# 1996—2003 年大耀斑事件引起的 TEC 突然增强的统计分析*

陈　斌[1,2,3]　刘立波[1]　万卫星[1]　宁百齐[1]　丁　锋[1]

[1](中国科学院地质与地球物理研究所　北京 100029)
[2](中国科学院武汉物理与数学研究所)
[3](中国科学院研究生院)

**摘　要**　利用 1996—2003 年期间 GOES 卫星耀斑观测资料和国际 GPS 观测网的 GPS-TEC 资料分析 X 级大耀斑事件引起的电离层电子浓度总含量 (TEC) 的突然增强 (SITEC) 现象. 对 X 射线耀斑等级、耀斑日面位置与 SITEC 的关系进行了分析. 结果表明, 两者都与 SITEC 现象的强弱有着一定的正相关性. 在消除 X 射线耀斑等级、耀斑日面位置对电离层 SITEC 现象的影响后, 进而分析了日地距离以及耀斑持续时间对电离层 SITEC 现象的影响. 结果表明, 日地距离和耀斑持续时间都是影响 SITEC 现象的重要参数, 日地距离较近时发生的耀斑事件引起的 SITEC 现象较为强烈. 另外, 耀斑持续时间越长, SITEC 现象越微弱, 但是当耀斑持续时间继续延长时, SITEC 现象的强弱逐渐趋于不再改变, 最后在某值附近达到平衡. 还对某些没有在电离层中引起明显 SITEC 现象的耀斑事件进行了讨论, 发现了这类耀斑的一些特征.

**关键词**　耀斑; 总电子含量 (TEC); 全球定位系统 (GPS)
**中图法分类号**　P 182

# A Statistical Analysis of SITEC Caused by Intense Solar Flares During 1996—2003

CHEN Bin[1,2,3]　LIU Libo[1]　WAN Weixing[1]　NING Baiqi[1]　DING Feng[1]

[1](*Institute of Geology and Geophysics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029)
[2](*Wuhan Institute of Physics and Mathematics, The Chinese Academy of Sciences*)
[3](*Graduate School, The Chinese Academy of Sciences*)

**Abstract**　In this paper, the SITEC phenomena is investigated which were caused by the X-class X-ray solar flares occurred from 1996 to 2003. The TEC data which obtained from a global GPS network are used to calculate the TEC increment, $\Delta\mathrm{TEC_f}$, and the variation rate increment, $\Delta(\mathrm{dTEC_f}/\mathrm{d}t)$, caused by solar flares. It is found that both $\Delta\mathrm{TEC_f}$ and $\Delta(\mathrm{dTEC_f}/\mathrm{d}t)$ are closely related with the flare's maximal X-ray flux and its location on the solar disc. After eliminating the effect of the maximal X-ray fluxes and the locations on solar disc of different flares, results showed that there is a negative relationship between $\Delta\mathrm{TEC_f}$ and the distance between the Earth and the Sun. The larger the distance, the smaller is the $\Delta\mathrm{TEC_f}$. Another finding is that $\Delta(\mathrm{dTEC_f}/\mathrm{d}t)$ correlates with

*国家自然科学基金 (40134020, 40274054), 中国科学院创新方向性项目 (KZCX3-SW-144) 和国家重点基础研究规划项目 (G2000078407) 共同资助
2004-06-15 收到原稿, 2004-11-08 收到修定稿

the duration of the flare. Some characteristics of the flares which cause no obvious SITEC are also found.

**Key words** Solar flares, Total electron content (TEC), Global position system (GPS)

## 1 引言

太阳耀斑事件产生的电离层效应一直是电离层扰动研究中的重要课题. 太阳耀斑发生时伴随有各种电磁和粒子辐射, 其中 X 射线和远紫外辐射会使向日面电离层各高度电子浓度突然增加, 产生短波突然衰减 (SWF)、宇宙噪音突然吸收 (SCNA)、突然相位异常 (SPA)、突然频率偏移 (SFD)、电离层电子浓度总含量突然增强 (SITEC) 等电离层骚扰现象, 可以统称为突然电离层骚扰 (SID). 一般认为不同的 SID 现象对应电离层不同高度上的电子浓度变化, 例如 SWF, SCNA, SPA 等主要由于 D 区和 E 区电离层较低高度上电子浓度的突然增加是 D 区和 E 区的耀斑效应, 而 SFD 和 SITEC 则被认为主要是 F 区的耀斑效应. 在电离层对耀斑响应方面, SITEC 是一个重要现象, 常以耀斑引起的 TEC 增量 ($\Delta\mathrm{TEC_f}$) 和 TEC 变化率的增量 $[\Delta(\mathrm{dTEC_f}/\mathrm{d}t)]$ 来表征 SITEC 现象的强弱.

全球定位系统 (GPS) 从其问世以来被广泛应用于电离层和大气研究. 由于具有高时间分辨率、广阔的空间范围以及良好的时间延续性, GPS 测量得到的 TEC 是研究 SITEC 现象的一种十分有效的手段. 这样, 对太阳耀斑辐射与 SITEC 的相关研究成为一个比较活跃的研究课题. 例如 Liu 等 [1] 分析了耀斑 X 射线辐射通量、太阳天顶角、地方时与 TEC 变化特性的相关性; Afraimovich 等 [2],[3] 对耀斑引起的全球电离层效应, 耀斑引起电离层涨落的松弛时间以及电离层各层对耀斑响应进行了研究; 张东和等 [4]–[6] 研究了耀斑 X 射线辐射通量、地方时和耀斑爆发的日面经度对 SITEC 的影响; 万卫星等 [7] 初步分析了耀斑引起的 TEC 增量及其时间变化率与太阳天顶角、耀斑辐射通量的关系等.

GOES 卫星提供了每次耀斑事件的爆发日期、开始时间、结束时间、日面位置和 X 射线等级等参数. 但是目前有关耀斑引起的 SITEC 现象的研究大多集中在耀斑 X 射线级别、耀斑日面位置以及观测站地方时、太阳天顶角等参数与电离层 SITEC 现象强弱的关系上. 很少考虑其他因素对 SITEC 现象的影响. 本文利用收集到的 GPS 观测台站资料, 对 1996—2003 年期间 X 级太阳耀斑事件的 X 射线等级、爆发时日面位置、持续时间、日地距离对 TEC 变化特性的影响进行了初步统计分析. 另外, 本文还讨论了某些没有在电离层中引起明显 SITEC 现象的耀斑事件的特性.

## 2 数据来源和处理方法

本文利用 1996—2003 年期间 GOES 卫星耀斑观测资料, 选取 GOES 卫星观测到的 X 级太阳耀斑事件爆发期间若干 GPS 观测站的 GPS 观测数据来计算耀斑期间电离层的 TEC 数据. 选择耀斑爆发期间, 处在 LT0700—LT1700 的 GPS 观测资料计算得到的 TEC 数据, 并且不考虑耀斑期间数据点密度小于每小时 115 个的 GPS 卫星观测数据.

GPS-TEC 计算时采用电离层单层模型, 即假设整个电离层的电子集中分布在一个薄球层上, 选择电离层中电子浓度最大的高度 (本文取 400 km) 作为该单层模型的高度, 利用投影关系将斜向 TEC 转化为垂直 TEC (单位是 TECU, $10^{16}/\mathrm{m}^2$).

另外, 为尽量去除野值数据点可能给计算结果带来的偏差, 本文在做数据的平均时, 如果数据点不小于 4 个, 计算均值时预先去掉了数据中的最大值和最小值.

## 3 理论分析

耀斑爆发时突然增强的太阳辐射将使得电离产生率突然增加一个与耀斑辐射相关的增量 $Q_f$, 导致电离层电子浓度产生相对应的增量 $N_\mathrm{f}$. 由于耀斑爆发是一个非常迅速的过程, 近似忽略耀斑期间消失率和漂移率对 $N_\mathrm{f}$ 的影响, 连续性方程可简化为

$$\frac{\partial N_\mathrm{f}}{\partial t} = Q_\mathrm{f}. \tag{1}$$

将式 (1) 沿高度积分, 并运用 Chapman 电离理论, 可得到

$$\frac{\partial \mathrm{TEC_f}}{\partial t} = 2.7183\frac{\eta I_\mathrm{f}'}{\mathrm{ch}(\chi)}. \tag{2}$$

这里 $\mathrm{TEC_f} = \int_0^\infty N_\mathrm{f}(h)\mathrm{d}h$ 为耀斑引起的 TEC 变

化部分，$\eta$ 为与电离层电离效率有关的常数，$I'_{\mathrm{f}}$ 为电离层高度上耀斑的有效辐射通量，$\mathrm{ch}(\chi)$ 为最大电离高度 ($h_{\mathrm{m}} = 120\,\mathrm{km}$) 处的 Chapman 函数值 [7].

从式 (2) 可看出，取 TEC 变化率 $\left(\dfrac{\mathrm{dTEC_f}}{\mathrm{d}t}\right)$ 增幅的最大值作为 TEC 变化率的增量 $\left(\Delta\dfrac{\mathrm{dTEC_f}}{\mathrm{d}t}\right)$，则 $\Delta\dfrac{\mathrm{dTEC_f}}{\mathrm{d}t}$ 与耀斑的最大辐射通量 ($I_{\mathrm{f}}$) 成正比，与 Chapman 函数成反比.

取耀斑引起的 TEC 变化部分 ($\mathrm{TEC_f}$) 的最大值作为耀斑引起的 TEC 增量 ($\Delta\mathrm{TEC_f}$)，并将 (2) 式从耀斑爆发时 ($t_1$) 到 TEC 增幅最大的时刻 ($t_{\mathrm{m}}$) 进行时间积分，积分过程中近似认为 Chapman 函数保持不变，并用增幅最大时刻对应的 Chapman 函数值作为整个耀斑期间的 $\mathrm{ch}(\chi)$，得到

$$\Delta\mathrm{TEC_f} = 2.7183\frac{\eta}{\mathrm{ch}(\chi)}\int_{t_1}^{t_{\mathrm{m}}} I'_{\mathrm{f}}(t)\mathrm{d}t. \qquad (3)$$

基于耀斑期间有效辐射通量突然增强的事实，简化认为辐射通量在某一时刻 $t_n$ 突然增加到 $I_{\mathrm{f}}$，则上式中的积分简化为

$$\int_{t_1}^{t_{\mathrm{m}}} I'_{\mathrm{f}}(t)\mathrm{d}t = \int_{t_n}^{t_{\mathrm{m}}} I_{\mathrm{f}}\mathrm{d}t. \qquad (4)$$

这样得到

$$\Delta\mathrm{TEC_f} = 2.7183\frac{\eta I_{\mathrm{f}}}{\mathrm{ch}(\chi)}\Delta t. \qquad (5)$$

式中 $\Delta t = (t_{\mathrm{m}} - t_n)$.

从式 (5) 可以看出，耀斑引起的 TEC 增量与耀斑的最大辐射通量 $I_{\mathrm{f}}$ 成正比，与 Chapman 函数成反比.

## 4 数据分析

### 4.1 耀斑引起 TEC 与 TEC 变化率的变化

图 1 显示了发生于 2000 年 6 月 7 日的一次耀斑事件中由 4 个 GPS 观测站数据计算得到的 TEC 和 TEC 变化率随时间的演化情况. 这次耀斑的 X 射线等级为 X1.2 级，日面位置 23°N03°E, 开始时间 UT1534, 结束时间 UT1606. 从上至下，4 个 GPS 观测站点当地地方时分别为 LT0800, LT1700, LT1600 和 LT1100 左右. 图 1 左边的 4 个图是耀斑期间 TEC 的时间演化曲线，右边的 4 个图是耀斑期间相应的 TEC 变化率的时间演化曲线. 图中的

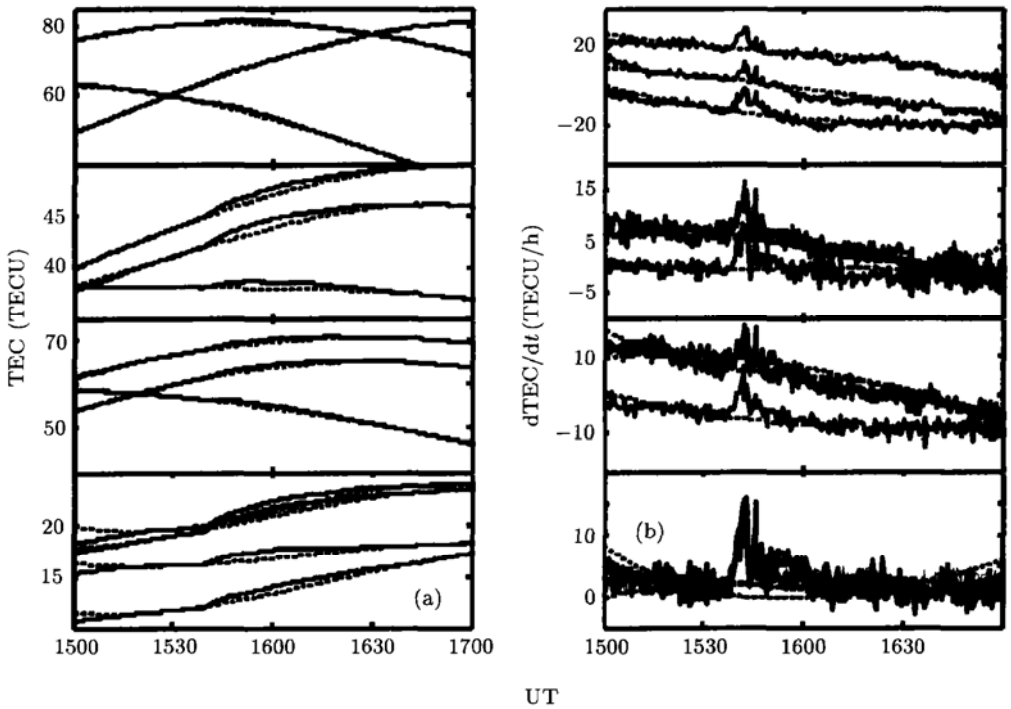



图 1 2000 年 7 月 6 日的一次耀斑事件中 4 个不同观测站得到的 TEC (a) 和 TEC 变化率 (b) 的时间演化曲线 (实线) 以及拟合得到的背景时间演化曲线 (虚线)

Fig.1 Temporal variation of TEC (a) and rate of change of TEC (b) from GPS data observed at four different GPS stations during the flare on 6 July 2000

表 1 48 起耀斑的基本情况

Table 1 Parameters of the flares used in the study

| 日期 | X 射线耀斑等级 | 耀斑日面经度 | 耀斑日面纬度 | 耀斑持续时间 /h |
|---|---|---|---|---|
| 1996-07-09 | 2.6 | −30 | −10 | 0.80 |
| 1997-11-04 | 2.1 | −33 | −14 | 0.17 |
| 1997-11-06 | 9.4 | −63 | −18 | 0.20 |
| 1997-11-27 | 2.6 | 63 | 17 | 0.35 |
| 1998-04-27 | 1.0 | 50 | −16 | 0.72 |
| 1998-05-02 | 1.1 | −15 | −15 | 0.33 |
| 1998-05-06 | 2.7 | −65 | −11 | 0.37 |
| 1998-08-19 | 3.9 | 75 | 32 | 0.25 |
| 1998-08-24 | 1.0 | 9 | 35 | 0.75 |
| 1998-11-23 | 2.2 | −89 | −28 | 0.50 |
| 1998-11-28 | 3.3 | 32 | 17 | 1.32 |
| 1999-08-28 | 1.1 | −14 | −26 | 0.43 |
| 1999-10-14 | 1.8 | 32 | 11 | 0.15 |
| 1999-11-27 | 1.4 | −68 | −15 | 0.18 |
| 2000-02-05 | 1.2 | 52 | 26 | 0.23 |
| 2000-03-22 | 1.1 | −57 | 14 | 0.37 |
| 2000-03-24 | 1.8 | −82 | 16 | 0.30 |
| 2000-06-07 | 1.2 | 3 | 23 | 0.53 |
| 2000-06-18 | 1.0 | −85 | 23 | 0.18 |
| 2000-07-12 | 1.9 | 27 | 17 | 0.47 |
| 2000-07-14 | 5.7 | −7 | 22 | 0.67 |
| 2000-11-25 | 1.9 | −23 | 20 | 0.37 |
| 2000-11-26 | 4.0 | −38 | 18 | 0.37 |
| 2001-03-29 | 1.7 | −19 | 20 | 0.58 |
| 2001-04-06 | 5.6 | 31 | −21 | 0.35 |
| 2001-04-10 | 2.3 | −9 | −23 | 0.60 |
| 2001-04-12 | 2.0 | −43 | −19 | 1.17 |
| 2001-04-15 | 14.4 | −85 | −20 | 0.60 |
| 2001-06-23 | 1.2 | 23 | 10 | 0.15 |
| 2001-08-25 | 5.3 | 34 | −17 | 0.68 |
| 2001-11-04 | 1.0 | −18 | 6 | 0.90 |
| 2001-12-11 | 2.8 | 41 | 16 | 0.27 |
| 2001-12-13 | 6.2 | 9 | 16 | 0.25 |
| 2002-07-03 | 1.5 | −51 | −20 | 0.13 |
| 2002-07-15 | 3.0 | −1 | 19 | 0.25 |
| 2002-07-18 | 1.8 | −30 | 19 | 0.42 |
| 2002-08-03 | 1.0 | −76 | −16 | 0.20 |
| 2002-08-21 | 1.0 | −51 | −12 | 0.13 |
| 2002-08-24 | 3.1 | −81 | −2 | 0.70 |
| 2002-08-30 | 1.5 | 74 | 15 | 0.80 |
| 2003-03-17 | 1.5 | −39 | −14 | 0.43 |
| 2003-03-18 | 1.5 | −46 | −15 | 0.48 |
| 2003-05-29 | 1.2 | −37 | −6 | 0.35 |
| 2003-06-11 | 1.6 | −57 | 14 | 0.43 |
| 2003-10-19 | 1.1 | 58 | 8 | 0.58 |
| 2003-10-29 | 10.0 | −2 | −15 | 0.40 |
| 2003-11-02 | 8.3 | −56 | −14 | 0.60 |
| 2003-11-04 | 28.0 | −83 | −19 | 0.62 |

不同实曲线为不同的卫星数据计算结果. 不同卫星对应的观测点位置不同, 但大多集中在观测站上方附近. 图 1 的虚曲线为利用耀斑前后一段时间的 TEC 和 TEC 变化率数据对耀斑期间数据的三阶拟合, 可以近似认为是正常太阳辐射电离产生的 TEC 背景的演化曲线. 两者的差值作为耀斑引起的电离层 TEC 增幅和电离层 TEC 变化率的增幅.

从图 1 可以看到, 耀斑爆发期间 TEC 有一个明显的增加 (即 SITEC 现象), 并且由于 TEC 增幅反映耀斑辐射通量的演化情况, 因此不同观测点的 SITEC 形态十分相似. 另外, 不同地理位置的观测点计算得到的 TEC 增幅也不一样, 这表明耀斑引起的 TEC 增幅大小与观测点的地理位置有关.

较之 TEC 的变化, TEC 变化率在耀斑期间的时间演化更为明显和迅速, 可以作为是否发生耀斑的更好指示. TEC 变化率的时间演化曲线还呈现出 TEC 时间演化曲线中没有出现的精细结构. 张东和等 [4] 曾经对比过 TEC 变化率的时间演化曲线与软 X 射线 (波长 1—8Å) 和硬 X 射线 (波长 53—93 keV) 的变化曲线, 发现较之 GOES 卫星测得的软 X 射线, 硬 X 射线与 TEC 变化率的时间精细结构对应得更好. 另外, TEC 变化率的增幅也出现了与观测点地理位置的相关性.

本文取 TEC 增幅最大值作为耀斑引起的 TEC 增量 ($\Delta\mathrm{TEC_f}$), 取 TEC 变化率增幅的最大值作为耀斑引起的 TEC 变化率的增量 ($\Delta\mathrm{dTEC_f/dt}$). 注意到 $\Delta\mathrm{TEC_f}$ 和 $\Delta\mathrm{dTEC_f/d}t$ 受观测点地理位置的影响, 在研究电离层对耀斑的响应时, 必须消除观测点地理位置不同而造成对耀斑电离层响应的差异.

根据第 3 节中的分析, 将各个地理位置不同的 GPS 观测点求得的 TEC 增量和 TEC 变化率增量除以对应的 $1/\mathrm{ch}(\chi)$, 消除了观测点地理位置所造成的差异, 再对每次耀斑的所有观测站点求平均值, 得到该次耀斑引起的 TEC 增量和 TEC 变化率的增量.

### 4.2 耀斑事件引起的 TEC 增量和 dTEC/d$t$ 增量的统计规律

由于各 GPS 观测站点建站的时间不一, 而且观测时间也是不连续的, 导致有些耀斑事件爆发期间, 地球向日面没有或只有极少的 GPS 观测站提供可用的 TEC 数据, 考虑到数据可用性, 本文没有将这样的耀斑事件纳入统计分析. 还有一些耀斑事件由于所有的 GPS 观测站点提供的 TEC 变化曲线中都没有出现明显的 SITEC 现象, 这一类耀斑事件期间的 TEC 数据, 本文在统计分析以前也予以去除. 这样剩下可用的耀斑事件数据共 48 起. 这 48 起耀斑事件的基本参数见表 1.

由于电离层中导致电离的主要辐射源是 X 射线和远紫外辐射 (EUV), 通常 EUV 爆发与 X 射线爆发在时间上非常一致, 而且 EUV 爆发的形态与软 X 射线爆发的形态很相似 [9], 所以本文用 GOES 卫星提供的软 X 射线通量表征耀斑的辐射通量, 并用软 X 射线等级度量耀斑的最大辐射通量. 由前面的推导可知, 耀斑引起的 TEC 增量和 TEC 变化率的增量都与耀斑的最大辐射通量 $I_\mathrm{f}$ 成正比. 也就是与耀斑的 X 射线级别成正比.

图 2(a) 显示了 48 起耀斑事件的 X 射线级别与耀斑引起的 TEC 增量的关系. 图 2(b) 显示了每起耀斑事件的 X 射线等级与耀斑引起 TEC 变化率增量的关系. 从 2(a) 图中可以看到 48 起耀斑事件中, 大于 X10 级别的耀斑有两起, 小于 X5 级别的耀斑有 39 起, 耀斑引起的 TEC 增量大于 20 TECU 的有两起, 小于 5 TECU 的有 39 起. 虽然总的趋势是耀斑引起的 TEC 增量随着耀斑 X 射线等级的增大而增大, 但是也可以看出, 级别最大的耀斑事件 (X28) 对应的 TEC 增量并不是引起 TEC 增量最大的一次耀斑事件, 而最大的 TEC 增量 (22 TECU) 对应的耀斑事件级别也远小于 X28 级的最大耀斑级别. 图 2(b) 中也可以看到同样的趋势. 这说明对于不同的耀斑事件, 耀斑引起的 TEC 增量和 TEC 变化率增量不仅仅与耀斑 X 射线级别有关.

张东和等 [5] 曾分析了耀斑引起的 TEC 变化与耀斑爆发的日面经度的关系, 发现对于同样等级的耀斑, 耀斑距日面中线的经度角越小, 耀斑引起的电离层 TEC 增幅越大. 说明耀斑引起的 SITEC 现象与耀斑的日面位置有一定的相关性. 本文利用 GOES 卫星提供的耀斑爆发的日面经度及纬度, 计算出耀斑日面位置与日面中心的夹角, 并用该夹角的余弦值 ($\cos A$) 来表征耀斑的日面位置. 较之单纯用日面经度来度量耀斑的日面位置, 利用 $\cos A$ 来度量耀斑的日面位置, 由于同时考虑了不同耀斑的日面纬度的变化, 对研究耀斑对电离层 SITEC 的影响更加准确, 也更能反映耀斑日面位置的改变.

按耀斑爆发的日面位置与日面中心的夹角余弦值 ($\cos A$) 的大小将 48 起耀斑分为 4 类, 图 2 中分别用 "·" 号 ($\cos A \leqslant 0.3$), "+" 号 ($0.3 < \cos A \leqslant 0.6$),

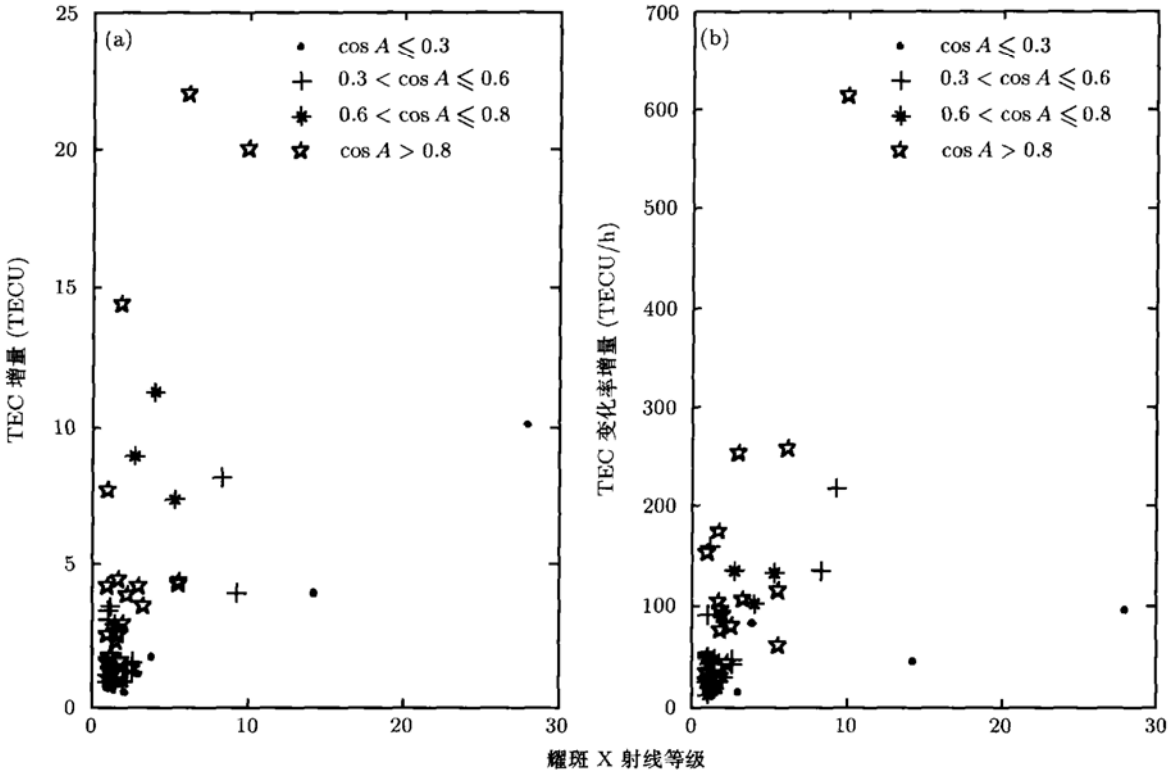



图 2 耀斑的 X 射线等级与 TEC 增量 (a) 以及 TEC 变化率增量 (b) 的关系

Fig.2 The relationship between the magnitude of X-ray flux and TEC enhancement (a) as well as the dTEC/d$t$ enhancement (b)

"$*$" 号 ($0.6< \cos A \leqslant 0.8$), "☆" 号 ($0.8< \cos A$) 表示这 4 类耀斑引起的 TEC 增量和 TEC 变化率增量与耀斑 X 射线级别的关系.

可以看到, 对于 $\cos A$ 相差不大的耀斑事件, X 射线等级越大, 耀斑引起的 TEC 的增量也越大, 随着 $\cos A$ 的增大, 对于同样幅度的等级变化, $\Delta\mathrm{TEC_f}$ 的幅度也有相应增加的趋势. 同样可以看出, 耀斑爆发的日面位置对 TEC 变化率增量的影响也有一样的趋势.

为了更好地了解这种趋势, 将耀斑引起的 TEC 增量和 TEC 变化率增量分别除以相应的耀斑 X 射线等级 ($\Delta\mathrm{TEC_f}/I_\mathrm{f}$ 和 $\Delta\dfrac{\mathrm{dTEC_f}}{\mathrm{d}t}/I_\mathrm{f}$), 然后观察两者与代表耀斑日面位置参数 $\cos A$ 的关系. 图 3(a) 和 (b) 分别显示了 $\Delta\mathrm{TEC_f}/I_\mathrm{f}$ 和 $\Delta\dfrac{\mathrm{dTEC_f}}{\mathrm{d}t}/I_\mathrm{f}$ 与 $\cos A$ 的关系.

从图 3(a) 中可以看出 $\Delta\mathrm{TEC_f}/I_\mathrm{f}$ 随着 $\cos A$ 的增加线性地增长, $\cos A$ 越小, 即耀斑日面位置离日面中心越远, 耀斑引起的电离层 TEC 响应越微弱, $\cos A$ 越大, 耀斑越靠近日面中心, 耀斑引起的电离层 TEC 响应越强烈. 图 3(b) 也显示出 $\Delta\dfrac{\mathrm{dTEC_f}}{\mathrm{d}t}/I_\mathrm{f}$ 与 $\cos A$ 有着同样的线性关系, 但是在两图中都有几起耀斑事件不符合这样的关系, 图 3 中用 "★" 号表示. 在这几起耀斑事件期间, 耀斑引起的 TEC 增量、 TEC 变化率增量与耀斑 X 射线等级的比值或者偏大于或者偏小于大多数具有同样日面位置参数 $\cos A$ 的耀斑事件引起的 TEC 增量、 TEC 变化率增量与耀斑 X 射线等级的比值. 这说明除耀斑的 X 射线等级、耀斑日面位置这两个因素外, 还有其他的因素影响耀斑期间电离层 SITEC 现象的强弱.

标注这几起耀斑事件的发生时间和持续时间 (在图 3 中用数字表示, 前两个数值分别为月份和日期, 括号内的数值为持续时间), 如图 3 中所示, 发现引起 TEC 增量和 TEC 变化率增量大于同类日面位置耀斑的耀斑事件爆发时间多集中在 10 月、11 月, 而小于同类耀斑事件的耀斑事件多发生在 3 月、4 月和 7 月. 这说明耀斑引起的电离层 SITEC 现象的强弱会随着耀斑爆发月份的改变而改变, 而耀斑爆发的月份与爆发时的日地距离有直接的联系.

为了更加直接地反映耀斑爆发时的日地距离与电离层 SITEC 的关系, 需要消除不同耀斑日面位

置对电离层 SITEC 的影响. 考虑到 $\Delta\mathrm{TEC_f}/I_\mathrm{f}$ 和 $\Delta\dfrac{\mathrm{dTEC_f}}{\mathrm{d}t}/I_\mathrm{f}$ 随着 $\cos A$ 增加呈现线性增长的趋势. 将 $\Delta\mathrm{TEC_f}/I_\mathrm{f}$ 和 $\Delta\dfrac{\mathrm{dTEC_f}}{\mathrm{d}t}/I_\mathrm{f}$ 除以代表耀斑日面位置的参数 $\cos A$, 得到新的参数 SF 和 DSF, 分别代表日面中心位置出现的 X1 级耀斑引起的地球上太阳直射点位置的电离层 TEC 增量和 TEC 变化率增量, 并计算 48 起耀斑事件爆发当天的日地距离.

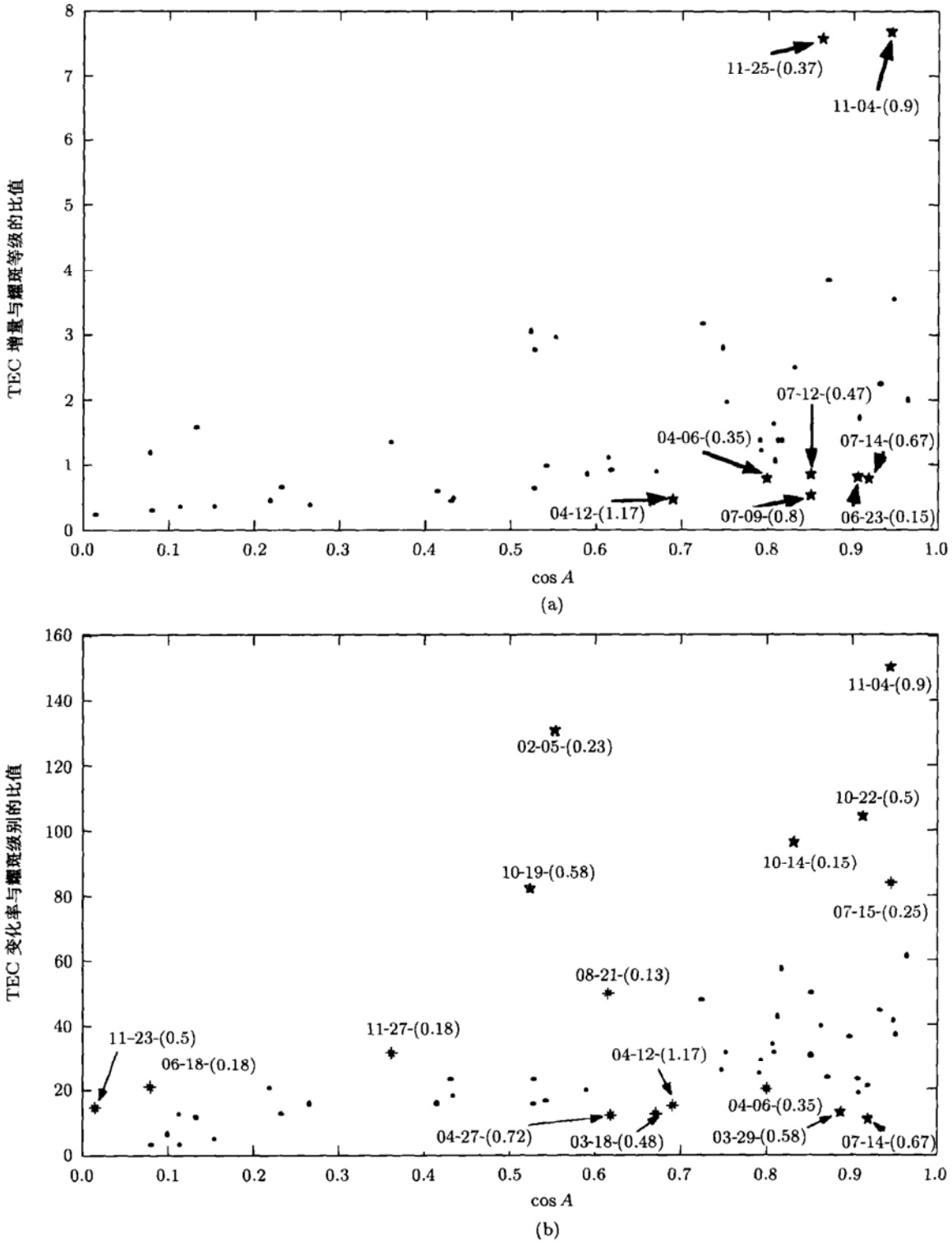



图 3 $\Delta\mathrm{TEC_f}/I_\mathrm{f}$(a) 和 $\Delta(\mathrm{dTEC_f}/\mathrm{d}t)/I_\mathrm{f}$(b) 都与耀斑的日面位置参数 $\cos A$ 有着正相关性

Fig.3 Both $\Delta\mathrm{TEC_f}/I_\mathrm{f}$ (a) and $\Delta(\mathrm{dTEC_f}/\mathrm{d}t)/I_\mathrm{f}$ (b) are closely related with the flare's location on the solar disc

图 4 显示了 SF 与日地距离的关系. 可以看出日地距离较远时, SF 较小, 日地距离较近时, 耀斑引起的 SF 较大. 这说明对于同样耀斑日面位置、同样 X 射线等级的耀斑事件, 日地距离越近, 耀斑引起的电离层 TEC 增量越大.

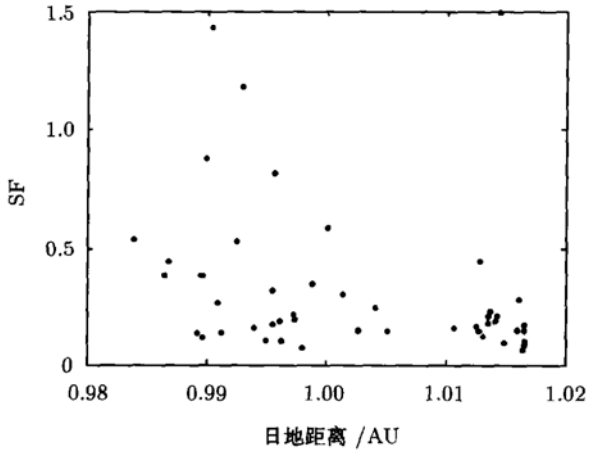



图 4 日地距离与 SF($\Delta TEC_f/(I_f \cos A)$) 存在负相关性
Fig.4 SF ($\Delta TEC_f/(I_f \cos A)$) is negatively related with the distance between the Earth and the Sun

考虑 TEC 变化率增量与日地距离的关系, 进行同样的讨论时, 没有发现明显的与日地距离的相关性. 这说明日地距离对 TEC 变化率的增量没有明显的影响.

可以注意到, 由于耀斑 X 射线等级是于地球同步轨道空间观测的, 反映的是耀斑 X 射线辐射在地球区域的强弱. 因此, 不会因为日地距离改变而影响耀斑 X 射线辐射的强弱, 理论上不会出现电离层 TEC 对耀斑的响应与日地距离之间的联系. 考虑由于远紫外辐射也是耀斑产生电离层 SITEC 的主要辐射源, 因此距离的变化对远紫外辐射的影响是否比 X 射线辐射更为明显, 从而在一定程度上表现为耀斑期间电离层 SITEC 随日地距离改变而变化的现象? 由于缺乏这方面的观测数据, 这个问题还有待进一步观测和研究.

在前面讨论耀斑引起的 TEC 增量与耀斑 X 射线级别的正相关性时, 忽略了耀斑持续时间的差异, 因此耀斑持续时间是否对耀斑引起的 TEC 增量有着一定的影响? 本文在图 3(a) 中标出了部分数据点的持续时间. 结果没有发现明显与耀斑持续时间的相关趋势, 这说明在考虑耀斑引起的 TEC 增量与耀斑 X 射线的关系时, 忽略耀斑持续的时间是可行的. 但是由图 3(b) 中标定的部分耀斑事件的持续时间看出, 耀斑持续的时间与耀斑引起的 TEC 变化率增量有一定的相关性.

图 5 显示了耀斑持续时间与 DSF 的关系, 从图中可以看出, 在耀斑持续时间小于 0.6 h 的情况下, 随着耀斑持续时间的增加, DSF 逐渐减少, 对应着 TEC 变化率增量逐步减小, 这说明耀斑持续时间越长, 电离层 TEC 在耀斑期间的抬升越平缓. 而耀斑持续时间大于 0.6 h 后, 随着持续时间的增长, DSF 不再减小, 反而有所增加, 最后大约在 1 h 长度附近趋于平衡在一个常量附近.

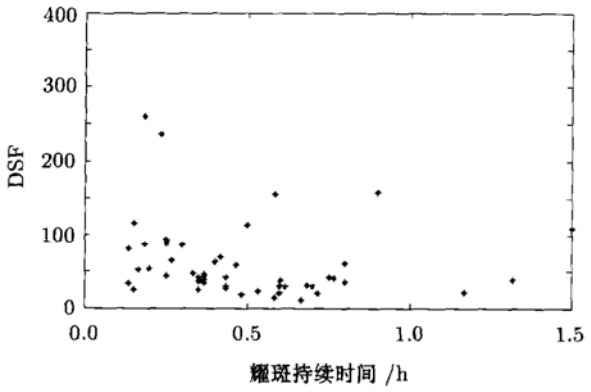



图 5 当耀斑持续时间小于 0.6 h 时, 其与 DSF($\Delta(dTEC_f/dt)/(I_f \cos A)$) 有一定的负相关性
Fig.5 DSF ($\Delta(dTEC_f/dt)/(I_f \cos A)$) is negatively related with the duration of the flare when the duration is less than 0.6 h

可以注意到, 在前面讨论耀斑引起的 TEC 变化率增量与耀斑 X 射线等级的关系时, 本文忽略掉了电子电离连续性方程中的消失项和漂移项. 随着耀斑持续时间的延长, 耀斑引起的电离层中电子复合效应增强也变得越来越明显, 当耀斑时间延长到足够长时, 电子复合效应必然要对电离层 TEC 的演化情况产生能够与产生率相比拟的效果, 从而要求在电子电离连续性方程中必须考虑消失项的作用. 因此, 是不是在耀斑持续时间大于 0.6 h 的情况下, 电离层中电子复合效应已经足够对电离层的 SITEC 现象产生不可忽略的影响; 而随着耀斑持续时间的继续延长, 耀斑引起的电子产生率的作用和电子消失率的作用将达到平衡的状态, 从而表现为 DSF 逐步趋向于在某值附近达到平衡. 这些问题都有待进一步的观测和分析.

### 4.3 无 SITEC 效应的耀斑分析

在某些耀斑事件期间, GPS 观测站点得到的 TEC 时间演化曲线中没有观察到明显的 SITEC 现象, 有些曲线虽然可以看到 TEC 有一定程度的增加, 但是增加的时间长度远大于耀斑持续的时间, 如图 6(a) 所示; 有些由于观测点正处在 LT1200 左右, 使得耀斑引起的 TEC 增长完全被 TEC 背景变化掩盖了, 导致无法计算耀斑引起的电离层 TEC 增量, 如图 6(b) 所示; 有些 TEC 曲线的振荡过于强烈, 从曲线上分辨不出耀斑引起的 TEC 变化, 如图 6(c) 所示; 还有的从曲线上完全看不到 TEC 的增长, 如图 6(d) 所示.

本文对这类没有在电离层中观察到明显 SITEC 现象的耀斑事件的统计过程中, 发现在这类耀斑事件期间, 有的仅是个别的 GPS 观测站计算出的 TEC 变化曲线中没有明显的突然增强现象, 而其他的观测站点可以看见明显的 SITEC 现象, 这或许与观测站点的地理位置有关. 而有些耀斑事件在本文所收集的所有观测站点计算显示的 TEC 变化曲线上都没有看到明显的突然增强现象. 本节对这一问题作一些初步的讨论.

表 2 列出了所有至少 2 个 GPS 观测站没有观察到 SITEC 现象的耀斑事件具体数据, 其中, 给出了 GPS 观测站点对应耀斑爆发时当地的地方时. 在表 2 中用 ○ 表示从 TEC 演化曲线可以看到明显的 SITEC 现象, 用 × 表示没有看到明显 SITEC 现象. 从表中可以看到, 共观察到这样的耀斑事件 13 起. 注意到有些观测站点在这 13 起耀斑事件中没有给出一次明显的 SITEC 现象, 去掉这些站点所带来的影响, 仍旧保留至少有两个 GPS 观测站点没有观察到 SITEC 现象的耀斑事件. 这样剩下的耀斑事件共 9 起. 在这 9 起耀斑事件中, 持续时间大于 0.5 h 的 5 起, 耀斑 X 射线级别小于 X2.0 的 6 起, 耀斑日面位置距日面中线经度角大于 80° 的 5 起. 分别占 1997—2003 年同类耀斑事件的 19.2%, 14.3%, 33.3%. 至少满足 2 个条件的 5 起, 占同类事件的 25%. 3 个条件都满足的 2 起, 而 1996—2003 年间同类的事件也仅有 2 起, 并且在这 2 起耀斑事件期间, 所有的 GPS 观测站点都没有看到明显的 SITEC 现象. 这说明这两起耀斑事件确实没有在电离层中引起可以观察到的 SITEC 现象.

从上面的分析可以看出, 当一次耀斑事件符合持续时间较长, 日面位置偏离中心位置较大, 而且耀斑级别不是特别大的时候, 很可能并不会在电离层中引起预期应该出现的 SITEC 现象. 另外, 注意到随着观测站点地方时的变化, 对于同一次耀斑事件, 有的观测站能够观测到明显的 SITEC 现象, 而有的则没有出现. 这说明观测站点的地理位置与当地电离层会不会出现 SITEC 现象也有一定的关系, 对于这一问题还有待于收集更多的 GPS 观测站数据和耀斑事件, 进行进一步的观测和研究.

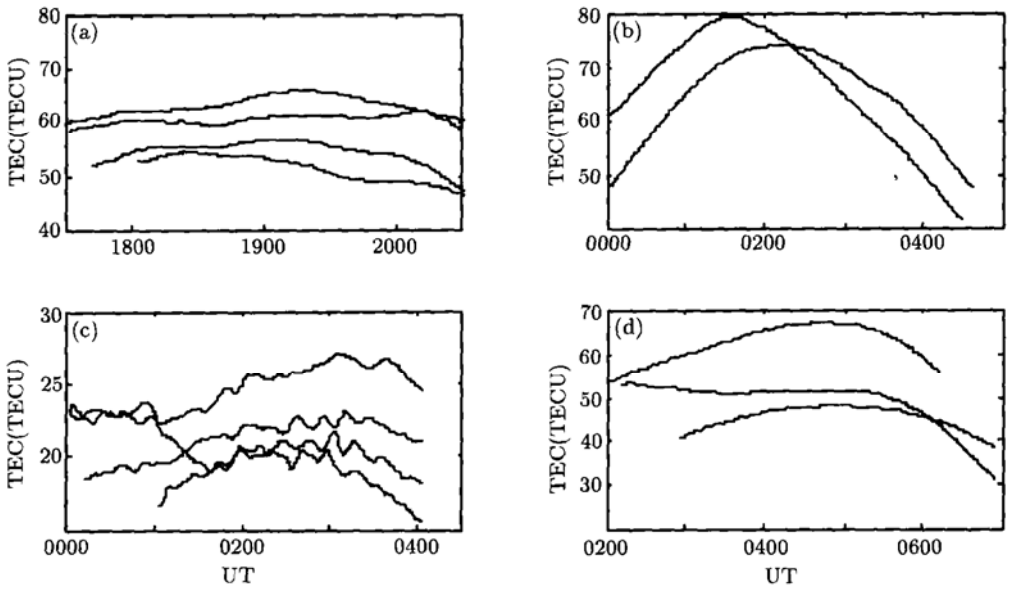



图 6 没有明显 SITEC 现象的 TEC 时间演化曲线

Fig.6 Temporal variation of TEC during flares which cause no obvious SITEC as that in Fig.1

**表 2 没有在观测站得到明显 SITEC 现象 (× 表示) 的耀斑事件的数据统计**

**Table 2 Solar flares which cause no obvious SITEC**

| 爆发日期 | 1998-11-23 | | 1998-11-28 | | 1999-11-27 | | 2000-03-22 | | 2000-06-18 | | 2000-11-26 | | 2001-04-03 | | 2001-10-22 | | 2001-11-04 | | 2002-04-21 | | 2002-08-24 | | 2003-10-19 | | 2003-10-29 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| X 射线耀斑等级 | X2.2 | | X3.3 | | X1.4 | | X1.1 | | X1.0 | | X4.0 | | X1.2 | | X1.2 | | X1.0 | | X1.5 | | X3.1 | | X1.1 | | X10.0 | |
| 持续时间 /h | 0.5 | | 1.32 | | 0.18 | | 0.37 | | 0.18 | | 0.37 | | 1.5 | | 0.5 | | 0.9 | | 1.9 | | 0.7 | | 0.58 | | 0.4 | |
| 日面位置 | 28°S, 89°W | | 17°N, 32°E | | 15°S, 68°W | | 14°N, 57°W | | 23°N, 85°W | | 18°N, 38°W | | 21°S, 83°E | | 18°S, 16°E | | 06°N, 18°W | | 14°S, 84°W | | 02°S, 81°W | | 08°N, 58°E | | 15°S, 02°W | |
| algo | | | | | | | 13.6 | × | | | 11.6 | ○ | | | 12.8 | × | 11.1 | ○ | | | | | 11.6 | ○ | 15.6 | ○ |
| artu | | | | | 16.1 | × | | | | | | | 7.8 | × | | | | | | | | | | | | |
| auck | | | | | | | | | 13.6 | × | | | 15.6 | × | | | | | 13.5 | × | 12.8 | ○ | | | | |
| bahr | 10.1 | × | 10.2 | × | 15.5 | ○ | | | | | | | 7.3 | × | | | | | | | | | | | | |
| baie | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 12.3 | × | | |
| daej | | | | | | | | | 10.5 | ○ | | | 12.4 | × | | | | | 10.3 | × | 9.7 | ○ | | | | |
| drao | | | | | | | 10.9 | × | | | 8.9 | ○ | | | | | 8.4 | × | | | | | | | | |
| fair | | | | | | | 9.0 | × | | | | | | | | | | | | | | | | | 11.0 | × |
| hers | | | | | 12.2 | × | | | | | 16.8 | ○ | | | | | | | | | | | | | | |
| hob2 | 16.5 | ○ | 16.7 | × | | | | | | | | | 13.8 | × | | | | | 11.7 | × | 11.0 | × | | | | |
| kokb | | | | | | | 8.2 | ○ | | | | | | | 7.4 | × | | | | | | | | | 10.2 | ○ |
| kosg | 7.1 | × | | | 12.5 | ○ | | | | | | | | | | | 16.6 | × | | | | | | | | |
| pin1 | | | | | | | 11.1 | ○ | | | 9.1 | ○ | | | 10.3 | × | 8.6 | ○ | | | | | 9.1 | ○ | 13.1 | ○ |
| pin2 | | | | | | | 11.1 | ○ | | | 9.1 | ○ | | | 10.3 | × | 8.6 | ○ | | | | | 9.1 | ○ | 13.1 | ○ |
| sio3 | | | | | | | 11.0 | ○ | | | 9.0 | × | | | 10.2 | × | 8.5 | ○ | | | | | 9.0 | ○ | 13.0 | ○ |
| wuhn | 14.3 | ○ | 14.5 | ○ | | | | | 9.6 | ○ | | | 11.6 | × | | | | | | | 8.8 | ○ | | | | |
| yar1 | 14.4 | ○ | 14.5 | ○ | | | | | 9.7 | × | | | 11.6 | × | | | | | 9.5 | × | | | | | | |
| yar2 | 14.4 | ○ | 14.5 | ○ | | | | | 9.7 | ○ | | | 11.6 | × | | | | | 9.5 | × | 8.9 | × | | | | |
| yell | | | | | | | 11.2 | × | | | 9.2 | × | | | 10.4 | × | 8.7 | × | | | | | 9.2 | × | 13.2 | × |

## 5 结果与讨论

太阳耀斑期间突然增强的X射线和远紫外辐射会加大电离层中的电子电离产生率，从而使电离层TEC和TEC变化率都出现突然增强现象. 对于地球上不同地理位置的观测点，不同的太阳天顶角影响了电离产生率，使得不同观测站点得到的TEC增量与TEC变化率增量随着地理位置的改变而不同. 不同的太阳耀斑X射线级别对应着强度不同的X射线辐射通量和远紫外辐射通量，从而对电离产生率产生根本的影响. 多起耀斑事件证明，耀斑的日面位置也对电离层TEC对耀斑的响应产生决定性的影响. 本文表明，用耀斑日面位置与日面中心夹角的余弦值来表征耀斑日面位置是可行的.

为了消除观测站地理位置、太阳耀斑X射线级别和耀斑日面位置这3个因素对耀斑引起的电离层TEC响应的影响，本文忽略了上述因素对电离层SITEC现象影响的不同强度，近似认为这3个因素有着同样的影响因子，依次用TEC增量和TEC变化率增量除以$1/\mathrm{ch}(\chi)$、耀斑X射线等级$I_{\mathrm{f}}$以及耀斑日面位置参数$\cos A$，得到不受观测点地理位置、耀斑事件等级、耀斑日面位置的反应电离层TEC与$\mathrm{dTEC}/dt$对耀斑响应的参数SF与DSF. 本文的分析过程表明这样的近似是可行的.

通过分析不同耀斑事件对应的SF和DSF大小，可以得到如下结论.

(1) 耀斑引起的电离层TEC增量与耀斑爆发时日地距离有密切的关系. 日地距离较近时，耀斑引起的电离层响应较强；日地距离较远时，耀斑引起的电离层响应较弱.

(2) 耀斑持续时间对耀斑引起的电离层$\mathrm{dTEC}/dt$增量有显著的影响. 在耀斑持续时间小于0.6 h的情况下，随着耀斑持续时间的延长，耀斑引起的电离层$\mathrm{dTEC}/dt$增量逐步减少. 随着耀斑持续时间的继续延长，$\mathrm{dTEC}/dt$对耀斑的响应趋近于某个定值.

(3) 当耀斑X射线级别小于X2.0，耀斑持续时间大于0.5 h以及耀斑日面位置距离中线经度角大于80°时，电离层TEC往往不会对耀斑事件产生预想中的SITEC响应.

## 参考文献


[1] Liu J Y, Lin C H, Tsai H F, Lion Y A. Ionospheric solar flare effects monitored by the ground-based GPS receivers, Theory observation. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**(A01307) doi: 10.1029/2003JA009931

[2] Afraimovich E L, Altyntsev A T, Kosogorov E A *et al.* Ionospheric effects of the solar flares of September 23, 1998 and July 29, 1999 as deduced from global GPS network data. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 2001, **63**(17):1841—1849

[3] Leonovich L A, Afraimovich E L, Romanova E B *et al.* Estimating the contribution from different ionospheric regions to the TEC response to the solar flares using data from the international GPS network. *Ann. Geophys.*, 2002, **20**:1935—1941

[4] Zhang Donghe, Xiao Zuo. Study of the ionospheric total electron content response to the great flare on 15 April 2001 using the International GPS Service network for the whole sunlit hemisphere. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108**(A8):1330—1340

[5] Zhang Donghe, Xiao Zuo, Chang Qing. The correlation of flare's location on solar disc and the sudden increase of total electron content. *Chin. Sci. Bull.*, 2002, **47**:82—85

[6] Zhang Donghe, Sun Zhen, Liu Siqing *et al.* One case study about the ionospheric response to one great solar flare in the sun-lit hemisphere. *Chin. J. Space Sci.*, 2004, **24**(2):96—104. in Chinese (张东和, 孙臻, 刘四清等. 大耀斑期间向日面电离层总电子含量的响应各例分析. 空间科学学报, 2004, **24**(2):96—104)

[7] Wan Weixing, Yuan Hong, Liu Libo *et al.* The GPS measured SITEC caused by the very intense solar flare on July 14, 2000. *Adv. Space Res.*, in press

[8] Ye Zonghai, Jiang Herong. The influences of solar flares on ionospheric electron content. *Chin. J. Space Sci.*, 1986, **6**(3):177—183. in Chinese (叶宗海, 蒋和荣. 太阳耀斑对电离层总电子含量的影响. 空间科学学报, 1986, **6**(3):177—183)

[9] Hu Wenrui, Lin Yuanzhang, Wu Linxiang *et al.* Solar Flare. Beijing: Science Press, 1983. in Chinese (胡文瑞, 林元章, 吴林襄等. 太阳耀斑. 北京: 科学出版社, 1983)