1998 年 11 月 7~8 日磁暴的行星际源分析

乐贵明, 唐玉华, 郑亮, 刘连光

南京大学天文系, 南京 210093;

中国气象局国家空间天气监测预警中心, 北京 100081;

中国气象局遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室, 北京 100081;

华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206;

中国科学院研究生院, 北京 100049

E-mail: nsclegm@163.com

2008-12-03 收稿, 2009-02-10 接受

国家自然科学基金(批准号: 50677020, 10333040, 10373017)、中国气象局科技推广项目(编号: CMATG2007M03)、国家标准化研究项目(编号: 2007GYB118)和中国气象局国家空间天气监测预警中心空间天气首席预报员研究资助项目

摘要 首先分析了 1998 年 11 月 7~8 日的太阳风特性, 分析结果显示, 日地连线引力平衡点的 ACE 卫星在 11 月 7 日 07:33 UT 观测到一个激波(以下简称第一个激波), 从激波开始到 11 月 7 日 22:00 UT 为激波之后的鞘区, 随后在 11 月 7 日 22:00 UT 至 11 月 8 日 11:50 UT 之间观测到一个类磁云(MCL)物质, 其中在 11 月 8 日 04:19 UT 观测到另一个激波(以下简称第二个激波), 第二个激波显然进入到类磁云的后半部分, 类磁云前半部分未受第二个激波的影响. 通过对 1998 年 11 月 7~8 日磁暴参数 SYM-H 的分析, 我们把磁暴的主相分为 3 个阶段. 第一阶段为从磁暴的急始 11 月 7 日 08:15 UT 到 11 月 7 日 22:44 UT; 第二个阶段为从 11 月 22:44 UT 至 11 月 8 日 04:51 UT; 第三阶段为从 11 月 8 日 04:51 UT 至 11 月 8 日 06:21 UT, 其中第二阶段对整个磁暴主相的发展起关键作用. 通过对 11 月 7~8 日太阳风特性的分析, 我们得到磁暴主相三阶段的行星际源分别为 11 月 7 日 07:33 UT 开始的鞘区、11 月 7 日 22:00 UT 至 11 月 8 日 04:19 UT 和之间的类磁云前半部分和从 11 月 8 日 04:19 UT 至 11 月 8 日 05:57 UT 之间的激波压缩类磁云后半部分, 其中类磁云的前半部分具有持续时间较强的行星际磁场南向分量, 它对这次磁暴主相的发展起着决定性的作用. 第二个激波压缩类磁云后半部分对磁暴主相发展的贡献远低于类磁云前半部分对磁暴主相的贡献.

关键词
磁暴
主相
激波
磁鞘
类磁云

磁暴是太阳输出物质与磁层剧烈相互作用的结果, 对卫星姿态、导航与定位、通讯以及电力系统、地下管网都有影响, 因此, 磁暴的研究一直是空间天气研究的热点. 在第 23 太阳活动周期间, 在日地连线引力的平衡点(以下简称 L1 点)有连续的太阳风观测, 因此, 这为磁暴行星际源的研究提供了大量的观测资料. 在磁暴的行星际源当中, 目前普遍认为行星际磁场南向分量或太阳风电场是磁暴行星际源的关键因素^[1,2]. 多种太阳风结构有持续的行星际磁场南向分量, 如共转相互作用区、行星际日冕物质抛射驱

动的激波与背景太阳风相互作用形成的鞘区、行星际日冕物质抛射(含磁云)携带的磁场都可能有磁场南向分量, 从而都可能引起磁暴. 如果有两种以上的行星际结构同时对一个磁暴的主相有影响, 则称为行星际组合结构对磁暴主相有影响. 高玉芬等人^[3]研究过磁暴形态类型对行星际组合结构的响应, 提出不同磁暴的形态是由于不同的行星际太阳风结构引起的. Wang 等人^[4,5]指出, 磁云如果被激波压缩, 则受到压缩的磁云可能形成更强的行星际磁场南向分量, 从而使得激波压缩磁云后可以形成强烈的磁暴, 他

引用格式: 乐贵明, 唐玉华, 郑亮, 等. 1998 年 11 月 7~8 日磁暴的行星际源分析. 科学通报, 2009, 54: 2542~2547

Le G M, Tang Y H, Zheng L, et al. An analysis of interplanetary sources of geomagnetic storm during November 7~8, 1998. Chinese Sci Bull, 2009, 54, doi: 10.1007/s11434-009-0228-x

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/csb2009-54-17-2542>

们给出了激波压缩磁云形成强烈磁暴的多个事例. L1 点连续的太阳风观测为磁暴行星际源的研究提供了大量的观测资料. 利用L1 点太阳风的观测资料, 2007 年Zhang等人^[6]研究了1996~2005 年期间88 个大磁暴的太阳源和行星际源. 2008 年Eacher等人^[7]研究了磁暴行星际源太阳周的变化, 他们列出了1996~2006 年期间所有大磁暴的行星际源. 1998 年11 月7~8 日期间出现的大磁暴是他们研究的磁暴其中的一个, 其中Zhang等人^[6]给出的该磁暴的行星际源为鞘区、行星际日冕物质抛射(以下简称第一个行星际日冕物质抛射-ICME1)以及该行星际日冕物质抛射后的另一个行星际日冕物质抛射(ICME2)的鞘区与ICME1 的相互作用区, 其中ICME2 的鞘区与ICME1 的相互作用起着关键作用. Eacher等人^[7]给出的该磁暴的行星际源为ICME2 驱动的激波压缩前面的ICME1. 通过分析, 我们发现, 未被ICME2 驱动激波压缩的ICME1 在1998 年11 月7~8 日磁暴主相的发展过程中起主要作用, 而ICME2 驱动激波与ICME1 的相互作用部分在1998 年11 月7~8 日磁暴主相的发展过程中并不起关键作用.

1 11 月 7~8 日的太阳风特性

在判断太阳风是否是ICME时, 通常采用太阳风的磁场特征和太阳风的成分特征来识别太阳风是否是ICME. 通常认为ICME的磁场强度较强且连续转过一个角度. 在识别太阳风是否是ICME时, 在太阳风的成分应满足的条件上还没有一个统一的标准^[8~12], 不过使用的最多的是采用 $N_a/N_p > 0.8$, $O^{+7}/O^{+6} > 1.0$ 来识别太阳风是否是ICME. 此外, Richardson等人^[13]还提出可用温度特征来识别太阳风是否是ICME. 磁云是ICME中的一个子集, 对于磁云(以下简称MC), 通常认为它的质子 $\beta < 0.1$, 且磁场连续平滑地转过一个角度^[14]. 利用ACE卫星的64 s数据, 我们得到的11 月7~8 日的太阳风特性如图1所示. 从图1可以看出, 在11 月7 日07:33 UT, 太阳风速度有一个小的跳变, 相应的行星际磁场也有一个小的跳变, 这显然是在L1 点观测到一个第一个激波(即第一个激波). 地面磁场观测仪在11 月7 日08:15 UT观测到一个急始, 这标志第一个激波到达磁层顶的时间为08:15 UT, 第一个激波从L1 点传播到磁层顶的时间为40 min. 第一个激波后面的鞘区, 有一个持续的行星际磁场南向分量. 随后我们看到在1998 年11 月7 日的

22:00 UT和1998 年11 月8 日的11:50 UT之间的太阳风等离子体 $\beta < 0.1$ (图1 中的第一条竖的虚线和第三条竖的虚线之间), 但此期间的 $N_a/N_p < 0.8$, $O^{+7}/O^{+6} < 1$, 因此, 此期间的太阳风不满足磁云的太阳风成分含量的要求, 因此, 这里我们把这段时间的太阳风称为类磁云结构. 从图1 可以看出, 在1998 年11 月8 日的04:19 UT又出现了一个行星际激波(即第二个激波), 中国地震局地球物理研究所北京地磁台站在11 月8 日04:51 UT观测到另一个急始, 因此, 第二个行星际激波从L1 点传播到磁层顶的时间为24 min. 从图1 可以看出, 第二个激波进入到了前面类磁云的部分区域(以下称之为类磁云的后半部分), 图1 所示的MCL_2 是被第二个激波压缩的类磁云的后半部分, MCL_1 是类磁云未被第二个激波压缩的部分(以下称之为类磁云的前半部分). 激波压缩类磁云的后半部分之后, 造成类磁云后半部分行星际磁场突然增强, 行星际磁场南向分量也突然增大. 被压缩的太阳风温度也突然增加, 同时太阳风密度也有小幅度的增加.

有研究表明, SYM-H是描写磁暴环电流发展的高时间分辨率的指数^[15], 为了能够看出磁暴演化的精细过程, 我们在本文的研究中磁暴参数采用SYM-H指数. 下面我们来看看磁暴主相期间磁暴指数SYM-H随时间的变化情况. 我们把SYM-H随时间的变化情况用图2 来表示, 从图2 可以看出, 磁暴主相的发展分为3 步. 第一步从急始开始, 在激波之后鞘区的行星际磁场南向分量的作用下, SYM-H完成了一个中等磁暴的主相, 然后磁暴逐渐恢复. 第二个阶段为从11 月7 日22:44 UT到第二个急始之间的时间段, SYM-H再次连续下降, 这是磁暴主相发展的第二步. 磁暴主相的第三个阶段为从第二个急始到SYM-H的最低值. 第一个阶段SYM-H从11 月7 日08:15 UT的-17 nT下降到11 月7 日16:21 UT的-76 nT, 然后又恢复到11 月7 日22:44 UT的-22 nT, 显然, 第一个阶段完成了一个中等磁暴的主相和部分恢复相. 第二个阶段SYM-H从11 月7 日22:44 UT的-22 nT下降到11 月8 日04:51 UT的-142 nT. 第三个阶段SYM-H在11 月8 日06:21 UT下降到最低值-180 nT, 显然第3 阶段SYM-H的变化量为-38 nT, 远低于第二个阶段SYM-H的变化量-120 nT. 为了看清Dst 指数在11 月7~8 日期间的变化, 我们在图2

图 1 1998 年 11 月 7~8 日太阳风特性

(a)~(j)依次是 ACE 卫星在 L1 点观测到的行星际磁场、行星际磁场 Z 分量、太阳风的速度、太阳风的质子密度、太阳风的质子温度、太阳风动压、太阳风的质子温度与太阳风质子的预期温度之比、太阳风中氦与质子的丰度比 $N_{\text{He}}/N_{\text{p}}$ 、 $\text{O}^{+7}/\text{O}^{+6}$ 以及太阳风的质子 β

中还加入了 Dst 指数随时间变化的情况。

从上面的分析我们可以看出，第二个阶段对整

个磁暴主相的贡献最大，第三个阶段对磁暴主相的贡献远小于第二个阶段对磁暴主相的贡献。

2 11月7~8日磁暴的行星际源

由 L1 点的太阳风传播到磁层的时间取决于太阳风的速度,为了看清磁暴主相 3 个发展阶段的行星际源,我们在给出磁暴主相发展的 3 个阶段的行星际源时扣除了太阳风从 L1 点传播到磁层顶的时间.图 3 为我们给出的对应磁暴主相 3 个阶段的行星际源.从图 3 可以看出,第一个激波之后的鞘区为磁暴主相第一个阶段的行星际源.类磁云的第一部分为磁暴主相第二个阶段的行星际源.第二个激波压缩的类磁云部分为磁暴主相第三个阶段的行星际源.显然,类磁云的第一部分对磁暴主相发展起最关键的作用,而激波压缩的类磁云部分对这个磁暴主相发展的贡献远小于类磁云前半部分对该磁暴主相的贡献.

类磁云前半部分的时间长度为 6 小时 15 分钟,径向空间长度为 0.071 AU,由 Akasofu 的能量耦合函数^[16]计算得到的类磁云前半部分注入磁层的能量为 481553 GW,类磁云前半部分行星际磁场南向分量的平均值为 -10.94 nT ,太阳风电场的平均值为 -5.15 mV/m .对磁暴主相有贡献的类磁云后半部分的时间长度为 2 小时 6 分钟,径向长度为 0.031 AU,注入磁层的能量为 457608 GW,行星际磁场南向分量的平均值为 -14.86 nT ,太阳风电场(VB_z)的平均值为 -8.95 mV/m .

3 总结与讨论

通过以上分析我们可以得到以下结论.

1998 年 11 月 7~8 日发生的大磁暴主相可以分为 3 个阶段.第一个阶段为 11 月 7 日 07:33 UT 到 11 月 7 日 22:00 UT,该阶段完成了一个中等磁暴的主相和该中等磁暴的部分恢复相,其行星际源是 11 月 7 日 07:33 UT 激波之后的鞘区.磁暴主相的第二个阶段为 11 月 7 日 22:00 UT 至 11 月 8 日 04:51 UT,SYM-H 下降幅度最大,其行星际源为鞘区之后类磁云的前半部分,也是对整个磁暴主相贡献最大的阶段.磁暴主相的第三阶段为 11 月 8 日 04:51 UT 到大约 11 月 8 日的 05:57 UT,其行星际源为磁云压缩的类磁云后半部分,其对整个磁暴主相的发展所起的作用远小于类磁云前半部分对磁暴主相的贡献.

前面的计算还表明,由能量耦合函数计算得到的第三阶段注入磁层的能量与第二个阶段注入磁层的能量分别为 457608 和 481553 GW,两者相差不大,因此,对于这个磁暴,注入磁层的能量对磁暴主相发展的影响不是很大.此外,第三阶段行星际磁场南向分量的最大值和平均值,太阳风电场的最大值和平均值都高于第二阶段的相应值,但第二阶段行星际磁场南向分量持续的时间较长,因此,对于我们所研究的这个磁暴,第二阶段行星际磁场南向及持续的时间是影响该磁暴主相发展的关键因素.

图 2 1998 年 11 月 7~8 日磁暴参数 SYM-H 和 Dst 随时间的变化

SSC1 为第一个急始, SSC2 为第二个急始

图3 1998 年 11 月 7~8 日磁暴的行星际源

(a)~(j)依次是行星际磁场、行星际磁场 Z 分量、太阳风电场、太阳风的能量耦合函数、太阳风的速度、太阳风的质子密度、太阳风的质子温度、太阳风动压、太阳风的质子温度与太阳风质子的预期温度之比、太阳风的质子 β

致谢 感谢 ACE 科学团队提供的 ACE 观测的太阳风资料,感谢中国地震局地球物理研究所提供的地磁急始数据和日本数据中心提供的 SYM-H 资料,感谢中国地震局地球物理研究所高玉芬研究员给予的帮助.

参考文献

- 1 Gonzalez W D, Tsurutani B T. Criteria of interplanetary parameters causing intense magnetic storms ($Dst < -100$ nT). *Planet Space Sci*, 1987, 35: 1101, doi: 10.1016/0032-0633(87)90015-8
- 2 高玉芬, 张秀玲. 行星际南向磁场事件与强磁暴. *空间科学学报*, 2000, 20: 136—143
- 3 高玉芬, 章公亮, 韩德胜. 磁暴形态类型对行星际组合结构的响应. *中国科学 A 辑: 数学*, 2000, 30(增刊): 65—68
- 4 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: 1700, doi: 10.1029/2002GL016861
- 5 Wang Y M, Ye P Z, Wang S. An interplanetary origin of great geomagnetic storms: Multiple magnetic clouds. *Chin J Geophys*, 2004, 47: 369—375
- 6 Zhang J, Richardson I G, Webb D F, et al. Correction to “Solar and interplanetary sources of major geomagnetic storms ($Dst \leq -100$ nT) during 1996—2005”. *J Geophys Res*, 2007, 112: A12103, doi: 10.1029/2007JA012891
- 7 Echer E, Gonzalez W D, Tsurutani B T, et al. Interplanetary conditions causing intense geomagnetic storms ($Dst \leq -100$ nT) during solar cycle 23 (1996—2006). *J Geophys Res*, 2008, 113: A05521, doi: 10.1029/2007JA012744
- 8 Jian L, Russell C R, Luhmann J G, et al. Properties of interplanetary coronal mass ejections at one AU during 1995–2004. *Solar Phys*, 2006, 239: 393, doi: 10.1007/s11207-006-0133-2
- 9 Richardson I G, Cane H V. Identification of interplanetary coronal mass ejections at 1 AU using multiple solar wind plasma composition anomalies. *J Geophys Res*, 2004, 109: A09104, doi: 10.1029/2004JA010598
- 10 Russell C T, Shinde A A. On defining interplanetary coronal mass ejections from fluid parameters. *Solar Phys*, 2005, 229: 323, doi: 10.1007/s11207-005-8777-x
- 11 Wimmer-Schweingruber R F, Crooker N U, Balogh A, et al. Understanding interplanetary coronal mass ejection signatures. *Space Sci Rev*, 2006, 123: 177, doi: 10.1007/s11214-006-9017-x
- 12 Zurbuchen T H, Richardson I G. *In-situ* solar wind and magnetic field signatures of interplanetary coronal mass ejections. *Space Sci Rev*, 2006, 123: 31—43, doi: 10.1007/s11214-006-9010-4
- 13 Richardson I G, Cane H V. Regions of abnormally low proton temperature in the solar wind (1965—1991) and their association with ejecta. *J Geophys Res*, 1995, 100: 23397—23412, doi: 10.1029/95JA02684
- 14 Blurga L, Sittler E, Mariani F, et al. Magnetic loop behind an interplanetary shock, Helios, and IMP8 observations. *J Geophys Res*, 1981, 86: 6673—6684, doi: 10.1029/JA086iA08p06673
- 15 Wanliss J A, Showalter K M. High-resolution global storm index: Dst index versus SYM-H. *J Geophys Res*, 2006, 111: A02202, doi: 10.1029/2005JA011034
- 16 Akasofu S L. The energy Coupling between the Solar Wind and the Magnetosphere. *Space Sci Rev*, 1981, 28: 121—190, doi: 10.1007/BF00218810