第21卷 第4期 空 间 科 学 学 报 Vol.21, No.4
2001 年 10月 CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE Oct., 2001

1998 年 4 月下旬至 5 月上旬地磁暴的日地事件认证*

汪毓明[1] 叶品中[1] 高玉芬[2] 王家龙[3]

[1](中国科学技术大学地球和空间科学系 合肥 230026)

[2](国家地震局地球物理研究所)

[3](中国科学院北京天文台)

摘 要

综合运用 SOHO/LASCO 、SOHO/EIT 关于 CME 的观测结果和 WIND 飞船关于太阳风的观测记录，识别了 1998 年 4 月下旬至 5 月上旬发生的磁暴的 CME 源，分析了与 5 月初强磁暴群相联系的日地事件. 结果表明，所用日地扰动事件关系认证的方法是可行的. 本文就上述日地事件所涉及的磁暴群与活动区的关系、 CME 地磁效应的日面东西不对称性以及磁云与高速流的作用等问题进行了讨论.

关键词 日冕物质抛射—地磁暴

1 引言

1998 年 4 月下旬至 5 月上旬，太阳表面异常活跃，高能量的太阳耀斑和日冕物质抛射 (CME) 事件频繁发生，根据 SOHO/LASCO(SOHO 飞船 /广角光谱日冕仪) 的观测，从 4 月 23 日至 5 月 2 日 10 天内，就发生了 6 起 Halo 型 CMEs 事件，其初速度大都在 1000 km/s 以上. 表 1 列出了这段时间内部分 CMEs 的主要参数和部分 X 耀斑的强度.

在此期间，地磁活动增强也十分显著. 首先是 4 月 24 日发生了 $Kp = 6$ 的磁暴，接着 5 月 1—5 日产生了很强的磁暴群，由 Dst 指数变化看出，该磁暴群由 3 个强度不等的磁暴组成，其中第二个磁暴最强烈，达到 $Kp = 9$. 表 2 列出了这些磁暴的主要参数.

研究表明 [1,2] 大的非重现地磁暴是由 CME 产生的，其物理过程是，具有很大能量的日冕抛射物离开太阳后，与背景太阳风相互作用，造成很强的行星际扰动与激波，如果这些运动是向着地球的，它们便会与磁层相互作用，从而引起磁暴. 由表 1 和表 2 可以看出，在我们研究的时间段内，即使列出的仅是 CMEs 的一部分，其次数也远比磁暴数多，说明能产生磁暴的 CMEs 仅是 CMEs 总数中的很小一部分. 识别那些与磁暴相联系的 CMEs, 进行这些日地事件的认证，对于研究日地过程的规律，提高空间天气的预报水平，具有重要意义.

多年来，人们为了研究日地事件，已经运用了多种手段进行了事件的认证工作，例如王家龙等 [3] 利用光学、射电、软、硬 X 射线等观测资料，对 1986 年 2 月上旬的地磁暴

* 国家自然科学基金资助项目 (49834030)
2000-07-06 收到原稿， 2001-08-10 收到修定稿

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

作日地事件认证. 由于缺乏二维成像观测资料, 而使部分结果有不确定性. 自从 1995 年 12 月 SOHO 飞船发射以来, 它所携带的 LASCO 和 EIT(远紫外成像望远镜) 系统相继工作. 它们的观测为日地事件的认证提供了有利条件, 提高了认证的可靠程度.

表 1　4 月下旬— 5 月上旬部分 CMEs 的主要参数 * 及部分 X 耀斑参数 ** 和射电爆分立谱形态 **

日期	*C*2 中出现的时间 (UT)	形态	持续时间 (h)	初速度 (km/s)	亮度	伴随的 X 耀斑	射电暴频谱型态
04-20	0705	SHA		400	较弱	–	–
	1007	SHA	1.5	1638	强	M1.4	II/2
04-21	0140	SHA		400	–	–	–
04-23	0527	HA		1390	强	X1.2	II/3, IV/3
04-24	0855	SHA		1245	弱	C8.9	0
04-27	0856	HA	3.5	1630	较强	X1.0	II/3, IV/3
04-29	1630	HA	7.0	1016	较强	M6.8	II/3, IV/3
05-01	2340	HA	<1.5	632	较强	C2.6	III/3
05-02	0500	HA	5.0	450	弱	C5.4	III/3, IV/3
	1406	HA	4.0	1044	较强	X1.1	IV/3
	2120	SHA		357	弱	C5.6	IV/3

HA 表示 Halo, SHA 表示部分 Halo; * 取自美国海军科学研究实验室 LASCO 观测主页 (http://lasco-www.nrl.navy.mil/cmelist.html);　** 取自 SGD.

表 2　4 月下旬 —5 月上旬磁暴的主要参数

	急始 *		*Kp* 最大值 **		*Dst* 最小值 (nT)**
日期	时间 (UT)	日期	*Kp*	时间 (UT)	
04-23	1826	04-24	6	0300-0600	−87
05-01	2156	05-02	7	1200-1500	−100
05-03	1743	05-04	9	0300-0600	−216
		05-05	7	0300-0600	−138

* 取自国家地震局地球物理所地磁报告;　** 取自日本 Kyoto (京都) 地磁台.

SOHO/LASCO 系统具有很高的灵敏度和信噪比, 视野也比较宽, 它能够给出 CME 清晰的图像, 是我们研究 CME 在外日冕区域内的发展、变化的有力的测量工具. 由于系统中间放置了挡板, 无法判断它是向地球的还是背离地球的, 所以仅根据 LASCO 的观测结果无法确定哪些是能产生磁暴的 CME. SOHO/EIT 系统是直接对着日面进行观测的, 其中 EIT 195Å(观测波段在 195Å附近) 对内日冕区域变化尤为敏感, 因此, 它能给出 CME 在日面上发生的具体位置, 还可以给出 CMEs 早期演变的情况 [4,5]. 另外, 行星际扰动与磁层作用进行动量与能量输运时, 太阳风和行星际磁场状况直接影响着输运结果, 从而影响磁暴的强度. 综上所述, 对一个日地事件的认证, 必须综合地运用 SOHO/LASCO 、SOHO/EIT 关于 CME 的观测结果和近地飞船关于行星际扰动的测量结果以及磁暴的观测记录. 本文将利用这些资料对 4 月下旬至 5 月上旬发生的日地事件进行认证与分析.

2　关于 4 月 24 日磁暴的 CME 源的认证

研究表明 [6], 在热压力和磁场力联合作用下, 日冕抛射物离开太阳表面后, 在 $10R_s$(太

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

阳半径) 的距离范围内, 有可能都是加速的. 而后, 在内日球层飞行的大部分时间内处于匀速或减速的运动状态. 为确定磁暴的 CME 源, 可以先假设日冕抛射物一直作匀速且径向运动. 与磁暴相联系的磁云速度即为其速度. 由此计算出抛射物从太阳至飞船匀速飞行所需时间, 称之为估计时间. 由于抛射物实际上并不是匀速运动, 存在着加速度或减速度, CME 源实际在日冕仪出现的时间与上述估计时间导出的时间是有差别的. 为此, Lindsay 等 [6] 在得到估计时间后, 再加减一个修正量, 修正量取 6 h, 这样就形成一个时间范围, 凡是在此时间范围内出现在日冕仪视场内的 CME, 即视为该磁云对应的 CME, 如果出现的不只是一个, 取最靠近估计时间者. 显然, 上述修正量大小的选取有很大的任意性. 由于 CME 加速情况的复杂性, 要选取一个合适的修正量几乎是不可能的. 本文认为, 不管实际存在的加速度大小如何, 一般情况下, 在诸多可能形成地磁效应的 CME 中, 所观测的磁云对应的 CME 应是与估计时间最靠近者. 因此, 本文在讨论磁暴的 CME 源时, 先由磁云速度值计算出估计时间, 然后再利用 SOHO/LASCO 与 SOHO/EIT 195Å的观测结果按上述原则确定 CME.

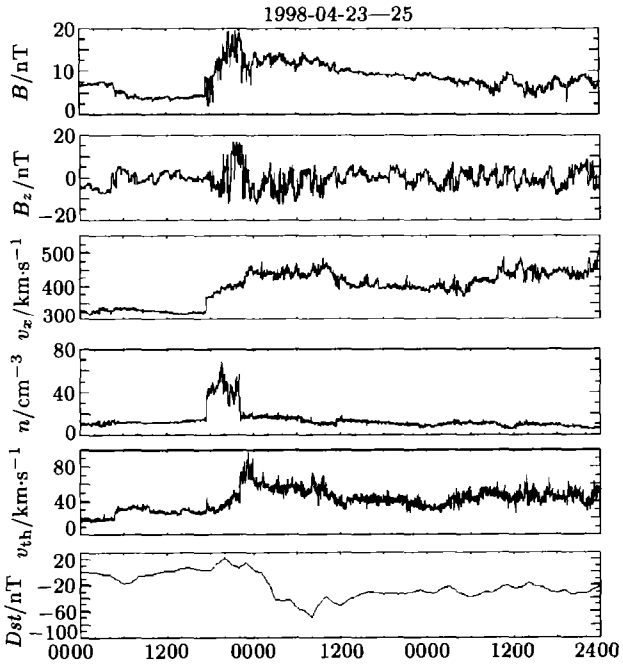


图 1 1998 年 4 月 23—25 日 WIND 飞船记录的太阳风参数和相应的 *Dst* 变化曲线
Fig.1 Parameters of solar wind by WIND spacecraft and *Dst* curve from Apr. 23 to 25, 1998

图 1 是 WIND 飞船 1998 年 4 月 23—25 日观测结果, 它是与 4 月 24 日磁暴相联系的, 高密度结构过后应是行星际中日冕抛射物, 由图可见, 抛射物 4 月 23 日 2 300 UT 到达飞船, 此时离子整体速度为 450 km/s, WIND 飞船当时位于地球上游 220 R_e(地球半径) 处, 所以 CME 从太阳到 WIND 飞船飞行的估计时间为 91 h, 即 CME 爆发的时间估计在 4 月 20 日 0400 UT. SOHO/LASCO 观测表明 4 月 20 日有两次 CME 出现, 一次是在 0705 UT, 强度比较弱, 另一次是在 1007 UT, 强度很强. 同时 SOHO/EIT 195Å观测显示,

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

仅在 4 月 20 日 0938 UT 时，日面的西南部位 (40°S, 50°W) 处有物质抛射产生，并不断向外扩展 (图 2). 从时间和方位上都可以断定它与 SOHO/LASCO 在 4 月 20 日 1007 UT 观测到的 CME 是同一事件. 因为若以等速度向里反推，日面抛出时间应在 0930—1000 UT 之间，这说明时间上是吻合的，在方位上二者也可以衔接. 可见，这一事件产生于向地一侧的日面上，又在估计时间附近，可以确定它就是 4 月 24 日磁暴的源. 它的高初速度和环状结构都支持上述判断. 它从太阳到达 WIND 飞船实际运行时间是 85 h，根据 Lindsay 等 [6] 的统计结果，初速度大于 500 km/s 的 CME 在内日球层内多作减速运动，小于 500 km/s 的 CME，多作加速运动，此次 CME 在太阳附近速度高达每秒千公里以上，总的来看它在内日球层内是减速的，所以实际运行时间小于估计时间是可以理解的.

这里需要分析一下 4 月 23 日 CME 的情况，它是一个强度很强的 Halo 型 CME，所伴随的 X 耀斑时间长、强度大，但是它在日面上爆发的位置是 (20°S, 84°E)，太偏离日面中心子午线，又处于日面东部，故不能形成地磁效应.

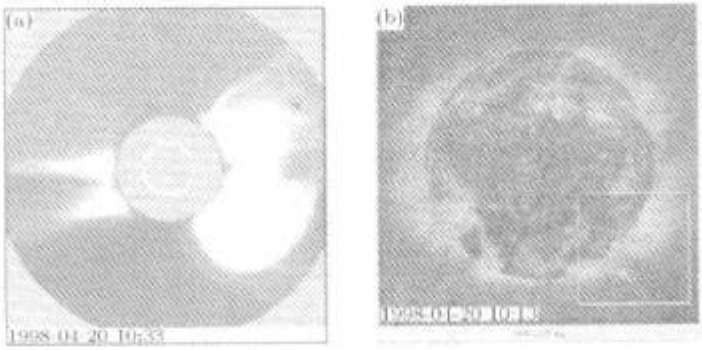


图 2　1998 年 4 月 20 日 LASCO 与 EIT 195Å图像

Fig.2　Images of LASCO and EIT 195Å on Apr. 20th, 1998

3　5 月 1—5 日磁暴群的分析

前面已经指出，该磁暴群是由 3 个磁暴组成的. 为分析这一日地事件的发生与发展，必须首先确定产生这些磁暴的 CMEs. 图 3 给出了 1998 年 5 月 1 日—6 日 WIND 飞船的观测记录和相应的 Dst 指数随时间变化曲线. 由图可见，第 1 个激波到达 WIND 时间是 5 月 1 日 2120 UT(图 3 中 A)，日冕抛射物 5 月 2 日 1200 UT 到达飞船 (图 3 中 B). 抛射物的磁云特征十分明显，由于膨胀引起速度的下降，变化缓慢，同时密度也在减小，更主要的是云内的磁场强度 (12 nT) 是背景值的两倍 (6 nT)，B_z 分量缓慢地由南向转为北向，最小值为 −12 nT，质子温度也明显地低于背景值. 磁云从 B 开始至 B' 结束 (图 3)，持续了大约 5 h. 此时离子整体速度平均为 600 km/s，WIND 所在位置在地球上游 217 R_e 处，据此计算的估计时间为 68 h，即为 4 月 29 日 1600 UT. EIT 195Å图像显示，4 月 29 日 1620 UT 日面 (18°S, 20°E) 处已有明显的日冕激波阵面在快速传播，同时 SOHO/LASCO 观测表明，恰恰在 4 月 29 日 1630 UT 有较强的 Halo 状 CME 在 $C2$ 中出现，显然二者是同一 CME (图 4)，因此可以断定它是向着地球的，并且其位置在日面中部，因此它是磁暴群中第 1 个磁暴的源. 从图 3 还可以看出，第 2 个激波到达 WIND 时间为 5 月 3 日

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

1700 UT(图 3 中 C), 由于高速流的作用, 抛射物 (磁云) 速度变化很大, 磁云的主体 (图 3 中 E、F) 到达 WIND 时间为 5 月 4 日 0200 UT, 此时离子整体速度为 800 km/s, 据此计算估计时间应为 51 h, 即为 5 月 1 日 2300 UT. EIT 195Å显示, 日面 (18°S, 05°W) 处从 5 月 1 日 2200 UT 开始就显现出日冕激波的传播, 其阵面形状与稍后 (2340 UT)LASCO 观测的 CME 的 Halo 形状一致 (图 5). 我们判定 5 月 1 日晚上出现的 CME 是第 2 个磁暴的源.

这里需要特别指出的是, 在第 2 个磁暴也是磁暴群中最大磁暴的形成过程中, 高速流

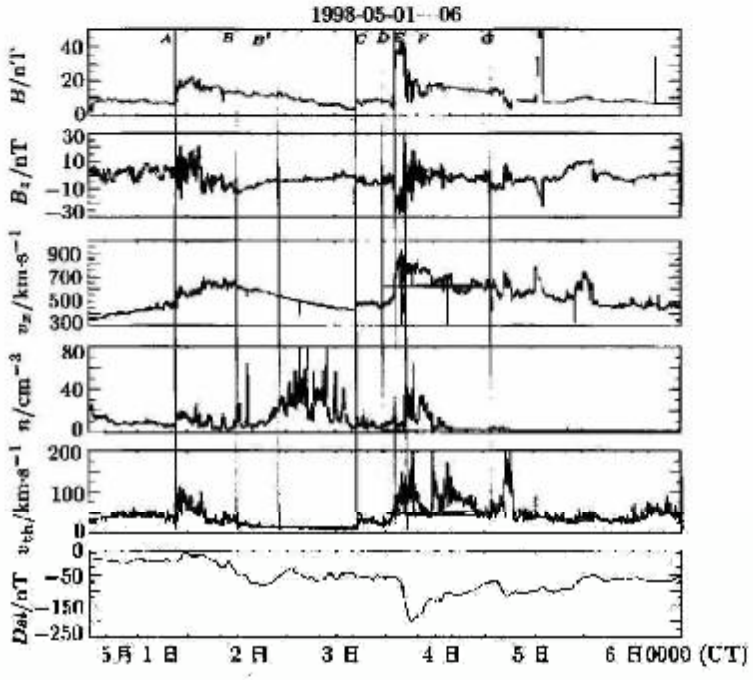


图 3 1998 年 5 月 1—6 日 WIND 飞船记录的太阳风参数和相应的 Dst 变化曲线

Fig.3 Parameters of solar wind by WIND spacecraft and Dst curve from May 1 to 6, 1998

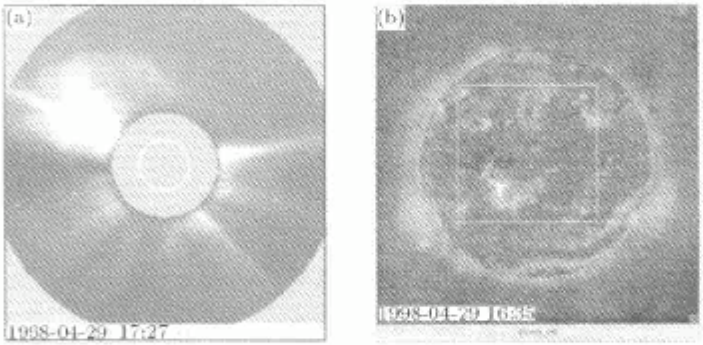


图 4 1998 年 4 月 29 日 LASCO 与 EIT 195Å图像

Fig.4 Image of LASCO and EIT 195Å on Apr. 29, 1998

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

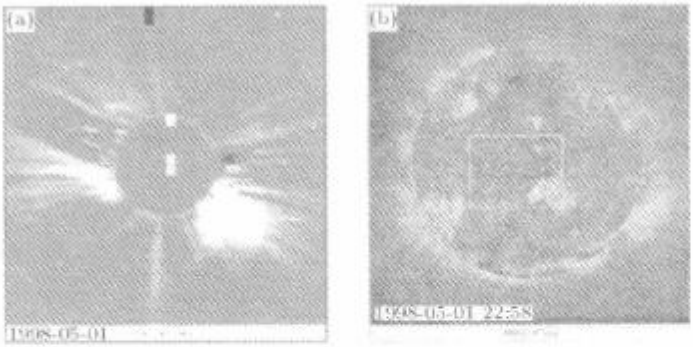


图 5　1998 年 5 月 1 日 LASCO 与 EIT 195Å图像
Fig.5　Image of LASCO and EIT 195Å on May 1, 1998

起到了关键作用，在速度为 800 km/s 的高速流挤压下，磁云本体后部的磁场强度及其南向分量都达到很高的值，磁场强度由 10 nT 陡增到 40 nT，B_s 值达到 −28 nT，由于磁云高速度、强磁场、低密度和大的南向磁场，在与磁层作用时，动量和能量的输运非常显著，因此形成了很强烈的磁暴. WIND 的观测表明，5 月 29 日高速流再现，这说明与磁云作用的高速流具有 27 天重现性，是共转结构.

第 3 个与磁暴相联系的磁云到达 WIND 时间为 5 月 5 日 0200 UT(图 3 中 G)，离子整体速度为 650 km/s，WIND 位于地球上游 216R_e 处，按上述方法计算，CME 与磁云之间时间差应在 64 h 附近，即 5 月 2 日 1000 UT. SOHO/LASCO 观测表明 5 月 2 日下午 1406 UT 有较强的 CME 出现，EIT 195Å观测表明它发生于日面 (15°S, 15°W) 处，是面向地球的，与估计时间仅差 4 h，因此它是第 3 个磁暴的源.

4　讨论

4.1　关于磁暴群与太阳活动区

对照太阳 NOAA8210 活动区的位置，发现引起磁暴群的几次 CME 都产生于这一活动区. 该活动区十分活跃，当它由东向西旋转时，不断地产生 CME 和 X 耀斑，根据 SOHO/LASCO 和 SOHO/EIT 观测，首先在 4 月 27 日爆发 CME，同时还伴随发生 X1.0 级强度的 X 耀斑，当时活动区所在日面位置为 (16°S, 50°E). 由于日冕物质抛射方向大体上是沿着太阳的径向，加之行星际空间存在着螺旋磁场，使这次 CME 越加偏离地球方向，未能造成地磁活动的变化. 从 4 月 29 日至 5 月 2 日，由于活动区位于日面中部，几次 Halo 型 CME 基本上都引起了地磁效应，形成强的磁暴群. 5 月 6 日该活动区转至 (11°S, 65°W) 处，虽然也爆发过大的 CME，并且螺旋磁场的存在使西部日面的抛射物质有利于到达地球，但终因过于偏离地球方向，未能引起地磁效应.

4.2　关于日面东西不对称性

考察 4 月 20 日 1007 UT 的 CME 情况，EIT 195Å观测表明它产生于日面 (40°S, 50°W) 处，显然它并不在日面中部，但它造成了 4 月 24 日的磁暴，与 4 月 27 日爆发的 CME 比较，二者对日面中心子午线的偏离是相同的，强度都属于强型，但对地磁活动性

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

所造成的效应却不同. 这说明由于行星际螺旋磁场的存在, 就地磁效应而言, 存在着日面东西不对称性, 日面西部爆发的 CME 较东部容易到达地球, 对地磁场的变化产生影响, 因此在判断 CME 能否到达地球时, 需考虑这种不对称性. 章公亮等 [7–9] 多次讨论过耀斑日面位置与磁扰关系不对称性问题, 指出发生在日面西部的耀斑其地磁效应要比东部强. 这里的耀斑实际上应该是 CME.

4.3 关于 CME 与高速共转流的作用

文中已经指出, 我们讨论的磁暴群中开始于 5 月 3 日的特别强的磁暴是太阳高速共转流与磁云相互作用的结果, WIND 飞船 4 月份的观测并未显示有高速流的存在, 这说明产生高速流的冕洞与 5 月 1 日的 CME 可能是在日面上相伴产生的. 关于冕洞与 CME 相联系的现象或者说磁云与高速流相互作用的现象已被多人讨论过, McAllister 等 [10] 研究了冕洞与 CME 作用对磁暴的影响, 研究证实高速共转流的存在大大加强了地磁效应, 他们称 CMEs 与高速流相联系是强磁暴的指示器. 本文讨论的 5 月 3 日强磁暴就是一个很好的例证, 从图 3 可以看出, 由 D 点开始的磁云的速度仅为 500 km/s, 磁场强度为 10 nT, B_z 分量大于 −8 nT, 都是比较弱的, 若无后来的强高速流出现, 是不会形成大的地磁活动的. 由于高速流的挤压, 磁云骤然增加, 在磁云内形成强间断 (图 3 中 E), 这种强磁云状态持续了大约两小时, 大大增强了地磁效应. 可见, 在空间天气预报中既要注意太阳活动的变化, 也要关注行星际中太阳风的信息.

4.4 关于 CME 与磁暴的 Kp 最大值的时间差

Braeckner 等 [11] 指出 CME 与对应磁暴的 Kp 最大值的时间差 Δt 基本上是 80 h. 本文分析的几次事件中, Δt 值依次是 84 、 67 、 51 和 61 h, 仅有一次接近 80 h, 其余 3 次与 80 h 偏离颇大. 从本文分析可见, 一个日地事件从日面 CME 开始至磁暴发生, 这是一个复杂的物理过程, 受多种因素的制约, 比如 CME 所在的日面位置、高速流作用等, 因此, Δt 值可能是比较分散的.

5 小结

本文综合利用 SOHO/LASCO 、 SOHO/EIT 关于 CME 的观测结果, WIND 飞船关于太阳风的测量记录以及地面的磁暴资料, 确定了 1998 年 4 月下旬到 5 月上旬每个磁暴的 CME 源. 对这些源的早期发展情况也有所了解. 说明用这种方法来认证 CME 与地磁暴的关系是切实可行的. 通过分析与讨论可以看出, 5 月份的磁暴群是由同一个太阳活动区 (NOAA8210) 在其随太阳运转过程中不断产生的 CME 所造成的. 日面上不同位置爆发的 CME 对地磁场的效应存在明显的东西不对称性. 5 月 3 日的特大磁暴是由高速流与 CME 相互作用的结果, 高速流的存在大大增加了 CME 的地磁效应. 关于 CME 与对应地磁暴的 Kp 最大值的时间差, 本文认为它的值可能是分散的.

致谢 在本文完成过程中, 中国科技大学空间物理教研室李毅博士给予我们很大帮助, 特此致谢.

参 考 文 献

[1] Gosling J T. The solar flare myth. *J. Geophys. Res.*, 1993, **98**(A11):18 937—18 949

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

[2] Cane H V. The current status in our understanding of Energetic Particles, Coronal Mass Ejections and Flares. Coronal Mass Ejections, Geophysical Monograph 99, AGU 1997. 205—215
[3] 王家龙等. 1986 年 2 月的高太阳活动研究 ——IV 日地扰动事件耦合初析. 空间科学学报, 1998, **18**(4):289—295
[4] Dere K P *et al.* EIT and LASCO observations of the initiation of a Coronal Mass Ejection. *Solar Phys.*, 1997, **175**:601—612
[5] Thompson B J *et al.* SOHO/EIT observations of an earth-directed coronal mass ejection on May 12, 1997. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, **25**(14):2465—2468
[6] 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**(A6):12 515—12 523
[7] 章公亮. 耀斑日面位置与磁扰关系的不对称性. 地球物理学报, 1963, **12**(1):32—40
[8] 章公亮等. 空间扰动与耀斑统计关系. 空间物理论文集. 北京：科学出版社, 1980. 103—108
[9] 章公亮等. 1989 年 3 月太阳活动引起的强烈磁暴群. 空间科学学报, 1990, **10**(2):81—88
[10] McAllister A H *et al.* Coronal Mass Ejections, Corolating Interaction Regions, and Geomagnetic Storms. Coronal Mass Ejection, Geophysical Monograph 99, AGU 1997. 279—289
[11] Brueckner G E *et al.* Geomagnetic storms caused by coronal mass ejections (CMEs): March 1996 through June 1997. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, **25**(15):3019—3022

IDENTIFICATION OF SOLAR-TERRESTRIAL EVENTS CONNECTED WITH GEOMAGNETIC STORMS FROM THE LATE APRIL TO THE EARLY MAY IN 1998

WANG Yuming[1]　YE Pinzhong[1]　GAO Yufen[2]　WANG Jialong[3]

[1](*Department of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei* 230026)
[2](*Institute of Geophysics, State Seismological Bureau*)
[3](*Beijing Astronomical Observatory, The Chinese Academy of Sciences*)

Abstract

Analyzing the CME observations of SOHO/LASCO and SOHO/EIT, as well as solar wind observations of the WIND spacecraft, we identified the CME sources that led to the geomagnetic storms occurring from the late April to early May in 1998. Also we analyzed the solar-terrestrial events associated with intense geomagnetic storms in early May. The results show that the identification method of solar-terrestrial events connected with geomagnetic storms we employed is feasible. In addition, we discussed the relationship between these geomagnetic storms and active regions, the east-west asymmetrical effect and the interactions between magnetic clouds and high-speed streams, etc.

Key words　CME, Geomagnetic storm

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com