磁云前边界附近磁场起伏的各向异性与地磁活动的关系

刘睿 魏奉思

(北京大学地球物理系, 北京 100871; 中国科学院空间科学和应用研究中心空间天气学开放实验室, 北京 100080.

E-mail: rzhenliu77@263.net)

摘要 以 Imp 8 和 Wind 飞船的磁场数据为基础, 用最小方差分析方法对 1 AU 附近 26 个磁云前边界前后磁场起伏进行了统计分析. 主要的新发现有: 经过磁云前边界, 磁场起伏的各向异性倾向于增强. 跨越边界前后起伏场各向异性的变化与地磁活动 K_p 指数和 D_{st} 指数相关. 有的事件虽有磁场南向分量, 但各向异性减弱, K_p 指数仍降低(或 D_{st} 指数增加). 有的事件虽无明显的南向分量, 但各向异性仍与 K_p 指数同向变化(或与 D_{st} 指数反向变化). 因此, 各向异性很可能是诊断地磁活动强弱的一个重要指标.

关键词 磁云边界 地磁活动 起伏场各向异性

磁云是具有下述性质的一类行星际事件(见图 1):

(1) 磁场方向(主要是 θ 角)在大约一天时间中平滑地转过一个较大的角度. (2) 磁场强度比背景强. (3) 温度比背景低或具有低的 β 值^[1]. 磁云边界的定义是一个尚未解决的问题^[1]. Farrugia 等人^[2]指出, 客观证认磁云边界并了解其性质是一个紧迫的研究课题. 魏奉思等人^[3,4]认为磁云很可能是时间尺度为天的磁重联事件, 它由一个等离子体团和位于两侧的磁中性线(分隔区)构成, 该磁中性线指示磁云的边界.

1 AU 附近的行星际磁云常常和地磁活动相联系. 1978~1979 年间的 10 个大磁暴中的 5 个与磁云有关^[5], 1971~1986 年间 5 个最大磁暴(≥ 325 nT $D_{st} \geq 250$ nT)中的两个与磁云有关^[6]. Wilson^[7]将磁云分为磁场由南转北的 SN 磁云和由北转南的 NS 磁云. 磁暴大小在这两类磁云中并无显著差别, 但磁暴主相通常开始于 B_z 分量转南时, 当 B_z 转北后开始恢复相. Wilson 所研究的 19 个磁云事件中, 有 5 个事件虽然存在持续时间较长的南向分量, 但 D_{st} 指数的下降并不明显. Zhang 等人^[8]也得到类似的结果, 但有一些 NS 磁云, 当 B_z 转南几小时后, 磁暴主相才开始.

Wei 等人^[9]指出行星际起伏跨越地球弓激波后, 起伏的幅度和各向异性都增加, 同时行星际太阳风状态的变化对地球弓激波后的起伏状态有着直接的控制作用. 可以推测, 磁云边界前后起伏状态发生的变化在跨越弓激波后将影响磁鞘区的起伏活动, 从而可能对磁层的某些活动施加影响. 本文分析了磁云前边界前后磁场起伏各向异性的变化以及与地磁

活动的关系.

1 事件的选取和处理方法

我们根据文献资料中曾经证认过的磁云事件, 筛选出 26 个数据较为完整、边界容易确定的典型磁云. 对于 1995 年以前的事件, 采用 Imp 8 飞船的分辨率为 15.36 s 平均的磁场数据; 对于 1995 年以后的事件采用 Wind 飞船分辨率约 1 min 平均的磁场数据. 我们通过结合磁场大小、 θ 角的变化与 θ 角跃变约 180° 的结构以及等离子体数据来证认磁云边界, 从而在一定程度上消除了证认磁云边界时的主观不确定性. 磁云事件如表 1.

我们采用最小方差分析方法^[15~16]来进行数据分析, 对方差-协方差矩阵 $M_{??} = \overline{B_i B_j} - \bar{B}_i \bar{B}_j$ ($i, j = 1, 2, 3$; B_i, B_j 是各个磁场强度矢量在直角坐标系中的分量, 横线表示对所有样本求平均), 用拉格朗日乘法求得 3 个本征值 e_1, e_2, e_3 和对应的本征矢 x_1, x_2 和 x_3 , 在几何上对应于 $M_{??}$ 所决定的方差椭球的 3 个主轴. 从而引入一个自然坐标系(x_1, x_2 和 x_3), x_1 为最大起伏的方向, x_3 为最小起伏的方向. 对于各向异性的起伏场, 比值 $e_1 : e_2 : e_3$ 量度起伏场的各向异性程度.

2 磁云前边界前后磁场起伏的统计性质

2.1 边界前后各向异性的变化与 K_p 指数比较

我们对 26 个磁云事件前边界前后的磁场用最小方差分析方法进行统计分析, 将 $e_1 : e_3$ 作为量度起伏

图 1 1995 年 3 月 4~5 日的磁云事件

D_{st} 指数用空心圆圈表示, K_p 指数用直方图表示. 图中 3 条竖线分别示出行星际激波: 磁云前过渡区(见 2.2 节)、磁云前边界和磁云后边界

各向异性的主要参数, 并将各向异性的变化与描述全球磁扰程度的地磁 K_p 指数进行比较. 我们在边界前后各取 3 h 左右数据, 保证所取区间内有两个以上 K_p 值以利于观察变化趋势.

的各向异性与 K_p 指数同向变化. 除事件 12, 18 和 20 外, 若跨越边界后各向异性增长, 则 K_p 指数相应增加; 反之, 若各向异性降低, K_p 指数也下降. 经过磁云前边界, 26 个事件中的 18 个磁场起伏的各向异性增强, 除事件 15, 22 和 26 各向异性的增长较弱外, 其余都有显著增强.

计算结果表明(见表 2), 磁云前边界前后磁场起伏

表 1 磁云事件(开始时间, 磁云类型和文献资料. 前 11 个事件来自 Imp 数据, 后 15 个事件来自 Wind 数据)

事件	日期	时刻	类型	文献	时刻	日期	时刻	类型	文献
1	1973-11-21	16 : 24	SN	[6,7,10]	14	1995-10-18	19 : 02	SN	Wind MFI Team
2	1975-11-17	01 : 58	NS	[6,7,10,11] [12,13]	15	1996-05-27	14 : 50	SN	Wind MFI Team
3	1977-09-22	11 : 36	NS	[11]	16	1996-12-24	03 : 04	NS	Wind MFI Team
4	1977-09-26	23 : 00	SN	[7,10,11]	17	1997-01-10	05 : 00	SN	Wind MFI Team
5	1978-06-05	04 : 28	SN	[7,8,12,14]	18	1997-05-15	09 : 52	SN	Wind MFI Team
6	1978-09-29	08 : 50	SN	[7,8,11]	19	1997-08-03	13 : 52	SN	Wind MFI Team
7	1981-10-22	14 : 30	SN	[11]	20	1997-09-21	22 : 06	SN	Wind MFI Team
8	1982-09-25	21 : 00	NS	[7,8,11,12]	21	1997-11-07	05 : 30	SN	Wind MFI Team
9	1988-01-14	08 : 30	NS	[11]	22	1998-01-07	02 : 54	SN	Wind MFI Team
10	1992-05-07	10 : 22	NS	[11]	23	1998-02-04	04 : 30	SN	Wind MFI Team
11	1992-11-09	06 : 46	SN	[11]	24	1998-03-04	14 : 40	SN	Wind MFI Team
12	1995-02-08	03 : 30	SN	Wind MFI Team ^{a)}	25	1998-06-02	10 : 30	SN	Wind MFI Team
13	1995-03-04	11 : 42	NS	Wind MFI Team	26	1998-08-20	09 : 10	SN	Wind MFI Team

a) http://lepmfi.gsfc.nasa.gov/mfi/mag_cloud_publ.html

表 2 磁云前边界前后磁场起伏的各向异性与 K_p 值比较^{a)}

事件	边界前			边界后			K_p	B_z	相关性
	$e_1 : e_2 : e_3$	$?t$	N	$e_1 : e_2 : e_3$	$?t$	N			
1	5.69 : 4.35 : 1	13 : 24~16 : 24	685	16.28 : 2.98 : 1	16 : 24~19 : 24	646	2+,2+,4	I	1
2	13.76 : 3.14 : 1	22 : 58~01 : 58	660	10.11 : 2.80 : 1	01 : 58~04 : 58	686	1,1-,1-	U	1
3	11.545 : 1.62 : 1	08 : 36~11 : 36	631	21.88 : 1.79 : 1	11 : 36~14 : 36	644	4,5-	U	1
4	27.32 : 6.20 : 1	20 : 00~23 : 00	627	41.41 : 4.34 : 1	23 : 00~02 : 00	668	5-,6-	I	1
5	20.21 : 5.47 : 1	01 : 28~04 : 28	700	14.70 : 3.97 : 1	20 : 32~23 : 32	622	6+,6+,4+	U	1
6	25.00 : 5.50 : 1	05 : 50~08 : 50	656	62.82 : 9.22 : 1	08 : 50~11 : 50	405	5-,5	I	1
7	7.50 : 2.42 : 1	11 : 30~14 : 30	448	16.85 : 2.15 : 1	14 : 30~17 : 30	116	5,7	I	1
8	64.96 : 9.33 : 1	18 : 00~21 : 00	459	40.63 : 2.27 : 1	21 : 00~24 : 00	563	4+,3	U	1
9	148.73 : 12.76 : 1	05 : 30~08 : 30	703	58.27 : 2.558 : 1	08 : 30~11 : 30	703	5,2+,2	U	1
10	4.12 : 3.01 : 1	07 : 22~10 : 22	585	13.25 : 2.09 : 1	10 : 22~13 : 22	697	1+,3	U	1
11	19.61 : 3.33 : 1	03 : 46~06 : 46	490	50.61 : 7.51 : 1	06 : 46~09 : 46	693	4,6+	I	1
12	34.02 : 2.31 : 1	00 : 30~03 : 30	118	28.28 : 4.84 : 1	03 : 30~06 : 30	117	4,5+	I	0
13	4.98 : 1.48 : 1	08 : 42~11 : 42	118	91.36 : 2.61 : 1	11 : 42~14 : 42	117	3-,3+	U	1
14	9.40 : 4.90 : 1	16 : 02~19 : 02	117	155.15 : 18.2 : 1	19 : 02~22 : 02	117	5+,7-	I	1
15	7.69 : 4.05 : 1	11 : 50~14 : 50	118	13.18 : 9.66 : 1	14 : 50~17 : 50	117	2-,4-	I	1
16	9.642 : 1.93 : 1	00 : 04~03 : 04	234	33.22 : 4.38 : 1	03 : 04~06 : 04	235	1,2-	U	1
17	26.67 : 5.22 : 1	02 : 00~05 : 00	235	40.15 : 2.11 : 1	05 : 00~08 : 00	234	5-,6	I	1
18	49.50 : 9.41 : 1	06 : 52~09 : 52	118	198.73 : 8.52 : 1	09 : 52~12 : 52	117	7-,7-	I	0
19	89.45 : 13.49 : 1	10 : 52~13 : 52	235	167.55 : 8.31 : 1	13 : 52~16 : 52	234	4-,5	I	1
20	5.88 : 3.68 : 1	18 : 40~21 : 40	235	4.32 : 3.55 : 1	22 : 06~01 : 06	235	5-,5,4+	U	0
21	26.11 : 9.45 : 1	02 : 30~05 : 30	117	15.20 : 1.56 : 1	05 : 30~08 : 30	118	7,6	I	1
22	105.82 : 8.10 : 1	23 : 54~02 : 54	117	121.86 : 69.55 : 1	02 : 54~05 : 54	117	5+,6+	U	1
23	28.30 : 3.14 : 1	01 : 30~04 : 30	117	16.21 : 1.52 : 1	04 : 30~07 : 30	118	3,2+	U	1
24	12.62 : 4.16 : 1	11 : 40~14 : 40	117	58.56 : 2.83 : 1	14 : 40~17 : 40	118	3-,4	U	1
25	8.55 : 2.63 : 1	07 : 30~10 : 30	117	33.36 : 3.06 : 1	10 : 30~13 : 30	118	2,2+	U	1
26	20.24 : 6.40 : 1	06 : 10~09 : 10	117	24.84 : 4.18 : 1	09 : 10~12 : 10	118	2+,3+	I	1

a) $e_1 : e_2 : e_3$ 为方差分析得到的 3 个本征值之比, $?t$ 为进行方差分析所用的时间段, N 为进行方差分析所用的数据量, K_p 一栏中分别为边界前后的 K_p 值, B_z 一栏内“I”(important)表示南向分量重要^[18]($B_z < 10$ nT 且持续时间超过 3 小时), 反之, 则用“U”(unimportant)表示. 相关性一栏中用“1”表示相关性较好, 用“0”表示相关性较差

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/csb2002-47-6-462>

2.2 边界前后各向异性的变化与 D_{st} 指数比较

磁云边界前通常存在复杂的结构, 这些结构中磁场强度较低, 密度或温度较高, β 值也较高, 总压强(热压加上磁压)平衡, 时间尺度为几十分钟到两个小时左右(见图 1). 我们将这种结构称为磁云边界前的“过渡区”. 在过渡区内磁场起伏的各向异性常常会发生剧烈的变化, 因此要较为细致地讨论磁云边界前后各向异性的变化, 必须单独考虑这种结构. 我们分别计算了磁云边界前、边界附近过渡区和边界后的磁场起伏的各向异性, 并与时均值的 D_{st} 指数¹⁾ 进行比较. 所用 D_{st} 指数取自日本京都大学的地磁数据中心(WDC). D_{st} 指数反映赤道环电流的发展, 常用来表征磁暴的发展. 由于 Imp 8 的数据中等离子体的数

据常常不完整, 难以给出上述过渡区, 我们只讨论 Wind 飞船观测到的 15 个磁云事件.

计算结果表明(见表 3), 磁场起伏的各向异性与 D_{st} 指数反向变化. 除事件 17, 19 和 24 外, 如果经过过渡区或前边界各向异性增长, 则 D_{st} 指数下降; 如果各向异性下降, 则 D_{st} 指数增加. 事件 13, 14, 15, 19, 20, 23 和 26 前边界附近各向异性的变化与磁暴急始时 D_{st} 指数的变化对应.

将表 3 与表 2 对照可以看到, 表 3 中各向异性与 D_{st} 指数相关性较差的事件(17, 19 和 24)与 K_p 指数却有较好的相关性, 表明这 3 个事件边界前后各向异性的变化在总体趋势上仍与地磁活动相关; 而表 2 中各向异性与 K_p 指数相关性较差的事件(12, 18 和 20)与

表 3 磁云边界前后磁场扰动的各向异性与 D_{st} 指数的比较^{a)}

事件	边界前			边界附近过渡区		
	$e_1 : e_2 : e_3$	βt	N	$e_1 : e_2 : e_3$	βt	N
12	37.24 : 3.79 : 1	01 : 50~02 : 50	39	78.04 : 2.01 : 1	02 : 50~03 : 30	26
13	9.89 : 4.54 : 1	09 : 54~10 : 54	40	6.58 : 1.33 : 1	10 : 54~11 : 42	31
14	29.21 : 5.31 : 1	17 : 20~18 : 20	39	20.38 : 7.36 : 1	18 : 20~19 : 02	27
15	57.37 : 2.83 : 1	11 : 10~12 : 10	39	11.36 : 6.00 : 1	12 : 10~14 : 50	105
16	30.44 : 4.73 : 1	00 : 20~01 : 20	78	5.96 : 2.90 : 1	01 : 20~03 : 04	136
17	60.49 : 12.73 : 1	02 : 50~03 : 50	78	17.25 : 2.48 : 1	03 : 50~05 : 00	91
18	234.94 : 4.14 : 1	06 : 30~07 : 30	39	44.38 : 6.33 : 1	07 : 30~09 : 52	93
19	29.25 : 3.00 : 1	12 : 00~13 : 04	83	109.05 : 29.49 : 1	13 : 04~13 : 52	63
20	14.53 : 1.79 : 1	20 : 42~21 : 42	79	67.65 : 22.24 : 1	21 : 42~22 : 06	31
21	7.01 : 1.36 : 1	02 : 20~04 : 30	84	31.38 : 9.52 : 1	04 : 30~05 : 30	39
22	7.63 : 1.09 : 1	00 : 22~01 : 22	39	98.77 : 9.42 : 1	01 : 22~02 : 54	60
23	20.11 : 3.64 : 1	01 : 20~02 : 20	39	13.00 : 2.56 : 1	02 : 20~04 : 50	98
24	60.54 : 4.13 : 1	13 : 06~14 : 06	39	321.55 : 11.39 : 1	14 : 06~14 : 42	24
25	25.37 : 11.56 : 1	07 : 20~08 : 20	39	12.53 : 3.04 : 1	08 : 20~10 : 30	85
26	28.68 : 3.60 : 1	04 : 40~05 : 40	39	10.58 : 2.22 : 1	05 : 40~09 : 10	137

事件	边界后			D_{st}	B_z	相关性
	$e_1 : e_2 : e_3$	βt	N			
12	111.01 : 22.29 : 1	03 : 30~04 : 30		?	I	1
13	38.49 : 2.87 : 1	11 : 42~12 : 42	39	+, ?	U	1
14	346.03 : 25.16 : 1	19 : 02~20 : 02	39	+, ?	I	1
15	84.68 : 2.94 : 1	14 : 50~15 : 50	39	+, ?	I	1
16	27.28 : 6.39 : 1	03 : 04~04 : 04	79	+, ?	U	1
17	42.61 : 4.16 : 1	05 : 00~06 : 00	79	?	I	0
18	101.89 : 33.83 : 1	09 : 52~10 : 52	39	+, ?	I	1
19	207.78 : 1.54 : 1	13 : 52~14 : 52	78	+, ?	I	0
20	19.99 : 3.00 : 1	22 : 06~23 : 06	78	?, +	U	1
21	11.36 : 1.61 : 1	05 : 30~06 : 30	40	?, +	I	1
22	132.00 : 11.39 : 1	02 : 54~03 : 54	39	?	U	1
23	343.35 : 6.78 : 1	04 : 50~05 : 50	39	+, ?	U	1
24	71.16 : 3.23 : 1	14 : 42~15 : 42	39	?	U	0
25	227.30 : 4.13 : 1	10 : 30~11 : 30	39	+, ?	U	1
26	14.27 : 2.43 : 1	09 : 20~10 : 20	39	+, ?	I	1

a) D_{st} 一栏中“+”表示 D_{st} 指数增长, “?”表示 D_{st} 指数降低, “+, ?”表示 D_{st} 指数在所考察的区间内先增长后降低, “?, +”表示 D_{st} 指数在所考察的区间内先降低后增长. 其他说明同表 2

D_{st} 指数却有较好的相关性. 这是由于过渡区附近磁场扰动的各向异性有剧烈的变化和两表中数据采样宽度不同. 过渡区的物理性质在磁云与磁层耦合过程中的作用是需要进一步研究的问题.

3 磁场起伏各向异性与磁场南向分量的关系

我们结合南向分量进一步分析了磁云前边界各向异性与地磁活动的关系, 发现有的事件各向异性比南向分量能够更为“灵敏”地反映地磁活动指数的变化.

26 个磁云中的 19 个是磁场由南转北的 SN 磁云, 前边界与磁场的南向分量对应. 其中 13 个事件(5, 20, 22, 23, 24 和 25 除外)南向分量是重要的($B_z < ?10$ nT, 且持续时间超过 3 h), 都与磁暴相联系, 但事件 21 中经过磁云前边界 K_p 指数反而下降, 相应的 D_{st} 指数增加, 各向异性也是降低的. 需要说明的是, 事件 21 中的磁暴是由 1997 年 11 月 7 日 22:20 的激波引起的, 磁云开始的时间与磁暴恢复相对应. 其余 6 个南向分量不重要的 SN 磁云中的 3 个(22, 24 和 25), 经过磁云前边界各向异性增强, 相应的 K_p 指数也增加, D_{st} 指数降低. 其中, 事件 22 与中等大小的磁暴相联系, D_{st} 指数峰值分别达到 77 nT, K_p 峰值为 6+.

7 个磁场由北转南的 NS 磁云中的 4 个事件(3, 10, 13 和 16)中, 经过磁云前边界, 各向异性增强, 地磁活动也增强, 其中, 事件 3, 13 与磁暴相联系(图 1 示出了事件 13 的情况).

4 结果与讨论

() 经过磁云前边界, 磁场起伏的各向异性倾向于增强.

() 磁云前边界前后磁场起伏的各向异性的变化与 K_p 指数和 D_{st} 指数有较强的相关性.

() 各向异性的增长似乎对于增强磁云与磁层间的耦合具有一定的作用; 反之, 各向异性降低, 即使存在较强的南向分量, K_p 指数仍然降低(或 D_{st} 指数增加), 如事件 21; 而对于与南向分量无关的事件(即 NS 磁云), 各向异性仍与地磁活动指数相关, 且能够正确指示前边界附近地磁活动的增强(如事件 3, 10, 13 和 16 等). 因此, 各向异性可能是量度磁云前边界附近磁场扰动的地磁效应的一个重要指标.

应该说明, 南向分量为磁层顶的重联提供了较为鲜明的物理图像, 但是行星际磁场常是高度涨落起伏的, 地球弓激波和磁层顶也是呈起伏状的, 因此, 进一步研究磁云边界附近磁场的扰动起伏与磁层顶

扰动起伏间的耦合, 有可能为磁层顶处实际可能发生的湍动重联提供更为细致的物理图景. 同时, 由于磁层顶的重联过程实际上是三维磁重联过程, 方差椭球和磁场起伏的三维分布函数有可能为进一步的研究提供重要线索.

致谢 工作过程中, 得益于与中央大学太空科学研究所赵寄昆教授的多次讨论. 本工作受国家重点基础研究发展规划(G200078405)和国家自然科学基金(批准号: 49990450, 49874040)资助.

参 考 文 献

- 1 Burlaga L F. Magnetic clouds. In: Physics and Chemistry in Space—Space and Solar Physics. Vol 21, Physics of the Inner Heliosphere. Berlin: Springer-Verlag, 1991. chapter 6
- 2 Farrugia C J, Burlaga L F, Lepping L F. Magnetic clouds and the quiet-storm effect at earth, 91-106. In: Tsurutani B T, Gonzalez W D, Kamide Y, et al, eds. Magnetic Storms. American Geophysical Union, 1997
- 3 魏奉思, Schwenn R, 胡强. 行星际空间中的磁重联事件. 中国科学, E 辑, 1997, 27(4): 325-331
- 4 魏奉思, 胡强, 冯学尚. 行星际电流片中的磁重联过程. 科学通报, 2000, 45(15): 1611-1616
- 5 Tsurutani B T, Gonzalez W D, Tang F et al, Origin of interplanetary southward magnetic fields responsible for major magnetic storms near solar maximum (1978-1979). J Geophys Res, 1988, 93: 8519-8531
- 6 Trurutani B T, Gonzalez W D, Tang F, et al. Great magnetic storms. Geophys Res Lett, 1992, 19: 73-76
- 7 Wilson R M. Geomagnetic response to magnetic clouds. Planet Space Sci, 1987, 35: 329-335
- 8 Zhang G, Burlaga L F. Magnetic clouds, Geomagnetic disturbances, and cosmic ray decreases. J Geophys Res, 1988, 95: 2511-2518
- 9 Wei F S, Du Heng, Whang Y C. Statistical properties of interplanetary fluctuations behind the bow shock. Planet Space Sci, 1987, 35(11): 1419-1428
- 10 Klein L W, Burlaga L F. Interplanetary magnetic clouds at 1AU. J Geophys Res, 1982, 87: 613-624
- 11 Bothmer V, Rust D M. The field configuration of magnetic clouds and the solar cycle. In: Crooker N, Joselyn J A, Feynmann J, eds. Coronal Mass Ejections. American Geophysical Union, 1999. 139-146
- 12 Lepping R P, Jones J A, Burlaga L F. Magnetic field structure of interplanetary magnetic clouds at 1 AU. J Geophys Res, 1990, 95: 11957-11965
- 13 Vandas M, Geranios A. November 17-18, 1975, event: A clue to an internal structure of magnetic clouds? J Geophys Res, 2001, 106: 1849-1858
- 14 Vandas M, et al. Evidence for a spheroidal structure of magnetic clouds. J Geophys Res, 1993, 98: 21061-21069
- 15 Sonnerup B U Ö, Cahill L J. Magnetopause structure and attitudes from Explorer 12 Observations. J Geophys Res, 1967, 72: 171-183
- 16 Lepping R P, Behannon K W. Magnetic field directional discontinuities. 1. Minimum variance errors. J Geophys Res, 1980, 85: 4695-4703
- 17 Dobrowolny M, Bavassano B, Marian F, et al. Magnetic dips in the solar wind. Solar Phys, 1979, 62: 203-220
- 18 Gonzalez W D, Tsurutani B T. Criteria of interplanetary parameters causing intense magnetic storms ($D_{st} < ?100$ nT). Planet Space Sci, 1987, 35: 1101-1109

doi/10.1360/csb2002-47-6-462 (2001-08-24 收稿, 2001-12-06 收修改稿)