

1997 年 11 月 6 日大耀斑期间电离层 TEC 的 GPS 观测结果分析

张东和 萧 佐

(北京大学地球物理系, 北京 100871)

摘要 利用 GPS 测量电离层 TEC 方法处理了 1997 年 11 月 6 日世界时 11:49 耀斑爆发期间地球向日面纬度范围在[N28~N45], 经度范围在[W90~E77]的 15 个台站的 GPS 观测数据, 得到了耀斑期间电离层 TEC 的变化结果. 本次耀斑为本太阳活动周开始以来观测到的最强的一次, 耀斑的 X 射线级别为 X9.4. 计算结果表明:在几分钟内耀斑引起了大空间范围电离层 TEC 增加, TEC 增加的最大幅度在 $2.5 \times 10^{16} \text{m}^{-2}$ 以上, TEC 增幅的大小与星下点的地方时有直接的关系, 但增幅并不与当地时 12 点对称, 地方时上午的电离层 TEC 增幅要比下午的更大些.

关键词 耀斑 GPS 星下点 TEC

太阳耀斑对电离层的影响一直是电离层扰动及电波传播研究中的一个重要课题. 耀斑产生的软、硬 X 射线及远紫外辐射会使地球向日面的电离层状态发生突然变化, 对于大级别的太阳耀斑, 电离层会产生多种影响电波正常传播的扰动效应, 如无线电短波中断(SWF)、VLF 信号相位的突变. 有多种观测手段可以用来研究电离层对耀斑的响应. DONNELLY 利用突然频率吸收技术研究了耀斑期间不同 X 射线和远紫外辐射频段对电离层各高度电子密度的影响^[1], 利用信标卫星的 Faraday 旋转法可得到电波射线路径上的电离层总电子含量. 国内外有一些作者利用该方法观测了几次大耀斑期间的电离层总电子含量(TEC)的变化^[2~4]. Mendillo 还利用耀斑期间电离层的非相干散射雷达数据与信标卫星数据进行了比较研究, 以求取得耀斑期间电离层各高度电子密度的变化情况. 利用 1968 年 8 月到 1970 年 8 月这两年的耀斑期间的射电流量, Matsoukas 研究了耀斑的射电流量与电离层 TEC 突增的相关性. 统计结果表明:耀斑在太阳上的位置影响着电离层 TEC 增量的大小, 同时, 电离层的电子密度及中性大气随高度的分布也对 TEC 的增量产生影响, 上午的电离层对耀斑的响应要比下午的弱^[1]. 虽然在电离层对耀斑的响应方面已作了大量研究, 但以往的观测手段存在着数据有限、空间范围小等缺点. 一台 Faraday 观测仪只能得到一个电离层星下点的 TEC, Matsoukas 虽然进行了不同耀斑与电离层 TEC 增量的相关研究, 但他利用的是不同耀斑的射电辐射通量参数, 而伴随耀斑爆发引起的射电辐射并不直接影响电离层 TEC 的变化, 而且对不同耀斑其变化参数较多, 统计方法不利于从机理上理解电离层对耀斑的响应.

全球卫星定位系统(GPS)作为一种卫星导航和定位系统, 从其问世以来被广泛应用于电离层研究. GPS 方法具有台站分布广、数量多, 一台 GPS 接收机可同时得到至少 4 个电离层星下点处的垂直 TEC 等优点. 利用这些数据可获得大尺度范围内的电离层状态信息. 到目前为止, 国内外报道了利用 GPS 方法进行电离层行扰(TID), 以及磁暴、地面爆炸对电离层的影响等方面的工作^[5~7], 而利用 GPS 研究耀斑对电离层的影响的工作到目前为止还未见报道. 本文的工作就是利用世界 GPS 台站资料研究一次大耀斑期间的电离层响应.

1 数据来源及处理方法

1997年11月6日世界时11:49分在太阳S18W63处爆发了本次太阳活动周以来观测到的最强的耀斑,该耀斑的X射线通量级别为X9.4,光学亮度等级为2B,太阳表面的活动区尺度有数个地球大小,此次耀斑还伴随着强烈的日冕物质抛射(CME)。我们利用世界GPS观测网取得了纬度在N28~N45的15个台站的GPS原始资料。耀斑爆发时刻这些台站都处于地球向日面。本文试图分析此次耀斑引起的大空间范围的电离层变化。

为了提高GPS方法测量电离层TEC扰动的精度,本文利用伪距观测量与载波相位观测量共同确定电离层的绝对TEC,在数据处理过程中考虑了卫星信号与卫星仰角的加权噪声,同时还考虑了卫星的硬件延迟误差,但没有考虑接收机的硬件误差。文中提供的TEC数据已转换为各星下点处的垂直TEC,单位为 $10^{16}m^{-2}$ 。具体处理方法可参考文献[8]。

2 结果与分析

图1~3为由3个GPS台站数据计算的该耀斑爆发期间电离层垂直TEC随时间的变化结果。图中的不同曲线为不同的卫星数据的计算结果。值得指出的是,不同卫星的电离层星下点的位置也不同,但基本上在观测点附近。

图1的观测点的经纬度为(N32.37W64.69),耀斑爆发时刻观测点的当地时在上午8点左右。从图1可见:在耀斑爆发时刻,所有TEC曲线有一个向上的突变,增加的大小平均均在 $1.8 \times 10^{16}m^{-2}$ 左右,增加的时间间隔为数分钟。另外,从图中还可看到:TEC随时间的总体变化趋势是增加的,这是由于正常太阳辐射对本底电离层TEC作用的结果,在计算耀斑引起的TEC增幅时应将这一背景增量消除掉。

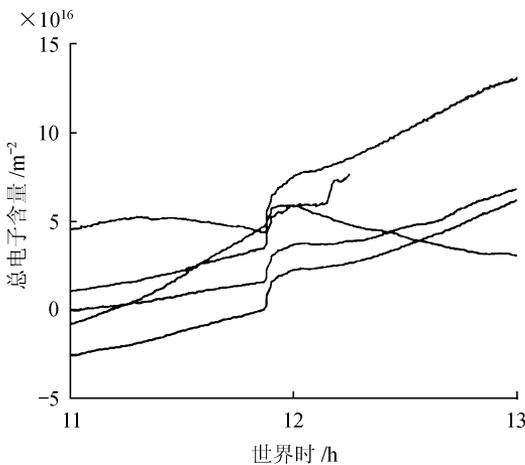


图1 耀斑爆发时刻测站地方时在上午8点左右的TEC随时间的变化

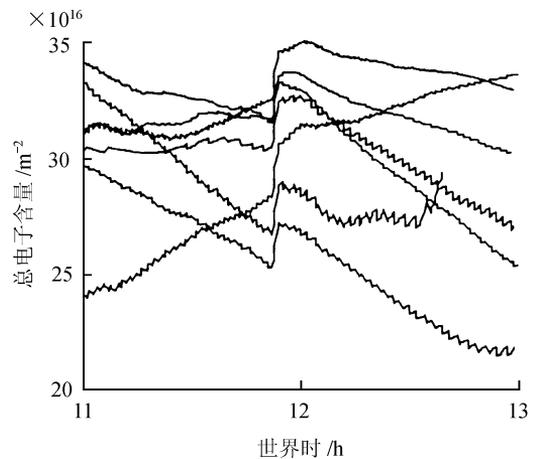


图2 耀斑爆发时刻测站地方时在中午12点左右的TEC随时间的变化

图2的观测点的经纬度为(N43.42E6.92),耀斑爆发时刻该点处于地方时的中午附近,耀斑引起的TEC增加非常明显,TEC的增幅都在 $2.5 \times 10^{16}m^{-2}$ 以上。

图3的观测点的经纬度为(N43.18E77.02),耀斑爆发时刻观测点的当地时为下午17点左右。从图中可见:5条TEC曲线中有3条在耀斑爆发时刻有一个明显的增加,但增加的幅度要小一些。另外,也有2条曲线看不出明显的TEC变化,这是因为耀斑爆发时刻卫星星下点

处的地方时更晚, 其当地时都在 18 点左右, 该处的电离层对耀斑辐射的响应很小.

为了研究耀斑对各地方时处的电离层 TEC 增幅的影响, 本文对纬度在 N28~N45 的耀斑爆发时刻向日面的 15 个台站的 GPS 数据进行了计算. 图 4 为各观测点及耀斑爆发时刻卫星各星下点的经纬度的分布情况, 图中测站分布空白处为大西洋区域. 图 5 为电离层 TEC 增幅随地方时的变化, 图中的曲线为其二次拟合曲线. 从图中可以看到耀斑引起的 TEC 增幅与地方时有直接的关系, 这显然是由于太阳天顶角的变化引起的. 值得注意的

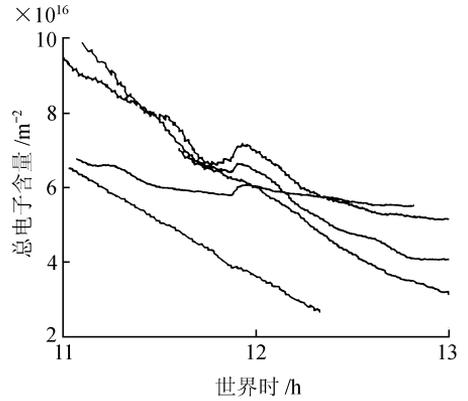


图 3 耀斑爆发时刻测站地方时在下午 17 点左右的 TEC 随时间的变化

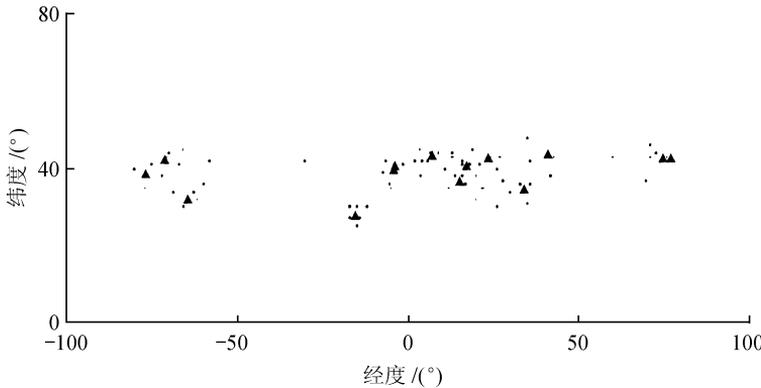


图 4 本文使用的 GPS 测站及耀斑爆发时刻各卫星的电离层星下点的经纬度

是电离层 TEC 增幅并不是相对于当地时中午 12 点对称的, 从图中可以明显看出, 当地时上午的 TEC 增幅要比下午的 TEC 增幅大一些. 如当地时上午 7 点的 TEC 增幅为 $1 \times 10^{16} \text{m}^{-2}$ 左右, 而当地时 17 点的 TEC 增幅仅为 $0.5 \times 10^{16} \text{m}^{-2}$ 左右. 这与 Matsoukas 得到的结果正好相反. Matsoukas 的结果虽然提到了电离层对耀斑响应的地方时不对称性, 但其结果为上午的电离层对耀斑的响应更弱, 如同样射电级别的耀斑, 发生在上午的 12 次仅有 3 次引起了电离层 TEC 增加, 而下午的 12 次却有 7 次引起了电离层 TEC 增加. 由于我们讨论的是一次耀斑对大

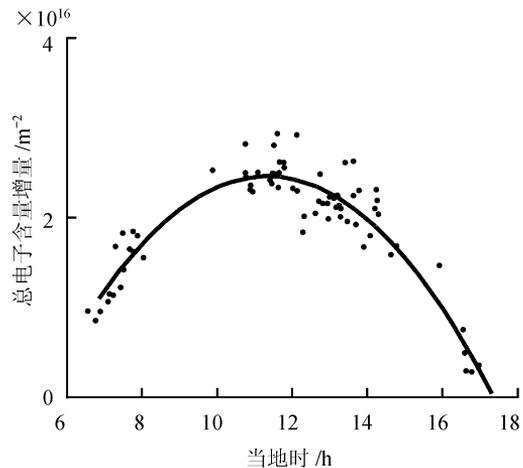


图 5 耀斑期间引起的电离层 TEC 的增幅随星下点各地方时的变化关系

范围电离层的影响, 结果更可靠. Matsoukas 认为引起这一不对称的原因与电离层总的电子密度、电子密度随高度的分布、中性大气随高度的分布等因素有直接的关系.

3 结论

(1) 本次耀斑对向日面电离层造成了大范围的 TEC 增加, 扰动涉及的经度范围在 150° 度左右, 最大 TEC 增幅在 $2.5 \times 10^{16} \text{m}^{-2}$ 以上.

(2) TEC 增幅与地方时有明显的关系, 但并不是相对于地方时中午 12 点对称, 上午增加的幅度大, 下午增加的幅度小, 这与 Matsoukas 的结果正好相反. 正如前面提到的, Matsoukas 所用的太阳射电流量参数并不直接对电离层电子密度产生影响, 其所用的又是不同射电爆发事件的流量参数. 而描述耀斑的参数比较多, 如耀斑的日盘位置、X 射线的流量等. 本文针对一次大耀斑对电离层的影响进行研究, 结果应更有说服力.

致谢 本工作为国家自然科学基金资助项目(批准号: 49874041, 49990454). 感谢世界 GPS 观测网提供的数据.

参 考 文 献

- 1 Matsoukas D A, Papagiannis M D, Aarons J, et al. Correlation of solar radio bursts and sudden increases of the total electron content (SITEC) of the ionosphere. *J A T P*, 1972, 34: 1275 ~ 1283
- 2 Thome G D, Wagner L S. Electron density enhancement in the E and F regions of the ionosphere during solar flares. *J G R*, 1971, 76: 6883 ~ 6894
- 3 Mendillo M. Incoherent scatter observations of the ionosphere respect to a large solar flare. *Radio Sci*, 1974, 9: 197 ~ 210
- 4 马健敏, 龙其利. 1984 年 4 月 24 日太阳耀斑爆发对电离层总电子含量的影响. *空间科学学报*, 1986, 6(4): 184 ~ 192
- 5 Ho C M, Mannucci A J, Lindqwister U J, et al. Global ionospheric perturbations monitored by the worldwide GPS network. *Geophys Res Lett*, 1996, 23: 3219 ~ 3222
- 6 Saito A, Fukao S. High resolution mapping of TEC perturbations with the GSI GPS network over Japan. *Geophys Res Lett*, 1998, 25(16): 3079 ~ 3082
- 7 Fitzgerald T. Observation of total content perturbations on GPS signals caused by a ground level explosion. *J A T P*, 1997, 59(7): 829 ~ 834
- 8 张东和, 萧 佐. 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*, 43(4)

(1999-10-22 收稿, 2000-01-25 收修改稿)