

赵凯, 蒋勇, 门可佩等. 2014. 不同地磁活动水平下电离层 H^+ 上行的半球对比研究. 地球物理学报, 57(11):3715-3728, doi: 10.6038/cjg20141126.

Zhao K, Jiang Y, Men K P, et al. 2014. Interhemispheric comparisons of ionospheric upflow H^+ at various geomagnetic activity levels using FAST observations. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 57(11):3715-3728, doi:10.6038/cjg20141126.

不同地磁活动水平下电离层 H^+ 上行的半球对比研究

赵凯¹, 蒋勇^{1*}, 门可佩², 黄林峰^{1,3}, 傅帅¹

1 南京信息工程大学数学与统计学院-空间天气研究所, 南京 210044

2 南京信息工程大学数学与统计学院, 南京 210044

3 中国气象局国家卫星气象中心, 北京 100081

摘要 使用 FAST/TEAMS 仪器在第 23 太阳活动周下降相的数据, 从地磁活动水平的角度, 分别分析在磁静日 ($Kp \leq 2^+$) 和磁扰日 ($Kp \geq 3^+$) 时南 (SH)、北半球 (NH) 高纬 ($> 50^\circ$) 电离层 H^+ 的上行强度, 计算其上行率和净上行积分能通量, 以期得到 H^+ 上行的长期水平并分析地磁扰动期间南、北半球离子上行强度的异同. 研究表明, 磁扰期间上行强度显著加强, 平静期南、北半球的平均上行率分别是 $\sim 15\%$ 和 $\sim 20\%$, 而磁扰期的平均上行率分别增强了 1.45 倍和 1.04 倍, 磁扰期间南半球上行强度的增长更显著; 平静期南半球的上行强度小于北半球, 但磁扰期两个半球的上行强度相当; 磁午夜和黎明区间受地磁扰动的影响最显著, 其磁扰期与平静期上行率的比值 (S/Q) 最大, 同时南半球在各个地方时区间的 S/Q 值均大于北半球; 另外, 我们发现磁扰期间的上行率在极光椭圆带下边界附近增幅最明显, 而积分通量在上边界附近增加显著. 上行源区以平静期的源区为中心从日侧极尖区扩展到磁午夜、且向低磁纬延伸, 同时, 极尖区上行源区在磁扰期有向晨侧偏移的趋势.

关键词 磁层-电离层耦合; 上行 H^+ ; 地磁扰动; 半球对比研究

doi:10.6038/cjg20141126

中图分类号 P353, P352

收稿日期 2014-09-16, 2014-10-16 收修定稿

Interhemispheric comparisons of ionospheric upflow H^+ at various geomagnetic activity levels using FAST observations

ZHAO Kai¹, JIANG Yong^{1*}, MEN Ke-Pei², HUANG Lin-Feng^{1,3}, FU Shuai¹

1 Institute of Space Science, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

2 School of Mathematics and Statistics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

3 National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administrator, Beijing 100081, China

Abstract Using the FAST/TEAMS observations on the declining phase of solar cycle 23 (SC23), we individually calculated the H^+ upflow rates during geomagnetic quiet times ($Kp \leq 2^+$) and disturbed times ($Kp \geq 3^+$) over the southern (SH) and northern (NH) high-latitude polar regions, respectively. We investigate into the long-term magnitude of upflow intensity and correlations between the hemispheres. It is found that the total intensity is significantly enhanced during geomagnetic disturbed times by a factor of 1.04 and 1.45 for the northern and southern hemispheres, respectively. The enhancement in southern hemisphere is more dramatic than that in northern hemisphere, the hemispherically averaged intensities all arrive at $\sim 22\%$ during disturbed times while the quiet time upflow rate is $\sim 15\%$ and $\sim 20\%$, respectively. The midnight and dawnside upflows are more sensitive to geomagnetic disturbance. The upflow rates

increase remarkably at low boundary of aurora oval, and during disturbed times, the high occurrence upflow region spreads from the dayside cusp region towards the midnight auroral zone and towards lower invariant latitudes. In addition, the polar cusp region moves gradually to the dawnside during disturbed times.

Keywords M-I coupling; Ionospheric H^+ upflow; Geomagnetic disturbance; Interhemispheric comparisons

1 引言

了解电离层上行离子在磁层中的分布以及其上行部分对磁层的影响对于理解磁层-电离层耦合具有重要的意义. 电离层上行主要发生在极区(极尖区、极光椭圆带等处), 因此对离子上行的研究主要集中在极区, Andersson 等(2004)提出一种动态识别极光椭圆带高低纬度边界的方法, 这种方法被广泛应用于上行事件的分析和研究. Shelly 等在 1972 年指出在一次地磁暴中电离层离子上行的幅度明显提升且 O^+ 的通量甚至会超过 H^+ 的通量. 目前, 一致的观点是极区电离层的离子获能过程和内磁层的等离子性质是在太阳风-磁层-电离层这样一个由许多的物理过程组成的系统内部产生的, 像离子加热、波粒相互作用等过程(Collin et al., 1984, 1998; Peterson et al., 2009). 相对于太阳风所携带的离子通过南北极区的开放磁力线区域进入外磁层, 电离层上行的离子成分主要被传输到内磁层(上行于夜侧的部分会被传输到等离子幔甚至更远的磁尾), 并成为内磁层离子的重要来源.

关于上行离子在高度上的分布特点, Bouhram 等(2002)使用 Probes 和 FAST 卫星数据研究了极区从 1000 到 19000 km 范围内的 H^+ 和 O^+ 上行率, 研究发现日侧极尖区在不同高度上都有上行离子存在且向磁层提供了大量冷离子. 同时, 他们指出 2000 km 以下的离子主要以沉降为主, 这部分离子大部分沉降到大气层, 而在 2000 km 以上, 上行离子的能通量会随着高度而增加, 直到 5000 km 高度开始减小并在 $2R_E$ 之后重新得到增强. 另外, 在 5000 km 高度上, Zeng 等(2004)用 Polar/TIDE 观测计算得到极盖区 5000 km 高度上 O^+ 的上行率为 48%, 这个上行率与在 840 km 高度(DMSP 卫星高度)上的模拟结果相差较大.

来自电离层不同源区的离子会上行到磁层的不同区域. Chappell 等(1987)指出从日侧极盖区和极尖区的上行 H^+ , He^+ , O^+ 主要被传输到等离子体

幔和磁尾瓣, 而夜侧极光椭圆带和更低纬度的上行部分则大部分被传输到磁尾等离子体片. Shi 等(2002)证实了这个结论, 同时指出起源于日侧椭圆带或者较低纬度的上行部分主要被传输至日侧磁层. 因此, 上行离子源区的空间分布主要集中在极尖区和极光椭圆带上(Newell et al., 1989; Valek et al., 2002; Frey et al., 2003; Fuselier et al., 2008).

电离层离子上行与地磁活动之间存在显著的相关关系. Cully 等(2003)用 EXOS-D/SMS 观测研究了不同地磁活动水平和太阳风条件下的 H^+ 和 O^+ 上行, 表明太阳风动压和行星际磁场(IMF)变化会导致上行强度的显著变化. Lennartsson 等(2004)用 Polar/TIMAS 仪器数据分析了太阳风对高纬电离层上行的影响, 结果表明, 行星际磁场 B_z 的减小(或北向变为南向)对离子上行具有促进作用, 但对 H^+ 和 O^+ 的影响幅度并不相同, 南向 B_z 使得两种离子的上行率分别增强 1.5~2 和 2.5~3 倍, 因此, O^+ 上行对行星际磁场的变化更敏感. 同时, 他们指出上行率随着高度增加而增强, 在高度从 $2R_E$ 到 $4R_E \sim 9R_E$ 的过程中上行率增加了近 3 倍.

关于电离层上行离子的观测和模拟研究已经持续了 40 多年, 其中离子上行与地磁扰动之间的关系也取得了大量的研究成果(Yau and André, 1997). 关于不同地磁活动水平下内磁层 O^+ 和 H^+ 的比例问题, Kroth 等(2002)用 CRESS 观测计算表明磁暴期间和非磁暴期间其比例分别为几百倍和 15%~65%. Wilson 等(2004)曾用 FAST 观测对比分析了 H^+ 和 O^+ 的上行强度与地磁亚暴之间的关系, 表明最大地磁亚暴期间的上行强度是最小地磁亚暴期间的 10 倍左右. 在观测研究的基础上, 磁流体方程也广泛应用于模拟电离层物质向磁层的传输. 这些研究结果充分表明, 电离层离子上行与地磁活动关系密切. 那么, 电离层 H^+ 的长期平均上行率及其空间分布有什么特点? 以及地磁扰动对电离层离子上行的影响在南、北半球之间是否相同?

基于这两个问题, 使用 FAST/TEAMS 仪器第 23 太阳活动周(SC23)下降相(2000—2005 年)观测

数据分别计算地磁扰期($Kp \geq 3^+$)和平静期($Kp \leq 2^+$)南(SH)、北(NH)半球极区电离层 H^+ 上行强度(上行率和净积分能通量),以期获得电离层 H^+ 上行强度的长期统计结果并对比分析地磁扰动对电离层上行增强幅度在南、北半球之间的异同.拟分别从上行强度在 ILat, MLT, 高度和年份上的分布角度进行研究.

2 数据资料

TEAMS 仪器是搭载在 FAST 飞船上的时间-离子能量-投掷角-质谱仪的简称(Carlson et al., 1998; Klumpar et al., 2001; Pfriff et al., 2001).飞船发射于 1996 年 8 月,其轨道倾角为 83° ,近、远地点分别为 350 和 4175 km.只有当其运行至南、北半球高纬时才会正常接收离子的相关数据,这些离子包括 H^+ , He^+ 和 O^+ (其能量范围是 $1 \sim 12000$ eV),相关数据包括卫星地理坐标、时间、离子在 48 个能道上的微分能通量、离子在 16 个投掷角内的微分能通量以及卫星飞行速度等信息.其旋转一周的时间是 5 s,在 $1/2$ 个旋转周期内 TEAMS 就可以收集一次信息,其观测的离子投掷角范围是 $-90^\circ \sim 270^\circ$.对于北半球而言,由于磁力线向下,上行的离子成分应该具有的投掷角范围是 $135^\circ \sim 225^\circ$,而南半球则相反(Zhao et al., 2014).该仪器数据可获取的时间范围是 1996 年 10 月 1 日到 2009 年 4 月 30 日,本文取 SC23 下降阶段 2000 年 3 月 6 日到 2005 年 10 月 22 日阶段内的数据进行分析.

图 1 从上往下分别显示 2004 年 11 月 9 日, 20:38—21:35 UT 特大地磁暴期间的 H^+ 能谱、 <1 keV H^+ 角谱、 ≥ 1 keV H^+ 角谱、 O^+ 能谱以及该时段的 Kp 指数和卫星飞行高度.磁暴发生时地磁 K 指数达到 87 nT, Kp 指数等级为 9^- .在 20:42 UT 左右和 21:25 UT 之后,微分能通量得到显著增强,具有高能离子的通量比低能离子的通量大、各个投掷角内的通量都增强、 H^+ 通量比 O^+ 通量平均高一个量级等特点.另外,可以发现,磁暴发生时通量增强的地方通常在较低磁纬度的极光带下边界和其他较低纬度地区,椭圆带以内的通量要相对较小,而 $>80^\circ$ ILat 极盖区的较小通量是由于卫星在此期间停止观测.根据 Shelley 等(1972)的观点,磁暴发生时 O^+ 的通量甚至会超过 H^+ 的通量,在此次磁暴事件中该现象并不明显,但可以肯定的是 H^+ 和 O^+ 的微分能通量都会增加甚至两个量级以上.在卫星此

次飞行中,远地点处在高纬极盖区,因此通量数值非常小.对于南半球而言,上行离子的投掷角范围是 $-90^\circ \sim 90^\circ$,在该投掷角范围内上述时段的高、低能 H^+ 的微分通量显著增加至 10^6 eV/($cm^2 \cdot s \cdot eV$),如图 1 第二、三子图中离子通量的角谱所示,尤其低能 H^+ 在向上的通量要大于向下的通量,因此,我们确定此时发生了 H^+ 上行事件.在 $90^\circ \sim 270^\circ$ 投掷角范围内, H^+ 的通量也显著得到增强.这部分离子的运动方向与磁力线方向相背,以沉降的形式回到电离层或被束缚在局部.

根据地磁活动水平和地磁纬度将数据分为四组(在 3.1 节讨论)分别确定 H^+ 上行事件(在 3.2 节讨论),一方面分析不同地磁活动水平下上行的空间分布、地方时分布、高度分布以及年代分布的长期特征(在 3.3 和 3.4 节讨论);另一方面,分析并讨论上行强度在南、北两个半球的异同.

3 分析

3.1 数据选择和网格

选择 2000—2005 年卫星时间精度为 5 s 的数据,研究 50° ILat 以上的电离层上行问题.考虑到 2000 km 以下的离子主要以沉降的形式存在(Bouhram et al., 2002),计算中只保留 2000 km 以上的数据计算上行率和上行净通量.从此高度到卫星的远地点 4175 km 被划分为四组:2000~2500、2500~3000、3000~3500 和 3500~4200.对于网格的划分,使用 48×20 个网格点覆盖磁经度 $0 \sim 360^\circ$ (磁地方时 0—24)和磁纬度 $50^\circ \sim 90^\circ$ ILat 的半球,网格精度为 $7.5^\circ \times 2^\circ$ (0.5 h $\times 2^\circ$).上述处理后的数据按照地磁活动水平 3 h 的 Kp 指数分为平静期($Kp \leq 2^+$)和磁扰期($Kp \geq 3^+$),按地磁纬度分为南半球(ILat $\leq -50^\circ$)和北半球(ILat $\geq 50^\circ$).在四组内,分别讨论电离层 H^+ 上行强度的 ILat-MLT、高度和磁地方时分布.

样本量的大小一定程度上决定着统计结果的显著性水平.如图 2 所示, $\geq 60^\circ$ ILat 区域的样本都在 1000 个以上, $\geq 50^\circ$ ILat 区域的样本数都大于 200,因此能够满足统计分析需要.对于 $80^\circ \sim 90^\circ$ ILat 高纬极盖区域,由于样本量原因不做讨论.

在这种情况下,满足条件的观测总共有 2944200 个,平静期有 1507311 个(57%),磁扰期有 1127337 个(43%),南、北半球分别为 1154906 (42%), 1604186 个(58%),从低到高的四个高度范围内观

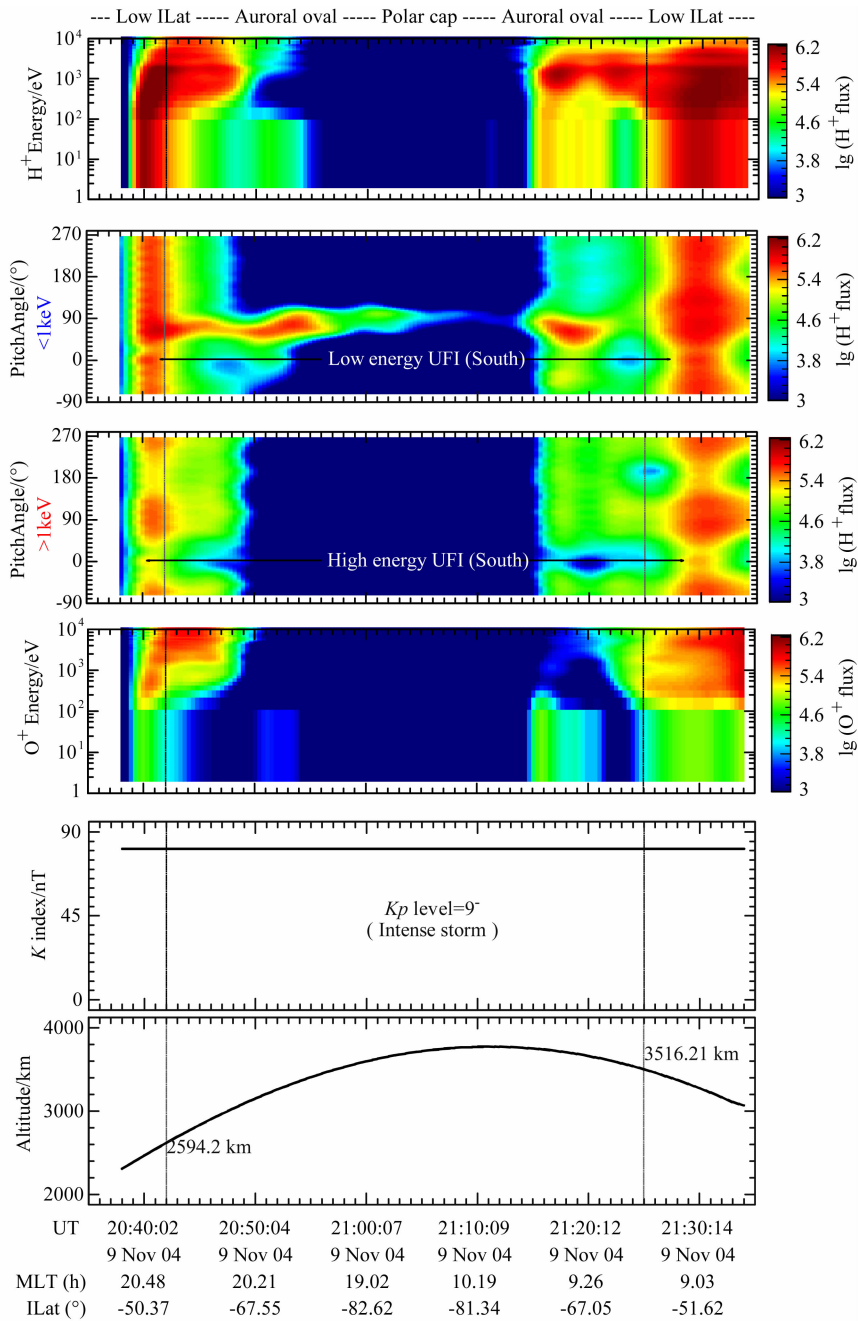


图 1 从上到下分别表示, 1 eV~12 keV H⁺ 的能谱、≥1 keV 和 <1 keV H⁺ 的投掷角谱、1 eV~12 keV O⁺ 的能谱以及该事件期间的 K_p 指数等级和卫星飞行的高度. 图中离子微分能通量是对数处理后的值, 在第一条参考线 (20:42 UT) 之前和第二条参考线 (21:25 UT) 之后, 其数值在上行方向上 (-90°~90°) 显著增强

Fig. 1 The panels, from top down, illustrate the 1 eV~12 keV H⁺ energy-time spectrogram, ≥1 keV and <1 keV H⁺ pitchangle-time spectrograms, 1 eV~12 keV O⁺ energy-time spectrogram, the K_p level and spacecraft altitude plot at the 20:35—21:35 UT interval. The differential energy fluxes are logarithmically transformed and are enhanced before the first vertical ref line (20:42 UT) and after the second ref line (21:25 UT) at the upward directions, which is from -45° to 45° exactly

测数分别占总数的 12%, 17%, 25% 和 46%, 从 2000 到 2005 年的 6 年观测数分别占总数的 20%, 16%, 17%, 17%, 15% 和 15%. 因此, 除了在不同高度组内数据量随着高度增加而增加, 数据相对均匀

地分布在各组中.

3.2 上行率

Yau 等(1984)从离子投掷角的角度给出离子上行事件相对严格的定义(他们简称上行离子为 UFI),

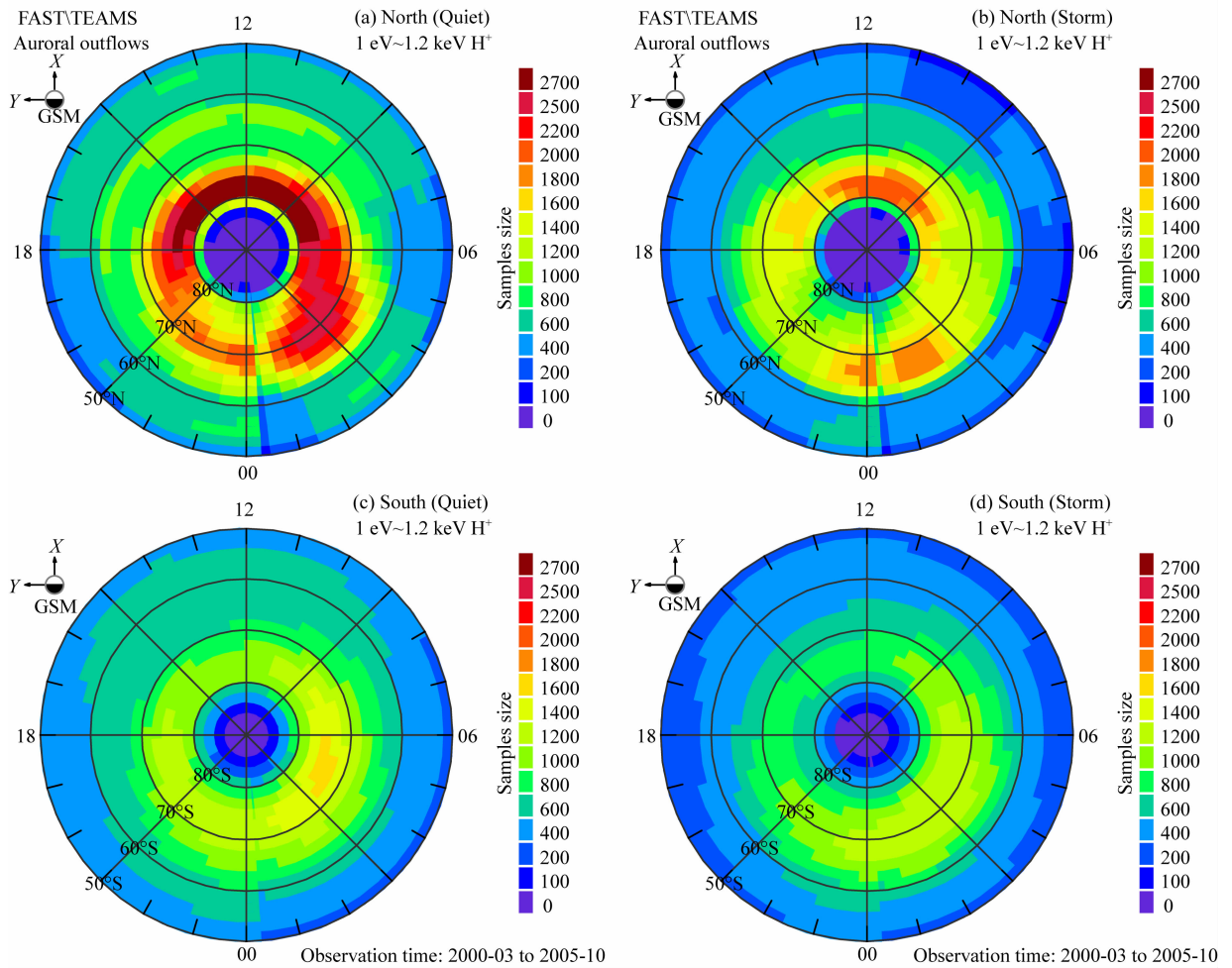


图2 使用 $2^\circ \times 7.5^\circ$ 网格划分 ILat 和 MLT, 地磁纬度的范围是 $50^\circ \sim 90^\circ$, 磁地方时从 0:00 到 24:00. 南、北半球的样本量在 $50^\circ \sim 80^\circ$ 的纬度范围内满足统计要求, 对于 $>80^\circ$ 区域由于样本量不足不予讨论. 北半球 (a) 的样本量比南半球 (b) 相对多一些, 但分布相似

Fig. 2 Bins for statistical analysis are grided into $2^\circ \times 7.5^\circ$ at ILat-MLT, where the invariant latitude runs from 50° to 90° while the magnetic local time is from 0:00 to 24:00. The sample size in northern (a) and southern (b) hemisphere are sufficient for the statistical analysis except the $>80^\circ$ ILat polar cap region which will not be discussed due to the insufficient samples. Note the samples are accumulated from March, 2000 to October, 2005 and are on different scales but in similar spatial distribution between the two hemispheres

简言之是在电离层或内磁层存在背离地球向上运动的离子, 在一定时间内当其通量达到某个量级的时候就发生了离子上行事件. 上行 O^+ 和 H^+ 的微分能通量峰值需要分别超过 10^3 和 10^4 $eV/(cm^2 \cdot s \cdot sr \cdot eV)$. 在投掷角方面, 以北半球为例, 被向上加速的离子 (正电荷) 其投掷角在 $135^\circ \sim 225^\circ$ 区间内, 在垂直于磁力线的 $\sim 90^\circ$ 和 $\sim 270^\circ$ 投掷角上, 离子被捕获. 对于投掷角范围是 $0^\circ \sim 180^\circ$ 的观测资料, 该值是 $135^\circ \sim 180^\circ$. 被向下加速的部分刚好相反. 阈值的选择很大程度上影响最后计算的上行强度, Collin 等 (1988) 指出上行事件在 12s 短暂的时间内其通量峰值将会增加一个量级, 且离子束的最大通量远超过 10^5 $eV/(cm^2 \cdot s \cdot sr \cdot eV)$.

在 Cully 等 (2003)、党戈等 (2007) 工作的基础上, 我们采用南、北半球总体向上和向下通量的公式 (1) 和 (2). 其中, $F_{up}|_{north}$ 和 $F_{down}|_{north}$ 分别表示微分能通量 $j(\theta, m, E)$ 在向上和向下的投掷角范围内的积分基础上对离子能量积分后的通量, θ 为离子投掷角, m 为该上行 (下行) 离子, 本文是 H^+ , 如式 (3) 所示. E 是离子所携带的能量, 离子温度范围是 $1 eV \sim 1.2 keV$. 公式 (2) 与 (1) 的差别源于南半球的上行投掷角范围与北半球的相反.

通过式 (4) 计算出净积分能通量, 对于上行事件而言, 净积分通量要为正值而且要大于某个阈值 F_{thrs} . 如式 (5) 所示, 该阈值至少在平均净通量 μ 以上 (3 个标准差), 否则过低的阈值将导致计算的上

$$\begin{cases} F_{\text{up}} | \text{north} = \int_{1\text{eV}}^{1.2\text{keV}} \int_{\pi/2}^{3\pi/2} j(\theta, m, E) \cos(\pi - \theta) d\theta dE, \\ F_{\text{down}} | \text{north} = \int_{1\text{eV}}^{1.2\text{keV}} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} j(\theta, m, E) \cos(\theta) d\theta dE; \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} F_{\text{up}} | \text{south} = \int_{1\text{eV}}^{1.2\text{keV}} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} j(\theta, m, E) \cos(\theta) d\theta dE, \\ F_{\text{down}} | \text{south} = \int_{1\text{eV}}^{1.2\text{keV}} \int_{\pi/2}^{3\pi/2} j(\theta, m, E) \cos(\pi - \theta) d\theta dE; \end{cases} \quad (2)$$

$$E \in [1\text{eV}, 1\text{keV}] \cup [1\text{keV}, 1.2\text{keV}]; m = H^+ \quad (3)$$

$$F_{\text{net}} = F_{\text{up}} - F_{\text{down}}, \quad (4)$$

$$F_{\text{thrs}} \geq \max\{|\mu + 3 \cdot \text{stderr}|, 10^4 \text{eV}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{eV})\}, \quad (5)$$

$$\text{Rate}_i | \text{Quiet} = \frac{\sum_{j=1}^{N_i} \text{sign}(\text{Quiet}_j) \cdot \text{sign}(\text{Up}_j)}{N_i}, \quad i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, N_i. \quad (6)$$

$$\text{Net flux}_i | \text{Quiet} = \frac{\sum_{j=1}^{N_i} \text{sign}(\text{Quiet}_j) \cdot \text{sign}(\text{Up}_j) \cdot F_{\text{net}}}{N_i}, \quad i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, N_i. \quad (7)$$

行率过大,不能体现不同上行源区的差别。

通过公式(1)、(2)、(4)我们计算出南、北半球的净积分能通量的均值和标准误分别为 8201 和 6340、9089 和 1480 eV/(cm² · s · eV),其均值未超过 10⁴量级,因此,计算过程中将净积分能通量的阈值设定为 10⁴ eV/(cm² · s · eV).如果计算出的净积分能通量 F_{net} 大于阈值 F_{thrs} ,我们就设定此次观测(第 j 个)的 Up_j 为 1,其中, $j = 1, 2, \dots, N_i$,其中 N_i 表示第 i 个网格内的观测总数, $i = 1, 2, \dots, n$, n 是总的网格数, $n = 48 \times 20 = 960$ 个.公式(6)和(7)给出了平静期 H^+ 的上行率和平均上行净积分能通量的计算公式,其中当该观测(第 j 个)处于平静时 ($Kp \leq 2^+$),设定 Quiet_j 为 1.

据此,我们最后得到的上行 H^+ 事件总数为北半球 463865 个(平静期 55%,磁扰期 40%),南半球 271079 个(平静期 49%,磁扰期 50%).基于这些事件,下文一方面分析研究这些上行事件的平均强度与长期变化特征,另一方面对比分析 H^+ 在南、北半球上行强度的异同。

3.3 半球对比分析

表 1 列出根据公式(6)、(7)计算出的 H^+ 上行率和平均上行积分能通量.分别给出在平静期和磁扰期,南、北半球在磁正午(6 小时 LT,下同)、傍晚、午夜和黎明地方时段以及半球的平均上行率和净积分能通量.同时,为了讨论地磁扰动对上行强度的影响,对应列出南、北半球的上行率和净积分能通量的扰时-平静时比值,记为 S/Q .

计算结果显示, H^+ 的长期平均半球上行率在 15%~25%之间,上行积分通量的平均水平处于

10⁵~10⁶ eV/(cm² · s · eV)之间.同时,平静期的北半球 H^+ 平均上行率(~20%)要高于南半球的平均强度(~15%),但是,在磁扰期间,差距将不断缩小,几乎达到同一个水平(分别是 21%和 22%).上行离子的半球平均积分通量与上行率有相似分布特点,即平静时北半球较高,磁扰时两个半球达到相似的水平.这说明两点,一是地磁扰动可以显著地增强电离层 H^+ 的上行强度;二是,地磁扰动对电离层 H^+ 上行强度的增加幅度在两个半球间并不相同.这自然让我们想到,地磁扰动对南、北半球的上行增强幅度分别是多少?

要回答这个问题,需要研究 H^+ 上行率在半球的空间分布,了解电离层 H^+ 的上行源区和上行高发区.与以往结果一致, H^+ 的上行源区主要分布在日侧极尖区、午夜侧极光椭圆带和黎明时分的椭圆带上.如图 3 所示,源区从日侧极尖区经由黎明侧向午夜时分蔓延、由极盖高纬向椭圆带蔓延.在磁傍晚区间(6 小时 LT),上行强度最弱,存在明显的晨昏不对称性(党戈等,2007).对比图中磁静期与磁扰期的上行强度空间分布,发现磁扰期的上行得到显著增强.这种增强具有两个特点:首先,增强的区域以磁静时的上行源区为中心向四周延伸;其次,地磁扰动期,极尖区虽为主要的上行源区,但是其中心明显的向晨侧移动,印证了 Newell 等(1989)和 Frey 等(2003)部分结论.那么,地磁扰动对电离层 H^+ 上行强度的增强在两个半球的差异是否显著呢?

对比图 3 上边(北半球)与下边(南半球)的上行率空间分布,我们认为磁静日,北半球的上行强度比南半球大,磁扰期间离子上行强度得到增强

表 1 不同磁地方时区间和半球内的 H⁺ 上行率、净积分能通量及其 S/Q 值统计表
Table 1 The upflow rate and net differential energy flux of UFI in different MLT intervals

Sector	Upflow rate (%)												Upflow net flux (eV/(cm ² • s • eV))					
	Quiet			Disturbed			S/Q ratio			Quiet			Disturbed			S/Q ratio		
	NH	SH	NH	SH	NH	SH	NH	SH	NH	SH	NH	SH	NH	SH	NH	SH	NH	SH
Noon	19.28±0.89	13.20±0.71	19.14±0.89	18.47±0.70	0.99	1.40	5.34±4.47	4.94±3.75	5.27±4.08	5.24±4.17	0.85	2.00						
Dusk	15.39±0.66	11.33±0.37	15.61±0.74	15.13±0.75	1.01	1.34	4.86±3.58	4.94±3.60	4.94±3.66	5.00±3.81	1.20	1.15						
Midnight	22.88±1.17	16.31±0.76	25.27±1.27	27.56±1.20	1.10	1.69	6.23±5.62	5.05±3.76	5.70±5.06	5.20±4.09	0.30	1.41						
Dawn	23.30±1.19	22.41±0.75	24.13±1.06	27.80±0.94	1.04	1.24	5.01±3.86	5.31±4.19	5.06±3.76	5.29±4.14	1.12	0.95						
Hemisphere	20.25±0.51	15.80±0.37	21.09±0.52	22.34±0.50	1.04	1.45	5.74±5.06	5.09±3.67	5.36±4.49	5.20±3.80	0.42	1.29						

注:磁正午(Noon)表示从 09 MLT 到 15 MLT 的 6 小时区间,其他类似;NH 代表北半球,SH 代表南半球,下同;表中的误差(±后数字)代表由各个地方时区间所有网格内的上行率或积分通量计算出该区间均值时,该均值的标准误差,下同。

表 2 不同地磁纬度区间内的半球平均 H⁺ 上行率、净积分能通量及其 S/Q 值统计表
Table 2 The mean upflow rate and net differential energy flux of H⁺ in different ILat intervals

ILat	Upflow rate (%)												Upflow net flux (eV/(cm ² • s • eV))					
	Quiet			Disturbed			S/Q ratio			Quiet			Disturbed			S/Q ratio		
	NH	SH	NH	SH	NH	SH	NH	SH	NH	SH	NH	SH	NH	SH	NH	SH	NH	SH
>50°	14.01±0.68	11.16±0.50	17.74±0.78	20.70±0.83	1.27	1.85	6.16±5.54	5.18±4.10	5.59±4.97	5.11±3.88	0.27	0.85						
>60°	30.46±0.78	21.58±0.63	33.21±0.81	32.85±0.90	1.09	1.52	5.45±4.78	5.04±3.66	5.28±4.36	5.23±4.25	0.68	1.55						
>70°	26.84±0.73	20.12±0.56	24.48±0.76	21.57±0.62	0.91	1.07	5.06±3.60	5.04±3.63	5.20±3.84	5.28±4.12	1.38	1.74						

注:区间>50°表示地磁纬度范围为 50°—60°之间的圆环,以此类推;高纬散区>80°范围内的统计结果由于样本量太少而缺乏可靠性和可比性,在此不予列出。

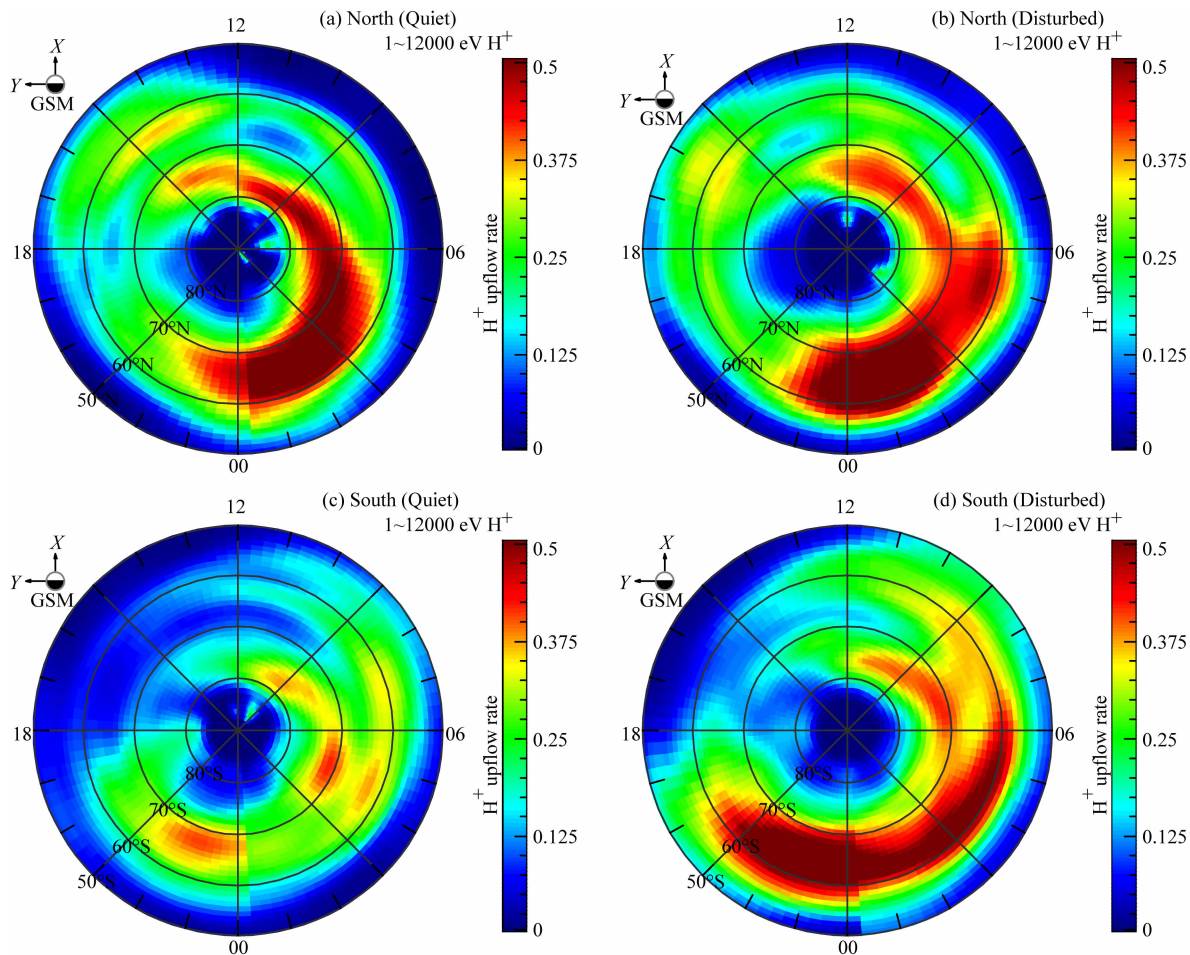


图3 根据公式(6)分别计算出的磁平静期(a,c)和磁扰期(b,d)北半球(a,b)、南半球(c,d)1 eV~12 keV H^+ 上行率的分布. 图例范围是0~0.5, 网格数据经线性插值为图2网格大小的一半

Fig. 3 According to Eq. (6), occurrence frequencies of upflow H^+ over the NH (a, b) and SH (c, d) are calculated individually in quiet (left two panels) and disturbed (right two panels) times and are color coded on a 0~0.5 scale as a function of ILat and MLT. The energy level of the ions goes from 1 eV to 12000 eV. The bins are interpolated to the half size to that in Fig. 2

且两个半球达到的强度相似. 对比图中左边(静)与右边(扰)两幅, 我们发现地磁扰动对南半球 H^+ 上行强度的影响更大. 根据表1中的 S/Q 值, 南、北半球的值分别为 1.45 和 1.04, 说明磁扰时南半球的半球平均强度增强了 1.45 倍, 而北半球的增加幅度仅为 4%. 在不同的地方时区域内, 黎明和午夜侧强度要高于磁正午和傍晚的强度, 且磁傍晚的强度最小, 上行率平均值为 ~15%, 而最高的黎明和午夜其平均上行率都在 22%~28% 之间. 在此 4 个磁地方时区间的 S/Q 值表明, 磁扰对北半球磁正午、傍晚、午夜和黎明的平均上行率的增强幅度分别为 -1%, 1%, 10% 和 4%, 而对应的对南半球的增强幅度分别为 40%, 34%, 69% 和 24%. 充分说明地磁扰动对电离层 H^+ 上行强度的影响在两个半球之间显著不同, 且对南半球的影响显著的多. 北半球磁正午的增

幅最小, 午夜的增幅最大; 南半球黎明时增幅最小, 午夜增幅最大; 这说明两点, 一是虽然磁扰期间 H^+ 上行率增幅在半球间并不相同, 但是磁午夜的增幅均最大; 再者北半球日侧极尖区增幅不明显, 而南半球极尖区增幅达到 40%.

表2列出上行率和净积分能通量在南、北半球平静期和磁扰期的不同磁纬度(ILat)区间内的平均强度和 S/Q 比值. 首先, 在各个纬度范围内, 平静期北半球上行率均高于南半球(除 $>80^\circ$, 由于样本量原因); 其次, 在磁扰期两个半球上行率得到加强并且相当. 在 $>60^\circ$ 和 $>70^\circ$ 的纬度范围内, 上行率最高, 在 20%~30% 之间, 在磁扰期间甚至能达到 35%; 而较低纬度的 $>50^\circ$ 区域上行率最小. 因此, 与图3一致, 椭圆带是电离层 H^+ 上行的源区. 但是, 在磁扰期间, 这个源区会向低纬度蔓延, 可见表2中

的磁扰时低纬上行率上升。

表 2 说明,上行率 S/Q 比值南半球在 $>50^\circ$, $>60^\circ$ 和 $>70^\circ$ 的纬度范围内磁扰期间分别增长了 1.85, 1.52 和 1.07 倍,均高于北半球的 1.27, 1.09 和 0.91 倍.这与表 1 中的结论一致,即地磁扰动对南半球 H^+ 的上行影响更显著.这种增长在低磁纬度更明显。

积分能通量的变化与上行率的变化有相似点又有不同点.表 2 中所示,静时 $50^\circ\sim 70^\circ$ 范围内积分通量最大, $70^\circ\sim 80^\circ$ 积分通量相对较小,而磁扰时在低纬度 ($50^\circ\sim 60^\circ$) 的通量减小同时高纬度椭圆带上 ($70^\circ\sim 80^\circ$) 的积分通量在增加.如净积分通量的 S/Q 比值所示,在高磁纬度区域其 S/Q 值最大,而低磁纬度区域的 S/Q 值最小.我们认为磁扰期间 H^+ 的上行源区会由高纬蔓延至低纬度,而其净积分通量会由低纬度转移至高纬度,尤其是日侧极尖区附近,如图 4 所示。

图 4 显示了上行 H^+ 净积分能通量的分布情况.日侧极尖区、北半球的日侧椭圆带、午夜椭圆带和南半球的黎明椭圆带是积分通量较大的区域.我们有理由相信这些区域是电离层上行的主要源区.此外,第一,磁扰期南半球的积分通量增加比北半球的明显;第二,磁扰期间高磁纬度的积分通量增加明显。

表 1,表 2 中的 S/Q 值表明 H^+ 的上行率和净积分能通量在磁扰期间都是增加的,且南半球比北半球增加的显著.所以二者之间具有密切的关系,由于上行率在磁扰期间是由高纬向低纬度蔓延,即高、低纬度上行率均较高,而积分通量却由以低纬度为主转向高纬度为主,尤其是日侧极尖区附近.因此这种关系并非线性的。

3.4 在高度、磁地方时的分布

根据 Bouhran 等(2002)的结论,距离地面 2000 km 以下的电离层上行强度相对较弱,在此高度范围的离子大部分以沉降的形式进入高层大气.在 5000 km 高度的磁层其上行强度开始占主导地位,然后开始慢慢减小直到大约 $2R_E$ 高度.本文讨论南北半球分别在磁平静时期和磁扰期在 2000~4200 km 的高度上 H^+ 上行强度的变化,同时对比分析地磁扰动在不同高度对上行率的影响。

图 5 给出了南、北半球在磁静日和磁扰期的不同高度上的 H^+ 上行率的分布.首先,不同高度均显示上行强度的晨昏不对称性;其次,上行源区在子夜侧最大且经磁黎明地方时蔓延至高纬极尖区,在磁

扰期甚至越过 00 MLT 达到了 22 MLT;与前文一致的是,平静期北半球的平均强度比南半球高,磁扰时达到相同的水平,于是磁扰对南半球 H^+ 上行的影响更显著。

在各个高度上,上行率大致呈现均匀的分布,具有两个主要的特点.首先,半球平均上行率随着高度的增加而增强,这与前人的结论一致;其次,随着高度的增加,上行的源区整体向磁午夜偏移,极尖区向黎明一侧偏移.图 5(a,b)的 00—12 MLT 的平均强度要明显高于 12—24 MLT 的强度,而且处于 00—12 MLT 侧的源区随着高度增加明显向午夜 00 MLT 转移,而处于 22—24 MLT 的午夜源区随着高度增加其上行强度也在增加.这种情况在南半球同样存在,见图 5(c,d)。

表 3 给出两个半球在不同地磁活动水平下的不同高度上的 H^+ 上行率的半球平均值和对应的 S/Q 比值.上行率随着高度增加,北半球由 $\sim 20\%$ 增至 4200 km 高度的 $>35\%$,南半球由 $\sim 20\%$ 增至 $\sim 45\%$.虽然都是增加,但是南半球在 >4000 km 的强度相对要高.地磁扰动对 H^+ 上行率的影响在南半球的各个高度都比北半球的要大,这与前文在不同地方时区间、地磁纬度区间的结果一致.在所有高度上的平均增幅,南半球是 145%,比北半球的 104% 要大.另外,相对表 1,就表 2 中的波动而言, H^+ 上行率在各个高度上的 S/Q 值变化不大.说明磁扰期间 H^+ 上行强度的增加相对均匀.从图 6 也可以清楚地看出,平静期南半球的平均上行强度最小,且磁扰期间南北半球的水平相当,但是北半球的增幅并不如南半球明显.达到 FAST 卫星远地点的 4000 km 高度,其平均上行率接近 40%,南半球甚至超过该值。

以 2 h 为步长,上行率随地方时的分布特点如图 7 所示.夜侧的上行强度最高,晨侧要高于昏侧,日侧 12 MLT 左右有较显著的上行,但是北半球的磁正午附近极尖区比南半球该处的上行强度更大(分别是 $\sim 25\%$ 和 $\sim 20\%$).总体来看,与前文结论一致,即磁静时南半球平均上行强度最低,磁扰期间,上行率会增强,且南北半球水平相当。

上行离子的运动是在行星际磁场-磁层-电离层耦合系统下进行的,离子加热、离心加速和波粒相互作用等物理过程都会对上行离子产生影响.本文考虑的问题之一,即离子上行的长期变化特征,前面已经给出其平均强度(上行率和净积分能通量),但这种变化是否与太阳活动水平保持一致?这是个值得研究的问题.表 4 列出了从 2000 年到 2005 年第 23

周太阳活动下降相期间南、北半球在不同地磁活动水平下的年平均上行强度,除 2001 年以外,上行率随着 SC23 下降相的到来大致呈减弱趋势,这种趋势在南半球更明显.北半球上行率由 2000 年开始增加至 2003 年达到最高值 $>35\%$,然后开始减弱;南半球上行率在 2000 和 2002 年最大 ($\sim 40\%$),然后

开始减弱到 2005 年的 $\sim 10\%$. 同样地,南半球的 S/Q 值除 2000 年与北半球的近似以外,其余每年的值都大于北半球,也就是说磁扰期间南半球的上行率增加较明显.可以看出,上面提出的问题其答案是肯定的,但是由于样本只覆盖了半个太阳活动周,这个趋势还不够明显,因此,需要更进一步的研究.

表 3 不同高度范围内的 H^+ 上行率和净积分通量的半球平均值及其 S/Q 值统计表

Table 3 The average upflow rate of H^+ in different altitudinal intervals in northern hemisphere (NH) and southern hemisphere (SH)

Altitude/km		2000~2500	2500~3000	3000~3500	3500~4000	4000~4200
NH	Quiet	21.68 ± 0.69	21.95 ± 0.65	22.14 ± 0.64	21.29 ± 0.61	36.73 ± 2.19
	Disturbed	20.66 ± 0.75	21.07 ± 0.69	20.64 ± 0.63	23.25 ± 0.64	37.35 ± 2.20
	S/Q ratio	0.95	0.96	0.93	1.09	1.02
SH	Quiet	17.17 ± 0.53	16.46 ± 0.53	16.57 ± 0.48	15.14 ± 0.41	44.50 ± 1.58
	Disturbed	22.33 ± 0.63	24.73 ± 0.69	22.61 ± 0.59	21.08 ± 0.54	48.25 ± 1.62
	S/Q ratio	1.30	1.50	1.36	1.39	1.08

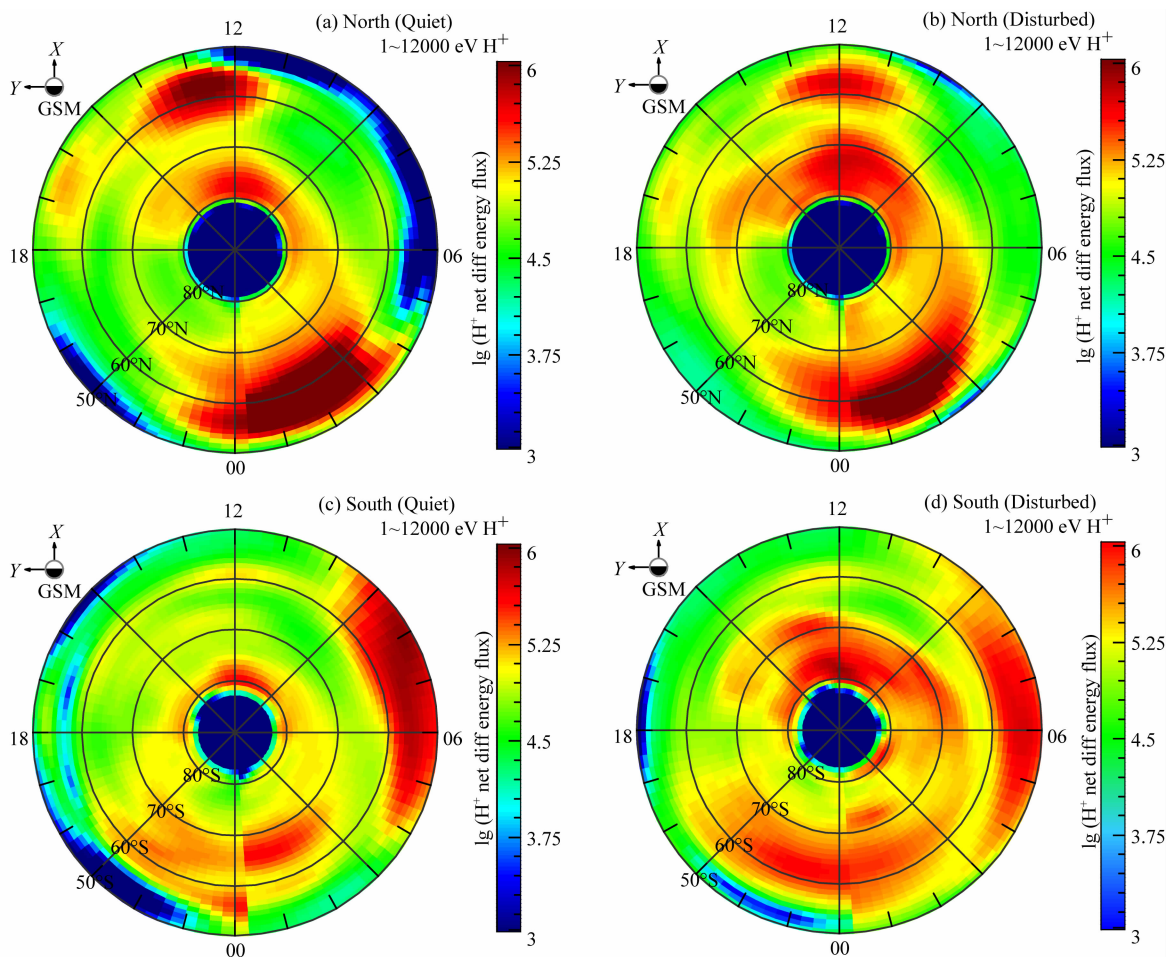


图 4 类似于图 3,对数转换后的净积分能通量色标中数字为取常用对数 \log_{10} 后的值在磁静日 (a,c) 和磁扰期 (b,d) 的半球分布,图例范围是 3~6

Fig. 4 Similar to Fig. 3, the logarithmically transformed net fluxes of upflowing H^+ are calculated and comparisons are made between the two hemispheres as well as the two geomagnetic conditions. The legend runs from 3 to 6

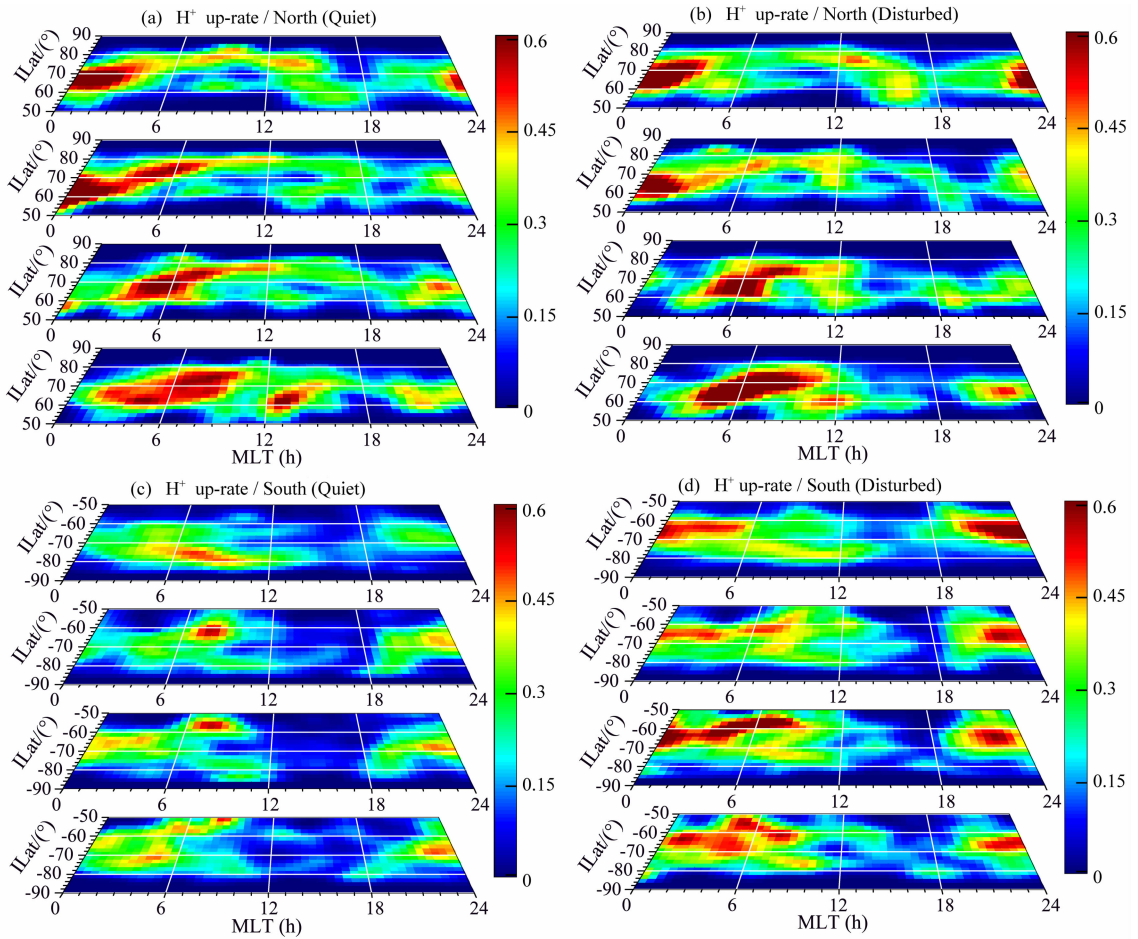


图 5 类似于图 3,磁静期(a,c)和磁扰期(b,d)的北半球(上)和南半球(下)的 H^+ 半球平均上行率在不同高度范围内的图像.高度由低到高分为 2000~2500、2500~3000、3000~3500 和 3400~4200 km
 Fig. 5 Similar to Fig. 3, altitudinal slice images of occurrence frequencies averaged over the all hemispheric ILat-MLT bins at rising altitudes for the two hemispheres on magnetically quiet (left) and storm conditions (right), respectively. Altitude from 2000 to 4200 km is sorted into four groups as labeled around the image corner

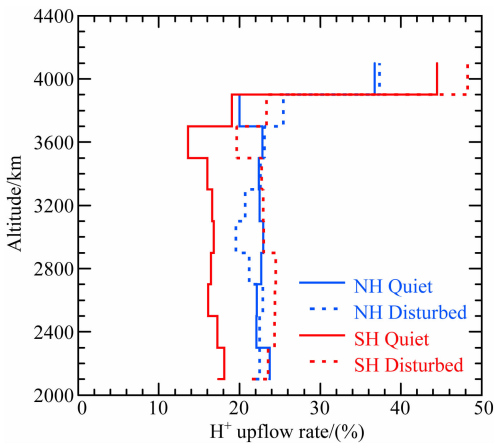


图 6 磁静期(实线)和磁扰期(虚线)的北半球(蓝色)和南半球(红色)的 H^+ 半球平均上行率在不同高度范围内的阶梯图.高度步长为 200 km
 Fig. 6 Step plots of H^+ upflow rate (hemispherically averaged) versus altitude running from 2000 to 4200 km in step of 200 km for northern hemisphere (blue) and southern hemisphere (red) during quiet (solid line) and disturbed (dash line) times, respectively

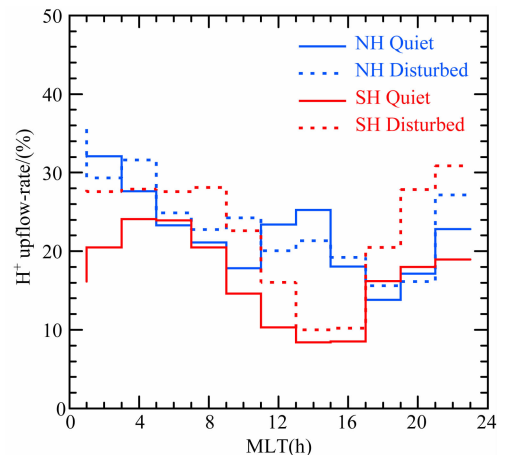


图 7 磁静期(实线)和磁扰期(虚线)的北半球(蓝色)和南半球(红色)的 H^+ 半球平均上行率在不同磁地方时范围内的阶梯图.磁地方时步长为 2 h
 Fig. 7 Step plots of H^+ upflow rate (hemispherically averaged) versus magnetic local time running from 0:00 to 24:00 in step of 2 h for northern hemisphere (blue) and southern hemisphere (red) during quiet (solid line) and disturbed (dash line) times, respectively

表 4 不同年代范围内的 H^+ 上行率和净积分通量的半球平均值及其 S/Q 值统计表Table 4 The annual mean upflow rate of H^+ in northern hemisphere (NH) and southern hemisphere (SH)

Year	2000	2001	2002	2003	2004	2005	
NH	Quiet	21.64±0.95	17.69±0.67	23.47±0.82	38.63±1.11	15.73±0.67	8.29±0.61
	Disturbed	23.05±0.97	16.96±0.69	30.06±1.05	35.11±1.02	16.83±0.63	3.74±0.38
	S/Q ratio	1.07	0.96	1.28	0.91	1.07	0.45
SH	Quiet	37.48±1.09	4.51±0.28	33.86±0.99	12.04±0.67	15.41±0.65	8.63±0.62
	Disturbed	39.70±1.07	7.18±0.48	42.30±1.11	16.42±0.56	19.06±0.68	11.44±0.75
	S/Q ratio	1.06	1.59	1.25	1.36	1.24	1.33

注:由于 TEAMS 仪器在 2001 年的最后两个月出现故障,导致该年的统计量缺乏可比性。

4 讨论

外流离子以一定的角度沿着磁力线上行到磁层,是磁层-电离层耦合的重要组成部分,这种上行通常发生在极光椭圆带附近(Fuselier et al., 2008). 关于上行源区的 ILat-MLT 分布,由于高度和卫星仪器的不同,研究结果并不统一. Norqvist 等(1998)的统计结果表明上行率在黎明侧最高,而 Fuselier 等(2008)使用 IMAGE/LENA 成像仪数据分析上行源区的分布,认为上行源区以傍晚侧为中心. 较一致的观点认为磁午夜侧是上行的重要区域之一,本文印证了这个结论,同时研究结果表明磁黎明侧的上行强度要显著高于磁傍晚侧的。

上行离子的运动受到的力主要来自于离子加热、波粒相互作用、离心加速和平行加速等物理过程. 当行星际磁层 IMF 北向的时候,电离层离子被对流强度较低的极盖电势控制,此时离子上行强度较弱,太阳风离子通过高纬磁重联进入磁层;当行星际磁层转为南向时,电离层离子被急剧增长的极盖电动势驱动并上行到内磁层(Fuselier et al., 2008). 对于行星际磁层对电离层离子上行幅度的影响, Lennartsson 等(2004)使用 Polar/TIMAS 和 Wind 卫星数据分别研究了 H^+ 和 O^+ 在不同行星际磁场条件下的上行强度. 结果表明,转为南向的行星际磁场会分别使得两种离子的上行率增加 1.5~2 和 2.5~3 倍. 说明南向行星际磁场可增强离子上行率,但上行率的增加比例与地磁扰动对电离层 H^+ 上行率的增加比例不同。

于是,有理由相信不同的地磁活动水平会对电离层离子上行产生影响. 由于地磁扰动是地球磁场与行星际磁场相互作用下产生的,地磁扰动的强度一定程度上反应了行星际磁场的强度. 研究结果表

明,磁扰期间,南、北半球的平均上行率均增加,但是增加的幅度并不相同,分别为 1.45 和 1.04 倍,说明南半球离子上行对地磁扰动的响应更敏感. 这与 Lennartsson 等使用 1996 年到 1998 年太阳活动极小年的 Polar 数据分析电离层 15 eV~33 keV 的 O^+ 随行星际磁场 B_z 的变化得到的增强幅度不同. 他们认为南半球(近地点约 $2R_E$)的 O^+ 上行强度受 B_z 的影响要大于北半球(远地点约 $4\sim 9R_E$),其最大增幅可达到 3 倍. 所以地磁扰动水平对上行的影响要小于行星际磁场,其原因可能是行星际条件的变化对电离层的影响也许是全球的,而地磁扰动在局部进行. 对于不同质量的离子,其上行强度对地磁活动水平的响应也不相同,上行 H^+ 的强度在不同地磁水平下的变化要小于 O^+ 的变化(Yau et al., 1985; Lennartsson et al., 2004; Zhao et al., 2014).

对于地磁扰动期间南半球的 H^+ 上行率增加更明显的原因,作者认为,首先,平静时的南半球上行率比北半球低,其背景值低. 磁扰时并不是南半球超过了北半球的上行强度,而是达到几乎相同的水平,所以南半球的 S/Q 更大;其次,在相同的太阳风 K 指数条件下,南半球的电离层外流率(Polar 卫星高度)较小,于是我们猜测相同行星际磁场条件下,太阳风能量的注入在南、北半球之间并不相同,且北半球的要大于南半球的. 因此,在地磁活动水平较低的时候,电离层上行 H^+ 主要发生于北半球日侧极尖区和夜侧极光椭圆带上;而在地磁扰动的时候,两极的磁剪切都随着行星际磁场转为南向而增强,所以其上行强度都会增大,于是 H^+ 的上行率在两个半球达到几乎相同的水平。

由于极尖区是离子上行的重要通道之一,所以日侧磁正午高纬是上行源区. 研究结果表明,磁扰期间南、北半球的日侧极尖区上行源区会向黎明侧转移,其原因可以根据 Newell 等(1989)和 Frey 等

(2003)的结论得到回答,极尖区所在的地方时与行星际磁场 B_y 分量显著正相关,当该分量分别为正、负向的时候,极尖区所处的地方时分别向傍晚和黎明侧靠近.因此,我们认为地磁扰动期间的极尖区上行源区向晨侧转移是由于行星际磁场的变化.

5 结论

(1)地磁扰动对电离层 H⁺ 上行率和净积分能通量的增加幅度在两个半球间并不相同.平静期的北半球 H⁺ 平均上行率高于南半球的平均强度,但是,磁扰期间两个半球的上行率几乎达到同一个水平.磁扰期间上行率和净积分能通量均得到增强,但是南半球比北半球增加的显著.磁扰时南半球的半球平均强度增强了 1.45 倍,而北半球的增加幅度仅为 4%;

(2)与以往结果一致,上行源区主要分布在日侧极尖区、午夜侧极光椭圆带和磁黎明时分的椭圆带上(60~80°ILat).磁扰时源区从日侧高纬极尖区经由黎明侧扩展至子夜、由极盖高纬向椭圆带蔓延,在磁傍晚区间,上行强度最弱,在磁午夜区间上行强度最大;

(3)磁扰期电离层离子上行强度的增强具有两个主要特点,一是增强的区域以磁静时上行源区为中心向四周延伸;二是地磁扰动剧烈时,极尖区虽为主要的上行源区,但是其中心明显地向晨侧移动;

(4)磁扰期间不同磁地方时区间和磁纬度区间的上行率变化并不相同.北半球磁正午的增幅最小,午夜的增幅最大;南半球黎明时增幅最小,午夜增幅最大;北半球日侧极尖区增幅不明显,而南半球极尖区增幅达到 40%;

(5)在各个高度上,上行率大致呈现一致的分布,且地磁扰动在各高度对 H⁺ 上行的增幅相比各个地方时和磁纬度区间的更均匀.半球平均上行率随着高度的增加在增强,这与前人的结论一致,但随着高度的增加,上行的源区整体向磁午夜偏移,极尖区向黎明一侧偏移.

致谢 感谢加州大学伯克利分校的 Carlson C. W. 教授提供的 FAST 卫星相关数据下载服务.感谢审稿专家对此研究工作提出的修改建议.

References

Andersson L, Peterson W K, McBryde K M. 2004. Dynamic

coordinates for auroral ion outflow. *J. Geophys. Res.*, 109: A08201, doi: 10.1029/2004JA010424.

Bouhras M, Duboulez N, Malingre M, et al. 2002. Ion outflow and associated perpendicular heating in the cusp observed by Interball Auroarl Probe and FAST Auroarl Snapsjot. *J. Geophys. Res.*, 107(A2): SMP 4-1-SMP 4-13, doi: 10.1029/2001JA000091.

Carlson C W, Pfaff R F, Watzin J G. 1998. The fast auroral snapshot (FAST) mission. *Geophys. Res. Lett.*, 25 (12): 2013-2016, doi: 10.1029/98GL01592.

Chappell C R, Moore T E, Waite J H. 1987. The ionosphere as a fully adequate source of plasma for the earth's magnetosphere. *J. Geophys. Res.*, 92 (A6): 5896-5910, doi: 10.1029/JA092iA06p05896.

Collin H L, Sharp R D, Shelly E G. 1984. The magnitude and composition of the outflow of energetic ions from the ionosphere. *J. Geophys. Res.*, 89(A4): 2185-2194, doi: 10.1029/JA089iA04p02185.

Collin H L, Peterson W K, Drake J F, et al. 1988. The helium components of energetic terrestrial ion upflows: their occurrence, morphology, and intensity. *J. Geophys. Res.*, 93: 7558-7864, doi: 10.1029/JA093iA07p07558.

Collin H L, Peterson W K, Lennartsson O W, et al. 1998. The seasonal variation of auroral ion beams. *J. Geophys. Res.*, 25 (21): 4071-4074, doi: 10.1029/1998GL000090.

Cully C M, Donovan E F, Yau A W, et al. 2003. Akebono/Suprathermal Mass Spectrometer observations of low energy ion outflow: Dependence on magnetic activity and solar wind conditions. *J. Geophys. Res.*, 108(A2): 1093, doi: 10.1029/2001JA009200.

Dang G, Ma S Y, Zhou Y L. 2007. The spatial-temporal distribution of O⁺ ions in the polar ionosphere: observations by FAST satellite during quiet magnetic condition. *Chinese Sci. Bulletin*, 52(19): 2330-2340.

Frey H U, Immel T J, Lu G, et al. 2003. Properties of localized, high latitude, dayside aurora. *J. Geophys. Res.*, 108(A4): 8008, doi: 10.1029/2002JA009332.

Fuselier S A, Claflin E S, Moore T E. 2008. Magnetic local time extent of ion outflow during substorm recovery. *J. Geophys. Res.*, 113: A06204, doi: 10.1029/2007JA012811.

Klumpar D M, Möbius E, Kistler L M, et al. 2001. The time-of-flight energy, energy, angle, mass spectrograph (TEAMS) experiment on FAST. *Space Sci. Reviews*, 98(1-2): 197-219.

Kroth H, Friedel R H W, Frutos-Aflaro F, et al. 2002. Ion composition of substorms during storm-time and non-storm-time periods. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 64(5-6): 561-566, doi: 10.1016/S1364-6826(02)00013-5.

Lennartsson O W, Collin H L, Peterson W K. 2004. Solar wind control of Earth's H⁺ and O⁺ outflow rates in the 15-eV to 33-keV energy range. *J. Geophys. Res.*, 109: A12212, doi: 10.1029/2004JA010690.

Newell P T, Meng C I, Sibeck D G, et al. 1989. Some low-altitude

- cusps dependences on the interplanetary magnetic field. *J. Geophys. Res.*, 94(A7): 8921-8927.
- Norqvist P, André M, Tyrland M. 1998. A statistical study of ion energization mechanisms in the auroral region. *J. Geophys. Res.*, 103(A10): 23459-23473, doi: 10.1029/98JA02076.
- Peterson W K, Anderson L, Callahan B, et al. 2009. Geomagnetic activity dependence of O^+ in transit from the ionosphere. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, 71(16): 1623-1629, doi: 10.1016/j.jastp.2008.11.003.
- Pfrrff R, Carlson C, Watzin J, et al. 2001. An overview of the fast auroral snapshot(FAST) satellite. *Space Sci. Rev.*, 98(1-2): 1-32, doi: 10.1007/97894010033221.
- Shelley E G, Johnson R G, Sharp R D. 1972. Satellite observations of energetic heavy ions during a geomagnetic storm. *J. Geophys. Res.*, 77(31): 6104-6110, doi: 10.1029/JA077i031p06104.
- Shi J K, Li C Q, Liu Z X. 2002. Transport of Ionosphere up-flowing O^+ ion along the field line at various longitudes to the magnetosphere. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 45(3): 306-312.
- Valek P W, Perez J D, Jahn J M, et al. 2002. Outflow from the ionosphere in the vicinity of the cusp. *J. Geophys. Res.*, 107(A8): SMP 13-1-SMP 13-9, doi: 10.1029/2001JA000107.
- Wilson G R, Ober D M, Germany G A, et al. 2004. Nightside auroral zone and polar cap ion outflow as a function of substorm size and phase. *J. Geophys. Res.*, 109: A02206, doi: 10.1029/2003JA009835.
- Yau A W, Whalen B A, Peterson W K, et al. 1984. Distribution of upflowing ionospheric ions in the high-altitude polar cap and auroral ionosphere. *J. Geophys. Res.*, 89(A7): 5507-5522, doi: 10.1029/JA089iA07p05507.
- Yau A W, Bechwith P H, Peterson W K, et al. 1985. Long-term (solar cycle) and seasonal variations of upflowing ionospheric ion event at DE-1 altitudes. *J. Geophys. Res.*, 90(A7): 6395-6407, doi: 10.1029/JA090iA07p06395.
- Yau A W, André M. 1997. Sources of ion outflow in the high latitude ionosphere. *Space Sci. Reviews*, 80(1-2): 1-25, doi: 10.1023/A:1004947203046.
- Zhao K, Jiang Y, Ding L G, et al. 2014. Statistical analysis of outflow ionospheric O^+ on the declining phase of solar cycle 23 using fast observations. *Planet. Space Sci.*, 101: 170-180, doi: 10.1016/j.pss.2014.07.003.
- Zeng W, Horwitz J L, Craven P D, et al. 2004. The O^+ density trough at 5000 km altitude in the polar cap. *J. Geophys. Res.*, 109: A03220, doi: 10.1029/2003JA010210.

附中文参考文献

- 党戈, 马淑英, 周云良. 2007. 极区电离层 O^+ 上行的时空分布: 平静期 FAST 卫星观测. *科学通报*, 52(19): 2330-2340.
- 史建魁, 李纯强, 刘振兴. 2002. 电离层上行 O^+ 离子沿不同经度处的磁力线向磁层的传输. *地球物理学报*, 45(3): 306-312.

(本文编辑 胡素芳)