

# 电离层对耀斑响应的 GPS 观测研究\*

张东和<sup>1,2</sup> 萧佐<sup>1</sup> 常青<sup>1</sup>

1. 北京大学地球物理系, 北京 100871; 2. 中国电波传播研究所青岛分所, 青岛 266010

**摘要** 利用 1997~1999 年全球日地电离层观测卫星的耀斑观测资料以及全球定位系统(GPS)网的观测资料, 对不同级别耀斑爆发期间的电离层总电子含量(TEC)随时间的变化特点、TEC 增幅及其与 X 射线最大辐射通量之间的关系进行了研究. 利用缓变型耀斑爆发期间的 GPS 观测数据, 分析了电离层对此类耀斑的响应特点.

**关键词** 耀斑 电离层 总电子含量(TEC) 全球定位系统(GPS)

在 1995 年和 1996 年, Wilson 和 Ho 等利用国际全球定位系统(GPS)网数据得到了全球范围的总电子含量(TEC)图, 并利用该方法对磁暴期间的电离层扰动形态进行了研究<sup>[1,2]</sup>. Saito 等也报道了利用高空间分辨率的 GPS 台站资料对一次电离层行扰(TID)的观测结果<sup>[3]</sup>. 除了利用大量 GPS 台站数据进行电离层扰动研究外, 利用单站或少量台站的 GPS 观测资料对电离层形态和扰动的研究也有所报道<sup>[4]</sup>. 我们利用国际 GPS 台站资料分别对两次大耀斑期间的电离层 TEC 进行了研究, 得到了一些有价值的结果<sup>[5,6]</sup>. 研究发现不同耀斑对电离层产生的影响有很大差异, 有必要对大量耀斑期间的电离层状态进行观测研究, 以归纳电离层对耀斑辐射的响应规律. 本文的目的就是利用大量耀斑爆发期间的 GPS 观测数据对 TEC 进行计算分析.

## 1 数据来源与 GPS 数据处理方法

利用 1997~1999 年的全球日地观测卫星(GOES)的耀斑观测资料, 选择了 40 个 M 及 X 级耀斑爆发期间的 GPS 数据计算 TEC. 为了消除由于纬度和地方时效应引起的耀斑对电离层的影响差异, 耀斑爆发期间的 GPS 数据的选取台站尽量在北纬 22°~45°之间, 而台站经度应在当地时 11~13 点之间. 在利用 GPS 数据进行 TEC 计算时考虑了卫星的硬件延迟和信号噪声与卫星仰角的关系, 由伪

距观测和载波相位观测来获得高精度的绝对 TEC. 具体方法参考有关文献<sup>[7,8]</sup>

## 2 结果分析

### 2.1 不同级别耀斑的电离层响应

通过对不同级别的耀斑爆发期间的 GPS 数据进行的计算, 发现电离层 TEC 对耀斑的响应可分为以下几种情况:

对于 M3.0 以下级别的耀斑, 仅从 TEC 的变化曲线上很难分辨出耀斑的影响(见图 1). 从图 1(a)中完全看不出电离层对耀斑的响应. 图 2 为与图 1(a)同一耀斑期间的高频 Doppler 记录, 从记录中可看到明显的耀斑影响. 高频 Doppler 扰动记录反映的是一种电离层变化的微分效应, 而 GPS 给出的 TEC 反映的是一种电离层变化的积分效应. 比较而言, 高频 Doppler 效应更为灵敏, 在监测小耀斑方面 GPS 方法有一定的局限性. 在耀斑爆发期间, 从图 1(b)中的 TEC 各曲线变化中似乎可以看到一个小的变化, 但是在事先没有耀斑信息的前提下, 很难据此确定耀斑的存在. 只有通过 TEC 扰动曲线进行时间微分之后, 才可以看到耀斑期间 TEC 的同步扰动.

对于 X 射线最大辐射通量大于 M3.0 的耀斑, 都能从由 GPS 计算的 TEC 曲线中看到其影响. 图 3 中示出了 4 个此级别耀斑引起的 TEC 随时间变化情形, 由图可见, 电离层对耀斑的响应明显. 另外, 从

2001-02-23 收稿, 2001-03-23 收修改稿

\* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 49990455, 60027001)

E-mail: zjeffery@263.net

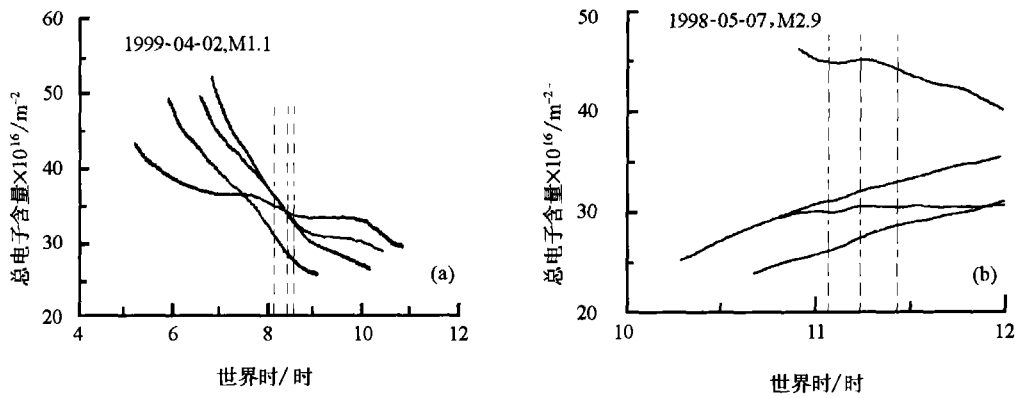


图1 由 GPS 方法计算的耀斑期间的电离层 TEC 随世界时的变化

(a) 为一次 M1.1 级耀斑; (b) 为一次 M2.9 级耀斑; 图中的 3 条虚线分别为耀斑爆发、最大、及结束的时刻, 图中实线为不同卫星数据计算的 TEC 结果(下同)

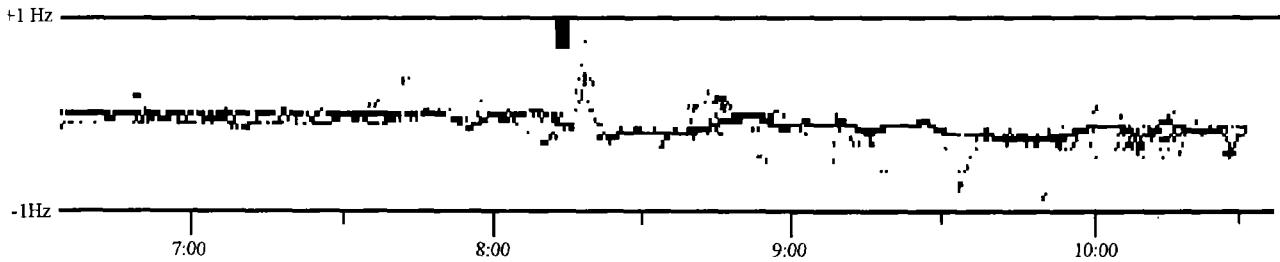


图2 图1(a)中的耀斑期间的高频 Doppler 记录

图中的黑柱代表耀斑开始时间, 横坐标为世界时, 纵向为 Doppler 频移

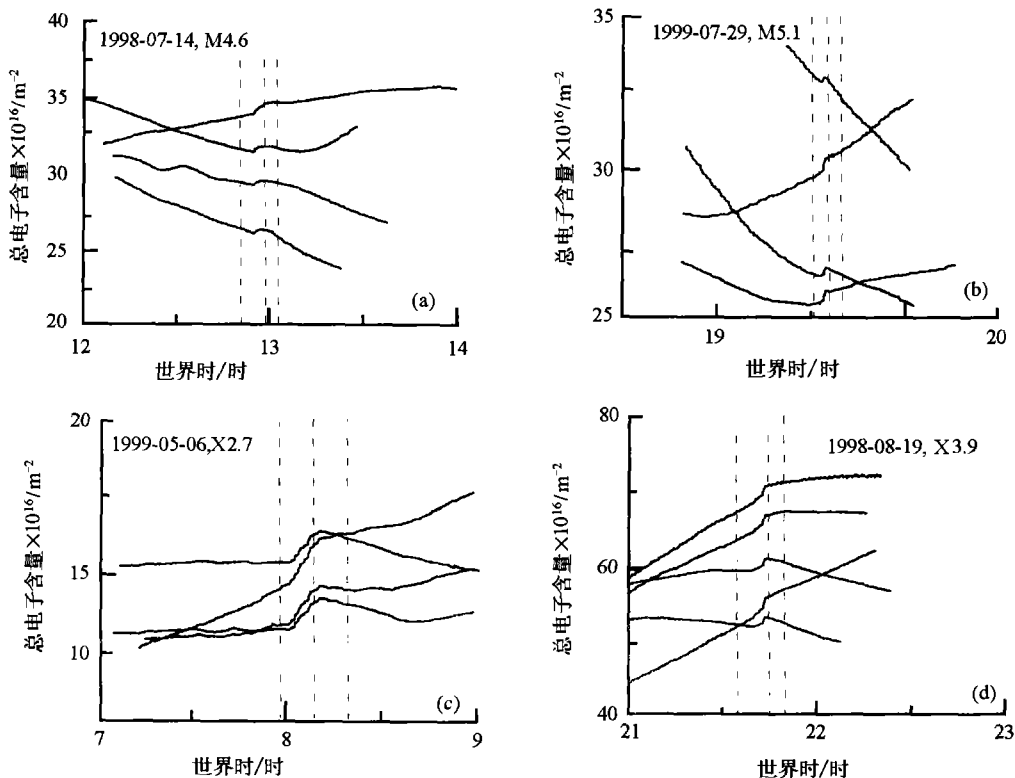


图3 4 个 X 射线最大辐射通量大于 M3.0 的耀斑爆发期间由 GPS 数据计算的 TEC 随时间的变化关系

图中各 TEC 曲线可以看到, 在小的时间尺度内 TEC 的变化也是同步的, 这一现象在 TEC 曲线的微分结果中更加明显(见图 4). 我们认为这与耀斑爆发过程中 X 射线和远紫外(EUV)辐射通量的时间演化特点有直接的关系.

图 5 给出了所计算的耀斑级别与电离层 TEC 增幅的关系, 图中的直线为拟合结果. 从该图可以看

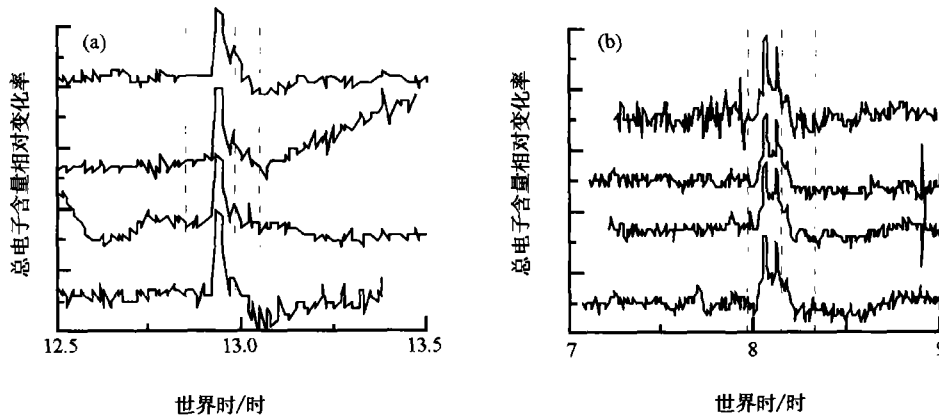


图 4 TEC 扰动曲线的微分结果

(a) 对图 3(a)中曲线的微分; (b) 对图 3(c)中曲线的微分

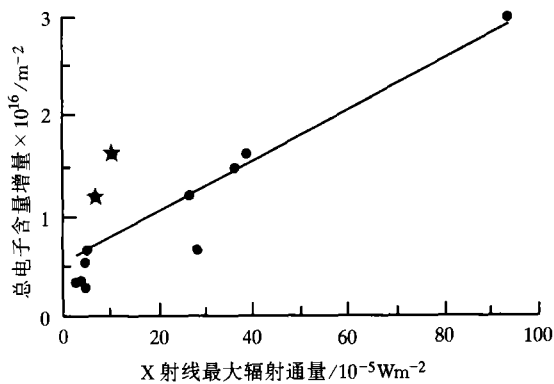


图 5 耀斑的 X 射线最大辐射通量与电离层 TEC 增幅的关系

## 2.2 缓变型耀斑对电离层增幅的影响

对于缓变型耀斑, 从耀斑开始爆发到 X 射线辐射通量达到最大的时间间隔多在 1 h 左右, 一般从电离层 TEC 结果中不易判断直接因耀斑辐射引起的电离层增幅的数值. 图 6 为一次 X3.3 级别的缓变型耀斑引起的电离层 TEC 随时间的变化曲线. 该耀斑的开始时刻为世界时 04:54, 耀斑的 X 射线辐射通量达到最大的时刻为 05:52, 在这一段时间内还爆发了一次 M1.4 和一次 M3.1 量级的耀斑, 在此期间内的 X 射线和 EUV 辐射情况比较复杂. 从图中可以看到,

出, 虽然总的趋势是耀斑的级别越大, 引起的电离层 TEC 增幅越大. 但对一些特定耀斑这一趋势并不满足. 也就是说一定还有其他与耀斑有关的因素影响着电离层对耀斑响应的强弱. Matsoukas 曾认为耀斑在日盘上距日盘中线的距离对电离层 TEC 增加也有影响<sup>[9]</sup>, 有关这一问题的 GPS 结果, 我们将另文给出.

在世界时 05:40 左右, 图中的 4 条曲线有一明显的突增, 这显然是由本次耀斑引起的, 但我们不能确定此耀斑引起的总的电离层 TEC 增幅. 应用设在日本秩内的 MF 雷达观测的在 66~82km 高度间的电子密度, 我们发现在该耀斑爆发的一段时间内, 该高度内的电子密度确实明显增加. 增加的时间大约在 5:30~6:30 之间, 由于耀斑辐射对这一高度中性成分的电离作用很强, 其电子密度的增加比利用 GPS 得到的 TEC 的增加要明显.

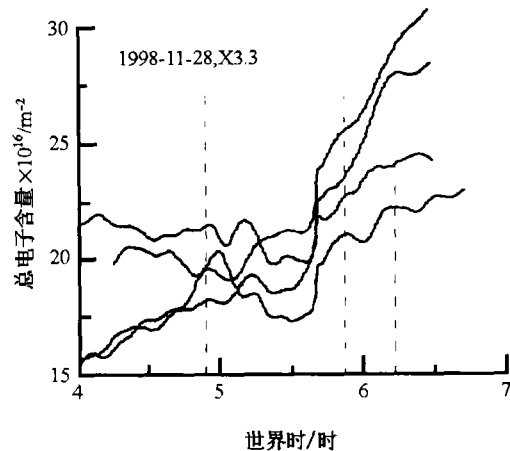


图 6 一次级别为 X3.3 的缓变型耀斑爆发期间的电离层 TEC 随时间的变化

### 3 结论

电离层对不同级别耀斑的响应不同. 由 GPS 测得的电离层 TEC 不易反映 M3.0 以下级别的耀斑对电离层的影响, 但从高频 Doppler 记录上可明显地看到此级别耀斑效应的存在. 对于级别大于 M3.0 的耀斑, 由 GPS 数据获得的电离层 TEC 一般都有反映, 并可通过 TEC 曲线确定耀斑引起的 TEC 增幅. 另外, 同一耀斑引起的由不同卫星数据计算的 TEC 随时间的变化趋势有很强的相关, 这应与耀斑的 X 射线以及 EUV 辐射的时间演化过程有关.

从耀斑最大辐射通量与 TEC 增幅的关系来看, 总的趋势是耀斑辐射强度越大电离层 TEC 增幅越大. 但对于特定耀斑, 电离层的响应并不一定如此, 一个较小级别的耀斑引起的 TEC 增幅可能大于较大级别的耀斑. 本文认为耀斑的 X 射线辐射通量只是决定 TEC 增幅的因素之一, 与耀斑有关的其他参数同样影响电离层的状态变化.

耀斑爆发的时间演化特性对电离层状态变化有直接影响. 对于缓变型耀斑, 电离层在长时间内的电离和复合过程比较复杂, 确定此类耀斑引起的电离层 TEC 增幅有一定困难, 但在耀斑爆发过程中仍可看出电离层 TEC 的增加.

**致谢** 感谢世界 GPS 观测网提供的数据.

### 参 考 文 献

- 1 Wilson B D, et al. Sub-daily northern hemisphere maps using the IGS GPS network. *Radio Sci*, 1995, 30(2): 639
- 2 Ho C M, et al. Global ionospheric perturbations monitored by the worldwide GPS network. *Geophys Res Lett*, 1996, 23(22): 3219
- 3 Saito A, et al. High resolution mapping of TEC perturbations with the GSI GPS network over Japan. *Geophys Res Lett*, 1998, 25(16): 3079
- 4 萧 佐, 等. 通过 GPS 测量数据研究电离层总电子含量的逐日变化. *空间科学学报*, 2000, 20(2): 97
- 5 张东和, 等. 利用 GPS 方法对 1998-11-22 太阳耀斑引起的电离层 TEC 变化的观测研究. *北京大学学报(自然科学版)*, 2000, 36(3): 414
- 6 张东和, 等. 1997 年 11 月 6 日大耀斑期间电离层 TEC 的 GPS 观测结果分析. *科学通报*, 2000, 45(6): 575
- 7 Mannucci A J, et al. A global mapping technique for GPS-derived ionospheric total electron content measurements. *Radio Sci*, 1998 33(3): 565
- 8 张东和, 等. 利用 GPS 数据计算 TEC 的方法及对电离层扰动现象的 GPS 观测. *地球物理学报*, 2000, 42(4): 451
- 9 Matsoukas D A, et al. Correlation of solar radio bursts and sudden increases of the total electron content(SITEC) of the ionosphere. *J Atmo Terr Phys*, 1972, 34(5): 1275

---

## 我国完成三种病原微生物全基因组测序

国家人类基因组南方研究中心宣布, 我国科学家在国际上率先独立完成钩端螺旋体、表皮葡萄球菌、黄单胞菌 3 种重要人类和植物病原体的全基因组精细测序. 有关专家认为, 这标志着我国独立从事大规模基因组测序和生物信息学研究水平又跃上了一个新台阶.

在完成上述 3 种病原微生物全基因组测序的同时, 我国科学家还首次识别了维护它们生命活动相关的整套基因, 并发现了一批与致病性相关的功能基因, 鉴定了一批可望用于发展新一代疫苗的靶标基因. 围绕这 3 种病原微生物的功能基因组研究已全面展开.

(供稿: 基础研究快报)