0254-6124/2012/32(1)-025–08 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Huang Linfeng, Deng Baichang, Huang Jiang, Xu Jie, Liu Weifeng, Liu Zuolian, Quan Hongjun. Statistical analysis of geomagnetic disturbances and ionospheric scintillations over Guangzhou region during solar minimum. *Chin. J. Space Sci.*, 2012, **32**(1): 25-32

# 太阳活动低年广州地区地磁扰动与电离层闪烁的统计特征分析*

黄林峰[1] 邓柏昌[1] 黄 江[2] 徐 杰[2]
刘伟峰[1] 刘作莲[1] 全宏俊[1]

1(华南理工大学理学院 广州 510641)

2(广州气象卫星地面站 广州 510640)

**摘 要** 基于肇庆地磁台的地磁监测数据和广州气象卫星地面站建立的华南地区 GPS 电离层闪烁监测网的监测数据, 统计分析了 2008 年 7 月至 2010 年 7 月太阳活动低年期间广州地区地磁扰动与电离层闪烁的关系. 用肇庆台地磁水平分量 $H$ 的变化量换算出肇庆地磁指数 $K$, 以此来代表广州地区地磁扰动情况. 分析结果表明, 磁暴/强地磁扰动对广州地区电离层闪烁的发生总体表现为抑制作用, 电离层闪烁主要发生在低 $K$ 值期间, 而在 $K \geqslant 4$ 时电离层闪烁的发生呈下降趋势. 电离层闪烁发生率随季节和地磁活动的变化规律表现在, 春季的弱闪烁发生率、夜间中等以上闪烁发生率和夏季中等以上闪烁的发生率明显与地磁活动指数 $K$ 相关, 即随 $K$ 指数的增大而减小; 在秋季和冬季闪烁发生率与 $K$ 指数变化无明显关系. 同时还综合分析了地磁与太阳活动的变化对电离层活动的影响, 广州地区闪烁主要发生在太阳活动较低的磁静日期间.

**关键词** 地磁扰动, $K$ 和 $Kp$ 指数, 电离层闪烁, $S_4$ 指数

**中图法分类号** P 352

# Statistical Analysis of Geomagnetic Disturbances and Ionospheric Scintillations Over Guangzhou Region During Solar Minimum

HUANG Linfeng[1] DENG Baichang[1] HUANG Jiang[2]
XU Jie[2] LIU Weifeng[1] LIU Zuolian[1] QUAN Hongjun[1]

1(*Department of Physics, South China University of Technology, Guangzhou* 510641)

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

**Abstract** The correlations between geomagnetic disturbance and GPS ionospheric scintillations are studied here using geomagnetic monitoring data of Zhaoqing geomagnetic station and the ionospheric scintillations observed by GPS monitoring network of South China, which is established by

* 国家自然科学基金项目 (40974093) 和国家高技术研究发展计划 (2009AA12Z137) 共同资助
2010-12-13 收到原稿, 2011-09-05 收到修定稿
E-mail: lxq850808@126.com

Guangzhou meteorological satellite ground stations. With the use of geomagnetic $K$ values converted from the variation of geomagnetic horizontal component $H$ at Zhaoqing to represent geomagnetic disturbance over Guangzhou region, the relationships between the geomagnetic disturbance and amplitude scintillation index ($S_4$) over Guangzhou region during solar minimum are statistically analyzed. Analysis indicates that most storms/strong magnetic disturbances of the year did not trigger the scintillation occurrence, that the ionosphere scintillation occurrence is mainly confined to the periods of lower $K$ values, and that the ionosphere scintillation occurrence declined for periods of higher $K$ values ($K \geqslant 4$). Occurrence rate of ionosphere scintillations is changed with seasons and the geomagnetic activities. The scintillations occurrence rate is obviously correlated with the variation of geomagnetic activity $K$ index, *i.e.*, as the index $K$ is raised, scintillation occurrence rate of above medium at night and weak in spring, as well as scintillations above medium in summer decreases. But there is no obvious relationship between occurrence rate of ionosphere scintillation and $K$ values in autumn and winter. In addition, comprehensive analyses for the effects of geomagnetic and solar activity on ionosphere activity show that there are more ionosphere scintillations over Guangzhou region during geomagnetic quiet and low solar activity periods.

**Key words** Geomagnetic disturbances, $K$ and $Kp$ indices, Ionosphere scintillations, $S_4$ index

## 0 引言

地球磁场分为两部分, 即来源于地球内部的基本磁场和来源于地球外部的变化磁场. 地磁扰动是指变化磁场的扰动, 其是由于太阳剧烈活动引起的不规则、大幅度、快速的地磁场变化. 地磁场扰动反映了日地空间环境的变化及日地关系, 是空间天气的主要影响因素之一. 电离层闪烁现象是指电波信号穿越电离层时, 由于电离层等离子体不均匀结构及其时空涨落引起的电波幅度、相位、时延的快速变化 [1]. 电离层闪烁活动发生可引起星地通信无线电链路及导航信号链路的功能退化和失效, 是空间天气监测和预报中的重要问题.

中国南方的低纬地区, 特别是台湾、福建、广东、广西、海南等地区, 均处于地球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非常显著, 是全球范围内电离层闪烁出现最频繁、影响最严重的地区之一 [2]. Wang 等 [3] 曾对广州地区 2007 年 4 月至 9 月以及 2008 年 1 月至 9 月期间 L 波段电离层闪烁变化特性进行了初步统计分析.

近年来, GPS 导航系统广泛应用. L 波段电离层闪烁特性及其对导航系统的影响受到了越来越多用户的关注. 有研究表明, 地磁扰动与电离层活动之间存在一定的相关性. Li[4] 利用三亚地区 GPS 电离层闪烁监测仪 2005 年的观测资料得出, 在三亚地区大部分磁暴的发生都不会触发电离层闪烁的发生, 而对个例事件的分析表明, 磁暴对三亚地区的电离层闪烁有不同的影响, 可以起到触发或者抑制作用. Zhan[5] 等对地磁扰动期间日本 Kokubunji 站电离层的扰动特征进行了分析, 总体来看, 磁暴期间 Kokubunji 站电离层响应以正暴为主. Ding 等 [6] 利用中国电离层台站和地磁台网资料, 对比研究了电离层与地磁场短期的异常分布及特征, 研究表明磁场与电离层时空异常特征有较好的一致性. Shang 等 [7] 对太阳活动下降期间海南地区 L 波段电离层闪烁特性进行了分析, 发现闪烁主要发生在磁静日期间, 在磁扰/磁暴期间也有可能发生, 但发生的概率相对较小. Feng 等 [8] 统计分析了海口观测站 2003 年 8 月至 2007 年 5 月太阳活动低年期间的电离层闪烁特征, 结果表明, 随着太阳活动的降低, 闪烁活动减少, 且强度减小.

广州电离层监测站目前已收集到 2008 年 7 月至 2010 年 7 月期间的地磁和电离层闪烁监测数据, 且数据观测连续完整, 其中闪烁数据有极少数几天缺失除外. 本文利用这两种数据对广州地区太阳活动上升期间磁扰动与电离层闪烁之间的关系进行了综合分析.

## 1 数据来源与处理

广东省地震局肇庆地磁台 (东经 112°27′、北纬 22°58′) 的地磁监测数据 (7 分量数据) 采样频率为 1 min, 资料时间为 2008 年 7 月至 2010 年 7 月. 对于中低纬度地区, 地磁扰动强度通常用地磁场水平分量 $H$ 的变化来确定, 在磁偏角 $D$ 分量扰动比 $H$ 大的时候也可用 $D$ 分量代替 $H$ 分量 [9]. 肇庆台处在低纬度地区, 因此在数据处理时选取地磁场水平分量 $H$ 来进行分析, 并依据肇庆台地磁水平分量 $H$ 的变化量换算出肇庆地磁 $K$ 指数, 以此来表示广州地区地磁扰动情况. 通过消除测量数据中的地磁场长期变化以及地磁场的平静变化 (主要是平静太阳日变化 $S_{\rm q}$, 有时也包括平静太阴日变化 $L$), 得到磁扰动幅度变化并将其转化为地磁 $K$ 指数. 表 1 列出了中国地磁台的 $K$ 值与 3 h 地磁扰动幅度最小值 $a_{\rm min}$ 的对应关系 [10].

广州气象卫星地面站 (东经 113°17′、北纬 23°8′) 2005 年起开展空间天气监测与研究业务, 重点开展电离层电子总含量与电离层闪烁的监测, 目前已建立基于 GPS 卫星的华南地区电离层闪烁监测网 (广州、韶关、茂名、厦门). 对于广州站电离层闪烁监测仪, 系统采样率为 50 Hz. 在本文的分析中, 主要使用的幅度闪烁指数 $S_4$ 定义 [3] 为减去系统噪声每分钟信号强度的归一化标准偏差, 其表达式如下:

$$S_4=\sqrt{\frac{\langle I'^2\rangle-\langle I'\rangle^2}{\langle I'\rangle^2}-\frac{100}{S/N_0}\Big(1+\frac{500}{19S/N_0}\Big)}. \quad (1)$$

其中, $\langle\ \rangle$ 表示一分钟的均值, $I'$ 为信号强度 $I$ 经过滤波消趋势之后的值, $S/N_0$ 为系统输出的信噪比, 一般取均值. 根据文献统计 [1,3] 和广州站监测数据, 将闪烁划分为 4 个等级: $S_4\leqslant 0.2$ 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, $S_4>0.6$ 为强闪烁. 在本文分析中, 为了消除多路径效应和其他低仰角效应的影响, 仅取卫星仰角大于 30° 的观测数据进行分析.

本文主要利用电离层闪烁与地磁这两种监测数据, 通过选择合适的数据统计方法, 将电离层闪烁数据与地磁数据进行对比统计分析, 寻求其对应规律.

**表 1 中国地磁台 $K$ 指数与 $a_{\rm min}$ 的对应关系**

**Table 1 Corresponding relationship between $K$ index and $a_{\rm min}$ of Chinese geomagnetic station**

| $K$ | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $a_{\rm min}$/nT | 0 | 3 | 6 | 12 | 24 | 40 | 70 | 120 | 200 | 300 |

## 2 电离层闪烁和地磁活动 $K$ 与 $Kp$ 指数的统计分析

### 2.1 地磁活动指数和电离层闪烁统计

基于 2008 年 7 月到 2010 年 7 月地磁活动 $K$ 和 $Kp$ 指数 ($Kp$ 指数取自世界数据中心——WDC) 及广州地区观测的电离层闪烁 (主要考虑幅度闪烁 $S_4$ 指数) 数据, 图 1 给出了地磁活动 $K$ 和 $Kp$ 指数及

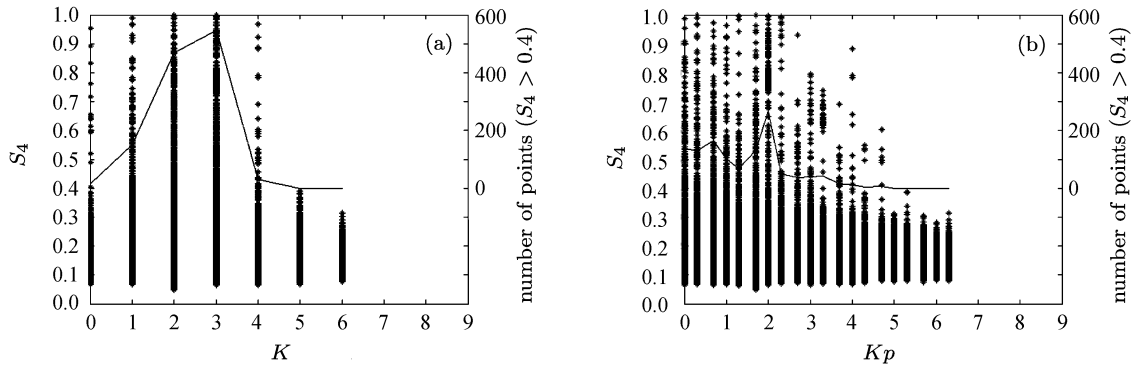



图 1 2008 年 7 月到 2010 年 7 月广州地区幅度闪烁指数 $S_4$ 与 3 h $K$ 和 $Kp$ 指数的统计 (实线对应右轴, 为相应 $K$ 和 $Kp$ 值 $S_4>0.4$ 的数据样本点数)

Fig. 1 Statistics of three-hour $K, Kp$ index and amplitude scintillation index $S_4$ from July 2008 to July 2010 over Guangzhou region (Sold line represents the number of points ($S_4>0.4$) under the conditions of different $K$ or $Kp$)

电离层幅度闪烁 $S_4$ 指数的散点统计结果, 图 1 中各点表示在当前 $K$ 或 $Kp$ 值下系统接收到的卫星信号振幅闪烁 $S_4$ 指数, 并给出了当 $S_4 > 0.4$ 时的数据样本数统计曲线. 考虑到引起闪烁的电离层不规则结构可能在地磁扰动开始几小时后才产生 [4], 为了使得 $K, Kp$ 和 $S_4$ 指数的统计更符合实际对应关系, 这里使用闪烁发生时与发生前 3 h 最大 $K$ 和 $Kp$ 值作为当前 $K$ 和 $Kp$ 值.

由于处在太阳活动低年, 地磁活动相对平静, 没有强烈地磁扰动发生, 因此在图 1 统计中当 $K$ 和 $Kp$ 值较大时没有数据. 由图 1(a) 可以看出, 电离层闪烁主要发生在低 $K$ 值期间, 且 $S_4 > 0.4$ 的各点主要集中在 $K$ 为 2 或 3 时, 表明中等以上闪烁的发生概率在 $K$ 为 2 或 3 时较大, 而在磁扰时 ($K \geqslant 4$), 广州地区很少观测到中等以上闪烁, 且闪烁的发生呈下降趋势. 由图 1(b) 可以看出, 电离层闪烁主要发生在低 $Kp$ 值期间, 并随着 $Kp$ 值的增大, 广州地区观测到的电离层闪烁尤其是中等以上的闪烁, 总体上呈逐渐减少的趋势.

综合对比分析地磁活动 $K$ 和 $Kp$ 指数及电离层幅度闪烁 $S_4$ 指数的统计结果显示, 2008 年 7 月到 2010 年 7 月发生的磁暴/强地磁扰动对广州地区电离层闪烁总体表现为抑制作用, 中等以上的闪烁易发生在 $K$ 为 2 或 3 的时间段附近. 由于 $Kp$ 是一种描述全球地磁活动性的指数, 而本文运用的 $K$ 指数是通过肇庆地磁台的地磁数据转化而来的, 更能反映广州地区的地磁活动水平, 因此, 电离层闪烁 $S_4$ 指数和地磁活动 $K$ 指数的统计结果更能代表广州地区地磁扰动和电离层闪烁关系的特征.

### 2.2 地磁活动指数与闪烁实例分析

在太阳活动低年期间, 闪烁发生次数相对减少, 且强度减小 [8]. 为了更清楚地了解低年期间地磁活动 $K$ 和 $Kp$ 指数与电离层闪烁发生的关系. 从 2008 年 7 月到 2010 年 7 月观测的所有实例中选择了 4 个具有代表性 ($S_4$ 指数相对较大) 的闪烁实例, 分析持续时间较长的中等以上闪烁发生时 $K$ 和 $Kp$ 值的变化情况.

图 2 给出了系统监测到的 4 个典型闪烁实例地

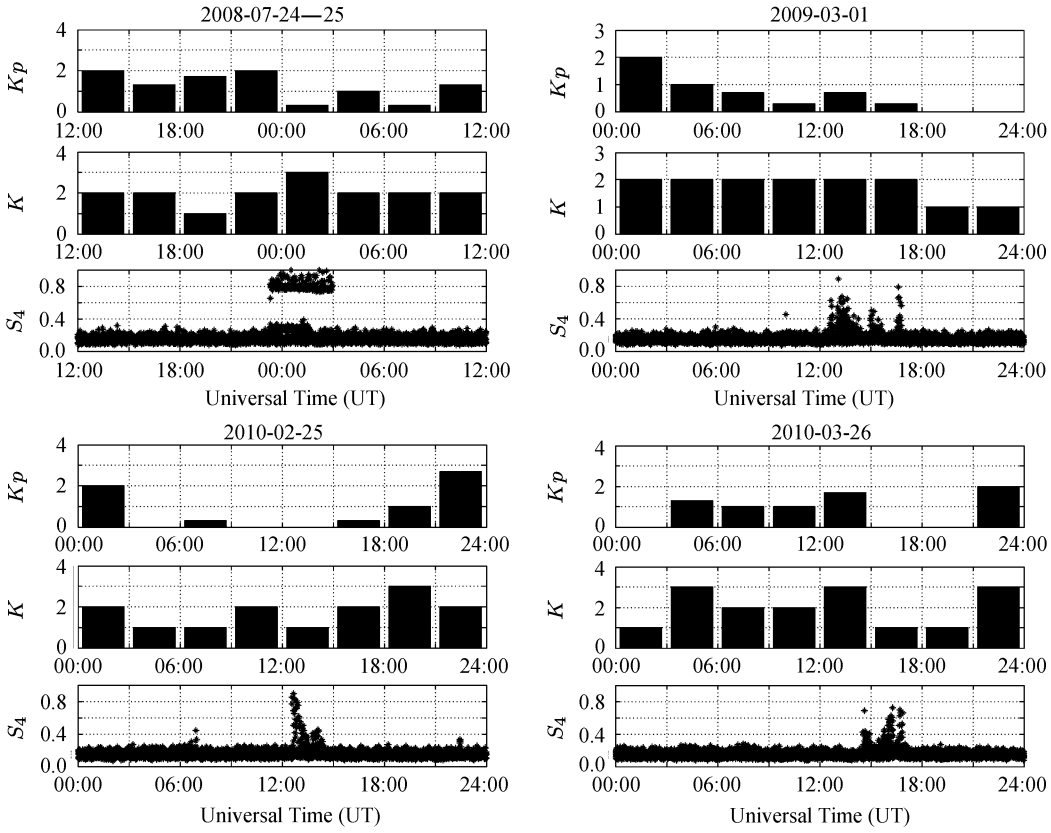



图 2 不同闪烁实例地磁活动 $K$ 与 $Kp$ 值的比较

Fig. 2 Comparison of geomagnetic activity $K$ and $Kp$ indices in different scintillation cases

磁活动 $K$ 和 $Kp$ 值的情况, 每个小图从上向下依次给出了 $Kp, K, S_4$ 指数随世界时的变化关系. 由图 2 可以看出, 在不同闪烁实例中, 闪烁发生时与发生前 3 h $K$ 值的最大值均要比相应的 $Kp$ 值大, 且在这段时间 $K$ 和 $Kp$ 值均较低, 这与图 1 的统计结果大体吻合.

## 3 广州地区各季节闪烁发生率与地磁活动性的关系

有研究表明 [11−15], 电离层闪烁发生的时间、强度、频率等会明显受到地方时和季节变化的影响. 为了更清楚地了解不同强度闪烁的发生在不同地磁活动水平条件下随地方时和季节的变化规律. 图 3 给出了广州地区四季电离层闪烁发生率与地磁活动性的关系, 图 3 中将闪烁发生率定义为以 1 h 为单位系统接收到的幅度闪烁指数 $S_4$ 大于给定值时的卫星数与总卫星数的比值. 图 3 中季节划分原则是 2−4 月为春季, 5−7 月为夏季, 8−10 月为秋季, 11−1 月为冬季.

从图 3 可以看出, 闪烁主要发生在春季和夏季, 且夏季闪烁发生最为频繁; 春季弱闪烁和夜间中等以上闪烁以及夏季中等以上闪烁发生率明显与地磁活动 $K$ 指数变化有关, 即随 $K$ 的增大而减小, 其中春季夜间中等以上闪烁最为明显; 电离层闪烁也有可能发生在磁扰或磁暴期间, 这种情形最有可能发生在夏季; 在秋季和冬季闪烁发生率的大小与 $K$ 指数变化无明显关系. 广州地区各季节电离层闪烁发生率和地磁活动特征列于表 2.

## 4 地磁与太阳活动对电离层闪烁的影响

利用广州 2008 年 7 月至 2010 年 7 月 GPS 电离层闪烁观测数据, 根据振幅闪烁指数的变化, 综合分析地磁和太阳活动对该地区电离层闪烁发生率的影响. 图 4 给出了广州地区电离层闪烁活动的逐日变化与地磁及太阳活动的关系, 从上向下依次为闪烁

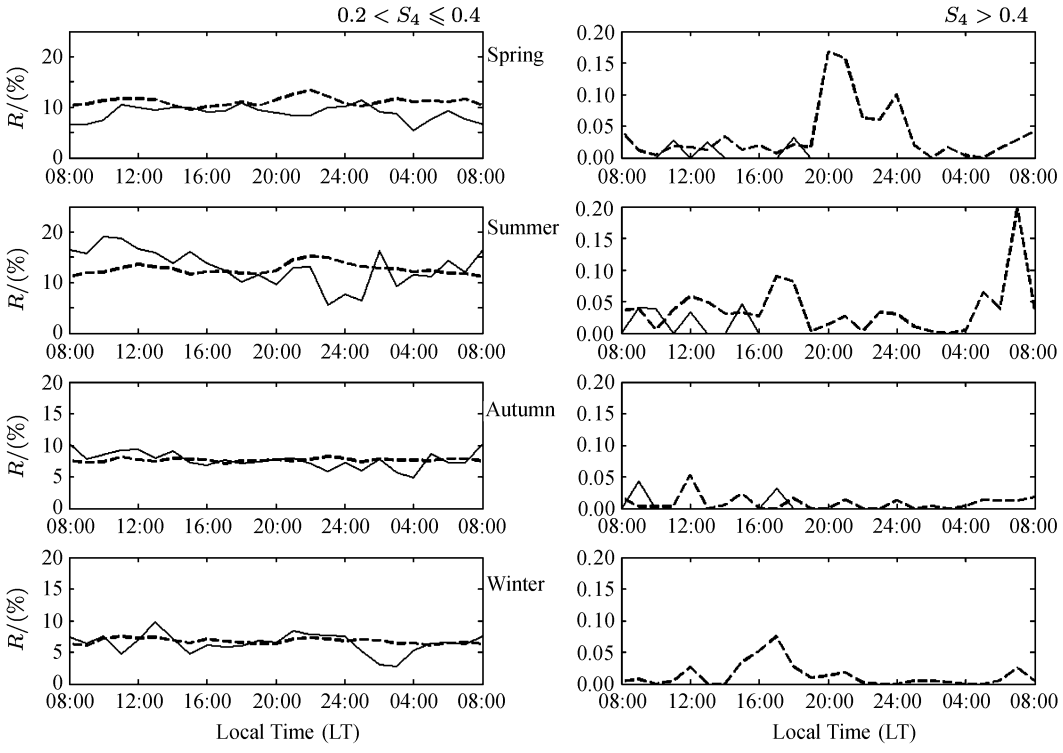



图 3 广州地区各季节期间闪烁发生率与地磁活动性的关系 (实线为 $K \geqslant 4$, 虚线为 $K \leqslant 2$)

Fig. 3 Correlation between the occurrence rate of scintillations and geomagnetic activity in different seasons over Guangzhou region (solid line indicates $K \geqslant 4$, dashed line indicates $K \leqslant 2$)

**表 2 电离层闪烁与地磁活动特征**

**Table 2 Characteristics of ionosphere scintillation and geomagnetic activity**

| 季节 | 弱闪烁 | | 中等以上闪烁 | |
|---|---|---|---|---|
| | $K=0,1,2$ | $K\geqslant 4$ | $K=0,1,2$ | $K\geqslant 4$ |
| 春 | 频繁 | 一般 | 主要发生在夜间, 且夜间出现峰值 | 发生率很小 |
| 夏 | 频繁 | 频繁 | 主要发生在白天, 且白天出现峰值 | 发生率很小 |
| 秋 | 一般 | 一般 | 发生率很小 | 发生率很小 |
| 冬 | 一般 | 一般 | 发生率很小 | 几乎没有 |

**注** 不同 $K$ 值条件下, 闪烁发生率在 10% 左右就认为闪烁发生频繁, 在 5% 左右认为闪烁发生一般.

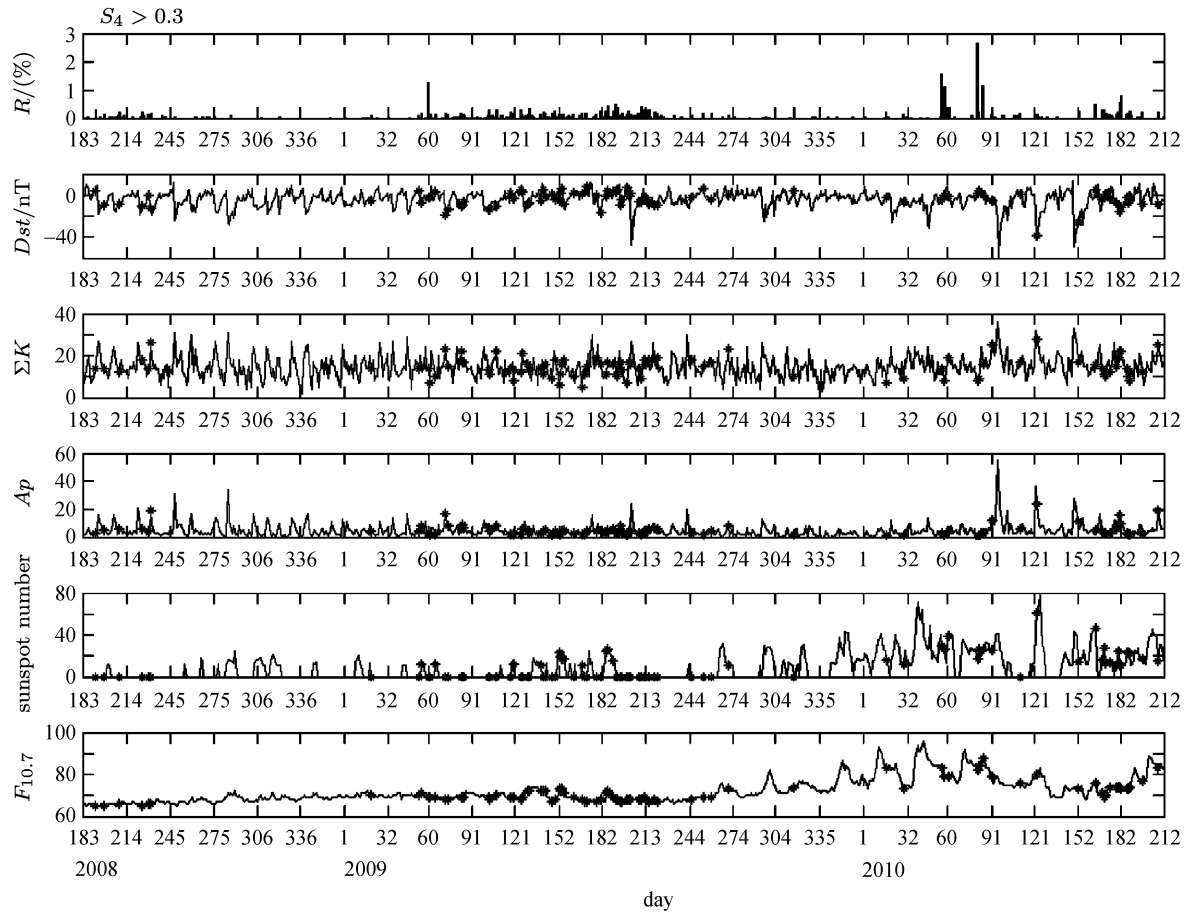



图 4 L 波段电离层闪烁活动的逐日变化与地磁及太阳活动的关系 ($\Sigma K$ 为当天所有 $K$ 指数的和, 每条曲线上的星号为闪烁发生时对应当天的太阳和地磁平均活动情况)

Fig. 4 Correlation between the daily variations of L-band ionosphere scintillation and geomagnetic and solar activity ($\Sigma K$ represents the sum of the $K$ indices on that day, and the asterisk of each curve corresponds to the solar or geomagnetic average activity)

发生率 $R$ ($S_4>0.3$), $Dst$, $\Sigma K$, $Ap$, SSN, $F_{10.7}$ 随时间的变化关系.

从图 4 可以看出, 电离层闪烁主要发生在磁静日, 这种情形在春分附近 (3 月至 4 月) 和夏季 (7 月至 8 月) 较为明显, 在 2008 年夏季 7 月至 8 月、2009 年和 2010 年春分期间和整个夏季闪烁发生率相对较

大, 地磁和太阳活动水平相对平静 ($Dst > -20\,\mathrm{nT}$, $\Sigma K < 20$, $Ap < 10$, SSN $< 20$, $F_{10.7} < 75$). 夏季地磁活动的增强可能会抑制电离层闪烁的发生, 例如在 2010 年夏季地磁活动明显增强, 地磁暴次数增多 (主要是小磁暴)、$\Sigma K$ 和 $Ap$ 指数较大, 电离层闪烁活动的发生明显受到抑制. 2009 年闪烁发生比 2008 年强, 而 2010 年闪烁发生比 2009 年强, 即在 2008 年下半年到 2010 年上半年地磁和太阳活动总体呈上升趋势期间, 电离层闪烁的发生整体也呈上升趋势, 但在这期间闪烁发生率都较小, 说明在太阳活动低年, 闪烁发生次数相对减少.

从图 4 中可以看出, 绝大部分高闪烁发生率时段都出现于太阳活动水平非常低的条件 (SSN $< 20$, $F_{10.7} < 75$) 下, 但相对于地磁活动, 太阳活动对电离层闪烁发生的影响并不明显.

## 5 结论

利用广东省地震局肇庆地磁台的监测数据以及广州气象卫星地面站建立的华南地区 GPS 电离层闪烁监测网广州站的监测数据, 对 2008 年 7 月到 2010 年 7 月太阳活动低年上升期间广州地区地磁扰动与电离层闪烁之间的关系进行了综合分析, 可以得出如下结论.

(1) 电离层闪烁主要发生在低 $K, Kp$ 值期间, 且在 $K$ 为 2 或 3 时, 中等以上闪烁的发生概率较大, 而在磁扰时 ($K \geqslant 4$), 广州地区很少观测到中等以上闪烁, 闪烁的发生呈下降趋势; 随着 $Kp$ 值由小到大, 广州地区观测到的电离层闪烁 (尤其是中等以上闪烁) 发生呈逐渐减少的趋势, 这与 Li[4] 对三亚地区的统计结果基本一致. 综合对比分析地磁活动 $K$ 和 $Kp$ 指数及电离层幅度闪烁 $S_4$ 指数的统计结果显示, 2008 年 7 月到 2010 年 7 月发生的磁暴/强地磁扰动对广州地区电离层闪烁总体表现出抑制作用, 中等以上闪烁易发生在 $K$ 为 2 或 3 的时间段附近.

(2) 电离层闪烁发生率随季节和地磁活动的变化关系主要表现在春季和夏季, 春季弱闪烁和夜间中等以上闪烁以及夏季中等以上闪烁发生率受地磁场控制明显, 均随 $K$ 指数的增大而减小, 在秋季和冬季闪烁发生率与 $K$ 指数变化无明显关系, 这与 He 等 [16] 对东亚中纬地区的电离层闪烁观测结果是基本相符的. 电离层闪烁也有可能发生在磁暴/强磁扰期间, 此种情形最有可能发生在夏季, 与 Shang 等 [17] 对此地区 L 波段电离层闪烁特性分析结果相符.

(3) 地磁和太阳活动的变化对电离层活动发生的影响表现在, 广州地区闪烁主要发生在太阳活动较低的磁静日期间, 夏季地磁活动的增强可能会抑制电离层闪烁的发生. 2008 年下半年到 2010 年上半年地磁和太阳活动总体呈上升趋势期间, 电离层闪烁的发生整体也呈上升趋势, 但在太阳活动低年期间闪烁发生率均较小.

广州地区电离层闪烁的季节变化特征与 Wang[3] 和 Lei 等 [18] 的在广州地区观测的夏季弱闪烁频繁的结果基本相符. 广州地区电离层闪烁除春分附近外, 夏季闪烁的发生较频繁, 这一现象与此地区处于电离层磁赤道异常区驼峰附近有关. 在夏季驼峰移至广州地区上空, 致使广州地区闪烁发生次数增加 [3]. 本研究只使用了 2008 年 7 月到 2010 年 7 月太阳活动上升期两年左右时间的观测数据, 这期间广州地区的地磁活动处于相对较低水平, 没有强烈的地磁扰动或大的磁暴发生, 进一步分析广州地区地磁扰动与电离层闪烁之间的关系, 还有待于更多观测数据的积累和更深入的分析研究.

## 参考文献


[1] Li Guozhu, *et al.* Design and realization of a real-time GPS ionospheric scintillation monitoring system [J]. *Chin. J. Radio Sci.*, 2005, **20**(6):758-764. In Chinese (李国主, 等. GPS 电离层闪烁实时监测系统的设计与实现 [J]. 电波科学学报, 2005, **20**(6):758-764)

[2] Zhen Weimin, *et al.* Scintillation monitoring and forecasting in China [J]. *Chin. J. Radio Sci.*, 2004, **19Z**(1):207-208. In Chinese (甄卫民, 等. 中国电离层闪烁监测和预报 [J]. 电波科学学报, 2004, **19Z**(1):207-208)

[3] Wang Siyu, *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, 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)

[4] Li Guozhu, *et al.* Effects of geomagnetic storm on GPS ionospheric scintillation at Sanya [J]. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 2008, **70**:1034-1045

[5] Zhan Liang, *et al.* Morphology of ionospheric disturbances over Kokubunji during geomagnetic disturbances [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2007, **27**(5):391-399. In Chinese (占亮, 等. 地磁扰动期间日本 Kokubunji 站电离层的扰动特征分析 [J]. 空间科学学报, 2007, **27**(5):391-399)

[6] Ding Jianhai, *et al.* Comparison study on short-term

anomalies of ionosphere and geomagnetic field before Kunlunshan Ms 8.1 earthquake [J]. *Earthquake*, 2004, **24**(1):104-111. In Chinese (丁鉴海, 等. 昆仑山口西 8.1 级地震前电离层与磁场短期异常对比研究 [J]. 地震, 2004, **24**(1):104-111)

[7] Shang Sheping, *et al*. Morphological study of L-band ionospheric scintillations in the equatorial region [J]. *Chin. J. Radio Sci.*, 2006, **21**(3):410-415. In Chinese (尚社平, 等. 赤道地 L–波段电离层闪烁的形态特性 [J]. 电波科学学报, 2006, **21**(3):410-415)

[8] Feng Jian, *et al*. Study of the low-latitude ionospheric scintillation during low solar activity periods [J]. *Chin. J. Radio Sci.*, 2007, **22**(SO):410-415. In Chinese (冯健, 等. 太阳活动低年低纬地区电离层闪烁特征研究 [J]. 电波科学学报, 2007, **22**(SO):410-415)

[9] Xu Wenyao. Improvement of scaling and evaluating of $K$ index [J]. *Morth. Seism. J.*, 2005, **27**(SO):36-41. In Chinese (徐文耀. 地磁活动 K 指数值量算和确定方法的改进 [J]. 西北地震学报, 2005, **27**(SO):36-41)

[10] Xu Wenyao. Physics of Electromagnetic Phenomena of the Earth [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2009. 307-347. In Chinese (徐文耀. 地球电磁现象物理学 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009. 307-347)

[11] Chen Fenghua, *et al*. Study of compute ionospheric $S_4$ index based on GPS signal [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2007, **27**(1):23-28. In Chinese (陈风华, 等. 基于 GPS 信号的电离层 $S_4$ 指数计算方法研究 [J]. 空间科学学报, 2007, **27**(1):23-28)

[12] Wang Dongli, *et al*. Preliminary statistic analysis of L-band ionospheric scintillation over Guilin region [J]. *Chin. J. Radio Sci.*, 2009, **29**(1):73-76. In Chinese (王冬丽, 等. 桂林地区 L–波段电离层闪烁初步统计分析 [J]. 桂林电子科技大学学报, 2009, **29**(1):73-76)

[13] Xu Jisheng, *et al*. GPS observation of ionospheric effects of the major storm of Nov. 7-10, 2004 [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2006, **49**(4):950-956. In Chinese (徐继生, 等. 2004 年 11 月强磁暴期间武汉电离层 TEC 的响应和振幅闪烁特征的 GPS 观测 [J]. 地球物理学报, 2006, **49**(4):950-956)

[14] Ma Jianmin, *et al*. The influence of the great solar flare of 24 April 1984 on the ionospheric total electron content [J]. *Chin. J. Radio Sci.*, 1986, **6**(4):184-192. In Chinese (马健敏, 等. 1984 年 4 月 24 日大太阳耀斑爆发对电离层总电子含量的影响 [J]. 空间科学学报, 1986, **6**(4):184-192)

[15] Zhu Yuhua, *et al*. A study of GPS ionospheric scintillations observed at Guilin [J]. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 2008, **70**:1948-1958

[16] He Youwen, *et al*. Mid-latitude ionospheric scintillation in eastern Asia [J]. *Chin. J. Radio Sci.*, 1994, **9**(2):45-51. In Chinese (何友文, 等. 东亚中纬地区的电离层闪烁 [J]. 电波科学学报, 1994, **9**(2):45-51)

[17] Shang Sheping, *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, 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)

[18] Lei Yuanhan, *et al*. Nighttime ionospheric scintillation observed at Wuchang and Guangzhou [J]. *J. Wuhan Univ.: Nat. Sci.*, 1989, **3**:32-36. In Chinese (雷源汉, 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)