

1984年4月24日大太阳耀斑爆发对 电离层电子总含量的影响

马健敏 龙其利
(中国电波传播研究所)

摘 要

本文给出1984年4月24日2356 UT太阳耀斑爆发期间在新乡和重庆两地利用法拉第技术接收日本同步卫星ETS-II的甚高频信号所得到的电离层电子总含量的异常变化。两站在耀斑爆发期间的三分半钟内同时观测到电离层电子总含量的突然急剧增加。它们的增量分别为 9.4×10^{16} 和 14.3×10^{16} ele/m²。本文还将偏振仪所观测到的现象与电离层垂测记录及甚低频锁相接收机所观测到的记录作了比较。分析的结果表明,大太阳耀斑期间不仅D层的电子浓度大大增加,而且F层的电子浓度也显著增加,后者是这次总含量剧增的主要部分。

一、引 言

研究太阳耀斑对电离层的影响,常用的一种监测方法是利用测高仪,但由于耀斑期间D层的严重吸收,使测高仪收不到任何回波。因此,用测高仪不可能对整个电离层进行研究。此外人们还采用了一些间接的方法,如突然频率偏移(SFD)技术及后向散射技术,对 h_m 以下的电子浓度的突然变化进行研究。随着同步卫星的出现和非相干散射技术的发展,提供了监测太阳耀斑对整个电离层影响的可能。这两种技术比较起来,非相干散射技术的优点是能完整地得出耀斑期间电离层电子浓度的分布,但它不大可能长期连续地工作,因此不能作为长期监测的手段。利用同步卫星的甚高频信号,可以连续不断地得到电离层电子总含量,即使在严重的太阳和地磁场扰动的情况下也能得到连续的结果,而且它能广泛布站,因此这种方法是日常监测太阳对电离层影响的一种很好的方法。利用这种方法人们观测到在某些大耀斑爆发期间电离层电子总含量突然增加(简称SITEC),并研究了它在全球范围内的响应^[1,2]。

1984年4月21日至4月30日太阳的活动性很强,日面上发生了许多次较大的耀斑,太阳的黑子数也较高。太阳活动性的增强对地球的电离层产生了很大的影响,其中1984年4月24日2356UT发生的3B级大耀斑对电离层的影响尤为显著。本文着重介绍这次大耀斑期间在新乡和重庆两地所观测到的电离层电子总含量的异常变化。本文还将偏振仪所观测到的现象与电离层垂直探测记录及甚低频锁相接收机的观测记录一起进行了比

较和分析。

二、观测方法和观测结果

所用观测方法是利用自制的电离层偏振仪连续接收日本同步卫星 ETS-II 的 136MHz 信号,测出无线电波穿越电离层后偏振面旋转角的变化,因为偏振面旋转的角度是与电波路径上的电子总含量有关的,因此测出了旋转角就可以知道电离层电子总含量。它们的换算公式如下:

$$N_T = \frac{f^2}{KM} \cdot Q.$$

其中 f 是卫星信标频率, K 是常数, \bar{M} 是平均磁场因子 ($\bar{M} = B \cos\theta \sec \chi$), B 是传播路径上距地面 400km 高度点的磁场, θ 是传播角, χ 是观测点观测卫星的天顶角, Q 是电波穿越电离层后偏振面旋转的角度, N_T 是直至 2000km 高度电离层垂直柱的电子总含量。

日本同步卫星 ETS-II 的位置是在东经 130° 的赤道上空。观测站在新乡和重庆两地。观测站的地理经纬度及其电波路径上距地面 400 km 高度点所对应的地面投影点(电离层对下点)的地理经纬度如表 1 所示。

表 1 观测站及其电离层对下点的经纬度

观测站名	观测站地理经纬度		400km 对下点的地理经纬度	
	新乡	35.3°N	113.9°E	32.4°N
重庆	29.5°N	106.4°E	27.0°N	109.1°E

这次太阳耀斑开始的时间是 1984 年 4 月 24 日 2356 UT, 耀斑最大时刻是 25 日 0001UT。耀斑级别为 X13/3B 级^[3]。这表示耀斑的面积和亮度都是比较大的,且伴有强烈的 0—8 Å 的 X 射线。

图 1 表示这次耀斑前后以及耀斑期间在新乡和重庆两站观测到的电离层电子总含量 (TEC) 的时变曲线。为了便于比较,在图中给出了耀斑爆发前一、二天(太阳比较宁静)这两个站的 TEC 时变曲线。从图 1 可以看到耀斑爆发期间新乡和重庆两地观测到的 TEC 都有 SITEC 发生。表 2 列出了这次耀斑爆发期间新乡和重庆两地观测到的 TEC 变化的详细数据以及 SITEC 的起止时间。从表 2 可知,新乡 $\Delta\text{TEC} = 9.4 \times 10^{16} \text{ ele}/\text{m}^2$, 重庆 $\Delta\text{TEC} = 14.3 \times 10^{16} \text{ ele}/\text{m}^2$ 。其相对增量分别为 40% 和 60%,两站所观测到的 SITEC 是在同一时刻发生的。三分半钟之后(即世界时 25 日 0 点 02 分 30 秒)两站的 TEC 同时达到极大,随后两站的 TEC 又同时开始逐渐下降,到 0032UT 两站的 TEC 都不再下降了。这时新乡站的 TEC 在这个数值上维持了 3 分钟,重庆站维持了 6 分钟。然后两站的 TEC 重新开始以比一般的日变化略慢的速度上升。在发生 SITEC 的最初三分半钟内,新乡站的电子总含量平均增长率为 $27 \times 10^{15} \text{ ele}/\text{m}^2 \cdot \text{min}$,重庆为 $41 \times 10^{15} \text{ ele}/\text{m}^2 \cdot \text{min}$ 。

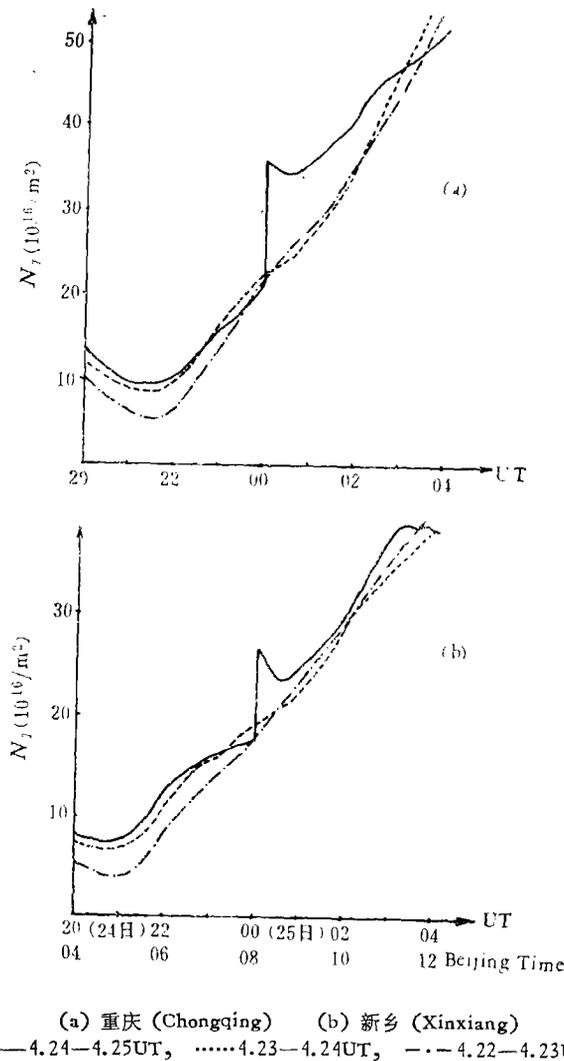


图 1 1984 年 4 月 24 日太阳大耀斑期间 TEC 的突然增加

Fig. 1 Sudden increases of TEC during the great solar flare of April 24, 1984

表 2 1984 年 4 月 24 日太阳耀斑引起的电子总含量的变化

观测站名	SITEC 数据			SITEC 起止时间 (UT)			耀斑期间总含量的增长率 $10^{15} \text{ ele/m}^2 \cdot \text{min}$	耀斑爆发前 1—2 天对应时间的总含量增长率 $10^{15} \text{ ele/m}^2 \cdot \text{min}$
	ΔQ π	ΔTEC 10^{16} ele/m^2	ΔTEC %	起 始 h, min, s	终 止 h, min, s	ΔT min		
新 乡	2.09	9.4	~40	23 59 00	00 02 30	3.5	27	0.5—1.0
重 庆	2.64	14.3	~60	23 59 00	00 02 30	3.5	41	0.5—1.0

而耀斑爆发前一、二天对应时间的 TEC 平均增长率在新乡约为 $(0.5-1.0) \times 10^{15} \text{ ele/m}^2 \cdot \text{min}$, 重庆也是这个数量范围. 可见耀斑引起 SITEC 的平均增长率要比平时的大 30—80 倍.

为了进一步分析太阳耀斑对电离层的影响,对北京、重庆、广州、长春、兰州等电离层垂测站在本次太阳耀斑期间所获取的电离层资料进行了分析对比。这些站观测的结果是:在太阳耀斑爆发期间上述各站都观测到了电离层突然骚扰现象,在这几个站的电离

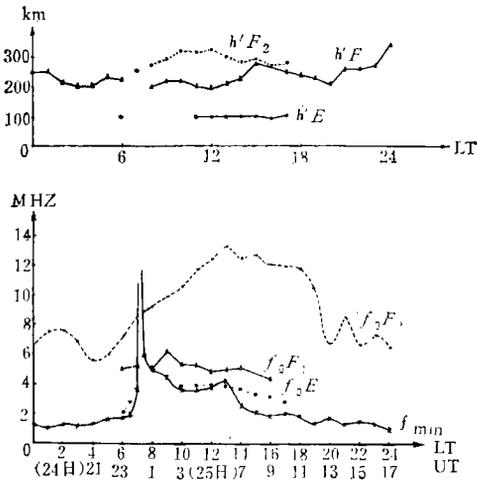


图2 1984年4月24日太阳大耀斑期间重庆站电离层参量的变化

Fig. 2 Variations of ionospheric characteristics at Chongqing during the great solar flare of April 24, 1984

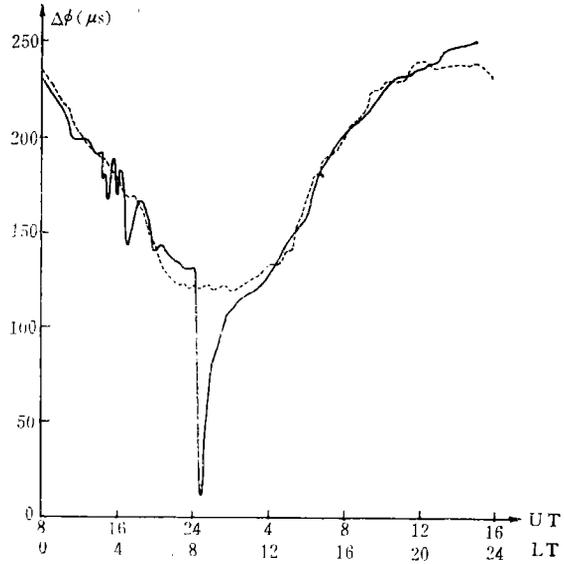


图3 1984年4月24日太阳大耀斑引起的VLF相位异常变化

— 4.24—4.25UT, ---- 4.19—4.20UT, $\Delta\phi = 118\mu\text{s}$, $\Delta h = 19.4\text{km}$, 频率(frequency): 10.2kHz, 发射地点 (transmitting site): Hawaii (21.4°N, 157.8°W), 接收地点 (receiving site): Xinxiang (35.3°N, 113.9°E), 路径长度 (path length): 8525km

Fig. 3 VLF phase anomaly associated with the great solar flare of April 24, 1984

图上至少有半个小时(25日0000—0030UT)没有任何回波的描述,其中北京站的电离图上整整有一个小时没有回波。这反映短波波段的无线电讯号全部被电离层吸收掉了。此外,在这前后各站上空的电离层都受到了不同程度的扰动,直到0130UT各站的电离层才恢复到宁静的状态。图2是一组反映耀斑引起的电离层变化过程的典型曲线。从图2可以看到,最初电离层只是使较低频率的电波的吸收增加,随后很快整个短波波段的电波完全吸收。在恢复过程中先是出现F层反射信号,然后出现E层反射信号。

这次太阳耀斑爆发时新乡的几台甚低频接收机(接收10.2kHz信号)也观测到了相位异常变化,测试的结果是VLF传播的相位异常始于24日2357UT,到25日0008UT达到极大,直到25日0430UT才恢复到正常状态。图3表示耀斑引起的VLF相位随时间的变化。图中的虚线是太阳较宁静时由太阳天顶角变化引起电离层等效反射高度的变化,使得VLF的传播相位有昼夜规律性的变化。图中实线表示太阳耀斑爆发时VLF相位的异常变化。由图3可见这次耀斑引起的 $\Delta\phi = 118\mu\text{s}$ 。在这种情况下定位的误差

达到 35km。因此太阳耀斑的预报对短波通讯以及甚低频定位系统都有十分重要的意义。经过计算知道这次耀斑爆发使电离层的等效反射高度(D 层的底部)下降了近 20km, 在这条电路上就是在本周期的太阳活动峰年也没有测到过这么大的数值, 足见这次耀斑对电离层的影响之大是十分罕见的。

三、讨 论

这次太阳耀斑引起的电离层效应之一是 SID 事件, 这反映了电离层 D 层的电子浓度大大增加, 从北京、重庆等几个电离层垂测站的频高图上有半小时或者更长时间没有任何回波描述就足以说明这次耀斑所引起的 D 层浓度剧增的程度。太阳耀斑爆发时 $0-8 \text{ \AA}$ 的辐射能量剧增, 特别是这次耀斑是 X13/3B 级的, $0-8 \text{ \AA}$ 的能量要比一般的耀斑更大, 因而使得 D 层的电子浓度剧增。

这次太阳耀斑引起的电离层效应还表现在电离层的电子总含量突然增加, 这反映了大耀斑期间电离层的 F 层的电子浓度也有显著增加。虽然利用同步卫星测量 TEC 不能给出电子浓度随高度分布的具体图象, 但对电子总含量突然增加的数值进行分析可以断定 D 层电子浓度的剧增对这次耀斑期间总含量增加的贡献是很小的。根据文献报道可作如下估算。 D 层的厚度在通常情况下认为是 30km, 浓度为 10^3 ele/cm^3 , 根据 VLF 测试结果我们假定这次耀斑使 D 层的厚度增加了 20km, 并假定 D 层的电子浓度增加了两个量级 (已有的实验结果一般为 10—20 倍), 则耀斑期间 D 层的电子总含量约为 $5 \times 10^{15} \text{ ele/m}^2$ 。这个数值占这次 SITEC 数值的 3—5%。这个结果充分说明 D 层浓度的增加是绝不可能造成这次电子总含量如此大幅度增加的。另一方面从表 2 和图 1 可以看到, 这次耀斑引起的电离层电子总含量的突然增加只是发生在三分半钟时间内, 随后 TEC 就开始逐渐下降了; 而电离层垂测站测得的频高图所反映的 D 层浓度剧增在重庆大约持续到 0030UT, 在北京则是持续到 0100UT。这进一步说明了在耀斑期间虽然 D 层电子浓度大大增加了, 但从电子总含量角度看 D 层电子含量的增加在整个电离层电子总含量的变化中根本显示不出来。由此可以推断这次耀斑期间 F 层电子含量的增加是这次电子总含量剧增的主要部分。

由电离层物理学可知, 对 D 层有贡献的太阳辐射波段主要是 $\frac{1}{2}-8 \text{ \AA}$, 而对 E 层、 F 层有贡献的是 $8-1027 \text{ \AA}$ 。上面已经推断这次耀斑不仅使 D 层电子浓度剧增, 而且还使 F 层的电子浓度显著增加, 从而可以推测这次太阳耀斑不仅在 $0-8 \text{ \AA}$ X 射线的辐射能量剧增, 而且在 $8-1027 \text{ \AA}$ 这个远紫外波段上的辐射能量也明显增加。因此观测太阳耀斑对电离层的影响有助于了解耀斑期间电磁辐射的谱特性。

由本文所列的表 2 可知这次耀斑引起的 SITEC 始于光学观测之后 3 分钟, 再经过 3 分半钟 ΔTEC 达到极大, 随后 TEC 逐渐减少, 而且两站观测结果在时间上十分一致。这反映了太阳耀斑爆发开始的最初几分钟内 $8-1027 \text{ \AA}$ 波段的辐射能量急剧增加, 几分钟后这个波段的辐射能量就开始逐渐减小, 大约经过 30 分钟一方面耀斑 $8-1027 \text{ \AA}$ 波段辐射能量逐渐减小使 F 层的电离率减小, 另一方面由于太阳天顶角变化使 F 层的电离率

增加,使 TEC 在 3—6 分钟内维持不变。而垂测资料和 VLF 观测结果反映了太阳耀斑爆发开始后 0—8 Å 的辐射能量迅速增加,它的持续时间是较长的,至少有 30 分钟以上。所以深入研究太阳耀斑的电离层效应对于研究各次耀斑的辐射组成及其时间演化是有意义的。

从本文所列的表 2 还可以看到这次耀斑对纬度较低的重庆上空的电离层的影响大于中纬新乡地区。这个观测结果与 M. Mendillo 等人^[2]对 1972 年 8 月 7 日太阳耀斑引起的 F 层变化的全球形态所得的结果是一致的。

总之,对 1984 年 4 月 24 日 2356UT 大耀斑期间电离层电子总含量突然增加的分析表明,在某些大的太阳耀斑期间在地球的电离层中不仅 D 层的电子浓度突然增加,而且电离层电子总含量突然增长(主要发生在电离层的 F 层)。电离层电子总含量的突然增长将会对穿越电离层的无线电信号产生严重的影响,如产生附加时延,引起大的折射和偏振面的旋转等等,会严重影响卫星导航系统和测速定位系统的精度。因此研究整个电离层对耀斑爆发的响应在日地空间物理研究和工程技术上都有重要的价值。

重庆垂测站的同志和赵协忠同志提供了有关观测资料,在此致谢。

参 考 文 献

- [1] Mendillo, M. and J. V. Evans, *Radio Sci.*, Vol. 9, p. 197, 1974.
- [2] Mendillo, M. et al., *J. Geophys. Res.*, Vol. 79, p. 665, 1974.
- [3] Solar-Geophysical Data, 477 Part I, U. S. Department of Commerce, 1984.

The Influence of the Great Solar Flare of 24 April 1984 on the Ionospheric Total Electron Content

Ma Jian-min Long Qi-li

(China Research Institute of Radiowave Propagation)

Abstract

Sudden increases of the ionospheric total electron content (TEC) during the great solar flare burst near 2356 UT on 24 April 1984 were simultaneously observed at Xinxiang (35.3° N, 113.9° E) and Chongqing (29.5° N, 106.4° E) by means of Faraday rotation measurements of the VHF signals from the Japanese geostationary satellite ETS-II. These sudden increases lasted three and a half minutes, and the values of TEC increases at Xinxiang and Chongqing reached 9.4×10^{16} and 14.3×10^{16} ele./m² respectively. The phenomenon recorded by polarimeters is compared with results from neighbouring ionosondes and VLF phase-locked receiver. The analysis shows that there are appreciable increases of electron density both in the ionospheric D-region and the F-region and the latter is the main part of the sharp TEC increases.