0254-6124/2017/37(4)-414–10 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

HUANG Rongze, XU Jie, DENG Kun, HUANG Jiang, DENG Baichang, QUAN Hongjun. Statistical analysis of GPS scintillation and TEC depletion in temporal and spatial distributions over South China (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2017, **37**(4): 414-423. DOI:10.11728/cjss2017.04.414

华南地区电离层闪烁与 TEC 耗空的时间和空间分布统计分析 *

黄荣泽[1] 徐 杰[2] 邓 琨[3] 黄 江[4] 邓柏昌[1] 全宏俊[1]

1(华南理工大学物理与光电学院 广州 510640)

2(广东省生态气象中心 广州 510640)

3(华南理工大学广州学院 广州 510640)

4(广州气象卫星地面站 广州 510640)

摘 要 利用位于赤道异常区的深圳站 (22.59°N, 113.97°E) 2011 年 1 月至 2012 年 12 月及 2015 年 1 月至 2015 年 12 月监测到的 GPS-TEC 数据, 统计分析华南地区电离层闪烁与 TEC 耗空同时出现、电离层闪烁单独出现和 TEC 耗空单独出现 3 种现象的时间和空间分布特性. 结果表明: 这 3 种现象均主要发生在春秋季节; 闪烁与 TEC 耗空同时出现、闪烁单独出现和 TEC 耗空单独出现分别主要发生在纬度为 19°－23°N, 21°－24°N 和 24°－26°N 的空间区域. 探测到闪烁和 TEC 耗空同时出现、闪烁单独出现和 TEC 耗空单独出现的时间分别主要分布在 20:00 LT－22:00 LT, 21:00 LT－23:00 LT 和 22:30 LT－23:30 LT. 闪烁与 TEC 耗空同时出现、闪烁单独出现和 TEC 耗空单独出现 3 种现象的时间和空间分布特性对应了华南地区不规则体和赤道等离子体泡 (EPBs) 从产生到消失的演变过程.

关键词 华南地区, 电离层闪烁, TEC 耗空, 演变过程

中图分类号 P 352

Statistical Analysis of GPS Scintillation and TEC Depletion in Temporal and Spatial Distributions over South China

HUANG Rongze[1] XU Jie[2] DENG Kun[3] HUANG Jiang[4]

DENG Baichang[1] QUAN Hongjun[1]

1(*Department of Physics, South China University of Technology, Guangzhou* 510640)

2(*Guangdong Ecological Meteorology Center, Guangzhou* 510640)

3(*Department of Guangzhou, South China University of Technology, Guangzhou* 510640)

4(*Guangzhou Meteorological Satellite Ground Station, Guangzhou* 510640)

Abstract The temporal and spatial distribution of scintillations accompanied with Total Electron

* 国家自然科学基金项目 (4157040137) 和广东省科技厅计划项目 (2013B020200010) 共同资助

2016-08-04 收到原稿, 2017-02-26 收到修定稿

E-mail: xujiegz@aliyun.com

Content (TEC) depletions, scintillations with no TEC depletions, and TEC depletions with no scintillations are discussed. The data of ionospheric scintillation and TEC from January 2011 to December 2012, and from January 2015 to December 2015 are observed by the monitor setting at Shenzhen GPS station. The results show that these three types of events occurred mainly in spring and autumn. These three types of events occurred mainly from 19°N to 23°N, 21°N to 24°N and 24°N to 26°N, respectively. In addition, these three types of events occurred mainly from 20:00 LT to 22:00 LT, 21:00 LT to 23:00 LT, 22:30 LT to 23:30 LT, respectively. The temporal and spatial distributions of these three types of events are responsible for the evolution process of equatorial plasma irregularity over South China.

Key words South China, Ionospheric scintillation, TEC depletion, Evolution process

0 引言

日落后赤道低纬地区的电离层在瑞利–泰勒 (R-T) 不稳定性作用下会产生各种尺度的等离子密度不规则体. 当无线电波穿越这些不规则体时, 信号的相位和振幅快速发生变化, 此即为电离层闪烁现象. 闪烁使穿越电离层的无线电信号出现误码和信号畸变, 从而对无线通信和导航系统的可靠性和精度产生不良影响 [1]. TEC (Total Electron Content) 是卫星与接收机之间整个路径上每平方米的总电子含量, 单位为 TECU. TEC 主要反映 F 层的电子浓度, 因此可以通过 TEC 的变化来研究 F 层等离子密度不规则体的变化. 闪烁和 TEC 波动都与电离层扰动相关, 对闪烁和 TEC 的研究是电离层研究的主要内容和热点之一.

已有多种探测手段被用于研究电离层扰动, 例如非相干散射雷达、数字式测高仪及全天空成像仪等 [2−4]. 近年来, 由于全球卫星导航系统 (GPS) 可以对多颗星同时进行观测, 其已经成为监测 TEC 变化和 L 波段电离层闪烁的主要手段. Seif 等 [5] 利用位于马来西亚的 UKM 站 (2.55°N, 101.46°E) 2009 年 9 月至 2010 年 9 月的闪烁监测数据, 研究发现夜间电离层闪烁主要发生在 3, 8, 9 月份, 白天闪烁发生在 11, 12 月份. Muella 等 [6] 利用 Sao Luis 站 (2.33°S, 44.21°W) 2001 年 3 月至 2002 年 2 月的闪烁监测数据, 研究发现闪烁主要出现在地方时午夜之前. Zhang 等 [7] 利用北京、乌鲁木齐和武汉 GPS 观测数据计算的垂直总电子含量, 分析了发生于 2000 年 4 月 6 日到 8 日磁暴期间观测区域的电离层状态, 发现电离层负相暴与磁暴有直接的联系. Xu 等 [8] 利用 GPS 接收机台阵测量到的闪烁和 TEC 变化率 ROT 快速起伏图样, 估计 F 层不规则结构漂移速度, 研究结果表明, 利用单站多卫星观测估计电离层不规则结构漂移是一种合理可行的方法.

国内外很多研究机构已开展闪烁与 TEC 耗空在时间和空间分布关系的研究. Olwende 等 [9] 对 Narobi (1.27°S, 36.8°E) 的 TEC 数据进行分析, 发现 TEC 耗空的出现不一定伴有电离层闪烁. Quan 等 [10] 利用深圳站 2011 至 2012 年的 GPS 数据, 研究了中国华南地区电离层闪烁与 TEC 耗空的相关性, 发现大约有 60% 的闪烁伴随有 TEC 耗空. Xiong 等 [11] 利用海南三亚地区的闪烁和 TEC 数据, 研究了闪烁与 ROTI 指数的相关性, 发现 65% 的闪烁伴随 ROTI 波动. Deng 等 [1] 等利用 2008 年 1 月至 2012 年 3 月在广州站和深圳站监测到的 GPS 数据, 研究了华南地区上空闪烁和 TEC 耗空在时间和空间上的相关性, 发现在该地区电离层闪烁现象不是总伴有 TEC 耗空出现. Zuo 等 [12] 利用广州和茂名台站的监测数据, 分析比较了两地电离层闪烁出现的逐月变化及地方时变化和空间分布特征, 发现中等强度闪烁和强闪烁出现均呈现明显季节分布规律. 由于华南地区地处赤道异常北驼峰区域内, 赤道电离层不规则体的出现比较活跃. 本文在上述研究的基础上, 进一步利用华南地区 2011 年 1 月至 2012 年 12 月及 2015 年 1 月至 12 月深圳 GPS 观测站 (22.59°N, 113.97°E) 的监测数据, 研究该区域电离层闪烁和 TEC 耗空时空分布的相关性, 主要针对电离层闪烁和 TEC 耗空同时出现、电离层闪烁单独出现和 TEC 耗空单独出现这 3 种现象, 利用该区域赤道电离层不规则体产生的机理, 分析 3 种现象产生的原因.

1 数据处理

深圳站的 GSV 4004A GPS 电离层闪烁和 TEC 监测设备 (GISTM) 可同时对 11 颗 GPS 卫星 L1 波段 (1.575 GHz) 和 L2 波段 (1.227 GHz) 信号进行观测, 其观测的卫星电离层穿透点轨迹的地理纬度范围为 17°−28°N, 地理经度范围为 106°−127°E. 该设备的电离层闪烁和 TEC 数据采样周期为 1 min. 电离层闪烁研究中衡量闪烁强弱的重要指标是振幅闪烁指数 S_4, 指数 S_4 定义为每分钟计算 1 次的归一化信号强度标准差, 计算公式为

$$S_4 = \sqrt{\frac{\langle S_{\rm I}^2\rangle - \langle S_{\rm I}\rangle^2}{\langle S_{\rm I}\rangle^2}}.$$

式中 $\langle\cdot\rangle$ 表示求均值, $S_{\rm I}$ 由窄带功率和宽带功率之差得到, 一般采样周期为 20 ms. 这里认为当 $S_4 \geqslant 0.2$ 且持续时间约 10 min 即为一次闪烁事件, $S_4 < 0.2$ 则忽略不计. 为了避免多径效应等非电离层闪烁带来的影响, 这里只取卫星仰角大于 25° 的数据. S_4 指数对应的不规则体尺度由菲涅尔尺度决定, 主要由无线电波的波长和不规则体的高度决定, 即

$$D_{\rm F} = \sqrt{2\lambda z}.$$

其中, $D_{\rm F}$ 为 S_4 指数对应的菲涅尔尺度; λ 为 L1 波段的波长, $\lambda = 0.19$ m; z 为不规则体距离地面的高度, $z = 400$ km. 因此, 引起 GPS 信号 L1 波段闪烁的 F 层不规则体的尺度约为 400 m.

这里使用的 TEC ($N_{\rm TEC}$) 数据是从斜 TEC ($S_{\rm TEC}$) 换算得到的垂直 TEC ($V_{\rm TEC}$) 数据, 其单位为 TECU, 计算公式为

$$V_{\rm TEC} = S_{\rm TEC} \times \sqrt{1 - \left(\frac{R_{\rm e}\cos\theta}{R_{\rm e} + h_{\max}}\right)^2}.$$

其中, θ 为卫星仰角, $R_{\rm e}$ 为地球半径, $h_{\max}$ 为电离层到地面的垂直高度, 即简化单层模型的薄层到地面的竖直高度, 一般为 300∼400 km, 这里选取的是 400 km.

TEC 耗空定义为某一时刻 TEC 值迅速衰减, 经过一段时间后又恢复到衰减前的水平, 整个过程持续的时间称为 TEC 耗空时间, 衰减的最大值称为耗空深度. 这里定义某一时刻 TEC 衰减值大于 5 TECU 并且持续时间在 10∼60 min 以内为一次 TEC 耗空事件 [13]. ROT 定义为 TEC 偏差, 其值为某一时刻的 TEC 减去上一分钟的 TEC, 表示某一时刻的 TEC 变化率, 单位为 TECU·min^{-1}.

2 结果

2.1 典型事例分析

图 1 为 2015 年 3 月 13 日对 PRN1 和 PRN30 号卫星的观测结果. 图 1(a) 为 PRN1 号卫星的观测结果, 从上到下依次为仰角、穿刺点、S_4 指数、TEC 和 ROT 随世界时的变化. 从图 1(a) 可以看出, 在接近 12:30 UT 时, PRN1 号卫星观测到的 S_4 指数明显大于 0.2, 并且持续时间约为 20 min, 即出现一次闪烁事件; 但在相应时间内没有出现 TEC 耗空, 说明这是一次典型的闪烁单独出现事件; 由 ROT 变化图可以看出, 此次闪烁单独出现过程中 ROT 值始终大于 0. 图 1(b) 给出了 PRN30 卫星的观测结果, 从图 1(b) 可以看出, 在 12:36 UT 之前, S_4 指数均低于 0.2; 在 12:36 UT 时, S_4 指数迅速增长到 0.5 左右, 持续时间大约 30 min; 在 12:36 UT 之后的时间段内, TEC 出现明显的耗空, 耗空深度大约为 25 TECU, 持续时间同样为 30 min 左右, 这是一次典型的闪烁和 TEC 耗空同时出现的事件; 由 ROT 变化图可以看出, 闪烁和 TEC 耗空同时出现时, ROT 值先为负再变为正, ROT 波动最大值达到 5 TECU·min^{-1}. 但是发生在 13:24 UT 左右的闪烁没有观测到 TEC 耗空的出现, ROT 值的波动也非常小, 该事件也是一次闪烁单独出现事件.

图 2 为 2015 年 3 月 13 日观测到的闪烁和 TEC 耗空同时出现或者闪烁单独出现的 GPS 卫星运行轨迹. 图 2 表明: 2015 年 3 月 13 日总共探测到 11 次闪烁事件, 其中伴随有 TEC 耗空的事件 6 次; PRN3, PRN19 及 PRN23 仅探测到闪烁和 TEC 耗空同时出现, PRN1 仅探测到闪烁单独出现, PRN4, PRN17, PRN19 和 PRN30 既探测到闪烁和 TEC 耗空同时出现也探测到闪烁单独出现.

图 3 是 2011 年 3 月 20 日 PRN23 号卫星观测到的 TEC 耗空单独出现的情况. 由 TEC 变化图 (从上向下第四个图) 可以看出, 在 14:18 UT−14:30 UT 出现 TEC 耗空, 深度约为 8 TECU, 指数 S_4 低于 0.2, 没有闪烁出现, 这是一次典型是 TEC 耗空单独出现事件; 14:30 UT 左右深度约为 5 TECU 的 TEC 耗空

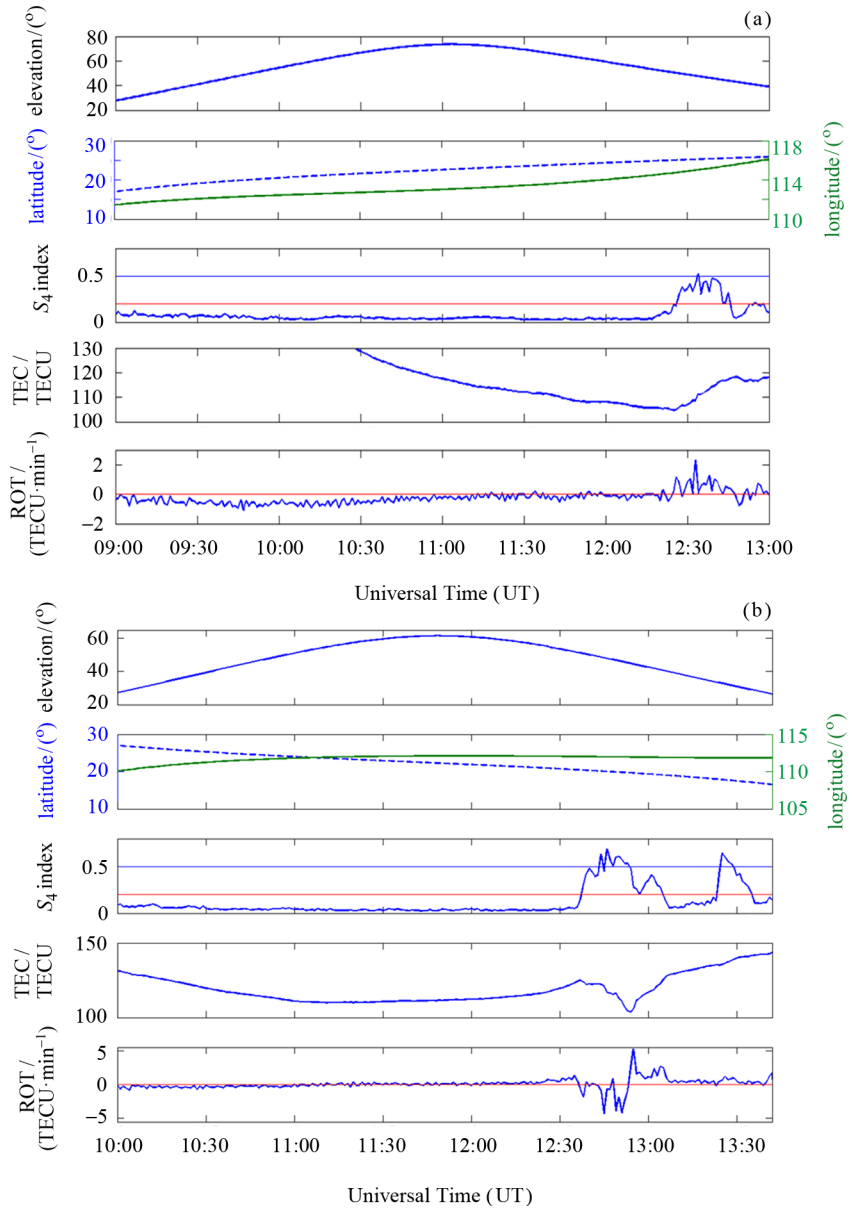

图 1　2015 年 3 月 13 日 PRN1 号卫星 (a) 和 PRN30 号卫星 (b) 观测到的 S_4 指数, TEC, ROT 及穿刺点地理经纬度随世界时的变化

Fig. 1　Variability of S_4 index, TEC, ROT, geographic latitude and longitude of the Ionospheric Pierce Point (IPP) detected by satellite PRN 1 (a) and PRN30 (b) on 13 March 2015

出现时同样没有观测到闪烁. 这两次 TEC 耗空单独出现事件发生过程中, ROT 值也是先为负再变为正, 最大值分别为 1.8 TECU·min^{-1} 和 1 TECU·min^{-1}.

2.2　季节变化特征

图 4(a)~(c) 分别为 2011, 2012 及 2015 年闪烁和 TEC 耗空同时出现、闪烁单独出现和 TEC 耗空单独出现的月分布图. 从图 4 可以看出, 3 种现象均主要发生在 3, 4, 9, 10 月份, 即春秋季节, 冬夏两个季节很少观测到.

2.3　纬度变化特征

图 5(a)~(c) 分别为 2011, 2012 及 2015 年闪烁和 TEC 耗空同时出现、闪烁单独出现和 TEC 耗空单独出现的纬度分布. 从图中可以看出, 闪烁和 TEC 耗空同时出现、闪烁单独出现和 TEC 耗空单独出现分别主要发生在纬度为 19°−23°N, 21°−24°N 和 24°−26°N 的空间区域.

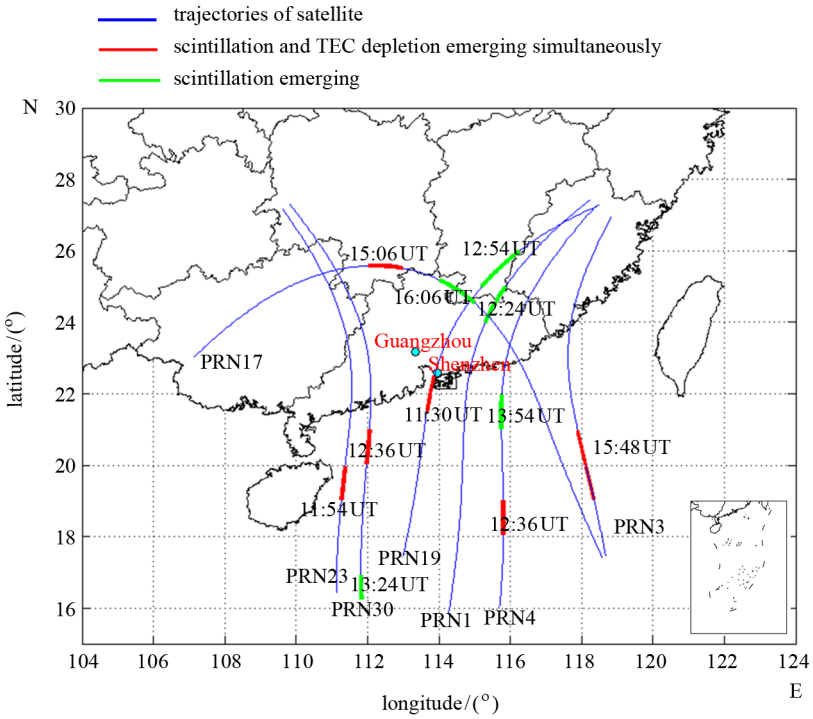

图 2 2015 年 3 月 13 日观测到的闪烁和 TEC 耗空同时出现及闪烁单独出现的时空分布 (标注时间表示事件发生时间)

Fig. 2 Spatial-temporal distributions of scintillation and TEC depletion emerging simultaneously and scintillation emerging solely detected over South China on 13 March 2015 (The time-labeling represents the event occurrence time)

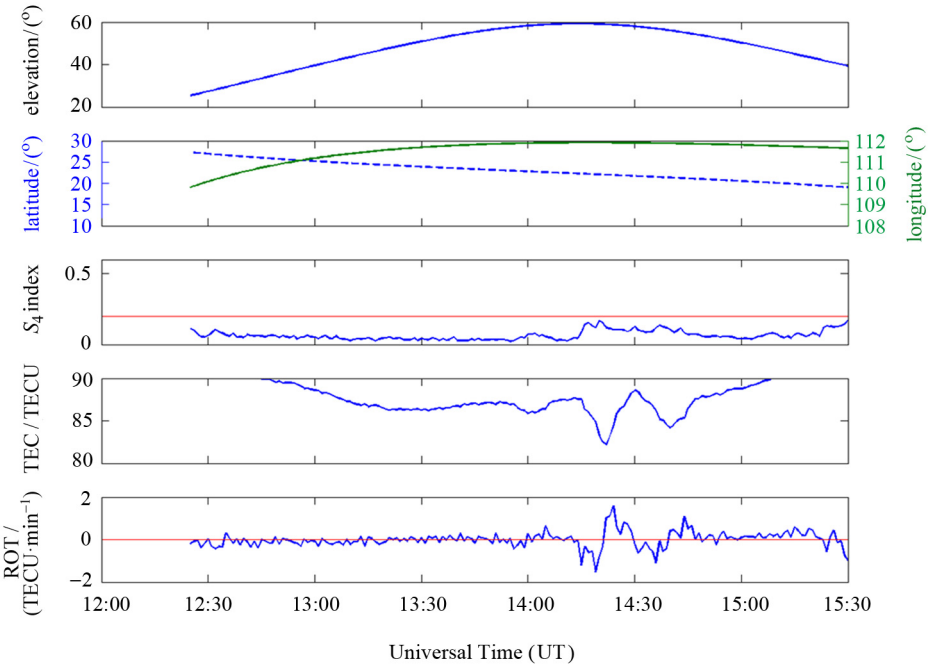

图 3 2011 年 3 月 20 日 PRN23 号卫星观测到的 S_4 指数, TEC, ROT 和穿刺点地理经纬度随世界时的变化

Fig. 3 Variability of S_4 index, TEC, ROT and geographic latitude and longitude of the Ionospheric Pierce Point (IPP) detected by satellite PRN23 on 20 March 2011

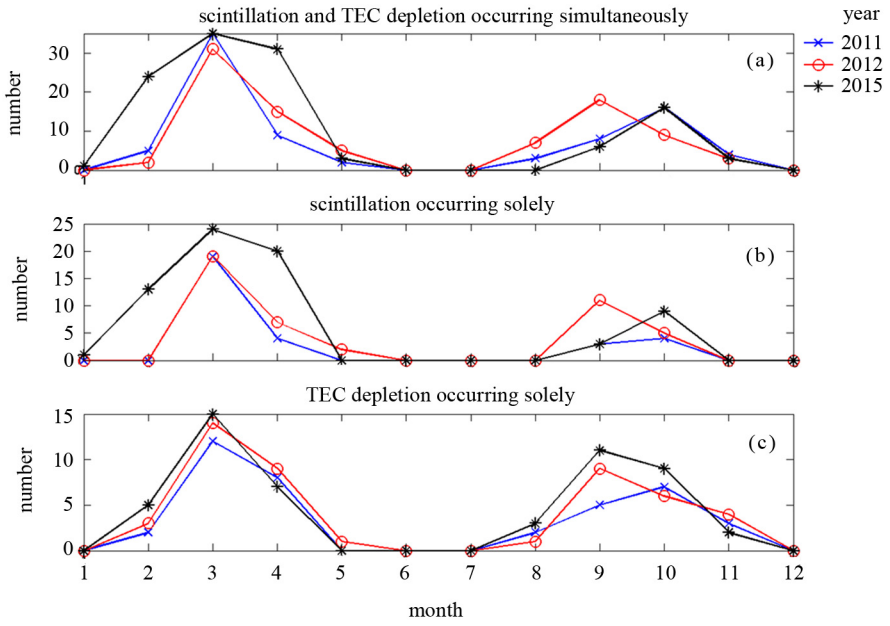

图 4 闪烁和 TEC 耗空同时出现 (a)、闪烁单独出现 (b) 和 TEC 耗空单独出现 (c) 的月分布

Fig. 4 Monthly distributions of scintillation and TEC depletion occurring simultaneously (a), scintillation occurring solely (b) and TEC depletion occurring solely (c)

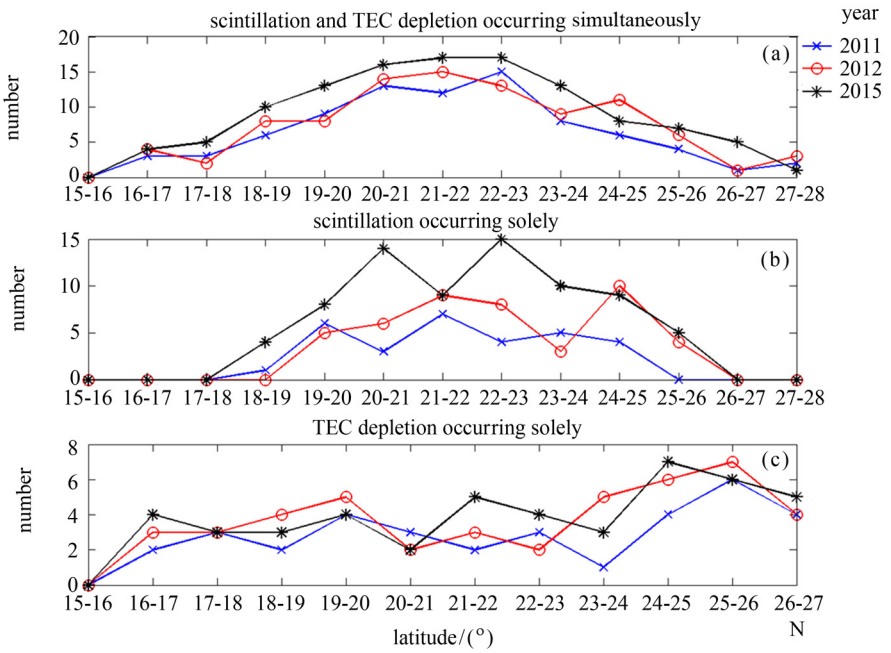

图 5 闪烁和 TEC 耗空同时出现 (a), 闪烁单独出现 (b) 和 TEC 耗空单独出现 (c) 的纬度分布

Fig. 5 Latitudinal distributions of scintillation and TEC depletion occurring simultaneously (a), scintillation occurring solely (b) and TEC depletion occurring solely (c)

2.4 时间变化特征

图 6(a)~(c) 分别为 2011, 2012 及 2015 年闪烁和 TEC 耗空同时出现、闪烁单独出现和 TEC 耗空单独出现的时间分布. 从图 6 可以看出, 闪烁和 TEC

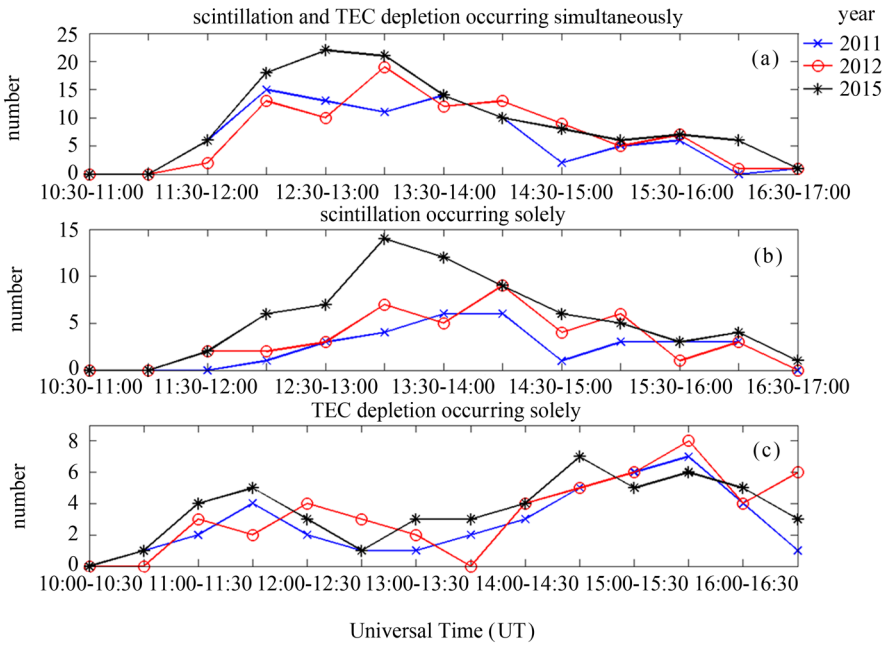

图 6 闪烁和 TEC 耗空同时出现 (a), 闪烁单独出现 (b) 和 TEC 耗空单独出现 (c) 的时间分布

Fig. 6 Temporal distributions of scintillation and TEC depletion occurring simultaneously (a), scintillation occurring solely (b) and TEC depletion occurring solely (c)

耗空同时出现、闪烁单独出现以及 TEC 耗空单独出现的时间分别主要分布在 12:00 UT−14:00 UT (20:00 LT−22:00 LT), 13:00 UT−15:00 UT (21:00 LT−23:00 LT) 和 14:30 UT−15:30 UT (22:30 LT−23:30 LT).

3 讨论

利用深圳站 2011 年 1 月至 2012 年 12 月及 2015 年 1 月至 2015 年 12 月的 GPS 数据, 分析了华南地区闪烁和 TEC 耗空同时出现、闪烁单独出现及 TEC 耗空单独出现 3 种现象随时间和空间的变化规律. 研究发现: 闪烁和 TEC 耗空同时出现、闪烁单独出现和 TEC 耗空单独出现 3 种现象主要发生在春秋季节; 闪烁和 TEC 耗空同时出现、闪烁单独出现和 TEC 耗空单独出现 3 种现象发生的纬度分别为 19°−23°N, 21°−24°N 和 24°−26°N; 时间主要分布在 12:00 UT−14:00 UT (20:00 LT−22:00 LT), 13:00 UT−15:00 UT (21:00 LT−23:00 LT) 和 14:30 UT−15:30 UT (22:30 LT−23:30 LT).

由于日落后东向电场急剧增强 (Pre-Reversal Enhancement, PRE), 并且与 $\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{B}$ 共同作用驱动赤道地区等离子体向上漂移 [14,15]. 同时, 到达 F 层底部的太阳辐射量减少 [16] 使得 F 层底部的等离子体浓度迅速降低. 因此 F 层底部与顶部之间产生巨大的等离子体密度梯度. 在重力和压力梯度的作用下, 向上漂移的等离子体到达 F 层顶部后开始下沉并沿着地磁场线扩散至低纬地区, 导致等离子体密度梯度变得不稳定. 在不稳定的等离子体密度梯度作用下, 赤道不规则体大量生成, 其尺度从几厘米到数百千米不等. 另外, 在 PRE 和 $\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{B}$ 共同作用下, 赤道地区将产生剧烈的东向电急流 (Eastward Electrojet, EEJ), 这些电急流在将等离子体传输至低纬地区时, 使低纬地区产生不稳定的等离子体密度梯度并在该区域激发等离子体泡 (Equatorial Plasma Bubbles, EPBs)[17].

统计结果表明, 闪烁和 TEC 耗空同时出现主要发生在 20:00 LT−22:00 LT, 此时间段通常是 PRE 和 EEJ 起作用的时间段. 东向电场控制赤道和低纬地区等离子体密度梯度不稳定的形成, 导致不规则体和 EPB 大量产生. 因此该阶段是闪烁和 TEC 耗空同时出现的高峰期. Basu 等 [18] 研究太阳活动高年和低年的电离层闪烁分布形态时发现强烈的闪烁主

要与赤道电离异常区的不规则体有关; Seemala 等 [19] 发现南美地区 TEC 耗空的季节和地理经纬度分布与 EPB 分布有关. 这些均表明闪烁与不规则体有关. 但是文献 [20, 21] 指出当 ROT 波动的最大值超过 1 TECU·min^{-1} 时, TEC 耗空主要由 EPB 引起, 图 2(b) 和图 3 也显示, 在观测到 TEC 耗空出现时, ROT 值均达到或超过 1 TECU·min^{-1}.

日落后几个小时内东向电场发生反转, 这将导致反向电急流 (Counter-Electrojet, CEJ) 的产生, 而西向电场和 CEJ 削弱了等离子体密度梯度的不稳定性, 使 EPB 产生的条件消失, 阻碍了 EPB 的产生 [22]. Biktash 等 [23] 指出当 F 层高度低于 300 km 时, 很少观测到不规则体; 而当高度超过 350 km 时, 可以观测到不规则体. 因此 F 层的高度也是不规则体能否生成的重要条件, 而 F 层的抬升又受到 PRE 驱动, 东向电场反向之后 F 层的高度将逐渐降低, 因此不再生成不规则体.

闪烁单独出现和 TEC 耗空单独出现的统计结果表明, 两种现象分别主要发生在 21:00 LT−23:00 LT (见图 6b) 和 22:30 LT−23:30 LT (见图 6c) 时间段内, TEC 单独出现的高峰期比闪烁单独出现略晚. 这两个时间段一般是东向电场发生反转之后. 东向电场反转之后, 随着 CEJ 的出现, EPB 不再产生, 此时 F 层高度降低幅度不大, 不规则体的产生尚未停止, 因此观测到的闪烁单独出现频率增大. 随着时间的推移, F 层的高度逐渐降低, 不规则体也不再产生. 不规则体和 EPB 沿着磁力线向北极扩散时不断衰退 [24], 随着时间推移, 尺度较小的不规则体率先衰退消失, 仅剩下尺度较大的 EPB. GPS 信号 L1 波段闪烁主要反映尺度为 400 m 的不规则体, 因此这一阶段通常只观测到 TEC 耗空而没有闪烁, 这是接近午夜时分 TEC 耗空单独出现频率增加的原因.

综上所述, 日落后不规则体或 EPB 的产生过程主要受东向电场和 EEJ 影响. 东向电场和 EEJ 未反转之前, 既有不规则体也有 EPB 产生; 东向电场和 EEJ 反转之后, EPB 很少生成, F 层高度逐渐降低且不规则体也不再生成, 随着时间的推移, EPB 和不规则体将逐渐消失. 图 7 是 2015 年 3 月 13 日海南富克 VHF 雷达记录到的电离层不规则体和 EPB 从产生到消失的过程. 从图 7 可以看出, 从夜间 12:00 UT

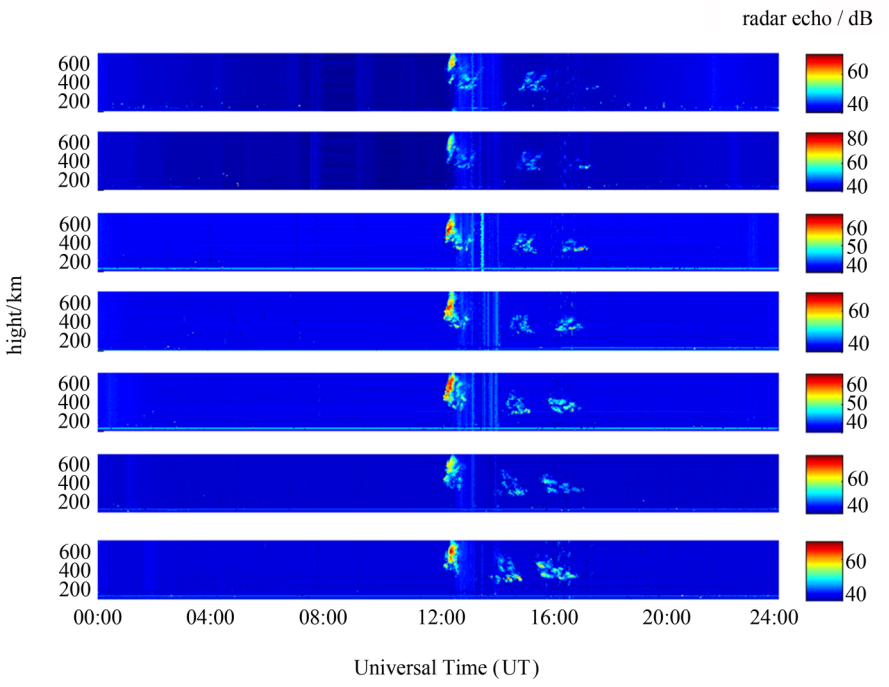

图 7 2015 年 3 月 13 日海南富克 VHF 雷达记录到的电离层不规则体和 EPB, 从上至下分别为 VHF 雷达波束 1~7 的观测结果

Fig. 7 Ionosphere irregularities and EPB recorded by Fuke VHF radar on 13 March 2015. The subgraphs from top to bottom are observations of 1~7 VHF radar bean respectively

开始变化图出现明显的斑块, 斑块高度在300~500 km之间, 其表示不规则体和 EPB 同时出现. 不规则体和 EPB 同时出现导致闪烁和 TEC 耗空同时出现, 图 1(b) 所示深圳 GPS 观测站观测到的闪烁和 TEC 耗空时间稍微延迟是因为深圳的纬度比海南富克略高). 随着时间推移, 斑块高度逐渐降低并消失, 即 F 层高度逐渐降低, 不规则体和 EPB 也渐渐消失. 由此可以看出, 电离层 TEC 耗空及闪烁的时空分布特征符合华南地区不规则体和 EPB 从产生到消失的演化过程.

闪烁指数 S_4 可能对应 F 层或 E 层的不均匀体 (如 Es). 但是文献 [25—27] 大量研究表明, 不同强度的 Es 在夏季白天出现率最大, 其日变化有明显的规律即伴随日出出现率显著增加而日落后骤然减少. 本文提到的闪烁现象绝大部分出现在春秋两季, 并且是在日落后至午夜间出现, 因此认为 Es 对本文提到的闪烁现象影响可以忽略.

另外, 统计发现闪烁和 TEC 耗空同时出现、闪烁单独出现和 TEC 耗空单独出现 3 种现象均主要发生在春秋季节, 这与文献 [28] 的研究结果一致. 文献 [28] 利用海南台站 2003 年 7 月至 2005 年 6 月的 GPS 电离层闪烁监测资料, 对该地区 L 波段电离层闪烁特性分析的结果表明, 闪烁的频率和强度在春秋季明显增大, 在冬季和夏季明显减小. 这是因为春秋分期间太阳直射赤道地区, 太阳日落线与磁力线趋于平行, 导致 PRE 增强, 而 PRE 的增强对磁赤道区日落后的密度梯度不稳定性起放大作用, 有利于不规则体和 EPB 的产生; 而在冬 (夏) 至期间, 太阳直射南 (北) 回归线, 太阳日落线与磁力线夹角最大, 对 PRE 的影响变小, 不规则体或 EPB 的产生也相应减少 [29,30]. 因此春秋季节会观测到大量的闪烁和 TEC 耗空, 而冬夏季节很少观测到.

4 总结

利用位于赤道异常北驼峰区域内的深圳 GPS 观测站 2011 年 1 月至 2012 年 12 月及 2015 年 1 月至 2015 年 12 月监测到的 GPS-TEC 数据, 统计了华南地区闪烁和 TEC 耗空同时出现、闪烁单独出现和 TEC 耗空单独出现 3 种现象的时间和空间分布特性, 并分析其产生的原因, 主要结论如下.

这 3 种现象都有明显的季节、时间和纬度依赖性. 3 种现象的季节、时间和空间分布主要由东向电场控制. 3 种现象的时间和空间分布特性符合华南地区不规则体和 EPBs 从产生到消失的演变过程.

致谢 GPS-TEC 数据和 VHF 雷达数据由子午工程提供.

参考文献

[1] DENG Baichang, HUANG Jiang, LIU Weifeng, *et al.* GPS scintillation and TEC depletion near the northern crest of equatorial anomaly over South China [J]. *Adv. Space Res.*, 2013, **51**(3): 356-365

[2] ZHONG Xiaoyan, ZHANG Manlian, ZHANG Shunrong, *et al.* An investigation on plasmaspheric electron content derived from ISR and GPS observations at Millstone Hill [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2013, **56**(3): 738-745 (种小燕, 张满莲, 张顺荣, 等. 基于非相干散射雷达和 GPS 观测研究 Millstone Hill 地区等离子体层电子含量 [J]. 地球物理学报, 2013, **56**(3): 738-745)

[3] XU Zhonghua, LIU Ruiyuan, LIU Shunlin, *et al.* Variations of the ionospheric F_2 layer critical frequency at Zhongshan Station, Antarctica [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2006, **49**(1): 1-8 (徐中华, 刘瑞源, 刘顺林, 等. 南极中山站电离层 F2 层临界频率变化特征 [J]. 地球物理学报, 2006, **49**(1): 1-8)

[4] WU Qi, YU Tao, LIN Zhaoxiang, *et al.* Night airglow observations to irregularities in the ionospheric F region over Hainan [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2016, **59**(1): 17-27 (吴祺, 余涛, 林兆祥, 等. 海南电离层 F 区不规则体的气辉观测 [J]. 地球物理学报, 2016, **59**(1): 17-27)

[5] SEIF A, ABDULLAH M, HASBI A M, *et al.* Investigation of ionospheric scintillation at UKM station, Malaysia during low solar activity [J]. *Acta Astron.*, 2012, **81**(1): 92-101

[6] MUELLA M T A H, DE PAULA E R, KANTOR I J, *et al.* Occurrence and zonal drifts of small-scale ionospheric irregularities over an equatorial station during solar maximummagnetic quiet and disturbed conditions [J]. *Adv. Space Res.*, 2009, **43**(12): 1957-1973

[7] ZHANG Donghe, XIAO Zuo, GU Shifen, *et al.* Observational study of ionospheric TEC during the magnetic storm on April 6—8, 2000 [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2002, **22**(3): 212-219 (张东和, 肖佐, 古士芬, 等. 2000 年 4 月 6—8 日磁暴期间电离层 TEC 观测研究 [J]. 空间科学学报, 2002, **22**(3): 212-219)

[8] XU Liang, XU Jisheng, ZHU Jie, *et al.* GPS measurements of ionospheric irregularity drifts and their initial results [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2009, **52**(1): 1-10 (徐良, 徐继生, 朱劼, 等. 电离层不规则结构漂移的 GPS 测量及其初步结果 [J]. 地球物理学报, 2009, **52**(1): 1-10)

[9] OLWENDO J O, CILLIERS P J, BAKI P, *et al.* Us-

ing GPS-SCINDA observations to study the correlation between scintillation, total electron content enhancement and depletions over the Kenyan region [J]. *Adv. Space Res.*, 2012, **49**(9): 1363-1372

[10] QUAN Hongjun, LIN Guoguo, DENG Baichang, *et al*. Correlation between ionospheric scintillation and TEC depletion as well as enhancement in South China [J]. *J. South China Univ. Tech.: Nat. Sci. Ed.*, 2013, **41**(12): 129-135, 144 (全宏俊, 林果果, 邓柏昌, 等. 华南地区 TEC 耗尽及增强与电离层闪烁的相关性 [J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2013, **41**(12): 129-135, 144)

[11] XIONG Bo, WAN Weixing, NING Baiqi, *et al*. A comparison and analysis of the S4 index, C/N and ROTI over Sanya [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2007, **50**(6): 1639-1648 (熊波, 万卫星, 宁百齐, 等. 海南三亚地区 S4 指数与 C/N、ROTI 的比较分析 [J]. 地球物理学报, 2007, **50**(6): 1639-1648)

[12] ZUO Xiaomin, HUANG Jiang, XIA Chunliang, *et al*. Investigation of ionospheric scintillations over South China [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2014, **34**(6): 802-808 (左小敏, 黄江, 夏淳亮, 等. 华南地区电离层闪烁的时空分布特征研究 [J]. 空间科学学报, 2014, **34**(6): 802-808)

[13] DENG Baichang, HUANG Jiang, KONG Debao, *et al*. Temporal and spatial distributions of TEC depletions with scintillations and ROTI over south China [J]. *Adv. Space Res.*, 2015, **55**(1): 259-268

[14] DE PAULA E R, RODRIGUES F S, IYER K N, *et al*. Equatorial anomaly effects on GPS scintillations in Brazil [J]. *Adv. Space Res.*, 2003, **31**(3): 749-754

[15] DE REZENDE L F C, DE PAULA E R, BATISTA I S, *et al*. Study of ionospheric irregularities during intense magnetic storms [J]. *Rev. Bras. Geof.*, 2007, **25**(Supp. 2): 151-158

[16] KELLEY M C. The Earth's Ionosphere [M]. San Diego: Academic Press Inc., 1989

[17] FEJER B G, SCHERLIESS L, DE PAULA E R. Effects of the vertical plasma drift velocity on the generation and evolution of equatorial spread *F* [J]. *J. Geophys. Res.*, 1999, **104**(A9): 19859-19869

[18] BASU S, MACKENZIE E, BASU S. Ionospheric constraints on VHF/UHF communications links during solar maximum and minimum periods [J]. *Radio Sci.*, 1988, **23**(3): 363-378

[19] SEEMALA G K, VALLADARES C E. Statistics of total electron content depletions observed over the South American continent for the year 2008 [J]. *Radio Sci.*, 2011, **46**(5): RS5019

[20] PI X, MANNUCCI A J, LINDQWISTER U J, *et al*. Monitoring of global ionospheric irregularities using the worldwide GPS network [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1997, **24**(18): 2283-2286

[21] KINTNER P M, LEDVINA B M, DE PAULA E R. GPS and ionospheric scintillations [J]. *Space Weather*, 2007, **5**(9): S09003. DOI: 10.1029/2006SW000260

[22] NGWIRA C M, SEEMALA G K, HABARULEMA J B. Simultaneous observations of ionospheric irregularities in the African low-latitude region [J]. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, 2013, **97**: 50-57

[23] BIKTASH L Z. Role of the magnetospheric and ionospheric currents in the generation of the equatorial scintillations during geomagnetic storms [J]. *Ann. Geophys.*, 2004, **22**(9): 3195-3202

[24] COSTA E, KELLEY M C. On the role of steepened structures and drift waves in equatorial spread F [J]. *J. Geophys. Res.*, 1978, **83**(A9): 4359-4364

[25] ZUO Xiaomin, WAN Weixing. The simulation analysis of mid-latitude sporadic E-layers [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2003, **23**(5): 371-378 (左小敏, 万卫星. 中纬突发 E 层特性的模拟分析 [J]. 空间科学学报, 2003, **23**(5): 371-378)

[26] HAN Yanming, HU Jin, KONG Qingyan, *et al*. Statistics on occurrence regularity of Es in south of China [J]. *Chin. J. Radio Sci.*, 2009, **24**(5): 929-933 (韩彦明, 胡进, 孔庆颜, 等. 中国南部地区 Es 层出现规律统计及分析 [J]. 电波科学学报, 2009, **24**(5): 929-933)

[27] KONG Qingyan, CHEN Yue, LIU Wen, *et al*. Investigation on Es properties in representative region of China [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2012, **32**(4): 506-512 (孔庆颜, 陈跃, 柳文, 等. 中国典型区域 Es 特性研究 [J]. 空间科学学报, 2012, **32**(4): 506-512)

[28] SHANG Sheping, SHI Jiankui, GUO Jianshan, *et al*. Ionospheric scintillation monitoring and preliminary statistic analysis over Hainan region [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2005, **25**(1): 23-28 (尚社平, 史建魁, 郭兼善, 等. 海南地区电离层闪烁监测及初步统计分析 [J]. 空间科学学报, 2005, **25**(1): 23-28)

[29] TSUNODA R T. Control of the seasonal and longitudinal occurrence of equatorial scintillations by the longitudinal gradient in integrated *E* region Pedersen conductivity [J]. *J. Geophys. Res.*, 1985, **90**(A1): 447-456

[30] TSUNODA R T. On seeding equatorial spread F during solstices [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2010, **37**(5): L05102