0254-6124/2014/34(6)-802–07 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Zuo Xiaomin, Huang Jiang, Xia Chunliang, Xu Jie. Investigation of ionospheric scintillations over South China (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2014, **34**(6): 802-808, doi:10.11728/cjss2014.06.802

华南地区电离层闪烁的时空分布特征研究 *

左小敏[1] 黄 江[2] 夏淳亮[3] 徐 杰[2]

1(中国地质大学数学与物理学院 武汉 430074)

2(广州气象卫星地面站 广州 510640)

3(中国地质大学地球物理与空间信息学院 武汉 430074)

摘 要 利用位于赤道异常区的广州 (23.17°N, 113.34°E) 和茂名 (21.45°N, 111.31°E) 两台站 2011 年 7 月至 2012 年 6 月观测到的 GPS 电离层闪烁数据, 分析比较了这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. 结果表明, 中等强度闪烁 ($S_4 > 0.4$) 和强闪烁 ($S_4 > 0.6$) 的出现均呈现明显季节分布规律, 两站的闪烁活动均表现出春秋强, 冬夏弱的特点, 在时间上主要发生在 20:00 LT—24:00 LT; 从空间分布来看, 两站的闪烁活动在 2011 年秋季, 闪烁出现的区域比较分散, 而在 2012 年春季, 主要在两站上空区域出现的闪烁最为频繁.

关键词 华南地区, 电离层闪烁, S_4 指数

中图分类号 P 352

Investigation of Ionospheric Scintillations over South China

ZUO Xiaomin[1] HUANG Jiang[2] XIA Chunliang[3] XU Jie[2]

1(*School of Mathematics and Physics, China University of Geosciences, Wuhan* 430074)

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

3(*Institute of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan* 430074)

Abstract Data recorded by GPS ionospheric scintillation monitors in Guangzhou (23.17°N, 113.34°E) and Maoming (21.45°N, 111.31°E) stations, which are situated near the northern crest of the equatorial ionosphere anormaly, has been used to study the day-to-day, month-to-month, local time and spatial variation characteristics of ionospheric amplitude scintillation during the period from July 2011 to June 2012. The results show that different intensity of amplitude scintillations has common temporal variation characteristics. The scintillation activities with $S_4 > 0.4$ and $S_4 > 0.6$ mostly occur from 20:00 LT to 24:00 LT in spring and autumn. Spatially, scintillations distribute throughout the large region with the latitude from 18° to 27° and the longitude from 109° to 118° for Guangzhou and the latitude from 17° to 26° and the longitude from 107° to 116° for Maoming

* 国家自然科学基金项目资助 (41004067)

2013-12-30 收到原稿, 2014-07-26 收到修定稿

E-mail: zuoxiaomin11@aliyun.com

in the fall of 2011. However, scintillations mainly appear in a small area overhead in the spring of 2012 of both stations.

Key words South China, ionospheric scintillations, S_4 index

0 引言

电离层闪烁是指当无线电波穿越电离层传播时, 由于电离层中电子密度不规则体引起的信号幅度、相位和到达角等快速变化的现象. 电离层闪烁会导致穿越电离层的通信出现误码和信号畸变, 从而对卫星通信和导航系统的可靠性和精度产生影响. 随着全球范围内卫星通信和导航系统的广泛应用, 人们对空间电磁环境的依赖性也越来越强, 观测研究电离层闪烁并进一步预报电离层扰动的情况, 有助于及时采取措施, 避免地面通信和卫星通信等出现故障, 这也是当前空间天气研究中的重要内容和热点之一.

有多种技术手段可用于检测不同尺度的电离层不规则体及其对无线电波传播的影响, 例如非相干散射雷达、VHF 雷达和地面处置探测仪等. 20 世纪 90 年代, GPS 的构建不仅使导航定位技术发生了极重要的提升, 也为电离层闪烁的观测提供一种强有力的手段. 长期的观测资料表明, 赤道和两极地区的电离层闪烁最强, 中纬地区闪烁较弱而且出现的概率较小. Thomas 等 [1] 利用澳大利亚北–东南亚区的 GPS 电离层闪烁监测网观测数据, 对该区域的 GPS 电离层闪烁进行了初步分析. Cervera 等 [2] 对该地区 GPS 电离层闪烁观测结果和电离层闪烁模型 WBMOD 结果进行了比较研究. Seif 等 [3] 研究了位于磁赤道异常区南驼峰附近的 UKM 台站一年的闪烁数据, 发现夜间闪烁事件主要发生在 3 月、8 月和 9 月, 白天闪烁事件主要发生在 11 月和 12 月.

中国长江 (上海、武汉、重庆) 以南的低纬度地区, 特别是台湾、福建、广东、广西、海南及南海地区, 均处在磁赤道异常区的驼峰附近区域, 其电离层闪烁出现率和严重程度较磁赤道和极区显著, 在全球范围内是电离层闪烁衰落出现最频繁、影响最严重的地区之一 [4]. 随着 GPS 的广泛使用, 中国中低纬地区 GPS 电离层闪烁的观测研究不断深入. Shang 等 [5] 利用海南 GPS 电离层闪烁监测数据, 对海南地区闪烁发生时间、季节等变化特征进行了统计研究, 得出闪烁主要发生在 9−11 月的日落至午夜时分; Xu 等 [6] 对中国武汉和桂林的 GPS 闪烁数据进行了分析, 认为闪烁活动主要发生在日落后至黎明, 空间分布集中在卫星仰角 50° 以下的东南和西南区域. Li[7] 研究了磁暴期间武汉地区电离层闪烁的响应情况. Wang 等 [8] 分析了广州地区 2007−2008 年的电离层闪烁活动, 发现弱闪烁的发生率在夏季有明显增加. Hu 等 [9] 将海南三亚一年的 GPS 闪烁观测数据与 GISM 模式预测结果进行了比较分析, 认为 GISM 模式在季节变化上仅仅对中等强度闪烁的预测效果较好, 对于日变化和空间分布的预测与实际观测有一些差异.

本文对比分析了位于低纬电离层赤道异常区的华南地区广州 (23.17°N, 113.34°E) 和茂名 (21.45°N, 111.31°E) 的 GPS 观测站 2011 年 7 月至 2012 年 6 月连续一年的电离层闪烁数据, 对华南地区电离层闪烁出现的时空分布特性进行了研究.

1 数据处理方法

电离层闪烁研究中衡量闪烁强度的重要指数是反映信号强度幅度变化的 S_4 指数, 其定义为每分钟信号强度的归一化标准偏差, 有时为了更加精确反映幅度的变化情况, 信号强度还要先经过滤波方式剔除由于信号源运动及多径效应等带来的环境噪声的影响. 其基本表达式为 [10]

$$S_4 = \sqrt{\frac{\langle S_{\rm I}^2\rangle - \langle S_{\rm I}\rangle^2}{\langle S_{\rm I}\rangle^2}}. \tag{1}$$

式中, $\langle\cdot\rangle$ 表示一分钟均值, 信号强度 $S_{\rm I}$ 由窄带功率与宽带功率之差得到, 也就是接收到的卫星信号功率 (一般采样频率为 50 Hz). 当闪烁增强时, S_4 指数增大, 当 $S_4 = 1$ 时, 通常认为闪烁达到饱和.

一般情况下, 将幅度闪烁分为 4 个等级, 即 $S_4 \leqslant 0.2$ 为无闪烁, $0.2 < S_4 \leqslant 0.4$ 为弱闪烁, $0.4 < S_4 \leqslant 0.6$ 为中等闪烁, $S_4 \geqslant 0.6$ 为强闪烁. 通过对广州和茂名台站接收到的所有卫星信号 S_4 的变化进行分析和计算, 图 1 给出了广州和茂名台站 9 月 23 日 08:00 LT

至 9 月 25 日 08:00 LT 连续 48 h 的 S_4 变化情况, 从图 1 可以看出, 广州和茂名台站的 S_4 背景噪声值均略小于 0.3, 因此本文分析中认为 $S_4 \geqslant 0.3$ 才有闪烁发生. 重点对 $S_4 > 0.4$ 的中等强度闪烁和 $S_4 > 0.6$ 的强闪烁发生规律进行分析.

由于信号幅度在低仰角时容易受到多径效应和本地噪声的影响, 在本文分析中, 根据实际经验, 卫星仰角落在 $0° \sim 30°$ 范围的观测数据不予考虑.

2 季节变化和地方时变化特征

图 2 给出了 2011 年 7 月 1 日至 2012 年 6 月 30 日一年间广州和茂名台站有效 S_4 数据的变化情况. 从图 2 可以看出, 在这一年中两站的闪烁活动非常频繁, 有大量 > 0.3 的 S_4 指数出现, 特别是 2011 年秋季 (9−11 月) 和 2012 年春季 (3−4 月), 电离层闪烁活动非常活跃, 部分闪烁指数达到 0.8 以上.

为能更细致地显示两台站不同强度闪烁活动的逐日变化特征, 分别计算出 $S_4 > 0.4$ 的中等强度闪烁和 $S_4 > 0.6$ 的强闪烁的每天发生率. 这里的发生率定义为每个时段接收到的幅度闪烁指数大于某给定值的个数与该时段总接收有效数据个数之比. 图 3 和图 4 分别给出了广州台站和茂名台站不同强度闪烁活动发生率的逐日变化. 从图中可以看出, 中等强度闪烁和强闪烁的发生率均呈现出明显的季节分布规律, 两站的闪烁活动表现出春秋强冬夏弱的特点. 从整体来看, 广州台站的闪烁活动在 2011 年秋季要强于 2012 年春季, 尤其是 2011 年 9 月初的发生率

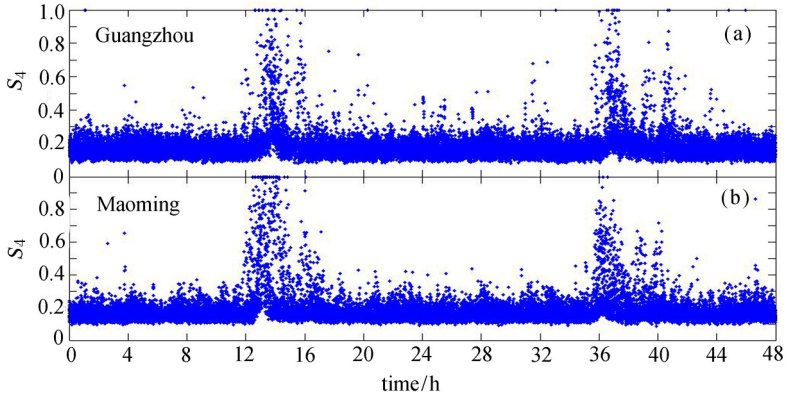


图 1 2011 年 9 月 23 日 08:00 LT 至 9 月 25 日 08:00 LT 连续 48 h 的 S_4 变化情况

Fig. 1 S_4 index scintillation activities observed at Guangzhou and Maoming station from 08:00 LT, 23 September to 08:00 LT, 25 September in 2011

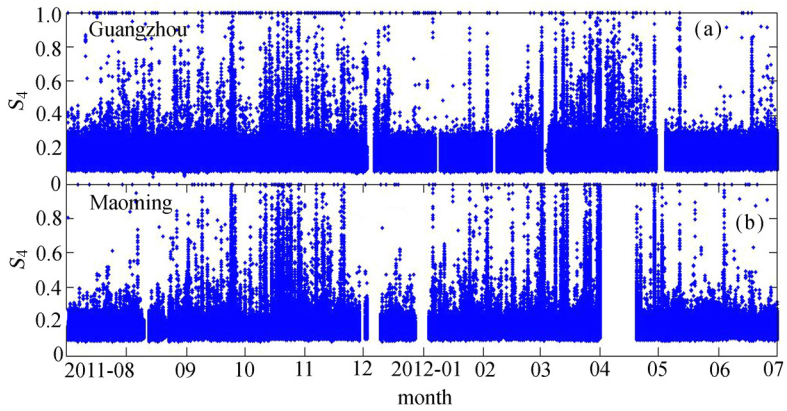


图 2 2011 年 7 月至 2012 年 6 月广州和茂名台站 S_4 的变化

Fig. 2 Day-to-day variations of the S_4 index scintillation activities observed at Guangzhou and Maoming station from July 2011 to June 2012

达到最大. 而茂名台站的闪烁活动在 2012 年春季强于 2011 年秋季, 2012 年 4 月底发生率达到最大.

图 5 和图 6 分别给出了广州和茂名地区一年中每月 S_4 指数随地方时的变化. 从图 5 可以看出, 广州地区在 2011 年 9—11 月和 2012 年的 3—4 月闪烁活动频繁, 在时间上主要发生在 20:00 LT—24:00 LT.

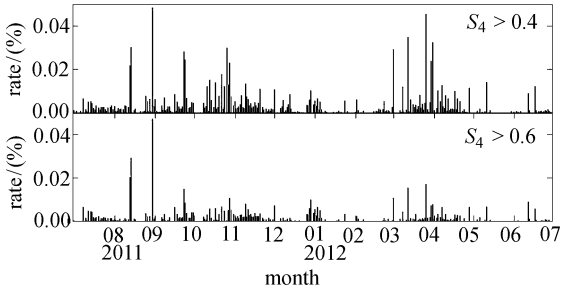


图 3 2011 年 7 月至 2012 年 6 月广州台站不同强度闪烁发生率的逐日变化

Fig. 3 Day-to-day variability of the occurrence rate of different intensity of amplitude scintillation observed at Guangzhou station from July 2011 to June 2012

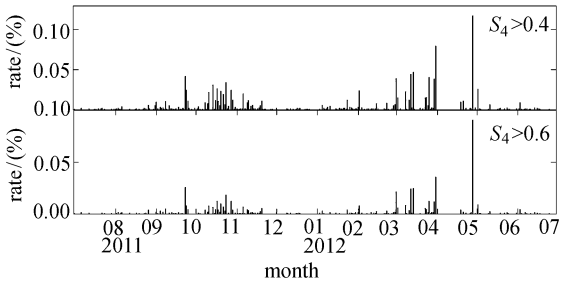


图 4 2011 年 7 月至 2012 年 6 月茂名台站不同强度闪烁发生率的逐日变化

Fig. 4 Day-to-day variability of the occurrence rate of different intensity of amplitude scintillation observed at Maoming station from July 2011 to June 2012

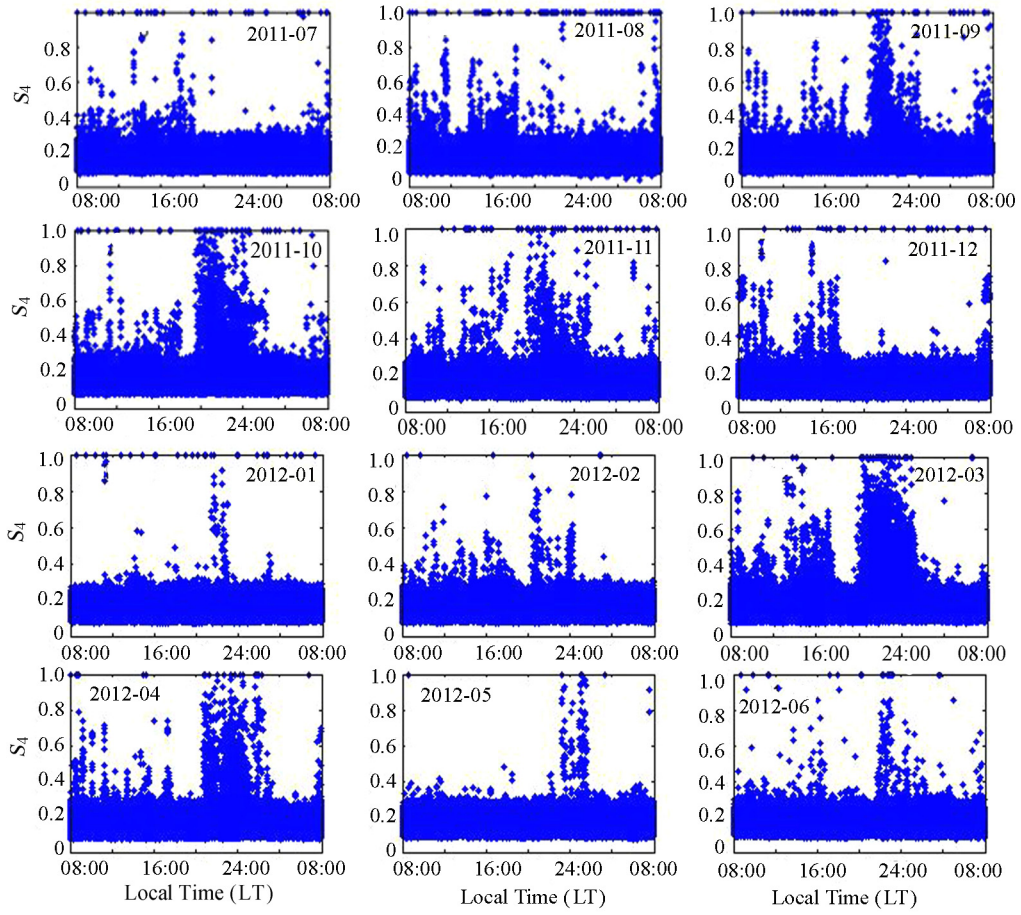


图 5 广州地区 S_4 指数随地方时的变化

Fig. 5 Month-to-month variations of the S_4 index scintillation activities observed at Guangzhou station

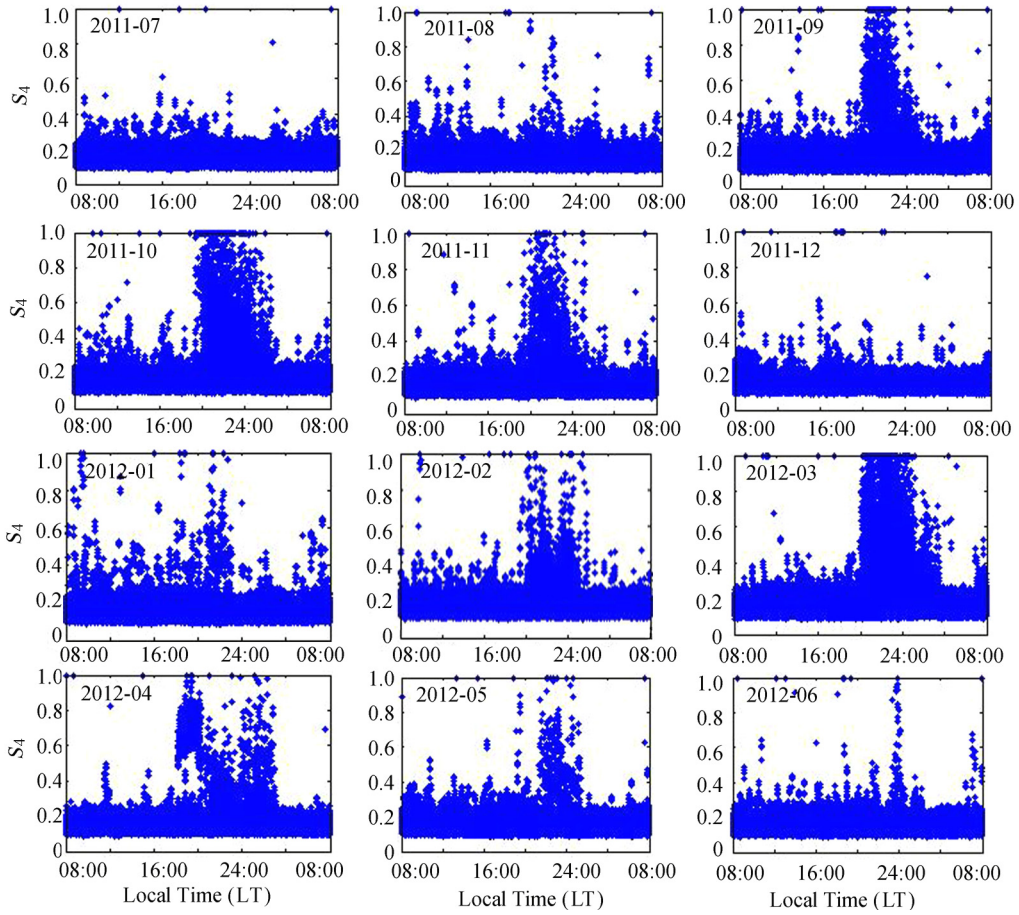


图 6 茂名地区 S_4 指数随地方时的变化

Fig. 6 Month-to-month variations of the S_4 index scintillation activities observed at Maoming station

茂名地区也是在这一时间段内闪烁活动最频繁, 而其他月份相对比较平静. 一般认为, 近磁赤道区电离层电波闪烁主要由在磁赤道生成的 F 层不规则体沿磁力线扩散到探测区域所致, 而赤道电离层不规则体基本上是一种夜间现象 [6], 本文的分析结果也证实了这一点.

3 空间分布特征

假设电离层薄层模型的高度为 400 km, 计算出各卫星信号的穿刺点, 给出卫星信号穿越电离层时的轨迹在经纬地图上的投影, 图 7 给出了广州和茂名台站上空一天可接收到的卫星轨迹分布, 从图 7 可以看出, 在 105°−120°E, 15°−25°N 的区域内, 卫星在电离层的投影轨迹基本上是均匀的. 茂名站的观测区域比广州站的纬度略低.

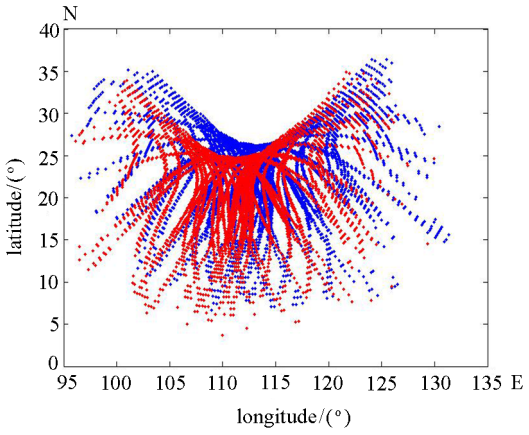


图 7 广州和茂名台站上空卫星轨迹分布 (蓝色为广州台站, 红色为茂名台站)

Fig. 7 Distribution of the station's overhead satellite path (blue standing for Guangzhou and red for Maoming)

对于闪烁活动的空间分布, 以往研究是用仰角和方位角等分的方式来划分区间, 给出以仰角和方位角为坐标的极图, 计算每个子区域的闪烁活动出现率, 进而得到闪烁活动的空间分布 [6,11]. 这种以仰角和方位角在极图上划分区域的方法, 由于距离相对角度的变化并不是线性的, 极图上等分的区域在实际中对应的空间面积相差很大, 并不能有效反映出闪烁活动的空间分布特征. 本文将实际空间按经纬度划分成小格, 分析每块小区域出现的闪烁活动情况. 图 8 和图 9 分别给出了广州和茂名两站 2011 年秋季 (9−10 月) 及 2012 年春季 (3−4 月) $S_4 > 0.4$ 的发生率空间分布情况. 如图 8 和图 9 所示, 每个区域块颜色的深浅代表该区域在某一时段内闪烁的发生率, 颜色越深表示发生率越大, 即闪烁活动越频繁. 由于闪烁活动在春秋季比较频繁, 因此这里仅研究典型的春秋两季空间分布情况.

从图 8 可以看出, 在 2011 年秋季, 广州台站监测到的闪烁活动在台站上空区域分布比较分散, 在 109°−118°E 以及 18°−27°N 的整个区域出现比较均衡, 而在 2012 年春季, 闪烁活动集中分布在广州台站上空南部 112°−115°E 以及 19°−23°N 的区域. 茂名台站监测到的闪烁活动分布具有类似特征. 图 9 显示, 在 2011 年秋季, 茂名上空的闪烁活动分布于 107°−116°E, 18°−26°N 的整个较大区域, 而在 2012 年春季, 主要在茂名台站上空区域出现的闪烁最为频繁, 集中在 110°−113°E, 20°−23°N 的区域. 两站得到的闪烁出现的空间分布结果是一致的.

磁赤道地区由于瑞利–泰勒不稳定性过程产生的大尺度电离层不规则体, 在上升到一定高度后分裂成较小尺度的不规则体, 并沿磁力线向磁赤道两侧扩

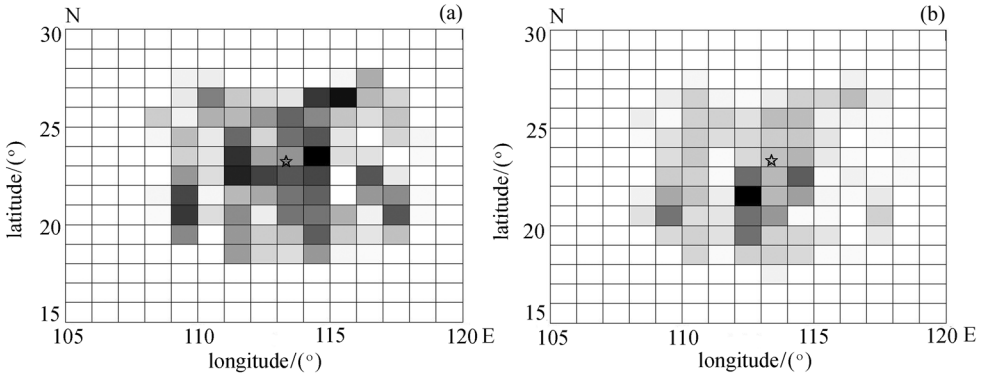


图 8 广州地区 $S_4 > 0.4$ 的发生率在 2011 年秋季 (a) 和 2012 年春季 (b) 的空间分布 (星号表示广州台站所在地)

Fig. 8 Spatial distribution of the occurrence rate of $S_4 > 0.4$ at Guangzhou station in the autumn of 2011 (a) and spring of 2012 (b). Five-pointed star represents the location of the station

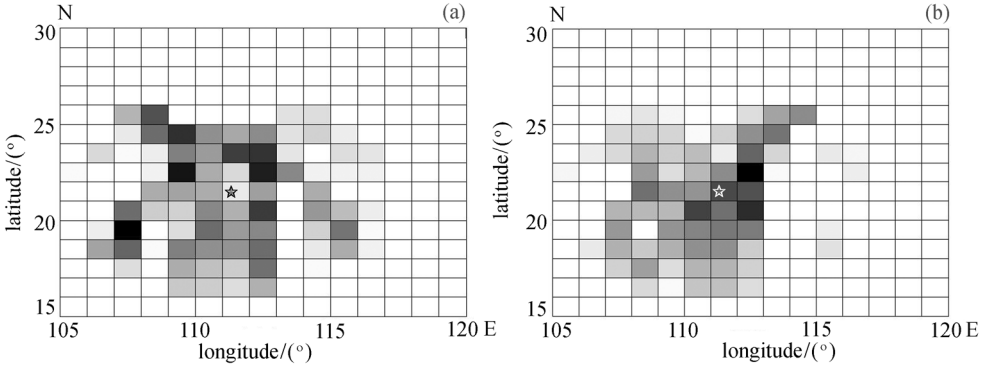


图 9 茂名地区 $S_4 > 0.4$ 的出现率在 2011 年秋季 (a) 和 2012 年春季 (b) 的空间分布 (星号表示茂名台站所在地)

Fig. 9 Spatial distribution of the occurrence rate of $S_4 > 0.4$ at Maoming station in the autumn of 2011 (a) and spring of 2012 (b). Five-pointed star represents the location of the station

散, 导致磁赤道异常及附近区域出现电波电离层闪烁现象. 以上电离层闪烁的空间分布特征表明, 很可能在 2011 年秋季扩散到华南地区的不规则体比较分散, 基本均匀分布在华南地区上空, 而 2012 年春季, 出现在华南地区的不规则体则相对比较集中. 其具体原因和形成机理尚需进一步研究和论证.

4 结语

利用中国广州和茂名两地的 GPS 电离层监测数据, 对华南地区 2011 年 7 月至 2012 年 6 月发生的电离层闪烁进行了统计分析. 结果表明, 两站监测到的闪烁活动都表现出春秋强, 冬夏弱的季节分布规律, 在时间上主要发生在 20:00 LT−24:00 LT; 从空间分布来看, 两站监测到的闪烁活动在 2011 年秋季出现的区域比较分散, 而在 2012 年春季, 闪烁出现的空间区域较为集中, 主要在茂名台站上空, 而广州台站上空略偏南区域出现的闪烁最为频繁.

中国华南地区的电离层闪烁的季节变化特征与其他地区得到的观测结果 [5−6] 是相符的, 但与 Wang 等 [8] 和 Lei 等 [12] 得出的广州地区闪烁夏季发生频繁的结论不太一致. 在空间分布上, 发现测站上空出现的电离层闪烁比周围要频繁, 这也与 Xu 等 [6] 得到的结果不太一致. 一般来说, 在仰角较高的测站上空区域, 电波穿过电离层的路径短, 不规则体对电波作用的累积效应较小, 闪烁现象应相对稀少, 但本文研究表明, 测站上空的不规则体对电波的影响是比较大的, 造成的闪烁频繁. 这说明华南地区的闪烁现象特征和成因可能比较复杂, 对华南地区电离层闪烁的全面了解和掌握还有待于连续监测和观测数据的不断积累以及更深入全面的分析研究.

参考文献

[1] Thomas R M, Cervera M A, Eftaxiadis K, *et al.* A regional GPS receiver network for monitoring equatorial scintillation and total electron content [J]. *Radio Sci.*, 2001, **36**(6):1545-1557

[2] Cervera M A, Thomas R M, Groves K M, *et al.* Validation of WBMOD in the southeast Asian region [J]. *Radio Sci.*, 2001, **36**(6):1559-1572

[3] 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

[4] Zhen Weimin, Chen Li. Scintillation monitoring and forecasting in China [J]. *Chin. J. Radio Sci.*, 2004, **19**(z1): 207-208. In Chinese (甄卫民, 陈丽. 中国电离层闪烁监测和预报 [J]. 电波科学学报, 2004, **19**(z1):207-208)

[5] Shang Sheping, Shi Jiankui, Guo Shanjian, *et al.* Ionospheric scintillation monitoring and preliminary statistic analysis over Hainan region [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2005, **25**(1):23-28. In Chinese (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)

[6] Xu Jisheng, Zhu Jie, Li Li, *et al.* Comparison of L-band radio wave scintillations and TEC fluctuations from observation of Wuhan and Guilin [J]. *Chin. J. Radio Sci.*, 2007, **22**(2):181-186. In Chinese (徐继生, 朱劼, 李莉, 等. 武汉与桂林 L–波段电波闪烁与 TEC 起伏特征比较 [J]. 电波科学学报, 2007, **22**(2):181-186)

[7] Li G, Ning B, Wan W, *et al.* Observations of GPS ionospheric scintillations over Wuhan during geomagnetic storms [J]. *Ann. Geophys.*, 2006, **24**:1581-1590

[8] Wang Siyu, Wang Jingsong, Yu Tao, *et al.* Preliminary analysis of ionospheric scintillations over Guangzhou region of China [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2010, **30**(2):141-147. In Chinese (王斯宇, 王劲松, 余涛, 等. 中国广州地区电离层闪烁观测结果的初步统计分析 [J]. 空间科学学报, 2010, **30**(2):141-147)

[9] Hu Lianhuan, Ning Baiqi, Li Guozhu. Comparison between GISM predictions and ionospheric scintillation measurements over Hainan region [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2007, **27**(5):384-390. In Chinese (胡连欢, 宁百齐, 李国主. 海南地区电离层闪烁观测与 GISM 模式预测的比较分析 [J]. 空间科学学报, 2007, **27**(5):384-390)

[10] Fremouw E J, Ishimaru A. Intensity scintillation index and mean apparent radar cross section on monostatic and bistatic paths [J]. *Radio Sci.*, 1992, **27**(4):539-543

[11] Yang Shenggao, Fang Hanxian, Weng Libin, *et al.* Preliminary statistic analysis of L-band ionospheric scintillation over Nanjing region in China [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2011, **31**(6):765-770. In Chinese (杨升高, 方涵先, 翁利斌, 等. 中国南京地区 L 波段电离层闪烁初步统计分析 [J]. 空间科学学报, 2011, **31**(6):765-770)

[12] Lei Yuanhan, Ma Shuying, Ye Dongying, *et al.* Nighttime ionospheric scintillations observed at Wuchang and Guangzhou [J]. *J. Wuhan Univ.: Nat. Sci.*, 1989, **3**:32-36. in Chinese (雷源汉, 马淑英, 叶冬英, 等. 武昌和广州夜间电离层闪烁的观测 [J]. 武汉大学学报: 理学版, 1989, **3**:32-36)