

极区上行离子对地磁活动和季节变化响应的统计分析

蒋勇^①, 彭建东^①, 赵凯^{①*}, 丁留贯^②, 蓝如师^①^① 南京信息工程大学 数学与统计学院, 江苏 南京 210044;^② 南京信息工程大学 物理与光电工程学院, 江苏 南京 210044

* 联系人, E-mail: jznust@163.com

2013-01-07 收稿, 2013-03-25 接受

国家自然科学基金资助项目(41174165; 41604134); 江苏省研究生科研创新基金项目(CXZZ11_0625; CXZZ12_0510); 江苏省高校自然科学基金研究基金资助项目(12KJB170008); 南京信息工程大学人才启动经费项目(2015r052)

摘要 利用 DMSP F13 卫星离子漂移速度测量数据和 Wind 卫星行星际磁场测量数据, 对极区顶部电离层离子整体上行进行研究, 主要考察平静期和磁暴期离子上行强度, 以及不同行星际磁场方向和季节对离子上行的影响。研究发现, 无论是南半球还是北半球, 磁暴期的上行发生率都超过平静期; 无论磁暴期还是平静期, 南半球在北向行星际磁场时上行发生率高于南向行星际磁场、北半球在南向行星际磁场时上行发生率高于北向行星际磁场, 且该结论在磁暴期比平静期更为明显; 南半球平静期在北向行星际磁场和南向行星际磁场时冬季的上行发生率都远高于夏季, 超过 2 倍, 北半球平静期在北向行星际磁场和南向行星际磁场时夏季的上行发生率高于冬季。

关键词极区电离层
离子上行
行星际磁场
季节变化

地球极盖高纬地区存在开放磁力线, 开放磁力线的一端和地球高纬地区的磁力线相连, 另一端和行星际磁场相连。电离层顶部的等离子体能沿着开放磁力线形成流向磁层的上行离子流 (Zeng, 2004; 赵凯等, 2014; Zhao et al., 2014, 2016)。

自 Axford (1968) 首先提出类似太阳风比喻的极风术语来表述高纬离子流后, 电离层越来越多地被视为磁层等离子体的重要源区, 甚至是磁层某些地区的主要等离子体源。然而电离层平均离子能大约为 0.1 eV, 不足以让重离子 (如 O^+) 克服引力逃逸出电离层。要达到逃逸速度, H^+ 和 O^+ 在电离层顶部必须分别被加速到 0.65 eV 和 10.5 eV (Zeng, 2004)。

近 30 a 来, 随着能量粒子探测仪器和卫星电位主动控制技术的发展, 卫星观测证实, 在极区电离层中存在着多种离子整体外流和获能过程, 是电离层等离子体的主要来源 (Andre and Yau, 1997)。

高纬电离层通过对流电场、粒子沉降和场向电流与磁层紧密耦合在一起, 并受太阳风与行星际磁

层的直接控制, 在太阳风—磁层—电离层—热层耦合过程中起着重要作用 (霍亮等, 2006; 丁留贯等, 2012; 陈玉林等, 2015; 蒋勇等, 2015)。因此, 对极区电离层等离子体的观测分析有助于理解电离层、磁层中的相关空间天气现象。

霍亮等 (2006) 的研究表明, 平静期和磁暴期间离子上行强度及发生率与 MLT (晨昏两侧) 分布规律有关, 且磁暴期间强的离子上行与等离子体对流及其剪切有关。Zeng (2004) 从多卫星不同高度的角度考察了极区电离层 O^+ 上行, 并指出极区电离层 O^+ 上行与行星际磁场之间存在关系。Smith (2009) 在对北向行星际磁场时高纬地区不同高度几近同时观察的 O^+ 粒子流特性研究中发现, 南半球平静期北向行星际磁场时, 冬季, 在 DMSP 高度, 总的向上的离子流要比夏季多。

本文在上述研究基础上利用 DMSP F13 卫星和 Wind 卫星的观测数据, 对极区顶部电离层离子整体上行进行研究, 主要考察平静期和磁暴期离子上行强度, 以及不同行星际磁场方向和季节对离子上行

引用格式: 蒋勇, 彭建东, 赵凯, 等, 2017. 极区上行离子对地磁活动和季节变化响应的统计分析 [J]. 大气科学学报, 40(1): 132-137.

Jiang Y, Peng J D, Zhao K, et al., 2017. The geomagnetic activity and seasonal variations of upward ions in the polar ionosphere: A statistical analysis [J]. Trans Atmos Sci, 40(1): 132-137. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxb.20130107011. (in Chinese).

的影响。

1 卫星与数据采集

1.1 DMSP 卫星

DMSP 的全称为 The Defense Meteorological Satellite Program, 是美国国防气象卫星系列。DMSP 卫星采用双星运行体制, 卫星运行轨道为近圆形太阳同步轨道, 倾角为 96° , 飞行高度约为 840 km (835~850 km), 每天由南向北(升段)和由北向南(降段)分别在固定的磁地方时(DMSP F13 为 05:45 和 17:45 LT) 经过赤道面(Horwitz et al., 1994; 霍亮等, 2006)。

DMSP 卫星上载有多种离子和场探测仪器, 本文只使用到制动势分析仪 RPA(Retarding Potential Analyzer) 和离子漂移计 IDM(Ion Drift Meter)。其中 RPA 测量离子沿卫星运动方向的速度(记为 V_x), 离子温度以及 H^+ , He^+ , O^+ 等不同离子在等离子体中各自占有的比例; IDM 测量离子垂直于卫星运动方向的水平速度(记为 V_y) 和铅垂直方向的速度(记为 V_z), V_x , V_y 和 V_z 遵循右手法则, 共同构成了离子运动的速度矢量。本文用到的物理量分别为铅垂直方向的速度 V_z 、等离子体密度 N_i 和 O^+ 在等离子体中占有的比例, 他们都可以由卫星数据中直接得到。

1.2 Wind 卫星

Wind 卫星发射于 1994 年 11 月 1 日, 开始时被用于从拉格朗日 L1 点处观察太阳风。一般处于太阳和地球之间。本文主要用到的仪器是 MFI(Magnetic Fields Investigation), 用于获得所有的行星际磁场数据。

1.3 离子漂移速度数据

DMSP F13 卫星上的 IDM 和 RPA 每 4 s 记录 1 个数据, 这些数据按质量分 4 类: 1、2、3、4。1 代表数据质量好, 可以放心使用; 2 代表数据有些值得质疑, 需谨慎使用; 3 代表数据质量差, 不能使用; 4 代表数据质量不能确定。因此在使用这些数据之前必须进行预处理; 大多使用的方法是只取数据 1 或数据 1 和 2, 没有数据的地方用内插和外推的方式补齐。本文只选用 IDM 和 RPA 上数据质量都是 1 的数据点。

1.4 所选用数据的时空覆盖

选用数据较为完整的 DMSP F13 卫星数据进行分析。平静期的数据选取如下: 2000—2005 年, 每月随机选择 6 d (每天的 Max.Kp <= 4)。共包括 6

077 个轨道数据。选取 2000—2005 年间的 10 个大磁暴, 这些磁暴期间 Dst 指数的最小值, 除 2004 年 7 月磁暴和 2005 年 8 月磁暴大于但接近 -200 nT 外, 其他都小于 -200 nT, 详见表 1。所选用的磁暴期间的数据包括 394 个轨道。

表 1 所选磁暴事件发生的时间与 Dst 指数最小值

Table 1 Occurrence dates and minima of the Dst index (an index of global geomagnetic activity level) for selected storm events

时间	最小 Dst/(nT)
2000 年 4 月 6—7 日	-288
2000 年 7 月 15—16 日	-301
2000 年 8 月 11—12 日	-235
2000 年 9 月 17—18 日	-201
2001 年 11 月 5—7 日	-277
2003 年 10 月 29—11 月 1 日	-401
2003 年 11 月 19—21 日	-472
2004 年 7 月 22—27 日	-197
2005 年 5 月 14—15 日	-247
2005 年 8 月 23—24 日	-183

2 观测数据分析

2.1 分析处理方法

DMSP F13 卫星飞行的高度处于电离层顶部区域, 在这里离子的主要成分是原子氧离子 O^+ 。首先, 给出上行事件的定义: 对 DMSP F13 的任意运行一圈, 当一定范围内(根据高纬顶部电离层离子上行的特性和 DMSP F13 卫星本身的特点, 本文只考虑南半球磁纬 $M_{LAT} \leq -60^\circ$ 的区域或北半球磁纬 $M_{LAT} \geq 60^\circ$ 的区域) 总的 O^+ 离子团具有向上运动的速度时, 称之为一个总的 O^+ 上行事件, 简称一个上行事件。在该区域范围内, 将任一有效点处的离子速度矢量 V_z (在高纬地区, V_z 近似于离子沿地磁场方向的速度) 和 O^+ 离子密度相乘, 就能得到该有效点处的 O^+ 离子沿地磁场方向的通量, 对所有 O^+ 离子通量求和, 则可得该区域的 O^+ 离子沿地磁场方向的净通量 F 。

在南半球, 地磁场方向向上, 与上行方向一致; 在北半球, 地磁场方向向下, 与上行方向相反。虽然总的 O^+ 离子团的运动速度方向不能直接获得, 但是可以通过 O^+ 离子沿地磁场方向的净通量间接获得。在南半球, 将单个轨道上磁纬 $M_{LAT} \leq -60^\circ$ 的区域 O^+ 沿地球磁场方向(铅垂直向上)的净通量作为上、

下行的判断依据, $F > 0$, 则记作一个上行事件; $F < 0$, 则记作一个下行事件。在北半球, 将单个轨道上磁纬 $M_{LAT} \geq 60^\circ$ 的区域 O^+ 沿地球磁场方向(铅垂直向下)的净通量作为上、下行的判断依据, $F > 0$, 则记作一个下行事件; $F < 0$ 则记作一个上行事件。

下面, 将分别对北向行星际磁场时南半球平静期, 南向行星际磁场时北半球磁暴期举一个上行的实例。行星际磁场方向(B_z)的判断, 看 B_z 分量正负, $B_z > 0$ 为北向行星际磁场(N-IMF); $B_z < 0$ 为南向行星际磁场(S-IMF)。

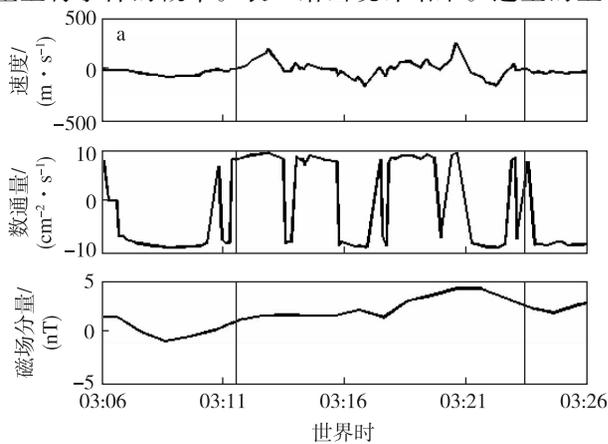
图 1a 分别显示 DMSP F13 卫星轨迹上的离子沿地磁场方向的速度 V_z 的时间分布、离子通量 F 对数的时间分布以及 Wind 卫星轨迹上的行星际磁场 B_z 分量的时间分布, 两竖线之间为磁纬 $M_{LAT} \leq -60^\circ$ 的区域, 该时间段为 2000 年 1 月 5 日 03:12:26—03:24:22 UTC, 为南半球平静期, 期间 z 轴磁场方向一直呈北向。表 2 则表示该时间段是南半球平静期北向行星际磁场时的一个上行事件。

图 1b 时间段为 2000 年 9 月 17 日 00:17:03—00:34:33 UTC, 为北半球磁暴期, 期间 z 轴磁场方向一直呈南向。表 2 则表示该时间段是北半球磁暴期南向行星际磁场时的一个上行事件。

2.2 分析处理结果

根据上述分析判断方法, 分别对南北半球平静期和磁暴期离子上行事件的发生率和强度进行统计。

发生率以轨道总数为基数, 即表示单位轨道发生上行事件的概率。表 3 给出统计结果。这里的上



行事件总数是指 2000—2005 年发生的总的上行事件数, 其中南半球平静期 790 个, 南半球磁暴期 67 个, 北半球平静期 4 647 个, 北半球磁暴期 308 个。

表 2 两次事例的上下行判断

Table 2 Judgment for two case observations on whether they are upward or downward

日期	时间	净通量/ ($cm^{-2} \cdot s^{-1}$)	是否上行
2000-01-05	03:12:26—03:24:22 UTC	2.2208×10^7	是
2000-09-17	00:17:03—00:34:33 UTC	-5.2734×10^7	是

表 3 平静期与磁暴期离子上行事件发生率比较

Table 3 Comparison of the possibility of upward events between quiet times and storm times

	平静期		磁暴期	
	上行事件 总数	单位轨道 上行率/%	上行事件 总数	单位轨道 上行率/%
南半球	790	13.00	67	17.01
北半球	4 647	76.47	308	78.17

由表 3 可以看出, 无论是南半球还是北半球, 磁暴期的上行发生率都超过平静期。由此可见, 地磁活动水平是影响离子上行的重要因素。

Zeng(2004) 从多卫星不同高度的角度考察了极区电离层 O^+ 上行, 并指出极区电离层 O^+ 上行与行星际磁场之间存在关系。因此再统计南北向行星际磁场时的离子上行。每一个选取的行星际磁场时

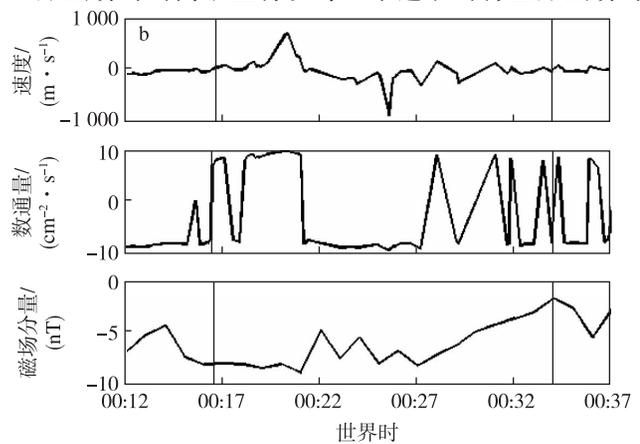


图 1 2000 年 1 月 5 日 03:12:26—03:24:22 UTC (a) 和 2000 年 9 月 17 日 00:17:03—00:34:33 UTC (b) DMSP F13 卫星观测到的离子垂直地表方向上的速度(单位: m/s)、数通量(单位: $cm^{-2} \cdot s^{-1}$)和行星际磁场南北分量(单位: nT)

Fig.1 Satellite observations during (a) 03:12:26—03:24:22 UTC 5 January 2000 and (b) 00:17:03—00:34:33 UTC 17 September 2000; velocity ($m \cdot s^{-1}$) of the upflows in the direction away from the center of the Earth; the number flux ($cm^{-2} \cdot s^{-1}$); and the north-south component of the interplanetary magnetic field(nT)

间段中都不能出现行星际磁场突然变向的情况发生,以确保所选取的行星际磁场数据是连续的且方向是一致的。统计结果如图 2 和表 4 所示。

表 4 平静期和磁暴期南北向行星际磁场的上行发生率比较

Table 4 Comparison of the possibility of upward events at different times and in different interplanetary magnetic fields

	平静期上行发生率/%		磁暴期上行发生率/%	
	N-IMF	S-IMF	N-IMF	S-IMF
南半球	14.55	12.62	23.58	17.99
北半球	65.03	66.50	83.04	88.46

无论磁暴期还是平静期,南半球在北向行星际磁场时上行发生率高于南向行星际磁场。北半球结论正好相反,即北半球在南向行星际磁场时上行发生率高于北向行星际磁场。且该结论在磁暴期比平静期更为明显。

Smith(2009)的研究发现,南半球冬季平静期北

向行星际磁场在 DMSP 高度,总的向上的离子流要比夏季多。这表明季节对离子上行可能存在影响(Horwitz and Akasofu, 1979; Horwitz and Moore, 1997)。最后再考察季节对平静期时的离子上行的影响,磁暴期数据较少不做考虑,图表中南半球冬季为 6、7、8 月,夏季为 12、1、2 月;北半球冬季为 12、1、2 月,夏季为 6、7、8 月,统计结果如图 3 和表 5。

表 5 平静期南北半球在南北向行星际磁场时的夏季和冬季的上行事件的发生率

Table 5 The possibility of upward events in summer and winter at different times and in different interplanetary magnetic fields

	冬季上行发生率/%		夏季上行发生率/%	
	N-IMF	S-IMF	N-IMF	S-IMF
南半球平静期	22.32	9.62	9.62	22.32
南半球平静期	20.81	9.07	9.07	20.81
北半球平静期	66.45	94.67	94.67	66.45
北半球平静期	70.00	86.73	86.73	70.00

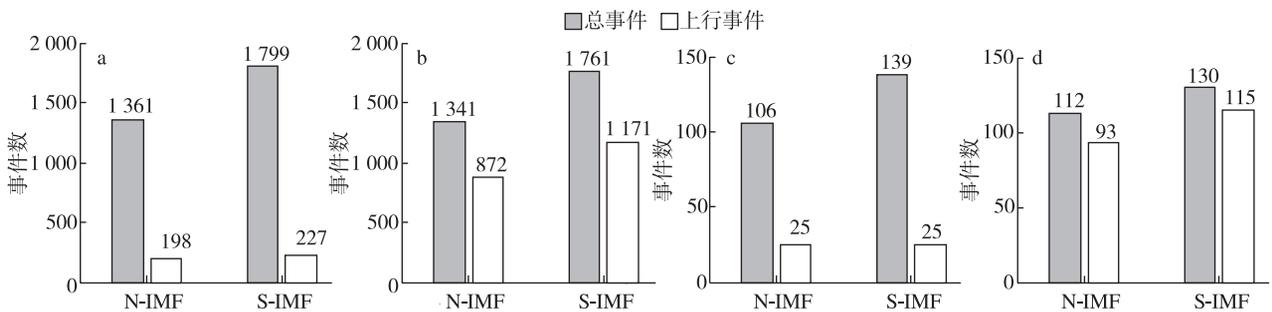


图 2 平静期(a,b)和磁暴期(c,d)南(a,c)、北(b,d)半球在南北向行星际磁场时上行事件的发生次数

Fig.2 Total observations and the number of upward events during magnetically (a,b)quiet and (c,d)disturbed periods, derived in (b,d) a positive and (a,c)negative interplanetary magnetic field, respectively

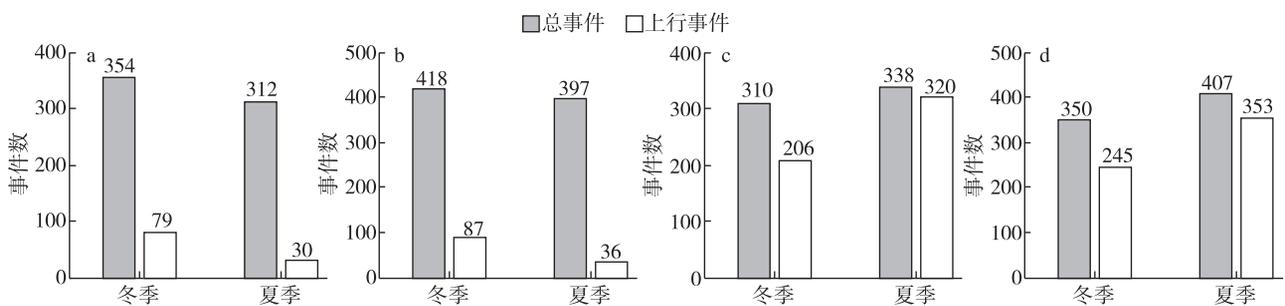


图 3 平静期南(a,b)、北半球(c,d)在南(b,d)北(a,c)向行星际磁场时的冬季和夏季的总事件数和上行事件的发生次数

Fig.3 Total observations and the number of upward events in local summer and winter in the (a,b) Southern and (c,d) Northern Hemisphere, during magnetically quiet periods, derived in a (a,c) positive and (b,d) negative interplanetary magnetic field, respectively

可见,南半球平静期在 N-IMF 和 S-IMF 时冬季的上行发生率都远高于夏季,超过 2 倍;北半球平静期在 N-IMF 和 S-IMF 时夏季的上行发生率高于冬季。由此可见,季节也是影响离子上行的重要因素。

3 结论

对 DMSP F13 卫星 2000—2005 年观测到的平静期和磁暴期的离子漂移速度数据和 Wind 卫星 2000—2005 年观测到的行星际磁场数据进行分析处理,得到以下结论:

- 1) 无论是南半球还是北半球,磁暴期的上行发生率都超过平静期。
- 2) 无论磁暴期还是平静期,南半球在北向行星际磁场时上行发生率高于南向行星际磁场;北半球在南向行星际磁场时上行发生率高于北向行星际磁

场。且该结论在磁暴期比平静期更为明显。

3) 南半球平静期在 N-IMF 和 S-IMF 时冬季的上行发生率都远高于夏季,超过 2 倍;北半球平静期在 N-IMF 和 S-IMF 时夏季的上行发生率高于冬季。

在今后的研究中,有些问题值得进一步深入研究和关注:

- 1) 需积累和分析处理更大数量的 DMSP F13 数据。
- 2) 可以采用多颗卫星从不同高度同时对极区电离层进行观测分析。

致谢:离子漂移速度测量数据由 http://cindispace.utdallas.edu/DMSP/dmsp_data_at_utdallas.html/ 提供,行星际磁场数据由 <http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cdaweb/> 提供。谨致谢忱!

参考文献 (References)

- Andre M, Yau A, 1997. Theories and observations of ion energization and outflow in the high-latitude magnetosphere[J]. *Space Sci Rev*, 80(1): 27-48.
- Axford W I, 1968. The polar wind and the terrestrial Helium budget[J]. *J Geophys Res*, 73(21): 6855-6859.
- 陈玉林, 季晶晶, 董丽花, 等, 2015. 太阳高能粒子事件起始释放高度研究[J]. *大气科学学报*, 38(2): 259-266. Chen Y L, Ji J J, Dong L H, et al., 2015. Study on the release height of solar energetic particle events[J]. *Trans Atmos Sci*, 38(2): 259-266. (in Chinese).
- 丁留贯, 蓝如师, 蒋勇, 等, 2012. 基于神经网络的太阳黑子面积平滑月均值预测[J]. *大气科学学报*, 35(4): 508-512. Ding L G, Lan R S, Jiang Y, et al., 2012. Prediction of the smoothed monthly mean sunspot area based on neural network[J]. *Trans Atmos Sci*, 35(4): 508-512. (in Chinese).
- Horwitz J L, Akasofu S I, 1979. On the relationship of the polar cap current system to the north-south component of the interplanetary magnetic field [J]. *J Geophys Res*, 84: 2567-2574.
- Horwitz J L, Moore T E, 1997. Four contemporary issues concerning ionospheric plasma flow to the magnetosphere[J]. *Space Set Rev*, 80: 49-76.
- Horwitz J L, Ho C W, Scarbro H D, et al., 1994. Centrifugal acceleration of the polar wind[J]. *J Geophys Res*, 99: 15051-15064.
- 霍亮, 马淑英, 周云良, 等, 2006. 极区顶部电离层离子上行—一区顶部电卫星观测[J]. *极地研究*, 18(2): 98-107. Huo L, Ma S Y, Zhou Y L, et al., 2006. Ion upflow in the topside polar ionosphere—observations by the DMSP satellite[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 18(2): 98-107. (in Chinese).
- 蒋勇, 姜乙, 冯彦, 等, 2015. 基于 CHAMP 卫星与三维 Taylor 多项式模型的区域地磁建模研究[J]. *地球物理学报*, 58(9): 3121-3132. Jiang Y, Jiang Y, Feng Y, et al., 2015. Regional geomagnetic modelling based on the magnetic data of CHAMP satellite and 3D Taylor polynomial[J]. *Chinese J Geophys*, 58(9): 3121-3132. (in Chinese).
- Smith S, 2009. High-latitude core ion properties during northward interplanetary magnetic field condition; A dissertation[D]. Huntsville: University of Alabama.
- Zeng W, 2004. Multi-spacecraft observations of O⁺ flows in the polar topside ionosphere and lower magnetosphere; A dissertation[D]. Huntsville: University of Alabama.
- 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[J]. *地球物理学报*, 57(11): 3715-3728. Zhao K, Jiang Y, Men K P, et al., 2014. Interhemispheric comparisons of ionospheric upflow H⁺ at various geomagnetic activity levels using FAST observations[J]. *Chinese J Geophys*, 57(11): 3715-3728. (in Chinese).
- 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 [J]. *Planetary and Space Science*, 101C: 170-180.
- Zhao K, Jiang Y, Chen K W, et al., 2016. Geomagnetic and solar activity dependence of ionospheric upflowing O⁺: Fast observations[J]. *Astrophysics and Space Science*, 361(9): 295.

The geomagnetic activity and seasonal variations of upward ions in the polar ionosphere: A statistical analysis

JIANG Yong¹, PENG Jiandong¹, ZHAO Kai¹, DING Liuguan², LAN Rushi¹

¹*School of Mathematics and Statistics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;*

²*School of Physics and Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China*

Based on a large dataset of ion drift velocity measurements onboard the DMSP F13 satellite and interplanetary magnetic field measurements onboard the Wind satellite, a study is made of the plasma bulk upward flowing ions in the topside polar ionosphere, with an emphasis on the quiet-time and storm-time changes in the distribution of upward occurrence and the impact of different interplanetary magnetic fields and seasons on the upward occurrence. The results show that the storm-time occurrence possibility of upward events is higher than that during quiet times in both the Southern Hemisphere and Northern Hemisphere. In the Southern Hemisphere and north of the interplanetary magnetic field, the possibility of upward events is higher than south of the interplanetary magnetic field; and in the Northern Hemisphere and south of the interplanetary magnetic field, the possibility of upward events is higher than north of the interplanetary magnetic field. These conclusions are more obvious in the magnetic storm period than the quiet period. Seasonally, in the Southern Hemisphere, upward events in winter are twice as likely as in summer, and this is the case during quiet times and north of the interplanetary magnetic field as well as during storm times and south of the interplanetary magnetic field. Mean while, in the Northern Hemisphere, the possibility of upward events in summer is greater than in winter, and this is true for quiet times north and south of the interplanetary magnetic field.

Large amounts of energetic particles are propagated by the dayside soft precipitating particles (1 keV for ions and 100 eV for electrons) and night side auroral sub-storm particle injections. This causes the moment transfer and heating of the cold plasma in the polar cap area by fractional heating and the ambipolar diffusion topside the *F* region of the ionosphere. At the same time, plasma waves, such as extremely low-frequency broadband waves, and ion cyclotron and lower hybrid waves, are involved by the convective velocity shear and plasma instability. Therefore, the cold upflows could be heated into thermal upflows at first, to reach a higher altitude, where they can be accelerated by the plasma waves into super thermal ions. In this paper, the occurrence frequency of upflow events during magnetically quiet periods is less than that during magnetically disturbed periods. This phenomenon can be explained by this mechanism.

The seasonal variations of upward ions are discussed in this paper, in that the occurrence frequency in local winter is higher than in local summer in the Northern Hemisphere. However, the opposite is true in the Southern Hemisphere. This conclusion is consistent with previous studies in which it was reported that seasonal variations in ionospheric upflow do indeed exist and that the occurrences are closely related to solar activity and the interplanetary magnetic field. Under conditions of solar illumination, the enhanced solar extreme ultraviolet radiation ionizes the neutral gas. The conductivity of the ionosphere increases, while at the same time the cross-polar cap potential difference decreases. Therefore, the occurrence frequency of upflows is small in local summer compared with local winter.

polar ionosphere; upflowing ions; interplanetary magnetic field; seasonal variation

doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20130107011

(责任编辑:刘菲)