

利用 MF 雷达对耀斑期间电离层 D 区电子密度的观测研究^{*}

张东和^{1,2,3} 萧佐² 吴健³ 龚建村¹ 刘四清¹

¹(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100080)

²(北京大学地球物理系)

³(中国电波传播研究所青岛分所)

摘 要

利用 MF 雷达观测资料对 X 级别耀斑爆发期间在 66—80 km 高度之间的电子密度进行了研究, 观测到了耀斑爆发期间电子密度的突然增加, 在较低高度上的电子密度的时间变化趋势与耀斑的软 X 射线辐射通量相关. 电子密度的变化强度依赖于具体的耀斑参数, 有些耀斑引起的电子密度增加高达 400 cm^{-3} , 有些仅为 100 cm^{-3} 左右. 但耀斑期间在这一高度区间增加的总电子含量增量仅占耀斑辐射引起的整个电离层总电子含量增量的千分之一左右. 最后, 利用恢复阶段电子密度的时间变化过程估算了 1997 年 11 月 4 日耀斑期间部分高度上的有效复合系数.

关键词 MF 雷达; 电子密度; 耀斑

1 引言

耀斑期间电离层 D 区电子密度的变化引起的电波传播效应最为显著, 这些效应包括短波吸收、突然频率偏移、突然相位异常等. 造成这些效应的原因从本质上讲都与耀斑期间电离层电子密度的增加有关. 由于对 D 区观测手段的限制以及发生其中的光化学过程的复杂性, 到目前为止, 在电离层各区域中, 人类对 D 区的认识最为薄弱^{[1],[2]}. 按照光化学理论, 影响该区域光化学过程的因素大致可分为如下两个方面, 一方面是 D 区的辐射源, 它随着太阳天顶角以及太阳活动强度而变化; 另一方面涉及到 D 区中性大气成分及其变化, 各种时间尺度的中性大气扰动使 D 区的光化学过程愈加复杂. 总的来说, D 区电离层的辐射源包括 X 射线, 宇宙线, Lyman alpha 射线和远紫外辐射. 在宁静状态下, 太阳 X 射线辐射强度的变化与太阳活动强度高度相关. 这期间太阳背景 X 射线 ($1-8 \text{ \AA}$) 辐射通量在一个小时内的变化一般小于一个量级; 而在一个太阳活动周内宇宙线变化更小, Lyman alpha 和远紫外辐射的变化量级也在两倍以上. 但在太阳耀斑爆发期间, X 射线辐射通量 ($1-8 \text{ \AA}$) 在几分钟到几十分钟内会突然变化几百甚至几千倍的量级, 这一变化会强烈改变电离层状态, 造成 D 区电子密度突增. 研究表明: 在耀斑爆发期间, D

^{*} 国家自然科学基金 (40274953, 40134020) 和国家重点基础研究规划项目 (G2000078408) 共同资助项目
2003-02-18 收到原稿, 2003-04-22 收到修定稿

区的状态主要受到由于 X 射线和部分远紫外辐射对 O_2 和 N_2 的电离作用的影响. 因此, 对耀斑期间 D 区电离层状态的研究有利于加深对 D 区光化学过程的认识^{[3],[4]}.

利用中、高频电波的部分反射进行的电波偏移吸收实验可获得电离层 D 区的中性风场和电子密度, MF 雷达就是基于上述原理. 使用日本稚内 (Wakanai, 45.36°N, 141.81°E) 的 MF 雷达观测资料, Igarashi 等人分析了 1997 年 3 月 9 日日食期间电离层 D 区电子密度的变化, 并对 MF 雷达观测结果与 IRI95 模式进行了初步比较研究^{[5],[6]}. 在本文中, 我们将利用该雷达数据和部分 GPS 观测数据对几次耀斑期间的电离层电子密度变化进行分析.

2 数据与方法

为了便于反映耀斑期间电子密度的变化, 我们选择了发生于观测站当地时下午的四次耀斑. 在没有耀斑爆发和大气扰动时, 这个时间段的 D 区的背景电离层电子密度是随时间而减小的. 表 1 给出了这 4 个耀斑的基本参数.

表 1 耀斑基本参数
Table 1 Parameters of the flares

时间	开始时间/UT	最大时间/UT	结束时间/UT	光盘位置	等级	积分通量/(J·m ⁻²)
1997-11-04	0552	0558	0602	S14W33/2B	X2.1	5.6×10^{-2}
1998-11-22	0630	0642	0649	S27W82/1N	X3.7	2.0×10^{-1}
1998-11-23	0628	0644	0658	S28W89/SF	X2.2	2.4×10^{-1}
1998-11-28	0454	0552	0613	N17E32/3N	X3.3	5.0×10^{-1}

稚内的 MF 雷达观测量为 60—100 km 之间的水平风场和电子密度, 垂直高度分辨率为 2 km, 雷达工作模式分为两种, 前两分钟观测中层大气风场, 后两分钟观测电子密度, 一个循环 4 分钟, 因此, 每 4 分钟可以提供一组电子密度高度剖面. 在 65 km 以下, 由于偏移吸收很弱, 电子密度观测结果不可靠; 而在 85 km 以上 X 波和 O 波信号强度之比的幅度很小, 电子密度的测量误差很大, 结果也不可靠. 因此, 本文将仅分析耀斑爆发期间高度在 66—82 km 的有效数据.

3 结果与分析

3.1 电子密度的变化

图 1 示出了 1997 年 11 月 4 日耀斑期间每隔 4 分钟由 MF 雷达观测的电子密度剖面. 从图 1 来看, 在较低高度上耀斑效应还是比较明显的. 在 0556 UT, 电子密度剖面的峰值高度在 76—80 之间, 最大电子密度为 300 cm^{-3} 左右, 在这之前耀斑辐射的影响还没有造成明显的电子密度变化, 到 0604 UT, 74 km 以下的电子密度快速增加, 66 km 处的电子密度从 100 cm^{-3} 增加到 260 cm^{-3} , 而 70 km 高度的电子密度从 50 cm^{-3} 增加到 200 cm^{-3} . 在 0608 UT 之后, 74 km 高度以下的电子密度开始逐渐下降. 在 74 km 以上, 耀斑爆发

期间电子密度的变化比较乱,在有些时刻,耀斑爆发之后的电子密度甚至小于耀斑爆发之前,这可能与这个区域的中性成分的扰动状态有关。

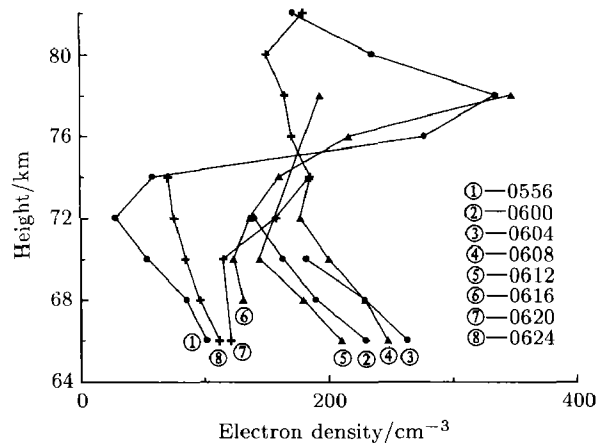


图 1 1997 年 11 月 4 日耀斑期间 MF 雷达观测的电子密度剖面随高度的变化

Fig.1 The profiles of the electron density observed by MF radar during the flare on Nov. 4, 1997

为了更加清楚地显示耀斑期间 D 区电子密度的变化情况,图 2(a)—(d) 给出了 4 个耀斑爆发期间不同高度电子密度随时间的变化.从图中可以清楚地看到耀斑效应.在图 2(a) 可见到与图 1 类似的结果.在图 2(b)—(c) 中,耀斑爆发后在 66—78 km 高度之间的电子密度都有一定程度的增加,与图 2(a) 不同,在较高高度的电子密度的增加更明显一些,电子密度从几十上升到 200—300 cm^{-3} 左右,而低于 72 km 高度的电子密度从 50 cm^{-3} 增加到 125 cm^{-3} 左右.在这 4 次耀斑中,对电子密度影响最大的是发生于 1998 年 11 月 28 日的耀斑,在 72 km 以下,耀斑爆发期间电子密度从 50 cm^{-3} 快速增加到了 250—350 cm^{-3} 之间.该耀斑爆发期间,在世界时 0515—0544 以及 0545—0559 之间还爆发了两次 M 级的耀斑,这也许是造成该耀斑爆发期间电子密度增加得如此剧烈的原因.由于该耀斑从爆发到最大经历了近一个小时,在耀斑爆发后,电子密度并没有很快上升.图 3 给出了 1998 年 11 月 28 日耀斑期间电子密度随时间和高度的等值线图.耀斑期间各高度的电子密度有一个明显的增加.观测点的当地时中午在 0300 UT 左右,从图可见,虽然 D 区的电子密度扰动比较剧烈,在 74 km 以上,电子密度随太阳天顶角变化的总趋势还是很明显的。

3.2 D 区电子密度、总电子含量和 X 射线的相关分析

耀斑期间的软 X 射线谱段的时间演化过程与总电子含量 (TEC) 的时间变化并不一致.这一般认为是由于耀斑期间引起总电子含量增加的大部分电子密度增加是发生在高 E 区和 F 区,造成这一区域电子密度增加的辐射源主要是紫外辐射,而耀斑期间的太阳紫外辐射时间演化规律与 X 射线并不相同.图 4(a), (b) 为两次耀斑期间电离层总电子含量的时间变化曲线,每一图中的不同的曲线代表由同一台站不同 GPS 卫星观测数据提取的 TEC 时间变化曲线.图中可以看到明显的耀斑效应,在耀斑期间电离层出现了总电子含量突然增加事件 (SITEC),两次耀斑造成的总电子含量的增加量的量级在 10^{16}m^{-2} .而即使假设在 60—80 km 的高度上的电子密度都增加 400 cm^{-3} .这区域的电子密度造成的

电子含量的增加也只有总电子密度增加值的千分之一, 远小于 GPS 方法提取 TEC 的精度, 因此这部分的电子密度增加量占总电子含量的增加量的比重可以忽略。

图 5(a), (b) 给出了图 4 中的两次耀斑期间由 GOES 卫星观测的 X 射线辐射通量、MF 雷达获得的电子密度 (68 km) 以及由 GPS 观测数据提取的 TEC 的微分量。按照电离

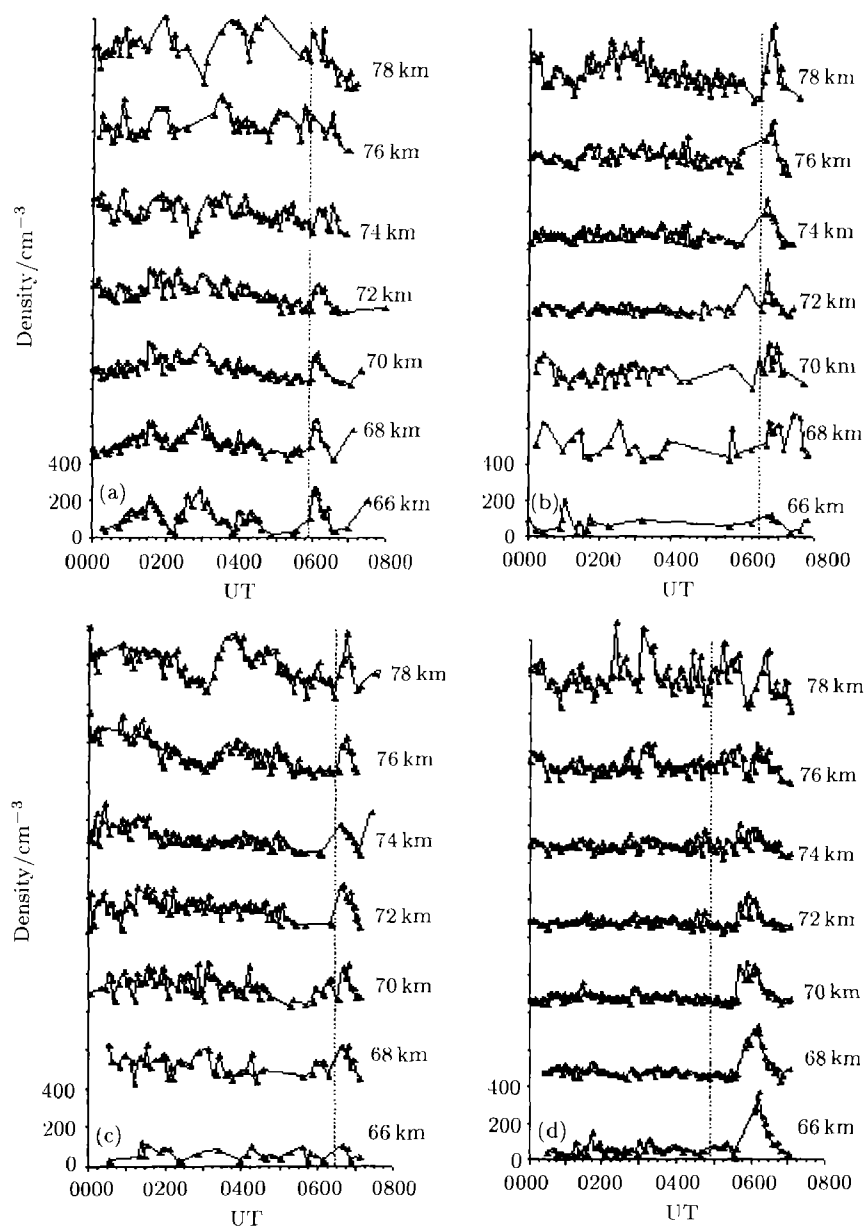


图 2 耀斑期间各高度电子密度随时间的变化关系 (虚线为各耀斑的爆发时刻)

Fig.2 The temporal variation of the electron density at different heights during these solar flares

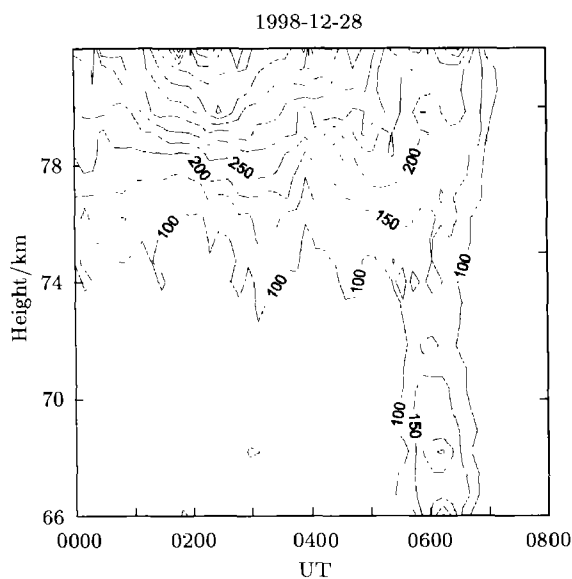


图 3 1998 年 11 月 28 日耀斑期间电子密度随时间和高度的等值线图

Fig.3 The contour lines of the electron density with the time and height during the flare on Nov. 28, 1998

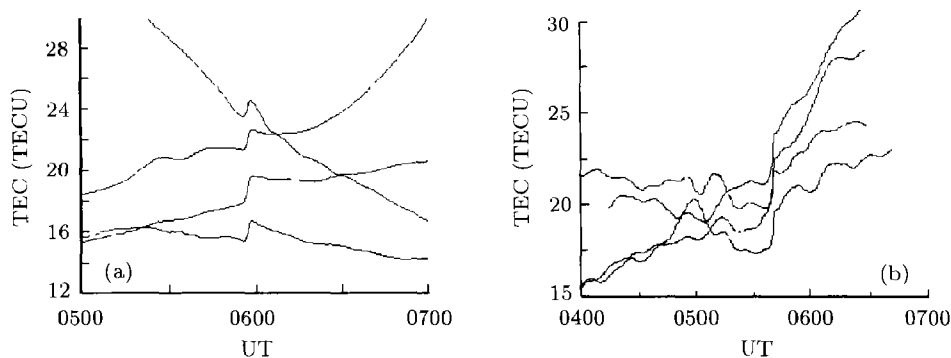


图 4 由 GPS 数据提取的两次耀斑期间的电离层总电子含量随时间的变化曲线 ($1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ m}^{-2}$)

(a) 1997 年 11 月 4 日的耀斑, (b) 1998 年 12 月 28 日的耀斑

Fig.4 The temporal TEC variation curves derived from GPS observations, $1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ m}^{-2}$

(a) 1997-11-4; (b) 1998-12-18

层电子连续性方程, 电子密度的产生率与电子产生率和损失率成正比. 而耀斑期间的电子产生率与太阳辐射通量有直接的关系. 从图中的总电子含量时间变化率与 X 射线随时间的变化关系来看, 虽然两次耀斑期间两者在图中都有所表现, 但两者之间的相关性不是很好. 这说明耀斑期间造成电离层总电子含量变化的太阳辐射不是 X 射线谱段. 再看一下图中的电子密度和 X 射线辐射通量之间的关系, 可以看到两者之间的相关性很好. 尤其是发生于 1997 年 11 月 4 日的耀斑情况, 在 X 级别耀斑爆发之前, 11 月 4 日在同一太阳活动区 (NOAA 的耀斑编号为 8100) 还爆发了几次级别比较大的耀斑, 这几个耀斑的级别和爆发时间是 0128—0201/M1.3; 0303—0328/M4.1; 0355—0419/C5.5 和 C8.0. 这几次

耀斑对 D 区电子密度 (68 km) 都造成了不同程度的影响, 这在 MF 雷达观测的电子密度的时间变化中可以看到, 且两者的相关性很好. 而这种影响在 GPS 提取的总电子含量中是很难分辨出来的. 一般认为 GPS 提取的总电子含量的精度在 0.02 TECU, 这种精度水平对一些小级别的耀斑产生的总电子含量的变化很难分辨出来.

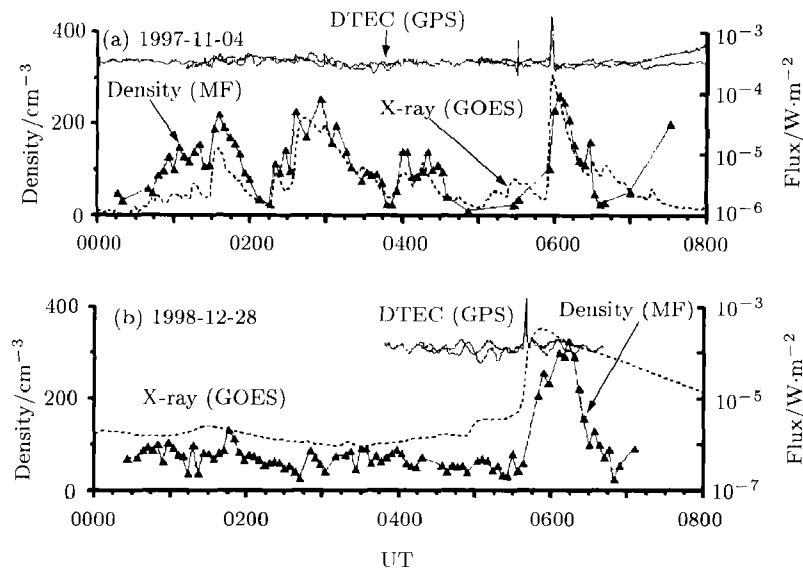


图 5 图 4 中的两次耀斑期间 TEC 时间变化率曲线, MF 雷达获得的电子密度曲线以及软 X 射线辐射通量之间的关系

Fig.5 The relationship among the temporal rate of TEC curves observed by GPS, the electron density observed by MF radar and the X ray flux observed by GOES satellite during the flares

从图 2(a) 和图 5(a) 可以看到, 66 和 68 km 高度的电子密度随时间变化受到明显的 X 射线辐射的控制. 但在更高的高度上, 这种控制作用不明显甚至看不出来. 由于 D 区的中性成分密度很高, 在这些高度上的中性成分的扰动会强烈影响到这个区域的电子密度的变化. 从图中电子密度的变化, 可以认为, 在 70 km 以上高度上的 D 区的中性成分的扰动要比 70 km 以下强烈.

3.3 D 区电子有效复合系数

通过分析耀斑期间电离层电子密度的变化, 在一定条件下可以获得电子有效复合系数. 由于耀斑辐射谱结构比较复杂, 很难确定因耀斑引起的附加电子密度产生率. 为了较准确地估算有效复合系数, 需对耀斑的时间演化特点进行分析, 选择的耀斑应该满足如下条件, 即因耀斑辐射引起的电子密度达到最大值的时刻要晚于耀斑结束时刻, 这样在电子密度恢复阶段就不存在耀斑辐射的影响. 在上面给出的 4 个耀斑中, 只有 1997 年 11 月 4 日的耀斑满足这一条件. 由于这时的电子密度远离平衡态, 在电子密度恢复阶段, 背景太阳辐射引起的电子产生率可以忽略, 这样, 利用电子连续方程就可估算出在这期间各高度的有效复合系数. 表 2 给出了部分高度的估算结果.

表 2 估算的有效复合系数

Table 2 The estimated effective recombination coefficient

高度 /km	复合系数 ($\times 10^{-12}$)/ $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$
66	5.2
68	6.4
70	6.5
72	3.5
74	1.7

从表 2 的结果来看, 随着高度的增加有效复合系数减小. 该结果从量级上与 D 区模型给出的结果相近^[7]. 考虑到随着高度的增加中性成分的密度减小, 其随高度的变化趋势也是合理的.

4 结论与讨论

太阳耀斑期间突然增加的 X 射线和远紫外辐射可影响到电离层的各个区域, 并造成电子密度的突然增加, 然而, 不同耀斑对电离层造成的效应有很大差别. 对于一些较大级别的耀斑, 甚至在电离层峰值以上高度上也能观测到电子密度的增加^[8]. 使用非相干散射雷达和 VHF 雷达, Rastogi 和 Mathews 等研究了耀斑期间 D 区电子密度^{[9],[10]}. 本文结果表明利用 MF 雷达测量 D 区电子密度是可行的.

耀斑期间有多种因素影响着重电离层电子密度的增量, 这些因素包括太阳天顶角、辐射谱结构、总辐射通量、中性成分和电子密度分布以及耀斑在太阳日盘的位置等^[11]. 因此, 利用有限的参数来确定耀斑对电离层影响的强弱是比较困难的. 上面的结果表明不同耀斑引起的电子密度增量的差异, 同时也可以看到各高度电子密度的周日变化特性也不是很明显.

对于 X 级别的耀斑, 强烈的 X 射线和远紫外辐射通常都会对电离层产生一个可视总电子含量突增 (SITEC), 这种总电子含量突增的量级一般为 10^{16}m^{-2} ^[12]. 而即使假设耀斑爆发期间在 66—80 km 高度的范围内的电子密度都增加了 400cm^{-3} , 在这一高度范围内造成的电子含量的增量也不到 10^{13}m^{-2} . 因此, 这一高度范围的电子密度对电波的折射效应几乎可以忽略. 但是, 由于 D 区中性成分密度很高, 如此小量的电子密度增量也可以强烈地影响电波传播的质量, 造成高频电波的完全吸收等效应.

主要结论如下.

(1) 电子浓度的增加与耀斑期间 X 射线和 EUV 辐射的增加有直接的关系. 该结果从一个侧面证实了利用 MF 雷达进行电子密度观测的可行性. 另外, 电离层对耀斑响应的强度有一定差别, 在 66—72 km 之间, 1997 年 11 月 4 日和 1998 年 11 月 28 日耀斑引起的电子密度增加量在 300cm^{-3} 以上, 但 1998 年 11 月 22 日和 23 日耀斑引起的电子密度的增加量仅为 100cm^{-3} 左右.

(2) 这类级别耀斑产生的总电子含量的增加的量级一般在 10^{16}m^{-2} 左右, 而 MF 雷达观测区间的总电子含量的增加量在 10^{13}m^{-2} 左右, 远远低于耀斑辐射对整个电离层产生

的总电子密度增加量。另外, 在较低高度上, 电子密度的变化与软 X 射线辐射通量的相关性很好, 说明这一区域的电子密度的增加与软 X 射线对中性成分的电离有关。

(3) 利用在不同高度上电子密度时间演化过程, 对 1997 年 11 月 4 日耀斑爆发期间各高度的有效复合系数进行了计算, 其结果是合理的。

致谢 日本 CRL 电离层研究组提供了耀斑期间的 MF 雷达数据。

参 考 文 献

- [1] Danilov A D. New ideas on the D-region modeling. *Adv. Space. Res.*, 2000, **25**:5—14
- [2] Mathews J D, Breakall J K, Ganguly S. The measurement of diurnal variations of electron concentration in the 60—100 km ionosphere at Arecibo. *J. Atmo. Terr. Phys.*, 1982, **44**:441—448
- [3] Danilov A D. Solar activity effects in the ionospheric D region. *Ann Geophysicae*, 1998, **16**:1527—1533
- [4] Sengupta P R. Solar X-ray control of the D-region of the ionosphere. *J. Atmo. Terr. Phys.*, 1980, **42**:339—355
- [5] Igarashi K, Murayama Y, Hocke K. Coordinated observations of the dynamics and coupling process of mesosphere and lower thermosphere winds with MF radar at middle-high latitude. *Earth Planets Space*, 1999, **51**:657—664
- [6] Igarashi K, Murayama Y, Nagayama S *et al.* D region electron density measurements by MF radar in the middle and high latitudes. *Adv. Space. Res.*, 2000, **25**:25—32
- [7] Ulich T, Turunen E, Nygren T. Effective recombination coefficient in the lower ionosphere during bursts of auroral electrons. *Adv. Space. Res.*, 2000, **25**:47—50
- [8] Mendillo M. Incoherent scatter observations of the ionosphere respect to a large solar flare. *Radio Sci.*, 1974, **9**:197—210
- [9] Rastogi P K, Mathews J D, Ying W P *et al.* Simultaneous VHF and UHF radar observations of the mesosphere at Arecibo during a solar flare: A check on the gradient-mixing hypothesis. *Radio Sci.*, 1988, **23**:97—105
- [10] Mathews J D. The incoherent scatter radar as a tool for studying the ionosphere D-region. *J. Atmo. Terr. Phys.*, 1984, **46**:975—986
- [11] Matsoukas D A, Papagiannis M D, Aarons J *et al.* Correlation of solar radio bursts and the total electron content (SITEC) of the ionosphere. *J. Atmo. Terr. Phys.*, 1972, **34**:1275—1283
- [12] Zhang Donghe, Xiao Zuo. Study of the ionospheric TEC using GPS during the large solar flare burst on Nov. 6, 1997. *Chin. Sci. Bull.*, 2000, **45**(6):575—579. in Chinese (张东和, 肖佐. 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—579)

THE STUDY OF THE ELECTRON DENSITY IN IONOSPHERIC D REGION USING MF RADAR DURING FLARES PERIOD

ZHANG Donghe^{1,2,3} XIAO Zuo² WU Jian³ GONG Jiancun¹ LIU Siqing¹

¹(Center for Space Science and Applied Research, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

²(The Department of Geophysics, Peking University)

³(Chinese Research Institute of Radio-wave Propagation)

Abstract

In this paper, the behavior of the electron density between the height of 66 and 80 km observed by MF radar at Waknnai station (45.36°N, 141.81°E) during four X-class flares is studied. The sudden increase of the electron density is observed during all of the flare period. The results show that the MF radar can be used as one routine method to observe electron density of the ionospheric D region. By comparison with the soft X-ray flux, it is found that the temporal variation of the electron density in the lower D region has a good correlation with the soft X-ray flux observed by GOES. Nevertheless, the correlation is not good in the higher altitude because of the atmospheric disturbances in the D region. On the other hand, the increases of electron density depends on the parameters of these four flares, the increase of the electron density for some of flare reach as high as 400 cm^{-3} , some of them is only about 100 cm^{-3} . Compared with the increase of the total electron content (TEC) caused by the flare with similar parameters, the total increase of electron density between the height of 66 and 80 km is only about one thousandth of TEC that almost has no effect on the delay time of the radiowave. But, the effect of the Sudden Ionospheric Disturbances caused by the increase of the electron density is very strong due to the very high number density of the atmospheric neutral compositions in the height of D region. In the end, the effective recombination coefficient at different heights is estimated using the electron density at the recovery period during the flare on Nov. 4, 1997.

Key words MF radar, Electron density, Solar flare