

WANG Xixi, FANG Hanxian, NIU Jun, WANG Sicheng. Statistics on the critical frequency of ionospheric sporadic E layer observed at Puerto Rico region (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2016, **36**(1): 18-24. DOI:10.11728/cjss2016.01.018

Puerto Rico 地区偶发 E 层临界 频率特性统计分析^{*}

王栖溪 方涵先 牛俊 汪四成

(解放军理工大学气象海洋学院 南京 211101)

摘要 利用 Puerto Rico 站 (18.5°N, 67.2°W) 1997—2013 年的 Es 临界频率数据, 对该地区 Es 特性进行了分析. 结果表明: 临界频率 f_0E_s 日均值具有一定的 16 天周期性变化特征, 其可能是大气行星波引起的; f_0E_s 随地方时的变化基本上呈一个波峰波谷结构, 波谷位于 06:00LT 左右, 波峰位于 14:00 LT 左右, 同时存在午夜和日落后异常高值现象, 其分别与午夜南向风场减弱和夜间电场变化有关; 通过分析不同强度 Es, 发现潮汐风造成较低强度 Es 发生率的地方时分布与中等和高强度 Es 明显不同. 这些现象的相关物理机制尚需进一步研究论证.

关键词 偶发 E 层, f_0E_s , Es 发生率

中图分类号 P 352

Statistics on the Critical Frequency of Ionospheric Sporadic E Layer Observed at Puerto Rico Region

WANG Xixi FANG Hanxian NIU Jun WANG Sicheng

(Institution of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101)

Abstract The Es property in Puerto Rico region (18.5°N, 67.2°W) has been investigated using the Es critical frequency during 1997—2013. Results show that the diurnal average critical frequency presents a weak 16-day period which may be caused by the planetary wave. The critical frequency variation with local time has also been investigated which presents a valley (at about 06:00 LT) and a peak (at about 14:00 LT) structure. Two anomalous peaks exist after the midnight and sunset, respectively. The phenomenon is considered as a result of downward electron flux caused by the diedown of southward wind field and variability of electric field during the nighttime. It has also been found that the incidence of Es with lower strength is clearly different from those with medium and higher strength, and it can be attributed to the tidal wind. These physical mechanisms need to be proved by both observations and further mechanical investigation.

Key words Sporadic E, f_0E_s , Es occurrence probability

^{*} 国家自然科学基金项目资助 (40505005)

2015-04-03 收到原稿, 2015-10-12 收到修定稿

E-mail: wangxixi19920218@126.com

0 引言

电离层电子密度由于受太阳活动及地磁场等因素的影响, 导致一些不规则现象或变化发生, 最常见的是偶发 E 层 (Sporadic E, Es) 和扩展 F (Spread F) 现象, 这些不规则现象的形成与电场、磁场及高层风场密切相关^[1-3]. 偶发 E 层是出现在 E 层高度范围内的非常薄的电子云, 其电子密度可以比正常 E 层电子密度高出几个数量级, 大尺度的 Es 范围能达到几十甚至几百公里. Es 具有明显的季节分布特征, 盛行于夏季半球的白天, 其他季节和夜间发生较少.

有关 Es 的形成机制存在不同观点, Dungey 首先提出了风切变理论^[4], Whitehead 与 Axford 对该理论进行了完善^[5-6], 后来的一些实验也支持该观点^[7]. 但是, E 层的离子如果要复合形成 Es, 必须具有非常强烈的风切变作用, 而风切变所需要的时间至少在 100s 以上, 在此之前寿命只有 10s 左右的离子已经被复合消失, 尽管有研究提出, 金属离子可以长时间存在的特性一定程度上解释了该问题, 但还是无法很好地解释 Es 强烈的季节变化和区域变化. 还有研究认为, Es 形成与电场、电子密度梯度漂移及电离层不稳定性等有关^[8-9]. Kagan 等^[10] 提出小尺度 Es 可能是由中性风驱动热不稳定性而产生的. 但现有的观测与分析均表明, Es 是电离层与热层相互耦合产生的复杂现象^[11], 不同地区及不同时段 Es 特性存在很大不同^[12-14].

Es 对雷达探测具有重要影响, 例如 Es 会在利用高频表面雷达探测时产生大量杂波, 还会大大减小超视距雷达的探测距离. 因此, 研究不同地区的 Es 特性有助于了解其发生发展机制, 进而实现人工调制, 对更好地利用 Es 进行通信及保障雷达探测等具有重要意义.

1 数据与预处理

分析采用的是 SPIDR (Space Physics Interactive Data Resource)* 提供的偶发 E 层临界频率地面观测数据, 选用了 Puerto Rico 站 (18.5°N, 67.2°W) 1997—2013 年共计 17 年的 f_oE_s 数据.

分析前对数据进行预处理: (1) 剔除缺测数据, SPIDR 的数据缺测用 9999.0 表示, 在使用前需要剔

除这些数据; (2) 剔除错误数据, 数据文件中存在一些明显的错误数据, 例如连续的大于 30 MHz 的观测值和大于 1000 MHz 的数据, 需要剔除; (3) SPIDR 提供的各个地面观测站观测频率为每次 15 min, 30 min, 60 min 的, 为使用方便, 对数据按每小时取平均值.

2 偶发 E 层临界频率特性分析

2.1 f_oE_s 季节变化特征

对 1997—2013 年共 17 年的电离层偶发 E 层临界频率 f_oE_s 进行分析, 以往研究大部分是针对 f_oE_s 较大的 Es 进行发生率分析的, 不能有效反映 Es 随时间的变化及周期特性, 因此应对观测数据进行日平均以研究其日变化及周期特性.

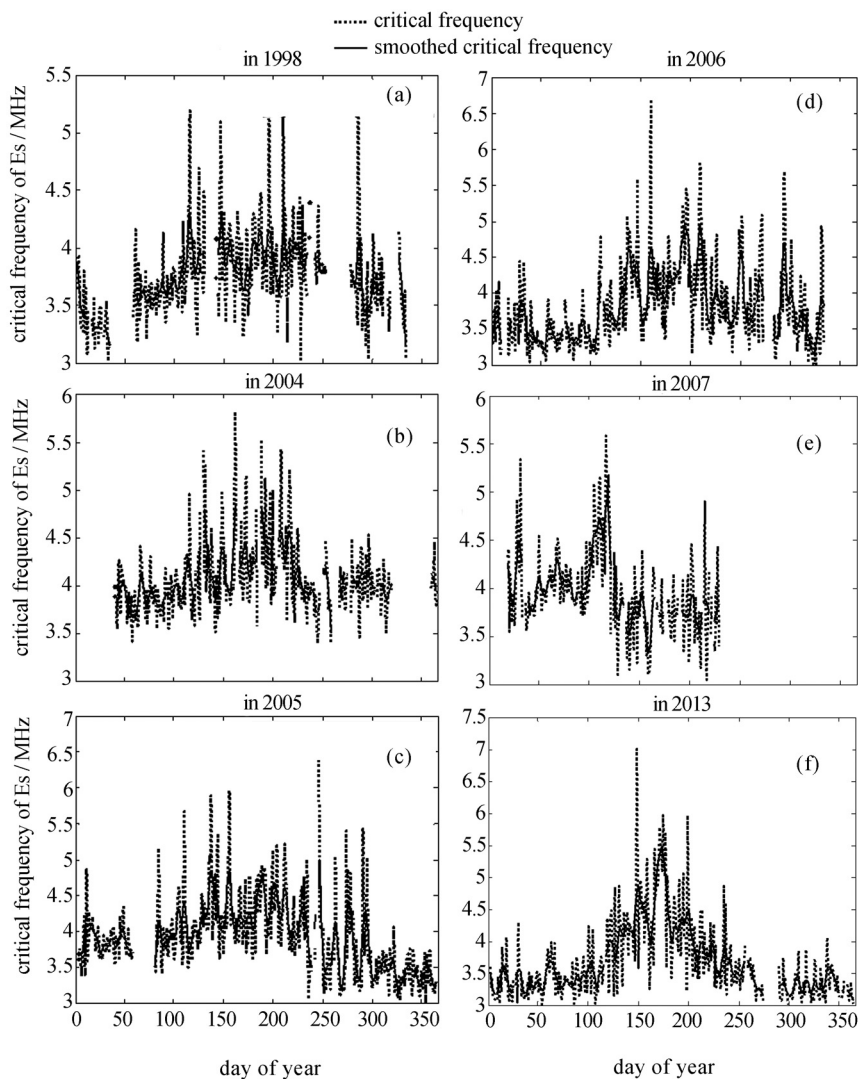
通常认为在 $f_oE_s > 3\text{ MHz}$ 时发生 Es^[12,15], 因此需要剔除 $f_oE_s < 3\text{ MHz}$ 的数据, 在季节变化和地方时变化研究中均只考虑 $f_oE_s > 3\text{ MHz}$ 的数据. 将每日 $f_oE_s > 3\text{ MHz}$ 的数据选出并加以平均, 以反映该日的 Es 活动水平, 通过数据分析发现 Es 发生次数的逐日变化相对较小. 因此, 通过这种方法的日平均既可以考虑到夜间 Es, 又避免了直接 24h 平均 (包含较多 $f_oE_s < 3\text{ MHz}$) 造成平均值偏小的误差.

由于有些年份的数据缺失严重, 例如 2002 年, 2008 年和 2009 年, 数据几乎完全缺测, 而 2003 年和 2010 年只有 1~3 个月的观测数据, 因此这些年份数据不能有效反映 f_oE_s 的季节变化特征, 在分析中只选取观测数据相对比较完整的 1998 年、2004—2007 年和 2013 年进行分析. 图 1 给出的是 f_oE_s 日均值随时间的变化结果.

从图 1 可以看出, f_oE_s 日均值随时间呈震荡分布, 全年都在波峰与波谷之间剧烈变化, 没有变化相对平滑的月份. 对这种震荡分布的周期进行分析, 采用小波局部功率谱进行分析时发现, 这种震荡没有明显的周期性, 只有比较弱的约 16 天的周期.

图 2 给出了 Es 临界频率日均值的周期分析. 图 2 中各区域颜色越红代表此位置的功率谱越大, 黑色圆锥线以外的部分是受到边界效应影响的区域, 因此不予考虑. 其余部分黑线包围的区域是通过了 95% 置信水平的红噪声标准谱检验. 由于 2007 年数据只有上半年的, 因此在周期分析时不再考虑. 从图中可以看出, f_oE_s 的周期特性各年强弱不一, 2004—2006

* <http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr/index.jsp>

图 1 不同年份下 f_0E_s 日均值变化Fig. 1 Variation of diurnal f_0E_s average value in different year

年都有相对较强的约 16 天震荡周期, 而 1998 和 2013 年的周期性较弱, 只在极少的时间内有 16 天周期. 由于风切变可能是由于大气波动产生的^[5], 因此认为这种周期性可能与大气行星波 (周期在几天到几十天之间) 有关, 这与 Karami 等^[16]提出的 16 天周期的大气行星波对 Es 有较大影响的观点一致.

将所有 $f_0E_s > 3$ MHz 的观测值进行统计, 得到全年每月 Es 的发生概率, 如表 1 所示.

从横向和纵向分别对比表 1 中的数据, 可以发现各年 Es 发生率的变化具有如下特点.

(1) Es 多发生在夏季, 5—8 月 Es 发生率占全年 40% 以上 (2007 年有 4 个月缺测, 因此不再考虑), 传统的风切变理论或金属离子均无法解释这一

夏季峰值. Whitehead^[17-18]提出了一种关于尘埃粒子的假设, 其假设 E 层除离子、电子和中性分子之外还含有由 100 或 1000 个原子组成的很小的粒子, 这些粒子表面附着一层金属层, 金属离子与粒子的碰撞导致更多金属离子脱离粒子表面游离出来, 但空气分子或其他非金属离子与其碰撞不会使金属离子脱离. 在白天, 少数金属离子与这些粒子碰撞, 产生更多的金属离子, 并且金属离子的数目增加得越来越快, 因此 Es 主要发生在白天, 夏天比冬天多是因为夏天紫外线辐射较强, E 层产生的金属离子比冬季多 100 倍, 造成了 Es 的季节变化和夏季峰值.

(2) 各年份 Es 发生概率季节分布有所不同, 1998 和 2004 年的春秋两季出现了 Es 发生率较高的月份.

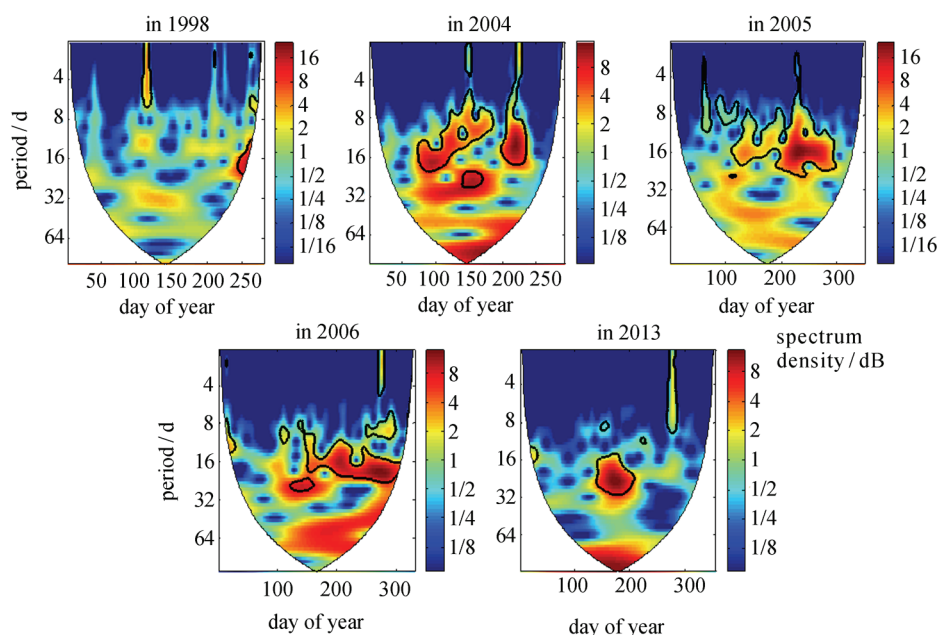


图 2 不同年份下 Es 临界频率日均值周期分析 (黑线内为通过 95% 置信水平的红噪声标准谱检验)

Fig. 2 Period analysis of diurnal average of Es critical frequency in different year (black line indicates an area tested by a 95% confidence level with the red noise standard spectrum method)

表 1 Es 发生率 (%) 的逐月变化 ($f_0E_s > 3$ MHz)

Table 1 Monthly occurrence probability (%) variation of the Es ($f_0E_s > 3$ MHz)

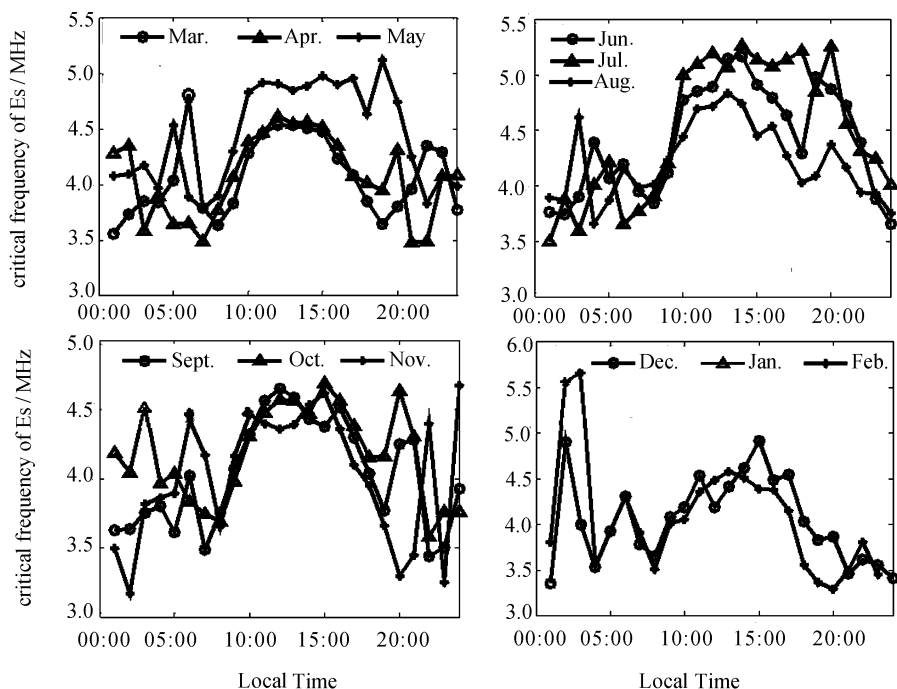
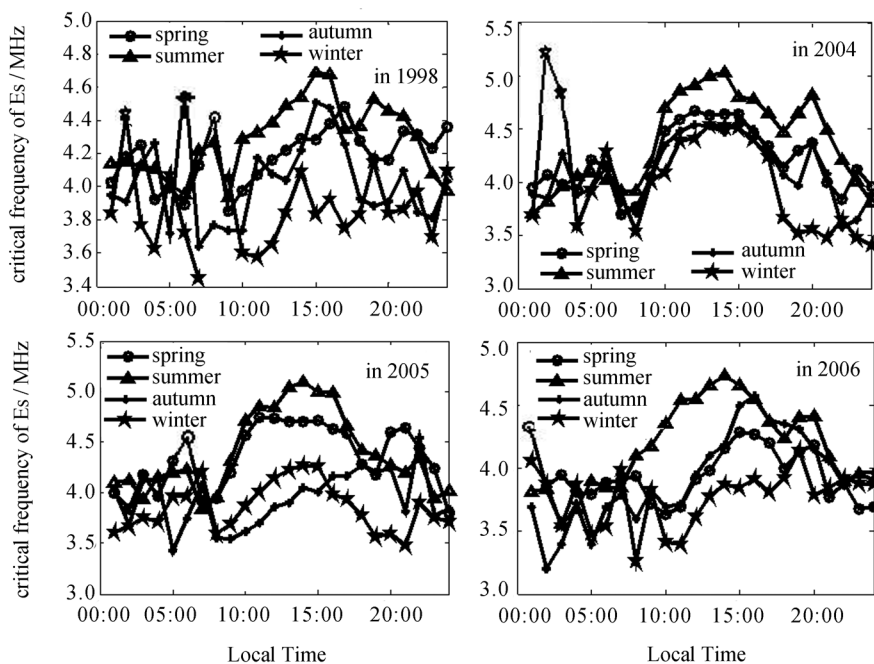
year	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
1998	7.4	0.8	12.0	13.4	8.4	14.2	14.9	11.2	1.8	10.1	5.8	0
2004	0	6.6	10.5	10.4	11.3	11.6	11.0	12.6	6.3	11.2	5.8	2.6
2005	8.2	8.6	2.6	9.8	11.9	11.0	11.8	9.7	6.7	7.5	5.7	6.4
2006	6.2	7.2	7.8	8.3	11.4	11.2	13.0	10.3	9.9	6.6	7.8	0
2007	11.5	17.1	27.1	31.0	5.2	2.7	4.1	1.2	0	0	0	0
2013	7.1	6.9	8.3	7.5	11.2	12.6	11.7	9.8	7.7	3.7	6.7	7.4

(3) 2007 年 Es 发生率变化较为异常, 5—8 月的发生率异常小于 1—4 月, 这是由于该站在 5—8 月的观测频率很低, 每天一次左右, 1—4 月发生率较高是由于存在 4 个月的缺测且 5—8 月观测较少而导致其发生率异常高, 因此认为 2007 年数据统计的发生率不能准确表现 Es 特征, 之后的研究中不再考虑 2007 年数据。

2.2 f_0E_s 地方时变化特征

进一步分析 f_0E_s 变化特征, 对每月相同时刻的 f_0E_s 进行平均, 研究其地方时变化。以数据最为齐全的 2013 年为例, 图 3 给出了该年份每月的 f_0E_s 随地方时的变化情况。

图 3 反映了 f_0E_s 的地方时变化规律, 从图 3 可以看出: f_0E_s 地方时变化表现出一个明显的波峰与波谷结构, 01:00 LT—08:00 LT 时段内为波谷, 08:00 LT—24:00 LT 为波峰, 波峰段 f_0E_s 明显高于波谷段; 1—4 月和 10—12 月的波谷结构比较平缓, 而 5—9 月 f_0E_s 的波谷结构较深, f_0E_s 从 01:00 LT 开始下降, 06:00 LT 左右达到最小; f_0E_s 在大约 06:00 LT—10:00 LT 之间快速上升, 每小时的 f_0E_s 变化最大可以超过 1 MHz, 并且其最大值可持续 3~4 h; 各月的波峰结构在 f_0E_s 值上有一定的区别, 但结构基本相同, 且在日落时段有一个异常短时间的峰值, 与中午的峰值构成了一个特殊的双峰结

图3 2013年各月 f_0E_s 随地方时的变化Fig. 3 f_0E_s variation with local time in each month of year 2013图4 不同年份 f_0E_s 随地方时的变化Fig. 4 f_0E_s variation with local time in different year

构, 右峰峰值时刻随季节有一定变化, 但基本在日落时段.

需要特别注意的是两个异常现象, 即午夜之后的异常高值和日落之后的双峰结构. 对于午夜之后的

高值现象, 但发生次数很少, 其值往往较大, 有时甚至大于白天的最大平均值 (以冬季最为明显). 分析认为这种现象与午夜之后 F 层高度迅速降低所伴随的向下的电子通量有关. Es 实质上是电子和离子在风

场及电场等因素作用下的聚集, 从 E_s 底部向上或者顶部向下的电子通量都会导致异常的 E_s 高值. 研究发现, 该地区午夜之后随着南向风场的减弱, F 层峰值高度出现断崖式下降^[19-20], 电子沿磁力线向下移动, 这种向下的电子通量可能造成异常的高强度 E_s . 由于夜间 E 层的高复合率, E_s 在较短时间内复合消失, 这与图 3 观测的现象一致. 而日落之后的双峰现象可能与晨昏电场的变化有关, 白天电场为东向而夜间 E 层电场为西向, 日落后电场的变化会使得电子在 $E \times B$ 的作用下产生向下的电子通量^[21], 有利于 E_s 的产生. 图 4 给出的其他年份各个季节的 f_0E_s 变化与 2013 年变化相似, 同样具有午夜异常和日落双峰现象, 这些现象仍需进行深入研究.

在 E_s 研究中, 通常将 E_s 分为低、中和高强度^[12,15] 三个级别, 为了分析形成不同强度 E_s 因素是否存在差异, 对低强度 ($3 \text{ MHz} < f_0E_s < 5 \text{ MHz}$)、中等强度 ($5 \text{ MHz} < f_0E_s < 7 \text{ MHz}$) 和高强度 ($f_0E_s > 7 \text{ MHz}$) 的 E_s 发生率随地方时的变化进行了统计.

图 5 给出了 f_0E_s 大于 3, 5, 7 MHz 时 E_s 发生概率地方时的变化, 从图 5 可以看出: 各强度的 E_s 发生概率都存在一定的地方时变化规律, 较强的 E_s 主要出现在正午时段, 较低强度 E_s 发生率峰值时间段为 09:00 LT—16:00 LT, 中等强度和高强度 E_s 发生率峰值均在 14:00 LT 左右; 各个强度的 E_s 在夜间的发生率一般都很低; 日落 (18:00 LT 左右) 之后一段时间内, 中等强度 E_s 发生率下降出现一个平缓阶段, 高强度 E_s 在此时间段内出现一个发生率的峰值, 与正午峰值相差不大, 与 f_0E_s 地方时变化一致.

分析发现, 较低强度 E_s 发生率地方时分布与中等和高强度 E_s 发生率地方时分布存在明显不同, 较低强度 E_s 最大发生率在 10:00 LT 左右, 而中等和高强度最大发生率在 15:00 LT 左右. Heelis 等^[22] 在 1974 年就发现潮汐风对引起电子的垂直运动, 其研究结果发现潮汐风在 06:00 LT—12:00 LT 所产生的向上垂直速度最大, 尽管其研究是针对 F 层的, 对 E 层同样存在相似的影响. 因此, 本文认为潮汐风在较低强度 E_s 形成过程中起着重要作用.

3 结论

利用 SPIDR 提供的 Puerto Rico 地区的 f_0E_s 数据对该地区 E_s 的逐日变化、逐月变化和地方时变

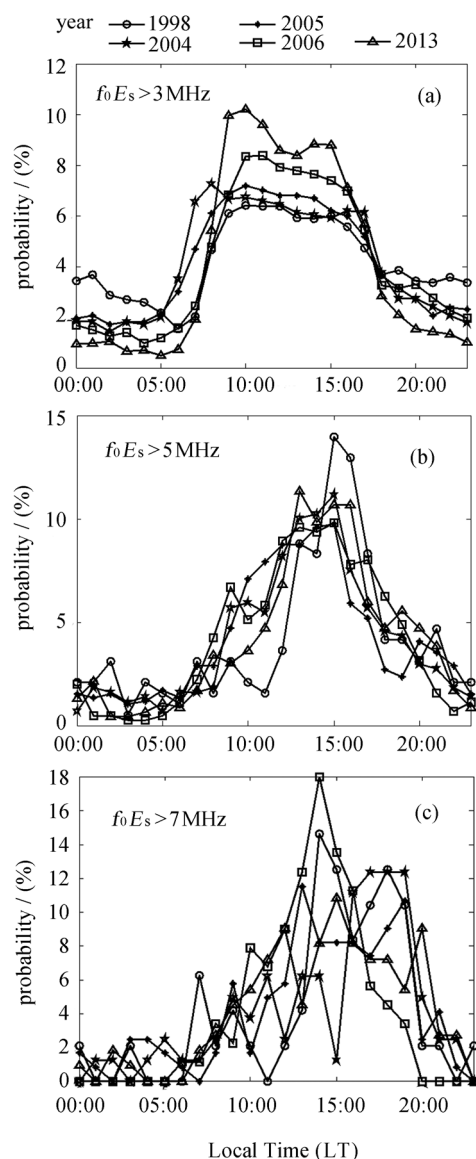


图 5 低强度 (a)、中等强度 (b) 及高强度 (c) E_s 发生率随地方时的变化

Fig. 5 Diurnal variation of weak (a), normal (b) and strong (c) E_s occurrence probability

化特性进行了分析, 认为 E_s 的形成与其上部和下部的电子通量存在关联. 结果表明, 大气行星波、风场、电场和潮汐风都有可能对 E_s 生成有重要影响.

(1) f_0E_s 日均值随时间呈震荡分布, 全年都在波峰与波谷之间剧烈变化, 没有变化相对平滑的月份. 小波局部功率谱分析显示这种震荡有较弱的 9~27 天周期, 这可能与大气行星波有关.

(2) E_s 主要发生在夏季, 5—8 月的发生率占全年的 40% 以上, 与以往研究结果一致.

(3) f_0E_s 随地方时的变化表现出明显的波峰与

波谷结构, f_0E_s 在 06:00 LT 左右达到最小; 之后快速上升, 每小时的 f_0E_s 变化最大可以超过 1 MHz, 并且其最大值可持续 3~4 h; 午夜之后存在异常高值以及日落之后的双峰结构, 分析认为其分别与午夜南向风场减弱和夜间电场变化引起的电子通量变化有关。

(4) E_s 主要出现在正午时段, 较低强度 ($3 \text{ MHz} < f_0E_s < 5 \text{ MHz}$) 的 E_s 发生率峰值时间段为 09:00 LT—16:00 LT, 中等强度 ($5 \text{ MHz} < f_0E_s < 7 \text{ MHz}$) 和高强度 ($f_0E_s > 7 \text{ MHz}$) 的 E_s 发生率峰值均在 14:00 LT 左右; 较低强度 E_s 发生率的地方时分布与中等和高强度 E_s 发生率地方时分布存在明显不同, 较低强度 E_s 发生率地方时分布与潮汐风引起的垂直漂移分布较为一致, 因此本文认为潮汐风在较低强度 E_s 形成过程中起着重要作用。

(5) 通过统计发现, E_s 的产生是一个极为复杂的过程, 可能存在风切变以外因素, 例如大气行星波、风场和电场等对其发生发展产生影响, 尤其是午夜 E_s 异常和日落双峰, 其发生次数虽然较少, 但其异常的高值说明 E_s 生成原因是复杂的, 其物理机制尚需深入的实测数据及理论证明。

致谢 E_s 临界频率数据由 SPIDR 提供。

参考文献

- [1] NYGREN T, JALONEN L, OKSMAN J, *et al.* The role of electric field and neutral wind direction in the formation of sporadic E-layer [J]. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1984, **46**: 373-381
- [2] SHI J K, WANG G J, REINISCH B W, *et al.* Relationship between strong range spread F and ionospheric scintillations observed in Hainan from 2003 to 2007 [J]. *J. Geophys. Res.*, 2011, **116**: A08306. doi:10.1029/2011JA016806
- [3] MATHEWS J D. Sporadic E: current views and recent progress [J]. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 1998, **60**: 413-435
- [4] DUNGEY J W. Effect of a magnetic field on turbulence in an ionized gas [J]. *J. Geophys. Res.*, 1959, **64**: 2188-2191
- [5] WHITEHEAD J D. Formation of the sporadic E layer in the temperate zones [J]. *Nature*, 1960, **188**: 567
- [6] AXFORD W I. The formation and vertical movement of dense ionized layers in the ionosphere due to neutral wind shears [J]. *J. Geophys. Res.*, 1963, **68**: 769-779
- [7] ROYRVIK O. Mid-latitude sporadic E-layers and vertical metal ion drift profiles [J]. *Planet. Space Sci.*, 1983, **31**: 253-264
- [8] BALSLEY B B, REY A, WOODMAN R F. On the plasma instability mechanisms responsible for E_s [J]. *J. Geophys. Res.*, 1976, **81**: 1391-1396
- [9] HYSELL D L, NOSSA E, LARSEN M F, *et al.* Dynamic instability in the lower thermosphere inferred from irregular sporadic E layers [J]. *J. Geophys. Res.*, 2012, **117**: A08305. doi:10.1029/2012JA017910
- [10] KAGAN L M, KELLEY M C. A thermal mechanism for generation of small-scale irregularities in the ionospheric E region [J]. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**: 5291-5303
- [11] BURCHILL J K, CLEMMONS J H, KNUDSEN D J, *et al.* High-latitude E region ionosphere-thermosphere coupling: A comparative study using in situ and incoherent scatter radar observations [J]. *J. Geophys. Res.*, 2012, **117**: A02301. doi:10.1029/2011JA017175
- [12] ZUO Xiaomin, WAN Weixing. The correlation between sporadic E-layer and solar activity [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2002, **45**(6): 759-765
- [13] WANG Xiao. Characteristics of Variation and Disturbances in Ionosphere in Low Latitude (Hainan) Region [D]. Beijing: Center for Space Science and Applied Research, CAS, 2004
- [14] KONG Qingyan, CHEN Yue, LIU Wen, *et al.* Investigation on E_s properties in representative region of China [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2012, **32**(4): 506-512 (孔庆颜, 陈跃, 刘文, 等. 中国典型区域 E_s 特性研究 [J]. 空间科学学报, 2012, **32**(4): 506-512)
- [15] HAN Yanming, HU Jin, KONG Qingyan, *et al.* Statistics on occurrence regularity of E_s in South of China [J]. *Chin. J. Radio Sci.*, 2009, **24**(5): 929-933
- [16] KARAMI K, GHADER S, BIDOKHTI A A, *et al.* Planetary and tidal wave-type oscillations in the ionospheric sporadic E layers over Tehran region [J]. *J. Geophys. Res.*, 2012, **117**: A04313, doi:10.1029/2011JA017466
- [17] WHITEHEAD J D. Sporadic E-Amystery solved: Part I [J]. *QST*, 1997, **10**: 39-41
- [18] WHITEHEAD J D. Sporadic E-Amystery solved: Part II [J]. *QST*, 1997, **11**: 38-42
- [19] NELSON G J, COGGER L L. Dynamic behavior of the nighttime ionosphere at Arecibo [J]. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 1971, **33**: 1711
- [20] VLASOV M N, KELLEY M C, MAKELA J J, *et al.* Intense nighttime flux from the plasmasphere during a modest magnetic storm [J]. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 2003, **65**: 1099
- [21] FEJER B G, FARLEY D T, WOODMAN R F, *et al.* Dependence of equatorial F-region vertical drifts on season and solar cycle [J]. *J. Geophys. Res.*, 1979, **84**: 5792
- [22] HEELIS R A, KENDALL P C, MOFFETT R J, *et al.* Electrical coupling of the E and F-regions and its effect on F-region drifts and winds [J]. *Planet. Space Sci.*, 1974, **22**: 743