0254-6124/2022/42(1)-0073-09 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

WEI Dong, YU Yiqun. Statistics of Ion Downward Flows in the Ionosphere during Subauroral Polarization Streams (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2022, **42**(1): 73–81. DOI:10.11728/cjss2022.01.200724066

亚极光区极化流发生期间电离层离子下行的统计*

魏 冬[1] 於益群[1,2]

1(北京航空航天大学空间与环境学院 北京 102206)

2(工业和信息化部空间环境监测与信息处理重点实验室 北京 102206)

摘 要 亚极光区极化流是地球磁层–电离层耦合过程中最重要的现象之一，对电离层具有重要的调制作用。多数情况下，亚极光区极化流发生时会伴随局地离子上行流动，目前已对其有充分的研究，但对离子下行的研究却甚少。本文分析了 DMSP 卫星在 2001—2015 年间 16 个地磁暴中的观测数据，在 483 个亚极光区极化流事件中找到 102 个离子下行事件，并对其开展统计研究，分析离子下行在亚极光区极化流事件中的发生率，在南北半球的分布以及有助于离子下行形成的条件。结果表明：离子下行在亚极光区极化流事件中发生概率较小，离子下行事件的发生与分布具有比较明显的南北半球差异，并且亚极光区极化流的速度与离子下行速度具有高度相关性，表现为线性关系；而离子下行极有可能是因为双极扩散与地球重力共同作用而产生的，并且离子的热运动强弱对离子下行的速度大小也具有重要影响。这些研究结果有助于进一步理解亚极光区极化流对地球电离层动力学的调制作用。

关键词 亚极光区极化流，离子下行，分布特征，统计研究

中图分类号 P352

Statistics of Ion Downward Flows in the Ionosphere during Subauroral Polarization Streams

WEI Dong[1] YU Yiqun[1,2]

1(*School of Space and Environment, Beihang University, Beijing* 102206)

2(*Key Laboratory of Space Environment Monitoring and Information Processing, Ministry of Industry and Information Technology, Beijing* 102206)

Abstract During geomagnetically disturbed times, enhanced westward plasma flows appear in the duskside subauroral ionosphere and are termed as Subauroral Polarization Streams (SAPS). SAPS are usually believed as one of the most important features of the magnetosphere-ionosphere coupling and

* 国家自然科学基金项目资助（41821003，41974192）

2020-07-24 收到原稿，2021-06-09 收到修定稿

E-mail: weidong@buaa.edu.cn

play an important role in regulating the ionospheric dynamics. Generally, SAPS can give rise to local ion upward flows, but there are few studies on ion downward flows. Based on the observations of DMSP satellites during 16 magnetic storm from 2001 to 2015, we find 102 cases with ion downward flows in all the 483 SAPS events. The occurrence rate of ion downward flows, the distribution of ion downward flows in the Northern and Southern Hemispheres, and the favored conditions for the formation of ion downward flows are further analyzed in these SAPS events. The results show that the occurrence rate of ion downward flow is relatively low in SAPS events, and the number and distribution of ion downward flow events are different on the two hemispheres. A linear relationship is found between the SAPS and ion downward flow velocities. Furthermore, the formation of ion downward flow is most probably caused by the combined effects of ambipolar diffusion and gravity. The intensity of ion thermal movement has significant influence on the velocity of ion downward flow. These results will help us to further understand the regulating effects of SAPS on the ionosphere.

Key words Subauroral Polarization Streams (SAPS), Ion downward flows, Distribution features, Statistical study

0 引言

亚极光区极化流(Subauroral Polarization Streams, SAPS)[1,2]是地球磁层–电离层耦合过程中的一种重要的物理现象,主要发生在地磁扰动时期的地球亚极光区域[1,3-6]。通常来说,SAPS是位于地球昏侧至午夜区域的快速西向等离子体流动,主要分布在16:00—24:00 MLT(磁地方时)[7-13,16]。SAPS通常具有两种不同特征的西向等离子体高速流:一种是Yeh等[2,14]发现的在纬度上分布较广且持续时间较长的西向等离子体高速流,另一种是Spiro等[15]发现的具有极高流动速度(≥1000 m·s^{-1})并且在纬度分布上较为狭窄(≤1°)的西向高速流。

SAPS的形成与磁层–电离层之间的耦合过程密切相关,取决于多个因素,包括磁层电场、等离子体片边界、磁层压强梯度、场向电流以及电离层电导率[12,15,17,18]。最初Southwood等[19]提出了一种电压源理论用于解释SAPS的形成。这种理论主要基于单粒子方法,认为在磁尾离子注入时,由于离子与电子等离子片内边界的不同而形成的电荷分离可以形成径向电场,该电场通过地球磁力线投射至电离层,成为极向电场,进而在电离层形成SAPS。然而,电压源理论忽略了缓慢等离子体过程中带电粒子呈中性的情况。Karlsson[20]和Anderson等[1,3]提出电离层极向电场的形成可以用电流源理论来解释,即地球昏侧方向向下的2区场向电流与方向向上的1区场向电流通过极向的皮德森电流在电离层形成闭合回路,为了维持电离层电流的连续性,会在电离层形成极向电场。当局地电导率相对较低时,该极向电场会增强,进而产生增强的西向等离子体漂移流动,即SAPS。此外,Anderson等[1,3]提出增强的电场与电离层电导率存在正向反馈效应:强电场能够通过电离层化学过程减弱局地电导率进而使得电场继续增强。Zheng等[13]通过模拟研究证实,中纬地区电离层低电导率区域对高速度SAPS的形成至关重要。

关于SAPS的研究可以基于多种观测手段,例如美国国防气象卫星计划(Defense Meteorological Satellite Program, DMSP)[3,21,22]、Millstone Hill非相干散射雷达[5,7]、以及超级双子极光雷达观测网(Super Dual Auroral Radar Network, SuperDARN)[11,23-25]。通过大量的卫星与雷达观测并使用数值模拟等方法,揭示了SAPS对电离层具有很大的影响。多项研究显示,SAPS可以改变电离层的成分,形成F区密度槽[26-28],并且可以对暴时电子密度增强(SED)以及等离子体层羽状结构(Plumes)产生影响[29,30-32]。此外,由于高速运动的等离子体与周围共转大气中性分子碰撞会产生摩擦加热效应,该加热效应导致的热膨胀会使离子向上流动[8,9,14,33,34]。然而,Horvath和Brian[35]的研究发现亚极光区高速离子流动也会造成离子的向下对流。Endo等[36]认为电离层离子下行发生在

离子加热以及离子上行之后, 即上行的离子会由于地球重力作用而重新回落至较低的电离层高度。Foster[37] 在 1993 年提到在 SED 事件中出现沿磁力线向下运动的等离子体速度流。而 Zou 等[38] 通过对多个 SED 事件中离子垂直流动情况进行研究, 提出 SED 期间离子下行可能由两种不同的机制所产生, 一种是由于压强梯度增强而导致的双极扩散增强, 另一种是由于极向热层风的增强。由于绝大多数研究表明在 SAPS 事件发生时, 当地的离子因为热膨胀而向上流动, 对于离子下行的情况则关注甚少。

本文利用 DMSP F12～F18 共 7 颗卫星的观测数据, 选取发生在 2001—2015 年间 16 个地磁暴中的 483 个 SAPS 事件进行统计, 以分析在这些 SAPS 事件中离子下行的发生率, 离子下行事件在南北半球的分布以及哪些条件有助于离子下行的发生。这些研究结果将有助于更好地理解 SAPS对地球电离层动力学的调制作用。

1　数据与方法

DMSP 卫星计划是美国国防部自 1965 年发射的一系列极轨卫星的统称, 命名为 DMSP F1～F19。该计划的卫星轨道倾角约为 96°, 高度 835～850 km, 绕地球一周运行时间约为 101 min, 其探测目的是观测距地球约 800 km 高度的电离层等离子体情况。DMSP 卫星具有高时间分辨率的等离子体以及磁场数据*, 本文的离子对流速度数据来自于 DMSP 卫星上搭载的 IDM(Ion Drift Meter)[39] 探测仪, 等离子体密度以及温度信息来源于其搭载的 RPA(Retarding Potential Analyzer)[40] 探测仪, 而离子与电子沉降数据则由 SSJ/5(Special Sensor J/5)[41] 仪器所测得。磁暴期间地磁指数 *Dst* 则来源于 OMNI 网站**。

关于 SAPS 事件的选择与判定, 本文主要采用以下标准: (1)SAPS 速度峰值≥500 m·s^{-1}; (2)速度峰值位于极光椭圆区的赤道向边界, 即电子沉降边界的低纬区域; (3)速度峰值位于昏侧–午夜侧区域(16:00—24:00 MLT)。由此三个条件利用 DMSP 卫星离子数据选取了 2001—2015 年间 16 个地磁暴中发生的 483 个 SAPS 事件, 而这些 SAPS 事件在南北半球均有分布。图 1 显示了 2013 年 3 月 17 日磁暴期间 DMSP F17 在南半球观测到一个 SAPS 事件, 而该 SAPS 事件中存在明显向下运动的离子流。从图 1(a) 可以看出, 在电子沉降边界的更低纬区域(见图 1c)出现一速度峰值高达 1.3 km·s^{-1} 的 SAPS 事件。而在图 1(b) 中, 与 SAPS 速度峰值相对应出现速度约为 0.4 km·s^{-1} 的离子下行。此外, 如图 1(e) 所示, SAPS 位于亚极光区电子密度槽内以及与离子温度峰值相吻合(见图 1f)。SAPS 附近电子密度的减小以及离子温度的升高说明等离子体高速流动可以促进电离层带电粒子重组以及与中性分子摩擦而产生加热效应。与图 1 所展示的事例相同, 本文中所选的电离层离子下行事件均在 SAPS 发生期间。

表 1 给出了本文研究中所选的 16 个地磁暴的发生日期、磁暴等级以及磁暴主相期间 *Dst* 指数达到的最小值。其中磁暴的等级是根据磁暴主相 *Dst* 指数的最小值处于以下哪个范围来划分的: *Dst*≥–30 nT 为小磁暴(Small), –100 nT≤*Dst*<–30 nT 为中等磁暴(Moderate), –300 nT≤*Dst*<–100 nT 为强磁暴(Strong), *Dst*<–300 nT 为超强磁暴(Severe)。每个磁暴时间跨度的选取是 *Dst* 指数从平静期开始减小的当天 00:00 UT 时刻起, 直到减小到最低值, 再从 *Dst* 指数最小值恢复到平静期数值的当天 24:00 UT 时刻止。从表 1 可以看出, 所选择的 16 个磁暴均为中等及中等以上等级的磁暴, 其中中等磁暴 6 个, 强磁暴 7 个, 超强磁暴 3 个。

2　结果与讨论

以 2013 年 3 月 17 日磁暴为例, 图 2 显示了该磁暴中发生的 SAPS 事件以及相应的离子上行与下行的统计情况。图 2(a) 显示, DMSP F16～F18 三颗卫星共观测到 61 个 SAPS 事件, 每颗卫星所观测到的 SAPS 事件数量基本一致, 而这 61 个事件中共发生离子上行 54 次, 离子下行 7 次, 其中离子下行占整个 SAPS 事件的 11.5%, 与离子上行数量相比较, 离子下行事件发生的比例很小。随后挑选出这 7 个离子下行事件并将其位置分布展示在图 2(b) 中, 如图所示, 7 个离子下行事件有 6 个出现在南半球, 只有 1 个在

* http://satdat.ngdc.noaa.gov/

** http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/

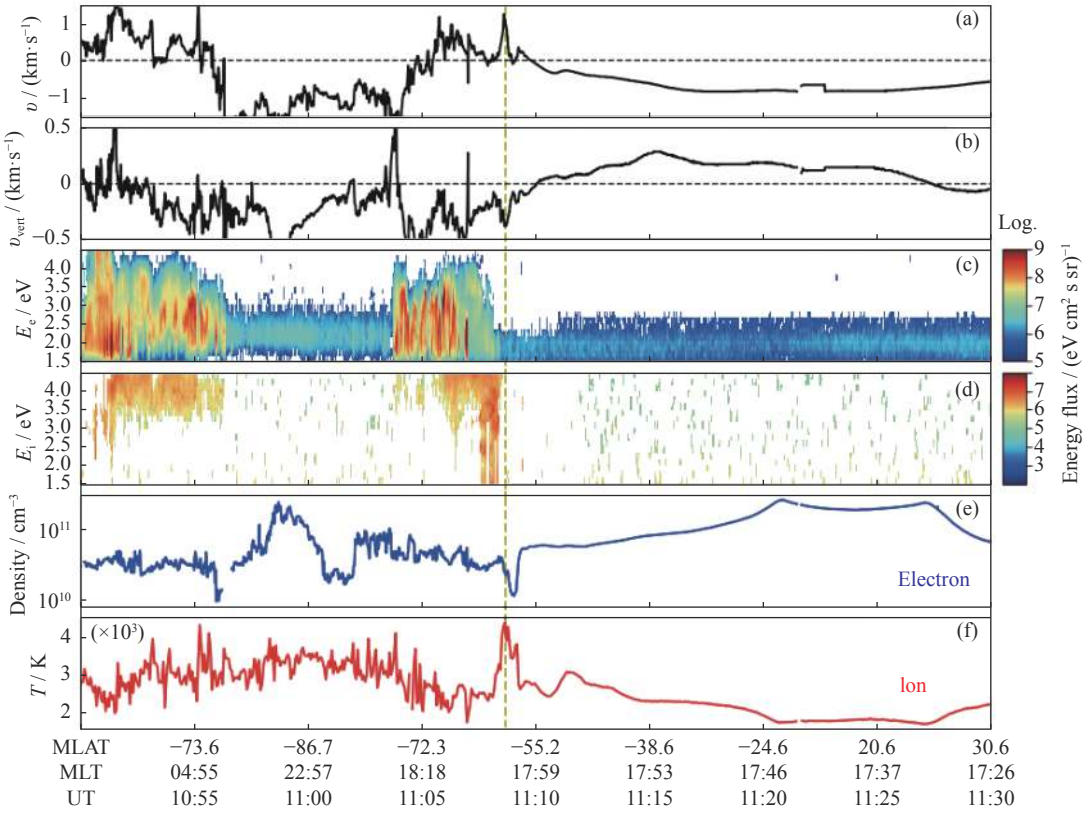


图 1 DMSP F17 在南半球观测到的一个 SAPS 发生时离子下行典型事例。图中从上到下分别为离子水平方向速度、离子垂直方向速度、电子能量通量、离子能量通量、电子数密度以及离子温度

Fig. 1 A typical case of ion downward flow observed by DMSP F17 during a SAPS event in the Southern Hemisphere. From top to bottom are the ion horizontal drift velocity, ion vertical drift velocity, electron energy flux, ion energy flux, electron number density and ion temperature

表 1 2001—2015 年间发生的 16 个地磁暴

Table 1 16 geomagnetic storms during 2001—2015

Date	Storm level	Dst_{min}/nT	Date	Storm level	Dst_{min}/nT
2001.03.31—04.02	Severe	–437	2005.09.15—09.17	Moderate	–70
2001.09.30—10.02	Strong	–143	2010.04.05—04.08	Moderate	–90
2002.04.17—04.19	Strong	–151	2010.08.03—08.05	Moderate	–81
2003.11.20—11.22	Severe	–490	2012.06.16—06.19	Moderate	–69
2004.04.01—04.07	Strong	–149	2013.03.17—03.19	Strong	–132
2004.11.07—11.09	Severe	–394	2013.05.31—06.03	Strong	–137
2005.01.21—01.23	Moderate	–92	2013.06.27—07.02	Strong	–111
2005.02.05—02.11	Moderate	–68	2015.03.17—03.19	Strong	–223

北半球被观测到, 因此离子下行事件的分布有可能存在南北不对称性。由于磁暴期间极光椭圆区向低纬扩张, 因此这些事件都分布在磁纬(Magnetic Latitude, MLAT)60°以下, 即亚极光区域。下面对这 16 个磁暴期间所有 SAPS 事件的统计结果进行分析。

图 3 显示了 2001—2015 年间 16 个地磁暴中 483 个 SAPS 事件的统计结果。如图 3(a) 所示, 483 个 SAPS 事件中共发生 102 次离子下行, 离子下行所占

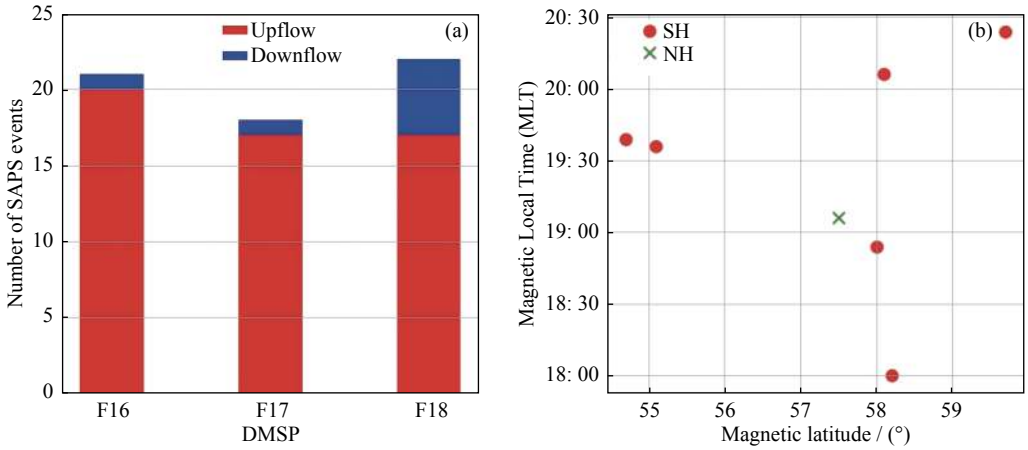


图 2　2013 年 3 月 17 日磁暴时 DMSP F16～F18 观测到的 SAPS 事件以及相应的离子上行与下行的统计情况。(a) 该磁暴所有 SAPS 事件中离子上行与下行的数量，(b) 离子下行事件在南北半球的分布

Fig. 2　Statistical characteristics of ion upward flow and downward flow with SAPS events from DMSP F16～F18 observations during the 17 March 2013 magnetic storm. (a) Number of ion upward flow and downward flow cases with SAPS events. (b) Distribution of ion downward flow events on the Northern Hemisphere (NH) and Southern Hemisphere (SH), respectively

比例约 21.1%。在 6 个中等磁暴中，共观测到 149 个 SAPS 事件，其中 29 个出现离子下行，所占比例约 19.5%。7 个强磁暴中观测到 187 个 SAPS 事件，其中出现 38 次离子下行，所占比例约 20.3%。而在 3 个超强磁暴中共有 147 个 SAPS 事件，其中 35 次离子下行，所占比例约 23.8%。以上比例显示在不同等级的磁暴中，出现离子下行的比例为 SAPS 事件总数的 20% 左右。此外，从图 3(b) 也可以看出，南半球发生的 SAPS 事件数要多于北半球发生的事件数量。SAPS 南北半球发生率的不同可能是因为南北半球季节差异而导致电离层电导率的不同。图 3(c)～3(f) 显示了 102 个离子下行事件在南北两个半球上的分布。总体来说，南半球观测到的离子下行事件数量(67 个)要多于北半球的离子下行数量(35 个)。当 $Kp\leqslant 4$ 时，地球磁层环境相对平静，由于 SAPS 发生率较低，因此能够观测到的离子下行事件也比较少(南北半球共 16 个)，大多数事件都发生在 Kp 指数较高的时候(南北半球共 86 个)。此外，从图 3(c) 和 3(d) 可以看出，在地磁活动相对平静时期，极光椭圆区会分布在较高的纬度，所以此时观测到的离子下行事件无论在北半球还是在南半球多位于 MLAT 60°以上。同理，当地磁相对扰动时($Kp>4$)，由于高能粒子向低纬区域的沉降导致极光椭圆区会向更低的纬度扩张，并且在昏侧流入电离层的 2 区场向电流也会向低纬扩展，所以 SAPS 发生的位置也会相应向更低的纬度移动，正如图 3(e) 和 (f) 所示，绝大多数离子下行事件出现在 MLAT 60°以下的区域。除了以上特征，离子下行事件的分布也表现出明显的南北半球差异。在北半球，无论是地磁相对平静时或是扰动时期，离子下行多分布于 17:00＜MLT＜21:00。而在南半球，离子下行的分布趋向于午夜位置(MLT=24:00)，主要分布于 18:00＜MLT＜24:00。关于离子下行南北半球分布的差异性可能是因为所选磁暴多发生在春季和冬季，春冬两季北半球所受太阳光照射较少进而会导致北半球电离层低电导率区域向日侧扩张[42]，而低电导率是产生 SAPS 的重要条件，因此 SAPS 的产生位置也会更靠近日侧，并最终导致北半球离子下行的分布也向日侧移动。

SAPS 的速度与离子下行速度也具有很高的相关性。图 4 显示了分布于南北半球所有离子下行事件当中 SAPS 速度与离子下行速度的关系。从图 4 可以看出，绝大多数离子下行出现在对流速度不高于 2000 $\mathrm{m\cdot s^{-1}}$ 的 SAPS 事件中，而相应的离子下行速度也基本不会高于 1000 $\mathrm{m\cdot s^{-1}}$。经计算 SAPS 速度与离子下行速度的相关指数高达 0.85，说明两者速度具有极高的相关性。此外，图 4 中黑色斜线表示 SAPS 速度与离子下行速度的拟合直线，该拟合直线可由方程 $v_{\mathrm{downflow}}=0.773v_{\mathrm{SAPS}}-495.2$ 表示，其中 v_{SAPS} 为 SAPS

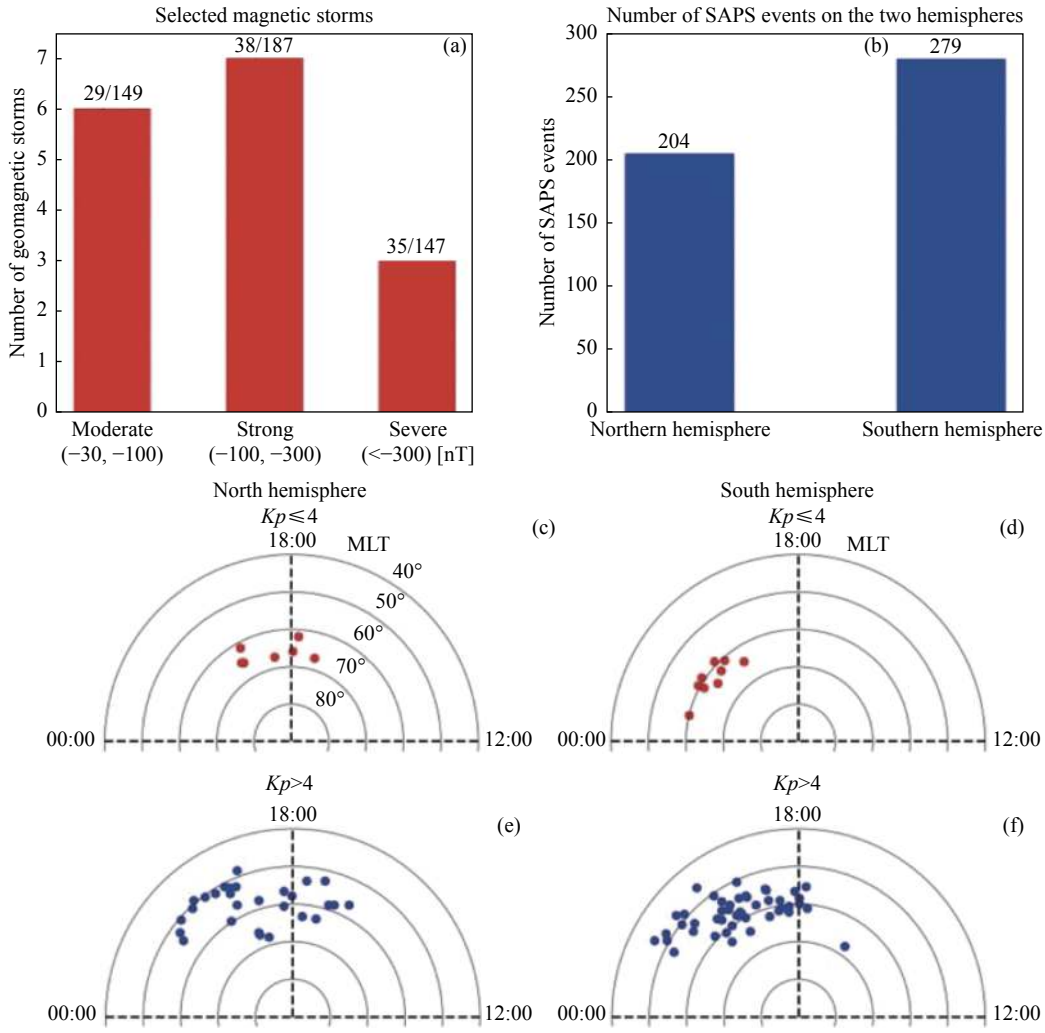


图 3 2001—2015 年间共 16 个地磁暴 DMSP F12～F18 观测到的 SAPS 事件以及离子下行的统计情况。(a) 不同等级磁暴中发生的 SAPS 事件以及离子下行的数量，(b) 南北半球发生的 SAPS 事件数量。(c)～(f) 地球磁层平静（$Kp\leqslant 4$）和扰动（$Kp>4$）时期所有离子下行事件在南北半球的分布

Fig. 3 Statistical characteristics of ion downward flow with SAPS events from DMSP F12—F18 observations during 16 magnetic storm of 2001—2015. (a) The number of all ion downward flow cases with SAPS events on the different storm level, (b) the number of SAPS events on the Northern and Southern hemispheres. (c)～(f) Distribution of ion downward flow events on the Northern and Southern hemispheres during the quiet ($Kp\leqslant 4$) and disturbed ($Kp>4$) times, respectively

速度而v_{downflow}是离子下行速度。因此，SAPS 速度与离子下行速度呈现近似线性关系，且电离层离子下行速度会随着 SAPS 流动速度的增加而增加。实际上，在 SAPS 发生时当地的电子密度较低，而更高高度的电子密度较高，由于电子扩散速度要远高于离子，所以会向更低高度扩散进而形成方向向下的电场，该电场与密度梯度同时作用下会造成离子的双极扩散，因此该双极扩散效应与地球重力相结合会产生离子的向下输运。而在 SAPS 速度较大时，会加速与电子的复合并带走更多的电子，因此也会促进双极扩散过程增强离子下行速度。离子下行速度增强可以将电离层等离子体快速输运至更低高度处，从而改变电离层不同高度的等离子体密度和组成成分，甚至是热层的离子成分，因此离子下行对流速度增强对局地电离层性质的短时变化具有重要作用。

上文提到 SAPS 速度与离子下行速度具有极高的相关性，而电离层高速等离子体对流会对周围粒子环境产生摩擦加热，图 1 中的离子下行速度峰值就对

应了一个明显的离子温度峰值,因此这里计算了所有离子下行事件中 SAPS 速度与离子下行速度的比值,并按照比值范围的不同对是否出现离子温度峰值的离子下行事件数量进行了统计。将两者速度的比值分成三个范围,分别是: $0<v_{\mathrm{SAPS}}/v_{\mathrm{downflow}}\leqslant 4$, $4<v_{\mathrm{SAPS}}/v_{\mathrm{downflow}}\leqslant 8$ 以及 $8<v_{\mathrm{SAPS}}/v_{\mathrm{downflow}}\leqslant 12$,比值越低证明离子下行速度与 SAPS 速度越接近。图 5 显示,当离子下行速度与 SAPS 速度十分接近时(比值较小),在离子温度峰值出现的情况下离子下行事件发生的次数明显升高。而随着比值的增大,在离子温度峰值出现的情况下离子下行事件的数量变少。此外,与温度峰值出现时的情况相反,在没有温度峰值的情况下会出现相反的变化趋势,即随着比值的升高,离子下行事件的数量会增多。可将离子温度峰值出现的情况看为离子热运动较强,把没有温度峰值出现的情况看为离子热运动不够明显。当离子热运动较强时,离子会加速离开所处的位置,进而形成电场并使双极扩散效应增强,从而导致高速的离子下行。而当离子热运动较弱时,需要较高速度的 SAPS 流动才会产生较弱的离子下行。因此,离子下行的产生以及速度大小与 SAPS 速度以及当地离子的热运动强弱密切相关。

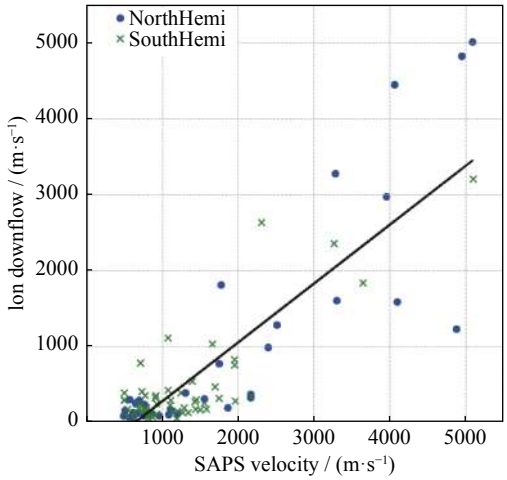


图 4　SAPS 速度与离子下行速度的相关性

Fig. 4　Correlation between SAPS velocities and ion downward flow velocities

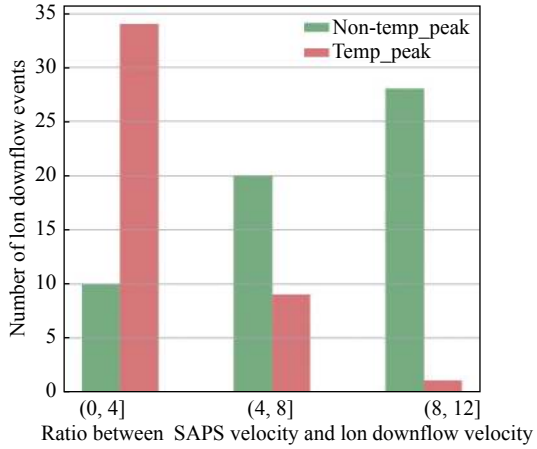


图 5　SAPS 速度与离子下行速度的比值以及发生局地离子温度峰值的统计情况

Fig. 5　Statistical characteristics of the ratio between SAPS and ion downward flow velocity and local ion temperature peaks

3　结论

利用 DMSP 卫星数据,选取发生在 2001—2015 年间 16 个地磁暴中的 483 个 SAPS 事件进行统计,分析了这些 SAPS 事件中发生的离子下行事件所占比例,这些事件在南北半球的分布以及哪些条件有助于离子下行的发生。

(1)离子下行在 SAPS 事件中的发生比例较小,约为 21.1%;离子下行事件的分布具有南北半球不对称性,其中南半球发生的事件数要高于北半球,且北半球的下行事件多分布于 17:00<MLT<21:00,而南半球多分布于 18:00<MLT<24:00。

(2)SAPS 的速度与离子下行速度也具有很强的相关性,表明强 SAPS 对流可以引起强离子下行流动,进而对垂直方向上的电离层性质迅速产生影响。

(3)当 SAPS 期间离子热运动显著时,所产生的离子下行速度会与 SAPS 速度十分接近,而离子热运动不明显时需要较大的 SAPS 流动才能产生离子下行。

综上所述,通过分析观测到的 102 个离子下行事件,可以发现在 SAPS 发生时与离子上行相比离子下行只占很小的比例,离子下行的发生与分布具有比较明显的南北半球差异,且 SAPS 速度与离子下行速度高度相关并呈现线性关系。此外,离子下行极有可能由双极扩散与地球重力的共同作用产生,且 SAPS 期间离子热运动的强弱对离子下行的速度也具有重要作用。然而,目前所选择的事件数量比较少,以后的工作会通过更多的离子下行事件进行更深入的统计研究。此外,关于 SAPS 期间离子下行的物理机制仍然不够明确,是哪些因素主导了 SAPS 期间离子上

行与离子下行,对这些问题的研究有助于更进一步理解 SAPS 对电离层动力学的调制作用。

致谢 DMSP F12～F18 卫星数据由美国国家海洋和大气管理局(NOAA)提供(http://satdat.ngdc.noaa.gov/),地磁指数 *Dst* 数据由 OMNI(http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/)提供。

参考文献

[1] ANDERSON P C, HANSON W B, HEELIS R A, *et al*. A proposed production model of rapid subauroral ion drifts and their relationship to substorm evolution[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1993, **98**(A4): 6069-6078

[2] FOSTER J C, BURKE W J. SAPS: A new categorization for subauroral electric fields[J]. *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, 2002, **83**(36): 393-394

[3] ANDERSON P C, CARPENTER D L, TSURUDA K, *et al*. Multisatellite observations of rapid subauroral ion drifts (SAID)[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2001, **106**(A12): 29585-29600

[4] HUANG C S, FOSTER J C. Correlation of the Subauroral Polarization Streams (SAPS) with the Dst index during severe magnetic storms[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2007, **112**(A11): A11302

[5] ERICKSON P J, BEROZ F, MISHION M Z. Statistical characterization of the American sector subauroral polarization stream using incoherent scatter radar[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2011, **116**(A5): A00J21

[6] HE F, ZHANG X X, WANG W B, *et al*. Different evolution patterns of Subauroral Polarization Streams (SAPS) during intense storms and quiet time substorms[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, **44**(21): 10796-10804

[7] FOSTER J C, VO H B. Average characteristics and activity dependence of the subauroral polarization stream[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2002, **107**(A12): 1475

[8] ANDERSON P C, HEELIS R A, HANSON W B. The ionospheric signatures of rapid subauroral ion drifts[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1991, **96**(A4): 5785-5792

[9] ERICKSON P J, GONCHARENKO L P, NICOLLS M J, *et al*. Dynamics of North American sector ionospheric and thermospheric response during the November 2004 superstorm[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2010, **72**(4): 292-301

[10] FIGUEIREDO S, KARLSSON T, MARKLUND G T. Investigation of subauroral ion drifts and related field-aligned currents and ionospheric Pedersen conductivity distribution[J]. *Annales Geophysicae*, 2004, **22**(3): 923-934

[11] KUNDURI B S R, BAKER J B H, RUOHONIEMI J M, et al. An examination of inter-hemispheric conjugacy in a subauroral polarization stream[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2012, **117**(A8): A08225

[12] CALIFF S, LI X, WOLF R A, *et al*. Large-amplitude electric fields in the inner magnetosphere: Van Allen Probes observations of subauroral polarization streams[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2016, **121**(6): 5294-5306

[13] ZHENG Y, BRANDT P C, LUI A T Y, *et al*. On ionospheric trough conductance and subauroral polarization streams: simulation results[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2008, **113**(A4): A04209

[14] YEH H-C, FOSTER J C. Storm time heavy ion outflow at mid-latitude[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1990, **95**(A6): 7881-7891

[15] SPIRO R W, HEELIS R A, HANSON W B. Rapid subauroral ion drifts observed by atmosphere explorer C[J]. *Geophysical Research Letters*, 1974, **6**(8): 657-660

[16] YU Y, JORDANOVA V, ZOU S, *et al*. Modeling subauroral polarization streams during the 17 March 2013 storm[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2015, **120**(3): 1738-1750

[17] BURKE W J, RUBIN A G, MAYNARD N C, *et al*. Ionospheric disturbances observed by DMSP at middle to low latitudes during the magnetic storm of June 4–6, 1991[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2000, **105**(A8): 18391-18405

[18] PUHL-QUINN P A, MATSUI H, MISHIN E V, *et al*. Cluster and DMSP observations of SAID electric fields[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2007, **112**(A5): A05219

[19] SOUTHWOOD D J, WOLF R A. An assessment of the role of precipitation in magnetospheric convection[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1978, **83**(A11): 5227-5232

[20] KARLSSON T, MARKLUND G T, BLOMBERG L G. Subauroral electric fields observed by the Freja satellite: A statistical study[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1998, **103**: 4327-4341

[21] WANG H, RIDLEY A J, LUHR H, *et al*. Statistical study of the subauroral polarization stream: Its dependence on the cross –polar cap potential and subauroral conductance[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2008, **113**(A12): A12311

[22] HE F, ZANG X X, WANG W B, *et al*. Large-scale structure of subauroral polarization streams during the main phase of a severe geomagnetic storm[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2018, **123**(4): 2964-2973

[23] GROCOTT A, MILAN S E, BAKER J B H, *et al*. Dynamic subauroral ionospheric electric fields observed by the Falkland Islands radar during the course of a geomagnetic storm[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2011, **116**(A11): A112021

[24] KATAOKA R, HOSOKAWA K, NISHITANI N, *et al*. SuperDARN Hokkaido radar observation of westward flow enhancement in subauroral latitudes[J]. *Annales Geophysicae*, 2009, **27**(4): 1695-1699

[25] TSYGANENKO N A, SITNOV M I. Modeling the dynamics of the inner magnetosphere during strong geomagnetic storms[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2015, **110**(A3): A03208

[26] SMIDDY M, SAGALYN R, SHUMAN B, *et al*. Intense poleward-directed electric fields near the ionospheric projection of the plasmapause[J]. *Geophysical Research. Letters*, 1977, **4**(11): 543-546

[27] MAYNARD N C. On large poleward-directed electric fields at sub-auroral latitudes[J]. *Geophysical Research. Letters*, 1978, **5**(7): 617-618

[28] SPIRO R W, HEELIS R A, HANSON W B. Ion convection and the formation of the mid-latitude F region ionization trough[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1978, **83**(A9): 4255-4264

[29] FOSTER J C, RIDEOUT W, SANDEL B, *et al*. On the relationship of SAPS to storm enhanced density[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2007, **69**(3): 303-313

[30] GOLDSTEIN J, SANDEL B R, THOMSEN M F, *et al*. Simultaneous remote sensing and in situ observations of plasmaspheric drainage plumes[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2004, **109**(A3): A03202

[31] FOSTER J C, ERICKSON P J, COSTER A J, *et al*. Storm time observations of plasmasphere erosion flux in the magnetosphere and ionosphere[J]. *Geophysical Research. Letters*, 2014, **41**(3): 762-768

[32] THOMAS E G, BAKER J B H, RUOHONIEMI J M, et al. Direct observations of the role of convection electric field in the formation of a polar tongue of ionization from storm enhanced density[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2013, **118**(3): 1180-1189

[33] WANG H, LUHR H. Seasonal variation of the ion upflow in the topside ionosphere during SAPS (subauroral polarization stream) periods[J]. *Annales Geophysicae*, 2013, **31**: 1521-1534

[34] MOFFET R J, HEELIS R A, SELLEK R, *et al*. The temporal evolution of the ionospheric signatures of subauroral ion drifts[J]. *Planetary and Space Science*, 1992, **40**(5): 663-670

[35] HORVATH I, BRIAN C L. Investigating the development of double-peak subauroral ion drift (DSAID)[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2017, **122**(4): 4525-4542

[36] ENDO M, FUJII R, OGAWA Y, *et al*. Ion upflow and downflow at the topside ionosphere observed by the EISCAT VHF radar[J]. *Annales Geophysicae*, 2000, **18**: 170-181

[37] FOSTER J C. Storm time plasma transport at middle and high latitudes[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1993, **98**(A2): 1675-1689

[38] ZOU S S, MOLDWIN M B, RIDLEY A J, *et al*. On the generation/decay of the storm-enhanced density plumes: Role of the convection flow and field-aligned ion flow[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2014, **119**(10): 8543-8559

[39] RICH F J, HAIRSTON M. Large-scale convection patterns observed by DMSP[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1994, **99**(A3): 3827-3844

[40] GREENSPAN M E, ANDERSON P B, PELAGATTI J M. Characteristics of the Thermal Plasma Monitor (SSIES) (Special Sensor for Ions, Electrons, and Scintillation) for the Defense Meteorological Satellite Program (DMSP) Spacecraft S8 through S10[R]. Bedford: Air Force Geophysics Laboratory, Hanscom Air Force Base, 1986

[41] HARDY D A, SCHMITT L K, GUSSENHOVEN M S, *et al*. Precipitating electron and ion detectors (SSJ/4) for the block 5 D/flights 6-10 DMSP satellites: Calibration and data presentation[R]. Bedford: Air Force Geophysics Laboratory, Hanscom Air Force Base, 1984

[42] HE F, ZHANG X X, CHEN B. Solar cycle, seasonal, and diurnal variations of subauroral ion drifts: Statistical results[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2014, **119**(6): 5076-5086

(责任编辑: 孙伟英)