

分类号 _____

密级 _____

UDC _____

编号 _____

中国科学院研究生院

博士学位论文

太阳活动区磁场结构与耀斑-日冕物质抛

射的定量研究

郭娟

指导教师

张洪起 研究员

中国科学院国家天文台

申请学位级别

博士

学科专业名称

天体物理

论文提交日期 2006年12月

论文答辩日期 2006年12月

培养单位

中国科学院国家天文台

学位授予单位

中国科学院研究生院

答辩委员会主席 邓元勇 研究员

Typeset by L^AT_EX 2_ε at March 16, 2007

With package C_ASt_Hesis v0.1g of C_TE_X.ORG

A Quantitative Study on Magnetic Field of
Solar Active Regions and
Flare-Coronal-Mass-Ejections

Juan Guo

Supervisor:

Prof. Hong-Qi Zhang

National Astronomical Observatories
Chinese Academy of Sciences

March, 2007

*Submitted in total fulfilment of the requirements for the degree of Ph.D.
in Solar Physics Research*

摘 要

太阳磁场在太阳活动中扮演着重要角色。大部分强耀斑和快速日冕物质抛射 (CME) 都起源于复杂活动区, 量化活动区磁场的位型及复杂性对太阳活动预报具有非常重要的意义。基于良好的空间观测资料, 本文用有效距离参数 d_E 量化活动区磁场复杂性, 分析基于该参数的活动区磁场位型的定量分类法。随后结合其它参数 (总磁通 Ft , 磁倾角 $Tilt$, 强场强梯度中性线长度 Lsg) 进行了多方面的拓展性研究, 包括活动区磁场演化研究, 活动区磁场参数与耀斑指数及 CME 速度统计关系等。

论文的主要成果归纳如下:

1. 对比活动区的有效距离参数 d_E 和威尔逊山磁分类, 分析了活动区磁场位型的定量分类法。研究了 24 个属于威尔逊山磁分类各种类型的活动区, 发现: 9 个 β 位型的活动区的有效距离参数 d_E 值都小于 1; 2 个 $\beta\delta$ 型活动区的有效距离参数 d_E 值都大于 1; 9 个 $\beta\gamma\delta$ 型的活动区有 8 个活动区的有效距离参数 d_E 值大于 1; 而 4 个 $\beta\gamma$ 型的活动区有一些不确定性, 其中 1 个活动区的有效距离参数 d_E 值大于 1, 其它 3 个活动区的有效距离参数 d_E 值小于 1。可见有效距离参数 d_E 值的范围具有一定规律性: 活动区的位型越复杂, 活动区的有效距离参数 d_E 值越大。因此我们可以得出结论: 有效距离参数 d_E 和威尔逊山磁分类基本一致, 有效距离参数 d_E 可以量化活动区的磁场位型。

2. 活动区磁场演化研究。分析了五个不同类型不同发展阶段活动区的磁场演化情况, 发现活动区的磁场演化可以用有效距离参数 d_E , 总磁通 Ft 和磁倾角 $Tilt$ 这三个参数从不同侧面定量的描述, 尤其是有效距离参数 d_E 可以定量的描述活动区 δ 结构的演化: 活动区 δ 结构的发展对应于有效距离参数 d_E 值的增加, 活动区 δ 结构的衰减对应于有效距离参数 d_E 值的减小。

3. 活动区磁场结构与耀斑指数统计关系。研究了 43 个产生耀斑的活动区, 发现活动区的有效距离参数 d_E 和耀斑指数有很好的相关性, 线性相关系数为 0.81; 活动区的总磁通 Ft 和耀斑指数的相关性较好, 线性相关系数为 0.50; 而活动区的磁倾角 $Tilt$ 和耀斑指数的相关性很弱, 线性相关系数只有 0.01。

4. 活动区磁场结构与 CME 速度统计关系。研究了 86 个源于 55 个日面中心附近活动区的 CME 速度与活动区磁场的四个参数 (有效距离参数 d_E , 总磁通 Ft , 磁倾角 $Tilt$, 强场强梯度中性线长度 Lsg) 之间的统计关系。该样本包含从 1997 到 2005 年几乎所有重要的源于日面中心附近的活动区的 CME 爆发事件。结果发现源于活动区的 CME 中, 较快 CME 倾向于产生在总磁通 Ft 较强或者有效距离参数 d_E 值较大的活动区中, 四个参数中, 有效距离参数 d_E 和 CME 速度的相关最好。通过上述样本我们还发现: 耀斑伴生的 CME 中, 较快 CME 的伴生耀斑较强; 有效距离参数 d_E , 强场强梯度中性线长度 Lsg 和总磁通 Ft 的任意两个相关较强, 尤其是总磁通 Ft 和强场强梯度中性线长度 Lsg , 而磁倾角 $Tilt$ 和其它参数相关性很弱; 86 个 CME 中, 有 11 慢 CME 和 1 个速度超过 1000 Km/s 的快 CME 产生于 β 结构的的活动区, 这些 CME 爆发前活动区的强场强梯度中性线长度 Lsg 均小于 50 角秒这个阈值, 说明用强场强梯度中性线长度 Lsg 这一阈值来预报活动区中 CME 的爆发时需要考虑一些特例, 一些活动区的强场强梯度中性线长度 Lsg 小于这个阈值也会产生 CME 甚至是快速 CME。

论文具体安排如下: 第一章引言, 第二第三章详细介绍作者的研究工作。最后, 在总结所做工作的同时, 对今后的工作进行了展望。

主题词: 太阳活动, 太阳磁场, 耀斑, 日冕物质抛射 (CME)

Abstract

Magnetic field plays a central role in solar activities. Most intense flares and fast coronal-mass-ejections (CMEs) initiate in active regions with complex configuration. It is helpful for prediction of solar activities to quantify the complexity of magnetic field of active regions properly. Using some space-borne observations, we quantify the magnetic structure with effective distance d_E and put forward the quantitative classification for magnetic field of solar active regions based on d_E . Then using d_E , together with other parameters (total flux (Ft), tilt angle ($Tilt$), length of strong field and strong gradient main neutral line (Lsg)), we have carried out some quantitative studies, including studies on evolutions of magnetic field of solar active regions, on the statistical relationship between magnetic properties of solar active regions and flare-index or CME speed, etc.

Our main contributions are as follows:

1. Quantitative classification for magnetic field of solar active regions. Magnetograms of 24 active regions of different types with MWMC has been studied. It has been found that all the 9 β regions show effective distance (d_E) less than unity; both of the 2 $\beta\delta$ regions show d_E more than unity; 8 out of 9 $\beta\gamma\delta$ regions show d_E more than unity; for the 4 $\beta\gamma$ regions, there are some discrepancies: 1 region shows d_E more than unity, while 3 regions show d_E less than unity. These indicate the more complex the active regions, the higher the value of d_E . So there is a basic agreement between MWMC and d_E . Moreover, d_E could quantify the magnetic configuration of active regions.

2. Quantitative study on evolution of solar active regions. Evolutions of

magnetic fields of five active regions have been studied quantitatively with d_E , Ft and $Tilt$. It has been found that the evolution of magnetic fields can be described in three aspects quantitatively and accurately by the three parameters, in particular d_E on the analysis of δ -type active regions: d_E increases for active regions with developing δ structure, while d_E decreases for active regions with decaying δ structure.

3. Statistical correlation between properties of magnetic field of solar active regions and flare-index. 43 flare-associated active regions have been studied to investigate and quantify the statistical correlation between flare-index and each of the three parameters d_E , Ft and $Tilt$. The linear correlation coefficients are 0.81, 0.50, 0.01 respectively.

4. Statistical correlation between properties of magnetic field of solar active regions and CME speed. A sample of 86 flare-CMEs originated in 55 solar active regions near the central meridian has been collected. This sample includes most of the important flare-CMEs initiating in active regions located near the central meridian in the interval from 1997 to 2005. Four measures, including d_E , Ft , $Tilt$ and Lsg , are used to quantify the properties of the magnetic field of flare-CME productive active regions. It has been found that for CMEs initiating in active regions, fast CMEs tend to initiate in active regions with large Ft or large d_E , among the four parameters, d_E correlates with CME speed best; In flare-associated CMEs, faster CMEs tend to be accompanied by more intense flares, the linear correlation coefficient is 0.58; The parameters d_E , Lsg and Ft correlate with one another well, especially Ft and Lsg , while $Tilt$ correlates with other parameters weakly; For the 86 CMEs initiating in active regions, The occurrence of 11 slow CMEs and 1 fast CME in β type regions with Lsg far below the threshold of 50 arcsec reminds us of some exceptions to be considered when Lsg

with the threshold is used to predict the CME productivity of active regions.

We arrange the thesis as follows: A brief introduction is presented in Chapter 1. Our main work are presented in Chapter 2 and Chapter 3. The summary of our work and prospects are given in the last chapter.

Keywords: solar activity, magnetic field, flare, coronal mass ejection (CME)

目 录

摘要	5
Abstract	7
目录	11
第一章 引言	1
1.1 太阳黑子	1
1.1.1 太阳黑子的观测特征	2
1.1.2 太阳黑子形态分类	3
1.2 太阳剧烈活动——耀斑和日冕物质抛射	8
1.2.1 耀斑	8
1.2.2 日冕物质抛射 (CME)	9
1.3 太阳活动区磁场非势性与耀斑-日冕物质抛射	10
1.3.1 磁场剪切	11
1.3.2 电流	12
1.3.3 磁螺度和电流螺度	13
1.3.4 磁浮现	19
1.3.5 磁场拓扑性	23
1.3.6 δ 结构-最典型的非势特征	24
1.4 本文的目的和意义	25

第二章 活动区磁场形态的定量研究	27
2.1 引言	27
2.2 数据分析	27
2.3 参数介绍	28
2.3.1 总磁通 (Ft)	28
2.3.2 磁倾角 ($Tilt$)	28
2.3.3 有效距离参数 (d_E)	29
2.4 基于有效距离参数 d_E 的活动区磁场定量分类法	31
2.5 几个不同类型活动区的演化	32
2.5.1 一般的 β 型的活动区 NOAA 10549	32
2.5.2 正在发展的 $\beta\delta$ 型活动区 NOAA 10720	34
2.5.3 新浮现且快速发展的 $\beta\gamma\delta$ 型活动区 NOAA 10488	35
2.5.4 已经充分发展且在不断发展的 $\beta\gamma\delta$ 型活动区 NOAA 10484	37
2.5.5 正在衰减的 $\beta\gamma\delta$ 型活动区 NOAA 9026	38
2.6 活动区磁场参数与耀斑指数之间的统计关系	41
2.7 活动区磁场参数与 CME 速度之间的统计关系	42
2.8 讨论	45
2.9 结论	46
第三章 产生耀斑-日冕物质抛射 (CME) 活动区的磁特性与CME速度	49
3.1 引言	49
3.2 资料选取与处理	50
3.3 强场强梯度中性线长度 (Lsg)	51
3.4 举例说明	52

目 录	13
3.5 统计结果	54
3.5.1 有效距离参数 d_E 与活动区磁分类的一致性检验	54
3.5.2 强场强梯度线中性线长度 L_{sg} 及其阈值预报 CME 的可靠性检验	55
3.5.3 活动区磁场各参数之间的关系	55
3.5.4 活动区磁场参数和 CME 速度之间的统计关系	57
3.5.5 CME 速度和伴生耀斑强度之间的统计关系	63
3.6 结论	64
第四章 总结与展望	73
参考文献	81
发表文章目录	91
致谢	93

第一章 引言

太阳是一颗典型的恒星，又是唯一能够被高空间、高时间、和高光谱分辨的恒星，关于它的详细研究对于了解广阔的恒星世界具有普遍意义。太阳高温等离子体环境是无法复制的天然实验室，有助于促进人类对磁相互作用等基本物理问题的理解，太阳物理研究成果对于天体中能量释放过程的仔细了解具有不可替代的借鉴作用。

太阳磁场的形成和演化是太阳物理学最重大的前沿问题之一。太阳剧烈活动的主要形式，如太阳耀斑和日冕物质抛射，其物理本质是太阳磁场中储存的自由磁能的爆发式释放。太阳爆发中增强的电磁辐射、高能粒子和磁化等离子体，经行星际空间，进入地球磁层、电离层和中高层大气，与空间中的等离子体和中性气体相互作用，产生太阳风扰动、地球磁暴、极光等一系列复杂的空间天气学现象，对空间环境带来灾害性影响，给天基和地基技术系统及人类健康造成损害。然而，迄今为止我们对作为空间天气学现象驱动源头的太阳活动的物理本质和规律仍所知甚少。对太阳活动规律及预报方法进行深入系统研究，将为预报日地空间灾害性天气提供更加可靠的观测基础和理论依据，对于提高国防能力和保障空间安全具有极为重要的意义。

本文运用良好的空间观测资料，对太阳活动区磁场结构进行定量分类，并开展了与之相关的一系列拓展性研究，包括活动区演化研究，活动区磁场参数与耀斑及日冕物质抛射的统计研究等，希望对太阳活动预报有所贡献。

1.1 太阳黑子

在各种太阳活动现象中，最为醒目也最容易观测到的现象就是太阳黑子，人类认识太阳活动是从黑子开始的。当太阳在地平线附近或在薄雾天气时，日

面上若有特大黑子，往往肉眼也能看到。我国史书上就有丰富的太阳黑子目视记录。《汉书》五行志中所记载的汉元帝永光元年（公元前 43 年）四月某日“日色青白，亡景（无影），正中时有景（影）亡（无）光”是世界上最早的太阳黑子观测记录。《汉书》中的另一条记载，成帝河平元年（公元前 28 年）三月乙未，“日出黄，有黑气，大如钱，居日中央”则是确切无疑的黑子记录。这些在望远镜发明之前的黑子记录，是研究太阳活动长期变化规律的珍贵资料。从 1610 年开始用望远镜断断续续的观测太阳黑子。自 1818 年开始才有比较常规的每日黑子观测。

1.1.1 太阳黑子的观测特征

通过长期观测发现，太阳黑子有如下一些相当独特的观测特征[林元章, 2000]:

(1) 黑子倾向于成群出现。日面上经常形成许多黑子群，每群中的黑子也从一二个至几十个，每个黑子的大小自几百至几万公里。由于太阳自转，西边的部分总在前面，称为前导部分；与其相对应，东边的就成为后随部分。前导黑子的纬度一般比后随黑子低，因此黑子群相对于太阳赤道略为前倾。黑子群通常出现在赤道两边 $\pm 40^\circ$ 之间的区域。

(2) 较大的黑子结构复杂。较大黑子中心区常有一块或几块特别暗黑的本影被半影包围。本影温度一般 $4000 \sim 45000 \text{ K}$ ，半影温度一般为 5500 K 。本影中有时会出现被称为亮桥的明亮细沟。

(3) 每个黑子都有很强的磁场，其强度约为 $1000 \sim 4000 \text{ G}$ 之间，且黑子越大磁场越强。

(4) Evershed 流动。黑子中存在从本影-半影边界向半影-光球边界的水平流动。这种流动从本影-半影边界开始，在半影中达到极大，在半影-光球边界处衰减。

(5) 黑子中的振动现象。观测表明黑子中存在波动现象，最明显的有本影

闪耀和半影行波。

(6) 黑子群的演化过程通常是由简单变复杂,再变为简单。

目前普遍认为,太阳表面磁场主要来源于强剪切层位于对流层与辐射层之间的自激发发电机作用。这种发电机机制实现了表面磁场环向分量与极向分量之间不断相互转化的循环。发电机理论能够较好地解释诸如 11 年太阳活动周、Spuror 定律、(描述黑子群在日面的浮现位置随太阳活动周变化的特征)、Hale-Nicholson 极性定律(描述双极黑子群前导黑子与后随黑子在每次太阳活动周结束期间极性均发生反转的现象)和 Maunder 蝴蝶图(指以时间为横轴,黑子群出现的平均纬度为纵轴做出的连续多个太阳活动周的黑子群在日面的分布图样,因酷似一只只展翅飞舞的蝴蝶而得名)等一系列实测现象。

1.1.2 太阳黑子形态分类

日面上太阳黑子整体情况是太阳活动水平的一种表现,同时每群黑子所呈现出的形态和极性的复杂程度也与太阳耀斑等活动现象密切相关,太阳物理学家对太阳黑子群提出了各种分类。

(一) Wilson 山磁分类

1919 年美国 Wilson 山天文台提出黑子群按磁场极性分类方法 Wilson 山磁分类(威尔逊山磁分类),它以双极黑子为一个基本类型,其它类型都看作双极黑子群的变形。在这种分类中黑子群被分为单极群,双极群和多极群。分别用希腊字母 α , β , γ 表示。1960 年以后又加入一种新的 δ 位型。具体分类方法如下:

α_p (或 AP): 单极群,极性为该活动周前导黑子应有极性。

α_f (或 AF): 单极群,极性与该活动周前导黑子应有极性相反。

β_p (或 BP): 双极群,前导黑子极性占优。

β_f (或 BF): 双极群,后随黑子极性占优。

β (或 B): 双极群, 前导极性与后随极性相当。

β_γ (或 Br): 基本上是 β 型的双极群, 但有少数几个黑子极性颠倒。

γ (或 r): 极性混杂的多极群。

δ (或 D): 同一半影内出现两块以上不同极性的本影, 其间距小于 2° [林元章, 2000]。

(二) Zurich 分类

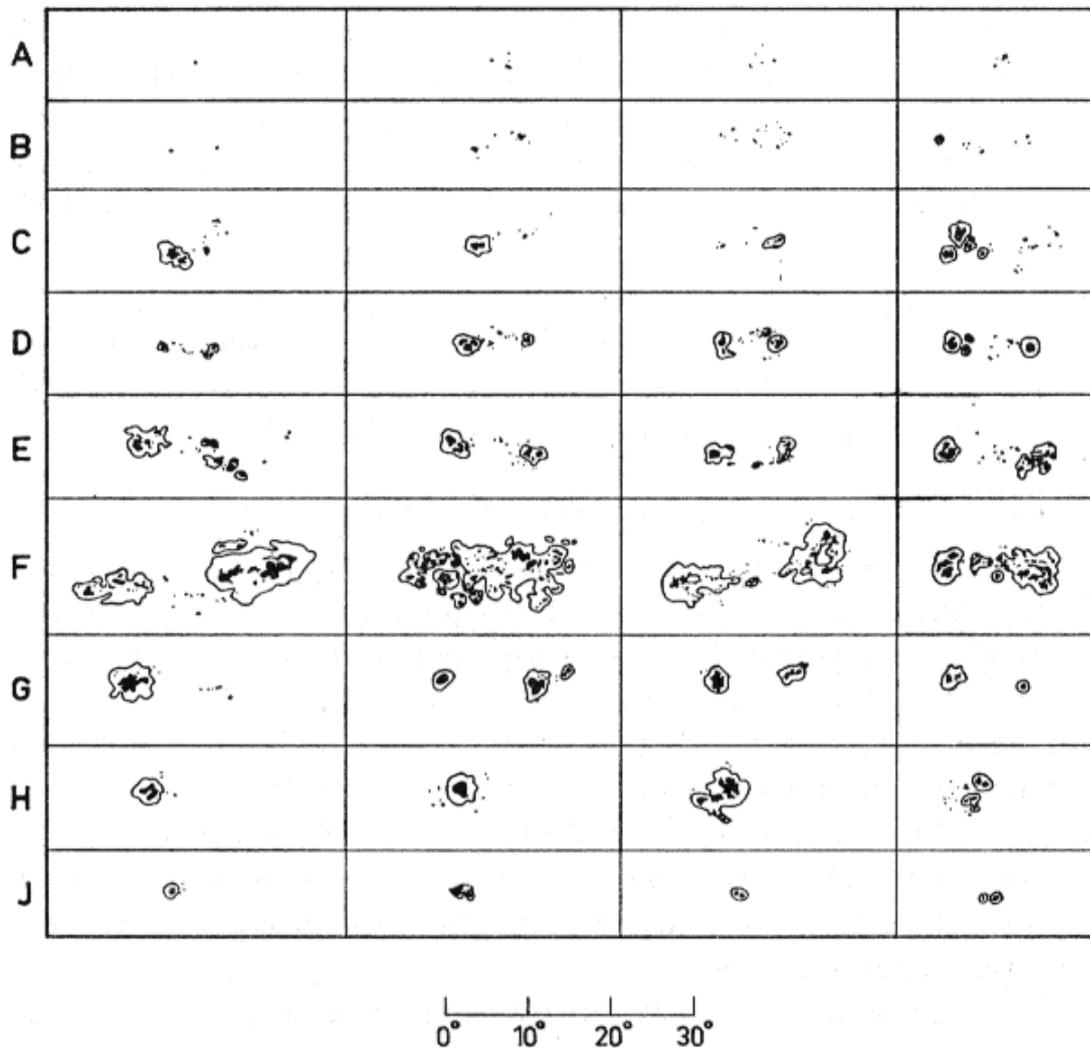


图 1.1: 黑子群的 Zurich 分型举例, 每型举四例。[Waldmeier, 1947]

黑子群的 Zurich 分类 (图 1.1) 是根据黑子群演化过程中所表现出的形态进行分类的, 如黑子有没有本影, 黑子群的尺度多大, 黑子群中黑子数目的多少, 它将黑子群分为九类, 分别用字母 A, B, C, D, E, F, G, J 表示。具体分类方法如下:

A: 无半影的小黑子, 或未显示双极结构的小黑子群。

B: 无半影的双极群。

C: 双极群, 其中一个黑子有半影。

D: 双极群, 二个主要黑子都有半影, 至少有一个黑子为简单结构, 日面经度延伸 10° 。

E: 大双极群, 结构复杂, 二个主要黑子均有本影, 它们之间还有些小黑子, 日面经度延伸大于 10° 。

F: 非常大而复杂的双极群, 日面经度延伸大于 15° 。

G: 大双极群, 只有几个大黑子, 无小黑子, 日面经度延伸大于 10° 。

H: 有半影的单极群, 直径大于 2.5° 。

J: 有半影的单极群, 直径小于 2.5° 。

注: Zurich 分型中, 所谓的“双极群”和“单极群”只是根据黑子群外观上是否由前导和后随两部分组成来判断, 并不需要磁场测量资料, 因此并无严格的磁场极性含义, 这一点与 Wilson 山天文台的黑子群分类有所不同。

(三) McIntoch 分类

McIntoch 分类 (图 1.2) 考虑黑子群以下三方面的内容: 采用修订的 Zurich 分型对黑子群进行整体描述, 黑子群中最大黑子的形态如何, 以及前导和后随黑子之间的较小黑子分布如何。因此该分类在作出更加定量和客观的定义时, 主要采纳了 Zurich 分类的演变序列, 并附加描述主要黑子和黑子群内部黑子的密集程度的参数。增加了活动区在大小、稳定性和复杂性方面的重要信息。

McIntoch 分类是用三个字母表示黑子群的新分类方法。

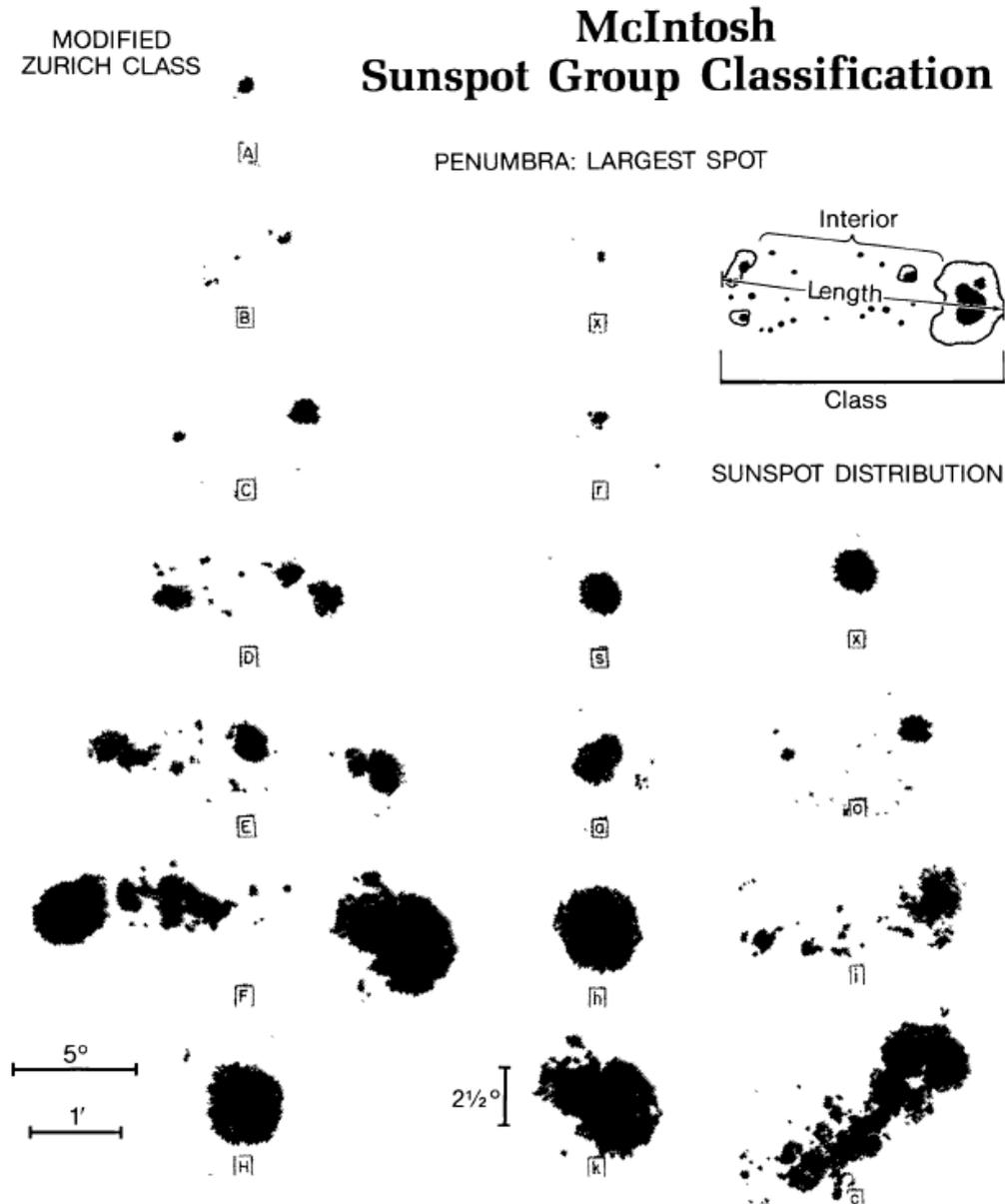


图 1.2: 黑子群的 McIntosh 分类举例。[McIntosh, 1990]

第一个字母含意与 Zurich 天文台分类法相同，但把 9 类合并为 7 类 (A, B, C, D, E, F, H)。删除了其中的 G 与 J，将原本的 G 归入 E 或 F 中，J 则并入 H 中。这是因为 G 群的判别必须依赖黑子群先前的发展状

况，若因天气等因素无法获知此群黑子的历史时，就无法正确的判定群型。至于删除 J 型的原因，是 J 与 H 的分别界定太不明确，因此予以合并。

第二个小写英文字母有 6 种，表示黑子群中最大黑子的半影情况，分别为：

x: 没有宽度大于 3 角秒的半影。

r: 半影简单且发育不完全，轮廓不完整或不规则。宽度很窄，通常只有 3 角秒左右（或太阳表面的 0.2° ，相当于 2000 公里左右），颜色较一般的半影浅而亮，若以高解析度来观测时，可见其具有颗粒状或米粒状的精细结构。这种半影代表一种介在米粒斑与细纤维状半影之间的过渡状态。

s: 轮廓对称、近于圆形的半影，且黑子直径小于日面经度的 2.5° （相当于 30000 公里），通常具有典型的细纤维状精细结构。在靠近中心的本影聚成密集的团状。若有单一本影周围，其半影成椭圆形者，亦属于此类。通常具对称型半影的黑子，发展变化很缓慢。

a: 轮廓不对称或比较复杂的半影，通常具有细纤维状精细结构，且直径小于日面经度的 2.5° 。这种半影轮廓大都不规则或是明确的非圆形，半影中有两个以上的本影散布其中。a 型不对称黑子每天都会改变形状，变化相当快速。

h: 类似 s 型的对称半影，但黑子直径大于日面经度的 2.5° 。

k: 类似 a 型的对称半影，但黑子直径大于日面经度的 2.5° 。当直径大于 5° 时，通常这种黑子的同一半影内会同时存在磁极性相反的本影，可同时归类为威尔逊山磁分类法中的 γ 型黑子。k 型黑子群极为活跃，易发生耀斑，有时甚至会发生极为稀少的白光耀斑。

第三个小写英文字母有 4 种，代表黑子群黑子群中的黑子分布情况，如小黑子数量、分布的紧密或疏散等中间的其他单独黑子紧密程度或散布情况。分别为：

x: 单一黑子 (individual)。

o: 开放式 (open) 的黑子群，即前导与后随两主黑子之间没有其他单独黑

子, 所以可以很明确地区分为极性相反的双极性黑子。磁场梯度通常较低。

i: 中间型 (intermediate) 的黑子群, 即前导与后随两主黑子间有一些没有半影的小黑子。

c: 密集型 (compact) 的黑子群, 即前导与后随两主黑子间有许多较大的黑子, 其中至少一个具有半影。在最极端的例子中, 几乎整个黑子群被一个单独的巨大半影包围, 表示磁场结构复杂, 磁场梯度比较陡峭, 亦即在极小区域内的磁场变化很大, 通常是耀斑的好发区。

用这种组合方式, 原本的 Zurich 分类法中的 G 群就可以表示成 Ero、Fro、Eso、Fso、Eao、Fao、Eho、Fho、Eko、Fko 等, J 群则可表示为 Hrx、Hsx、Hax 等。

1.2 太阳剧烈活动——耀斑和日冕物质抛射

1.2.1 耀斑

耀斑是最剧烈的太阳活动爆发形式。它是局部太阳大气中磁能突然和大规模释放的结果。耀斑活动是由 Carrington 和 Hodgson 于 1859 年第一次发现的。20 世纪 50 年代以前关于太阳耀斑的定义是指 $H\alpha$ 单色光看到的太阳色球谱斑中的突然增亮现象, 因此早先也称太阳耀斑为色球爆发。后来多种手段综合观测表明, 与 $H\alpha$ 突然增亮的同时, 还伴随有一些列更高能的现象发生, 包括从波长短于 1 \AA 的 γ 射线和 X 光, 直到波长达几公里的射电波段几乎全波段的电磁辐射增强, 以及发射能量从 10^3 eV 直到 10^{11} eV 的各种电子流。较大的耀斑释放的能量为 10^{32} erg 量级。大部分耀斑发生在黑子附近的活动区内, 尤其当活动区处于快速增长的状态。

目前按照 GOES (Geostationary Operational Environmental Satellites) 卫星上软 X 射线积分流量我们常将耀斑分成四类, 分别为 B、C、M 和 X, 所释放能量依次增大, X 射线耀斑分类如表 1.1 所示。

表 1.1: X射线耀斑分类

Classification	Peak Flux Range (0.1-0.8 nm)	
	mks system (W m^{-2})	cgs system ($\text{erg cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)
A	$\Phi < 10^{-7}$	$\Phi < 10^{-4}$
B	$10^{-7} < \Phi < 10^{-6}$	$10^{-4} < \Phi < 10^{-3}$
C	$10^{-6} < \Phi < 10^{-5}$	$10^{-3} < \Phi < 10^{-2}$
M	$10^{-5} < \Phi < 10^{-4}$	$10^{-2} < \Phi < 10^{-1}$
X	$10^{-4} < \Phi$	$10^{-1} < \Phi$

1.2.2 日冕物质抛射 (CME)

日冕物质抛射 (CME) 是由日冕扰动引起的大范围的物质和磁场有日冕向外突然抛射。

1971 年 12 月 14 日美国海军实验室的 OSO-7 (Orbiting Solar Observatory) 卫星首次观测到了 CME。1973 年美国国家航空和宇宙航行局的 Skylab 卫星则首先对 CME 进行了常规观测。随后 SMM (Solar Maximum Mission)、SOHO (Solar and Heliospheric Observatory) 等卫星也观测到了大量的 CME, 同时一些地面望远镜也对 CME 进行了观测。

日冕物质抛射的表现形态多种多样, 大致可以分为环状、泡状、云状、束流状、射线状、分离束流状等其它类型。一个类环 CME 结构通常包括亮外环 (或高密度泡)、被外环包围的低密度腔和腔内的有低密度物质构成的亮核 (爆发日珥)。

CME 的大小 (视角宽度) 可通过观测测量出来, 一般用 CME 两边缘的位置角之差来表示。CME 的视角宽度可从几度到几十度, 甚至达到 360° 。CME 的位置分布比较广泛, 研究表明, 大多数 CME 投影纬度分布在 $\pm 50^\circ$ 内。CME 的速度分布比较广泛, 可以从数 10 km/s 到 2000 km/s 以上, 中值速度为 450 km/s 左右。CME 的质量范围从 1×10^{14} 至 $4 \times 10^{16} \text{ g}$, 平均质量为 $6.2 \times 10^{15} \text{ g}$

量级；总能量大约为 10^{30} 至 10^{32} erg。

Gosling [1993] 在著名的“耀斑神化”中指出，形成灾害性天气的原因主要是 CME 而不是耀斑，这使人们开始重视 CME 的研究。CME 是剧烈行星际扰动的主要驱动源。CME 爆发时，大量的等离子体物质在短时间内从太阳低日冕抛出。当这些等离子体物质通过行星际空间传播到地球附近的行星际空间时就会扰动地球磁场，产生地磁暴和电离层暴等现象，造成空间天气的剧烈变化。严重时会引起卫星失控，威胁到宇航员的生命安全，袭击高纬度和极区附近飞行的高空客机，破坏通讯、电网以及导航。因此，CME 的研究与人类生活密切相关。目前对 CME 的研究已经成为太阳物理和空间物理中一个最活跃的领域。

1.3 太阳活动区磁场非势性与耀斑-日冕物质抛射

通常认为，太阳大气各种活动现象的能量，都来源于磁场能量的释放和转化。各种太阳爆发现象与储存在磁场中的非势部分能量的快速释放过程有关。太阳爆发所需要的能量，来自可供释放的磁场自由能，亦即总磁能与势场能之差。磁场对势场的偏离越大，自由磁能也越大，这就意味着将有更多可供释放的自由能储备。活动区磁场对势场的偏离称为非势性。一般而言，活动区磁场的非势性越强，爆发太阳活动的可能性越大。

那么活动区磁场的非势性是如何产生的呢？现在看来有三种可能：(1) 光球下面和光球中流体的各种运动（特别是扭绞和剪切运动）带动磁力线足跟运动，使磁场位形偏离势场；(2) 光球下面新磁流的升浮，使附近的原有磁场受到干扰，即使原有磁场为势场，受到新浮现磁流的扰动，也会形成非势场；(3) 新浮现的磁流本身就是非势的，这是光球下面流体运动和湍动造成的结果。上述三种情况都有一些观测实例 [Krall et al., 1982; Tanaka, 1991]，以及理论数值模拟的证实 [Low and Nakagawa, 1975; Sakurai, 1993]。

活动区磁场非势性的观测表现为活动区磁图有明显的缠绕（即横场呈现漩涡状结构）和剪切形态（横向磁场与纵场中性线接近平行）。活动区磁场的非势

性的表示包括剪切, 电流, 电流螺度、磁螺度以及自由磁能等来表示。

1.3.1 磁场剪切

自从 20 世纪 70 年代起, 磁场剪切在研究磁场位形变化与太阳爆发现象之间关系的研究中一直占有很重要的地位。该概念是 Zirin and Tanaka [1973] 在描述耀斑活动过程中, $H\alpha$ 纤维或暗条的缠绕现象时形成的。他们研究了 1972 年 8 月份一个产生耀斑, 发现耀斑后环的发展揭示了中性线上方磁力线的剪切的 结构, 底部的磁力线走向几乎和中性线方向平行, 上层的磁力线的走向越来越垂直于中性线方向。指出耀斑发生在由剪切场到势场的演化过程中。该耀斑产生于一个 δ 黑子, 而黑子生来就具有反转磁结构和强梯度, 他们还指出剧烈耀斑的出现是由于黑子运动引起的跨越中性线的强梯度以及沿中性线的强剪切。

Hagyard et al. [1984] 引入了剪切角这个概念来定量描述黑子磁场的非势程度, 剪切角定义为光球层的势场方向与光测到的横场方位角之差。她们发现 δ 黑子中的磁剪切角较大, 最大可达 85° , 而这个磁剪切角最大的地方恰恰是该活动区中 X 射线耀斑触发的地方。

Tanaka [1991] 通过光谱测量发现所研究的 δ 结构中一个被拉长的黑子横场高达 4300 高斯, 从而证实了被拉长的黑子以及 δ 黑子的强剪切和强梯度的中性线具有横场。

随后, Zirin and Wang [1993] 借助分光镜测量了 6 个 δ 黑子的横场方向和强度, 发现其中 5 个 δ 黑子剪切非常强, 横场方向和中性线方向平行。6 个 δ 黑子的横场场强都非常强, 和黑子本影场强相当, 最强达到为 3980 高斯。另外, 他们所研究的 δ 黑子最强的横场只局限在几条狭长的通道上, 这些强横场不会像纵场一样造成本影暗化, 而是对应于黑子的半影。

通过研究 Yohkoh 卫星的软 X 射线观测资料, Canfield [1999] 发现具有明显大尺度 S (或反 S) 形结构的 活动区比不具有大尺度 S (或反 S) 结构的 活动

区更倾向于产生 CME。这种大尺度 S (或反 S) 形结构表征着复杂的磁场结构。在双极活动区中, 这种 S (或反 S) 形结构沿着中性线, 揭示了中性线上方磁力线的纽绞和剪切的结 构储存着大量的自由能。

对比研究 Yohkoh 卫星的软 X 射线观测资料和源区矢量磁场, Falconer et al. [2001; 2002] 发现活动区磁场强横场强剪切的中性线部分, 和软 X 射线图像上增亮的软 X 射线环核心部分, 在形状和位置上有较好的对应关系。提出用活动区矢量磁场的强场强剪切中性线长度来测量活动区的非势性从而预报一个活动区是否将产生 CME。他们后来的研究 [Falconer et al., 2003] 发现从活动区的强场强梯度中性线长度可以替代强场强剪切中性线长度, 而且前者可以很方便的从活动区的纵向磁图得到。

这些观测结果都证实强剪切是耀斑高产黑子的重要特征, 对于我们理解和预报耀斑等剧烈太阳活动具有非常重要的意义。

1.3.2 电流

电流也是反映非势磁场结构的一个物理量。世界上首先观测研究耀斑 $H\alpha$ 发射与电流之间关系的的人是 Severny and Bumba [1958] 和 Moreten and Severny [1968]。他们研究了 30 个耀斑, 发现其中大约 80% 的 $H\alpha$ 初始增亮与电流的主要位置一致。随着光球矢量磁图观测的不断改进, 人们有望找到并建立起耀斑发生地点与电流之间更详细的时空关系。

在中美“日不落”联合观测中, Li et al. [1999] 利用大熊湖天文台和怀柔观测站的高时空分辨率的磁图及白光像, 对超级活动区 (NOAA AR 6891) 作了详细研究, 首次对电流演化与磁场、黑子运动和耀斑活动的时空联系进行了长时间跟踪研究。从观测中得到的主要结果是: (1) 该活动区的电流通常出现在正磁场区域而消失于负磁场区域; (2) 在强剪切中性线两边存在着一对相反极性的相距很近的集中电流系统。磁剪切度反映了中性线与电流系统的符合程度, 但最大的集中电流并不与强剪切区域一致; (3) 存在一些横场很强的区域, 虽磁剪

切很强但并没有耀斑发生；(4) 磁场演化（时间、空间）、黑子运动以及耀斑的产生都与纵向电流相对应。该活动区耀斑活动的日变化，并不与总电流密度有关，而是与剩余电流的变化密切相关。他们也首次从载有电流的磁流绳的角度解释了该 δ 位形群异常活动的动力学起源，并提出：太阳耀斑触发及其大小与两个因素有关，(1) 涌现剪切，即由磁流涌现产生的剪切；(2) 移动剪切，即由集中电流的移动产生的剪切。这两个因素是产生耀斑的能量。

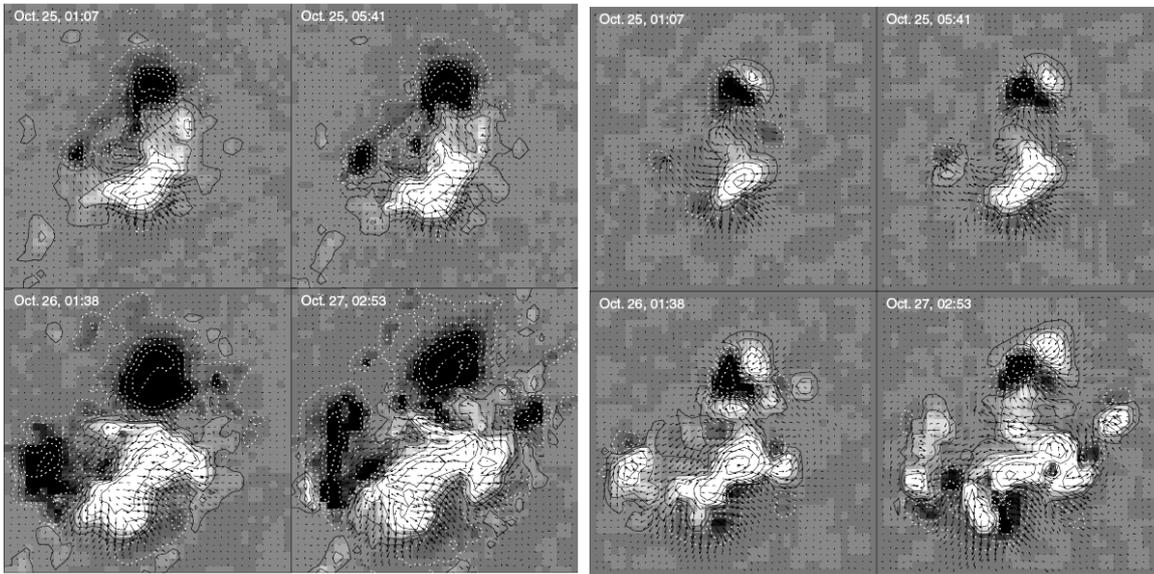
Zhang [2001b] 把活动区的纵向电流记为 $J_z = \frac{B}{\mu_0} \left(\frac{\partial b_y}{\partial x} - \frac{\partial b_x}{\partial y} \right) + \frac{1}{\mu_0} \left(b_y \frac{\partial B}{\partial x} - b_x \frac{\partial B}{\partial y} \right)$ ，指出该式中第一部分与磁场手征性有关，第二部分与磁场剪切和梯度有关。活动区磁场的剪切和电流都反映了活动区的一部分电流，尤其在中性线附近。活动区纵向电流与螺度有着内在的联系。

1.3.3 磁螺度和电流螺度

与磁场纽绞和剪切相比，磁螺度表征的非势性更为复杂，它实际上表征磁力线互相缠结的程度。人们也希望从螺度的角度来揭示耀斑事件中磁活动规律（磁能贮存，输运及释放）。磁场的螺度密度定义为 $h_m = \mathbf{A} \cdot \mathbf{B}$ ，其中 \mathbf{A} 为磁场 \mathbf{B} 的向量势， $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$ ，而 $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$ 。一定空间体积 V 中的总磁螺度为 $H_m = \int \int \int h_m dV$ 。同样的，可以定义电流螺度密度为 $h_c = \mathbf{B} \cdot (\nabla \times \mathbf{B})$ ，其中 $\nabla \times \mathbf{B}$ 代表电流 $\mathbf{J} = \frac{1}{\mu_0} (\nabla \times \mathbf{B})$ ，而稳恒条件下 $\nabla \cdot \mathbf{J} = 0$ 。一定空间体积 V 中的总电流磁螺度为 $H_c = \int \int \int h_c dV$ 。目前关于活动区螺度的研究中，大多选用 h_c 为观测和研究参量。然而由于向量磁场的精确测量目前仅限于光球层，所以迄今关于电流螺度的观测和计算大多限于它的纵向分量。

Bao and Zhang [1999] 试图从螺度的角度研究耀斑前后活动区光球磁场的非势结构有什么变化。通过研究活动区 $H\beta$ 耀斑和光球电流螺度的关系，他们发现一些区域及其附近的电流螺度的快速变化很可能是触发耀斑爆发的原因，但并没有发现电流螺度峰值与耀斑位置之间有何密切关系。电流螺度随时间的显著变化是耀斑多产活动区的特点，而耀斑过后电流螺度的量级并不都减小。

电流螺度的变化率可以较好的表征活动区磁场非势性。他们还指出研究耀斑对螺度的影响对于理解磁场结构和太阳大气的动力学过程非常重要。



a.

b.

图 1.3: a图: 1992 年 10 月 25 日至 27 日 NOAA 7321 矢量磁场的演化情况。等高线代表活动区纵向磁场强度分别为 $\pm 50, 200, 1000, 1800, 3000$ 高斯, 黑色实线代表活动区正极, 白色虚线代表活动区负极。箭头代表活动区横场。b图: 电流螺度的演化情况。等高线代表活动区电流螺度分别为 $\pm 0.0025, 0.01, 0.025, 0.05, 0.009, 0.15 \text{ G}^2\text{m}^{-1}$, 黑色实线代表活动区电流螺度为正极的部分, 白色虚线代表活动区电流螺度为负的部分。箭头代表活动区横场。[Zhang, 2001a]

Zhang et al. [2000] 研究了 1992 年活动区 NOAA 7070 矢量磁场和软 X 射线耀斑之间的关系, 发现 (1) 活动区磁场结构和磁力线的两个主要系统外形是一致的。两个系统具有相反的电流螺度符号。由于不同系统磁力线的相互作用, 软 X 射线增亮发生在两个系统的交界面附近。(2) 活动区的一系列耀斑是具有不同电流螺度符号的两个系统磁力线相互作用产生的。活动区中性线附近增亮

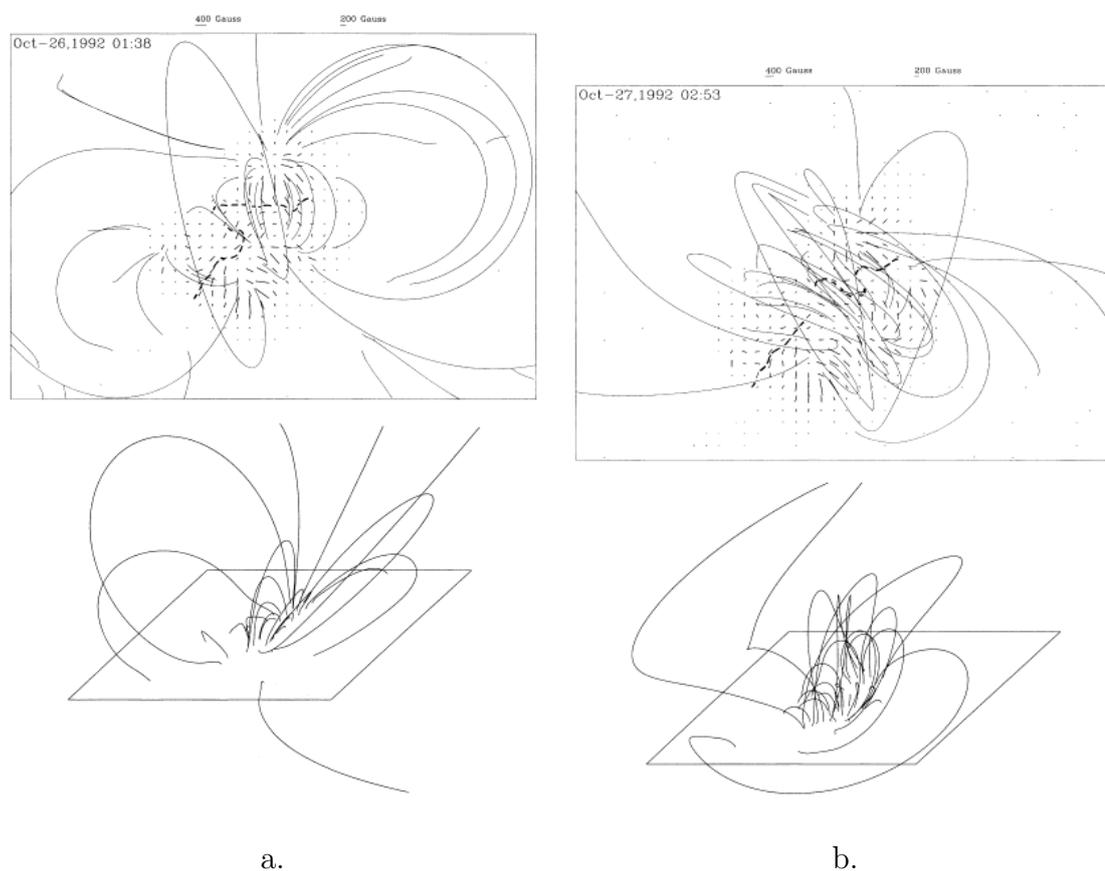


图 1.4: a图: NOAA 7321 10 月 26 日光球磁场无力场外推的到的光球表面上的磁力线, 下图是上图的侧面图。上图中短线代表光球表面横场, 粗虚线代表活动区中性线。b图: 同左图, 是 10 月 27 日的外推图。[Zhang, 2001a]

的小尺度软 X 射线环状结构可能反映了耀斑前的磁重联。活动区的大尺度磁重联可能是耀斑前低层大气中磁中性线附近强剪切场的磁重联触发的。

通过研究一个新浮 δ 活动区的磁场和电流螺度的演化, Zhang [2001] 发现 (1) 电流螺度随着磁场的演化而发生变化。电流螺度和磁螺度的关系比较复杂, 而电流螺度和线性无力场因子 α 及无力场假设下的磁能有着相对简单的关系。(2) 活动区表面电流螺度的形成与新浮磁流管有着一定的联系, 电流螺度密度随着高度剪切磁流管的浮现而增加。而且光球磁场线性无力场外推得到的磁力线空间静态分布及演化和软 X 射线形状及演化基本一致。太阳表面电流手

征性的拓扑改变可能是由浮现磁流管从大气底部带来的。活动区的磁场、电流螺度及无力场外推结果的演化如图 1.3-1.4所示。

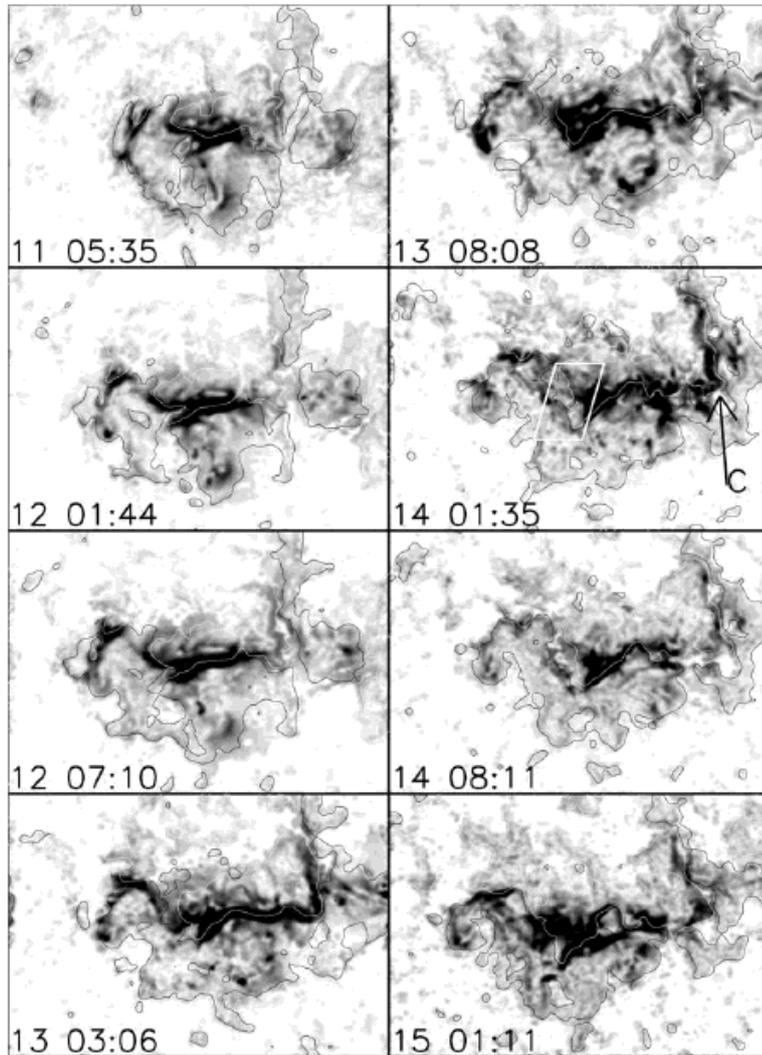


图 1.5: 超级活动区 NOAA 9077 非势能演化过程。方框中标出的区域在巴士底耀斑之前非势性磁能急剧减少, 该处对应耀斑的一个足点。该现象可作为太阳磁活动中“低层大气磁重联”的一个有力证据。[Deng et al., 2001]

利用怀柔基地的光球矢量磁场观测资料, Deng et al. [2001] 研究了 NOAA 9077 活动区磁场的非势性特征的演化情况, 发现“巴士底”耀斑爆发前几天 (1)

暗条下方关键点处磁倾角发生了从正到负的灾变；(2) 旧电流、旧纵向电流螺度系统瓦解，新电流、新纵向电流螺度系统形成；(3) 源区磁场衰减，光球表面自由磁能密度减小。这些显著变化发生在耀斑爆发前至少 9 小时，而且均发生在活动区显著磁对消的部分。观测到的活动区非势性的演化代表着磁能和磁复杂性从低层大气向日冕的不断传输。这种传输以及低层大气的缓慢磁重联可能对大耀斑爆发所需能量的积累起着重要作用。活动区非势能演化情况如图 1.5。

Liu and Zhang [2002] 研究了“巴士底”耀斑-CME 与活动区反极性螺度形成的关系。通过分析 NOAA 9077 δ 结构的电流螺度三天的演化情况，发现大耀斑前约 2 个小时的时候， δ 结构中的一个黑子 F4 稳定地转换了它的电流螺度手征性。他们指出螺度的反号变化会直接导致 δ 黑子致密结构的分裂，并指出这对于理解大耀斑过程中的 δ 黑子快速瓦解的原因有非常重要的意义。针对黑子的螺度反号他们还提出了一种新的黑子组成模型。该模型能很好地解释黑子螺度为什么会反号：通常，有两种螺度互为反号的、纵向磁场方向一致的细磁流管共存于同一个黑子中，特殊情况下它们成分比例的变化就会导致整体的平均螺度的变化。他们的重要研究结果如图 1.6-1.8 所示。

越来越多的研究表明，太阳表面被观测到的各种各样的图案在南北两个半球上各自呈现出一种手征性（左手系或右手系）为主导的扭绞，且与太阳活动周无关。

Seehafer [1990] 通过比较常 α 无力场外推得到的各种磁图，研究了活动区电流螺度符号问题。他发现 16 个活动区中除了两个以外，在北半球是负螺度，南半球为正螺度。Pevtsov et al. [1995] 通过采用线性无力场因子 α 作为纵向电流与纵向磁场之比，研究了 69 个活动区的局部螺度，得到的结果为，北半球有 75% 的活动区是负螺度，而南半球有 69% 的活动区是正螺度。

利用怀柔的 1988 - 1997 观测资料，Bao and Zhang [1998] 计算了 422 个活动区的光球电流螺度，并发现太阳北半球 84% 的活动区是负螺度，而南半球 81% 的是正螺度。经过仔细分析，Bao et al. [2002] 认为半球螺度符号的倾向性

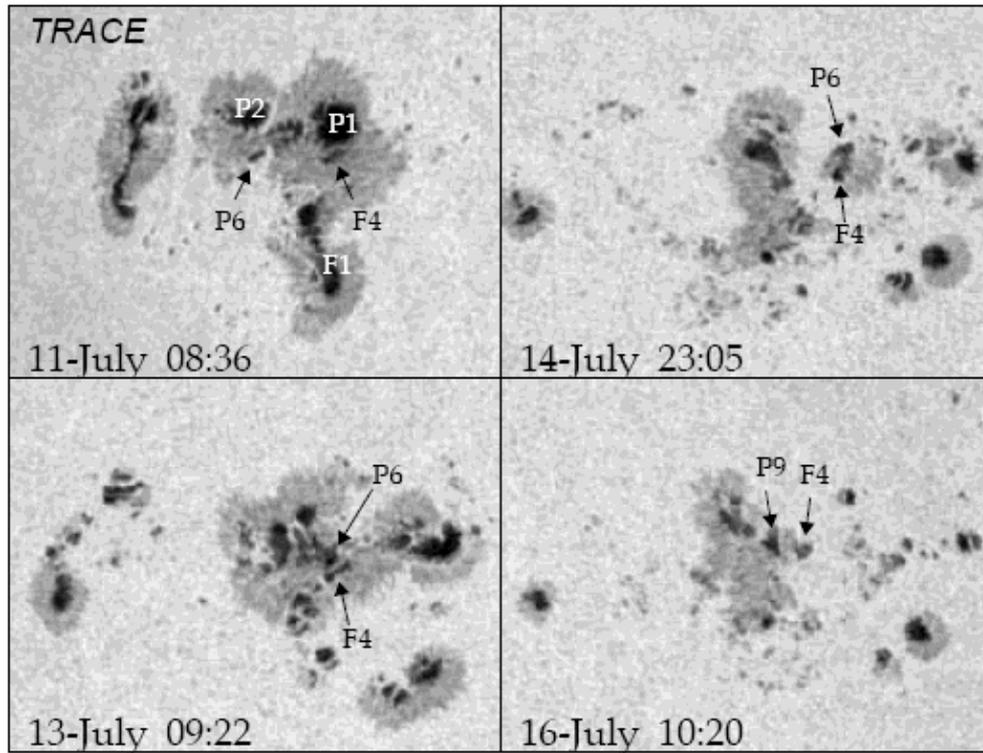


图 1.6: TRACE 白光 (5000 埃) 观测到的活动区 NOAA 9077 黑子群演化。2000 年 7 月 11 日时的主黑子为 P1、P2 和 F1。7 月 13 日黑子 F4 与 P6 直接从不同的半影中脱离, 相互组合成一个 δ 黑子。图中的“P”代表前导(正极)黑子,“F”代表后随(负极)黑子。图像视场大小: $3' \times 2.3'$ 。[Liu and Zhang, 2002]

可能与柯里奥利力的作用是分不开的。由太阳交叉自传引起的大尺度的光球运动对活动区电流螺度的贡献只会削弱上述半球螺度符号的倾向性。

另外, 他们 [Zhang and Bao, 1998; 1999] 还发现具有反转符号的活动区并非出现在太阳表面任意位置上, 一些活动区偏向于经度定位, 这些反符号的区域通常与相反极性的磁浮现有关。他们分析认为在这些区域中从对流层底浮现出来的磁流管具有很强的扭绞(强于该处的柯里奥利力), 而这种扭绞很可能不是由随意的扭绞运动引起的, 而是源于太阳大气底部的发电机。

为了探讨电流螺度与磁倾角是否相关, Tian et al. [2001] 并进一步研究了

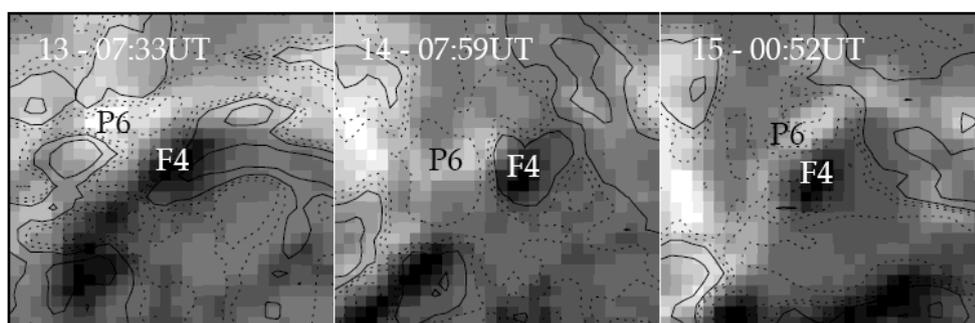


图 1.7: 3 天内的垂直电流演化。正极磁场用白色表示, 负极用黑色。实等高圈代表电流密度的向外运动分量大小, 而虚线则代表朝内的分量大小, 它们的等高值分别为: $\pm 2, 8, 20$ 安培/平方米。P6 和 F4 的位置在图中被精确地标出。视场大小: $0.9' \times 0.9'$ 。各幅图之间的灰度差异是由于视宁度的影响。注意 F4 区域附近的电流演化。[Liu and Zhang, 2002]

磁倾角与电流螺度参数 $B_{\parallel} \cdot \nabla \times B_{\parallel}$ 的关系。发现: (1) 北(南)半球约 60% 的活动区中, 正(负)倾角分别对应着负(正)电流螺度; (2) 不符合上述符号规律的活动区(约占三分之一)主要分布在一些特殊的经度区域, 这些区域也是大耀斑(M 级以上)多发地带。

Tian et al. [2002a] 研究了第 22、23 太阳活动周中超级活动区(即黑子面积、耀斑指数、产生的 10.7 射电流量、质子流量及地磁暴指数都较大的活动区)的磁场特性。发现 84% 的超级活动区的净磁通比较大; 68% 超级活动区具有反常的磁倾角; 84% 的超级活动区的遵守半球螺度法则, 且磁力线的纽绞和磁轴的纽绞程度都比较大; 大部分超级活动区分布在经度间隔约为 90° 四个活动经度带上。她们指出这四条经度带的产生可能是源于光球层底特殊的磁场环境。

1.3.4 磁浮现

强耀斑活动与磁流浮现的关系密切, δ 位形与动力学过程是产生大耀斑的

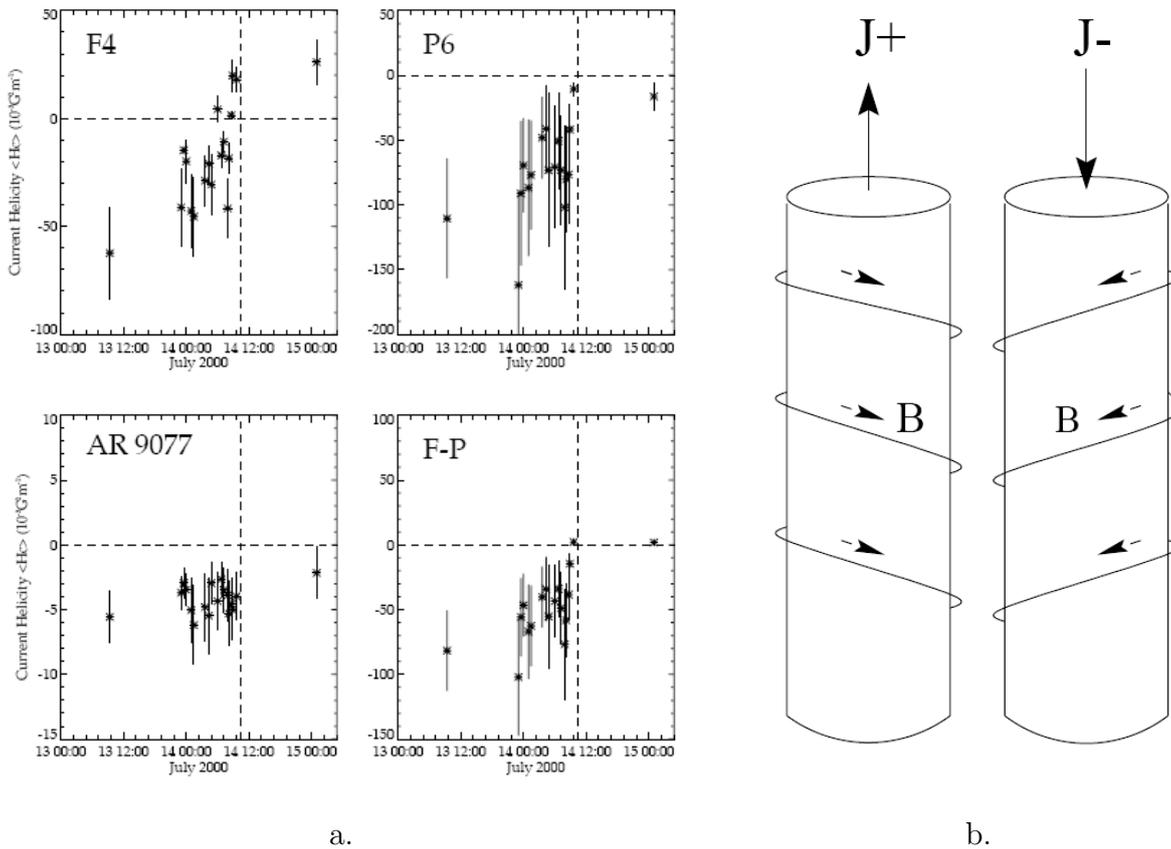


图 1.8: a图: 利用 18 幅矢量磁图对 NOAA 9077 所做的连续 3 天的电流螺度 h_c 的测量。一个小星代表一幅磁图的结果。不同磁图归算出各自的误差棒长短。上方两个方框分别是 F4、P6 的结果。下两个分别是整个活动区和 P6-F4 的 δ 区域的结果。图中垂直虚线是耀斑峰值时刻, 而水平虚线是指零螺度坐标线。b图: 黑子的磁流管模型。这两种类型的磁流系统被认为共存于一个黑子中。它们之间不会有磁重联发生。注意, 它们感生的电流方向相反。[Liu and Zhang, 2002]

重要条件。黑子的运动和旋转是大耀斑发生前的先兆现象。

通过研究 1972 年 8 月份一个耀斑事件, Tanaka and Nakagawa [1983] 估计了无力场中可释放的能量, 发现该耀斑释放的能量可以由黑子的自行运动积累起来, 并指出耀斑爆发可以看作是无功场由高能状态向较低能状态转变的一个能量释放过程。

Herdiwijaya et al. [1997] 考察了 276 个单个黑子的自行运动后, 指出 70% 的黑子快速飘移运动和耀斑的发生相关。

liu and Zhang [2001] 对活动区 NOAA 9077 的研究进一步证实了 δ 位形与动力学过程对产生大耀斑起着非常关键的作用。2000 年 7 月 14 日, 活动区 NOAA 9077 产生了当时太阳峰年最大的耀斑活动 (3B/X5.7), 并伴随有壮观的日冕物质抛射。它的磁场结构是 $\beta\gamma\delta$ 型。黑子群的形态和磁场都随时间有显著演化。他们精确测量了大尺度的黑子自行, 并比较了自行运动与 7 月 14 日大耀斑的关系, 发现: (1) 该活动区的特殊磁场分布和连续的快速分裂、重组, 是导致它始终保持高剪切位形的原因 (即 7 月 14 日大耀斑前后一致); (2) 其中的一组黑子的整体运动方向、暗条被切断和激活的地点、及耀斑核起源的地点有着很好的空间相关性; (3) 快速浮现磁流的运动特征显示, 黑子运动与大耀斑有着密切的联系, 磁流系统的连续浮现促使了 7 月 14 日的双带大耀斑的爆发。如果将所观测到的黑子光球自行运动看成是上浮磁流管与光球的空间截面移动的话, 那么磁流系统的内部拓扑结构对于理解黑子群的运动起着非常关键的作用。

Ishii et al. [1998; 2000] 认为耀斑的发生取决于 δ 位形 (或剪切) 的形成过程。他们详细研究了两个活动区 (NOAA 4201 与 NOAA 5395) 的自行, 发现浮现磁流束的缠绕结构应该是理解某些黑子群能产生大量耀斑的根本途径。而磁流管的缠绕大小, 即缠绕程度将决定耀斑的活动量级。 $\beta\gamma\delta$ 结构是最复杂的磁场类型之一, 它们的空间拓扑结构也应该很复杂。特殊结构磁流管的上浮会导致它在光球的足点, 即黑子的移动。活动区中性线附近的磁剪切程度若被增强, 更多的电流片将在这些不同磁流系统的分隔面。当系统瓦解时, 电流片内快速磁重联将释放大量的自由能。

Kurokawa et al. [2002] 试图构建简单的磁流管浮现模型来模拟活动区磁场演化及伴随的剧烈耀斑活动。通过详细研究 NOAA 9026 这个活动区的 δ 结构灾变演化, 作者构建了两个磁流管浮现模型来解释这个活动区的一系列演化特

征。这两个模型尤其是第二个能很好的展示扭绞磁绳的突然解缠和强耀斑的发生这二者之间密切的因果关系(图 1.9-1.10)。

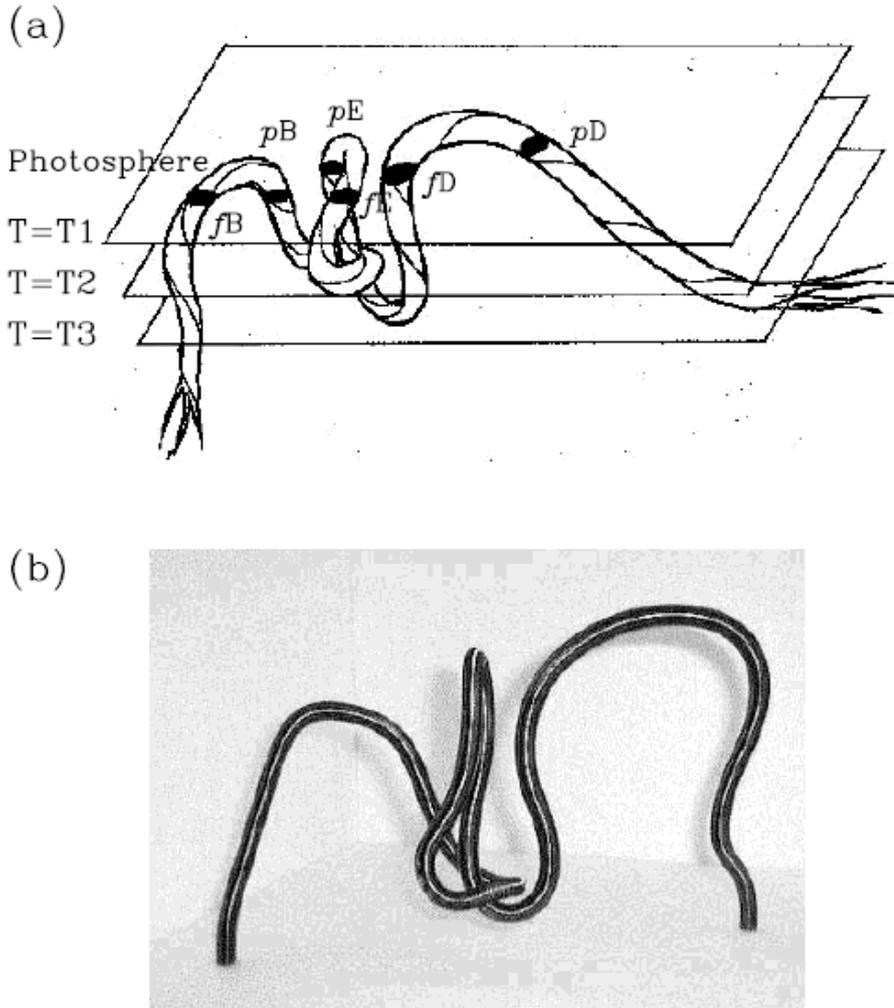


图 1.9: 扭绞磁绳的浮现过程模型 I。(a) 磁绳的不断浮现过程。标记为 T1、T2、T3 的三个平面代表三个连续时刻的光球表面位置,磁绳上的黑点代表其在 T1 时刻光球表面的切面,即黑子。(b) 一个柔软的管子做成扭绞磁绳的形状。[Kurokawa et al., 2002]

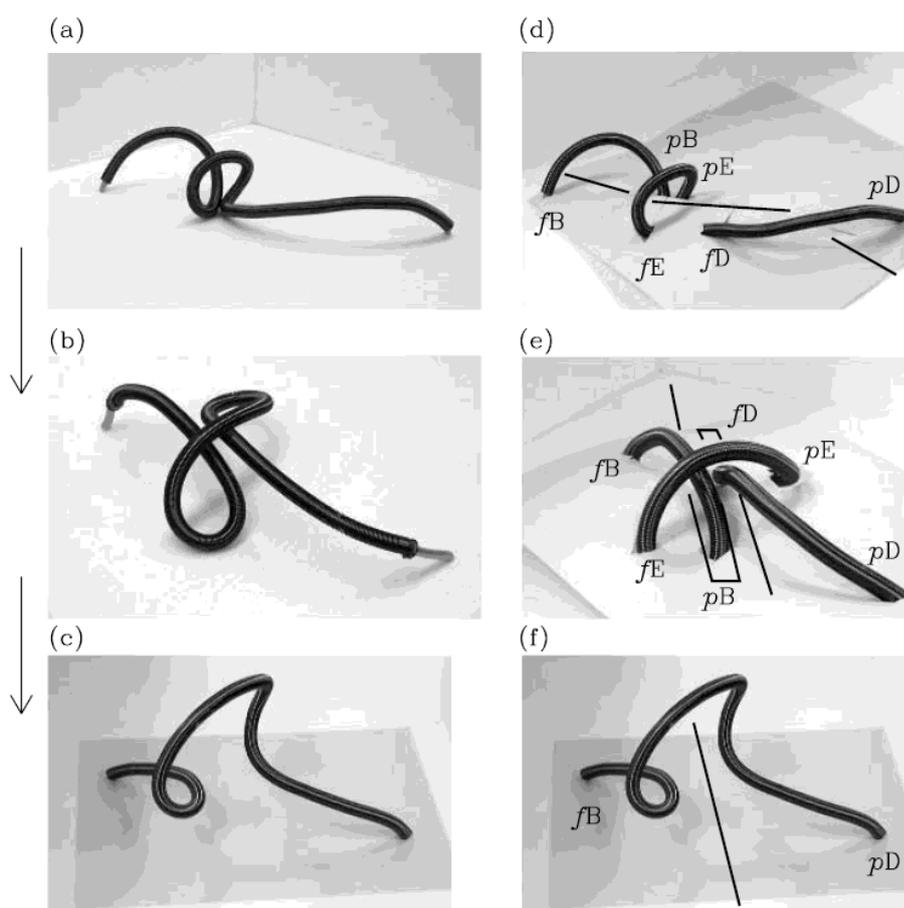


图 1.10: 扭绞磁绳的浮现过程模型 II。(a)、(b)、(c) 三附图展示了整个磁绳扭绞在浮现过程中的演化；(d)、(e)、(f) 三幅图展示了磁绳浮现过程中在光球表面的黑子和中性线位置。请注意 (e) 图中显著的之字形中性线。[Kurokawa et al., 2002]

1.3.5 磁场拓扑性

太阳磁场的拓扑结构与磁重联以及太阳耀斑有很密切的关系。Wang [1995] 和 Wang and Wang [1996] 假设了势场或线性无力场模型来研究二维外推磁场中奇异点。他们发现 $H\alpha$ 耀斑的起始增亮与鞍状点密切相关，并且 $H\beta$ 增亮趋向于沿二维磁元分隔带的扩展。Wang et al. [1999] 进一步将这种方法应用于观

测的横场，并发现了奇异点和与之有关的二维拓扑。他们指出，太阳耀斑的日冕软 X 射线发射与这种磁拓扑有很好的相关性。这些结果支持了太阳耀斑爆发时磁重联导致能量释放的结论。

1.3.6 δ 结构-最典型的非势特征

1960 年以前，黑子群的威尔逊山磁分类只包括 α , β , $\beta\gamma$, γ 这四种类型。1960 年 Kunzel [1960] 为威尔逊山磁分类加入了一种新的黑子类型 δ 黑子，即两块或者多块具有反极性的黑子本影共用一个黑子半影的磁场结构。并且作者首次指出这种黑子结构的耀斑产生率最高，这种黑子磁场结构对产生耀斑具有独特的重要作用。自此以后，人们开始广泛地研究这种能够产生大量耀斑的黑子群。

越来越多的统计研究表明具有 δ 结构的复杂活动区与耀斑有着密切联系。Warwick [1966] 证实了黑子的 δ 结构是产生质子耀斑的必要条件，发现大部分释放高能质子的大耀斑都发生这种 δ 结构中，并指出 δ 结构本身是一个非常反常的特征。这一反常特征可作为重大耀斑尤其是质子事件发生的相对可信的和早期可识别的征兆，对于耀斑及质子事件等空间天气具有非常重要的实际价值。Tanaka [1980] 研究了 1917-1974 年的 δ 黑子发现 90% 的 δ 黑子都伴随着大耀斑或者剧烈的地磁暴。Sammis et al. [2000] 等人统计了 8 年的活动区观测数据，发现几乎所有的强耀斑都发生在 $\beta\gamma\delta$ 型活动区里。

早期统计就已研究表明约为 40% 的 CME 与 $H\alpha$ 耀斑相关，并且 $H\alpha$ 望远镜观测到的耀斑位置处有明显的物质抛射的耀斑有 90% 都和 CME 相关 [Munro et al., 1979]。通过分析 1986 至 1987 年间由 SMM 纪录的 151 个 CME, Harrison [1995] 发现 CME 和耀斑之间紧密联系；但两者的性质特征没有明显的相关性，它们并非互相激发，而可能是日冕中同一物理过程的两种不同表现。该研究结果为随后的许多研究所支持。另外，很多个案研究也表明产生剧烈空间天气的大耀斑及快速日冕物质抛射和复杂活动区关系密切，如 NOAA 9026, NOAA

9077, NOAA 10486 等 [Liu and Zhang, 2001; 2002; Deng et al., 2001; Tian et al. 2002a; 2002b; 2003; Zhang, 2001a; Zhang et al., 2001; Zhang, 2004]。

可见 δ 黑子在活动区分型及与耀斑、CME 等剧烈太阳活动的关系中都占有特殊重要的地位。而 δ 位型本身就是一种最明显的非势特征，它与前面介绍的各种非势特征密切相关。

1.4 本文的目的和意义

太阳剧烈活动及其对人类生存环境的影响已经成为当代自然科学一个重大课题。发展定量描述太阳、行星际介质、地球磁层动力学过程对人类活动影响的实时预报能力是上一世纪以来长期未解决的基础研究课题之一。太阳活动预报直接与国防、航天、国家安全和经济发展相联系。定量地理解和预报太阳磁场的形成、演化和导致太阳剧烈活动的物理过程，定量地理解和预报太阳活动的条件和状态，成为太阳和空间科学领域最困难、最具挑战性也最能造福人类的基础研究课题。

太阳黑子群分类有助于研究不同类型黑子群与耀斑发生率之间的关系，对于太阳活动预报具有重要意义。然而迄今为止，作为太阳活动预报的基本因子之一的黑子群分类，一般采用形态分类法，没有关于黑子群位型定量分类的系统研究，这在一定程度上影响了太阳活动预报自动化的实现。

本文以研究量化的太阳活动区磁场位型分类及与剧烈太阳活动的统计关系为主题，在前人的工作基础上，细致的探讨了活动区磁场位型的定量分类法，应用定量分类方法，深入探讨了太阳磁场的结构演化及量化的太阳磁场结构与太阳耀斑和日冕物质抛射的统计关系，为开发新型太阳活动预报因子进行了有益的尝试，希望为太阳活动预报提供有益的参考。

第二章 活动区磁场形态的定量研究

2.1 引言

威尔逊山磁分类是 1919 年美国 Wilson 山天文台提出的按黑子群磁极性分类方法,这一分类方法对太阳黑子的研究颇具指导意义且一直沿用至今。但是,尚有一些问题是这种定性分类方法所不能解决的。例如不同的 δ 黑子之间千差万别;一个 δ 黑子的位形也不是一成不变的,那么如何来描述这些不同及演化呢?这就需要一种能够定量描述活动区磁场位型的方法来补充和完善已有的定量分类方法。

为了满足这种需要,Chumak and Chumak [1987] 提出一个结构参数(本文中称为有效距离参数)来定量地描述活动区磁场两极之间相互远离或者相互靠近的程度。这个参数将为定量研究活动区磁场位型演化研究,以及定量研究活动区磁场位型与太阳耀斑、日冕物质抛射等开辟新的思路。然而,关于这个参数的研究和应用却并不多。

本章将通过实际应用验证有效距离参数和威尔逊山磁分类方法的一致性。我们将用有效距离参数,总磁通和磁倾角三个参数综合的定量的研究几个不同类型活动区的演化情况,另外我们还将通过一些统计分析活动区磁场的三个参数与耀斑指数以及 CME 的速度之间的定量关系。

2.2 数据分析

SOHO/MDI 空间望远镜提供了高分辨的全日面纵向磁图,使用 1024×1024 的 CCD 探测器,MDI 全日面磁图的分辨率为 1.978 角秒。MDI 观测图像平均 96 分钟一幅。我们只取活动区位于日面中心附近 ($-45^\circ < l < +45^\circ$) 几天的资料。根据 Chae et al. [2001] 非线性图像处理方法,我们对所有的活动区磁图

都作了投影改正,其中也考虑并去除了较差自转效应。为了消除噪声同时保留有用的信息,比如新浮现活动区和衰减活动区的弱场,阈值取为 100G;参考 SEC 太阳活动周报 (<http://www.sec.noaa.gov/weekly/index.html>) 我们可以确定活动区的磁分类和耀斑指数;参考 SOHO/LASCO/CME 数据 (http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/index.html) 我们得到 CME 的速度。另外我们还参考了 Tian et al. [2003] 和 Zhou et al. [2003] 的文章来确定 CME 和活动区对应关系。

2.3 参数介绍

2.3.1 总磁通 (F_t)

总磁通是一个描述活动区尺寸的量,它关系着活动区可能产生多大能量程度上的太阳活动事件 [Giovanelli, 1939; McIntosh, 1990; Canfield et al., 1999; Tian et al., 2002a], 总磁通可通过下面的公式计算得到:

$$F_t = |F_s| + |F_n| \quad (2.1)$$

其中 F_s 和 F_n 分别表示活动区正负两极的总磁通。

2.3.2 磁倾角 ($Tilt$)

磁倾角这个可观测量可以提供光球层以下伴随着磁流管在太阳内部产生以及演化过程的相关信息。活动区的强环向场通常被认为是在太阳发电机的作用下,对流层底以下的强剪切层产生的。由于浮力不稳定性的作用,一旦环向场被带到对流层底部,这些环向场就会衰减,磁力线就会收缩而形成磁流管,随后这些磁流管就会以 Ω 形状浮出光球层表面形成黑子或者活动区 [Parker, 1955]。在浮出光球层的过程中,这些磁流管将会受到多种力的作用,比较典型的有柯里奥利力和湍动。这两种物理过程都会将它们的某些信息以扭绞和磁倾角的形式表现在不断上浮的磁流管上。至今已有很多这方面的观测和理论结果

[Hale et al., 1919; D' Silva and Choudhuri, 1993; Fan et al., 1994; Fisher et al., 1995; Longcope and Fisher, 1996; Nandy and Choudhuri, 2001; Wang and Sheeley, 2003; Holder et al., 2004]。磁倾角定义为活动区磁轴方向和当地纬线的夹角 [Tian et al., 1999]，本文中活动区每一个磁极的位置取以纵场强度密度加权的重心位置，活动区的磁轴为连接活动区正负两磁极重心位置的直线。活动区负极重心位置公式计算如下：

$$X_s = \sum (B_{si} \times X_{si}) / \sum B_{si} \quad (2.2)$$

$$Y_s = \sum (B_{si} \times Y_{si}) / \sum B_{si} \quad (2.3)$$

相应的，活动区正极的重心位置公式计算如下：

$$X_n = \sum (B_{ni} \times X_{ni}) / \sum B_{ni} \quad (2.4)$$

$$Y_n = \sum (B_{ni} \times Y_{ni}) / \sum B_{ni} \quad (2.5)$$

磁倾角可通过以下公式计算得到：

$$\tan(\text{Tilt}) = \delta y / \delta x \quad (2.6)$$

其中 δy 和 δx 分别是球面上活动区前导和后随黑子重心的卡林顿坐标之差。图 2.1 给出了第 23 太阳活动周磁倾角的分别在南北半球的坐标系。

2.3.3 有效距离参数 (d_E)

有效距离这个结构参数是 Chumak and Chumak [1987] 提出来的，Kononvich et al., [1999] 在理论上指出了有效距离与威尔逊山磁分类具有对应关系，但是他并没有将有效距离参数真正用于计算活动区磁场；Chumak and Zhang [2003] 以及 Chumak et al. [2004] 将这个参数真正应用到了活动区磁场，研究发现产生耀斑的活动区和没有产生耀斑的活动区的有效距离参数的分布有着本质的不同。他们先将活动区磁场以 50 高斯为步长分成一系列的场强范围，在每一个场

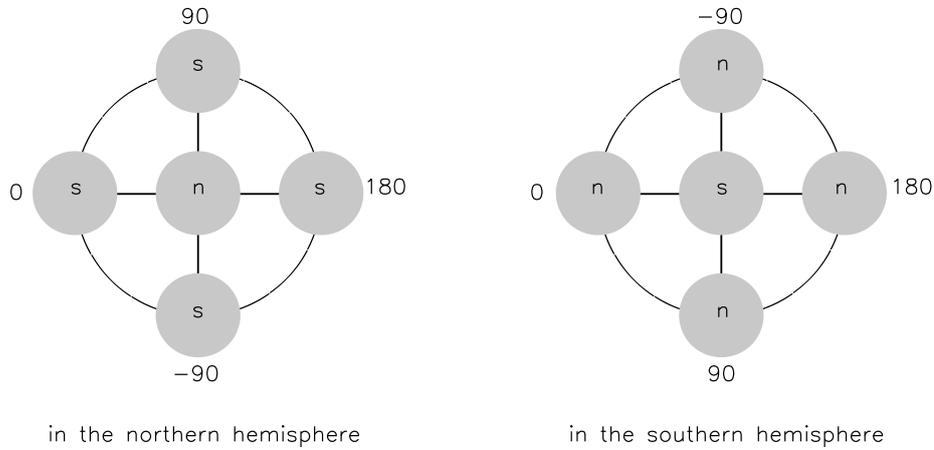


图 2.1: 第 23 太阳活动周 *Tilt* 的定义的示意图, N 和 S 分别代表活动区正极和负极以磁场强度加权的重心的位置。

强范围内计算有效距离参数 d_E 的值, 这样就得到了有效距离参数 d_E 在不同场强范围内的分布, 然后计算这个有效距离参数 d_E 在场强的分布的统计学的前四矩, 即平均值, 标准偏差, 峰度和偏斜度。跟他们的算法不同, 我们用一般意义上计算得到的有效距离 d_E , 即先给活动区磁场设定一个阈值 (100 高斯), 用高于这个阈值的所有的磁场强度密度来计算有效距离参数 d_E 。有效距离参数 d_E 可以通过以下公式计算得到:

$$d_E = (R_n + R_s) / R_{sn} \quad (2.7)$$

其中

$$R_s = (N_s / \pi)^{-1/2} \quad (2.8)$$

$$R_n = (N_n / \pi)^{-1/2} \quad (2.9)$$

N_s 和 N_n 分别是活动区负正两极的总面积。 R_{sn} 是活动区两极的纵场加权的重心之间的距离 (活动区两极的重心计算公式见 2.2-2.5 式)。

从几何意义上来讲, 这个参数可以定量地描述活动区磁场两极之间相互远离或者相互靠近的程度。图 2.2 给出了活动区有效距离参数 d_E 的一个示意图, 图中白灰两个圆分别代表一个活动区的正负两极。图 2.2 (a) 中两极分得比较开的活动区的有效距离参数 d_E 一般小于 1, 例如 β 位形的活动区; 图 2.2 (b) 中两极非常靠近的活动区的有效距离参数 d_E 一般大于 1, 例如 δ 位型的活动区。这就说明活动区两极的分布情况可以用有效距离 d_E 来粗略地定量描述。

2.4 基于有效距离参数 d_E 的活动区磁场定量分类法

我们实际分析了 24 个属于威尔逊山磁分类的不同类型活动区磁场, 结果如表 2.1 所示。从表中我们可以看到, 9 个 β 位型的活动区的有效距离参数都是小于 1 的; 2 个 $\beta\delta$ 型活动区的有效距离参数都是大于 1 的; 9 个 $\beta\gamma\delta$ 型的活动区有 8 个活动区的有效距离参数是大于 1 的; 4 个 $\beta\gamma$ 型的活动区就有一些不

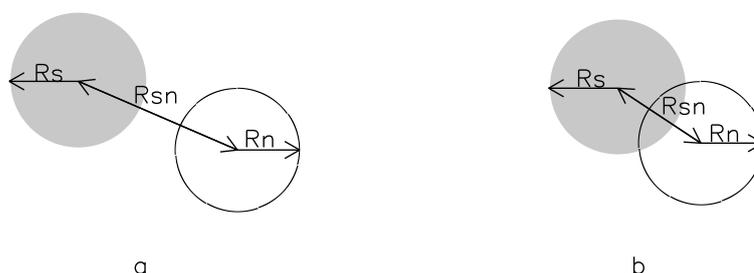


图 2.2: 活动区 d_E 示意图, 图中白圈代表活动区正极, 黑圈代表活动区负极。(a) 两极分开的活动区, 其 d_E 值小于 1; (b) 两极靠近在一起的活动区, 其 d_E 值大于 1。

确定性，其中有一个活动区的有效距离参数是大于 1 的，其它 3 个活动区的有效距离参数是小于 1 的。

可见 d_E 值的范围具有一定规律：活动区位型越复杂， d_E 值越大。从上面的分析结果中我们可以看到有效距离参数 d_E 给出的值和威尔逊山黑子磁分类是基本一致的，活动区磁场位型可用有效距离参数 d_E 来量化。由此，活动区磁场演化以及活动区磁场位型和太阳活动（例如活动区产生的耀斑及 CME 等）可以用有效距离参数 d_E 来定量的研究。

2.5 几个不同类型活动区的演化

本节将分析 5 个不同类型的活动区的演化情况：一个一般的 β 位型的活动区，一个正在发展的 $\beta\delta$ 位型活动区，一个新浮现且快速发展的 $\beta\gamma\delta$ 位型活动区，一个已经充分发展且在不断发展的 $\beta\gamma\delta$ 位型活动区，一个正在衰减的 $\beta\gamma\delta$ 位型活动区。图 2.3 - 2.7 分别给出了五个活动区磁场的演化情况，图 2.8 给出了对应于五个活动区的“有效距离-总磁通-磁倾角”演化情况，图中横坐标表示磁倾角，纵坐标表示有效距离参数，圆的面积对应于活动区的总磁通。对比活动区的磁场演化情况和这个活动区在“有效距离-总磁通-磁倾角”图中的演化情况，我们就用可以定量和定性相结合的方法研究活动区演化。

2.5.1 一般的 β 型的活动区 NOAA 10549

NOAA 10549 是一个一般的 β 位型的活动区，从图 2.3 中可以看到这活动区的磁场位型在几天的演化过程中一直保持简单的 β 位型。图 2.8 中这个活动区的有效距离参数 d_E 的值一直保持在 0.6 左右，最大变化幅度为 0.1；这个区磁倾角仅有几度的变化；圆大小表示的活动区的总磁通变化也不是很明显。

表 2.1: 对比 24 个活动区的有效距离 d_E 值和威尔逊山磁分类类型

NOAA	Date	Location	Mag. class	d_E
8097	22 Oct 1997	N16W14	β	0.4691
8872	18 Feb 2000	S29W11	β	0.5674
9269	18 Dec 2000	N14W06	β	0.7967
9387	24 Mar 2001	N08W07	β	0.7111
9404	01 Apr 2001	S06W04	β	0.6947
9432	20 Apr 2001	N08W06	β	0.8453
10043	28 Jul 2002	N12W13	β	0.7088
10050	29 Jul 2002	S07W06	β	0.8708
10549	06 Feb 2004	N14W09	β	0.6085
8100	02 Nov 1997	S19W12	$\beta\gamma$	0.7405
8210	02 May 1998	S17W22	$\beta\gamma$	1.4548
8759	13 Nov 1999	N10W07	$\beta\gamma$	0.9171
10314	15 Mar 2003	S13W14	$\beta\gamma$	0.5805
9165	15 Sep 2000	N14E01	$\beta\delta$	1.9179
10720	15 Jan 2005	N13W03	$\beta\delta$	2.0969
9026	07 Jun 2000	N20E03	$\beta\gamma\delta$	1.3343
9077	14 Jul 2000	N18W09	$\beta\gamma\delta$	2.1101
9393	29 Mar 2001	N17W18	$\beta\gamma\delta$	1.3226
9415	08 Apr 2001	S21E05	$\beta\gamma\delta$	2.4045
9632	26 Sep 2001	S19W08	$\beta\gamma\delta$	1.3873
10030	15 Jul 2002	N18W00	$\beta\gamma\delta$	0.9688
10484	23 Oct 2003	N04W00	$\beta\gamma\delta$	2.1133
10486	28 Oct 2003	S17E04	$\beta\gamma\delta$	4.6694
10488	28 Oct 2003	N08W04	$\beta\gamma\delta$	1.0391

2.5.2 正在发展的 $\beta\delta$ 型活动区 NOAA 10720

NOAA 10720 是一个正在发展的 $\beta\delta$ 型活动区。这个活动区在 2005 年 1 月 12 日至 17 日 6 天的演化情况如图 2.4 所示。该活动区在 1 月 12 日是一个简单的 β 位型，正极位于负极右下方。在后来的几天里，随着磁流管的快速浮现，活动区迅速增大，活动区两极相互靠近而后再相互挤压。磁极轴顺时针旋转。活动区发展成为一个 $\beta\delta$ 型。从图 2.8 中该活动区的演化示意图我们可以看出，在

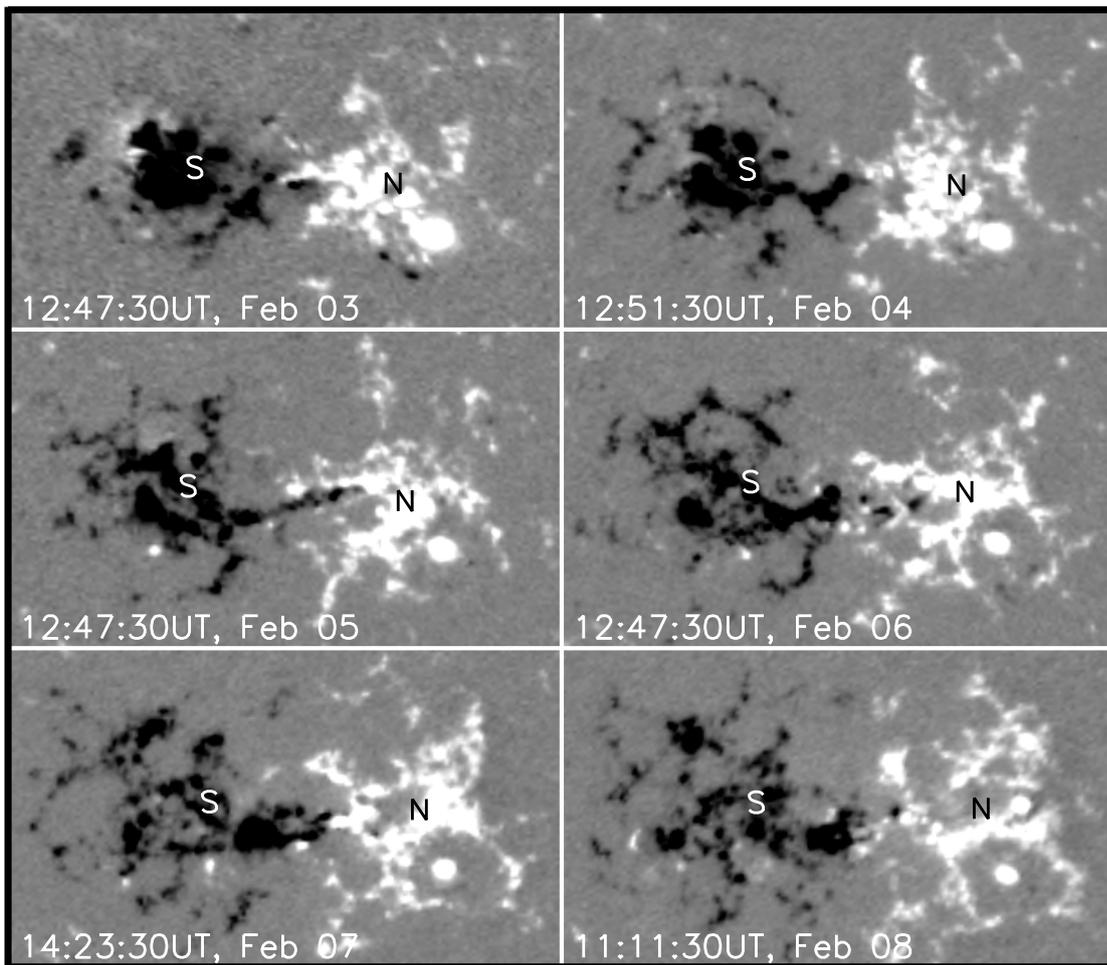


图 2.3: 基本稳定的 β 型活动区 NOAA 10549 在 2004 年 2 月 3 日至 8 日期间的纵向磁图系列。视场大小: $306'' \times 184''$ 。白(黑)块代表正(负)极纵场。N 和 S 分别代表活动区正极和负极以磁场强度加权的重心的位置。

这六天的演化过程中, 这个活动区的有效距离参数 d_E 迅速从 1.1 增大到 4.0。磁倾角 $Tilt$ 从 19° 增加到 67° 。圆大小迅速增大代表着活动区的总磁通 Ft 迅速增加。该活动区在这六天内产生了 3 个 X 级耀斑: 1 月 15 日 00:00 UT 的 X1.2, 1 月 15 日 22:25 UT 的 X1.2 以及 1 月 17 日 06:59 UT 的 X3.8。我们发现这几个耀斑级别是随着有效距离参数 d_E , 总磁通 Ft 以及磁倾角 $Tilt$ 的增加而增加的。

2.5.3 新浮现且快速发展的 $\beta\gamma\delta$ 型活动区 NOAA 10488

北半球的 NOAA 10488 是一个值得关注的新浮现且快速发展的 $\beta\gamma\delta$ 型活动区。这个活动区出现在第 23 太阳活动周, 27 号在靠近日面中心附近位置新浮现且迅速发展起来 [Zhang et al., 2003; Liu and Zhang, 2006]。活动区在 2003 年 10 月 26 日至 31 日 6 天的演化情况如图 2.5 所示。在浮现之初, 该活动区是典型的 β 型的, 后随黑子 F1 位于前导黑子 P1 的东南面。随后另外一对双极黑子 P2 和 F2 出现在 P1 和 F1 的东边, 此时整个活动区是由两组互相靠得很近的简单的 β 型活动区组成的一个 $\beta\gamma\delta$ 型活动区。随着磁流管的不断浮现, 活动区黑子的不断发展, 黑子 P2 和 F2 逐渐相互远离, 黑子 P2 和旁边的 F1 相互靠近。随着 P2 的不断长大以及 P2 和 F1 的不断靠近, P2 爬升到 F1 的上边, 形成该活动区主要的 δ 结构。可见这个 $\beta\gamma\delta$ 型活动区的形成是源于两个不同黑子群的相互碰撞的 [Zirin and Liggett, 1987]。另外, 在 10 月 28 日第一对双极黑子 P1 和 F1 上边形成了一个小的 δ 结构, 这个小的 δ 结构一直到 10 月 31 日还存在。在 6 天的演化过程中, 活动区的极轴即连接 N 和 S 的直线作顺时针旋转, 而后再稍稍沿逆时针方向旋转。从图 2.8 中该活动区的演化示意图中我们可以看到, 活动区 6 天的演化可以分为两部分: 早期演化过程中, 有效距离参数 d_E 在其值 0.9 附近基本保持稳定; 后期演化过程中, 有效距离参数 d_E 迅速增大最高达 1.88。活动区的磁倾角 $Tilt$ 从 -51° 逐渐演化至 -2° , 而后再逐渐演化到 -5° 。活动区的总磁通起初很小, 后来随着磁浮现迅速增大。

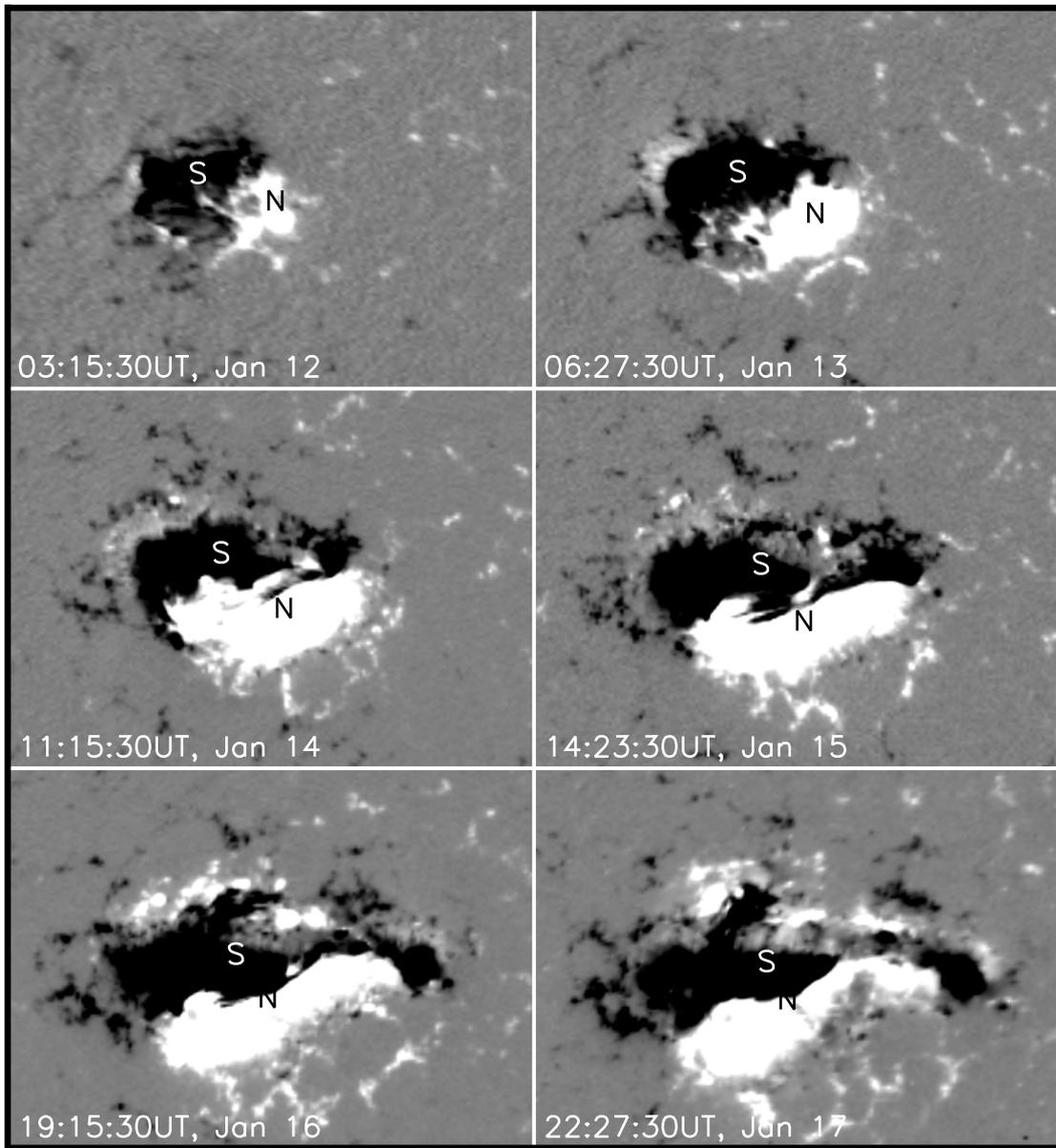


图 2.4: 快速发展的 $\beta\delta$ 型活动区 NOAA 10720 在 2005 年 1 月 12 日至 17 日期间的纵向磁图系列。视场大小: $338'' \times 242''$ 。白(黑)块代表正(负)极纵场。N 和 S 分别代表活动区正极和负极以磁场强度加权的重心的位置。

2.5.4 已经充分发展且在不断发展的 $\beta\gamma\delta$ 型活动区 NOAA 10484

活动区 NOAA 10484 一出现在日面上就已经是一个充分发展的 $\beta\gamma\delta$ 型活动区。该活动区在 2003 年 10 月 20 日至 26 日 7 天的演化情况如图 2.6 所示。10 月 20 日, 活动区的正极由 P1 和 P2 两部分组成, P1 位于活动区负极的

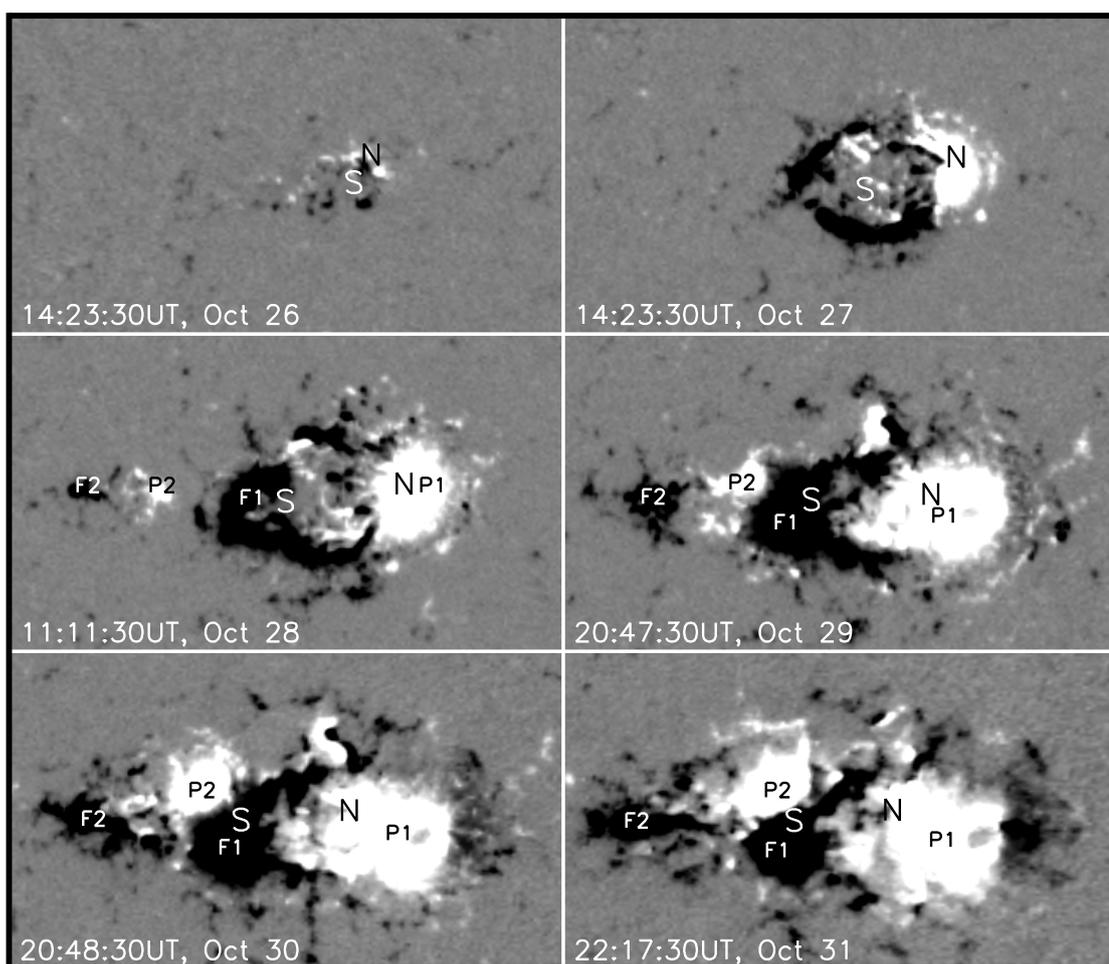


图 2.5: 新浮现且快速发展的 $\beta\gamma\delta$ 型活动区 NOAA 10488 在 2003 年 10 月 26 日至 31 日期间的纵向磁图系列。视场大小: $374'' \times 216''$ 。白(黑)块代表正(负)极纵场。N 和 S 分别代表活动区正极和负极以磁场强度加权的重心的位置。P1 和 P2 标示活动区前导部分的主要黑子, F1 和 F2 表示活动区后随部分的主要黑子。

西边, P2 位于活动区负极的南边。后来随着 P3 出现在活动区负极的东北边, 活动区的正极就由 P1, P2, P3 这三部分组成。此时, 可以看作活动区的正极包围着活动区的负极。我们认为这时活动区两极相互靠近相互渗透的程度增强了。这一特点表现为图 2.8 中 d_E 值的增加, 从 2 增加到 2.7。演化过程中, 活动区的负极的右上部分 (10 月 20 日图中) 持续沿逆时针方向推进最后运动到整个活动区的右下方, 这造成整个活动区的负极重心 S 不断向下移动; 而活动区的正极 P2 部分则不断衰减, 这造成整个活动区的正极中心 N 不断向上移动。结果整个活动区极轴的持续做逆时针旋转。这一特点在图 2.8 中表现为 $Tilt$ 值不断减小, 从 42° 到 -13° 。另外, 活动区的负极稍有增加, 正极则稍有衰减, 且二者增加或衰减的程度大致相当, 结果活动区的总磁通变化不大。相应的, 图 2.8 中代表该活动区的总磁通 Ft 的圆的大小变化不大。值得注意的还有, 在 10 月 26 日 17:21 UT, 一个 X1.2 级耀斑发生在这个活动区中。此时, 活动区具有反常的磁倾角 $Tilt$ 且有效距离参数 d_E 值达到 7 天中的最大。

2.5.5 正在衰减的 $\beta\gamma\delta$ 型活动区 NOAA 9026

NOAA 9026 是一个非常著名的活动区, 这个活动区产生了一系列耀斑和强烈的地球物理效应。很多科学家曾经研究这个活动区 [Kurokawa et al., 2002; Zhang, 2004; Wang et al., 2004]。该活动区在 2000 年 6 月 4 日至 10 日 7 天的演化情况如图 2.7 所示。这个活动区最显著的特点是 δ 结构的衰减到最后消失, 相应的活动区从 $\beta\gamma\delta$ 类型逐渐演化为 $\beta\gamma$ 类型。这一特点对应于图 2.8 中该活动区 d_E 值的逐渐减小。随着 δ 结构的衰减, 活动区的负极的重心向东稍有移动, 而活动区正极的重心稍向南移动, 结果整个活动区的极轴沿顺时针方向旋转。这一特点对应于图 2.8 中该活动区的 $Tilt$ 逐渐从 -5° 演化为 7° 。活动区的总磁通先稍有增加而后迅速减小。另外, 这个活动区在这 7 天内产生了 3 个 X 级耀斑, 分别是 6 月 6 日 13:00 UT 的 X1.1, 6 月 6 日 14:58 UT 的 X2.3, 以及 6 月 7 日 15:34 UT 的 X1.2。这些耀斑爆发时, 活动区的有效距

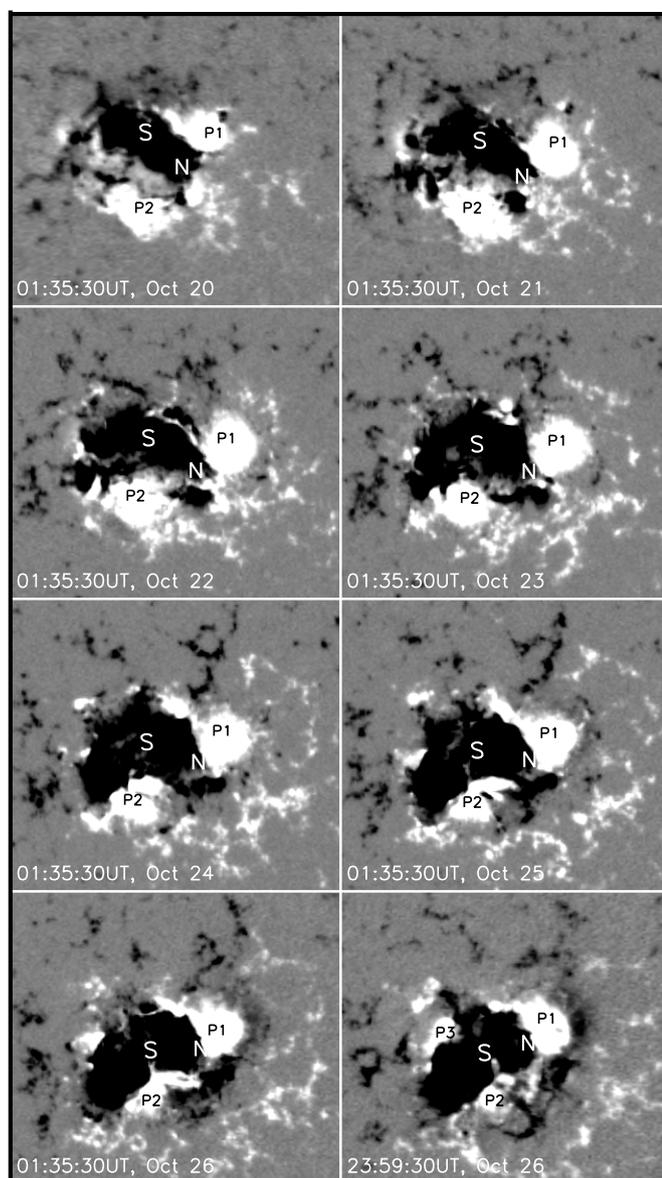


图 2.6: 已经充分发展且在不断发展的 $\beta\gamma\delta$ 型活动区 NOAA 10484 在 2003 年 10 月 20 日至 26 日期间的纵向磁图系列。视场大小: $316'' \times 282''$ 。白(黑)块代表正(负)极纵场。N 和 S 分别代表活动区正极和负极以磁场强度加权的重心的位置。P1、P2 和 P3 标示活动区前导部分的主要黑子。

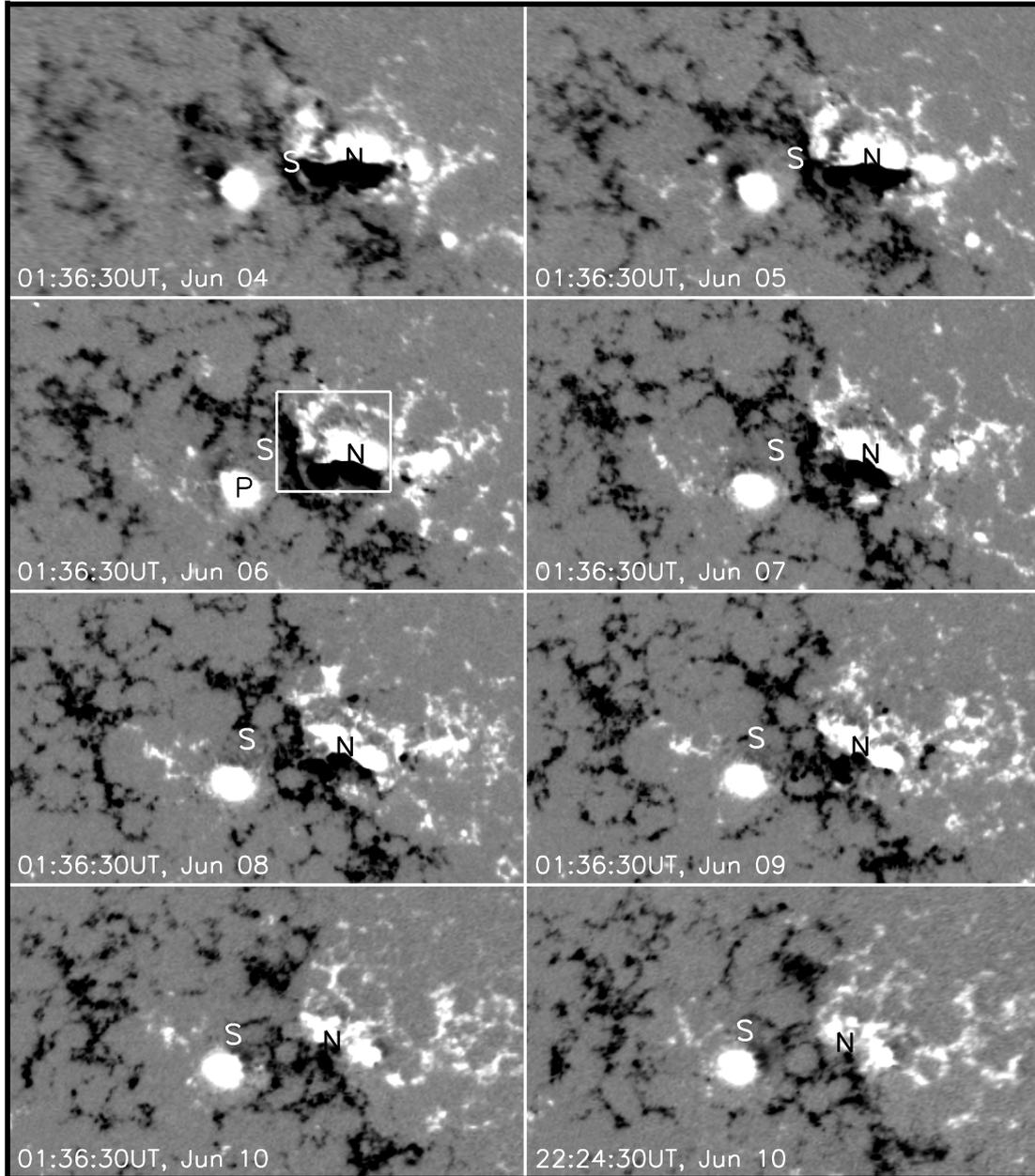


图 2.7: 正在衰减的 $\beta\gamma\delta$ 型活动区 NOAA 9026 在 2000 年 6 月 4 日至 10 日期间的纵向磁图系列。视场大小: $490'' \times 280''$ 。白(黑)块代表正(负)极纵场。N 和 S 分别代表活动区正极和负极以磁场强度加权的重心的位置。01:36:30 UT 时刻白框内是该活动区最主要的黑子, P 表示活动区中一个基本稳定的黑子。

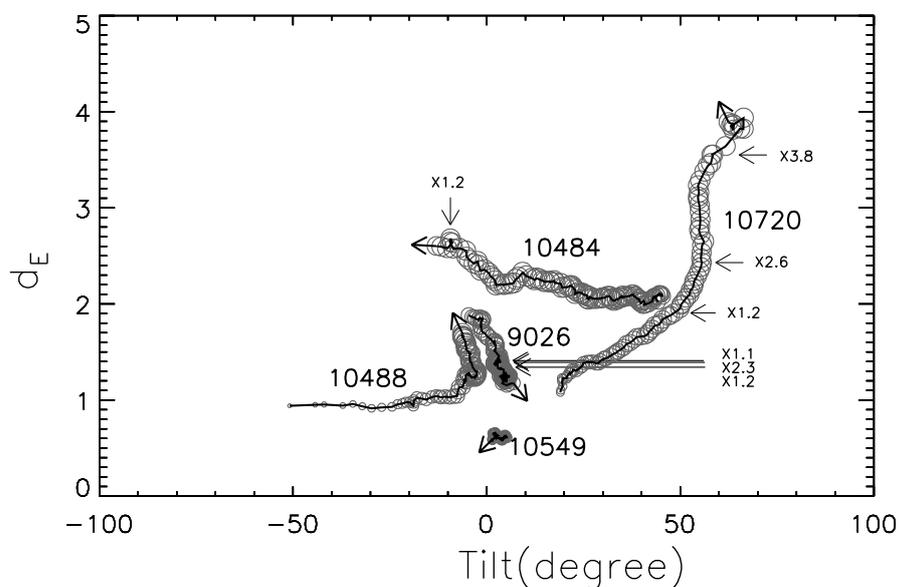


图 2.8: 五个活动区的演化情况。横坐标是 $Tilt$ 的值, 纵坐标是 d_E 的值, 圆的大小正比于活动区的总磁通 Ft 。连接一系列圆的带箭头的黑线代表活动区随时间的方向。各个活动区旁边横向或竖向的箭头表明 X 级耀斑的爆发。

离参数 d_E 值均大于 1, 具有正常的 $Tilt$ 值, 活动区的总磁通 Ft 较大。

2.6 活动区磁场参数与耀斑指数之间的统计关系

Sammis [2000] 研究发现几乎所有的大耀斑都发生在 $\beta\gamma\delta$ 位型的活动区中, 并且大活动区倾向于产生大耀斑。但是前者是一个更明显的趋势, 即活动区磁结构的类型和大耀斑活动关系更为密切。

有效距离参数 d_E 可以定量的描述活动区磁场位型, 它可以方便地定量描述和检验耀斑和活动区位形之间的相关性。我们选用了 43 个活动区为样本统计研究磁场参数和耀斑指数的相关性。

每个活动区的有效距离参数取该活动区在经过日面中心 5 天内的所有数据计算的有效距离的平均值, 即平均有效距离参数; 同样的, 每个活动区的总磁通取该活动区在经过日面中心 5 天内的所有数据计算的总磁通的平均值, 即平均总磁通; 每个活动区的磁倾角取该活动区在经过日面中心 5 天内的所有数据计算的磁倾角的平均值, 即平均磁倾角。每个活动区的耀斑指数是该活动区在日面中心附近 5 天内产生的所有 X、M、C 级软 X 射线耀斑的峰值流量之和 (单位是 $10^{-4}Wm^{-2}$)。

图 2.9 给出了 43 个活动区的耀斑指数与活动区磁场三个参数之间关系的统计结果。我们发现活动区的平均有效距离参数和活动区耀斑指数之间的相关很好, 线性相关系数达到 0.81。这表明剧烈的耀斑事件倾向于产生在有效距离参数 d_E 值大的活动区中。活动区的平均总磁通和活动区耀斑指数也有较好相关性, 线性相关系数为 0.50。活动区的平均磁倾角和活动区耀斑指数相关不好, 线性相关系数只有 0.01。

很显然, 我们的结果跟 Sammis [2000] 的结果非常一致, 相对于活动区总磁通, 活动区的类型跟耀斑指数的关系更加密切。这也从另一方面肯定了有效距离 d_E 这个参数的提出和应用是十分有意义的。

2.7 活动区磁场参数与 CME 速度之间的统计关系

CME 是太阳最剧烈的活动现象之一。研究已经发现 CME 和其它一些太阳活动, 如太阳耀斑, 日珥爆发和活动区等有密切的相关性 [Munro et al., 1979; Webb and Hundhausen, 1987; Gilbert et al., 2000; Zhou et al., 2003]。

为了研究 CME 和与产生 CME 活动区的磁场特征之间可能存在的定量关系, 我们研究了源于 25 个活动区的 49 个 CME。我们用 CME 伴生耀斑触发之前大约 1 小时的左右的 MDI 磁图来计算活动区的三个参数: 有效距离参数 d_E , 总磁通 Ft 和磁倾角 $Tilt$ 。

图 2.10 给出了 CME 速度和 CME 相关活动区的三个参数 (d_E , Ft 和 $Tilt$) 之间的关系。我们发现活动区的有效距离参数 d_E 和 CME 速度相关较好, 线性相关系数达到 0.64。这表明源于活动区的 CME 中, 快 CME 倾向于产生在复杂活动区, 即有效距离参数 d_E 值大的活动区中; 而慢 CME 倾向于产生

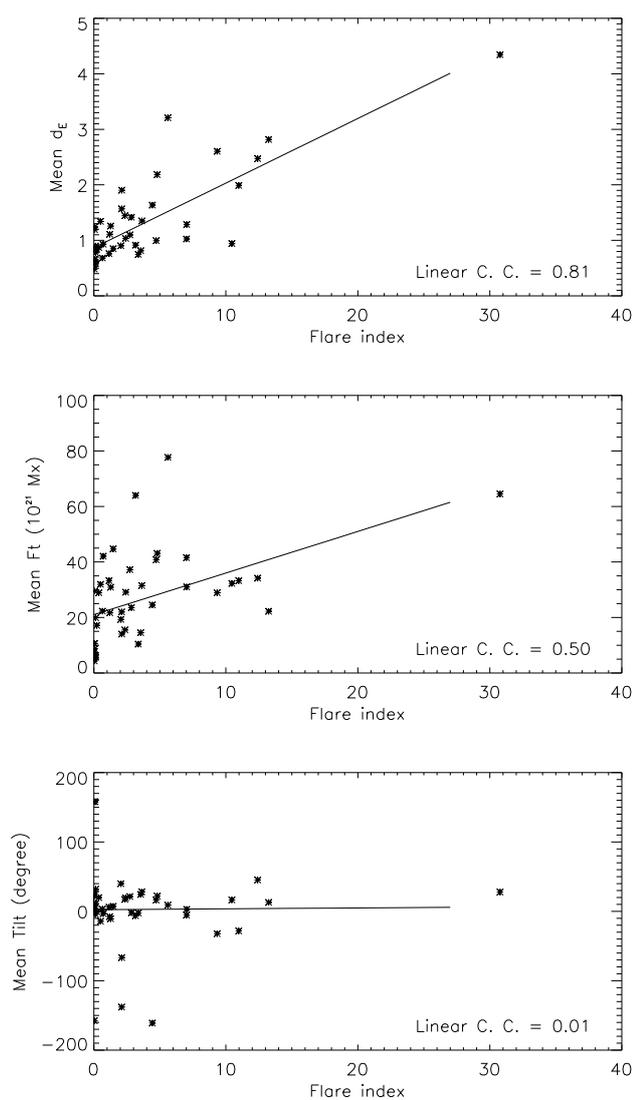


图 2.9: 活动区三个参数分别和耀斑指数的统计关系。每一幅图中曲线为对所有数据点的最小二乘方线性拟和线。

在相对简单活动区，即有效距离参数 d_E 值小的活动区中。活动区的总磁通 Ft 和 CME 速度的相关性不太好，线性相关系数为 0.39。活动区的磁倾角 $Tilt$ 和 CME 速度相关不好，线性相关系数只有 -0.07。

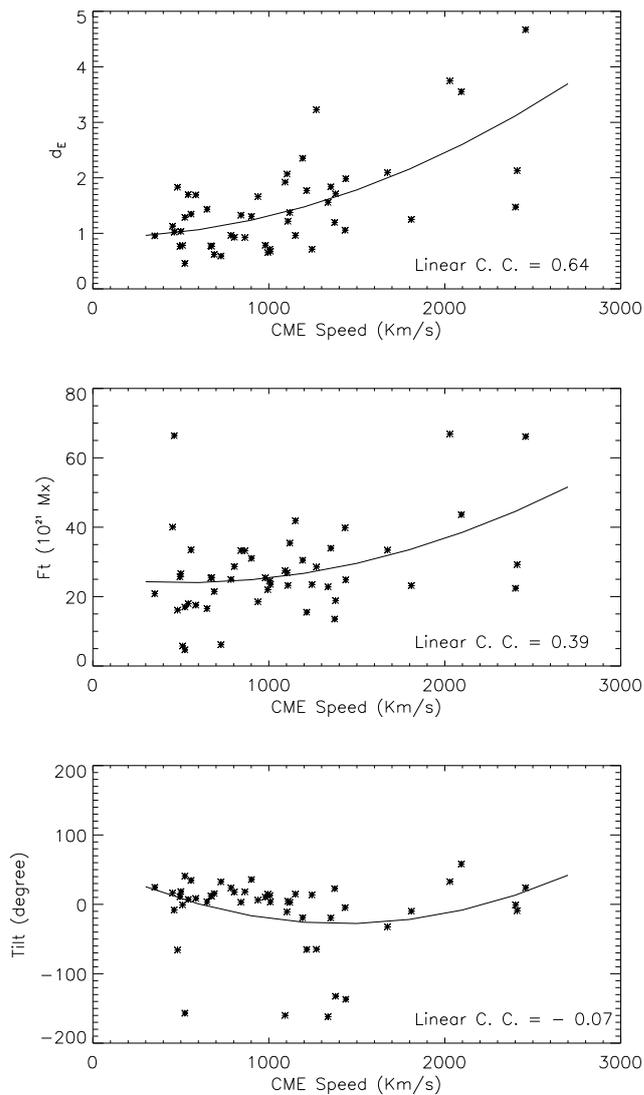


图 2.10: 活动区三个参数分别和 CME 速度的统计关系。每一幅图中曲线为对所有数据点的最小二乘方线性拟和线。

2.8 讨论

视场的选取可能会影响活动区各参数的计算结果,尤其是像 NOAA 9026 这样复杂的活动区。研究这个活动区时,太阳物理学家们选择过大小不同的视场。Falconer et al. [2002; 2003] 在研究活动区的 CME 产生率与描述活动区非势性参数之间的相关性时,对于该活动区只选取了图 2.7 中 6 月 6 日白色方框所包括的区域。Tian and Liu [2003] 在研究活动区净磁通的减少和重大耀斑、CME 事件之间的关系时采用了图 2.7 的视场。Zhang [2004] 指出如果基于整个北半球算得的该活动区的磁倾角 *Tilt* 则不是反常的,他还指出由活动区磁场衰减的增强网络场应该包含于整个活动区之内。NOAA 9026 是由旧的相对稳定的部分和新的快速发展的部分这两部分磁流管构成的。旧的相对稳定的部分不仅应该包括黑子 P,也应该包括随后的极性相反的增强网络场。新的快速发展的部分为上述旧的磁结构附近的快速发展又迅速衰减的 δ 结构。两部分磁流管混合在一起,这可能源于太阳内部与太阳发电机机制相关的复杂的过程 [Kurokawa et al., 2002]。

样本选择的不同可能会带来不同统计结果的差异。Shi and Wang [1993] 发现超过 95% 的 X 级耀斑发生在具有 δ 结构的活动区中,而 282 个 δ 黑子中只有 23% 产生了 X 级耀斑。在我们所用的 43 个样本中,有 27 个活动区具有 δ 结构,其中 19 个活动区产生了 X 级耀斑。X 级耀斑是否产生于 δ 结构的活动区是 Shi and Wang [1993] 研究中所关注的,而我们将研究重点放在了活动区的磁结构复杂程度和这个活动区的耀斑指数之间的关系上。例如,假设两个 δ 结构的活动区都产生了 X 级耀斑,其中一个活动区产生了一个 X 级耀斑,而另一个活动区产生了几十个 X 级耀斑,这两个活动区在 Shi and Wang [1993] 的研究中是同等对待的,而它们在我们的研究中则是区别对待的,后者很可能具有较高的耀斑指数和较复杂的磁结构。我们的研究结果是与大耀斑倾向于产生于复杂磁结构的活动区这个一般趋势相一致的。

另外需要指出的是,浮现位置比较靠近两组简单的 β 结构黑子,即使它们之间没有明显的相互作用,也很可能被威尔逊山磁分类认为是一个 $\beta\gamma$ 黑子,此时可能会引起有效距离参数 d_E 和威尔逊山磁分类的不一致。

2.9 结论

基于 Chumak and Chumak [1987] 提出的参数,我们验证了活动区有效距离参数 d_E 和威尔逊山次分类的一致性,提出了基于有效距离参数 d_E 的活动区磁场定量分类法。随后,结合有效距离参数 d_E 与另外两个参数总磁通 Ft 、磁倾角 $Tilt$ 定量研究了几个活动区的演化、活动区磁场参数与耀斑指数、CME 的速度的统计关系。具体结果如下:

(1) 通过研究 24 个属于威尔逊山磁分类的不同类型的活动区的有效距离参数 d_E , 我们发现活动区的有效距离参数 d_E 值与活动区的威尔逊山磁分类基本一致。而且跟威尔逊山磁分类比较起来,有效距离参数 d_E 是一个非常有用的参数,它可以粗略地量化活动区的磁场结构。由此活动区的磁场结构的演化,活动区磁场结构与其它太阳活动,例如耀斑, CME 等的相互关系都可以得到量化。

(2) 通过分析五个不同类型不同发展阶段的活动区的磁场演化情况,我们发现活动区的磁场结构演化可以用有效距离参数 d_E , 总磁通 Ft 和磁倾角 $Tilt$ 这三个参数从不同侧面定量的描述,尤其有效距离参数 d_E 可以定量的描述活动区 δ 结构的演化。活动区的 δ 结构发展的时候有效距离参数 d_E 增加,活动区的 δ 结构衰减的时候有效距离参数 d_E 减小。

(3) 研究了 43 个产生耀斑的活动区。统计研究表明,跟总磁通 Ft 和磁倾角 $Tilt$ 比较起来,有效距离参数 d_E 与活动区的耀斑指数有很好的相关性。大耀斑倾向于发生在具有复杂磁场结构,即有效距离参数 d_E 值大的活动区中。这

与 Sammis [2000] 的研究结果相当一致。

(4) 研究了 25 个产生 55 个 CME 的活动区。统计研究表明, 跟总磁通 Ft 和磁倾角 $Tilt$ 比较起来, 有效距离参数 d_E 与活动区产生的 CME 速度有较好的相关性。快速 CME 倾向于发生在具有复杂磁场结构, 即有效距离参数 d_E 值大的活动区中。

以上结果表明, 有效距离 d_E 这个参数具有非常重要的意义。它不但可以量化活动区磁场结构, 还可以为预报耀斑 CME 等激烈太阳活动提供有价值的参考。

第三章 产生耀斑-日冕物质抛射 (CME) 活动区的磁特性 与CME速度

3.1 引言

CME 是太阳上最剧烈的活动之一。CME 爆发时,大量等离子体从太阳低日冕中抛出,并且释放出巨大的能量。特别是快速全晕 CME 可以引起空间天气的剧烈变化,例如扰动地球磁场,产生地磁暴和电离层暴等。研究发现大部分对地 CME 触发自活动区 [Zhou et al., 2003],那么弄清楚什么样的活动区会触发快速 CME 将对于空间天气预报具有重要的意义。

通过对活动区磁场长期观测,人们很早就注意到产生 CME 的活动区通常具有全球非势性结构特性 [Moore and LaBonte, 1980; Moore et al., 1997; 2001; Canfield et al., 1999]。Falconer et al. [1997; 2001] 基于活动区的矢量磁场资料发现,磁剪切、磁扭绞等参数可以用来描述活动区的全球非势性。然而分析矢量磁场资料不可避免地要遇到一些困难,例如定标问题,180 度不确定性问题等,另外一般的矢量磁场望远镜视场有限,无法观测大活动区。相对于矢量磁场资料,传统的视向磁图更简单完备,到目前已经积累了数十年的资料,适合用来连续一贯的监测太阳磁场活动。如果可以从视向磁图中得到某些参数来有效的描述活动区磁场非势性,这将是非常有实际意义的。

利用怀柔矢量磁场资料,Zhang [2001b; 2006a] 研究了 NOAA 6659 的矢量磁场,发现活动区磁场的剪切和梯度都是活动区电流的一部分,尤其是在磁中性线附近。Hahn et al. [2005] 等研究了 29 个耀斑相关的光球矢量磁场及相应的 $H\alpha$ 资料,发现扭绞的梯度在耀斑爆发活动中起重要作用。Wang et al. [2006] 等研究 5 个产生大耀斑的著名活动区,发现比起磁剪切,磁梯度可以更好的预

报活动区的某个部分会产生耀斑。因为磁梯度可以很方便的从传统的视向磁图中得到,所以在 CME 预报方面,磁梯度将是一个非常可靠的参数,可以替代磁剪切。通过研究 17 组矢量磁场数据, Falconer et al. [2003] 发现强场强梯度中性线长度 (length of strong field and strong gradient main neutral line) L_{sg} 是一个可以从视向磁场得到的,可以量化活动区磁场非势性的重要参数。然而到目前为止,还没有人研究产生 CME 的活动区的强场强梯度中性线长度 L_{sg} 和 CME 速度之间的关系。

我们前面的研究发现有效距离参数 d_E 可以量化活动区磁场复杂性,从而可以用来定量研究活动区磁场演化,以及定量研究活动区磁场复杂性和太阳活动之间的关系。本章我们将着重研究产生耀斑-CME 的活动区。我们将研究样本扩大到 86 个 CME,这些 CME 源于 55 个活动区而且全部触发于活动区处于日面中心附近。这个新扩大的活动区样本包含从 1997 到 2005 年几乎所有重要的源于日面中心附近活动区的 CME 爆发事件。在这项工作中仍然用到了前面用过的三个参数总磁通 F_t , 磁倾角 $Tilt$ 以及有效距离参数 d_E , 而且在计算前三个参数时,我们仍然取阈值取为 100 G。另外,还增加了第四个参数强场强梯度中性线长度 L_{sg} 。我们将研究四个参数之间的关系,以及 CME 速度与 CME 伴生耀斑强度之间的关系。

3.2 资料选取与处理

我们只选取位于日面中心附近 ($-45^\circ < l < +45^\circ$) 的产生 CME 的活动区磁场。从 Tian et al. [2003], Zhou et al. [2003] 以及 Moon et al. [2005] 的文章的 CME 列表中,我们挑选出符合以上条件的 CME。另外,一些样本的得到还参考了 SEC 太阳事件周报和 CME 列表。我们最终得到了源于 55 个位于日面中心附近活动区的 86 个耀斑-CME 事件。活动区纵向磁图从 SOHO/MDI 的 96 分钟得到。我们不用耀斑爆发时刻附近的磁图,因为根据 Moon et al. [2002] 的研究结果磁螺度峰值会在耀斑峰值前后 20 分钟内发生改变。所以我们最终

选用的磁图时间是在耀斑爆发之前最少 25 分钟最多 96+25 分钟的磁场资料。比如, 当一个耀斑初始正好发生在一幅磁图采集时刻, 或者这幅磁图采集时刻之后的 25 分钟之内, 我们就采用前一幅磁图。

根据 Chae et al. [2001] 等非线性图像处理方法, 我们对所有的活动区磁图都作了投影改正, 其中也考虑并消除了较差自转效应。最后我们得到 86 幅与 CME 相关的活动区纵向磁图。

3.3 强场强梯度中性线长度 (L_{sg})

中性线将活动区纵场的相反极性的部分分开, 强梯度强剪切经常出现在活动区中性线附近, 大量研究表明恰恰是这些地方会频繁的产生耀斑 [Zirin and Liggett, 1987; Zirin, 1988; Hagyard and Rabin, 1986; Hagyard, 1988; Zhang et al., 1994; Zhang, 2001]。强场强梯度中性线长度 L_{sg} 是 Falconer et al. [2003] 年提出的一个表征活动区全球磁场非势性的参数, 这个参数指活动区磁场的主要中性线上由活动区纵场外推所得势场的横场较强 (>150 G) 并且纵场的横向梯度较强 (>50 G/Mm) 部分的长度, 强场强梯度中性线长度 L_{sg} 可以从纵向磁图中得到。Falconer et al. [2003] 发现活动区磁场的强场强梯度中性线长度 L_{sg} 和活动区的 CME 的产生率有强的相关性, 并且指出这个参数将对 CME 的预报提供切实可行的帮助。他们还强场强梯度中性线长度 L_{sg} 定义了一个阈值, 认为强场强梯度中性线长度 L_{sg} 大于 36, 000 Km, 也就是大约 50 角秒之后活动区很可能产生 CME。

计算强场强梯度中性线长度 L_{sg} 时, 第一步需要从活动区纵向磁图中确定中性线的位置, 然后取中性线上势场的横场大于 150 G 并且纵场的横向梯度大于 50 G/Mm 部分的像素长度。如果得到的中性线上有的部分宽于 1 个像素, 那么一部分像素将被删掉以确保最终计算的中性线长度为一个像素宽。最后根据每个像素对应太阳上的长度和总的像素个数就可以得到强场强梯度中性线长度 L_{sg} 的长度。为了简单起见, 本文中强场强梯度中性线长度 L_{sg} 取角秒为单

位。

3.4 举例说明

图 3.1 给出了一个典型事件的相关数据。NOAA 10720 活动区 2005 年 1 月 17 日产生了一个 X3.8 耀斑，这个耀斑触发于 06:59 UT，09:52 UT 达到最大流量，并于 10:07 UT 结束。伴随着这个耀斑，爆发了一个速度为 2547 Km/s 的快速 CME，CME 前沿第一次出现在 SOHO/LASCO C2 的时间为 09:54 UT (图 3.1 左上图)。我们取 06:24 UT 时刻的 MDI 96 分钟磁图 (约 X3.8 耀斑触发之前的 35 分钟)，做投影改正及较差自转之后得到 NOAA 10720 的纵向磁图。然后用得到的纵向磁图来计算这个活动区磁场的 4 个参数。四个参数中，磁倾角 $Tilt$ 和有效距离参数 d_E 的计算都用到活动区正负两极的以磁场加权的重心，图中标记为 'S' ('N') 的点为活动区负 (正) 极重心。图 3.1 右上图中，虚线 b-o 为联结活动区正负两极重心 'N' 及 'S' 的一条直线，c-o 为与当地纬线平行的一条直线，于是角 b-o-c 为此活动区的磁倾角 $Tilt$ ，约为 58.06° 。图 3.1 左下图中，给出了活动区纵向磁图以及对应于这个磁图的有效距离参数 d_E 的示意图，其中的以 'S' 为圆心的圆和面积与活动区负极的面积相同，其中的以 'N' 为圆心的圆和面积与活动区正极的面积相同，它们用来代表活动区磁流管在光球表面的横截面的负极和正极。这两个代表活动区正负两极圆的位置靠得非常的近，两个圆的大部分都重叠在了一起。这个简单的示意图粗略的描述了这个具有 δ 活动区的磁场位形。通过计算两圆半径之和 (线段 SE + 线段 NF) 与活动区两极重心之间的距离 (线段 SN) 的比值，我们得到对应于这个活动区磁图的有效距离参数 d_E (约为 3.55)，从而这个活动区的磁场位型得到了粗略的量化。一般而言， β 位型的活动区有效距离参数 d_E 值一般小于 1。由此我们可以看出有效距离参数 d_E 可以描述活动区磁场的非势性，有效距离参数 d_E 值越高，活动区的非势性越强。NOAA 10720 活动区磁场在 06:24 时刻的非势性非常强。图 3.1 右下图中给出了本活动区磁图的强场 (势场横场较强大于 150 G) 强梯度 (纵场

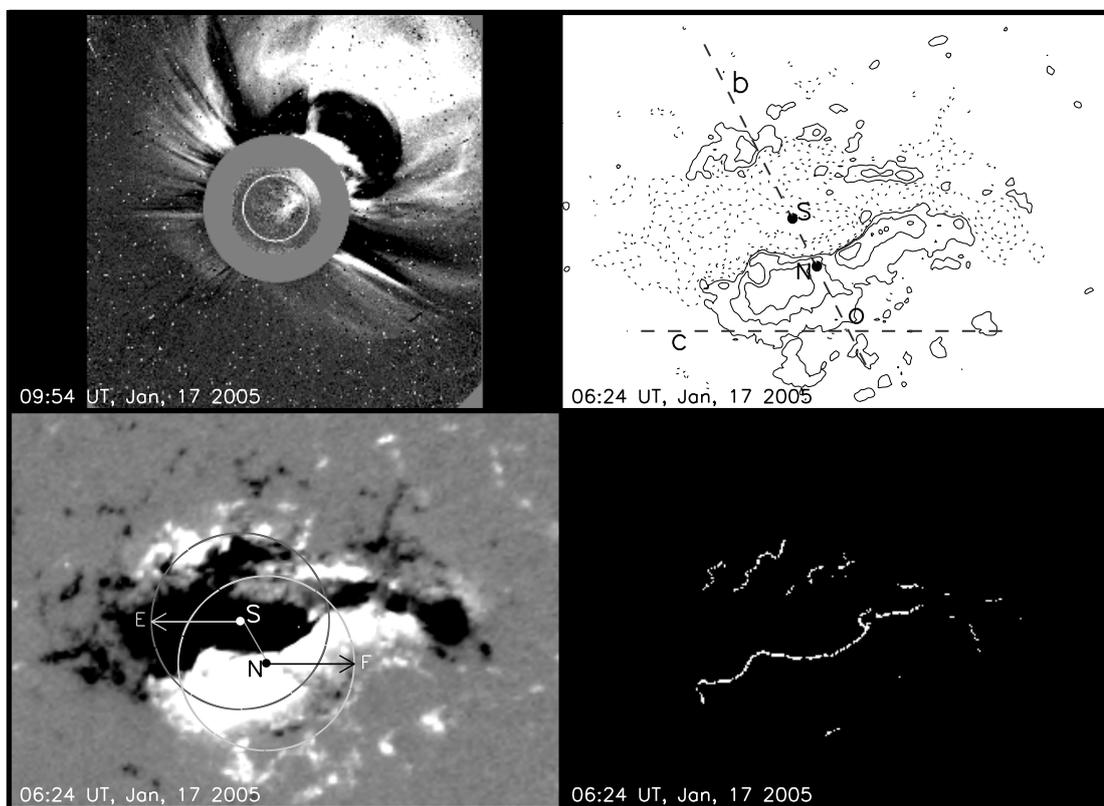


图 3.1: 左上图: 一个由 LASCO/C2 在 2005 年 1 月 17 日 09:54 UT 获得的源于 NOAA 10720 活动区的西北向的 CME。右上图: NOAA 10720 在 06:24 UT 时刻的纵向磁场场强分别为 100, 500, 1000 高斯的等高线图。N 和 S 表示活动区正极和负极磁场位置; 角 b-o-c 代表着活动区此时的倾角 *Tilt*, 其值约为 58.06° 。左下图: NOAA 10720 在 06:24 UT 时刻的 d_E 的示意图, 浅色的以 N 为圆心的圆代表活动区正极, 深色的以 S 为圆心的圆代表活动区的负极, 带箭头的线段 S-E 和 N-F 分别为两个圆的半径, 线段 S-N 的长度是活动区两极中心之间的距离, d_E 的值约为 3.55。右下图: 白线部分是 NOAA 10720 在 06:24 UT 时刻的磁场场强梯度线长度 L_{sg} 。注意后三附图的视场大小为 $338'' \times 242''$ 。

的横向梯度较强大于 50 G/Mm) 中性线的示意图。强场强梯度中性线长度 L_{sg} 为图中白线部分的长度, 约 523 角秒, 这个值远远高于 Falconer et al., [2003] 给出的阈值 (50 角秒)。

3.5 统计结果

表 3.5 详细列出了 86 个 CME、伴生耀斑的物理特性及相关活动区的特征及其纵向磁场的 4 个参数的值。

3.5.1 有效距离参数 d_E 与活动区磁分类的一致性检验

首先, 我们用目前的样本中再来检验一下有效距离参数 d_E 与活动区威尔逊磁分类的基本一致性。表 3.5 的样本中一些活动区可能在不同时间产生多个 CME, 其中某些活动区可能在不同时刻属于不同的磁场位型, 在检验一致性时, 这些活动区将在表现为不同磁场类型的时候被重复计算。例如, 活动区 NOAA 8210 在 4 月 29 日属于 $\beta\gamma$ 型, 在 5 月 1 日属于 $\beta\delta$ 型, 在 5 月 2 日又属于 $\beta\gamma\delta$ 型。在检验一致性时, 这个活动区就作为不同类型的活动区被计算了三次。通过分析表 3.5 中 55 个活动区的磁场位形及相应有效距离参数 d_E 的值, 我们发现大部分 β 型活动区 (20/24) 的有效距离参数 d_E 值都小于 1; 2 个 $\beta\delta$ 型活动区, 唯一的 $\gamma\delta$ 型活动区, 以及大部分 $\beta\gamma\delta$ 型活动区 (18/20) 的有效距离参数 d_E 值都大于 1; 而对于 14 个 $\beta\gamma$ 型活动区仍有一定的不确定性: 6 个活动区的有效距离参数 d_E 值都小于 1, 另外 8 个活动区的有效距离参数 d_E 值都大于 1。这个情况跟前面用 24 个不同类型活动区研究所得结果基本一致。这里用较多的样本得到的结果进一步肯定了有效距离参数 d_E 可以量化活动区磁场位型。

表 3.1: 各参数之间的统计相关系数

	CC_{Pl}	CC_{Sr}	S_{Sr}
d_E vs. Ft	0.6180	0.5690	1.09e-8
d_E vs. Lsg	0.6885	0.6088	5.0e-10
Ft vs. Lsg	0.8971	0.8209	3.8e-22
$Tilt$ vs. Ft	0.0761	0.0110	0.9199
$Tilt$ vs. d_E	-0.0853	-0.2326	0.03116
$Tilt$ vs. Lsg	0.0959	0.0993	0.3630

3.5.2 强场强梯度线中性线长度 Lsg 及其阈值预报 CME 的可靠性检验

研究表 3.5 中给出的活动区磁场的强场强梯度中性线长度 Lsg 值, 我们发现大部分 CME (74/86) 源区的 Lsg 值都是大于 Falconer et al. [2003] 定义的强场强梯度中性线长度 Lsg 为 50 角秒这个阈值的, 这在一定程度上肯定了他们定义的阈值的可靠性。然而, 有 12 个 CME 源区磁场的强场强梯度中性线长度 Lsg 小于 50 角秒这个阈值; 尤其值得注意的是其中 4 个 CME 源区磁场的强场强梯度中性线长度 Lsg 等于 0 角秒。这就提醒我们当用活动区磁场的强场强梯度中性线长度 Lsg 以及 50 角秒这个阈值来预报 CME 时, 需要考虑一些特例。另外, 还有一点值得注意的是这 12 个 CME 的源区都是 β 型活动区, 且 12 个 CME 中有 11 个 CME 是慢速 CME, 速度小于 1000 Km/S。

3.5.3 活动区磁场各参数之间的关系

本节着重讨论磁倾角 $Tilt$, 总磁通 Ft , 有效距离参数 d_E 及强场强梯度中性线长度 Lsg 四个参数之间的关系, 如图 3.2 所示。对于图 3.2 中的每一组关系, 我们都计算了 Pearson's 线性相关系数 (CC_{Pl}) 和 Spearman's 秩相关系数 (CC_{Sr}) 以及 Spearman's 秩相关显著性 (S_{Sr})。这里 S_{Sr} 的值域是 0.0 到

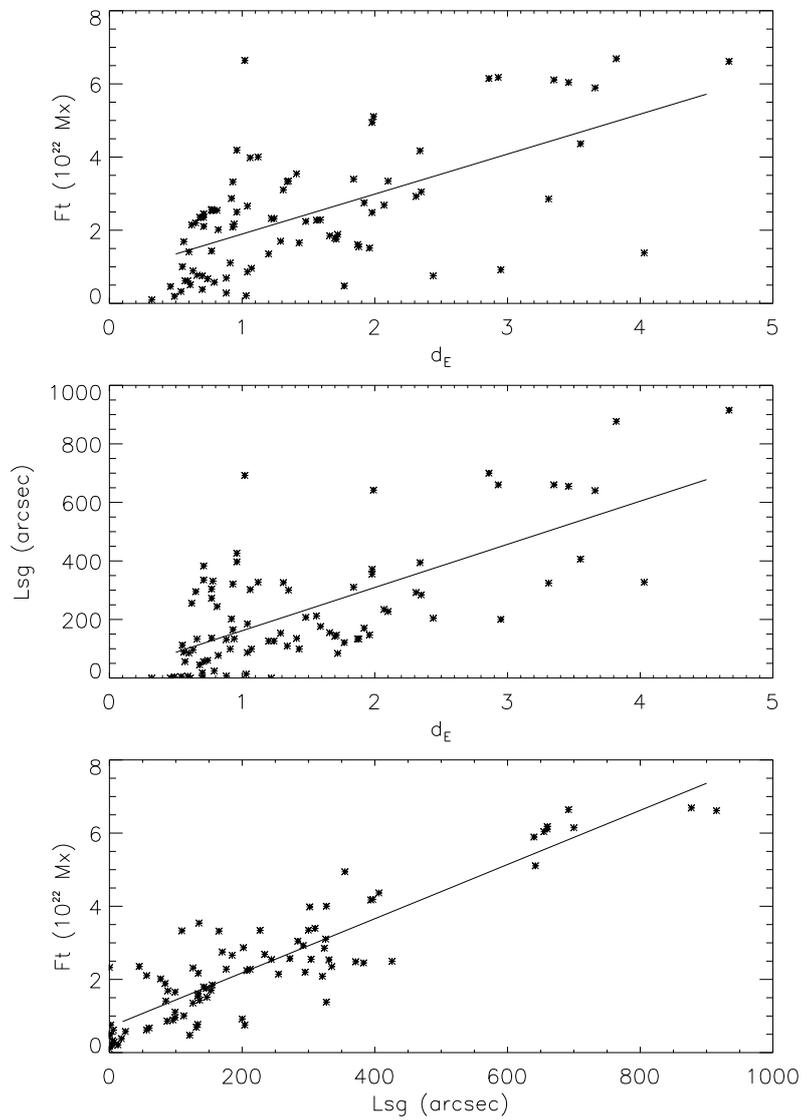


图 3.2: 活动区磁场各参数之间的关系, 实线是对图中数据点进行最小二乘法拟合和所得的趋势线。

1.0 之间的, 较小的 S_{Sr} 值意味着较显著的 Spearman's 秩相关。表 3.1 列出了图 3.2 中的每一组关系的相关系数。研究发现总磁通 Ft , 有效距离参数 d_E 及强场强梯度中性线长度 Lsg 这三个参数的任意两个都存在较强的相关性, 尤其总磁通 Ft 和强场强梯度中性线长度 Lsg 相关性最强。

总磁通 Ft , 有效距离参数 d_E 及强场强梯度中性线长度 Lsg 都较大的活动区很可能产生强耀斑和快速 CME, 比如表 3.5 中的 NOAA 10486, NOAA 9415, NOAA 9077 和 NOAA 10720。磁倾角 $Tilt$ 和其他三个参数中任意一个基本不相关。另外有一点值得注意的是表 3.5 的 31 个快速 CME 中, 有 17 个 CME 的源区都具有反常磁倾角 $Tilt$, 这些活动区的磁流管的轴向扭转比较厉害, 磁场比较复杂且具有较大的有效距离参数 d_E 和强场强梯度中性线长度 Lsg 。另外还有一些活动区的磁场实在太复杂, 以至于很难区分活动区的前导部分和后随部分, 例如活动区 NOAA 10486。在这种情况下, 只简单的用磁场加权的方法计算的出正负两极重心来求活动区的磁倾角 $Tilt$ 已经不是很合理, 即使算出来其物理意义也比较模糊。此时, 就应该着重分析其它三个参数来预报活动区的耀斑或者 CME 事件。例如活动区 NOAA 10486 的总磁通 Ft , 有效距离参数 d_E 和强场强梯度中性线长度 Lsg 都很大, 这些信息已经为得出“此活动区将有很剧烈的太阳活动事件”这一预报结果提供了强有力的依据。而事实上, 在 10 月 22 日至 11 月 4 日这段时间内, 这个活动区产生了 7 个 X 射线耀斑 (其中包括一个最近几年内观测到的最大的 X28 耀斑), 19 个 M 级耀斑以及 8 个快速 CME。

总的说来, 预报活动区的爆发事件时, 可以采用多个参数相结合的方法。

3.5.4 活动区磁场参数和 CME 速度之间的统计关系

图 3.3 给出了 CME 速度分别和源区磁场四个参数磁倾角 $Tilt$, 总磁通 Ft , 有效距离参数 d_E 及强场强梯度中性线长度 Lsg 散点图, 表 3.2 列出了对应于每一组关系的相关系数。对比目前较大样本所得结果和前面较小样本所得结果,

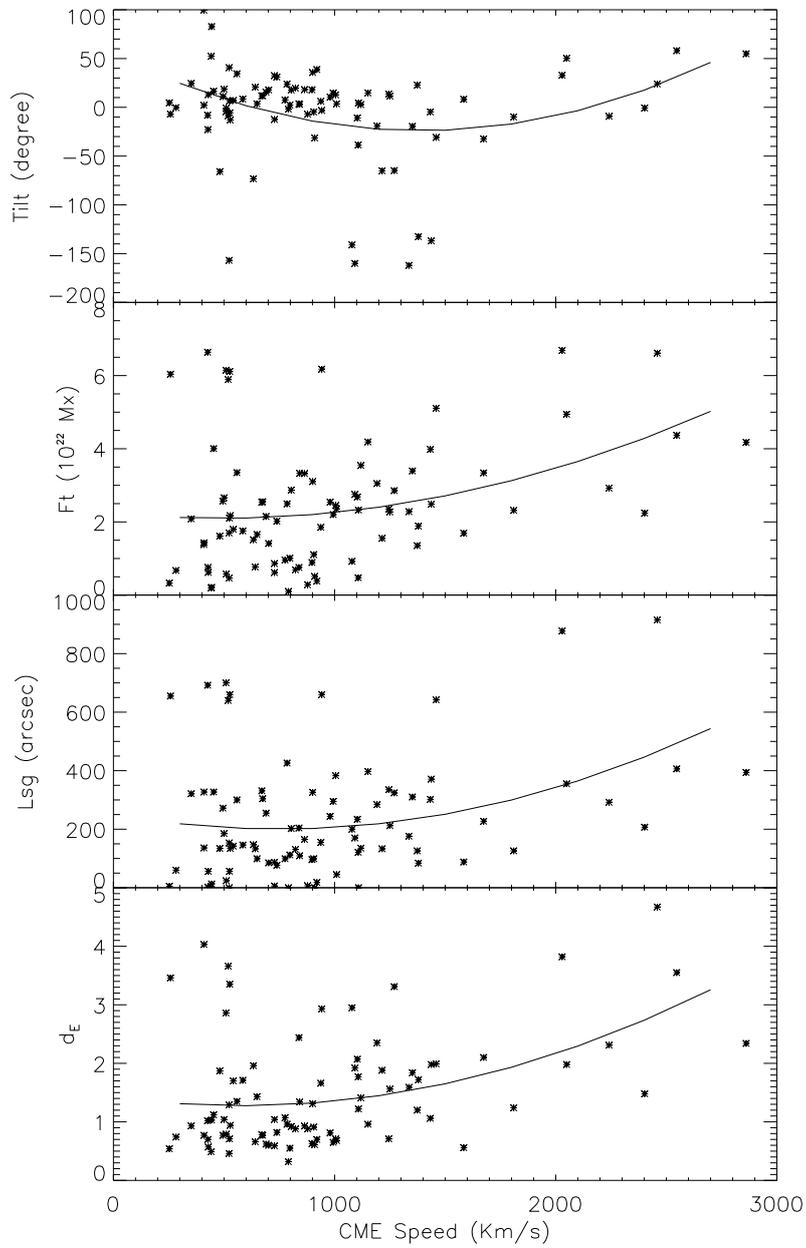


图 3.3: CME 速度和源区 (活动区) 磁场四个参数之间的统计关系, 实线是对图中数据点进行最小二乘法拟合和所得的趋势线。

表 3.2: CME 速度和四个参数之间的统计相关系数

	CC_{Pl}	CC_{Sr}	S_{Sr}	CC_P
V_{CME} vs. $Tilt$	-0.0406	-0.1256	0.2491	
V_{CME} vs. Ft	0.3337	0.3386	0.0014	0.1290 (d_E) 0.1752 (Lsg)
V_{CME} vs. Lsg	0.289	0.2370	0.0280	-0.0239 (Ft) 0.0325 (d_E)
V_{CME} vs. d_E	0.3888	0.3499	9.6e-4	0.2463 (Ft) 0.2730 (Lsg)

我们发现：CME 速度和磁倾角 $Tilt$ 的 Pearson's 线性相关系数 CC_{Pl} 仍然非常小，CME 速度和总磁通 Ft 以及 CME 速度和有效距离参数 d_E 两组关系的 Pearson's 线性相关系数 CC_{Pl} 都有所减小，但是基本趋势还是在的：有效距离参数 d_E 和 CME 速度相关性比磁倾角 $Tilt$ 或总磁通 Ft 和 CME 速度的相关性都要好。另外，总磁通 Ft 和 CME 速度的相关性受样本大小的影响比较小。

虽然有效距离参数 d_E 和强场强梯度中性线长度 Lsg 在量化活动区磁场的非势性上彼此密切相关，有效距离参数 d_E 和 CME 速度的相关性好于强场强梯度中性线长度 Lsg 和 CME 速度的相关性。这可能是两个参数是从不同的角度描述活动区磁场非势性的。有效距离参数 d_E 通过描述活动区的磁场复杂性来描述活动区的非势性，有效距离参数 d_E 和活动区威尔逊山磁分类的基本一致，具有 δ 位型的活动区一般都有非常强的非势性，同时这种活动区一般都具有较大有效距离 d_E 。表 3.5 中的 31 个快速 CME 中有 18 个是源于 $\beta\gamma\delta$ 型活动区，8 个源于源于 $\beta\gamma$ 型活动区，2 个源于 $\beta\delta$ 型活动区，3 个源于 β 型活动区。而强场强梯度中性线长度 Lsg 虽然和活动区的 CME 产生率有强相关 [Falconer et al., 2005]，却和活动区威尔逊山磁分类没有任何关系。

表 3.2 中，每一组关系的 Spearman's 秩相关系数 CC_{Sr} 和相应的 Pearson's 线性相关系数 CC_{Pl} 基本相当，但是四组关系的 Spearman's 秩相关显著性 S_{Sr} 相差很大。其中，有效距离参数 d_E 和 CME 速度这组关系的 S_{Sr} 最小，约为 0.00096。由于这里的 S_{Sr} 的值域是 0.0 到 1.0 之间的，较小的 S_{Sr} 值意味着较

显著的 Spearman's 秩相关。这就进一步肯定了有效距离参数 d_E 和 CME 速度之间是具有一定相关性的, 虽然 Spearman's 秩相关和 Pearson's 线性相关都不是很强。

前面的研究发现总磁通 Ft , 有效距离参数 d_E 及强场强梯度中性线长度 Lsg 这三个参数任意两个都存在较强的相关性, 而 CME 速度可能和这三个参数都有相关性。到目前为止还不是很清楚前面的 CME 和强场强梯度中性线长度 Lsg 或者有效距离参数 d_E 的相关是不是有一部分来源于强场强梯度中性线长度 Lsg 或者有效距离参数 d_E 和总磁通 Ft 的相关。为了得到真正的 CME 速度和强场强梯度中性线长度 Lsg , 有效距离参数 d_E 及总磁通 Ft 三者之一的相关性同时又有效的去除其他参数的影响, 我们引进部分相关系数 (CC_P)。部分系数可以计算两个量之间部分相关性的时候保持第三个量不变, 从而把第三个量的影响去除。例如, 我们可以保持总磁通 Ft 不变计算 CME 速度和有效距离参数 d_E 的部分相关系数从而去除总磁通 Ft 可能带来的影响, 同样我们也可以保持总磁通 Ft 不变计算 CME 速度和强场强梯度中性线长度 Lsg 的部分相关系数从而去除总磁通 Ft 可能带来的影响, 以此类推下去。在表 3.2 中的最后一列给出了一些重要的部分相关系数, 其中括号中的参数为计算部分相关系数时保持不变的那个参数。一般我们这样分析部分相关系数: 如果两个量之间的部分相关系数跟它们之间的 Pearson's 线性相关系数和 Spearman's 秩相关系数比较起来非常小, 则说明两者之间不存在真正的相关性, 而由 Pearson's 线性相关系数和 Spearman's 秩相关系数表现出来的相关是源于二者和第三个参数之间的相关性。通过研究表 3.2 我们发现, CME 速度和总磁通 Ft 的部分相关系数 (保持强场强梯度中性线长度 Lsg 或有效距离参数 d_E 不变时), 以及 CME 速度和有效距离参数 d_E 的部分相关系数 (保持强场强梯度中性线长度 Lsg 或总磁通 Ft 不变时), 跟各自的 Pearson's 线性相关系数和 Spearman's 秩相关系数比较起来, 都有较小幅度的降低, 这就肯定了 CME 速度和有效距离参数 d_E 及总磁通 Ft 确实有一定的相关性存在。然而, CME 速度和强场强梯度中性线

长度 L_{sg} 的部分相关系数 (保持总磁通 Ft 或有效距离参数 d_E 不变时) 跟相应的 Pearson's 线性相关系数及 Spearman's 秩相关系数比较起来非常小, 这就说明 CME 速度和强场强梯度中性线长度 L_{sg} 之间不存在真正的相关性, 由 Pearson's 线性相关系数和 Spearman's 秩相关系数表现出来的二者的相关性实际上是由于它们和总磁通 Ft 或者有效距离参数 d_E 之间存在相关性。

通过以上对三种相关系数的讨论, 我们可以得出以下结论: 产生于活动区的 CME 中, 快速 CME 倾向于产生在具有较大的总磁通 Ft 或者较高的有效距离参数 d_E 的活动区中。即使 CME 速度与有效距离参数 d_E 及总磁通 Ft 相关系数不是很高, 但是 Spearman's 秩相关显著性 S_{Sr} 和部分相关系数 (CC_P) 肯定了这种趋势。

相对于磁结构简单的一半活动区, 磁结构复杂的大活动区更容易产生剧烈的太阳爆发事件, 如强耀斑和快速 CME。本工作中, 强场强梯度中性线长度 L_{sg} 和有效距离参数 d_E 可以用来描述活动区磁场的大尺度非势性, 而总磁通 Ft 给出了活动区磁场的强度, 即活动区可以提供给重大太阳活动事件的能量。由此, 我们有理由期待具有高度复杂性或者说大尺度非势性强磁场的活动区可能倾向于产生快 CME。

表 3.3: CME 速度和两个复合参数之间的统计相关系数

	CC_{Pl}	CC_{Sr}	S_{Sr}
V_{CME} vs. $Ft \times d_E$	0.3665	0.3815	2.9e-4
V_{CME} vs. $Ft \times L_{sg}$	0.2495	0.2842	0.0080

对于 86 个 CME, 我们检验了 CME 速度和两个复合参数 $Ft \times d_E$ 及 $Ft \times L_{sg}$ 之间的关系 (图 3.4 给出散点图, 表 3.3 给出了相应的相关系数)。从表 4.3 中任何一种相关系数来看, CME 速度和参数 $Ft \times d_E$ 的相关性都稍好于 CME 速度和 $Ft \times L_{sg}$ 的相关性。然而前一组关系的任何一种相关系数仍不是很高, CME 速度和两个复合参数的相关系数与前面 CME 和总磁通 Ft , 有效

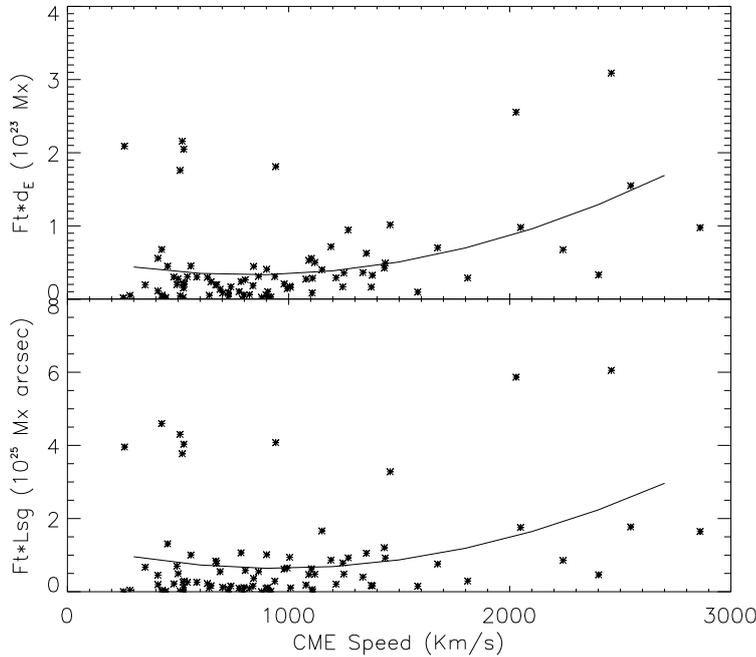


图 3.4: CME 速度和源区 (活动区) 磁场两个复合参数之间的统计关系, 实线是对图中数据点进行最小二乘法拟和所得的趋势线。

距离参数 d_E , 强场强梯度中性线长度 Lsg 各自单独的相关系数基本相当。细致研究表明, 图 3.4 中 6 个特殊点的出现较大程度上影响了相关系数。这 6 个特殊事件中有 5 个慢 CME 源于强磁场复杂磁结构 (较大的总磁通 Ft , 较大的有效距离参数 d_E , 较大的强场强梯度中性线长度 Lsg) 的活动区 NOAA 9393, 1 个慢 CME 源于具有强磁场复杂磁结构 (较大的总磁通 Ft , 较大的强场强梯度中性线长度 Lsg) 的 NOAA 8674。去掉这 6 个样本, CME 速度与 $Ft \times d_E$ 之间的相关系数将变为 $CC_{Pl} = 0.6557$, $CC_{Sr} = 0.5613$ 及 $S_{Sr} = 6.11e-8$; CME 速度与 $Ft \times Lsg$ 之间的相关系数将变为 $CC_{Pl} = 0.5520$, $CC_{Sr} = 0.4565$ 及 $S_{Sr} = 2.08e-5$ 。这 6 个样本同样也在较大程度上影响着前面图 3.3 和表 3.2 中 CME 速度与总磁通 Ft , 有效距离参数 d_E , 强场强梯度中性线长度 Lsg 各参数之间的相关系数。值得注意的是不管有没有这 6 个样本, CME 速度和参数的相关系

数都好于 CME 速度和 $Ft \times Lsg$ 的相关系数。这就意味着快 CME 倾向于发生在大 $Ft \times d_E$ 的活动区中而非具有大 $Ft \times Lsg$ 的活动区中。

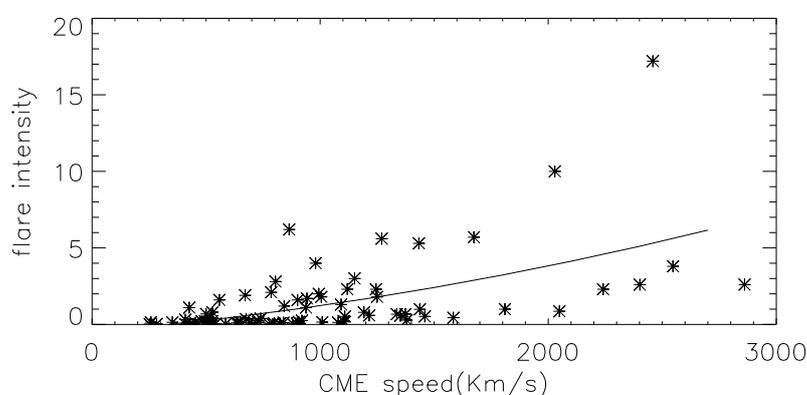


图 3.5: CME 速度和伴随 X 射线耀斑强度的统计关系, 实线是对图中数据点进行最小二乘法拟和所得的趋势线。

表 3.4: CME 速度和伴随 X 射线耀斑强度之间的统计相关系数

	CC_{Pl}	CC_{Sr}	S_{Sr}
V_{CME} vs. I_{flare}	0.5777	0.6462	1.83e-11

3.5.5 CME 速度和伴生耀斑强度之间的统计关系

86 个 CME 中, 31 个为速度超过 1000 Km/s 的快速 CME, 所有的这些快速 CME 都伴随着 M 或者 X 级的 X 射线耀斑。我们研究了 CME 速度跟伴生耀斑峰值流量之间的关系 (图 3.5), 此时, 一个 C1.0 耀斑计为 0.01, 一个 M2.0 耀斑计为 0.2, 一个 X1.0 级的耀斑计为 1, 以此类推。表 3.4 给出了相应于图 3.5 中这组关系的 Pearson's 线性相关系数和 Spearman's 秩相关系数。我们发现 CME 速度跟伴生耀斑峰值流量之间存在着很好得相关性。Pearson's 线性相关系数为 0.5777, Spearman's 秩相关系数为 0.6462, Spearman's 秩相关显著性

为 $1.83e-11$ 。这个非常小的 Spearman's 秩相关显著性表明二者的较强的相关性是非常显著的。这就意味着在耀斑伴生的 CME 中, 快速 CME 倾向于有较强的伴生耀斑。

3.6 结论

本章中, 我们选择了 86 个源于 55 个活动区的耀斑、CME 事件, 来研究活动区纵场特性及其与 CME 速度之间的统计关系。选用四个参数磁倾角 $Tilt$, 总磁通 Ft , 有效距离参数 Ed 及强场强梯度中性线长度 Lsg 来量化活动区磁场各方面特性。主要结果如下:

(1) 源于活动区的 CME 中, 较快 CME 倾向于产生在总磁通较强或者有效距离参数值较高的活动区中。

(2) 耀斑伴随的 CME 中, 较快 CME 的伴生耀斑较强。

(3) 三个参数有效距离参数 d_E , 强场强梯度中性线长度 Lsg 和总磁通 Ft 的任意两个相关较强, 尤其是总磁通 Ft 和强场强梯度中性线长度 Lsg ; 而活动区的磁倾角 $Tilt$ 和其他参数的相关性很弱。

(4) 86 个 CME 中, 有 11 慢 CME 和 1 个速度超过 1000 Km/s 的快 CME 产生于 β 结构的的活动区, 这些 CME 爆发前活动区的强场强梯度中性线长度 Lsg 均小于 50 角秒这个阈值, 说明用 Lsg 这一阈值来预报活动区中 CME 的爆发时需要考虑一些特例, 一些活动区的 Lsg 小于这个阈值也会产生 CME 甚至是快速 CME。

表 3.5: 86 个耀斑/CME 及相关活动区特征

Date	Time ^a	V^b (km s ⁻¹)	Flare Start	X-Ray Class	Position (deg)	NOAA	Mag. Class	Tilt (deg)	F^t (10 ²¹ Mx)	d_E	L_{sg} (arcsec)
1997 Apr 07	14:27	878	13:50	C6.8	S25E16	8027	β	-7.09	2.81	0.88	7 *
1997 Oct 21	18:03	523	17:00	C3.3	N17E05	8097	β	-156.88	4.64	0.46	0 *
1997 Nov 03	11:11	352	09:13	M1.4	S20W15	8100	$\beta\gamma\delta$	24.47	20.84	0.93	321
1997 Nov 04	06:10	785	05:52	X2.1	S14W33	8100	$\beta\gamma\delta$	23.72	24.95	0.96	426
1998 Apr 29	16:58	1374	16:06	M6.8	S18E20	8210	$\beta\gamma$	22.70	13.52	1.20	126
1998 May 01	23:40	585	21:40	C2.6	S19W05	8210	$\gamma\delta$	8.48	17.54	1.71	146
1998 May 02	05:31	542	04:48	C5.4	S19W10	8210	$\beta\gamma\delta$	7.00	17.96	1.70	142
1998 May 02	14:06	938	13:31	X1.1	S15W15	8210	$\beta\gamma\delta$	6.10	18.50	1.66	155
1998 May 03	22:02	649	21:12	M1.4	S13W34	8210	$\beta\gamma$	3.59	16.55	1.43	99
1998 Nov 04	07:54	523	07:13	C1.6	N17E01	8375	$\beta\gamma$	40.63	16.98	1.29	153
1999 May 03	06:06	1584	05:36	M4.4	N17E32	8525	β	8.14	16.88	0.56	88
1999 May 10	05:50	920	05:24	M2.5	N16E19	8539	β	38.68	3.82	0.70	18 *
1999 Aug 07	23:50	283	23:04	C3.9	S28E03	8657	β	-0.35	6.72	0.74	60

表 3.5: continued.

Date	Time ^a	V^b (km s^{-1})	Flare Start	X-Ray Class	Position (deg)	NOAA	Mag. Class	Tilt (deg)	Ft (10^{21} Mx)	d_E	L_{sg} (arcsec)
1999 Aug 17	13:31	776	12:47	C2.6	N22E34	8668	β	7.50	9.58	1.07	99
1999 Aug 28	18:26	426	17:52	X1.1	S26W14	8674	$\beta\gamma\delta$	-8.21	66.39	1.02	692
1999 Sep 01	02:30	253	23:56 ^c	C2.7	N08W08	8677	β	4.64	3.25	0.54	5 *
1999 Sep 13	17:31	444	16:38	C2.6	N16W03	8693	β	82.69	2.10	1.03	13 *
1999 Sep 13	09:30	898	08:05	C4.9	N22E10	8699	β	17.99	8.90	0.63	96
1999 Oct 14	09:26	1250	08:58	X1.8	N12E37	8731	$\beta\gamma\delta$	11.42	22.73	1.56	212
1999 Nov 26	17:30	409	17:40	C2.3	S12W10	8778	β	2.05	14.30	0.77	136
2000 Jan 18	17:54	739	17:10	M3.9	S19E11	8831	β	31.06	20.16	0.82	77
2000 Jan 28	20:12	429	19:45	C4.7	S31W17	8841	β	12.99	6.19	0.57	56
2000 Feb 09	19:54	910	19:26	C7.4	S14W40	8853	β	-31.46	5.10	0.61	0 *
2000 Feb 08	09:30	1079	08:43	M1.3	N25E26	8858	$\beta\gamma$	-141.07	9.20	2.95	200
2000 Feb 12	04:31	1107	04:10	M1.7	N26E23	8858	$\beta\gamma$	-38.72	4.74	1.77	121
2000 Feb 17	20:06	728	18:45	M2.5	S25W16	8869	$\beta\gamma$	-12.46	8.61	1.04	87
2000 Feb 17	21:30	728	20:19	M1.3	S29E07	8872	β	32.46	6.15	0.59	6 *

表 3.5: continued.

Date	Time ^a	V ^b (km s ⁻¹)	Flare Start	X-Ray Class	Position (deg)	NOAA	Mag. Class	Tilt (deg)	Ft (10 ²¹ Mx)	d _E	Lsg (arcsec)
2000 Apr 10	00:30	409	23:29 ^c	M3.1	S14E01	8948	$\beta\gamma\delta$	99.52	13.80	4.03	327
2000 May 10	20:06	641	19:32	C8.7	N14E20	8990	β	20.58	7.68	0.66	133
2000 Jun 02	10:30	442	09:04	C2.4	N10E23	9028	β	52.29	1.93	0.49	4 *
2000 Jun 06	15:54	1119	12:06	X2.3	N20E18	9026	$\beta\gamma\delta$	2.77	35.41	1.41	135
2000 Jun 07	16:30	842	15:04	X1.2	N23W03	9026	$\beta\gamma\delta$	2.98	33.28	1.34	109
2000 Jun 10	17:08	1108	16:37	M5.2	N22W38	9026	β	4.41	23.24	1.22	0 *
2000 Jul 10	21:50	1352	21:05	M5.7	N17E27	9077	$\beta\gamma\delta$	-19.56	33.94	1.84	310
2000 Jul 14	10:54	1674	10:03	X5.7	N22W07	9077	$\beta\gamma\delta$	-32.45	33.40	2.10	227
2000 Jul 25	03:30	528	02:47	M8.0	N06W08	9097	$\beta\gamma$	-13.10	21.71	0.94	134
2000 Aug 09	16:30	702	15:33	C2.3	N11E11	9114	$\beta\gamma$	17.79	14.10	0.60	85
2000 Sep 01	06:30	427	05:42	C1.6	S20W18	9143	β	-22.84	7.55	0.70	2 *
2000 Sep 15	12:06	633	10:54	C9.5	N13E08	9165	$\beta\delta$	-73.30	15.12	1.96	147
2000 Sep 15	15:26	481	14:31	M2.0	N12E07	9165	$\beta\delta$	-65.84	16.10	1.87	134
2000 Sep 16	05:18	1215	04:07	M5.9	N14W07	9165	$\beta\gamma$	-65.05	15.49	1.88	133

表 3.5: continued.

Date	Time ^a	V^b (km s^{-1})	Flare Start	X-Ray Class	Position (deg)	NOAA	Mag. Class	Tilt (deg)	F_t (10^{21} Mx)	d_E	L_{sg} (arcsec)
2000 Oct 02	03:50	525	02:47	C4.1	S09E07	9176	$\beta\gamma$	6.68	21.04	0.71	56
2000 Oct 09	23:50	798	23:22	C6.7	N01W14	9182	β	2.20	10.05	0.55	112
2000 Nov 23	23:54	690	23:18	M1.0	N22W03	9236	β	15.51	21.47	0.62	255
2000 Nov 24	05:30	994	04:55	X2.0	N20W05	9236	$\beta\gamma$	14.60	22.00	0.65	295
2000 Nov 24	15:30	1245	14:51	X2.3	N22W07	9236	$\beta\gamma$	13.57	23.49	0.71	335
2000 Nov 24	22:06	1005	21:43	X1.8	N21W14	9236	$\beta\gamma$	12.72	24.52	0.71	383
2000 Nov 25	09:30	675	09:06	M3.5	N18W24	9236	$\beta\gamma$	11.76	25.51	0.77	304
2000 Nov 25	19:31	671	18:33	X1.9	N20W23	9236	$\beta\gamma$	11.80	25.36	0.78	331
2000 Nov 26	03:30	495	02:47	M2.2	N19W30	9236	$\beta\gamma$	11.08	25.68	0.77	272
2000 Nov 26	17:06	980	16:34	X4.0	N18W38	9236	$\beta\gamma$	10.34	25.42	0.81	244
2000 Dec 18	11:50	510	11:03	C7.0	N15E01	9269	β	-0.81	5.76	0.79	24 *
2001 Jan 10	00:54	823	00:34	C5.9	N13E36	9306	$\beta\gamma$	19.52	6.89	0.88	131
2001 Jan 20	19:32	839	18:40	M1.2	S07E40	9313	$\beta\gamma$	3.57	7.53	2.44	204
2001 Mar 24	20:50	906	19:37	M1.7	N15E22	9390	β	-4.80	11.05	0.91	99

表 3.5: continued.

Date	Time ^a	V ^b (km s ⁻¹)	Flare Start	X-Ray Class	Position (deg)	NOAA	Mag. Class	Tilt (deg)	Ft (10 ²¹ Mx)	d _E	Lsg (arcsec)
2001 Mar 28	12:50	519	11:21	M4.3	N18E02	9393	$\beta\gamma\delta$	-8.68	58.92	3.66	640
2001 Mar 28	19:27	258	18:58	M1.5	N14W05	9393	$\beta\gamma\delta$	-7.09	60.38	3.46	655
2001 Mar 29	00:26	526	23:25 ^c	M2.1	N17W04	9393	$\beta\gamma\delta$	-5.60	61.10	3.35	660
2001 Mar 29	10:26	942	09:57	X1.7	N17W18	9393	$\beta\gamma\delta$	-3.26	61.75	2.93	660
2001 Mar 29	14:26	509	14:09	M1.6	N16W15	9393	$\beta\gamma\delta$	-4.42	61.45	2.86	700
2001 Apr 06	19:30	1270	19:10	X5.6	S24E31	9415	$\beta\gamma$	-64.83	28.54	3.31	324
2001 Apr 09	15:54	1192	15:20	M7.9	S21W04	9415	$\beta\gamma\delta$	-19.24	30.48	2.35	284
2001 Apr 10	05:30	2241	05:06	X2.3	S23W09	9415	$\beta\gamma\delta$	-9.24	29.23	2.31	292
2001 Apr 11	13:32	1103	12:56	M2.3	S22W27	9415	$\beta\gamma\delta$	-10.89	26.83	2.07	234
2001 Aug 25	16:50	1433	16:23	X5.3	S17E34	9591	$\beta\gamma\delta$	-4.73	39.82	1.06	302
2001 Sep 11	14:54	791	14:16	C3.2	N14E34	9615	β	-1.92	1.00	0.32	0 *
2001 Sep 17	08:54	1009	08:18	M1.5	S14E04	9616	$\beta\gamma$	3.48	23.53	0.68	45
2001 Sep 24	10:31	2402	09:32	X2.6	S16E23	9632	$\beta\gamma\delta$	-0.79	22.40	1.48	207
2001 Oct 19	01:27	558	00:47	X1.6	N16W18	9661	$\beta\gamma\delta$	34.44	33.46	1.35	300

表 3.5: continued.

Date	Time ^a	V^b (km s ⁻¹)	Flare Start	X-Ray Class	Position (deg)	NOAA	Mag. Class	Tilt (deg)	Ft (10 ²¹ Mx)	d_E	L_{sg} (arcsec)
2001 Oct 19	16:50	901	16:13	X1.6	N15W29	9661	$\beta\gamma\delta$	35.71	31.03	1.31	326
2001 Oct 22	15:06	1336	14:27	M6.7	S20E18	9672	$\beta\gamma\delta$	-162.00	22.81	1.59	176
2001 Oct 25	15:26	1092	14:42	X1.3	S16W21	9672	$\beta\gamma\delta$	-160.03	27.51	1.92	170
2001 Nov 01	22:30	453	21:38	M1.1	N12W23	9682	$\beta\gamma\delta$	16.39	40.02	1.12	327
2001 Nov 04	16:03	1810	16:03	X1.0	N06W18	9684	$\beta\gamma\delta$	-9.94	23.16	1.24	126
2001 Nov 17	05:30	1379	04:48	M2.8	S13E42	9704	β	-132.51	18.86	1.72	84
2001 Nov 22	23:30	1437	22:09	M9.9	S15W34	9704	$\beta\gamma\delta$	-136.86	24.83	1.98	371
2001 Nov 28	17:30	500	16:32	M6.9	N04E15	9715	$\beta\gamma\delta$	18.48	26.60	1.04	185
2001 Dec 11	08:30	804	08:02	X2.8	N16E41	9733	$\beta\gamma$	17.66	28.67	0.92	202
2001 Dec 13	14:54	864	14:24	X6.2	N16E09	9733	$\beta\gamma$	18.14	33.22	0.93	165
2002 Jul 15	20:30	1151	19:50	X3.0	N19W01	10030	$\beta\gamma\delta$	14.73	41.86	0.96	397
2002 Aug 16	12:30	1459	11:32	M5.2	S14E20	10069	$\beta\gamma\delta$	-30.85	51.05	1.99	642
2003 Oct 28	11:30	2459	10:01	X17.2	S17E04	10486	$\beta\gamma\delta$	23.94	66.13	4.67	915
2003 Oct 29	20:54	2029	20:37	X10	S15W02	10486	$\beta\gamma\delta$	32.73	66.87	3.82	877

表 3.5: continued.

Date	Time ^a	V ^b (km s ⁻¹)	Flare Start	X-Ray Class	Position (deg)	NOAA	Mag. Class	Tilt (deg)	Ft (10 ²¹ Mx)	d _E	Lsg (arcsec)
2005 Jan 15	06:30	2049	05:56	M8.6	N11E06	10720	$\beta\delta$	50.18	49.42	1.98	355
2005 Jan 15	23:06	2861	21:54	X2.6	N14W08	10720	$\beta\delta$	54.88	41.72	2.34	394
2005 Jan 17	09:54	2547	06:59	X3.8	N13W27	10720	$\beta\delta$	58.06	43.64	3.55	406

^a 代表 CME 首次出现在 LASCO C2 视场中。

^b 代表 CME 线性拟和速度。

^c 代表本行第一列那天的前一天某时刻。

★ 代表产生该 CME 的活动区强度梯度线长度 Lsg 小于 50 角秒这个阈值。

第四章 总结与展望

长期以来, 太阳黑子分类方法, 例如 Wilson 山分类, Zürich 分型以及 McIntoch 分类, 都是属于定性分类。至今没有比较权威的活动区磁场位型的定量分类法, 这使得跟黑子位型相关的研究只能按 Wilson 山分类, 或者其它分类, 给出定性的结果, 比如, 只能描述为“大量统计结果表明 δ 黑子跟耀斑有非常密切的关系”等。

俄罗斯莫斯科大学斯坦伯格天文研究所 Chumak O. V. 教授等早在 1987 年就提出了一个参数来量化活动区磁场位形的粗略方法。虽然前人对活动区磁场位型定量分析已经作了初步的探讨, 但依然缺乏的细致分析研究使之系统化。我们首先对前人提出的活动区磁场有效距离参数进行了细致的样本检验, 分析基于该参数的活动区磁场位型的定量分类法。随后结合另外几个参数对太阳活动区磁场演化, 活动区磁场特性与耀斑指数统计关系, 以及活动区磁场特性与 CME 速度统计关系等进行了多方面的拓展性研究。

本文的一系列研究结果归纳列举如下: (1) 活动区有效距离参数 d_E 的值和威尔逊山磁分类基本一致, 有效距离参数 d_E 可以量化活动区的磁场位型。(2) 定量分析了 5 个不同类型的活动区磁场演化, 发现活动区的磁场演化可以用有效距离参数 d_E , 总磁通 Ft 和磁倾角 $Tilt$ 这三个参数从不同侧面定量的描述, 尤其是有效距离参数 d_E 可以定量的描述活动区 δ 结构的演化: 活动区 δ 结构的发展对应于有效距离参数 d_E 值的增加, 活动区 δ 结构的衰减对应于有效距离参数 d_E 值的减小。(3) 通过统计分析 43 个活动区的耀斑指数与活动区磁场参数之间的统计关系, 发现活动区磁场的有效距离参数 d_E , 总磁通 Ft 和磁倾角 $Tilt$ 中, 有效距离参数 d_E 和耀斑指数相关最好。(4) 统计分析了 86 个源于 55 个日面中心附近活动区的 CME 速度与活动区磁场参数之间的统计关系。发

现源于活动区的 CME 中, 较快 CME 倾向于产生在总磁通 Ft 较强或者有效距离参数 d_E 值较高的活动区中; 四个参数中, 有效距离参数 d_E 和 CME 速度的相关最好。有效距离参数 d_E , 强场强梯度中性线长度 Lsg 和总磁通 Ft 的任意两个相关较强, 尤其是总磁通 Ft 和强场强梯度中性线长度 Lsg , 而磁倾角 $Tilt$ 和其它参数相关性很弱。86 个 CME 中, 有 11 慢 CME 和 1 个速度超过 1000 Km/s 的快 CME 产生于 β 结构的的活动区, 这些 CME 爆发前活动区的强场强梯度中性线长度 Lsg 均小于 50 角秒这个阈值, 说明用强场强梯度中性线长度 Lsg 这一阈值来预报活动区中 CME 的爆发时需要考虑一些特例, 一些活动区的强场强梯度中性线长度 Lsg 小于这个阈值也会产生 CME 甚至是快速 CME。另外, 耀斑伴随的 CME 中, 较快 CME 的伴生耀斑较强。

本文从有效距离参数量化活动区磁场位型入手, 探讨了量化后的活动区磁场位型演化, 量化后的活动区磁场位型与耀斑指数及 CME 速度之间的统计关系。得到的一系列合理的研究结果表明这种量化方法是切实可行并具有实际意义的。活动区磁场位型和复杂性量化之后的可操作性为空间天气预报提供了很大的便利。有效距离参数 d_E 可能是一个具有物理意义的新的预报因子, 其有效性和可行性有待于更大样本的统计工作来检验。

另外, 需要指出的是, 作为新的分类方法, 用有效距离参数 d_E 量化活动区磁场位型仍稍嫌粗略, 还存在一些问题需要解决, 例如用 d_E 来量化 γ 型活动区磁场结构时, d_E 的值和威尔逊山磁分类不存在明显的对应性; d_E 无法描述威尔逊山磁分类中 α 位型活动区。

论文研究了活动区磁场参数和耀斑指数之间的统计关系, 有一种观点认为, 活动区的磁场越复杂, 就有越多的机会产生耀斑, 即耀斑的个数越多, 活动区磁场参数和耀斑个数是否也有很好的相关性呢? 这个问题可以进一步研究。

论文中的工作只用到了活动区的纵场资料, 活动区横向磁场也提供了重要信息, 如何应用横场资料做类似定量分类工作是一个有待研究的课题。

以张洪起教授为首席科学家的怀柔太阳观测基地于 2005 年底成功的研制出全日面矢量磁场望远镜(图 4.1)。望远镜的成功运行使怀柔基地全日面矢量磁场的观测能力处于该类仪器中世界先进或领先水平。该望远镜已经取得了很好的观测资料(图 4.2-4.4),

应用全日面矢量磁场资料,我们正在研究一个太阳活动区爆发事件,目前已经取得了一些初步结果。毕业后将继续完成该事件的研究工作。

另外应用全日面矢量磁场资料,将可以开展一系列研究课题: 1. 日面非势磁场浮现和发展的全过程监测; 2. 太阳活动区之间非势磁场拓扑连结性,以及与耀斑-CME的联系; 3. 太阳大尺度磁场手征性和太阳内部磁场的形成机制——太阳发电机问题; 4. 全日面矢量磁场的无力场三维外推工作; 5. 太阳活动预报。我也将积极参加进来。



图 4.1: 全日面太阳光学和磁场监测系统望远镜 [Zhang, 2006b]。

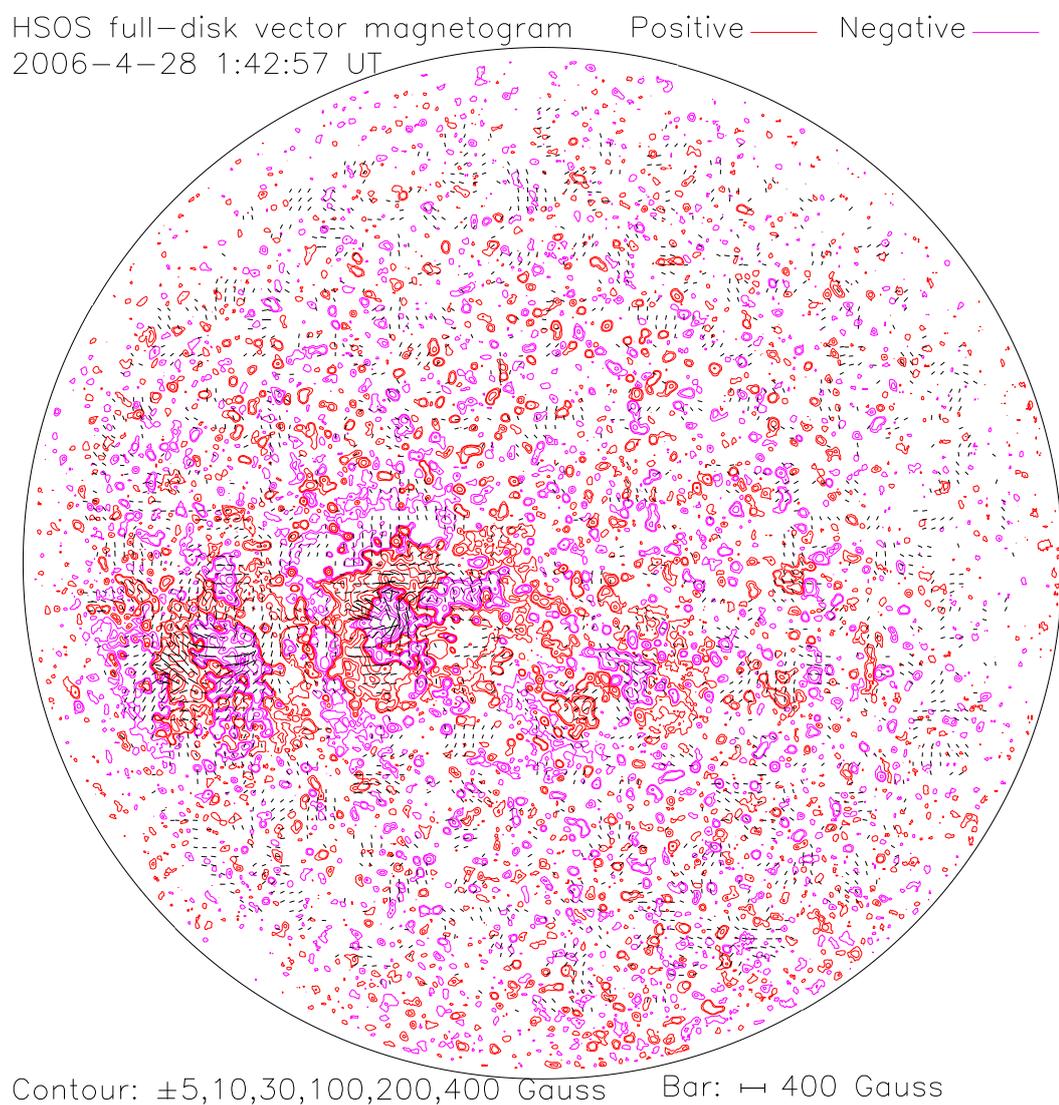


图 4.2: 2006 年 4 月 28 日的全日面矢量磁图。红线代表正极, 粉线代表负极, 等高线代表的纵场强度值, 分别为: $\pm 5, 10, 30, 100, 200, 400$ 高斯。黑色线段代表横场, 单位刻度为 400 高斯 [Zhang, 2006b]。

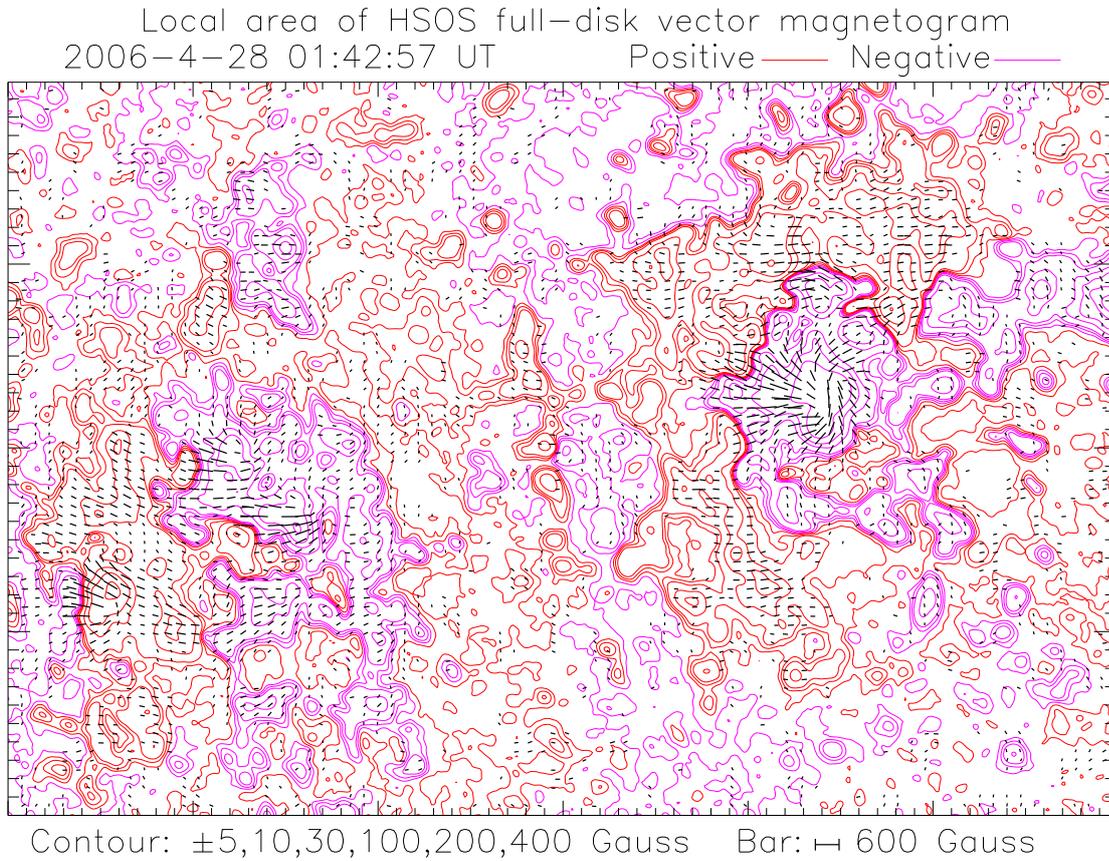


图 4.3: 2006 年 4 月 28 日的全日面矢量磁图的局部图。红线代表正极, 粉线代表负极, 等高线代表的纵场强度值, 分别为: $\pm 5, 10, 30, 100, 200, 400$ 高斯。黑色线段代表横场, 单位刻度为 400 高斯 [Zhang, 2006b]。

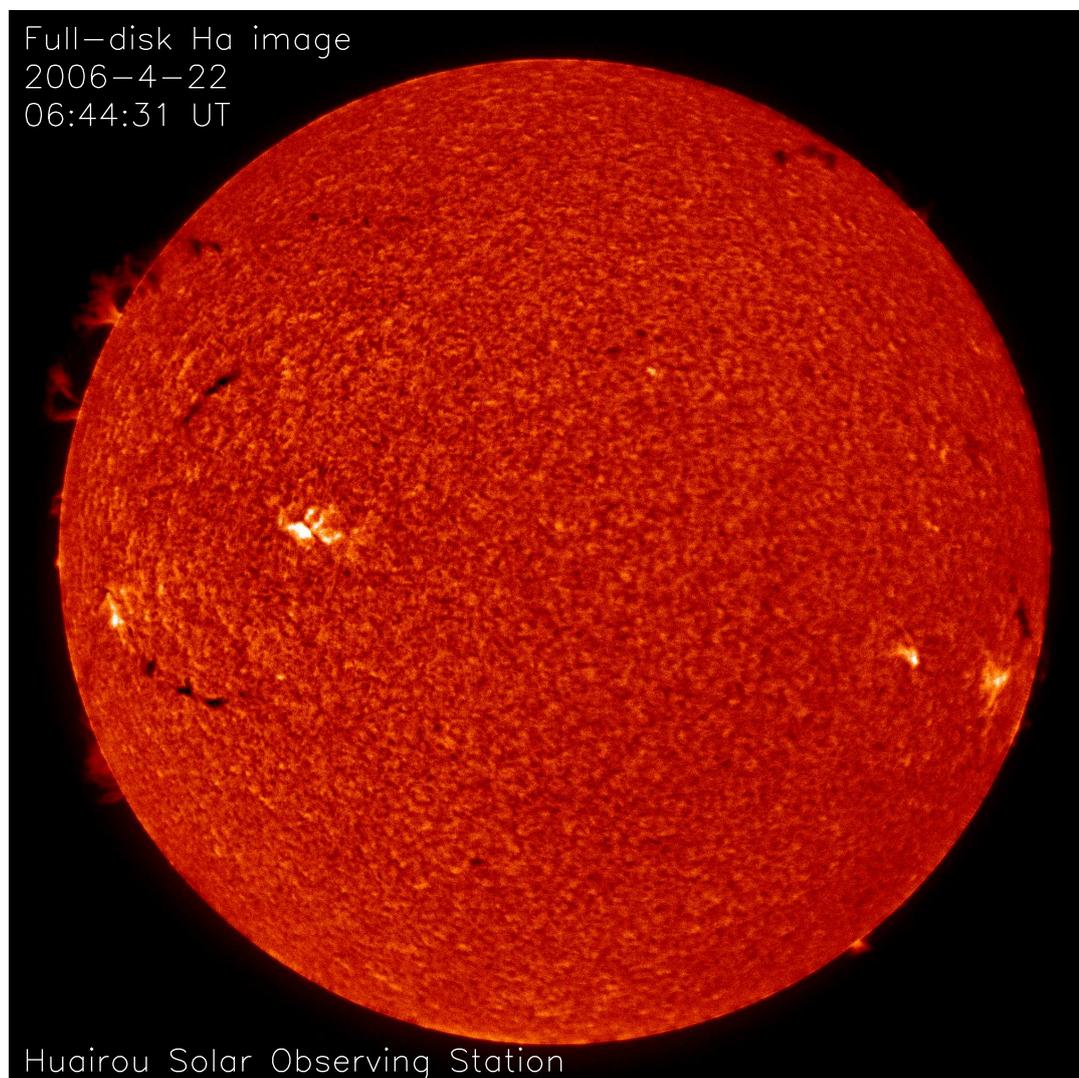


图 4.4: 2006 年 4 月 22 日的全日面 H α 图 [Zhang, 2006b]。

参考文献

- 林元章, 太阳物理学导论, 科学出版社, 2000.
- Bao, S. D., Sakurai, T. and Suematsu, Y., The source of magnetic field twist in solar active regions, *Astrophys. J.*, 2002, 573, 445.
- Bao, S. D. and Zhang, H. Q., Patterns of current helicity for solar cycle 22, *Astrophys. J.*, 496, L43, 1998.
- Bao, S. D. and Zhang, H. Q., Ai, G. X., et al., A survey of flares and current helicity in active regions, 1999, *A&AS*, 139, 311
- Canfield, R. C., Hudson, H. S., and McKenzie, D. E., Sigmoidal morphology and eruptive solar activity, *J. Geophys. Res. Lett.*, 26, 627, 1999.
- Chae, J., Wang, H., Qiu, J., Goode, P. R., Strous, L., and Yun, H. S., The formation of a prominence in active region NOAA 8668. I. SOHO/MDI observations of magnetic field evolution, *Astrophys. J.*, 560, 476, 2001.
- Chumak, O. V. and Chumak Z. N., A stochastic method of describing the evolution of solar active regions, *Kinematics and Physics of Heavenly Bodies, Kiev Naukova Dumka (in Russian)*, 3, 7, 1987.
- Chumak, O. V. and Zhang H. Q., How are magnetic flux structure and imbalance related to magnetic intensity in solar active regions? Solar Variability as an Input to the Earth's Environment, Edited by A. Wilson, *International Solar Cycle Studies (ISCS) Symposium*, p. 75, 2003.

- Chumak, O. V., Zhang H. Q., and Guo J., Integral properties of the magnetic fields of solar active regions under quiet and flare activity conditions, *Astron. Astrophys. Trans.*, 23, 525, 2004.
- Deng, Y. Y., Wang, J. X., Yan, Y. H. and Zhang, J., Evolution of magnetic nonpolarity in NOAA 9077, *Sol. Phys.*, 204, 13, 2001.
- D'Silva, S. and Choudhuri, A. R., A theoretical model for tilts of bipolar magnetic regions , *Astron. Astrophys.*, 272, 621, 1993.
- Falconer, D. A., Moore, R. L., Porter, J. G. and Gary, G. A., Neutral-line magnetic shear and enhanced coronal heating in solar active regions, *Astrophys. J.*, 482, 519, 1997.
- Falconer, D. A., A prospective method for predicting coronal mass ejections from vector magnetograms, *J. Geophys. Res.*, 106, 25185, 2001.
- Falconer, D. A., Moore, R. L., and Gary, G. A., Correlation of the coronal mass ejection productivity of solar active regions with measures of their global nonpotentiality from vector magnetograms: baseline results, *Astrophys. J.*, 569, 1016, 2002.
- Falconer, D. A., Moore, R. L., and Gary, G. A., A measure from line-of-sight magnetograms for prediction of coronal mass ejections, *J. Geophys. Res.*, 108, SSH11, 2003.
- Fan, Y., Fisher, G. H., and McClymont, A. N., Dynamics of emerging active region flux loops, *Astrophys. J.*, 436, 907, 1994.
- Fisher, G. H., Fan, Y., and Howard, R. F., Comparisons between theory and observation of active region tilts, *Astrophys. J.*, 438, 463, 1995.

- Giovanelli, R. G., The relations between eruptions and sunspots., *Astrophys. J.*, 89, 555, 1939.
- Gilbert, H. R., Holzer, T. R., Burkepile, J. T., and Hundhausen, A. J., Active and eruptive prominences and their relationship to coronal mass ejections, *Astrophys. J.*, 537, 503, 2000.
- Gosling, J. T., The solar flare myth, *J. Geophys. Res.*, 98, 18937, 1993.
- Harrison, R. A., The nature of solar flares associated with coronal mass ejection, *Astron. Astrophys.*, 304, 585, 1995.
- Hagyard, M. J., Observed nonpotential magnetic fields and the inferred flow of electric currents at a location of repeated flaring, *Sol. Phys.*, 115, 107, 1988.
- Hagyard, M.J. and Rabin, D.M., Measurement and interpretation of magnetic shear in solar active regions, *Adv. Space Res.*, 6, 7, 1986.
- Hagyard, M. J., Smith, J. B., Teuber, D. and West, E. A., A quantitative study relating observed shear in photospheric magnetic fields to repeated flaring, *Sol. Phys.*, 91, 115, 1984.
- Hahn, M., Gaard, S., Jibben, P., Canfield, R. C. and Nandy, D., Spatial relationship between twist in active region magnetic fields and solar flares, *Astrophys. J.*, 629, 1135, 2005.
- Hale, G. E., Ellerman, F., Nicholson, S. B., and Joy, A. H., The magnetic polarity of sun-spots, *Astrophys. J.*, 49, 153, 1919.
- Herdiwijaya, D., Makita, M., Answar, B., The Proper Motion of Individual Sunspots, *PASJ*, 49, 235, 1997

- Holder, Z. A., Canfield, R. C., McMullen, R. A., Nandy, D., Howard, R. F., and Pevtsov, A. A., On the tilt and twist of solar active regions, *Astrophys. J.*, 611, 1149, 2004.
- Ishii, T. T., Kurokawa, H., Takeuchi, T. T., Emergence of a Twisted Magnetic Flux Bundle as a Source of Strong Flare Activity, *Astrophys. J.*, 499, 898, 1998
- Ishii, T. T., Kurokawa, H., Takeuchi, T. T., 2000, Emergence of Twisted Magnetic-Flux Bundles and Flare Activity in a Large Active Region, NOAA 4201, *PASJ*, 52, 337, 2000
- Kononovich, E. V., Krasotkin S. A., and Chumak O. V., In J.-C. Vial and B. Kaldeich-Schu"mann (eds.), Plasma dynamics and diagnostics in the solar transition region and corona, *Proc. 8th SOHO Workshop*, ESA SP-446, 379, 1999.
- Krall, K. R., Smith, J. B., Hagyard, M. J., West, E. A., Cumings, N. P., Vector magnetic field evolution, energy storage, and associated photospheric velocity shear within a flare-productive active region, *Solar Phys.*, 79, 59, 1982.
- Kurokawa, H., Wang, T., and Ishii, T., Emergence and drastic breakdown of a twisted flux rope to trigger strong solar flares in noaa active region 9026, *Astrophys. J.*, 572, 598, 2002.
- Kunzel, H., Die Flare-hufigkeit in fleckengruppen unterschiedlicher klasse und magnetischer struktur, *Astronomische Nachrichten*, 285, 271, 1960.
- Li, W., Chik-Yin, Lee., Chae, J., et al., Magnetic Fields and Solar Processes, ed. A. Wilson, *ESA SP Series*, 448, 169, 1999.

- Liu, J. H. and Zhang, H. Q., The magnetic field, horizontal motion and helicity in a fast emerging flux region which eventually forms a delta spot, *Sol. Phys.*, 234, 21, 2006.
- Liu, Y. and Zhang, H. Q., Relationship between magnetic field evolution and major flare event on July 14, 2000, *Astron. Astrophys.*, 372, 1019, 2001.
- Liu, Y. and Zhang, H. Q., Analysis of a delta spot, *Astron. Astrophys.*, 386, 646, 2002.
- Longcope, D. W. and Fisher, G. H., The effects of convection zone turbulence on the tilt angles of magnetic bipoles, *Astrophys. J.*, 458, 380, 1996.
- Low, B. C. and Nakagawa, Y., Dynamics of solar magnetic fields. VI, *Astrophys. J.*, 199, 237, 1975.
- McIntosh, P. S., The classification of sunspot groups, *Sol. Phys.*, 125, 251, 1990.
- Moon, Y. J., Chae, J., Wang, H. M., Choe, G. S. and Park, Y. D., Impulsive Variations of the Magnetic Helicity Change Rate Associated with Eruptive Flares, *Astrophys. J.*, 580, 528, 2002.
- Moon, Y. J., Cho, K. S., Dryer, M., Kim, Y. H., Bong, S. C., Chae, J. and Park, Y. D., New geoeffective parameters of very fast halo coronal mass ejections, *Astrophys. J.*, 624, 414, 2005.
- Moore, R. L. and LaBonte, B. J., The filament eruption in the 3B flare of July 29, 1973 - Onset and magnetic field configuration, *In: Solar and interplanetary dynamics; IAUS*, 91, 207, 1980.
- Moore, R. L., Schmeider, B., Hathaway, D. H. and Tarbel, T. D., 3-D magnetic field configuration late in a large two-ribbon flare, *Sol. Phys.*, 176, 153, 1997.

- Moore, R. L., Sterling, A. C., Hudson, H. S. and Lemen, J. R., Onset of the magnetic explosion in solar flares and coronal mass ejections, *Astrophys. J.*, 552, 833, 2001.
- Moreten, G. E. and Severny, A. B., Magnetic Fields and Flares in the Region CMP 20 September 1963, *Solar Phys.*, 3, 282, 1968
- Munro, R. H., Gosling, J. T., Hilder, E., MacQueen, R. M., Poland, A. I., and Ross, C. L., The association of coronal mass ejection transients with other forms of solar activity, *Sol. Phys.*, 61, 201, 1979.
- Nandy, D. and Choudhuri, A. R., Toward a mean field formulation of the babcock-leighton type solar dynamo. I. α -Coefficient versus Durney's Double-Ring Approach, *Astrophys. J.*, 551, 576, 2001.
- Parker, E. N., The formation of sunspots from the solar toroidal field, *Astrophys. J.*, 121, 491, 1955.
- Pevtsov, A. A., Canfield, R. C., Metcalf, T. R., Latitudinal variation of helicity of photospheric magnetic fields, *Astrophys. J.*, 440, L109, 1995.
- Sakurai, T., Magnetic field structures and flares, *Adv. Space Res.*, 13, 109, 1993.
- Sammis, I., Tang, F., and Zirin, H., The dependence of large flare occurrence on the magnetic structure of sunspots, *Astrophys. J.*, 540, 583, 2000.
- Seehafer, N., Electric current helicity in the solar atmosphere, *Solar Phys.*, 125, 219, 1990
- Severny, A. B. and Bumba, V., On the penetration of solar magnetic fields into the chromosphere, *The Observatory*, 78, 33, 1958.

- Shi, Z. X. and Wang, J. X., Delta-sunspots and X-class flares, *Sol. Phys.*, 149, 105, 1993.
- Su, J. T. and Zhang, H. Q., Calibration of Vector Magnetogram with the Non-linear Least-squares Fitting Technique, *Chinese J. Astron. Astrophys.*, 4, 365, 2004.
- Subramanian, P. and Dere, K. D., Source regions of coronal mass ejections, *Astrophys. J.*, 561, 372, 2001.
- Tanaka, K., in R. F. Donnelly (ed.), *solar-Terrestrial Predictions Proceedings*, NOAA-ERL, 3, C1, 1980.
- Tanaka, K., Studies on a very flare-active δ group: Peculiar δ spot evolution and inferred subsurface magnetic rope structure, *Sol. Phys.*, 136, 133, 1991.
- Tanaka, K. and Nakagawa Y., Force-free magnetic fields and flares of August 1972, *Sol. Phys.*, 33, 187, 1973.
- Tang, F., On the origin of δ spots, *Sol. Phys.*, 89, 43, 1983.
- Tian, L. R., Bao, S. D., Zhang, H. Q. and Wang, H. N., Relationship in sign between tilt and twist in active region magnetic fields, *Astron. Astrophys.*, 374, 294, 2001.
- Tian, L. R. and Liu, Y., Relationship between decrease of net magnetic flux and solar major events, *Astron. Astrophys.*, 406, 337, 2003.
- Tian, L. R., Liu, Y., and Wang, J. X., The most violent super-active region in the 22nd and 23rd cycles, *Sol. Phys.*, 209, 361, 2002a.

- Tian, L. R., Wang, J. X. and Wu, D. J., Non-potentiality of the magnetic field beneath the eruption filament in the Bastille event, *Sol. Phys.*, 209, 375, 2002b.
- Tian, L. R., Zhang, H. Q., Tong, Y., and Jing, H. R., The tilt of the magnetic polarity axis in active regions with different polarity separation and flux, *Sol. Phys.*, 189, 305, 1999.
- Waldmeier, M., *Publ. Zurich Obs.*, 9, 1, 1947.
- Wang, H. M., Liu, C., Qiu, J., Deng, N., Goode, P.R., and Denker, C., Rapid Penumbra Decay following Three X-Class Solar Flares, *Astrophys. J.*, 601, L195, 2004.
- Wang, H. M., Song, H., Yurchyshyn, V., Deng, Y. Y., Zhang, H. Q., Falconer, D. A. and Li, J., Relationship between magnetic gradient and magnetic shear in five super active regions producing great flares, *Chinese J. Astron. Astrophys.*, P. in press, 2006.
- Wang, H. N., Longitudinal components of highly stressed magnetic fields in the active region NOAA 7640, *Sol. Phys.*, 157, 213, 1995.
- Wang, H. N. and Wang, J. X., Two-dimensional magnetic singular points and flares in solar active regions, *Astron. Astrophys.*, 313, 285, 1996.
- Wang, T. J., Wang, H. N. and Qiu, J., Two-dimensional singular points in an observed transverse field in solar active region NOAA 7321, *Astron. Astrophys.*, 342, 854, 1999.
- Wang, Y. M. and Sheeley, N. R., On the topological evolution of the coronal magnetic field during the solar cycle, *Astrophys. J.*, 599, 1404, 2003.

- Warwick, C. C., Sunspot configurations and proton flares, *Astrophys. J.*, 145, 215, 1966.
- Webb, D. F. and Hundhausen, A. J., Activity associated with the solar origin of coronal mass ejections, *Sol. Phys.*, 108, 383, 1987.
- Zhang, H. Q., Formation of current helicity and emerging magnetic flux in solar active regions, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 326, 57, 2001a.
- Zhang, H. Q., Electric current and magnetic shear in solar active regions, *Astrophys. J.*, 557, L71, 2001b.
- Zhang, H. Q., Magnetic field, helicity and the 2000 July 14 flare in solar active region 9077, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 332, 500, 2002.
- Zhang, H. Q., Formation of solar delta active regions: twist and writhe of magnetic ropes, *Chinese J. Astron. Astrophys.*, 4, 563, 2004.
- Zhang, H. Q., Observational study of solar magnetic active phenomena by huairou vector magnetograph, *Advances in Geosciences: Solar Terrestrial*, ed. M. Duldig, 2, 83, 2006a.
- Zhang, H. Q., et al., Solar magnetism and activity telescope at Huairou, *Chinese J. Astron. Astrophys.*, In press, 2006b.
- Zhang, H. Q., Ai, G. X., Yan, X., Li, W. and Liu, Y., Evolution of vector magnetic field and white-light flares in a solar active region (NOAA 6659) in 1991 June, *Astrophys. J.*, 423, 828, 1994.
- Zhang, H. Q. and Bao, S. D., Latitudinal distribution of photospheric current helicity and solar activities, *Astron. Astrophys.*, 339, 880, 1998

- Zhang, H. Q. and Bao, S. D., Distribution of photospheric electric current helicity and solar activities, *Astrophys. J.*, 519, 876, 1999.
- Zhang, H. Q., Bao, X. M., Zhang, Y., Liu, J. H., Bao, S. D., Deng, Y. Y., Li, W., Chen, J., Dun, J. P., Su, J. T., Guo, J., Wang, X. F., Hu, K. L., Lin, G. H., and Wang, D. G., Three super active regions in the descending phase of solar cycle 23, *Chinese J. Astron. Astrophys.*, 3, 491, 2003.
- Zhang, H. Q., Sukurai, T., Shibata, K., Shimojo, M. and Kurokawa, H., Soft X-ray flares and magnetic configuration in a solar active region in February 1992, *Astron. Astrophys.*, 357, 725, 2000.
- Zhang, J., Wang, J. X., Deng, Y. Y. and Wu, D. L., Magnetic flux cancellation associated with the major solar event on 2000 July 14, *Astrophys. J.*, 548, L99, 2001.
- Zhou, G. P., Wang, J. X., and Cao, Z. L., Correlation between halo coronal mass ejections and solar surface activity, *Astron. Astrophys.*, 397, 1057, 2003.
- Zirin, H. and Liggett, M. A., Delta spots and great flares, *Sol. Phys.*, 113, 267, 1987.
- Zirin, H. and Tanaka, K., The flares of August 1972, *Sol. Phys.*, 32, 173, 1973.
- Zirin, H. and Wang, H., Strong transverse fields in δ -sunspots, *Sol. Phys.*, 144, 37, 1993.
- Zirin, H., *Astrophysics of the Sun*, Cambridge Unive. Press., 1988

发表文章目录

- [1] **Guo, J.**, Zhang, H. Q., Chumak, O. V. and Liu, Y., A quantitative study on magnetic configuration for active regions, *Sol. Phys.*, 237, 25, 2006.
- [2] **Guo, J.**, Zhang, H. Q. and Chumak, O. V., Magnetic properties of flare-CME productive active regions and CME speed, *Astron. Astrophys.*, in press, 2006.
- [3] **Guo, J.** and Zhang, H. Q., A quantitative study on solar magnetic field and activities, *Proceedings of Advances in Space Research, 36th COSPAR Assembly*, submitted, 2006.
- [4] Zhang, H. Q., Bao, X. M, Zhang, Y., Liu, J. H., Bao, S. D., Deng, Y. Y., Li, W., Chen, J., Dun, J. P., Su, J. T., **Guo, J.**, Wang, X. F., Hu, K. L., Lin, G. H., and Wang, D. G., Three super active regions in the descending phase of solar cycle 23, *Chinese J. Astron. Astrophys.*, 3, 491, 2003.
- [5] Chumak, O. V., Zhang H. Q., and **Guo J.**, Integral properties of the magnetic fields of solar active regions under quiet and flare activity conditions, *Astron. Astrophys. Trans.*, 23, 525, 2004.
- [6] Chumak, O. V., Zhang H. Q., and **Guo J.**, General properties of magnetic fields in solar active regions and flare productivity, *The 3-rd French-Chinese meeting on solar physics*, ed. Fang, C., Schmieder, B., and Ding, M., Nanjing University Press, 266, 2006.

以上文章中审稿文章4篇，非审稿文章1篇（[6]），会议文章2篇，第一作者SCI文章3篇，非第一作者SCI文章1篇。

致 谢

非常荣幸有机会来以张洪起教授为首席科学家的怀柔太阳观测基地学习。衷心感谢我的导师张洪起研究员，是他带我走进了太阳物理的大门。他严谨的科学态度，深邃的思想，开阔的视野以及勤俭节约的生活作风无不令人敬佩。五年来，导师无论在生活上，还是课题的选择、研究和论文的写作上，无时不给予我热情的关怀、指导和帮助。如果没有他的悉心指导，要完成这本博士论文中的工作是难以想象的。谨在此向他表示崇高的敬意和最衷心的感谢！

感谢俄罗斯莫斯科大学 Chumak O. V. 教授对我的不吝赐教，本文用到的主要的参数有效距离参数就是他提出来的，定量分类法也是基于他的基本思路之上完成的，我在研究过程中得到了他的热情的指导与帮助。正是他刻苦执著的研究精神鼓舞着我坚持不懈的完成我的研究工作！

衷心感谢邓元勇研究员的热情关怀和以及富有收获的讨论。感谢包曙东研究员、张枚研究员、苏江涛副研究员、王东光高级工程师、胡柯良高级工程师的不吝赐教。感谢林刚华副研究员对我计算机方面的帮助。感谢汪国萍老师对我工作和生活上的热情的关怀和帮助。感谢怀柔站默默无闻的其他工作人员如：王艺、李焕荣、李威、张鼎波、阮文东、卢永宁和程瑶等，是他们保持了怀柔观测站优良的工作生活环境，我的许多工作都是在这块远离喧嚣的净土上完成的。

另外感谢天文台的汪景琇研究员、颜毅华研究员、王华宁研究员、张军研究员，国外专家王海民教授、李京博士、刘煜博士。衷心感谢杜红荣老师多年来热情周到的帮助。

感谢一起工作、刻苦努力的师兄、师姐、师弟、师妹们：包星明、张印、刘继宏、陈洁、阮桂平、高裕、徐海清、王晓帆、谢文彬、杨尚斌、张志勇、孙英

姿、胡新华等，与你们一起的学习、交流和讨论开阔了我的思路。

感谢同窗好友白光顺、刘飞飞、贾志宏、周玮、郝彩娜，这段人生岁月因了你们的陪伴而变得充实、愉快又丰富多彩。

感谢我的家人，是他们默默无闻的付出和关怀给予了我最大的支持和鼓励。尤其感谢我的先生林佳本，感谢他无微不至的关爱与照顾，是他的执著和热情一直鼓舞着我在太阳物理博大精深的知识海洋中坚持不懈的走到今天。

最后我要感谢邓元勇研究员、王华宁研究员和毛信杰教授，感谢他们在百忙之中抽出时间对我的论文进行了认真细致的评阅，纠正了论文一些写作和认识上的错误，他们提出的宝贵建议对于本论文的最终完成起到了至关重要的作用。