

日冕物质抛射引起地磁扰动的分类预报*

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, 北京 100049)

(2006 年 5 月 4 日收到 2006 年 10 月 30 日收到修改稿)

对 1997—2003 年期间引起地磁扰动的 72 个加速日冕物质抛射(CME)事件和 69 个减速 CME 事件进行了特性分析,并针对经行星际闪烁(IPS)认证的 32 个加速 CME 引起的地磁扰动事件和 32 个减速 CME 引起的地磁扰动事件分类建立了新的从属函数 μ_T 和新的磁扰开始时间修正项,经验证预报效果得到显著提高.对于加速 CME 引起的地磁扰动事件,磁扰开始时间的预报值 T_{pre} 与观测值 T_{obs} 比较,相对误差 $\Delta T_{pre}/T_{obs} \leq 10\%$ 的事件占总事件数的 21.86%, $\Delta T_{pre}/T_{obs} \leq 30\%$ 的事件为 78.13%, 而 $\Delta T_{pre}/T_{obs} > 50\%$ 的事件为 9.36%. 对于减速 CME 引起的地磁扰动事件,相对误差 $\Delta T_{pre}/T_{obs} \leq 10\%$ 的事件占总事件数的 25.00%, $\Delta T_{pre}/T_{obs} \leq 30\%$ 的事件为 84.37%, 而 $\Delta T_{pre}/T_{obs} > 50\%$ 的事件仅为 3.13%. 这表明该预报方法对空间灾害性事件的磁扰动的定量预报具有很大的现实可能性.

关键词: 日冕物质抛射, 地磁扰动, 从属函数

PACC: 9430L, 9460R, 9660R

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,终于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. CME 的质量一般在 10^{15} — 10^{16} g, 其边缘(大概距太阳表面 $5R_s$ (R_s 为太阳半径)以内)速度既可以小于 50 km/s 也可以大于 2000 km/s^[1]. Gosling 等^[2]发现速度在 100—1200 km/s 的 CME 平均速度为 470 km/s, 快速 CME 一般与耀斑、II 型射电爆发相关, 而慢速 CME 则和日珥爆发相关, 但是没有观测到做减速运动的 CME. 20 世纪 80 年代早期观测技术大大提高, MacQueen 和 Fisher^[3]测量了 $1.2R_s$ — $2.4R_s$ 范围的 12 个环状 CME. 他们发现和耀斑相关的 CME 以守恒速度传播, 然而和日珥爆发相联系的慢速 CME 作加速运动. 他们推测产生加速度的力是由同样驱动太阳风的力提供的. 在 20 世纪 80 年代 P78-1 宇宙飞船上的 SOLWIND 日冕观测仪和 SMM 飞船上的日冕观测仪观测到了上千

个 CME 事件. 文献[4—7]对 CME 作了与软 X 射线爆发、日冕 II 型爆发、行星际 II 型爆发、行星际激波、能量粒子事件的分析比较研究, 由于当时只能对 CME 事件进行粗略的加速度观测, 所以对它的加速度研究仍然较少. SMM 的日冕观测仪的观测范围仅为 $1.5R_s$ — $6.0R_s$. 它只能观测到与日珥爆发相关的近太阳加速事件, 后来美国的 Mauna Loa 观测站和 SMM 飞船进行综合观测, 观测到了 $4R_s$ 内的加速度在 1 — 1000 m/s² 范围的加速 CME 事件. 直到 1995 年 12 月随着 SOHO 飞船的 LASCAO 日冕观测仪的发射, 对 CME 的观测才得到了根本的改善. 观测范围远至 $30R_s$, 甚至能观测到晕状的 CME 事件和一些与耀斑相联系的加速 CME 事件和与日珥爆发相联系的匀速 CME 事件^[8].

在发现 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. Gosling^[9]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的地磁暴是由 CME 驱动的激波引起的^[10]与太阳风扰动相关的

* 国家自然科学基金重点项目(批准号: 40523006, 40536029, 40336053, 40374056)资助的课题.

† E-mail: jwang@spaceweather.ac.cn

磁云也是由 CME 驱动的激波引起的^[11]。

空间灾害性天气的预报是当代日地物理学家们面临挑战的难题之一。有关它的研究涉及太阳活动爆发机制、太阳风暴的结构和在行星际中的传播过程以及其与地球磁层的相互作用等等。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。长期以来人们在数值预报、统计预报等方面做出了大量的努力,但预报的准确度仍与实际需求有较大的距离。但是人们在激波到达时间的预报方面已经取得了很大的进展,预报方法多种多样。目前,预报激波到达时间模型主要有经验模型和物理模型两种。通过对 1997—2002 年期间发生的 91 个 CME 引起的激波事件的研究,Manoharan 等^[12]得到了一个激波渡越时间与 CME 初始速度的经验关系式 $T_{\text{shock}} = 3.9 - 2 \times 10^{-3} V_{\text{CME}} + 3.6 \times 10^{-7} V_{\text{CME}}^2$ 。这里 T_{shock} 为激波到达时间, V_{CME} 为 CME 速度。预报激波渡越时间的物理模型有激波到达模型(STOA)、改进后的 STOA 模型(STOA-2)、行星际激波传播模型(ISPM)、Hakamada-Akasofu-Fry 太阳风模型(HAFV.2)^[13-18]。STOA、STOA-2 模型是以爆炸波理论为基础来预报激波到达时间的。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 模型稍微复杂一些,它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。“ISF”方法^[19-21]以太阳活动、行星际扰动和地磁扰动的观测为基础,综合行星际闪烁(IPS)数据观测、行星际扰动过程的物理基础和模糊数学中的从属函数,并进一步对众多研究事件的每一个射电源的最佳贴近度进行搜索并考虑行星际磁场南向分量的影响,取得了令人鼓舞的试预报效果。乐贵明等^[23]依据 CME 到达磁层时会引起银河宇宙线强度的突然下降这一特点,利用小波分析方法确定宇宙线强度变化的突变时刻,判断 CME 到达磁层顶的时刻,从而得到 CME 在磁层顶附近的结构。

IPS 是射电信号和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^[24]。如果我们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,因此能知道 CME 的行进情况。通过 IPS 观测我们还可以构造出二维的太阳风速度图,进而

研究太阳的活动^[25]。

IPS 观测能够提供 ICME 的速度变化,了解它们的三维传播特征及其与电流片的关系^[26]。IPS 观测还能用来检测出太阳风到达地球时的扰动情况,进而能用来预报地磁暴^[27]。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方面的复杂性等等,使 IPS 激波观测和认证存在一定的模糊性。

地磁扰动变化是由于太阳活动、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,这就使我们研究的对象常具有一定的“模糊性”^[19-22]。近年来,人们开始运用模糊数学的方法研究太阳风暴-IPS 激波与地磁扰动的关系。考虑到激波本身结构的不同特征以及激波与地磁扰动事件之间可能存在的内在联系,需要我们对激波进行分类研究,进而研究不同类型的激波对地磁扰动的影响。此外,在分类基础上根据快-慢激波建立不同的从属函数,将会进一步提高预报地磁扰动大小的准确度。

本文对 1997—2003 年期间加速 CME 事件和减速 CME 事件进行了特性分析并对经 IPS 认证的加速 CME 引起的地磁扰动事件和减速 CME 引起的地磁扰动事件进行了分析试验,针对引起地磁扰动的两类 CME 磁扰事件分类建立了新的从属函数 μ_T 和新的 CME 速度修正项,经验证预报效果得到了显著提高。

2. 两类 CME 引起的地磁扰动事件的特性分析

CME 与许多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紧密联系,所以对它的特性研究就变得越来越重要。下面就能引起地磁扰动的加速 CME 和减速 CME 的速度、加速度及其日面分布做分析研究。

2.1. 日面分布

我们选取了 1997—2003 年期间 72 个引起地磁扰动的加速 CME 事件和 69 个减速 CME 事件为研

究对象.数据来自世界资料中心发布的太阳-地球物理资料,IPS 观测数据来源于日本名古屋大学.所选

取两类 CME 事件日面分布如图 1 所示.所选事件的日面经纬度分布如图 2、图 3 所示.

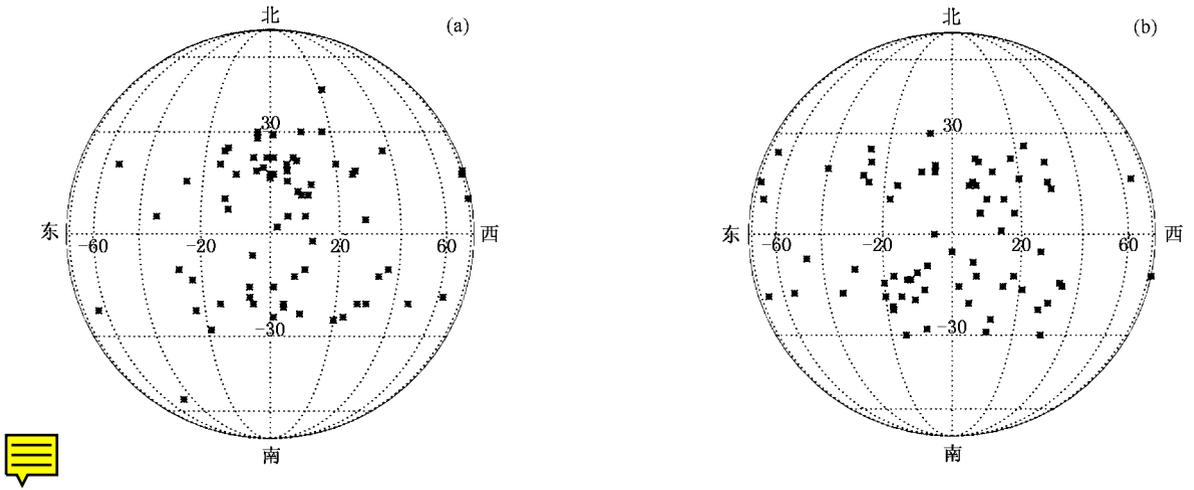


图 1 CME 事件日面分布图 (a)加速 CME 日面分布 ,(b)减速 CME 日面分布

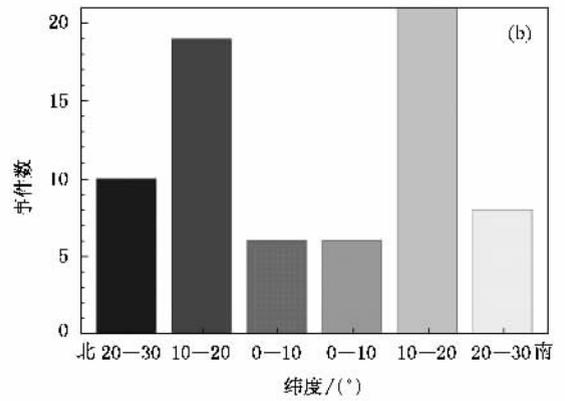
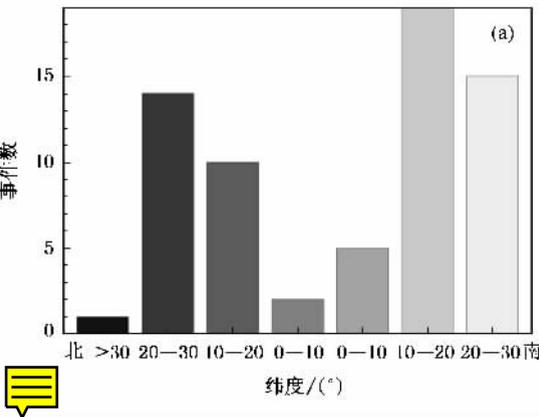


图 2 CME 事件纬度分布图 (a)加速 CME 纬度分布 ,(b)减速 CME 纬度分布

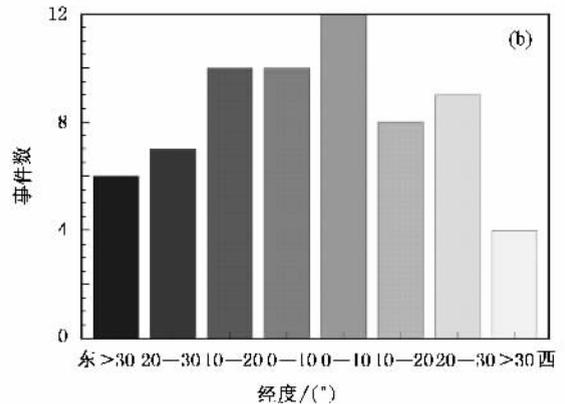
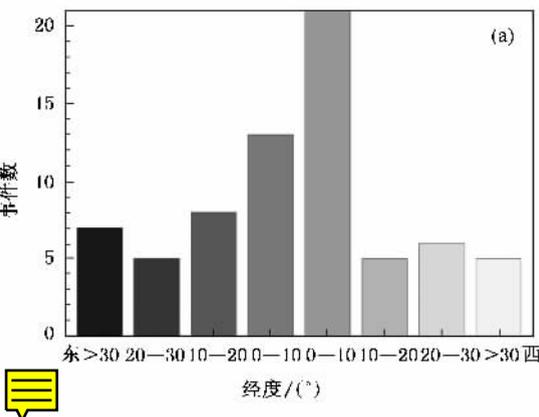


图 3 CME 事件经度分布图 (a)加速 CME 经度分布 ,(b)减速 CME 经度分布

从以上分布图我们可以看出,加速 CME 事件的日面分布的东西不对称性和南北不对称性比减速

CME 事件的稍明显,日面北部要比南部分布多,西部比东部多,这可能是由于减速 CME 和加速 CME

的触发机制不同.加速 CME 是当日 从低日冕流升起时逐渐形成的,从侧面看,它们有一个中心核并呈气球状;减速 CME 主要与耀斑、日核中心的莫尔顿波相联系^[28].两类事件纬度分布的峰值都在北纬 15°左右,与日球电流片离开 CME 方向向南倾 15°的统计结果很一致,与魏奉思^[29]的结论相一致.经度分布主要在日面西边 0°—10°范围,在日面西部爆发的 CME 的激波能较快传播到地球且引起较大的地磁扰动.Zhao 等^[30]近期对耀斑激波的太阳源分布特征及其地球物理效应的相关性给出了详细的研究.

2.2. 初始速度和加速度

图 4 展示了加速 CME 和减速 CME 初始速度分布,其中加速 CME 的初始速度 V_0 在 104—2505 km/s 范围,平均速度为 643 km/s,减速 CME 的初始速度在 150—2459 km/s 范围,平均速度为 906 km/s,这表明引起地磁扰动的 CME 初始速度比观测到的一般 CME 的初始平均速度(487 km/s)^[31]快.减速 CME 要

比加速 CME 平均速度快,它引起的激波更快传播到地球.

Sheeley 等^[32]认为在日冕观测仪观测的范围内,无论是快速还是慢速的晕状 CME 或者作加速运动或者作恒速运动.但是当 LASCAO/C3 观测后,他们又得出结论,在 $30R_s$ 内晕状快速 CME 做减速运动.这可能是由于加速 CME 与减速 CME 的爆发机制不同以及在行星际空间传播的过程和周围行星际介质作用不同造成的.在我们这 72 个加速 CME 事件中,有 61.11% 的 CME 为快速 CME ($V_{SW} < V_{CME}$, V_{SW} 为背景太阳风速度, V_{CME} 为 CME 速度),38.89% 的 CME 为慢速 ($V_{SW} > V_{CME}$).在 69 个减速 CME 中,有 11.59% 的慢速 CME,88.41% 的快速 CME.在这里选取的 141 个 CME 事件中快速事件占的比例稍大,约为 74.47%.

在日冕观测范围内加速 CME 的驱动力可能仍然存在,而减速 CME 的驱动力大大减弱了.为了了解它们初始速度与加速度的关系,我们给出了它们的关系(图 5).

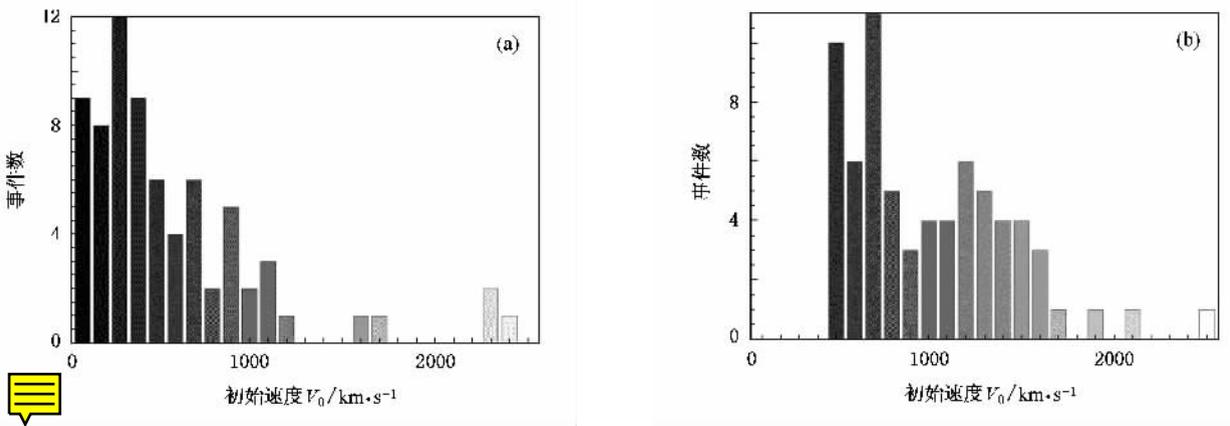


图 4 CME 初始速度分布图 (a)加速 CME 初始速度分布,(b)减速 CME 初始速度分布

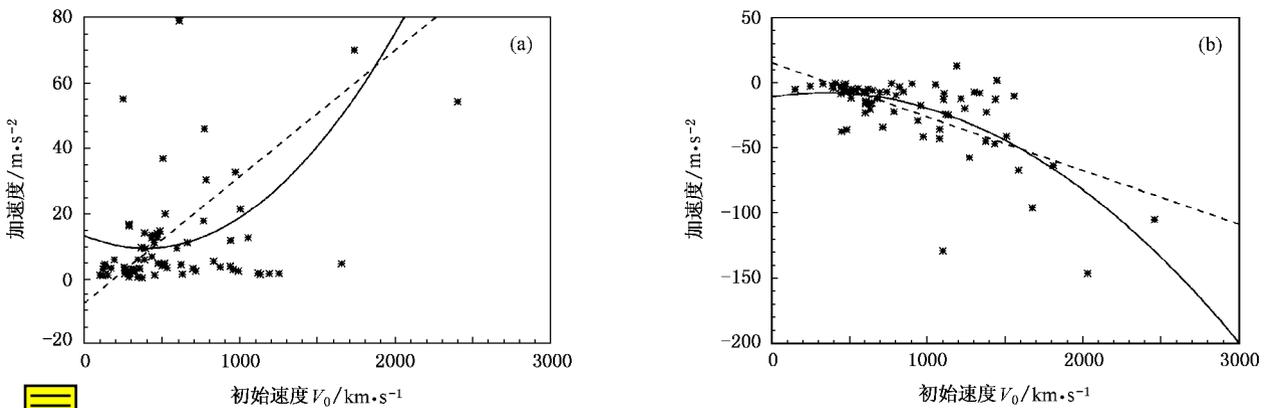


图 5 CME 初始速度-加速度关系 (a)加速 CME 初始速度-加速度关系 (b)减速 CME 初始速度-加速度关系

图 5 中的虚线为一次拟合曲线,实线为二次拟合曲线.72 个加速 CME 的加速度和初始速度的相关系数 $c = 0.57$,平均加速度为 4.36 m/s^2 .69 个减速 CME 的加速度和初始速度的相关系数 $c = -0.64$,平均加速度为 -9.88 m/s^2 .两者的加速度绝对值都是随着速度的增大而增大.减速 CME 比加速 CME 的平均加速度大,它的加速度和初始速度的相关系数也比加速 CME 初始速度与加速度的相关系数大,这可能是由于减速 CME 和加速 CME 的驱动力作用效果和时间长短不同造成的.

3. 从属函数的分类建立

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三维结构并有助于发展一种预报方法. IPS 观测能够提供行星际扰动的三维图像并能提前预测出扰动是否向地球传播^[33].然而 IPS 观测存在一定的局限性:激波面速度跃变量和激波渡越时间的不确定性.但是当我们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降低了.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 IPS 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”.这样我们可用不同的模糊集 $A = (\mu_T, \mu_M, \mu_{\Delta V}, \mu_{\theta}, \mu_{\phi})$ 来描述^[22].这里 $\mu_T, \mu_M, \mu_{\Delta V}, \mu_{\theta}, \mu_{\phi}$ 是由观测数据确定的 5 个从属函数,其中下标 T 为行星际扰动的渡越时间, M 为地磁扰动的幅度, ΔV 为激波面前后介质速度的跃变量 $V - V_f$ (V 为激波面前介质速度, V_f 为激波面后介质速度), θ 和 ϕ 分别为 CME 爆发源所在位置的纬度和经度.

从太阳活动开始到地磁扰动发生的这段时间称为磁扰开始时间 T .图 6 是 1997—2003 年经 IPS 认证的 32 个加速 CME 引起的激波事件和 32 个减速 CME 引起的激波事件(这里我们除去了 CME 速度大于 1500 km/s 的高速事件)磁扰开始时间 T 的分布.

磁扰开始时间 T 的频谱分布本身就含有从属程度的含义,这时利用最小二乘法原理对观测数据进行最佳拟合并作归一化处理,就可得到加速 CME 引起的激波事件的从属函数 μ_{T_a} 和减速 CME 引起的

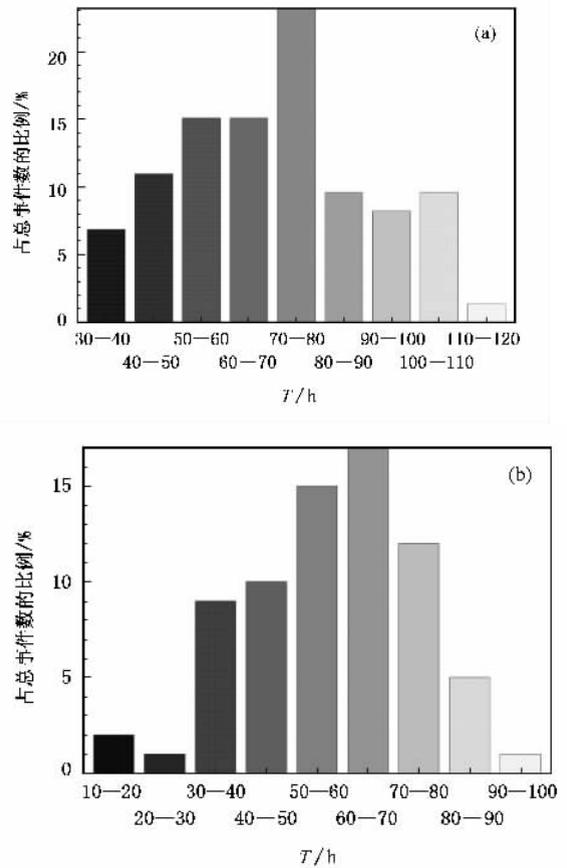


图 6 CME 引起的激波事件渡越时间频次图 (a)加速 CME 引起的激波事件渡越时间频次,(b)减速 CME 引起的激波事件渡越时间频次

激波事件的从属函数 μ_{T_d} .

$$\mu_{T_a} = -0.00027541x^2 + 0.0344x - 0.0753, \quad (1)$$

$$\mu_{T_d} = -0.00040798x^2 + 0.0444x - 0.2080. \quad (2)$$

CME 引起的激波事件的从属函数曲线如图 7 所示.

从图 7 可以看出,加速 CME 引起的激波传播到地球的最可几时间为 62.54 h ,此时 μ_{T_a} 取最大值 1. $\mu_{T_a}-T$ 曲线相对于 62.45 h 大致对称,减速 CME 引起的激波传播到地球的最可几时间为 54.41 h ,此时 μ_{T_d} 取最大值 1. $\mu_{T_d}-T$ 曲线相对于 54.41 h 大致对称.两条曲线都相对于最可几时间对称,这意味着传播过快和过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.这是因为对于传播时间过长的事件,该 CME 事件之后而未入选的事件或其他瞬变扰动所引起的这种事件的可能性就增大,其模糊度也增大,该事件的 μ_T 值较低是合理的.对于传播时

间过短的事件,该 CME 事件之前而未入选的瞬变扰动所引起的这种事件的可能性也增大,于是其模糊程度也增大,该类事件的 μ_T 值较低也是合理的. 减速 CME 引起的激波事件的最可几时间比加速 CME 引起的激波事件的最可几时间短,这与减速事件比加速事件平均速度大而引起激波传播到地球的时间短是相对应的.

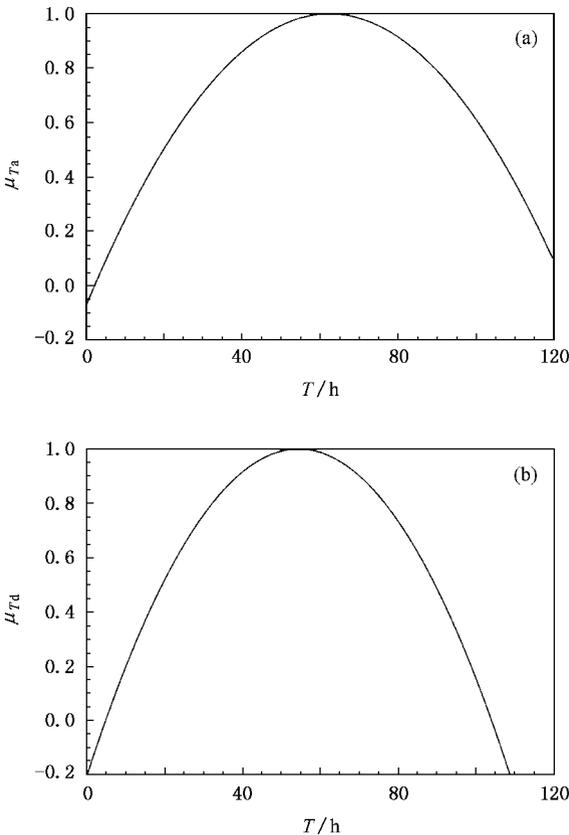


图 7 CME 引起的激波事件 μ_T 函数曲线 (a) 加速 CME 引起的激波事件 μ_{Ta} 函数曲线, (b) 减速 CME 引起的激波事件 μ_{Td} 函数曲线

在 Wei 等^[27, 34—36]的工作基础上,我们由 5 个从属函数根据最大贴近度来挑选最佳射点源. 根据太阳活动观测和 IPS 观测,采用爆炸波在变密度运动介质模型来确定太阳风暴到达地球的时间和能量. 对 1997—2003 年期间经 IPS 认证的 32 个加速 CME 引起的激波事件和 32 个减速 CME 引起的激波事件进行模糊预报,给出了 CME 初始速度与磁扰开始时间观测值和预报值的拟合曲线,如图 8 所示. 由拟合曲线分别得到了两类事件磁扰开始时间修正项的表达式为

$$\Delta T_a = 7.14715 \times 10^{-6} x^2 - 0.03141x + 32.459, \quad (3)$$

$$\Delta T_d = 9.3919 \times 10^{-6} x^2 - 0.03884x + 40.611. \quad (4)$$

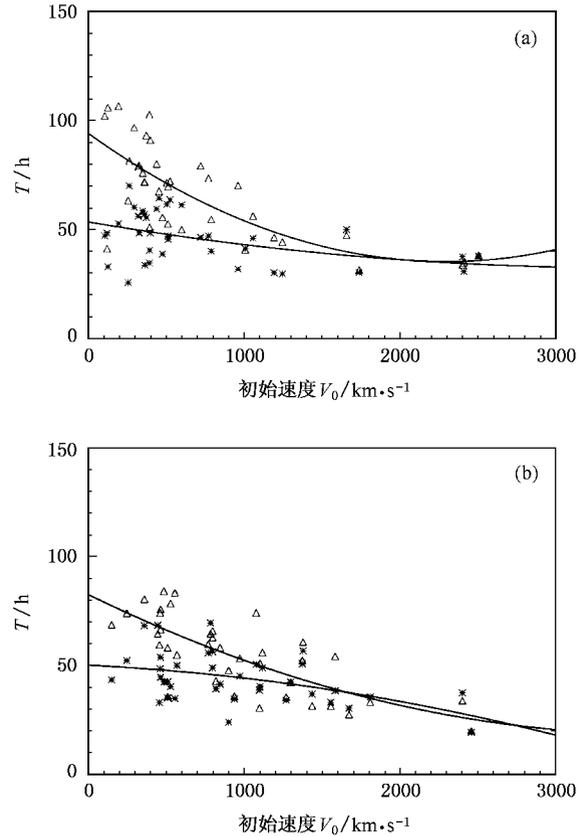


图 8 CME 速度与磁扰开始时间观测值、预报值(修正后)的拟合曲线 (a) 加速 CME 速度与磁扰开始时间观测值、预报值(修正后)的拟合曲线 (b) 减速 CME 速度与磁扰开始时间观测值、预报值(修正后)的拟合曲线. Δ 为观测值, * 为预报值, — 为拟合曲线

4. 分类预报结果

将磁扰开始时间修正项加入到爆炸波在变密度的运动介质模型的能量时间方程中^[35], 这样我们就得到了新的能量与时间关系

$$T_s = \frac{J}{V_0} \left\{ 4\lambda_1 [R + 2E_0(1 - \ln(R + 2E_0))] + 2X^{1/2} - \frac{(16\lambda_1^2 + \frac{1}{J})E_0}{(4\lambda_1^2 + \frac{1}{2J})^{1/2}} \ln \left[X^{1/2} + (R + 2E_0) \times \left(4\lambda_1^2 + \frac{1}{2J} \right)^{1/2} + \frac{(16\lambda_1^2 + \frac{1}{J})E_0}{2(4\lambda_1^2 + \frac{1}{2J})^{1/2}} \right] - 8\lambda_1 E_0 \right.$$

$$\times \ln \left(\frac{X^{1/2} + 4\lambda_1 E_0}{R + 2E_0} - \frac{16\lambda_1^2 + \frac{1}{J}}{8\lambda_1} \right) \} + T_0 + \Delta T, \quad (5)$$

其中

$$X = \left(\frac{E}{AV_0^2} \right) \frac{R}{J} + \left(4\lambda_1^2 + \frac{1}{2j} \right) R^2,$$

$$E_0 = \frac{E_s}{AU_0^2}.$$

这里 $J = \frac{3}{8}$, $\lambda_1 = -0.1808$, $A = 300 \text{ kg/m}$.

对 1997—2003 年期间的两类 CME 引起的地磁扰动事件进行综合预报,最后得到了修正后的磁扰开始时间,预报结果如图 9 所示.

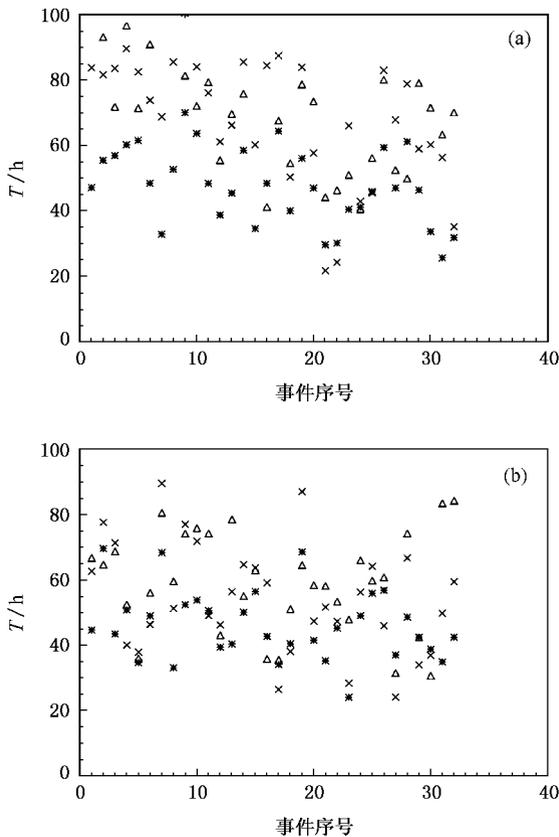


图 9 CME 引起的激波事件的磁扰开始时间预报结果 (a) 加速 CME 引起的激波事件的磁扰开始时间预报结果, (b) 减速 CME 引起的激波事件的磁扰开始时间预报结果. Δ 为观测值, * 为预报值, \times 为分类后的预报值

CME 引起的激波事件分类前后磁扰开始时间相对误差比较见图 10,从图中可以看出,分类后预报效果比分类前效果有明显提高.

预报结果显示:对于加速 CME 引起的地磁扰动事件磁扰开始时间的预报,分类前相对误差

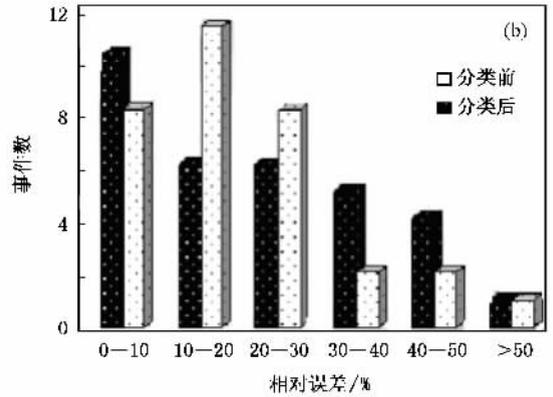
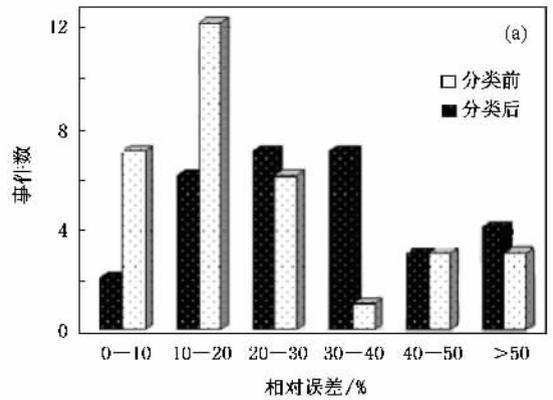


图 10 CME 引起的磁扰事件分类前后磁扰开始时间相对误差 (a) 加速 CME 引起的磁扰事件分类前后磁扰开始时间相对误差 (b) 减速 CME 引起的磁扰事件分类前后磁扰开始时间相对误差

$\Delta T_{pre}/T_{obs}$ 在 0—10% 范围的事件占总事件的 6.25%, 10—30% 的事件占 40.63%, 30—50% 的事件占 31.26%, 大于 50% 的事件占 21.86%; 分类后, 相对误差在 0—10% 的事件占 21.86%, 10—30% 的事件占 56.27%, 30—50% 的事件占 12.51%, 而大于 50% 的事件占 9.36%.

对于减速 CME 引起的地磁扰动事件分类前相对误差 $\Delta T_{pre}/T_{obs}$ 在 0—10% 范围内的事件占总事件的 31.25%, 10—30% 的事件占 37.50%, 30—50% 的事件占 28.12%, 大于 50% 的事件占 3.13%; 分类后, 相对误差在 0—10% 范围内的事件占总事件的 25.00%, 10—30% 的事件占 59.37%, 30—50% 的事件占 12.50%, 而大于 50% 的事件占 3.13%.

5. 结 论

本文对 1997—2003 年期间能引起地磁扰动的

加速 CME 事件和减速 CME 事件进行了分析. 结果表明:加速 CME 事件比减速 CME 事件日面分布的东西不对称性和南北不对称性稍明显,两者纬度分布的峰值都在北纬 15° 左右,与日球电流片离开 CME 方向向南倾约 15° 的统计结果很一致,经度分布主要在日面西边 0° — 10° 范围. 减速 CME 速度与其加速度相关性比加速事件速度与其加速度的相关性大,两类事件的加速度绝对值都是随着速度的增大而增大.

我们针对加速 CME 事件和减速 CME 引起的地磁扰动事件分类设计了从属函数 μ_T ,并根据两类 CME 的初始速度和激波渡越时间的关系分别得到了渡越时间修正项,对两类 CME 引起的地磁扰动事件进行了分类预报.对于加速 CME 引起的地磁扰动

事件磁扰开始时间的预报,相对误差在 0—10% 的事件占总事件的 21.86%,10%—30% 的事件占 56.27%,30%—50% 的事件占 12.51%,而大于 50% 的事件占 9.36%.对于减速 CME 引起的地磁扰动事件的预报,相对误差在 0—10% 范围内的事件占总事件的 25.00%,10%—30% 的事件占 59.37%,30%—50% 的事件占 12.50%,而大于 50% 的事件占 3.13%.这表明该预报方法对空间灾害性事件磁扰动的定量预报具有很大的现实可能性.

本文的工作尚存在一些有待探讨的问题,如行星际磁场南向分量的影响、地球鞘层磁场结构对 CME 引起地磁扰动的的影响等,并且还可以根据不同类型的磁扰事件建立不同的从属函数.这些都是我们下一步应该开展的研究工作.

- [1] Hundhausen A J, Burkepile J T, St Cyr Q C 1994 *J. Geophys. Res.* **99** 6543
- [2] Gosling J T, Hildner E, MacQueen R M *et al* 1976 *Sol. Phys.* **48** 389
- [3] MacQueen R M, Fisher R R 1983 *Sol. Phys.* **89** 89
- [4] Sheeley N R Jr, Howard R A, Koomen M J *et al* 1983 *Astrophys. J.* **272** 349
- [5] Sheeley N R Jr, Stewart R T, Robjinson R D *et al* 1984 *Astrophys. J.* **279** 839
- [6] Cane H V, Sheeley N R Jr, Howard R A 1987 *J. Geophys. Res.* **92** 9869
- [7] Gosling J T 1996 *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **34** 35
- [8] Chen J 1997 *Sol. Phys.* **175** 601
- [9] Gosling J T 1993 *J. Geophys. Res.* **98** 937
- [10] Gosling J T, Bame S J, McComas *et al* 1991 *J. Geophys. Res.* **96** 7831
- [11] Burlaga L F, Behannon K W, Klein L W 1987 *J. Geophys. Res.* **92** 5727
- [12] Manoharan P K, Gopalswamy N, Yashiro S *et al* 2004 *J. Geophys. Res.* **A 110** 0906
- [13] Fry C D, Sun W, Deehr C S *et al* 2001 *J. Geophys. Res.* **106** 985
- [14] Fry C D, Dryer M, Deehr C S *et al* 2003 *J. Geophys. Res.* **108** 1070
- [15] Hakamada K, Akasofu S I 1982 *Space Sci. Rev.* **31** 3
- [16] Moon Y J, Dryer M, Smith Z *et al* 2002 *Geophys. Res.* **29** 1029
- [17] Smith Z, Dryer M, Ort E *et al* 2000 *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* **62** 1265
- [18] Feng X S, Zhao X H 2006 *Sol. Phys.* **238** 167
- [19] Wei F S, Cai H C 1990 *Chin. J. Space Sci.* **10** 35 (in Chinese)
- [魏奉思、蔡红昌 1990 空间科学学报 **10** 35]
- [20] Wei F S, Xu Y, Feng X S *et al* 2002 *Sci. China E* **45** 525
- [21] Wei F S, Cai H C, Feng X S *et al* 2003 *Adv. Space Res.* **31** 1069
- [22] Wei F S, Feng X S, Xu Y *et al* 2005 *Adv. Space Res.* **36** 2363
- [23] Le G M, Han Y B 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 467 (in Chinese)[乐贵明、韩延本 2005 物理学报 **54** 467]
- [24] Jackson B V, Hick P P, Buffington A 2003 *Proc. ISCS* **535** 856
- [25] Rappoport S A, Hick P P, Jackson B V 2002 *Bull. Am. Astron. Soc.* **34** 242
- [26] Wei F S, Dryer M 1991 *Sol. Phys.* **132** 373
- [27] Wei F S 1984 *Acta Geophys. Sin.* **27** 417 (in Chinese)[魏奉思 1984 地球物理学报 **27** 417]
- [28] Sheeley N R Jr, Walters J H, Wang Y M *et al* 1999 *J. Geophys. Res.* **104** 739
- [29] Wei F S 1987 *Sci. China A* **30** 186 (in Chinese)[魏奉思 1987 中国科学 A **30** 186]
- [30] Zhao X H, Feng X S, Wu C C 2006 *J. Geophys. Res.* **A 111** 09103
- [31] St Cyr O C, Howard R A, Sheeley N R Jr *et al* 2000 *J. Geophys. Res.* **105** 169
- [32] Sheeley N R Jr, Walters J H, Wang Y M *et al* 1999 *J. Geophys. Res.* **104** 739
- [33] Xie Y Q, Wei F S, Feng X S 2006 *Sol. Phys.* **234** 363
- [34] Wei F S 1982 *J. Space Sci.* **2** 63 (in Chinese)[魏奉思 1982 空间科学学报 **2** 63]
- [35] Wei F S, Wang H T 1988 *Res. Space Phys.* **3** 100 (in Chinese)[魏奉思、王海涛 1988 空间物理与探测技术 **3** 100]
- [36] Wei F S, Cai H C 1990 *Chin. J. Space Sci.* **10** 35

Classified prediction of geomagnetic disturbance caused by coronal mass ejection^{*}

Wang Jing^{1,2)†} Feng Xue-Shang¹⁾

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

²⁾ *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

(Received 4 May 2006 ; revised manuscript received 30 October 2006)

Abstract

The characteristics of accelerating coronal mass ejection (CME) and decelerating CME happening during 1997—2003 are analyzed. Prediction tests are made for geomagnetic disturbance events caused by the gradually accelerating CME-associated interplanetary shock waves and the decelerating CME-associated interplanetary shock waves, which can be identified by interplanetary scintillation (IPS) observation during 1997—2003. New membership functions and new correctional item of onset time of geomagnetic disturbances are respectively constituted for two kinds of CME. The main results are: for the onset time of the geomagnetic disturbance in the accelerating CME, the relative error between the observation, T_{obs} , and the prediction, T_{pre} , $\Delta T_{\text{pre}}/T_{\text{obs}} \leq 10\%$ for 21.86% of all events, $\leq 30\%$ for 78.13% and $\geq 50\%$ for only 9.36%; for the decelerating CME, $\Delta T_{\text{pre}}/T_{\text{obs}} \leq 10\%$ for 25.00% of all events, $\leq 30\%$ for 84.37% and $\geq 50\%$ for only 3.13%. These results show that the method has good feasibility for the geomagnetic disturbance predictions.

Keywords: coronal mass ejection, geomagnetic disturbances, membership function

PACC: 9430L, 9460R, 9660R

^{*} Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 40523006, 40536029, 40336053, 40374056).

[†] E-mail: jwang@spaceweather.ac.cn