第21卷 第3期 空 间 科 学 学 报 Vol.21, No.3
2001 年 7月 CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE July, 2001

1997 年 1 月空间天气事件的三维 MHD 模拟*

石 勇 魏奉思 冯学尚
(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100080)

摘 要

以 1997 年 1 月空间天气事件期间的观测为依据，在构造了比较接近真实的背景太阳风基础上，进一步利用三维时变的 MHD 模式，模拟了 CME(日冕物质抛射) 激发的扰动在行星际空间的传播过程，对地球空间环境的影响及行星际磁场南向分量 B_z 在 1 AU 的时间经历. 模拟结果与 WIND 卫星的观测进行了比较. 结果表明，模拟与观测得到的扰动到达地球的时间、地球空间环境各量的变化及 B_z 的时间经历基本一致.

关键词 空间天气事件—扰动— MHD 模拟

1 引 言

1997 年 1 月 6 日，太阳表面发生 CME, WIND 卫星在 10 日测量到地球空间环境各物理量发生突变，尤其是振幅很大的 B_z 突然南向过程和动压的突变，可判断有地磁暴发生. 这是一次明显的由 CME 激发强烈扰动造成的空间天气事件，对地球空间环境造成了不利影响. 近年来，对地磁暴这样的灾害性空间天气事件的研究越来越受到人们的重视，大量的观测资料表明非定期发生的强地磁暴大多是由 CME 引起的，而 CME 的行星际传播过程即与行星际介质的相互作用是引发地磁暴的关键因素，因此进行 CME 行星际过程的研究对空间天气事件的预报具有一定的实际意义.

用数值方法研究太阳表面的活动及其行星际过程在当前是进行空间天气预报的一条行之有效的途径. 本文的目的是从空间天气数值预报的角度出发，以一个三维的 MHD 模式为基础 [1]，根据事件期间的观测资料，构造比较接近真实的初边值，模拟 1997 年 1 月 CME 在行星际空间的传播及演变过程，给出扰动到达时间及与磁暴有关的各物理量，特别是 B_z 在 1AU 的时间经历，并与 WIND 卫星的有关观测对比. 基于同样目的的研究还有 Usmanov 等对 1991 年 6 月多太阳耀斑激发的扰动进行的三维模拟 [2−4]，Dryer 等对 1994 年 4 月的 CME 行星际过程的模拟 [5]. 本文侧重于以观测为基础构造接近真实的初边值条件，即放弃缺乏观测依据的内边界较理想的取法而将太阳表面的物理特征结合到模式中，在此基础上模拟 1997 年 1 月空间天气事件. 同时，本文还希望考察 Han 模式用于模拟行星际扰动传播的能力，故未对事件的日冕过程做更多的讨论.

* 中国科学院空间科学与应用研究中心所长基金资助 (982003)
中国科学院空间天气学开放研究实验室
2000-04-21 收到原稿， 2001-05-08 收到修定稿

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

2　观测结果

这里先简单介绍 1997 年 1 月事件的情况. 图 1 是 Wilcox 天文台以太阳光球磁场观测为输入, 用势场模式 * 计算得到的太阳源表面 ($2.5\,R_s$) 径向磁场 B_r 的分布. 可见磁场关于赤道面不对称, 在 300° 附近有明显的倾斜和扭曲, 这些特征不能用一般的标准函数来描述. 磁场在源表面最大为 $10\,\mu$T, 磁场较弱.

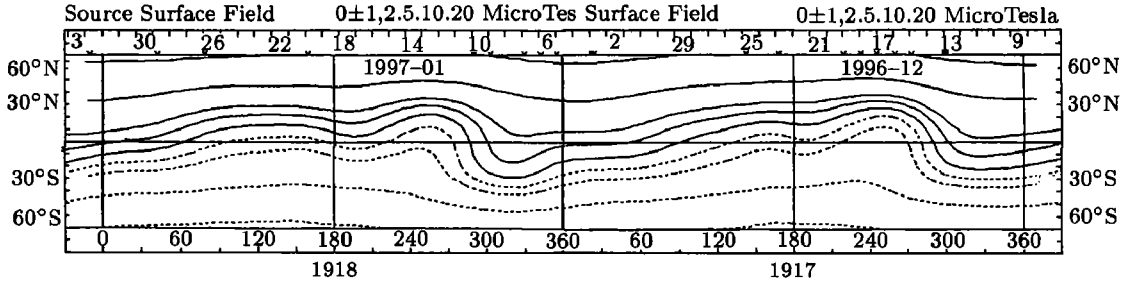


图 1　卡林顿 1917 和 1918 周太阳源表面 B_r 分布

Fig.1　The distribution of B_r at the source surface of 1917 and 1918 Rotation

表 1 给出了几个天文台观测到的 5 日和 6 日太阳表面的暗条消失 (DSFs), 分析表明这几个活动与 6 日发生在日冕的物质抛射事件相关, 也是地球附近 10—11 日地磁暴的太阳源 [1]. 可见 DSFs 均发生在日面中心偏南大约 20°S 附近, Yohkoh 软 X 射线的照片 (限于篇幅, 本文未给出, 可在网上查到) 也显示 6 日和 7 日之间, 在日面中心偏南 20° 左右持续有明显的亮斑, 据此可确定 CME 的源位置. 表 1 表明 5 日和 6 日在三个不同时间段内, 上述位置都观测到太阳表面的 DSFs 活动, 时间跨度共有近 30 小时. SOHO 上的 C2 和 C3 日冕仪分别在 6 日 1734 和 1950 观测到物质抛射, 根据观测到的物质膨胀速度, 可粗略地估计 CME 发生时间在日面中心处分别为 1402 和 1508, 在太阳边缘分别为 1548 和 1624.

上述观测结果是本文确定模式初边值条件的基础.

表 1　1997 年 1 月 5 日至 6 日太阳表面的 DSFs 事件

台站名称	消失时间	位置	范围
	1 月 5 日无观测资料		
Ramey	> 5, 2119< 6, 1113	17°S 05°E	5°
San Vito	> 5, 1939< 6, 2300	19°S 06°E 20°S 10°E	9°
Ramey	6, 1301—1453	23°S 03°W	5°
		24°S 01°W	
		27°S 00°W	

*Hoeksema J T, Schetter P H. Rep. CSSA-ASTRU 8511, 1985, Stanford University, Stanford, California

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

3 模式的初边值

本文所用模式的基础是 Han 发展的一个三维 MHD 模式，它由一个求解定态背景太阳风的诊断模式和一个模拟扰动传播的时变模式构成.

以图 1 为基础，利用一个二元插值方法插出所有网格点上 (共 36×55 个) 的径向磁场值，根据磁通量守恒将其外推到 $18\,R_s$ 处，作为 B_r 的初边值. 通常在数值模拟中磁场的南北分量 B_θ 都是被忽略的 [6], 但 1997 年 1 月事件电流片实际上有明显的倾斜，并在卡林顿经度 300° 附近有一定的扭曲，根据矢量法则及有关文献的取法 [2], 本文尝试将 B_θ 取为

$$B_\theta = \sin 2\theta \times 10, \tag{1}$$

B_ϕ 取为

$$B_\phi = 3\sin((\theta - \theta_0)/4) \times 10^2, \tag{2}$$

这里磁场单位都是 nT.

密度通常是按理想函数形式给出的. K-日冕亮度的观测表明，电流片附近密度最大，随纬度递减. 据此假设源表面密度与磁场在分布上具有相似性，可用相似关系推出密度的分布，用观测得到的密度值定标. 根据 WIND 卫星观测到的地球附近的数密度，反推到 $18\,R_s$, 再定标到相似形上. 速度用质量流量守恒来确定，温度用压力平衡来确定.

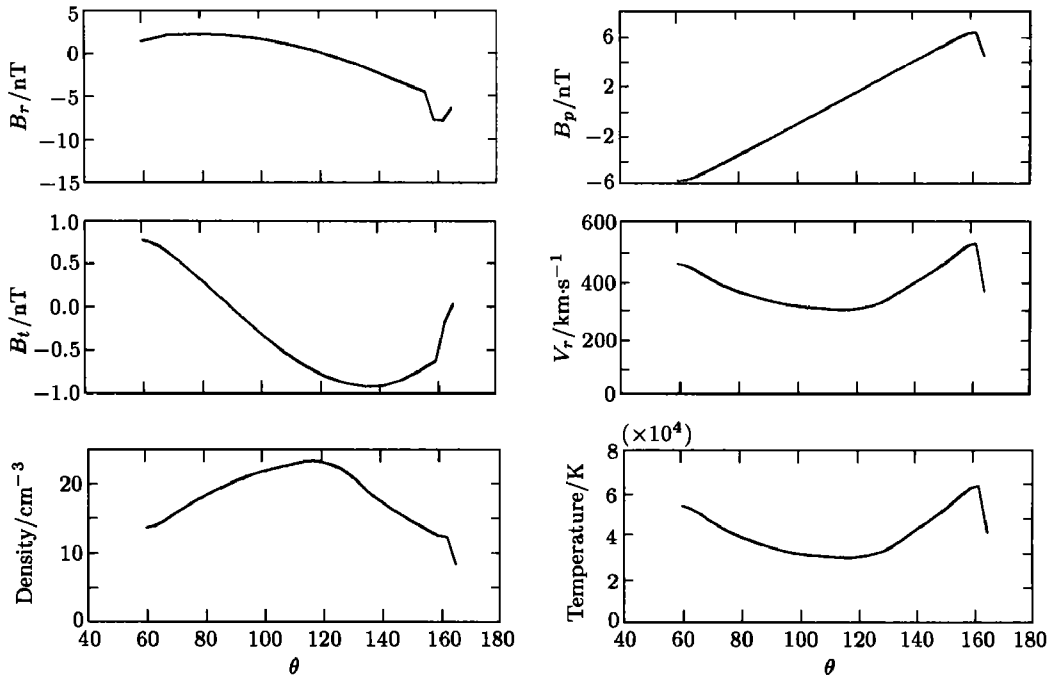


图 2 1 AU 处背景场各物理量在子午面内的分布
Fig.2 Varibles' distribution in the meridional plane at 1 AU

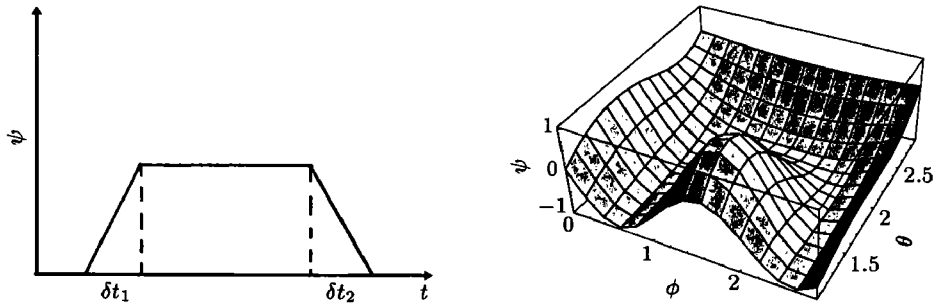
将上述初边值带入诊断模式，可得到稳定的太阳风背景场. 图 2 给出了 1 AU 处的 B_r 、 B_ϕ 、 B_θ 、 V_r 、 ρ 及 T 在子午面内的分布. 在 1 AU 附近， B_r 的值在 3 nT 左

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

右，B_ϕ 为 −3 nT 左右，B_θ 在 1 AU 附近几乎为 0，总磁场也在 3 nT 左右．从 Internet 上得到 WIND 卫星观测显示，在 1 月 10 日附近，即磁暴发生前，行星际磁场值为 3 nT，10 日以后很快增加到 10 nT 以上．可见本文得到的磁场与观测符合较好．由图 2 可见 1 AU 处的太阳风速度为 300 km/s 左右，等离子体数密度为 9/cm^3 左右．WIND 卫星观测到 10 日前太阳风速度为 320 km/s 左右，等离子体数密度为 10/cm^3，模拟结果与观测值基本吻合，等离子温度在 2×10^4 K 左右．由图还可见各物理量关于事件的太阳源位置 (图中 110° 附近) 呈不对称结构．

根据上述有关太阳表面活动的观测，我们做出以下推论：6 日午后太阳活动最频繁，是此次事件的主要诱发因素；事件的时间跨度较长，应在 30 小时以上；太阳表面在上述时间段内应不止一次物质喷发，至少有时间相互交叉或间隔的 3 次物质喷发．共引入了三次扰动，分别对应与表 1 中 Ramey 观测到的 5 日至 6 日的活动，Ramey 观测到的 6 日午后的活动和 San Vito 观测的 6 日午夜的活动．同时在扰动的发生时间和持续时间上，还参考了 SOHO 的观测和软 X 射线资料．

在内边界上共引入速度和密度扰动组合成的两个扰动和一个强温度扰动，各扰动间隔一定的时间；扰动过后，内边界恢复扰动前状态并保持不变，即一般所说的固定内边界；在其他边界上为了减小反射作用，均采用线性外推边界．图 3 给出了扰动的时间和空间分布，图中的垂直坐标变量 ψ 代表 V 、ρ 和 T 三个变量，图 3(a) 是扰动在随时间的变化情况，δt_1 是扰动的变化时间，δt_2 是其持续时间，图 3(b) 是扰动在空间 θ-ϕ 平面内的分布，这里给出的仅是时空分布的归一化示意图，具体到每个扰动，其形式有一定的差别，这里不一一给出．



(a) 扰动时间分布　　(b) 扰动空间分布

图 3　内边界上扰动的时间和空间分布示意图

Fig.3　The spatial and temporal sketch map of disturbances at the inner boundary

4　模拟结果

图 4 给出了 WIND 卫星观测和本文模拟得到的 1 AU 处 V_r 、N 及热速度 $V_{\rm th}$ 演化情况．观测表明地球附近的各量在 10 日和 11 日之间发生突变，导致地磁暴发生．由模拟结果可见扰动在 110 小时后到达，结合第 2 节的分析，即扰动也是在 10 日和 11 日之间到达，二者基本符合．WIND 卫星观测得到的 $V_{\rm th}$ 、ρ 和 V_r 峰值分别为 82 km/s, 53/cm^3 和 540 km/s，模拟得到的相应各量为 86 km/s, 56/cm^3 和 540 km/s 二者基本一致．比较可

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

见，各量随时间的演化情况也相差无几.

值得注意的是，从卫星失事的时间来看，地磁暴最强应在 11 日左右，观测和模拟结果都一致地显示出 11 日附近有较明显的高密度和高速流结构，但 11 日附近速度并未达到最大，这以后仍有大时间跨度和强度的高速流结构，同时热速度仍保持较大值，而密度却减小到低于事件前的背景太阳风平均值，这印证了第 3 节的分析，即太阳源表面除了 6 日午后的频繁活动外，此前此后都至少还应有一次喷发过程. 我们认为 11 日前后的强地磁暴是由 6 日午后的太阳活动引起，其后的太阳活动应该是 11 日后高速流结构的太阳源. 根据上述分析，我们可做出这样的假设，即 11 日后的高速流结构不是简单动量扰动引起的，还应该包括温度的突变. 为此我们在第 3 节中引入两个动量扰动之后再于偏北一点的位置上引入一个温度扰动，软 X 射线也显示在该位置附近有明显的活动. 该过程中速度和密度扰动都较小，模拟结果与观测基本一致，可见第 3 节中的推断是合理的.

一般来说，B_z 突然南向可作为地磁暴发生的判据，本文模拟得到了较好的 B_z 在 1 AU 的时间行为. 在 GSM 坐标系中，B_z 与日心坐标系 (本文模式所采用的坐标系) 中的 B_θ 具有这样的关系：$B_z = -B_\theta$. 图 5 给出了 WIND 卫星观测和本文模拟得到的 B_z 在 1 AU 的时间经历. WIND 卫星的观测表明，B_z 在 10 日 02 时开始南向，在 10 日 08 时开始转北，南向最大值达到 −10 nT 左右，与 11 日 04 时到达北向最大值，整个过程持续约 26 小时. 模拟结果可见，100 小时以后，即 10 日早晨 B_z 突然南向，在 110 小时附近较缓慢地向北，南向最大值可达 −10 nT 以上，然后转而向北，整个过程持续约 30 小时. 比较两图可见，除模拟结果的北向值略小于观测值外，二者在时间经历及位形上几乎一致.

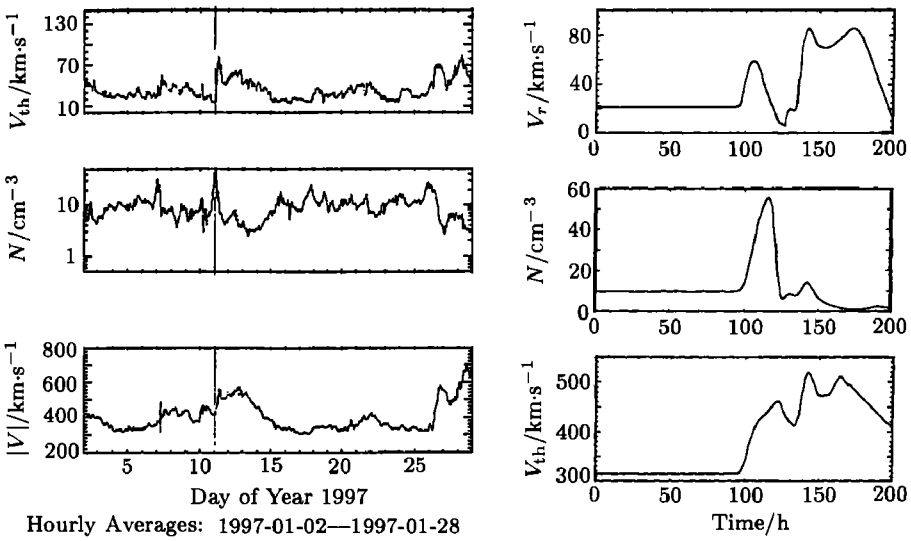


图 4 1 AU 处速度 (V)、数密度 (N)、热速度 (V_{th}) 随时间的演化
左图为 WIND 卫星观测结果，右图为模拟结果

Fig.4 The temporal distribution of the velocity (V), the number density (N) and the thermal velocity (V_{th}) at 1 AU, the upper three are the WIND's observations and the bottom three are the simulated results

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

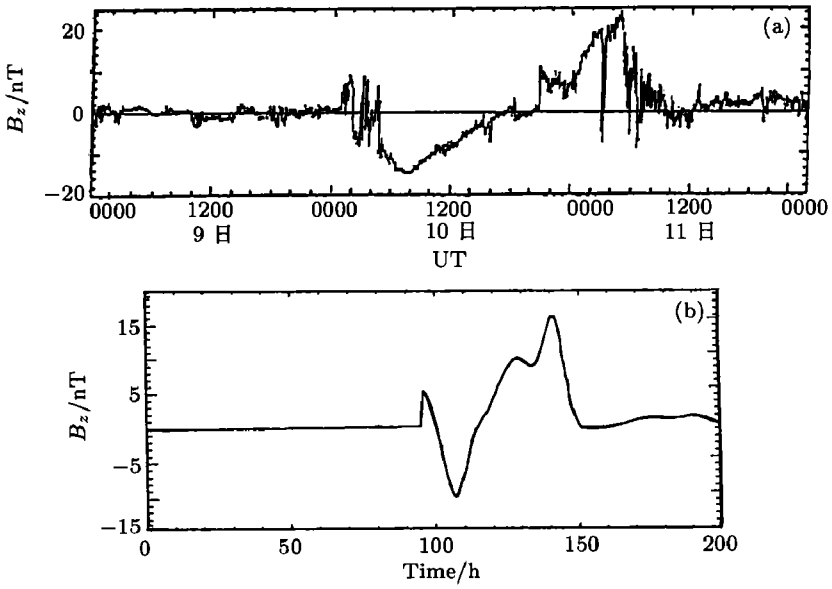


图 5　WIND 卫星观测及模式模拟得到的 1 AU 处行星际磁场南北分量 B_z 的时间经历
(a) 为 WIND 观测，(b) 为模拟结果
Fig.5　The temporal behavior of B_z at 1 AU,
the (a) is the WIND's observation and the (b) one is the numerical results

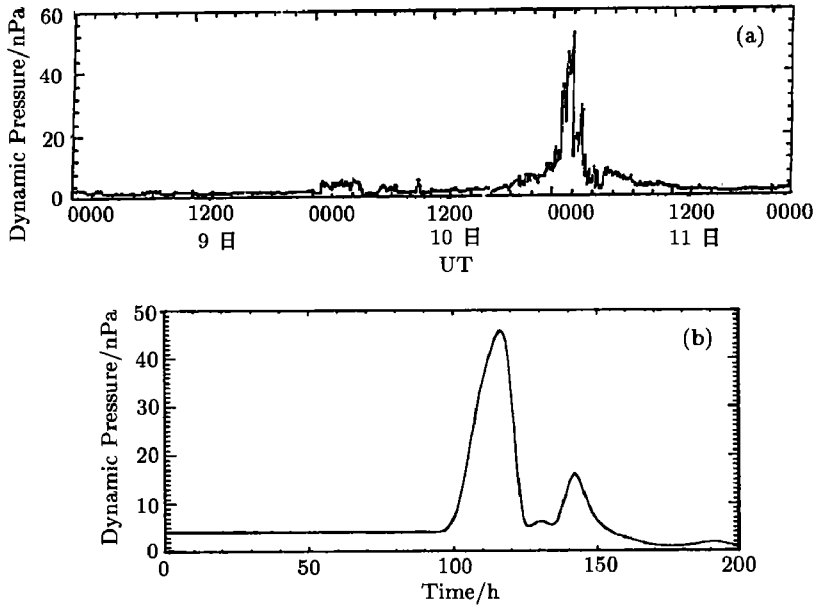


图 6　WIND 卫星观测及模式模拟得到的 1 AU 处动压的时间经历
(a) 为 WIND 观测，(b) 为模拟结果
Fig.6　The temporal behavior of dynamic pressure at 1 AU,
the (a) is the WIND's observation and the (b) is the numerical results

动压的突变也是磁暴发生的重要判据．图 6 给出了 WIND 卫星观测和模拟得到的 1 AU 处动压力的分布情况．由图可见，无论观测还是模拟结果都表明动压发生突变的时

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

间与 B_z 南向的时间完全吻合，动压从突变到恢复到背景值的时间与 B_z 由北转南的时间完全吻合，即 30 小时左右. 模拟和观测得到的动压在量值上也基本一致，最大值都在 50 nPa 左右，并且地磁暴期间动压的突变是比较明显的，其量级达到了几十纳帕，说明有大量高能粒子到达地球.

图 5 和图 6 的结果，可以作为预报地磁暴的重要参考.

5 结 语

本文以观测为依据构造了比较接近真实的初边值，模拟得到了 1997 年 1 月 CME 期间接近实际的三维背景太阳风，在此基础上通过对事件期间多种观测资料的综合分析确定扰动，模拟了 CME 的行星际过程. 结果表明：模拟得到的背景场比较接近真实情况，与 WIND 卫星观测结果基本一致；扰动到达时间及各物理量的演化基本与 WIND 卫星的观测一致；模拟得到了 B_z 突然南向然后转北的过程，并与 WIND 卫星的观测符合极好，这是通常的二维或二维三分量的数值模拟无法得到的，同时综合动压的模拟结果，可作为地磁暴预报的重要参考. 因此，本文可作为空间天气事件数值预报的参考，有一定的实际意义. 需要指出的是，这一类以预报为目的的工作的基本要求是直接采用太阳表面的观测作为模式的输入，但在目前情况下，仍有很大困难. 本文所采用的将太阳表面的物理特征结合到模式的初边值中，从而获得比较接近真实的结果的做法，只能算是一种有益的尝试.

本文的结果还表明 Han 模式具有模拟强扰动在行星际空间传播的能力，所不足的是模式未能将日冕过程考虑进去，这是需要进一步发展的.

参 考 文 献

[1] Han S M, Wu S T, Dryer M. A three-dimensional, time-dependent numerical modeling of super-sonic, super-Alfvenic MHD flow. *Comput. Fluids*, 1988, **16**(1):81—103

[2] Usmanov A V, Dryer M. A global, 3-D simulation of interplanetary dynamics in June 1991. *Solar Phys.*, 1995, **159**:347—370

[3] Usmanov A V. The global structure of the solar wind in June 1991. *Solar Phys.*, 1993, **148**:371—378

[4] Usmanov A V. A global numerical 3-D MHD model of the solar wind. *Solar Phys.*, 1993, **146**: 377—396

[5] Dryer M, Wu C C, Smith Z K. Three-dimensional MHD simulation of the April 14, 1994, interplanetary coronal mass ejection and its propagation to Earth and Ulysess. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**(A7):14 065—14 074

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

A THREE-DIMENSIONAL MHD SIMULATION FOR THE JANUARY 1997 SPACE WEATHER EVENT

SHI Yong　WEI Fengsi　FENG Xueshang

(Center for Space Science and Applied Research, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract

Based on observations from some satellites, observatories and the obtained definitely real solar wind backgroud, the propagation and evolution of the Janurary 1997 interplanetary CME were simulated in this paper using a 3-D MHD model. Results showed that the parameters simulated near the earth are in accordance with observations of WIND satellite, especially the temporal B_z behavior at 1 AU.

Key words　Space weather event, CME, MHD simulation

• 学术动态 •

中国空间科学学会第六次全国会员代表大会暨学术年会在宁波市召开

中国空间科学学会于 2001 年 5 月 20 日至 24 日在浙江省宁波市召开了第六次全国会员代表大会暨学术年会. 有 164 名代表出席了这次会议.

会议除圆满地完成了学会理事会换届工作的一切议程以外, 还召开了以 "21 世纪初我国空间科学技术的发展" 为主题的学术年会. 6 位空间界著名科学家分别围绕我国空间科学发展中有关的重大课题做了综述性报告.

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