J S, Suo Y C. 2005. Typhoon effects on the ionosphere. AOGS 2th, Singapore, June, 2005 (Invited talk)

Liu J Y, Chen Y I, Pulinets S A, et al. 2000. Seismo-ionosphere signatures prior to M≥6.0 Taiwan earthquake. Geophys Res Lett, 27: 3113-3116

Sorokin V M, Isaev N V, Yaschenko A K, et al. 2005. Strong DC electric field formation in the low latitude ionosphere over typhoons. J Atmos Sol Terr Phys, 67: 1269-1279

Wang J S, Liu Y M, Xiao Zuo. 2005. Ionospheric effects of Typhoon // Adv. Geosci., volumes: 981-256-456-X. Singapore: World Scientific Co., Pte. Ltd., 135 pp

Xiao Z, Xiao S, Hao Y, et al. 2007. Morphological features of ionospheric response to typhoon. J Geophys Res, 112, A04304, doi:10.1029/2006JA011671