0254-6124/2022/42(1)-0044-07 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

REN Ganming, CAO Jinbin, MA Yuduan. Response of Substorm Onset Location and Expansion Phase Duration to Interplanetary Magnetic Field B_z (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2022, **42**(1): 44–50. DOI:10.11728/cjss2022.01.201112099

亚暴起始位置和膨胀相持续时间对行星际磁场 B_z 分量的响应*

任干明[1] 曹晋滨[1,2] 马玉端[1,2]

1(北京航空航天大学空间与环境学院 北京 102206)

2(空间环境监测与信息处理工业和信息化部重点实验室 北京 102206)

摘 要 磁层亚暴是太阳风–磁层–电离层耦合过程中的重要爆发性事件，其特性受太阳风参数的影响很大。本文利用对 IMAGE 卫星在 2000—2005 年观测到的 4193 个亚暴起始事件，统计研究了在不同的行星际磁场（IMF）B_z 条件下亚暴起始位置和膨胀相持续时间。结果表明，南向 IMF 发生的亚暴比北向 IMF 下发生的亚暴要多。南向 IMF 条件下亚暴 *AE* 指数最大值的平均值基本上>600 nT，并有随南向 IMF 持续时间增大而增大的趋势。北向 IMF 条件下亚暴 *AE* 指数最大值的平均值基本上<500 nT，并有随北向 IMF 持续时间增大而减小的趋势。亚暴的起始磁纬度基本上位于 65°—70°之间。当南向 IMF 或北向 IMF 的持续时间增大，超过 80 min 时，北半球的亚暴起始磁纬度会降低。亚暴起始磁地方时大部分位于 22:15—23:15 MLT 之间。但整体分布比较分散，显示不出特别清晰的随 IMF B_z 持续时间变化的趋势。相比于南向的 IMF，北向 IMF 期间发生亚暴的平均膨胀相持续时间增大了将近 10 min，表明南向 IMF 期间，亚暴强度虽然较大，但其膨胀相持续时间较短，亚暴能量释放和耗散的速度更快。

关键词 亚暴起始，磁地方时，磁纬度，膨胀相持续时间

中图分类号 P353

Response of Substorm Onset Location and Expansion Phase Duration to Interplanetary Magnetic Field B_z

REN Ganming[1] CAO Jinbin[1,2] MA Yuduan[1,2]

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

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

Abstract A magnetospheric substorm is a significant process in solar wind-magnetosphere- ionosphere

* 国家自然科学基金项目资助（41821003）

2020-11-12 收到原稿，2021-07-31 收到修定稿

E-mail: jbcao@buaa.edu.cn

coupling. Substorm onset locations have a great dependence of solar wind parameters. Based on 4193 auroral breakup events identified by Frey *et al.* from about 5 years IMAGE FUV data, we statistically study the distribution of substorm onset locations and substorm expansion duration time under different Interplanetary Magnetic Field (IMF) conditions in southern and northern hemispheres. It is found that the occurrence rate of a substorm is relatively bigger under southward IMF than northward IMF. The maximum value of substorm *AE* index is above 600 nT under southward IMF, and increases with the evolution of southward IMF lasting time. While the maximum value of substorm *AE* index is beneath 500 nT under northward IMF, and decreases with the evolution of northward IMF lasting time. The substorm onset magnetic latitude is around 65°—70°. With the lasting time of northward/southward IMF exceeding 80 minutes, the substorm onset magnetic latitude in the northern hemisphere lower with the evolution of IMF lasting time. The substorm onset is around 22:15—23:15 MLT. It's irregular under different IMF lasting time. The average expansion time of substorm is about 10 minutes larger under northward IMF than southward IMF. It indicates that the speed of substorm energy release and dissipation is faster under southward IMF with intense substorms.

Key words Substorm onset, Magnetic local time, Magnetic latitude, Expansion duration time

0 引言

磁层亚暴是太阳风–磁层–电离层耦合系统中的重要能量释放和耗散事件。磁层亚暴会经历增长相, 膨胀相和恢复相三个阶段。在增长相期间, 磁层对流增强, 太阳风输入磁层的能量以磁场的形式储存在尾瓣中[1]。增长相持续时间, 大约为 30～90 min[2]。磁尾持续积累的能量在膨胀相会以磁场重联方式突然释放出来。在膨胀相起始(通常也被直接称为亚暴起始)时, 极光强度会突然增加[3], 极光椭圆会出现极向和西向漂移[4,5]。在膨胀相的过程中, 越尾电流中断, 转为场向电流进入电离层, 并形成亚暴电流楔[6]。当极光强度开始下降时, 标志着亚暴进入恢复相。亚暴起始时间的确定对亚暴不同过程的时间区分尤为重要。已有很多研究通过地磁台站和极光图像确定了一系列的亚暴起始事件[7-10], 以这些事件为基础, 前人做了许多统计性的工作来研究亚暴起始的位置与太阳风参数的关系[11-13]。

观测研究表明, 极光爆发通常发生在磁地方时(Magnetic Local Time, MLT)午夜前 1～2 h[7, 11], 但在磁纬度 55°—75°、磁地方时 19:00—03:00 MLT 的区域也能观察到。Liou 等[7] 通过 POLAR 卫星分析了 648 个位于北半球的极光爆发事例(Auroral breakup), 发现行星际磁场(IMF)B_z 对极光爆发的纬度分布影响很大, 但极光爆发的磁地方时主要在 22:00—23:00 MLT 之间。Frey 等[8] 利用 IMAGE 卫星统计了位于北半球的 2400 多个亚暴起始事例, 得出亚暴起始磁地方时的中值为 23:00 MLT, 磁纬度的中值为 66.4° 。同样, 通过 IMAGE 获得的极光图像, Wang 等[13] 发现在北半球, 夏季极光爆发的地方时早一些, 而冬季极光爆发的地方时则晚一些。在南半球, 这个规律则相反。

Østgaard 等[12, 14] 也发现了亚暴起始的分布在南北半球的不对称性, 尽管其研究的事例有限(15 个), 但结果清晰地表现出不对称性与行星际磁场的转向相关。不对称性与行星际磁场时钟角(在 GSM 坐标系下, 行星际磁场在 yz 平面的投影与 z 轴的夹角)具有相关性。基于 2000—2004 年的 3700 多个亚暴起始事件, Østgaard 等证实行星际磁场的时钟角会显著造成亚暴起始位置的南北半球不对称性[15]。Liou 等[16] 统计研究了 POLAR 卫星在 1996—2000 期间, 以及 2007 年观测到的 2539 个亚暴起始事件, 发现行星际磁场的时钟角与亚暴起始的磁地方时在北半球有较强的正相关性, 相关系数为 0.65, 而在南半球则没有相关性。Østgaard 等[17] 通过更多的亚暴事例(POLAR 卫星于 1996—2000 年, 2007 年; IMAGE 卫星于 2000—2005 年, 共计 6731 个亚暴起始事件)对行星际磁场参数与亚暴起始位置进行了研究。Østgaard 等[17] 研究发现行星际磁场的时钟角与磁地方时的关系并不是线性的, 而是更接近于正弦函数, 在北半球

两者的拟合系数达到了 0.98, 而在南半球则是 0.96。

本文利用 IMAGE 卫星在 2000—2005 年观测到的 4193 个亚暴起始事件, 统计研究亚暴起始位置在不同的行星际磁场 B_z 条件下的分布和南北半球的不对称性, 以及亚暴膨胀相持续时间与行星际磁场 B_z 南向/北向持续时间的关系。研究结果会有助于更好地理解行星际磁场 B_z 分量与亚暴的关系。

1 事件选取

分析使用的数据来源于 IMAGE 卫星上 FUV 仪器在 2000—2005 年观察到的 4193 个亚暴起始事件[8, 18]。行星际磁场和太阳风的数据主要来源于 OMNI 数据库, 时间精度为 1 min。OMNI 的数据通过时间平移到地球的弓激波附近。由于太阳风从弓激波传播到地球夜侧(约为$x = -10R_e$附近, 即夜侧距地心 10 个地球半径的位置)有时间延迟, 因此这里将 OMNI 数据再度平移到亚暴起始前 T 分钟。在以往的研究中, 这个延迟时间的取值从 30～60 min 不等[19-21]。例如, Østgaard 等[17] 研究行星际磁场引起亚暴起始位置的南北半球不对称性时, 就将数据从$x = 17R_e$平移到$x = -10R_e$处, 延迟时间为 40 min。Liou 等[16] 研究行星际磁场的方位角对极光爆发位置的影响时, 选取的延迟时间是 45 min。而 Wang 等[13] 在太阳风参数对亚暴起始影响的研究中, 选取的延迟时间是 60 min。为了探究亚暴起始位置对行星际B_z分量的可能响应时间, 这里设定 T的取值分别为 25 min、30 min、35 min、40 min、45 min、50 min、55 min。

由于本文主要是研究亚暴起始位置与行星际磁场B_z分量持续时间的相关性, 因此将北向/南向 IMF 的持续时间分为 15 个区间, 分别是 0～10 min、10～20 min、20～30 min、30～40 min、40～50 min、…、130～140 min、140～150 min。在研究中, 将 IMF 北向转向/南向转向的开始时间设置为持续时间的初始时间。有些时候, 北向/南向的 IMF 并非连续向北/向南, 并且可能会在短时间内向南/向北扰动。这里忽略了 IMF 的这些短时间和小幅度的扰动, 并认为在扰动时间与整个持续时间之比平均小于 13% 的条件下, 北向/南向 IMF 是连续的。

2 统计与分析

将数据划分成 15 个区间后, 分别对 15 个区间的数据取平均值。对于设定的每一个延迟时间, 对磁地方时和磁纬度关于北向/南向 IMF 持续时间进行相关性分析, 并计算相应的相关系数。表 1展示了在不同的延迟时间, 亚暴起始(分别发生在南/北半球)的磁纬度与南向/北向 IMF 持续时间的相关系数。表 1 的最后一列给出了每个类别相关系数的平均值。无论是南向 IMF 还是北向 IMF, 在北半球亚暴起始的磁纬度与北向/南向 IMF 持续时间都有很好的相关性。但在南半球相关性相对较低。这个观点与以前南北不对称性的结论是类似的。但是进一步分析表明南向 IMF 和北向 IMF 期间, 北半球相关性与延迟时间的关系是不一样的。北向 IMF 磁场期间, 当延迟时间小于 40 min 时, 北半球的相关性较高, 最高时

表 1 不同延迟时间情况下北半球和南半球亚暴起始磁纬度与南向/北向 IMF 持续时间的相关系数

Table 1 Correlation coefficient of substorm onset magnetic latitude in southern/northern hemisphere and southward/northward IMF duration under different shifted time

Shifted time/min	Northward IMF		Southward IMF	
	Northern hemisphere	Southern hemisphere	Northern hemisphere	Southern hemisphere
25	–0.53	0.14	–0.77	0.37
30	–0.45	0.07	–0.62	0.42
35	**–0.64**	**–0.11**	**–0.81**	**–0.05**
40	–0.58	–0.14	–0.68	0.24
45	–0.04	0.28	–0.81	0.03
50	–0.08	0.34	–0.62	0.21
55	0.13	0.34	–0.71	0.01
Average	–0.37	0.19	–0.72	0.18

达到–0.64。但是当延迟时间超过 40 min，北半球的相关性基本消失。南向 IMF 磁场期间，在选取的所有延迟时间内，北半球的相关性一直较大(–0.62 ～ –0.81)。考虑到上述结果，本文选定延迟时间为 35 min。

图 1 表示的是不同的南/北向 IMF 持续时间下发生的亚暴事例数目。最两侧区间的亚暴个数包含了行星际磁场持续时间>140 min 下发生的所有亚暴。大部分的亚暴事例都处于南向或者北向 IMF

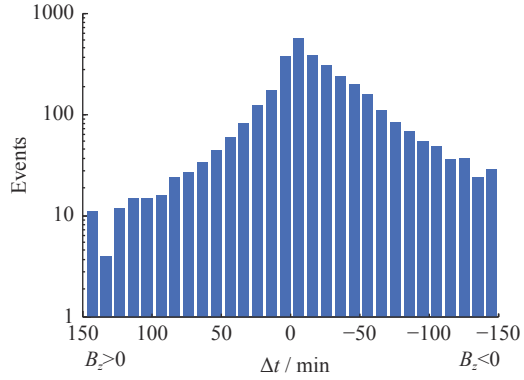


图 1　南向 IMF（B_z <0）/北向 IMF（B_z>0）的不同持续时间下发生的亚暴事件数

Fig. 1　Substorm events under different southward/northward IMF duration

持续时间比较短的区间内，$|\Delta t|$ <50 min 区间内的事例数占比为 75%，当区间扩大到$|\Delta t|$ <100 min，事例占比变为 93%。南向 IMF 持续时间下发生的亚暴比同样持续时间的北向 IMF 下发生的亚暴要多，这与以往亚暴往往发生在南向 IMF 条件下的结论一致[7]。但同时也表明即使在北向 IMF 持续时间很长的情况下，亚暴也能发生[22-26]。

图 2 表示的是不同的南/北向 IMF 持续时间下，南/北半球亚暴起始的磁纬度。亚暴起始的磁纬度基本上位于 65°—70°之间。在南向 IMF 或北向 IMF 的持续时间小于 80 min 的范围内，北半球亚暴起始磁纬度位于 66°附近。 随着南向 IMF 或北向 IMF 的持续时间增大，超过 80 min 时，北半球亚暴起始磁纬度会降低，向赤道方向移动。这一点在行星际磁场北向的条件下尤为明显。而无论是在南向 IMF 条件下还是在北向 IMF 条件下，南半球亚暴起始磁纬度与 IMF 持续时间都没有清晰的关系。这个结果表明了亚暴起始位置磁纬度随 IMF 持续时间的分布在南北半球是不对称的。

图 3 给出了不同的南/北向 IMF 持续时间下，南/北半球亚暴起始的磁地方时平均值。可以看出亚暴

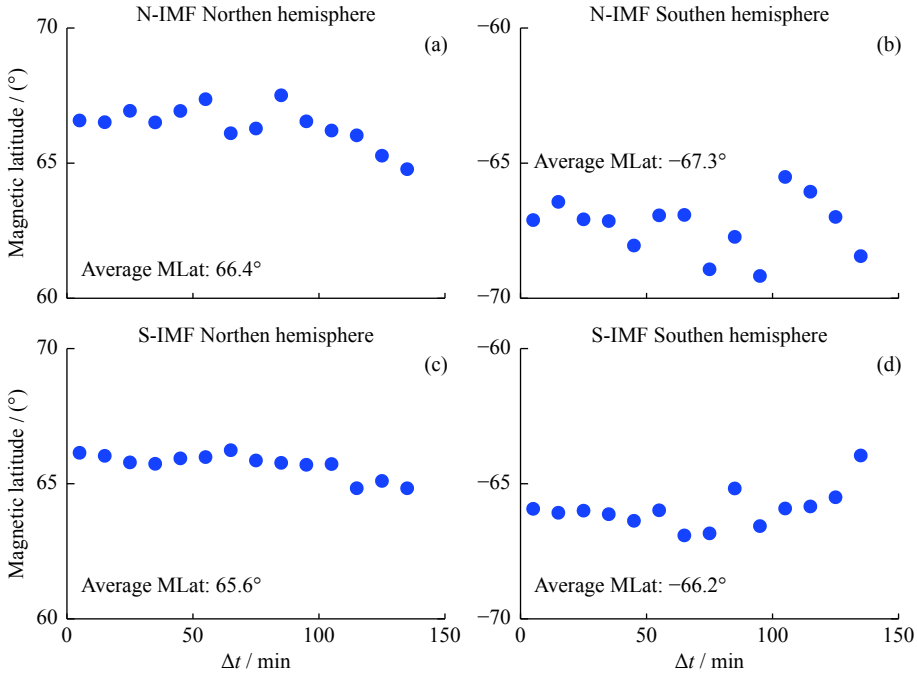


图 2　在不同南向/北向 IMF 持续时间下北半球和南半球亚暴起始磁纬度的分布

Fig. 2　Means of magnetic latitude in northern/southern hemisphere under different southward/northward IMF duration

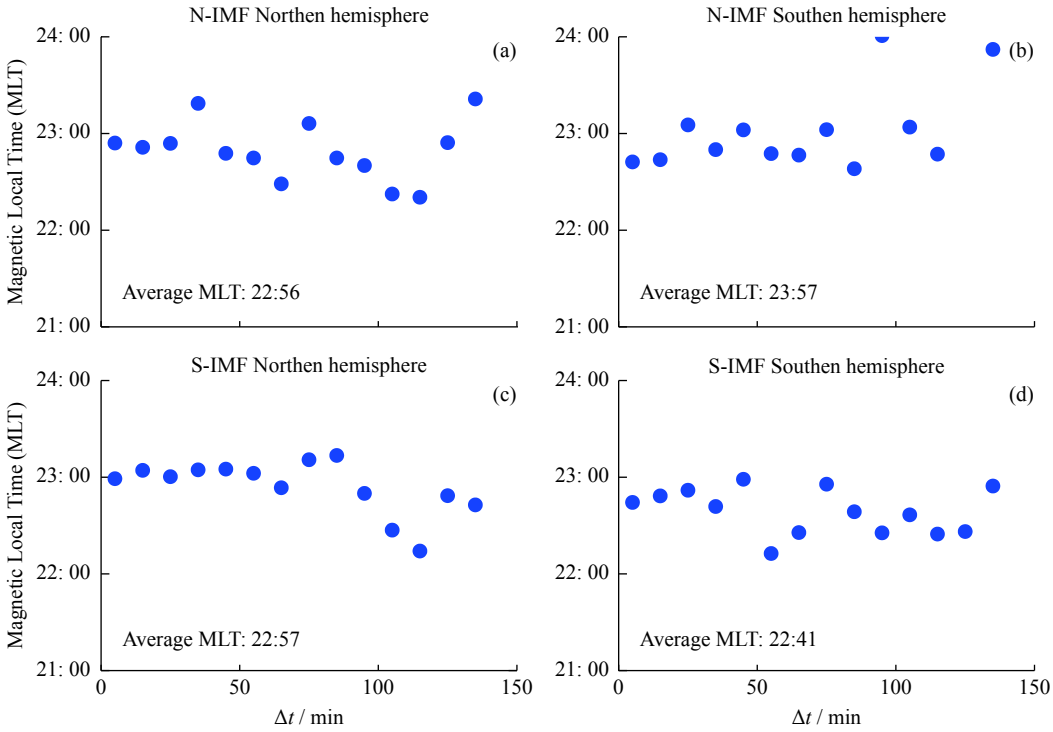


图 3 在不同南向/北向 IMF 的持续时间下北半球和南半球亚暴起始磁地方时的分布

Fig. 3 Means of magnetic local time in northern/southern hemisphere under different southward/northward IMF duration

起始磁地方时大部分位于 22:15—23:15 MLT。但整体分布比较分散，显示不出特别清晰的随 IMF B_z 持续时间变化的趋势。个别时间点上，亚暴起始磁地方时的突变可能与区间样本数不够大有关。例如在北向持续时间 130 min 时，亚暴起始磁地方时平均值甚至跳到了 24:00 MLT 附近。

图 4 给出了不同南向/北向 IMF 持续时间下每个区间亚暴 AE 指数最大值的平均值。南向 IMF 条件下亚暴 AE 指数最大值的平均值比北向 IMF 条件下亚暴 AE 指数最大值的平均值普遍要大。南向 IMF 条件下亚暴 AE 指数最大值的平均值基本上>600 nT，并有随南向 IMF 持续时间增大而增大的趋势。北向 IMF 条件下亚暴 AE 指数最大值的平均值基本上<500 nT，并有随北向 IMF 持续时间增大而减小的趋势。这说明虽然北向行星际磁场期间也有亚暴发生，但是整体来说其亚暴强度明显要低于南向行星际磁场期间发生的亚暴。当然，上述结果是统计性的结果，也不排除北向行星际磁场期间较强亚暴发生的可能性。通过亚暴起始的时间和亚暴 AE 指数最大值的时间，可以计算出亚暴膨胀相持续时间，$\Delta T = T_{AE\max} - T_{\mathrm{Onset}}$ [27]。图 5 给出了不同行星际磁场条件下(北向 N-IMF 和南向 S-IMF)，分别发生在南/北半球的亚暴膨胀相持续时间(Expansion Phase Duration, EPD)的平均值。北向 IMF 期间亚暴膨胀相持续时间普遍大于南向 IMF 期间亚暴膨胀相持续时间。在北向 IMF 条件下，发生在北半球的亚暴膨胀相持续时间平均为 52 min，发生在南半球的亚暴

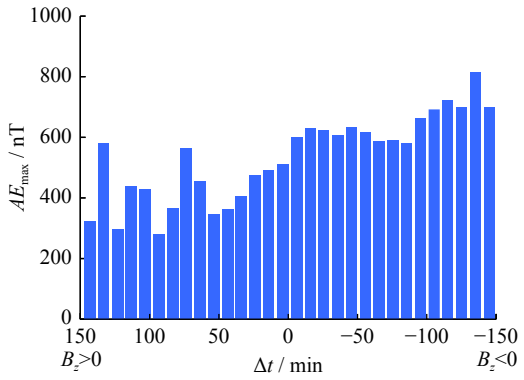


图 4 不同南向 IMF（B_z <0）/北向 IMF（B_z>0）持续时间下亚暴 AE 指数最大值的平均值

Fig. 4 Means of maximum substorm AE index under different southward/northward IMF duration

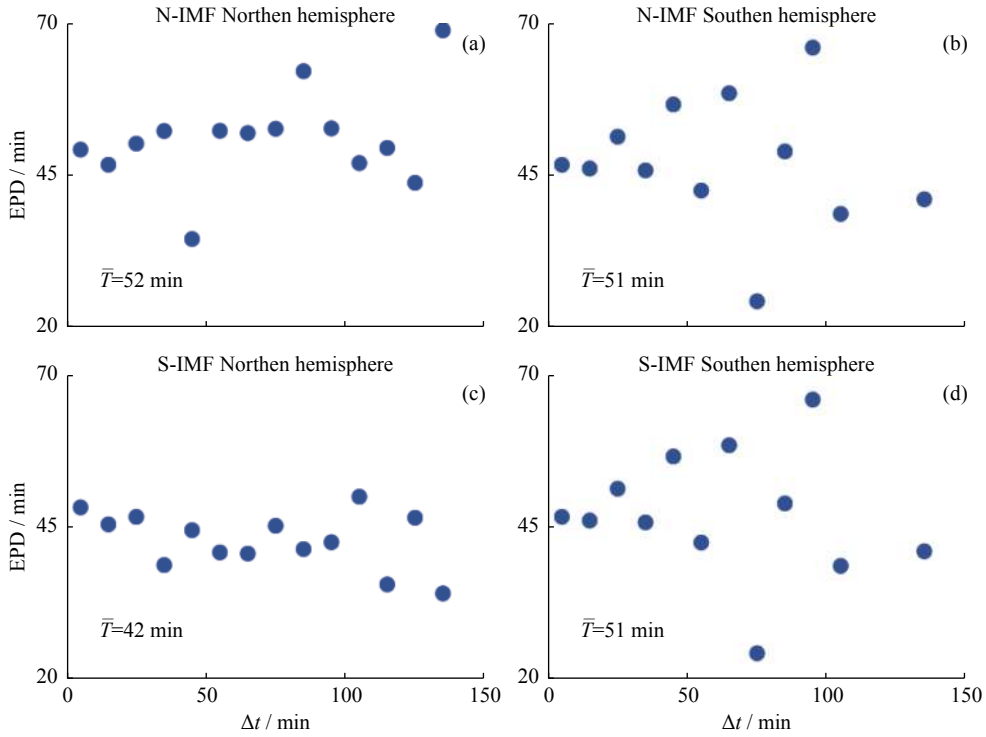


图 5　在不同南向/北向 IMF 持续时间下北半球和南半球亚暴膨胀相持续时间的分布

Fig. 5　Means of expansion phase duration in northern/southern hemisphere under different southward/northward IMF duration

膨胀相持续时间平均为 51 min。而在南向 IMF 条件下，发生在北半球的亚暴膨胀相持续时间平均为 42 min，发生在南半球的亚暴膨胀相持续时间平均为 39 min。因此相比于南向的 IMF，北向 IMF 期间发生亚暴的平均膨胀相持续时间增大了将近 10 min。这说明南向 IMF 期间，亚暴强度虽然较大，但其膨胀相时间持续较短，亚暴能量释放和耗散的速度更快。

3　结论

针对 IMAGE 卫星在 2000—2005 年间观察到的 4193 个亚暴起始事件，统计分析了在不同南/北向 IMF 持续时间下，发生在南/北半球极光亚暴起始的磁地方时、磁纬度以及膨胀相持续时间的特征，研究结果如下。

(1)南向 IMF 发生的亚暴比北向 IMF 发生的亚暴要多，但即使在北向 IMF 持续时间很长的情况下，亚暴也能发生。

(2)亚暴的起始磁纬度基本上位于 65°—70°之间。当南向 IMF 或北向 IMF 的持续时间增大，超过 80 min 时，北半球的亚暴起始磁纬度会降低，向赤道方向移动。这一点在行星际磁场北向的条件下尤为明显。南半球的亚暴起始磁纬度与南向和北向 IMF 的持续时间没有关系。

(3)亚暴起始磁地方时大部分位于 22:15—23:15 MLT 之间。但整体分布比较分散，显示不出特别清晰的随 IMF 持续时间变化的趋势。

(4)南向 IMF 条件下亚暴 AE 指数最大值的平均值基本上>600 nT，并有随南向 IMF 持续时间增大而增大的趋势。北向 IMF 条件下亚暴 AE 指数最大值的平均值基本上<500 nT，并有随北向 IMF 持续时间增大而减小的趋势。北向行星际磁场期间亚暴强度明显要低于南向行星际磁场期间亚暴强度。

(5)相比于南向 IMF，北向 IMF 期间发生亚暴的平均膨胀相持续时间多了将近 10 min。这说明南向 IMF 期间，亚暴强度虽然较大，但其膨胀相持续时间较短，亚暴能量释放和耗散的速度更快。

致谢　亚暴起始事例集由 Frey H U 和 Mende S B 提供。

参考文献

[1] AXFORD I W. Magnetospheric convection[J]. *Reviews of Geophysics*, 1969, 7 (1/2). DOI: 10.1029/rg007i001p00421

[2] LI H, WANG C, PENG Z, *et al*. Solar wind impacts on growth phase duration and substorm intensity: a statistical approach[J]. *Journal of Geophysical Research Space Physics*, 2013, **118**

[3] VORONKOV O I. Observations of the phases of the substorm[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, **108**(A2). DOI: 10.1029/2002 JA009314

[4] PARTAMIES N, JUUSOLA L, TANSKANEN E, *et al*. Statistical properties of substorms during different storm and solar cycle phases[J]. *Annales Geophysicae*, 2013, **31**(2): 349-358

[5] MCPHERRON R L. Growth phase of magnetospheric substorms[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1970, **75**(28). DOI: 10.1029/JA075 i028 p05592

[6] MCPHERRON R L, RUSSELL C T, AUBRY M P. Satellite studies of magnetospheric substorms on August 15, 1968: 1. State of the magnetosphere[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1973, **78**(16): 3044-3053

[7] LIOU K, NEWELL P T, SIBECK D G, *et al*. Observation of IMF and seasonal effects in the location of auroral substorm onset[J]. *Journal of Geophysical Research Space Physics*, 2001, **106**(A4): 5799

[8] FREY H U, MENDE S B, ANGELOPOULOS V. Substorm onset observations by IMAGE-FUV[J]. *Journal of Geophysical Research Space Physics*, 2004. DOI: 10.1029/2004JA010607

[9] NISHIMURA Y, LYONS L, ZOU S, *et al*. Substorm triggering by new plasma intrusion: THEMIS all-sky imager observations[J]. *Journal of Geophysical Research Space Physics*, 2010. DOI: 10.1029/2009 ja015166

[10] NEWELL P T, GJERLOEV J W. Evaluation of SuperMAG auroral electrojet indices as indicators of substorms and auroral power[J]. *Journal of Geophysical Research Space Physics*, 2011, 116(A12). DOI: 10.1029/2011 JA016779

[11] CRAVEN J D, FRANK L A. Diagnosis of auroral dynamics using global auroral imaging with emphasis on large-scale evolutions [R]. Iowa: Department of Physics and Astronomy, Iowa University, 1989

[12] ØSTGAARD N. Interplanetary magnetic field control of the location of substorm onset and auroral features in the conjugate hemispheres[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, **109**(A7). DOI: 10.1029/2003 JA010370

[13] WANG H, LUEHR H, MA S Y, *et al*. Interhemispheric comparison of average substorm onset locations: evidence for deviation from conjugacy[J]. *Annales Geophysicae*, 2007, **25**(4). DOI: 10.5194/angeo-25-989-2007

[14] ØSTGAARD N, TSYGANENKO N A, MENDE S B, *et al*. Observations and model predictions of substorm auroral asymmetries in the conjugate hemispheres[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, **32**(5): 347-354

[15] ØSTGAARD N, MENDE S B, FREY H U, *et al*. Auroral conjugacy studies based on global imaging[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2007, **69**(3): 249-255

[16] Liou K, Newell P T. On the azimuthal location of auroral breakup: Hemispheric asymmetry[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, **37**(23): 817-824

[17] ØSTGAARD N, LAUNDAL K M, JUUSOLA L, *et al*. Interhemispherical asymmetry of substorm onset locations and the interplanetary magnetic field[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, **38** (8). DOI: 10.1029/2011 GL046767

[18] FREY H U, MENDE S B. Substorm onsets as observed by IMAGE-FUV[C]//The 8 th International Conference on Substorms. Calgary: University of Calgary, 2006: 71-76

[19] MENG C I, TSURUTANI B, KAWASAKI K, *et al*. Cross-correlation analysis of the *AE* index and the interplanetary magnetic field B_z component[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1973, **78**(4): 617-629

[20] Arnoldy R L. Signature in the interplanetary medium for substorms[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1971, **76**(22): 5189-5201

[21] ROSTOKER G, LAM H L, HUME W D. Response Time of the Magnetosphere to the Interplanetary Electric Field[J]. *Canadian Journal of Physics*, 1972, **50**(6): 544-547

[22] NISHIDA A. Interplanetary origin of electric fields in the magnetosphere[J]. *Cosmic Electrodynamics*, 1971, **2**: 350-74

[23] AKASOFU S I, PERREAULT P D, YASUHARA F, *et al*. Auroral substorms and the interplanetary magnetic field[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1973, **78**(31): 7490-7508

[24] PETRUKOVICH A A, BAUMJOHANN W, NAKAMURA R, *et al*. Small substorms: Solar wind input and magnetotail dynamics[J]. *Journal of Geophysical Research Space Physics*, 2000, **105**(A9): 21109-21117

[25] LUI A T Y, AKASOFU S I, HONES E W, *et al*. Observation of the plasma sheet during a contracted oval substorm in a prolonged quiet period[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1976, **81**(7): 1415-1419

[26] KAMIDE Y, PERREAULT P D, AKASOFU S I, *et al*. Dependence of substorm occurrence probability on the interplanetary magnetic field and on the size of the auroral oval[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1977, **82**(35): 5521-5528

[27] BAKER D N, PULKKINEN T I, ANGELOPOULOS V, *et al*. Neutral line model of substorms: Past results and present view[J]. *Journal of Geophysical Research Space Physics*, 1996, **101**(A6): 12975-13010

(责任编辑：孙伟英)