# 行星际南向磁场事件与强磁暴*

高王芬 张秀玲
(中国地震局地球物理研究所 北京 100081)

**摘 要**

利用 1978—1988 年期间的太阳风和地磁资料对行星际磁场 (IMF) 南向分量 $B_s$ 事件 (即 $B_s > 10\,\mathrm{nT}$ 及其所驱动的昏向电场 $VB_s > 5\,\mathrm{mV/m}$ 、持续时间 $\Delta T > 3\,\mathrm{h}$ 的事件) 与强磁暴 ($Dst \leqslant -100\,\mathrm{nT}$) 关系进行了分析. 结果表明, 100% 的 $B_s$ 事件都能引起磁暴的发生, 但其中只有 84% 为强磁暴; 强磁暴的发生都与较强的 IMF $B_s$ 活动密切相关, 但只有 68% 的强磁暴伴随 $B_s$ 事件而发生; $B_s$ 事件与强磁暴并不是一一对应的关系. 在分析太阳风与磁层的相互作用引起磁暴时, 还必须考虑磁层背景情况和 $B_s$ 波动对磁暴形成的贡献; 同时应注意 $Dst$ 指数会受到环电流以外的诸多电流体系等因素的影响这一事实.

**关键词** 太阳风—行星际磁场— $B_s$ 事件—磁暴

## 1 引 言

磁暴的发生与行星际介质扰动之间关系的研究已有 30 多年的历史 [1−4]. 人们提出各种能量耦合函数, 讨论太阳风与磁层之间的耦合过程及地磁扰动, 特别是强磁暴形成的原因. 我国学者章公亮等 [5−7] 也曾就磁暴形态对行星际扰动结构的响应及磁云与地磁扰动等进行了研究. 人们不仅想通过这些研究搞清它们之间的关系和物理过程, 同时也探索对地磁扰动, 尤其是对磁暴预报的可能性和预报方法. 通过这些研究人们认识到, IMF $B_s$ 是引起磁暴 (尤其是强磁暴) 的关键参数. 1987 年, Gonzalez 等 [8] 分析了 1978 年 8 月 16 日 —1979 年 12 月 28 日之内发生的 $Dst < -100\,\mathrm{nT}$ 的 10 个强磁暴后指出, 这些磁暴的行星际源是持续时间 $\Delta T > 3\,\mathrm{h}$ 、大的负 IMF $B_z$(即南向分量 $B_s > 10\,\mathrm{nT}$) 及其驱动的行星际昏向电场 $VB_z > 5\,\mathrm{mV/m}$ 的 IMF $B_z$ 事件 (为明确表示南向分量直接原因和叙述上的方便, 本文以下将改称为 $B_s$ 事件) 引起的, 并且认为这些行星际扰动事件和强磁暴的发生是一对一的关系. 1994 年 Gonzalez 等 [9] 对磁暴的研究进行了评述和总结, 对 IMF $B_s$ 在磁暴形成中的作用进行了详细讨论, 肯定了 $B_s$ 事件与强磁暴之间的这种关系. 1996 年在有关磁暴的专题讨论会 (Chapman Conference on Magnetic Storm) 上也引用了 $B_s$ 事件与强磁暴这种一一对应的关系 [10].

这一结论实际上涉及到强磁暴形成的理论及其预报问题. 因为如果这种一一对应的结论成立, 则肯定了强磁暴是太阳风电场直接驱动的结果, 而与磁层本身和可能的电离层过程及其他太阳风条件无关, 而这一问题正是目前争论的焦点之一. 同时如果这一简单的

* 国家自然科学基金资助项目 (49834040) 和中国科学院日球模拟开放研究实验室联合支持, 中国地震局地球物理研究所论文标注号 00AC1007
1999-09-07 收到原稿, 2000-01-27 收到修定稿

关系具有普遍性，则可使强磁暴的预报更易于实现，因此有着非常重要和实际意义．由于这一结果是仅从一年多的时间内 10 个强磁暴得到的，因此非常有必要利用更多资料对其普适性进行考察．本文将利用更多的资料对这一问题作进一步分析．

## 2　资料的选取与分析

本文使用的太阳风和行星际资料及 $Dst$ 指数来自美国 NGDC(NOAA) 提供的 CD 盘 (Solar Variability Affecting Earth)，其中太阳风和行星际磁场的资料主要取自 ISEE3 卫星，缺少的一些数据由 IMP8 补充．分析中使用的部分地磁资料取自中国地震局地球物理研究所出版的磁暴报告．利用这些资料对 1978—1988 年期间太阳风参数和强磁暴 ($Dst \leqslant -100\,\mathrm{nT}$) 进行了分析．

首先按照文献 [8] 确定 $B_s$ 事件的条件，从太阳风资料中挑选符合 IMF $B_s > 10\,\mathrm{nT}$、且其驱动的昏向电场 $VB_s > 5\,\mathrm{mV/m}$, 持续时间 $\Delta t > 3$ 小时的 $B_s$ 事件．根据这一条件，在这 11 年有 IMF 记录的资料中，共挑选出 31 个 $B_s$ 事件．表 1 列出这 31 个事件的日期、$B_s$ 的最大值、$B_s > 10\,\mathrm{nT}$(且 $VB_s > 5\,\mathrm{mV/m}$) 的持续时间 $\Delta T$、$VB_s$ 的峰值及每个事件对应的 $Dst$ 指数的峰值．

应指出的是，从这里所用的资料看，Gonzalez[8] 文中的 3 个磁暴所对应的太阳风和行星际条件并不符合作者提出的 $B_s$ 事件的条件，这可能是由于 NGDC 正式出版的资料中对原来的临时性资料作了进一步的修订．

**表 1　$B_s$ 事件与磁暴**

| 年　月　日 | $B_s$ (nT) | $\Delta T$ (h) | $VB_s$ (mV/m) | $Dst$ (nT) | 年　月　日 | $B_s$ (nT) | $\Delta T$ (h) | $VB_s$ (mV/m) | $Dst$ (nT) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1978-01-06 | 12.3 | 8 | 7.7* | −121 | 1981-05-09 | 21.7 | 5 | 8.5 | −119 |
| 1978-08-28 | 22.8 | 12 | 10.9 | −226 | 1981-07-17 | 15.4 | 5 | 6.5 | −67 |
| 1978-09-29 | 24.4 | 8 | 17.8 | −224 | 1981-07-23 | 14.3 | 4 | 6.7 | −89 |
| 1978-11-25 | 14.0 | 5 | 7.3 | −149 | 1981-07-25 | 29.3 | 5** | 22.5 | −226 |
| 1979-03-10 | 14.1 | 4 | 6.2 | −140 | 1981-10-20 | 11.9 | 3 | 7.6 | −192 |
| 1979-04-03 | 16.9 | 7 | 9.4 | −202 | 1981-10-22 | 17.8 | 8* | 8.9 | −185 |
| 1979-04-25 | 16.1 | 3* | 9.6 | −149 | 1982-02-10 | 13.3 | 21 | 5.7 | −102 |
| 1979-09-18 | 15.5 | 4* | 6.3 | −158 | 1982-03-01 | 24.6 | 12 | 14.9 | −211 |
| 1980-02-16 | 14.3 | 7 | 5.8 | −132 | 1982-04-10 | 14.3 | 8* | 4.9 | −137 |
| 1980-05-25 | 16.9 | 5 | 8.8 | −126 | 1982-06-10 | 13.3 | 4 | 6.7 | −66 |
| 1980-07-25 | 13.9 | 4 | 6.7 | −88 | 1982-09-22 | 15.2 | 3* | 10.9 | −210 |
| 1980-10-23 | 12.4 | 4 | 6.2 | −85 | 1982-09-26 | 20.5 | 7* | 10.4 | −187 |
| 1980-12-19 | 31.1 | 9 | 16.2 | −240 | 1982-11-24 | 19.0 | 4 | 14.2 | −197 |
| 1981-02-06 | 11.3 | 3 | 5.8 | −131 | 1988-01-14 | 18.5 | 11 | 11.0 | −147 |
| 1981-03-05 | 26.7 | 4* | 16.4 | −215 | 1988-02-22 | 15.6 | 6* | 6.6 | −130 |
| 1981-04-12 | 25.5 | 4* | 14.8 | −311 | | | | | |

注：表中时间栏中 "*" 表示数据不全；"**" 表示 $Dst$ 最小值不是由这一时间段的 $B_s$ 事件引起的

从表 1 中可以看出，对应于这 31 个事件，有 26 个事件引起了 $Dst \leqslant -100\,\mathrm{nT}$ 的磁暴，约占整个事件的 84%，其中有 9 个磁暴的 $Dst < -200\,\mathrm{nT}$，其余 5 个事件也都引起了中等磁暴 ($-100\,\mathrm{nT} < Dst < -50\,\mathrm{nT}$). 对应于 $Dst < -200\,\mathrm{nT}$ 的大磁暴，$B_s$ 均大于 15 nT，其中有 7 个对应的 $B_s$ 大于 20 nT，相应的 $VB_s$ 大于 10 mV/m，而对于 $Dst > -100\,\mathrm{nT}$ 的磁暴 $VB_s$ 不超过 8.0 nT.

与此同时，我们检查了在此期间发生的强磁暴，结果共发生 77 个 $Dst \leqslant -100\,\mathrm{nT}$ 的强磁暴. 其中 39 个缺少太阳风参数记录. 在有太阳风参数记录的 38 个强磁暴中， 26 个即约 68% 的磁暴是伴随 $B_s$ 事件而发生的，其余 32% 的强磁暴虽然也发生在有较强的 $B_s$ 活动的情况下，但并未达到 $B_s$ 事件的条件.

从以上结果可以看出，磁层对 $B_s$ 事件的响应是一个复杂的过程，虽然在大多数情况下 $B_s$ 事件能引起 $Dst \leqslant -100\,\mathrm{nT}$ 的强磁暴，但它们之间并不是一一对应的关系，即并不是所有 $B_s$ 事件都能引起强磁暴，也不是所有强磁暴都是由 $B_s$ 事件引起的.

利用表 1 中的数据还可对 $Dst$ 指数与 $B_s$ 和 $VB_s$ 及持续时间作相关分析. 图 1(a)、(b) 和 (c) 分别给出了表 1 中 $Dst$ 指数和 $B_s$、$VB_s$ 及持续时间 $\Delta T$ 的关系. 从图中可以看出， $Dst$ 指数的峰值与 $B_s$ 和 $VB_s$ 成线性正相关，即 $B_s$ 和 $VB_s$ 越大， $Dst$ 指数峰值也越大； $Dst$ 指数与 $B_s$ 和它所驱动的电场 $VB_s$ 的线性相关系数分别为 0.72 和 0.75，但与持续时间无明显相关趋势. 这说明强磁暴与 IMF $B_s$ 驱动的对流电场的关系最为密切.

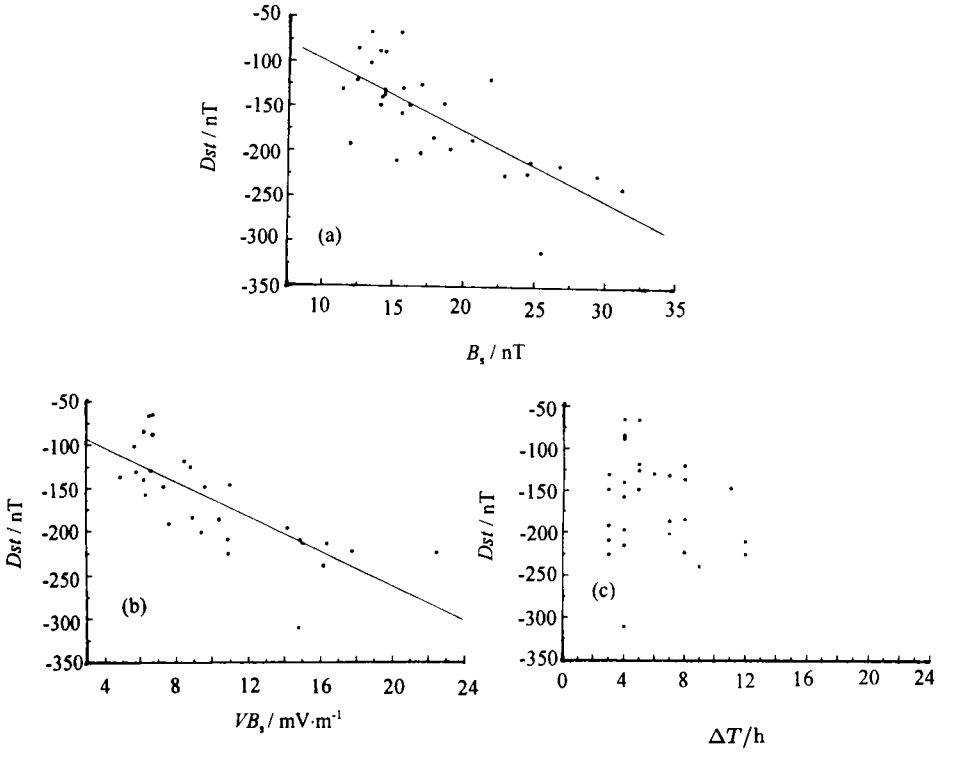


图 1 表 1 中 $Dst$ 指数与 $B_s$ 事件的关系

Fig.1 The relationship between $Dst$ and $B_s$ events in Table 1

根据我们以前的结果[7]可知，$Dst$ 指数的峰值时间滞后对流电场约 1 h, 这样更容易理解是由于对流电场把太阳风能量输运到磁层而引起了磁暴. 图 1(c) 显示的 $\Delta T$ 与 $Dst$ 无关说明，当 $B_s > 10$ nT 的持续时间超过阈值 3 h 后，持续时间的长短对磁暴的发展已无关紧要.

以上所述是一种统计关系，图 2 和图 3 将对一些特殊例子进行分析. 两图中的竖实线为磁暴起始时间，竖虚线为磁暴主相结束时间；横虚线分别表示 $B_s$ 事件给定的 $B_s$ 和 $VB_s$ 的阈值 (10 nT 和 5 mV/m). 图 2 的例子说明，有时 IMF $B_s$ 和 $VB_s$ 的强度更大，持

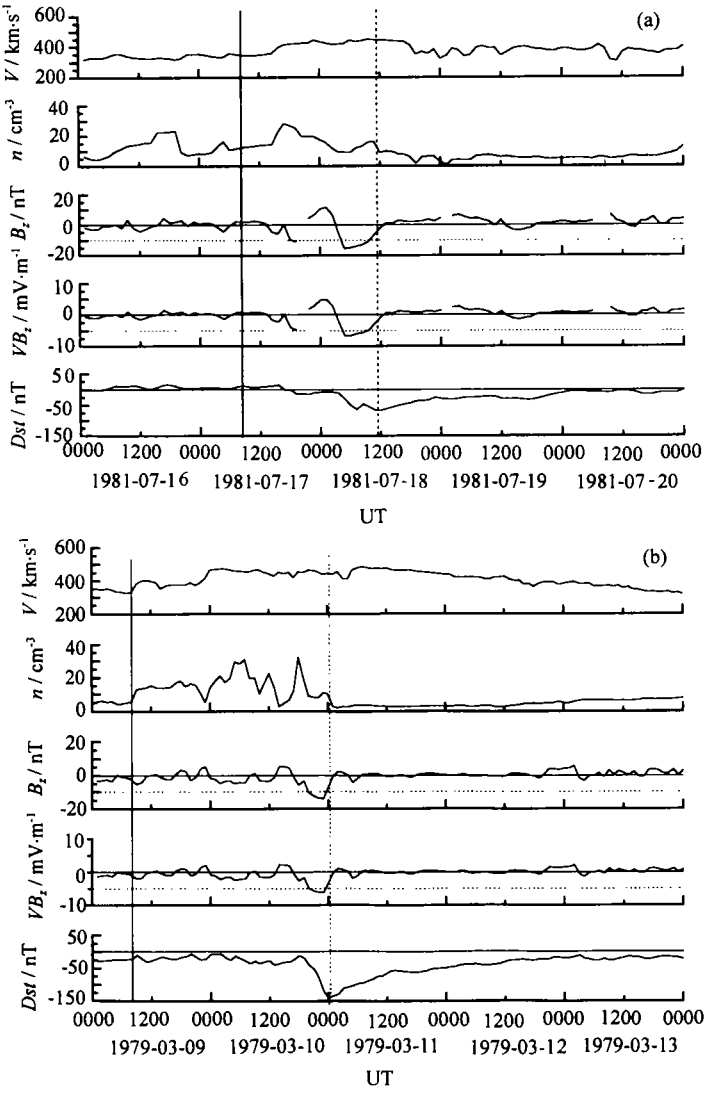


图 2　不同磁层背景下 $B_s$ 事件引起的磁暴

(a) 1981 年 7 月 16—20 日；(b) 1979 年 3 月 9—12 日

Fig.2　Ma; netic storms caused by $B_s$ events under different magnetospheric background

(a) July 16—20, 1981; (b) March 9—12, 1979

续时间更长的 $B_s$ 事件所引起磁暴的 $Dst$ 指数反而比强度小、持续时间短的事件的 $Dst$ 指数的峰值要小. 图 2(a) 和图 2(b) 分别给出 1981 年 7 月 17 日和 1979 年 3 月 10 日的 $B_s$ 事件. 图中给出了每个事件 $Dst$ 指数到达极小值这一天的前 1 天和后 4 天的的太阳风速度 $V$、粒子密度 $n$、IMF $B_s$ 及其驱动的太阳风电场 $VB_s$ 和地磁 $Dst$ 指数的时均值. 前后事件的 $B_s$ 分别为 15.4 nT 和 14.1 nT,$VB_s$ 分别为 6.3 mV/m 和 6.2 mV/m, 虽然前一事件的 $B_s$ 和 $VB_s$ 都比后一事件大, 但它们引起的磁暴后者却比前者强, 前后磁暴的 $Dst$ 指数有明显差别, 分别为 −67 nT 和 −140 nT. 从图中相同的太阳风参数的曲线形态和数值大小看并无明显区别, 但可看出 $Dst$ 指数曲线的区别. 在图 2(b) 中磁暴主相开始前地

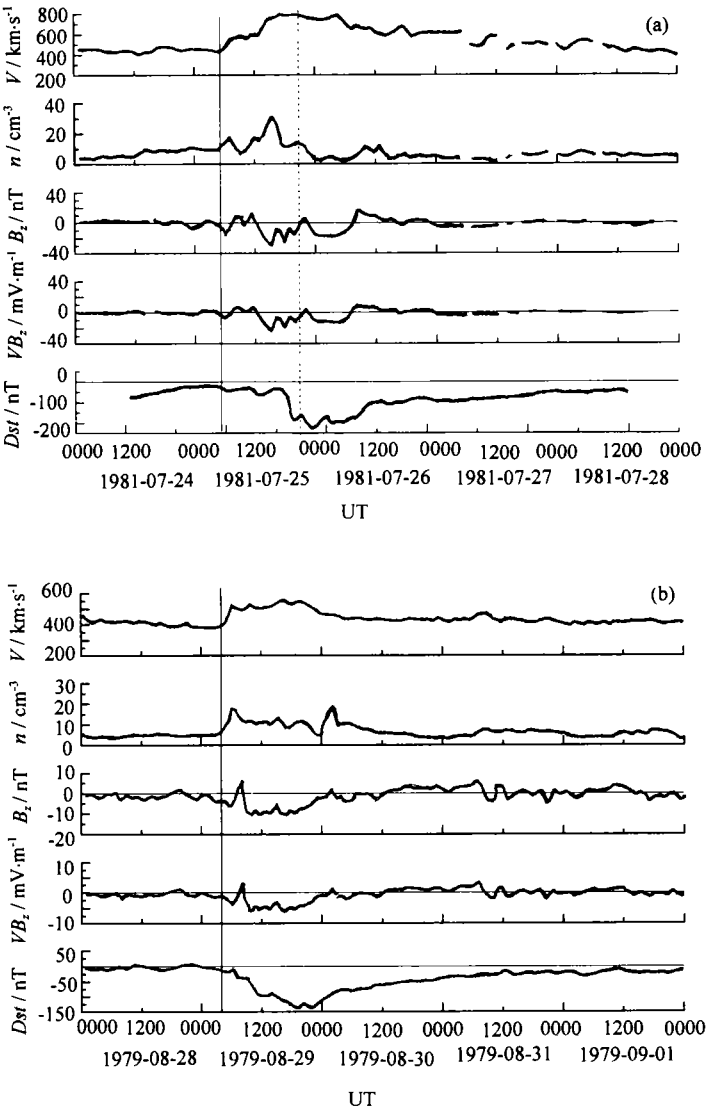


图 3 与 $B_s$ 波动有关的磁暴

(a) 1981 年 7 月 25 日 —28 日, (b) 1979 年 8 月 28 日 —9 月 1 日

Fig.3 Magnetic storms related to $B_s$ fluctuating

(a) July 25—28 1981, (b) August 28—September 1 1979

磁场已处于弱扰动状态，$Dst$ 指数处于 $-30\,\mathrm{nT}$ 附近．而图 2(a) 在磁暴主相开始之前磁场比较平静，$Dst$ 指数为正值，显然这两个事件的背景场不同．这说明同样 $B_s$ 事件在不同的磁层背景情况下引起的地磁扰动强度不同，$B_s$ 事件引起的地磁扰动是叠加在背景场上的，背景场的影响不可忽视．这种情况在其他事件中，尤其是未伴随 $B_s$ 事件的强磁暴中也可看出．

另一类例子是磁暴的 $Dst$ 指数发展可能与 $B_s$ 的波动有关．图 3(a) 给出 1981 年 7 月 25 日大磁暴的例子．从图中可以看出，峰值之前的 $B_s$ 和 $VB_s$ 的值和变化的幅度很大，但持续时间却不到 3 h, 因此构不成 $B_s$ 事件．但可能正是这种强烈的 $B_s$ 和 $VB_s$ 波动引起了 $Dst$ 指数峰值为 $-226\,\mathrm{nT}$ 的强烈磁暴，峰值后虽然出现明显的 $B_s$ 事件，但 $Dst$ 的值仍没能超过前面的水平．图 3(b) 给出的另一个例子是 1979 年 8 月 29 日 0459 UT 开始的急始型磁暴，其 $Dst$ 指数峰值为 $-140\,\mathrm{nT}$. 引起这一磁暴的 IMF 没有很强的南向分量，其最大的 $B_s$ 为 11.30 nT, 但并不是持续 3 h 以上的 $B_s > 10\,\mathrm{nT}$ 的 $B_s$ 事件．从图 3(b) 中看出，在磁暴主相形成和发展过程中 $B_s$ ($VB_s$) 曲线变化虽不如图 3(a) 那样明显，但与图 2 相比其波动较大．这一现象在其他未伴随 $B_s$ 事件的强磁暴中也可看到．

应强调指出的是，从我们对每一个不随 $B_s$ 事件出现的强磁暴详细分析看，尽管这些磁暴并不是严格的 $B_s$ 事件引起，但仍离不开较强的 IMF $B_s$ 和其驱动的较强电场 $VB_s$ 活动．

## 3　讨论与结论

太阳风能量向磁层传输的机制是 IMF 与地球磁场的重联．当 IMF 指向南时这种重联就会发生．在背日面等离子体片发生的磁场重联使那里的等离子体加热加速，在 IMF $B_s$ 驱动的晨昏对流电场作用下向地球方向运动，注入到环电流区，形成暴时环电流而产生磁暴．不管现在对环电流的形成是由于太阳风直接驱动的对流电场还是亚暴的感应电场，IMF $B_s$ 都是最重要的条件．多年的研究表明，持续时间长、幅度大的 IMF $B_s$ 极其驱动的电场，即本文中的 $B_s$ 事件与强磁暴的发生密切相关．进一步研究强磁暴的发生是否与 $B_s$ 事件为一一对应关系，对磁暴形成理论的研究及磁暴预报有极其重要的意义．从本文利用较多资料分析的结果看出，虽然强磁暴的发生与 $B_s$ 事件密切相关，但并不是一一对应的关系．这种简单关系不成立的主要原因是太阳风和磁层相互作用物理过程的复杂性所致．因为不仅仅 IMF $B_s$ 极其驱动的对流电场的幅度大小，而且其变化，也会对耦合过程产生影响．除此之外，耦合是一种相互作用的过程，磁层本身的背景情况必然对耦合过程也产生影响．因此只考虑 $B_s$ 和 $VB_s$ 的幅度的大小不考虑其变化及磁层背景是不完全的；另一需要考虑的原因是 $Dst$ 指数除决定于环电流外，还受磁层顶及磁层内其他电流体系影响；而确定 $Dst$ 指数所用台站数量不足的影响也会对 $Dst$ 指数造成较大的随机误差．

比较图 2(a) 和 2(b) 就可以看出磁层背景对磁暴强度的影响，即如果在磁暴开始前磁场已经处于弱扰动状态 ($Dst$ 指数已经处于较大的负值), 则同样的太阳风扰动引起的磁暴就会较强，即 $Dst$ 指数幅度会较大．当然磁层的背景实际上也决定于背景太阳风．图 3 说

明磁暴的形成及其强弱不仅与 $B_s$ 的强度和持续时间有关，而且与其变化率 (即能量的注入率) 也有关. $B_s$ 波动越大，相应的磁暴强度就越大. 对统计结果中的 8 个未伴随 $B_s$ 事件的强磁暴进一步考察表明，这些磁暴的发生与弱的磁场扰动背景和南向磁场及昏向电场有较大波动有关. Lyons[10] 曾强调了磁暴主相期波动电场会增加磁暴的强度，Wolf 等人 [11] 的模拟结果也印证了这一点. 如果将来的研究能使用高分辨率 (如 1 min) 的资料，可能会取得更另人信服的结果.

暴时赤道环电流 (对称部分) 是磁暴的直接源，探讨磁暴的成因实际上是探讨环电流 (暴时) 的成因. 目前磁暴的强度是用 $Dst$ 指数来度量，因此也把 $Dst$ 指数作为暴时环电流强度的量度. $Dst$ 指数能否正确量度环电流的强度是至关重要的问题，因为误差很大的 $Dst$ 指数可能会导致在磁暴的研究中或磁暴预报中的不正确的结论.

最近 McPherron[12] 在研究亚暴在磁暴产生中的作用时详细讨论了影响 $Dst$ 指数的诸多因素，其中包括计算 $Dst$ 指数所用台站的长期变化、静日变化、磁层顶电流、部分环电流、磁尾电流和亚暴电流楔的影响及台站数量不足的影响等等，指出，如果在时间序列分析中亚暴事件在世界时上均匀分布，则以上影响的积累误差可能为 10—30 nT，且随机出现在资料中. 在一般研究中常对太阳风动压力引起的磁层顶扰动电流的影响进行校正. 不过在 Gonzalez 等 [8] 的工作中对 $Dst$ 指数并没作任何校正. 虽然我们利用未经校正的 $Dst$ 资料的统计分析 (如图 1) 表明强磁暴与 $B_s$ 事件密切相关，但不同的单个事件的 $Dst$ 可能受不同因素的影响，其影响的程度和结果是不可能相同的，因此对单个事件的讨论和事件的选取会受这一因素的影响.

因此，尽管很多 $B_s$ 事件引起 $Dst \leqslant -100$ nT 的强磁暴，强磁暴的发生也多由 $B_s$ 事件引起，但它们之间不是一一对应的关系；物理过程的复杂性和资料的可靠性都需要考虑更多因素的影响.

主要结论是：利用 1978—1988 年期间有太阳风记录的资料分析表明，100% 的 $B_s$ 事件都会引起磁暴的发生，但只有 84% 的 $B_s$ 事件能引起强磁暴；强磁暴的发生都与较强的 IMF $B_s$ 活动密切相关，但只有 68% 的强磁暴伴随 $B_s$ 事件而发生；$B_s$ 事件与强磁暴并不是一一对应的关系. 在分析太阳风和行星际扰动与磁层的相互作用引起磁暴时，除了行星际南向磁场及其所驱动的电场的大小和持续时间外，还必须考虑磁层背景情况和 $B_s$ 的变化等因素对磁暴形成的贡献；同时应记住用来度量磁暴强度的 $Dst$ 指数会受到环电流以外的诸多电流体系等因素的影响这一事实.

## 参 考 文 献

[1] Akasofu S I, Chapman B T. The development of the main phase of magnetic storms. *J. Geophys. Res.*, 1963, **68**(1):125—129

[2] Rostoker G, Falthammar C G. Relationship between changes in the interplanetary magnetic field variations in the magnetic field at the earth's surface. *J. Geophys. Res.*, 1967, **72**(23):5 853—5 863

[3] Russell C T, Mcpherron R L, Burton R ζ. On the cause of geomagnetic storms. *J. Geophys. Res.*, 1974, **79**(7):1 105—1 109

[4] Akasofu S I. Energy coupling between the solar win and the magnetoshpere. *Space Sci. Rev.*, 1981, **28**:121—190

[5] 章公亮. 磁暴形态类型与行星际磁云特征. 中国科学 (A 辑), 1990, **4**(2):1 068—1 078

[6] Zhang Gongliang, Burlaga L F. Magnetic clouds, geomagnetic disturbances, and cosmic ray decreases. *J. Geophys. Res.*, 1988, **93**(A4):2 511—2 518

[7] 高玉芬，杨冬梅. 强磁暴的形成 —— 地磁大气空间研究及应用. 北京：地震出版社， 1996. 78—83

[8] Gonzalez W D, Tsurutani B T. Criteria of interplanetary parameters causing intense magnetic storms ($Dst < -100$ nT). *Planet. Space Sci.*, 1987, **35**:1 101—1 109

[9] Gonzalez W D *et al.* What is a geomagnetic storm? *J. Geophys. Res.*, 1994, **99**(A4):5 771—5 792

[10] Kamide Y *et al.* Magnetic Storms: Current Understanding and Outstanding Questions, Magnetic Storms, USA: AGU, 1997. 1—19

[11] Wolf R A *et al.* Magnetic Storm, USA: AGU, 1997. 161—172

[12] Mcpherron R L. The Role of Substorms in the Generation of Magnetic Storms, Magnetic Storms, Magnetic Storm: Current Understanding and Outstanding Questions, Magnetic Storms, USA: AGU, 1997. 131—147

# RELATIONS BETWEEN IMF $B_s$ EVENTS AND INTENSE MAGNETIC STORMS

GAO Yufen　ZHANG Xiuling

(*Institute of Geophysics, State Seismological Bureau, Beijing* 100081)

## Abstract

The relationship between IMF $B_s$ events ($B_s > 10$ nT, $VB_s > 5$ mV/m and both last more than 3 h) and intense magnetic storms ($Dst \leqslant -100$ nT) is analyzed using the solar wind and geomagnetic data from 1978—1988. The results show that one hundred percent of $B_s$ events can cause magnetic storms, but only 84% are intense storms. Although all the intense magnetic storms correlate to larger IMF $B_s$ closely, only 68% of intense magnetic storms are actually caused by $B_s$ events. The relationship between $B_s$ events and intense magnetic storms is not in correspondence of one to one. The effects of magnetospheric background and fluctuations of $B_s$ on the cause of magnetic storms must be taken into account. Also the attention should be paid to the fact that $Dst$ indices are affected by many electric current systems after than ring current.

**Key words**　Solar wind, Interplanetary magnetic field, $B_s$ event-magnetic storm