

分类号\_\_\_\_\_

密级\_\_\_\_\_

UDC \_\_\_\_\_

编号\_\_\_\_\_

# 中国科学院研究生院 博士学位论文

太阳跨赤道日冕环的研究

陈洁

指导教师 张洪起 研究员 包曙东 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 2007年4月 论文答辩日期 2007年6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 汪景琇 研究员



## 摘 要

跨赤道环是连接赤道南北半球的一种日冕环。基于空间观测资料,和地面观测资料,本文对跨赤道环作了系统的统计研究。从 *Yohkoh* 软 X 射线 1991–2001 年的数据库中,辨认出了 356 个跨赤道环,研究了跨赤道环的一些特性。作者的主要工作有:

1. 提出了新的跨赤道环 (TL) 分类方法。356 个跨赤道环可以根据两种标准分类: 其中一种是根据跨赤道环足点的磁类型分类, 另一种是根据同一区域中的跨赤道环数分类。基于第一个标准, 跨赤道环可以分成: PTL, 跨赤道环足点的磁极性和双极黑子的前导极性相同; FTL, 跨赤道环足点的磁极性和双极黑子的后随极性相同。通过统计研究, 在 356 个跨赤道环中 PTL 占 64%, FTL 占 36%。PTL 占优的这种趋势并不随着太阳活动周的变化而改变。基于第二种分类方法, 跨赤道环可分成在一个区域中只有一个跨赤道环的 STL 和在一个区域中存在多于一个跨赤道环的 MTLs。分析了 TL, PTL 和 FTL 与太阳活动周指数的关系, 发现它们有很好的相关性。得到了不同年份跨赤道环数和太阳活动区数的比值关系。

2. 计算了跨赤道环两足点的距离, 倾角和纬度不对称性, 研究了这三个量和太阳活动周的关系。发现了跨赤道环足点分裂度随太阳活动周的变化与太阳黑子活动的蝴蝶图一致: 在太阳活动周的开始跨赤道环的分裂度最大, 随着太阳活动周的变化, 分裂度逐渐减小。跨赤道环的倾角和纬度不对称性并不随着太阳活动周的变化而改变。

3. 用局部电流螺度  $h_c$  和无力因子  $\alpha_{best}$  两个参数计算了跨赤道环连接的 43 对活动区的螺度符号和 50 对磁极性区的螺度形式, 这两个参数得到了近似相同的

结果：(1) 跨赤道环连接的活动区对的螺度形式并没有明显的相关性：约50%的活动区对螺度符号相同，50%的活动区对的螺度符号相反。(2) 如果我们考虑跨赤道环所连磁极性区的螺度符号关系，得到了和上面相似的结果：约有一半的磁极性区对有相同的螺度符号。

4. 基于观测的纵向磁场，对33个跨赤道环作了线性无力场外推。这些外推的环可以分为两部分：一部分是跨赤道环连接的磁极性区的螺度符号相同，另一部分跨赤道环连接的磁极性区的螺度符号相反。对于第一部分，跨赤道环的扭曲符号趋向于和磁极性区的螺度符号相同。

5. 对160个跨赤道环的非势性，即长度与距离的比值 ( $T_w$ ) 进行了研究，对跨赤道环所连接活动区产生的耀斑作了统计，分析了跨赤道环的非势性和其连接活动区产生耀斑的关系，结果发现它们并没有明显的相关性。

作者的主要贡献为：首次从统计的角度上发现了跨赤道环更容易连接双极黑子的前导极性。用大量的样本说明跨赤道环连接的活动区对的螺度符号没有明显的相关性，这与前人得到的结论有些不同。

论文主要有以下几部分组成：第一章引言，第二章介绍了跨赤道环研究现状，第三、四、五章详细介绍了作者的工作，第六章给出了结束语。

**关键词：** 太阳活动，日冕环，跨赤道环，螺度

## Abstract

Transequatorial loops are one type of coronal structures which connect different regions in the opposite hemispheres. In this thesis, we made a statistical study for transequatorial loops based on a great lot of images. We identify 356 transequatorial loops (TLs) from the data set of *Yohkoh* Soft X-Ray Telescope (SXT) in the period of solar cycles 22 and 23, then survey some properties of TLs. Our main contributions are as follows:

1. The classification of the TL can be made on two bases. One is according to the magnetic polarities of the TLs footpoints, and the other is according to the TL number in the same region. Based on the first criterion, TLs fall into two categories: PTL in which the magnetic polarities of the footpoints are the same as the preceding polarities (PTL), and FTL in which the footpoint polarities are the same as the following polarities (FTL) of active regions, respectively. It is found that PTL has a preference; about 66% of the TLs are PTL, and this preference of PTL is independent of the solar cycle. The percentage of FTL is about 34%. Based on the second criterion, TLs are also divided into two categories: the number of TLs in a region is either single (STL) or multiple (MTLs). In addition, we find that the number of TL, PTL, and FTL numbers have good correlations with solar cycle indices. By comparing the number of TLs and the number of active regions in each year, we obtain the ratio between them.

2. Three parameters of TLs are computed: separation of footpoints, tilt angle and asymmetry in latitude; their yearly variations are calculated. we find

separation of footpoints is consistent with Spörer's law. Tilt angle and Asymmetry in latitude have no obvious changes following solar cycle.

3. We calculate the helicity patterns of 43 pairs of active regions and the chirality of 50 pairs of opposite magnetic polarity regions which are connected by the transequatorial loops (TLs). In order to make the results more convincing, two helicity proxies including the local current helicity  $h_c$  and the force-free factor  $\alpha_{best}$  are computed. The results are similar from both of the two parameters, they are as follows: (1) Current helicity of the active regions pairs connected by transequatorial loops have no obvious regularity: about 50% of the active region pairs carry the same current helicity sign and about 50% of them have the opposite. (2) If we consider the magnetic polarity pairs connected by the TLs, the result is almost the same as the active region pairs, a little more than a half of them show the same chirality.

4. The force-free field extrapolation is made to fit these transequatorial loops based on the observed longitudinal magnetic field. We calculate 33 TLs which are divided into two parts: one part is both of the two active regions connected by the TLs having the same chirality; the other is the two active regions having the opposite handedness. In the first part, the TLs twist signs tend to be the same as the active region pairs chirality.

5. The non-potentiality of 160 TLs are analyzed, the flare number of the active regions connected by TLs are surveyed statistically. We find that there is no clear relation between the non-potentiality of TLs and the eruption of flares.

Some new results are obtained in our work. We first find that the TLs are more easily connected preceding polarities than following polarities of the

sunspots and obtain that the helicity patterns of the active region pairs connected by TLs have no clear correlation which is different from the previous result.

The thesis is composed as follows: a brief introduction is presented in Chapter 1; in Chapter 2 we investigate the recent research of TLs; our main contributions are demonstrated in Chapters 3, 4 and 5. The summary of our work are given in Chapter 6.

**Keywords:** solar activity, coronal loop, transequatorial loop, helicity



# 目 录

摘要	3
Abstract	5
目录	9
第一章 引言	1
1.1 太阳的结构	1
1.2 太阳日冕的简介	2
1.2.1 太阳日冕的观测历史	2
1.2.2 日冕磁场	4
1.2.3 日冕的几何形状	5
1.2.4 太阳日冕的密度结构	5
1.2.5 太阳日冕的温度结构	7
1.2.6 太阳日冕的辐射谱	9
1.3 软X射线望远镜观测的日冕	10
1.3.1 Sigmoid结构	11
1.3.2 X射线亮点	12
1.3.3 X射线观测到的一些结构	15
1.4 磁螺度以及在太阳物理上的应用	15
1.4.1 理论方面	16

1.4.2	观测方面	25
1.4.3	螺度的起源以及半球规则产生的原因	31
1.5	研究本文的目的和意义	33
<b>第二章</b>	<b>跨赤道环研究现状</b>	<b>35</b>
2.1	跨赤道环的形态特征	35
2.2	跨赤道环的形成和消失	37
2.3	跨赤道环与太阳活动的关系	39
2.3.1	跨赤道环与同调耀斑的关系	39
2.3.2	跨赤道环与日冕物质抛射的关系	39
<b>第三章</b>	<b>跨赤道环的统计研究</b>	<b>43</b>
3.1	引言	43
3.2	观测和数据处理	43
3.3	跨赤道环分类	44
3.4	统计结果	48
3.5	跨赤道环与太阳活动周之间的关系	49
3.6	跨赤道环的三个参数	50
3.6.1	足点的距离	51
3.6.2	倾角	51
3.6.3	纬度不对称性	52
3.7	结论和讨论	53
<b>第四章</b>	<b>跨赤道环足点的螺度形式</b>	<b>55</b>
4.1	引言	55

目 录	9
4.2 观测和数据处理	56
4.2.1 矢量磁图数据处理	56
4.2.2 外推	59
4.3 结果	59
4.3.1 例子	59
4.3.2 统计结果	61
4.4 结论和讨论	69
<b>第五章 跨赤道环非势性与其连接活动区产生耀斑的关系</b>	<b>87</b>
5.1 引言	87
5.2 资料分析	88
5.2.1 跨赤道环非势性的计算方法	88
5.2.2 跨赤道环非势性和其足点活动区爆发耀斑的关系	89
5.3 结论和讨论	92
<b>第六章 结束语</b>	<b>93</b>
<b>参考文献</b>	<b>95</b>
<b>发表文章目录</b>	<b>103</b>
<b>致谢</b>	<b>105</b>



## 第一章 引言

太阳是太阳系的中心天体，一颗普通的主序星，位于银河系的一个旋臂上，它从诞生到现在经过了将近47亿年。它是离地球最近的一颗恒星，是地球能量的源泉。太阳上的剧烈活动，耀斑爆发，日冕物质抛射，能够引起地球磁场和电离层的强烈扰动，对空间环境研究，具有重要的应用价值。

### 1.1 太阳的结构

对于太阳内部，不能直接观测，主要是通过一定的理论模型来了解，这些模型须与观测的日震频率和中微子通量一致。通过理论研究和各种观测已经确定，太阳内部大致可以分为以下几个球层。从日心到大约 $1/4$ 个太阳半径的区域，叫日核区。这个区域是太阳的产能区，中心温度接近1,500万度，不断的由氢原子发生核聚变转化成氦。从 $1/4$ 个太阳半径到约 $3/4$ 个太阳半径处称为辐射层。在太阳内部，辐射能以X射线和 $\gamma$ 射线的形式存在。辐射流以一种类似于耗散的过程向光球传输，当能量流向外传输时，气压和质子的平均能量都下降，当达到 $3/4$ 个半径时，能量传输的形式从辐射耗散转换成对流。自 $3/4$ 个太阳半径到肉眼所看到的太阳表面附近，称为对流层。在对流层，能量以对流元胞的形式循环向外传输。热的元胞浮起到太阳表面释放一部分能量，变冷下降，然后被加热，再上浮，释放能量，变冷下降，不断重复这样的过程。

对流层的上方是太阳的大气。太阳大气根据温度和密度的不同，大致可以分成光球层、色球层和日冕层。我们用肉眼直接观测到的太阳表面是太阳的光球层，它是很薄的一层，用白光观测会发现它存在临边昏暗现象。光球外面是一个较厚的层次，称为色球层。它的密度比光球低，温度却比光球高，在1500千

米以下的色球比较均匀, 1500千米以上充满了针状体。色球外面是一层更稀薄但温度很高能达到百万度的大气层, 称日冕。色球和日冕的密度非常稀薄, 其亮度比地面白天的亮度还要低几个量级, 只有在日全食时或借助特殊的太阳望远镜才能看到它们(林元章, 2000)。

## 1.2 太阳日冕的简介

### 1.2.1 太阳日冕的观测历史

由于太阳日冕非常稀薄, 汤姆逊散射产生的光学辐射并不容易被看到, 只有在日食时才可以观测到。中国早在公元前28年就有了日食的纪录。在日食期间观测日珥开始于1842年(Guillermier和Koutchmy, 1999)。Lyot于1930年建立了第一台日冕仪, 这架仪器并不需要等到日食时才能观测到日冕, 而是遮盖了太阳的亮日面, 可以进行常规的日冕观测(Bray等, 1991)。

在光学波段, 可以看到光球层, 而日冕基本上是看不见的; 而在软X射线、硬X射线或射电波段, 最亮的发射来自于日冕。日冕观测的重大突破开始于发射火箭和卫星的空间时代。Skylab的发射, 使太阳空间的多波段观测进入崭新的时代, 它携带两台X射线望远镜, 一台EUV光谱仪和一台UV光谱仪, 在其观测期间记录了32, 000张照片。Skylab的科学成果主要集中在对冷、热活动区环和耀斑环的研究(Bray等, 1991)。

第一架致力于太阳的空间卫星, 太阳极大年使者(SMM)于1980年2月发射, 一直观测到1989年12月, 持续了将近一个太阳活动周。SMM观测到了12, 000个太阳耀斑和几百个日冕物质抛射(CME), 并取得了大量的科学成果(Makishima, 1982; Takakura等, 1983(仪器描述))。太阳日冕的软X射线像的重大突破来自于日本发射的Yohkoh卫星(Tsuneta, 1991(仪器描述))。Yohkoh于1991年到2001年的观测, 提供了10年的软X射线像, 第一次展示了

大尺度磁力线重构和耀斑过程磁重联的几何和拓扑。1995年SOHO卫星发射成功，为太阳物理研究提供了大量的科学数据（Fleck等，1995（仪器描述））。通过这颗卫星，可以观测从太阳内部到30个太阳半径以外的日球空间。这颗空间卫星共有12个仪器组成，其中3个仪器观测日震（GOLF, VIRGO, SOI/MDI），5个仪器用来观测太阳大气（SUMER, CDS, EIT, UVCS, LASCO），还有4个粒子探测器用来观测太阳风（CELIAS, COSTEP, ERNE, SWAN）。主要有以下几个仪器观测日冕：太阳紫外发射辐射测量仪（SUMER），光谱范围在500到1610埃；日冕诊断光谱仪（CDS），光谱范围在150到800埃；极紫外成像望远镜（EIT），可以在171埃，195埃，284埃和304埃成全日面像；紫外日冕光谱仪（UVCS）提供了1到3个太阳半径的光谱诊断；大角度分光日冕仪（LASCO）观测从1.1到30个太阳半径的日球空间。SOHO卫星是一个相当成功的仪器，它为太阳日冕的研究提供了丰富的数据资料。

TRACE卫星对日冕的观测提供了史无前例的高空间分辨率（0.5角秒/像元），它是只有一架望远镜的卫星，称为过渡区和日冕探测器（Handy等，1999（仪器描述））。TRACE卫星于1998年4月发射到现在一直在很好的观测。仪器的视场为 $8.5 \times 8.5$ 角分，口径为30厘米，它由三个极紫外波段（171埃，195埃，284埃），一个紫外波段（1600埃）和一个白光波段（5000埃）组成。覆盖的温度范围从6000K到10MK，主要覆盖的温度在1-2MK的紫外波段。TRACE高分辨率的资料对我们了解日冕等离子体动力学，日冕加热和变冷，以及磁重联过程起到了重要作用。高能太阳分光仪（RHESSI）于2002年2月5日发射，用来探测粒子加速和太阳耀斑能量释放过程的基本物理（Lin等，1998）。

对于太阳日冕的结构和动力学特征的物理解，在过去的十年内主要来自于UV, EUV, 软X射线和硬X射线的高分辨率空间观测，但是，地面观测站也起到了一定作用。澳大利亚从1967到1984年的射电日像仪，法国从1977年开

始的Nancay射电日像仪，美国加利福尼亚从1978年开始Owens谷（OVRO）射电观测台，俄罗斯从1972年开始的RATAN-600以及日本从1972年开始的Nobeyama射电观测站提供了丰富的太阳日冕射电成像资料，同时全世界也有大量的射电光谱仪，比如怀柔的射电频谱仪，对射电成像仪起到了补充作用（Aschwanden, 2006, P7）。

### 1.2.2 日冕磁场

磁场在太阳日冕中占主要位置，它控制了日冕的动力学特征和拓扑结构。热等离子体流沿着磁力线流动，能量粒子沿着磁力线传播。冕环是由热等离子体填充的管道，其形状由日冕磁场限定。日冕中存在两种不同的磁区域，开放场和闭合场。开放场由日冕中开放的磁力线组成，总是存在于极区，有时向赤道延伸，连接到太阳表面，是高速太阳风（约 $800\text{km/s}$ ）的源区。无论何时色球足点的等离子体被加热，开放的磁位形都可以将等离子体有效的传输到日球。相反的，闭合场是由日冕中闭合的磁力线组成，高度为大约一个太阳半径，能够产生大约 $400\text{km/s}$ 的低速太阳风。闭合的磁力线区存在高密度的日冕环，是色球等离子体由闭合的磁力线捆绑而形成。

太阳表面的磁场并不是各向同性的。最强的磁场区为黑子区，场强达到2000到3000高斯。宁静区的磁场最弱，只有几高斯。日冕磁场很弱，不能直接测量，而是通过间接的方法得到。目前主要有以下几种方法：(1) 在 $\geq 0.5$ 个日地距离由空间飞行器测量，(2) 由塞曼效应测量活动区暗条，(3) 由光球磁场作外推，(4) 由射电波段的资料来推断。（章振大，2000）

Dulk和McLean（1978）得到了磁场随高度变化的半经验公式：

$$B(R) = 0.5\left(\frac{R}{R_{\odot}} - 1\right)^{-1.5}G \quad (1.1)$$

这个公式适用于1.02到10个太阳半径之间。

### 1.2.3 日冕的几何形状

太阳和恒星大气普遍被认为有一个球状的表面，沿着表面的径向方向密度会逐渐降低。球状结构假定压力平衡和各向同性，主要是由于重力的作用，这种假定对于平均密度结构是一个有用的基本概念。然而，太阳日冕由于磁场的作用，具有高度的各向异性。起决定性作用的参数是等离子体 $\beta$ 值，即热压 $p_{th}$ 与磁压 $p_{mag}$ 比。在日冕的大部分区域，等离子体 $\beta$ 值小于1，即磁压大于热压，这形成了一种拓扑限制，热压不足以横向穿过磁场。

对于日冕拓扑结构的理解过程由图1.1来描述 (Schrijver, 2001)。在20世纪50年代，重力的作用使太阳日冕根据平均密度结构分层。到了20世纪80年代，磁结构的概念引入到日冕。20世纪末，空间望远镜带来的高分辨率图像展示了太阳日冕在空间上的各向异性和时间上力学的演化。加热的色球向上流，变冷的向下流，磁重联，以及与波的相互作用。从图中可以清楚地看出日冕从静态的球对称的模型向着动态的各向异性的拓扑结构演化。

### 1.2.4 太阳日冕的密度结构

日冕中的粒子密度很小，比地球上任何实验室真空的密度都要低。太阳日冕的电子密度在宁静区的底部约为 $10^9 cm^{-3}$ ，在高于太阳表面大约一个太阳半径的高日冕电子密度约为 $10^6 cm^{-3}$ 。耀斑环的电子密度很高，能达到 $10^{11} cm^{-3}$ 。在色球区域密度比日冕增加了几个量级，氢的电离温度下降到11,000K。因此，色球的等离子体只部分的被电离，然而日冕被全部的电离。基于EUV线离子丰度的测量，流体静力学平衡，辐射转移和双极耗散，色球密度可以计算得很具体。

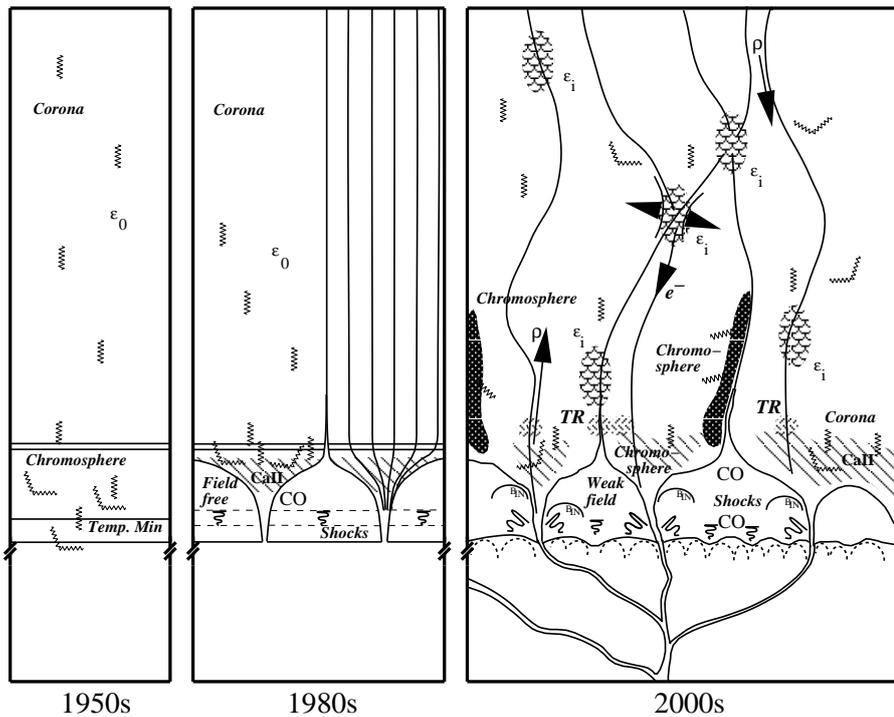


图 1.1: 太阳日冕几何形状的卡通图。左图：二十世纪五十年代，重力分层结构；中间：二十世纪八十年代，色球垂直通量管结构；二十世纪末，光球、色球、日冕的各向异性结构。（Schrijver, 2001）

日冕中的等离子体密度是高度各向异性的。在日冕底部，即大约高于光球2500KM，冕洞的密度是最低的，大约为 $(0.5 - 1.0) \times 10^8 \text{cm}^{-3}$ 。在宁静区的底部密度要高一些约 $(1 - 2) \times 10^8 \text{cm}^{-3}$ ，在日冕流的底部密度为 $(3 - 5) \times 10^8 \text{cm}^{-3}$ ，在活动区密度最高约为 $2 \times 10^8 - 2 \times 10^9 \text{cm}^{-3}$ 。在高日冕，也就是高度大约为1个太阳半径，密度下降到 $(10^6 - 10^7) \text{cm}^{-3}$ 。

用白光数据测量日冕密度始于1950年，此方法假定白光偏振由汤姆逊散射形成并且正比于沿视向方向日冕电子密度。第二种方法是用射电爆通过日冕传播的频率来测量，因为发射频率对应于基频和谐振的等离子体频率，它是电子密度的一个函数。在刚刚过去的几十年里，EUV波段和软X射线波段的空间观

测提供了基于发射测量的另一种方法,对于光学薄的辐射,日冕密度正比于沿着圆柱轴向积分的平方密度。这种方法适应于不同的谱线,因此等离子密度可以在不同的温度分别测量。然而,这种方法也存在一定的缺陷,因为每一个仪器都有有限的空间分辨率,此方法并不适合解决低于有效密度的等离子体结构。在 $120\text{\AA}$ 的密度敏感线存在相对高的密度 $n_e \leq 10^{12}\text{cm}^{-3}$ ,可以测量绝对密度。(Aschwanden, 2006, P24)

太阳日食期间的白光观测可以发现日冕分成三部分:(1) K冕,主要存在于 $r \leq 1.3$ 太阳半径,由自由电子散射光球的光而形成的局部偏振连续谱发射;(2) L冕,主要存在于 $r \leq 1.5$ 太阳半径,由高度离子化原子的谱线发射组成;(3) F冕,主要存在于 $r \geq 1.5$ 太阳半径,有行星际尘埃衍射的光球夫琅和费衍射谱线的吸收线形成。(章振大, 2006)

### 1.2.5 太阳日冕的温度结构

太阳日冕的百万度高温在六十年前当Bengt Edlen分析谱线的时候才发现。关于太阳日冕高温的物理理解目前还不太清楚,因为它看起来违反了热力学第二定律。有一个平均温度大约为 $T = 5785\text{K}$ 的光球边界,然而,从色球到日冕,温度很快上升到百万度。从日冕到日球温度下降得很慢,到一个日地距离时 $T \approx 10^5\text{K}$ 。

太阳日冕的温度结构是各向异性的。在软X射线和EUV波段光学薄的发射由热的等离子体填充了日冕结构。因为热压小于磁压,等离子体沿着磁力线的方向传输,垂直于磁力线的耗散被禁止,这造成每一个日冕环代表一个孤立的热系统,只有小的色球足点作为真空管提供热量和物质交换。因为日冕环足点的加热在时间和空间并不是连续的,当获得一个类稳态的热速度时,其中的一个环就会有能量输入从而达到一定的温度。结果,日冕有许多不同温度的环组

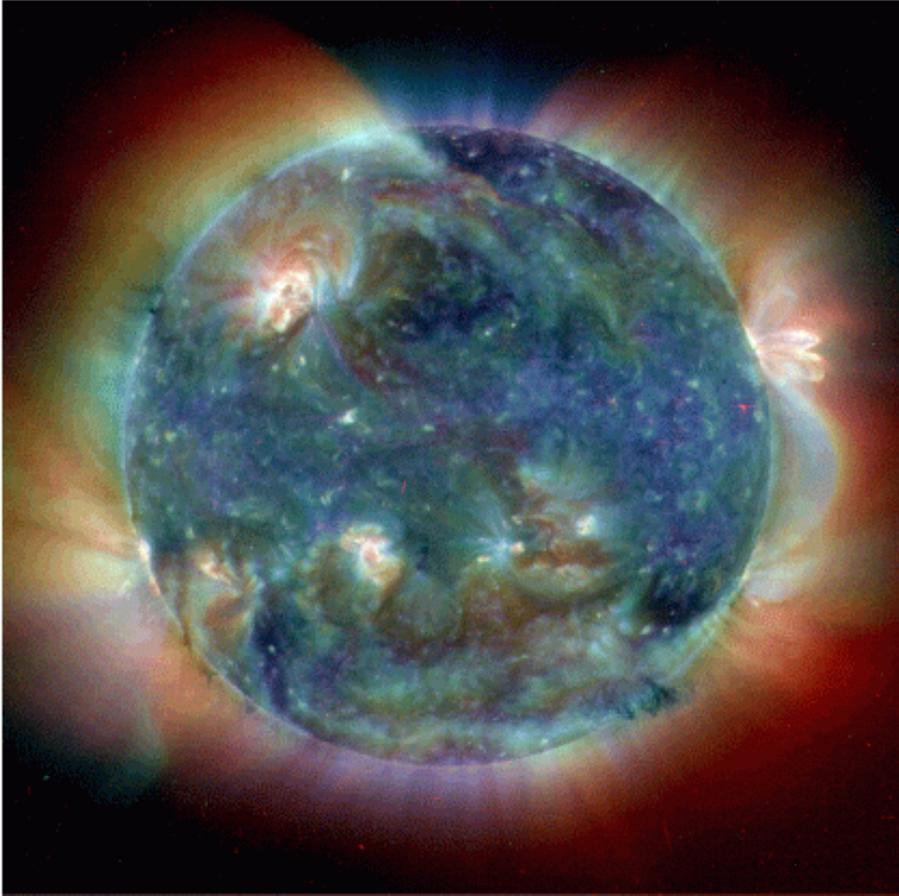


图 1.2: 多温度的太阳日冕 (SOHO/EIT)

成。较冷的一些环在EUV中是可见的, 稍微热一些的环显示在软X射线中。太阳日冕的多温度图片显示在图1.2中。此图由SOHO/EIT的三个不同温度的滤光器组成, 蓝色的图像1.0MK (171Å), 绿色的图像1.5MK (195Å) 和红色的图像2.0MK (284Å)。根据颜色, 我们可以看到北面的冕洞温度最低, 在日冕边缘随着高度的增加温度变大。从图中我们也可以看到另外一个效果, 按照牛顿定律的颜色混合定律: 如果蓝、绿、红以同等强度混合则形成白光。活动区中可以看到白光, 表明在活动区中1.0, 1.2和2.0MK的温度环具有相同的贡献。

日冕中多温度的分布能够定量的表示成差分发射测量分布 $dEM(T)/dT$ ，它由 $n_e(T)$ 的平方沿着圆柱的轴向积分得到，

$$\frac{dEM(T)}{dT}dT = \int n_e^2(T, z)dz, \quad (1.2)$$

这个公式适合于任何给定的温度。这个物理量可以在EUV和软X射线较宽的波段范围测量太阳上的任何一个位置。

日冕中开放的场区温度最低，例如冕洞， $T \leq 1MK$ 。闭合的场区温度居中，例如宁静区， $T = 1 - 2MK$ 。活动区显示的温度最强 $T = 2 - 6MK$ 。开放场区温度略低是因为等离子体的传输很有效，闭合的场区温度稍高一些是因为热的等离子体被捆绑并且不容易离开。宁静区和活动区温度的差别是不同的磁通量浮现速度、热传导速度以及其它相关速度作用的结果。

### 1.2.6 太阳日冕的辐射谱

我们的行星地球除了可以接受太阳和其它恒星的光学和射电波段的发射外，其余的波段都滤掉了。在刚刚过去的十年中，太阳物理的主要进展是大量的空间卫星发射到我们的吸收大气以上。这些空间卫星给我们提供了史无前例的全波段信息，覆盖 $\gamma$ 射线，硬X射线，软X射线，紫外线，极紫外线。

光谱的物理单位一般根据波长 $\lambda$ 来定义，真空中电磁波的基本色散关系为 $\nu = \frac{c}{\lambda}$ 。下面主要介绍几个波段的物理发射过程。

最短的波段是 $\gamma$ 射线波段，在大耀斑的最大能量过程发射，波长范围从 $\lambda = 10^{-3} \sim 10^{-1}\text{\AA}$ ，对应的能量为 $\epsilon \approx 100KeV - 10MeV$ 。很显然，这样高能的辐射只有当粒子在耀斑中被加速产生足够高的能量，与原子核相互作用才能发生。

$\gamma$ 射线波段下面的一个波段是硬X射线波段，能量范围 $\epsilon \approx 10 - 100KeV$ 。能

量范围对应着中间相对论电子，这要求电子在无碰撞的等离子体中被加速。当这些非热电子进入高密度的过渡区和色球时，会通过碰撞和发射电子韧致辐射来释放能量。

硬X射线波段下面的是软X射线波段，波长为 $\lambda = 1 \sim 100\text{\AA}$ ，对应的热能范围为 $\epsilon \approx 0.1 - 10\text{KeV}$ ，等离子体温度为 $T \approx 1.5 - 150\text{MK}$ 。*Yohkoh*望远镜可以很好的观测到软X射线波段的图像。软X射线由电子的自由-自由发射产生，并由日冕中高度电离的离子散射。

软X射线波段下面的是极紫外波段 (EUV)，对应的波长范围是 $\lambda = 100 \sim 1000\text{\AA}$ ，等离子体温度为 $T \approx 0.15 - 1.5\text{MK}$ 。宁静区的温度约是 $T \approx 1 - 3\text{MK}$ ，这样，EUV波段可以很好的测量宁静区。EUV发射像软X射线发射一样，也是由电子的自由-自由发射产生，但是由低温离子散射。

### 1.3 软X射线望远镜观测的日冕

*Yohkoh*卫星于1991年发射，在软X射线波段观测太阳大气将近10年的时间。*Yohkoh*的软X射线望远镜 (SXT) 是一个反射式望远镜，CCD探测器是 $1024 \times 1024$ 像元。它能够提供太阳日冕的全日面像和局部像。其时间分辨率分别为秒和分钟量级；在各成像模式下，又可对CCD像元采取 $1 \times 1$ 、 $2 \times 2$ 、 $4 \times 4$ 的不同组合方式，分别对应 $2.45''$ 、 $4.91''$ 、 $9.81''$ 的角分辨率；局部成像的视场为 $2.6' \sim 10.5'$ ，全日面成像则可达 $42'$ 。为了研究耀斑爆发时的快速演变，SXT还有一个时间分辨率高达0.5秒的特殊成像模式 (Tsuneta, 1991)。

*Yohkoh*卫星运行得很成功，其SXT也有很多有价值的发现，它比以往的观测更清晰地显示了日冕的动态结构和变化。图1.3是1992年8月26日*Yohkoh*卫星软X射线望远镜的一张全日面像。从图中可以看到日冕在软X射线波段的主要结构：冕洞，活动区环（如果活动区环像‘S’形，则称为Sigmoid结构），相互连接

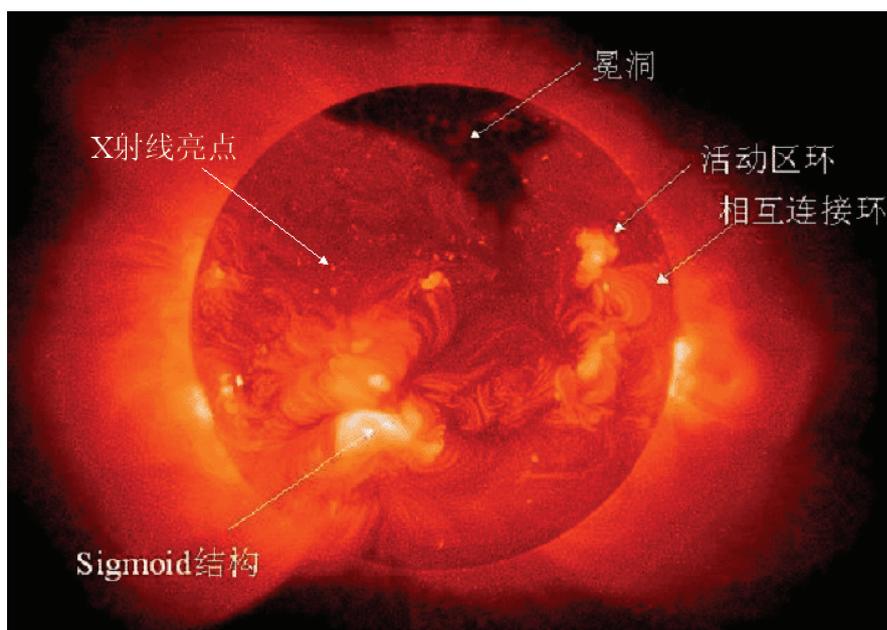


图 1.3: 1992年8月26日的一张软X射线像 (Yohkoh/SXT)

环。

冕洞是用软X射线观测到的日冕大尺度结构，其亮度和密度比宁静日冕低。冕洞也是日冕开放磁场区最常见的特征，是太阳风高速流的日面源，与地磁暴有很强的相关性。活动区环发生于活动区，连接着中性线两边极性相反的区域。相互连接环从活动区向外延伸并与周围光球磁区相连接。当相互连接环连接着赤道两边的区域时，这种环称为跨赤道环。下面对Sigmoid结构和软X射线亮点做详细介绍，并且对软X射线观测到的一些其它结构作简要介绍。

### 1.3.1 Sigmoid结构

软X射线中，经常可以看到‘S’型或反‘S’型的结构，Acton (1992) 首先发现这种结构，Rust和Kumar (1996) 将这种结构命名为Sigmoid结构。图1.4显示了一个Sigmoid演化过程，它从一个‘S’型结构最终演化成环拱。

Sterling和Hudson (1997) 第一次用Yohkoh/SXT 研究了Sigmoid结构和

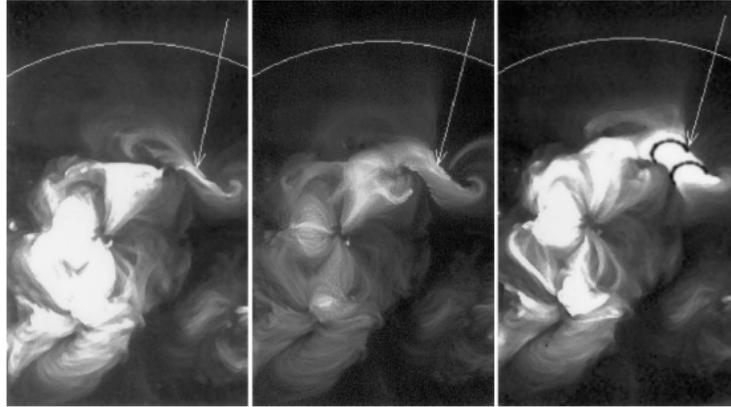


图 1.4: Sigmoid结构的演化 (Rust, 1996)

表 1.1: 活动区根据形态和是否爆发活动的分布

	非Sigmoid	Sigmoid
爆发	28	51
非爆发	28	10
总数	56	61

地日冕物质抛射 (CME) 的关系, 发现CME爆发以后, Sigmoid 变成软X射线拱 (如图1.5)。Hudson (1998) 用大的样本研究发现在对地CME 产生的位置, Sigmoid变成拱的形状是一个普遍的特征。

Canfield等 (1999) 研究了软X射线从1993到1997年的图像, 按照形状将这些活动区分成Sigmoid结构和非Sigmoid结构以及根据是否爆发将其分成爆发型和非爆发型, 发现如果一个活动区是Sigmoid结构更容易爆发 (表1.1)。

### 1.3.2 X射线亮点

X射线亮点 (XBP) 为X射线发射的像点一样的结构。它首先由Vaiana等 (1970) 用火箭发射的软X射线望远镜发现。接着, 一些人用Skylab、Yohkoh卫星

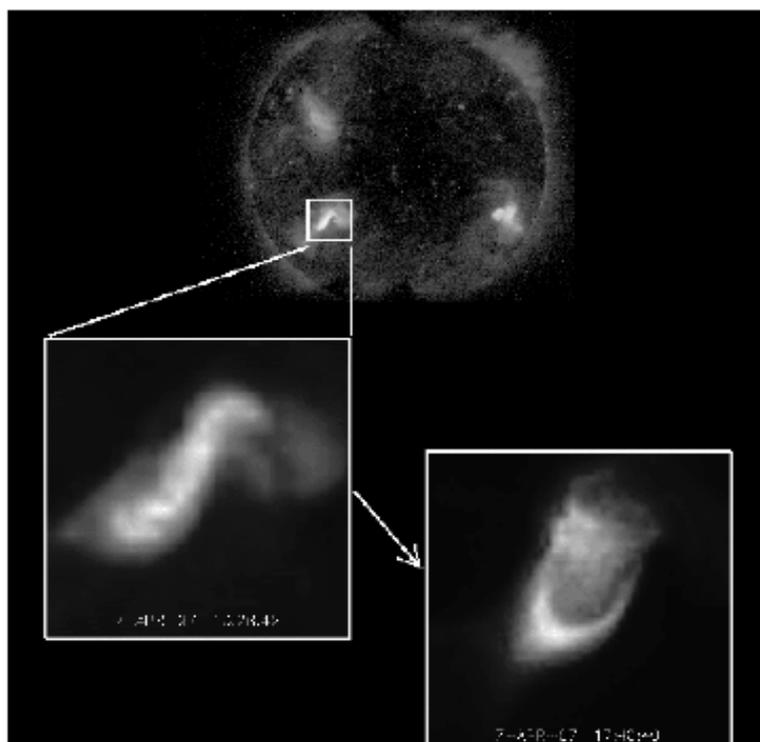


图 1.5: 在日冕物质抛射前后Sigmoid结构的演化

的SXT望远镜和SOHO卫星的EIT望远镜研究了这种结构。X射线亮点的尺度从4到40兆米，它们的纬度分布很广，XBP主要出现在活动区，但是也可以在冕洞和宁静区发现。Davis (1983) 研究表明XBP的数目与太阳活动周反相关，也就是，在太阳活动峰年XBP的数目相对比较少，在太阳活动谷年XBP的数目较多。Golub等 (1989) 把这种现象解释为辅助活动周的存在而使主活动周变成反相位。如果这种活动周存在，对于太阳发电机理论将会有重要的应用。Nakakubo和Hara (1999) 用一个自动程序识别Yohkoh/SXT从1993年到1998年全日面像的XBP，发现XBP数与太阳活动周反相关，它们也分析了XBP的平均强度分布以及每一个亮点附近的背景辐射量，发现从1993年到1996年亮的XBP数并没有明显的变化，而暗的XBP数系统的增加。在同一时

期,背景强度降低。这样,Nakakubo 和Hara (1999) 得出结论在接近于太阳活动极小年时,XBP数的增加值是一个简单的可视效应。

一般的,在任何给定的时刻,每个太阳日面有40-80个XBP。Golub (1974) 估计出每个太阳日面大约有几百个XBP。最近,Longcope等(2001)研究了SOHO/EIT从1996年到1998年期间的11个时间段,发现每个日面的XBP数从43个到91个。在他们的调查中只有10% ~ 20%的太阳日面有大约400个亮点。在Nakakubo和Hara 的研究中,从1993年到1996年的研究中,XBP数从大约160个到270个。

关于日冕亮点和光球磁场的关系,最早由Krieger (1971) 研究。随后,一些科学家也作了研究。在绝大部分研究中,每一个亮点,对应一对小的光球双极。例如,Harvey (1996) 发现52个日冕亮点中有47个与磁双极有关。然而,反相关并不是很强,只有50%的磁双极对应XBP。XBP经常和瞬变活动区(EAR)有关。这种联系提出了一个问题,既然EAR与太阳活动周有一个正的相关,然而XBP存在负的相关关系。另外一方面,Harvey (1996) 研究表明52个日冕亮点中40个与磁对消双极有关,因此,XBP中只有一小部分与EAR有关。虽然,Nakakubo和Hara清楚的建议XBP数与太阳活动周反相关是由于宁静日冕亮度的改变,但是他们并不能解释一些别的观测,例如,XBP在太阳活动区带出现的更频繁。在Sattarov等(2002)年的工作中,用了另外一种方法,也就是,用检测光球双极的特性来辨别XBP与太阳活动周的关系,这与磁活动和可视效应都有关。发现XBP数遵循反相关关系。但是双极区数并不随着太阳活动周变化,他们认为XBP与光球双极有关,XBP不受太阳活动周的影响,这种反相关关系解释为宁静太阳日冕亮度的改变,这种亮度的改变受活动区的影响。

### 1.3.3 X射线观测到的一些结构

图1.6给出了软X射线望远镜观测的一些日冕结构 (Acton等, 1992)。图中A为盔状冕流。冕流是一种大的, 存在寿命较长的, 从日冕底部沿着径向方向向外延伸到几个太阳半径的大的结构。冕流中的盔状冕流由活动区连接并且位于暗条或日珥的上面。B为相互连接的环, 图中显示的是环的横截面, 看起来像一个单一的环。C为软X射线喷流: 热的等离子体沿着开放的磁力线流动, 称为X射线喷流, 基本上是线状结构, 有时有些弯曲。D为后耀斑环: 向上流的热等离子体加热而使软X射线的耀斑环增亮, 形成后耀斑环。E为尖状环: 环状结构在顶部形成一个尖状的点, 称为尖状环。F为多环: 并不是由单一环组成, 而是多个环组成。G为Sigmoid结构: 活动区的环显示剪切的结构。

## 1.4 磁螺度以及在太阳物理上的应用

近年来, 磁螺度这个不大为天体学家所熟悉的量变得越来越热。为什么会出现这种现象呢? 用传统的物理量, 比如能量和磁通量, 我们无法描述磁流体力学中复杂的磁场; 而磁螺度可以研究复杂磁力线的拓扑结构, 可以解决太阳活动区磁场的非势性问题。磁螺度这个量, 与经典的发电机理论, 太阳活动周, 以及近地空间的物理环境有重要的关系。

磁螺度与数学上的拓扑有一定的关系, 还是物理量, 最近应用到空间物理、天体物理中。Elsaser (1956) 首次提出磁螺度这个概念, 并指出在理想MHD中它是守恒的。Woltjer (1958) 把它引入到空间物理和天体物理的研究当中。Moffatt (1969) 认为磁螺度实际上反映了磁场拓扑结构的复杂性。Berger和Field (1984) 提出了相对螺度概念, 使螺度在开放区域内也是一个规范不变量。并在一定的条件和限制下, 计算出了相对螺度随时间的变化。这一开创性的工作, 使螺度能够应用到天体物理中, 尤其是太阳物理上。这样, 可

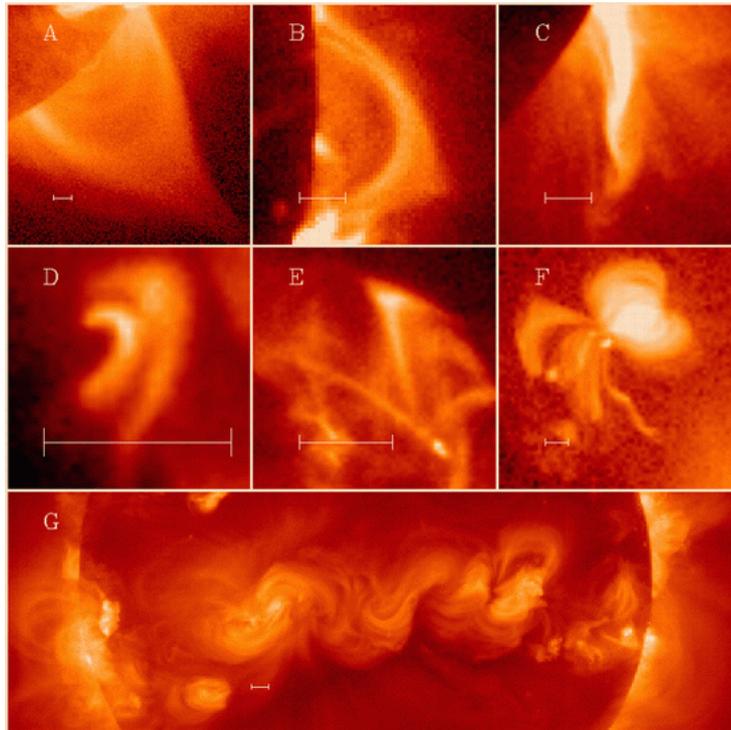


图 1.6: 软X射线像的一些结构 (Acton等, 1992)。A为盔状冕流; B为相互连接的环; C为软X射线喷流; D为后耀斑环; E为尖状环; F为多环; G为Sigmoid结构。

以通过观测计算磁螺度随时间的变化率, 活动区电流螺度的符号。

这一节从螺度理论方面, 观测方面详细介绍了螺度的最新进展。

### 1.4.1 理论方面

#### 1.4.1.1 磁螺度积分

螺度作为一个数学量, 其起源可以追溯到19世纪伟大的数学家高斯。他在研究小行星绕地轨道时, 发现了一个异常的积分公式, 通过它可以计算出两条曲线的连结数。此积分公式是一个双重积分, 假定两条相互连接的曲线为1和2,  $\sigma$  为曲线1的参数,  $\tau$  为曲线2的参数, 曲线1可以表示为 $x(\sigma)$ , 曲线2表

示为 $y(\tau)$ ,  $r=y-x$ , 高斯连结数可以写为:

$$L_{12} = \oint_1 \oint_2 \frac{dx}{d\sigma} \cdot \frac{r}{r^3} \times \frac{dy}{d\tau} d\tau d\sigma \quad (1.3)$$

流体力学中的螺度密度定义为:  $h_f = v \cdot \nabla \times v$ , 且  $\Omega = \nabla \times v$ 。与流体力学中螺度密度定义相似, 磁螺度密度为:  $h_m = A \cdot \nabla \times A$ ,  $B = \nabla \times A$ 。即  $h_m = A \cdot B$

‘螺度’的一般形式为  $\int X \cdot \nabla \times X d^3x$ , 以此类推, 磁螺度的可以定义为  $H = \int A \cdot B d^3x$  矢势A在螺度中是一个比较麻烦的量, 因为它不是一个规范不变量, 通过规范变换会发生改变, 下面我们将会讲到如何把A变成规范不变量。这里, 我们用库仑规范计算A得

$$A(x) = -\frac{1}{4\pi} \int \frac{r}{r^3} \times B y d^3y \quad r = y - x \quad (1.4)$$

螺度变成双重积分形式

$$H = -\frac{1}{4\pi} \int \int B(x) \cdot \frac{r}{r^3} \times B y d^3x d^3y \quad (1.5)$$

这个积分公式与高斯连结数公式1.3相似, 表明磁螺度与所有磁力线的连接数有一定的关系。

虽然磁场中磁力线的连结数为无穷大, 它们也不是简单连接的闭合曲线, 但是可以假定封闭区域内磁力线为闭合的通量管(也就是在边界面S上, B为磁感应强度, n为垂直于表面的方向)。如果, 有N个通量管, 每个通量管携带的通量为 $\phi_i$ ,  $i = 1, 2 \dots N$ 。通量管i, j的连结数为 $L_{ij}$ , 螺度为

$$H = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N L_{ij} \phi_i \phi_j \quad (1.6)$$

当通量管数N趋于无穷大时, 上式的求和形式将会变成积分形式(Arnold和Khesin 1992)。

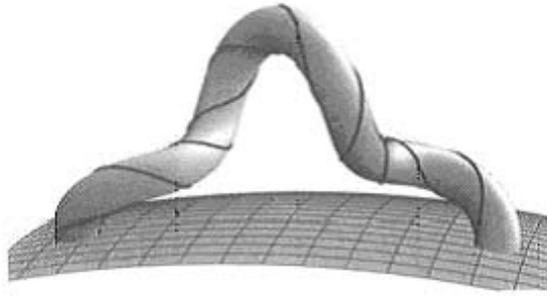


图 1.7: 一个通量管

#### 1.4.1.2 磁螺度的拓扑特性

磁螺度可以反映磁场的不同结构。如扭曲、拧、打结以及连结。扭曲指的是磁力线围绕轴的旋转，用 $T_w$ 表示。拧指轴本身的旋转，用 $W_r$ 表示。扭曲和拧都是指通量管内部的弯曲形式。打结是一个通量管的连结形式，而连结指两个通量管的几何形式，连结数用 $L$ 表示。可以通过计算磁力线围绕轴的扭曲角度，计算其扭曲度，得出 $T_w$ 值；通过计算轴的扭曲，得出 $W_r$ 值；计算 $L$ 可以用上面的高斯连结数公式1.3。1961年，数学家Calugareanu发现了一个关于以上三个量关系的简单公式 $L=T_w+W_r$  通过图1.5我们可以对此有个直观地了解。这个通量管的扭曲 $T_w=2.3$ ，拧 $W_r=0.7$ ，带入公式上述得 $L=T_w+W_r=3$ 。

#### 1.4.1.3 自螺度和互螺度

通量管自身的螺度，我们称自螺度。对于通量管之间的螺度，称为互螺度。如果有一个闭合的空间，边界面上没有磁力线穿出或穿入。如果把这一空间 $V$ 分成 $N$ 个小的区域，每个小区域有一个闭合的磁边界面。那么整个空间总的螺度为这些小区域螺度之和，

$$H_v = \sum_i^N \sum_j^N H_{ij} \quad (1.7)$$

$H_{ij}$ 表示区域*i*和*j*间的磁螺度。对于闭合的磁通量管，如果*i=j*，则 $H_{ii}$ 为自螺度；如果*i≠j*，则 $H_{ij} = L_{ij}\Phi_i\Phi_j$ 称互螺度。

#### 1.4.1.4 螺度守恒

在理想MHD中，如果磁边界面闭合，则螺度守恒。Woltjer (1958) 对此进行了证明。从Maxwell方程出发，得出

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \nabla \times (v \times B) \quad (1.8)$$

引入矢势A，选择一定的规范，使标量势消失，得到

$$\frac{\partial A}{\partial t} = v \times B = v \times \nabla \times A \quad (1.9)$$

得到

$$\nabla \times A \cdot \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (1.10)$$

用以上公式，在体积V中，磁螺度随时间的变化率为

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_V A \cdot \nabla \times A dV &= \int_V A \cdot \nabla \times \frac{\partial A}{\partial t} + \int_V \nabla \times A \cdot \frac{\partial A}{\partial t} dV \\ &= \int_V \nabla \cdot (A \times \frac{\partial A}{\partial t}) dV + 2 \int_V \nabla \times A \cdot \frac{\partial A}{\partial t} dV \\ &= \int_S A \times \frac{\partial A}{\partial t} dS \end{aligned} \quad (1.11)$$

因为磁边界面闭合，所以上式等于0，磁螺度守恒。这一结论的得出，使磁螺度这一物理量广泛的应用到天体物理中。

如果磁螺度中，矢势A和磁感应强度B有小的改变， $A \rightarrow A + \delta A$ ， $B \rightarrow B + \delta B$ ，当其守恒时， $\delta H = \delta A \cdot B + A \cdot \delta B = 0$ 。

磁能的表达式为  $W = \int_V \frac{B^2}{2\mu} dV$ , 对其求微分, 等式右边减去  $\alpha$  倍的上式, 得

$$\begin{aligned} 2\mu\delta W &= \int_V 2B \cdot \delta B - \alpha(\delta \cdot B + A \cdot \delta B) dV \\ &= \int_V \nabla \cdot (-2B + \alpha A) \times \delta A dV + 2 \int_V (\nabla \times B - \alpha B) \cdot \delta A dV \\ &= \int_S (-2B + \alpha A) \times \delta A dV + 2 \int_V (\nabla \times B - \alpha B) \cdot \delta A dV \quad (1.12) \end{aligned}$$

在边界面上  $\delta A=0$ , 则第一项为0。体积V中,  $\delta A$ 为任意值, 若  $\delta W=0$  (即磁能为最小值), 得出线性常  $\alpha$  方程  $\nabla \times B = \alpha B$ 。此方程亦为线性无力场方程。对于这个结果, 可以从感性上认识, 当螺度守恒时, 如果磁能为最小值, 磁力线不运动, 场为无力场。

#### 1.4.1.5 开放场中螺度

用矢势A计算磁螺度, 必须保证A是规范不变量。如果磁表面为闭合的磁边界面 ( $B \cdot \hat{n} |_{S=0}$ ), 矢势A做规范变换  $A \rightarrow A + \nabla \Psi$ , H的变换为

$$\delta H = \int \nabla \psi \cdot B d^3x = \int \nabla \cdot \psi B d^3x = \oint \psi B \cdot \hat{n} |_{S} d^2S = 0 \quad (1.13)$$

因此, A是规范不变量。然而, 如果把磁螺度的概念应用到太阳光球上, 植根于光球表面的磁力线不是闭合的,  $B \cdot \hat{n} |_{S} \neq 0$ , A不是规范不变量。

对于像太阳光球表面一样, 磁场为开放场, Berger和Field (1984) 引入相对螺度这一概念, 使矢势A的规范不变性问题得到解决。他们是这样做的: 有一体积V, 沿着边界面S将其分成  $V_a$  和  $V_b$  两部分, 其中一部分磁场强度相同, 而另一部分磁场强度不同。如图1.8所示。

在体积  $V_b$  中, 磁场强度相同(可以选任意强度); 而  $V_a$  中存在两个不同的场, 这样, 当矢势A发生改变时, 螺度的变化量为0, A为规范变换。

应用以上的规范变换, 作进一步推广。如图1.9, 左图为一个磁场, 沿着边

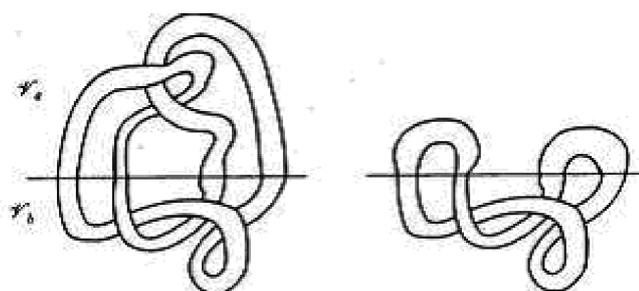
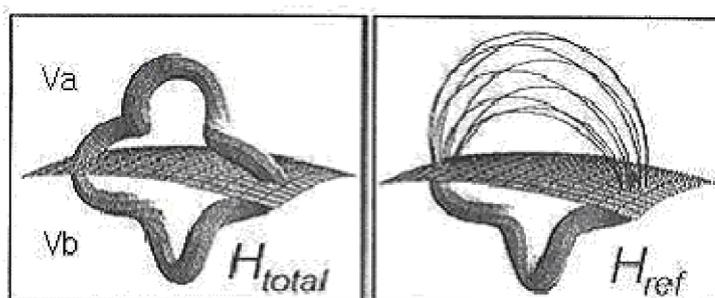
图 1.8: 两个磁通量管, 其中 $V_b$ 完全相同

图 1.9: 做规范后的两个磁通量管

界面将其分成 $V_a$ 和 $V_b$ 两部分,  $H_{total}$ 为场的总螺度。右图, 边界面上边为势场, 用 $P_a$ 表示, 下边和左图完全一致,  $H_{ref}$ 为右图中场的螺度。

因为 $P_a$ 为势场, 所以 $\nabla \times P_a = 0$ ,  $P_a$ 为在此边界条件下的最小能量场。定义 $H_{total} - H_{ref}$ 为体积a中的相对螺度 $H_R(V_a)$ , 可以写为

$$H_r(V_a) \equiv H(B_a, B'_b) - H(P_a, B'_b) \quad (1.14)$$

同理, 体积b中的相对螺度定义为

$$H_r(V_b) \equiv H(B'_a, B_b) - H(B'_a, P_b) \quad (1.15)$$

选 $B'_a = P_a$ ,  $B'_b = B_b$ , 带入(18)(19)式得

$$H(B_a, B_b) = H_R(V_a) + H_R(V_b) + H(P_a, P_b) \quad (1.16)$$

从上面的式子可以看出,  $V$ 中的总螺度等于分开的两个亚体积的相对螺度、势场螺度之和。势场螺度  $H(P_a, P_b)$  与边界面的形状有关。如果边界面为平面或球面, 则  $A_P \cdot \hat{n} |_{S=0} = 0$ ,  $H(P_a, P_b) = 0$ , 势场螺度消失。

如果将一个体积分成  $N$  个区域, 所有的分界面都为平行平面, 或者每个分界面都与球面同球心, 则所有的势场螺度项消失, 整个空间的螺度为

$$H(B) = \sum_{i=1}^N H_R(V_i) \quad (1.17)$$

以上使用参考场提出相对螺度概念, 来计算开放场的螺度。Kusano等(1995)提出了另一种方法, 把空间分成一个闭合环场加势场计算开放场的螺度。这两种方法虽然不同, 但是有相同的结果。

#### 1.4.1.6 螺度传输

对于体积为  $V$  的开放场, 它的边界面是球面或平面 ( $A \cdot \hat{n} |_{S=0} = 0$ ), 且满足条件  $\nabla \cdot A_P = 0$ , 螺度随时间的变化率, 也就是相对螺度随时间的变化率为

$$\frac{dH_R(V)}{dt} = -2c \int_V E \cdot B d^3x - 2c \oint_S A_P \times E \cdot \hat{n} dS \quad (1.18)$$

第一项体积分, 为耗散项, 下一部分将会具体讨论; 第二项面积分, 为通过表面的螺度流。  $E$  是电场强度,  $E = \eta J + \frac{1}{c} B \times V$ , 在理想MHD中, 电阻率  $\eta$  趋于零, 体积项消失。只剩下表面项。将  $E$  带入表面项, 变成两项, 如下式

$$\frac{dH_R(V)}{dt} = -2c \oint_s (A_P \cdot v) B \cdot \hat{n} dS + 2c \oint_S A_P \cdot B v \cdot \hat{n} dS \quad (1.19)$$

第一项反映平行于边界面的磁力线运动, 第二项反映通过边界面的螺度传输。以上理论可以应用到太阳物理, 主要是日冕中。对于像太阳日冕一样的开放场, 以光球为边界面。因为日冕中, 等离子体  $\beta$  很小, 可以认为是理想的MHD, 螺度随时间的变化率, 可以写为

$$\frac{dH}{dt} = -2 \oint_s (A_P \cdot v) B_z dS + 2 \oint_S A_P \cdot B_z v dS \quad (1.20)$$

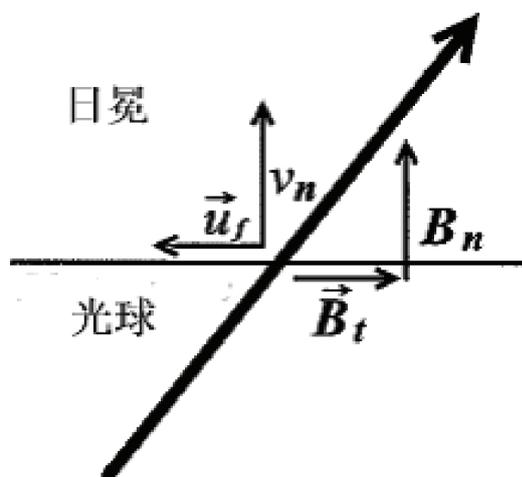


图 1.10: 局部相关跟踪方法

边界面满足  $\nabla \times A_P \cdot Z = B_z$  ,  $\nabla \cdot A_P = 0$  ,  $A_P \cdot Z = 0$  ,  $A_P$  为势场的矢量势,  $Z$  为垂直于太阳表面的方向。第一项为光球边界面上磁力线水平运动产生的螺度随时间的变化, 第二项为穿过光球表面的螺度变化率。

汪景琇 (1996) 认为, 在快速增长的活动区中, 光球的耗散对螺度演化起的作用很小, 而光球磁场的水平对流对螺度演化起主要作用。胡友秋等人 (1997) 用数值模拟的方法研究太阳大气的螺度传输, 发现磁重联过程中螺度耗散很小, 全部螺度近似守恒。

天文上的一种理论最重要的是在观测上能够证实。November 和 Simon (1988) 提出局部相关跟踪技术 (LCT), 用此技术可以计算连续两张磁图的相对位移。Berger 和 Ruzmaikin (2000) 发现可以直接从观测上研究磁螺度的传输。(Devore (2000); Chae (2001); Demoulin 等人 (2002); Moon 等人 (2002a)) 用 LCT 方法计算了太阳上磁螺度的传输。如图 1.10,  $v_n$  为光球等离子体运动的法向速度,  $u_f = -\frac{v_n}{B_n} B_t$  为等离子体的法向运动产生的磁通量管的切向运动

速度。 $v_t$ 为光球等离子体运动的切向速度，会使磁通量管产生切向运动。这样，在光球表面磁力线的切向运动速度为 $u = v_t - \frac{v_n}{B_n} B_t$ 用LCT方法可以直接计算。

日冕中螺度随时间的变化率可以写为 $\frac{dH}{dt} = -2 \oint (A_P \bullet u) B_n dS$ ，其中把光球表面作为边界条件。

#### 1.4.1.7 螺度耗散

在没有螺度通过表面传输时，螺度随时间的变化为 $\frac{dH}{dt} = -2 \int_V \eta J \cdot B d^3x$ ，磁能为 $W = \int_V B^2 d^3x$ ，则能量随时间变化为 $|\frac{dW}{dt}| = 2 \int_V \eta J^2 dV$

由以上关系，我们可以得到，螺度随时间变化与能量变化的关系：

$$\left| \frac{dH}{dt} \right| \leq \sqrt{2\eta W} \left| \frac{dW}{dt} \right| \quad (1.21)$$

假定一个孤立的闭合体积，没有能量和螺度通过表面，用H和W定义特征长度 $L = |H| / W$ 也就是螺度场结构的有效尺度。例如在线性无力场中，有一个半径为R的球表面，有效长度为 $L \approx 0.31R$ 。定义耗散时间 $\tau_d = L^2 / \eta$ 。

考虑时间为 $\Delta t$ 的一个磁重联或耗散过程， $|\frac{\Delta H}{H}| \leq \sqrt{\frac{\Delta t}{\tau_d}}$ 。因为磁重联过程很快，所用时间极短 $\Delta t \ll \tau_d$ ，所以螺度耗散是可忽略的。

对于太阳耀斑，爆发时间 $\Delta t \approx 1000s$ ，特征长度 $L \approx 10^3 Km$ ，电阻率，也称耗散系数 $\eta \approx 10^{-6} Km^2 s^{-1}$ ，由以上公式，可以得到 $|\Delta H / H| < 3 \times 10^{-5}$ 。因此当耀斑爆发时，螺度耗散很小，可以忽略不计，螺度近似守恒。Hornig (1999)对磁重联过程进行数值模拟表明：二维情况下，磁螺度严格守恒；三维情况下，磁螺度近似守恒。

#### 1.4.1.8 电流螺度与磁螺度的关系

依据螺度密度定义，Seehafer (1990)引入电流螺度密度

$$h_c = B \cdot \nabla \times B = \mu_0 J \cdot B \quad (1.22)$$

电流螺度积分式为  $H_C = \int h_c dV = \int \mu_0 J \cdot B dV$ , 可得  $\frac{dH}{dt} = -\frac{2\eta}{\mu_0} H_C$

上式为理论推导上磁螺度变化率与电流螺度的关系。张洪起(2001)从观测方面,推导出电流螺度密度与磁螺度密度的关系。把  $\nabla \times A$  写成平行于A的分量和垂直于A的分量,  $\nabla \times A = \beta A + D$ ,  $A \perp D$  将此式带入1.22得

$$h_c = \beta^2 h_m + f(D) \cdot \nabla \times A \quad (1.23)$$

因为  $\nabla \times A \parallel A$ ,  $A \perp D$ , 上式中第二项消失,只剩下第一项  $h_c = \beta^2 h_m$ , 此式反映了磁螺度密度与电流螺度密度的关系,在观测上它们是同号的。

### 1.4.2 观测方面

最近几年,太阳磁场在观测方面最重要的特征就是半球符号规则。这一部分详细介绍太阳黑子超半影纤维旋转,光球磁场,宁静暗条,暗条通道,日冕拱,日冕环,行星际磁云的半球规则。

#### 1.4.2.1 太阳黑子超半影纤维旋转

早在1927年,Hale研究色球层太阳黑子周围的纤维时就发现,在北半球纤维成逆时针旋转,南半球成顺时针旋转;并且不随活动周变化。

Richardson(1941)从威尔逊山天文台的观测中,找出141个大的孤立的太阳黑子。发现在这些黑子周围的超半影纤维,存在涡旋结构。并且这些超半影纤维,在北半球中有大约3/4为反时针旋转,南半球大约3/4为顺时针旋转。这些结果在观测上证实了Hale的结果。丁有济等人(1987)通过对大量的数据统计,使这一结果进一步得到证实。

由于光球活动区的矢量磁场可以直接观测,我们可以利用观测的数据,计算活动区的电流螺度。光球活动区螺度符号的观测有两种方法,第一种用无力

因子  $\alpha$ ，另外一种用电流螺度的一部分来代替全部电流螺度。

### (1) 测量无力因子 $\alpha$

无力场方程为  $\nabla \times B = \alpha B = \mu_0 J$ ，可以得出  $\alpha = \frac{\mu_0 J_z}{B_z}$ 。  $J_z$  为电流的 Z 分量，可以用横向磁场求

$$J_z = \frac{1}{\mu_0} \left( \frac{\partial B_y}{\partial x} - \frac{\partial B_x}{\partial y} \right) \quad (1.24)$$

因为  $\alpha$  与电流螺度和磁螺度有一定的关系  $\alpha = \frac{h_c}{B^2} = \frac{B^2}{h_m}$ ， $\alpha$  与电流螺度、磁螺度符号都相同，所以可以用  $\alpha$  的符号来推断螺度符号。

### (2) 电流螺度密度观测

电流螺度密度公式为  $h_c = B \cdot \nabla \times B = \mu_0 (B_x J_x + B_y J_y + B_z J_z)$ ，因为  $J_x$ ， $J_y$  为不可观测量，所以只取 Z 分量， $h_c = \mu_0 J_z B_z$ 。活动区中总电流螺度  $H_c$  为各测点  $h_c$  的代数和： $H_c = \sum h_c = \mu_0 \sum J_z B_z$ 。

### (3) 光球螺度符号规则的研究结果

Seehafer (1990) 用无力因子  $\alpha$  对 16 个活动区统计，发现了在光球磁场中存在半球螺度规则，在北半球绝大部分螺度为负螺度，南半球为正。

Pevtsov 等 (1995) 用 Mees 观测站的数据，Bao 和 Zhang (1998) 用怀柔矢量磁场望远镜观测的数据，通过两种观测方法对活动区的电流螺度进行分析，发现以下结果 (图 1.11)。从图中可以看出，光球活动区在北半球电流螺度主要为负，南半球主要为正，并且观测结果不随太阳活动周的变化而变化。

Pevtsov 和 Latushko (2000) 研究大尺度磁场的螺度符号规则。他们对 SOHO 飞行器上密歇尔多普勒仪 (MDI) 观测的全日面纵向磁图，对 8 个太阳旋转周的数据进行了分析。结果表明在太阳纬度  $\pm 40^\circ$  以内，没有很强的螺度反对称性。而在高纬度符合螺度符号规则，北半球电流螺度主要为负，南半球主要为正。

参考文献	太阳活动周	半球	$\alpha$ best		$H_c$		活动区数
			负值	正值	负值	正值	
Pevtsov(1995)	22	北	25(76%)		...		33
		南		25(69%)		...	36
Bao&Zhang(1998)	22	北	152(76%)		168(84%)		199
Bao等(2000)		南		159(71%)		177(79%)	223
Bao等(2000)	23	北	26(59%)		14(32%)		44
		南		28(65%)		21(49%)	43
Pevtsov等(2001)	23	北	88(63%)		70(50%)		140
		南		86(70%)		70(57%)	123

图 1.11: 光球活动区的半球螺度规则

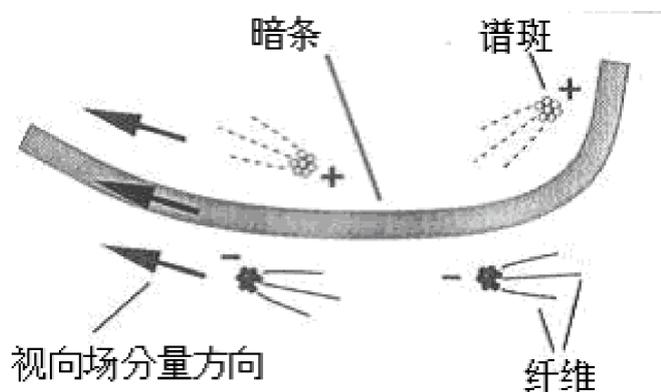


图 1.12: 暗条的结构

#### 1.4.2.2 暗条

暗条通道是形成暗条的基本磁结构。许多观测结果表明，它们在暗条形成以前就存在，暗条爆发之后，依然存在。在色球 $H\alpha$ 图像中，可以在沿着极性反转线(PIL)的方向辨认出暗条通道。

从暗条周围的 $H\alpha$ 谱斑，以及由谱斑发出的纤维的方向，我们可以得知暗条通道轴的方向。正谱斑发出的纤维方向与暗条通道轴的方向一致，负谱斑发出的纤维与暗条通道轴的方向相反(图1.12)。



图 1.13: 暗条的手征性

观测者站在正极磁场的一边，如果暗条通道轴的方向向右，称为右旋 (dextral)。如果方向向左，则称为左旋 (sinistral)。观测表明，在北半球，主要表现为右旋，南半球表现为左旋。暗条的一个基本特征，就是它存在于磁场的正负极间的极性反转线上。一般有暗条的地方，都有暗条通道。暗条与暗条通道的旋转结构，是一一对应的关系，因此不仅暗条通道有左旋和右旋的结构，暗条也有这种结构。如果暗条通道是右旋的，在其中的暗条就是右手方向的；暗条通道是左旋的，其暗条为左手方向的。对于暗条的手征形式，如图1.13。

上面的那部分为左旋，下面的为右旋。Martin等人 (1994) 用大量的数据进行统计表明，活动区暗条虽然也存在左旋和右旋的形式，但是没有明显的半球

规则。宁静区暗条有明显的半球规则。北半球为右旋，南半球为左旋。与暗条通道的半球规则一致。他们对1991年9月到1992年6月宁静暗条做了统计。结果表明，在北半球高纬度所有暗条为右旋，南半球高纬度所有暗条为左旋。还得出宁静区暗条，其通道一般在有谱斑的那一边结束；活动区暗条，通道可以在谱斑，太阳黑子或活动区的边界结束。

后来，Zirker等人（1997）用太阳地球物理数据中公布的图，对1984年的256个暗条作了统计，排除活动区中以及没有明显的左旋或右旋方向的暗条，剩下131个。在这131个暗条中，有36个在H $\alpha$ 图上没有显示，假定它们爆发了。在最后剩下的95个中，只有4个不遵从半球符号规则。

最近，Pevtsov等人（2003）用色球H $\alpha$ 全日面像，对2000-2001年的2310个暗条的手征性进行了研究，发现宁静暗条和活动区暗条都存在半球规则。对于宁静暗条，在北半球有80.2%的为右旋（dextral），南半球85.5%的为左旋（sinistral），半球规则比较强。对于活动区暗条，半球规则较弱，北半球74.9%的为右旋，南半球76.7%的为左旋。

Martin（1998）基于观测认为存在右旋暗条的场为左手扭曲，也就是说通量管有负的螺度；在具有左旋暗条的场为右手的扭曲，通量管有正的螺度。但是，Aulanier（1998a, 1998b）通过无力场螺度模型得出的结论与Martin的不同，认为左旋暗条，由正螺度的通量管形成。

### 1.4.2.3 日冕拱

Martin等人（1998）用阳光卫星（*Yohkoh*）观测到的X射线图像，研究了日冕拱的倾斜。定义日冕环与暗条轴夹角的锐角为倾斜角。如图1.14，如果横跨暗条或暗条通道轴的环为左手旋转的，如左图，称为左倾斜；如果横跨暗条的环为右手旋转的，称为右倾斜。发现了X射线拱与暗条通道轴的方向有一定的关系，

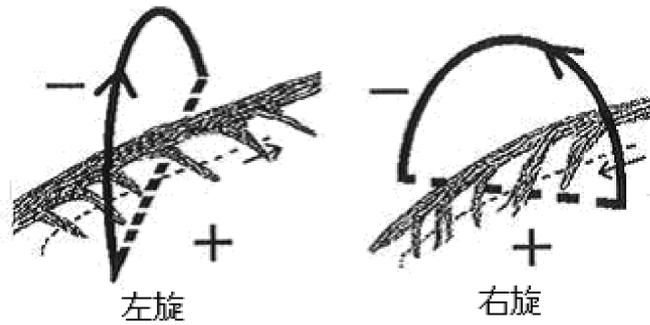


图 1.14: 暗条与日冕拱的关系

拱的逆时针旋转对应暗条通道的右旋，顺时针旋转对应左旋。

他们研究力学环系统时发现，当此系统随着高度改变时，其与暗条通道轴方向的关系随着时间改变，或者顺时针或者逆时针，而独立的环不改变方向。把X射线拱看作力学环顶部，其与暗条通道轴的夹角，称为倾斜角。选取阳光卫星观测数据中的11个例子，在北半球有四个，夹角全为逆时针方向旋转；南半球的7个全为顺时针方向旋转。

后来，Zirker (1997) 对33个宁静暗条以及其上面的拱统计发现，所有右旋 (dextral) 的暗条对应着逆时针旋转 (左旋) 的拱，所有左旋 (sinistral) 的暗条对应着顺时针旋转 (右旋) 的拱。这种关系要比暗条的半球规则强，而且在统计的数据中无一例外。

#### 1.4.2.4 日冕环

在日冕中，等离子体  $\beta$  值 (热能与磁能比) 很小，重力和压力可忽略不计，只考虑磁场的作用。假定磁场为无力场，方程可以写为  $\nabla \times B = \alpha B$ 。 $\alpha$  反映了日冕中的螺度结构。从阳光卫星软X射线像中，可以看到一些Sigmoid结构，它有一定的手征性，为S型和反S型，是日冕中的螺度在观测上的表现形式。可以通过观测得到的一些量来推断  $\alpha$  的值，Rust等人 (1996) 和Pevtsov等人 (1997)

参考文献	半球	s 型	反 s 型	总数
Rust & Kumar (1996)	北半球	4	24	28
	南半球	40	12	52
	跨赤道	12	11	23
	总数	56	47	103
pevtsov & Canfield(1998)	北半球	32	47	79
	南半球	70	33	103
	总数	102	80	182

图 1.15: S型和反S型的结构在南北半球的分布

根据模型得到 $\alpha > 0$ ，对应S型，磁场有正的磁螺度； $\alpha < 0$ ，对应反S型，磁场有负的磁螺度。他们用阳光卫星的软X射线像资料，发现X射线环中有许多S型或反S型的结构。对这些Sigmoid的统计如图1.15。

结果表明，北半球主要为反S型，南半球主要为S型。跨赤道的反S型与S型的数目大致相当。

#### 1.4.2.5 行星际磁云

不仅太阳大气中存在螺度的半球规则，在行星际磁云中也存在这样的规则。Smith (1999) 用Ominitape数据库的资料，对1965到1997年的星系际磁云进行了分析，得出北半球的螺度为负，南半球螺度为正，且螺度符号不随太阳磁场的极性反转变化的。

#### 1.4.3 螺度的起源以及半球规则产生的原因

从光球到行星际磁场都存在螺度，存在同样的半球规则，那么螺度是怎样产生的？为什么会出现这样的半球规则？最近许多太阳物理学家都在研究这个问题，到目前还没有一个结论。但是一般都认为螺度产生于对流区底部的过冲区。下面介绍一下最近比较典型的模型。

### 1.4.3.1 平均场发电机模型

把磁场 $B$ 分解成角向分量 $B_\phi$ ，径向分量 $B_r$ ，用平均场发电机理论，可以得到对流区中螺度随时间的变化为

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \int \alpha B^2 d^3r + \int (\nabla\Omega \times \nabla)_\phi r \sin\theta A^2 \frac{d^3r}{2} - \frac{H}{\tau_T} \quad (1.25)$$

这个方程描述了由平均场发电机产生的螺度的长期变化。前面两项是对一个半球的积分，第三项与湍动耗散有关， $\tau_T$ 为湍动耗散的特征时间。对流区中螺度产生依赖于 $\alpha$ 与 $\Omega$ 的符号和分布。在标准平均场发电机理论中， $\alpha$ 的分布由平均动能螺度决定。平均动能螺度在北半球为负值，南半球为正值。 $\alpha$ 与平均动能螺度符号相反，因此北半球为正值，南半球为负值。第二项由较差自转决定。最近，用日球数据重新构造了对流区旋转的分布。可以从重新构造中，得知 $\Omega$ 的梯度分布。此分布分为两部分，在接近于赤道的低纬度，也就是在日球纬度低于 $30^\circ$ ，在对流区底部附近 $\Omega$ 的径向梯度是正值，在高于 $30^\circ$ ， $\Omega$ 的径向梯度为负值。这样方程右边的第二项没有确定的符号。

为了研究平均磁螺度的变化，考虑一个只针对于北半球的简单近似模型。

$$\frac{\partial H}{\partial t} = 2\zeta E_B - \frac{H}{\tau_T} \quad (1.26)$$

$E_B = 1/2 \int B^2 d^3r$ 是磁场的角向能量。如果方程的第一项积分比第二项大得多，参数 $\zeta$ 接近于 $\alpha$ 的值，反之参数由 $\Omega$ 决定。

对于太阳表面磁螺度的符号规则，引用Berger的相对螺度概念，计算相对螺度随时间的变化率，然后再考虑较差自转的影响，得到太阳南北半球的螺度变化率。

### 1.4.3.2 $\Sigma$ 效应

Longcope等人(1998)提出了一种不同于上述发电机的模型。他们提出通过对流区中的湍动,使通量管中的磁场发生扭曲。通量管扭曲 $q$  (1) 随时间的变化为

$$\frac{dq}{dt} = -\zeta q + \frac{\partial w}{\partial l} + \Sigma(l, t) \quad (1.27)$$

方程右边的第一项为当通量管的轴伸长时,扭曲量 $q$ 的改变, $\zeta$ 为轴伸长的速度。第二项为如果通量管两个足点旋转方向不同,扭曲的增加。第三项 $\Sigma$ 项,依赖于轴的形状和演化,这一项是唯一的非线性项,可以认为是扭曲的源,产生螺度。

$\alpha$ 效应与 $\Sigma$ 效应是两个不同的现象。 $\alpha$ 效应中任意磁场的演化与其内部的速度场有关,它从标准磁感应方程中得出; $\Sigma$ 效应只保持在孤立通量管中的磁场,在通量管内部磁场的演化与通量管外部流体速度有关。

$\alpha$ 效应和 $\Sigma$ 效应只是扭曲产生的可能机制,具体扭曲是怎样产生的,还有待于进一步的研究。

## 1.5 研究本文的目的和意义

跨赤道环是连接南北两半球的一种大尺度日冕环,它是一种特殊的日冕环,目前国际上对其研究不是很多,关于它的一些性质还不太清楚,选择这一课题,可以发现跨赤道环的一些新的特性,还可以帮助我们更好的理解太阳磁场的发电机模型。

跨赤道环的形成普遍认为是由磁重联作用而成,研究跨赤道环的演化过程,可以更好理解磁重联理论并且能在观测中解释磁重联过程。跨赤道环的改变与耀斑爆发,暗条爆发,日冕物质抛射有一定的关系,研究跨赤道环,可以更好的理解太阳表面活动的物理机制。



## 第二章 跨赤道环研究现状

跨赤道环首先由Skylab卫星观测到，它是连接南北两半球的一种日冕环(Chase 等1976, Švestka 等1977)。在此之后，十几年的时间都没有观测软X射线的望远镜，一直到1991年Yohkoh卫星的发射。Yohkoh卫星的发射成功，带来了大量软X射线日冕像，第一次展示了大尺度磁场重构和重联过程的几何和拓扑，又引起了研究跨赤道日冕环的兴趣。

在这一章中我们对跨赤道环的观测特征作了一个简单的综述。

### 2.1 跨赤道环的形态特征

跨赤道日冕环是一种大尺度结构，其结构相对稳定。一般寿命为十几天，最短的寿命也为十几个小时(Glover 等2003)。Pevtsov (2000) 对跨赤道环的特性做了系统的分析。他从1991—1998年的资料中，找到87个跨赤道环。发现这些跨赤道环趋向于出现在一定的经度。并把这些环按形态分成连接型和重联型。其中连接型分成‘U’和‘S’型，重联型又分成‘X’型和‘Y’型，如图2.1。在这些环中，61个(70%)跨赤道环属于连接性，26个(30%)环属于重联型。这个分类的统计结果列在表2.1中。

表 2.1: 根据形态对跨赤道环的分类(Pevtsov 2000)

连接		重联	
(61 Total)		(26 Total)	
U	S	X	Y
25	36	16	10

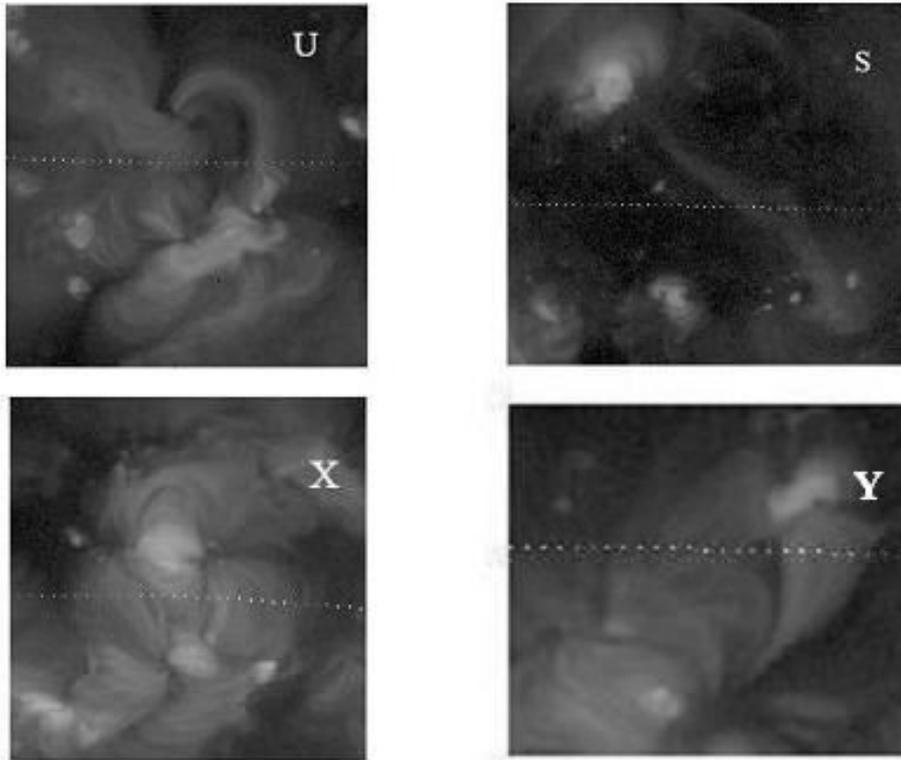


图 2.1: 跨赤道环的形态特征(Pevtsov 2000)。「U」,「S」,「X」,「Y」, 分别表示跨赤道环的形状像这些字母的形状。

跨赤道环并不都是连接成熟的活动区, 有的连接新浮现的活动区, 也有的连接谱斑区。Pevtsov (2000) 研究了87个跨赤道环系统, 发现其中9个环没有连接活动区, 40个环只连接一个活动区。从软X射线观测跨赤道环的足点和其连接的活动区中间有一个暗的空隙。关于跨赤道环X射线像观测的空隙有以下几种解释: 跨赤道环的足点温度较低; 接近于足点的磁场增加导致了密度的下降; 可能在跨赤道环足点和活动区环之间存在真实的空隙。然而, 关于空隙的产生并不是很清楚。

Fárník 等 (2001) 研究了跨赤道环足点的位置, 发现绝大部分跨赤道环的足点植根于活动区的外围中等强度的磁场, 也有一些例子, 跨赤道环抛锚于弱

场或强场，其磁场范围从 $\leq 30$ 高斯到几百高斯。一些环它们的足点接近于黑子半影，但是从来没有发现跨赤道环植根于黑子本影。

Chase 等（1976）从Skylab数据中找到100个相互连接的环，发现这些环的平均长度大约 $20^\circ$ ，最长的环为 $37^\circ$ 。他们认为这个长度是太阳上最大长度。最近，Fárník 等（1999）用Yohkoh/SXT数据发现两个跨赤道环的长度分别是 $47^\circ$ 和 $61^\circ$ 。因此，他们认为 $37^\circ$ 的上限只适应于Skylab观测期间。Pevtsov（2000）用Yohkoh/SXT数据研究了87个跨赤道环发现他们的平均足点分裂度为 $30^\circ$ ，最长的环分裂度为 $75^\circ$ 。Pevtsov与Chase 等的结果不同，可能是因为Chase 等用的Skylab的数据只有9个月，而Pevtsov用了Yohkoh 的将近8年的数据。

2001年Fárník等用SXT、TRACE和EIT研究跨赤道环足点时，用有限的样本发现X射线跨赤道环不存在EUV对应物。然而，跨赤道环在日冕等离子体中，用EUV发射线观测到，最近的观测发现软X射线图像确实存在EUV对应物。Hara等（2003）用SOHO/CDS第一次观测到了跨赤道环（TL）的OV发射。Pevtsov（2004）用SXT测量了11个跨赤道环的温度，发现温度范围在 $5 \times 10^6$ 到 $1.5 \times 10^7 K$ 。Brosius（2006）调查了TL的温度组成和多普勒速度。他研究了2004年7月29日的一个跨赤道环，此环连接10652和10653活动区。环在紫外发射线中显示离子形成于多个温度范围，包括HeI, OIII, OIV, OV, NeVI, CaX, MgX和FeXII。表明环的等离子体温度范围在2个量级。低于 $10^6 K$ 的发射线的相对多普勒速度大于 $30 \text{ km/s}$ ，两条最冷的发射线的最大速度为 $37 \text{ km/s}$ 和 $41 \text{ km/s}$ 。跨赤道环冷等离子体存在表明环在低温是可见的且保持稳定。

## 2.2 跨赤道环的形成和消失

跨赤道环普遍被认为由磁重联形成。Švestka（1977）研究了一个跨赤道环

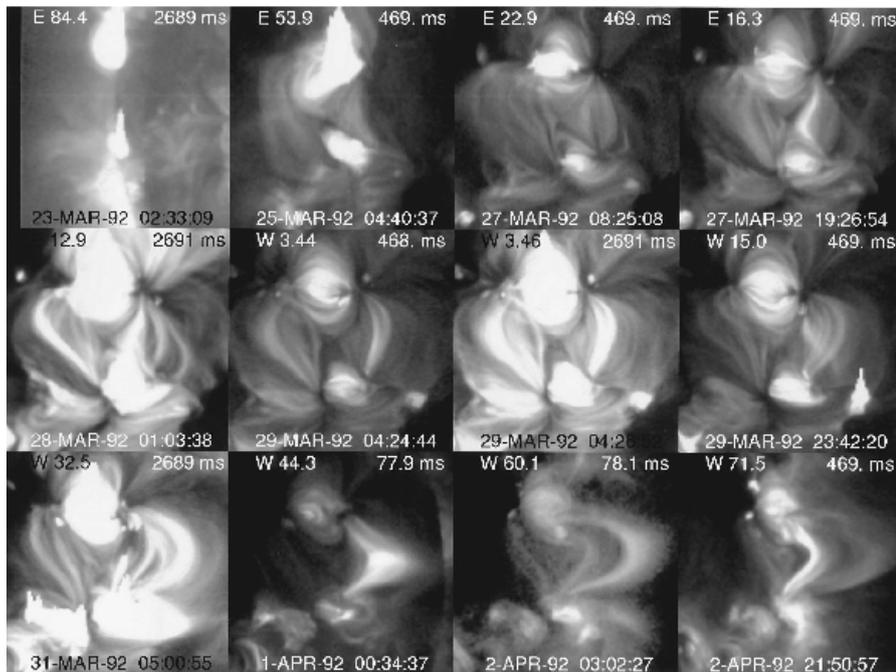


图 2.2: X型跨赤道环的形成 (Tsuneta 1996)

的形成过程发现跨赤道环很有可能是磁力线从两个活动区延伸出来向赤道拓展通过磁重联而形成。Tsuneta (1996) 研究了一个X型跨赤道环, 为Petshek磁重联模型提供了很强的证据, 其演化过程如图2.2。存在下面的现象: (1) 跨赤道环先前没有被观测到, 是新产生的; (2) 软X射线像中看到了一个清楚的X点; (3) 向外流的磁重联的等离子体温度为4-7MK, 向内流的为2MK。

Fárník 等 (1999) 观测了两个跨赤道环的形成过程, 图2.3展示了其中的一个例子, 从图中可以看出在10: 02UT两个活动区之间, 没有相互连接的环, 到11: 04UT可以清楚地看到一个跨赤道环存在于两个活动区之间, 而两个活动区的距离没有改变, 且跨赤道环的长度为 $61^\circ$ , 他们认为此跨赤道环由磁重联形成。Harra 等 (2003) 给出了一些观测证据, 进一步证实跨赤道环由磁重联形成。

## 2.3 跨赤道环与太阳活动的关系

### 2.3.1 跨赤道环与同调耀斑的关系

同调耀斑被定义为发生在不同活动区单几乎同时发生的太阳耀斑，它们由不同活动区的日面连接所引起。同调耀斑不等于同时耀斑。同时耀斑为一些没有相互关系但基本同时发生的耀斑。

Moon等(2002)从统计角度研究GOES软X射线同调耀斑时，发现跨赤道环比其它相互连接的环更容易产生同调耀斑。而王海民等(2001)，张长喜等(2000)研究个例时发现两个邻近活动区的连接环，也可以产生同调耀斑。

### 2.3.2 跨赤道环与日冕物质抛射的关系

Khan 和Hudson (2000)研究了1998年5月6日，8日，9日三个事件，发现跨赤道环的消失与耀斑和CME有关，他们认为耀斑产生的激波引起跨赤道环的不稳定，促使其消失，并且认为跨赤道环的消失，造成CME的触发。图2.4中显示了3个跨赤道环在耀斑爆发前后的变化。每一行是一个例子，其中每一行的前两个图是耀斑爆发前后的软X射线像，第三个图是由前两个图相减得到的。Delannée 和Aulanier (1999)，Delannée (2000)研究发现跨赤道环的等离子体密度降低与日冕物质抛射有关。

Glover 等(2003)用大的样本分析了跨赤道环与耀斑及CME之间的关系。他们共分析了18个环，其中有10个环所连接的活动区与耀斑或CME有关。在这10个环系中共观测到33个事件，研究了每一个事件对跨赤道环的影响，发现跨赤道环的消失导致的软X射线增亮在温度上和B级耀斑相同，和日冕中的dimming现象一样普遍。

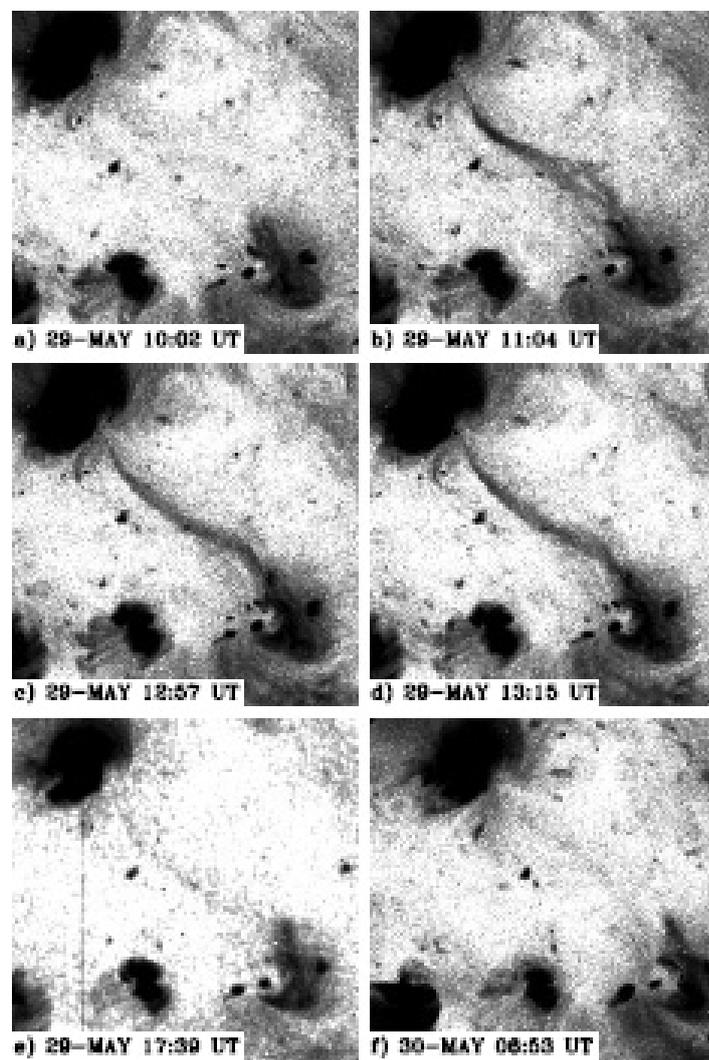


图 2.3: 跨赤道环的形成 (Farnik 1999)

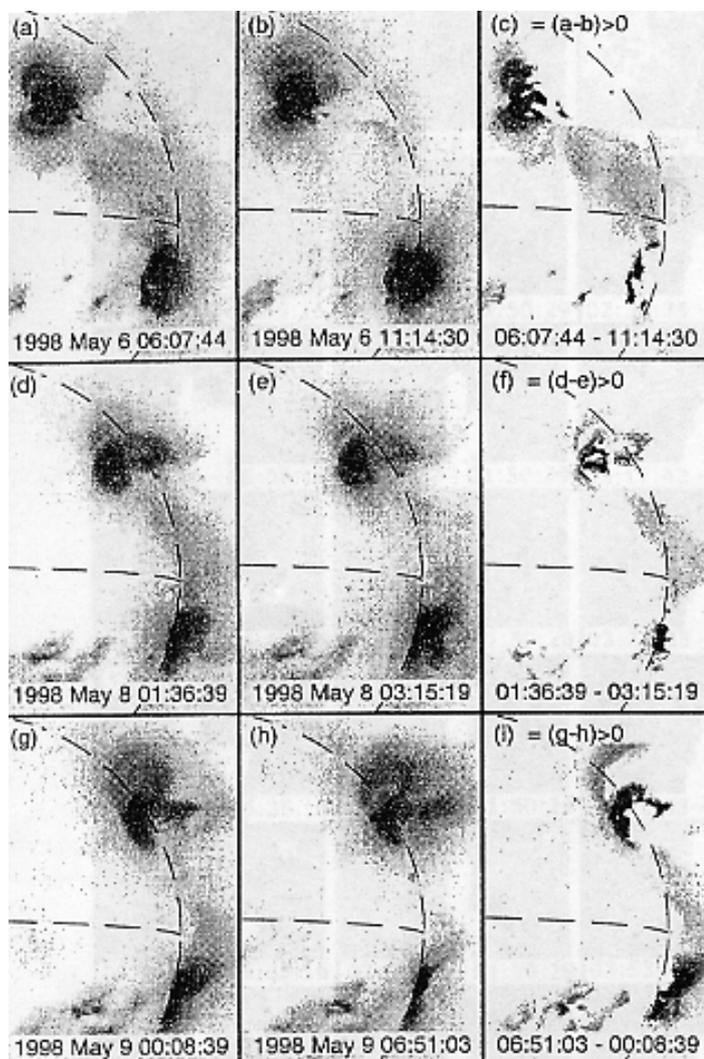


图 2.4: 跨赤道环的消失与太阳耀斑爆发的关系 (Khan等2000)



## 第三章 跨赤道环的统计研究

### 3.1 引言

跨赤道环是一种日冕环，它连接着南北两个半球，大量观测表明跨赤道环并不是一种偶然现象，Pevtsov (2000) 发现在软X射线像中，大约有1/3的活动区存在跨赤道环。

跨赤道环展示太阳日冕大气的磁结构，它连接相反的磁极性。Krieger 等 (1971) 把日冕中软X射线发射结构和光球纵向磁图作了比较，发现跨赤道环的足点起源于前导极性，然而，Švestka (1981) 观测到跨赤道环连接后随极性。这就产生了一个问题：跨赤道环连接前导极性容易还是后随极性方便呢？这个问题激发了我们对跨赤道环足点的磁极性做统计研究。

在这一章中，通过分析 *Yohkoh* 软X射线像和全日面纵向磁图，我们将跨赤道环按照足点的磁极性和同一区域中的跨赤道环数分类。另外，还研究了跨赤道环数和活动区数的关系，分析了跨赤道环数随着太阳活动周的变化，并且计算了跨赤道环的足点距离、倾角和纬度不对称性。

### 3.2 观测和数据处理

我们用了 *Yohkoh* 卫星全日面软X射线像，它由 A1.1 和 AlMg 滤光器拍摄，空间分辨率是 4.9 角秒/像素。从 1991 年 10 月卫星发射到 2001 年 12 月结束的所有数据中，找到 356 个跨赤道环，选择了位于日面中心的观测质量很好的图像。Pevtsov (2004) 用了同样的数据库，只发现了 226 个跨赤道环，原因是我们的分类和他们不同，我们通过足点的磁极性分类，用我们的方法，如果一对活动

区有两个跨赤道环，我们将会数两次，相同的情况下，Pevtsov会把它看成一个跨赤道环。

在这个研究中，也用到SOHO/MDI 纵向磁图。MDI 纵向磁图的时间分辨率有96分钟和1分钟两种，我们采用96分钟的纵向磁图，空间分辨率是1.96角秒/像素，选择在时间上与软X射线像很接近的96分钟的MDI磁图。MDI 从1996年开始提供数据，然而在1998年6月到10月以及1999年1月到2月没有数据，因此，MDI 并不能提供给我们所需要的全部纵向磁图，对于我们所需要而MDI 没有的磁图，用美国国家天文台Kitt 峰的纵向磁图代替。

通过对比较X射线像和全日面纵向磁图，我们来确定跨赤道环足点的磁极性。在确定足点的磁极性以后，计算这一极性区的权重中心，然后把他们转换成日球坐标。用这些通量系统的位置，计算跨赤道环足点的距离，倾角和纬度不对称性。

### 3.3 跨赤道环分类

太阳活动周22周，北半球太阳黑子的前导极性为负极，南半球的前导极性为正极。在太阳活动周23周，磁极性发生反转，北半球的前导极性为正极，南半球的前导极性为负极。Yohkoh软X 射线的数据库包括22周和23周的数据。跨赤道环可能形成于两个成熟的活动区或一端连接活动区另一端连接宁静区，因此跨赤道环的足点可能是活动区也可能是宁静区。

与Pevtsov (2000) 从形态对跨赤道环分类不同，我们根据跨赤道环足点的磁极性分类。不考虑跨赤道环属于哪个活动周也不管它连接宁静区还是活动区，只要足点的磁极性和双极黑子的前导极性相同，我们就称它为PTL。如果足点的磁极性和后随极性相同，称它为FTL。因此，通过足点的磁极性，跨赤道环被分为两类：一类是PTL，另一类是FTL。图3.1是介绍分类的一个例

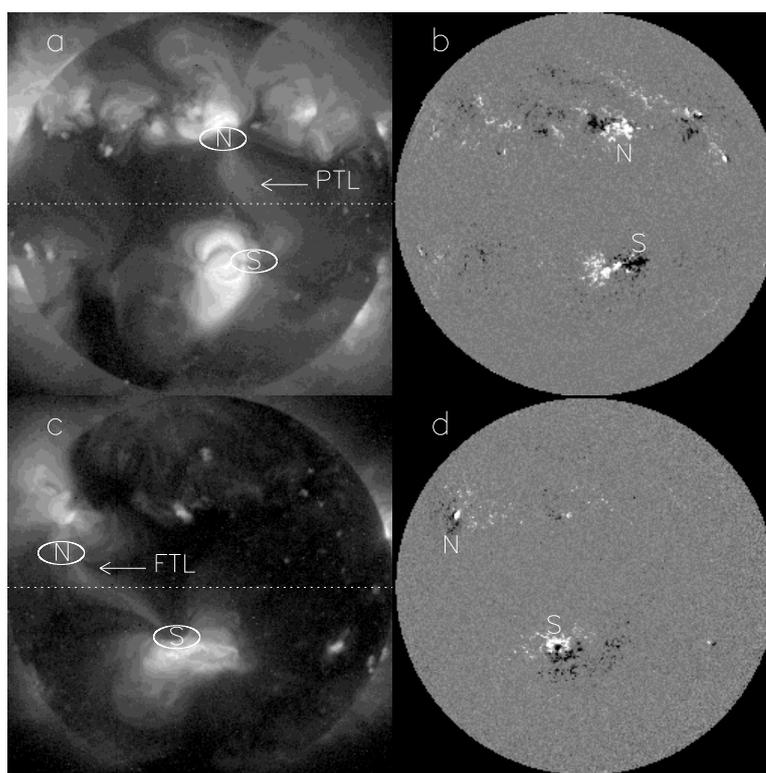


图 3.1: (a) PTL (SPTL) 的软X射线像。‘N’表示跨赤道环在北半球的足点，‘S’表示在南半球的足点；椭圆表明足点位置。(b) PTL (SPTL) 对应的纵向磁图。英文字母表明足点的磁极性。(c) FTL (SFTL) 的软X射线像。(d) FTL (SFTL) 对应的纵向磁图。

子。图3.1a和3.1c是显示跨赤道环的软X射线像。用椭圆表示跨赤道环足点。字母‘N’代表北半球的足点，‘S’表示南半球的足点。图3.1b和3.1d是对应的纵向磁图，‘N’和‘S’是足点磁极性所在位置。

图3.1a是PTL的一个例子，它是1999年的图像，属于太阳活动周23周。在北半球足点的磁极性为正值，南半球足点的磁极性为负值，它们都是双极黑子的前导极性。图3.1c是FTL的一个例子，它是1997年的图像，也属于太阳活动周23周。从图中我们可以看出，南半球足点的磁极性为正值，但是我们不能确定

它是前导极性，还是后随极性。在太阳活动周23周，南半球绝大部分双极黑子群的后随极性是正值。北半球足点的磁极性为负值，是双极黑子的后随极性，南半球足点的极性与后随极性相同，我们称之为FTL。

根据同一个区域跨赤道环的数目，我们将其分类：如果跨赤道环连接的两个区域都只有一个跨赤道环存在，称之为STL；如果跨赤道环连接的两个区域中的一个区域有两个或三个跨赤道环存在，我们将这个跨赤道环系统称之为MTLs。根据足点的磁极性，我们又将STL和MTLs分成一些子类。对于STL，如果足点的磁极性和前导极性相同，我们称之为SPTL；如果与后随极性相同，称之为SFTL。对于MTLs，如果一个环属于PTL，另一个环属于FTL，称这个系统为MTL-PF；如果跨赤道环连接的所有环都是PTL，称这个系统为MPTL；如果跨赤道环连接的所有环都是FTL，称这个系统为MFTL。图3.1和3.2给出了跨赤道环的例子。

在图3.1a和3.1c中，可以看到跨赤道环连接的两个区域都只有一个跨赤道环，表明是STL。3.1a又是PTL，称为SPTL；3.1a是FTL，按照上面的分类，可以称为SFTL。从图3.2a中我们看到，在北半球的两个跨赤道环的足点都存在于一个活动区，也就是说，一个活动区拥有两个跨赤道环，不管别的足点存在于一个活动区还是两个活动区，称这个环系统为MTLs。在这两个环中，其中一个是PTL，另一个是FTL，我们称之为MTL-PF。从图3.2c中，可以看到两个跨赤道环存在于南半球的一个活动区，图3.2e中，也表明南半球的一个活动区有两个跨赤道环，它们都是MTLs。通过对比图3.2c和3.2d，看到两个环都是PTL，称这个系统为MPTL。从图3.2e和3.2f中，我们看到两个环都是FTL，称这个系统为MFTL。

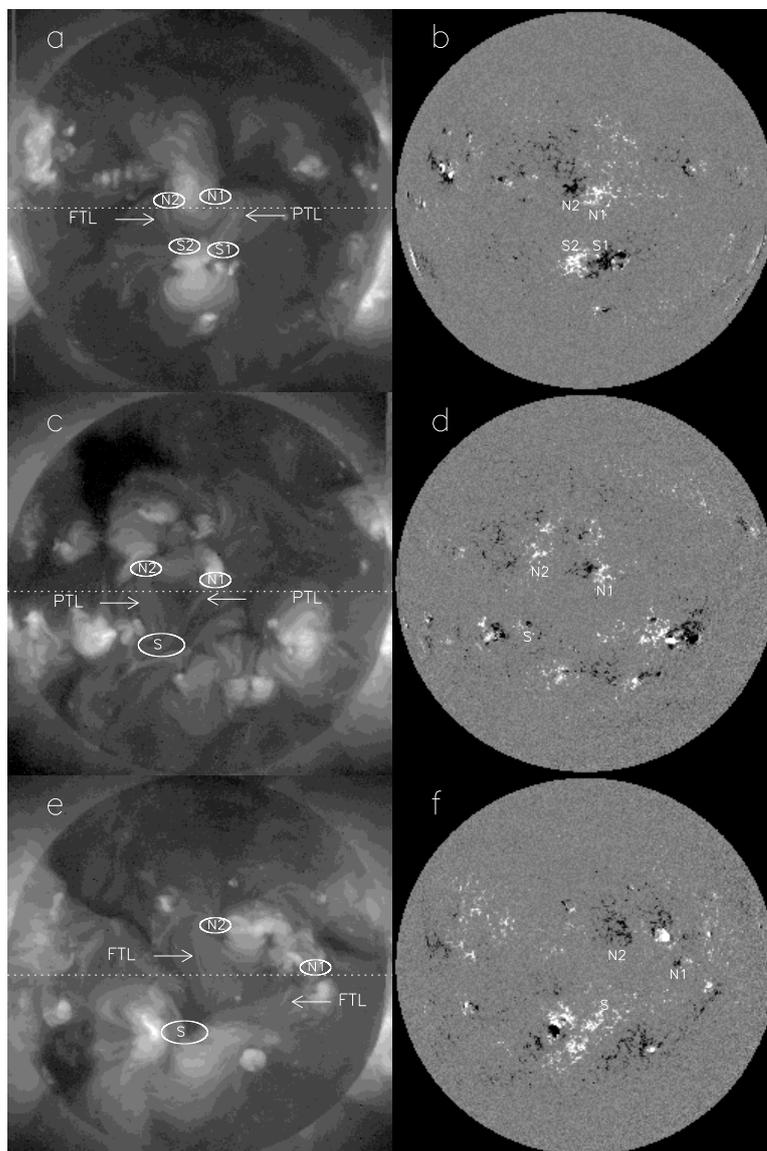


图 3.2: (a) MTL-PF的软X射线像。‘N1’和‘N2’代表北半球的足点，‘S1’和‘S2’代表南半球的足点。椭圆表明足点的位置。(b) MTL-PF 对应的全日面纵向磁图。英文字母表明足点的磁极性。(c) MPTL的软X射线像。(d) MPTL对应的全日面纵向磁图。(e) MFTL的软X射线像。(f) MFTL对应的全日面纵向磁图。

表 3.1: 跨赤道环根据足点的磁极性分类

Category	Number	Fraction
PTL	229	64%
FTL	127	36%

表 3.2: 跨赤道环根据同一区域中的数目和足点磁极性的分类

STL		MTLs		
SPTL	SFTL	MTL-PF	MPTL	MFTL
120	32	70(145)	20(41)	8(18)
79%	21%	71%	20%	9%
152		98(204)		
61%(43%)		39%(57%)		

### 3.4 统计结果

从 *Yohkoh* 软X射线像中找到了356个跨赤道环。表3.1中给出了这些环按照足点磁极性分类的统计结果。从表3.1中可以看出跨赤道环中是PTL的有229个，占有跨赤道环的64%，是FTL的有127个，占跨赤道环总数的36%。

表3.2列出了按照同一区域中的跨赤道环数目和足点磁极性给出的跨赤道环更详细的分类。从表中可以看出，有152个STL和98个MTLs系统（包含204个跨赤道环）。对于STL，其中SPTL为120个，占79%；SFTL为32个，占21%。从这个结果中可以看出，对于STL而言，SPTL占绝大多数。对于MTLs系统而言，MTL-PF系统有70个（145个跨赤道环），占MTLs总数的71%；MPTL系统有20个（41个跨赤道环），占总数的20%；MFTL系统有8个（18个跨赤道环），占总数的9%。

表3.3给出了PTLs和FTLs在不同太阳活动周所占的百分比。在太阳活动

表 3.3: 在太阳活动周22周和23周的跨赤道环数

Solar Cycle 22			Solar Cycle 23		
Category	148	100%	Category	208	100%
PTL	91	61%	PTL	138	66%
FTL	57	39%	FTL	70	34%

周22周, PTL 占61%; 在23周, PTL占66%。这说明PTL优势并不随太阳活动周变化。

### 3.5 跨赤道环与太阳活动周之间的关系

太阳活动存在11年的周期, 例如太阳黑子、耀斑数的变化、全部磁通量、10CM射电通量以及大尺度场形式的演化。跨赤道环也有11周年的变化 (Pevtsov, 2000, 2004)。图3.3进一步证实了Pevtsov的结果。图3.3c和3.3d也给出了PTLs和FTLs随太阳活动周的变化。

图3.3a显示了不同年份的跨赤道环数。在太阳活动周的下降阶段 (1992-1996), 跨赤道环数减少; 在上升阶段 (1997-2000), 跨赤道环数增加。在太阳活动峰年 (1992, 2000), 跨赤道环数最多; 在太阳活动谷年 (1996, 1997), 跨赤道环数很少。图3.3b给出了跨赤道环数与活动区数的关系。虚线表明跨赤道环数与活动区数的平均比值为10%。Pevtsov (2000) 用跨赤道环数与每年太阳黑子数做比较得到比值为30%。我们用每年最后一天的活动区编号减去第一天的活动区编号得到的活动区数即是当年的太阳活动区数。软X射线望远镜在1991年和2001年并不是全年都有数据, 在这两年, 我们在软X射线望远镜观测的那段时间计算活动区数目。一般而言, 一个跨赤道环连接两个活动区, 如果我们考虑跨赤道环与活动区数比值的时候, 活动区数应除以2, 这样比值将会是20%。并

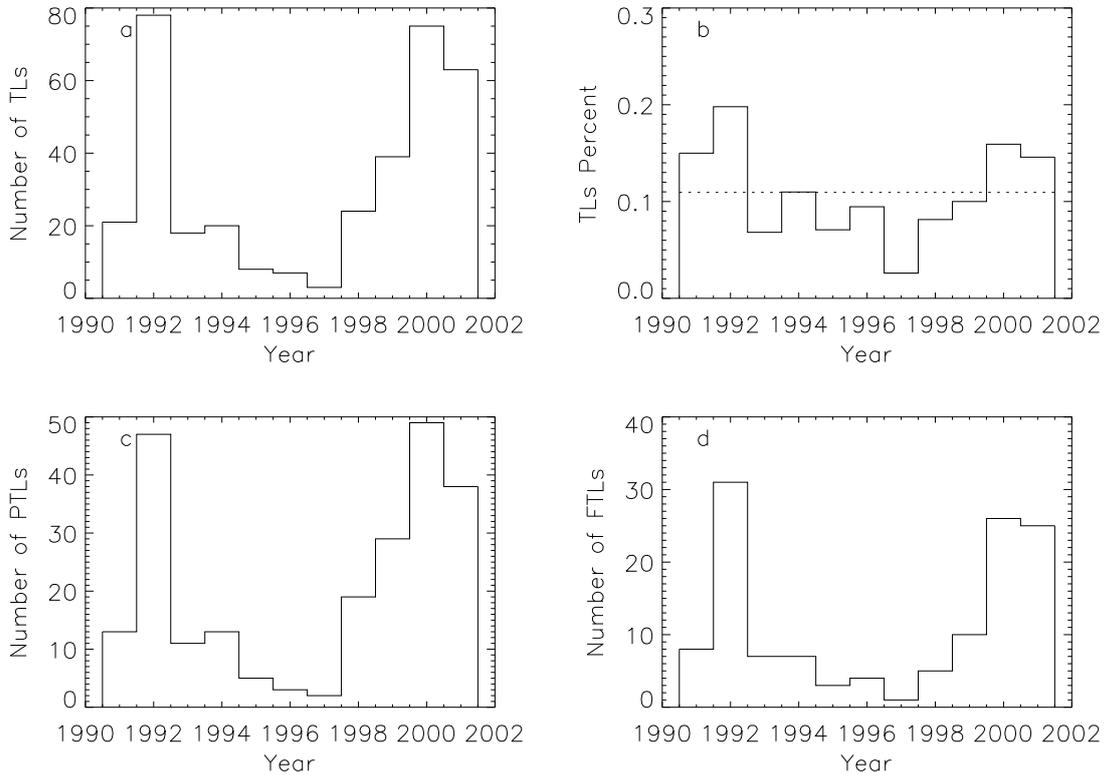


图 3.3: (a) 在不同年份的跨赤道环数。(b) 不同年份跨赤道环数与活动区数的百分比, 点线指平均值。(c) PTLs 在不同年份的数目。(d) FTLs 在不同年份的数目。1991-1996年属于太阳活动周22周, 1996-2001年属于太阳活动周23周。

不是所有的跨赤道环都连接两个活动区, 有的跨赤道环连接宁静区, 因此跨赤道环与活动区比值将会小于20%。图3.3c和3.3d显示PTLs和FTLs随太阳活动周的变化, 它们与跨赤道环有相同的趋势。

### 3.6 跨赤道环的三个参数

在3.2我们介绍了跨赤道环足点的计算方法。用足点的位置, 我们计算了跨

赤道环的三个参数：足点距离、跨赤道环的倾角以及跨赤道环的纬度不对称度。图3.4a, 3.5a和3.6a显示了针对于这三个参数，跨赤道环的分布。曲线是多项式拟合，点线是它们的平均值。图3.4b, 3.5b和3.6b是这三个参数随着太阳活动周的变化，误差范围是 $1\sigma$ 。

### 3.6.1 足点的距离

跨赤道环足点的距离，也就是跨赤道环两足点间的长度，我们用日球度数来表示。从图3.4中，可以看到足点的平均距离是 $27^\circ$ ，它与Pevtsov (2000)年的结果很接近，与Chase 等 (1976)得到的 $20^\circ$ 有些差别。Pevtsov (2000)用 *Yohkoh* 软X射线望远镜的从1991年到1998年的数据，我们同样用 *Yohkoh* 软X射线望远镜的数据，从1991年到2001年，而Chase 等 (1976)用Skylab卫星的资料只有9个月的数据。

1991-1995年是太阳活动周22周的下降阶段，1997年到2001年是太阳活动周23周的上升阶段。从图3.4b中，我们可以看到1991-1995年，跨赤道环的距离逐年下降；1997-2001年足点距离也逐年下降。我们也计算了22周和23周足点距离的平均值。在太阳活动周22周，平均值大约 $22^\circ$ ；在23周，平均值大约 $31^\circ$ 。1996年，太阳磁活动周改变，磁极性发生反转，这一年跨赤道环足点距离的平均值接近整个太阳活动周的平均值。Spörer定律表明在太阳活动周开始时，黑子出现于高纬，随着太阳活动周，黑子纬度逐渐降低。从图4b中，可以看出跨赤道环足点距离的平均值也随着太阳活动周变小，且在太阳活动周的下降阶段（1991-1995）比上升阶段（1997-2001）低，它与Spörer定律一致。

### 3.6.2 倾角

我们将跨赤道环与赤道间的夹角，定义为跨赤道环倾角。用跨赤道环两足点的纬度差除以经度差得到夹角的正切值，然后得到跨赤道环倾角。当跨赤道

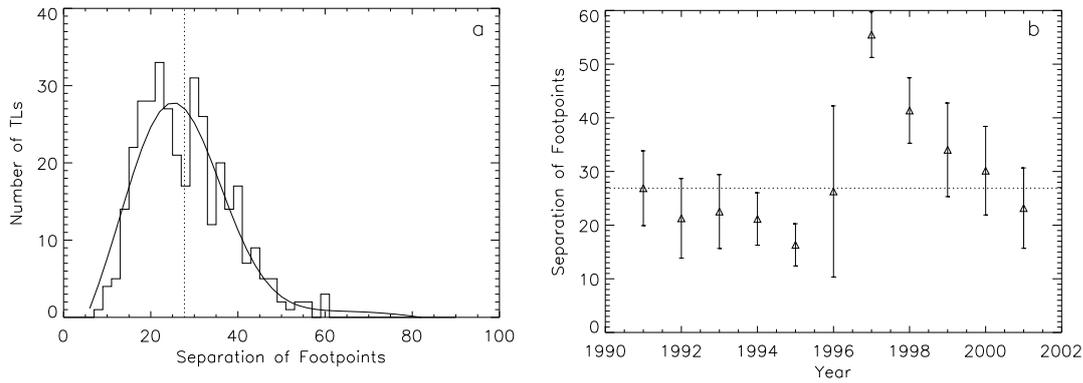


图 3.4: 跨赤道环足点的距离。(a) 跨赤道环数随足点距离的分布, 横坐标单位为度, 曲线是多项式拟合, 虚线是平均值。(b) 在不同年份足点距离的分布, 三角形表明足点距离在不同年份的平均值, 误差棒在 $1\sigma$ 范围, 点线表明平均值。

环北半球的足点在南半球足点的西边时, 倾角小于 $90^\circ$ , 是锐角。相反, 如果跨赤道环北半球的足点在南半球足点的东边, 则倾角大于 $90^\circ$ , 是钝角。图3.5a给出了在不同倾角值时, 跨赤道环数的分布。图中虚线为跨赤道环倾角的平均值, 从图中可以看到其平均值接近 $90^\circ$ 。图3.5b给出了跨赤道环在不同年份的分布。从图中可以看到倾角并不随着太阳活动周变化, 这个结果与Pevtsov (2004) 的结果相同。

### 3.6.3 纬度不对称性

我们用北半球足点的纬度值减去南半球足点纬度的绝对值来看跨赤道环在纬度上是否对称。如果北半球足点的纬度值大于南半球足点纬度的绝对值, 我们得到正值; 如果北半球足点的纬度值小于南半球足点纬度的绝对值, 我们得到负值。从图3.6中我们可以看到平均值大约为 $0^\circ$ , 也就是跨赤道环在纬度上基本是对称的。图3.6b给出了纬度不对称性在不同年份的分布, 在图中我们并没有看到跨赤道环纬度不对称度在不同年份的明显差别, 也就是不随着太阳活动周变

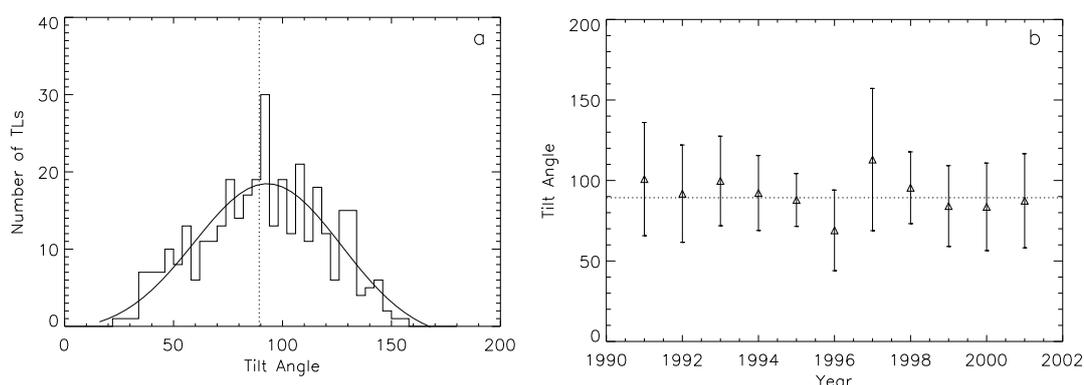


图 3.5: 跨赤道环的倾角。(a) 跨赤道环数随倾角的分布, 横坐标单位为度, 曲线是多项式拟合, 虚线是平均值。(b) 在不同年份跨赤道环倾角的分布, 三角形表明倾角在所在年份的平均值, 误差棒在 $1\sigma$ 范围, 点线表明平均值。

化。

### 3.7 结论和讨论

用 *Yohkoh*/SXT 图像, 我们找到 356 个跨赤道环。通过统计研究, 得到下面的结果:

1. 对于所有这些跨赤道环, 有 64% 其足点磁极性与前导黑子的极性相同 (PTL), 有 36% 其足点磁极性与后随黑子的极性相同 (FTL)。从统计结果可以看到 PTL 占优, 并且这种关系不随太阳活动周变化。PTL 占优, 可以用双极活动区前导部分与后随部分不对称来解释, 也就是前导部分比后随部分更密集, 而且寿命比后随极性长, 因此前导极性比后随极性更容易形成跨赤道环; 也可以用前导极性比后随极性离赤道近来解释, 前导极性离得比较近, 形成跨赤道环就比较容易。当跨赤道环连接的两个活动区都是成熟的活动区时, 后随极性和前导极性形成跨赤道环的概率相同, 因此, 对于多个环形成的跨赤道环系统, MTL-PF 所占的比率很大。

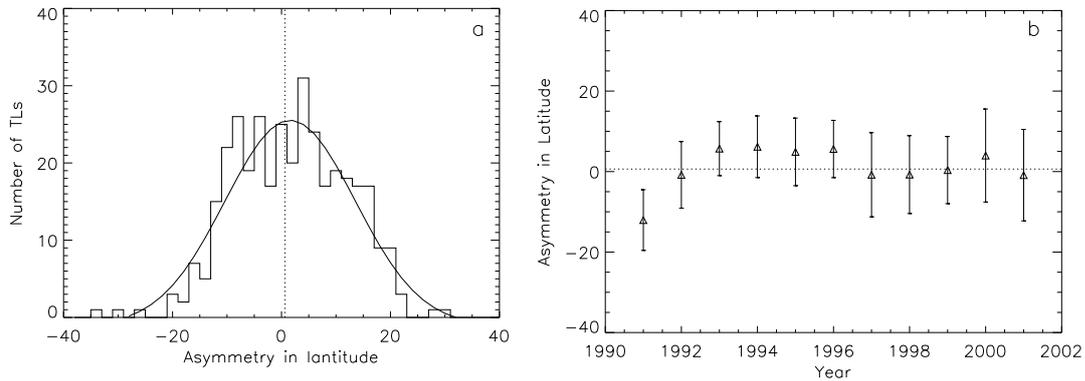


图 3.6: 跨赤道环的纬度不对称性。(a) 跨赤道环数在纬度不对称性的分布, 横坐标单位为度, 曲线是多项式拟合, 点线是平均值。(b) 在不同年份纬度不对称性的分布, 三角形表明在不同年份的平均值, 误差棒在 $1\sigma$ 范围, 点线表明平均值。

2. 在太阳活动周22周和23周, 跨赤道环数的变化与太阳黑子数的变化是一致的。在太阳活动极大年时, 跨赤道环数最多; 在太阳活动极小年时, 跨赤道环数很少。PTL和FTL的数目也随着太阳活动周变化。

3. 计算了跨赤道环的三个参数: 足点距离、倾角和纬度不对称性。跨赤道环的距离随着太阳活动周的变化而改变。在太阳活动周开始时, 足点距离最大, 随着太阳活动周的演化足点距离变小, 这与太阳黑子的Spörer定律(例如, Bray和Loughhead, 1979)一致。根据Stenflo (1988) 的结果, 太阳大尺度磁场的径向分量从纬度 $30^\circ$ 左右向赤道移动。同时, 向赤道移动的分量也被一些发电机理论模型所分析 (Kitchatinov 1993)。如果假定跨赤道环是反映大尺度径向场分量的磁结构, 它间接支持Stenflo (1988) 的结论。跨赤道环的倾角和纬度不对称性并不随着太阳活动周变化, 且在22周的下降阶段和23周的上升阶段也没有明显的差别。从平均效果而言, 跨赤道环垂直于赤道, 而且关于赤道对称。

## 第四章 跨赤道环足点的螺度形式

### 4.1 引言

关于活动区的电流螺度符号, Seehafer (1990) 通过假定活动区为常 $\alpha$ 无力场, 计算了活动区的电流螺度符号, 对于16个活动区, 除了两个活动区外, 剩下的活动区在北半球的螺度符号为负值, 南半球螺度符号为正值, 即光球磁场存在半球螺度规则。后来, 一些科学家 (Pevtsov 等, 1995; Abramenko 等, 1996; Bao 和Zhang, 1998; Hagino 和Sakurai, 2004) 用光球矢量磁图计算了活动区的电流螺度符号, 进一步证实了半球螺度规则。

Canfield等 (1996) 发现活动区的手征性对于跨赤道环的形成起着重要作用。他们用 *Yohkoh/SXT* 1991-1995年的数据, 分析了从经度上很接近, 但位于赤道两侧的27对太阳活动区。在这27对活动区中, 有17对形成了跨赤道环, 在形成跨赤道环的17对活动区中, 有15对活动区的电流螺度符号相同。Fárník 等 (1999) 用两个例子证实了这个结论。Pevtsov (2000) 研究了22对跨赤道环连接的活动区的螺度符号关系: 其中15对 (68%) 显示相同的手征性, 7对 (32%) 表明相反的手征性。

*Yohkoh*高质量的图像显示了太阳日冕不同尺度的结构, 有X射线亮点, 活动区环和相互连接环。跨赤道环作为一种特殊的日冕环, 可能沿着经度环, 也可能展示‘S’或反‘S’型结构。我们不能只从形态上判断跨赤道环是势场还是非势场。Fárník (1999) 通过无力场外推确定了两个跨赤道环的扭曲符号, 也计算了环所连接活动区的螺度符号, 发现跨赤道环的扭曲和活动区的螺度符号相同。

为了更好地说明由跨赤道环连接的活动区对的螺度关系, 我们用

了 *Yohkoh* 从1991年到2001年将近10年的数据。首先, 计算了跨赤道环连接的活动区的螺度符号。跨赤道环作为一种磁力线结构, 连接相反的磁极性区, 于是我们又计算了跨赤道环连接的磁极性区的螺度符号。这样能够更好的理解跨赤道环连接的磁场的特征性关系。通过研究, 给出了活动区对和磁极性对的螺度符号的相关性。

跨赤道环代表大尺度的磁结构, 活动区显示小尺度磁位形, 那么跨赤道环的扭曲与足点的螺度关系是怎样的? 为了回答这个问题, 对跨赤道环作了无力场外推以确定跨赤道环的扭曲形式, 然后研究了跨赤道环和他们足点的螺度关系。

## 4.2 观测和数据处理

从 *Yohkoh* 软X射线望远镜的数据库中找到356个跨赤道环。跨赤道环的足点有可能是宁静区或活动区, 通过对比软X射线像和全日面纵向磁图, 找到连接两个活动区的跨赤道环。对于所选择的跨赤道环, 带着它连接的活动区, 调查怀柔矢量磁图数据库, 找这些活动区是否有对应的矢量磁图。

### 4.2.1 矢量磁图数据处理

#### 4.2.1.1 观测技术

用太阳磁场望远镜得到光球矢量磁图, 这个矢量磁像仪安装在怀柔太阳观测站。视场为  $5'.23 \times 3'.63$ , CCD为  $512 \times 512$  像素。光球矢量磁场的获得基于  $I$ ,  $Q$ ,  $U$  和  $V$  四个Stokes参数。磁场纵向分量在离线心FeI  $0.075 \text{ \AA}$  处的线翼测量, 横向分量  $Q$  和  $U$  在线心  $\lambda 5324.19 \text{ \AA}$  测量。纵场和横场的磁图都是由256帧叠加而成。对  $Q$ ,  $U$  和  $V$  做了  $3 \times 4$  像素的平滑后, 我们得到的矢量磁图时间分辨率为5分

钟，空间分辨率为 $2 \times 2$ 角秒。Stokes参数和磁场的关系可用下面的公式表示：

$$B_{\parallel} = C_{\parallel} \frac{V}{I}, \quad (4.1)$$

$$B_{\perp} = C_{\perp} \left( \frac{Q^2}{I^2} + \frac{U^2}{I^2} \right)^{\frac{1}{4}}, \quad (4.2)$$

$C_{\parallel}$  和  $C_{\perp}$  是磁场纵向分量和横向分量的定标因子。然而，对于矢量磁图的精确定标是复杂和困难的。在定标过程中，用了理论定标和经验定标两种方法。横场方向 $180^{\circ}$ 不确定性是解决Zeeman 效应的一个内在缺陷，用势场近似的方法解决。

West和Hagyard (1983) 发现当单色像滤光器从线心移动到线翼时，横场方位角会发生旋转。怀柔横场在线心测量，纠正法拉第旋转是必要的。我们用Su和Zhang (2004) 的最小二乘法改正法拉第旋转，用以下公式表示：

$$\overline{\Delta\phi} = 0.412 + 0.015 \times B_z, \quad (4.3)$$

$\overline{\Delta\phi}$ 是法拉第旋转最大值的平均值。对于正的纵向场，法拉第旋转有一个正值；对于负的纵向场，法拉第旋转有一个负值。因此，对于正的纵向磁场，我们减去 $|\overline{\Delta\phi}|$ ；对于负的纵向场，我们加上 $|\overline{\Delta\phi}|$ 。从公式4.3中，可以看到只有 $|B_z|$ 大于27高斯时，才能满足方程，纵向磁场的噪音水平 $\leq 20$ 高斯，考虑到法拉第旋转改正，我们只用大于30高斯的数据。对于横场测量噪音水平一般为100高斯，选横场大于200高斯的数据。

#### 4.2.1.2 计算电流螺度的参数和方法

用两个参数来计算电流螺度，一个是无力因子 $\alpha$ ，另外一个为电流螺度的局部分量 $h_c$ 。这两个参数都可以从观测的矢量磁场数据中直接得到。

无力场因子 $\alpha_{best}$ : 计算无力场因子 $\alpha$ 时, 把光球的纵向分量作为边界条件。用无力场方程 $\nabla \times \mathbf{B} = \alpha \mathbf{B}$ , 我们计算参数 $\alpha$ 的值, 使得观测的水平分量和计算的水平分量拟合得最好, 也就是 $B_x$ 和 $B_y$ 有最小的平方差。当改变参数 $\alpha$ 的值时, 最小平方差也随之改变。平方差为最小值时的 $\alpha$ 为 $\alpha_{best}$ , 可以用下面的公式来表示:

$$\frac{\sum [B_{cal}(\alpha_{best}) - B_{obs}]^2}{\sum B^2} = min. \quad (4.4)$$

局部电流螺度 $h_c$ : 可以表达为下面的公式:

$$h_c = \mu B_z J_z. \quad (4.5)$$

$B_z$ 为磁场的纵向分量,  $J_z$ 是纵向电流, 由观测的横场得到。在计算中, 每个活动区的局部电流螺度总是既包括正的电流螺度, 也包括负的电流螺度。为了显示哪一种符号占优势, 我们用了 $\rho_h$ 这个量, 表示为

$$\rho_h = \frac{\sum h_c(i, j)}{\sum |h_c(i, j)|}, \quad (4.6)$$

$\sum$ 表示对于整个活动区的像素点求和,  $h_c(i, j)$ 为在像素点 $(i, j)$ 的电流螺度值。 $\rho_h$ 称为一个活动区的电流螺度不平衡度, 描述净电流螺度与无符号电流螺度的比值。从上面的公式, 可以看出 $\rho_h$ 和 $\sum h_c$ 有相同的电流螺度符号。

#### 4.2.1.3 数据处理

对于那些从怀柔矢量磁图中选择的活跃区, 我们找观测数据很好且经度在 $\pm 35^\circ$  以内的矢量磁图。共43对活跃区有满足上述条件的矢量磁图。

有的一个活跃区可能有几个跨赤道环, 因此对于43对活跃区中共有81个活跃区, 对于这81个活跃区, 我们选择了大约800张矢量磁图。用上面介绍的两个参数, 计算了每个活跃区的电流螺度平均值。跨赤道环只连接活跃区的一部分并不连接整个活跃区, 如果我们计算活跃区的螺度形式, 并不能很清楚地表示

跨赤道环足点的螺度。为了更准确的表示跨赤道环足点的螺度，我们计算了跨赤道环连接的磁极性对的电流螺度。

如果把跨赤道环看成磁力线，它连接着相反的磁极性。由于一些活动区有两个跨赤道环连接，在选择43对活动区中共有50对磁极性区。

### 4.2.2 外推

不能仅从形态上看跨赤道环的扭曲形式，我们用Chiu 和Hilton (1977) 的方法，假定日冕磁场是常 $\alpha$ 无力场，用格林函数的方法解线性无力场方程，以光球表面的纵向磁场做边界条件，作无力场外推来确定跨赤道环的扭曲符号。

首先从SOHO/MDI数据中找跨赤道环对应的纵向磁图，如果找不到，我们用美国国家天文台Kitt Peak的纵向磁图。用纵向磁场做边界条件来外推日冕磁力线，不断改变 $\alpha$  的值，当外推的磁力线和观测的跨赤道环结构拟合得最好时，所得的值即我们所需要的 $\alpha$ 值。

## 4.3 结果

### 4.3.1 例子

为了更清楚的显示怎样选择和处理数据，我们举一个例子给以说明。图4.1a是1999年1月19日的Yohkoh软X射线像。从图中我们可以看到跨赤道环在北半球连接活动区AR 8440的正极性，在南半球连接AR 8439的负极性。在找到确定的活动区和磁极性区以后，我们从怀柔数据库中找到这两个活动区对应的矢量磁图。

对于选择的两个活动区，我们找观测条件好而且位于日面中心的磁图。然后按着4.2.1节给出的方法处理这些磁图，计算这两个活动区及连接的磁极性区的 $\alpha_{best}$ 和 $\rho_h$ 值，并求得它们的平均值，表4.1列出了这些值。从表4.1中我们可以

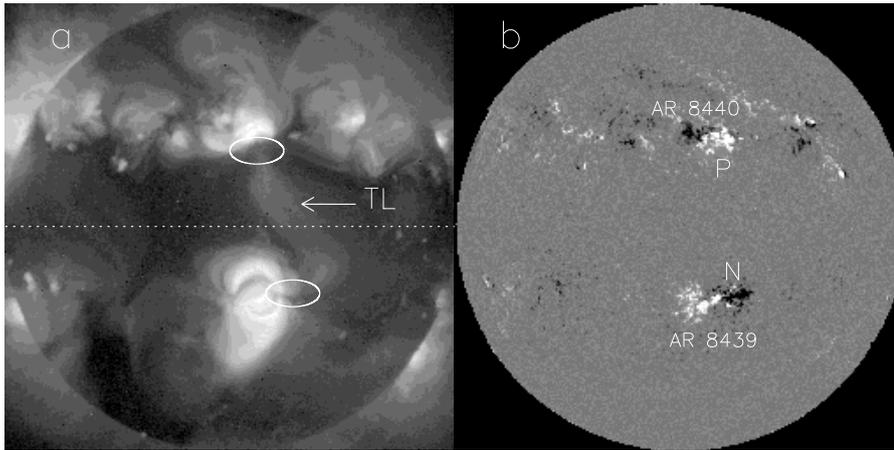


图 4.1: (a) 1999年1月19日 *Yohkoh* 软X 射线像的一个跨赤道环, 两个椭圆环表明跨赤道环连接的区域.(b) 对应的Kitt峰全日面纵向磁图。‘P’ 表明正的磁极性, ‘N’ 表明负的磁极性。

表 4.1: AR 8440和AR 8439的螺度值

AR number	$\alpha_{best}$	$\rho_h$	$\alpha_{best(MP)}$	$\rho_h(MP)$
8440	1.16	31%	1.17(P)	30%(P)
8439	0.04	21%	0.80(N)	11%(N)

注意:  $\alpha_{best}$  的单位是  $10^{-8} m^{-1}$ . ‘MP’ 代表磁极性区; ‘P’ 表示正的磁极性, ‘N’ 表示负的磁极性。

看出活动区AR 8440和AR 8439有相同的螺度符号, 并且跨赤道环连接的磁极性区也有相同的手征性。

图4.2给出了日冕中跨赤道环的磁力线分布, 是用4.2.3节给出的方法外推得到的磁力线。 $\alpha$ 值为  $1.7 \times 10^{-3} Mm^{-1}$ , 通过与表4.1对比, 得知跨赤道环扭曲符号和足点的螺度符号相同。

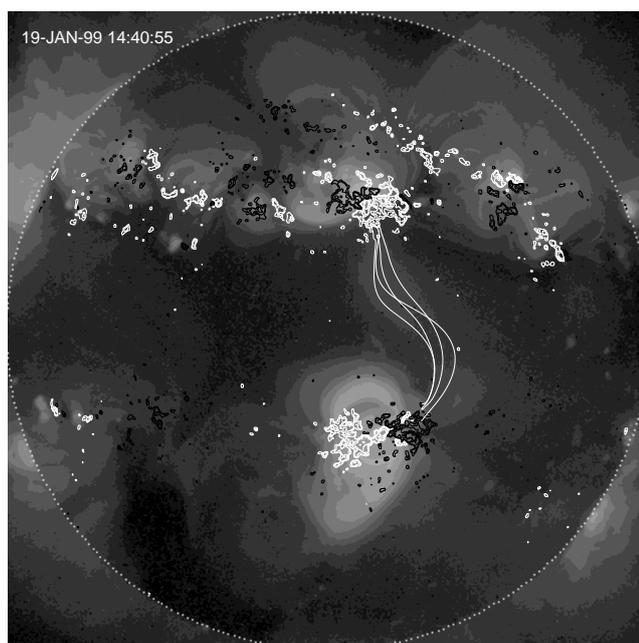


图 4.2: 纵向磁图的无力场外推。Kitt峰纵向磁图的等高线图覆盖 *Yohkoh* 软X射线像。 $\alpha = 1.7 \times 10^{-3} Mm^{-1}$

### 4.3.2 统计结果

在这一部分，我们从统计的角度分析了跨赤道环连接的活动区对的手征性关系以及磁极性对的螺度关系。并对跨赤道环作了外推，找到他们的外推值。

#### 4.3.2.1 两个参数的关系

用两个参数计算电流螺度，我们从统计的角度分析了它们的关系。图4.3给出了跨赤道环所连活动区的两个参数之间的关系，从图中可以看出他们有很好的相关性，对于81个活动区，有63个（78%）活动区，用两个参数计算，得到的符号相同。对于两个参数符号相反的活动区，绝大部分它们有小的螺度值并且标准偏差 ( $1\sigma$ ) 大于平均值。

图4.4给出了跨赤道环所连磁极性区的两个参数的相关关系。对于两个参

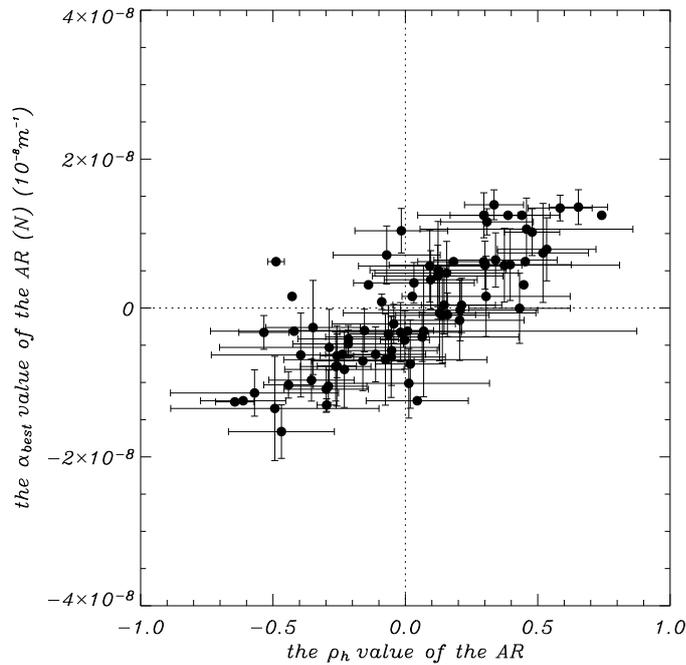


图 4.3: 关于活动区的 $\rho_h$ 和 $\alpha_{best}$ 的关系。误差棒是从同一活动区的多张磁图得到的, 误差范围为 $1\sigma$ , 没有误差棒的点表明此活动区只有一张磁图。

数, 90%的磁极性区有相同的符号。计算磁极性区的螺度, 两个参数的相关性比计算活动区的螺度要高。这可能是因为在一个活动区内既有正螺度, 又有负螺度, 如果从平均角度考虑, 会得到一个接近0 的值, 这个值可能稍微偏正或者偏负。为了证明上面的猜测, 我们在81个活动区中找到 $\rho_h$ 小于0.1的活动区共20个, 其中9个活动区的两个参数符号是相反的, 如果把这20个活动区去掉, 两个参数的相关性会达到85%。

#### 4.3.2.2 活动区对的螺度关系

图4.5给出了跨赤道环连接的43对活动区的螺度关系。从图中, 我们并不能清楚地看到活动区对的关系。对于参数 $\alpha_{best}$ , 22对 (51%) 活动区有相同的符号, 21对 (49%) 活动区有相反的符号。用参数 $\rho_h$ , 得到26对 (60%) 活动区有相

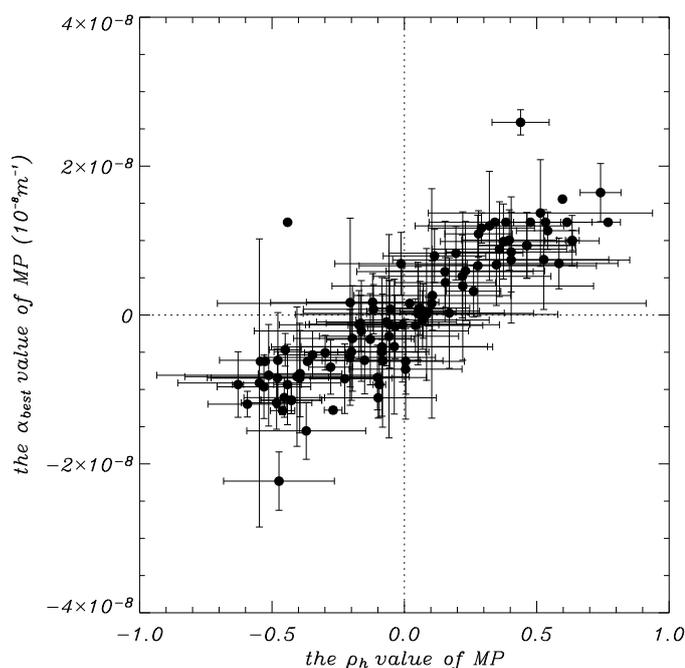


图 4.4: 关于磁极性区的 $\rho_h$ 和 $\alpha_{best}$ 的关系。误差棒是从同一磁极性区的多张磁图得到的, 误差范围为 $1\sigma$ , 没有误差棒的点表明这个磁极性区只有一张磁图。

同的符号, 17对 (40%) 活动区有相反的符号。

对于81个活动区, 有10个活动区 $\alpha_{best}$  的平均值小于 $2 \times 10^{-9} m^{-1}$ 且标准偏差 $1\sigma$ 大于平均值, 如果我们把这些活动区去掉, 还剩下33对活动区。在这些活动区对中, 对于 $\alpha_{best}$ , 17对 (52%) 有相同的符号; 对于 $\rho_h$ , 18对 (55%) 有相同的符号。有8对活动区中有一个或两个活动区只有一张磁图, 如果我们也把这些活动区减掉, 只剩下25对活动区, 在这25对中, 对于 $\alpha_{best}$ , 14对 (56%) 有相同的符号; 对于 $\rho_h$ , 15对 (60%) 有相同的符号。

用两个参数得到的结果表明跨赤道环连接的活动区并不一定有相同的螺度符号。Pevtsov (2000) 根据跨赤道环的形态结构, 将其分成两类: 一类是‘连接型’, 另一类是‘重联型’。他们计算了22对由跨赤道环连接的活动区的电流螺度

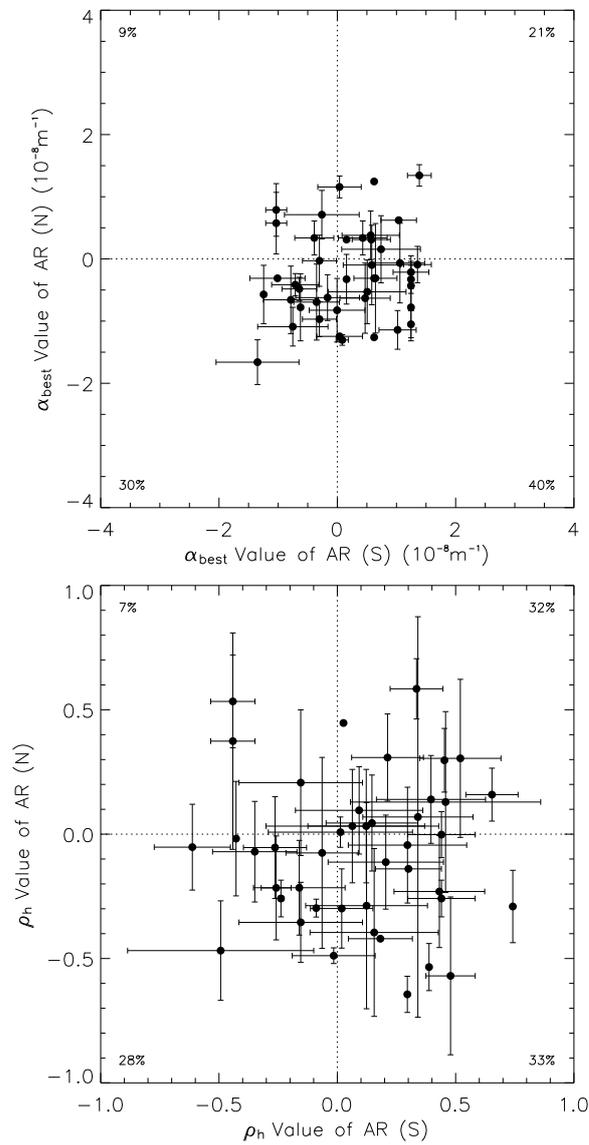


图 4.5: 上图: 跨赤道环连接的活动区对的 $\alpha_{\text{best}}$  的相关性。下图: 跨赤道环连接的活动区对的 $\rho_h$ 的关系。X轴代表南半球活动区的螺度值, Y轴代表北半球活动区的螺度值。对应的误差值为 $1\sigma$ 范围。

值,其中14个是‘连接型’,8个是‘重联型’。对于‘连接型’,有50%的活动区对有相同的螺度符号,对于‘重联型’,所有的活动区对都有相同的螺度符号。如果我们把选择的43个跨赤道环也按Pevtsov (2000)的方法分类,有26个环属于‘连接型’,17个环是‘重联型’。对于26个连接型的环,其中10个活动区对有相同的螺度符号;对于重联型环,71%的活动区对有相同的螺度符号。这个结果表明重联型的跨赤道环连接的活动区趋向于有相同的螺度符号。

#### 4.3.2.3 电流螺度符号的半球规则

我们选择的81个活动区既包括太阳活动周22周的活动区,也包括23周的活动区。为了进一步验证跨赤道环连接的活动区对的电流螺度没有相关性,我们考虑了活动区电流螺度的半球规则。图4.6给出了所有这些活动区的电流螺度随纬度的分布,从图中我们可以看到这些活动区遵循半球规则。对于 $\alpha_{best}$ ,北半球68%的活动区有负的螺度值,南半球60%的活动区有正的螺度值。对于电流螺度不平衡度 $\rho_h$ ,北半球59%的活动区有负的螺度值,南半球65%的活动区有正的螺度值。

不仅是整个数据库,对于独立活动周的活动区的螺度符号也遵循半球规则。在太阳活动周22周,对于 $\alpha_{best}$ ,北半球60%的活动区有负的螺度值,南半球72%的活动区有正的螺度值。对于 $\rho_h$ ,北半球70%的活动区有负的螺度值,南半球72%的活动区有正的螺度值。在太阳活动周23周,对于 $\alpha_{best}$ ,北半球71%的活动区有负的螺度值,南半球55%的活动区有正的螺度值。对于 $\rho_h$ ,北半球55%的活动区有负的螺度值,南半球62%的活动区有正的螺度值。这些结果与先前的研究结果一致(Pevtsov等 1995, 2001; Bao和Zhang 1998; Zhang 2006)

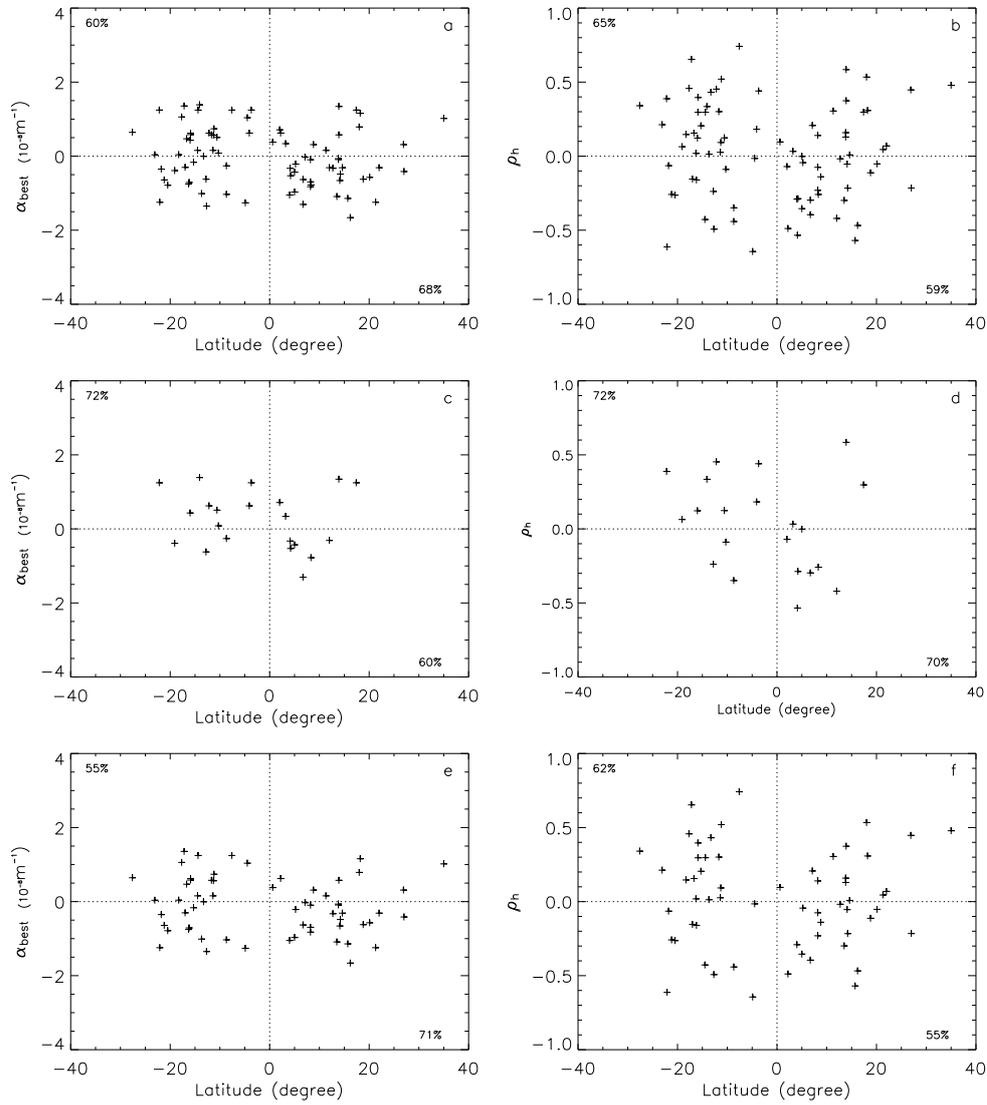


图 4.6:  $\alpha_{best}$  和  $\rho_h$  随纬度的分布图。(a) 所有活动区的  $\alpha_{best}$  随纬度的分布图。(b) 所有活动区的  $\rho_h$  随纬度的分布图。(c, e) 太阳活动周22周, 23周的活动区的  $\alpha_{best}$  值随纬度的分布图。(d, f) 太阳活动周22周, 23周的活动区的  $\rho_h$  随纬度的分布图。

#### 4.3.2.4 磁极性对的电流螺度关系

跨赤道环连接相反的磁极性区, 为了更清楚地展示跨赤道环足点的螺度关系, 我们计算了跨赤道环连接的50对磁极性区的电流螺度。图4.7给出了它们的螺度关系, 从两个参数得到的结果表明, 跨赤道环连接的磁极性区对的电流螺度并没有明显的关系。用参数 $\alpha_{best}$ , 56% (28对) 的磁极性对有相同的螺度符号, 44% (22对) 的磁极性对有相反的螺度符号。用参数 $\rho_h$ , 64% (32对) 的磁极性对有相同的螺度符号, 36% (18对) 的磁极性对有相反的螺度符号。

#### 4.3.2.5 跨赤道环的扭曲

用观测的纵向磁图, 我们对这些跨赤道环作了无力场外推, 外推值称为跨赤道环的扭曲值。有一些跨赤道环没有对应的纵向磁图, 还有一些环通过与软X射线像拟合找不到确定的符号, 所以只外推了33个跨赤道环。在这33个跨赤道环中, 有16个跨赤道环的扭曲值是正的, 12个跨赤道环的扭曲值是负的, 还有5个跨赤道环的扭曲值为0。图4.8给出了跨赤道环扭曲值的分布。

跨赤道环的扭曲值, 是用无力场外推得到的; 计算活动区的电流螺度 $\alpha_{best}$ 也是用无力场外推得到的, 这两个量具有可比性, 我们分析了他们的关系。对于参数 $\rho_h$ , 虽然, 在一定程度上代表电流螺度, 但是它与外推值有不同的物理意义, 我们并没有考虑这个参数与跨赤道环扭曲值的关系。作为一种磁力线结构, 跨赤道环连接相反的磁极性区, 我们只考虑跨赤道环与磁极性对的螺度关系。这些跨赤道环根据其连接磁极性对的螺度是否相同分成两部分, 结果在表4.2中已经给出。有19个跨赤道环的足点的螺度符号相同, 14个跨赤道环的螺度符号相反。对于第一部分, 有12个跨赤道环的扭曲符号和足点的扭曲符号相同, 4个跨赤道环的扭曲符号与足点螺度符号相反。对于第二部分, 有7个跨赤道环的扭曲符号为负值, 5个跨赤道环的扭曲符号为正值。这个结果表明, 跨赤道环的扭

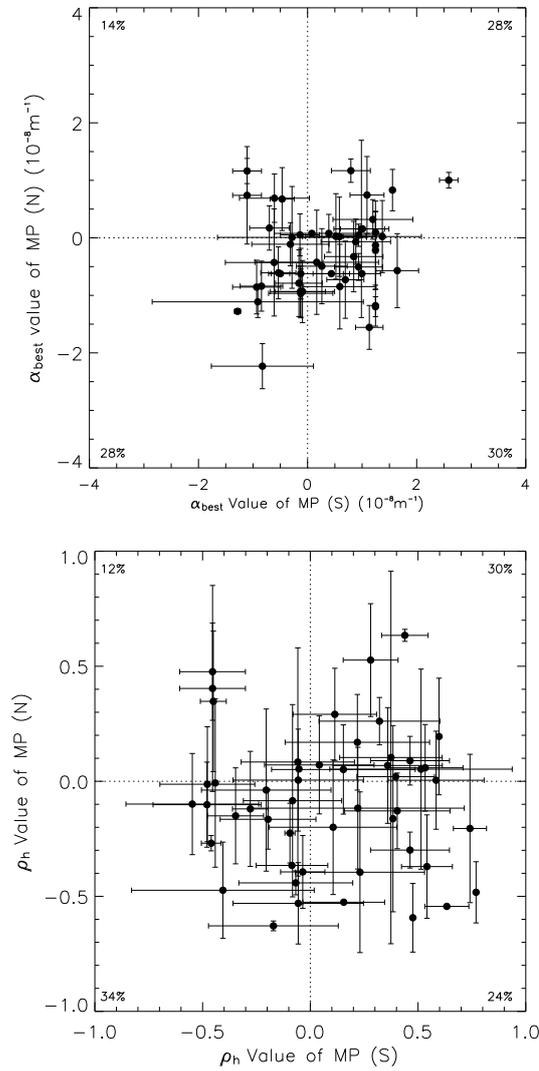


图 4.7: 上图: 跨赤道环连接的磁极性对 $\alpha_{best}$ 的相关性。下图: 跨赤道环连接的磁极性对 $\rho_h$ 的相关性。X轴代表南半球磁极性区的螺度值, Y轴代表北半球磁极性区的螺度值。对应的误差值为 $1\sigma$ 范围。

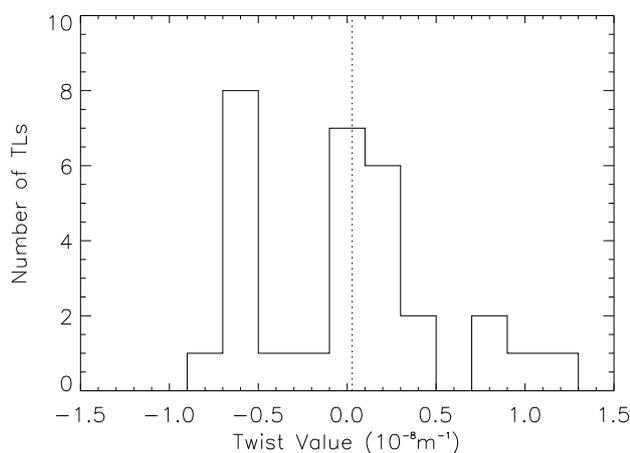


图 4.8: 跨赤道环扭曲值的分布。点线表明平均值。

曲趋向于与足点的螺度符号相同。

#### 4.4 结论和讨论

计算了43对活动区的螺度符号：约50%的活动区对有相同的螺度符号；50%的活动区对有相反的螺度符号。我们又计算了50对跨赤道环连接的磁极性区的螺度符号，结果与活动区对螺度符号关系类似：约50%的磁极性

表 4.2: 跨赤道环外推符号和足点螺度形式的关系

参数	$\alpha_{best}$						
	same			opposite			
足点的螺度关系							
跨赤道环的扭曲和足点的螺度的关系	same	opposite	potential	TLs signs number	positive	negative	potential
	12	4	3		7	5	2

区对有相同的螺度符号；50%的磁极性区对有相反的螺度符号。这个结果表明跨赤道环并不是很容易连接螺度符号相同的两个区，也就是活动区的螺度符号与跨赤道环的形成无关。

Pevtsov (2000) 用 *Yohkoh* 的1991年到1998年软X射线数据库的资料研究了22对跨赤道环连接活动区对的螺度关系，发现68%的活动区对有相同的电流螺度符号。我们用了一个更大的数据库，用 *Yohkoh* 软X射线望远镜的整个数据库和怀柔数据库，找了43对跨赤道环连接的活动区，发现22对 (51%) 有相同的螺度形式，21对有相反电流螺度符号。我们的结果与Pevtsov的有些不同，可能有下面的原因：首先，Pevtsov 用的是Haleakala偏振仪 (HSP) 的数据库，而我们用的是太阳磁场望远镜 (SMFT) 的数据，不同的仪器产生的结果会有些差别。虽然Pevtsov 等 (2006) 研究HSP和SMFT数据发现它们有很好的螺度相关性，大约80%的磁图有相同的螺度符号，20%的有相反的螺度符号。如果我们从活动区对考虑两个数据库螺度的相关性，将会低于80%。再者，我们选择的样本与Pevtsov (2000) 的样本有些差别，不同的样本也会引起结果上的差异。其次，Pevtsov (2000) 得到68%的活动区对有相同的螺度符号；虽然，跨赤道环连接的活动区对的螺度符号有相同的趋势，但这种趋势比较弱。最后，我们两个用的数据库都比较小，希望有人用更大量的数据库研究这个问题。

我们选择的43个跨赤道环，根据‘重联型’和‘连接型’分为两类。对于‘重联型’，有71%的活动区对有相同的螺度符号。

用两个参数计算了光球电流螺度： $\alpha_{best}$  和  $\rho_h$ ，发现它们有很好的相关性，但是两个参数有不同的物理意义观测结果也有一些差别，这样两个参数得到的结果有一些轻微的不同。

虽然我们选择的活动区都是跨赤道环连接的活动区，但是他们的电流螺度符号也遵循半球规则。活动区的半球规则与Pevtsov等 (1995) 得到的半球螺度

规则相同。这些活动区遵循半球规则，进一步验证了跨赤道环连接的活动区对的电流螺度没有明显的相关性。

用无力场外推我们得到了33个跨赤道环的扭曲值，这些环的扭曲平均值接近0。有正的扭曲值和负的扭曲值的跨赤道环数基本相同，这个结果与Rust和Kumar（1996）得到的结果类似；他们发现对于23个软X射线跨赤道环亮点，‘S’型的跨赤道环数为12个，反‘S’型的跨赤道环数为11个。接着，我们分析了跨赤道环的扭曲与足点的螺度关系，结果表明，跨赤道环的扭曲趋向于和足点的螺度符号相同。

附录: 表4.3和4.4 分别给出了用参数 $\alpha_{best}$  和 $\rho_h$ 得到的跨赤道环连接的活动区和磁极性区的平均螺度值。

第一栏给出了软X射线像观测的跨赤道环的日期, 第二栏给出了活动区存在的半球, ‘N’ 表明在北半球, ‘S’ 表明在南半球。第三栏展示了NOAA 活动区的编号, 在第四栏中给出了平均螺度值和 $1\sigma$ 范围的误差。第五栏显示了跨赤道环连接的磁极性, ‘N’ 表明负的磁极, ‘P’ 显示正的磁极, 对应于第五栏的平均螺度值和 $1\sigma$ 范围的误差值显示在第六栏中。两个活动区, 并不仅仅连接一个跨赤道环, 有时会连接两个跨赤道环。第七栏展示了由另一个跨赤道环连接的另外一对磁极性对, 第八栏给出了第七栏对应的磁极性对的平均螺度值和 $1\sigma$ 范围的误差。

表4.4给出了用参数 $\rho_h$ 计算的螺度值, 每一栏代表的物理意义都和表4.3的相同。表4.5展示了由外推得到的跨赤道环的无力场值和其连接足点的电流螺度值。第一栏给出了软X射线观测的全日面像的时间。第二栏给出了外推的跨赤道环的无力场值。第三栏显示了了活动区存在的半球。跨赤道环连接的活动区的国际编号展示在第四栏, ‘P’ 和‘N’ 代表跨赤道环连接的磁极性区, 第五栏给出了跨赤道环连接足点的 $\alpha_{best}$  值。

表 4.3: 跨赤道环连接的活动区对的 $\alpha_{best}$ 值

Date	Hemi.	NOAA	$\alpha_{best}$ (AR)	MP	$\alpha_{best}$ (MP)	MP	$\alpha_{best}$ (MP)
1991 Oct 28	S	6891	$1.39 \pm 0.20$	P	$1.09 \pm 0.31$	N	$2.59 \pm 0.17$
	N	6893	$1.34 \pm 0.17$	N	$0.74 \pm 0.67$	P	$1.00 \pm 0.14$
1992 Jan 07	S	6993	$0.08 \pm 0.10$	P	$-1.28 \pm 0.06$		
	N	6996	$-1.30 \pm 0.08$	N	$-1.28 \pm 0.04$		
1992 Jan 20	S	7012	$0.62 \pm 0.00$	P	$1.56 \pm 0.00$		
	N	7019	$1.24 \pm 0.00$	N	$0.83 \pm 0.36$		
1992 Feb 27	N	7067	$-0.43 \pm 0.39$	N	$0.04 \pm 0.19$		
	S	7069	$1.25 \pm 0.00$	P	$0.93 \pm 0.44$		
	S	7069	$1.25 \pm 0.00$	P	$0.93 \pm 0.44$		
	N	7070	$-0.78 \pm 0.54$	N	$-0.51 \pm 0.23$		
	N	7070	$-0.78 \pm 0.54$	P	$-0.86 \pm 0.47$		
	S	7072	$-0.62 \pm 0.00$	N	$-0.93 \pm 0.44$		
1992 Apr 18	S	7128	$0.43 \pm 0.41$	P	$0.26 \pm 0.47$		
	N	7131	$0.34 \pm 0.27$	N	$-0.49 \pm 0.65$		
	N	7131	$0.34 \pm 0.27$	P	$0.67 \pm 0.55$		
	S	7130	$-0.39 \pm 0.33$	N	$-0.47 \pm 0.22$		
1994 Jan 05	N	7645	$0.71 \pm 0.39$	N	$0.69 \pm 0.42$	P	$-0.11 \pm 0.38$

表 4.3: continued

Date	Hemi.	NOAA	$\alpha_{best}$ (AR)	MP	$\alpha_{best}$ (MP)	MP	$\alpha_{best}$ (MP)
	S	7646	$-0.26 \pm 0.63$	P	$-0.61 \pm 0.64$	N	$-0.31 \pm 0.71$
1995 Jan 24	S	7829	$1.25 \pm 0.00$	P	$1.25 \pm 0.00$		
	N	7830	$-0.33 \pm 0.23$	N	$-1.20 \pm 0.17$		
1995 Apr 17	S	7863	$0.62 \pm 0.00$	P	$1.00 \pm 0.34$	N	$-0.50 \pm 0.17$
	N	7864	$-0.31 \pm 0.00$	N	$-0.62 \pm 0.00$	P	$-0.62 \pm 0.00$
1995 Aug 25	N	7901	$-0.53 \pm 0.51$	P	$0.008 \pm 0.89$		
	S	7902	$0.51 \pm 0.66$	N	$-0.29 \pm 1.37$		
1996 Dec 17	N	8004	$-1.26 \pm 0.03$	P	$-0.21 \pm 0.68$		
	S	8005	$0.62 \pm 0.00$	N	$1.25 \pm 0.00$		
1997 Sep 10	N	8084	$-0.31 \pm 0.88$	P	$0.16 \pm 1.54$		
	S	8085	$0.64 \pm 0.36$	N	$0.99 \pm 0.50$		
1997 Dec 26	S	8124	$1.02 \pm 0.31$	P	$1.13 \pm 0.25$		
	N	8126	$-1.14 \pm 0.31$	N	$-1.56 \pm 0.38$		
1998 Jul 02	S	8258	$0.16 \pm 0.00$	N	$0.08 \pm 0.00$		
	N	8259	$0.31 \pm 0.00$	P	$0.08 \pm 0.00$		
1998 Jul 06	S	8263	$1.06 \pm 0.42$	N	$1.37 \pm 0.72$		
	N	8264	$-0.07 \pm 0.64$	P	$0.02 \pm 0.63$		
1998 Nov 30	S	8393	$0.04 \pm 0.39$	N	$-0.14 \pm 0.36$		

表 4.3: continued

Date	Hemi.	NOAA	$\alpha_{best}$ (AR)	MP	$\alpha_{best}$ (MP)	MP	$\alpha_{best}$ (MP)
	N	8395	$-1.25 \pm 0.00$	P	$0.05 \pm 0.36$		
1998 Dec 09	N	8402	$-0.57 \pm 0.47$	P	$-0.84 \pm 0.43$		
	S	8404	$-1.25 \pm 0.00$	N	$-0.85 \pm 0.39$		
1999 Jan 19	S	8439	$0.04 \pm 0.37$	N	$0.79 \pm 0.36$		
	N	8440	$1.16 \pm 0.18$	P	$1.17 \pm 0.20$		
1999 Feb 13	N	8457	$-0.48 \pm 0.19$	P	$0.17 \pm 0.38$		
	S	8458	$-0.64 \pm 0.29$	N	$-0.70 \pm 0.36$		
1999 Jun 05	N	8558	$-1.09 \pm 0.31$	P	$-0.79 \pm 0.58$		
	S	8562	$-0.75 \pm 0.59$	N	$-0.16 \pm 0.43$		
1999 Jun 28	S	8603	$-0.17 \pm 0.54$	P	$0.17 \pm 1.13$	N	$0.85 \pm 0.54$
	N	8602	$-0.62 \pm 0.37$	N	$-0.42 \pm 0.91$	P	$-0.33 \pm 0.61$
1999 Jul 13	S	8627	$-1.01 \pm 0.47$	N	$0.39 \pm 1.00$		
	N	8628	$-0.31 \pm 0.00$	P	$0.08 \pm 0.33$		
1999 Nov 18	S	8765	$-1.03 \pm 0.18$	N	$-1.11 \pm 0.26$		
	N	8766	$0.79 \pm 0.42$	P	$1.16 \pm 0.22$		
	S	8765	$-1.03 \pm 0.18$	N	$-1.11 \pm 0.26$		
	N	8768	$0.58 \pm 0.50$	P	$0.74 \pm 0.85$		
2000 Jan 19	S	8831	$-0.79 \pm 0.46$	N	$-0.54 \pm 0.32$		

表 4.3: continued

Date	Hemi.	NOAA	$\alpha_{best}$ (AR)	MP	$\alpha_{best}$ (MP)	MP	$\alpha_{best}$ (MP)
	N	8829	$-0.66 \pm 0.54$	P	$-0.61 \pm 0.45$		
2000 Feb 26	S	8882	$0.58 \pm 0.48$	N	$0.52 \pm 0.56$		
	N	8883	$-0.10 \pm 0.64$	P	$0.03 \pm 0.74$		
2000 Mar 09	S	8898	$-0.71 \pm 0.40$	P	$-0.09 \pm 0.59$		
	N	8904	$-0.42 \pm 0.18$	N	$-0.93 \pm 0.54$		
2000 Apr 20	N	8963	$-1.66 \pm 0.36$	P	$-2.23 \pm 0.39$		
	S	8968	$-1.35 \pm 0.70$	N	$-0.83 \pm 0.94$		
2000 Apr 28	S	8970	$1.36 \pm 0.23$	P	$1.20 \pm 0.73$	N	$1.64 \pm 0.39$
	N	8971	$-0.09 \pm 0.29$	N	$0.32 \pm 0.34$	P	$-0.57 \pm 0.64$
2000 Jun 27	N	9054	$0.16 \pm 0.54$	P	$0.09 \pm 0.36$		
	S	9056	$0.74 \pm 0.67$	N	$1.25 \pm 0.00$		
2000 Jul 22	N	9097	$-1.05 \pm 0.22$	P	$-1.18 \pm 0.36$		
	S	9096	$1.25 \pm 0.00$	N	$1.25 \pm 0.00$		
2000 Aug 29	N	9140	$-0.21 \pm 0.26$	P	$-0.07 \pm 0.39$		
	S	9143	$1.25 \pm 0.30$	N	$0.88 \pm 0.64$		
2000 Sep 05	N	9147	$-0.63 \pm 0.56$	P	$-0.85 \pm 0.74$		
	S	9154	$0.47 \pm 0.42$	N	$0.59 \pm 0.67$		
2000 Sep 29	S	9173	$0.57 \pm 0.32$	P	$0.44 \pm 0.34$	N	$1.01 \pm 0.41$

表 4.3: continued

Date	Hemi.	NOAA	$\alpha_{best}$ (AR)	MP	$\alpha_{best}$ (MP)	MP	$\alpha_{best}$ (MP)
	N	9172	$0.31 \pm 0.00$	N	$-0.62 \pm 0.00$	P	$0.16 \pm 0.00$
2000 Nov 02	S	9214	$0.56 \pm 0.48$	N	$0.58 \pm 0.68$		
	N	9213	$0.38 \pm 0.39$	P	$0.02 \pm 0.69$		
2000 Dec 20	N	9278	$-0.03 \pm 0.41$	P	$-0.62 \pm 0.44$		
	S	9279	$-0.30 \pm 0.29$	N	$-0.13 \pm 0.59$		
2000 Dec 23	S	9279	$-0.30 \pm 0.29$	P	$-0.91 \pm 1.94$	N	$-0.13 \pm 0.59$
	N	9280	$-0.97 \pm 0.28$	N	$-1.11 \pm 0.27$	P	$-0.96 \pm 0.43$
2001 Jan 09	N	9296	$-0.69 \pm 0.61$	P	$-0.43 \pm 0.93$		
	S	9295	$-0.35 \pm 0.39$	N	$-0.61 \pm 0.89$		
2001 Feb 09	N	9335	$-0.83 \pm 0.51$	P	$-0.73 \pm 0.67$		
	S	9339	$-0.004 \pm 0.47$	N	$0.69 \pm 0.34$		
2001 Feb 26	N	9359	$-0.33 \pm 0.40$	P	$-0.13 \pm 0.77$		
	S	9360	$0.16 \pm 0.00$	N	$1.25 \pm 0.00$		
2001 Mar 15	S	9373	$1.04 \pm 0.30$	N	$-0.13 \pm 0.46$		
	N	9384	$0.62 \pm 0.00$	P	$-0.93 \pm 0.44$		

*Note:*  $\alpha_{best}$  的单位是  $10^{-8} m^{-1}$ , 误差范围为  $1\sigma$  水平。‘MP’ 代表磁极性区; ‘P’ 表明正的磁极区, ‘N’ 表示负的磁极区。

表 4.4: 跨赤道环连接的区域对的 $\rho_h$ 值。

Date	Hemi.	NOAA	$\rho_h$ (AR)	MP	$\rho_h$ (MP)	MP	$\rho_h$ (MP)
1991 Oct 28	S	6891	$0.33 \pm 0.11$	P	$0.28 \pm 0.13$	N	$0.44 \pm 0.11$
	N	6893	$0.58 \pm 0.12$	N	$0.53 \pm 0.25$	P	$0.63 \pm 0.03$
1992 Jan 07	S	6993	$-0.09 \pm 0.00$	P	$-0.46 \pm 0.05$		
	N	6996	$-0.30 \pm 0.04$	N	$-0.27 \pm 0.03$		
1992 Jan 20	S	7012	$0.45 \pm 0.00$	P	$0.60 \pm 0.00$		
	N	7019	$0.30 \pm 0.13$	N	$0.19 \pm 0.25$		
1992 Feb 27	N	7067	$-0.002 \pm 0.09$	N	$0.09 \pm 0.11$		
	S	7069	$0.44 \pm 0.14$	P	$0.46 \pm 0.18$		
	S	7069	$0.44 \pm 0.14$	P	$0.46 \pm 0.18$		
	N	7070	$-0.26 \pm 0.07$	N	$-0.30 \pm 0.08$		
	N	7070	$-0.26 \pm 0.07$	P	$-0.23 \pm 0.13$		
	S	7072	$-0.24 \pm 0.01$	N	$-0.09 \pm 0.02$		
1992 Apr 18	S	7128	$0.12 \pm 0.25$	P	$0.11 \pm 0.30$		
	N	7131	$0.03 \pm 0.23$	N	$-0.20 \pm 0.29$		
	N	7131	$0.03 \pm 0.23$	P	$0.35 \pm 0.31$		
	S	7130	$0.06 \pm 0.36$	N	$-0.45 \pm 0.06$		
1994 Jan 05	N	7645	$-0.07 \pm 0.20$	N	$-0.01 \pm 0.25$	P	$-0.17 \pm 0.13$
	S	7646	$-0.35 \pm 0.18$	P	$-0.48 \pm 0.22$	N	$-0.20 \pm 0.22$

表 4.4: continued

Date	Hemi.	NOAA	$\rho_h$ (AR)	MP	$\rho_h$ (MP)	MP	$\rho_h$ (MP)
1995 Jan 24	S	7829	$0.39 \pm 0.00$	P	$0.48 \pm 0.00$		
	N	7830	$-0.53 \pm 0.09$	N	$-0.59 \pm 0.15$		
1995 Apr 17	S	7863	$0.18 \pm 0.14$	P	$0.63 \pm 0.10$	N	$-0.09 \pm 0.17$
	N	7864	$-0.42 \pm 0.00$	N	$-0.54 \pm 0.00$	P	$-0.37 \pm 0.00$
1995 Aug 25	N	7901	$-0.29 \pm 0.41$	P	$0.08 \pm 0.50$		
	S	7902	$0.12 \pm 0.26$	N	$-0.06 \pm 0.26$		
1996 Dec 17	N	8004	$-0.64 \pm 0.07$	P	$-0.16 \pm 0.40$		
	S	8005	$0.30 \pm 0.00$	N	$0.38 \pm 0.00$		
1997 Sep 10	N	8084	$0.07 \pm 0.81$	P	$0.10 \pm 0.81$		
	S	8085	$0.34 \pm 0.23$	N	$0.37 \pm 0.24$		
1997 Dec 26	S	8124	$0.48 \pm 0.10$	P	$0.54 \pm 0.12$		
	N	8126	$-0.57 \pm 0.32$	N	$-0.37 \pm 0.22$		
1998 Jul 02	S	8258	$0.03 \pm 0.00$	N	$-0.05 \pm 0.00$		
	N	8259	$0.45 \pm 0.00$	P	$0.05 \pm 0.00$		
1998 Jul 06	S	8263	$0.46 \pm 0.40$	N	$0.51 \pm 0.42$		
	N	8264	$0.13 \pm 0.36$	P	$0.05 \pm 0.43$		
1998 Nov 30	S	8393	$0.15 \pm 0.19$	N	$0.04 \pm 0.25$		
	N	8395	$0.04 \pm 0.19$	P	$0.07 \pm 0.21$		

表 4.4: continued

Date	Hemi.	NOAA	$\rho_h$ (AR)	MP	$\rho_h$ (MP)	MP	$\rho_h$ (MP)
1998 Dec 09	N	8402	$-0.05 \pm 0.17$	P	$-0.10 \pm 0.18$		
	S	8404	$-0.61 \pm 0.16$	N	$-0.48 \pm 0.25$		
1999 Jan 19	S	8439	$0.21 \pm 0.15$	N	$0.11 \pm 0.19$		
	N	8440	$0.31 \pm 0.18$	P	$0.29 \pm 0.20$		
1999 Feb 13	N	8457	$-0.22 \pm 0.21$	P	$-0.12 \pm 0.25$		
	S	8458	$-0.26 \pm 0.06$	N	$-0.28 \pm 0.08$		
1999 Jun 05	N	8558	$-0.30 \pm 0.16$	P	$-0.39 \pm 0.16$		
	S	8562	$0.02 \pm 0.13$	N	$-0.04 \pm 0.10$		
1999 Jun 28	S	8603	$0.20 \pm 0.24$	P	$-0.20 \pm 0.30$	N	$0.40 \pm 0.24$
	N	8602	$-0.11 \pm 0.19$	N	$-0.04 \pm 0.35$	P	$-0.13 \pm 0.16$
1999 Jul 13	S	8627	$0.01 \pm 0.30$	N	$0.22 \pm 0.49$		
	N	8628	$0.01 \pm 0.06$	P	$-0.12 \pm 0.26$		
1999 Nov 18	S	8765	$-0.44 \pm 0.09$	N	$-0.45 \pm 0.15$		
	N	8766	$0.53 \pm 0.19$	P	$0.48 \pm 0.21$		
	S	8765	$-0.44 \pm 0.09$	N	$-0.45 \pm 0.15$		
	N	8768	$0.37 \pm 0.44$	P	$0.40 \pm 0.45$		
2000 Jan 19	S	8831	$-0.26 \pm 0.13$	N	$-0.35 \pm 0.13$		
	N	8829	$-0.05 \pm 0.20$	P	$-0.15 \pm 0.21$		

表 4.4: continued

Date	Hemi.	NOAA	$\rho_h$ (AR)	MP	$\rho_h$ (MP)	MP	$\rho_h$ (MP)
2000 Feb 26	S	8882	$0.40 \pm 0.23$	N	$0.22 \pm 0.34$		
	N	8883	$0.14 \pm 0.18$	P	$0.17 \pm 0.21$		
2000 Mar 09	S	8898	$-0.16 \pm 0.19$	P	$-0.07 \pm 0.26$		
	N	8904	$-0.22 \pm 0.19$	N	$-0.44 \pm 0.05$		
2000 Apr 20	N	8963	$-0.47 \pm 0.20$	P	$-0.47 \pm 0.21$		
	S	8968	$-0.49 \pm 0.39$	N	$-0.41 \pm 0.42$		
2000 Apr 28	S	8970	$0.65 \pm 0.11$	P	$0.32 \pm 0.28$	N	$0.74 \pm 0.08$
	N	8971	$0.16 \pm 0.11$	N	$0.26 \pm 0.10$	P	$-0.21 \pm 0.32$
2000 Jun 27	N	9054	$0.30 \pm 0.32$	P	$0.06 \pm 0.19$		
	S	9056	$0.52 \pm 0.17$	N	$0.53 \pm 0.18$		
2000 Jul 22	N	9097	$-0.29 \pm 0.15$	P	$-0.48 \pm 0.13$		
	S	9096	$0.74 \pm 0.00$	N	$0.77 \pm 0.00$		
2000 Aug 29	N	9140	$-0.04 \pm 0.23$	P	$0.07 \pm 0.25$		
	S	9143	$0.30 \pm 0.25$	N	$0.36 \pm 0.25$		
2000 Sep 05	N	9147	$-0.40 \pm 0.34$	P	$-0.40 \pm 0.35$		
	S	9154	$0.16 \pm 0.27$	N	$0.23 \pm 0.30$		
2000 Sep 29	S	9173	$0.30 \pm 0.14$	P	$0.16 \pm 0.19$	N	$0.40 \pm 0.18$
	N	9172	$-0.14 \pm 0.00$	N	$-0.53 \pm 0.00$	P	$0.02 \pm 0.00$

表 4.4: continued

Date	Hemi.	NOAA	$\rho_h$ (AR)	MP	$\rho_h$ (MP)	MP	$\rho_h$ (MP)
2000 Nov 02	S	9214	$0.09 \pm 0.27$	N	$0.15 \pm 0.33$		
	N	9213	$0.10 \pm 0.18$	P	$0.05 \pm 0.19$		
2000 Dec 20	N	9278	$0.21 \pm 0.29$	P	$0.005 \pm 0.22$		
	S	9279	$-0.15 \pm 0.26$	N	$-0.06 \pm 0.30$		
2000 Dec 23	S	9279	$-0.15 \pm 0.26$	P	$-0.55 \pm 0.31$	N	$-0.06 \pm 0.30$
	N	9280	$-0.35 \pm 0.16$	N	$-0.10 \pm 0.22$	P	$-0.53 \pm 0.18$
2001 Jan 09	N	9296	$-0.08 \pm 0.38$	P	$-0.08 \pm 0.42$		
	S	9295	$-0.06 \pm 0.15$	N	$-0.08 \pm 0.23$		
2001 Feb 09	N	9335	$-0.23 \pm 0.23$	P	$0.005 \pm 0.21$		
	S	9339	$0.43 \pm 0.19$	N	$0.58 \pm 0.22$		
2001 Feb 26	N	9359	$-0.02 \pm 0.23$	P	$-0.007 \pm 0.37$		
	S	9360	$-0.43 \pm 0.00$	N	$-0.44 \pm 0.00$		
2001 Mar 15	S	9373	$-0.02 \pm 0.18$	N	$-0.17 \pm 0.30$		
	N	9384	$-0.49 \pm 0.03$	P	$-0.63 \pm 0.02$		

注意: 误差范围为 $1\sigma$ 。‘MP’代表磁极区; ‘P’表示正的磁极性区, ‘N’代表负的磁极性区。

表 4.5: 跨赤道环的 $\alpha$ 值和其连接活动区的 $\alpha_{best}$ 值

Date	$\alpha_{(TL)}$	Hemisphere	NOAA AR	$\alpha_{best}$
1991 Oct 28	0.17	S	6891 (N)	2.59
		N	6893 (P)	1.00
1992 Jan 07	-0.87	S	6993 (P)	-1.28
		N	6996 (N)	-1.28
1994 Jan 05	0.00	N	7645 (P)	-0.11
		S	7646 (N)	-0.31
		N	7645 (N)	0.69
		S	7646 (P)	-0.61
1995 Jan 24	-0.52	S	7829 (P)	1.25
		N	7830 (N)	-1.20
1995 Aug 25	-0.52	N	7901 (P)	0.008
		S	7902 (N)	-0.29
1997 Sep 10	0.79	N	8084 (P)	0.16
		S	8085 (N)	0.99
1997 Dec 26	0.50	S	8124 (P)	1.13
		N	8126 (N)	-1.56
1998 Nov 30	0.18	S	8393 (N)	-0.14
		N	8395 (P)	0.05

表 4.5: continued

Date	$\alpha$ (TL)	Hemisphere	NOAA AR	$\alpha_{best}$
1999 Jan 19	0.17	S	8439 (N)	0.79
		N	8440 (P)	1.17
1999 Feb 13	0.79	N	8457 (P)	0.17
		S	8458 (N)	-0.70
1999 Jun 05	0.10	N	8558 (P)	-0.79
		S	8562 (N)	-0.16
1999 Jun 28	0.10	S	8603 (P)	0.17
		N	8602 (N)	-0.42
		S	8603 (N)	0.85
		N	8602 (P)	-0.33
1999 Jul 13	0.20	S	8627 (N)	0.39
		N	8628 (P)	0.08
1999 Nov 18	-0.50	S	8765 (N)	-1.11
		N	8766 (P)	1.16
	-0.50	S	8765 (N)	-1.11
		N	8768 (P)	0.74
2000 Jan 19	0.00	S	8831 (N)	-0.54
		N	8829 (P)	-0.61

表 4.5: continued

Date	$\alpha_{(TL)}$	Hemisphere	NOAA AR	$\alpha_{best}$
2000 Feb 26	0.10	S	8882 (N)	0.52
		N	8883 (P)	0.03
2000 Mar 09	1.09	S	8898 (P)	-0.09
		N	8904 (N)	-0.93
2000 Apr 20	-0.25	N	8963 (P)	-2.23
		S	8968 (N)	-0.83
2000 Jun 27	-0.40	N	9054 (P)	0.09
		S	9056 (N)	1.25
2000 Aug 29	-0.50	N	9140 (P)	-0.07
		S	9143 (N)	0.88
2000 Sep 05	0.20	N	9147 (P)	-0.85
		S	9154 (N)	0.59
2000 Sep 29	0.50	S	9173 (N)	1.01
		N	9172 (P)	0.16
2000 Nov 02	0.00	S	9214 (N)	0.58
		N	9213 (P)	0.02
2000 Dec 20	-0.50	N	9278 (P)	-0.62
		S	9279 (N)	-0.13

表 4.5: continued

Date	$\alpha$ (TL)	Hemisphere	NOAA AR	$\alpha_{best}$
2000 Dec 23	-0.50	S	9279 (P)	-0.91
		N	9280 (N)	-1.11
	-0.50	S	9279 (N)	-0.13
		N	9280 (P)	-0.96
2001 Jan 09	0.20	N	9296 (P)	-0.43
		S	9295 (N)	-0.61
2001 Feb 09	0.00	N	9335 (P)	-0.73
		S	9339 (N)	0.69
2001 Feb 26	1.29	N	9359 (P)	-0.13
		S	9360 (N)	1.25
2001 Mar 15	-0.50	S	9373 (N)	-0.13
		N	9384 (P)	-0.93

注意: $\alpha$ (TL)和 $\alpha_{best}$ 的单位是 $10^{-8}m^{-1}$ .

‘P’ 表示正的磁极性区, ‘N’ 代表负的磁极性区。

## 第五章 跨赤道环非势性与其连接活动区产生耀斑的关系

### 5.1 引言

软X射线图像显示的活动区尺度的形状像‘S’型的日冕环，一般称作Sigmoid结构。Canfield等（1999）发现有Sigmoid结构的日冕环更容易爆发太阳活动。

关于活动区日冕环的非势性，目前主要有两种计算方法。一种是Rust等人（1996）提出的，把‘S’型结构看作扭曲的通量管。从观测中可以测量通量管的最大半径 $R$ ，长度 $L$ ，扭曲量用 $L/2\pi R$ 来表示。在第二种模型是Pevtsov等人（1997）提出的，用简单双极黑子的线性无力场模型，来推断扭曲的值 $\alpha$ ，公式为 $\alpha = (\pi/L)\sin\gamma$ 。其中 $\gamma$ 为双极黑子中心连线与Sigmoid切线的夹角， $L$ 为两个足点间的距离。这两个模型如图5.1所示。

跨赤道环反映日冕中大尺度磁结构，可以用无力场外推来确定其非势性。Fárník（2001）等用无力场外推，计算了两个跨赤道环的非势参数。

耀斑是太阳上剧烈能量的爆发。目前按照GOES（Geostationary Operational Environmental Satellites）卫星上软X射线积分流量耀斑通常被分成四类，

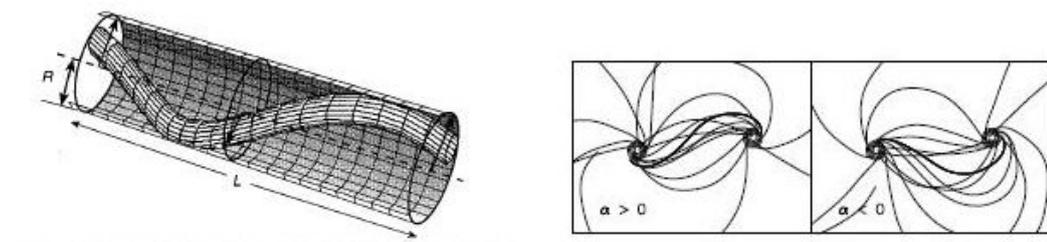


图 5.1: 左图: Rust等的模型。右图: Pevtsov等的模型。

表 5.1: X射线耀斑分类

Class	Peak ( $W/m^2$ ) between 1 and 8 Angstroms
B	$I < 10^{-6}$
C	$10^{-6} \leq I < 10^{-5}$
M	$10^{-5} \leq I < 10^{-4}$
X	$I \geq 10^{-4}$

分别为B、C、M和X级，所释放能量如表5.1所示。

在这一章中，基于 *Yohkoh* 软X射线数据库和GOES软X耀斑数据库的资料，研究了跨赤道环非势性和耀斑之间的关系。

## 5.2 资料分析

从Chen等（2006）找到的跨赤道环数据库中，选择连接两个活动区的跨赤道环共160个，计算这些跨赤道环的非势性。从GOES软X射线耀斑数据库中找到与这些活动区相关的耀斑。

### 5.2.1 跨赤道环非势性的计算方法

定义跨赤道环的非势性 ( $Tw$ ) 为跨赤道环的长度 ( $L$ ) 与足点的距离 ( $D$ ) 的比值，即

$$Tw = \frac{L}{D}. \quad (5.1)$$

跨赤道环投影到平面上展示的是二维结构，如图5.2，因此每一个跨赤道环可以得到两个  $Tw$  值。当计算这两个值时，选择跨赤道环的左右两个边缘来分别计算。对于每一个边缘计算  $Tw$  值时，我们在这个边缘上选取9个点。一般而言，跨赤道环为‘S’型，把其中的5个点标在5个拐点处，然后在每两点之间沿着跨赤

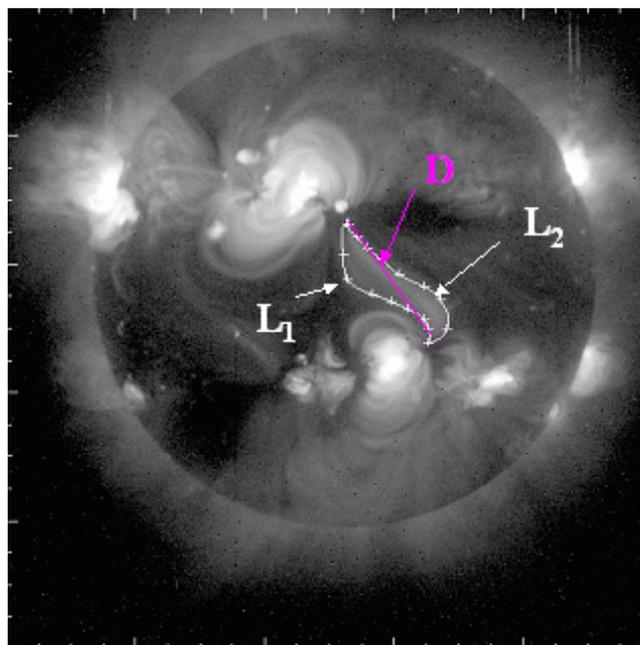


图 5.2: 跨赤道环非势性的计算。 $L_1$ ,  $L_2$ 为跨赤道环的两个长度,  $D$ 为跨赤道环足点的距离。

道环边缘点一个点。对于选取的这9个点, 做样条差分, 求得跨赤道环长度 ( $L$ )。在这9个点中, 首末两点间的距离为  $D$ 。对所得两个  $T_w$  值求平均, 即为这个跨赤道环的  $T_w$  值, 用公式表示为:

$$T_w = \frac{L_1 + L_2}{2D}. \quad (5.2)$$

### 5.2.2 跨赤道环非势性和其足点活动区爆发耀斑的关系

对于选出的160个跨赤道环, 计算了它们的  $T_w$  值。在这些跨赤道环连接的活动区中, 并不是一个活动区只被一个跨赤道环连接, 有的一个活动区被两个跨赤道环连接, 这些跨赤道环共连接282个活动区。对于跨赤道环连接的每一个活动区, 看对应的GOES软X射线耀斑数据库, 寻找在这个活动区存在期间爆发的耀斑类型和数量。

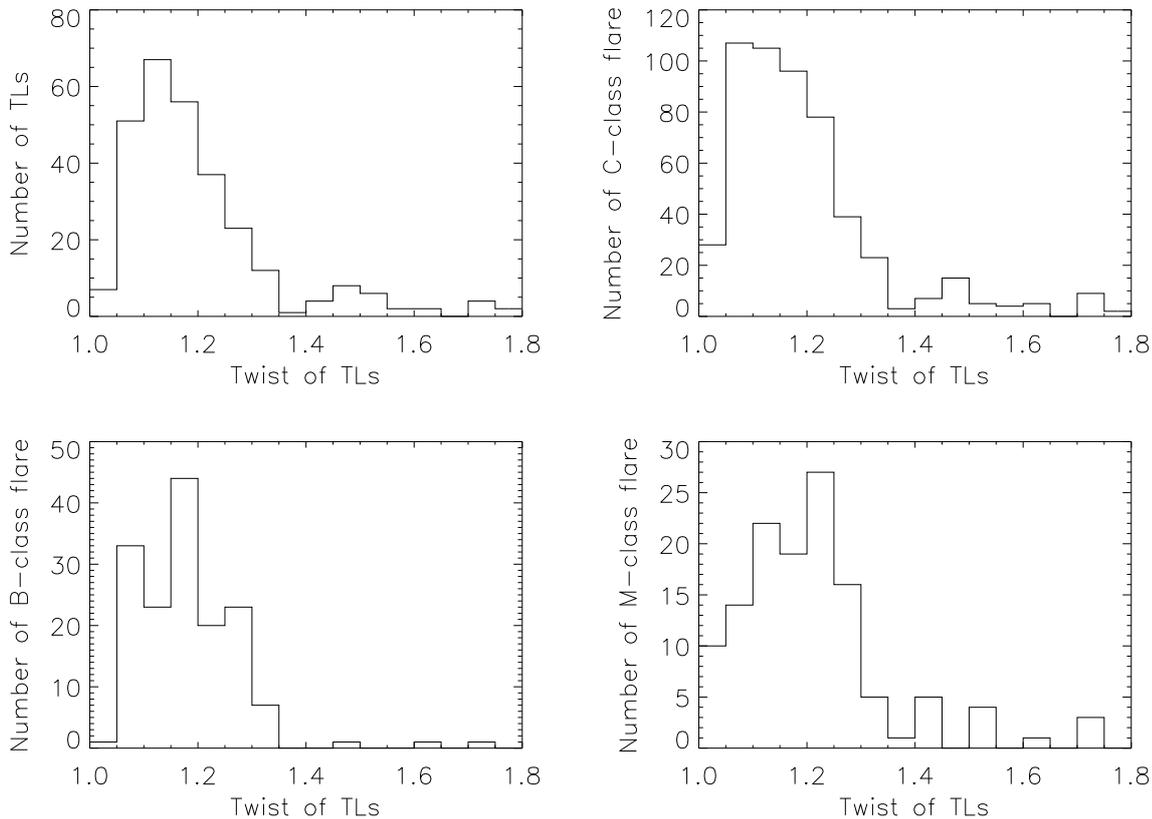


图 5.3: 跨赤道环非势性与产生耀斑的关系。左上: 跨赤道环在不同Tw值的分布。右上: 跨赤道环Tw值与B级耀斑的关系。左下: 跨赤道环Tw值与C级耀斑的关系。右下: 跨赤道环Tw值与M级耀斑的关系。

图5.3给出了跨赤道环非势性的分布以及跨赤道环非势性与足点活动区产生耀斑的关系。5.3左上图给出了跨赤道环非势性的分布。从图中可以看出跨赤道环的Tw值主要集中在1.05 和1.30之间, 其中Tw值在1.10到1.15之间的跨赤道环数最多。5.3左下, 右上, 右下图分别给出了B级, C级和M级耀斑的数目随着跨赤道环Tw值的分布。从图中我们可以看出耀斑数的分布趋势和跨赤道环Tw值的分布趋势基本是一致的, 这说明跨赤道环的Tw值与爆发的耀斑并没有明显的联系, 并不是跨赤道环扭曲值越大越容易爆发耀斑。

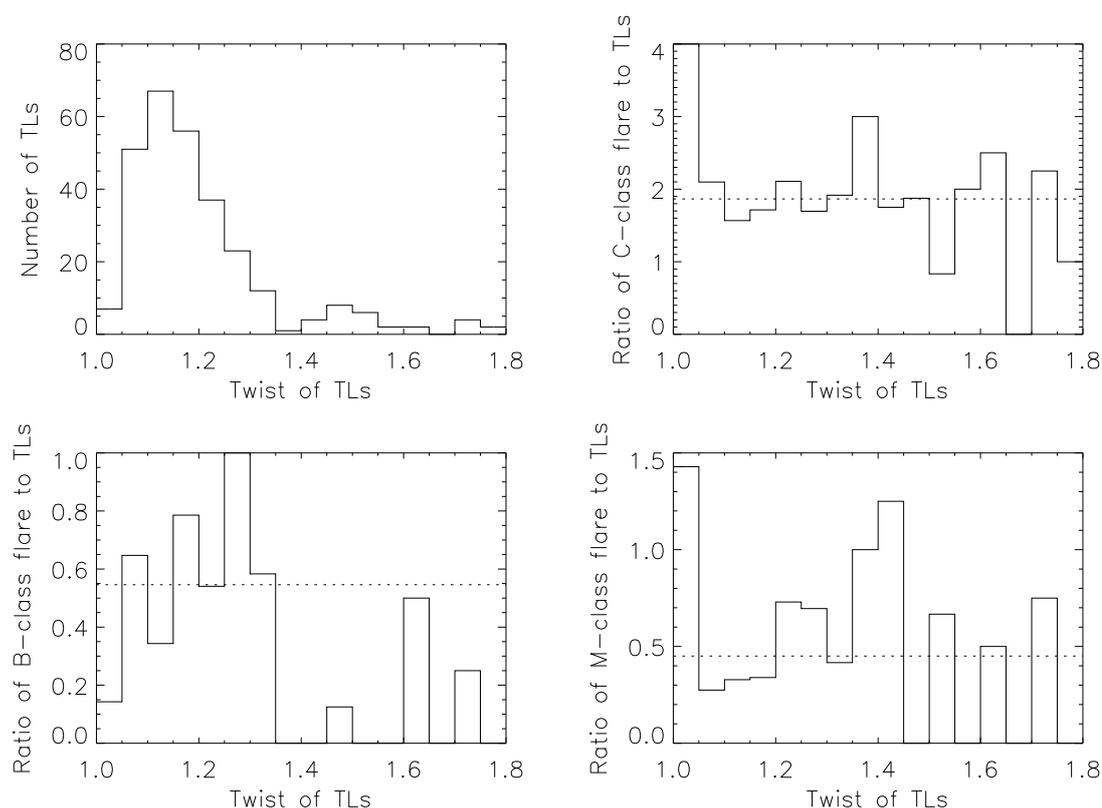


图 5.4: 跨赤道环非势性与产生耀斑的关系。左上: 跨赤道环在不同Tw值的分布。右上: 跨赤道环Tw值与B级耀斑的关系。左下: 跨赤道环Tw值与C级耀斑的关系。右下: 跨赤道环Tw值与M级耀斑的关系。

为了更好的研究跨赤道环非势性与活动区产生耀斑的关系, 将耀斑数相对于对跨赤道环数做了归一化, 如图5.4所示。5.4左下, 右上, 右下图分别对B级, C级和M级耀斑进行了归一化, 虚线是归一化后的平均值。从图中可以看出每个跨赤道环对应的B级和M级耀斑将近0.5个, 对应的C级耀斑将近两个, 还可以明确地看到跨赤道环的Tw值与其足点活动区产生的耀斑数无关。

### 5.3 结论和讨论

用了一种简单的方法计算跨赤道环的非势性，并对160个跨赤道环的Tw值作了计算，发现这些跨赤道环的Tw值主要集中在1.05到1.30之间。找到了跨赤道环连接活动区产生的耀斑数，分析了Tw值与耀斑数的关系，结果表明他们并没有明显的相关性。这个结果说明，跨赤道环与活动区中的日冕环不同：活动区中的日冕环如果有大的扭曲（显示为Sigmoid结构），容易产生太阳活动；跨赤道环的扭曲值和太阳耀斑的爆发没有明显的相关性。

## 第六章 结束语

虽然，目前一些人对跨赤道环作了研究，但是，还有一些问题并不太清楚，主要体现在以下几个方面。跨赤道环一般认为是由磁重联形成的，但是什么引起的磁重联，磁重联过程是如何形成跨赤道环的，跨赤道环的演化，消失与耀斑，日冕物质抛射之间的关系。跨赤道环的形成过程有哪几种磁重联形式需要系统的研究。Moon(2002)研究同调耀斑，发现跨赤道环比别的相互连接环更容易产生同调耀斑，但是我们并不知道是跨赤道环引起同调耀斑的发生，还是同调耀斑促使跨赤道环的形成。跨赤道环的密度、温度以及它们随着跨赤道环的演化的变化有待进一步研究。

本文基本上对于跨赤道环作了统计研究。但是对个例还没有分析，对于跨赤道环的演化过程，以及它们和太阳活动的关系，需要进一步分析。Hinode卫星的发射成功，带来了比Yohkoh更高空间分辨率的全日面软X射线像，对于研究跨赤道环的演化过程，提供了新的机遇。怀柔全日面矢量磁场的正式运行，可以分析大尺度环的矢量磁场演化过程，更有利于对跨赤道环的了解。这些仪器的成功，也有利于解决上面提到的问题。



## 参考文献

林元章, 太阳物理导论, 科学出版社, 2000.

章振大, 日冕物理, 科学出版社, 2000.

Abramenko, V., Wang, T., and Yurchishin, V.: 1996, *Solar Phys.* **168**, 75.

Acton, L., Tsuneta, S., Ogawara, Y., *et al.*: 1992, *Science* **258**, 618.

Ai, G., and Hu, Y.: 1986, *Acta Astron. Sinica* **27**, 173.

Ai, G., Li, W., and Zhang, H.: 1982, *Acta Astron. Sinica* **23**, 39.

Arnold, V.I, Khesin B A.: 1992, *Ann.Rev.Fluid Mech*, **24**, 145

Aschwanden, M.: 2006, *Physics of the Solar Corona*, Published in association with Praxis Publishing Chichester, UK, p. 1-36.

Aulanier, G. and Demoulin, P.: 1998a, *Astron. Astrophys.* **329**, 1125

Aulanier, G., Demoulin, P., Van Driel-Gesztelyi, L. Mein, P. and Deforest, C.: 1998b, *Astron. Astrophys.*, **335**, 309

Bao, S.D. and Zhang, H.: 1998, *Astrophys.J*, **496**, L43

Bao, S.D., Ai, G.X. and Zhang, H.Q.: 2000, *J Astrophys Astro*, **21**, 303

Berger, M.A.: 1984, *Geophys Fluid Dynamics*, **30**, 79

Berger, M.A., Field G B.: 1984, *J.Fluid Mech*, **147**, 133

- Berger, M.A.: 1999, *Magnetic Helicity in Space and Laboratory Plasmas*, *Geophys. Mon. Ser.* **111**, AGU, Washington, 1
- Berger, M.A., Ruznaikin, A.J.: 2000, *Geophys. Res.*, **105**, 10481
- Bray, R., and Loughhead, R.: 1979, *Sunspots*, Dover Publications Inc., New York, p. 226.
- Brosius, J.: 2006, *Astrophys. J.* **636**, 57.
- Calugareanu, C.: 1961, *Math J*, 1961, **11**, 588
- Canfield, R., Pevtsov, A., and McClymont, A.: 1996, in R.D. Bentley and J.T. Mariska (eds.), *Magnetic Reconnection in the Solar Atmosphere*, *ASP Conf. Ser.* **111**, 341.
- Chae, J.: 2001, *Astrophys. J.*, **560** L95
- Chase, R., Krieger, A., Švestka, Z., and Vaiana, G.: 1976, in *Space Research XVI*, Akademie-Verlag, Berlin, p. 917.
- Chen, J., Bao, S., and Zhang, H.: 2006, *Solar Phys.* **235**, 281.
- Chiu, Y., and Hilton, H.: 1977, *Astrophys. J.* **212**, 873.
- Davis, J.: 1983, *Sol. Phys.*, **88**, 337
- Delannée, C. and Aulanier, G.: 1999, *Solar Phys.*, **190**, 107
- Delannée, C.: 2000, *ApJ*, **545**, 512
- Demoulin, P., Mandrini, C.H., Van Driel-Gesztelyi, L., *et al.*: 2002, *Astron. Astrophys.*, **382**, 650

- Demoulin,P., Berger,M.A.: 2003, *Sol Phys*, **215**, 203
- Devore,C.R.: 2000, *Astrophys.J*, **539**, 944
- Ding,Y.J., Hong,Q.F. and Wang,H.Z.: 1987, *Sol Phys*, **107**, 221
- Dulk, G., and Mclean, D.: 1978, *SP*. **57**, 279.
- Elsasser,W. M.: 1956, *Rev.Mod.Phys.* **28**, 135
- Fárník, F., Karlicky, M., and Švestka, Z.: 1999, *Solar Phys.* **187**, 33.
- Fárník, F., Karlicky, M., and Švestka, Z.: 2001, *Solar Phys.* **202**, 81.
- Fleck, B., Domingo, V., and Poland, A. 1995, *Solar Phys.* **192**.
- Glover, A., Harra, L. K., Matthews, S. A. and Foley, C. A. 2003, *Astron. Astrophys.* **400**, 759.
- Golub, L., Krieger, A., *et al.*: 1974, *ApJ*, **189**, L93
- Golub,L., Harvey, K. L., *et al.*: 1989, *Sol. Phys.*, **124**, 211
- Guillermier, P., and Koutchmy, S. 1999, Total Eclipses. Science, Observations, Myths and Legends, Springer-Praxis Series in Astronomy, Springer-Verlag, Berlin and Paxis Publishing, Chichester, UK.
- Hagino, M., and Sakurai, T: 2004, *Publ. Astron. Soc. Japan* **56**, 831.
- Hagyard, M., and Pevtsov, A: 1999, *Solar Phys.* **189**, 25.
- Hale,G.E.: 1927, *Nature*, **119**, 708
- Handy, B., Acton, L., Kankelborg, C. *et al.*: 1999, *Solar Phys.* **187**, 229.

- Harra, L., Matthews, S., and van Driel-Gesztly, L.: 2003, *Astrophys. J.* **598**, L59.
- Harvey, K. L.: 1996, in *ASP Conf. Ser. 111, Magnetic Reconnection in the Solar Atmosphere*, ed. R. D. Bentley and J. T. Mariska (San Francisco: ASP), 9
- Hornig, G.: 1999, *Magnetic Helicity in Space and Laboratory Plasmas*, *Geophys. Mon. Ser. 111*, AGU, Washington, 157
- Hu, Y. Q., Xia, L. D., Li, X., Wang, J. and Ai, G.: 1997, *Sol Phys.* **170**, 283
- Hudson, H. S., Lemen, J. R., et al.: 1998, *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 2481
- Khan, J. and Hudson, H.: 2000, *Geophys. Res. Lett.* **27**, 1083.
- Kitchatinov, L. L.: 1993, in F. Krause, K. H. Rädler, and G. Rüdiger (eds.), *The Cosmic Dynamo*, *IAU Symp.* **157**, 13.
- Krieger, A., Vaiana, G., and van Speybroeck, L.: 1971, in *IAU Symp. 43: Solar Magnetic Fields*, ed. R. Howard, (Dordrecht: Reidel), 397
- Kusano, K., Suzuki, Y. and Nishikawa, K.: 1995, *Astrophys. J.* **441**, 942
- Landi Degl'Innocenti, E.: 1979, *Solar Phys.* **63**, 237.
- Lin, R. et al.: 1998, *SPIE* **3442**, 2.
- Longcope, D. W., Fisher, G. H. and Pevtsov, A. A.: 1998, *Astrophys. J.* **507**, 417
- Longcope, D. W., Kankelborg, C. C., et al.: 2001, *ApJ*, **553**, 429
- Makishima, K.: 1982, *Hinotori Symposium on Solar Flares*, Held in Tokyo, Japan, (ed, Y. Tanaka), ISAS, 120.

- Martin,S.F, Bilimoria,R. and Tracadas,P.W.: 1994, *Solar Surface Mganetism: Rutten R J. Schrijver C. J. (eds.) Printed in the Netherlands, Kluwer Academic Publishers*, 303
- Martin,S.F.: 1998, *ASP Conference Series, Vol. 150, IAU Colloquium 167*, **150**, 419
- Moffatt,H. K.: 1969, *J.Fluid Mech.*, **106**, 27
- Moon, Y. *et al.*: 2002, *Astrophys. J.* **574**, 434.
- Moon,Y., Chae,J., et al.: 2002a, *Astrophys.J*, **574**, 1066
- Nakakubo, K., Hara, H: 1999, *Adv. Space Res.*, **25(9)**, 1905
- November,L.G., Simon,G.W.: 1988, *Astrophys.J*, **333**, 427
- Obridko, V. N., Shelting, B. D.:2003, *Astronomy Rep.* **47**, 333.
- Pevtsov, A.: 2000, *Astrophys. J.* **531**, 553.
- Pevtsov, A.: 2004, in A.V. Stepanov, E.E. Benevolenskaya, and A.G. Kosovichev (eds.), *Multi-Wavelength Investigations of Solar Activity, IAU Symp.* **223**, 521.
- Pevtsov, A., Canfield, R., and Metcalf, T.: 1995, *Astrophys. J.* **440**, L109.
- Pevtsov, A., Dun, J., and Zhang, H.: 2006, *Solar Phys.* **234**, 203.
- Pevtsov,A.A., Canfield,R.C. and Latushko,S.M.: 2001, *Astrophys.J*, **549**, 261
- Pevtsov,A.A. and Latushko,S.M.: 2000, *Astrophys.J*, **528**, 999

- Pevtsov, A.A., Balasubramaniam, K.S., Rogers, J.W.: 2003, *Astrophys. J.*, **595**, 500
- Pevtsov, A.A., Canfield, R.C. and McClymont, A.N.: 1997, *Astrophys. J.*, **481**, 973
- Pevtsov, A.A., Canfield, R.C.: 1998, *Eos Trans. AGU*, **79(17)**, 273
- Smith, C.W.: 1999, *Magnetic Helicity in Space and Laboratory Plasmas*, *Geophys. Mon. Ser. 111*, AGU, Washington, 239
- Richardson, R.S.: 1941, *Astrophys. J.*, **93**, 24
- Rust, D., and Kumar, A.: 1996, *Astrophys. J.* **464**, L199.
- Sakurai, T.: 2001, in M. Sigwarth(ed.), *ASP Conf. Ser. 236, Advanced Solar Polarimetry - Theory, Observation, and Instrumentation*, p. 535.
- Sattarov, I., Pevtsov, A., et al.: 2002, *ApJ*, **564**, 1042
- Scherrer, P. H. et al.: 1995, *Solar Phys.* **162**, 129.
- Schrijver, C. J. : 2001, *SP*. **198**, 325.
- Seehafer, N.: 1990, *Solar Phys.* **125**, 219.
- Sterling, A. C., and Hudson, H. S.: 1997, *ApJ*, **491**, L55
- Su. J., and Zhang, H.: 2004, *Solar Phys.* **222**, 17.
- Švestka, Z., Krieger, A. S., Chase, R. C., and Howard, R.: 1977, *Solar Phys.* **52**, 69.
- Švestka, Z. and Howard, R.: 1981, *Solar Phys.* **71**, 349.

- Stenflo, J. O.: 1988, *Astrophys. Space Sci.* **144**, 321.
- Takakura, T., Kaufmann, P., Costa, J., *et al.*: 1983, *Nature* **302**, 317.
- Tsuneta, S., Acton, L., Bruner, M., Lemen, J., *et al.*: 1991, *Solar Phys.* **136**, 37.
- Tsuneta, S.: 1996, *Astrophys. J.* **456**, L63.
- Vaiana, G., Krieger, A., *et al.*: 1970, *Bull. American Phys. Soc.*, **15**,611
- Venkatakrishnan, P., Hagyard, M., and Hathaway, D: 1988, *Solar Phys.* **115**, 125.
- Wang, H., Chae, J., *et al.*: 2001, *ApJ*, **559**, 1171
- Wang,J.X.: 1996, *Sol Phys*, **163**, 319
- Wang, T., Ai, G., and Deng, Y: 1996, *Astrophysics Reports* **23**, 31.
- Wang, T., Xu, A., and Zhang, H: 1994, *Solar Phys.* **155**, 99.
- West, E., and Hagyard, M.: 1983, *Solar Phys.* **88**, 51.
- Woltjer,L.: 1958, *Proc.Natl Acad.Sci.USA*, **44**, 489
- Zhang, C., Wang, H., *et al.*: 2000, *Solar Phys.*, **195**, 135
- Zhang,H.: 2001a, *Monthly Notices of the RAS*, **326**, 57
- Zhang, M.: 2006, *Astrophys. J.* **646**, L85.
- Zirker, J. B. Martin, S. F. Harvey, K. and Gaizauskas, V.: 1997, *Sol Phys*, **175**, 27



## 发表文章目录

- [1] **Chen J**, Bao S and Zhang H, A Statistical Study of Transequatorial loops, 2006, Solar Physics, 235,281
- [2] **Chen J**, Bao S and Zhang H, Some Statistical Properties of Transequatorial Loops, 2007, Adv. Space Res. (in press)
- [3] **Chen J**, Bao S and Zhang H, Helicity Patterns of the Active Regions Connected by Transequatorial Loops, 2007, Solar Physics (Accepted)
- [4] **Chen J**, Bao S and Zhang H, Relationship Between Nonpotentiality of Transequatorial Loops and Eruption of Flare, 2007, (Preparation)
- [5] 陈洁, 包曙东, 张洪起, 磁螺度以及在太阳物理上的应用, 2006, 河北师大学报, 30, 423
- [6] **Chen J**, Bao S and Zhang H, The Magnetic Polarity of the Footpoints of Transequatorial Loops, 2006, Third French-Chinese Meeting on Solar Physics, 70
- [7] Zhang H, Bao X, Zhang Y, Liu J, Bao S, Deng Y, Li W, **Chen J**, et al. Three Super Active Regions in the Descending Phase of Solar Cycle 23, 2003, Chin. J. Astron. Astrophys., 3, 491



## 致 谢

在论文完成之际，衷心的感谢我的导师张洪起研究员。他带我走进了太阳物理研究领域，使我从一名学生变成了一位研究人员。在读研期间，学会了发现问题，解决问题的能力。他公正客观的为人，严谨的治学态度，深深的影响了我。他的勤奋，坚持和毅力，一直激励着我前进。

真诚的感谢我的导师包曙东研究员。我的研究生生涯中的成长和进步，其中的每一步都离不开包曙东老师的关心、帮助和鼓励。他在科研上给予了我很多帮助：教我学会如何做报告，如何写文章，怎样修改文章；告诉我以什么样的态度对待科研。而且在生活上给了我很多关心，教我如何去处理生活中遇到的问题和困难。

有幸在国家天文台怀柔基地学习，衷心的感谢怀柔基地的每一位老师、同学以及工作的每一位员工。感谢邓元勇研究员给我讲了一些做科研的方法和给予的一些帮助；感谢张枚研究员给了我 *Yohkoh* 卫星的一批数据；感谢汪国萍老师教我学会了如何观测太阳；感谢林钢华、胡柯良、王艺、王东光、林佳本、李威、李焕荣、张鼎波等怀柔工作人员和老师的帮助。同时感谢我的师兄、师姐、师弟、师妹们！感谢苏江涛对怀柔磁场数据处理的讨论，感谢刘继红教我如何处理第一张磁图，感谢包星明提供的一些建议，感谢张印的讨论，感谢高裕关于法拉第旋转的讨论。同时我也要感谢和他们的学术交流以及在生活上的给予的各种帮助。感谢郭娟、谢文彬、徐海清、张志勇、王晓帆、杨尚斌的讨论和帮助。感谢孙英姿，她使我的研究生生活丰富而精彩。

感谢汪景琇研究员的关心和鼓励，感谢颜毅华研究员，王华宁研究员和张军研究员的帮助。感谢 Pipin, V., 王海民, 李京, Schmieder, B., Nindos, A., 刘煜

的交流、讨论和建议。

感谢毛信杰老师，李宗伟老师，张军老师，张枚老师对本文认真评审并提出了宝贵意见。

感谢杜红荣老师，在我的研究生生涯中，无论是学习上还是生活上，都给予了悉心的关怀和帮助；感谢艾华老师的热心帮助。

感谢我的舍友：崔彦美、姜杰、王丹、刘国卿、刘玉娟，生活因为有了她们的陪伴而变得充实和快乐。

感谢我的父亲母亲！他们默默无闻的付出和关心，是我前进的动力！