

太阳活动区 R9077 引起的 强烈吸收事件^{*}

胡红桥 刘瑞源 刘勇华 刘顺林 杨惠根 徐中华

(中国极地研究所 上海 200129)

佐藤夏雄 山岸久雄

(日本国立极地研究所)

摘 要

利用南极中山站的观测数据分析了太阳活动区 R9077 所引起的强烈吸收事件, 其中 2000 年 7 月 14 日的太阳质子事件引起了持续 3 天多强烈的极盖吸收. 同时, 激烈的太阳活动使磁层处于极度扰动状态, 磁层高能粒子沉降使许多持续时间较短的吸收峰叠加在极盖吸收背景之上. 最突出的是 7 月 15 日的吸收增强事件, 其最大值达 26 dB, 这是自 1997 年 2 月中山站安装成像式宇宙噪声接收机以来观测到的最强的吸收. 另一个较突出的吸收峰发生在 14 日 1753 UT 前后. 本文还讨论了产生这些吸收的原由.

关键词 极区电离层—宇宙噪声吸收—太阳活动—南极中山站

1 引言

随着 23 周太阳活动峰年的来临和空间科学的发展, 人们对激烈太阳活动所引起的近地空间效应的研究兴趣越来越浓, 对许多太阳活动事件, 如 1993 年 11 月事件、1997 年 1 月事件和 1998 年 5 月事件的近地空间效应进行了集中的讨论^[1-3]. 2000 年 7 月频繁的太阳活动产生的近地空间效应也受到了空间学界的普遍关注.

由于极区特殊的地磁位形, 来自剧烈扰动磁层和直接来自太阳的高能粒子沿着磁力线沉降到极区电离层后, 在极区电离层引起强烈的附加电离, 使电离层的电子密度和电子与其他粒子的碰撞明显增强, 并进一步使极区电离层对宇宙噪声的吸收增强, 因此对宇宙噪声吸收的观测常常被用来监测极区电离层^[4]. 南极中山站 (69.4°S, 76.4°E) 位于极隙区纬度附近, 其不变磁纬为 74.5°. 地方时 $LT = UT + 5\text{ h}$, 磁地方时 $MLT = UT + 2\text{ h}$. 在通常情况下, 中山站在磁中午位于极隙区, 子夜位于极盖区的低纬边缘, 午前和午后穿过极光带, 是观测极盖吸收的理想位置. 本文利用中山站的多手段监测数据, 对 7 月太阳活动事件在中山站所产生的极区近地空间效应, 特别是 R9077 在 7 月 13—17 日所产生的强烈吸收事件进行了初步分析.

^{*} 国家自然科学基金 (49634160, 4007438)、国家海洋局青年海洋科学基金 (2000903)、中国科学院基础研究重大项目 (655951-1-305) 资助

2001-06-19 收到原稿, 2001-11-02 收到修定稿

2 太阳活动区 R9077 产生的强烈太阳活动事件及其近地空间效应

2000 年 7 月太阳活动非常频繁, 先后出现了 20 多个活动区, 这些活动区产生了一系列近地空间效应. 其中 R9077 是活动性最强的一个活动区, 它所产生的近地空间效应也最强. 在 R9077 产生的一系列强烈太阳活动事件中, 最突出的是 7 月 14 日 1024 UT 发生的 X5/3B 级大耀斑爆发, 该事件同时伴随着 2600 sfu 的 10 cm 波辐射爆发、II/IV 型射电

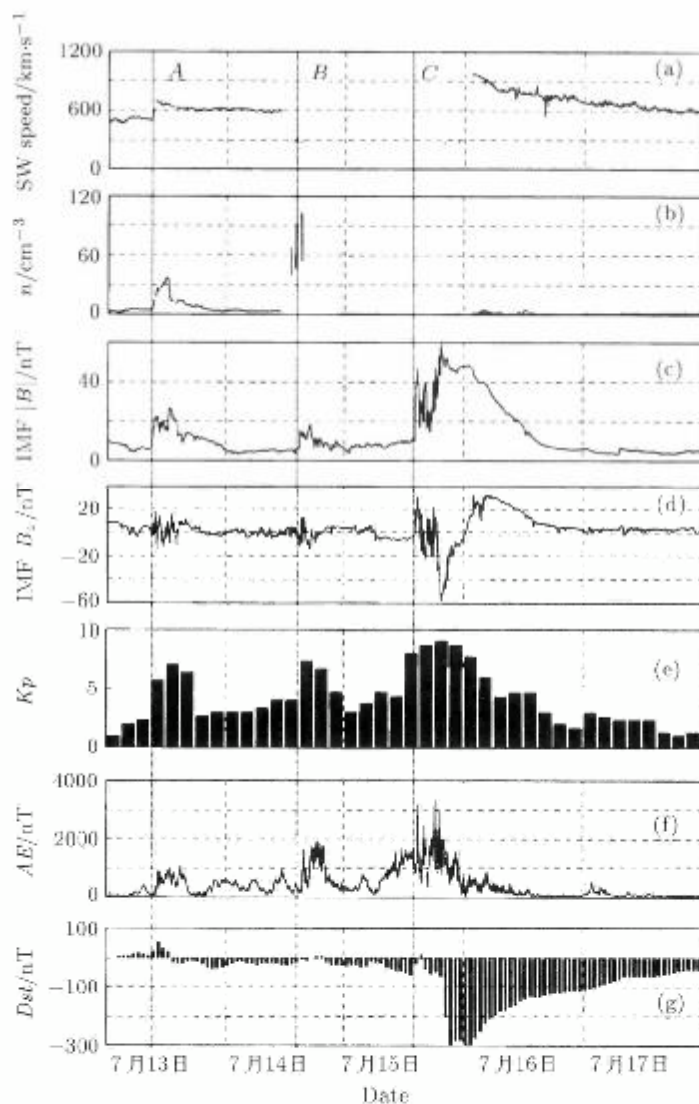


图 1 2000 年 7 月 13—17 日 ACE 卫星观测到的太阳风参数和全球地磁指数

Fig.1 Solar wind parameters observed by ACE satellite and global geomagnetic indices for July 13—17, 2000

爆发、快速日冕物质抛射 (CME) 事件和太阳质子事件, 这一太阳活动事件产生了一系列近地空间效应, 其中最突出的是发生于 7 月 15—17 日的大磁暴. 地球空间环境的另一个突出响应是质子事件和由此所引起的极盖吸收. 随着 7 月 14 日的 X5/3B 爆发, 地球同步轨道发生了 1989 年以来最强的一次能量大于 100 MeV 的质子事件. 伴随着质子事件的发生, 在地球两极的极盖区和极光带附近区域产生了强烈的极盖吸收事件, 该事件持续了 3 天多.

图 1 给出了 7 月 13 日到 7 月 17 日 ACE 卫星在磁层顶上游观测到的行星际空间环境的变化和全球地磁指数在这段时间内的变化情况. 图中依次给出了太阳风速度、太阳风等离子体密度、行星际磁场 IMF 总强度及其 B_z 分量, 以及全球 3 h 磁情指数 K_p 、极光电集流指数 AE 和赤道环电流指数 Dst . 从图 1 可见, 行星际空间在 7 月 13 日到 17 日出现了 3 个明显的行星际激波结构, 图中的 3 条垂直点线分别标明了 ACE 卫星观测到这 3 个激波的时刻. 这 3 个行星际激波都与太阳活动区 R9077 所产生的 CME 事件有关. 在 3 个激波事件中, 行星际磁场都出现了跳跃性增强. 在第一个激波到达 ACE 卫星时, ACE 卫星同时观测到了太阳风速度和太阳风等离子体密度的跳跃性增强. 尽管由于高能质子事件的原因 (参见图 2(d)), ACE 卫星在后两次激波过程中对太阳风速度和等离子体密度观测的数据不全, 但仍然可以看出当时太阳风速度和太阳风等离子体密度都增强了很多. 发生于 15 日 1410 UT 的激波是 3 个激波中最强的, 它对应于 R9077 活动区于 7 月 14 日产生的 X5/3B 级耀斑爆发所伴随的 CME 事件.

行星际对太阳活动区 R9077 所发生的一系列活动事件的响应传到地球空间后, 对近地空间产生了很大的影响. 从图 1(g) 可见, Dst 指数在每次激波经过 ACE 卫星后 1 h 左右都出现了一正向增强, 这一时延反映了行星际激波从 ACE 卫星到磁层顶的渡越时间. 从图 1(e) 和 1(f) 可见, 在行星际激波撞击到磁层顶不久, 全球地磁活动明显增强, 极光亚暴频繁发生. 特别是第三个激波撞击磁层顶造成了 7 月 15 日到 17 日的大磁暴, 在此期间 Dst 达到了 -300 nT, K_p 指数迅速增加到了 9, AE 指数的最大值则超过了 3000 nT, 这是 1989 年以来所发生的最大磁暴.

3 极区电离层对宇宙噪声的吸收

通过对宇宙噪声吸收 (CNA) 的观测, 可以监测极区电离层以及引起极区电离层电子密度剧烈变化的高能粒子沉降. 目前监测宇宙噪声吸收最先进的设备是成像式宇宙噪声接收机, 其突出的优点是它能够不受天气和季节的影响全天候地监测极区能量粒子沉降的时空分布. 1997 年 2 月, 中国极地研究所与日本国立极地研究所在南极中山站合作安装了一成像式宇宙噪声接收机^[5]. 该设备的接收天线阵由 8×8 偶极天线构成, 在空间形成 8×8 个波束. 2000 年 7 月 15 日该设备观测到了 26 dB 的强吸收峰, 这是自开展观测以来最强的一个吸收事件.

图 2 给出了 7 月 13 日至 17 日中山站的地面观测和 Soho 卫星对太阳高能质子通量的观测. 图 2(a) 给出了中山站地磁 H 分量的变化, 其观测设备是加拿大 EDA 设备公司制造的 FM-105B 通门式磁力计, 该磁力计的时间分辨率为 1 Hz, 最大动态范围为 ± 1000 nT. 图 2(b) 给出了中山站电离层 F 层的临界频率 f_oF_2 的时变曲线 (较低的曲线), 其相应值

对应于右侧纵坐标, 图 2(b) 中较高的曲线给出了 F 层峰值电子密度处的真高 $h_m F_2$ 的时变情况, 其相应值对应于左侧纵坐标. 这些电离层参数是由美国 Massachusetts Lowell 大学制造的 DPS-4 数字测高仪探测到的频高图导出的. 图 2(c) 给出了中山站成像式宇宙噪声接收机的中心波束 (N4E4) 观测到的吸收情况, 图中较低的曲线对应的纵坐标为 10 dB/格 (对应于右侧纵坐标), 较高的曲线对应于 2 dB/格. 图 2(d) 则是 Soho 卫星在 7 月 13 日至 17 日探测到的太阳高能质子通量.

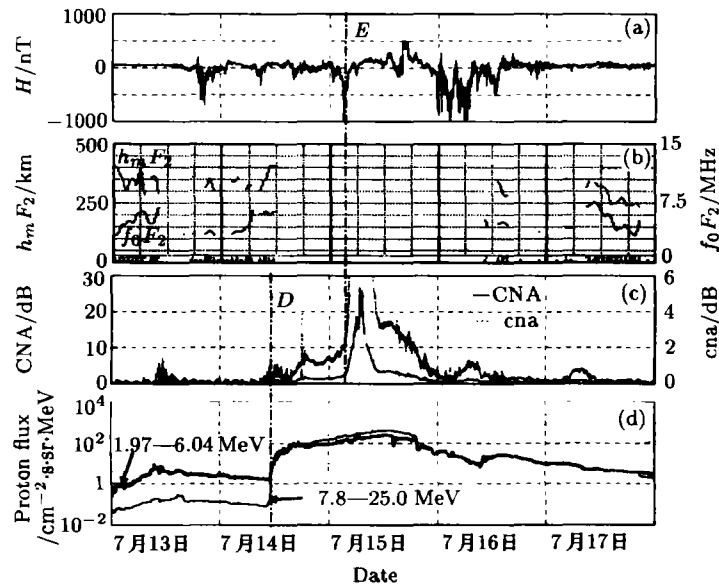


图 2 2000 年 7 月 13—17 日南极中山站地面观测和 Soho 卫星的高能质子通量观测
Fig.2 Ground-based observations at Zhongshan Station of Antarctica and energetic proton flux observation at Soho Satellite for July 13—17, 2000

从图 2 可见, 由于太阳质子事件和极光亚暴所产生的强烈高能粒子沉降, 中山站出现了多个异常强烈的吸收事件. 在这些吸收事件中, 除太阳质子事件所产生的长时间极盖吸收背景外, 7 月 14 日 1753 UT 和 15 日 0645 UT 出现的两个持续时间较短的吸收峰也很突出, 下面将详细讨论这些吸收事件.

3.1 极盖吸收事件

从图 2(c) 可见, 在 7 月 13 日到 17 日中山站除出现了一些持续时间较短的吸收峰外, 最典型的一个特征就是在 7 月 14 日 1040 UT 左右到 7 月 17 日 1940 UT 左右持续出现的强烈吸收背景, 这就是由太阳质子事件引起的极盖吸收 (PCA) 事件^[6], 该事件持续了 3 天多. 图 2 中垂直虚线 (D) 标明了 Soho 卫星观测到质子事件的时间, 从图 2(c) 可见极盖吸收事件与质子事件发生的时间几乎一致. 这一强烈的太阳质子事件与 7 月 14 日 1024 UT 爆发的 X5/3B 级耀斑有关, 从太阳耀斑爆发到极盖吸收事件开始只有 16 min 的时延.

从图 2(b) 可见, 随着极盖吸收事件的发生, 中山站的 DPS-4 数据测高仪很快就接收不到回波了. 日本昭和站指向中山站的 HF 雷达在 14 日 1500 UT 到 16 日 1200 UT 也没

有回波. 这表明当时这些设备发射的高频信号都被电离层吸收了. DMSP F13/14 卫星在此期间曾多次穿越南极中山站上空, 观测到了在极盖区和极光区均匀增强的粒子沉降背景, 正是这一均匀增强的粒子沉降造成了极盖吸收.

中山站观测到的极盖吸收表现出了平滑的周日变化, 白天的吸收为夜晚的 2—10 倍, 这主要是由于电子在夜晚更容易与中性成分复合为负离子, 使电子密度减小造成的. 7 月 13 日 0930 UT 左右开始的一个吸收事件也与质子通量的增强 (图 2(d)) 相对应, 该吸收也可能是由来自太阳的高能粒子沉降产生的极盖吸收.

3.2 7 月 14 日 1753 UT 吸收峰

在极盖吸收的背景上, 磁层高能粒子沉降在 7 月 14 日 1753 UT 产生了分均值达 3.9 dB 的吸收峰. 对照图 2(a) 可以发现, 出现这一吸收峰时, 中山站的地磁 H 分量出现了一小负扰. 对照图 1 可以看出, 这一吸收峰出现在第 2 个激波到达地球磁层顶之后, 当时极光亚暴发生非常频繁. 因此这一吸收峰很可能与极光亚暴所引起的极光粒子沉降有关.

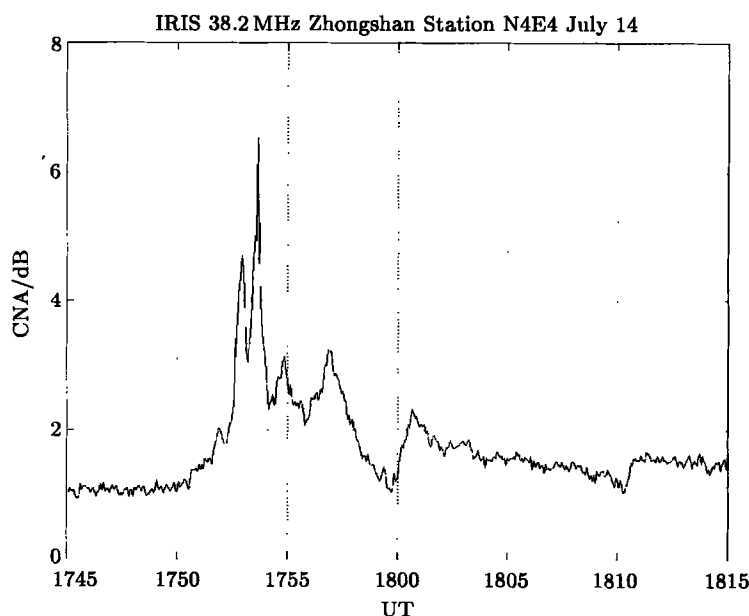


图 3 中山站成像式宇宙噪声接收机的中心波束在 14 日 1745—1815 UT 观测到的吸收情况

Fig.3 Absorption at Zhongshan Station, Antarctica observed by the central beam of the imaging riometer during 1745—1815 UT on July 14, 2000

图 3 给出了中山站成像式宇宙噪声接收机的中心波束在 14 日 1745—1815 UT 观测到的吸收情况. 从图中可以看出, 该吸收事件是叠加在约 1.0 dB 吸收背景上的一脉动结构, 其最大峰实际超过了 6 dB. Stauning^[7] 在 1993 年 11 月 4 日 2200 UT 左右的亚暴事件中在北极 Sdr.Strømfjord 站利用成像式宇宙噪声接收机曾观测到类似的吸收事件. 这类吸收事件可能是由经过瞬变的场向电势差 (10—30 keV) 重复性加速的磁层电子沉降引起的, 而该场向电势差可能与上行场向电流有关. 与 Stauning 的观测不同的是, 本文观测到的吸收脉动的幅度是由强变弱而不是由弱变强. 这可能是由于在太阳能量粒子沉降所产生

的强烈电离背景下, 场向电势差与电子加速所引起的电离层电导率变化之间的正反馈受到抑制造成的。

3.3 7月15日吸收增强

发生于15日0645 UT的高达26 dB的吸收峰是图2(c)的一个显著特征。该吸收增强叠加在强烈的极盖吸收背景之上, 从7月15日0300 UT开始, 到7月15日1110 UT才恢复到吸收背景水平。这一吸收峰发生的时间涵盖了中山站(70 km高度)的白天(地方时), 但如果简单地认为这一吸收峰完全是由极盖吸收的日变化造成的, 则很难让人相信, 因为这一吸收增强非常迅速, 这与极盖吸收事件通常缓慢变化这一特征不符。同时, 发生这一吸收增强时, 太阳高能质子的通量并没有明显的增强, 因此这也不可能是由太阳高能粒子通量变化造成的。

可能造成吸收峰的原因很多, 如太阳X射线爆发、极光粒子沉降。但由于中山站当时正处于极夜期间, 由太阳事件所产生的X射线不可能到达中山站上空电离层, 因此, 中山站观测到的这一吸收峰不可能由太阳活动的X射线爆发造成。通常的极光粒子沉降能否造成如此强烈的吸收也很令人怀疑。

由于在太阳质子事件到达地球前后, 分别有3个行星际激波到达地球, 使地球磁层在发生极盖吸收事件的同时处于强烈的扰动状态, 因此这一吸收峰很可能是由磁层动力学过程造成的。尽管第3个行星际激波最强, 它的到达使地球磁层发生了强烈的磁暴, 但由于它达到地球的时间在吸收峰发生之后, 因此第3个激波不可能对这一吸收峰有任何贡献。但在强烈的太阳质子事件所产生的极盖吸收背景下, 前两个接连到达的激波所引起的磁层动力学过程有可能导致这一吸收峰的发生。

从图2(a)可以看出, 在这一吸收增强开始发生时, 15日0300 UT出现了强度高达 -1000 nT的地磁负扰, 实际上这一负扰已经达到了观测的饱和值。对照AE指数, 不难发现, 这一地磁负扰与极光亚暴有关, 且负扰发生在亚暴的主相期间。从AE指数来看, 这次极光亚暴为一孤立亚暴, 其强度并不是很强, 中山站如此强烈的地磁扰动使我们有理由认为当时中山站正位于亚暴的中心附近。因此, 我们认为这一吸收增强与极光亚暴有关, 但又不是通常的极光粒子沉降。

在极光亚暴主相高密度的“高能电子云”会注入到闭合磁力线上, 在地磁场梯度和磁层电场的共同作用下东向漂移到黎明侧, 并在漂移过程中得到加速。在午前扇区这些电子能量高达30—300 keV, 它们沉降到电离层时, 在D层和E层(60—100 km)产生电离增强, 从而产生强烈的电离层吸收^[4]。从电离层吸收的时空变化来看, 7月15日的吸收增强发生时, 中山站低纬方向的吸收比高纬方向的更强。而中山站当时位于开/闭区边界附近, 可见7月15日的吸收增强可能部分是由于这些“高能电子云”产生的。Cummer等^[8]在分析极光亚暴的多谱段图像时也曾发现亚暴发生后在子夜后和黎明扇区有局域X射线极光的增强出现, 他们也认为这是由亚暴发生过程中产生的高能粒子东向漂移并进一步加速后沉降产生的。

亚暴产生的“高能电子云”东向漂移并同时得到加速, 这与中山站相对于极光卵的运动方向一致, 因此这一吸收峰持续了很长的时间。7月15日的吸收峰为什么如此之强, 很明显还与极盖吸收的昼夜变化有关, 但到底两因素各占多大的比例还是一个有待研究的问题。

4 结论

太阳活动区 R9077 产生的高能粒子直接沉降到极盖区和极光区产生了强烈的极盖吸收, 中山站的成像式宇宙噪声接收机在 14 日 1040 UT 左右到 17 日 1940 UT 左右观测到了这一吸收事件, 并观测到了极盖吸收事件的昼夜变化。

R9077 频繁活动, 使地球磁层处于剧烈扰动状态, 极光亚暴发生频繁, 很多持续时间较短的吸收峰叠加在强烈极盖吸收背景上, 其中较突出的吸收峰有两个。一个出现在 7 月 14 日 1753 UT 前后, 该吸收峰表现出一定的脉动特征, 其最大峰值超过了 6 dB, 这一吸收事件可能与极光亚暴发生时经场向电势差重复加速的极光粒子的沉降有关。另一个是 15 日晨侧发生的峰值达 26 dB 的吸收峰, 这是自中山站 1997 年 2 月开展电离层吸收观测以来所见到的最强的吸收事件。这一吸收增强除与极盖吸收的昼夜变化有关外, 很可能还与亚暴主相时在闭合磁力线上产生的“高能电子云”经东向漂移并加速后在午前扇区沉降有关。

致谢 中国极地考察办公室支持了南极中山站仪器的运行, 日本文部省支持了通门式磁力计和成像式宇宙噪声接收机, 中山站观测是由中国第 16 次南极考察队完成, D.J. McComas 博士 (ACE 太阳风参数)、N. Ness 博士 (ACE 行星际磁场)、Horst Kunow 博士 (Soho 空间粒子) 和世界地磁数据中心 (*Kp*, *Dst*, *AE*) 经由网上提供了数据, 在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] Knipp D J *et al.* An overview of the early November 1993 geomagnetic storm. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**(A11):26 197—26 220
- [2] Fox N J, Perodo M, Thompson B J. Cradle-to-grave tracking of the January 6-11, 1997, Sun-Earth connection event. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, **24**(14):2461—2464
- [3] Obara T, Den M, Miyoshi Y, Morioka A. Energetic electron variation in the outer radiation zone during early May 1998 magnetic storm. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 2000, **62**:1405—1412
- [4] Stauning P. Investigations of ionospheric radio wave absorption processes using imaging riometer techniques. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1996, **58**(6):753—764
- [5] 刘勇华等. 中山站成像式宇宙噪声接收机的初步观测结果. 极地研究, 1998, **10**(4):282—289
- [6] Stauning P. High-latitude D- and E-region investigations using imaging riometer observations. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1996, **58**(6):765—783
- [7] Stauning P. Substorm modeling based on observations of an intense high-latitude absorption surge event. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**(A11):26 433—26 452
- [8] Cummer S A *et al.* Global multispectral auroral imaging of an isolated substorm. *Geophys. Res. Lett.*, 2000, **27**(5):637—640

THE INTENSE IONOSPHERIC ABSORPTIONS ASSOCIATED WITH R9077

HU Hongqiao LIU Ruiyuan LIU Yonghua LIU Shunlin
YANG Huigen XU Zhonghua

(Polar Research Institute of China, Shanghai 200129)

N Sato H Yamagishi

(National Institute of Polar Research, Japan)

Abstract

Using the ground observation data at Zhongshan Station of Antarctica during July 13 to 17, 2000, the intense absorption events associated with the activities of the solar active region R9077 are analyzed. It was shown that an intense polar cap absorption event lasted more than 3 days, which was caused by the solar proton event accompanying the X5/3B major flare at 1024 UT on 13 July. The polar cap event started at about 1040 UT on July 14, and lasted to about 1940 UT on July 17, with a typical day-night variation. At the same time, the intense solar activities extremely disturbed the magnetosphere, therefore aurora substorms occurred frequently. The energetic particle precipitation from the magnetotail caused several absorption spikes superimposing on the background of polar cap absorption. The distinct event is an absorption enhancement that started at about 0300 UT on 15th, reached its peak of 26 dB around 0645 UT and recovered at about 1110 UT on the same day, which was the strongest absorption event observed at Zhongshan Station since the imaging riometer installed in February, 1997. Another outstanding absorption spike with pulsation occurred at around 1753 UT on 14th, its peak reached 6 dB.

Key words Polar ionosphere, Cosmic noise absorption, Solar activity, Zhongshan Station of Antarctica