

海南地区扩展 F 统计特性及行星波扰动观测

朱正平 陈郑洲 罗伟华

(中南民族大学 电子信息工程学院 武汉 430074)

摘要 为研究中国低纬地区扩展 F(SF) 的发生时间和季节特性以及行星波扰动对其影响,利用 2013 年海南三亚综合观测站 DPS-4D 数字测高仪观测到的电离层频高图数据,统计分析了扩展 F 的开始和持续时间及其季节变化;提取了电离层虚高,从虚高的逐日变化中获取了 F 层上抬时间和行星波扰动特征,并对上抬期间电离层 F 层最小虚高($h'F$)、临界频率(f_oF_2) 等参数进行了小波分析.结果表明:海南地区扩展 F 类型主要为 RSF,其季节性最大值(51%) 出现在分点季,RSF 在日落后和午夜后均有发生,而 FSF 主要在夏季午夜后出现;海南地区电离层虚高在日落后反转增强(PRE) 期间有明显上抬现象,电离层特征参数中存在周期为准 2d、5d 以及 10d 的行星波扰动,它通过调制电离层 F 区发电机电场的方式激励扩展 F 的发生和发展.

关键词 扩展 F; 季节变化; 日落后反转增强; 行星波扰动; 发电机电场

中图分类号 P352 文献标识码 A 文章编号 1672-4321(2017)02-0097-07

Statistical Characteristics of Spread-F and Observations of Planetary Wave Disturbances in Hainan

Zhu Zhengping, Chen Zhengzhou, Luo Weihua

(College of Electronics and Information Engineering, South-Central University for Nationalities, Wuhan 430074, China)

Abstract In this paper, the ionograms recorded by the DPS-4D digisonde at Sanya ionospheric observatory station in 2013 are used to study the onsets, durations and seasonal variations of the spread-F (SF). The uplift time of F-region and the planetary wave disturbances are obtained from the daily virtual height variations extracted from the ionograms. The minimum virtual height ($h'F$) and the critical frequency of F layer (f_oF_2), etc. are analyzed with wavelets transform during uplift. The results show: The RSF is the main type with a seasonal maximum value about 51% in equinox in Hainan. RSF occur from post-sunset to post-midnight, while FSF mainly appear at post-midnight during summer months. There are obvious elevations of virtual height during pre-reversal enhancement (PRE). There are planetary wave disturbances with quasi 2-day, 5-day and 10-day periods of the ionospheric characteristic parameters and they drive the initiation and the development of SF by modulating dynamo electrical field in the ionospheric F-region.

Keywords spread-F; seasonal variations; PRE; planetary wave disturbances; dynamo electrical field

人们对于扩展 F 现象的研究源于 20 世纪 30 年代,从那以后,关于扩展 F 的很多方面(发生率统计、季节和经纬度分布、和太阳地磁活动的关系等)被广泛研究^[1-5]. 已有研究提出,扩展 F 发生的主要机制包括:赤道电离异常、重力波、经向热层风以及行星波式振荡^[6-9]等,所有这些机制及其叠加作用使得扩展 F 发生率、电子密度、F 层高度等参数发生

逐日变化^[10]. 研究表明:电离层不规则体主要分布在赤道和极地地区^[11],引起低纬度电离层闪烁的赤道电离层不规则体起因于夜间磁赤道上空的瑞利-泰勒不稳定性,低纬赤道地区是全球闪烁活动最强的区域之一^[12],对该区域的电离层扩展 F 现象的研究有着重要意义.

行星波是起源于平流层或对流层,周期为 2 ~

收稿日期 2016-12-13

作者简介 朱正平(1968-) 男,教授,博士,研究方向:电离层无线电传播,信号检测与信息处理,电离层垂直探测设备的研究与开发,无线电探测新观测模式, E-mail: zpzh2007@sina.com

基金项目 国家自然科学基金资助项目(41474135, 41474134)

30d 的全球尺度的波,其通过干扰气压、温度和风速等气象活动垂直和水平方向上传输^[13].行星波不能直接到达 100km 以上高空,而是通过参与调制潮汐和热层风等方式间接向上传输到电离层 F 层^[14].行星波作为扩展 F 发生的种子机制一直被广泛研究,它常以调制电离层特征参数($h'F$ 、 foF_2 、 hmF_2 等)的方式出现,也可以直接调制扩展 F 的开始时间^[15].Lastovicka^[16]对中纬度地区欧洲站观测到的 foF_2 进行小波分析,发现了周期为 5d、10d、16d 的行星波活动.

本文采用 2013 年海南三亚综合观测台站的电离层频高图数据,对扩展 F 的形态、发生时间和季节分布进行统计分析;从扩展 F 高发季—分点季的电离层虚高的逐日变化中获取了 F 层上抬时间和行星波扰动特征,指出了在扩展 F 发生前 3h 的 F 层有明显地上抬现象;利用 Morlet 小波变换对扩展 F 发生前的 $h'F$ 、 foF_2 、Dst 指数等参数进行了频谱分析,并对观察到的行星波振荡周期进行了解释分析,指出海南地区电离层特征参数中存在周期为准 2d、5d 以及 10d 的行星波扰动,它通过调制电离层 F 区发电电场的方式影响 F 层特征参数,激励扩展 F 的发生和发展.

1 数据选取和分类

海南地区三亚综合观测台站 ($18^\circ N$, $109^\circ E$;

DIP lat. $13^\circ N$) 位于中国低纬度地区,该地安装的新一代电离层数字测高仪 DPS-4D 通过长期观测累计了大量的频高图观测数据,该测高仪可工作于多种模式,常规探测为频高图模式^[17].测高仪在 2013 年 1 月每 5min 工作一次,2~12 月每 7.5min 工作一次,本文采用的数据为 2013 年全年(338d)的数据,共计 59232 张频高图.其中较长缺测时段为 8 月 20~31 日和 11 月 11~25 日,缺测时段均不超过 15d.所有的频高图均采用 SAO-Explorer 软件手动标定.扩展 F 常分为频率型、区域型、混合型和歧型,海南地区歧型扩展 F 十分罕见,而常能观测到强区域型扩展 F^[18](SSF).本文主要研究的是频率型扩展 F(FSF)和区域型扩展 F(RSF).

2 数据分析和讨论

2.1 扩展 F 发生率统计

如图 1 所示为 2013 年 1~12 月 1000~2400UT (LT = UT + 8h) 期间扩展 F 月平均发生率柱状图,图中横坐标为 UT 时,纵坐标为扩展 F 的发生率,黑色柱代表 RSF,灰色柱代表 FSF.其中,月平均发生率为当月对应时刻扩展 F 出现的天数与当月有效数据的天数的比值;另外,海南地处低纬度地区,其季节与通常气候学意义上的划分有所不同,本文将全年分 3 个季节进行了统计研究,即:3、4、9、10 月为分点季,5、6、7、8 月为夏季,11、12、1、2 月为冬季.

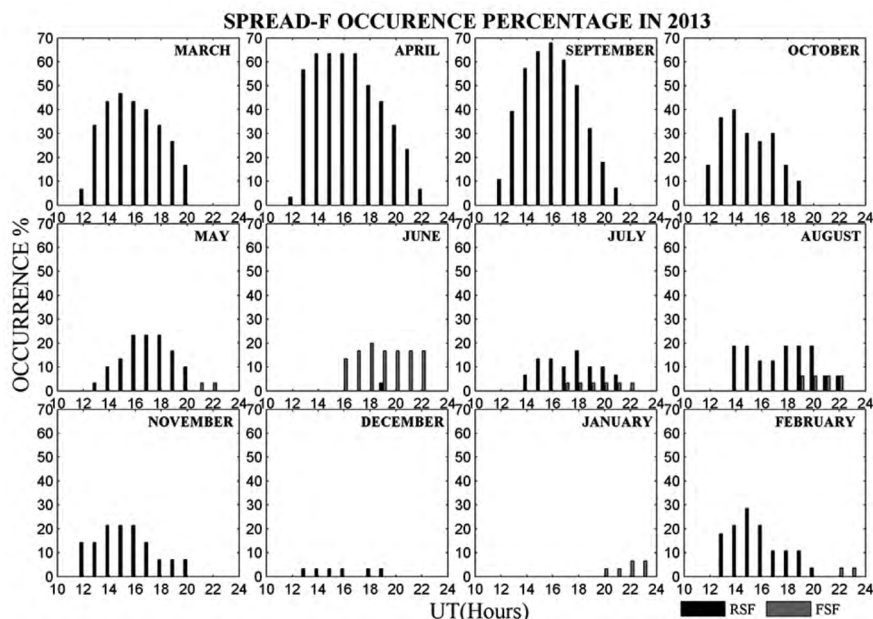


图 1 2013 年扩展 F 月平均发生率

Fig. 1 Monthly averaged percentage occurrences of SF in 2013

从图 1 中可以看出: 2013 年海南地区扩展 F 主要类型为 RSF,而在高纬地区 Zhigansk 和 Yakutsk 两个台站观测到的主要是 FSF^[19]. 分点季 RSF 发生率呈现季节性最大,9 月 1600UT 时扩展 F 发生率达到全年最大值 67%,夏季和冬季扩展 F 发生率均在 30% 以下.

为了研究扩展 F 的发生时间和季节变化,如图 2 所示给出了 2013 年 1000 ~ 2400UT 期间,RSF 和 FSF 在分点季、夏季、冬季的发生率折线图. 从图 2 (a) 可以看出,分点季 RSF 发生频繁,主要发生在

1300 ~ 2000UT,RSF 平均发生率约为 23%,在 1400UT 达到最大值 51%,没有 FSF 发生;从图 2 (b) 可以看出,夏季 RSF 和 FSF 发生率相当,均值约为 3% 和 5%,RSF 主要发生在 1400 ~ 2000UT,在 1800UT 达到最大值 14%,FSF 主要发生在 1700 ~ 2200UT,在 2200UT 达到最大值 8%;从图 2 (c) 可以看出,冬季 RSF 发生率较低,主要发生在 1400 ~ 1600UT,FSF 较为罕见. 通过比较发现,分点季扩展 F 开始时间为 1300UT,夏季和冬季晚于分点季,FSF 主要发生在午夜后.

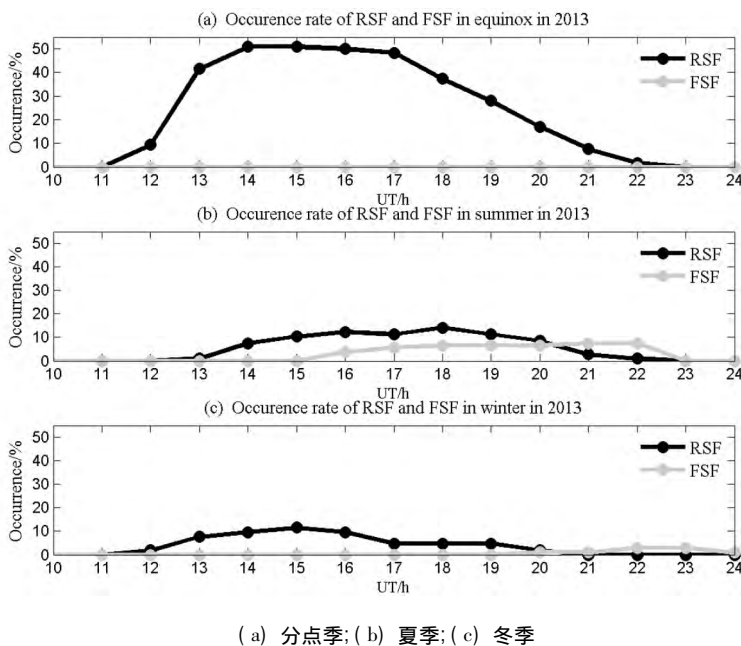


图 2 2013 年 1000 ~ 2400UT 期间,RSF 和 FSF 在分点季、夏季、冬季的发生率曲线

Fig. 2 Occurrences of RSF and FSF during equinox, summer and winter in 2013 at 1000 ~ 2400UT

2.2 F 层上抬现象

已有研究表明,日落后反转增强(PRE)期间,电离层 F 层上抬是导致扩展 F 发生的一个重要因素^[20]. 为了研究 PRE 期间,扩展 F 发生与 F 层上抬之间的联系,如图 3 (a)、(b) 所示绘制了 2013 年 9、10 月 1000 ~ 2000UT 期间 h'F 高度变化曲线,图中黑色曲线为当月各天高度变化曲线,灰色曲线为月平均高度变化曲线. 从图中可以看出,h'F 在 1000 ~ 1130UT 有明显上抬趋势,高度介于 220 ~ 310km 之间. 如图 3 (c)、(d) 为 2013 年 9 月 12 日、13 日,10 月 6 日、7 日,探测频率为 3、4、5、6、7、8MHz 时的电离层虚高变化,图中虚线框内为 PRE 期间电离层虚高变化,实线框内为扩展 F 发生阶段电离层虚高变化. 从图中可以看出,虚高的变化并不是随机的而是呈波状振荡,各频点对应的电离层虚高在 PRE 期间

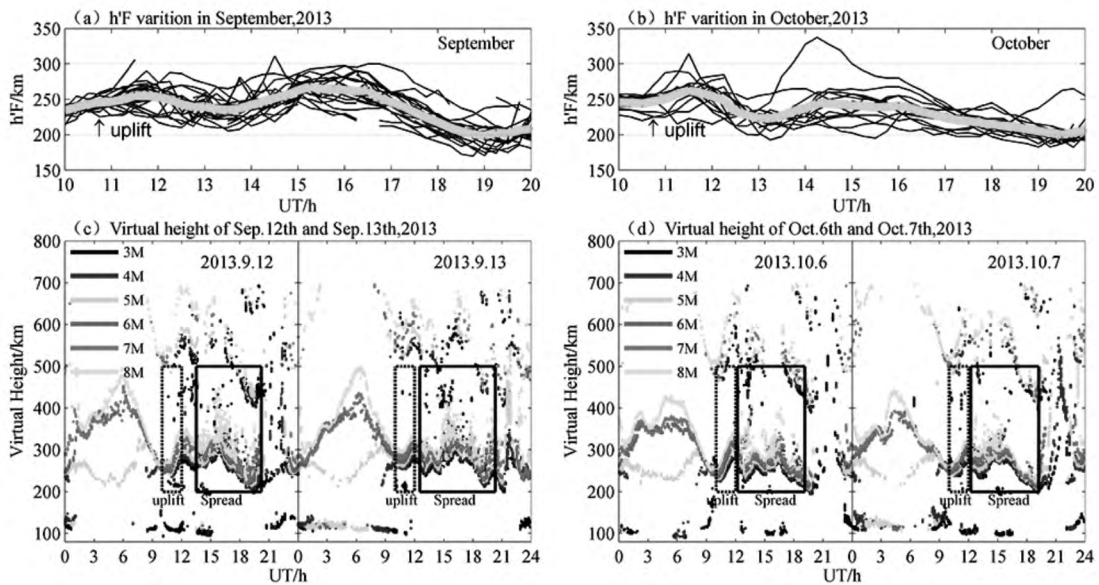
(1000 ~ 1200UT) 都有明显的上抬现象,随后在 1300UT 开始有扩展 F 发生,最长持续到 2000UT. 另外,日出时分 2100 ~ 2300UT,电离层等离子体密度较低,临界频率低于 3MHz. 白天 2330 ~ 0900UT,由于受太阳辐射影响,电离层等离子体密度较高,临界频率达到 5MHz 以上.

2.3 行星波扰动观测

Fagundes^[21]指出电离层虚高发生的昼夜变化是由太阳天顶角、潮汐、短周期振荡(重力波等)和长周期振荡(行星波等)以及他们的叠加作用影响电离层的电离率而导致的. Takahashi 和 Compo^[22]指出引发赤道地区 h'F 发生逐日变化的主要因素包括地磁干扰、热层风和行星波. 为了研究行星波对 2013 年海南地区电离层的扰动情况,本文采用 Morlet 小波变换对 2013 年 3、4、9、10 月共 122d 的

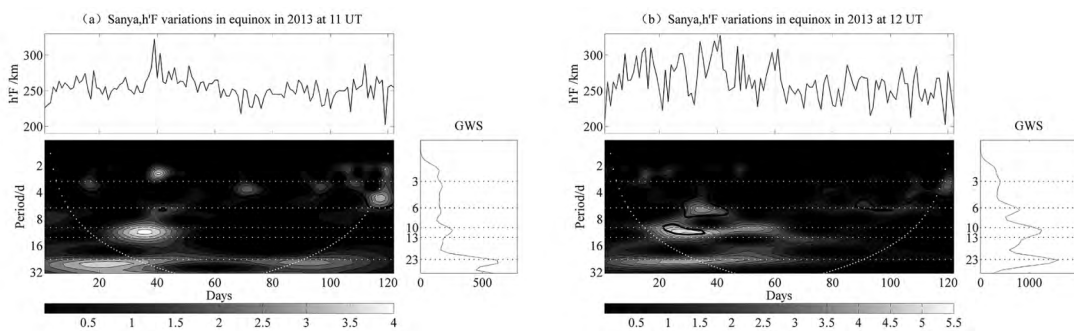
观测数据进行频谱分析, Morlet 小波是常用的指数复值小波, 通过将时间序列分解为时间-频率空间, 小波变换能够得到序列的周期特性及其动态变化^[23]. 由于扩展 F 开始时间为 1300UT, 电离层虚高在 1000 ~ 1200UT 有明显上抬趋势, 故选取 1100UT 和 1200UT 这两个时间点的数据进行小波分析. 如图 4 (a) 和 (b) 分别对 1100UT 和 1200UT 时的 h'F 进行了小波分析, 结果表明: 1100UT 和 1200UT 都存在着 2 ~ 3d、10 ~ 13d 和 23d 的振荡周期, 其中 10

~ 13d 的振荡周期具有很好的显著性水平和一致性, 时间主要集中在 3 月 20 日到 4 月 20 日, 此外, 1200UT 还含有 5 ~ 7d 的周期成分. 图 5 (a) 和 (b) 分别为 foF₂ 在 1100UT 和 1200UT 时的小波分析结果, 两图都含有 2 ~ 3d、5d、10 ~ 13d 和 23d 的振荡周期, 其中 10 ~ 13d 的振荡周期具有最大的全波功率谱 (GWS), 且和 h'F 的小波分析结果在出现时间上具有一致性.



(a) 9月 h'F; (b) 10月 h'F; (c) 9月 12日、13日虚高; (d) 10月 6日、7日虚高

图3 2013年9月、10月 h'F 变化曲线和探测频点为 3、4、5、6、7、8MHz 的虚高变化曲线
Fig. 3 H'F and virtual height variation for 3, 4, 5, 6, 7, 8MHz in September and October, 2013



(a) 1100UT 时 h'F (b) 1200UT 时 h'F

图4 2013年分点季 h'F 的小波分析周期结果
Fig. 4 Wavelet analysis of h'F for the period in equinox, 2013

1992年 Forbes 和 Leveroni^[24]对 foF₂ 做 Fourier 变换, 发现了 12d 和 16d 的行星波振荡周期, 并指出行星波是通过调制发电机电场影响 F 层电场, 进而

影响 h'F 等 F 层参数的. 日落时分电离层垂直漂移速度和发电机电场成正比^[25], 以日落时分的 h'F 对时间的导数 dh'F/dt 作为电离层垂直漂移速度已经

被证明是可靠的^[26]. 本文对 F 层垂直漂移速度 $dh'F/dt$ 和电子密度时间导数 dNe/dt 进行了小波分析, 结果如图 6 所示, 从两图中都可以得到的振荡周期

有 2~3d 和 10~13d, 此外 $dh'F/dt$ 的周期图谱中还含有 5~7d、23d 的周期成分.

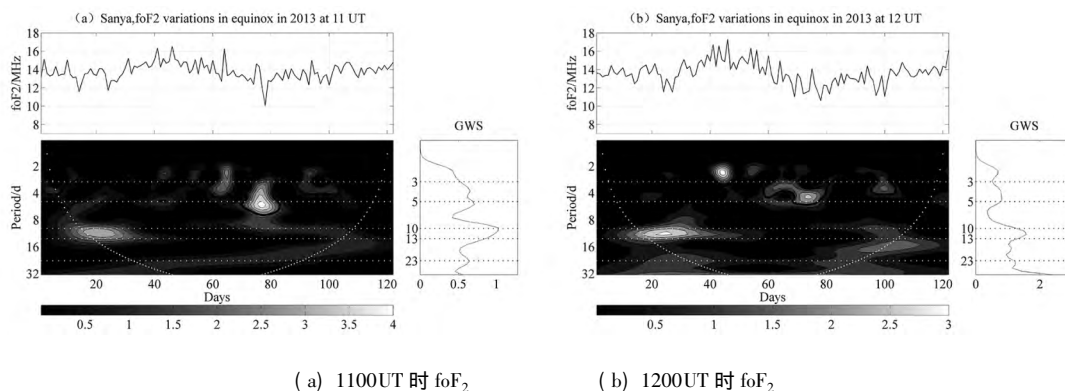


图 5 2013 年分点季 foF₂ 的小波分析周期结果

Fig. 5 Wavelet analysis of foF₂ for the period in equinox, 2013

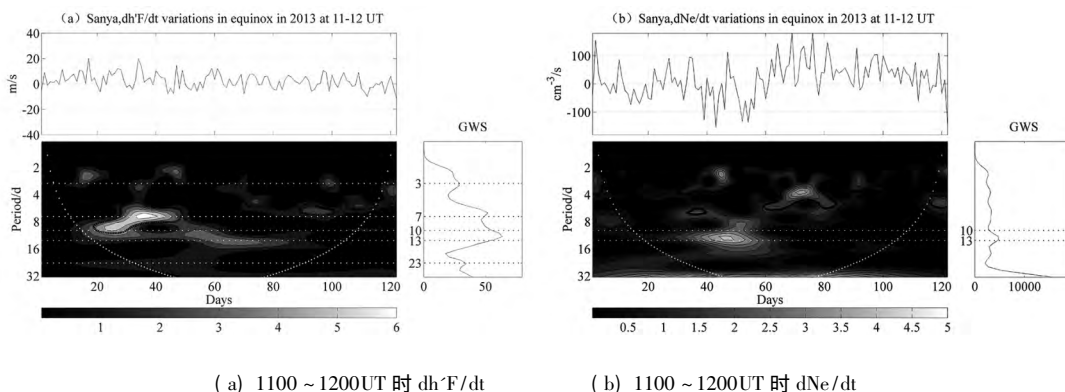


图 6 2013 年分点季 $dh'F/dt$ 和 dNe/dt 的小波分析周期结果

Fig. 6 Wavelet analysis of $dh'F/dt$ and dNe/dt for the period in equinox, 2013

综合上述, 小波分析可以得到的振荡周期有 2~3d、5~7d、10~13d 以及 23d. Altadill 和 Apostolov^[27] 指出电离层 F 层参数的周期性变化可以分为两类, 第一类与太阳电离和太阳风有关, 这些变化通常是由于太阳自转(27.3d 和 13.5d, 包括 21~24d)引起的; 第二类与行星波活动有关, 周期为 2~30d. 本文认为海南地区电离层 F 层中存在的 2~3d 和 5~7d 的振荡周期可能与准 2d 和 5d 的行星波活动有关, 10~13d 的振荡周期可能与 10d 的行星波活动以及太阳的半自转周期(13.5d)有关, 23d 的振荡周期可能与太阳的自转周期(27d)有关.

为了研究 F 层参数周期性变化与太阳自转和地磁活动的联系, 如图 7 所示选取 2013 年分点季共

122d 的 $F_{10.7}$ 指数和 Dst 指数进行了小波分析. 结果表明: $F_{10.7}$ 指数呈现 23d 的振荡周期, Dst 呈现 7d 和 13.5d 的振荡周期. 值得注意的是, 在 $F_{10.7}$ 指数小波分析中并没有发现 13.5d 的振荡周期, Altadill 和 Apostolov^[27] 的分析结果同样如此, 但在其对 MgII 指数的频谱分析的中发现了 13.5d 的振荡周期并认为对上层大气而言, MgII 指数比 $F_{10.7}$ 指数更具有代表性. Dst 指数分析结果中出现的 13.5d 的振荡周期大部分在影响锥之外, 可信度不高, 原因可能是小波分析的边缘效应引起的. 本文认为上述电离层参数存在的 23d 的振荡周期是由于太阳自转引起的, 不是由地磁活动引起; 上述 5~7d 的振荡周期除了和 5d 的行星波活动有关外, 还可能与地磁活动有关.

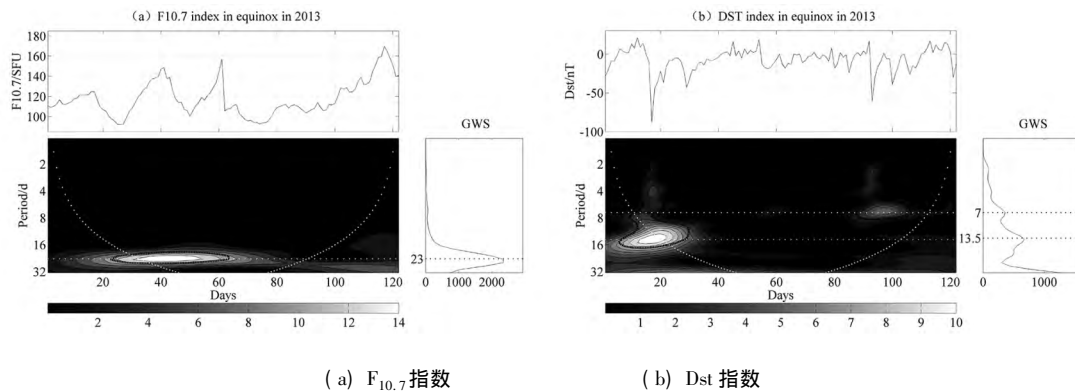


图7 2013年分点季 $F_{10.7}$ 指数和 Dst 指数的小波分析周期结果

Fig. 7 Wavelet analysis of $F_{10.7}$ index and Dst index for the period in equinox, 2013

3 结论

本文利用2013年海南三亚综合观测台站 DPS-4D 型数字测高仪的探测数据,对 RSF 和 FSF 两种不同类型的扩展 F 的发生率,起止时间和季节分布进行了统计分析;对9月和10月 F 层 $h'F$ 和探测频率为 3~8MHz 时的电离层虚高进行绘图比较;此外,还利用小波变换对分点季 $h'F$ 、 foF_2 、 $F_{10.7}$ 指数和 Dst 指数等参数进行频谱分析,主要结论如下。

(1) 三亚地区扩展 F 的主要类型为 RSF,分点季扩展 F 发生率呈现季节性最大,且开始时间要早于夏季和冬季。

(2) 分点季 RSF 发生频繁,无 FSF 发生,在 1300UT 达到最大发生率 51%;夏季 RSF 和 FSF 发生率相当,RSF 从日落后到午夜后都有发生,而 FSF 主要在夏季午夜后出现;冬季 RSF 发生率较低,FSF 较为罕见。

(3) F 层上抬是扩展 F 发生的重要因素之一。分点季电离层虚高在日落后(1000~1200UT)有明显的上抬现象,随后从 1300UT 开始有扩展 F 发生,发生时间主要集中在 1300~2000UT。

(4) $h'F$ 、 foF_2 和 $dh'F/dt$ 均存在 2~3d、10~13d、23d 的振荡周期,5~7d 的偶发振荡周期; dNe/dt 存在 2~3d、10~13d 的振荡周期。其中 2~3d 的振荡周期可能与准 2d 的行星波活动有关,5~7d 的振荡周期可能与 5d 的行星波活动以及地磁活动有关,10~13d 的振荡周期可能与 10d 的行星波活动以及太阳的半自转周期(13.5d)有关,23d 的振荡周期可能与太阳自转周期(27d)有关。本文认为 2013 年海南地区电离层特征参数中存在的周期为准 2d、

5d 以及 10d 的行星波扰动是扩展 F 发生的重要激发机制,它是通过调制电离层 F 区发电机电场的方式影响 F 层特征参数,进而影响扩展 F 的形成和发展的。

参考文献

- [1] Abdu M A, Sobral J H A, Nelson O R, et al. Solar cycle related range type spread-F occurrence characteristics over equatorial and low latitude stations in Brazil [J]. *J Atmos Terr Phys*, 1985, 47(8-10): 901-905.
- [2] Abdu M A, Iyer K N, Medeiros R T D, et al. Thermospheric meridional wind control of equatorial spread-F and evening prereversal electric field [J]. *Geophys Res Lett*, 2006, 33(7): 359-377.
- [3] Cabrera M A, Pezzopane M, Zuccheretti E, et al. Satellite traces, range spread-F occurrence, and gravity wave propagation at the southern anomaly crest [J]. *Ann Geophys*, 2010, 28(5): 1133-1140.
- [4] Pezzopane M, Zuccheretti E, Abadi P, et al. Low-latitude equinoctial spread-F occurrence at different longitude sectors under low solar activity [J]. *Ann Geophys*, 2013, 31(2): 153-162.
- [5] Li G, Ning B, Hu L, et al. Longitudinal development of low-latitude ionospheric irregularities during the geomagnetic storms of July 2004 [J]. *J Geophys Res*, 2010, 115(A4): 507-512.
- [6] Jayachandran P T, Ram P S, Somayajulu V V, et al. Effect of equatorial ionization anomaly on the occurrence of spread-F [J]. *Ann Geophys*, 1997, 15(2): 255-262.
- [7] Kelley M C, Larsen M F, Lahoz C. Gravity wave initiation of equatorial spread-F: A case study [J]. *J Geophys Res*, 1981, 86(86): 9087-9100.
- [8] Devasia C V, Jyoti N, Subbarao K S V, et al. On the

- plausible linkage of thermospheric meridional winds with the equatorial spread F [J]. *JASTP*, 2002, 64(1): 1-12.
- [9] Abdu M A, Ramkumar T K, Batista I S, et al. Planetary wave signatures in the equatorial atmosphere-ionosphere system and mesosphere-E- and F-region coupling [J]. *JASTP*, 2006b, 68(3-5): 902-915.
- [10] Rishbeth H. F-region links with the lower atmosphere [J]. *JASTP*, 2006, 68(3): 469-478.
- [11] Aarons J. 50 years of radio-scintillation observations [J]. *Aaten Prop Mag*, 1997, 39(6): 7-12.
- [12] Basu S, Groves K M, Quinn J M, et al. A comparison of TEC fluctuations and scintillations at Ascension Island [J]. *JASTP*, 1999, 61(11): 1219-1226.
- [13] Schoeberl M R, Geller M A. The propagation of planetary-scale waves into the upper atmosphere [R]. Urbana: Aeronomy Report No 70 University of Illinois, 1976.
- [14] Pancheva D, Haldoupis C, Meek C E, et al. Evidence of a role for modulated atmospheric tides in the dependence of sporadic E layers on planetary waves [J]. *J Geophys Res*, 2003, 108(A5): 1176.
- [15] Lastovicka J, Krizan P, Sauli P, et al. Persistence of the planetary wave type oscillations in foF₂ over Europe [J]. *Ann Geophys*, 2002, 21(7): 1543-1552.
- [16] Takahashi H, Abdu M A, Wrasse C M, et al. Possible influence of ultra-fast Kelvin wave on the equatorial ionosphere evening uplifting [J]. *Earth Planets Space*, 2009, 61: 455-462.
- [17] 朱正平, 宁百齐. 电离层垂直探测中的观测模式研究 [J]. *电波科学学报*, 2007, 22(5): 760-766.
- [18] 王国军, 史建魁, 王 霄, 等. 海南地区扩展 F 的季节变化研究 [J]. *电波科学学报*, 2007, 22(4): 583-588.
- [19] 陶 伟, 史建魁, 王国军, 等. 高纬地区电离层扩展 F 发生时间研究 [J]. *电波科学学报*, 2013, 28(03): 484.
- [20] 朱正平, 高紫枫, 罗伟华. 中国低纬地区行星波扰动观测及其对 SF 的影响 [J]. *中南民族大学学报(自然科学版)*, 2016, 35(1): 81-88.
- [21] Fagundes P R, Pillat V G, Bolzan M J A, et al. Observations of F layer electron density profiles modulated by planetary wave type oscillations in the equatorial ionospheric anomaly region [J]. *J Geophys Res*, 2005, 110(A12302): 1-8.
- [22] Takahashi H, Lima L M, Wrasse C M, et al. Evidence on 2-4 day oscillations of the equatorial ionosphere h'F and mesospheric airglow emission [J]. *Geophys Res Lett*, 2005, 321(12): L12102.
- [23] Torrence C, Compo G. A practical guide to wavelet analysis [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 1998, 79(79): 61-78.
- [24] Forbes J M, Leveroni S. Quasi 16-day oscillation in the ionosphere [J]. *Geophys Res Lett*, 1992, 19(10): 981-984.
- [25] Bertoni F C P, Sahai Y, Raulin J P, et al. Equatorial spread-F occurrence observed at two near equatorial stations in the Brazilian sector and its occurrence modulated by planetary waves [J]. *JASTP*, 2011, 73(4): 457-463.
- [26] Bertoni F C P, Batista I S, Abdu M A, et al. A comparison of ionospheric vertical drift velocities measured by Digisonde and Incoherent Scatter Radar at the magnetic equator [J]. *J Atmos Sol-Terr Phy*, 2006, 68(6): 669-678.
- [27] Altadill D, Apostolov E M. Time and scale size of planetary wave signatures in the ionospheric F region: Role of the geomagnetic activity and mesosphere/lower thermosphere winds [J]. *J Geophys Res*, 2003, 108(A11): 1403.