

太阳耀斑和相关电离层吸收事件

贺龙松^① M. Nishino^② 张北辰^① 刘勇华^① 刘瑞源^① 刘顺林^① 胡红桥^①
N. Sato^③ H. Yamagishi^③

(^①中国极地研究所, 上海 200129; ^②日本名古屋大学太阳地球环境研究所, 丰川 442; ^③日本国立极地研究所, 东京 173. Email: pricsh@online.sh.cn)

摘要 利用 23 周太阳峰期期间南极中山站(不变磁纬 74.5° S)成像式宇宙噪声接收机的观测结果, 对由太阳质子和 X 射线耀斑引起的日侧电离层吸收事件进行了分析, 定量地给出电离层吸收和 X 射线耀斑强度的对应关系, 同时还利用北极 Ny-Alesund(不变磁纬 76.08° N)站的观测数据对此关系进行对比研究, 得出了在理论和观测上都较为一致的结论. 同时, 认为 M 级以上的 X 射线耀斑才能引起日侧电离层较为明显的吸收.

关键词 成像式宇宙噪声接收机 X 射线耀斑 太阳质子事件 电离层吸收

电离层吸收事件是与一系列日地物理事件的扰动相联系的. 在太阳耀斑期间, X 射线和远紫外线的辐射会引起日侧电离层的 D, E 层低端的电离显著增强, 因此导致电离层吸收的增加. 吸收持续的时间通常与 X 射线耀斑持续的时间相对应^[1]. Ranta 等人^[2]指出从宇宙噪声接收机的观测中, 可区别分别由太阳 X 射线和质子事件引起的电离层吸收.

宇宙噪声接收机是利用银河系射电源随机起伏的噪音作为探测信号来研究地球高层离子化大气的. 对空间一给定方向, 这些射电源的强度是恒定的. 在太阳风暴期间, 大量的高能电子和质子的沉降会使地球低层大气电离增加, 引起 60~100 km 高度上的电离层吸收. 38.2 MHz 的成像式宇宙噪声接收机是由一组天线阵 (8×8 或 7×7) 组成的^[3, 4], 中山站的成像式宇宙噪声接收机是一个由 $64(8 \times 8)$ 个阵子组成的天线阵^[5], 探测范围在 90 km 高度上可达 $180 \text{ km} \times 180 \text{ km}$ 的范围.

我国南极中山站(地理纬度 69.4° S, 76.4° E, 不变磁纬 74.5° S, $L = 13.9$)白天处于极隙区, 夜晚处于极盖区, 每天有两次进出极光卵. 在本文中, 我们分析了由太阳质子和 X 射线耀斑引起的电离层吸收, 并利用了南极中山站和北极 Ny-Alesund 站 38.2 MHz 的成像式宇宙噪声接收机^[3]的数据, 对 X 射线耀斑引起的电离层吸收事件进行了比对分析.

1 事件分析

电离层吸收的数据由中山站 38.2 MHz 成像式宇宙噪声接收机获得, $1 \sim 8 \text{ A X}$ 射线通量强度由 GOES 卫星的观测得到. 中山站的地方时 $t_{\text{LT}} \approx t_{\text{UT}} + 5 \text{ h}$.

1997 年 11 月 4 日和 6 日分别在太阳日面的西南半球 S14W33 和 S18W63 发生了两个 X 级的大耀斑. 图 1(a) 和 (b) 是 GOES-9 卫星在 11 月 4~9 日期间, 观测的 X 射线流量和质子流量($5 \sim 30 \text{ MeV}$ 和大于 60 MeV)分布. 从图 1(a) 和 (b) 来看, 分别在 4 日的 0552UT 和 6 日的 1149UT 发生 X2.1 和 X9.4 的 X 射线耀斑. 在 4 日的 0127 和 0232UT 还分别有两次 M1.3 和 M4.1 的耀斑爆发. 在两次 X 级 X 射线耀斑爆发后, 分别观测到质子通量的迅速增加, 表明有大量的质子沉降到近地空间.

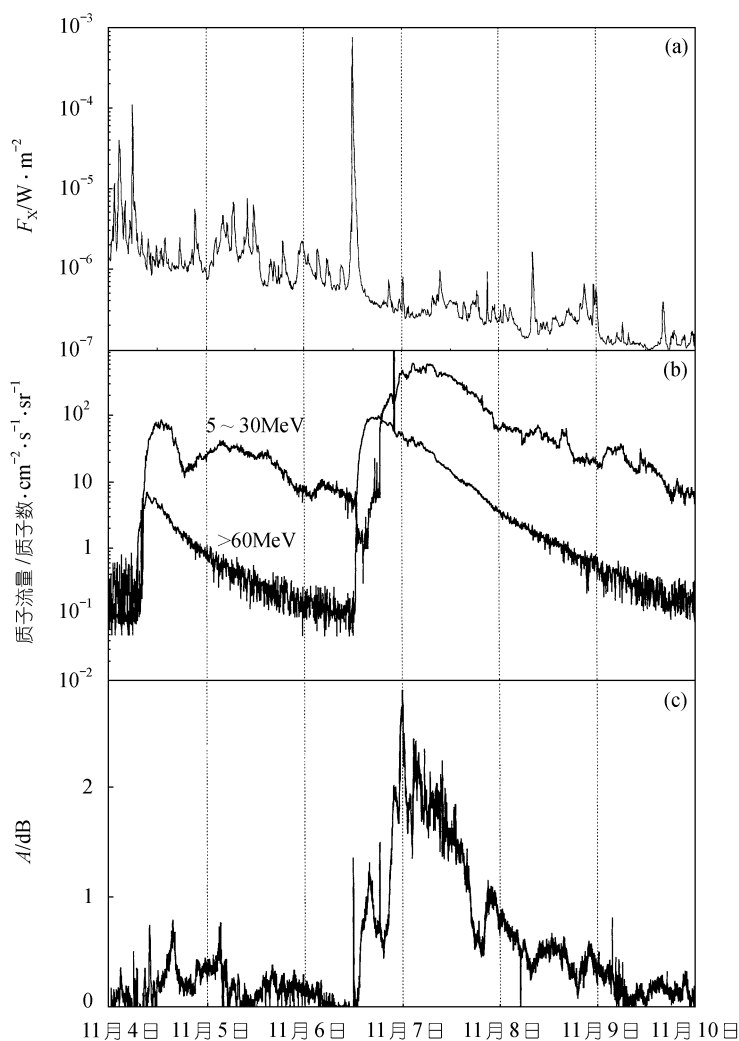


图 1 1997 年 11 月 4~9 日期间由 GOES-9 卫星观测的 X 射线流量(a)和
质子流量(b)以及中山站成像式宇宙噪声接收机中心波束观测的吸收事件(c)

1.1 太阳质子事件

从图 1(b)来看, 11 月 4 日两次 M 级耀斑, 其相对应的质子通量变化并不显著, 因此没有引起极盖吸收. 4 日的 X2.1 级耀斑爆发后, 在 0710UT 观测到大于 60 MeV 的质子通量迅速增加, 在 0830UT 时 5~30 MeV 的质子也开始骤然增加. 从图 1(c)上可以看出 4 日的太阳风暴引起了持续近 2 d 的极盖吸收事件(4 日 0830~6 日 0410UT), 但吸收强度较弱, 基本处于小于 0.5 dB 的量级. 相对来说, 6 日极盖吸收强度较大, 峰值吸收达 2.8 dB. 在 6 日 X9.4 耀斑爆发后 70 min (1300UT), 可观测到大于 60 MeV 的质子开始增加, 极区电离层几乎同时开始出现了吸收 (1310UT). 在 1530UT 时 5~30 MeV 的质子也出现迅速增长. 从中山站成像式宇宙噪声接收机中心波束的观测结果(图 1 (c))来看, 在 7 日 0001UT 吸收达到极大值 2.8 dB, 此后电离层吸收

开始逐渐减少, 并一直延续到 11 月 10 日才恢复正常.

1.2 X 射线耀斑和电离层突然骚扰

图 2 和 3 分别是南极中山站成像式宇宙噪声接收机的 64 个通道中的 16 个通道在 11 月 4 日和 6 日 X 射线耀斑时观测到的电离层吸收事件.

图 2(c)是 1997 年 11 月 4 日 0100~0700UT 期间, GOES-9 观测到的 5 min 平均的 X 射线耀斑强度变化,可以看出有 3 次大于 M 级(通量为 10^{-5} W/m^2) 的 X 射线耀斑事件发生, 分别对

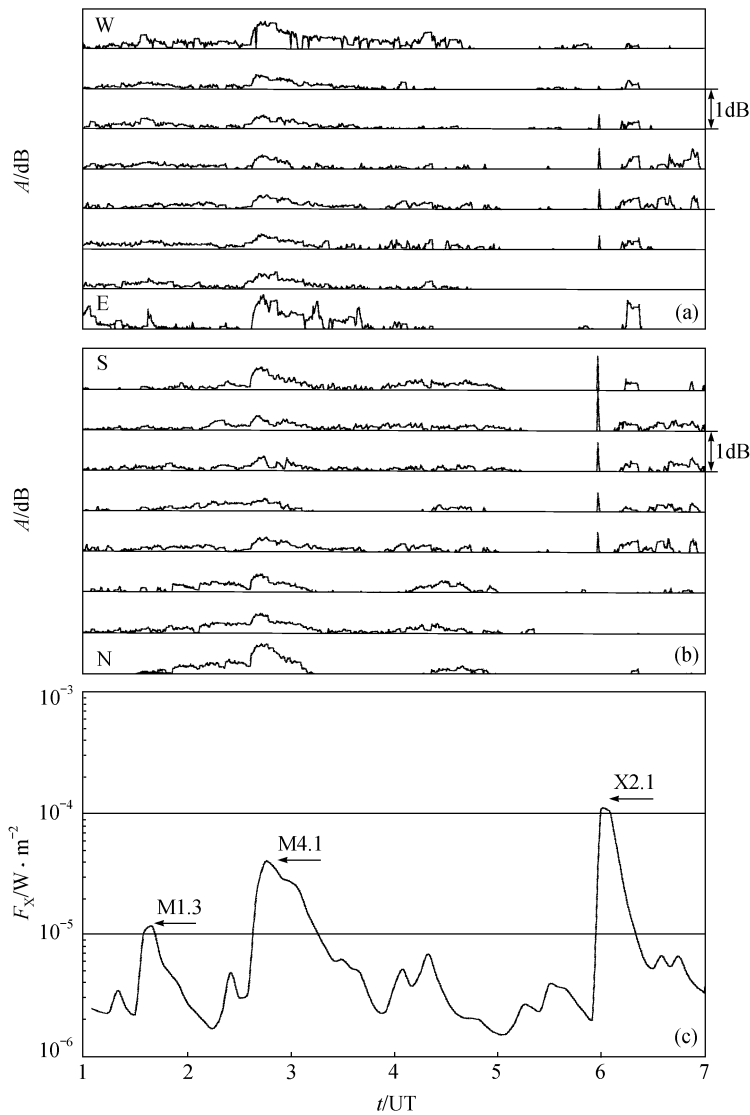


图 2 1997 年 11 月 4 日 0100~0700UT 中山站成像式宇宙噪声接收机观测到的与 X 射线相关的电离层吸收事件系列

(a) 中山站东西方向 N = 4 时的电离层吸收事件; (b) 中山站南北方向 E = 4 时的电离层吸收事件;
(c) GOES-9 卫星观测到的两次 M 级和一次 X 级的耀斑 (5 min 平均)

应的峰值流量为 $1.3\times10^{-5}\text{ W/m}^2$ (M1.3), $4.1\times10^{-5}\text{ W/m}^2$ (M 4.1) 和 $2.1\times10^{-4}\text{ W/m}^2$ (X2.1), 其对应的时间分别为 0130, 0250 和 0558UT. 从图 2(a)东西向(N = 4)和(b)南北向(E = 4)给出的中心束观测的电离层吸收序列来看, X 射线耀斑强度小于 M 级的, 几乎没有引起可观测到的吸收事件. 与 M1.3 X 射线耀斑(0130UT)对应的吸收强度只产生很弱的吸收. 对中心波束 N4E4 来说, 在 0250UT M4.1 X 射线耀斑引起了强度为 0.35 dB 的吸收事件, 其后伴随的弱电离层吸收与弱 X 射线流量相对应, 一直延续到 0303UT, X 射线耀斑结束. 从上例的 16 通道的观测来

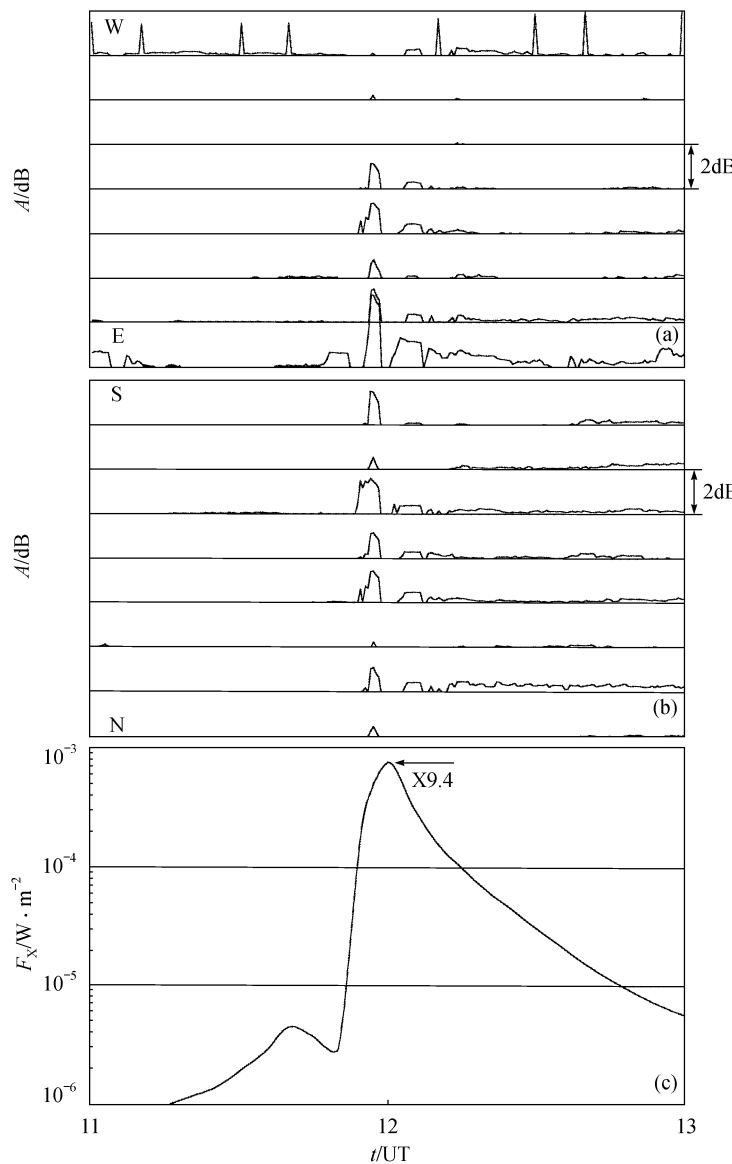


图 3 1997 年 11 月 6 日 1100~1300UT 中山站成像式宇宙噪声接收机观测
电离层突然骚扰事件

(a) 东西向 N = 4 各波束观测到的电离层吸收; (b) 南北向 E = 4 各波束观测到的电离层吸收;
(c) GOES-9 卫星观测的一次 X9.4 级的耀斑

看, 由 X 射线引起的电离层吸收事件无漂移运动, 持续的时间与 X 射线耀斑的发生时间相对应. 其后跟随的 X2.1 耀斑(0558UT) 也引起了可观测吸收事件, 其强度为 0.46 dB. 这个吸收峰向极向扩展, 在 D 层高度上沿经向有 100 km 的宽度.

图 3 是 6 日 1149~1210UT 爆发的一次 X9.4 级的 X 射线耀斑, 从中山站成像式宇宙噪声接收机的观测结果来看, 它引起了峰值为 1.4 dB(1157UT)的电离层吸收.

2 电离层吸收的初步结果

从上述事件可以看出, 太阳质子事件引起的极盖吸收事件可持续 2~3 d, 而 X 射线耀斑引起的电离层吸收事件, 其持续时间与 X 射线增强的时间相同.

我们分析了 1997~1999 年太阳 23 周峰期上升期期间, 几个主要活动区的 X 射线耀斑事件和电离层吸收的关系. 在南半球冬季月份期间发生的 X 射线耀斑, 在中山站纬度上没有观测到与之对应的明显电离层吸收事件, 这主要是由于中山站在南半球冬季月份, 太阳的高度角较小或处于地平线以下, 因此电离层几乎不受 X 射线耀斑的直接影响^[1]. 表 1 列出了 1997 年 11 月(AR8100)、1998 年 11 月(AR8210) 和 1999 年 11 月份(AR8765 和 AR8771)在中山站夏季月份的日侧($t_{LT} \approx t_{UT} + 5\text{ h}$)、中心波束(N4E4)测量的电离层吸收与对应的 X 射线流量. 表 1 中已排除了夜晚侧的 X 射线耀斑事件. 图 4 示出了由表 1 数据给出的关系曲线, 其横坐标代表 X 射线流量, 纵坐标表示 N4E4 波束的吸收强度. 从图 4 的拟合曲线来看, 电离层吸收强度 A 和 X 射线通量的大小 F_X 满足: $A \approx 66.8 F_X^{0.5}$, 相关系数为 0.8. 从这个关系中可以估算出只有 X 射线的流量大于 $9 \times 10^{-6} \text{ W/m}^2$ 才能产生较为明显的电离层吸收($A \geq 0.2 \text{ dB}$).

表 1 1997~1999 年期间, 中山站的日侧观测到的电离层吸收及其对应的 X 射线耀斑

日期	X 射线耀斑		电离层吸收(N4E4)	
	时间 / UT	流量/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	观测值/ dB	时间/UT
1997 年 11 月 3 日	1029	4.7×10^{-5}	0.38	1030
1997 年 11 月 4 日	0242	4.1×10^{-5}	0.35	0245
1997 年 11 月 4 日	0558	2.1×10^{-4}	0.46	0558
1997 年 11 月 6 日 ^{a)}	1155	9.4×10^{-4}	1.36	1154
1997 年 11 月 27 日	1317	2.6×10^{-4}	0.64	1317
1997 年 11 月 28 日	0503	6.8×10^{-5}	0.34	0509
1998 年 11 月 22 日	0642	3.7×10^{-4}	1.96	0642
1998 年 11 月 23 日	0644	2.2×10^{-5}	1.35	0643
1998 年 11 月 23 日	1121	3.1×10^{-5}	0.35	1120
1998 年 11 月 24 日	0220	1.0×10^{-4}	0.93	0219
1998 年 11 月 28 日	0552	3.3×10^{-4}	1.54	0546
1999 年 11 月 15 日	0841	2.9×10^{-5}	0.21	0840
1999 年 11 月 16 日	0710	2.3×10^{-5}	0.32	0710
1999 年 11 月 21 日	1017	2.2×10^{-5}	0.45	1017
1999 年 11 月 26 日	0123	5.7×10^{-5}	0.22	0122
1999 年 11 月 26 日	0400	1.9×10^{-5}	0.36	0401
1999 年 11 月 27 日	0301	2.8×10^{-5}	0.35	0301
1999 年 11 月 27 日	1212	1.4×10^{-4}	0.68	1212

a) 图 3 的拟合曲线中未用到此数据

Ny-Alesund 处于中山站的北极共轭点附近, 在耀斑频繁的 4~5 月和 8 月期间, 它正处于北半球的春夏季节. 因此, 此期间发生的 X 射线耀斑对其影响较为显著. 表 2 列出了 Ny-

Alesund 成像式宇宙噪声接收机观测的电离层吸收, 并和我们得出的理论值进行了比较, 可以看出理论值和实测的结果基本上是一致的. 表 2 给出了 Ny-Alesund 成像式宇宙噪声接收机 N4E7 波束的测量值, 是考虑到这个波束受周围电磁干扰影响较小.

表 2 Ny-Alesund 站观测到的吸收事件及与 $A = 66.8 F_X^{0.5}$ 的比较

日期	X 射线耀斑		电离层吸收(N4E7)		
	时间/ UT	流量/ $W \cdot m^{-2}$	观测值/ dB	理论值/ dB	误差/ %
1998 年 4 月 27 日	0920	1.1×10^{-4}	1.00	0.70	30
1998 年 5 月 2 日	1342	1.1×10^{-4}	1.00	0.70	30
1998 年 5 月 6 日	0809	2.7×10^{-4}	1.50	1.10	26
1998 年 7 月 14 日	1259	4.6×10^{-5}	0.40	0.45	8
1998 年 8 月 18 日	0824	2.8×10^{-4}	1.20	1.12	6

在太阳耀斑爆发期间, X 射线, $H\alpha$, EUV 及宇宙射线都能引起 D 层电离, 使 D 层的电子密度增加^[6]. 吸收强度可以表示为^[1]

$$A = \frac{q^2}{2e_0 m_e c} \int_s \frac{N g_{en}}{(w \pm w_L)^2 + g_{en}^2} ds,$$

这里 e_0 和 c 分别表示介电常数和光速, q 和 m_e 是电子的电荷和质量, N 和 g_{en} 是局部电子的密度和电子-中性分子的碰撞频率, w 是射电波的角频率, w_L 是电子回旋频率的经向分量. 因此, 吸收强度 A 正比于电子和中性大气的碰撞频率 g_{en} 和电子密度 N . 只考虑 X 射线引起的电离, 电子密度 N 正比于 X 射线流量 F_X 的平方根. 在电子和中性大气的碰撞频率变化不很剧烈的情况下, 吸收强度 $A \sim F_X^{0.5}$, 与我们得到的经验关系十分吻合. 这说明在 X 射线耀斑期间, X 射线引起 D 层电离占主导地位, 由其他粒子(如 $H\alpha$, EUV 及宇宙射线)引起的电子密度增加, 与 X 射线引起的电离相比作用很小.

从图 4 可以看出, X 射线通量较大的一些数据点的弥散也较大. 对 1997 年 11 月 6 日 X9.4 级的 X 射线耀斑来看, 利用经验公式得到的理论值为 1.91 dB, 而成像式宇宙噪声接收机实测的值只有 1.36 dB, 相对误差达到了 40%. 这可能是由于通量大的 X 射线耀斑引起了 D 层的多次电离, 而引起了较大的随机偏离.

3 结论和讨论

太阳质子引起的极盖吸收时间较长, 而 X 射线耀斑引起的电离层吸收事件, 其持续时间与 X 射线耀斑的发生时间相对应. 从我们的事件分析可以看出, 太阳质子事件和 X 射线耀斑事件引起了明显不同的电离层吸收.

对太阳 23 周峰期上升期几个大活动区的 X 射线耀斑引起的电离层吸收事件分析中, 我

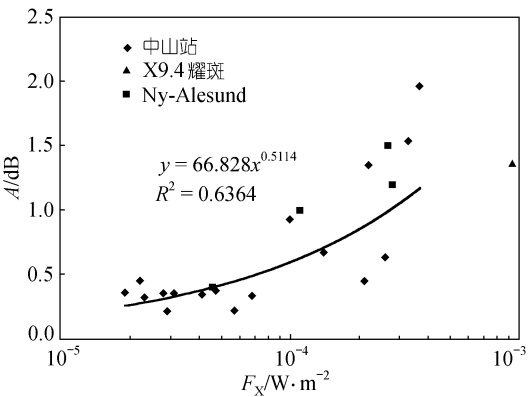


图 4 与表 1 对应的中山站电离层吸收强度和 X 射线通量的散点图、最小二乘拟合关系和 Ny-Alesund 的观测结果

们利用南极中山站和北极 Ny-Alesund 站成像式宇宙噪声接收机数据, 给出了一个经验的公式, 得出了与理论和测量相一致的结论. 我们认为在 X 射线耀斑爆发期间, 电离层 D 层电子密度的增加主要受 X 射线强度的影响, 其吸收强度与 X 射线通量的变化成幂率关系. 同时, 认为 X 射线流量大于 $9 \times 10^{-6} \text{ W/m}^2$ 才产生较为明显的电离层吸收.

致谢 感谢 Dan Wilkinson 博士网上提供的 GOES 卫星 X 射线的观测资料和云南天文台太阳活动预报组提供的太阳活动简报. 中国南极第十三队中山站越冬队在本文的两位作者越冬观测期间给予了很大的帮助, 在此也表示衷心的感谢. 本工作为国家自然科学基金(批准号: 49639160)、中国科学院重大基金(批准号: KJ951-1-305)和国家海洋局青年基金(批准号: 98605)资助项目.

参 考 文 献

- 1 Stauning P. Investigations of ionospheric radio wave absorption processes using imaging riometer techniques. *J Atmosphy Terr Phys*, 1996, 58: 753~764
- 2 Stauning P. D-region observations of polar cap absorption events during EISCAT operation in 1981~1989. *J Atmosphy Terr Phys*, 1993, 55: 751~766
- 3 Detrick D L, Rosenberg T J. A phase-array radiowave imager for studies of cosmic noise absorption. *Radio Sci*, 1990, 25: 325~338
- 4 Rosenberg T J, Detrick D L, Venkatesan D, et al. A comparative study of imaging and broad-beam riometer measurements: the effects of spatial structure on the frequency dependence of aurora absorption. *J Geophys Res*, 1991, 96(17): 793~803
- 5 Liu Y, Liu R, He L, et al. Preliminary result of imaging riometer at Zhongshan Station, Antarctica. *Chinese Journal of Polar Science*, 1999, 10(1): 33~40
- 6 Brekke A. *Physics of the Upper Polar Atmosphere*. Chichester: John Wiley & Sons, 1997. 233

(2000-3-15 收稿, 2000-6-18 收修改稿)