0254-6124/2007/27(6)-459-08 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Wang Jing, Feng Xueshang. Prediction method of CME associated geomagnetic disturbances based on fuzzy mathematics. *Chin. J. Space Sci.*, 2007, **27**(6): 459∼466

CME 地磁扰动事件的模糊预报方法 *

王 晶 [1,2] 冯学尚 [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)

摘 要 以 1997—2003 年期间的 73 个日冕物质抛射 (CME) 激波扰动事件和模糊数学为基础, 提出了一种预报地磁扰动的方法. 该方法以 CME 事件爆发的日面经纬度、相关地磁扰动事件的渡越时间、地磁扰动指数、IPS 观测的太阳风速度跃变量为基础, 建立了预报 CME 地磁扰动事件的 μ_θ, μ_ϕ, μ_T, μ_M, $\mu_{\Delta v}$ 从属函数, 考虑了 CME 初始速度对激波到达时间的影响. 以这 5 个从属函数为基础并利用模糊数学对 1996—2004 年期间 73 个经行星际闪烁 (IPS) 观测认证的 CME 激波引起的地磁扰动事件进行了预报实验. 实验结果表明, 磁扰开始时间预报的相对误差, $\Delta T_{\rm pre}/T_{\rm obs} \leqslant 30\%$ 的事件占总事件数的 91.78%, 而 $\Delta T_{\rm pre}/T_{\rm obs} > 30\%$ 的事件占总事件数的 12.33%; 磁扰幅度 ($\sum Kp$) 大小的预报, 其相对误差 $\Delta\sum Kp/\sum Kp_{\rm obs} \leqslant 30\%$ 的事件占总事件数的 60.27%, 相对误差 $\geqslant 50\%$ 的事件占总事件数的 12.33%. 这表明该预报方法对空间灾害性事件地磁扰动的定量预报具有很大应用潜力.

关键词 地磁扰动; 从属函数; CME

中图法分类号 P353

Prediction Method of CME Associated Geomagnetic Disturbances Based on Fuzzy Mathematics

WANG Jing[1,2] FENG Xueshang[1]

[1](*State Key Laboratory of Space Weather, Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100080)

[2](*Graduate University of Chinese Academy of Sciences*)

Abstract Based on the 73 geomagnetic disturbance events caused by coronal mass ejection (CME) associated with interplanetary shock waves and using fuzzy mathematics, here is presented a prediction method for geomagnetic disturbances. According to the solar location of CME, the transit time of the interplanetary disturbance, the geomagnetic disturbance magnitude and the velocity jump observed by IPS at the disturbed front, five membership functions μ_θ, μ_ϕ, μ_T, μ_M, $\mu_{\Delta v}$ are constituted. Based on the five membership functions and fuzzy mathematics, prediction tests for the 73 CME associated geomagnetic disturbance events during 1996—2004 are made by considering the influence of CME velocity on the onset time of geomagnetic disturbances. Main results are: (1) For the prediction of the magnetic disturbance onset time, 91.78% is within the range of relative error $\Delta T_{\rm pre}/T_{\rm obs} \leqslant 30\%$ and 12.33% within $\Delta T_{\rm pre}/T_{\rm obs} \geqslant 30\%$; (2) For the prediction of the geomagnetic disturbance amplitudes, 60.27% is within the range of relative error $\Delta\sum Kp/\sum Kp_{\rm obs} \leqslant 30\%$ and

* 国家自然科学基金项目 (40523006, 40336053, 40536029) 和国家 973 计划 (2006CB806304) 共同资助

2007-03-20 收到原稿, 2007-07-03 收到修定稿

12.33% within $\Delta\sum Kp/\sum Kp_{\rm obs} \geqslant 50\%$. These results show that the prediction method has good feasibility for geomagnetic disturbance prediction.

Key words Geomagnetic disturbances, Membership function, CME

1 引言

在 20 世纪 60 年代末到 70 年代初, 通过美国海军实验室 OSO-7 卫星的日冕观测仪和 Skylab 飞船对太阳日冕连续的跟踪观测, 证实了被称为日冕物质抛射 (CME) 的太阳日冕瞬时抛射物质是太阳活动的一种普遍现象. 随后通过 SOLWIND 、SMM 日冕观测仪及最近的 SOHO 卫星上的观测仪对 CME 的跟踪观测已经确定了日冕物质抛射的基本特征. CME 的质量一般在 $10^{15} \sim 10^{16}$g, 其边缘 (大概离太阳表面 5 个太阳半径以内) 速度可以达到小于 50 km/s 和大于 2000 km/s[1]. CME 的出现率与太阳活动及其他太阳物理现象有密切的关系, 在太阳活动低年, 整个太阳上 CME 的出现率约每天 0.2 次, 且主要出现在磁赤道附近的低日球层纬度处; 而在太阳活动高年平均可达每天 3.5 次, 并可延伸到高纬度区域 [2].

在发现日冕物质抛射 (CME) 现象之前, 许多研究者认为, 大的非重现性地磁暴、行星际激波和行星际空间中的高能粒子事件与大的太阳耀斑是紧密联系的, 即太阳耀斑是这些事件的基本原因, 但是 Gosling[3] 在总结了大约 20 年的 CME 研究后认为, 太阳不断演化的磁结构是这些事件的主要原因. 现在普遍认为大的非重现地磁暴是由 CME 驱动的激波引起的, 与太阳风扰动相关的磁云也是由 CME 驱动的激波引起的 [4].

长期以来人们在数值预报、统计预报等方面做了大量的工作[5]~[9], 但预报的准确度仍与实际需求有较大的距离. 主要原因是, 作为一个科学基础研究问题, 其包括了太阳爆发源、太阳风暴的结构和在行星际中的传播过程以及它们与地球磁层的相互作用. 因此, 地磁扰动的预报应该以对发生在太阳-行星际-地球这一系统链的物理过程的科学理解为基础. 目前, 地磁强度的预报方法有很多, 其中 Wu[10] 等给出了利用磁云内部太阳风参数来预报地磁暴强度的经验公式: $Dst_{\min} = 0.83 + 7.85B_{z_{\min}}$ (B_z 为行星际磁场南向分量) 以及 $Dst_{\min} = -16.48 - 12.89 \times (vB_z)_{\max}$ (v 为太阳风速度) 用这两个公式预报由磁云产生的地磁暴强度, 其相对误差小于 10%. Gonzalez 等 [11] 从公式 $\mathrm{d}Dst/\mathrm{d}t = Q(t) - Dst/\tau$ (其中, $Q(t)$ 为太阳风能量输入函数, τ 为衰减时间) 出发, 经过一系列近似和简化, 得到一个由 halo CME 的膨胀速度来预报行星际磁云产生地磁暴 Dst 指数峰值的公式: $Dst_{\min} = 5.2 \times 10^{-4}(0.22v_{\rm e} + 340)^2$ ($v_{\rm e}$ 为 halo CME 的膨胀速度), 并将此公式运用于 13 个 halo CME 事件, 得到相关系数 0.81. Zhao 等 [12] 给出了利用 CME 投影速度在电流片磁坐标下研究预报地磁暴强度 $Dst_{\min}$ 的方法, 这里考虑到地磁响应存在同异侧效应, 对同侧和异侧事件分别处理. 该方法对于中等磁暴和强磁暴的预报准确率较高. 预报激波到达时间模型主要有两种, 即经验模型和物理基础的传播模型. Manoharan 等 [13] 通过对 1997—2002 年期间发生的 91 个 CME-IP 激波事件的研究, 得到了一个激波渡越时间与 CME 初始速度的经验关系式, $T_{\rm shock} = 3.9 - 2 \times 10^{-3}v_{\rm CME} + 3.6 \times 10^{-7}v_{\rm CME}^2$ (这里称为 CME-IP 模型). 物理模型有 STOA, STOA-2, ISPM, HAFV.2 模型, 这些模型都是用来预报激波渡越时间的 [14]~[19]. STOA 和 STOA-2 模型是以爆炸波理论为基础的, 并且只预报激波到达时间. ISPM 模型是基于 2.5 维 MHD 数值模拟研究激波参数的模型. HAFV.2 模型稍微复杂一点, 其不仅预报激波到达时间, 还预报了行星际磁场分量和激波的强度以及太阳风的速度、密度、磁场和动力压. 所有这些模型都是需要输入参数来预报的. Feng 等 [20] 提出了一种能够预报激波到达时间的激波传播模型 SPM 模型, 此模型关于激波到达时间的预报结果与国际流行预报模型 STOA, ISPM 和 HAFV.2 模型的结果很一致, 此模型具有很好的现实可行性. ISF[21]~[24] 方法以 IPS 数据观测为基础, 综合行星际扰动过程的物理基础和模糊数学中从属函数基础, 并进一步对研究事件的每一个射电源的最佳贴近度进行搜寻并考虑行星际磁场南北向分量的影响, 对于地磁扰动的预报有很好的效果.

IPS 是射电源闪烁的名称, 它是射电信号与太阳风相互作用的结果. 当射电波在太阳风中传播时, 等离子体的不规则结构造成射电波的振幅和相位的

变化, 相位和振幅的变化可以与太阳风密度的变化相对应. 如果通过星空对几百个信号源进行观测, 能构造出一个天平面, 通过对这个天平面不断的观测就可看到闪烁活动的变化, 因此就能知道 CME 的行进情况. 通过 IPS 观测还可以构造出 2 维太阳风速度图, 进而研究太阳的活动 [25],[26]. IPS 观测能够提供 ICME 的速度变化, 了解它们的 3 维传播特征及其与电流片的关系 [27]. IPS 观测还能用来检测太阳风到达地球时的扰动情况, 进而预报地磁暴 [28]. 一般在 IPS 观测到激波扰动的当天或几天后就会相应地观测到地磁扰动的发生. 以 IPS 观测为基础的预测要求有大量的相关扰动事件作为研究基础, 而 IPS 观测记录到的扰动不一定是与 CME 相关的激波引起的, 实际上并没有明确的标准和模式, 由于 IPS 观测本身的局限性, 空间传播条件的复杂多变性以及激波本身结构诸多方面的复杂性等, 使 IPS 激波观测和认证存在一定的模糊性.

地磁扰动变化是太阳活动、行星际扰动以及地球系统本身的多种不确定性复杂因素综合作用的结果, 这就使研究的对象常具有一定的模糊性, 为运用模糊数学方法来预报地磁扰动提供了物理基础. 本文建立了预报 CME 地磁扰动事件的 5 个从属函数, 考虑了 CME 初始速度对激波到达时间的影响并在 Wei 等 [21]~[24] 工作的基础上利用模糊数学方法对 1997—2003 年期间 73 个经行星际闪烁观测认证的 CME 激波引起的地磁扰动事件进行了预报实验, 结果还是比较可信的.

2 从属函数的建立

地磁扰动的预报在空间天气预报中占有重要地位, 但是由于观测的不完善性和对太阳 - 行星际 - 地磁链了解的不完全性使地磁扰动预报质量不高. IPS 观测有助于了解太阳风的演化和 3 维结构, 并有助于发展一种新的预报方法 [28]~[31]. IPS 观测能够提供行星际扰动的 3 维图像并能提前预测出扰动是否沿地球方向传播 [32]. 然而 IPS 观测存在一定的局限性, 即激波面速度跃变量和渡越时间的不确定性. 但是当用模糊数学中的贴近度来挑选射电源时, 地磁预报的不确定性会降低. 由于太阳风暴源头的多样性、行星际扰动和传播条件的复杂性及行星际闪烁观测本身的局限性, 使得太阳风暴的认证具有一定的模糊性. 这样就可用不同的模糊集 $A=(\mu_T,\mu_M,\mu_\theta,\mu_\phi,\mu_{\Delta v})$ 来描述. 其中, μ_T, μ_M, μ_θ, μ_ϕ, $\mu_{\Delta v}$ 是由观测数据确定的 5 个从属函数. 下标 T 为激波从太阳传播到地球处的渡越时间, M 为地磁扰动幅度, θ 为 CME 的纬度, ϕ 为 CME 的经度, Δv 为激波面前后介质速度的跃变量 $v-v_0$. 从属函数一般不是纯数学的结果, 通常是根据作者对所研究问题的认识, 以经验为先导而设计出来的, 通过实践运用而不断完善. 为了使设计更反映实际情况, 我们将对 1997—2003 年 73 个 CME 激波事件的 T, $\sum Kp$, Δv, θ, ϕ 的数据作出直方图, 以此为基础具体分析. 其中 θ 和 ϕ 来源于文献 [33], 磁扰数据 $\sum Kp$ 取值为扰动到达地球后每隔 3 h 的连续 8 个 Kp 值之和. 选取事件的主要参考为: IPS 速度观测连续有 3~4 天以上的数据, IPS 速度突然增加 $\geqslant 50$ km/s, 射电源离太阳距离 $\leqslant 0.8$ AU. 数据日面分布如图 1 所示.

从图 1 中可以看到, 引起地磁暴的大部分 CME 事件的日面活动源的纬度都起源于日核中心 30° 左右, 并且起源西部的 CME 事件要多于东部. 该样本具有通常意义下 CME 在日面上的分布特征, 因此该样本组具有普遍意义.

从图 2 和图 3 可以看出, T 和 $\sum Kp$ 本身就具有从属程度的含义, 这时利用最小二乘法原理对观测数据进行最佳拟和并作归一化处理, 就可得到

$$\mu_T = -3.468\times10^{-4}\,T^2+0.039T-0.097,$$
$$\mu_M = \frac{1}{380}\Big(\sum Kp\Big)^{2.859}\mathrm{e}^{-0.132\sum Kp}.$$

图 4 和图 5 展示了事件的日面纬度和经度分布. 根据 CME 激波传播的 3 维统计平均特性, 传播最快的方向将在 15°N, 10°W 附近, 因而设计从属函数相对于法线是不对称的并且极值点在 15°N, 10°W 附近. 根据它们的从属性并根据最小二乘法初步设计确定的从属函数如下:

$$\mu_\theta = \mathrm{e}^{-(\frac{0.1}{180})\times(\theta-15)^2},$$
$$\mu_\phi = \mathrm{e}^{-(\frac{0.1}{360})\times(\phi-10)^2}.$$

而 Δv 则不能直接采用频数分布来得到其从属函数, 需要分析其物理意义, 激波面前后的速度跃变量 Δv 代表激波强弱, Δv 越大激波强度越大.

太阳风中除激波一类扰动现象外, 通常的扰动其速度跃变量一般较小, 为了选出激波和排除非激波扰动的影响, 将设计其从属函数 $\mu_{\Delta v}$ 随 Δv 增大而增大. 考虑到图 6 中当 $\Delta v<50$ km/s 时, 尚有事

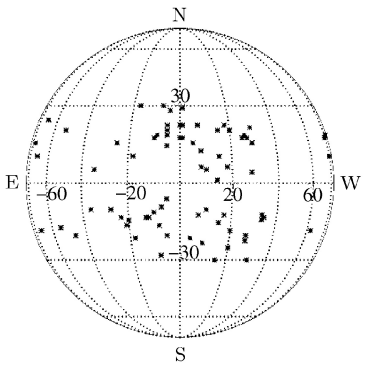


图 1 CME 事件日面分布
(∗ 为 CME 事件的日面源位置)
Fig.1 Distributions of CME events on the solar surface
(∗ is the location of CME)

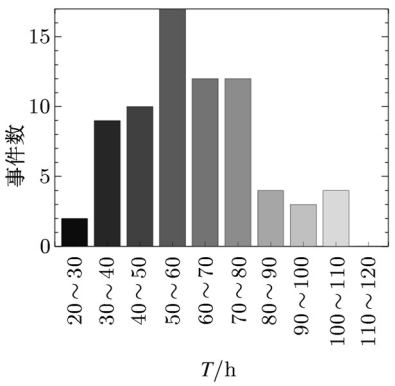


图 2 T 的频次分布
Fig.2 Frequency distribution of T

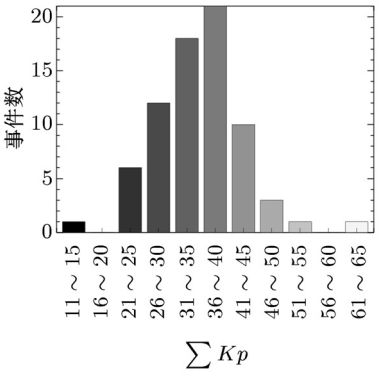


图 3 $\sum Kp$ 频次分布
Fig.3 Frequency distribution of $\sum Kp$

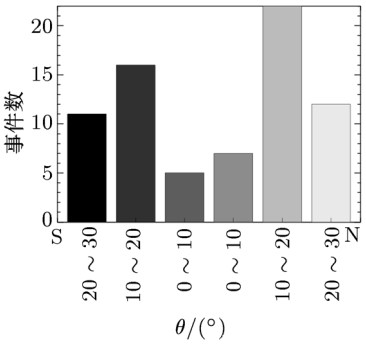


图 4 纬度频次分布
Fig.4 Frequency distribution of solar latitude

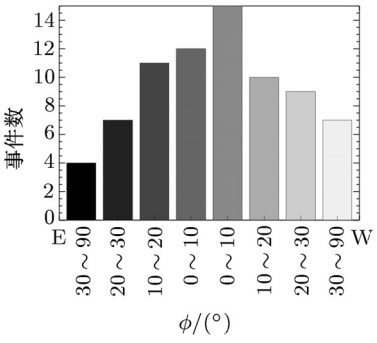


图 5 经度频次分布
Fig.5 Frequency distribution of solar longitude

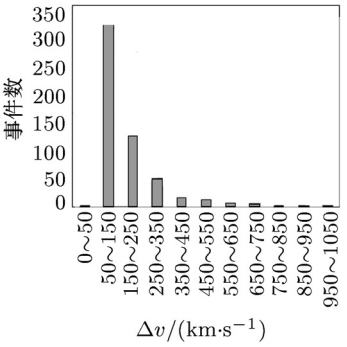


图 6 IPS 观测速度跃变量
Fig.6 Distribution of the velocity jump observed by IPS

件存在, 但其模糊度太大, 而设计 $\mu_{\Delta v}$ 取 0.2 以下值, 只有当 Δv 大于声速 (50 km/s) 时, $\mu_{\Delta v}$ 才取较为有意义的值, 所以设计 $\mu_{\Delta v} = 0.5$. 最后设计从属函数如下:

$$\mu_{\Delta v} = \frac{1}{1 + \left(\frac{50}{\Delta v}\right)^2 \Big/ R}.$$

3 分析与讨论

3.1 从属函数特性分析

根据实际观测数据设计确定的 5 个从属函数, 能够比较好地描述 CME 激波的基本特征, 5 个从属函数之间是相互制约和补充的. 这 5 个从属函数曲线如图 7~11 所示.

从图 7 中可以看出激波传播到地球的最可几时间为 56.18 h, μ_T 取最大值 1. μ_T-T 曲线相对于 56.18 h 大致对称, 这意味着传播太快与传播太慢的激波都具有相近的 μ_T 值, 从属于激波的程度是一致的.

从图 8 中可以看出, μ_M 在 $\sum Kp$ 为 20 ~ 25 时具有接近于 1 的值, 这表示 $\sum Kp \approx 20$ 代表 CME 激波引起的最可几 $\sum Kp$ 指数扰动值. 曲线相对于峰值 $\sum Kp$ 为 20 ~ 25 时呈非对称分布是十分明显的. 在 $\sum Kp < 20$ 时, 随着 $\sum Kp$ 指数的减小 μ_M 值下降很快, 这相对于太阳风扰动很小的情况, 这时, 由其他扰动引起的地磁扰动的可能性自然是很大的, 其从属程度下降很快也是合理的; 当 $\sum Kp > 25$ 时, 随着 $\sum Kp$ 增大 μ_M 下降, 地磁扰

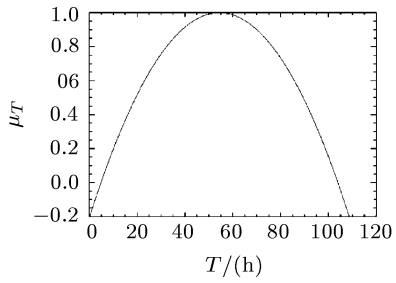


图 7 μ_T 从属函数曲线
Fig.7 Curve of μ_T

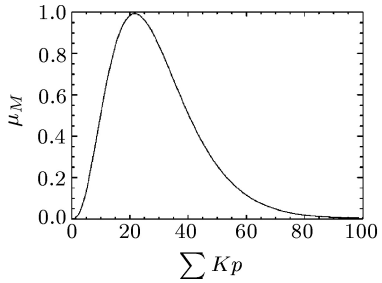


图 8 μ_M 从属函数曲线
Fig.8 Curve of μ_M

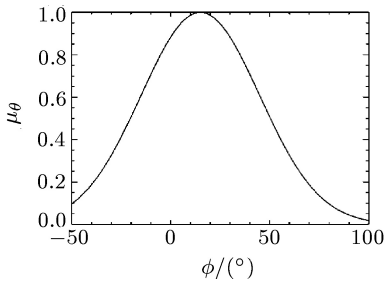


图 9 μ_θ 从属函数曲线
Fig.9 Curve of μ_θ

动由大的 CME 激波所引起的可能性较其他原因所引起的可能性要大得多, 因而对较大范围内大的地磁扰动赋予较大的 $\sum Kp$ 是合理的.

μ_θ 是一条峰值取在纬度 $\theta = 15°$ 附近其左右两端下降较陡的曲线. 这是根据 CME 的频次分布即北纬 15° 分布频次最高, 同日球电流片离开 CME 方向向南倾约 15° 的统计结果很一致而设计的 [34].

图 10 所示的 μ_ϕ 是一条峰值在西经 0° ~ 10° 范围且西端略高于东端的缓变曲线. 这样设计是考虑到 CME 经度 ϕ 的频次西端略高于东端的非对称分布以及 CME 在日面西边 0° ~ 10° 范围所引起的

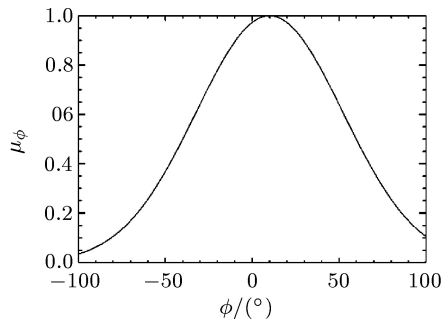


图 10 μ_ϕ 从属函数曲线
Fig.10 Curve of μ_θ

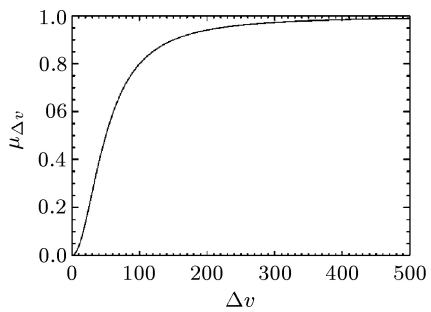


图 11 $\mu_{\Delta v}$ 从属函数曲线
Fig.11 Curve of $\mu_{\Delta v}$

激波能较快传播到地球且引起较大地磁扰动的非对称传播特性.

$\mu_{\Delta v}$-Δv 是一条随速度跃变值 Δv 增大而增加且逐渐平缓的曲线 (见图 11). 考虑到激波的超声流要求, 设计 $\Delta v = 50\,\mathrm{km/s}$ 附近其 $\mu_{\Delta v} = 0.5$. Δv 越大, 扰动事件是激波的可能性也就越大, $\mu_{\Delta v}$ 也取较大的值. 这样设计的 $\mu_{\Delta v}$ 使传播很快的大 CME 激波不会因 $\mu_{\Delta v}$ 较小而被证认掉.

3.2 CME 初始速度对渡越时间的影响

根据上述 5 个从属函数, 在 Wei 等的工作基础上, 可以根据最大贴近度来挑选最佳射电源. 根据太阳活动观测和 IPS 观测, 采用爆炸波在变密度及运动介质模型来确定太阳风暴到达地球的时间和能量, 地磁扰动指数是由太阳风暴能量和相关地磁扰动的统计关系确定的 [27]. 这样我们对 1997—2003 年期间的 73 个 IPS 认证的 CME 激波引起的地磁扰动事件进行预报, 做出了 CME 初始速度与磁扰开始时间观测值及预报值之间的拟和图 (见图 12).

图 12 中实线是磁扰开始时间的观测值与 CME 初始速度的拟和曲线, 虚线是磁扰开始时间预报值与 CME 初始速度的拟和曲线, 从图 12 可以看到, 当速度接近 2500 km/s 时两条曲线能很好地复合, 在低速和高速激波事件中, 预报值都小于观测值. 从拟和方程中可以找到对磁扰开始时间修正项的系数, 修正项的表达式为

$$\Delta T = 39.6092 - 0.0389765 v_{\mathrm{CME}} + 9.66966 \times 10^{-6} v_{\mathrm{CME}}^2 .$$

将这个修正项加入到爆炸波在变密度及运动介质模型中的能量时间方程中 [35], 就得到了如下新的能量时间方程:

$$T_{\mathrm{s}} = \frac{J}{v_0}\left\{4\lambda_1\{R + 2E_0[1 - \ln(R + 2E_0)]\} + \right.$$

$$2X^{1/2}-\frac{\left(16\lambda_1^2+\frac{1}{J}\right)E_0}{\left(4\lambda_1^2+\frac{1}{2J}\right)^{1/2}}\cdot$$
$$\ln\left[X^{1/2}+(R+2E_0)\left(4\lambda_1^2+\frac{1}{2J}\right)^{1/2}+\frac{\left(16\lambda_1^2+\frac{1}{J}\right)E_0}{2\left(4\lambda_1^2+\frac{1}{2J}\right)^{1/2}}\right]-8\lambda_1E_0\cdot$$
$$\ln\left(\frac{X^{1/2}+4\lambda_1E_0}{R+2E_0}-\frac{16\lambda_1^2+\frac{1}{J}}{8\lambda_1}\right)\Bigg\}+T_0+\Delta T.$$

其中, $X^{1/2}=\left[\left(\frac{E_0}{AV_0^2}\right)\frac{R}{J}+\left(4\lambda_1^2+\frac{1}{2J}\right)R^2\right]^{1/2}$,

$E_0=\frac{E_{\rm s}}{AU_0^2}$, $J=\frac{3}{8}$, $\lambda_1=-0.1808$, $A=300\,{\rm kg/m}$.

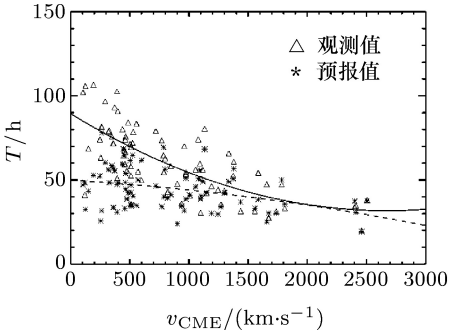


图 12 CME 初始速度与磁扰开始时间的关系

Fig.12 Initial velocity of CME vs the observational value and predicted value of onset time of geomagnetic disturbances

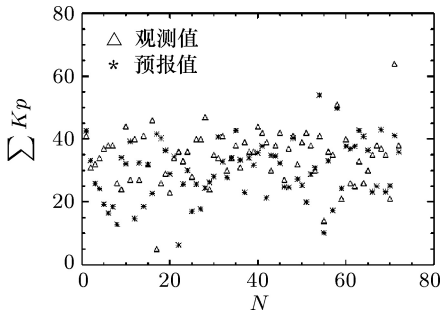


图 13 磁扰指数预报结果

Fig.13 Results of prediction tests for geomagnetic disturbance amplitude

4 预报结果

4.1 地磁扰动幅度大小

根据上述方法并利用修正后的能量时间方程, 我们对 1997—2003 年期间 73 个 IPS 认证的 CME 激波引起的地磁扰动事件进行了预报实验, 磁扰幅度 $\sum Kp$ 指数预报结果如图 13 和图 14 所示.

预报结果如下: 相对误差 $\Delta\sum Kp/\sum Kp_{\rm obs}$ 在 10% 范围内的事件为 18 个, 占总事件数的 24.66%; 相对误差在 10%~30% 范围的事件有 44 个, 占总事件数的 60.27%; 相对误差在 30%~50% 范围的事件有 20 个, 占总事件数的 27.40%, 相对误差大于 50% 的事件有 9 个, 占总事件数的 12.33%.

4.2 地磁扰动开始时间

从太阳活动开始到地磁扰动发生的这段时间称

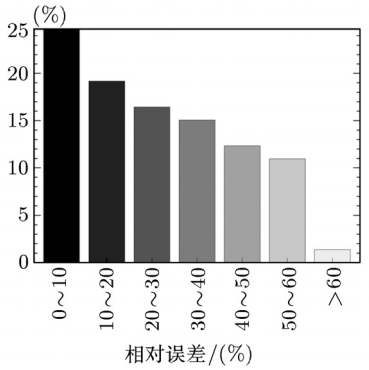


图 14 磁扰指数误差百分比

Fig.14 Percent, with various magnitude errors $\Delta\sum Kp/\sum Kp_{\rm obs}$ for predicting magnitude of geomagnetic disturbances

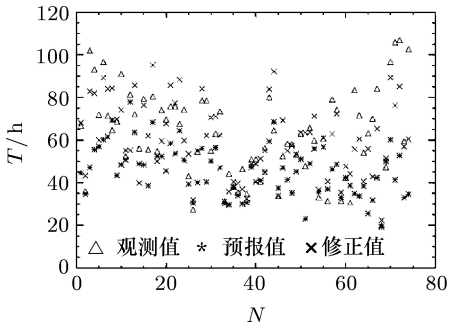


图 15 磁扰开始时间预报结果

Fig.15 Results of the prediction tests for the onset time

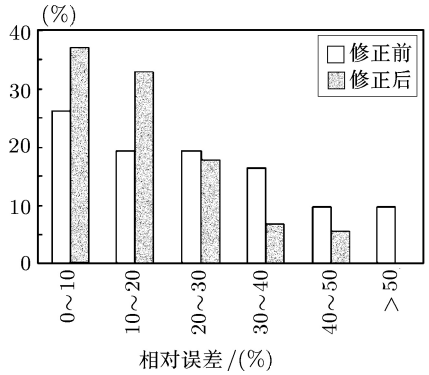


图 16 修正前后的相对误差

Fig.16 Relative errors, $\Delta T_{\rm pre}/T_{\rm obs}$, before and after modified for predicting magnitude of the geomagnetic disturbances

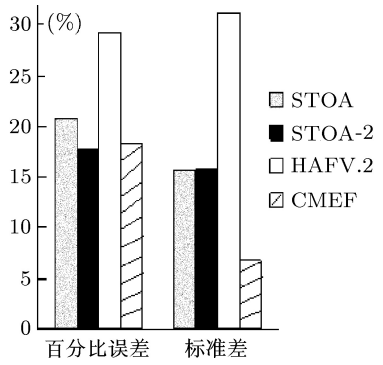


图 17 预报模式结果比较

Fig.17 Compare of prediction results

为磁扰开始时间, 它的观测值与预报值 (修正后) 的比较和误差百分比如图 15 和图 16 所示.

预报结果显示, 修正前相对误差 $\Delta T_{\rm pre}/T_{\rm obs}$ 在 10% 范围内的事件占总事件数的 26.77%; 在 10%~20% 范围内的占 19.18%; 在 20%~30% 范围内的占 19.18%; 在 30%~40% 范围内的事件占 16.44%; 在 40%~50% 范围内的事件占 9.58%; >50% 的有 7 个, 占总事件数的 9.58%. 修正后, 相对误差在 10% 范围内的事件占总事件数的 36.99%; 在 10%~20% 范围内的事件占 32.88%; 在 20%~30% 范围内的事件占 17.18%; 在 30%~40% 范围内的事件占 6.85%; 在 40%~50% 范围内的事件占 5.48%; 而 > 50% 的事件为 0.

4.3 与其他预报模型的对比

为进一步检验得到的预报模型 (简称 CMEF 模型) 的有效性, 需要将其预报效果与其他预报模式的预测效果进行比较. 这里选出了比较典型的 9 次 CME 地磁扰动事件与模型 STOA, STOA-2, HAFV.2 的预测结果 [36] 进行比较, 这 4 种预测方法的预报结果如图 17 所示.

从 4 种模型的百分比误差来看, 我们的预报模型相对于 STOA 和 HAFV.2 较小, 但是相对于 STOA-2 偏大一些. 从标准差来看, 我们的预报模型相对于其他 3 种模型为最小. 通过比较可以看出, 我们的预报方法与其他经验预报模型相比, 在预报精度上都是有可比性的.

5 讨论

根据 1997—2003 年期间 73 个 CME 地磁扰动事件构造了 5 个从属函数, 并考虑了 CME 初始速度对磁扰开始时间的影响, 利用模糊数学方法对事件进行预报, 效果较好, 但有如下问题尚待改进.

(1) IPS 观测是在每天的中天时间观测一次, 这样无形就给观测带来了一定的误差, 如果 IPS 观测每天能跟踪观测几个小时, 那么以此为基础的空间天气预报将得到很大的改善.

(2) 考虑行星际磁场南向分量的影响.

(3) 如果我们根据不同类型的磁扰事件建立不同的从属函数, 这样预报的效果会更好.

致谢 中国科学院空间科学与应用研究中心魏奉思院士对本工作进行了指导, 日本名古屋大学提供了 IPS 观测数据.

参考文献

[1] Hundhausen A J, Burkepile J T, Cyr Q C. Speeds of coronal mass ejection: SMM observations from 1980 and 1984—1989. *J. Geophys. Res.*, 1994, **99**:6543~6552

[2] Webb D F, Howard R A. The solar cycle variation of coronal mass ejections and the solar wind mass flux. *J. Geophys. Res.*, 1994, **99**:4201~4220

[3] Gosling J T. The solar flare myth. *J. Geophys. Res.*, 1993, **98**:937~950

[4] Burlaga L F, Behannon K W, Klein L W. Compound stream, magnetic clouds, and major geomagnetic storms. *J. Geophys. Res.*, 1987, **92**:5725~5734

[5] Gapper G R *et al.* Observing interplanetary disturbances form the ground. *Nature*, 1982, **296**:633~636

[6] Joselyn J A. Geomagnetic activity forecasting: The state of the art. *Rev. Geophys.*, 1995, **33**:383~401

[7] Kamide Y, Mcpherron R L, Gonzalez W D, Hamilton D C. Magnetic storms: Current understanding and outstanding questions. *Geophys Monog.*, 1997, **98**:77~87

[8] Thomas R D, Dimitris V. Review of techniques for magnetic storm forecasting. *Geophys Monog.*, 1997, **98**:253~266

[9] Dryer M. Propagation of disturbances between the sun and the magnetosphere. *Space Sci. Rev.*, 1994, **67**:363~419

[10] Wu C C, Lepping R P. Relationships for predicting magnetic cloud-associated geomagnetic storms intensity. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 2004, **67**:283~291

[11] Gonzalez W D *et al.* Prediction of peak-*Dst* from halo CME/magnetic cloud speed observations. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 2004, **66**:161~165

[12] Zhao X H, Feng X S. A tentative study for the prediction of the CME related geomagnetic storm intensity and its transit time. *Sci. China* (*E*), 2005, **48**:648~668

[13] 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**:A06109, doi:10.1029/2003JA010300

[14] Dryer M, Smart D F. Dynamical models of coronal transients and interplanetary disturbances. *Adv. Space Res.*, 1984, **4**:291~301

[15] Fry C D *et al.* Improvements to the HAF solar wind model for space weather predictions. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**(A10):20 985~21 002

[16] Fry C D, Dryer M, Deehr C S, Sun W, Akasofu S I, Smith Z. Forecasting solar wind structures and shock arrival times using an ensemble of models. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108**:1070~1089

[17] Hakamada K, Akasofu S I. Simulation of three-dimensional solar wind disturbance and resulting geomagnetic storms. *Space. Sci. Rev.*, 1982, **31**(3):63~70

[18] Moon Y J, Dryer M, Smith Z, Park Y D, Cho K S. Role of Indian ocean warming in the development of Philippine sea anticyclone during ENSO. *Geophys. Res.*, 2002, **29**(10):1161~1164

[19] Smith Z, Dryer M, Ort E, Murtagh W. Performance of interplanetary shock prediction models: STOA and ISPM. *J. Atmos. Solar Terr. Phys.*, 2000, **62**:1265~1274

[20] Feng X S, Zhao X H. A new Prediction Method for the Arrival Time of Interplanetary Shocks. *Solar Phys.*, 2006, **238**:167~186

[21] Wei Fengsi, Cai Hongchang. Primary application of the membership functions in the geomagnetic disturbance predictions. *Chin. J. Space Sci.*, 1990, **10**:35~41. in Chinese (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**:35~41)

[22] Wei F S, Xu Y, Feng X S, Fan Q L. Prediction tests by using "ISF" method for the geomagnetic disturbances. *Sci. China* (*E*), 2002, **45**:525~530

[23] Wei F S, Cai H C, Feng X S, Shi J K. A prediction method of geomagnetic disturbances based on IPS observations-dynamics fuzzy mathematics. *Adv. Space Res.*, 2003, **31**:1069~1073

[24] Wei F S, Feng X S, Xu Y, Fan Q L. Prediction tests by using "ISF" method for geomagnetic disturbances. *Adv. Space Res.*, 2005, **36**:2363~2367

[25] Canals A, Breen A R, Ofman L, Fallows R A. Estimating random transverse velocities in the fast solar wind from EISCAT interplanetary scintillation measurements. *Ann. Geophys.*, 2002, **20**:1265~1277

[26] Rappoport S A, Hick P P, Jackson B V. Coronal mass ejections identified in Interplanetary Scintillation (IPS) tomography and in LASCO coronagraph images. *Bull. Ame. Astron. Soc.*, 2002, **34**:242~250

[27] Wei F S, Dryer M. Propagation of solar flare associated interplanetary shock waves in the heliospheric meridianal plane. *Solar Phys.*, 1991, **132**:373~394

[28] Wei Fengsi. Preliminary results of predicting geomagnetic storms by using IPS observation. *Chin. J. Geophys.*, 1984, **27**:417~423. in Chinese (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**:417~423)

[29] Pinter S. Experimental study of flare-generated collisionless interplanetary shock wave propagation. *Space Sci. Rev.*, 1982, **32**:145~168

[30] Kojima M, Kakinuma T J. Solar cycle evolution of solar wind speed structure between 1973 and 1985 observed with the interplanetary scintillation method. *J. Geophys. Res.*, 1987, **92**:7269~7279

[31] Watanabe T, Schwenn R. Large-scale propagation properties of interplanetary disturbances revealed from IPS and spacecraft observations. *Space Sci. Rev.*, 1989, **51**:147~153

[32] Xie Y Q, Wei F S, Feng X S. Prediction test for the two extremely strong solar storms in October 2003. *Solar Phys.*, 2006, **234**:363~377

[33] Gopalswamy N, Lara A, Yashiro S *et al.* Predicting the 1-AU arrival times of coronal mass ejections. *J. Geophys. Res.*, 2001, 106, **29**:207~217

[34] Wei F S. Statistical study on the asymmetrical propagation of flare-shocks. *Sci. China* (*A*), 1987, **2**:186~193

[35] Wei Fengsi. The blast wave propagating in a moving medium with variable density. *Chin. J. Space Sci.*, 1982, **2**:63~72. in Chinese (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**:63~72)

[36] Chol K S, Moon Y J, Dryer M *et al.* A statistical comparison of interplanetary shock and CME propagation models. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108**:1445~1455