

佟亚男, 刘四清, 张效信等. 磁暴主相多阶发展行星际起因的初步分析. 地球物理学报, 2011, **54**(6): 1439~1456, DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.06.004

Tong Y N, Liu S Q, Zhang X X, et al. Primary analysis on the interplanetary cause of multistep magnetic storms. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, **54**(6): 1439~1456, DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.06.004

磁暴主相多阶发展行星际起因的初步分析

佟亚男^{1,2}, 刘四清¹, 张效信³, 林瑞淋¹, 龚建村¹

1 中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100190

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

3 中国气象局国家空间天气监测预警中心, 北京 100081

摘 要 本文利用 1998~2006 年与磁云有关的 80 起中强磁暴 ($Dst^* \leq -50$ nT), 对其主相期间不同发展阶数磁暴的行星际起因进行了统计分析. 重点研究了鞘区磁场单独作用、磁云本体单独作用、鞘区与磁云共同作用以及其他复杂行星际结构在磁暴主相多阶发展中的相对重要性, 并对导致磁暴主相增加一阶的行星际起因做了初步分析. 统计结果表明: (1) 有一半以上的中强磁暴主相具有多个发展阶段, 其中一阶磁暴和多阶磁暴 (包括二阶和二阶以上磁暴) 在中等磁暴 (-100 nT $< Dst^* \leq -50$ nT) 中所占比例分别为 53.8% 和 46.2%, 在强磁暴 ($Dst^* \leq -100$ nT) 中所占比例分别为 42.6% 和 57.4%; (2) 随着磁暴主相发展阶数的增加, 磁暴主相的平均持续时间也随之延长; (3) 鞘区磁场单独作用、磁云本体单独作用、鞘区与磁云共同作用、磁云与其他行星际结构共同作用都可能引起磁暴主相的多阶发展; (4) 有 46.5% 的多阶磁暴是由鞘区磁场与磁云本体共同作用引起, 有 34.9% 的多阶磁暴是由鞘区磁场单独作用和磁云本体单独作用引起, 其余的多阶磁暴是由其他复杂行星际结构引起; (5) 在鞘区磁场单独作用的事件中, 鞘区磁场结构是影响磁暴主相多阶发展的重要因素之一; (6) 磁暴主相的多阶发展与晨昏电场 E_y 、行星际磁场 B_z 南向分量的发展密切相关, 随着 E_y 和 B_z 阶段性的发展, 磁暴主相也呈现多阶发展的趋势, 且每阶 Dst^* 极小值与该阶 $E_{y\max}$ 和 $B_{z\min}$ 有很好的线性相关性, 线性耦合方程分别为 $Dst_{\min}^* = -34.62 - 11.89 \times E_{y\max}$ 和 $Dst_{\min}^* = -5.90 + 8.50 \times B_{z\min}$.

关键词 多阶磁暴, Dst 指数, 磁云, 行星际磁场南向分量, 行星际电场

DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.06.004

中图分类号 P353

收稿日期 2010-05-19, 2011-05-12 收修定稿

Primary analysis on the interplanetary cause of multistep magnetic storms

TONG Ya-Nan^{1,2}, LIU Si-Qing¹, ZHANG Xiao-Xin³, LIN Rui-Lin¹, GONG Jian-Cun¹

1 The Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 China Meteorological Administration and National Center for Space Weather Monitoring and Warning, Beijing 100081, China

Abstract Using eighty moderate intense geomagnetic storms ($Dst^* \leq -50$ nT) induced by MCs from 1998 to 2006, we statistically examined the relations between the geomagnetic storms development in different steps during the main phases and their interplanetary sources. This paper has analyzed the relative importance of sheath region magnetic field ahead of MC, MC itself, the combination of sheath and MC, and other complicated interplanetary structures in the associated multistep storms, and the interplanetary drivers leading to Dst^* index further decrease were also investigated. It is found that: (1) above 1/2 moderate intense storms have a two-step

or more than two steps development during their main phases (called multiple-step storms), and the percentages of one-step storms and multistep storms in the moderate storms ($-100 \text{ nT} < Dst^* \leq -50 \text{ nT}$) are 53.8% and 46.2%, and in intense storms ($Dst^* \leq -100 \text{ nT}$) the percentages are 42.6% and 57.4% respectively; (2) with the step number increases, the average duration of main phase is also prolonged; (3) sheath field itself, MC itself, the combination of sheath and MC, and other complicated interplanetary structures all can lead to multistep storms; (4) 46.5% of multistep storms were induced by the combinations of sheath and MC fields, 34.9% of multistep storms were induced by sheath field itself or MC itself, and the others were induced by the complicated interplanetary structures. (5) in the magnetic storms induced by the sheath region, the magnetic structures of sheath field were closely related to the development of the main phases; (6) the multistep storms have close relation to the intermittent development of the interplanetary southward component of magnetic field (B_z) and y component of electric field (E_y), and the prediction relationships for every step Dst_{\min}^* and the $E_{y\max}/B_{z\min}$ during the step are: $Dst_{\min}^* = -34.62 - 11.89 \times E_{y\max}$ and $Dst_{\min}^* = -5.90 + 8.50 \times B_{z\min}$.

Keywords Multiple step storm, Dst index, Magnetic cloud, Interplanetary south magnetic field, Interplanetary electric field

1 引言

磁暴是地球空间环境扰动的重要表现形式之一,长期以来一直是人们研究的重要课题.磁暴主要是由行星际磁场 B_z 南向分量扫过地球时,导致相应的西向环电流增强而引起的. Cane 等^[1]统计结果表明,行星际磁场 B_z 南向分量与 Dst_{\min} 有较好的相关性,相关系数为 0.74. 此外,行星际电场 ($E_y = -VB_z \times 10^{-3}$) 与 Dst 指数也有很好的相关性,并且在强磁暴期间,行星际电场的突变特征相对于 V 、 V^2 、 B_z 、 VB^2 和能量耦合函数 ϵ 具有更易识别的特征^[2]. Wu 和 Lepping^[3]统计分析了从 1995~1998 年的 Wind 数据,再次证实了 $B_{z\min}$ 、 $VB_{z\min}$ 与 Dst_{\min} 有很好的相关性,相关系数分别为 0.81 和 0.87. 然而,相同强度的磁暴其形态可以很不相同,磁暴形态的差异实际上反应了引起磁暴的源和物理过程的差异. 目前,人们越来越重视对磁暴形态的研究,例如 Dst 指数是如何达到最小值的. 最先注意到这一问题的是 Kamide 等^[4],他们将磁暴按主相的发展阶段分为两类,一类是只有一个发展阶段(“one-step storm”,一阶磁暴),另一类是有两个发展阶段(“two-step storm”,二阶磁暴),也就是说在环电流未恢复至暴前水平之前,又有新的粒子注入导致环电流的进一步增强. 然而,磁暴主相除了有一阶和二阶发展外,还有更多阶的发展^[5]. 目前,主相为二阶及二阶以上发展的磁暴被统称为多阶磁暴

(“multiple-step storm”). 在磁暴物理机制研究过程中,主相多个发展阶段的思想有着重要意义,可以解释背景磁层的弱扰动和 B_s 及 VB_s 剧烈波动对磁暴强弱的影响^[2].

磁云(MC)被认为是日冕物质抛射(CME)的一种产物,即行星际 CME(ICME)的一种. 磁云有三个基本特征:增强的磁场、磁场方向有着大而平滑的旋转,以及低的质子温度^[6]. 统计研究表明,将近有一半的 ICME 是磁云^[7],由于磁云经常携带较强且持续时间较长的磁场南向分量,因此对地磁活动有显著影响, Echer 等^[8]统计分析了 1966~2001 年 149 个磁云的对地有效性,发现有 97% 的磁云引起 $Dst \leq -30 \text{ nT}$ 的地磁扰动,有 77% 的磁云引起 $Dst \leq -50 \text{ nT}$ 的中强磁暴,并且磁云的不同部分都可能引起磁暴的发生,包括激波与磁云之间的鞘区磁场、磁云本体的不同部分以及鞘区与磁云的共同作用^[3, 9],其中,鞘区磁场与磁云本体磁场的共同作用(“Sheath+MC”)被认为是引起二阶磁暴的重要原因^[3, 4]. 最新研究表明,由于磁云本体磁场南向分量的扰动,磁云本体磁场单独作用也可导致磁暴主相的多阶发展^[9],激波或高速流对 NS 型磁云尾部磁场南向分量的压缩作用也是导致磁暴强度进一步增强的重要原因之一^[10~12].

本文对 1998~2006 年与磁云相关的 80 起中强磁暴($Dst^* \leq -50 \text{ nT}$)进行了统计分析,根据引起磁暴行星际结构的不同,将引起磁暴的行星际起因分为如下四类:鞘区磁场单独作用、磁云本体单独作

用、鞘区与磁云共同作用、以及其他复杂的行星际结构(包括磁云+激波/高速流对磁云的压缩作用等),并进一步分析了不同行星际结构对磁暴主相发展的影响,以及磁暴主相的多阶发展对磁暴强度、主相持续时间的影响.同时,我们对导致磁暴主相增加一阶的行星际条件做了初步的定量分析.

2 数据来源与分析方法

本文运用的太阳风数据来自 ACE 卫星, Dst 指数来自地磁数据中心.根据磁云的基本特征,我们从 Zhang 等^[9]1998 年 1 月~2002 年 4 月磁云列表和 Gopalswamy 等^[13]1996~2005 年的磁云列表中挑选出数据完整且引起地磁扰动 $Dst^* \leq -50$ nT 的 80 起事件,并参考了前人关于引起磁暴的行星际源的研究成果^[14, 15].磁云边界的确定采用 Wei 等^[16]的方法,以温度、密度和等离子体 β 参数的“三高”状态以及磁场强度下降、磁倾角的突变作为划分磁云边界的标准.根据磁云本体磁场 B_z 分量旋转方向的不同,将磁云分为如下四类:SN 型、NS 型、S 型和 N 型磁云.

本文使用修正后的 Dst 指数,即去掉磁层顶电流对 Dst 指数的影响,数据处理公式如下:

$$Dst^* = Dst - b(nV^2)^{1/2} + c,$$

其中 $b=0.02$ nT/(cm⁻³·km²·s⁻²)^{1/2}, $c=20$ nT,太阳风密度 n 和速度 V 为小时分辨率数据.在计算压力修正后的 Dst^* 指数之前,太阳风密度 n 和速度 V 的观测数据分别平移 1 h^[9, 17].

根据磁暴主相发展阶数的不同,可以将磁暴划分为如下 3 类:一阶磁暴、二阶磁暴、三阶及三阶以上磁暴.参照前人^[3, 4, 18]对磁暴阶数的判断方法,本文采用如下标准来判断磁暴主相的发展阶数:(1)磁暴强度 $Dst^*_{\min} \leq -50$ nT;(2)相邻两阶磁暴峰值的时间间隔大于 3 h;(3)每阶磁暴的恢复值不超过磁暴强度的 90%;(4) Dst^* 指数第一次下降幅度大于等于 30 nT,且后一阶磁暴强度要大于前一阶.

磁暴期间,地磁场的磁偏角和垂直分量都有明显起伏,但最具特征的是地磁场水平分量的变化,大多数磁暴开始时,水平分量陡然上升,在中低纬度的地磁台站,其上升幅度约 10~20 nT,这称为磁暴急始.不是所有的磁暴都有急始,有急始的磁暴称为急始型磁暴(SSC),没有急始的磁暴称为缓始型磁暴(GC).本文研究的 80 起中强磁暴中,有 69 起为急始型磁暴,11 起为缓始型磁暴.

3 典型事例分析

在以下事例分析过程中,很重要的一点是如何给每一阶 Dst^* 配对上来自 ACE 的太阳风数据,其中关键问题是如何计算太阳风作用于磁层引起 Dst^* 变化的响应时间.目前有两种常用的处理方法,其一是采用 2 h 的时间推迟,即考虑 1 h 太阳风传输时间加上 1 h 磁层响应时间,其二是利用 Dst^* 极小值和 ACE 观测到的行星际磁场 B_z 极小值之间相对应方法从而获取推迟时间.根据 Gonzalez 等^[19]统计结果,后一种方法所得的平均推迟时间约为 2 h,与第一种方法结果一样.考虑到磁层对太阳风响应的差异性,本文采用 Dst^* 极小值和行星际磁场 B_z 极小值相对应的方法.如果对应 B_z 极小值时间全部落在鞘区内,那么认为该磁暴是由鞘区磁场单独作用引起的;如果对应 B_z 极小值时间有的落在鞘区内,有的落在磁云本体内,那么认为该磁暴是由鞘区磁场和磁云本体磁场共同作用引起的;如果对应 B_z 极小值时间全部落在磁云本体内,则还需要考虑鞘区磁场是否对磁暴主相的发展起作用,如果鞘区磁场引起了 Dst^* 指数下降,但在磁云本体磁场对地磁活动产生影响之前已经恢复至暴前水平,则认为鞘区磁场对磁暴主相的发展不起作用,即认为磁暴主相由磁云本体单独作用引起;如果对磁暴主相发展有贡献,则认为该磁暴是由鞘区磁场和磁云共同作用引起.

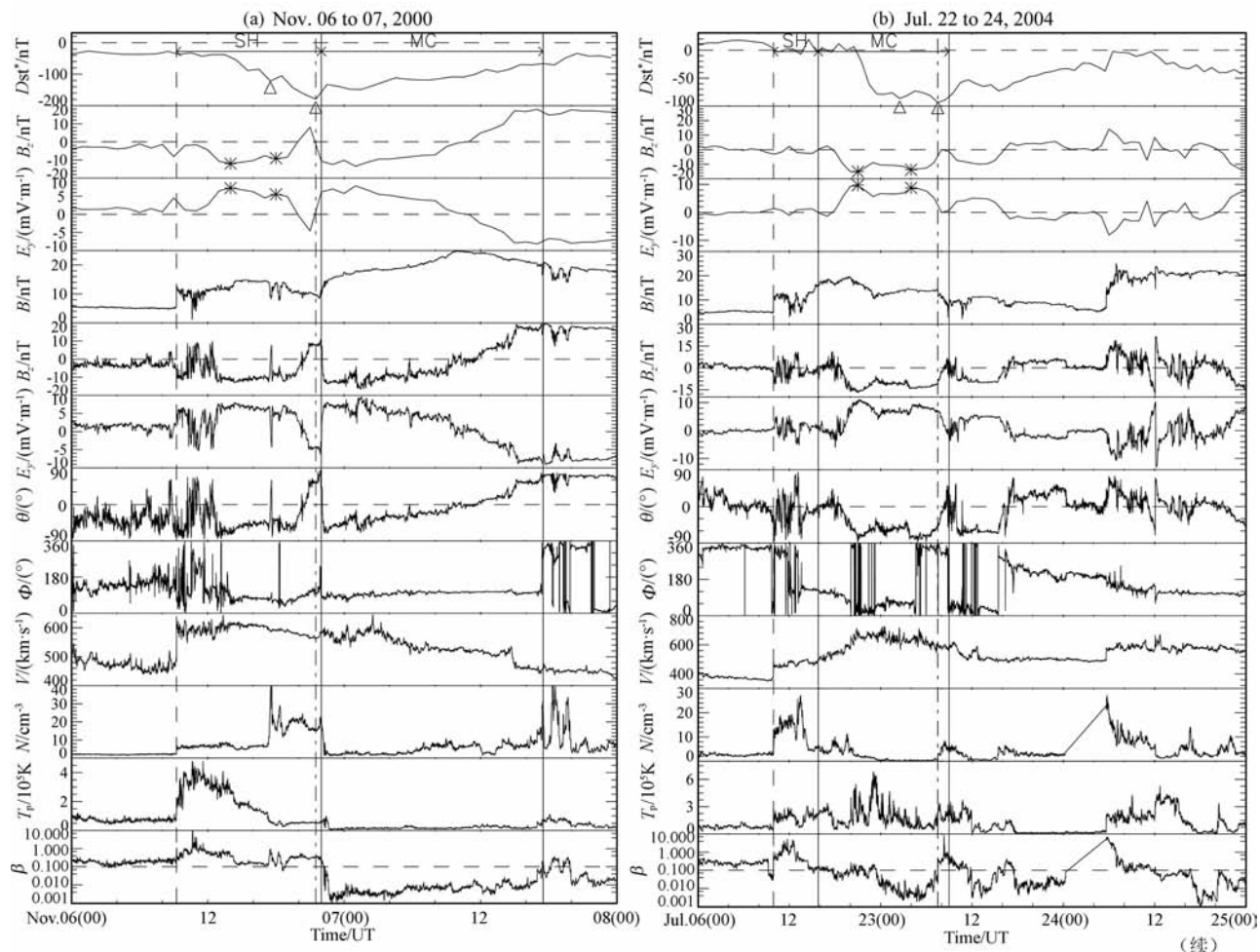
我们通过 4 个典型事例具体分析鞘区磁场单独作用、磁云本体单独作用、鞘区与磁云共同作用、磁云与其他结构的相互作用对磁暴主相发展的影响.为了更准确地确定激波开始时间和磁云边界时间,太阳风和行星际磁场数据分别采用 ACE 卫星高精度观测数据,时间分辨率分别为 64 s 和 16 s.在确定 1 h 精度的 Dst^* 指数每一阶峰值对应的行星际磁场 B_z 分量和行星际电场 E_y 分量时,我们采用的是 1 h 精度 ACE 卫星观测数据.图 1(a~d)分别为鞘区磁场单独作用(“SH”)、磁云本体单独作用(“MC”)、鞘区与磁云共同作用(“SH+MC”)、磁云本体+高速流对磁云的压缩作用(“MC+PMC-HSS”)这四种情况下磁暴主相的发展情况.

由 ACE 卫星观测到的 2000 年 11 月 6~7 日 $Dst^* = -179$ nT 强磁暴期间的行星际磁场及太阳风变化如图 1a 所示.根据上述磁暴主相发展阶数的判断标准,可以判断该强磁暴主相有 2 个发展阶段,

每一阶 Dst^* 指数极小值出现的时间分别为 11 月 6 日 17:30 和 11 月 6 日 21:30, 极小值分别为 -122 nT 和 -179 nT, 即该磁暴为二阶强磁暴. 由图 1a 可以看出, 在 11 月 6 日 09:15, 太阳风速度 V 、密度 N 、温度 T_p 及行星际磁场强度 B 有明显的跳变, 这表明在 L1 点观测到行星际激波 (竖虚线所在位置). 根据 Wei 等^[16] 磁云边界的确定方法, 可以确定磁云的前后边界分别位于 11 月 6 日 22:00 和 11 月 7 日 17:30. Dst^* 指数的第一次下降对应的 B_z 和 E_y 分量极值分别是 -11.96 nT 和 7.3 mV/m, 极值时间均为 11 月 6 日 14:00, 此后 B_z 和 E_y 分量逐渐恢复, Dst^* 指数也由 -122 nT 恢复至 -105 nT. Dst^* 指数第二阶极小值对应的 B_z 和 E_y 分量极值分别是 -9.49 nT 和 5.6 mV/m, 极值时间均为 11 月 6 日 18:00, 虽然强度没有第一个峰值强, 但也导致了 Dst^* 指数的第二次下降, 形成了二阶强磁暴. 可以看出, 引起磁暴主相 Dst^* 指数两次下降的行星际磁场 B_z 分量极小值时间全部落在激波与磁云开始时间之内, 因此我们判断该二阶强磁暴是由鞘区磁场单独作用引起, 磁云本体对地磁场的影响主要体现

在磁暴恢复相阶段.

图 1b 为 2004 年 7 月 22 日~7 月 24 日 $Dst^* = -94$ nT 中等磁暴期间行星际磁场和太阳风观测数据, 根据上述磁暴主相发展阶数的判断标准, 可以判断该强磁暴主相有 2 个发展阶段, 每一阶 Dst^* 指数极小值出现的时间分别为 7 月 23 日 02:30 和 7 月 23 日 07:30, 极小值分别为 -87 nT 和 -94 nT, 即该磁暴为二阶中等强度磁暴. 从图 1b 可以看到, 在 7 月 22 日 09:55 UT, 太阳风速度 V 、密度 N 、温度 T_p 及行星际磁场强度 B 有明显跳变, 这表明 ACE 卫星观测到一个激波, 磁云前后边界分别在 7 月 22 日 15:48 和 7 月 23 日 9:00. 磁云本体内 B_z 分量由北向南缓慢旋转, 表明该磁云为 NS 型磁云, 在磁云后半部分有持续时间较长的南向分量, 虽然在 B_z 南向分量期间没有由南向北的反转, 但 B_z 南向分量的强度随时间发生变化. Dst^* 指数的第一次下降对应的 B_z 和 E_y 分量极值分别是 -15.34 nT 和 9.52 mV/m, 极值时间均为 7 月 22 日 21:00, Dst^* 指数第二阶极小值对应的 B_z 和 E_y 分量极值分别是 -13.67 nT 和 8.59 mV/m, 极值时间均为 7 月



(续)

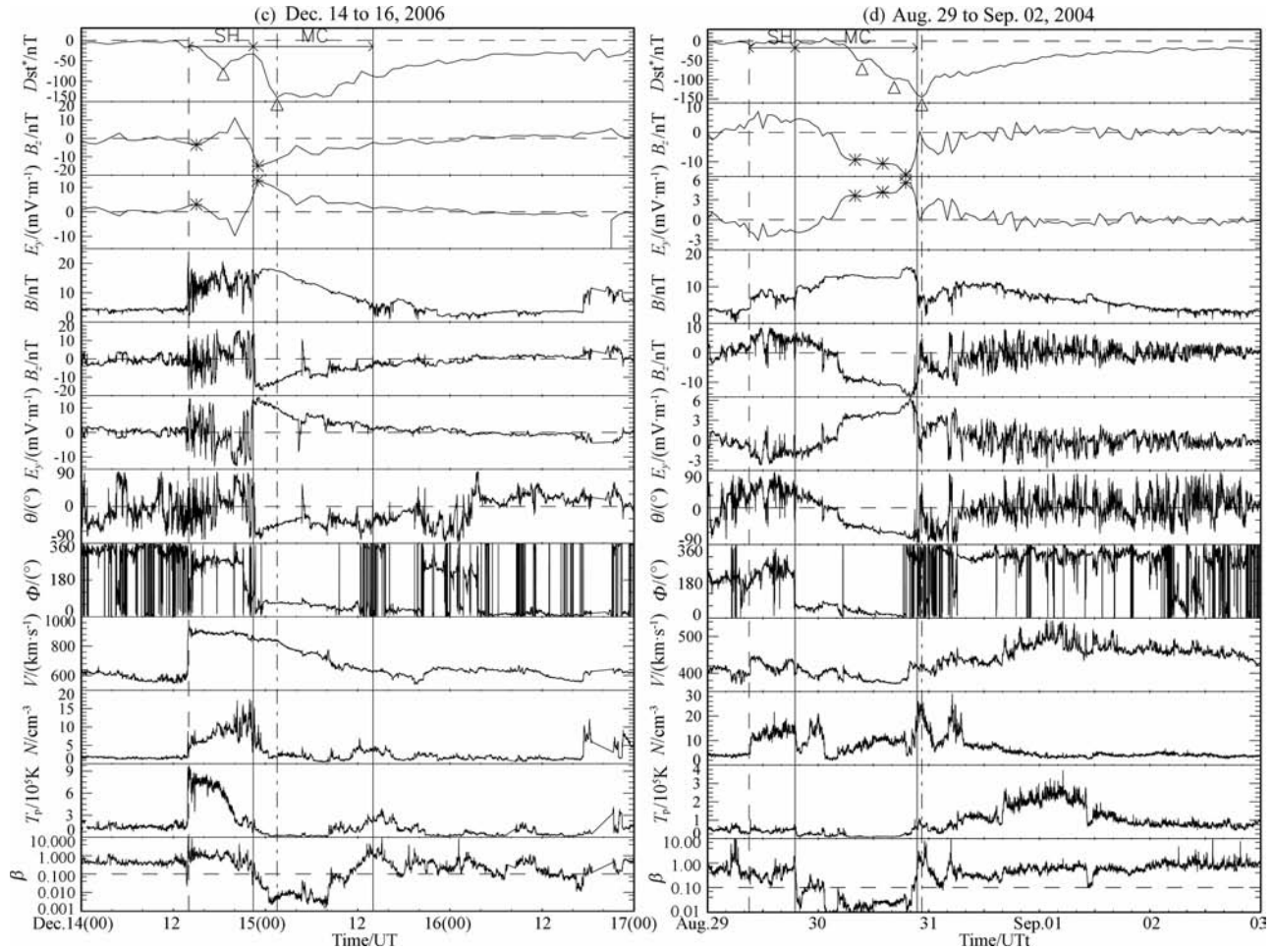


图1 (a)由鞘区磁场单独作用引起的二阶磁暴;(b)由磁云本体单独作用引起的二阶磁暴;(c)由鞘区和磁云共同作用引起的二阶磁暴;(d)由磁云本体和高速流对磁云的压缩引起的三阶磁暴.从上至下依次为 Dst^* 指数,小时分辨率的行星际磁场 B_z (GSM 坐标)和行星际电场 E_y 分量,高精度的行星际磁场强度 B 及其 z 分量 B_z (GSM 坐标),行星际电场 y 分量 E_y ,行星际磁场 B 相对于黄道面的倾角 θ 、与子午面的夹角 Φ ,太阳风的速度 V ,密度 N ,质子温度 T_p ,以及等离子体 β 值.竖点划线代表 Dst^* 极小值的位置,竖虚线代表激波所在的位置,两条竖实线为磁云边界,“ Δ ”代表每阶 Dst^* 指数峰值的位置,“*”代表与每阶 Dst^* 指数峰值对应的 B_z 和 E_y 的峰值位置.

Fig. 1 (a) A two-step storm due to sheath field itself; (b) A two-step storm due to MC itself; (c) A two-step storm due to the combination of sheath and MC field; (d) A three-step storm due to the combination of MC and the compression by high speed stream. From top to bottom are plotted corrected geomagnetic index (Dst^*), hourly B_z (in GSM) and E_y , high resolution of interplanetary magnetic field strength (B) and z component field (B_z) in GSM, the y component of electric field (E_y), the elevation (θ) and azimuthal (Φ) angles of field direction, solar wind speed (V), proton density (N), proton temperature (T_p), and the ratio of proton thermal pressure to magnetic pressure (β). The vertical dash and dot line stands for the Dst^*_{min} location, the vertical dashed line stands for interplanetary shock location, the two solid lines stand for the boundaries of MCs, and the triangular stands for the peak step of Dst^* index, the asterisk stands for the peak value of B_z and E_y corresponds to the dip value of Dst^* index.

23日04:00,虽然强度没有第一次极值强,但也导致了 Dst^* 指数的第二次下降,从而使磁暴主相形成两个发展阶段.虽然激波与磁云之间的鞘区内磁场 B_z 分量在南北方向扰动,但 B_z 南向分量强度较弱,在磁云到来之前地磁场已经恢复至暴前水平,导致 Dst^* 指数两次下降的行星际磁场 B_z 南向分量极小值全部落在磁云本体内,因此我们认为鞘区磁场对

磁暴主相的发展不起作用,该二阶磁暴是由磁云本体单独作用引起.

图1c为2006年12月14~16日 $Dst^* = -140$ nT强磁暴期间行星际磁场和太阳风观测数据,根据上述判断标准,可以判断该强磁暴主相有2个发展阶段,每一阶 Dst^* 指数极小值出现的时间分别为12月14日18:30和12月15日01:30,极小值分别为

-71 nT 和 -140 nT. 从图 1c 可以看到, 在 12 月 14 日 14:00, 太阳风速度 V 、密度 N 、温度 T_p 及行星际磁场强度 B 有明显跳变, 这表明 ACE 卫星观测到一个激波, 磁云前后边界分别在 12 月 14 日 22:24 和 12 月 15 日 14:00. Dst^* 指数的第一次下降对应的 B_z 和 E_y 分量极值分别是 -3.5 nT 和 3.14 mV/m, 极值时间均为 12 月 14 日 15:00, 1 h 后, B_z 由南向转为北向, Dst^* 指数也由 -71 nT 恢复至 -33 nT. Dst^* 指数第二阶极小值对应的 B_z 和 E_y 分量极值分别是 -15.25 nT 和 12.86 mV/m, 极值时间均为 12 月 14 日 23:00. 可以看出, 引起 Dst^* 指数第一次下降的 B_z 和 E_y 分量极小值落在激波与磁云开始时间之间的鞘区内, 引起 Dst^* 指数第二次下降的 B_z 和 E_y 分量极小值落在磁云本体内, 因此我们判断该磁暴是由鞘区与磁云本体磁场共同作用引起.

图 1d 为 2004 年 8 月 29 日~9 月 2 日 $Dst^* = -146$ nT 强磁暴期间行星际磁场和太阳风观测数据, 根据上述磁暴主相发展阶数的判断标准, 可以判断该强磁暴主相有 3 个发展阶段, 每一阶 Dst^* 指数极小值出现的时间分别为 8 月 30 日 09:30、8 月 30 日 16:30 和 8 月 30 日 22:30, 极小值分别为 -52 nT、-98 nT 和 -146 nT. 从图 1d 可以看到, 在 8 月 29 日 09:00, 太阳风速度 V 、密度 N 、温度 T_p 及行星际磁场强度 B 有明显跳变, 这表明 ACE 卫星观测到一个激波, 磁云前后边界分别在 8 月 29 日 19:00 和 8 月 30 日 21:30. 由于激波与磁云之间的鞘区内磁场 B_z 分量主要为北向, 对磁暴主相发展基本不起作用, 磁暴主相的发展主要是由磁云本体磁场引起, 磁云本体磁场 B_z 分量由北向南缓慢旋转, 表明该磁云为 NS 型磁云. Dst^* 指数的第一次下降对应的 B_z 和 E_y 分量极值分别是 -9.44 nT 和 3.68 mV/m, 极值时间均为 8 月 30 日 08:00, Dst^* 指数第二阶极小值对应的 B_z 和 E_y 分量极值分别是 -10.88 nT 和 4.1 mV/m, 极值时间均为 8 月 30 日 14:00. 由于高速流对磁云尾部的压缩作用, 使 B_z 和 E_y 分量强度进一步增强, 于 8 月 30 日 19:00, B_z 和 E_y 分量第三次达到极值 -14.2 nT 和 5.65 mV/m, 导致 Dst^* 指数的第三次下降, 从而形成磁暴主相的三个发展阶段. 可以看出, Dst^* 指数的前两次下降是由磁云本体单独作用引起, Dst^* 指数的第三次下降是由高速流对 NS 型磁云尾部的压缩作用引起.

综上所述, 通过对上述 4 起典型事例的分析, 得到如下初步结论: (1) 除了 Zhang 等^[9] 认为的磁云本体单独作用以及鞘区与磁云共同作用可以引起多

阶磁暴的发生外, 鞘区磁场单独作用也可引起磁暴的多阶发展; (2) 磁云在行星际传播过程中驱动激波, 并不意味着激波与磁云之间的鞘区磁场在磁暴主相的多阶发展中一定起作用, 这主要取决于鞘区磁场南向分量的强弱及其持续时间; (3) 磁暴主相的多阶发展与行星际磁场 B_z 南向分量和行星际电场 E_y 分量阶段性的变化密切相关.

4 统计结果

我们对 1998~2006 年 80 起与磁云相关不同发展阶数的中强磁暴 ($Dst^* \leq -50$ nT) 进行了逐一细致的分析, 主要分析了导致磁暴主相不同发展阶数的行星际结构, 不同发展阶数磁暴对磁暴强度及其持续时间的影响, 并对导致磁暴主相增加一阶的行星际条件做了初步分析. 表 1 列出了这 80 起中强磁暴的 Dst^* 指数达到最小值的日期、磁暴强度 (Dst^* 指数最小值)、磁暴主相的发展阶数 n , 磁暴类型 (SSC 代表急始型磁暴, GC 代表缓始型磁暴)、引起磁暴主相的行星际结构 (SH 代表鞘区磁场单独作用、MC 代表磁云本体单独作用、SH+MC 代表鞘区与磁云共同作用、PMC-SH 或 PMC-HSS 代表激波或高速流对磁云的压缩作用)、磁云极性、每阶 Dst^* 指数的峰值及峰值时间、每阶 Dst^* 指数峰值对应的 B_z 峰值及其时间、激波出现时间、磁云开始时间和结束时间.

4.1 磁暴主相发展阶数与磁暴强度的关系

为了研究磁暴主相的发展阶数对磁暴强度的影响, 我们统计分析了一阶、二阶、三阶及三阶以上磁暴在不同强度磁暴中的分布情况, 统计结果如图 2 所示. 从图 2a 可以看出, 在这 80 起中强磁暴中, 磁暴主相为一阶、二阶、三阶及三阶以上的分别有 37 起、24 起和 19 起, 所占比例分别为 46.25%、30% 和 23.75%, 可见多阶磁暴 (主相为二阶及二阶以上) 占中强磁暴的一半以上, 这说明磁暴主相的多阶发展在中强磁暴中是一种常见的现象, 该结论与 Kamide 等^[3] 所得结论一致. 图 2(b~d) 分别为主相不同发展阶数的磁暴在中等磁暴 (-100 nT $< Dst^* \leq -50$ nT)、强磁暴 (-200 nT $< Dst^* \leq -100$ nT) 和特大磁暴 ($Dst^* \leq -200$ nT) 中所占比例分布, 从图中我们可以看到, 一阶磁暴和多阶磁暴 (包括二阶和二阶以上磁暴) 在中等磁暴 (-100 nT $< Dst^* \leq -50$ nT) 中所占比例分别为 53.8% 和 46.2%, 在强磁暴+特大磁暴 ($Dst^* \leq -100$ nT) 中所占比例分别为 42.6% 和 57.4%.

表 1 1998~2006 年中强磁暴及其行星际源相关参数列表

Table 1 The moderate intense storms associated with MCs list during 1998~2006

序号	磁暴日期	磁暴强度 Dst_{min}^* (nT)	主相 阶数	主相持续 时间(h)	磁暴 类型	引起磁暴的 行星际结构	磁云 极性	Dst^* 每阶峰值 及其时间	每阶 Dst^* 峰值 对应 B_z 峰值 及其时间	每阶 Dst^* 与 B_z 延迟时间 (h)	激波时间	磁云开始 时间	磁云结束 时间
1	1998-02-18	-113	1	14	SSC	MC	S	1998-02-18 00 : 30 (113)	1998-02-17 23 : 00 (-15.66)	1.5	没有	1998-02-17 10 : 00	1998-02-18 15 : 09
2	1998-03-25	-62	2	31	SSC	SH	N	1998-03-24 23 : 30 (-44)	1998-03-24 21 : 00 (-5.32)	2.5	1998-03-24 10 : 00	1998-03-25 16 : 12	1998-03-26 09 : 00
								1998-03-25 16 : 30 (-62)	1998-03-25 13 : 00 (-6.96)	3.5			
3	1998-05-04	-258	4	45	SSC	SH+MC+ PMC-SH	S	1998-05-02 11 : 30 (-73)	1998-05-02 10 : 00 (-9.92)	1.5 1.5 1.5 2.5	1998-05-01 21 : 12	1998-05-02 09 : 00	1998-05-04 05 : 00
								1998-05-02 17 : 30 (-99)	1998-05-02 16 : 00 (-7.8)				
								1998-05-03 07 : 30 (-103)	1998-05-03 06 : 00 (-3.94)				
								1998-05-04 05 : 30 (-258)	1998-05-04 03 : 00 (-31.92)				
4	1998-06-14	-55	1	6	SSC	MC	SN	1998-06-14 09 : 30 (-55)	1998-06-14 04 : 00 (-10.72)	5.5	1998-06-13 18 : 56	1998-06-14 03 : 00	1998-06-15 08 : 48
5	1998-08-06	-166	1	11	SSC	MC+PMC-SH	NS	1998-08-06 11 : 30 (-166)	1998-08-06 08 : 00 (-19.16)	3.5	没有	1998-08-05 13 : 12	1998-08-06 12 : 00
6	1998-08-20	-68	2	28	SSC	SH+MC	SN	1998-08-19 23 : 30 (-44)	1998-08-19 20 : 00 (-9.34)	3.5	1998-08-19 17 : 32	1998-08-20 07 : 54	1998-08-21 19 : 36
								1998-08-20 20 : 30 (-68)	1998-08-20 15 : 00 (-9.28)	5.5			
7	1998-08-27	-160	3	19	SSC	SH	S	1998-08-26 12 : 30 (-32)	1998-08-26 09 : 00 (-8.56)	3.5	1998-08-26 06 : 15	1998-08-27 05 : 24	1998-08-28 00 : 18
								1998-08-26 20 : 30 (-65)	1998-08-26 18 : 00 (-3.84)	2.5			
								1998-08-27 03 : 30 (-160)	1998-08-27 00 : 00 (-10.4)	3.5			
8	1998-09-25	-209	1	8	SSC	SH	SN	1998-09-25 07 : 30 (-209)	1998-09-25 01 : 00 (-18.09)	6.5	1998-09-24 23 : 15	1998-09-25 06 : 00	1998-09-26 16 : 00
9	1998-10-19	-119	3	22	SSC	SH+MC	SN	1998-10-19 05 : 30 (-79)	1998-10-19 02 : 00 (-15.09)	3.5	1998-10-18 09 : 00	1998-10-19 04 : 00	1998-10-20 07 : 06
								1998-10-19 12 : 30 (-106)	1998-10-19 11 : 00 (-17.19)	1.5			
								1998-10-19 17 : 30 (-119)	1998-10-19 13 : 00 (-16.91)	4.5			

续表 1

序号	磁暴日期	磁暴强度 Dst_{\min}^* (nT)	主相 阶数	主相持续 时间(h)	磁暴 类型	引起磁暴的 行星际结构	磁云 极性	Dst^* 每阶峰值 及其时间	每阶 Dst^* 峰值 对应 B_z 峰值 及其时间	每阶 Dst^* 与 B_z 延迟时间 (h)	激波时间	磁云开始 时间	磁云结束 时间
10	1998-11-08	-162	2	20	SSC	SH+MC+ PMC-SH	NS	1998-11-07 16 : 30 (-93) 1998-11-08 06 : 30 (-162)	1998-11-07 14 : 00 (-7.79) 1998-11-08 04 : 00 (-15.88)	2.5 2.5	1998-11-07 08 : 00	1998-11-07 18 : 00	1998-11-08 12 : 30
11	1998-11-09	-144	1	17	SSC	MC	NS	1998-11-09 12 : 30 (-144)	1998-11-09 09 : 00 (-14.66)	3.5	没有	1998-11-08 18 : 48	1998-11-10 01 : 42
12	1999-01-13	-134	2	10	SSC	SH+MC	S	1999-01-13 13 : 30 (-58) 1999-01-13 20 : 30 (-134)	1999-01.13 10 : 00 (-10.32) 1999-01-13 15 : 00 (-14.98)	3.5 5.5	1999-01-13 10 : 00	1999-01-13 15 : 00	1999-01-13 22 : 18
13	1999-02-18	-146	1	7	SSC	SH	S	1999-02-18 09 : 30 (-146)	1999-02-18 08 : 00 (-21.64)	1.5	1999-02-18 02 : 00	1999-02-18 11 : 54	1999-02-19 11 : 54
14	1999-03-01	-112	1	13	SSC	MC	SN	1999-03-01 00 : 30 (-112)	1999-02-28 21 : 00 (-13.19)	3.5	1999-02-28 04 : 30	1999-02-28 14 : 00	1999-03-01 15 : 54
15	1999-04-17	-105	1	13	SSC	SH+MC	SN	1999-04-17 03 : 30 (-105)	1999-04-17 01 : 00 (-13.93)	2.5	1999-04-16 10 : 30	1999-04-16 21 : 00	1999-04-17 20 : 00
16	1999-08-23	-73	2	56	GC	MC	NS	1999-08-23 00 : 30 (-64) 1999-08-23 15 : 30 (-73)	1999-08-22 23 : 00 (-9.29) 1999-08-23 12 : 00 (-9.15)	1.5 3.5	没有	1999-08-21 05 : 36	1999-08-23 16 : 00
17	1999-11-13	-106	3	33	GC	MC-SH	S	1999-11-13 08 : 30 (-61) 1999-11-13 15 : 30 (-69) 1999-11-13 22 : 30 (-106)	1999-11-13 05 : 00 (-4.03) 1999-11-13 12 : 00 (-9.2) 1999-11-13 17 : 00 (-11.69)	3.5 3.5 5.5	没有	1999-11-12 09 : 24	1999-11-13 22 : 12
18	1999-12-13	-83	2	18	SSC	SH+MC	SN	1999-12-13 00 : 30 (-33) 1999-12-13 09 : 30 (-83)	1999-12-12 17 : 00 (-4.46) 1999-12-13 07 : 00 (-9.48)	7.5 2.5	1999-12-12 15 : 10	1999-12-12 19 : 48	1999-12-13 16 : 30
19	2000-01-23	-117	1	25	SSC	SH+MC	S	2000-01-23 02 : 30 (-117)	2000-01-23 00 : 00 (-15.66)	2.5	2000-01-22 00 : 23	2000-01-22 17 : 12	2000-01-23 01 : 48
20	2000-02-12	-115	2	35	SSC	SH	SN	2000-02-12 04 : 30 (-83) 2000-02-12 11 : 30 (-115)	2000-02-12 01 : 00 (-12.46) 2000-02-12 09 : 00 (-15.9)	3.5 2.5	2000-02-11 23 : 18	2000-02-12 12 : 00	2000-02-13 00 : 00

续表 1

序号	磁暴日期	磁暴强度 Dst_{min}^* (nT)	主相 阶数	主相持续 时间(h)	磁暴 类型	引起磁暴的 行星际结构	磁云 极性	Dst^* 每阶峰值 及其时间	每阶 Dst^* 峰值 对应 B_z 峰值 及其时间	每阶 Dst^* 与 B_z 延迟时间 (h)	激波时间	磁云开始 时间	磁云结束 时间
21	2000-04-06	-329	1	7	SSC	SH	NS	2000-04-06 22 : 30 (-329)	2000-04-06 20 : 00 (-26.75)	2.5	2000-04-06 16 : 04	2000-04-07 06 : 48	2000-04-08 18 : 00
22	2000-05-17	-105	1	4	GC	MC	SN	2000-05-17 03 : 30 (-105)	2000-05-17 00 : 00 (-8.3)	3.5	没有	2000-05-16 23 : 12	2000-05-17 07 : 30
23	2000-05-24	-158	3	15	SSC	SH	S	2000-05-24 00 : 30 (-36) 2000-05-24 04 : 30 (-148) 2000-05-24 09 : 30 (-158)	2000-05-23 22 : 00 (-4.51) 2000-05-24 02 : 00 (-21.72) 2000-05-24 06 : 00 (-10.79)	2.5 2.5 3.5	2000-05-23 17 : 00	2000-05-24 12 : 06	2000-05-27 10 : 24
24	2000-06-05	-54	3	18	SSC	SH+MC	SN	2000-06-05 01 : 30 (-33) 2000-06-05 05 : 30 (-46) 2000-06-05 11 : 30 (-54)	2000-06-04 22 : 00 (-8.17) 2000-06-05 04 : 00 (-4.9) 2000-06-05 10 : 00 (-7.19)	3.5 1.5 1.5	2000-06-04 14 : 23	2000-06-05 00 : 00	2000-06-06 22 : 42
25	2000-07-14	-65	1	7	SSC	SH	NS	2000-07-14 21 : 30 (-65)	2000-07-14 16 : 00 (-6.61)	5.5	2000-07-14 15 : 00	2000-07-14 17 : 30	2000-07-15 14 : 15
26	2000-07-15	-328	2	8	SSC	SH+MC	SN	2000-07-15 18 : 30 (-114) 2000-07-15 22 : 30 (-328)	2000-07-15 16 : 00 (-7.36) 2000-07-15 19 : 00 (-43.68)	2.5 3.5	2000-07-15 14 : 15	2000-07-15 19 : 00	2000-07-16 10 : 00
27	2000-07-26	-63	2	17	SSC	SH	NS	2000-07-26 10 : 30 (-45) 2000-07-26 20 : 30 (-63)	2000-07-26 06 : 00 (-8.84) 2000-07-26 18 : 00 (-8.52)	4.5 2.5	2000-07-26 03 : 00	2000-07-27 02 : 06	2000-07-28 05 : 24
28	2000-07-29	-85	1	40	SSC	SH+MC	NS	2000-07-29 11 : 30 (-85)	2000-07-29 08 : 00 (-10.14)	2.5	2000-07-28 09 : 10	2000-07-28 12 : 06	2000-07-29 12 : 00
29	2000-08-11	-98	1	27	SSC	SH+MC	S	2000-08-11 06 : 30 (-98)	2000-08-11 03 : 00 (-11.65)	3.5	2000-08-10 04 : 07	2000-08-10 19 : 18	2000-08-11 18 : 00
30	2000-08-12	-241	2	9	SSC	SH+MC	SN	2000-08-12 04 : 30 (-113) 2000-08-12 09 : 30 (-241)	2000-08-12 02 : 00 (-14.09) 2000-08-12 07 : 00 (-28.12)	2.5 2.5	2000-08-11 18 : 10	2000-08-12 05 : 30	2000-08-13 22 : 12
31	2000-09-02	-55	1	12	SSC	SH	N	2000-09-02 10 : 30 (-55)	2000-09-02 07 : 00 (-7.37)	3.5	2000-09-01 22 : 00	2000-09-02 21 : 54	2000-09-03 12 : 42

续表 1

序号	磁暴日期	磁暴强度 Dst_{\min}^* (nT)	主相 阶数	主相持续 时间(h)	磁暴 类型	引起磁暴的 行星际结构	磁云 极性	Dst^* 每阶峰值 及其时间	每阶 Dst^* 峰值 对应 B_z 峰值 及其时间	每阶 Dst^* 与 B_z 延迟时间 (h)	激波时间	磁云开始 时间	磁云结束 时间	
32	2000-09-17	-235	1	5	SSC	SH	NS	2000-09-17 23 : 30 (-235)	2000-09-17 21 : 00 (-22.93)	2.5	2000-09-17 16 : 45	2000-09-17 23 : 24	2000-09-21 00 : 00	
33	2000-10-05	-201	5	63	SSC	SH+MC+ PMC-SH+ ICME	NS	2000-10-03 12 : 30 (-82)	2000-10-03 10 : 00 (-10.6)					
								2000-10-04 13 : 30 (-97)	?	2.5				
								2000-10-04 19 : 30 (-144)	2000-10-04 14 : 00 (-13.93)	?	5.5	2000-10-03 00 : 08	2000-10-03 10 : 12	2000-10-05 02 : 30
								2000-10-05 07 : 30 (-199)	2000-10-05 04 : 00 (-19.71)	3.5				
							2000-10-05 13 : 30 (-201)	2000-10-05 11 : 00 (-14.02)	2.5					
34	2000-10-14	-105	3	40	SSC	SH+MC	S	2000-10-13 05 : 30 (-89)	2000-10-13 02 : 00 (-13.57)	3.5				
								2000-10-14 09 : 30 (-103)	2000-10-14 04 : 00 (-10.8)	5.5	2000-10-12 21 : 45	2000-10-13 06 : 06	2000-10-14 17 : 30	
								2000-10-14 14 : 30 (-105)	2000-10-14 11 : 00 (-11.44)	3.5				
35	2000-10-29	-122	2	17	SSC	SH+MC	SN	2000-10-28 12 : 30 (-45)	2000-10-28 09 : 00 (-7.84)	3.5				
								2000-10-29 02 : 30 (-122)	2000-10-28 23 : 00 (-16.99)	3.5	2000-10-28 09 : 08	2000-10-28 21 : 12	2000-10-30 23 : 00	
36	2000-11-06	-179	2	12	SSC	SH	SN	2000-11-06 17 : 30 (-122)	2000-11-06 14 : 00 (-11.96)	3.5				
								2000-11-06 21 : 30 (-179)	2000-11-06 18 : 00 (-9.49)	3.5	2000-11-06 09 : 15	2000-11-06 22 : 00	2000-11-07 17 : 30	
37	2000-11-29	-124	3	35	SSC	SH+MC	S	2000-11-29 04 : 30 (-103)	2000-11-29 03 : 00 (-9.96)	1.5				
								2000-11-29 08 : 30 (-116)	2000-11-29 05 : 00 (-10.17)	3.5	2000-11-28 05 : 00	2000-11-28 16 : 00	2000-11-29 20 : 42	
								2000-11-29 13 : 30 (-124)	2000-11-29 10 : 00 (-9.01)	3.5				
38	2000-12-24	-63	1	9	SSC	MC	SN	2000-12-23 04 : 30 (-63)	2000-12-23 01 : 00 (-13.68)	3.5	没有	2000-12-22 19 : 42	2000-12-24 17 : 00	
39	2001-01-24	-63	2	32	SSC	SH+MC	SN	2001-01-23 20 : 30 (-44)	2001-01-23 18 : 00 (-4.85)	2.5				
								2001-01-24 18 : 30 (-63)	2001-01-24 16 : 00 (-5.92)	2.5	2001-01-23 10 : 06	2001-01-24 08 : 48	2001-01-25 15 : 00	

续表 1

序号	磁暴日期	磁暴强度 Dst_{\min}^* (nT)	主相 阶数	主相持续 时间(h)	磁暴 类型	引起磁暴的 行星际结构	磁云 极性	Dst^* 每阶峰值 及其时间	每阶 Dst^* 峰值 对应 B_z 峰值 及其时间	每阶 Dst^* 与 B_z 延迟时间 (h)	激波时间	磁云开始 时间	磁云结束 时间
40	2001-03-05	-84	1	11	GC	MC-CIR	S	2001-03-05 02 : 30 (-84)	2001-03-04 23 : 00 (-12.64)	3.5	没有	2001-03-04 15 : 42	2001-03-05 01 : 36
41	2001-03-20	-152	4	29	SSC	SH+MC	SN	2001-03-19 17 : 30 (-77)	2001-03-19 15 : 00 (-15.18)		2001-03-19 10 : 23	2001-03-19 17 : 00	2001-03-22 09 : 30
								2001-03-19 21 : 30 (-110)	2001-03-19 18 : 00 (-11.29)	2.5			
								2001-03-20 08 : 30 (-127)	2001-03-20 06 : 00 (-15.47)	3.5			
								2001-03-20 15 : 30 (-152)	2001-03-20 13 : 00 (-19.01)	2.5			
42	2001-03-31	-419	1	8	SSC	SH+MC	SN	2001-03-31 08 : 30 (-419)	2001-03-31 06 : 00 (-40.96)	2.5	2001-03-31 00 : 23	2001-03-31 05 : 00	2001-03-31 22 : 30
43	2001-04-05	-51	3	17	SSC	SH	NS	2001-04-04 19 : 30 (-32)	2001-04-04 17 : 00 (-1.63)	2.5	2001-04-04 14 : 22	2001-04-05 07 : 30	2001-04-07 17 : 00
								2001-04-04 23 : 30 (-34)	?	?			
								2001-04-05 07 : 30 (-51)	2001-04-05 05 : 00 (-4.96)	2.5			
44	2001-04-11	-272	2	10	SSC	SH	SN	2001-04-11 18 : 30 (-155)	2001-04-11 15 : 00 (-15.62)	3.5	2001-04-11 15 : 28	2001-04-11 22 : 18	2001-04-13 07 : 00
								2001-04-11 23 : 30 (-272)	2001-04-11 20 : 00 (-23.01)	3.5			
45	2001-04-13	-83	2	6	SSC	SH+MC	SN	2001-04-13 11 : 30 (-78)	2001-04-13 09 : 00 (-4.95)	2.5	2001-04-13 07 : 06	2001-04-13 10 : 12	2001-04-14 11 : 36
								2001-04-13 15 : 30 (-83)	2001-04-13 12 : 00 (-0.12)	3.5			
46	2001-04-22	-107	2	23	SSC	MC	S	2001-04-22 07 : 30 (-40)	2001-04-22 05 : 00 (-9.76)	2.5	2001-04-21 15 : 08	2001-04-21 23 : 36	2001-04-23 08 : 18
								2001-04-22 15 : 30 (-107)	2001-04-22 11 : 00 (-12.7)	4.5			
47	2001-05-10	-77	2	14	SSC	SH+MC	S	2001-05-09 17 : 30 (-71)	2001-05-09 14 : 00 (-8.46)	3.5	2001-05-09 09 : 30	2001-05-09 11 : 54	2001-05-10 21 : 36
								2001-05-10 01 : 30 (-77)	2001-05-09 23 : 00 (-6.47)	2.5			
48	2001-10-03	-167	1	9	GC	MC	NS	2001-10-03 14 : 30 (-167)	2001-10-03 12 : 00 (-19.84)	2.5	没有	2001-10-02 23 : 30	2001-10-03 16 : 18
49	2001-10-11	-90	1	3	SSC	SH	SN	2001-10-11 19 : 30 (-90)	2001-10-11 16 : 00 (-9.0)	3.5	2001-10-11 16 : 20	2001-10-12 02 : 12	2001-10-12 09 : 00

续表 1

序号	磁暴日期	磁暴强度 Dst_{\min}^* (nT)	主相 阶数	主相持续 时间(h)	磁暴 类型	引起磁暴的 行星际结构	磁云 极性	Dst^* 每阶峰值 及其时间	每阶 Dst^* 峰值 对应 B_z 峰值 及其时间	每阶 Dst^* 与 B_z 延迟时间 (h)	激波时间	磁云开始 时间	磁云结束 时间
50	2001-11-01	-101	3	21	SSC	SH+MC	SN	2001-10-31 23 : 30 (-76)	2001-10-31 21 : 00 (-13.08)	2.5 2.5 3.5	2001-10-31 12 : 54	2001-10-31 18 : 00	2001-11-02 11 : 06
								2001-11-01 03 : 30 (-92)	2001-11-01 01 : 00 (-10.5)				
								2001-11-01 10 : 30 (-101)	2001-11-01 07 : 00 (-10.51)				
51	2001-11-24	-246	2	8	SSC	SH	N	2001-11-24 07 : 30 (-172)	2001-11-24 06 : 00 (-24.93)	1.5 1.5	2001-11-24 05 : 38	2001-11-24 15 : 00	2001-11-25 16 : 00
								2001-11-24 12 : 30 (-246)	2001-11-24 11 : 00 (-14.7)				
52	2002-03-01	-83	1	21	SSC	MC	SN	2002-03-01 01 : 30 (-83)	2002-02-28 22 : 00 (-14.63)	4.5	2002-02-28 04 : 00	2002-02-28 16 : 42	2002-03-01 09 : 36
53	2002-03-24	-110	2	20	SSC	SH	SN	2002-03-23 18 : 30 (-31)	2002-03-23 14 : 00 (-4.82)	4.5 5.5	2002-03-23 11 : 00	2002-03-24 10 : 48	2002-03-25 20 : 64
								2002-03-24 09 : 30 (-110)	2002-03-24 04 : 00 (-9.66)				
54	2002-04-17	-117	1	6	SSC	SH	S	2002-04-17 17 : 30 (-117)	2002-04-17 14 : 00 (-19.04)	3.5	2002-04-17 10 : 21	2002-04-17 23 : 30	2002-04-19 08 : 00
55	2002-04-20	-159	3	22	SSC	SH	SN	2002-04-19 14 : 30 (-107)	2002-04-19 11 : 00 (-8.46)	3.5 3.5 6.5	2002-04-19 08 : 02	2002-04-20 04 : 24	2002-04-21 15 : 30
								2002-04-19 18 : 30 (-132)	2002-04-19 15 : 00 (-12.83)				
								2002-04-20 06 : 30 (-159)	2002-04-20 00 : 00 (-11.11)				
56	2002-05-19	-60	1	10	SSC	SH+MC	SN	2002-05-19 06 : 30 (-60)	2002-05-19 04 : 00 (-8.82)	2.5	2002-05-18 19 : 20	2002-05-19 02 : 42	2002-05-20 03 : 00
57	2002-05-23	-117	1	7	SSC	SH	SN	2002-05-23 17 : 30 (-117)	2002-05-23 15 : 00 (-13.08)	2.5	2002-05-23 10 : 15	2002-05-23 21 : 00	2002-05-25 18 : 00
58	2002-08-01	-59	1	9	SSC	SH+MC	SN	2002-08-01 14 : 30 (-59)	2002-08-01 11 : 00 (-13.17)	3.5	2002-08-01 04 : 24	2002-08-01 09 : 06	2002-08-01 22 : 18
59	2002-08-02	-107	1	8	SSC	SH	NS	2002-08-02 05 : 30 (-107)	2002-08-02 03 : 00 (-9.29)	2.5	2002-08-01 22 : 19	2002-08-02 06 : 30	2002-08-03 06 : 30
60	2002-10-01	-191	2	33	SSC	SH+MC+CIR	NS	2002-09-30 14 : 30 (-65)	2002-09-30 11 : 00 (-12.29)	3.5 5.5	2002-09-30 07 : 21	2002-09-30 21 : 00	2002-10-01 15 : 24
								2002-10-01 16 : 30 (-191)	2002-10-01 11 : 00 (-21.94)				

续表 1

序号	磁暴日期	磁暴强度 Dst_{min}^* (nT)	主相 阶数	主相持续 时间(h)	磁暴 类型	引起磁暴的 行星际结构	磁云 极性	Dst^* 每阶峰值 及其时间	每阶 Dst^* 峰值 对应 B_z 峰值 及其时间	每阶 Dst^* 与 B_z 延迟时间 (h)	激波时间	磁云开始 时间	磁云结束 时间
61	2002-10-04	-140	3	23	GC	SH+MC	S	2002-10-03 18 : 30 (-115)	2002-10-03 16 : 00 (-9.97)	2.5 2.5 4.5	2002-10-02 22 : 14	2002-10-03 04 : 42	2002-10-04 11 : 57
								2002-10-04 00 : 30 (-128)	2002-10-03 22 : 00 (-9.73)				
								2002-10-04 08 : 30 (-140)	2002-10-04 04 : 00 (-11.77)				
62	2003-03-20	-61	1	15	SSC	SH+MC	S	2003-03-20 20 : 30 (-61)	2003-03-20 17 : 00 (-7.24)	3.5	2003-03-20 04 : 20	2003-03-20 12 : 16	2003-03-20 22 : 30
63	2003-06-18	-158	1	15	GC	MC+PMC-SH	NS	2003-06-18 09 : 30 (-158)	2003-06-18 07 : 00 (-15.8)	2.5	没有	2003-06-17 11 : 00	2003-06-18 08 : 48
64	2003-07-12	-116	4	34	GC	MC+PMC -HSS	S	2003-07-11 10 : 30 (-65)	2003-07-11 07 : 00 (-12.27)	3.5 4.5 2.5 3.5	没有	2003-07-10 20 : 00	2003-07-11 07 : 00
								2003-07-11 18 : 30 (-70)	2003-07-11 14 : 00 (-9.5)				
								2003-07-12 01 : 30 (-83)	2003-07-11 23 : 00 (-11.02)				
								2003-07-12 05 : 30 (-116)	2003-07-12 02 : 00 (-11.81)				
65	2003-08-18	-139	4	31	SSC	SH+MC	SN	2003-08-17 23 : 30 (-78)	2003-08-17 22 : 00 (-8.6)	1.5 4.5 1.5 2.5	2003-08-17 13 : 41	2003-08-18 02 : 00	2003-08-19 16 : 18
								2003-08-18 10 : 30 (-124)	2003-08-18 06 : 00 (-16.22)				
								2003-08-18 15 : 30 (-138)	2003-08-18 14 : 00 (-14.63)				
								2003-08-18 20 : 30 (-139)	2003-08-18 18 : 00 (-12.83)				
66	2003-11-20	-444	1	14	SSC	SH+MC	S	2003-11-20 20 : 30 (-444)	2003-11-20 15 : 00 (-51.76)	5.5	2003-11-20 07 : 27	2003-11-20 10 : 00	2003-11-21 00 : 24
67	2004-04-03	-106	1	8	SSC	SH	N	2004-04-03 19 : 30 (-106)	2004-04-03 16 : 00 (-7.68)	3.5	2004-04-03 09 : 00	2004-04-04 00 : 00	2004-04-05 18 : 18
68	2004-07-23	-94	2	10	SSC	MC	NS	2004-07-23 02 : 30 (-87)	2004-07-22 21 : 00 (-15.34)	5.5 3.5	2004-07-22 09 : 55	2004-07-22 15 : 48	2004-07-23 09 : 00
								2004-07-23 07 : 30 (-94)	2004-07-23 04 : 00 (-13.67)				
69	2004-07-25	-164	4	35	SSC	MC	NS	2004-07-24 16 : 30 (-33)	2004-07-24 14 : 00 (-0.99)	2.5 ? 4.5 2.5	2004-07-24 05 : 45	2004-07-24 12 : 00	2004-07-25 17 : 12
								2004-07-24 20 : 30 (-40)	?				
								2004-07-25 12 : 30 (-153)	2004-07-25 08 : 00 (-18.75)				
								2004-07-25 16 : 30 (-162)	2004-07-25 14 : 00 (-17.67)				

续表 1

序号	磁暴日期	磁暴强度 Dst^*_{min} (nT)	主相 阶数	主相持续 时间(h)	磁暴 类型	引起磁暴的 行星际结构	磁云 极性	Dst^* 每阶峰值 及其时间	每阶 Dst^* 峰值 对应 B_z 峰值 及其时间	每阶 Dst^* 与 B_z 延迟时间 (h)	激波时间	磁云开始 时间	磁云结束 时间
70	2004-08-30	-146	3	22	SSC	MC+PMC -HSS	NS	2004-08-30 09 : 30 (-52)	2004-08-30 08 : 00 (-9.44)	1.5	2004-08-29 09 : 00	2004-08-29 19 : 00	2004-08-30 21 : 30
							2004-08-30 16 : 30 (-98)	2004-08-30 14 : 00 (-10.88)	2.5				
							2004-08-30 22 : 30 (-146)	2004-08-30 19 : 00 (-14.2)	3.5				
71	2004-11-08	-378	2	12	SSC	SH+MC	SN	2004-11-08 00 : 30 (-207)	2004-11-07 22 : 00 (-29.08)	2.5	2004-11-07 17 : 55	2004-11-07 22 : 30	2004-11-08 17 : 00
							2004-11-08 06 : 30 (-378)	2004-11-08 03 : 00 (-42.37)	3.5				
72	2004-11-10	-304	3	22	SSC	PICME-SH +MC	NS	2004-11-09 16 : 30 (-174)	2004-11-09 13 : 00 (-7.87)	3.5	2004-11-09 09 : 10	2004-11-09 20 : 30	2004-11-10 16 : 42
							2004-11-09 21 : 30 (-250)	2004-11-09 19 : 00 (-21.99)	2.5				
							2004-11-10 08 : 30 (-304)	2004-11-10 06 : 00 (-24.94)	2.5				
73	2005-05-15	-278	1	6	SSC	MC	SN	2005-05-15 07 : 30 (-278)	2005-05-15 06 : 00 (-32.62)	1.5	2005-05-15 02 : 05	2005-05-15 05 : 30	2005-05-15 22 : 18
74	2005-05-20	-106	1	6	SSC	SH+MC	SN	2005-05-20 08 : 30 (-106)	2005-05-20 06 : 00 (-8.12)	2.5	2005-05-19 19 : 00	2005-05-20 06 : 00	2005-05-20 15 : 00
75	2005-06-12	-104	1	13	SSC	MC	S	2005-06-12 22 : 30 (-104)	2005-06-12 17 : 00 (-16.93)	5.5	2005-06-12 06 : 48	2005-06-12 16 : 00	2005-06-13 11 : 48
76	2005-06-15	-54	1	10	GC	SH+MC	SN	2005-06-15 12 : 30 (-54)	2005-06-15 11 : 00 (-6.92)	1.5	2005-06-14 19 : 55	2005-06-15 05 : 12	2005-06-16 08 : 42
77	2005-07-18	-84	2	26	SSC	SH+MC	NS	2005-07-17 10 : 30 (-57)	2005-07-17 08 : 00 (-9.25)	2.5	2005-07-17 00 : 55	2005-07-17 14 : 16	2005-07-18 08 : 00
							2005-07-18 06 : 30 (-84)	2005-07-18 05 : 00 (-6.78)	1.5				
78	2005-10-31	-77	1	14	GC	MC	NS	2005-10-31 19 : 30 (-77)	2005-10-31 16 : 00 (-8.92)	3.5	没有	2005-10-31 02 : 30	2005-10-31 20 : 50
79	2006-04-14	-112	1	18	GC	MC	NS	2006-04-14 09 : 30 (-112)	2006-04-14 07 : 00 (-14.33)	2.5	没有	2006-04-13 15 : 42	2006-04-14 11 : 00
80	2006-12-15	-140	2	12	SSC	SH+MC	S	2006-12-14 18 : 30 (-71)	2006-12-14 15 : 00 (-3.5)	3.5	2006-12-14 14 : 00	2006-12-14 22 : 24	2006-12-15 14 : 00
							2006-12-15 01 : 30 (-140)	2006-12-14 23 : 00 (-15.25)	2.5				

注:在每阶 Dst^* 峰值对应 B_z 峰值及其时间一列中,“?”表示 Dst^* 极小值找不到对应的 B_z 极小值。

通过磁暴主相的发展阶数与磁暴强度关系的统计分析,我们发现,磁暴主相的多阶发展对磁暴强度有一定影响,即随着磁暴发展阶数的增加,磁暴强度有增强的趋势,但它们之间并不是一一对应的关系,也就是说,并不是所有的强磁暴和特大磁暴的主相都是多阶发展,也不是所有的多阶磁暴都是强磁暴或特大磁暴.例如,在 40 起强磁暴和 14 起特大磁暴中,分别有 42.5%(17 起)和 42.9%(6 起)为一阶磁暴;在 26 起中等磁暴中,有 38.5%(10 起)为二阶磁暴,有 7.7%(2 起)为三阶及三阶以上磁暴.

4.2 磁暴主相发展阶数与主相持续时间的关系

图 3 为磁暴主相不同发展阶数与主相持续时间之间的关系,其中横坐标表示主相发展阶数,纵坐标表示主相持续时间,可以看到:(1)除了有 1 起一阶磁暴主相持续时间为 40 h 外,其余 36 起一阶磁暴主相持续时间全部集中在 3~27 h 之间,平均持续时间为 11 h;(2)除了 1 起二阶磁暴主相持续时间为 56 h 外,其余 23 起二阶磁暴主相持续时间全部集中在 6~35 h 之间,平均持续时间为 17.9 h;(3)三阶磁暴主相持续时间全部集中在 15~40 h 之间,平均持续时间为 23.8 h;(4)四阶磁暴主相持续时间全部集中在 29~45 h 之间,平均持续时间为 34.8 h,五阶磁暴的主相持续时间最长,为 63 h. 统计结果显示,随着磁暴主相发展阶数的增加,磁暴主相的平均持续时间也随之延长.

4.3 磁暴主相发展阶数与行星际结构的关系

为了研究鞘区磁场单独作用、磁云本体单独作用、鞘区磁场与磁云共同作用、磁云与其他结构共同作用在磁暴主相多阶发展中的相对重要性,我们统计了不同发展阶数磁暴与不同行星际结构之间的关系.

根据引起磁暴行星际结构的不同,我们将这 80 起磁暴事件分为如下 4 类:鞘区磁场单独作用(“Sheath”)、磁云本体单独作用(“MC”)、鞘区与磁云共同作用(“SH+MC”)、以及磁云与其他行星际结构共同作用(“others”),其中磁云与其他行星际结构的共同作用主要包括磁云本体作用+激波(或高速流)对磁云尾部的压缩作用等复杂行星际结构.统计结果如图 4 所示.从图 4a 我们看到,有 47.5% 的中强磁暴是由鞘区磁场单独作用和磁云本体单独作用引起,有 38.75% 的中强磁暴是由鞘区与磁云共同作用引起,有 13.75% 的中强磁暴是由其他复杂行星际结构引起.图 4(b~d)分别为不同行星际结构在一阶磁暴、二阶磁暴、三阶及三阶以上磁暴中所占比例分布,统计结果表明:在一阶磁暴中,鞘区磁场单独作用、磁云单独作用、鞘区与磁云共同作用、磁云与其他行星际结构相互作用分别占一阶磁暴的 29.7%(11 起)、32.4%(12 起)、29.7%(11 起)和 8.2%(3 起);在二阶磁暴中,四类不同行星际结构分别占二阶磁暴的 29.2%(7 起)、12.5%(3 起)、50%(12 起)和 8.3%(2 起);在三阶及三阶以上磁暴中,四类不同行星际结构分别占 21.1%(4 起)、5.2%(1 起)、42.1%(8 起)和 31.6%(6 起).

上述统计结果显示,有近 1/2 的多阶磁暴(包括二阶和二阶以上磁暴)是由鞘区磁场与磁云本体共同作用引起,有约 1/3 的多阶磁暴是由鞘区磁场单独作用和磁云本体单独作用引起,其余的多阶磁暴是由其他复杂结构引起的,这说明鞘区磁场单独作用和磁云本体单独作用在磁暴主相的多阶发展中也具有相对重要的作用.需要说明的是,磁云本体单独作用并不意味着磁云前面一定没有鞘区结构,只是由于鞘区磁场南向分量较弱,在磁云本体对地磁场作用之前,地磁场已经恢复至暴前水平.

值得我们注意的是,在鞘区单独作用的 22 起中强磁暴中,有 11 起为一阶磁暴,11 起为多阶磁暴.下面,我们通过典型事例的对比分析,来了解不同鞘区磁场结构对磁暴主相发展的影响.通过鞘区磁场单独作用引起的二阶强磁暴(如图 1a),鞘区磁场只引起 Dst^* 指数的一次下降(如图 1c 所示),以及鞘区磁场对磁暴主相不起作用(如图 1d)这三起事件的对比分析,我们可以看出,鞘区内不同的磁场结构是导致地磁场不同响应的重要原因之一.若鞘区磁场 B_z 南向分量有很明显的阶段性变化,将引起 Dst^* 指数的多次下降(如图 1a 所示);若鞘区磁场 B_z 南向分量没有阶段性的变化,则一般只引起磁暴

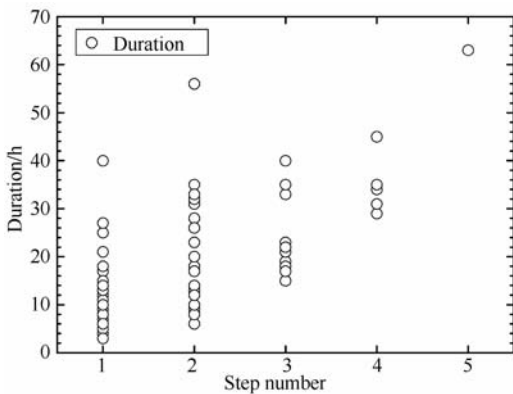


图 3 磁暴主相的发展阶数与磁暴主相持续时间的关系

Fig. 3 Scatter plot showing the relationship between step number during main phase and its duration

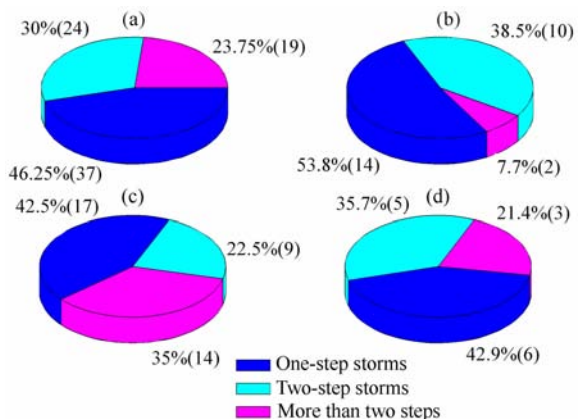


图 2 主相不同发展阶数在不同强度磁暴中所占比例分布 (a) 全部中强磁暴($Dst^* \leq -50$ nT); (b) 中等磁暴(-100 nT $< Dst^* \leq -50$ nT); (c) 强磁暴(-200 nT $< Dst^* \leq -100$ nT); (d) 特大磁暴($Dst^* \leq -200$ nT), 括号中的数字表示每类磁暴的数量。

Fig. 2 Pie plots showing occurrence percentages of different steps storms in different intensity of storms

- (a) All moderate intense storms ($Dst^* \leq -50$ nT);
- (b) Moderate storms (-100 nT $< Dst^* \leq -50$ nT);
- (c) Intense storms (-200 nT $< Dst^* \leq -100$ nT);
- (d) Super intense storms ($Dst^* \leq -200$ nT).

The subtotal of each kind of storms is in parentheses in the respective title.

主相的一次下降(如图 1c 所示);若鞘区内磁场 B_z 分量为北向,则鞘区对磁暴主相的发展基本不起作用(如图 1d 所示)。

4.4 行星际参数对磁暴主相多阶发展的影响

上述统计结果主要是研究磁暴主相不同发展阶数与磁暴强度、磁暴主相持续时间以及不同行星际结构之间的关系,为了研究导致磁暴增加一阶的行星际起因,我们进一步分析了引起磁暴主相的多阶发展与不同行星际参数之间的关系.由于 Dst^* 指数为小时分辨率数据,因此,以下在分析 Dst^* 指数与行星际参数之间关系过程中,行星际参数采用 ACE 卫星小时分辨率数据.本文在分析这 80 起磁暴事件及其行星际源的过程中了解到,磁暴主相的多阶发展与行星际磁场 B_z 分量和行星际电场 E_y 分量的发展密切相关,而其他行星际参数,如太阳风密度 N 、速度 V 、 $N \times V$ 组合参数和太阳风动压 D_p 在磁暴主相多阶发展的过程中没有很明显的阶段性变化特征,因此本文着重分析每一阶 Dst^* 指数极小值与每阶磁暴期间 B_z 分量极小值、 E_y 分量极大值的定量关系。

统计结果如图 5 所示,我们可以看到,每阶 Dst^* 指数极小值与太阳风密度 N 、速度 V 、 $N \times V$ 和

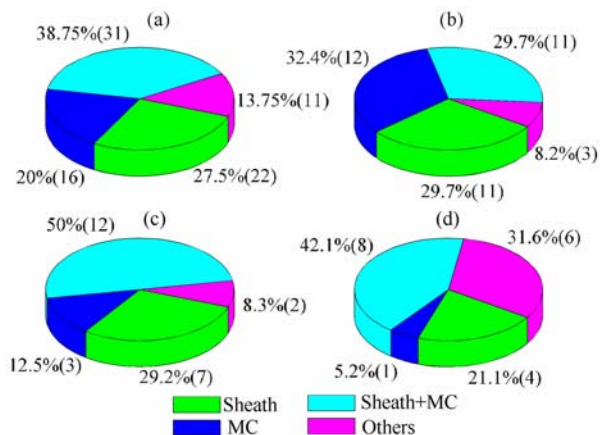


图 4 不同行星际结构在主相不同发展阶数磁暴中所占比例分布

(a) 全部中强磁暴; (b) 一阶磁暴; (c) 二阶磁暴; (d) 三阶及以上磁暴, 括号中的数字表示每类磁暴的数量。

Fig. 4 Pie plots showing the occurrence percentages of different steps of storms due to the different interplanetary structures

- (a) All moderate intense storms;
- (b) One-step storms;
- (c) Two-step storms;
- (d) More than two steps storms. The subtotal of each kind of storms is in parentheses in the respective title.

太阳风动压 D_p 的相关性很弱,但与该阶 E_y 分量极大值、 B_z 分量极小值具有很好的相关性,线性相关系数分别为 -0.89 和 0.88 , 直线为线性耦合曲线,耦合方程如下:

Dst_{min}^* 与 $E_{y,max}$ 的拟合方程为:

$$Dst_{min}^* = -34.62 - 11.89 \times E_{y,max}$$

(标准偏差为 32.9 nT; 相关系数为 -0.89).

Dst_{min}^* 与 $B_{z,min}$ 的拟合方程为:

$$Dst_{min}^* = -5.90 + 8.50 \times B_{z,min}$$

(标准偏差为 33.8 nT; 相关系数为 0.88).

上述统计分析结果表明:行星际磁场 B_z 南向分量和行星际电场 E_y 分量的阶段性变化是导致磁暴主相间歇式增强的重要因素之一,即随着 B_z 南向分量和 E_y 分量阶段性增强,磁暴主相呈现间歇式增强的趋势。

5 结论与讨论

本文利用 1998~2006 年发生的由磁云引起的 80 起中强磁暴($Dst^* \leq -50$ nT), 对不同发展阶数的磁暴与磁暴强度、主相持续时间以及行星际结构之间的关系进行了统计分析,并对导致磁暴主相增加一阶的行星际条件做了初步分析,得到的主要结

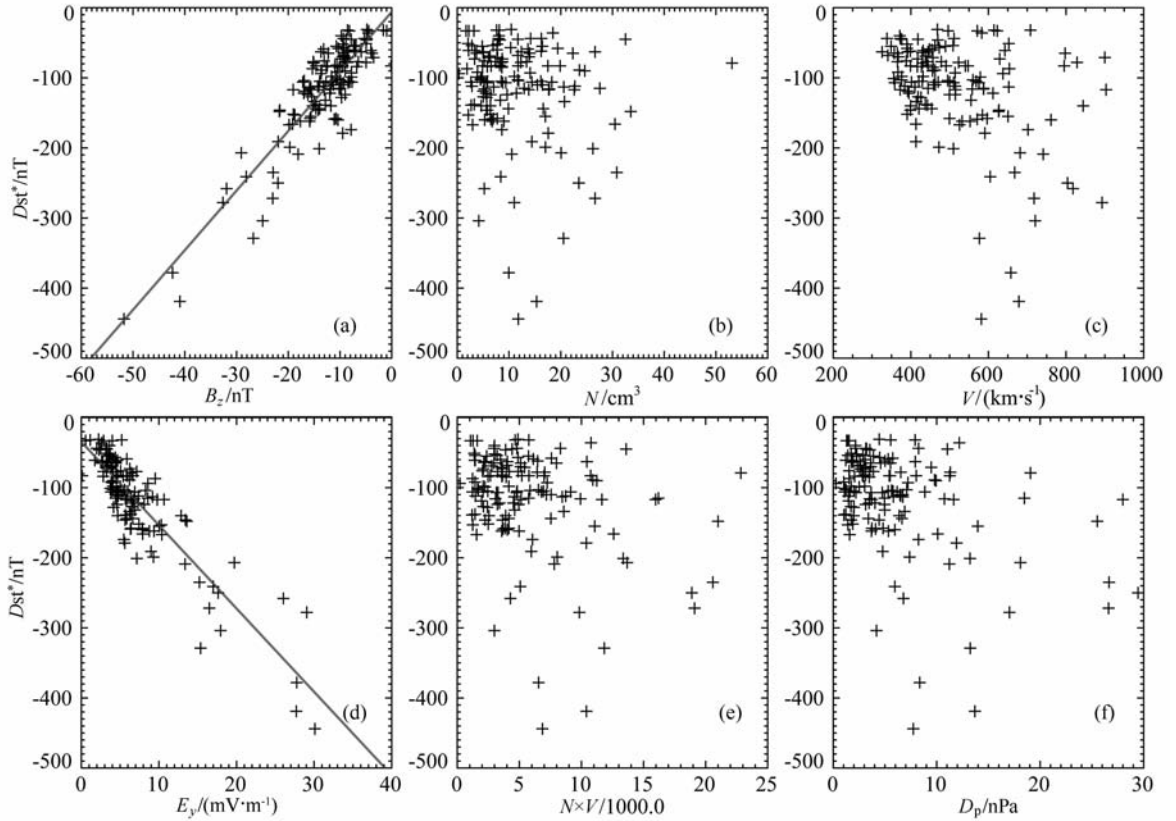


图5 每阶 Dst^* 极小值 (Dst_{\min}^*) 与该阶行星际电场 E_y 分量极大值 ($E_{y\max}$)、行星际磁场 B_z 分量极小值 ($B_{z\min}$) 以及 B_z 极值时刻对应的太阳风密度 N 、速度 V 、 $N \times V$ 和太阳风动压 D_p 之间的关系图, 直线为 Dst_{\min}^* 与 $E_{y\max}$ 、 Dst_{\min}^* 与 $B_{z\min}$ 的线性耦合曲线

Fig. 5 Relationships for every step storm intensity (Dst^*) versus the maximum value of y component of interplanetary electric field ($E_{y\max}$), the minimum value of z component of interplanetary magnetic field ($B_{z\min}$) and several solar wind parameters, such as N , V , $N \times V$, and solar wind dynamic pressure D_p corresponding to the $B_{z\min}$ during every step. The lines indicate the linear coupling curve of Dst_{\min}^* and $E_{y\max}$, Dst_{\min}^* and $B_{z\min}$.

果如下:

(1) 有 1/2 以上的中强磁暴主相有多个发展阶段, 其中一阶磁暴和多阶磁暴 (包括二阶和二阶以上磁暴) 在中等磁暴 ($-100 \text{ nT} < Dst^* \leq -50 \text{ nT}$) 中所占比例分别为 53.8% 和 46.2%, 在强磁暴 + 特大磁暴 ($Dst^* \leq -100 \text{ nT}$) 中所占比例分别为 42.6% 和 57.4%;

(2) 随着磁暴主相发展阶数的增加, 磁暴主相的平均持续时间也随之延长;

(3) 鞘区磁场单独作用、磁云本体单独作用、鞘区与磁云共同作用、磁云与其他行星际结构共同作用都可能引起磁暴主相的多阶发展, 其中约 46.5% 的多阶磁暴是由鞘区磁场与磁云本体共同作用引起, 有 34.9% 的多阶磁暴是由鞘区磁场单独作用和磁云本体单独作用引起, 其余的多阶磁暴是由其他复杂行星际结构引起;

(4) 磁暴主相的多阶发展与行星际电场 E_y 分量、行星际磁场 B_z 南向分量的发展密切相关, 随着 E_y 和 B_z 阶段性的变化, 磁暴主相呈现多阶发展的趋势, 且每阶 Dst^* 极小值与该阶 E_y 极大值和 B_z 极小值有很好的线性相关性。

过去的研究认为多阶磁暴产生的原因主要是由鞘区磁场与磁云共同作用引起^[20], 而 Zhang 等^[9] 在分析太阳活动上升年和极大年磁云的地球物理效应过程中, 发现磁云本体单独作用也可引起多阶磁暴。一方面, 我们通过个个例分析, 确认了前人所得结论, 即鞘区磁场与磁云本体共同作用, 以及磁云本体单独作用都可引起多阶磁暴。另一方面, 我们的研究还发现, 除了上述两种情况外, 鞘区磁场单独作用、磁云与其他行星际结构共同作用形成的复杂结构也可引起多阶磁暴的发生, 并且鞘区磁场单独作用引起的多阶磁暴基本是磁云本体单独作用引起多阶磁暴

的 2 倍多。

在鞘区单独作用引起的磁暴事件中,鞘区磁场结构的不同是导致磁暴主相不同发展阶数的重要原因之一。一般来说,如果鞘区内 B_z 分量为北向,则不引起磁暴;如果鞘区磁场 B_z 南向分量没有阶段性的变化或南北方向的反转,则一般只引起磁暴主相的一次下降;如果鞘区磁场 B_z 南向分量有很明显的阶段性变化(包括方向的变化、强度的变化),则更易引起 Dst^* 指数的多次下降。

B_z 南向分量和 E_y 分量阶段性变化是影响磁暴主相多阶发展的重要行星际参数,这里阶段性变化既包括 B_z 或 E_y 方向的变化,也包括强度的变化。一般来说, B_z 南向分量或 E_y 分量后一阶比前一阶强度更强,则一般会导致 Dst^* 指数的进一步下降,但我们也注意到, B_z 南向分量或 E_y 分量后一阶比前一阶强度弱也可能引起磁暴强度的进一步增强,这可能与 B_z 南向分量的持续时间有关,在后续的工作中,我们将进一步分析 B_z 南向分量的积累效应,以及其他行星际参数(如能量耦合函数 ϵ 等)对磁暴增加一阶的影响。

致 谢 感谢 ACE 卫星提供的行星际磁场和太阳风数据,感谢世界地磁数据中心提供的 Dst 指数。

参考文献(References)

- [1] Cane H V, Richardson I G, St Cyr O C. Coronal mass ejections, interplanetary ejecta and geomagnetic storms. *Geophys Res Lett*, 2000, **27**:3591~3594
- [2] 张继春,田剑华,濮祖荫. 行星际电场与 Dst 指数. 空间科学学报,2001,**21**:297~304
Zhang J C, Tian J H, Pu S Y. Correlations of Dst index with the interplanetary electric field. *Chin J Space Sci* (in Chinese), 2001, **21**: 297~304
- [3] Wu C C, Lepping R P. Effects of magnetic clouds on the occurrence of geomagnetic storms; The first 4 years of Wind. *J Geophys Res*, 2002, **107** (A10), 1314, doi: 10. 1029/2001JA000161
- [4] Kamide Y, Yokoyama N, Gonzalez W, et al. Two-step development of geomagnetic storms. *J Geophys Res*, 1998, **103**:6917~6921
- [5] Richardson I G, Zhang J. Multiple-step geomagnetic storms and their interplanetary drivers. *Geophys Res Lett*, 2008, **35**, L06S07, doi:10. 1029/2007GL032025
- [6] Burlaga L, Sittler E, Mariani F, et al. Magnetic loop behind an interplanetary shocks: Voyager, Helios, and IMP8 observations. *J Geophys Res*, 1981, **86**:6673~6684
- [7] Cane H V, Richardson I G. Helios 1 and 2 observations of

particle decreases, ejecta, and magnetic clouds. *J Geophys Res*, 1997, **102**:7075~7086

- [8] Echer E, Alves M V, Gonzalez W D. A statistical study of magnetic cloud parameters and geoeffectiveness. *J Atmos Sol Terr Phys*, 2005, **67**:839~852
- [9] Zhang J C, Liemohn M W, Kozyra J U, et al. A statistical study of the geoeffectiveness of magnetic clouds during high solar activity years. *J Geophys Res*, 2004, **109**, A09101, doi:10. 1029/2004JA010410
- [10] Dal Lago A, Gonzalez W D, de Gonzalez A L C, et al. Compression of magnetic clouds in interplanetary space and increase in their geoeffectiveness. *J Atmos Sol Terr Phys*, 2001, **63**:451~455
- [11] Dal Lago A, Gonzalez W D, Laura A Balmaceda, et al. The 17 ~ 22 October (1999) solar-interplanetary-geomagnetic event: Very intense geomagnetic storm associated with a pressure balance between interplanetary coronal mass ejection and a high-speed stream. *J Geophys Res*, 2006, **111**, A07S14, doi:10. 1029/2005JA011394
- [12] Wang Y M, Ye P Z, Wang S, et al. An interplanetary cause of large geomagnetic storms: Fast forward shock overtaking preceding magnetic cloud. *Geophys Res Lett*, 2003, **30**(13), 1700, doi:10. 1029/2002GL016861
- [13] Gopalswamy N, Akiyama S, Yashiro S, et al. Erratum to "Solar source and geospace consequences of interplanetary magnetic clouds observed during solar cycle 23-Paper 1". *J Atmos Sol Terr Phys*, 2009, **71**:1005~1009
- [14] Gopalswamy N, Yashiro S, Akiyama S. Geoeffectiveness of halo coronal mass ejections. *J Geophys Res*, 2007, **112**, A06112, doi:10. 1029/2006JA012149
- [15] Zhang J, Richardson I G, Webb D F, et al. Solar and interplanetary sources of major geomagnetic storm ($Dst \leq -100nT$) during 1996~2005. *J Geophys Res*, 2007, **112**, A10102, doi:10. 1029/2007JA012321
- [16] Wei F S, Liu R, Fan Q L, et al. Identification of the magnetic cloud boundary layers. *J Geophys Res*, 2003, **108**, 1263, doi:1029/2002JA009511
- [17] Gonzalez W D, Joselyn J A, Kamide Y, et al. What is a geomagnetic storm? *J Geophys Res*, 1994, **99**:5771~5792
- [18] Xie H, Gopalswamy N, Manoharan P K, et al. Long-lived geomagnetic storms and coronal mass ejections. *J Geophys Res*, 2006, **111**, A01103, doi:10. 1029/2005JA011287
- [19] Gonzalez W D, Echer E. A study on the peak Dst and peak negative B_z relationship during intense geomagnetic storms. *Geophys Res Lett*, 2005, **32**, L18103, doi: 10. 1029/2005GL023486
- [20] Vieira L E A, Gonzalez W D, Gonzalez A L, et al. A study of magnetic storms development in two or more steps and its associated with the polarity of magnetic clouds. *J Atmos Sol Terr Phys*, 2001, **63**:457~461