

2003 年 10 月两次特大太阳风暴的预报试验 *

解妍琼^{①②③**} 魏奉思^① 冯学尚^① 钟鼎坤^①

(① 中国科学院空间科学与应用研究中心空间天气学国家重点实验室, 北京 100080; ② 中国科学院研究生院, 北京 100039; ③ 中国人民解放军理工大学气象学院, 南京 211101)

摘要 针对 2003 年 10 月 28 日和 29 日的两次特大太阳风暴(激波)事件, 提出一种把空间天气形势分析——“望诊”与定量预报——“切脉”相结合的二步法, 进行预报试验. 第一步, “望诊”, 太阳源表面磁场分布、行星际闪烁观测资料和 ACE 卫星观测的联合分析表明, 源表面的大尺度磁位形造成了激波相对于爆发源法向非对称传播, 地球处在接近激波传播最快、能量最大的方向上; 这两次激波是高速抛射事件, 强磁场、高温的日冕物质快速膨胀以及高速的背景太阳风都有利于激波的快速传播. 第二步, “切脉”, 采用新建立的快激波渡越时间的从属函数 μ_T 于 ISF 方法中, 对其渡越时间和引起的地磁扰动进行了预报试验. 预报试验结果是: 两次激波事件磁扰开始时间的预报值与观测值相比较, 相对误差分别为 1.8% 和 6.7%; 磁扰幅度 ΣKp 指数的预报相对误差分别为 4.1% 和 3.1%; 此外, 比较二步法与国际流行的五种统计或数值预报方法, 结果表明, 二步法有利于改善预测太阳风暴到达时间及其引起的地磁扰动幅度大小的能力. 工作表明, 深入研究激波传播的物理特性, 对于提高预报精度是极为重要的.

关键词 太阳风暴 激波 行星际闪烁观测 二步法 ISF 方法

1 2003 年 10 月底至 11 月初太阳风暴

强烈的太阳活动事件, 如耀斑、日冕物质抛射(CME)等, 常引发 X 射线暴、粒子暴和等离子体物质的快速抛出, 它们在行星际空间和地球空间引起各种效应, 如行星际激波、磁暴、电离层暴、热层暴和高能粒子暴等等, 人们形象地称其为太阳风暴. 它们有时会对空间 and 地面的技术系统产生严重的干扰和破坏, 形成空间灾害性天气事件 [1,2]. 作为第 23 太阳活动周迄今为止最剧烈的空间天气过程之

收稿日期: 2005-06-29, 接受日期: 2006-04-19

* 国家自然科学基金(批准号: 40536029, 40336053, 40374056)和中国科学院“空间天气学创新团队国际合作海外伙伴计划”联合资助项目

** E-mail: yqxie@spaceweather.ac.cn

一, 2003年10月底至11月初的灾害性空间天气事件及其事后分析引起了人们的强烈关注和深入思考^[3,4]. 这次灾害性空间天气过程导致地球空间出现大量高能粒子流及强烈的地磁扰动, 对全球多个国家造成影响, 波及通讯中断、导航失误、卫星异常、电网故障等等^[5~7].

从2003年下半年开始, 本次太阳活动周已开始向太阳活动极小期发展. 导致这次重大空间灾害性天气过程的太阳爆发, 源于编号为10484, 10486和10488的3个太阳黑子群(图1(a)). 其中, 10486黑子区活动最为剧烈, 它共爆发了7次X级大耀斑, 特别是10月28日X17.2级(图1(b))和10月29日X10.0级的两次耀斑爆发给人留下了深刻印象. 此外, 它还于11月4日爆发了一次持续12 min的X28级耀斑, 这是自1976年有数据记录以来的最高值, 而稍早的X17级耀斑则排在第4位.

截止到11月4日, 在短短14 d内, 这次空间天气过程共爆发了12次X级耀斑, 以及众多的M级和C级耀斑、日冕物质抛射事件, 同步轨道上的卫星也探测到了多个高能粒子事件. 对地球空间产生显著影响的3次耀斑和晕状CME爆发分别发生于10月22, 28(参见图1(c))和29日, 其中28/29日爆发触发的两个地磁暴位列1932年以来14个最强烈的地磁暴之中.

此次太阳风暴出其不意, 不仅强度大, 而且持续时间长, 其发生、发展和传播引起了科研工作者的普遍关注. 如Skoug等人^[8]利用ACE卫星资料详细报道了10月29~30日期间异常高速太阳风的特征; Zurbuchen等人^[9]基于ACE卫星SWICS仪器的观测, 分析了事件期间快速CME的运动学特征及其组成成分的特点; Malandark等人^[10]和Lario等人^[11]分别从不同角度分析了事件期间的太阳高能粒子情况; Kuwabara等人^[12]基于宇宙射线和磁场观测分析了29日的行星际日冕物质抛射的三维形状; Woods等人^[13]报道了事件期间太阳辐照度的变化; Gopalswamy等人^[3]总结了多位科研工作者对这次风暴的研究结果, 不仅包括风暴的太阳起源、其对飞船的影响、在地球空间产生的效应, 还结合Ulyssess, Cassini和Voyagers飞船的观测介绍了风暴对1 AU以远的日球空间产生的影响, 给这次太阳风暴提供了更加广泛全面的描述.

当然, 面对这次强烈的空间灾害性天气过程, 人们并非完全被动无助. SEC等世界知名的空间天气预报中心对太阳风暴的到达时间进行了预报, 部分预报结果是较准确可信的^[14,15]; 科研工作者对卫星的操控采取了一定的应对措施并从中得到了宝贵的经验教训^[3,7]等等. 人们在应对这次空间天气过程和事后分析中所积累的经验将具有重要意义.

本文选取爆发于10月28日和29日的两次特大太阳风暴(激波事件)作为研究样本, 它们用了不到20 h的时间就吹到了地球, 触发了强烈地磁暴, 表1列出了这两次事件的相关参数^[8,14,15]. 本文针对这两次特大太阳风暴, 把新近发展的“望

诊-切脉”二步法应用于它们的预报试验中，并和国际上五种流行预报方法进行比较，结果表明我们的方法是有优势的.

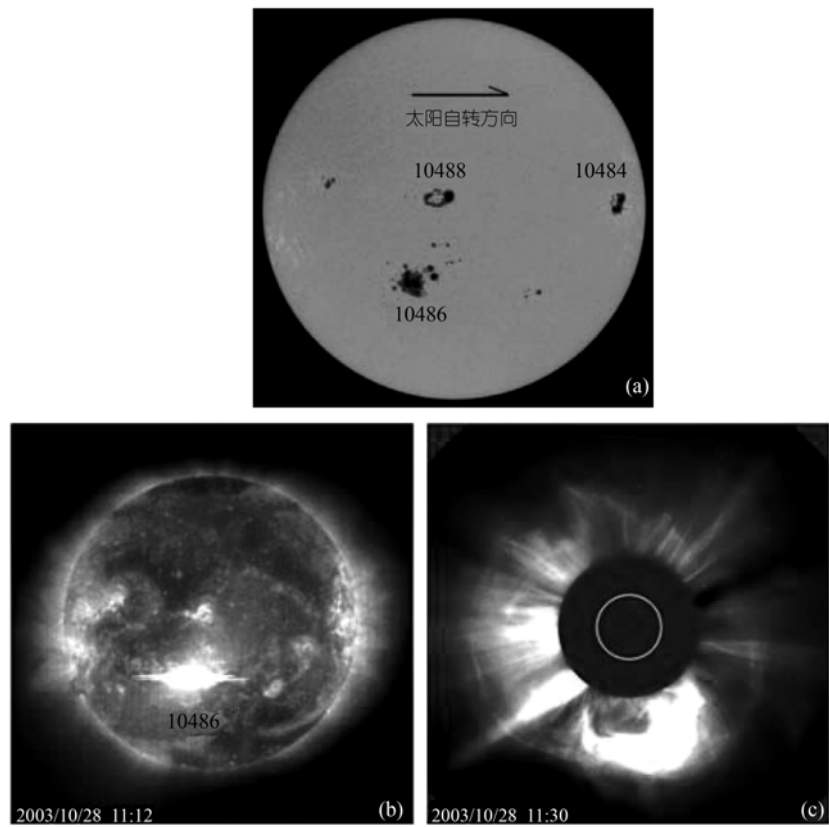


图1 2003年10月28日黑子活动区10484, 10486和10488在日面的位置(SOHO/MIDI Doppler 成像照片)(a); 10486 黑子群处 12:15(格林威治时间, UT)爆发 X17/4B 级耀斑 (SOHO/EIT 图像)(b); 10486 黑子活动区产生晕状 CME(SOHO/LASCO C2 日冕仪观测图像)(c)

表 1 两次激波样本的重要参数^{a)}

事件编号	激波发生日期和时间	爆发源日面位置	激波初速度 /km·s ⁻¹	激波渡越时间/h	ΔKp 指数
1	2003/10/28 1102 UT	S16E08	2000	19.97	65.8
2	2003/10/29 2042 UT	S15W02	2000	19.63	62.3

a) 各列从左到右分别是: 激波事件的编号、爆发日期和时间、爆发源在日球坐标系中的位置、激波初速度、激波到达地球的观测时间以及引起的磁扰幅度大小; 磁扰数据 ΔKp 来自 <http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/kp/index.html>.

2 “望诊”——两次特大太阳风暴的空间天气形势分析

2.1 太阳源表面大尺度电流片位形利于风暴吹到地球

图 2 以 WSO 天文台提供的第 2009 卡林顿周内日冕源表面磁场分布为背景,

激波1和2的爆发源位置分别由#1和#2符号表示; 爆发源爆发时地球的投影位置分别由E1和E2表示. 从图2可以看到爆发源被电流片所环绕, 从源表面电流片位形推断, 激波在经度范围内的传播将受电流片的阻碍(限制在约180度的经度范围内), 在纬度范围内向赤道和北半球的传播相对是比较自由的. 预期源于位置#1和#2的两次强激波将向电流片北侧非对称传播, 地球处在激波易于到达的位置.

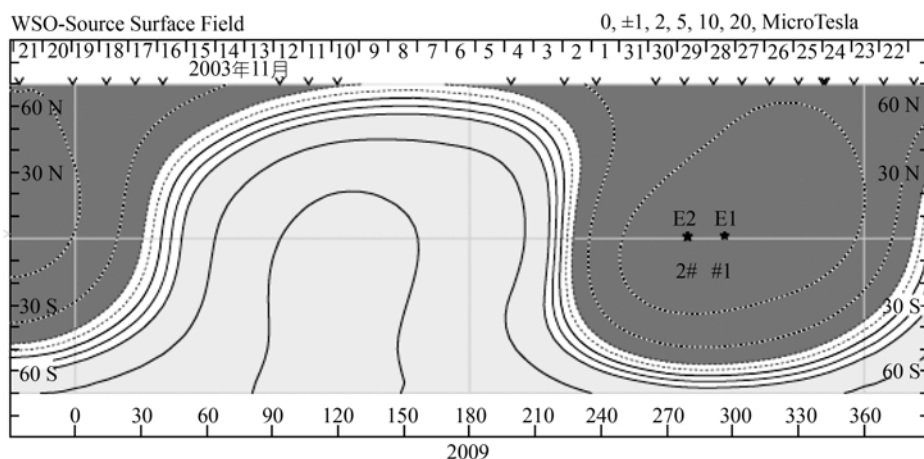


图2 第2009卡林顿周日冕源表面磁场分布(WSO)和爆发源位置示意图

2.2 激波的三维传播特性表明地球处于激波传播最快、能量最大的方向附近

行星际闪烁(IPS)观测能提供太阳风的三维观测, 揭示扰动传播的三维结构和传播特性, 多个射电源的观测可以提供有关激波的粗略三维图像^[16]. 为了从IPS观测中认证这两次激波样本, 我们对相应IPS观测¹⁾的选取原则是: (i) 太阳强烈爆发后, 位于较大经、纬度空间范围的多个射电源的IPS观测均记录到太阳风速度增加 ≥ 50 km/s; (ii) 且有连续3~4 d以上的较为完整的观测数据; (iii) 不采用高纬以及太阳背面区域的IPS观测. 基于此, 对这两次激波事件分别选取了4个射电源的观测记录(参见表2的前4列内容). 由于篇幅所限, 这里仅展示了其中两个射电源的太阳风观测结果, 如图3所示. 从此图可以看出, 激波产生后, 这两个射电源均观测到了明显的太阳风速度跃变(其位置分别用箭头指示), 将其看作IPS观测到的激波.

由于IPS观测是在不同方位、不同时间和距离上进行的, 要研究激波的形状等三维传播特性, 必须把不同时刻的观测数据归一化到同一时刻, 也就是说把所有观测点组织到激波面上去. 数据的归一化处理应恰当地考虑影响激波传播的

1) <http://stesun5.stelab.nagoya-u.ac.jp>

动力学效应, 这样得到的传播特征才能更好地反映真实情形. 影响激波传播的动力学效应主要有: (i) 背景太阳风的各向异性流动; (ii) 不同能量、不同距离和不同背景速度时, 激波具有的不同减速过程. 我们采用能较好解释观测结果和这两种动力学效应的激波模型^[17], 对 IPS 观测数据进行传播效应的改正. 选定归一化参数即渡越时间 T 后, 经模型处理, 可以分别得到与不同射电源在同一时刻 T 观测相对应的激波传播距离 $R_i (i = 1, 2, 3, \dots, n; n$ 表示射电源观测的个数), 由此可以估计激波面的三维形状, 如图 4 所示.

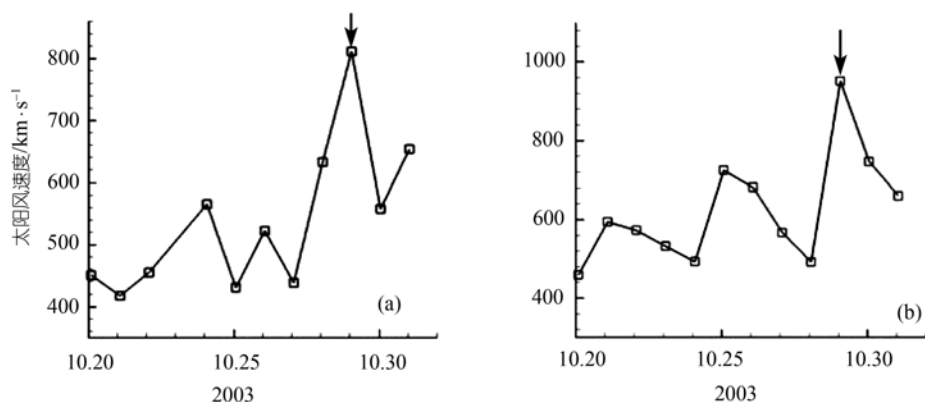


图 3 IPS 观测得到的太阳风速度随时间演化图

(a) 射电源 1323+32, (b) 射电源 3C283

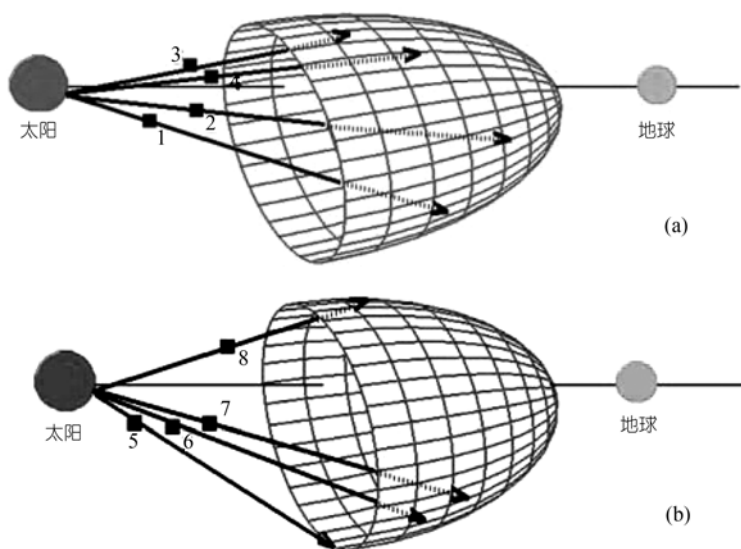


图 4 通过 IPS 观测粗略反演激波样本 1(a)和 2(b)的三维拓扑形状

■代表射电源位置, 箭头线代表由射电源观测得到的激波传播距离, 曲面为估计的激波形状. 射电源代号: 1 示 1127-14, 2 示 3C255, 3 示 3C286, 4 示 1323+32, 5 示 1334-17, 6 示 3C283, 7 示 1245-19, 8 示 1345+12

关于这两次激波的传播特性, 从图4可得到如下几点结论: (i) 激波相对于爆发源法向非对称传播, 激波的形状是非球形的. 激波在纬度上的传播范围比在经度上的传播范围大. (ii) 激波传播最快的方向, 其日球纬度范围约在正负10度之间. 也就是说, 通过IPS观测反演的激波结构能显示激波传播的各向异性, 在一定程度上反映出了背景太阳风以及太阳附近和日地空间的大尺度磁场结构等对其传播的影响. 地球均位于激波最快传播方向的附近. 通过激波模型 [17] 得到两次激波朝地球方向的能量分别约为1.6, 1.9×10^{25} J/sr, 它们到达地球的时间分别约为21和20 h, 这表明它们是特大的两次太阳风暴.

2.3 高速、高温、高磁场强度的日冕物质抛射向着地球高速袭来

激波产生后, 以约2000 km/s的速度在日地空间快速传播, ACE和SOHO等卫星均记录到了这两次激波事件. 下面我们采用Skoug提供的ACE数据分析激波的行星际表现. 值得注意的是, 由于此次太阳风暴持续时间长、强度大, 所以在一定的时段内卫星观测数据缺失或失真. 如, 在10月29日0600 UT~30日0400 UT期间, 质子数密度数据完全缺失. 为了分析需要, 我们按照Skoug等人 [8] 采用的质子数密度分布, 将缺失的数据进行了粗略的补全, 参见图5中点斜线阴影部分. 此外, 数据的时间分辨率在28日1200 UT~31日期间约为33 min, 其余时段为64 s. 图5即为ACE卫星记录到的激波上下游等离子体参数和磁场的起伏变化以及相应期间的Dst指数变化情况. 图中数据从上到下分别为质子速度 V_p , 质子温度 T_p 和数密度 N , 行星际磁场强度 $|B|$, GSE坐标中磁场的极角 θ_B 和方位角 ϕ_B , GSE坐标中Z方向磁场分量 B_z , 随后是利用补全后的数密度计算的等离子体的热压 P_t (仅考虑了质子和电子的热压, 且假设电子热压等同于质子的热压)、磁压 P_m , 总压 P_{total} 以及热压和磁压之比 β , 最后是Dst指数. 图中标注有“1”和“2”的竖直虚线分别指示激波样本1和2的位置. 两次激波之后都伴随着磁云事件, 分别记为MC1和MC2, 它们的边界用竖直点线标示. 激波样本1和磁云MC1之间是一个结构较简单的、范围较小的鞘区(记为鞘区1); 相比之下, 激波样本2与磁云MC2之间的鞘区(记为鞘区2)结构比较复杂, 范围较大, 呈现强相互作用区的特征.

通过分析补全后的ACE观测数据, 两次激波事件在行星际的传播特性主要有以下几方面特点:

(i) 高速背景太阳风的对流效应对激波快速传播有重要贡献. Skoug等人 [8] 指出, 激波样本1到达ACE卫星的时间约为29日0600 UT, 随后在将近6 h的时段内, 太阳风速超过了1500 km/s; 在将近26 h的时段内, 太阳风速超过了1000 km/s; 记录到的太阳风速度最大值约为2240 km/s. 激波样本2到达ACE卫星的时间约为30日1630 UT, 此后太阳风速一度最高达1710 km/s, 风速超过1500和1000 km/s的时间段分别为1和17.5 h. 这里除了两次CME的快抛射原因

外, 激波前的背景太阳风速度分别高达约 600 和 1000 km/s, 背景太阳风的对流效应也对激波高速传播起重要作用, 特别是激波 2 的传播. 根据本文采用的激波模型 [12] 计算, 此处高速背景太阳风的贡献相对通常的 400 km/s 背景太阳风而言, 能使这两次激波分别提前 3 和 2.4 h 到达地球.

(ii) 异常高温. 两次激波过后, 卫星均探测到了异常高的质子温度: 质子温度一度分别超过了 10^7 和 5×10^6 K, 比以往 ACE 卫星探测到的质子温度峰值高出了约一个量级 [8]. 此外从激波(尤其是激波 2)上下游的质子数密度分布可以明显看出, 该处的等离子体是很稀薄的. 激波附近温度异常高、密度极低, 表明激波在传播过程中是快速膨胀的.

(iii) 强磁场喷发. 磁场强度 $|B|$ 随着激波越过卫星一度呈明显增大趋势, 而且其最高值均超过了 40 nT. 第一次激波过后, Skoug 等人 [8] 通过分析高分辨率数据指出磁场强度最高值达到了 68 nT. 由此可以推测这两次激波事件都是强磁场喷发事件. 此外, 从激波附近的热压和磁压分布可以看出, 除了鞘层 1 内由于激波对等离子体的强烈加热效应使得热压明显高于磁压外, 在磁云 MC1 和 MC2 内, 热压都明显地低于磁压, 这也表明激波是由太阳的强磁场喷发事件驱动的. 强磁场的膨胀也是此二次太阳风暴极低密度的重要原因之一.

2.4 行星际磁场南北向分量 B_z 多次长时间保持南向是地球将面临灾害的重要信号

激波渡越卫星期间, B_z 分量表现出明显的南北向起伏, 其起伏变化与 Dst 指数的变化有很好的相关性(参见图 5). 在鞘区 1 内, B_z 分量发生了明显的南北转向, 其最小值约为 -15 nT, 但其南向分量的持续时间较短, 约为 3 h; 与之相对应, Dst 指数在此期间明显地下降, 由 -50 nT 下降到 -200 nT. 在磁云 MC1 的头部, B_z 由北转南后, B_z 在较长的时间内(将近 12 h)一直保持南向, 其大小呈现较缓慢的下降趋势, 最小值达到了近 -30 nT; 受其影响, Dst 指数长时间地缓慢下降, 其最小值达到了 -360 nT, 表明发生了大磁暴. 第三次明显的 B_z 南北转向事件发生在鞘区 2, 在 2 h 的时间内 B_z 由 6 nT 快速降到约 -35 nT, 随后是约 6 h 的南向分量保持期; Dst 指数相应地在短时间内迅速下降, 其下降幅度达到了约 300 nT, 达到最小值 -400 nT, 表明产生了强烈的大磁暴. 所以, 行星际磁场南向分量的大而长持续期, 是地球面临灾害的一个重要指示.

综上, 对于这两次快速激波事件, “望诊”的定性结论是: 无论是 CME 本身的性质还是太阳和行星际条件, 都利于它们形成特大太阳风暴; 地球处在太阳风暴最强的方向附近, 地球空间将发生空间灾害性天气事件.

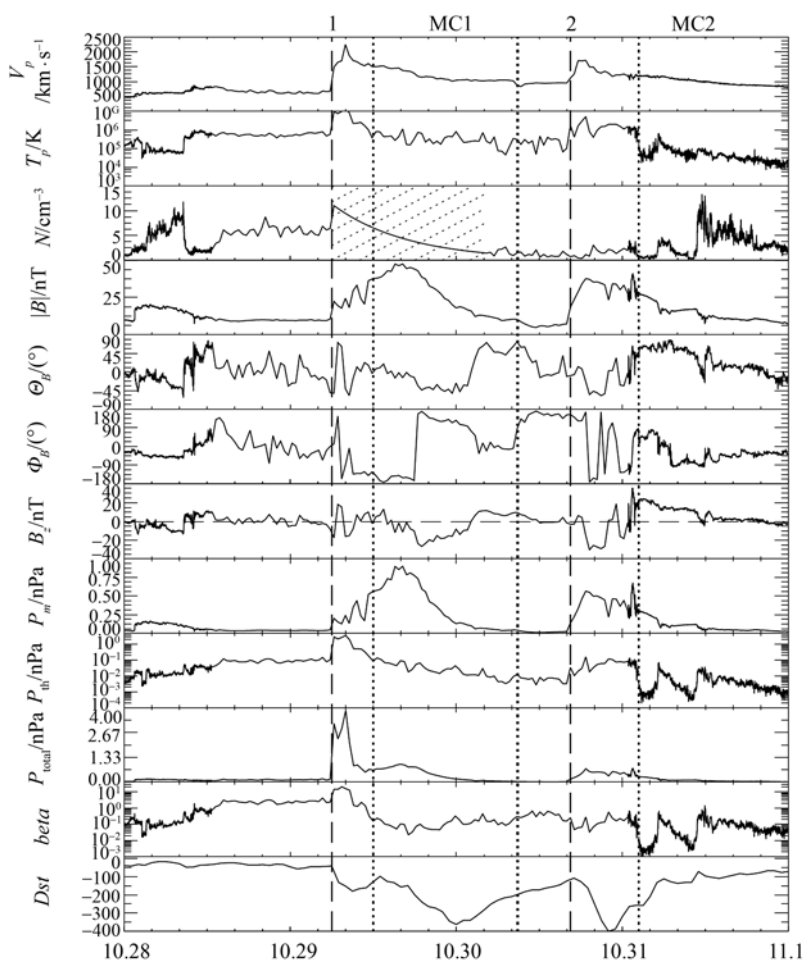


图 5 2003.10.28~11.01 期间 ACE 卫星对太阳风参数和行星际磁场的观测记录以及相应的 Dst 指数
 Dst 数据来自 Kyoto 大学 WDC-C2 数据中心

3 “切脉”——两次特大太阳风暴事件的预报试验

魏奉思等人曾经以行星际闪烁观测为基础，提出了有关地磁扰动的预报方法 [18,19]。在此工作基础上，他们综合行星际激波传播的物理模型和模糊数学中从属函数概念，并进一步对所研究的事件考虑了行星际磁场南-北分量的影响，以此综合提出针对所有不同快、慢激波而建立了 ISF 方法 [20,21]。这里 ISF 分别由 IPS, Solar Storm(太阳风暴)和 Fuzzy(模糊)的第一个英文字母组成。本节针对快激波事件，采用新建立的快激波渡越时间的从属函数 μ_T 于 ISF 方法进行“切脉”，即预报试验，并将其结果与国际流行预报方法的结果进行了比较。

3.1 关于快激波从属函数 μ_T 的设定

ISF方法是物理模型和统计相结合的预报方法. 该方法首先从魏奉思提出的点源爆炸波在变密度、运动介质中传播的物理模型^[17]出发, 根据太阳活动和行星际闪烁观测确定激波具有的能量, 进而预报激波到达地球的时间; 然后根据激波的能量与地球磁扰的经验关系^[21], 预测地磁扰动 ΔKp 指数; 最后利用从属函数选择最佳观测做预报试验^[20].

ISF方法的 5 个从属函数是通过大量激波事件统计分析得到的, 反映的是不同强弱太阳风暴事件的平均状态^[20]. 为了提高预报精度, 本文首先针对权重大、反映激波渡越时间的从属函数 μ_T , 建立适用于快速激波(到达地球的时间 $T_s \leq 35$ 小时)的 μ_T (其表达式和分布曲线参见图 6), 并将其用于激波样本的预报试验中.

$$\mu_T = \begin{cases} \frac{(T_s - 12.8)^{1.15} \cdot e^{-\frac{(T_s - 12.8)}{7.0}}}{0.1882 \times 7.0^{1.5}}, & T_s \leq 20.8, \\ \frac{(T_s / 1.3 - 12.8)^{1.15} \cdot e^{-\frac{(T_s / 1.3 - 12.8)}{7.0}}}{0.1882 \times 7.0^{1.5}}, & T_s > 20.8. \end{cases}$$

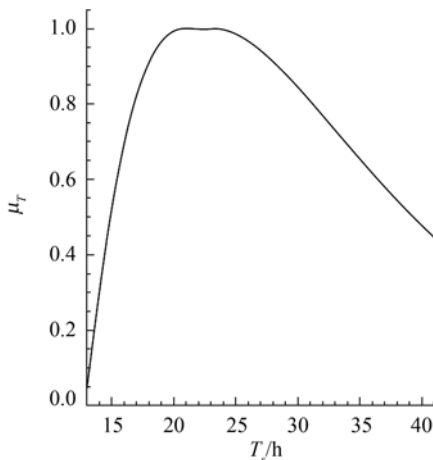


图 6 适用于快速激波事件的渡越时间从属函数 μ_T 的表达式及其函数曲线分布

3.2 预报试验结果

采用快激波渡越时间的从属函数 μ_T 于 ISF 方法, 针对本文选取的两个激波样本, 其磁扰开始时间(从太阳活动开始到地磁扰动发生的这段时间)和地磁扰动幅度大小(用 ΔKp 指数来衡量)的预报结果见表 2.

对激波样本 1, 经过对各个射电源的观测数据和预报结果做了合理的分析后, 我们挑选贴近度(A, B)最大的射电源 3C255 作为最佳的 IPS 观测来预报地磁扰动, 其磁扰时间和磁扰幅度预报值分别是 20.34 h 和 63.1, 其相

对误差分别为 1.8% 和 4.1%.

对于激波样本 2, 参照表 2, 经分析比较, 选择贴近度最大的射电源 3C283 的预报结果为最佳. 它对激波样本 2 对应的磁扰时间和磁扰幅度预报值分别是 20.94 h 和 60.3, 其相对误差分别为 6.7%和 3.1%. 值得指出的是, 相对于样本 1 的观测数据, 样本 2 的射电源观测其纬度集中于中纬, 经度差别不大, 这势必会

影响激波形状的反演和预报结果.

“切脉”预报的这两次特大太阳风暴到达地球时间分别为 20.34 和 20.94 h, 与“望诊”估计值 21 和 20 h 十分一致. “望诊”与“切脉”这二步预报相互支持, 大大增加了预报的可信度. 这是“切脉”预报有很高的预报精度的一种必然, 也是这二步法一致性的最好印证.

表 2 不同射电源对行星际激波样本 1 和 2 引起的地磁扰动的预报试验结果^{a)}

事件 编号	射电源	距离 /AU	位置	$T_{\text{观}}/\text{h}$	$T_{\text{预}}/\text{h}$	相对 误差	$\Delta Kp_{\text{观}}$	$\Delta Kp_{\text{预}}$	相对 误差	(A, B)
样 本 1	1127-14	0.61	S21E27	19.97	22.88	14.6%	65.8	46.4	29.5%	0.72
	3C255	0.69	S07E27	19.97	20.34	1.8%	65.8	63.1	4.1%	0.78
	3C286	0.70	N38E40	19.97	23.71	18.7%	65.8	47.7	27.5%	0.75
	1323+32	0.72	N36E41	19.97	22.71	13.7%	65.8	61.8	6.1%	0.77
样 本 2	1134-17	0.18	S50E19	19.63	40.00	103.6%	62.3	31.4	50.0%	0.57
	3C283	0.30	S50E31	19.63	20.94	6.7%	62.3	60.3	3.1%	0.75
	1245-19	0.37	S38E29	19.63	17.21	12.3%	62.3	53.7	13.9%	0.69
	1345+12	0.45	N45E31	19.63	16.59	15.5%	62.3	54.7	12.3%	0.62

a) 各列从左到右分别是: 激波事件编号、射电源编号、射电源的日心距及其在日球坐标系中的位置、激波到达时间观测值和预报值及其相对误差、 ΔKp 指数的观测值和预报值及其相对误差、观测集 A 和典型集 B 之间的贴近度

3.3 与国际流行预报方法的预报结果比较

目前, 国际上主要有两类(5 种)流行的预报激波到达地球的模型, 一类是基于统计得到的经验预报模型, 第二类是基于物理理论的激波传播数值模型.

以经验预报模型为例, Manoharan 等人^[22]对 1997~2002 年期间的 91 次激波事件进行了统计分析, 得到了激波渡越时间和与相应 CME 初始速度之间的经验关系式, 本文记这种方法为 CME-IP 模型.

下面概要介绍一下几种基于物理理论的激波传播模型的方法和特点^[23], 它们分别是 STOA, STOA-2, ISPM 以及 HAFv.2 模型.

STOA 模型是基于点源爆炸波的自相似理论, 并利用活塞驱动概念进行了模型修正. 该模型利用太阳活动、背景太阳风速度等输入参数, 得到激波到达地球的时间. STOA-2 模型是对 STOA 模型的改进, 它沿用了 STOA 模型的理论, 只是改进了激波传播速度与传播距离的关系式. 这两种模型主要适用于耀斑驱动的激波, 而且没有考虑激波与背景太阳风的相互作用.

ISPM 模型是基于 2.5 维 MHD 数值模拟的参数化研究. 该模型基于太阳爆发源注入太阳风的总能量和太阳爆发源的位置, 通过求解参数化研究建立的代数方程组, 确定激波到达地球的时间及强度. 该模型适用于 CME 驱动的激波、耀斑驱动的激波以及高速太阳风超越低速太阳风产生的激波, 但其使用的经验参数是否可靠有待考证.

HAFv.2 模型是模拟大尺度太阳风结构和行星际扰动传播的“修改运动学”模型. 该模型考虑了流与流之间的相互作用, 如高速流(包括激波)越过低速流的情况, 可以得到行星际磁场、等离子体速度、密度等物理量的时空分布, 从而预测激波到达地球的时间.

以上这 5 种预报方法的预报结果大都局限于对激波到达时间的预报, 其中仅有 ISPM 模型能对激波强度做一个粗略的定性估计: 其输出结果包含激波强度指数, 如果该指数超过一定的阈值, 则认为该事件是灾害性的, 应当提醒人们注意; 如果指数小于阈值, 则认为激波不会引起大的扰动, 可视其为无影响或无灾害事件. 然而, 我们的二步法不仅能预报激波到达地球的时间, 而且能定量地预报激波引起的磁扰强度大小(用 ΔKp 指数来表示). 因此, 从这点而言, 二步法是一种比较全面的预报方法.

针对这两次激波事件的到达时间, 我们将二步法的预报结果与上述国际流行预报方法的结果 [14,15] 做比较, 比较结果见表 3. 对事件 1, 二步法的预报精度除与 ISPM 模型的相同外, 比流行的其他方法高 5.4~42.3 倍. 对事件 2, 其预报精度高于其他方法 2.4~14.7 倍. 比较结果说明, 二步法的预报效果是令人满意的. 该方法充分考虑了每次事件的真实空间天气形势, 在背景场描述方面优于其他基于统计的预报模型, 对此类强激波事件的预报具有明显优势.

表 3 不同预报方法对激波样本 1 和 2 到达地球时间预报结果比较

事件编号		二步法	CME-IP	STOA	STOA-2	ISPM	HAFv.2
事件 1	$T_{\text{预}}/\text{h}$	20.34	35.19	21.92	27.12	20.33	28.02
	相对误差/%	1.8	76.2	9.8	35.8	1.8	40.3
事件 2	$T_{\text{预}}/\text{h}$	20.94	30.39	28.58	39.00	22.80	23.25
	相对误差/%	6.7	54.8	45.6	98.7	16.0	18.0

4 分析和讨论

本文选取 2003 年 10 月底至 11 月初太阳风暴期间的两次强激波事件, 首先分析其空间天气形势——“望诊”, 然后运用改进的 ISF 方法进行了预报试验——“切脉”, 并将其预报结果与国际流行的其他 5 种方法的预报结果进行比较. 预报试验的比较表明, “望诊-切脉”二步法对这两次强激波事件的预报效果是好的: 两次激波达到时间预报的相对误差分别为 1.8%和 6.7%; 其磁扰幅度预报的相对误差分别为 4.1% 和 3.1%; 与国际流行激波预报方法相比, 二步法有明显优势. 特别值得指出的是, 分析空间天气形势与用改进的 ISF 方法预报结果的一致性, 大大提高了预报的可信度, 同时也表明激波传播条件分析的重要性, “望诊”是“切脉”的重要物理基础.

此外, 本文建议的“望诊-切脉”二步法尚待改进的方面有:

(i) 虽然 IPS 观测具有不局限于日心距和日球纬度实时观测的优势, 但是由于它是中天观测, 影响了 ISF 方法的预报精度, 若能实现中天前后的跟踪观测, 将使此方法的优点更加显现出来.

(ii) 如何建立二步法中第一步与第二步之间的联系, 在最后的预报结果中体现“望诊”的权重.

(iii) 深入考察行星际激波的结构和类型、激波与背景太阳风的相互作用方式, 并将分析结果在预报方法中合理体现出来将有益于预报方法的改善.

(iv) 文中选取的激波样本是极其强烈的爆发事件, ISF 方法采用点源爆炸波作为其物理模型存在一定的局限性, 若考虑使用活塞式激波模型加以修正, 结果会更好.

致谢 感谢美国 Los Alamos 国家实验室的 Skoug 博士提供了 2003.10.28~2003.11.4 期间 ACE 卫星的观测数据. 感谢以下网站提供了相关数据: <http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/> 网站提供了 ACE 卫星的观测数据, <http://stesun5.stelab.nagoya-u.ac.jp> 提供了 IPS 观测数据, <http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp> 提供了 K_p 和 Dst 指数.

参 考 文 献

- 1 魏奉思, 朱志文. 空间天气. 科学, 1999, 5: 30—33
- 2 魏奉思. 空间天气学的基本问题. 中国基础科学, 2000, 7: 9—13
- 3 Gopalswamy N, Barbieri L, Lu G, et al. Introduction to the special section: Violent Sun-Earth connection events of October–November 2003. *Geophys Res Lett*, 2005, 32(3): L03S01 [\[DOI\]](#)
- 4 Lopez R E, Baker D N, Allen J E. Sun unleashes Halloween storm. *Eos Trans AGU*, 2004, 85: 105—108 [\[DOI\]](#)
- 5 Webb D, Allen J. Spacecraft and ground anomalies related to the October–November 2003 solar activity. *Space Weather*, 2004, 2(3): S03008 [\[DOI\]](#)
- 6 索玉成, 张添益. 2003 年一次日一地大骚扰. 军事气象, 2004, 3: 34—36
- 7 Barbieri L P, Mahmot R E. October–November 2003's space weather and operations lessons learned. *Space Weather*, 2004, 2(9): S09002 [\[DOI\]](#)
- 8 Skoug R M, Gosling J T, Steinberg J T, et al. Extremely high speed Solar Wind: 29–30 October 2003. *J Geophys Res*, 2004, 109(A9): A09102 [\[DOI\]](#)
- 9 Zurbuchen T H, Gloeckler G, Ipavich F, et al. On the fast coronal mass ejections in October/November 2003: ACE-SWICS results. *Geophys Res Lett*, 2004, 31(11): L11805 [\[DOI\]](#)
- 10 Malandraki I O E, Lario D, Lanzerotti L J, et al. October/November 2003 ICMEs: ACE/EPAM solar energetic particle observations. *J Geophys Res*, 2005, 110(A9): A09S19 [\[DOI\]](#)
- 11 Lario D, Livil S, Krimigisl S M, et al. Heliospheric energetic particle observations during the October–November 2003 events. *J Geophys Res*, 2005, 110(A9): A09S11 [\[DOI\]](#)
- 12 Kuwabara T, Munakata K, Yasue S, et al. Geometry of an interplanetary CME on October 29, 2003 deduced from cosmic rays. *Geophys Res Lett*, 2004, 31(19): L19803 [\[DOI\]](#)
- 13 Woods T N, Eparvier F G, Fontenla J, et al. Solar irradiance variability during the October 2003 solar storm

- period. *Geophys Res Lett*, 2004, 31(10): L10802 [\[DOI\]](#)
- 14 Cary O. Prediction performance of space weather forecast centers following the extreme events of October and November 2003. *Space Weather*, 2004, 2(8): S08001 [\[DOI\]](#)
- 15 Dryer M, Smith Z, Fry C D, et al. Real-time shock arrival predictions during the “Halloween 2003 Epoch”. *Space Weather*, 2004, 2(9): S09001 [\[DOI\]](#)
- 16 Wei F S, Dryer M. Propagation of solar flare-associated interplanetary shock waves in the heliospheric meridional plane. *Solar Phys*, 1991, 132: 373—394 [\[DOI\]](#)
- 17 魏奉思. 冲击波在变密度、运动介质中的传播. *空间科学学报*, 1982, 2(1): 63—72
- 18 魏奉思. 关于利用行星际闪烁(IPS)观测进行地球磁暴急始预报的初步探讨. *地球物理学报*, 1984, 27(5): 417—423
- 19 魏奉思, 蔡红昌. 从属函数在地磁扰动预报研究中的初步应用. *空间科学学报*, 1990, 10(1): 35—41
- 20 魏奉思, 徐 亚, 冯学尚, 等. 利用“ISF”方法于地磁扰动事件的预报试验. *中国科学, E 辑*, 2003, 33(5): 447—451
- 21 Wei F S, Cai H C, Feng X S, et al. A prediction method of geomagnetic disturbances based on IPS observations-dynamics-fuzzy mathematics. *Adv Space Res*, 2003, 31(4): 1069—1073 [\[DOI\]](#)
- 22 Manoharan P K, Gopalswamy N, Yashiro S, et al. Influence of coronal mass ejection interaction on propagation of interplanetary shocks. *J Geophys Res*, 2004, 109(A6): A06109 [\[DOI\]](#)
- 23 Cho K S, Moon Y J, Dryer M, et al. A statistical comparison of interplanetary shock and CME propagation models. *J Geophys Res*, 2003, 108(A12): 1445—1452 [\[DOI\]](#)