

罗 浩,陈耿雄,杜爱民等. 耀斑引发的激波初始速度对激波到达时间预测的影响. 地球物理学报, 2011, **54**(8):1945~1952, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.08.001

Luo H, Chen G X, Du A M, et al. Influence of the initial shock speed excited by solar flares on shock arrival time prediction. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, **54**(8):1945~1952, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.08.001

## 耀斑引发的激波初始速度对激波 到达时间预测的影响

罗 浩<sup>1,3</sup>, 陈耿雄<sup>1\*</sup>, 杜爱民<sup>1,4</sup>, 孙 炜<sup>2</sup>, 徐文耀<sup>1</sup>, 张 莹<sup>1</sup>, 赵旭东<sup>1</sup>, 王 源<sup>1</sup>

1 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

2 美国阿拉斯加大学费尔班克斯分校地球物理研究所, 阿拉斯加 99701

3 中国科学院研究生院, 北京 100049

4 中国科学院空间天气学国家重点实验室, 北京 100190

**摘 要** 利用 Hakamada-Akasofu-Fry 运动学太阳风模型模拟了 1981 到 1985 卡林顿周的 48 个太阳耀斑事件激发的激波到达地球的时间. 结果表明, 对模式输入参数之一的激波初始速度进行调整, 可以使模拟结果和实际观测基本一致. 通过对发生在该时期多个事件的统计分析, 分别得到日球表面东、西两半球耀斑爆发对应的激波初始速度调整因子和初始速度的统计关系. 该关系应用到 1986 到 1990 卡林顿周期间发生的耀斑对应的激波到达地球时间的模拟时, 对于位于西(东)半球的耀斑, 预测行星际激波到达地球所需时间的平均绝对误差从未使用该关系的 16(15) h 降低到 12(11) h.

**关键词** HAF 模型, 初始太阳风激波速度, 激波到时, II 型射电爆发

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.08.001

中图分类号 P353

收稿日期 2011-03-06, 2011-05-20 收修定稿

### Influence of the initial shock speed excited by solar flares on shock arrival time prediction

LUO Hao<sup>1,3</sup>, CHEN Geng-Xiong<sup>1\*</sup>, DU Ai-Min<sup>1,4</sup>, SUN Wei<sup>2</sup>, XU Wen-Yao<sup>1</sup>,  
ZHANG Ying<sup>1</sup>, ZHAO Xu-Dong<sup>1</sup>, WANG Yuan<sup>1</sup>

1 *Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*

2 *Geophysical Institute, University of Alaska Fairbanks, Fairbanks, Alaska 99701, USA*

3 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

4 *State Key Laboratory of Space Weather, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*

**Abstract** By using Hakamada-Akasofu-Fry (HAF) solar wind model, we simulated 48 solar flare events during Carrington Rotation 1981 to 1985 and compared the simulated shock arrival time with observations by satellites at 1 AU. It is found that the initial solar wind shock speed deduced from the metric Type II radio burst observations plays an important role in the shock

**基金项目** 国家重点基础研究发展计划项目(2011CB811404)、公益性行业(气象)科研专项经费项目(GYHY200806024, GYHY(QX)2007-6-13)资助.

**作者简介** 罗 浩,男,1982年生,博士研究生,2006年毕业于云南大学,目前主要从事行星际激波到达时间以及亚暴方面研究.

E-mail:luohao@mail.iggcas.ac.cn

\* **通讯作者** 陈耿雄,男,1957年生,副研究员,主要从事地磁场扰动研究与预报、空间等离子体过程与数值模拟研究、磁暴与亚暴关系的研究.

E-mail:gxchen@mail.iggcas.ac.cn

arrival time prediction. The match between predicted and observed shock arrival times (SATs) was considerably improved by iteratively adjusting the initial shock speed. We obtained the adjustment factors as a function of the initial shock speed for different hemispheres by statistical analysis and applied them to adjust the initial shock speed driven by the solar flares which occurred in the following five Carrington rotations (1986~1990), the mean absolute error of the shock arrival time was reduced from 16 (15) hours to 12 (11) hours for the flare occurred on the western (eastern) hemisphere. This indicates that there can be significant improvements for the shock arrival time prediction by adjusting the initial shock speed using the statistical functions.

**Keywords** HAF model, Initial shock speed, Shock arrival time, Type II radio burst

## 1 引言

太阳瞬时爆发事件驱动的行星际激波到达地球时可压缩磁层,使地球磁层发生扰动.行星际激波在传播过程中还能够使南向磁场增强<sup>[1]</sup>,而较强的南向磁场是造成中等磁暴及大磁暴的主要原因之一<sup>[2~5]</sup>.强烈的地磁扰动往往伴随着行星际激波的到达而产生<sup>[6]</sup>,Echer 和 Gonzalez<sup>[7]</sup>等人通过对 1973~2000 年间的行星际激波及其对应的地磁效应统计研究发现:激波通过地球后产生弱磁暴( $-50 \text{ nT} < Dst < -30 \text{ nT}$ )、中等磁暴( $-100 \text{ nT} < Dst < -50 \text{ nT}$ )、强磁暴( $Dst < -100 \text{ nT}$ )的几率分别为 20.6%,35.1%,22.3%.因此,如何准确地预报行星际激波到达时间对空间天气预报系统的建立具有至关重要的作用<sup>[8]</sup>.同时,行星际激波到达时间还是衡量一个太阳风模式有效性的标准之一<sup>[9]</sup>.

自 1997 年 2 月以来,Smith 等人尝试用 STOA 和 ISPM 模型实时预报激波到达时间<sup>[10]</sup>.Fry 等人利用 HAF 模型模拟了第 23 太阳周上升相的 173 个太阳爆发事件所产生的激波,并把结果和 STOA 和 ISPM 太阳风模型进行了对比<sup>[8]</sup>.McKenna-Lawlor 等人利用 STOA 和 HAF 这两个太阳风模型对 23 周太阳高年时的 166 个太阳爆发事件驱动的激波进行了实时的预报<sup>[11]</sup>.Smith 等人对第 23 太阳周的下降相的行星际激波到达时间做了预报<sup>[12]</sup>.通过太阳周三个相位不同模式对行星际激波到达时间模拟结果的统计表明,这几个太阳风模型在预测激波到达时间的准确程度基本上是相当的.在行星际激波到达时间的预报中,太阳爆发事件的初始激波速度、背景太阳风速度、行星际太阳风的共旋结构以及日地连线和初始激波法向的夹角都是影响激波到达时间预测的因素.同时,动力学理论的研究结果表明,激波不单纯是一个间断,它具有一定的厚度,

并且存在许多粒子加速机制(例如,准垂直激波条件下的漂移加速和激波冲浪加速等)<sup>[13~15]</sup>,这些效应会影响激波在行星际空间的传播并且对激波到达时间产生一定的影响.然而在 HAF 模型对行星际激波到达时间的预测中,初始激波速度被认为是最重要的<sup>[16]</sup>.因此在本文中主要考虑激波初始速度而忽略其他因素对激波到达时间的影响.在 HAF 模型中,初始激波速度可以由米制 II 型射电爆发的数据计算得到<sup>[17]</sup>.具体的计算方法是 Smerd 等人首次提出<sup>[18]</sup>:

$$V_s = 6.529 \times 10^5 \left| (f_{\max} - f_{\min}) / \Delta t \right| / f_{\min} \times [\lg(f_{\min} / a^{1/2}) - 0.4150]^2, \quad (1)$$

其中  $V_s$  是初始激波速度(km/s); $f_{\max}$  和  $f_{\min}$  分别为此次射电爆发的最大和最小频率; $\Delta t$  是爆发的持续时间; $a$  是一个常数在计算中取 1.上述方法计算得到的激波初始速度为许多太阳风模式提供了输入参数.例如,行星际激波传播模式(ISPM)和激波到时模式(STOA)都利用由上述方法计算得到激波初始速度,并作为模型的输入参数<sup>[19~21]</sup>.然而,Sun 等人利用 HAF 模型模拟了发生在 2001 年 3 月 28 日到 4 月 18 日之间的一系列太阳爆发事件<sup>[16]</sup>,通过对模拟的激波到达时间和 ACE 卫星的实际观测对比得到计算误差,然后调整激波初始速度使模拟的激波到达时间和观测吻合.结果发现大部分高速激波( $V_s > 1000 \text{ km/s}$ )平均需要减小 30%才能和观测到的激波到达时间吻合.由于低速的激波到达地球也能引起明显的地磁效应,因此有必要评估相对低速的激波初始速度在激波到达时间预测中的影响.

本文中,我们主要选择具有较低初始激波速度( $V_s < 1000 \text{ km/s}$ )的太阳爆发事件.耀斑的参数和激波初始速度由美国阿拉斯加大学费尔班克斯分校的地球物理所提供(<http://gse.gi.alaska.edu/recent/archive/>).初始的背景太阳风速度由太阳源表面磁场推算得到.模型中,太阳爆发事件的输入参

数如下:事件开始时刻、事件持续时间、事件爆发的位置(包括在太阳表面的经度和纬度)、初始激波速度.关于 HAF 模型的详细描述可参阅 Hakamada, Akasofu<sup>[22]</sup> 和 Fry<sup>[23]</sup> 的文章.

## 2 模拟以及观测结果

图 1 展示了 2001 年 9 月 20 日 05 :07 时刻太阳耀斑爆发时,由这个太阳耀斑驱动的激波在黄道面内传播至 2AU 的过程. 图的中心表示太阳所在的位置. 小黑点代表地球所在位置. 图中不同颜色的线代表行星际磁场的极性,红线表示行星际磁场背离太阳,蓝线代表行星际磁场指向太阳. 根据公式(1)

得到的激波初始速度约为 950 km/s,模拟得到激波到达地球的时间为 2001 年 9 月 23 日 12 :00 左右. 根据观测资料,激波到达地球的实际时间是 2001 年 9 月 23 日 09 :30 左右,模拟的激波到达时间比观测晚了大约 2.5 h. 当激波初始速度( $V_s$ )从 950 km/s 调整到 1050 km/s 后,模拟得到激波到达地球的时间为 2001 年 9 月 23 日 09 :00 左右,模拟的激波到达时间和观测的基本吻合. 此时的 1050 km/s 即为调整后的激波初始速度( $V_{si}$ ),调整的大小为

$$\text{Factor} = (V_{si} - V_s) / V_s = 0.11.$$

图 2 展示了可能产生激波的三种行星际结构<sup>[24]</sup>. 图 2a 表示由纯的耀斑或者 CME 所产生的激波到达地球;图 2b 展示的是由纯粹的共转相互作用

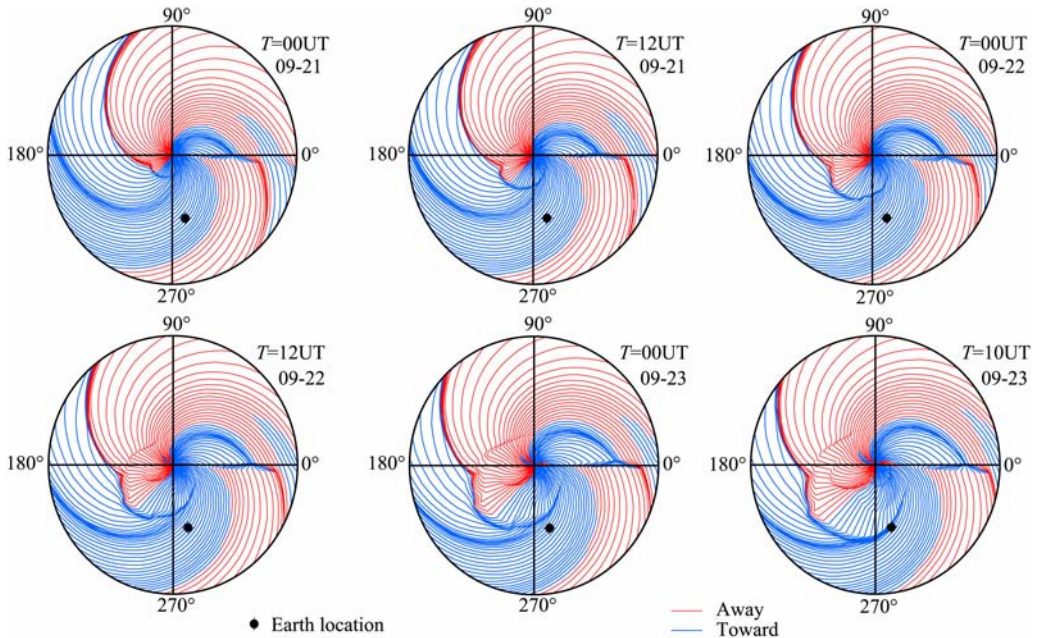


图 1 2001 年 9 月 20 日 05 :07UT 爆发的太阳耀斑驱动的行星际激波在黄道面内传播至 2AU 的过程  
Fig. 1 The propagation in the ecliptic plane to 2 AU of the shock wave generated by the flare occurred at 05 :07UT on September 20<sup>th</sup>, 2001

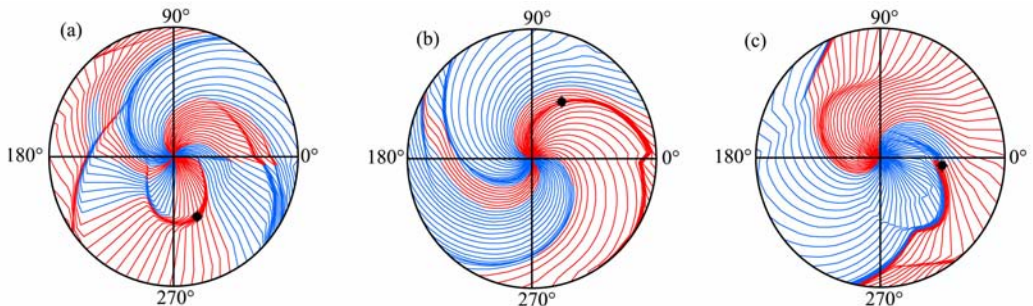


图 2 可能产生激波的三种行星际结构<sup>[24]</sup>  
(a) 纯的耀斑或者 CME 所形成的激波; (b) 共转相互作用区(CIR)形成的激波; (c) 耀斑和 CIR 共同形成的激波.  
Fig. 2 Three possible interplanetary structures which can generate shock waves<sup>[24]</sup>  
(a) Pure flares or CMEs; (b) Pure CIRs; (c) CIR-ICMEs/flares.

区(CIR)产生的激波;图 2c 表示由耀斑和 CIR 共同作用形成的激波到达地球的情形. 起源于太阳冕洞的太阳风高速流传播至行星际空间和背景低速太阳风相互作用, 造成接触面内磁场和等离子体的压缩<sup>[25]</sup>, 当压缩梯度足够大时, 在行星际空间就能形成激波(CIR 驱动的激波). 此种情况下, 激波并不对应于 Type II 型射电爆发, 因此在我们目前的模拟中无法通过对激波初始速度的调整来改变 CIR 产生的激波到达地球的时间. 本文仅考虑由耀斑以及耀斑和 CIR 相互作用而形成的激波所对应的激波初始速度.

图 3 展示了 1982 卡林顿周的模拟结果和观测结果的对比, 其中图 3a 的红线表示未调整的激波初始速度的模拟结果, 黑线代表卫星的实际观测结果. 从上至下依次表示太阳风速度、密度、动压和激波搜索指数. 可以看出, 大部分的行星际激波到达时间的预报结果和观测结果都有一定的偏差, 因此我们根据偏差的大小定量地调整了激波初始速度. 图 3b 的红线表示激波初始速度调整以后的模拟结果. 从图中可以清楚地看出, 通过调整激波初始速度可使模拟的结果和观测结果很好地吻合. 这也说明了激波初始速度在激波到达时间预报中的重要作用.

我们对 1981 至 1985 卡林顿周期间太阳耀斑爆

发所引发的激波初始速度进行上述调整. 表 1 列出了能够到达地球的激波事件模拟的结果. 第 1 列表示耀斑事件的序号; 第 2 列和第 3 列表示耀斑爆发的时间; 第 4 列表示耀斑的爆发位置; 第 5 列表示未调整之前的激波初始速度. 第 6 列表示利用未调整的激波初始速度模拟得到的激波到达时间. 在这列中, “Interacting Event”表示对应的太阳耀斑事件所产生的激波被后面爆发的耀斑所产生的激波赶超并相互作用形成一个新的激波. 这种类型的激波事件已由 McKenna-Lawlor 等人进行了详细的描述<sup>[11]</sup>. 第 7 列表示使模型预测得到的激波到达时间和观测结果相吻合所调整的初始激波速度. 第 8 列表示观测结果得到的激波到达时间. 第 9 列是激波初始速度的调整因子  $\text{Factor} = (V_{\text{si}} - V_{\text{s}}) / V_{\text{s}}$ , 它代表激波初始速度调整的百分比. 在模拟中通过设定激波搜索指数  $\text{SSI} = \log(\Delta\text{DP}/\text{DP})$  来确定激波是否到达地球. 其中 DP 是地球附近太阳风动压;  $\Delta\text{DP} = \text{DP}(t+1) - \text{DP}(t)$  是两个连续时刻的太阳风动压变化值. 当这个指数值超过 -0.5 时, 就认为激波到达地球<sup>[16]</sup>.

图 4 展示了经过调整激波初始速度后 1981 至 1985 卡林顿周的 22 个激波到达地球的黄道面投影. 根据卫星观测结果, 在 1981 到 1985 卡林顿周中

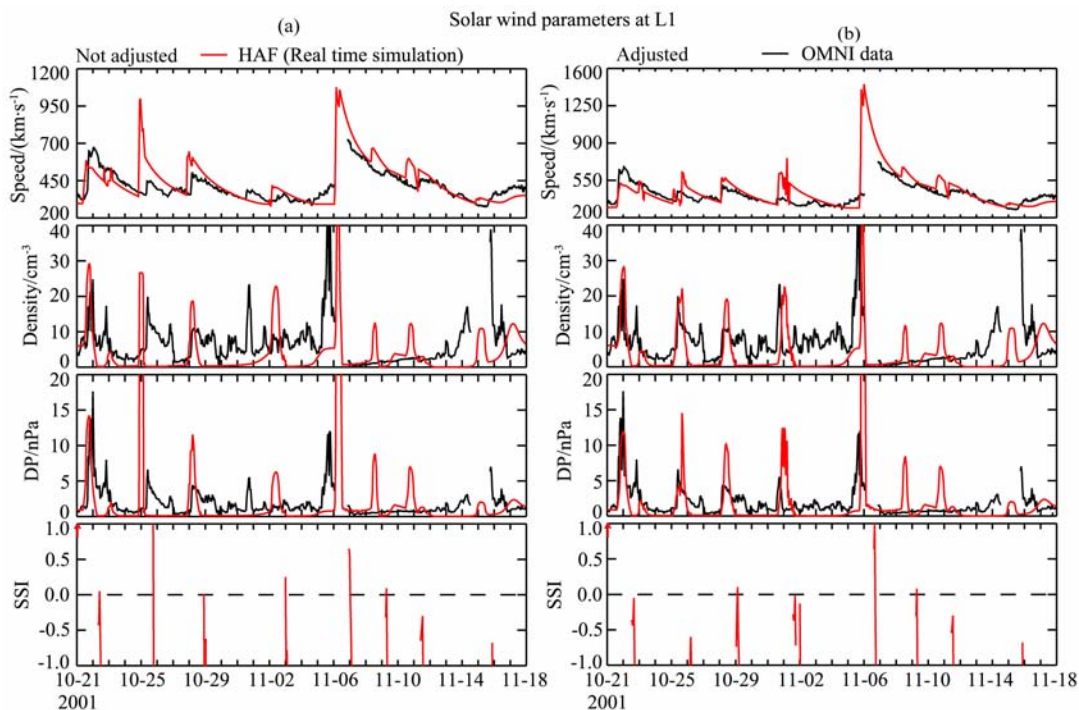


图 3 1982 卡林顿周的模拟结果和观测结果对比

(a) 未调整的激波初始速度的模拟和观测结果对比; (b) 调整以后的激波初始速度的模拟和观测结果对比.

Fig. 3 Comparison between simulated results and observations

(a) Simulations before adjustments of the initial shock speed; (b) Simulations after adjustments of the initial shock speed.

表 1 模拟激波到达时间和观测对比

Table 1 Comparisons of the shock arrival time between simulated and observed results

Flare Number	Date YYMMDD	Time HHMM	Location	$V_s$ (km/s)	Prediction MMDD HHMM	$V_{si}$ (km/s)	Observation MMDD HHMM	Factor
01	20010920	0507	S17 E57	950	0923 1200	1050	0923 0931	0.11
02	20010922	0921	N24 W07	725	0925 0200	550	0925 2030	— 0.24
06	20010928	0830	N10 E18	680	1001 0600	1000	0930 1922	0.47
08	20011008	0815	S12 W100	581	Interacting Event	1150		0.77
09	20011009	0737	N19 E67	585	Interacting Event	885		0.51
10	20011009	1055	S23 E17	650	1012 1500	1150	1011 1706	0.77
13	20011019	0101	N16 W18	914	Interacting Event	800		— 0.12
14	20011019	1624	N15 W19	738	1021 1200	700	1021 1647	— 0.05
15	20011021	0441	S18 E15	536	Interacting Event	500		— 0.07
16	20011022	1453	S21 E18	955	Interacting Event	900		— 0.06
17	20011022	1759	S18 E16	1043	1024 2200	850	1025 0835	— 0.19
18	20011025	1456	S19 W20	1091	1028 0100	950	1028 0315	— 0.13
19	20011027	0347	N11 E50	359	Interacting Event	550		0.53
20	20011029	1112	N12 E25	609	1102 0300	1250	1031 1425	1.05
21	20011104	1610	N02 W23	1329	1106 0400	1150	1106 1108	— 0.13
26	20011117	0540	S28 E42	560	1120 2300	1050	1119 1809	0.88
27	20011121	1321	S15 W18	700	Interacting Event	950		0.36
28	20011122	2027	S25 W67	900	Interacting Event	1300		0.44
29	20011122	2231	S15 W34	459	1124 2100	650	1124 0553	0.42
30	20011128	1636	N04 E16	674	Interacting Event	900		0.34
31	20011129	0152	N04 E12	600	Interacting Event	700		0.17
32	20011129	1409	N05 E03	684	1201 1800	750	1201 0439	0.10
33	20011209	0443	N26 E08	839	Interacting Event	650		— 0.23
34	20011210	0940	S25 W19	978	1211 1900	800	1212 0835	— 0.18
35	20011211	0808	N16 E41	940	1214 0000	700	1214 2150	— 0.26
36	20011213	1429	N16 E09	931	Interacting Event	1000		0.07
37	20011214	0856	N06 E100	800	1216 0000	1050	1215 2116	0.31
38	20011226	0502	N08 W54	1500	1228 0900	950	1229 0540	— 0.37
39	20011228	2005	S20 E97	1359	Interacting Event	950		— 0.30
40	20011229	0944	S08 W85	1092	0101 0300	1350	1230 2030	0.24
41	20020103	0221	S11 E12	465	0106 2200	650	0106 1329	0.40
42	20020104	0935	N38 E87	900	0109 2200	900	0109 2225	0.00
43	20020114	0607	S18 W115	1500	0119 0400	1050	0119 1133	— 0.30
44	20020123	1341	N12 E29	562	0123 0900	1350	0125 0838	1.40
48	20020206	0445	S17 W48	457	0206 0600	457	0206 0600	0.00

有 22 个激波到达地球,而 HAF 模型的模拟结果有 27 个激波能够到达地球.其中对第 5,7,22,25,46 个耀斑事件进行模拟(未在表格中列出),预测将有激波到达地球,但是实际上却没有被观测到.从图中可以看出第 1,10,21,32,34,38 和 44 个耀斑事件对应的激波是由 CIR 和耀斑相互作用产生的;而最后一个激波事件是由纯粹的 CIR 产生的;其余的则是由纯粹的耀斑事件产生的.一般来说,由耀斑引发的激波由于其在太阳上出现位置的不同,即使初始激波速度完全相同,激波到达地球所需的时间也不尽

相同,特别是对于那些分别发生在太阳东西两个半球的耀斑其影响可能更明显.Fry 等人通过 68 个激波事件的激波平均传播速度(日地距离除以传播时间)和激波初始速度的比值( $V_{ave}/V_s$ )和耀斑在日面上的经度的对比发现,在大部分的经度初始激波速度都有被高估的趋势,这种趋势在西半球尤为明显<sup>[8]</sup>.因此为了考虑耀斑位置的影响,我们把耀斑分为发生在太阳东半球和西半球两类来进行分析.图 5a 展示的是在西半球爆发的太阳耀斑事件经过上述方法调整激波初始速度后得到的分布图,其中纵

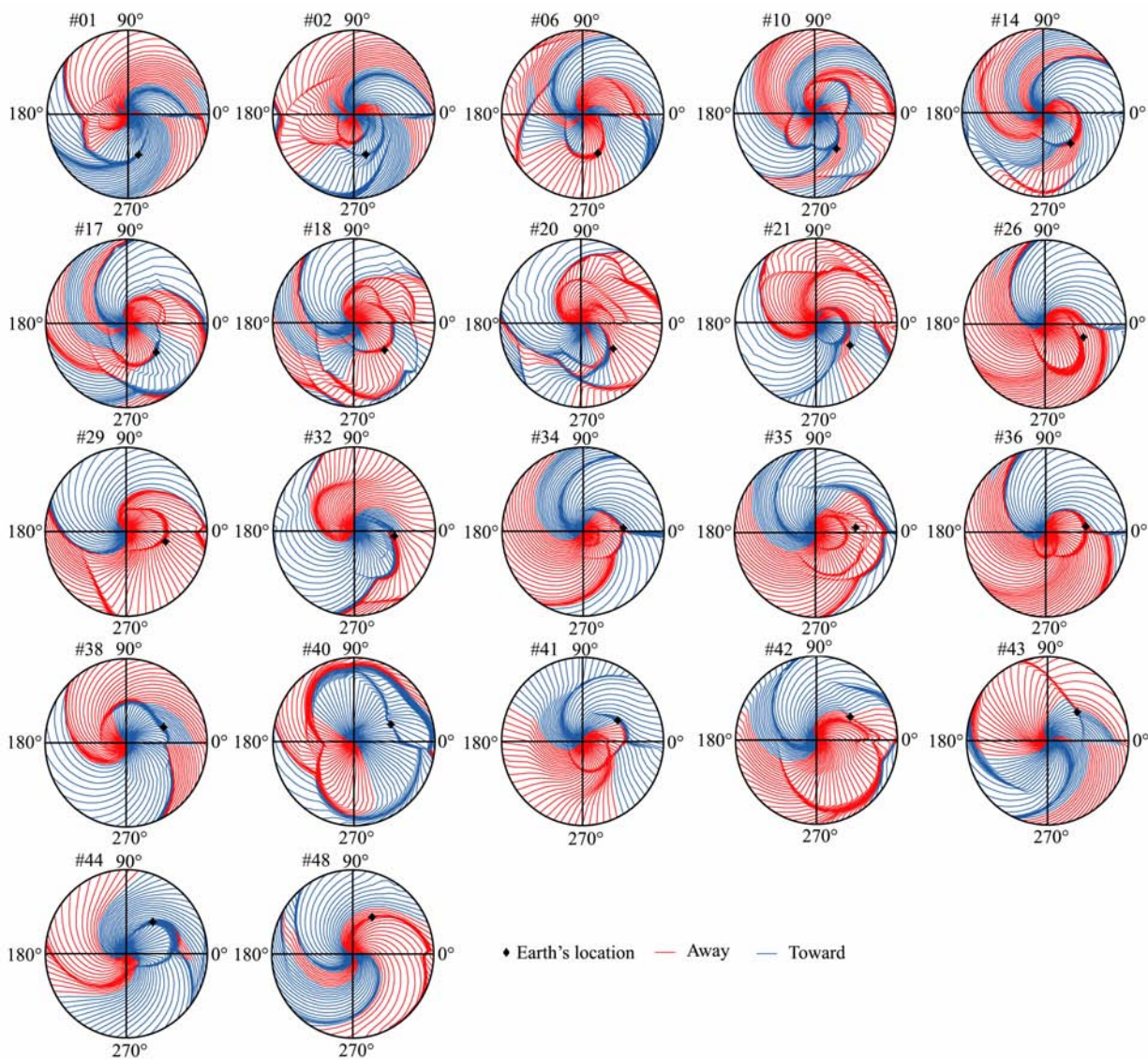


图 4 调整激波初始速度以后 1981 至 1985 卡林顿周的 22 个激波到达地球的黄道面投影图  
 Fig. 4 Shock arrivals at Earth of the 22 shock waves after adjusting the initial shock speed

坐标表示调整因子( $F_w$ ), 横坐标表示未调整前的激波初始速度( $V_s$ ). 利用线性回归方法得到回归方程为:  $F_w = -0.07V_s + 74$ , 相关系数为  $-0.67$ . 当  $V_s = 1057 \text{ km/s}$  时,  $F_w = 0$ . 这意味着对于未调整前的激波初始速度低于  $1057 \text{ km/s}$  的事件, 激波初始速度整体趋势被低估, 而高于  $1057 \text{ km/s}$  的事件整体趋势被高估. 图 5b 展示的是在东半球爆发太阳耀斑事件对应的调整因子( $F_e$ )和激波初始速度的相互关系. 此时的回归方程为:  $F_e = -0.13V_s + 124$ , 相关系数为  $-0.65$ .  $F_e = 0$  时, 给出  $V_s = 954 \text{ km/s}$ . 因此对于东半球爆发的太阳耀斑事件, 未调整前的激波初始速度在低于  $954 \text{ km/s}$  时整体趋势被低估, 而高于  $954 \text{ km/s}$  时整体趋势被高估. 对于东西半球高速激波事件( $V_s > 1000 \text{ km/s}$ )和 Sun 等人<sup>[16]</sup>的结

论是基本一致的.

为了验证以上得到回归方程在改善激波到达时间预测的有效性, 我们利用这两个方程对随后 5 个 (1986~1990) 卡林顿周期期间的太阳耀斑事件所对应的激波初始速度进行修正, 并利用修正前和修正后的激波初始速度分别进行模拟对比. 图 6 给出了相应于 1987 卡林顿的结果. 图中的参数和图 3 一致. 其中图 6a 是利用未调整的激波初始速度的模拟和观测结果的对比, 而图 6b 是激波初始速度经以上回归方程修正后的对比. 可以清楚地看出, 经过对激波初始速度进行修正后, 激波到达时间有较明显的改善. 特别是对于 3 月 18 日激波事件, 平均绝对误差由原来的 18 h 降低为 6 h 左右. 对这 5 个卡林顿周所有事件模拟结果的误差统计分析表明, 对于西半

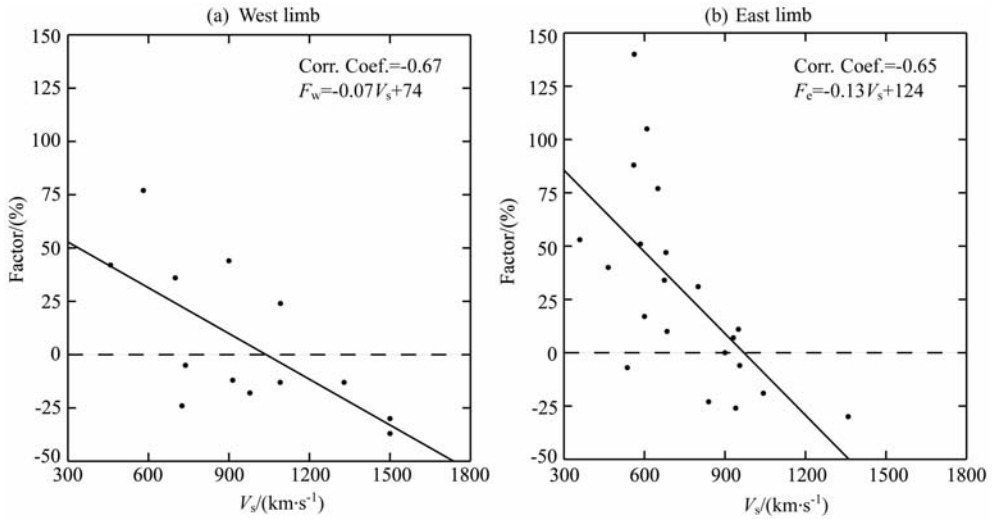


图 5 调整因子 Factor 关于初始激波速度的分布图

(a) 西半球爆发的耀斑事件; (b) 东半球爆发的耀斑事件.

Fig. 5 The distribution of the corrective factors in terms of  $V_s$ .

(a) Solar flares occurred on the western hemisphere; (b) Solar flares occurred on the eastern hemisphere.

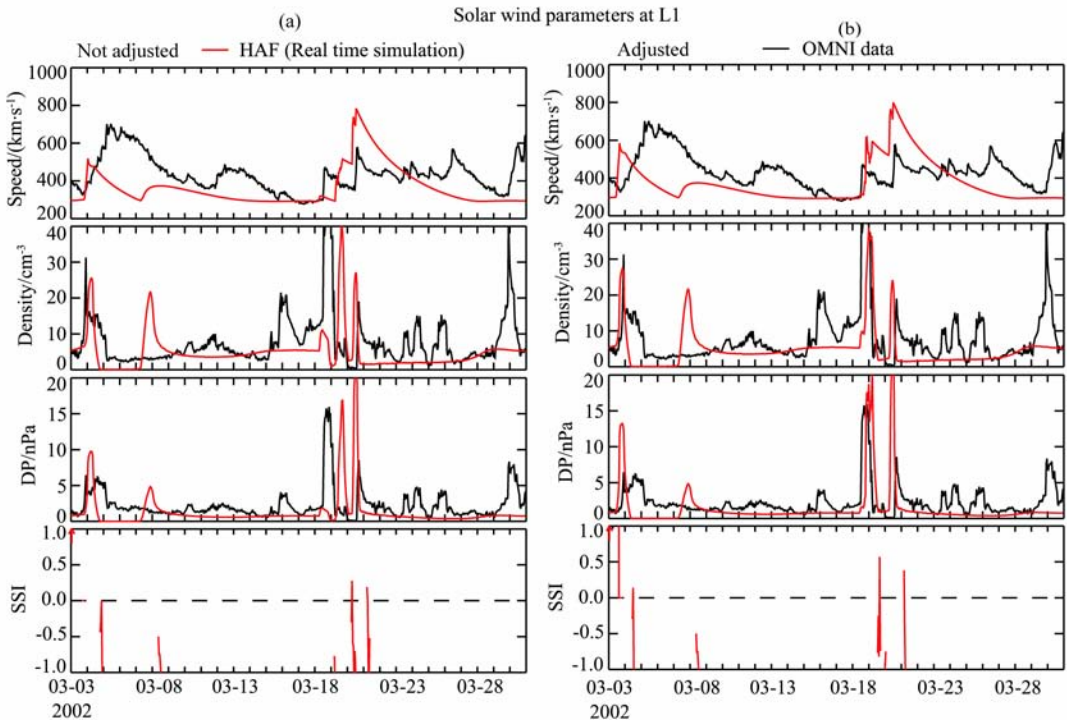


图 6 1987 卡林顿周的模拟结果和观测结果对比

(a) 未调整的激波初始速度的模拟和观测结果对比; (b) 利用统计关系修正后的激波初始速度的模拟和观测结果对比.

Fig. 6 Comparison between simulated results and observations

(a) Simulations before adjustments of the initial shock speed; (b) Simulations after adjustments of the initial shock speed by using the statistical functions.

球的耀斑事件平均绝对误差由未经调整的 16 h 降低到了 12 h 左右,而对于东半球的耀斑事件则由未经调整的 15 h 降低到了 11 h 左右.这说明我们以上所得到的结果对于提高 HAF 模型激波到达时间的预报水平方面是比较有效的.

### 3 结 论

本文利用 HAF 太阳风模型,对 1981 到 1985 卡林顿周的太阳耀斑事件进行模拟,在和卫星实际观测对

比的基础上,对激波初始速度调整可使预测得到的激波到达时间和观测结果很好地吻合.通过对发生在太阳上东西两个半球耀斑爆发引发激波事件到达地球时间模拟结果的统计分析,得到调整因子和激波初始速度的统计关系分别为  $F_w = -0.07V_s + 74$  和  $F_e = -0.13V_s + 124$ .利用这两个关系对 1986 到 1990 卡林顿周的太阳耀斑对应的激波初始速度进行修正,并用修正前后的激波初始速度分别进行模拟检验.所得到的结果和卫星实际观测对比表明,对于位于西半球的耀斑,行星际激波到达地球所需时间的平均误差从 16 h 降低到 12 h,而对于位于东半球的耀斑,行星际激波到达地球所需时间的平均误差从 15 h 降低到 11 h.因此对激波初始速度采用以上的修正可以提高 HAF 对激波到达时间的预报水平.

**致谢** 感谢美国阿拉斯加大学费尔班克斯分校地球物理研究所提供耀斑数据和激波初始速度.感谢 WSO 提供太阳源表面磁场数据.感谢 NASA 戈达德空间飞行中心提供 OMNI 数据.

### 参考文献 (References)

- [1] Gosling J T, McComas D J, Phillips J L, et al. Geomagnetic activity associated with Earth passage of interplanetary shock disturbances and coronal mass ejections. *J. Geophys. Res.*, 1991, **96**(A5): 7831~7839
- [2] Russell C T, McPherron R L, Burton R K. On the cause of geomagnetic storms. *J. Geophys. Res.*, 1974, **79**(7): 1105~1109, doi: 10.1029/JA079i007p01105
- [3] Gonzalez W D, Tsurutani B T. Criteria of interplanetary parameters causing intense magnetic storms ( $Dst < -100$  nT). *Planetary and Space Science*, 1987, **35**(9): 1101~1109
- [4] Gonzalez W D, Tsurutani B T, Gonzalez A L C, et al. Solar wind-magnetosphere coupling during intense magnetic storms (1978~1979). *J. Geophys. Res.*, 1989, **94**(A7): 8835~8851
- [5] 刘绍亮, 李立文. 南向行星际磁场事件与磁暴关系的研究. *地球物理学报*, 2002, **45**(3): 297~305  
Liu S L, Li L W. Study on relationship between southward IMF events and geomagnetic storms. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2002, **45**(3): 297~305
- [6] 刘四清, 魏奉思. 耀斑-行星际激波结构与相应地磁扰动结构间关系的分析(I). *地球物理学报*, 1993, **36**(6): 691~698  
Liu S Q, Wei F S. Structures of flare-interplanetary shock waves and geomagnetic disturbance. *Chinese J. Geophys.* (*Acta Geophysica Sinica*) (in Chinese), 1993, **36**(6): 691~698
- [7] Echer E, Gonzalez W D. Geoeffectiveness of interplanetary shocks, magnetic clouds, sector boundary crossings and their combined occurrence. *Geophys. Res. Lett.*, 2004, **31**: L09808, doi: 10.1029/2003GL019199
- [8] Fry C D, Dry M, Smith Z, et al. Forecasting solar wind structures and shock arrival times using an ensemble of models. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108**(A2): 1070, doi: 10.1029/2002JA009474
- [9] Sun W, Dryer M, Fry C D, et al. Real-time forecasting of ICME shock arrivals at L1 during the "April Fool's Day" epoch: 28 March-21 April 2001. *Ann. Geophys.*, 2002b, **20**(7): 937~945
- [10] Smith Z, Dryer M, Ort E, et al. Performance of interplanetary shock prediction models; STOA and ISPM. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 2000, **62**(14): 1265~1274
- [11] McKenna-Lawlor S M P, Dryer M, Kartalev M D, et al. Near real-time predictions of the arrival at Earth of flare-related shocks during Solar Cycle 23. *J. Geophys. Res.*, 2006, **111**: A11103, doi: 10.1029/2005JA011162
- [12] Smith Z K, Dryer M, McKenna-Lawlor S M P, et al. Operational validation of HAFv2's predictions of interplanetary shock arrivals at Earth; Declining phase of Solar Cycle 23. *J. Geophys. Res.*, 2009, **114**: A05106, doi: 10.1029/2008JA013836
- [13] Yang Z W, Lu Q M, Wang S. The evolution of the electric field at a nonstationary perpendicular shock. *Phys. Plasmas*, 2009, **16**(12): 124502, doi: 10.1063/1.3275788
- [14] Lu Q M, Hu Q, Zank G P. The interaction of Alfvén waves with perpendicular shocks. *Astrophys. J.*, 2009, **706**(1): 687~692
- [15] Yang Z W, Lu Q M, Lembège M B, et al. Shock front nonstationarity and ion acceleration in supercritical perpendicular shocks. *J. Geophys. Res.*, 2009, **114**: A03111, doi: 10.1029/2008JA013785
- [16] Sun W, Dryer M, Fry C D, et al. Evaluation of solar Type II radio burst estimates of initial solar wind shock speed using a kinematic model of the solar wind on the April 2001 solar event swarm. *Geophys. Res. Lett.*, 2002a, **29**(8): 1171, doi: 10.1029/2001GL013659
- [17] Maxwell A, Dryer M. A piston-driven shock in the solar corona. *Space Sci. Rev.*, 1982, **32**: 11
- [18] Smerd S F, Sheridan K V, Stewart R T. Split-band structure in Type II radio bursts from the Sun. *Astrophys. Lett.*, 1975, **16**(1): 23~28
- [19] Smith Z, Dryer M. MHD study of temporal and spatial evolution of simulated interplanetary shocks in the ecliptic plane within 1 AU. *Solar Phys.*, 1990, **129**(2): 387~405
- [20] Dryer M, Smart D F. Dynamical models of coronal transients and interplanetary disturbances. *Adv. Space Res.*, 1984, **4**(7): 291~301
- [21] Smart D F, Shea M A. A simplified model for timing the arrival of solar flare-initiated shocks. *J. Geophys. Res.*, 1985, **90**(A1): 183~190
- [22] Hakamada K, Akasofu S I. Simulation of three-dimensional solar wind disturbances and resulting geomagnetic storms. *Space Sci. Rev.*, 1982, **31**(1): 3~70, doi: 10.1007/BF00349000
- [23] Fry C D. Three-dimensional structure of the heliosphere: Quiet-time and disturbed periods [Ph. D. thesis]. Univ. of Alaska Fairbanks, 1985
- [24] Zhang Y, Sun W, Feng X S, et al. Statistical analysis of corotating interaction regions and their geoeffectiveness during solar cycle 23. *J. Geophys. Res.*, 2008, **113**: A08106, doi: 10.1029/2008JA013095
- [25] Hundhausen A J. *Coronal Expansion and Solar Wind*. Berlin, New York: Springer-Verlag, 1972