0254-6124/2022/42(1)-0051-14 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

WANG Rukun, ZHAO Kai, FENG Dandan, WANG Zihui, TANG Muxian, XIONG Yating, FENG Ling. Statistical Relationships between Ionospheric Upflows and Various Parameters during Geomagnetic Storms (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2022, **42**(1): 51–64. DOI:10.11728/cjss2022.01.201116101

磁暴期电离层离子上行能通量的统计关系研究*

王如坤[1] 赵 凯[1,2] 冯丹丹[1] 王子珲[1]
汤慕贤[1] 熊雅婷[1,2] 冯 玲[1,2]

1(南京信息工程大学数学与统计学院 南京 210044)

2(南京信息工程大学空间天气研究所 南京 210044)

摘 要 利用 FAST 卫星 1997—2006 年 34 个磁暴期 149 个轨道的观测数据，分析不同相位上行通量数量级，研究不同相位离子上行能通量与地磁活动 Sym-H 指数和 Kp 指数，以及注入的 Poynting 通量之间的关系，构造上行通量经验模型。研究结果表明：磁暴主相期间，上行离子能通量可超过 10^8 eV·cm^{-2}·s^{-1}·sr^{-1}·eV^{-1} 量级，初相和恢复相期，上行离子能通量可超过 10^7 eV·cm^{-2}·s^{-1}·sr^{-1}·eV^{-1} 量级，主相期能通量均值普遍高于初相和恢复相；磁暴初相期间，上行离子能通量与 Sym-H、Kp 以及 Poynting 通量成显著正相关，相关系数分别为 0.890、0.664 和 0.660；磁暴主相期间相关系数分别为 0.858、0.823 和 0.541。以磁暴主相为例，上行离子能通量与 Sym-H 和 Poynting 通量的经验公式为$J_{i+} = 10^{5.324\pm0.581} \times (\text{Sym-}H)^{1.465\pm0.340}$，$J_{i+} = 10^{6.469\pm0.798} \times {S_{\text{dc}}}^{0.888\pm0.703}$。初相期间，由于地磁扰动时能量快速注入，电离层离子迅速获能，上行离子能通量与地磁扰动指数呈现较高的相关性，同时主相期上行离子能通量的增幅跨越两个量级；向下的 Poynting 通量导致的焦耳耗散是离子获能的重要来源之一，因此上行离子能通量与 Poynting 通量有较强的相关性。恢复相期间地磁活动趋于平静，上行离子能通量低于主相期的能通量。

关键词 磁暴期，离子上行，地磁活动指数，Poynting 通量，经验方程

中图分类号 P354

Statistical Relationships between Ionospheric Upflows and Various Parameters during Geomagnetic Storms

WANG Rukun[1] ZHAO Kai[1,2] FENG Dandan[1] WANG Zihui[1]
TANG Muxian[1] XIONG Yating[1,2] FENG Ling[1,2]

1(*School of Mathematics and Statistics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing* 210044)

2(*Institute of Space Weather, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing* 210044)

Abstract A collection of data from 149 orbits by the Fast Auroral SnapshoT (FAST) mission during

* 国家自然科学基金青年基金项目 (41604134) 和江苏省高校创新创业训练计划项目 (201910300102 Y) 共同资助
2020-11-15 收到原稿，2021-09-05 收到修定稿
E-mail: kaizhao@nuist.edu.cn

34 geomagnetic storms from 1997 to 2006 is used to analyze the energy flux of upflowing ions as a function of storm phases, and analyze the relationships between the flux and the parameters, including Sym-*H* index, *Kp* index, and the Poynting flux to construct empirical models. Results show that, in the main phase of the storm, the energy flux exceeds 10^8 eV·cm^{-2}·s^{-1}·sr^{-1}·eV^{-1}, and in the initial and recovery phases, the energy flux can exceed 10^7 eV·cm^{-2}·s^{-1}·sr^{-1}·eV^{-1}. The averaged energy flux in the main phase is higher than that in the initial and recovery phases. In the initial phase, the flux is significantly positively correlated to Sym-*H*, *Kp* and the Poynting flux. The correlation coefficients are 0.890, 0.664 and 0.660, respectively. In the main phase, the correlation coefficients are 0.858, 0.823 and 0.541, respectively. Empirical formulas for the energy flux as functions of the Sym-*H* and the Poynting flux are constructed. In the main phase, $J_{i+} = 10^{5.324\pm0.581} \times \text{Sym-}H^{1.465\pm0.340}$, $J_{i+} = 10^{6.469\pm0.798} \times S_{\text{dc}}{}^{0.888\pm0.703}$. In the initial phase, due to the rapid injection of the energy during geomagnetic disturbance and the rapid energy acquisition of ionospheric ions, the ion energy flux is highly correlated with the geomagnetic disturbance indices. Meanwhile, the energy flux increases by two orders of magnitude in the main phase. The Joule dissipation caused by the downward Poynting flux is one of the important sources of ion energy acquisition, and a strong correlation is observed.

Key words Geomagnetic storms, Upflow ions, Geomagnetic activity indices, Poynting flux, Empirical formulas

0 引言

地球磁层是在太阳风磁场与地球磁场共同作用下形成的等离子体空腔区。电离层是地球表面 70～1500 km 高度范围内部分电离的高层大气，是地球磁层与中性大气的中间区域，存在着磁层–电离层耦合和电离层–热层耦合。Shelley 等[1] 利用极轨卫星 1971-089A 上的高能离子质谱仪获取的能量范围为 0.7～12 keV 的离子数据，发现磁层存在来自电离层的 O^+。Yau 等[2] 利用 DE-1 卫星对能量范围为 0.01～17 keV 的逃逸离子进行研究，发现电离层上行离子是内磁层等离子体的重要来源。离子上行的加速机制主要包括摩擦加热、焦耳加热、双极电场、波粒相互作用、场向加速和离心加速等[3-6]，研究离子上行的获能过程和传输路径有助于理解磁层–电离层耦合，建立离子上行的经验统计模型有助于开展磁流体模拟研究。

关于离子上行与地磁扰动水平的关系，Fu 等[7] 利用DMSP (F12、F13 和F15) 卫星观测对高度约 840 km 的离子上行进行分析，通过比较上行通量、数密度、速度和发生率在太阳活动高年与太阳活动低年的比值，指出离子上行通量和数密度与太阳活动存在正相关关系，离子速度、上行发生率与太阳活动存在负相关关系。Cully 等[8] 利用 DE-1 卫星，研究北半球 60°mLat 以上 6000～10000 km 范围低能量 O^+、H^+ 的流出与太阳风指数、*Kp* 的关系，发现 $F_{10.7}$、太阳风动压、太阳风电场、IMF 的变化和 *Kp* 与离子流出率存在相关性，并未给出确切的相关系数。Zhao 等[9] 利用 FAST/TEAMS 仪器在第 23 太阳活动周下降相的数据，研究得到电离层 H^+的上行强度在磁扰期间显著加强，两个半球的上行强度相当，而南半球上行强度的增长更显著，南北半球的平均上行率分别增强了 1.45 倍和 1.04 倍。Zhou 等[10] 利用 DMSP 卫星对高度 830 km 左右，±50°mLat 以上的电离层离子上行事件进行研究，发现离子上行通量与太阳活动水平及 *Kp* 指数具有正相关的关系。Zhao 等[11] 利用 FAST 卫星对 50°mLat 以上电离层 O^+上行频率与太阳黑子数及地磁活动水平关系进行研究，建立了地磁纬度与上行发生率的回归方程，发现磁静期电离层离子上行高发区在日侧极光椭圆带 70°mLat 附近及日侧极尖区 76°—80°mLat 附近，夜侧极光椭圆带高发区在 60°mLat 左右，磁扰期上行高发区向赤道移动至 50°mLat。此外，O^+ 上行频率与太阳黑子数相关系数为 0.9。以上研究虽得到了相关关系，但没有讨论上行通量与地磁活动指数的相关系数，也未给出经验回归方程。

对于不同磁暴相位期电离层离子上行通量与地磁活动指数的关系, Zhao 等 [6] 利用 FAST 卫星研究了磁暴期间 O^+ (H^+) 的逃逸数通量的影响因素, 发现 Poynting 通量和软电子沉降与离子逃逸相关性较高, 相关系数分别为 0.826 (0.669) 和 0.676 (0.763)。此外, 主相期间 O^+/H^+ 逃逸率较磁暴初相、恢复相更高。Wilson 等[12] 利用 FAST 卫星对亚暴期间 1000 km 高度的夜侧逃逸离子与地磁活动指数、亚暴相位的相关性进行研究, 发现离子逃逸率与亚暴强度存在正相关关系, 亚暴初相 O^+ 被迅速加热并在之后的 15～20 min 内离子逃逸率增加了两倍。Ogawa 等 [13] 利用 IMAGE 卫星研究亚暴期间 66°—67°mLat 离子的上行事件, 指出在亚暴初相期间离子速度与电子温度开始增强, 主相期间离子速度与电子温度激增, 离子通量达到 2×10^{14} $m^{-2}\cdot s^{-1}$, 恢复相离子上行与中性粒子流出显著相关。

电磁能以 Poynting 通量的形式注入电离层, 研究 Poynting 通量与电离层离子上行之间关系对于研究电离层离子上行加速机制具有重要意义。Deng 等[14] 利用 DMSP 卫星日侧极尖区 0.03～30 keV 离子和电子数据, 研究 Poynting 通量与软电子沉降的相关性, 发现二者相关性达到 0.800。Yordanova 等[15] 利用 EISCAT 和 MIRACLE 雷达以及 Cluster 卫星对极尖区 90～1000 km 高度的能量输入来源进行研究, 发现 E 层焦耳加热能量主要来源是 Poynting 通量。Huang 等[16] 利用 DMSP 卫星对约 840 km 高度的磁暴主相与磁暴前的 Poynting 通量进行比较分析, 发现磁暴主相时 Poynting 通量达到最大值。

关于磁暴不同相位离子通量与地磁活动指数之间的相关性和经验关系尚无系统研究, 并且不同相位离子上行与地磁活动指数相关性的差异是否与磁暴期能量注入机制及离子获能过程有关亦不清楚。Sym-H 指数表征 E 层赤道电集流对地磁活动水平的影响, Kp 指数表征中高纬度太阳风能量注入对地磁活动水平的影响, 同时 Poynting 通量可用于表示电磁能注入对离子上行的影响, 这三个参数被证实与离子上行具有一定的相关性[6, 8, 17]。本文利用 FAST 卫星观测数据, 研究磁暴不同相位期间的电离层离子上行通量与地磁指数的关系, 建立电离层离子上行强度与地磁指数、Poynting 通量的经验统计关系, 给出相关性大小及物理机制。

1 数据

1.1 仪器介绍

FAST 卫星远地点高度为 4175 km, 近地点高度为 350 km, 轨道倾角为 83°, 轨道周期约 133 min, 每 8.1 个月覆盖全部地方时。该卫星主要用于探测极光区带电粒子在电场和磁场中的空间和时间高精度分布。数据主要分为快速模式(5 s 分辨率)和慢速模式(20 s 分辨率)。

FAST 卫星上装有多种有效载荷, 主要包括静电分析仪 (ESA)、质谱仪 (TEAMS)、电场感应器 (EFS) 和磁场感应器 (MFS) [18] 。

本研究主要使用静电分析仪和电磁场的测量数据。ESA 仪器包括电子分析仪 (EES) 和离子分析仪 (IES), 对称分布在卫星主体的 4 个侧面, 主要测量电子和离子的分布情况。离子分析仪可以探测以所有投掷角方向撞入仪器的带电离子 (0.004～30 keV) 的数量。EFS 仪器由 6 个朗缪尔探针和 10 个探测器组成, 其分散在卫星主体周围, 主要测量电场强度。MFS 仪器位于卫星主体两侧, 分别是高分辨率直流磁通脉冲磁力仪 (DCB) 和交流探索线圈磁强计 (ACF)。这里使用电磁场强度数据计算 Poynting 通量[6]。

1.2 事件选取

考虑到卫星轨道空间分布覆盖程度和数据质量, 共选择 1997—2006 年 34 个磁暴期内 149 个轨道数据。分别按照南北半球和磁暴相位分组。

图 1(a) 为北半球轨道分布, 共 105 个。整体来看, 基本覆盖了 50°— 90°N 的高纬度地区, 主要分布在 60°—90°N 高纬度区域。图 1(b) 为南半球轨道分布, 共 44 个, 较好地覆盖了 60°—90°N 的高纬度地区。由于所选年份内南半球的数据受卫星表面带电或扰动离子的影响较为严重, 只保留了该半球部分质量较好的数据。

选择 Sym-H 指数和 Kp 指数研究离子逃逸与地磁活动之间的关系。这两个指数的主要区别是: Sym-H 表征 E 层赤道电集流对地磁活动水平的影响, 而 Kp 指数表征中高纬度太阳风能量注入对地磁活动水平的影响; 本文使用的 Sym-H 指数时间分辨率为 1 min, Kp 指数的时间分辨率为 3 h。按照扰动程度, 地磁暴可分为 4 类: 小磁暴, -50 nT $<$ Sym-H $\leqslant$ -30 nT;

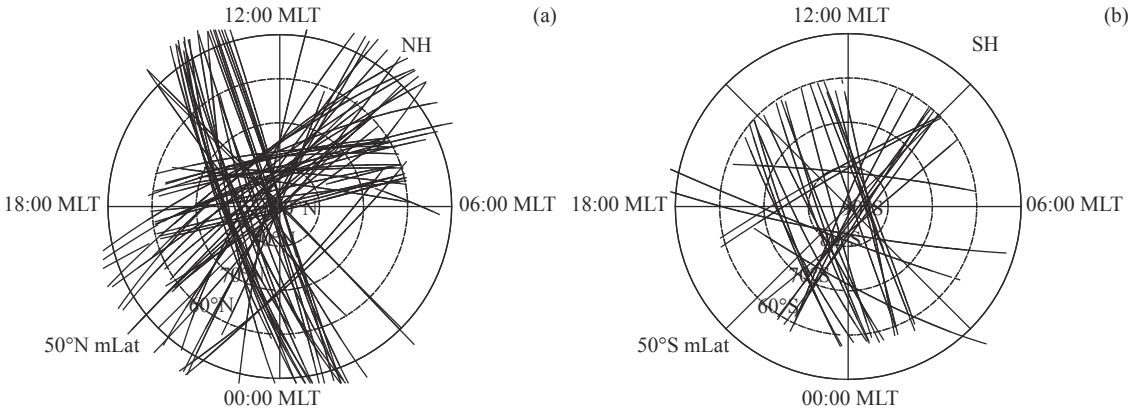


图 1 事件的空间分布。(a) 北半球 (NH) 观测数据分布，(b) 南半球 (SH) 观测数据分布

Fig. 1 Spatial distribution of selected events. (a) and (b) are observations in the Northern Hemisphere (NH) and the Southern Hemisphere (SH), respectively

中磁暴，–100 nT < Sym-H ≤ –50 nT; 大磁暴，–200 nT < Sym-H ≤ –100 nT; 特大磁暴, Sym-H ≤ –200 nT。根据 Kp 指数地磁扰动可以分为: 磁平静期, Kp<3; 地磁活跃期, 3 ≤ Kp < 5; 小磁暴, Kp=5; 中等磁暴, Kp=6; 强磁暴, Kp=7; 超强磁暴, Kp≥8(地磁活动指数来自日本京都世界地磁数据中心)。

表 1 列出了不同磁暴相位内的离子上行事件总数, 事件主要集中在 1998 年(50%)、2004 年(27%)和 2006 年(23%), 其中恢复相的事件数最多(70%)。由于本文选取的是磁暴不同相位的上行事件, 因此首先选取合适的磁暴事件, 不同年份磁暴发生的数量不同, 磁暴各相位持续时长也不同, 导致上行事件在年份的分布上不均匀, 本文选取上行事件的年代际影响将在讨论部分说明。

表 1 按磁暴相位分相后的离子上行事件数

Table 1 Number of upflow events as functions of storm phases

	Initial phase	Main phase	Recovery phase	Year
Number of events	0	6	0	1997
	8	7	52	1998
	0	0	1	2001
	4	11	25	2004
	1	0	0	2005
	1	6	27	2006
Total	14	30	105	149

2 通量计算

2.1 上行通量计算

参考 Cully 等[8] 给出的北半球向上通量和净通量的计算公式, 即

$$J_u(m) = 2\pi \iint_{\pi/2}^{\pi} J(m,E,\beta)\cos(\pi-\beta)\sin(\beta)\,\mathrm{d}\beta\mathrm{d}E, \tag{1}$$

$$\Phi(m) = -2\pi \iint_{\beta_{\mathrm{loss}}}^{\pi} J(m,E,\beta)\cos(\pi-\beta)\sin(\beta)\,\mathrm{d}\beta\mathrm{d}E. \tag{2}$$

其中: $J(m,E,\beta)$表示能量为E的外流离子m在投掷角β上的微分能通量, $\cos(\pi-\beta)$为因子微分能通量在北半球向上方向上的分量; $\sin(\beta)$为立体角因子, β_{loss}为损失锥角度, 计算方法为$\beta_{\mathrm{loss}} = \arcsin\left(\sqrt{B_0/B_{\max}}\right)$, B_0为局地观测磁场, 强度$B_{\max}$为 100 km 高度磁场强度。

在上述两个计算上行通量和净通量的公式基础上, 考虑如下条件。

(1)使用的测量仪器不同: FAST/ESA 仪器数据的投掷角范围为–90°～270°, 而北半球向上运动的离子投掷角为 90°～270°, 南半球向上运动的离子投掷角为–90°～90°。因此, 本文计算向上的通量时应对式(1)进行相应修改。

(2)用式(1)计算出的南半球能通量为负值, 因此在不影响通量强度的情况下对式(1)取绝对值。

(3)由于这里只研究离子锥, 需要排除磁层沉降的离子, 其能量较高, 因此选择 4～300 eV 能量范围内的上行离子以减少磁层沉降离子的干扰。

上行事件离子上行能通量和误差的计算过程如下。

(1)基于能谱和投掷角谱确定上行事件的起止时

间。能谱显示有低能离子(小于 300 eV)显著的能通量且无明显的卫星表面电势影响,投掷角谱显示 180°或 0°两侧有对称的高能通量分布。

(2)基于式 (1) 计算离子按投掷角和能量的积分能通量。投掷角的积分范围是背离地球向上的,能量的积分范围为 4～300 eV。

(3)计算积分能通量在上述起止时间内的均值 μ和标准差 σ。后文的相关关系和经验模型是基于均值μ的,每个上行事件的离子上行能通量波动范围取为 [μ-σ, μ+σ],误差取一倍标准差。

基于 FAST 卫星观测研究的上行事件应满足以下条件。

(1) 投掷角谱显示 180°(北半球) 或 0°(南半球) 两边对称分布,因为对称性保证了有上行离子发生且受扰动离子影响较小。

(2) 卫星观测高度在 2000 km 以上。原因是在 2000 km 以下存在大量能量低于 8 eV 的冷离子,这部分离子(尤其是重离子)的热速度小于卫星飞行速度。

(3) 卫星表面电势介于–4～4 V 之间。类似于卫星相对飞行速度对离子投掷角测量的影响,卫星表面电势影响了仪器对冷离子能量的测量,这里选取电势较小时期的观测结果。

2.2 Poynting 通量计算

本文使用的 Poynting 通量指的是注入到电离层的电磁能,即沉降的分量。原因是 FAST 卫星虽然有电场和磁场的探测数据,但是电场只有 E_x (卫星运动方向)和 E_z(南北方向)分量数据可用。本文讨论的沉降 Poynting 通量计算公式为

$$S = \frac{E_{\text{alongV}} \cdot \mathrm{d}B_{\text{west}}}{\mu_0}. \tag{3}$$

其中, E_{alongV}表示电场的水平分量 E_x, $\mathrm{d}B_{\text{west}}$表示磁场在东西向的变化值, μ_0为真空磁导率[6, 17]. 其中 x 方向为卫星运动方向, z 方向为场向电流方向, y 方向垂直于 x 且向西。

3 上行事件

图 2 描述的是 1998 年 3 月 10 日磁暴主相期间 FAST 卫星观测到的轨道号为 6127 的北半球电离层离子上行事件,观测时间为 18:45—19:15 UT,该时间段 Sym-H 最小值是 –115.0 nT, 18:54:00 UT 时刻 Sym-H 的值为–101.7 nT,该时段内 Sym-H 平均值为 –95.5 nT, 3 h 的 Kp 指数为 7,对应大磁暴。

如图 2(a) 所示,在晨侧极光椭圆带 18:50:00—18:53:50 UT 时间段内, FAST 卫星观测到显著的 $<$ 300 eV 的离子能通量,量级可以超过 10^8 eV·cm^{-2}·s^{-1}·sr^{-1}·eV^{-1},其平均能量在 10～100 eV 之间,是较冷的离子。 $>$ 300 eV 较热的离子的平均能量在 1～10 keV 之间,如图 2(a) 的两条曲线所示。图 2(b) 显示,在投掷角 180°两边具有对称的高能通量,表明存在上行的离子。同时在其他角度上有能通量相当的离子,其表现出各向同性。

图 2(c) (d) 分别显示了$<$ 300 eV 和$>$ 300 eV 离子的投掷角谱,表明上行部分离子是$<$ 300 eV 的低能离子,其来源于电离层;各向同性的部分离子是$>$ 300 eV 的高能离子,其来源于磁层。另外, $>$ 300 eV 的离子投掷角谱并没有显示出明显的上行离子特征,这也说明本研究所选择 4～300 eV 的能量范围可以尽可能地包含上行离子且排除磁层沉降的高能离子。图 2 (e) (f) 分别显示上行和下行离子的能谱。可以看到,低能离子只出现在上行离子的能谱中,高能离子同时出现在上行和下行离子能谱中且通量相当。这也说明了上行离子的能量较低,通常低于 300 eV,比磁层沉降离子(平均能量 10 keV 左右)要冷。图 2 (g)(h)分别表示 $<$ 300 eV 和 $>$ 300 eV 离子的积分能通量,结果表明上行通量(红色)主要由低能离子贡献,即上行离子;高能离子的能量较低且通量呈现出正负交替的特征。图 2 (k) (l) (m) 分别表示沉降的 Poynting 通量、Sym-H 指数和 Kp 指数。本文统计关系基于的是所选时段内离子能通量的均值、Poynting 通量最大值 [17]、Sym-H 指数绝对值的均值和 Kp 指数均值。

图 3 描述的是 1998 年 2 月 23 日小磁暴恢复相期间的上行事件,轨道号为 5965,观测时间段是 19:40—20:25 UT,该时间内 Sym-H 最小值为–34 nT, 3 h 的 Kp 指数为 3,依据 Sym-H 指数属于小磁暴,依据 Kp 指数属于地磁活跃期。

由图 3(a) 可见,在日侧 19:48—19:50 UT 以及夜侧的 20:15 UT 和 20:17 UT,离子的微分能通显著加强,其值由背景值 10^6 eV·cm^{-2}·s^{-1}·sr^{-1}·eV^{-1} 快速增长至 10^7 eV·cm^{-2}·s^{-1}·sr^{-1}·eV^{-1} 量级,增加了 1 个量级。图 3(b) 给出了离子微分能通量随投掷角的分布, 90°～270° 投掷角范围内能通量也显著增强,接近 10^8

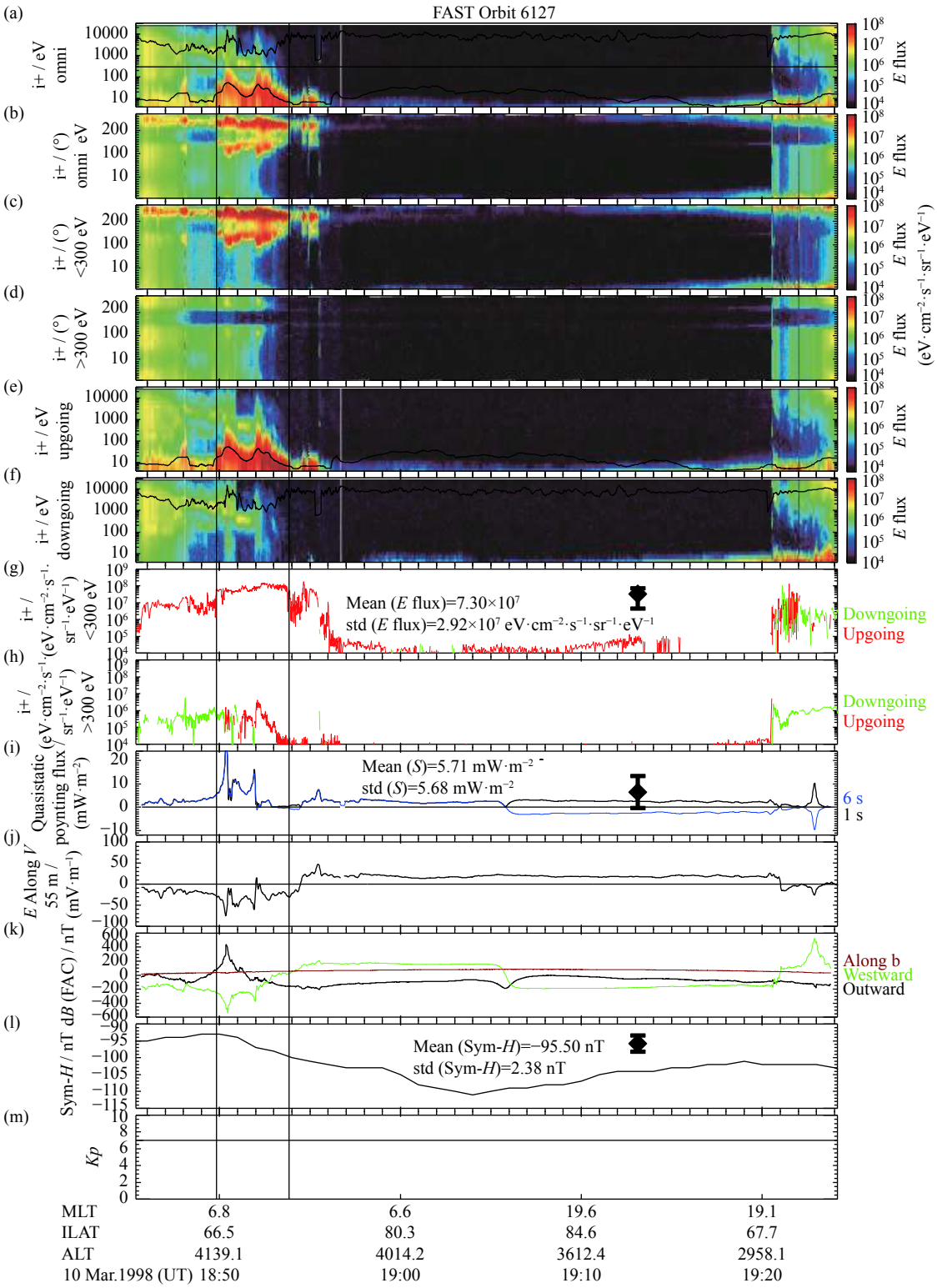


图 2 1998 年 3 月 10 日磁暴（*Kp*=7）主相期间 FAST 卫星观测到的离子上行事件

Fig. 2 Upflow event observed by FAST spacecraft on the main phase of the geomagnetic storm on 10 March 1998, when the *Kp* index is 7

eV·cm^{-2}·s^{-1}·sr^{-1}·eV^{-1} 量级。图 3(c) 给出了此次离子上行事件期间能量范围 4～300 eV 的离子在 90°～270° 投掷角范围内的积分通量。可以看出，在日侧 19:48—19:50 UT 以及夜侧的 20:15 UT 和 20:17 UT，

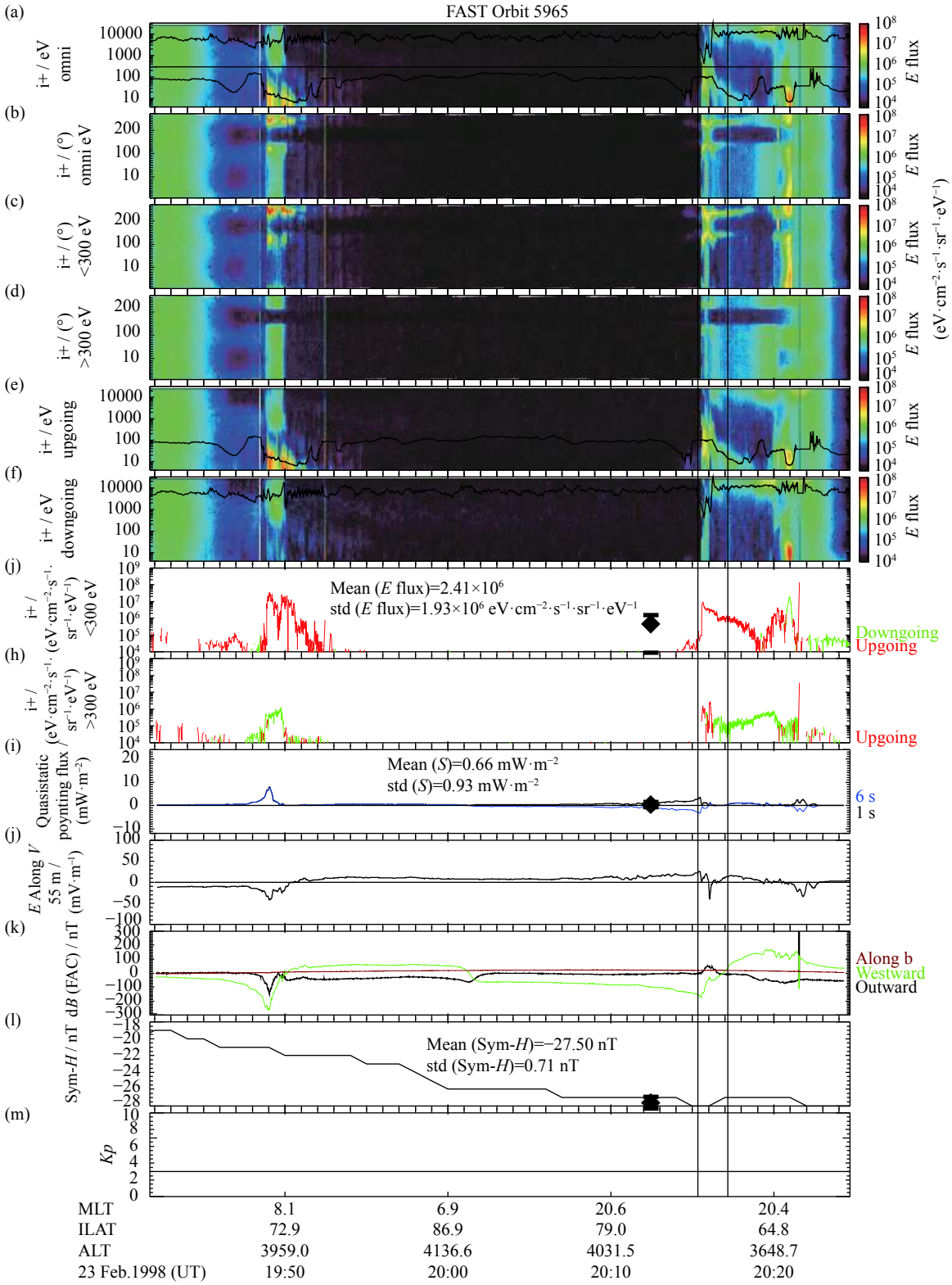


图 3　1998 年 2 月 23 日磁暴（Kp=3）恢复相期间 FAST 卫星观测到的离子上行事件

Fig. 3　The upflow event in the recovery phase of the storm on February 23, 1998

积分通量得到显著增强。对应图 3(i) 中的 Poynting 通量也达到峰值 3.5 mW·m^{-2} 。

图 3 显示了磁暴恢复相期间的离子上行事件。该事件发生在夜侧的极光椭圆带，高度约为 3800 km。

所选时段内的平均离子上行能通量为 2.41×10^6 eV·cm^{-2}·s^{-1}·sr^{-1}·eV^{-1}, 比磁暴主相期间的平均能通量 7.30×10^7 eV·cm^{-2}·s^{-1}·sr^{-1}·eV^{-1} 低 1 个数量级。

观测结果表明, 磁暴主相期间的离子上行能通量高于磁暴恢复相期间的离子上行能通量。以下将根据磁暴相位讨论离子上行能通量与能量注入和地磁活动指数之间的统计关系。

4 统计模型

4.1 Sym-*H* 指数

由于磁暴期间, 不同相位持续时间不同, 因此对初相、主相、恢复相的 14、30、105 组数据取绝对值后再取以 10 为底的对数, 绘制出磁暴期不同相位的上行离子能通量与对应的地磁活动指数 Sym-*H* 的散点(见图 4), 并对此进行对数线性拟合获得如下模型:

$$J_{i+} = 10^b x^a. \tag{4}$$

式中: J_{i+}为磁暴期上行离子能通量, 单位 eV·cm^{-2}·s^{-1}·sr^{-1}·eV^{-1}; x为地磁活动指数 Sym-*H*, 单位 nT; a和b为参数。参数估计值见表 2。

结果表明, 初相和主相的模型拟合效果较好, 相关系数均超过 0.850, Sym-*H* 的绝对值越大, 上行离子能通量越大, 如图 4(a) (b) 所示。但磁暴恢复相的拟合效果一般, 相关系数为 0.550, 从图 4(c) 中也能看出, 在 Sym-*H* 绝对值较小的部分, 数据呈现一种无序

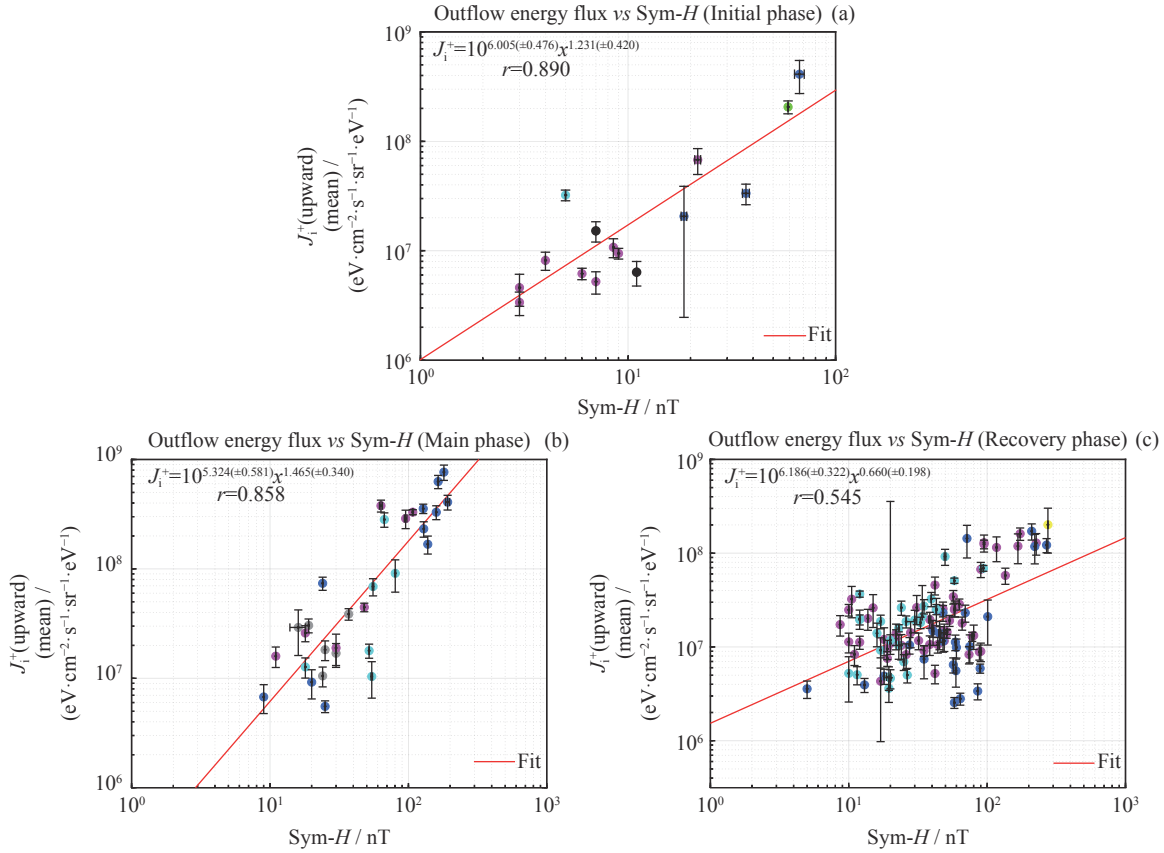


图 4 磁暴上行离子能通量均值与地磁活动指数 Sym-*H* 的散点图及拟合曲线。图中点表示每次事件的离子上行能通量和 Sym-*H* 指数在上行期间的均值, 其标准差使用误差棒表示。灰色点表示 1997 年事件, 粉色点表示 1998 年事件, 黄色点表示 2001 年事件, 蓝色点表示 2004 年事件, 绿色点表示 2005 年事件, 青色点表示 2006 年事件

Fig. 4 Scatter plots and fitting curves of the mean of upflow ions energy flux and geomagnetic activity index Sym-*H*. Each scatter represents the mean values of the upflow energy flux and the Sym-*H* index, while the error bar means the one sigma variation of the two quantities. The gray scatters represent the events of 1997, the pink scatters indicate the events of 1998, the yellow scatters indicate the events of 2001, the blue scatters indicate the events of 2004, the green scatters indicate the events of 2005, and the cyan scatters mean the events of 2006

的状态, 而这种情况在初相和主相的拟合图中并没有出现。由此推测, 主相和初相时能量注入较迅速且集中, 因而相关系数更高, 而恢复相地磁活动趋向稳定, 能量注入不显著, 模型中自变量系数小, 相关系数较低。

根据表 3 的各相均值, 可以直观看出主相上行离子能通量比初相和恢复相高 1 个量级左右。随着 Sym-H 绝对值的增大, 能通量呈指数倍递增。这也与第 3 节中的观测一致。Yang [19] 观测到的中低纬度地磁脉动强度在恢复相低于主相。一般情况下, 暴时环电流主要由来自电离层的粒子 (IOP)。Fu 等 [20] 研究发现, 磁暴越强, IOP 比例越高。当 IOP 恢复到暴前水平时, Dst 指数约是其最小值的 30%, 而此时仍处于磁暴恢复相。Zhao 等 [5] 和 Zhou 等 [10] 的研究结果均表明, 在地磁活动强的时期, 电离层离子上行高发区会由高纬度向低纬度扩展。因此, 推测上行离子能通量在日侧和夜侧与地磁扰动水平之间的拟合模型可能是不同的, 但是尚未据此进行研究。

4.2 Kp 指数

磁暴期不同相位的上行离子能通量与地磁活动指数 Kp 的关系如图 5 所示。磁暴主相期如图 5(b) 所示, 上行离子能通量均值与地磁活动指数 Kp 的相关性最显著, 相关系数为 0.823。这是由于主相期地磁活动剧烈, 能量注入速度快, 相关关系显著。磁暴初相和恢复相期见图 5(a) (c), 上行离子能通量与 Kp 相关关系减弱, 相关系数分别为 0.664 和 0.618。这可能是由于初相期的事件选取较少, 不能有效反映初相期的变化; 恢复相上行离子能通量与 Kp 的相关性较弱。

通过图 5(b) (c) 的磁暴主相和恢复相条形图可以明显观察到地磁活动较强时 ($Kp\geqslant 7$), 上行离子能通量较高, 约为 10^8 量级; 地磁活动较弱时 ($Kp\leqslant 7$), 上行离子能通量较低, 约为 10^7 量级。同时, 计算了各相的 Kp 均值 (见表 4)。发现地磁活动越剧烈, 即 Kp 的值越大, 上行离子能通量越大。

表 2　经验公式参数估计值及相关系数

Table 2　Empirical formula parameter estimates and correlation coefficients

Magnetic storm phase	a	b	r
Initial Phases	1.231(±0.420)	6.005(±0.476)	0.890
Main Phase	1.465(±0.340)	5.324(±0.581)	0.858
Recovery Phase	0.660(±0.199)	6.186(±0.322)	0.545

注　括号内为95%置信区间。

表 3　各相位 Sym-H 和上行能通量均值 (α= 0.05)

Table 3　Mean value of Sym-H and upflow ions energy flux of each phase (α=0.05)

	Mean absolute value of Sym-H / nT	Mean of energy flux / ($eV\cdot cm^{-2}\cdot s^{-1}\cdot sr^{-1}\cdot eV^{-1}$)
Initial Phases	17.769(±10.872)	$5.909\times10^7(\pm5.773\times10^7)$
Main Phase	67.333(±18.325)	$1.363\times10^8(\pm6.279\times10^7)$
Recovery Phase	54.340(±10.067)	$3.026\times10^7(\pm7.801\times10^6)$

4.3 Poynting 通量

为研究磁暴期上行离子通量与 Poynting 通量之间的相关关系, 在 Poynting 通量的计算时选取了上行事件期间的峰值。这是由于上行离子能通量是在一个开阔的空间区域内观测的, 而能量输入发生时间较短, 是在一个较为狭窄的空间区域内观测的。

不同相位的上行离子能通量与 Poynting 通量的关系如图 6 所示。结果显示, 磁暴不同时期的上行离子能通量与 Poynting 通量具有较高的相关性, 其中磁暴初相时期上行离子能通量与 Poynting 通量之间的正相关性最为显著, 相关性最高, 相关系数 r = 0.660, 主相 r = 0.541, 恢复相 r = 0.575, 这与 Zhao 等[6] 得到的离子外流与 Poynting 通量具有高依赖性的结论一致。需要说明的是, 虽然初相拟合效果较好, 但不排除由于数据点过少而引起的局部拟合效果较好; 而恢复相拟合结果较差, 推测可能是由于恢复相加速离子上行的能量来源不只是焦耳耗散, 而是多方面因素共同作用的, 因此恢复相时期对 Poynting 通量的相关性相对较低。

Strangeway 等 [17] 研究了影响离子外流的两个因素—— 软电子沉降和 Poynting 通量, 得到离子外流与 Poynting 通量具有较高依赖性的结论, 同时也指出离子外流与软电子沉降也有很强的相关关系。磁暴期上行离子能量来源不只有 Poynting 通量, 这就合理解释了磁暴主相和恢复相期间, 上行离子能通量与 Poynting 通量的相关性低于其与地磁活动指数的关系。

表 5 列出了 Poynting 通量的各相均值, 可以看出, 主相的能通量均值最大, 对应的 Poynting 通量均值也最高, 这也说明向下的 Poynting 通量通过焦耳

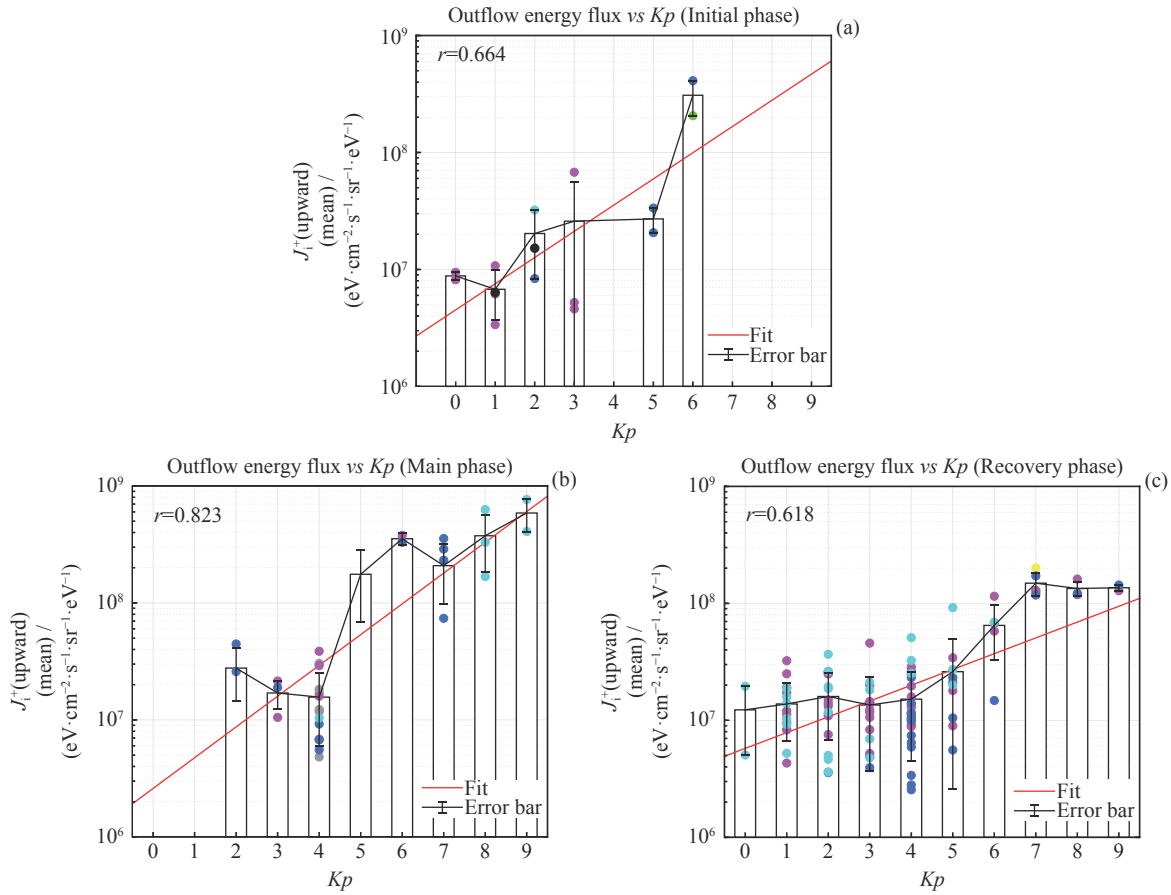


图 5 磁暴上行离子能通量均值与地磁活动指数 *Kp* 的关系。灰色点表示 1997 年事件，粉色点表示 1998 年事件，黄色点表示 2001 年事件，蓝色点表示 2004 年事件，绿色点表示 2005 年事件，青色点表示 2006 年事件

Fig. 5 Relationship diagram between the mean value of upflow ions energy flux and geomagnetic activity index *Kp*. The gray scatters represent the events of 1997, the pink scatters indicate the events of 1998, the yellow scatters indicate the events of 2001, the blue scatters indicate the events of 2004, the green scatters indicate the events of 2005, and the cyan scatters mean the events of 2006

表 4 各相位 *Kp* 和上行能通量均值 (α=0.05)

Table 4 Mean value of *Kp* and upflow ions energy flux of each phase (α=0.05)

	Mean of *Kp* index	Mean of energy flux / (eV·cm^{-2}·s^{-1}·sr^{-1}·eV^{-1})
Initial Phases	2.7(±1.1)	$5.909\times10^{7}(\pm5.773\times10^{7})$
Main Phase	5.0(±1.0)	$1.363\times10^{8}(\pm6.279\times10^{7})$
Recovery Phase	3.5(±0.4)	$3.026\times10^{7}(\pm7.801\times10^{6})$

耗散加热离子是获能的重要来源。恢复相离子上行通量小于初相和主相，说明恢复相离子获能较弱。

同时，根据散点图的拟合曲线给出磁暴期上行离子能通量与 Poynting 通量的经验公式为

$$J_{i+} = 10^{b}\ S_{\rm dc}^{a}. \tag{5}$$

其中，J_{i+}为磁暴期上行离子能通量，单位 eV·cm^{-2}·s^{-1}·sr^{-1}·eV^{-1}；$S_{\rm dc}$ 为 4000 km 左右高度上的 Poynting 通量，单位 mW·m^{-2}；a和b为参数。参数估计值汇总见表 6。

5 结论与讨论

5.1 结论

分别对南北半球的上行离子锥事件进行研究，拟合了上行离子能通量与 Sym-*H*、*Kp* 和 Poynting 通量在磁暴不同相位期间的统计关系，主要结论如下。

(1)主相期 Sym-*H* 绝对值、*Kp* 和 Poynting 通量及对应的上行离子能通量均值都为最大，且能通量高出初相和恢复相 1 个量级。由于初相期地磁扰动的

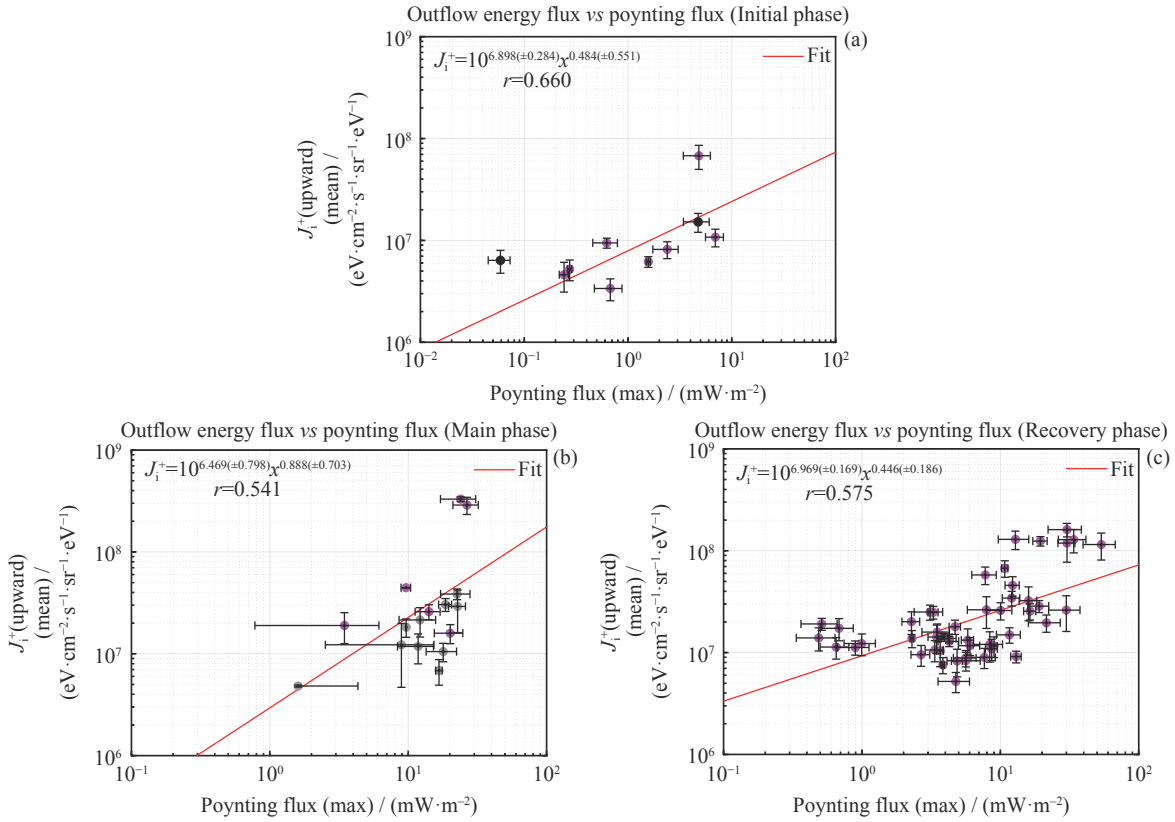


图 6 磁暴上行离子能通量均值与 Poynting 通量的散点。图中点表示每次事件的离子上行能通量和 Poynting 通量在上行期间的均值，其标准差使用误差棒表示。灰色点表示 1997 年事件，粉色点表示 1998 年事件

Fig. 6 Scatter plot of the mean of upflow energy flux and Poynting flux. Scatters mean the averaged values of the upflow energy flux and the Poynting flux during the upflowing time intervals, while error bars represent the one sigma variation of the two quantities. The gray scatters represent the events of 1997, and the pink scatters indicate the events of 1998

表 5 各相位 Poynting 通量和上行能通量均值 (α=0.05)

Table 5 Mean value of Poynting flux and upflow energy flux of each phase (α=0.05)

Magnetic storm phase	Mean of Poynting flux/(mW·m^{-2})	Mean of energy flux / (eV·cm^{-2}·s^{-1}·sr^{-1}·eV^{-1})
Initial Phase	2.192(±1.202)	$5.909\times10^{7}(\pm5.773\times10^{7})$
Main Phase	15.029(±6.710)	$1.363\times10^{8}(\pm6.279\times10^{7})$
Recovery Phase	9.961(±2.933)	$3.026\times10^{7}(\pm7.801\times10^{6})$

表 6 经验公式参数估计值及相关系数

Table 6 Empirical formula parameter estimates and correlation coefficients

Magnetic storm phase	a	b	r
Initial Phase	0.484(±0.551)	6.898(±0.284)	0.660
Main Phase	0.888(±0.703)	6.469(±0.798)	0.541
Recovery Phase	0.446(±0.186)	6.969(±0.169)	0.575

注 括号内为95%置信区间。

能量注入使电离层离子快速获能，同时向下的 Poynting 通量通过焦耳耗散加热离子也使离子获得大量能量，使其在主相期指数倍快速增长，呈现高于初相和恢复相 1 个量级的特征。

(2)地磁活动指数在磁暴不同时期对因变量上行离子能通量的相关程度不同：主相期相关程度最高；初相期次之；依据表征地磁扰动水平的指数的不同，恢复相时地磁扰动对于上行离子能通量的相关程度仅为主相期的 45%～50%。

(3)与影响程度的情况类似，在磁暴初相和主相期，上行离子能通量与地磁扰动水平呈显著正相关，而到恢复相，虽然二者之间仍有一定的正相关关系，但线性关系不显著，这与能量注入的时间有关系。

(4)关于磁暴初相和主相时地磁扰动对上行离子能通量的影响程度,利用 Sym-H 进行拟合效果相比利用 Kp 的相关系数明显更大,效果更好。但恢复相时利用 Kp 拟合的模型效果反而更好。

(5)磁暴不同时期的上行离子能通量与同时期 Poynting 通量具有一定依赖性,相关系数分别为 0.66、0.541 和 0.575。初相的相关性最好,主相次之,恢复相略差。结果表明,电磁能输入导致的电离层焦耳加热是离子上行的重要获能来源。

5.2 讨论

由于初相期很短,导致初相期样本点过少,应考虑建立的线性关系是否具有统计意义。因此,另外选取两个初相期的上行事件,带入到建立的经验模型中,验证模型是否可靠,见图 4(a)、5(a) 和 6(a) 中的黑色点。在图 4(a)、5(a) 和 6(a) 中可以看出,新增的两个初相点均在拟合曲线附近,且计算结果也都在置信区间内,因此本文拟合结果具有一定统计意义。

考虑到线性模型要求数据的正态性与之前研究工作的一致性 [17, 6, 21],使用对数化的离子上行能通量和 Poynting 通量及 Sym-H 指数分析相关关系。原因是对数化后的数据更接近正态分布,这使得拟合的统计模型更容易通过参数的显著性检验。

使用第 21 周太阳活动下降相 1981—1984 年 DE-1 卫星数据,Yau 等[2] 研究了离子上行发生率的太阳活动依赖性问题,发现太阳活动高年的上行事件发生率是活动低年的 2～3 倍,这与 Lennartsson 等[22] 的研究结果一致。根据图 7 第一行显示的磁暴不同相位离子上行能通量与 $F_{10.7}$ 随时间的分布,本文所选上行事件主要分布在太阳活动峰年的两侧且太阳活动水平相当,离子上行通量的大小没有显示出明显的太阳活动依赖性。图 7 第二行为离子上行能通量与上行期间 $F_{10.7}$ 均值的散点,结果显示初相期间离子上行通量与 $F_{10.7}$ 没有相关关系,恢复相期间有较弱的相关关系,主相期间的相关关系较好,相关系数为 0.51。这主要有两方面原因:一是本文选取的太阳峰值年的上行事件少;二是上行 O^+具有太阳活动依赖性,H^+没有太阳活动依赖性,而本文 ESA 仪器没有区分离子的上行成分。本文在做回归分析时没有考虑太阳活动水平对离子上行能通量的影响,后续研究将进一步细化分析。

如图 7 的第三行所示,本文选取的上行事件超过 90% 分布在 3000～4175 km。初相、主相和恢复相分别有 14、35 和 102 个事件,在 3000～4175 km 的事件占比分别为 93%、97% 和 91%。在北半球 70°ILat 上,3000 km 高度的地球偶极磁场强度约为 17565.4 nT,4175 km 高度的地球偶极磁场强度约为 12994.7 nT,磁场的相对变化率为 26%。由于离子能通量沿磁力线投影到不同高度的数值正比于磁场强度大小,这里没有将离子上行能通量投影到某个固定高度,因此本文结果是基于 3000～4175 km 高度范围内平均强度得到的。离子上行能通量随高度的变化特征将在后续研究中展开。

另外,Bouhram 等 [23] 使用 Probes 和 FAST 卫星数据研究了极区从 1000 km 到 19000 km 范围内的 O^+上行率,发现由 2000 km 向上,其上行率逐渐增强,从约 5000 km 高度(这个高度被认为是上行离子束开始增强的区域[24])向上,其上行强度增长放缓。值得说明的是,由于本文选取的事件集中在一个较小的高度范围内,离子上行能通量没有表现出明显的高度依赖性,而且本文研究的上行离子是离子锥而非离子束。

使用 FAST 卫星 1996 年 9 月至 1997 年 2 月数据,Lund 等 [25] 统计分析了 714 个对应于 BBELF 波和 EMIC 波的两类上行离子锥事件发生率(每组上行事件数的占比),表明地磁扰动期($Kp\geqslant 4^-$),上行事件发生率峰值发生在 75°ILat,地磁平静期($Kp\leqslant 1^+$)峰值发生在 77°ILat。这表明地磁扰动越剧烈,离子上行事件发生的磁纬度越低。虽然本文研究的只是磁暴期间的上行事件,但是上行事件所处地磁纬度也表现出该特征。图 7 最后一行显示,磁暴初相的上行事件主要分布在 70°—80°ILat,磁暴主相的上行事件主要分布在 65°—75°ILat,在磁暴恢复相内,上行事件的磁纬度升高。研究表明日侧极尖区的上行通量高于夜侧极光椭圆带 [6],本文所选上行事件在磁暴初相和恢复相显示出该特点,磁暴主相由于数据不均匀且缺乏日侧数据,没有显示该特征。

本文给出了地磁活动指数 Sym-H 和 Kp 以及 Poynting 通量与磁暴期不同相位上行离子通量的经验公式,得到了较好的相关性,可为后续研究提供参考。需要说明的是,这种相关关系描述的两种物理过程的线性关系,不代表物理过程之内是可以相互触发的。

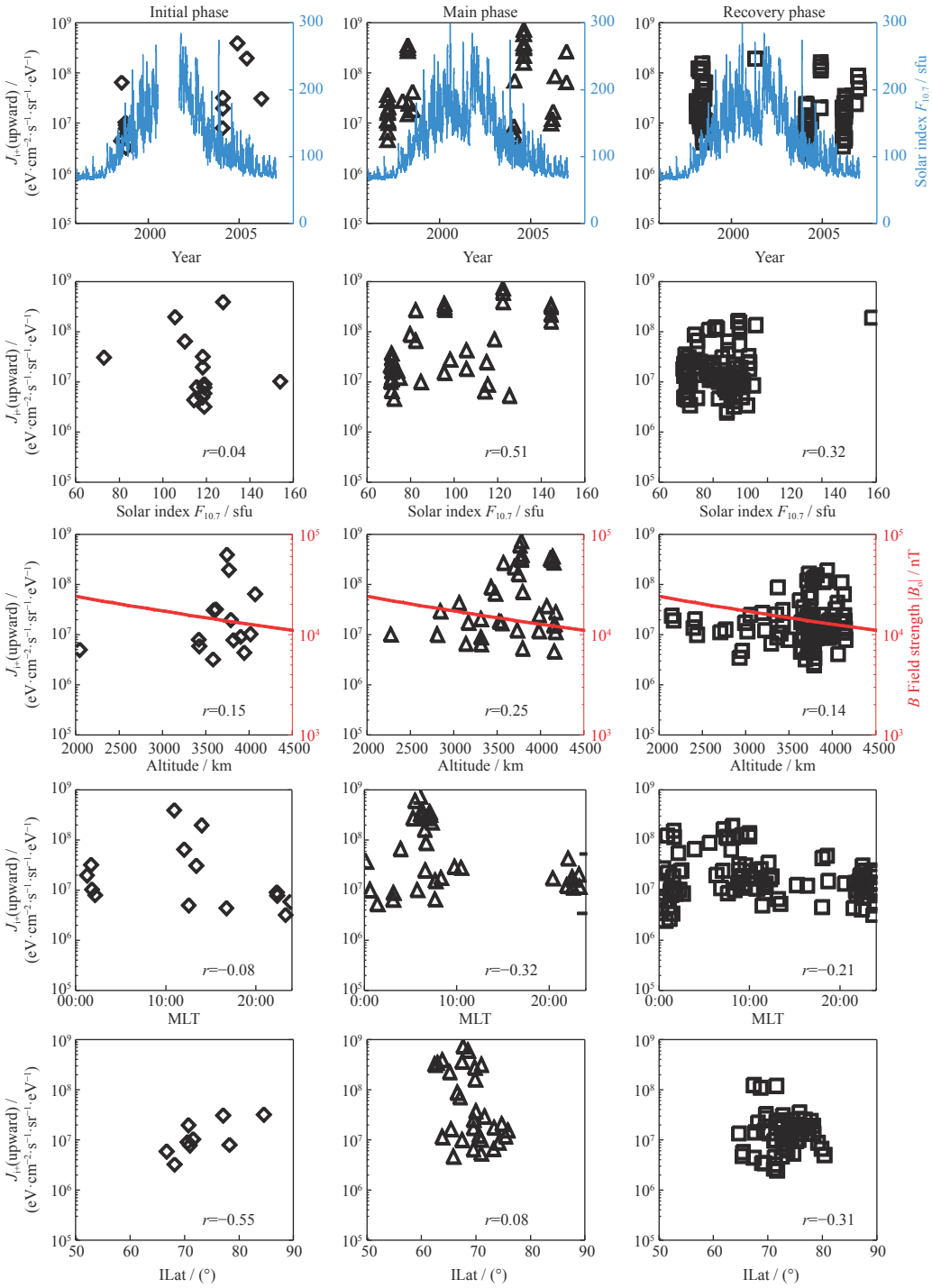


图 7 离子上行能通量在磁暴初相、主相和恢复相与其他参数的散点结果。r 表示离子上行能通量与各参数的相关系数

Fig. 7 Scatter plots of the averaged upflow energy flux versus the parameters on initial phases, main phases, and recovery phases. In each plot, r represents the correlation coefficient between the upflow energy flux and the parameters

致谢 美国航天航空局(NASA)提供了 FAST 卫星(https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/in dex.html/)和地磁活动数据(https://omniweb. gsfc.nasa.gov/form/dx1.html)下载服务,美国宇航局戈达德太空飞行中心(https://spdf.gsfc. nasa.gov/pub/data/omni/high_res_omni/)和日本京都世界地磁数据中心提供了太阳风参数和地磁活动指数(http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp /a easy/)数据。

参考文献

[1] SHELLEY E G, JOHNSON R G, SHARP R D. Satellite observations of energetic heavy ions during a geomagnetic storm[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1972, **77**(31): 6104-6110

[2] YAU A W, SHELLEY E G, PETERSON W K, *et al*. Energetic auroral and polar ion outflow at DE 1 altitudes: Magnitude, composition, magnetic activity dependence, and long-term variations[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1985, **90**(A9): 8417-8432

[3] BURCHILL J K, KNUDSEN D J, CLEMMONS J H, *et al*. Thermal ion upflow in the cusp ionosphere and its dependence on soft electron energy flux[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2010, **115**(A5): A05206

[4] MOORE T E, KHAZANOV G V. Mechanisms of ionospheric mass escape[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2010, **115**(A12): A00J13

[5] ZHAO K, CHEN K W, JIANG Y, *et al*. Latitude dependence of low-altitude O^+ ion upflow: Statistical results from FAST observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2017, **122**(9): 9705-9722

[6] ZHAO K, KISTLER L M, LUND E J, *et al*. Factors controlling O^+ and H^+ outflow in the cusp during a geomagnetic storm: FAST/TEAMS observations[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, **47**(11): e2020GL086975

[7] FU Shuai, JIANG Yong, ZHAO Kai, *et al*. Solar activity dependence of ionosphere ion upflow in the polar topside[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2017, **37**(1): 28-38 (傅帅, 蒋勇, 赵凯, 等. 极区顶部电离层离子上行的太阳活动依赖性研究[J]. 空间科学学报, 2017, **37**(1): 28-38)

[8] CULLY C M, DONOVAN E F, YAU A W, *et al*. Akebono/suprathermal mass spectrometer observations of low-energy ion outflow: Dependence on magnetic activity and solar wind conditions[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2003, **108**(A2): 1093

[9] ZHAO Kai, JIANG Yong, MEN Kepei, *et al*. Interhemispheric comparisons of ionospheric upflow H^+ at various geomagnetic activity levels using FAST observations[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, **57**(11): 3715-3728 (赵凯, 蒋勇, 门可佩, 等. 不同地磁活动水平下电离层H^+上行的半球对比研究[J]. 地球物理学报, 2014, **57**(11): 3715-3728)

[10] ZHOU Kangjun, CAI Hongtao, LI Ying, *et al*. Geomagnetic activity dependences of high-latitude dayside ionospheric ion upflows[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2018, **61**(2): 423-436 (周康俊, 蔡红涛, 李影, 等. 高纬日侧电离层离子上行的地磁活动依赖性研究[J]. 地球物理学报, 2018, **61**(2): 423-436)

[11] ZHAO K, JIANG Y, CHEN K W, *et al*. Geomagnetic and solar activity dependence of ionospheric upflowing O^+: FAST observations[J]. *Astrophysics and Space Science*, 2016, **361**(9): 295

[12] WILSON G R, OBER D M, GERMANY G A, *et al*. Nightside auroral zone and polar cap ion outflow as a function of substorm size and phase[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2004, **109**(A2): A02206

[13] OGAWA Y, SAWATSUBASHI M, BUCHERT S C, *et al*. Relationship between auroral substorm and ion upflow in the nightside polar ionosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2013, **118**(11): 7426-7437

[14] DENG Y, SHENG C, SU Y J, *et al*. Correlation between Poynting flux and soft electron precipitation in the dayside polar cap boundary regions[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2015, **120**(10): 9102-9109

[15] YORDANOVA E, SUNDKVIST D, BUCHERT S C, *et al*. Energy input from the exterior cusp into the ionosphere: Correlated ground-based and satellite observations[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, **34**(4): L04102

[16] HUANG C Y, HUANG Y S, SU Y J, *et al*. DMSP observations of high latitude Poynting flux during magnetic storms[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2017, **164**: 294-307

[17] STRANGEWAY R J, ERGUN R E, SU Y J, *et al*. Factors controlling ionospheric outflows as observed at intermediate altitudes[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2005, **110**(A3): A03221

[18] CARLSON C W, PFAFF R F, WATZIN J G, *et al*. The fast auroral SnapshoT (FAST) mission[J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, **25**(12): 2013-2016

[19] YANG Shaofeng. Low latitude pulsations during SC storm[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1992, **35**(2): 133-141

[20] FU Suiyan, PU Zuyin, ZONG Qiugang, *et al*. Ion composition variations in the ring current during intense magnetic storms and their relationship with evolution of storms[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2001, **44**(1): 1-11

[21] ZHENG Y H, MOORE T E, MOZER F S, *et al*. Polar study of ionospheric ion outflow versus energy input[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2005, **110**(A7): A07210

[22] LENNARTSSON O W, COLLIN H L, PETERSON W K. Solar wind control of Earth's H^+ and O^+ outflow rates in the 15-eV to 33-keV energy range[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2004, **109**(A12): A12212

[23] BOUHRAM M, DUBOULOZ N, MALINGRE M, *et al*. Ion outflow and associated perpendicular heating in the cusp observed by Interball Auroral Probe and FAST Auroral Snapshot[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2002, **107**(A2): 1023

[24] CUI Y B, FU S Y, ZONG Q G, *et al*. Altitude of the upper boundary of AAR based on observations of ion beams in inverted-V structures: a case study[J]. *Science China Earth Sciences*, 2016, **59**(7): 1489-1497

[25] LUND E J, MÖBIUS E, CARLSON C W, *et al*. Transverse ion acceleration mechanisms in the aurora at solar minimum: occurrence distributions[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2000, **62**(6): 467-475

(责任编辑: 宋雅娜)