

2000年行星际南向磁场事件及相关 CME的若干分析*

叶品中 汪毓明

(中国科学技术大学地球和空间科学学院 合肥 230026)

摘 要

根据 WIND 飞船的观测资料, 讨论了 2000 年发生的南向磁场 (B_s) 事件, 分析了它们的源, 发现 12 次事件中有 11 次的源是日冕物质抛射 (CME). 运用从地球向太阳时间倒推的方法和 LASCO, EIT195 Å 的观测资料, 确定了这些 CME. 它们都是快速 CME, 伴有行星际激波, 都具有晕状 (Halo) 形态. 它们在日面上发生的位置是在一个不对称的区域内. 还分析了其中 5 个强南向磁场 ($B_s \geq 20 \text{ nT}$) 事件, 发现它们的 CME 源, 或者具有很高的能量, 或者抛射方向正对地球, 或者是具有叠加效应的 CME 系列. 分析表明, 在我们所讨论的太阳活动高年, 大的行星际扰动和强地磁暴与高速流的联系并不密切.

关键词 CME; 磁云; 地磁暴; 高速流

1 引言

所谓行星际南向磁场事件是指满足以下 3 个条件的行星际扰动^{[1],[2]}: (1) 行星际南向磁场分量 $B_s \geq 10 \text{ nT}$. (2) $B_s \geq 10 \text{ nT}$ 的持续时间大于 3 h. (3) 晨昏电场 $E \sim vB_s \geq 5 \text{ mV/m}$, 其中 v 是太阳风速度. 以下简称为南向磁场事件. 由于其 B_s 变化的持续时间长, 强度变化也比较大, 因此南向磁场事件是比较剧烈的行星际扰动. 它经常伴随着强磁暴, 有着明显的空间天气变化效应^{[1],[2]}. 研究南向磁场事件的规律及其源的特征, 是空间天气预报研究的一项重要内容. 2000 年已处于太阳活动高年, 南向磁场事件出现较多, WIND 和 SOHO 飞船提供了行星际和太阳的观测资料, 为研究南向磁场事件提供了有利条件.

日冕物质抛射 (CME) 是影响空间天气的最重要的太阳事件^[3], 空间天气预报实际上在很大程度上依赖于对 CME 的预报. 但由于 CME 现象极其复杂, 至今人们对它的物理过程仍不十分清楚, 关于 CME 的预报, 现在仍处于探索中^[4]. 南向磁场事件主要是由 CME 引起的^{[1],[5]}, 也有少部分发生在共转流相互作用区 (CIR) 内. 本文将从分析 2000 年发生的南向磁场事件入手, 找出相应的 CME 源, 再进一步分析这些 CME 的特征, 或许会有益于空间天气预报的研究.

2 南向磁场事件的统计

根据 WIND 飞船关于行星际磁场和太阳风参数的观测记录 (文中所有 WIND 数据曲

* 国家自然科学基金资助项目 (49834030, 49974036)

2002-04-03 收到原稿, 2002-08-25 收到修定稿

线都是在 GSM 坐标系中绘制), 2000 年共发生南向磁场事件 12 次, 详见表 1. 表中太阳风速度 v 和南向磁场 B_s 是峰值. Δt 为南向磁场大于 10 nT 的持续时间, S_{we} 是 WIND 卫星位置. t_s 为激波到达时间. 由表 1 可见, 在与南向磁场事件联系的磁暴中, 仅序号为 1, 2 的两次 $Dst > -100$ nT, 而后的 10 次全是 $Dst < -100$ nT 的强磁暴, 可见, 这一年中, 在南向磁场事件所对应的磁暴中, 绝大多数为强磁暴, 中等磁暴是较少的. 为便于叙述, 序号为 1 的事件简称为 S_1 事件, 以此类推.

表 1 2000 年南向磁场事件的统计
Table 1 Statistics of the B_s events in 2000

序号	日期	B_s (nT)	Δt (h)	v (km/s)	Dst (nT)	t_s (UT)	S_{we} (R_e)
1	01-11	24	4	500	-83	—	67
2	01-22	14	6	370	-91	—	60
3	02-12	18	4	600	-169	0000	132
4	04-06	26	6.5	600	-321	1630	68
5	07-15	50	5	700	-300	1430	70
6	08-11	30	4.5	650	-237	1910	42
7	09-17	24	4	800	-201	1600	238
8	10-05	27	3.5	550	-172	0400	252
9	10-14	14	4	400	-110	2300	234
10	10-28	16	6	400	-113	0700 和 1000	188
11	11-06	12	> 3*	600	-159	0930	141
12	11-28	13	> 3*	600	-130	0600	133

注: > 3* 表示略大于 3 h; R_e 为地球半径

为便于分析, 图 1 给出 2000 年 Dst 指数按太阳自转周的顺序排列结果. 从图 1 可以看出, 2000 年 $Dst < -100$ nT 的强磁暴也发生 12 次, 有 10 次与南向磁场事件相联系, 其他两次 Dst 最小值分别为 -147 nT 和 -104 nT, 发生在 5 月 24 日和 11 月 10 日. 说明南向磁场事件与强磁暴并非一一对应. 不过强磁暴中的强者都是与南向磁场事件相关的.

3 南向磁场事件源的分析

3.1 源的性质判断

磁云是 CME 在行星际空间存在的一种表现形式, 约占 CME 总数的 1/2—1/3. 磁云具有如下观测特征^[6]. (1) 磁场增强, 其值高于背景值. (2) 磁场的 z 分量 B_z 单调慢旋转. (3) 低的质子温度. 如果日冕物质抛射速度大于磁声波速度, 便会有行星际激波产生, 而在 1 AU 处共转流相互作用区内一般仅有压缩波出现, 产生行星际激波的可能性很小. 因此, 若根据 WIND 观测资料判断事件的磁结构为磁云或磁云和激波共同存在, 即可确定其源为 CME. 有时, 由于强激波压缩, 波后鞘区内也可能形成南向磁场事件, 这种情况, 其源也应是 CME.

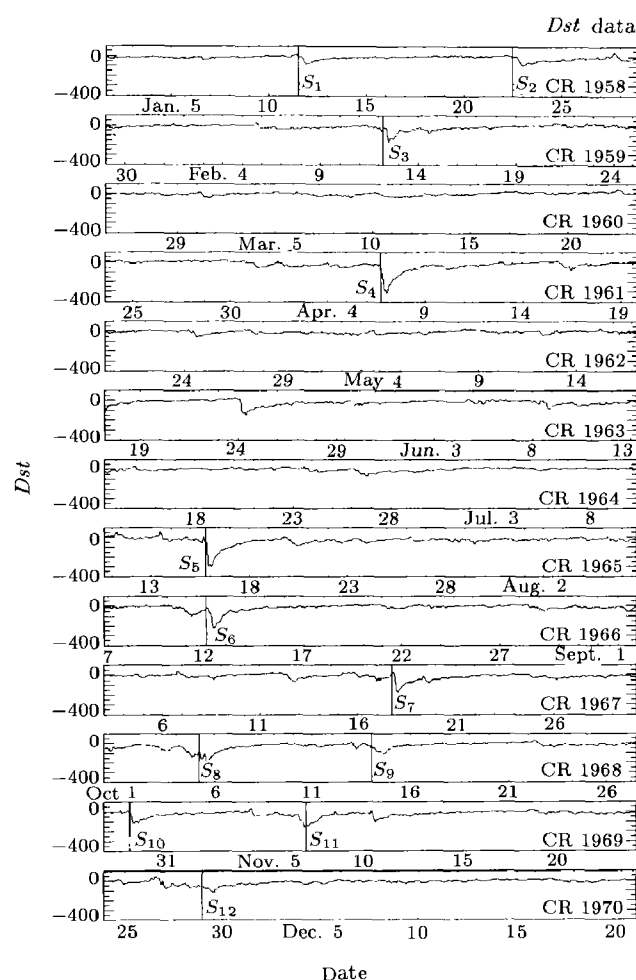


图 1 按太阳自转周顺序排列的 2000 年 Dst 随时间的变化曲线
(图中竖线对应 12 次南向磁场事件的开始)

Fig.1 Dst curve in 2000. The vertical solid lines denote the beginning of the B_s events.
The "CR" means "Carrington Rotation"

根据上述原则分析, 2000 年 12 次南向磁场事件, 有 11 次的源是 CME, 其中一次是 CME 和 CIR 两源共同存在, 另一次的源是 CIR. 详细分析列于表 2 中. 下面举例加以具体说明.

例 1 事件 S_1 . WIND 飞船的观测结果绘于图 2 中. 太阳风速度在一天左右的时间, 从 300 km/s 上升到 600 km/s, 由低温的低速流进入高温的低密度的高速流, 流界面出现在 11 日 2000 UT, 这是一个典型的共转流结构, 事件中具有持续南向磁场的等离子体, 位于 CIR 中.

例 2 事件 S_6 . WIND 飞船观测结果绘于图 3 中. 从 8 月 12 日 0600 UT 开始直至 13 日 0100 UT, 1 AU 处等离子体满足南向磁场事件要求, 同时它明显地具有磁云特征, 质子温度具有很低的值, 磁场强度的背景值约为 10 nT, 而事件对应的磁场强度则大于 20 nT. 其 z 分量从南向缓慢地旋转至北向, 激波出现于 8 月 11 日 1830 UT, 强度属于中等. 因

表 2 2000 年南向磁场事件源的分析
Table 2 The B_s events and their sources

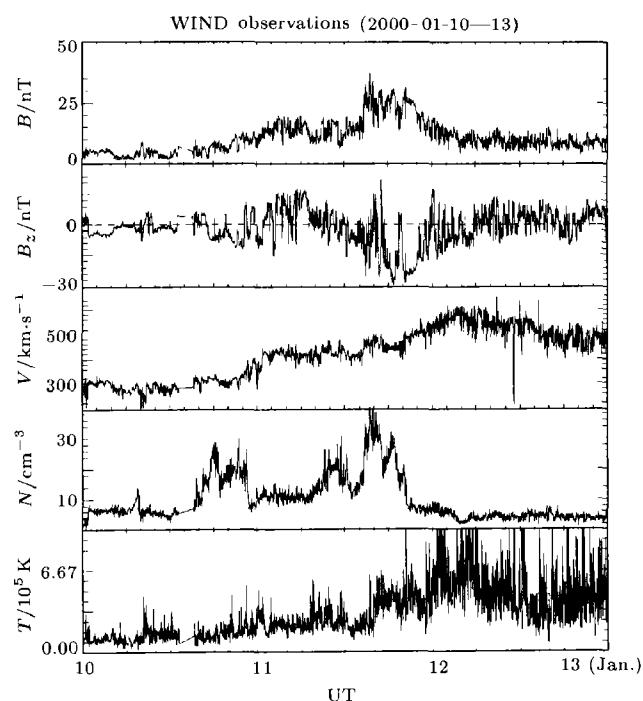
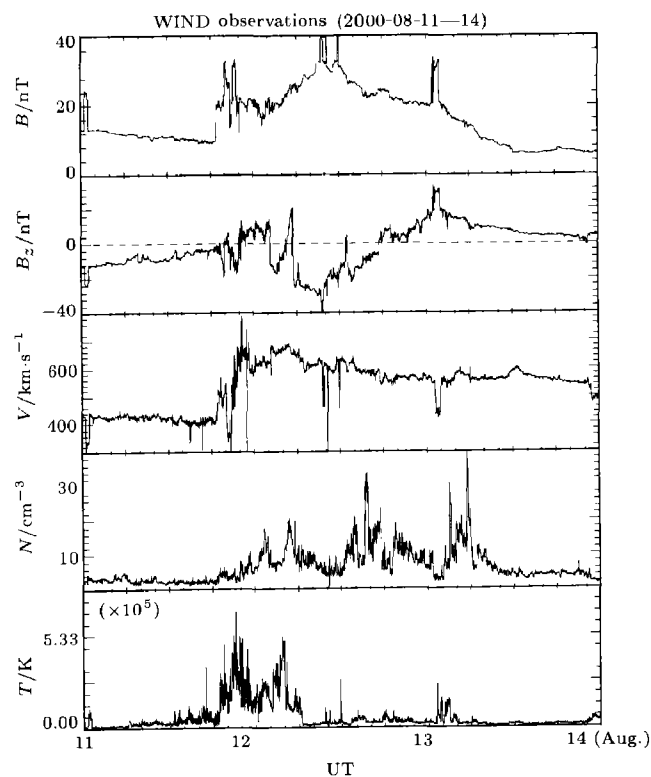
事件	日期	观测分析	源
S_1	01-11	事件等离子体处于共转流作用区内, 太阳风速度从 300 km/s 增加到 600 km/s, 质子温度 T_p 不存在低值, 不是磁云	共转流相互作用区
S_2	01-22	22 日 2100 UT-23 日 0800 UT 磁场增加, B_z 分量慢旋转, T_p 有低值槽, 所以是磁云, 不能判断有无激波	CME (01-18, 1754 UT)
S_3	02-12	12 日 0000 UT 激波到达 WIND, 强度较强, 0730—1300 UT 事件等离子体为磁云	CME (02-09, 1954 UT)
S_4	04-06	6 日 1630 UT 强激波到达 WIND, 6 日 1730 UT—7 日 0800 UT 到达 WIND 的等离子体具有强南向磁场, 位于激波鞘内	CME (04-04, 1632 UT)
S_5	07-15	15 日 1430 UT 激波到达 WIND, 15 日 2000 UT—16 日 0900 UT 事件等离子体具有典型的磁云结构	CME (07-14, 1054 UT)
S_6	08-11	11 日 1830 UT 激波到达 WIND, 12 日 0600 UT—13 日 0200 UT 为磁云	CME (08-09, 1630 UT)
S_7	09-17	激波于 17 日 1600 UT 到达 WIND, 并有多激波叠加. 太阳风速度从 16 日 1900 UT 的 350 km/s 升到 17 日 2400 UT 的 900 km/s. 17 日 1900 UT—2300 UT 到达的等离子体为磁云. 它位于共转流相互作用区内, 流界面出现在 17 日 0400 UT	CME (09-16, 0518 UT), 共转流相互作用区
S_8	10-05	前面 CME 的磁云尾部被后面的激波所压缩, 形成南向磁场事件. 激波到达 WIND 时间约 5 日 0400 UT	CME (10-02, 0350 UT)
S_9	10-14	10 月 12 日 2300 UT 激波到达 WIND, 13 日 1800 UT 开始的磁云一直延伸到 14 日 1800 UT, 之后为共转流相互作用区	CME (10-09, 2350 UT)
S_{10}	10-28	28 日 0700 UT 和 1000 UT 分别有激波到达 WIND, 28 日 2300 UT 到达 WIND 飞船的等离子体是磁云, 磁云速度 400 km/s	CME (10-25, 0826 UT)
S_{11}	11-06	6 日 0930 UT 激波到达 WIND, 从 2230 UT 开始到达的等离子体是磁云一直延伸到 7 日 1800 UT	CME (11-03, 1826 UT)
S_{12}	11-28	28 日 0600 UT 激波到达 WIND, 2300 UT—29 日 2100 UT 为磁云, 磁云在运动中减速明显	CME (11-25, 1931 UT)

此, 其源应是 CME.

例 3 事件 S_7 . 关于此事件的 WIND 观测见图 4. 9 月 17 日 1900—2300 UT 等离子体构成南向磁场事件, 并且具有磁云特征. 同时它处于共转流作用区内, 所以该事件源是 CME 和 CIR, 高速流的压缩作用使南向磁场加大. 自身也处于 600 km/s 的高速流中. 激波到达时间 9 月 17 日 1600 UT 附近显然有多激波叠加.

3.2 关于事件对应的 CME 的认证

首先这些 CME 应是向地的, 为此, CME 发生的日面位置应在正面, 即向地的一侧; 同时白光日冕仪 (例如 C2/LASCO) 观测的视张角应大于一定角度, 这样的 CME 才能与磁层发生碰撞. 这里我们按照 Hudson 等^[7]的取法, 选取视张角大于 130° 的 CME. 再者是 CME 发生时间的确定. 由于白光日冕仪只能观测到 CME 的速度在天空平面上的投影 (称为视速度), 并不能测量速度本身, 并且抛射物在行星际空间中的运动情况也很复杂,

图 2 事件 S_1 的 WIND 观测资料Fig.2 WIND observations of S_1 图 3 事件 S_6 的 WIND 观测资料Fig.3 WIND observations of S_6

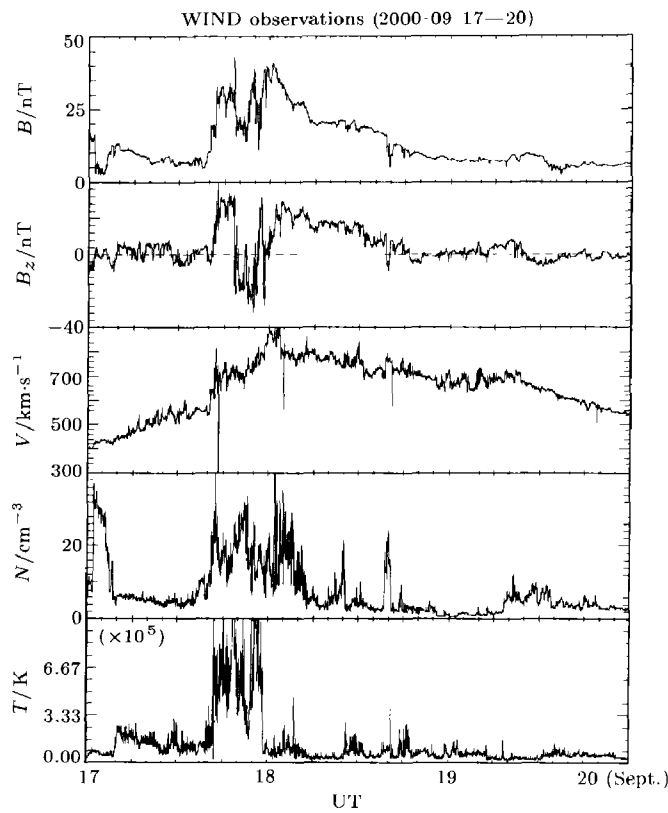


图 4 事件 S_7 的 WIND 观测资料
Fig.4 WIND observations of S_7

表 3 2000 年南向磁场事件中 CME 源的有关参数
Table 3 The corresponding CME in these B_s events

事件	日期	时间 *	形态	视张角	视速度	日面位置	耀斑	日地传输时间
		UT			km/s	(°)		h
S_2	01-18	1754	Halo	360°	759	S16E04	M3.9	99
S_3	02-09	1954	Halo	360°	910	S14W40	C7.4	60
S_4	04-04	1632	Halo	360°	1188	N16W60	C9.7	49.5
S_5	07-14	1054	Halo	360°	1674	N17W02	X1.2	33
S_6	08-09	1630	Halo	360°	702	N20E12	C2.3	61.5
S_7	09-16	0518	Halo	360°	1232	N13W06	M5.9	36
S_8	10-02	0350	Halo	360°	525	S10E09	C4.1	79
S_9	10-09	2350	Halo	360°	798	N02W06	C6.7	96
S_{10}	10-25	0826	Halo	360°	770	N20W28	无	86
S_{11}	11-03	1826	Halo	360°	291	N02W01	C3.2	76.5
S_{12}	11-25	1931	Halo	360°	671	N20W26	X1.9	74.5

注: *CME 在 C2 中开始出现的时间

因此要准确地确定 CME 从太阳到地球的飞行时间是很困难的. 目前大都采取从地球向

太阳回推的办法, 估计 CME 发生的时间. 对于磁云处于低速的情况, 由于无共转流相互作用的存在, 磁云基本上处于匀速运动状态^[8]. 可以用 1 AU 处磁云速度估算出从太阳到地球的飞行时间, 从而倒推出 CME 在白光日冕仪出现的时间, 显然这个时间只是一种近似. 在此时间附近通过 LASCO 和 EIT195 Å 观测的图像确定满足上述要求的 CME 作为事件的源; 对于磁云处于高速流中的情况, 由于存在共转流作用区, 磁云的运动与匀速运动差别较大, 这种情况可以利用 Cliver 曲线^[9] 导出行星际激波在行星际空间传播的平均速度, 同样可以通过 WIND、LASCO 和 EIT 的观测资料确定 CME 源. 对于仅有激波的情况我们也用这种办法确定其源.

按照上述方法, 我们确定了造成各次事件的 CME, 并在表 3 中列出这些 CME 的有关参数. 由于 CME 是日冕中的大尺度活动现象, 其日面位置应该有明确的物理含义, 这里指的是 CME 的初发位置. 表中的 Halo 则遵循了传统的定义, 指 CME 的视张角等于 360°. 耀斑强度一项取自 SGD 手册, 其余各项则取自 CME Catalog*. 下面举例说明 CME 的认证过程.

例 4 事件 S_4 . 这是一次很强的事件, 它造成了 Dst 指数最小值为 -321 nT 的强磁暴, WIND 飞船观测资料绘于图 5 中. 4 月 6 日 1700 UT 激波到达, 激波前后密度比

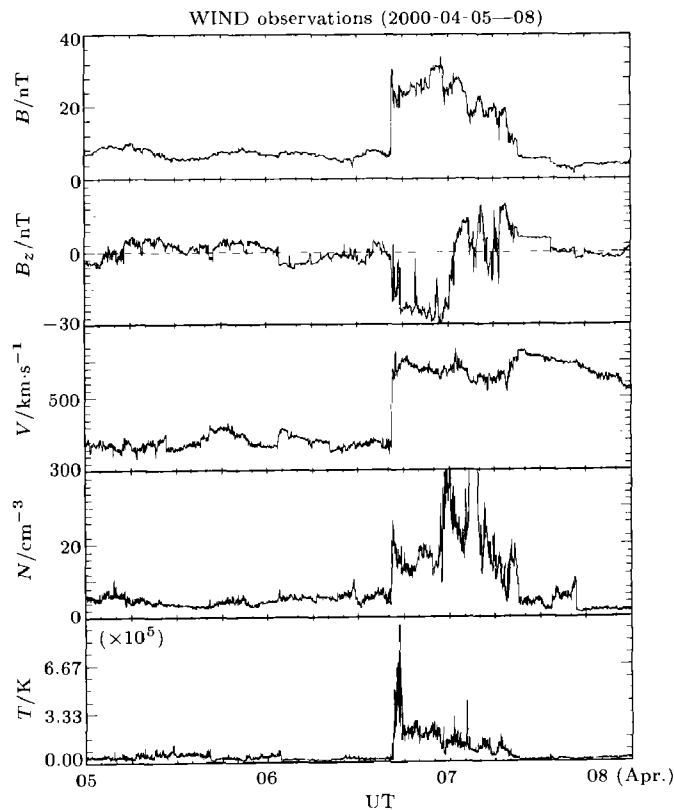


图 5 事件 S_4 的 WIND 观测资料
Fig.5 WIND observations of S_4

*http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/

$\rho_2 : \rho_1 \approx 4$, 属于强激波, 磁云到达时间为 1730 UT, 其后的南向磁场强度达 30 nT, 持续时间 6 h, 它是由激波压缩形成的, 波后太阳风速度最大值约为 640 km/s, 由 Cliver 曲线可查, 激波从太阳到地球的平均速度为 880 km/s, 以此速度计算, 激波在行星际空间大约传播了 48 h, 对应的 CME 应出现在 4 月 4 日下午 1700 UT 左右, LASCO 和 EIT 观测表明, 4 月 4 日下午 1632 UT 出现在 C2 视野中的 CME 是一个正面的 Halo CME, 应视为事件 S_4 的源. 其日面位置是在 (16°N , 60°W), 由于与中心子午线偏离太大, 因此只能观测到激波, 而不能观测到抛射物.

例 5 事件 S_{10} . WIND 飞船关于此事件的观测资料见图 6. 磁云开始于 10 月 28 日 0300 UT, 南向磁场持续近 8 h, 其最大值为 16 nT. 造成 Dst 极小值为 -113 nT 的磁暴, 1 AU 处磁云速度大约为 430 km/s, 由此速度计算, 磁云在行星际空间运行时间为 4 天左右, LASCO 和 EIT 观测显示 10 月 25 日 0826 UT 有一正面 Halo CME, 距此时间最近. 因此, S_{10} 事件的源应为此 CME.

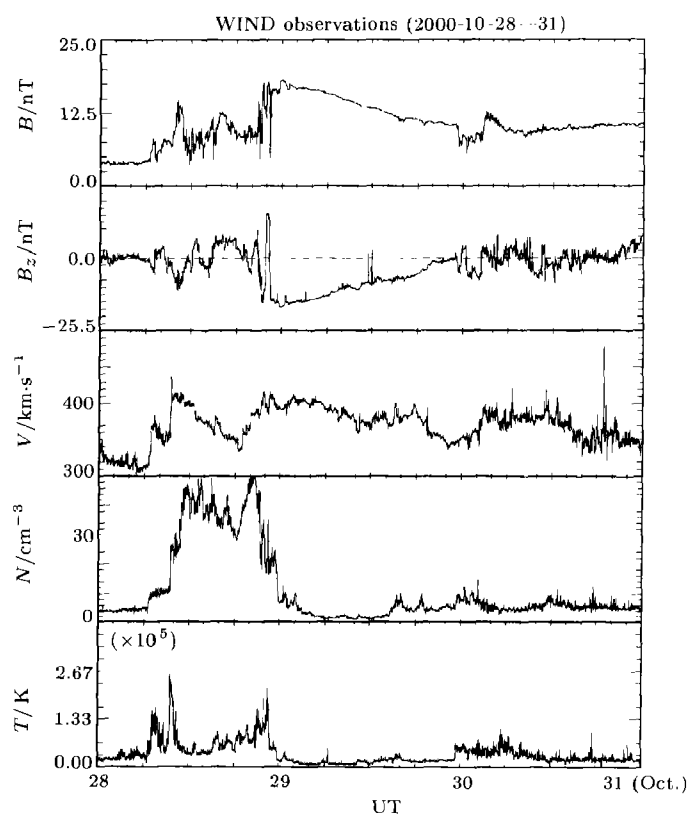


图 6 事件 S_{10} 的 WIND 观测资料

Fig.6 WIND observations of S_{10}

4 讨论与小结

2000 年 12 次南向磁场事件中, 11 次的源是 CME, 其形态全部为 Halo. 同时, 从表

1 和表 3 可以看出, 11 次 CME 源除了 S_2 不能确定有无激波外, 其余 10 次事件皆存在激波, 说明这些 CME 都是快速 CME. 以下着重讨论三个问题.

4.1 关于南向磁场事件 CME 源的日面位置与对称性的讨论

表 3 表明, 2000 年南向磁场事件对应的 CME 发生的日面位置大致在这样一个区域内, 日面经度从 10°E 到 60°W , 日面纬度从 15°S 到 20°N . 它能否在一定程度上表示了作为 B_s 事件源的 CME 的必要条件, 还有待于更多的资料积累和分析. 但它毕竟给出了一个区域, 在此区域内发生的 CME, 造成强的行星际扰动和强的地磁效应的可能性更大一些.

此区域存在着明显的经度不对称性, 东窄西宽, 同时, 发生的次数也有着东西不对称性, 有 9 次发生在中心子午线的西边, 东边仅发生 2 次, 即东少西多. 纬度不对称性并不明显, 但发生的次数北半球 8 次远大于南半球 3 次, 北多南少.

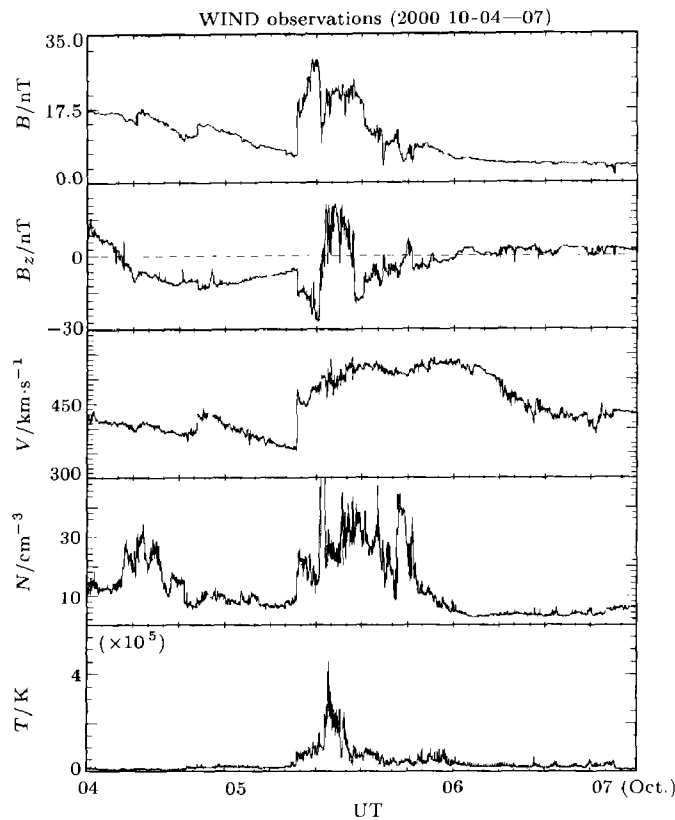
4.2 关于强南向磁场事件的源的分析

南向磁场分量是表示行星际扰动强弱和地磁效应有效性的重要物理量. 在 2000 年以 CME 为源的 11 次事件中, 南向磁场大于 20 nT 的有 5 次, 它们是 S_4, S_5, S_6, S_7 和 S_8 (见表 1). 我们分析这些强扰动对应的 CME 情况: S_4 和 S_5 所对应的 CME 具有很高的视速度和较大面积的暗区, 是大家所关注的能量很大的大事件; 关于 S_6 , 从白光日冕仪 C3/LASCO 观测可看出, 它对应的 CME 的视速度和亮度都具有较好的对称性, 说明它抛射的方向正对地球, 因此磁云中南向磁场强度 (30 nT) 和尺度 (0.3 AU) 都比较大; S_7 前文已经讨论, 它处在共转流作用区内, 并有几个爆发时间相距很近, 又来自同一活动区的 CME 产生了叠加效应, 这些 CME 在 C2/LASCO 出现的时间分别是 9 月 15 日 1206 UT, 1526 UT 和 9 月 16 日 0518 UT, 其中最后一个 CME 具有很大能量; 事件 S_8 是激波和磁云共同作用的结果 (图 7).

由上可见, 具有下述特点的 CME 更值得关注: (1) 具有大的能量, (2) 抛射方向正对地球, (3) 有可能形成叠加效应的 CME 系列.

4.3 关于在太阳活动高年 B_s 事件、强磁暴和高速流关系的讨论

在 2000 年 12 次南向磁场事件中, 有 3 次事件 (S_2, S_9 和 S_{10}) 的磁云速度在 400 km/s 左右, 它们的南向磁场分量皆小于 20 nT , 所造成的地磁场扰动 Dst 值都在 -100 nT 附近, 相对其他事件是比较弱的. 而另外 9 次事件包括 5 次强南向磁场事件, 对应的太阳风都具有较高的速度. 除 S_1 外它们都造成了很强的磁扰动. Dst 指数都小于 -130 nT . 这里有两种情况, 一是高速流, 在它们前面存在着共转流相互作用区, 具有低密度, 高质子温度的特点, 并存在流界面. S_1 和 S_7 就属于这种情况. 另一则是激波行为, 激波使太阳风速度有较大增加. 它们都是由 CME 产生的, 与共转流无关. S_4 等其余 7 例属于此类情况. McAllister 等人^[10] 讨论了太阳活动衰减相期间的地磁活动, 指出大多数中等以上磁暴 ($Dst < -50\text{ nT}$) 都是与共转流作用区相伴而生, 说明共转流相互作用区在磁暴形成中的重要性. 上述分析表明, 在我们讨论的太阳活动高年, 与南向磁场事件相联系的大行星际扰动和强的地磁暴的产生与共转流的相关性并不大, 仅有 $22\%(2/9)$ 与共转流有关.

图7 事件 S_8 的 WIND 观测资料Fig.7 WIND observations of S_8

5 结束语

本文仅分析了 2000 年一年的南向磁场事件, 虽然得到了一些结果, 但由于讨论的时间范围较小, 事件也较少, 这些结果还会有一定的局限性, 还需要做更多的工作, 使南向磁场事件及其源的分析 and 认证进一步深化和改进。

参 考 文 献

- [1] Tsurutani B T *et al.* Origin of interplanetary southward magnetic fields responsible for major magnetic storms near solar maximum (1978—1979). *J. Geophys. Res.*, 1998, **53**(A8):8519—8531
- [2] Gao Yufen *et al.* Relations between IMF B_s events and intense magnetic storms. *Chin. J. Space Sci.*, 2000, **20**:136—143, in Chinese (高玉芬等. 行星际南向磁场事件与强磁暴. 空间科学学报, 2000, **20**:136—143)
- [3] Gosling J T. The solar flare myth. *J. Geophys. Res.*, 1993, **98**:18 937—18 949
- [4] Gosling J T. Coronal mass ejections: an overview. In: Crooker N *et al.* ed., *Coronal Mass Ejection*, Geophys. Monogr. Ser. 99, AGU, 1997. 9—16
- [5] Zhao X P *et al.* Central axial field direction in magnetic clouds and its relation to southward interplanetary magnetic field events and dependence on disappearing solar filaments. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**(A2):2077—2083
- [6] Burlaga L F. Magnetic clouds and force-free fields with constant α . *J. Geophys. Res.*, 1988, **93**:7217—7229

- [7] Hudson H S *et al.* X-ray coronal changes during CME. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, **25**:2481—2484
- [8] Lindsay G M *et al.* Relationships between coronal mass ejection speeds from coronagraph images and interplanetary characteristics of associated interplanetary coronal mass ejections. *J. Geophys. Res.*, 1999, **104**:12 515—12 524
- [9] Cliver E W *et al.* An estimate of the maximum speed of the solar wind, 1938—1989. *J. Geophys. Res.*, 1990, **95**(A10):17 103—17 122
- [10] McAllister A H *et al.* Coronal mass ejections, corotating interaction region, and geomagnetic storms. In: Crooker N *et al.* ed., Coronal Mass Ejection, Geophys. Monogr. Ser.99, AGU, 1997. 279—289

A STUDY ON THE B_s EVENTS IN INTERPLANETARY SPACE AND THE ASSOCIATED CMEs IN 2000

YE Pinzhong WANG Yuming

(School of Earth and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

Abstract

According to the observations from WIND spacecraft, the events of southward magnetic field (B_s events) occurred in 2000 are studied. Among these 12 events, there were 11 events associated with the coronal mass ejections (CMEs). Using the data from WIND, SOHO/LASCO, and SOHO/EIT, we identified the associated CMEs, which were all halo type. All of these CMEs were moving outward with fast speeds and caused shocks ahead. The initial sites of these CMEs on the solar disc were in an asymmetrical region. By studying 5 strong B_s events ($B_s \geq 20$ nT), it is found that the energy of the associated CMEs was high, or the associated CMEs just directed to the Earth, or there were several CMEs, which caused one same B_s event combinationally. In addition, during the solar maximum, the relationship between the intense disturbances in interplanetary space and the high-speed streams seem to be weak.

Key words CME, Magnetic cloud, Geomagnetic storm, High-speed stream