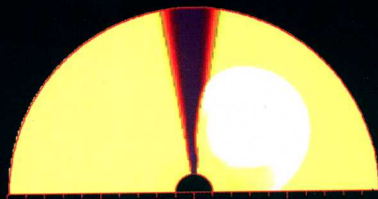
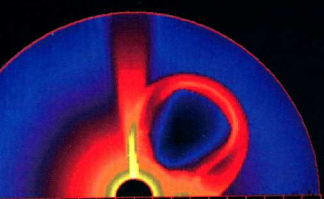
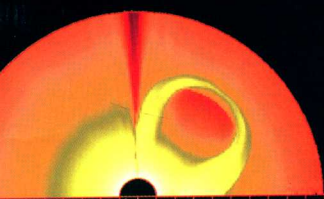


张效信 牡丹 郭建广 编著



KONGJIAN TIANQI
DINGLIANG YUBAO MOSHI

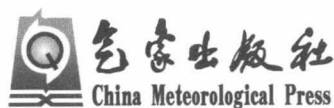


空间天气 定量预报模式

 气象出版社
China Meteorological Press

空间天气定量预报模式

张效信 杜 丹 郭建广 编著



内容简介

本书全面介绍了 25 个面向业务应用的空间天气定量预报模式,覆盖空间天气所涉及的太阳、行星际、磁层、电离层和中高层大气五大区域。本书内容是对公益性行业(气象)科研专项项目“空间天气定量化预报技术及其集成”(GYHY200806024)部分成果的凝练与总结,可作为空间天气相关学科的教科书,也可供从事空间天气相关的专业技术人员参考,并对面向业务的空间天气应用研究有积极推动作用。

图书在版编目(CIP)数据

空间天气定量预报模式/张效信,牡丹,郭建广编著. —北京:气象出版社,2016.2
ISBN 978-7-5029-6149-7

I. ①空… II. ①张…②杜…③郭… III. ①空间科学-天气预报 IV. ①P45

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 022190 号

出版发行:气象出版社

地 址:北京市海淀区中关村南大街 46 号

总 编 室:010-68407112

网 址:<http://www.qxcbs.com>

责任编辑:杨泽彬 邵俊年

责任校对:王丽梅

封面设计:易普锐创意

印 刷:北京中新伟业印刷有限公司

开 本:787 mm×1092 mm 1/16

字 数:370 千字

版 次:2016 年 4 月第 1 版

定 价:72.00 元

邮政编码:100081

发 行 部:010-68409198

E-mail: qxcbs@cma.gov.cn

终 审:袁信轩

责任技编:赵相宁

印 张:15

彩 插:8

印 次:2016 年 4 月第 1 次印刷

参与编写人员(按姓氏笔画排列):

万卫星	于超	王永福	王传兵	王建平
毛田	冯学尚	吕建永	刘国华	刘瑞源
李汇军	肖伏良	余优	张东和	张莹
陈安芹	陈耿雄	陈婷娣	陈耀	武业文
武昭	林瑞淋	钟鼎坤	罗浩	周全
宗秋刚	郝永强	赵海娟	姜国英	徐文耀
徐寄遥	唐云秋	唐怡环	黄聪	谢伦
解妍琼	窦贤康	熊波	潘宗浩	薛向辉

序

空间天气科学是当代自然科学的一门新兴的多学科前沿的交叉科学,也是关乎国家经济社会发展 and 国家安全的新兴战略科学,它是我国空间科学中最有基础和优势的基础研究领域之一,可望在当代取得重大原创性新成就。了解灾害性空间天气变化过程与规律,是减轻或避免灾害性空间天气带给航天、通信、导航定位、遥感、资源、人类健康等高科技领域的损失与危害的基本前提和必备的科学基础。

空间天气预报是空间时代人类社会生存与发展所必需的一种基本能力,犹如人类需要地球天气预报一样。今天,人类社会正全面进入探索空间、利用空间的新时期,空间天气预报面临前所未有的新挑战,特别是定量预报,需要各种描述日地空间整体和各组成部分(包括大气模型、电离层模型、磁层模型、行星际模型等)的基本状态和结构的模型,以及日地空间天气事件模型(包括各种太阳事件过程模型、行星际太阳风暴传播模型、磁暴和亚暴模型、电离层暴和热层暴模型等)。它们各有所长,各有所用,是空间天气预报需要逐渐集成与融合的两个重要方面。

公益性行业(气象)科研专项项目——“空间天气定量化预报技术及其集成”(GYHY200806024)从空间天气业务发展的角度出发,集中同行的力量开展面向业务应用的空间天气定量化预报技术研究,对基于国外数据的预报模式进行了区域性分析,并分析了相关模式在国内的适应性,对国内(外)成熟的预报研究成果改造成面向业务的预报技术,开展了对比较成熟的预报方法的定量化技术改造,确定了相关空间天气预报技术接口规范;在进行太阳/行星际、太阳风/磁层、内磁层、电离层、中高层大气等空间区域的定量化预报模式转化的基础上,初步构建了空间天气定量化业务预报框架,完成了太阳、行星际、磁层、电离层和中高层大气等空间区域的定量化初级预报模式系统集成,是国内首个面向业务应用的跨越空间天气所涉及的五大区域(太阳、行星际、磁层、电离层和中高层大气)的集成预报模式。

进一步发展集成预报模式,建立日地系统不同空间区域、不同参数和空间天气事件的因果链研究模式是提升我国空间天气监测预警水平为国际先进有待努力的一个方向,也将成为我国空间天气业务领域的关键技术和重要工作,对提升整个行业的业务水平具有极其重要的意义。

魏奉思

(中国科学院国家空间科学中心研究员,中国科学院院士)

2016年3月28日

前言

“空间天气量化预报技术及其集成”(GYHY200806024)项目是国家卫星气象中心张效信研究员主持的公益性行业(气象)科研专项项目,于2008年10月立项。该项目从空间天气业务发展的角度出发,集中同行的力量开展面向业务应用的空间天气量化预报技术研究,对基于国外数据的预报模式进行了区域性分析,并分析了相关模式在国内的适应性,对国内(外)成熟的预报研究成果改造成面向业务的预报技术,开展了对比较成熟的预报方法的量化技术改造,确定了相关空间天气预报技术接口规范;在进行太阳/行星际、太阳风/磁层、内磁层、电离层、中高层大气等空间区域的量化预报模式转化的基础上,初步构建了空间天气量化业务预报框架,完成了太阳、行星际、磁层、电离层和中高层大气等空间区域的量化初级预报模式系统集成,是国内首个面向业务应用的跨越空间天气所涉及的五大区域(太阳、行星际、磁层、电离层和中高层大气)的集成预报模式。中国科学院国家空间科学中心、北京大学、中国科学技术大学、中国极地研究中心、中国科学院地质与地球物理研究所、山东大学威海分校、长沙理工大学、中国人民解放军理工大学等国内主要空间天气研究单位作为协作单位参加了项目研究。项目的主要成员有万卫星院士、窦贤康教授、冯学尚研究员、刘瑞源研究员、徐寄遥研究员、宗秋刚教授、陈耀教授、肖伏良教授、王传兵教授等,都是相关研究领域的权威专家。经过四年的研究与开发,项目制定了国内首个空间天气预报规范。在各协作单位的大力支持下,项目组完成了25个空间天气定量预报模式的研发改造和集成,可谓是小投入大产出的典范项目。

项目关于空间天气预报规范的研究成果有利于提高业务能力,促进空间天气预报行业的规范化发展,更好地为航空、航天、地质勘探、导航定位、长距离管网等用户服务;项目构建的空间天气量化预报初步框架是我国空间天气监测预警的基础性、前瞻性工作,也将成为我国空间天气业务领域的关键技术和重要工作,能够极大提高我国对灾害性空间天气的预测预报能力。定量预报系统已成为预报员预报空间天气的辅助工具,部分模式在日常业务中发挥了重要作用。鉴于此,将项目的部分研究成果根据当前的进展加以更新并编辑成册——《空间天气定量预报模式》,一方面是对项目成果的凝练与总结,另一方面可作为空间天气相关学科的教科书,也可供从事空间天气相关的专业技术人员参考,并对面向业务的空间天气应用研究有积极推动作用。

本书由国家卫星气象中心(国家空间天气监测预警中心)的张效信、牡丹、郭建广整理编写完成。第1章的CME冰激凌-锥模型以及三维运动学模式(HAF)由中国科学技术大学的王传兵教授、薛向辉教授和潘宗浩博士编写;未来2天M级、X级耀斑产生概率与未来1~3天F107定量预报模式分别由国家卫星气象中心(国家空间天气监测预警中心)的唐云秋和赵海娟高工编写;激波到达时间一维磁流体模式及专家数据库模式由中国科学院国家空间科学中心的冯学尚研究员、钟鼎坤和张莹博士编写;CME激波传播过程预报模式由山东大学的陈耀教授和武昭编写。第2章的磁层顶统计模式及太阳风传输模式由张效信研究员和中国科学院国家空间科学中心的林瑞淋博士编写;磁层状态模式由南京信息工程大学的吕建永教授和周全编写;极光卵分布预报模式由国家卫星气象中心(国家空间天气监测预警中心)的陈安芹博

士编写;第3章的辐射带边界演化模式由北京大学的宗秋刚教授和王永福博士编写;高能质子注入事件预报模式、辐射带槽区高能电子通量预报模式以及辐射带南大西洋异常区高能粒子通量预报模式由北京大学的谢伦教授和王永福博士编写;电离层电流特征模式由中国科学院地质与地球物理研究所的陈耿雄和徐文耀研究员编写;地球辐射带波-粒相互作用由长沙理工大学的肖伏良教授编写;地磁扰动预报模式由解放军理工大学的解妍琼和李汇军博士编写。第4章的中国电离层电子总含量(TEC)现报技术的发展完善与多种参量数据同化模式由中国科学院地质与地球物理研究所的万卫星院士、余优和熊波博士编写;中国及其周边地区电离层TEC短期预报技术由中国极地研究中心的刘瑞源研究员和武业文博士编写;电离层闪烁效应预报模式由北京大学的张东和教授和郝永强博士编写。第5章的中低纬地区中高层大气温度、密度预报模式由中国科学院国家空间科学中心的徐寄遥研究员和姜国英博士编写;大气温度密度日变化模式、钠层季节变化模式以及钠层日变化模式由中国科学技术大学的窦贤康教授和薛向辉、陈婷娣、唐怡环博士编写。国家卫星气象中心(国家空间天气监测预警中心)的戎志国、阚凤清和吴雪宝研究员对项目的完成做了大量的协调和组织工作。国家卫星气象中心(国家空间天气监测预警中心)的毛田、黄聪、于超、叶茜、王传宇、周颜等人为本书做了大量细致和烦琐的整理、修改及其他辅助工作。在此谨向为本书做出贡献的所有成员表示诚挚的感谢。

本书的出版得到了魏奉思院士、汪景琇院士、王水院士、涂传诒院士、方成院士、肖佐教授、王赤研究员、杨军研究员、王劲松研究员、文洪涛博士、杨蕾博士等专家和领导的指导及支持,在此一并致以诚挚的谢意。

由于空间天气模式研究处于不断发展变化中,书中疏漏之处在所难免,敬请读者给予批评指正。

目 录

序

前言

第 1 章 太阳/行星际模式	(1)
1.1 概况	(1)
1.2 CME 冰激凌-锥模型	(2)
1.3 未来 2 天 M 级、X 级耀斑产生概率预报模式	(16)
1.4 未来 1~3 天 F107 定量预报模式	(20)
1.5 太阳风暴到达地球时间和强度预报模式	(22)
1.6 CME 激波传播过程预报模式	(40)
1.7 总结	(53)
发表相关论文	(54)
参考文献	(54)
第 2 章 太阳风/磁层模式	(57)
2.1 概况	(57)
2.2 磁层顶统计模式	(58)
2.3 磁层状态模式	(84)
2.4 太阳风传输模式	(89)
2.5 极光卵分布预报模式	(98)
2.6 总结	(102)
发表相关论文	(103)
参考文献	(103)
第 3 章 内磁层模式	(107)
3.1 概况	(107)
3.2 辐射带边界演化模式	(109)
3.3 高能质子注入事件预报模式	(121)
3.4 辐射带槽区高能电子通量预报模式	(122)
3.5 辐射带南大西洋异常区高能粒子通量预报模式	(127)

3.6	电离层电流特征模式	(131)
3.7	地球辐射带波-粒相互作用	(137)
3.8	地磁扰动预报模式	(140)
3.9	总结	(149)
	发表相关论文	(149)
	参考文献	(151)
第4章	电离层模式	(152)
4.1	概况	(152)
4.2	中国电离层 TEC 现报技术的发展与多种参量数据同化模式的建立	(153)
4.3	中国及其周边地区电离层 TEC 短期预报技术	(158)
4.4	电离层闪烁效应预报模式	(170)
4.5	总结	(177)
	发表相关论文	(178)
	参考文献	(178)
第5章	中高层大气模式	(180)
5.1	概况	(180)
5.2	中高层大气模式研究现状	(182)
5.3	中低纬地区中高层大气温度和密度预报模式	(187)
5.4	大气温度密度日变化模式	(193)
5.5	钠层季节变化模式	(206)
5.6	钠层日变化模式	(215)
5.7	总结	(220)
	发表相关论文	(220)
	参考文献	(221)
第6章	空间天气预报模式发展现状与趋势	(223)
6.1	发展现状	(223)
6.2	发展趋势	(225)

第 1 章 太阳/行星际模式

1.1 概况

1.1.1 目的意义

以日冕物质抛射(CME)为主要表现形式的太阳风暴,不仅是地面观测到的几乎所有非重现性地磁暴的太阳活动源,而且与它相联系的激波还是最强烈的太阳高能粒子事件(SEP)——渐进型 SEP 的驱动源。目前通过卫星及全球地面台站的联合不间断观测,我们可以实时监测太阳上的爆发活动,从而对地球附近空间环境可能遭受到的灾害性变化进行预报和警报。

空间天气研究已进入一个以日地系统空间天气全球(整体)过程的研究和预报为核心的发展阶段,空间天气灾害性事件定量预报是重要的科学前沿。预测 CME 近期是否可能发生,发生后太阳风暴到达地球轨道的时间、强度,以及可能伴随的 SEP 事件的流量、能量和通量是空间天气预报研究中极为重要的内容,它就像我们预报台风“桑美”“海棠”何时登陆我国沿海一样具有重要的减灾防灾效益,可以为航天安全、通信保障等国防和民用需要做出贡献。

1.1.2 研究目标

建立一套可测算 CME 真实抛射速度、爆发位置及张角,并预报太阳耀斑产率、太阳风暴到达地球的时间和强度,以及 CME 驱动的行星际激波传播过程及其特性参数的智能化业务预报模式。

1.1.3 模式组成

太阳/行星际模式由以下五个模式组成(图 1.1):

- ① CME 冰激凌-锥模式。
- ② 未来 1~3 天 F107 指数定量预报模式。
- ③ 未来 2 天 M 级、X 级耀斑产生概率预报模式。
- ④ 太阳风暴到达地球时间和强度的智能化业务预报模式。
- ⑤ CME 激波的传播过程与激波特性的预报模式。

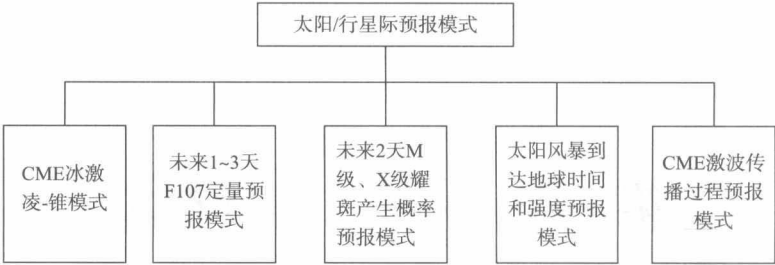


图 1.1 太阳/行星际模式结构图

1.1.4 技术路线

- (1)整理、认证太阳活动(日冕物质抛射/Ⅱ型射电暴)观测特性;吸取和综合有关太阳风暴传播物理过程的已有研究成果;在此基础上,发展统计分析和数值预报计算技术。
- (2)根据 CME 的冰激凌-锥模型反演计算 CME 的运动学参数;再将 CME 冰激凌-锥模型反演得到的 CME 运动学参数代入 HAF 运动学模型,模拟预测 CME 在日地空间的传播时间;将数值模型预测结果和观测资料进行比较分析,由资料分析结果指导模型的建模工作,进而将预测结果与观测比较,由观测资料来检验模型结果,优化模型中的一些特定参数或关系,以减少模型计算中的人为因素。
- (3)分别根据太阳活动谷期、上升相、峰期和下降相来研究耀斑的产生情况,给出未来 2 天 M 级、X 级耀斑的产生概率。
- (4)利用磁流体(MHD)模型计算 CME 驱动的激波在各个时刻和位置上的分布和传播特性,并给出指定位置和时间的激波的物理参数。

1.2 CME 冰激凌-锥模型

CME 是大量物质从日冕抛射到行星际空间的剧烈活动现象,是地球空间环境扰动的重要源,特别是正对地球抛射的 Halo CME(晕状 CME)。对 CME 抛射速度、张角及位置等运动学参数的准确确定,对研究 CME 在行星际空间的传播特征,以及对日地空间环境的影响,具有重要意义。但是,目前对 CME 的观测都只是对它在天空平面的投影观测,如果要知道它的真实运动学特征参数,则只有在一定的模型假设下,由其天空平面投影观测资料反演得到。根据国内外同行及我们自己的研究结果,我们假设 CME 的形状为冰激凌-锥形来反演计算 CME 的运动学参数,即 CME 的真实抛射速度、张角及位置等,并设计了一套半自动化的图像分析处理软件,相关结果可以用于一些空间天气预报模式(Xue *et al.*, 2005)。

1.2.1 模型的基本假设、原理

在本模型中,对 CME 的抛射结构做如下假设:①CME 的抛射形状是对称的冰激凌-锥型,如图 1.2 所示,整个形状为一圆锥和一球相截构成,锥的顶点及球的中心均位于太阳的中心;

②CME 只存在径向的运动;③在 CME 的整个运动过程中,CME 的运动速度及角宽度(即圆锥的张角)不随时间变化(Xue *et al.*, 2005)。

设 CME 在太阳爆发的日面位置为 (θ_0, φ_0) , 这里 θ_0 和 φ_0 分别为爆发位置的余纬(余纬 $=90^\circ$ —日面纬度)和经度。CME 的爆发速度为 v , 爆发的范围是半张角为 $\alpha/2$ 的锥形, 在整个锥体内 CME 等速且不随时间变化。建立如图 1.2 所示的坐标系, 其中 (y_h, z_h) 为天空平面, x_h 轴在日地连线方向并指向地球, z_c 轴为冰激凌锥的中心对称轴。通过简单的坐标转换有

$$\begin{cases} x_h = x_c \cos \alpha_1 + y_c \cos \alpha_2 + z_c \cos \alpha_3 \\ y_h = x_c \cos \beta_1 + y_c \cos \beta_2 + z_c \cos \beta_3 \\ z_h = x_c \cos \gamma_1 + y_c \cos \gamma_2 + z_c \cos \gamma_3 \end{cases} \quad (1.1)$$

$$\begin{cases} x_c = x_h \cos \alpha_1 + y_h \cos \beta_1 + z_h \cos \gamma_1 \\ y_c = x_h \cos \alpha_2 + y_h \cos \beta_2 + z_h \cos \gamma_2 \\ z_c = x_h \cos \alpha_3 + y_h \cos \beta_3 + z_h \cos \gamma_3 \end{cases} \quad (1.2)$$

其中,

$$\begin{cases} \cos \alpha_1 = \cos \theta_0 \cos \varphi_0 \\ \cos \beta_1 = \cos \theta_0 \sin \varphi_0 \\ \cos \gamma_1 = -\sin \theta_0 \end{cases} \quad (1.3)$$

$$\begin{cases} \cos \alpha_2 = -\sin \varphi_0 \\ \cos \beta_2 = \cos \varphi_0 \\ \cos \gamma_2 = 0 \end{cases} \quad (1.4)$$

$$\begin{cases} \cos \alpha_3 = \cos \varphi_0 \sin \theta_0 \\ \cos \beta_3 = \sin \varphi_0 \sin \theta_0 \\ \cos \gamma_3 = \cos \theta_0 \end{cases} \quad (1.5)$$

在 (x_c, y_c, z_c) 坐标系中, 一个顶点在坐标原点的锥体的方程为 $\cos \theta \geq \cos(\alpha/2)$ 。那么该锥体在 (x_h, y_h, z_h) 坐标系中的方程则为

$$1 \geq \frac{x_h \cos \varphi_0 \sin \theta_0 + y_h \sin \varphi_0 \sin \theta_0 + z_h \cos \theta_0}{\sqrt{x_h^2 + y_h^2 + z_h^2}} \geq \cos \frac{\alpha}{2} \quad (1.6)$$

锥面上任意一径向和 $Oy_h z_h$ 平面的夹角为

$$\sin \delta = \frac{x_h}{\sqrt{x_h^2 + y_h^2 + z_h^2}} \quad (1.7)$$

为了计算锥面上任一径向和 $Oy_h z_h$ 平面的夹角 δ , 我们用一单位球面和锥体相截, 所得截面应满足方程

$$\begin{cases} 1 \geq x_h \cos \varphi_0 \sin \theta_0 + y_h \sin \varphi_0 \sin \theta_0 + z_h \cos \theta_0 \geq \cos \frac{\alpha}{2} \\ x_h^2 + y_h^2 + z_h^2 = 1 \\ \sin \delta = x_h \end{cases} \quad (1.8)$$

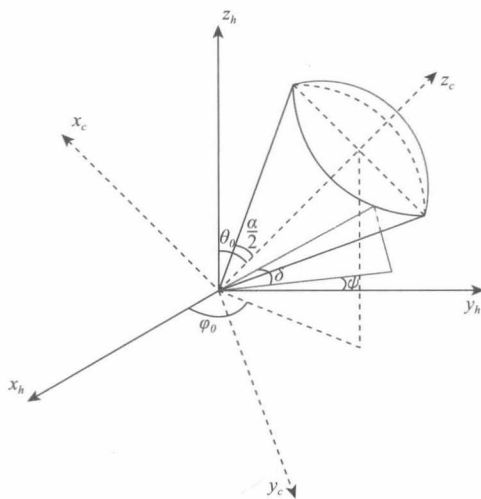


图 1.2 CME 的冰激凌-锥模型几何结构示意图(Xue *et al.*, 2005)

令 $y_h = \rho \cos \psi$, $z_h = \rho \sin \psi$, 这里 ψ 为某一径向在 $Oy_h z_h$ 平面的投影线和 y_h 轴的夹角, 有

$$\begin{cases} x_h \cos \varphi_0 \sin \theta_0 + \rho (\cos \psi \sin \varphi_0 \sin \theta_0 + \sin \psi \cos \theta_0) = \cos \frac{\alpha}{2} \\ x_h^2 + \rho^2 = 1 \end{cases} \quad (1.9)$$

由此可以求得

$$\sin \delta = x_h = \frac{\cos \frac{\alpha}{2} \cos \varphi_0 \sin \theta_0 \pm A \sqrt{\cos^2 \varphi_0 \sin^2 \theta_0 + A^2 - \cos^2 \frac{\alpha}{2}}}{\cos^2 \varphi_0 \sin^2 \theta_0 + A^2} \quad (1.10)$$

其中

$$A = \cos \psi \sin \varphi_0 \sin \theta_0 + \sin \psi \cos \theta_0 \quad (1.11)$$

(1) 对 (1.10) 式, 当

$$\cos \frac{\alpha}{2} \leq \cos \varphi_0 \sin \theta_0 \quad (1.12)$$

时, 对任意的 $\psi \in [0, 2\pi]$, 方程 (1.10) 均有解, CME 为 Halo CME。

(2) 对 (1.10) 式, 当

$$\cos \frac{\alpha}{2} > \cos \varphi_0 \sin \theta_0 \quad (1.13)$$

时, CME 为非 Halo CME, 方程 (1.10) 有实数解的 ψ 范围为

$$\psi_0 + \psi_- \leq \psi \leq \psi_0 + \psi_+ \quad (1.14)$$

其中

$$\tan \psi_0 = \frac{\cos \theta_0}{\sin \theta_0 \sin \varphi_0} \quad (1.15)$$

$$\cos \psi_{\pm} = \frac{\pm \sqrt{\cos^2 \frac{\alpha}{2} - \sin^2 \theta_0 \cos^2 \varphi_0}}{\sqrt{\sin^2 \theta_0 \sin^2 \varphi_0 + \cos^2 \theta_0}} \quad (1.16)$$

(3) 当锥体外表面和 $Oy_h z_h$ 平面有交点时, 那么 CME 在天空平面的最大投影速度在某些方向将不由锥面的投影速度确定, 而直接由 CME 的真实速度给定。假设在 $\psi_1 \leq \psi \leq \psi_2$ 的范围, CME 的投影速度直接由 CME 的真实速度给定, 则令 (1.9) 式中 $x_h = 0$, 可计算得

$$\begin{cases} \cos \psi_{1,2} \sin \varphi_0 \sin \theta_0 + \sin \psi_{1,2} \cos \theta_0 = \cos \frac{\alpha}{2} \\ \sin \frac{\alpha}{2} \geq \sin \theta_0 \cos \varphi_0 \end{cases} \quad (1.17)$$

令 $C = \sin \theta_0 \cos \varphi_0$, 根据上面的讨论, CME 投影速度的计算, 可以分为下面几种情况:

① CME 为 Halo CME, 并且 CME 的锥面和 $Oy_h z_h$ 平面没有交点, 这时

$$v_p = v \cos \delta = v \left| \frac{A \cos \frac{\alpha}{2} \pm C \sqrt{A^2 + C^2 - \cos^2 \frac{\alpha}{2}}}{A^2 + C^2} \right| \quad (1.18)$$

$$\psi \in [0, 2\pi]$$

② CME 为 Halo CME, 并且 CME 的锥面和 $Oy_h z_h$ 平面有交点, 这时

$$\begin{cases} v_p = v \cos \delta = v \left| \frac{A \cos \frac{\alpha}{2} \pm C \sqrt{A^2 + C^2 - \cos^2 \frac{\alpha}{2}}}{A^2 + C^2} \right|, \psi \notin [\psi_1, \psi_2] \\ v_p = v, \psi \in [\psi_1, \psi_2] \end{cases} \quad (1.19)$$

③ CME 为非 Halo CME, 并且 CME 的锥面和 $Oy_h z_h$ 平面没有交点, 这时

$$\begin{aligned} v_p = v \cos \delta = v \left| \frac{A \cos \frac{\alpha}{2} \pm C \sqrt{A^2 + C^2 - \cos^2 \frac{\alpha}{2}}}{A^2 + C^2} \right| \\ \psi \in [\psi_0 + \psi_-, \psi_0 + \psi_+] \end{aligned} \quad (1.20)$$

④ CME 为非 Halo CME, 并且 CME 的锥面和 $Oy_h z_h$ 平面有交点, 这时

$$\begin{cases} v_p = v \cos \delta = v \left| \frac{A \cos \frac{\alpha}{2} \pm C \sqrt{A^2 + C^2 - \cos^2 \frac{\alpha}{2}}}{A^2 + C^2} \right|, \psi \in [\psi_0 + \psi_-, \psi_0 + \psi_+], \psi \notin [\psi_1, \psi_2] \\ v_p = v, \psi \in [\psi_1, \psi_2] \end{cases} \quad (1.21)$$

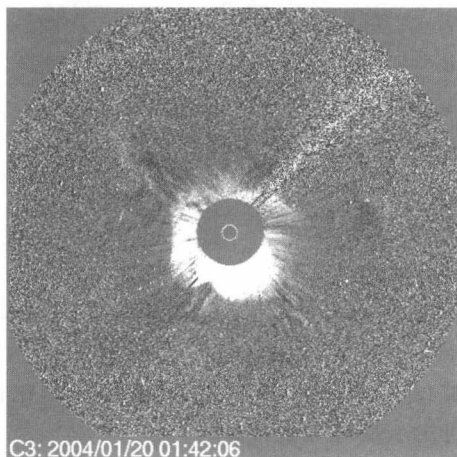
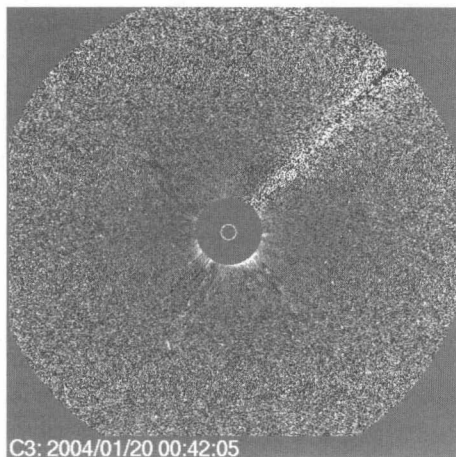
通过测量 CME 在天空平面不同方向的投影观测速度的大小, 利用上面的关系 (1.18) — (1.21) 式, 就可以反演计算 CME 的真实抛射速度、张角及位置等的最佳值。我们设计了一套半自动化的软件来实现这些测量、计算和反演工作。具体程序实现过程见下面的介绍。

1.2.2 模型的输入参数

CME 冰激凌-锥模型的输入参数, 包括两部分。

(1) SOHO/LASCO 观测的差分图像

这部分差分图像的获得, 对历史的 CME 事件和实时观测的 CME 事件是不同的。对历史的 CME 事件, SOHO/LASCO 的原始观测图像一般为 fits 格式或者 png 格式; 但网上的实时观测图像一般为 jpg 或 gif 格式的图片。因为不同格式的原始文件, 处理获得差分图像的程序也不太一样。差分图像的命名如“c30042. bmp”, 其中的 c3 表示是 SOHO/LASCO/C3 的观测, 0042 表示观测时间是当天的 00:42 UT。示例如图 1.3 所示。



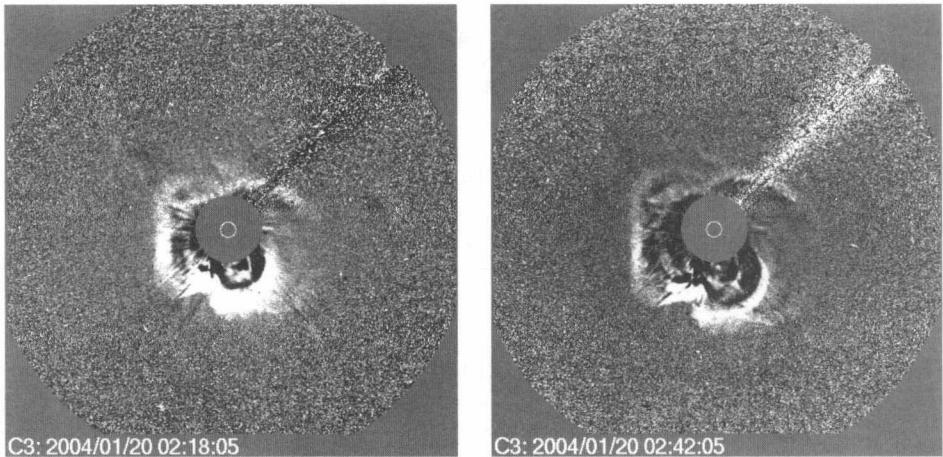


图 1.3 2004 年 1 月 20 日 CME 的 SOHO/LASCO/C3 观测差分图像

(2)SOHO/EIT 观测的差分图像或者 CME 对应耀斑的日面爆发位置

在这个部分,历史事件和观测事件的差分图像的获得、处理方式跟 SOHO/LASCO 的差分图像类似。采用 EIT 差分图像的目的是:大致确定 CME 在日面的爆发位置。在实际的操作中,也可以根据耀斑的资料,直接获得 CME 在日面的大致爆发位置。

1.2.3 模型的输出参数

(1)CME 天空平面投影速度的拟合曲线,以及 CME 爆发位置、速度和张角。

图 1.4 为对 2004 年 1 月 20 日 CME 的拟合反演结果,图中 v 为拟合得到的 CME 径向爆

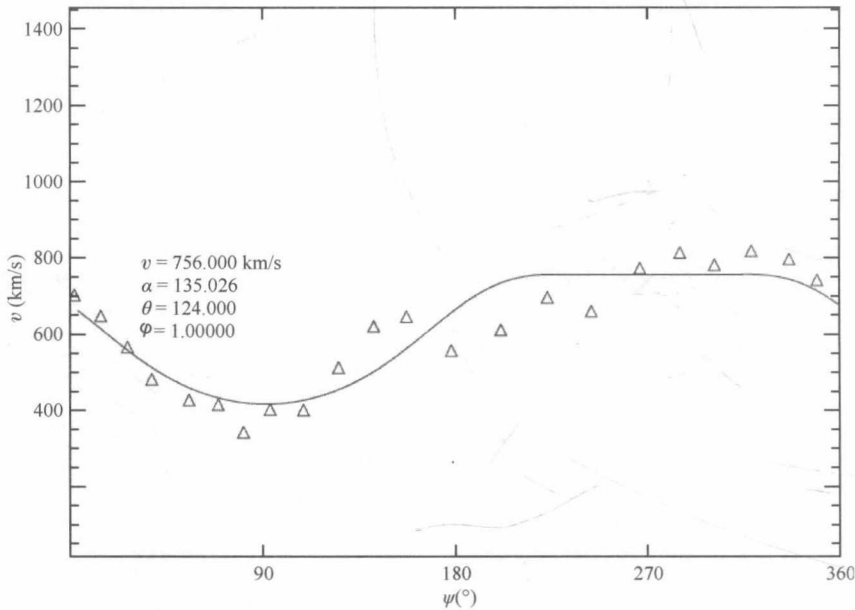


图 1.4 2004 年 1 月 20 日爆发的晕状 CME 的速度拟合结果曲线,其中三角形为 CME 在天空平面不同方向投影速度的测量值

发速度; α 为拟合得到的角宽度; θ 为拟合得到的 CME 爆发日面位置的余纬,其中大于 90° 表示位于南半球,小于 90° 表示位于北半球; φ 为拟合得到的 CME 爆发日面位置的经度,其中正值表示位于日面中心西边,负值表示位于日面中心东边。

(2) CME 拟合前沿位置和观测前沿位置的比较图

图 1.5 为对 2004 年 1 月 20 日 CME 锥模型拟合的前沿位置和观测前沿位置的比较。根据该图,可以直观判断拟合结果和观测结果相比较的好坏。由图 1.5 可以看出,拟合的前沿位置和观测前沿位置,重叠得还是比较好的。

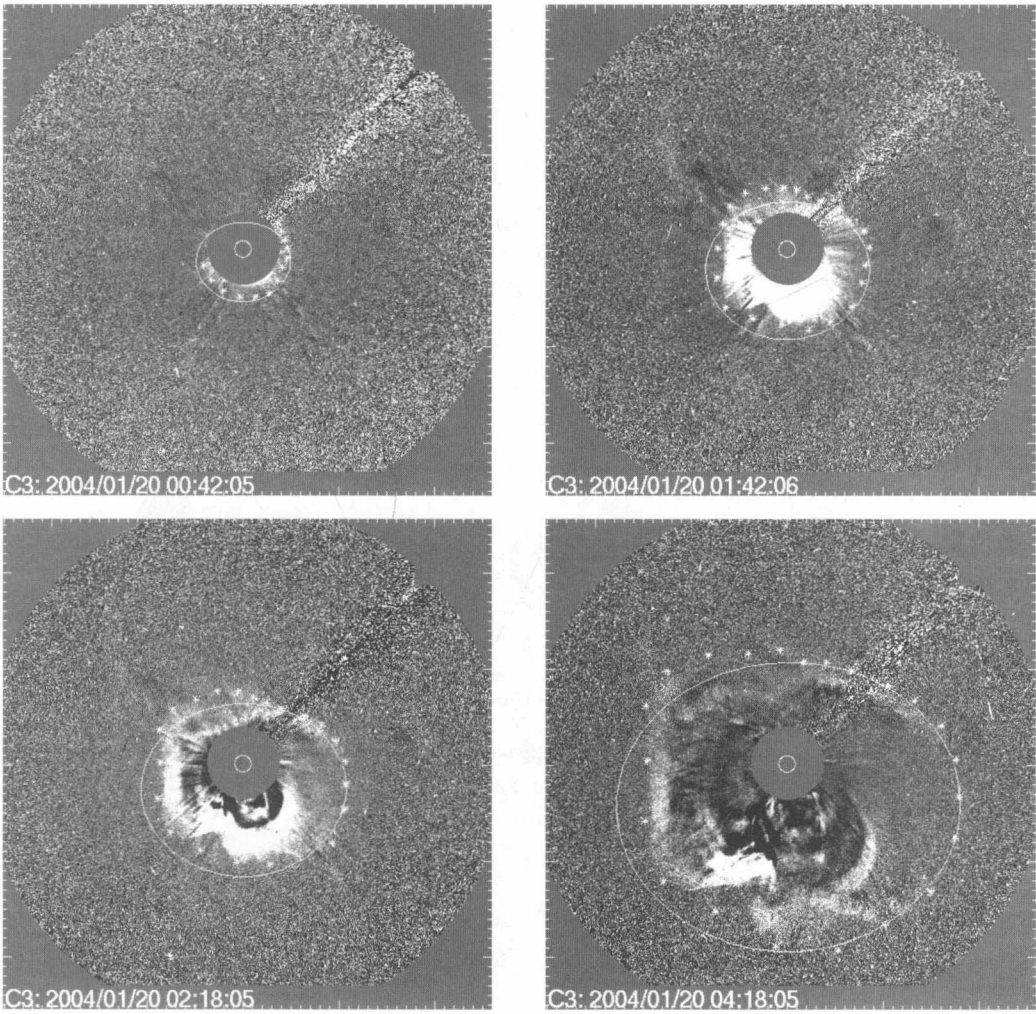


图 1.5 2004 年 1 月 20 日爆发的晕状 CME 的拟合前沿和观测前沿位置的比较,其中白线为拟合结果,白色星号为所选取的观测前沿位置代表点

1.2.4 程序反演计算过程

整个拟合反演的基本过程是:

