

密级 _____



中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

博士学位论文

基于怀柔全日面单色像的太阳黑子高精度自动识别研究

作者姓名 _____ 赵翠

指导教师 _____ 邓元勇、林钢华 研究员

_____ 中国科学院国家天文台

学位类别 _____ 理学博士

学科专业 _____ 天文技术与方法

培养单位 _____ 中国科学院国家天文台

2016 年 5 月

Typeset by L^AT_EX 2_ε at May 30, 2016

With package C^ASthesis v0.2 of C^TE_X.ORG

Automatic Recognition of Sunspots in HSOS Full-Disk Solar Images

By

Cui Zhao

Directed by Prof. Yuan-Yong Deng and Gang-Hua Lin

A Dissertation Submitted to
University of Chinese Academy of Sciences
In partial fulfillment of the requirement
For the degree of
Doctor of Science

National Astronomical Observatories
Chinese Academy of Sciences

May, 2016

摘 要

太阳黑子是日面上最早被发现、最显著且具有强磁场的太阳现象之一，其观测和研究对于太阳活动和规律的研究具有重要的意义。近现代大型观测设备获取的海量、丰富、高分辨率的太阳黑子观测资料，为研究太阳黑子提供了新的契机。然而，早期手工识别太阳黑子的手段已经不可能满足这些数据处理的需求，因此急需自动的太阳黑子识别方法，能够高效、精确地提取这些数据中的太阳黑子，它是研究太阳黑子规律和机理的基础和前提。本文以怀柔太阳观测基地的全日面光球单色像为例，提出了一种新的太阳黑子高精度自动识别方法。算法采用数学形态学和OTSU算法进行设计，分为：①日面轮廓的自动提取；②日面上太阳黑子的自动识别两个步骤实现。结果显示本方法对太阳黑子的识别率达到了95%、错误率为1.2%，与NOAA/USAF日面黑子总面积的相关性达到95%。经过比对，这一结果优于其它太阳黑子识别方法，是一种高精度的自动化方法。该方法将用于处理目前海量、丰富的太阳黑子观测资料，为研究和应用提供准确、实时、丰富的数据资源。

关键词： 太阳黑子，自动，识别，图像处理

Abstract

Sunspots are one of the solar phenomena which are earliest to be found, most significantly and with strong magnetic field. Its observation and research are significant for solar activity and its rules. Large scale, abundant and high resolution sunspot observation data obtained by modern large-scale solar equipment have provided new opportunity for sunspot study. However, the early manually identification of the sunspot is impossible to meet the needs for these data processing, urgently needs a new sunspot identification method which is able to automatically and accurately extract these sunspots. The new method will be the foundation and prerequisite for studying sunspots rules and mechanism. This paper puts forward a new sunspot high precision automatic identification method based on full-disk photospheric monochrome image of the Huairou Solar Observing Station. It adopts mathematical morphology and OTSU algorithm and is divided into two steps: 1)extraction of solar limb; 2)recognition of sunspots. The results shows that the recognition rate of this method is 95%, the error rate is 1.2%, and the correlation between USAF/NOAA and HSOS sunspots areas is 95%. This result is much better compared with other sunspots identification methods, thus is high-precision. It will be used to deal with the massive and abundant observation data and provide accurate, real-time and abundant data resources for research and application.

Keywords: sunspot, automatic, recognition, image processing

目 录

摘要	i
Abstract	iii
目录	v
第一章 引言	1
1.1 太阳和太阳黑子	1
1.2 太阳黑子的研究与识别	2
1.3 本文的目的和意义	2
第二章 太阳黑子识别的国内外研究现状	7
2.1 手工识别太阳黑子时代	7
2.2 自动识别太阳黑子时代	10
2.3 其它太阳活动自动识别及预报技术	11
2.4 现有方法的局限	12
第三章 基础图像识别技术	15
3.1 阈值分割法	15
3.1.1 基于直方图的全局阈值法	15
3.1.2 OTSU算法	16
3.2 边缘检测法	17
3.2.1 基于一阶导数的Sobel算子	18
3.2.2 基于二阶导数的Laplace算子	19
3.3 数学形态学	20
3.3.1 结构元素	20
3.3.2 腐蚀运算	21

3.3.3	膨胀运算	22
3.3.4	开运算	22
3.3.5	闭运算	23
3.3.6	低帽变换	23
3.4	区域生长法	23
3.5	上述方法的比较及筛选	24
第四章	太阳黑子自动识别方法	27
4.1	基于数学形态学的日面轮廓自动提取	27
4.2	基于数学形态学的太阳黑子自动识别方法	28
4.3	识别结果	31
4.4	受噪声干扰图像的识别	31
4.5	尝试其它方法	31
4.5.1	全局阈值分割法	31
4.5.2	区域生长法	36
4.5.3	以上方法比对	36
第五章	精度与讨论	41
5.1	比对本算法与手工提取的日面黑子个数	41
5.2	比对本算法与USAF/NOAA提供的日面黑子总面积	44
5.3	特色与创新	47
第六章	总结与展望	53
6.1	本文工作总结	53
6.2	未来工作展望	54
附录 A	附录	57
A.1	基于数学形态学的日面轮廓自动提取程序	57
A.2	基于数学形态学的太阳黑子自动识别程序	59
参考文献		63

发表文章及其它科研成果目录	73
简历	75
致谢	77

表 格

1.1	怀柔全日面光球单色像参数	3
2.1	手工提取的黑子群5058的参数信息	9
2.2	黑子群5058中的每个太阳黑子的参数信息	9
3.1	(a)是水平梯度方向, 检测垂直边缘;(b)是垂直梯度方向, 检测水平边缘	18
3.2	(a)是水平的Roberts模板; (b)是竖直的Roberts模板	19
3.3	(a)是水平的Prewitt模板; (b)是竖直的Prewitt模板	19
3.4	Laplace模板	20
3.5	各种图像识别技术的比对	25
5.1	本算法自动提取的太阳黑子个数与手工提取的黑子个数比对结果 ..	42
5.2	接表5.1	43
5.3	本方法未识别的太阳黑子直径	45
5.4	本方法错误识别的太阳黑子直径	47
5.5	太阳黑子自动识别与人工方式进行比对的结果, 基于Meudon天文台的Ca II K1观测数据	48
5.6	Curto, et. 2008利用Ebro观测站数据计算的太阳黑子自动识别个数与SFC数据库提供的结果进行比对	49
5.7	各种太阳黑子自动识别方法的精度比对	50

插 图

1.1	怀柔基地口径10cm的全日面矢量磁场望远镜	4
1.2	怀柔全日面光球单色像	5
2.1	(a)全日面磁场数据;(b)全日面手描太阳黑子数据	8
2.2	黑子群5058	10
2.3	观测时间为2011-11-11 03:31:08的怀柔全日面光球单色像，受到 仪器噪声干扰	14
3.1	几个对称的结构元素示例	21
4.1	(a)预处理后的图像；(b)干净的日面；(c)对图像(b)的日面收 缩1个像素后的图像；(d)灰度图中的日面轮廓；(e)二值图中的日 面轮廓；(f)用红色标记的日面轮廓，叠加至图像(a)上	29
4.2	日面轮廓的自动提取算法流程图	30
4.3	(a)预处理后的图像；(b)一个干净的日面；(c)日面上的梯度信 息；(d)二值图，反映了太阳黑子的候选区域；(e)将识别后的太 阳黑子叠加至了图像(a)上	32
4.4	太阳黑子识别流程图	33
4.5	左侧是放大的局部原始图像，右侧是识别结果	34
4.6	(a)受到仪器噪声干扰的原始图像；(b)干净的日面，消除了太 阳黑子；(c)日面上的梯度信息；(d)二值图像，显示太阳黑子 候选区域；(e)红色代表太阳黑子，将识别结果叠加至了原始图 像上	35
4.7	(a)原始图像；(b)日面边缘外的区域被处理为白色；(c)利用全局 阈值对图像进行分割的结果，红色代表识别结果	38
4.8	区域生长法处理结果：(a)原始图像，(b)识别的太阳黑子	39

5.1	(a)NOAA/USAF提供的每日日面黑子总面积;(b)怀柔基地提供的每日日面黑子总面积	46
5.2	图5.1中两组数据的相关性	50
5.3	(a)Zharkov,et. 2005识别的日面太阳黑子总面积; (b)USAF/NOAA提供的日面太阳黑子总面积	51
5.4	(a)Curto,et al.(2008)识别的日面太阳黑子总面积; (b)USAF/NOAA提供的日面太阳黑子总面积	52

第一章 引言

1.1 太阳和太阳黑子

太阳是一颗典型的恒星，它的观测和研究对于了解广阔的恒星世界具有普遍意义。它是与人类关系最为密切的天体，维持着人类生存以及地球上一切生命活动所必需的适当环境。昼夜交替、四季变换、风云雨雪……无不与之息息相关 [11]。它与人类的生活和生产有着密不可分的联系，因此，人类自然产生了想要深入了解太阳的愿望。

人们在了解太阳的过程中，发现它存在着许多活动和现象，例如：剧烈的耀斑、持续的暗条、谱斑、还有醒目的太阳黑子等。这些现象中，太阳黑子最容易观测到，也是最早被人们发现的现象之一。我国史书上就有丰富的太阳黑子目视记录 [9]。《汉书》中记载，成帝河平元年三月乙未“日出黄，有黑气，大如钱，居日中央”，是全世界最早的黑子观测记录 [10]。自公元前43年至明末，从我国历史上整理出的太阳黑子记录多达100多条。从1610年开始人们用望远镜断断续续地观测太阳黑子，自1818年开始才有比较常规的每日黑子观测。太阳黑子反应了太阳的诸多特征。通过对太阳黑子的长期观测，人们发现太阳具有一些规律，比较典型的有：发现了太阳活动具有11年的周期性([47], [67])；太阳黑子的纬度分布随着时间呈现图蝴蝶图案。另外，人们也发现黑子具有一些相当独特的性质：太阳黑子倾向于成群出现；太阳黑子中也具有振动现象([20], [84])和Evershed效应[37]等。这些规律和发现都使得人们对太阳有了更加深入的了解和认识。

然而，至今人们并未完全了解太阳，对于它依然还有许多不清楚之处。剧烈的太阳活动会对地球和人类生活带来危害，如影响空间飞行安全、无线电通讯中断，但是人们还无法非常准确地预报太阳活动；太阳出现了异常低迷的24太阳活动周，目前的理论也未完全解释清楚其产生机制。这些问题依然困扰着人们，研究表明这些都与太阳黑子具有强烈的相关性([2], [18], [28], [33], [65], [66], [73])，对太阳黑子的研究将有望推动以上问题的解决，研究太阳黑子具有重要的科学意义和应用价值。

1.2 太阳黑子的研究与识别

迄今为止，人们对太阳黑子已经开展了诸多研究，大部分都是基于太阳黑子观测数据进行的。按照数据的观测视场可以将这些研究分为两类：

1) 基于太阳黑子局部数据开展的研究和发现，例如：上面提到的太阳黑子振动现象和Evershed效应等；

2) 基于太阳黑子全日面数据开展的研究和发现，例如：通过观测和统计全日面数据中的太阳黑子，发现了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）；长期的全日面太阳黑子观测资料是发电机理论得以推动的基础 [51]。全日面资料所提供的黑子群的面积、黑子的磁分类等参数作为预报因子在太阳活动预报的研究发挥了重要作用 ([1], [36], [43])。

我们发现，以上这些研究均离不开对太阳黑子轮廓的准确识别，它是这些研究的前提和基础。

在局部数据中，一般通过限定太阳黑子的磁场来提取太阳黑子，进而获取其几何和物理参数。对于局部数据而言，这种方法简单可行。然而，在全日面数据中则无法采用这种方法，这主要是由于：对于光球单色像或者白光数据而言，由于受到临边昏暗的影响，日面是非均匀的，采用单一的全局阈值法进行分割将无法准确识别太阳黑子（具体可见4.5.1节）。

早期主要基于手工目视的方式提取全日面数据中的太阳黑子，这种方式工作效率非常低下，随着大型仪器的出现，数据爆炸式增长，这种方式已经难以满足需求。大量太阳活动的研究需要长期、连续的全日面的太阳黑子几何和物理参数，因此，必须对太阳黑子进行自动识别。准确、高效地识别全日面观测数据中的太阳黑子成为研究其机理的基础和前提。

1.3 本文的目的和意义

怀柔太阳观测基地是中国科学院国家天文台天文观测与研究的重要基地之一，主要开展太阳磁场和速度场的观测与研究。基地装备了多台先进的太阳观测设备，其中2006年装备的全日面矢量磁场望远镜 [49]（图1.1），除了能获得全日面光球矢量磁场数据以外，还能够同时获取相应的全日面光球单色像（如

图1.2), 其基本信息如表1.1所示。这些数据为研究太阳黑子提供了长期、连续、稳定的观测资料。怀柔基地在地域和时段上均具有独特性, 使得这些资料能够与其它台站资料形成互补, 为太阳黑子的研究提供了更完备的资料。

表 1.1: 怀柔全日面光球单色像参数

物镜口径	10cm
图像大小	992*1004像素
波长	Fe5324Å
像元分辨率	2' × 2'
空间分辨率	大于5角秒
观测对象	太阳黑子
视场	全日面
观测模式	常规观测
采样频率	15分钟

如何精确高效地识别这些数据中的太阳黑子是开展太阳黑子研究的基础和前提。因此, 本文将研究一种基于怀柔全日面光球单色像的太阳黑子识别方法。以期利用该方法, 识别这些数据中的太阳黑子。并结合同步观测到的全日面矢量磁场信息, 提取太阳黑子的几何和物理/磁场参数, 建立怀柔太阳黑子属性数据库, 为有关科学研究和应用提供数据支持。

本文将安排如下: 在第二章, 将介绍太阳黑子识别方法的国内外研究现状; 第三章调研和介绍基础的图像识别技术; 第四章将研究和探索一种适合于怀柔全日面光球单色像的太阳黑子自动识别方法; 第五章, 将对该方法的精度进行检验以及讨论; 最后对本文进行总结和展望。

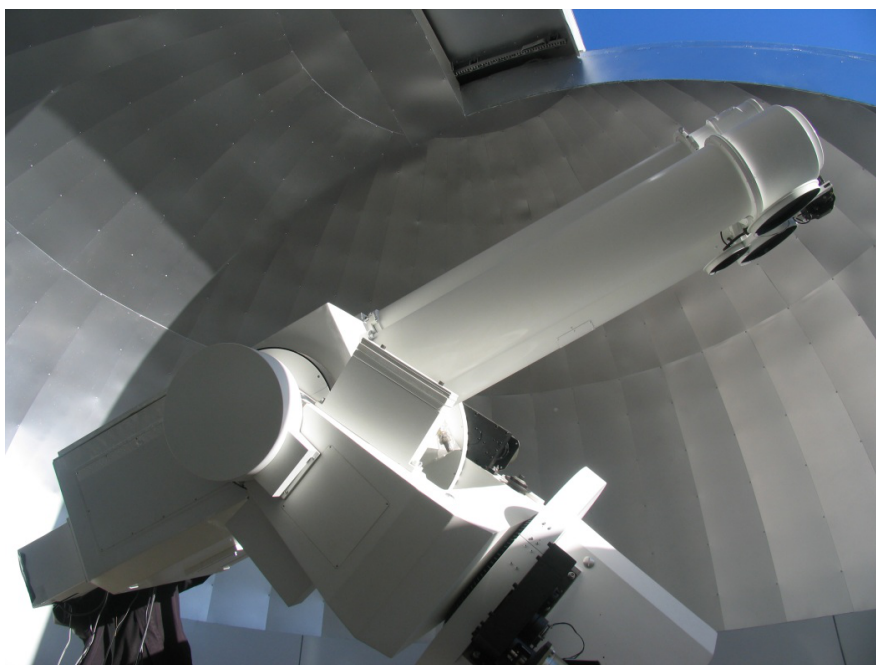


图 1.1: 怀柔基地口径10cm的全日面矢量磁场望远镜

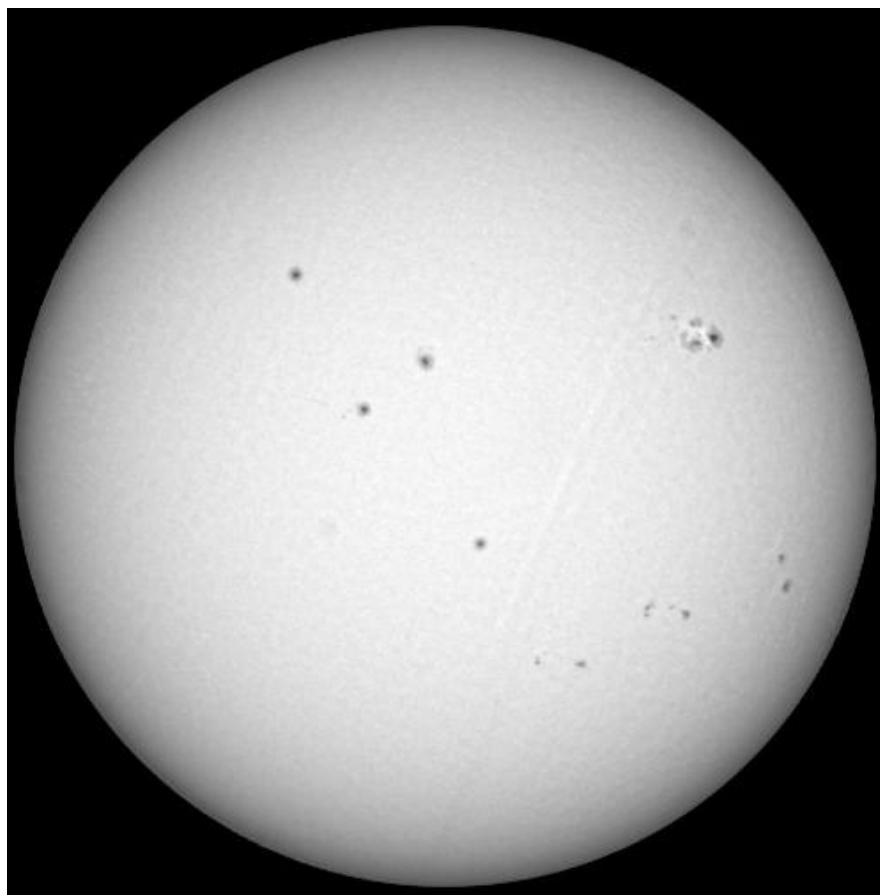


图 1.2: 怀柔全日面光球单色像

第二章 太阳黑子识别的国内外研究现状

自从人们开始观测太阳黑子，就已经尝试对其进行识别了。早期主要是基于手工方式进行识别，被称为手工识别时代。随着更多太阳观测设备投入使用，数据量激增，以及更多深入的科学研究需求，人们对识别太阳黑子的精度和效率两方面都提出了更高需求，新的计算机技术使得人们可以利用图像处理技术来满足这种需求，因此，这一阶段又被称为自动识别时代。

2.1 手工识别太阳黑子时代

早期由于各种条件的限制，人们主要通过手工的方式识别太阳黑子。典型的如：匈牙利的德布勒森太阳物理天文台（DEBRECEN HELIOPHYSICAL OBSERVATORY，简称DHO）记录和保存了从1872年至今的几乎所有的太阳黑子群和太阳黑子信息 [45]。在1872-1976年期间，他们主要基于手绘黑子图进行识别，进而统计太阳黑子的有关信息；后期则基于数字化的全日面太阳黑子图像进行识别和统计。下面随机选取了某日数据进行介绍。如图2.1所示，该台站首先根据全日面磁场数据对观测到的太阳黑子进行分群，以及对每个黑子群进行编号。

然后他们对每个黑子群和其内的太阳黑子进行了识别，进而统计其参数信息。例如黑子群5058（图2.2）的参数信息如表2.1所示。黑子群5058内所有太阳黑子的参数信息则如表2.2所示。

除了DHO天文台，法国的默东天文台（Meudon Observatory）、瑞士的洛迦诺太阳天文台（Locarno Solar Observatory）、美国的威尔逊山天文台（Mount Wilson Observatory）等台站也都基于手工识别太阳黑子。著名的SIDC数据中心（Solar Influences Data Center）使用这些台站提供的黑子相对数，重新计算得到一个新的黑子数 [50]（被称为国际相对黑子数或Zürich/Wolf黑子数），向全世界进行发布，这个数据是反映太阳活动水平的一个最基本指标，对太阳活动的研究发挥着重要作用。

这种手工识别太阳黑子的方式，为人类进行太阳黑子的研究提供了非常重要以及不可替代的作用。然而，随着数据量的爆炸式增长，这种方式已经越来越

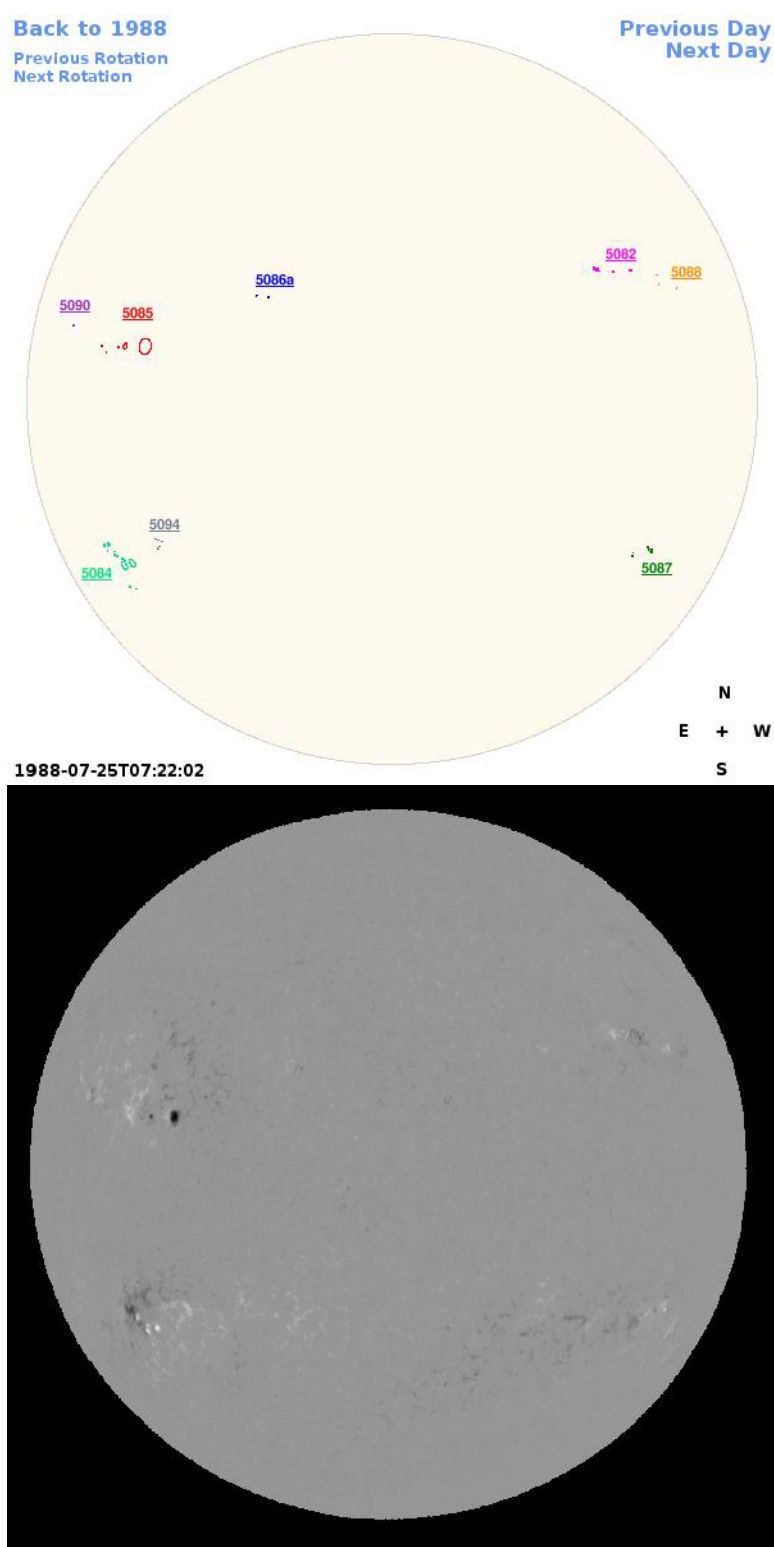


图 2.1: (a)全日面磁场数据;(b)全日面手描太阳黑子数据

表 2.1: 手工提取的黑子群5058的参数信息

黑子群编号	黑子本影投影改正面积（日面百万分之一）	黑子群投影改正面积（单位同左）	改正的本影面积（单位同左）	改正的黑子群面积（单位同左）	日面纬度	日面经度	距中央子午线经度距离	P角	距离日面中心的距离（日面半径为单位）
5058	74	407	51	283	12.06	10.41	-44.30	78.11	0.6999

表 2.2: 黑子群5058中的每个太阳黑子的参数信息

黑子编号	黑子本影投影改正面积（日面百万分之一）	黑子群投影改正面积（单位同左）	改正的本影面积（单位同左）	改正的黑子群面积（单位同左）	日面纬度	日面经度	距中央子午线经度距离	P角	距离日面中心的距离（日面半径为单位）
1	66	358	45	245	12.11	11.12	-43.59	77.98	0.6916
2	5	41	4	31	11.81	6.79	-47.92	78.85	0.7428
3	3	-2	2	-2	11.95	6.35	-48.37	78.69	0.7480
4	0	2	0	2	11.63	4.99	-49.72	79.22	0.7630
5	0	1	0	1	10.49	2.19	-52.52	80.83	0.7927
6	0	5	0	4	11.5	0.87	-53.84	79.60	0.8066

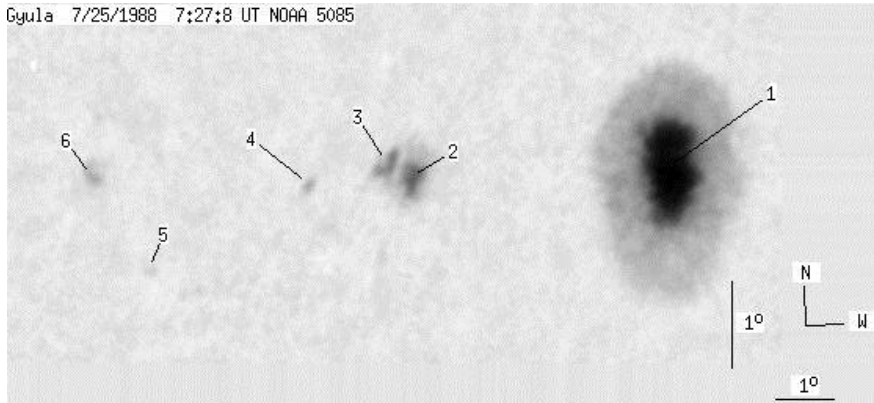


图 2.2: 黑子群5058

越无法满足需求，迫切需要自动识别太阳黑子的手段。

2.2 自动识别太阳黑子时代

近年来随着观测能力不断提升，高时空分辨率的大型太阳观测设备（例如：SDO、Hinode、TRACE、SOHO、NVST等）相继投入使用，每日都产生了海量的高质量、高精度的太阳黑子观测数据（例如：SDO每天都能够产生1.8T的观测数据），这些数据为深入分析和理解太阳规律提供了坚实的数据基础以及新的契机。然而传统的手工方式工作效率非常低下、且精度有限，已经不可能完成如此海量数据的需求，因此，迫切需求新的高效精确的太阳黑子识别手段。

近现代计算机和图像识别技术的发展使得人们能够自动、快速地识别太阳黑子，利用这些技术，已经提出了一些太阳黑子的自动识别方法，包括：边缘检测法、形态学识别法和小波分析识别法，下面分别介绍和讨论。

（1）太阳黑子边缘检测法利用太阳黑子与日面背景在图像上的灰度差异来实现检测，实际上就是检测日面上灰度发生变化的位置。例如Zharkov et al.(2005) [81]为了识别SOHO/MDI 白光数据中的太阳黑子，提出利用一阶微分边缘检测Sobel算子筛选出日面上太阳黑子的候选区域。该算子主要基于图像强度的一阶导数，然而导数的计算对噪声很敏感，噪声的存在可能会使检测到的边缘变宽或在某些点处发生间断，首先需要使用滤波器。因此，他们首先使用了Gaussian平滑来滤掉噪声。然后，他们进一步使用了一些太阳黑子几何参

数的限定条件对这些候选区域进行了筛选，去除不满足条件的区域。

这种方法基于图像强度的一阶导数进行实现，然而导数对噪声很敏感，会使得边缘发生断裂。虽然之前使用了滤波，但是滤波器在降低噪声的同时，也会引起边缘强度的损失，使得精度不会很高。Zharkov et al.(2005)中对SOHO/MDI白光数据中太阳黑子的识别率仅为84.3%，错误率为7.2%。

(2) 第二种方法是太阳黑子形态学识别方法，其原理是用具有一定形态的结构元素去度量和提取图像中的太阳黑子，其中结构元素是最重要的因素，相当于“滤波窗口”。这种方法的实质是要表达太阳黑子形态与结构元素之间的相互作用。这种方法较为抽象，需要结合具体操作才易理解。Curto et al.(2008) [32]利用这种方法从Ebro 观测站的白光图像中识别了太阳黑子。他们首先对图像进行了形态学闭运算，选取了合适的结构元素使太阳黑子轮廓变大，然后将这个结果与原始图像相减，得到日面的梯度信息，然后，通过一定限定条件来判断每个梯度围绕的区域是否为太阳黑子。Watson et al.(2009) [75]也采用了这种方法来识别太阳黑子。

形态学方法具有多种基本操作，包括：膨胀运算、腐蚀运算、开运算和闭运算。在以上方法中，如何结合这些操作以及如何选取结构元素是决定能否准确识别太阳黑子的关键。

(3) 太阳黑子小波分析识别法：小波分析法是图像处理中的一种经典、常用的方法，其基本原理是将图像中信号的小波变换系数集中在频率空间上的有限部分，利用信号和噪声小波系数幅值上的差异，通过选取一个合适的阈值，对小波系数进行处理，以达到去除噪声又保留有用信号的目的。Djafer et al.(2012) [35]采用此方法识别了Meudon天文台的Ca II K1 图像中的太阳黑子。在精度方面，这种方法的太阳黑子面积识别率达到了95%（与其它台站比较）；除此之外，它还比手工方式多识别到3.35%的太阳黑子，是一种较高精度的识别方法。

以上介绍了几种主要的太阳黑子识别方法，相比而言，目前小波分析识别法精度较高，能够满足研究的需求，是一种较好的太阳黑子识别方法。

2.3 其它太阳活动自动识别及预报技术

除了产生太阳黑子现象以外，日面上还经常爆发耀斑、暗条、日冕物质抛射等各种太阳活动，识别、跟踪以及预报这些活动对有关研究都具有重要作用

和意义。除了使用图像识别技术以外，其它计算机技术也会被使用，例如人工神经网络、支持向量机等人工智能技术被充分用于预报太阳耀斑。虽然不同太阳活动或现象的属性和特征不同，但我们认为了解各种太阳活动的识别、跟踪或预报技术，将会对研究太阳黑子的识别大有益处。

首先介绍暗条的识别，目前已经出现了多种算法。Gao, Wang and Zhou (2002) [42]采用了全局阈值法和区域生长法来探测暗条的演化和消失；Collin and Nesme-Ribes (1992) [31]也采用类似的方法进行暗条的跟踪，并以此来研究太阳表面的旋转；Shih and Kowalski (2003) [69]结合了全局阈值、局部阈值和数学形态学法来分割暗条；Zharkova and Schetinin (2005) [83]则采用了人工神经网络的方法来提取暗条。Qu et al. (2005) [63]提出了利用基于边缘探测的自适应阈值法来识别暗条。Bernasconi, Rust, and Hakim (2005) [23]利用归一化和全局阈值法进行暗条的分割。Yuan (2011) [78]采用了自适应阈值法和形态学法进行暗条识别。

对于日面物质抛射 (CMEs)，也出现了一些识别方法，包括：Qu et al.(2006) [64]利用数学形态学的方法进行了CMEs识别和分类。Olmedo et al.(2008) [58]基于先进分割技术进行CMEs 的探测。Zeng Zhao-xian(2012) [79]则基于频谱突变分析进行CMEs的识别。

对于耀斑预报，Borda et al. (2002) [26]采用了人工神经网络进行耀斑探测；Qu et al.(2003) [62]分别尝试采用了多层感知器、径向基函数以及支持向量机的方法进行耀斑的探测；Qu et al.(2004) [61]采用图像处理技术进行耀斑的跟踪；Bobra et al. (2014) [25]提出利用机器学习的方法进行耀斑的预报。

还有很多的识别技术在此并未一一列出([19], [21], [22], [24], [29], [30], [34], [38], [39], [40], [41], [44], [48], [52], [53], [54], [55], [56], [59], [60], [70], [71], [72], [76], [77], [80], [82])，由于相关技术太多，技术复杂，我们还需不断地学习和研究，以上只进行了部分调研工作。

可以看到，目前计算机技术已经大量应用到太阳活动和现象的识别、探测、跟踪和预报中，这些自动化技术正为太阳物理的研究起到良好的推动作用。

2.4 现有方法的局限

那么上述的几种太阳黑子识别方法能否用来识别怀柔全日面单色像的太阳

黑子呢？

通过分析与测试，我们发现以上方法均无法较好的满足怀柔数据的需求，这主要是由于：

1) 由于每日都有常规观测，且采样频率较高，怀柔数据量越来越多，手工方式显然不能满足需求。

2) 现有的几种自动化方法都是基于高分辨率的全日面数据进行处理，这些图像中太阳黑子轮廓清晰；然而怀柔全日面单色像在观测和采集时受到大气干扰和有限的仪器口径使得这些数据的分辨率不足，太阳黑子轮廓较为模糊，对识别算法的精度提出了更高要求，现有算法难以满足需求。

3) 怀柔部分时间段的数据受到了仪器噪声干扰（如图2.3），由于仪器噪声与太阳黑子的强度接近，会对太阳黑子的识别造成干扰。

4) 目前的自动化方法在识别中将太阳黑子的本影和半影进行了分离；然而，怀柔全日面单色像受分辨率影响，许多小黑子的本影和半影无法分离。

由于怀柔全日面光球单色像的特殊性，使得现有方法无法准确识别这些数据中的太阳黑子，因此，有必要研究一种适合于怀柔全日面光球单色像的太阳黑子自动识别方法。

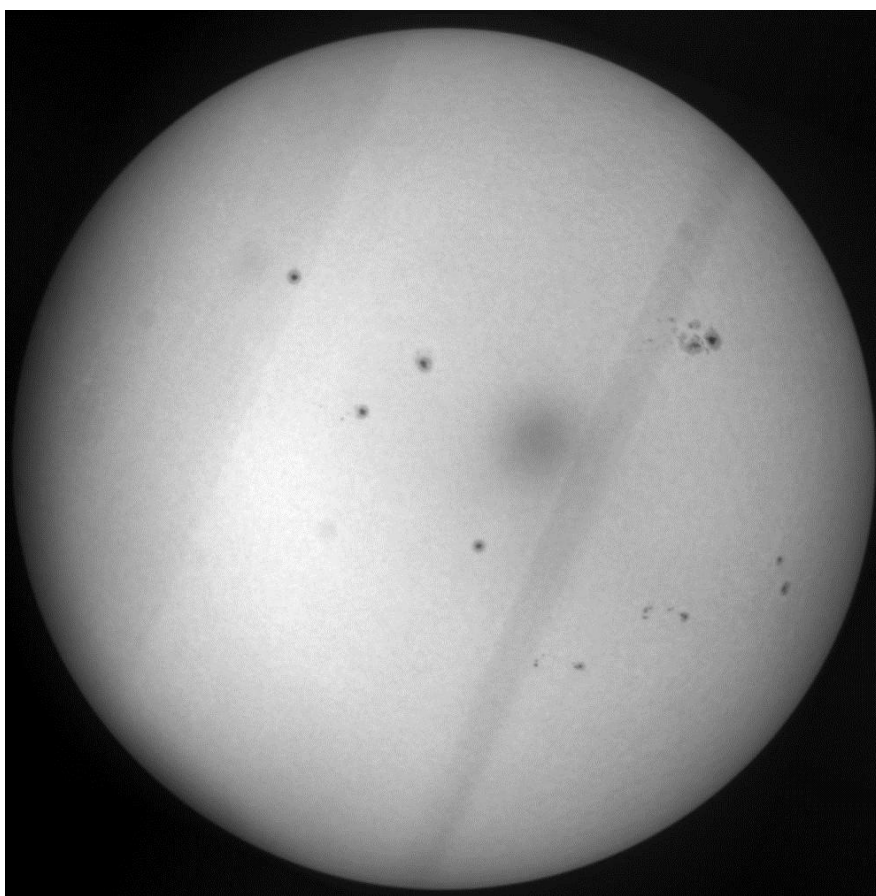


图 2.3: 观测时间为2011-11-11 03:31:08的怀柔全日面光球单色像，受到仪器噪声干扰

第三章 基础图像识别技术

为了研究出一种适应于怀柔全日面光球单色像的太阳黑子自动识别方法，我们对图像处理技术中的各种识别方法进行了较为全面地调研和分析，由于篇幅有限，我们归纳和选取了几种主要的方法，对它们分别进行介绍。

3.1 阈值分割法

阈值分割法([15], [68])是一种最直观和易于实现的图像识别方法，该方法在图像的识别和分割中处于中心地位。其基本思想是确定一个阈值，然后把每个像素点的灰度值与阈值相比较，根据比较的结果把该像素划分为两类——前景（或者对象）或者背景。一般来说，阈值分割可以分为以下3步。

- (1) 确定阈值。
- (2) 将阈值和像素比较。
- (3) 将像素归类。

其中第（1）步阈值的确定是最重要的。阈值的选择将直接影响分割的准确性以及由此产生的图像描述、分析的正确性。

由于需求不同，产生了几种不同的阈值确定方法，包括：实验法、基于直方图的阈值法、迭代选择阈值法、最小均方误差法以及最大类间方差法（OTSU）等。由于篇幅有限，我们选取其中最典型的基于直方图的阈值法和最灵活的最大类间方差法（OTSU）两种方法分别进行介绍。

3.1.1 基于直方图的全局阈值法

对一幅图像从上之下，从左至右扫描每个像素值，在每个灰度值上计算像素数目，以这些数据为基础就完成了图像直方图的绘制。它显示了不同的像素值在不同的强度值上的出现频率。基于直方图的全局阈值法是通过视觉检测选取直方图的波谷作为阈值将目标和背景进行分割，以达到识别目标的目的 [12]。除了视觉检测，以下算法还可以自动地得到阈值T：

1. 选择一个T的初始估计值。

2. 用T分割图像。这样做会生成两组像素： G_1 由所有灰度值大于T的像素组成， G_2 由所有灰度值小于或等于T的像素组成。
3. 对区域 G_1 和 G_2 中的所有像素计算平均灰度值 μ_1 和 μ_2 。
4. 计算新的门限值：

$$T = \frac{1}{2} \times (\mu_1 + \mu_2)$$

5. 重复步骤2到4，直到逐次迭代所得的T值之差小于事先定义的参数 T_0 。

基于直方图的阈值法是阈值分割法中最基础的方法，这种方法简单易操作，对于背景均匀、对象和背景强度差异明显的图像分割效果较好。

3.1.2 OTSU算法

OTSU算法([8], [57])是一种自适应的阈值确定的方法，也称为最大类间差法。它是按图像的灰度特性，将图像分成背景和前景两部分。顾名思义，该方法认为背景和前景之间的类间方差越大，说明构成图像的两部分的差别越大，当部分前景错分为背景或反之时都会导致两部分差别变小。使用该方法意味着错分概率最小。该方法的原理如下：

假设我们通过阈值T把一幅灰度图像 $I(x, y)$ 的像素分为两类:对象和背景。对象和背景的像素数目分别为 N_1 和 N_2 ，图像尺寸为 $M \times N$ ，则显而易见：

$$N_1 + N_2 = M \times N \quad (1)$$

假设对象像素所占的比例为 ω_1 ，背景像素所占的比例为 ω_2 ，则：

$$\omega_1 = \frac{N_1}{M \times N} \quad (2)$$

$$\omega_2 = \frac{N_2}{M \times N} \quad (3)$$

$$\omega_1 + \omega_2 = 1 \quad (4)$$

假设对象和背景的平均灰度值分别为 μ_1 、 μ_2 ，图像的平均灰度值为 μ ，则：

$$\mu = \mu_1 \times \omega_1 + \mu_2 \times \omega_2 \quad (5)$$

g 代表了对象和背景的差异，则可以定义其为：

$$g = \omega_1 \times (\mu - \mu_1)^2 + \omega_2 \times (\mu - \mu_2)^2 \quad (6)$$

如果把公式(5)带入公式(6)，则可得到：

$$g = \omega_1 \times \omega_2 \times (\mu_1 - \mu_2)^2 \quad (7)$$

将阈值 T 进行迭代，使得 g 最大的值为所求的结果。

OTSU算法对噪音和目标大小十分敏感，它仅对类间方差为单峰的图像产生较好的分割效果。当目标与背景的大小比例悬殊时，类间方差准则函数可能呈现双峰或多峰，此时效果不好，但是类间方差法是用时最少的。

3.2 边缘检测法

图像的边缘是图像的最基本特征。所谓边缘是指其周围像素灰度有阶跃变化或屋顶变化的那些像素的集合。边缘蕴含了丰富的内在信息（如方向、阶跃性质、形状等），能勾画出目标物体，使观察者一目了然，是人们对图像最感兴趣的特征之一。从本质上来说，边缘是图像局部特性不连续性（灰度突变、颜色突变等）的反映，它标志着一个区域的终结和另一个区域的开始。边缘特性是沿边缘走向的像素变化平缓，而垂直于边缘方向的像素变化剧烈。所以，从这个意义上来说，提取边缘的算法就是要找出符合边缘特性的像素的微分算子。边缘检测算子是利用图像边缘的突变性质来检测边缘的。可以分为两种：一种是以一阶导数为基础的边缘检测算子，通过计算图像的梯度值来检测图像边缘，如：Roberts算子、sobel算子、Prewitt算子；一种是以二阶导数为基础的边缘检测算子，通过寻求二阶导数中的过零点来检测边缘，如：Laplace算子、LOG算子、Canny算子。

Sobel算子和Laplace算子就是最经典的两种。Sobel算子是边缘检测器中最常用的算子之一，Laplace算子是常用的二阶导数算子。下面我们以这两种为例分别进行介绍。

3.2.1 基于一阶导数的Sobel算子

Sobel算子 [14]的边缘检测，是在图像空间利用两个方向模板与图像进行邻域卷积来完成的。这两个方向模板一个检测水平边缘，一个检测垂直边缘，如表3.1所示。模板内的数字为模板系数，梯度方向与边缘方向总是正交垂直。

表 3.1: (a)是水平梯度方向，检测垂直边缘;(b)是垂直梯度方向，检测水平边缘

(a)			(b)		
-1	0	-1	1	2	1
-2	0	2	0	0	0
-1	0	1	-1	-2	-1

该算法的基本原理：由于图像边缘附近的亮度变化较大，所以可以把那些在邻域内，灰度变化超过某个适当阈值的像素点当作边缘点。

算法的主要步骤：

- 1.分别将两个方向模板沿着图像从一个像素移动到另一个像素，并将模板的中心像素与图像中的某个像素位置重合；
- 2.将模板内的系数与其对应的图像像素值相乘；
- 3.将所有乘积相加；
- 4.将两个卷积的最大值，赋给图像中对应模板中心位置的像素，作为该像素的新灰度值；
- 5.取适当的阈值TH，若像素新灰度值大于TH，则判该像素点为边缘点。

从上述可知，Sobel算法的优点是计算简单，速度快。但由于只采用了两个方向模板，只能检测水平和垂直方向的边缘，因此，这种算法对于纹理较复杂的图像，其边缘检测效果欠佳；同时，经典Sobel算法认为，凡灰度新值大于或等于阈值的像素点都是边缘点。这种判定依据是欠合理的，会造成边缘点的误判，因为许多噪声点的灰度新值也很大。

其它几种常用梯度算子的模板如下所示，其原理与Sobel算子类似，在这里不展开介绍，仅供参考。

1) Roberts算子

Roberts算子 [4]是一种利用局部差分算子寻找边缘的算子，他采用对角线

方向相邻两像素之差近似梯度幅值检测边缘。其模板如表3.2。检测垂直边缘的效果好于斜向边缘，定位精度高，对噪声敏感,无法抑制噪声的影响。

表 3.2: (a)是水平的Roberts模板; (b)是竖直的Roberts模板

(a)		(b)	
0	-1	-1	0
1	0	0	1

2) Prewitt算子

Prewitt算子 [6]是一种一阶微分算子的边缘检测，利用像素点上下、左右邻点的灰度差，在边缘处达到极值检测边缘，去掉部分伪边缘，对噪声具有平滑作用。其原理是在图像空间利用两个方向模板与图像进行邻域卷积来完成的，其模板如表3.3，这两个方向模板一个检测水平边缘，一个检测垂直边缘。

经典Prewitt算子认为：凡灰度新值大于或等于阈值的像素点都是边缘点。即选择适当的阈值 T ，若 $P(i, j) \gg T$ ，则 (i, j) 为边缘点， $P(i, j)$ 为边缘图像。这种判定是欠合理的，会造成边缘点的误判，因为许多噪声点的灰度值也很大，而且对于幅值较小的边缘点，其边缘反而丢失了。

表 3.3: (a)是水平的Prewitt模板; (b)是竖直的Prewitt模板

(a)			(b)		
-1	0	1	-1	-1	-1
-1	0	1	0	0	0
-1	0	1	1	1	1

3.2.2 基于二阶导数的Laplace算子

Laplace算子 ([7], [27])是一种各向同性算子，二阶微分算子，在只关心边缘的位置而不考虑其周围的像素灰度差值时比较合适。Laplace算子对孤立像素的响应要比对边缘或线的响应要更强烈，因此只适用于无噪声图像。拉普拉斯算子也是最简单的各向同性微分算子，具有旋转不变性。一个二维图像函数的拉普拉斯变换是各向同性的二阶导数，定义

$$\begin{aligned}
\nabla^2 f(x, y) &= [f(x+1, y) - f(x, y)] - [f(x, y) - f(x-1, y)] + [f(x, y+1) - f(x, y)] \\
&\quad - [f(x, y) - f(x, y-1)] \\
&= f(x+1, y) + f(x-1, y) + f(x, y+1) + f(x, y-1) - 4f(x, y)
\end{aligned}$$

另外, Laplace算子还可以表示成模板的形式, 如表3.4所示:

表 3.4: Laplace模板

0	1	0
1	-4	1
0	1	0

Laplace算子一般不以其原始形式用于边缘检测, 因为其作为一个二阶导数, 它对噪声具有无法接受的敏感性; 同时其幅值产生双边缘, 这是复杂的分割不希望有的结果; 最后Laplace算子不能检测边缘的方向。所以Laplace算子在分割中所起的作用仅仅包括: (1) 利用它的零交叉性质进行边缘定位; (2) 确定一个像素是在一条边缘暗的一面还是亮的一面。

3.3 数学形态学

数学形态学是分析几何形状和结构的数学方法, 是建立在集合代数基础上, 用集合论方法定量描述几何结构的科学。它是一组形态学的代数运算符组成, 用这些算子及其组合进行图像形状和结构的分析处理包括图像分割与识别、边缘检测、特征抽取等方面的工作([3], [5], [17])。

数学形态学是用具有一定形态的结构元素去度量和提取图像中的对应形状, 以达到对图像分析和识别的目的 [46]。其数学基础和所用语言是集合论。基本运算有4个: 膨胀、腐蚀、开操作和闭操作, 下面分别进行介绍。

3.3.1 结构元素

结构元素是数学形态学中的一个最重要也是最基本的概念。

在考察分析图像时，要设计一种收集图像信息的探针，称为结构元素B。它是n维欧氏空间 E^n 或其子空间 $E^m(m < n)$ 中的一个集合，具有一定的几何形状，如圆形、正方形、十字形、有向线段等的集合。观察者在图像中不断移动结构元素便可以考察图像各部分之间的关系，从而提取有用特征进行分析和描述。结构元素在形态学运算中的作用类似于在信号处理时的“滤波窗口”或参考模板。对于每一个结构元素，我们指定一个参考点，该点可以包含在结构元素中，也可以不包含在结构元素中，但运算结构会有所不同 [13]。

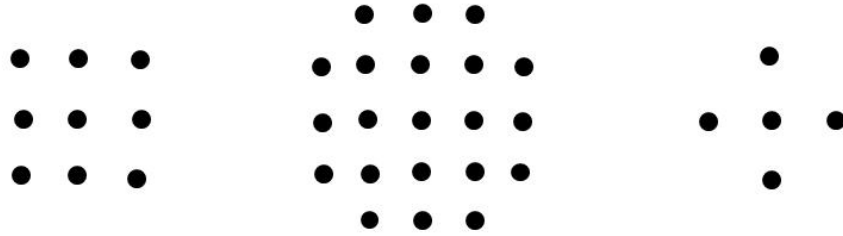


图 3.1: 几个对称的结构元素示例

结构元素的选取直接影响形态运算的效果，因此，要根据具体情况来确定。一般情况下，结构元素的选取必须考虑以下两个原则：

1. 结构元素必须在几何上比原图像简单，且有界。其尺寸相对地要小于所考察的物体，当选择性质相同或相似的结构元素时，以选取图像某些特征的极限情况为宜。
2. 结构元素的形状最好具有某种凸性，如圆形、十字形、方形等。对非凸性子集，由于连接两点的线段大部分位于集合的外面，故用非凸性子集作为结构元素将得不到更多的有用信息。

图3.1给出了一些对称的结构元素。

3.3.2 腐蚀运算

灰度图像 $f(x, y)$ 被结构元素B所腐蚀的数学运算定义为：

$$g(x, y) = f \ominus B = \min\{f(x+x', y+y') - B(x', y') | (x+x'), (y+y') \in D_f; (x', y') \in D_b\}$$

其中， $g(x, y)$ 为腐蚀后的灰度图像， D_f 和 D_b 分别是 f 和 B 的定义域。

用自然语言描述即：

腐蚀运算就是计算该点局部范围内各点与结构元素中对应点的灰度值之差，并选取其中的最小值作为该点的腐蚀结果。经过腐蚀运算后，图像边缘部分具有较大灰度值的点的灰度会降低，得到边缘看起来向灰度值高的区域内部收缩。所以认为‘腐蚀’包含目标轮廓‘缩小’的意思。

3.3.3 膨胀运算

灰度图像 $f(x, y)$ 被结构元素 B 所膨胀的数学运算定义为：

$$g(x, y) = f \oplus B = \min\{f(x+x', y+y') + B(x', y') | (x+x'), (y+y') \in D_f; (x', y') \in D_b\}$$

其中， $g(x, y)$ 为腐蚀后的灰度图像， D_f 和 D_b 分别是 f 和 B 的定义域。

用自然语言描述即：

膨胀运算的计算是逐点进行的，求某点的膨胀运算结果，也就是计算该点局部范围内各点与结构元素中对应点的灰度值之和，并选取其中的最大值作为该点的膨胀结果。经过腐蚀运算后，图像边缘部分具有较小灰度值的点的灰度会升高，得到边缘看起来向灰度值低的区域内部扩张。所以认为‘膨胀’包含目标轮廓‘扩大’的意思。

3.3.4 开运算

先腐蚀后膨胀的过程称为开运算，其数学公式定义为：

$$g = f \circ B = (f \ominus B) \oplus B$$

其中， g 为腐蚀后的灰度图像， f 为原灰度图像， B 为结构元素。

在实际应用中，开运算经常用于去除较小（相对于结构元素的大小而言）的明亮细节，同时，相对地保持整体的灰度级和较大的明亮区域不变。先进行腐蚀运算可以除去小的图像细节，但这样做会使得图像变暗。接下来进行膨胀运算又会增强图像的整体亮度，但不会将腐蚀运算除去的部分重新引入图像中。

3.3.5 闭运算

先膨胀后腐蚀的过程称为闭运算，其数学公式定义为：

$$g = f \bullet B = (f \oplus B) \ominus B$$

其中，g为腐蚀后的灰度图像，f为原灰度图像，B为结构元素。

实际上，闭运算经常用于除去图像中的暗细节部分，而相对地保持明亮部分不受影响。先通过膨胀除去图像中的暗细节，同时增加图像的亮度，接下来对暗图像进行腐蚀，而不会将膨胀操作除去的部分重新引入图像中。

3.3.6 低帽变换

低帽变换定义是原始图像减去其闭运算后的图像，其数学公式定义为：

$$g = f - (f \oplus B) \ominus B$$

其中，g为腐蚀后的灰度图像，f为原灰度图像，B为结构元素。

它是一种非均匀光照问题的解决方案。非常适合提取背景不均的图像上目标物轮廓的提取。

3.4 区域生长法

区域生长是将具有相似性质的像素集合起来构成区域。具体先对每个需要分割的区域找一个种子像素作为生长的起点，然后将像素周围领域中与种子像素具有相同或相似性质的像素（根据某种事先确定的生长或相似性准则来判定）合并到种子像素所在的区域中。将这些新像素当做新的种子像素继续进行上面的过程，直到没有满足条件的像素可以被包括进来，这样，一个区域就长成了 [16]。

区域生长的好坏取决于：1.初始点（种子点）的选取；2.生长准则；3.终止条件。对于需要分割的图像，区域生长的三个法则是：1、选取图像中的一点为种子点（种子点的选取需要具体情况具体分析）。2、在种子点处进行8邻域或4邻域扩展，判定准则是：如果考虑的像素与种子像素灰度值差的绝对值小于某个门限T，则将该像素包括进种子像素所在的区域。3、当不再有像素满足加入这个区域的准则时，区域生长停止。

区域生长实现的步骤如下:

- 1) 对图像顺序扫描, 找到第一个还没有归属的像素, 设该像素为 (x_0, y_0) ;
- 2) 以 (x_0, y_0) 为中心, 考虑 (x_0, y_0) 的8邻域像素 (x, y) , 如果 (x, y) 满足生长准则, 将 (x, y) 与 (x_0, y_0) 合并在同一区域内, 同时将 (x, y) 压入堆栈;
- 3) 从堆栈中取出一个像素, 把它当作 (x_0, y_0) 返回步骤2;
- 4) 当堆栈为空时, 返回到步骤1;
- 5) 重复步骤1-4直到图像中的每个点都有归属时, 生长结束。

区域生长法通常能够将具有相同特征的联通区域识别出来, 提供很好的边界信息和分割结果, 这种方法思想很简单, 只需要若干种子点即可完成。但是这种方法当噪声和灰度不均时可能导致过分割, 而不能得到较好的结果。且基于迭代完成, 计算代价大, 在实际中最严重的问题就是效率低下。

3.5 上述方法的比较及筛选

上述方法各有其特点, 我们用表3.5对它们的特点进行了归纳。在使用中, 应该结合具体的应用需求进行选择或组合。

为了选取合适的太阳黑子识别方法, 我们对怀柔全日面光球单色像的图像特征进行了分析, 发现其具有以下特点: 1) 由于受到临边昏暗的影响, 图像背景是非均匀的, 这使得基于直方图的全局阈值法难以适应; 2) 日面上除了太阳黑子具有较低的灰度, 还存在仪器噪声, 边缘检测法中的sobel算子和Laplacian算子难以将其它进行分离; 3) 由于怀柔全日面光球单色像数据量大, 对算法的计算速度也有一定需求, 效率低下的区域生长法也不是最合适的方法。

由于数学形态学对背景不均匀的图像具有较好的识别效果, 因此, 我们将主要使用这种方法进行太阳黑子的识别。在接下来的一章中, 我们将具体展开介绍。

表 3.5: 各种图像识别技术的比对

图像识别方法	优点	缺点
基于直方图的全局阈值法	简单、易实现	无法识别复杂、对象和背景差异的图像
OTSU算法	对类间方差为单峰的图像产生较好的分割效果；用时最少	对噪音十分敏感，当目标与背景的大小比例悬殊时，类间方差准则函数可能呈现双峰或多峰，效果不好
基于一阶的sobel算法	计算简单，速度快	只能检测水平和垂直方向的边缘，对于纹理较复杂的图像，其边缘检测效果欠佳；容易造成边缘点的误判
Laplacian算法	只适用于无噪声图像	对噪声非常敏感；不能检测边缘的方向。不以其原始形式用于边缘检测
数学形态学方法	对背景不均的图像具有较好的识别效果	对结构元素的选取和不同算法的组合很重要，直接影响识别结果
阈值生长法	思想简单，能够将具有相同特征的联通区域识别出来，提供很好的边界信息和分割结果	当噪声和灰度不均时可能导致过分割。计算代价大，在实际中最严重的问题就是效率低下

第四章 太阳黑子自动识别方法

上一章介绍了主要的图像识别技术，通过比对分析，认为数学形态学法应该是适合于提取怀柔全日面图像中的太阳黑子，那么在这一章，将阐述如何利用该方法实现太阳黑子的自动识别。将分两节进行介绍：第一节介绍了日面轮廓的自动提取方法，这是确定黑子绝对面积和位置（经纬度）的前提；第二节介绍了太阳黑子的自动识别方法。

4.1 基于数学形态学的日面轮廓自动提取

日面轮廓的提取，是确定太阳黑子绝对面积和位置的前提条件，因此需要准确提取。本文的日面轮廓自动提取方法主要基于数学形态学和OTSU方法来实现。其步骤如下：

（1）首先采用Wang, X. et al.(2008) [74]提出的方法对原始数据进行预处理，得到图4.1(a)。

（2）第二步是为了消除日面上所有的太阳黑子和噪声，以得到一个干净的日面。这是通过对图4.1(a)采用形态学闭运算实现的，为了使得闭运算能够消除它们，其结构元素SE 的半径必须大于日面上所有太阳黑子和噪声的半径。我们对大量怀柔光球全日面图像进行了分析，发现当SE的半径大于30像素时，能够得到较好的结果，所以SE设置为30。这样处理后，就能够得到一个干净的日面如图4.1(b)。

（3）第三步是为了将图4.1(b)的日面轮廓进行收缩。方法是对图4.1(b)利用形态学腐蚀运算进行处理，其中结构元素的半径设置为1个像素，处理后得到一个日面半径比图4.1(b)小1像素的图4.1(c)。

（4）为了得到日面轮廓，将图4.1(b)减去图4.1(c)，则得到了反映日面轮廓的图4.1(d)。

（5）由于图4.1(d)是灰度图，并无法直接得到日面轮廓的坐标，因此需要把它进行分割，得到能够直接反映日面坐标的二值图。在此使用了OTSU阈值法对图4.1(d) 进行分割，使用这种方法不用人工设定阈值，它会根据图像自动计算以及选取合适的阈值。通过这一步骤处理后得到了图4.1(e)。

(6) 由于在图像的黑色背景区域中, 有时会存在CCD的噪声, 它们存在图4.1(e)中, 也会被OTSU阈值法分割成为白色区域, 会被误判断为日面轮廓坐标, 因此需要将它们排除。这里采用如下方法进行排除:

假设图4.1(e)的尺寸为 $M \times N$, 图中任意一点的坐标设置为 $I(x, y)$, 假如 $(\frac{N}{2} - y)^2 + (\frac{M}{2} - x)^2 > (\frac{M}{2})^2$, 则 $I(x, y) = 0$ 。

(7) 最后, 提取图4.1(e)中的白色像素的横纵坐标, 分别保存在数组X, Y中。使用最小二乘法对X, Y进行圆的拟合, 得到图4.1(f), 图4.1(a)也被叠加了上去, 红色标记处就是提取的日面轮廓。

本文所有程序均采用MATLAB软件实现, 该算法程序请见附录A.1。

为了更直观地显示本算法的流程, 我们画了流程图4.2。

4.2 基于数学形态学的太阳黑子自动识别方法

在提取日面轮廓之后, 我们就可以在此轮廓内识别太阳黑子了。

需要说明的是, 由于数据分辨率限制, 在这里并未把黑子的本影和半影进行分离, 而是将它们当作一个整体进行识别。太阳黑子的自动识别方法如下:

(1) 首先采用Wang, X. et al.(2008) [74]提出的方法对原始图像进行预处理, 得到图4.3(a)。

(2) 第二步的目的是为了提取日面上太阳黑子和仪器等噪声的梯度, 采用的方法如下: 首先利用一个结构元素SE 半径为30 像素的闭运算处理图4.3(a), 其中SE 的半径必须大于太阳黑子和噪声的半径, 以将它们进行消除。这样就得到了图4.3(b), 然后将图4.3(b)与图4.3(a)相减, 得到图4.3(c)。

(3) 图4.3(c)反应的就是日面上具有灰度突变的太阳黑子和噪声。在这一步, 我们需要将它们从日面上分割出来, 这里阈值的选择是关键, 它依赖于图4.3(c)的灰度。通过大量的实验和测试, 我们发现让阈值等于图像强度范围的20%将是一个合适的值。由于临边昏暗的影响, 这些梯度信息在越靠近边缘处会降低, 因此, 在 $0.8R - R$ 的日面中, 设置该阈值为15% (其中R可以通过4.1的方法计算得出)。通过这一步的处理后, 将得到图4.3(d)。

(4) 为了进一步准确分离太阳黑子, 我们对上一步提取的区域进行了限定, 保留在原始图像中的灰度最大值和最小值之差大于 $H=5$ 的区域(H 的选择是通过在区间 $[0, 255]$ 进行迭代选取的。当 $H \subseteq [2, 10]$, 提取结果较好, 因此随机设置 $H=5$), 舍弃不满足此条件的区域。

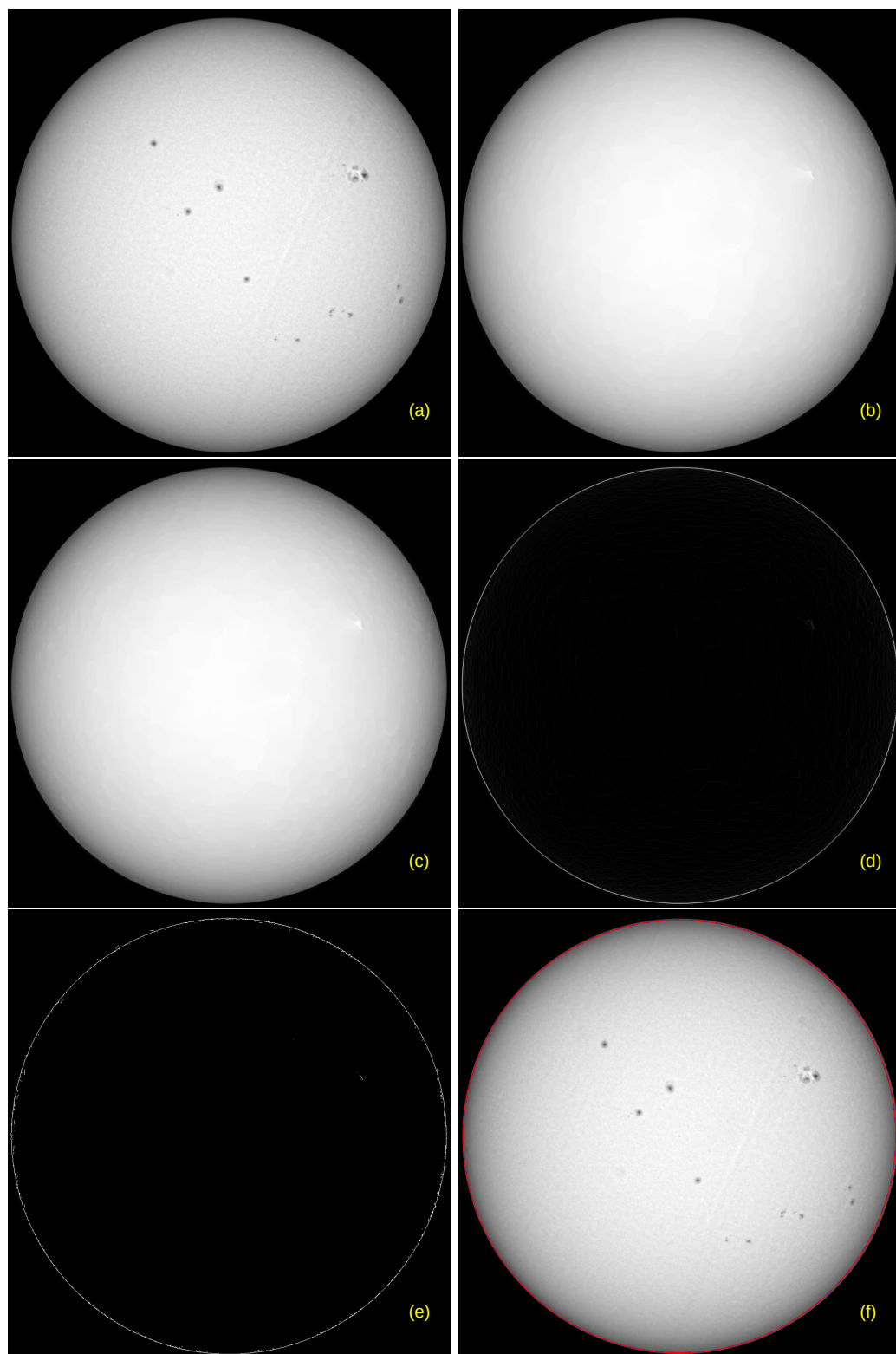


图 4.1: (a)预处理后的图像; (b)干净的日面; (c)对图像(b)的日面收缩1个像素后的图像; (d)灰度图中的日面轮廓; (e)二值图中的日面轮廓; (f)用红色标记的日面轮廓, 叠加至图像(a)上

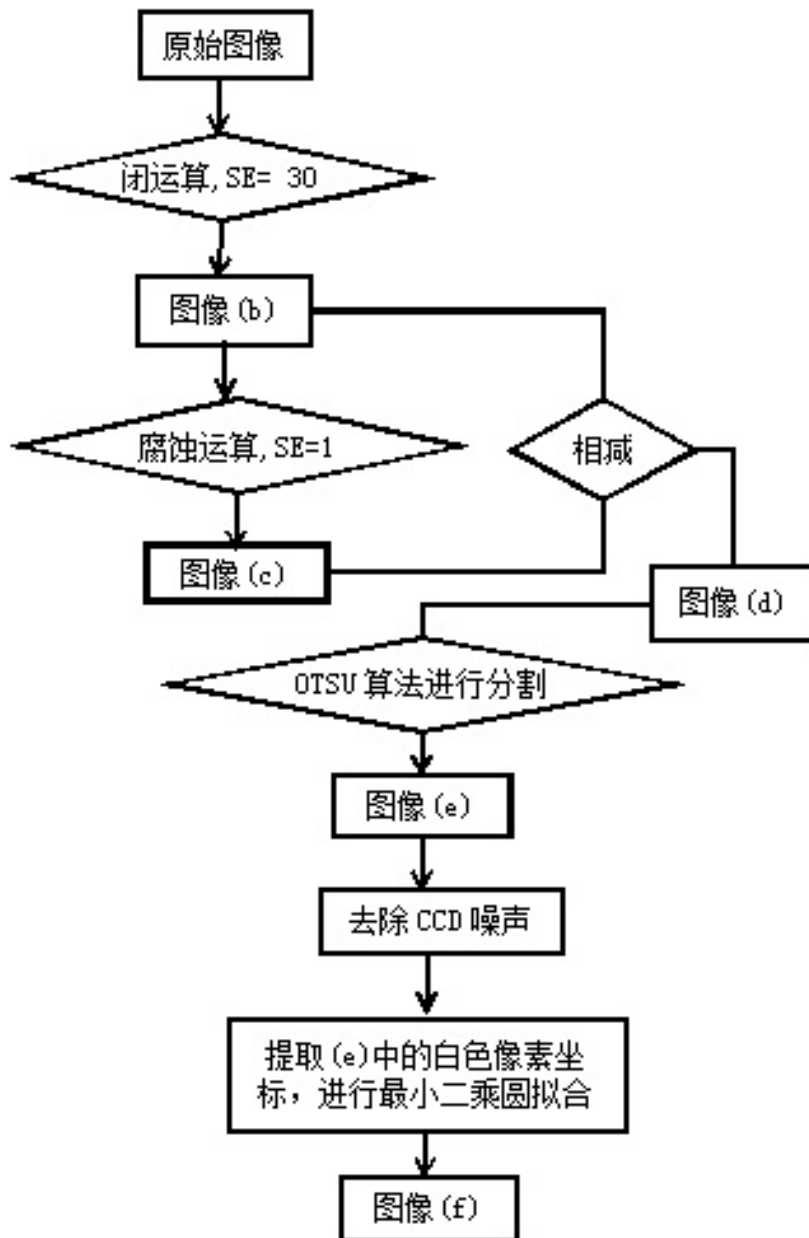


图 4.2: 日面轮廓的自动提取算法流程图

(5) 最后, 我们将提取出来的区域标记为红色, 并叠加至图4.3(a)中, 得到图4.3(e)。

这样, 一幅图像中的太阳黑子就被自动识别了出来。

为了更直观地显示本算法的流程, 我们画了图4.4的太阳黑子识别流程图。

4.3 识别结果

为了直观地显示本算法对太阳黑子的识别效果, 我们随机选取了几个被识别的太阳黑子, 将它们与原始图像进行了放大比对, 为了更清楚显示, 这里仅仅截取了活动区中的太阳黑子, 结果如图4.5。从图中我们可以看到这些太阳黑子的轮廓都被准确识别了出来, 结果较为理想。

4.4 受噪声干扰图像的识别

由于怀柔部分时期的全日面光球单色像数据受到了仪器噪声的干扰, 因此, 我们测试了上述方法在这些数据上的识别情况, 结果如图4.6所示。从图中, 我们可以看出, 该程序消除了仪器噪声的干扰, 成功地识别了日面上的太阳黑子。说明本算法能够准确识别受噪声干扰图像中的太阳黑子。

4.5 尝试其它方法

上一章介绍了多种图像识别技术, 除了数学形态学方法被用于进行太阳黑子的识别以外, 我们也尝试了应用全局阈值分割法和区域生长法来识别太阳黑子。下面将分别进行介绍。

4.5.1 全局阈值分割法

这是一种最简单的图像分割和识别方法, 它采用一个全局的阈值来对图像进行分割, 以达到识别对象的目的。根据怀柔全日面单色像的图像特征, 日面受到临边昏暗的影响, 不同位置的太阳黑子灰度值是不一致的, 且日面边缘处灰度值较低, 可能与日面中心太阳黑子的灰度值接近, 对太阳黑子的识别造成干扰。因此, 从理论上利用全局阈值进行分割是不可行的。下面进行了尝试, 给出了实验结果。如下图所示:

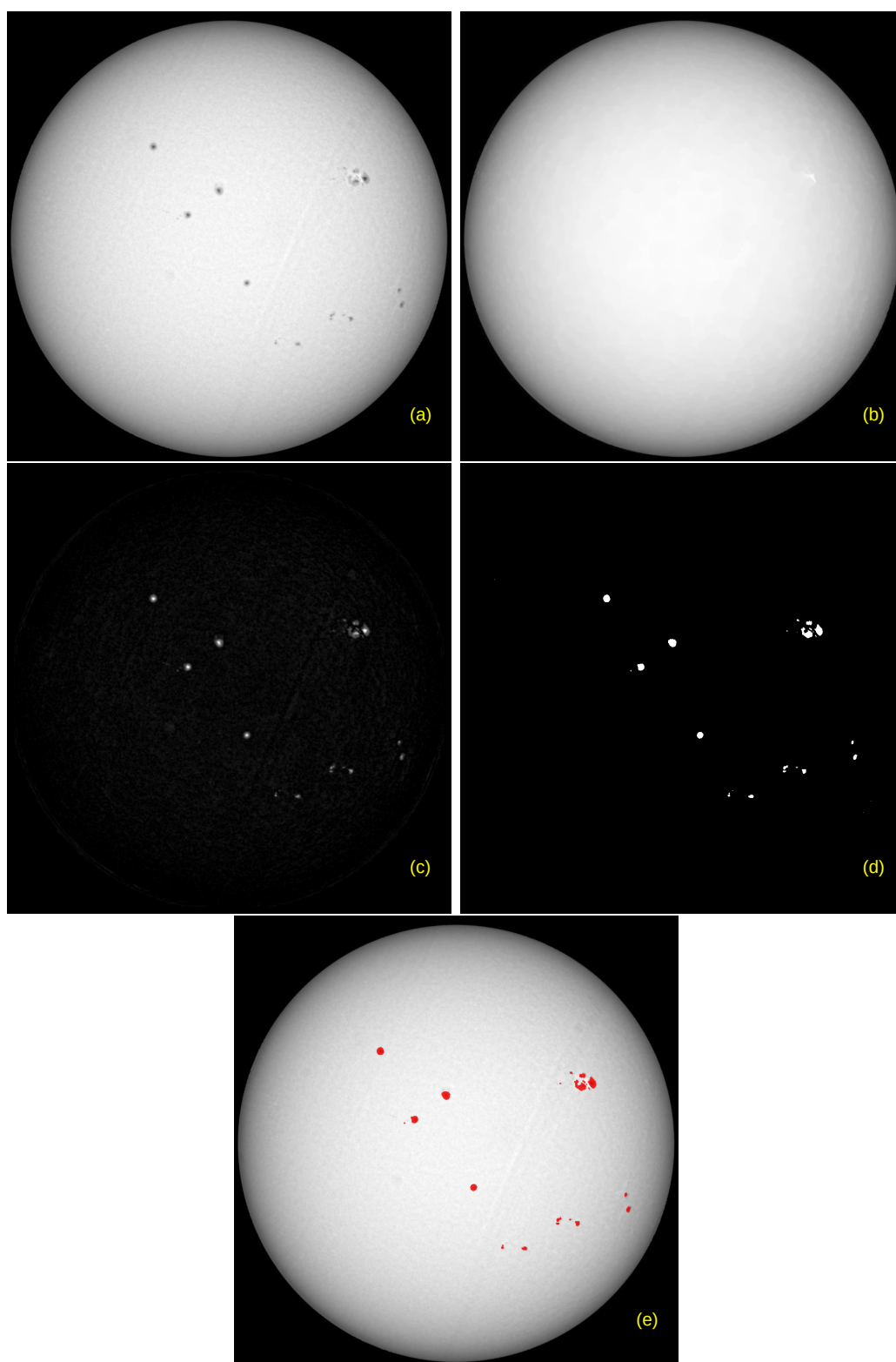


图 4.3: (a)预处理后的图像; (b)一个干净的日面; (c)日面上的梯度信息; (d)二值图, 反映了太阳黑子的候选区域; (e)将识别后的太阳黑子叠加至了图像(a)上

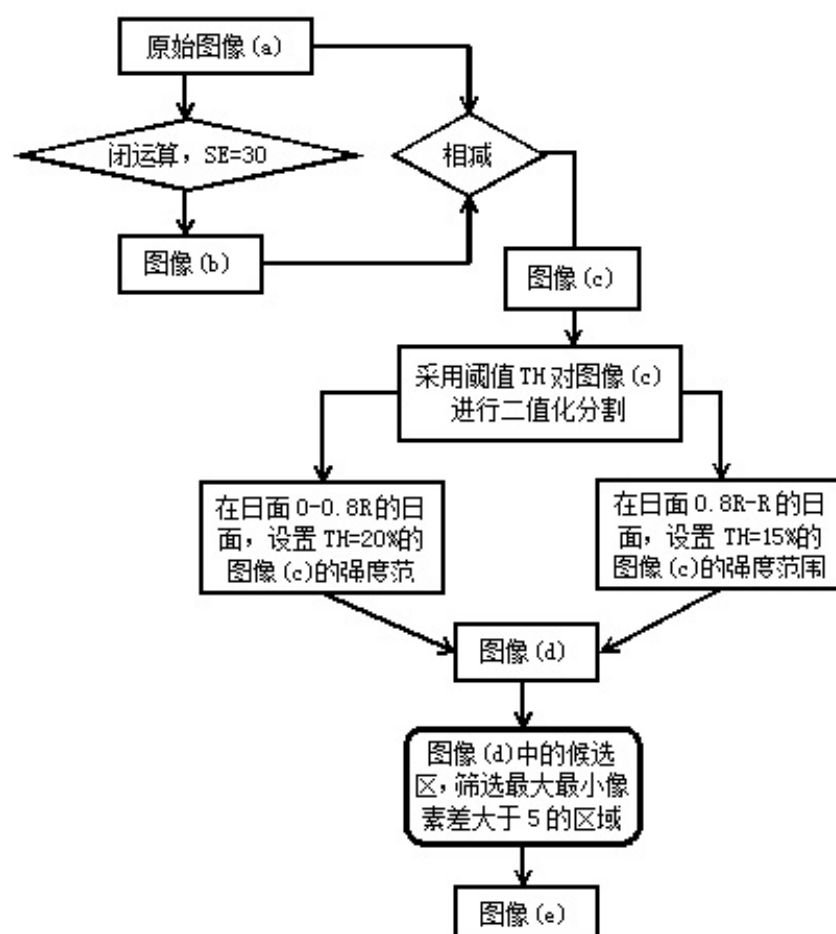


图 4.4: 太阳黑子识别流程图

图4.7(a)是原始图像, 图4.7(b)是利用4.1节的日面轮廓提取程序, 将日面边缘外的区域处理为白色, 以消除其对太阳黑子识别的干扰, 图4.7(c)是利用全局阈值对图像进行分割的结果 (红色为提取的太阳黑子区域, 并将它们叠加至原始图像)。图4.7(c)中日面边缘的红色区域为日面内边缘的部分, 说明它们与太阳黑子的灰度接近, 对太阳黑子的识别造成了干扰。

在该处理过程中, 为了去除日面边缘的干扰, 必须将阈值调低, 但这同时也会消除日面上的许多太阳黑子。因此, 这种方法的处理效果并不理想。

这种方法理解和处理起来都非常简单, 之所以要首先介绍这样方法, 并不仅仅为了说明这种方法不可行, 更是要说明: 基于全局阈值的其它识别方法同样是不可行的, 另一例子如下面将要介绍的区域生长法, 在这种方法中, 它利

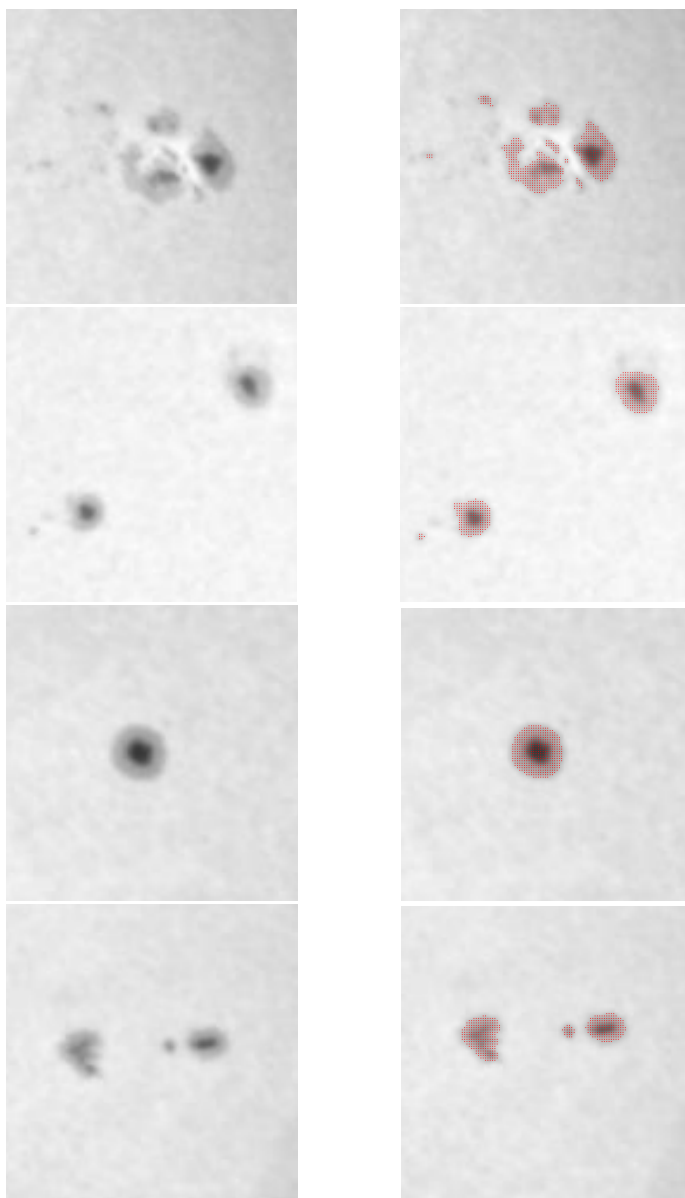


图 4.5: 左侧是放大的局部原始图像, 右侧是识别结果

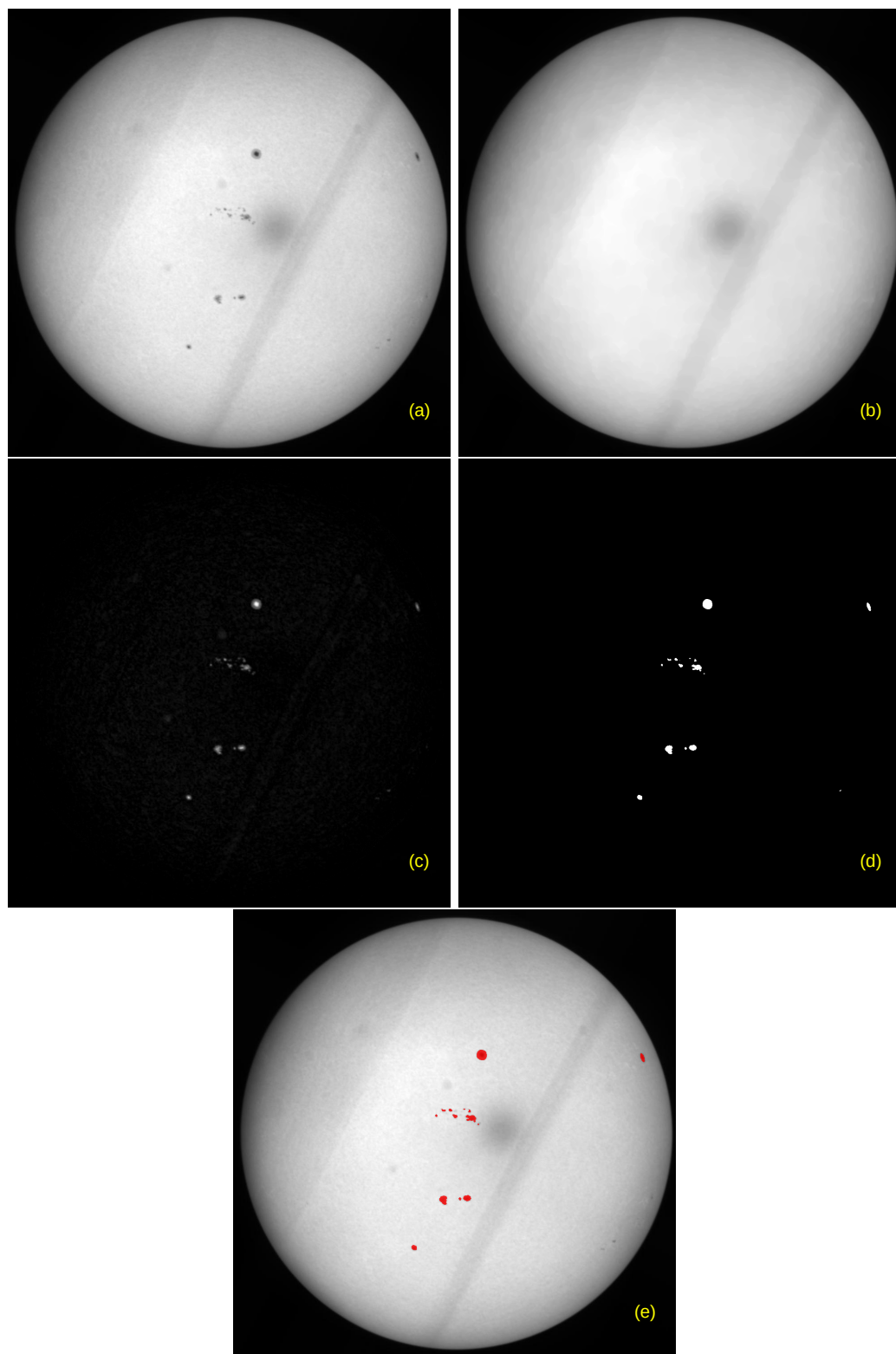


图 4.6: (a)受到仪器噪声干扰的原始图像; (b) 干净的日面, 消除了太阳黑子; (c) 日面上的梯度信息; (d) 二值图像, 显示太阳黑子候选区域; (e) 红色代表太阳黑子, 将识别结果叠加至了原始图像上

用全局阈值法来进行种子点的选取，也将导致结果的不理想，具体处理过程和结果见下节。

4.5.2 区域生长法

在第三章已经提到，区域生长法也是一种图像识别的技术，本文也尝试采用此方法进行太阳黑子的识别，下面我们将具体进行介绍。

根据区域生长法的理论，我们对怀柔光球单色像中太阳黑子的自动识别步骤如下：

1) 首先进行种子点的选取和确定。在此利用全局阈值法设定一个阈值对图像进行分割，分割提取的对象设置为种子点，这里阈值的设定必须足够低，以保证所有的种子点都被包含于太阳黑子之中；

2) 确定生长准则，认为与种子点灰度值之差小于50像素的邻域被确定为相同区域；

3) 按照3.4节中提出的区域生长法的步骤对所有种子点周围的邻域像素进行判断，最终得到太阳黑子区域，识别结果如图4.8所示。

从图4.8(b)中可以看出，日面上的太阳黑子并未被完全识别，这主要是由于种子点的选取不合理造成的，利用全局阈值法提取的种子点由于必须包含于太阳黑子之中，则必然会导致另一部分太阳黑子内没有种子点。对于没有种子点的太阳黑子，区域生长法将无法探测到它们。

另外，这种方法执行效率非常低下，我们选取了部分数据进行测试，发现对每个数据的处理速度都超过了3分钟，因此，这种方法的低速率也成为了瓶颈。

4.5.3 以上方法比对

经过比对以上两种方法与本文提出方法的处理过程和结果，我们分析得出，全局阈值分割法和区域生长法不可行的关键是由于日面受到临边昏暗的影响，非均匀的日面使得基于全局阈值的方法不可行。而本文提出的基于数学形态学的太阳黑子方法，则恰恰能够消除非均匀日面的干扰（从图4.3(b)和图4.3(c)直观可见）。在处理过程中，该方法首先就消除了临边昏暗的影响，然后再进行太阳黑子的识别，使得算法最终可行。对于日面的仪器噪声，在消除

日面背景的同时，数学形态学也将它们当作了背景一并进行消除，使得这种方法更加适应于处理怀柔全日面光球单色像。因此，是一种合理、可行的方法。

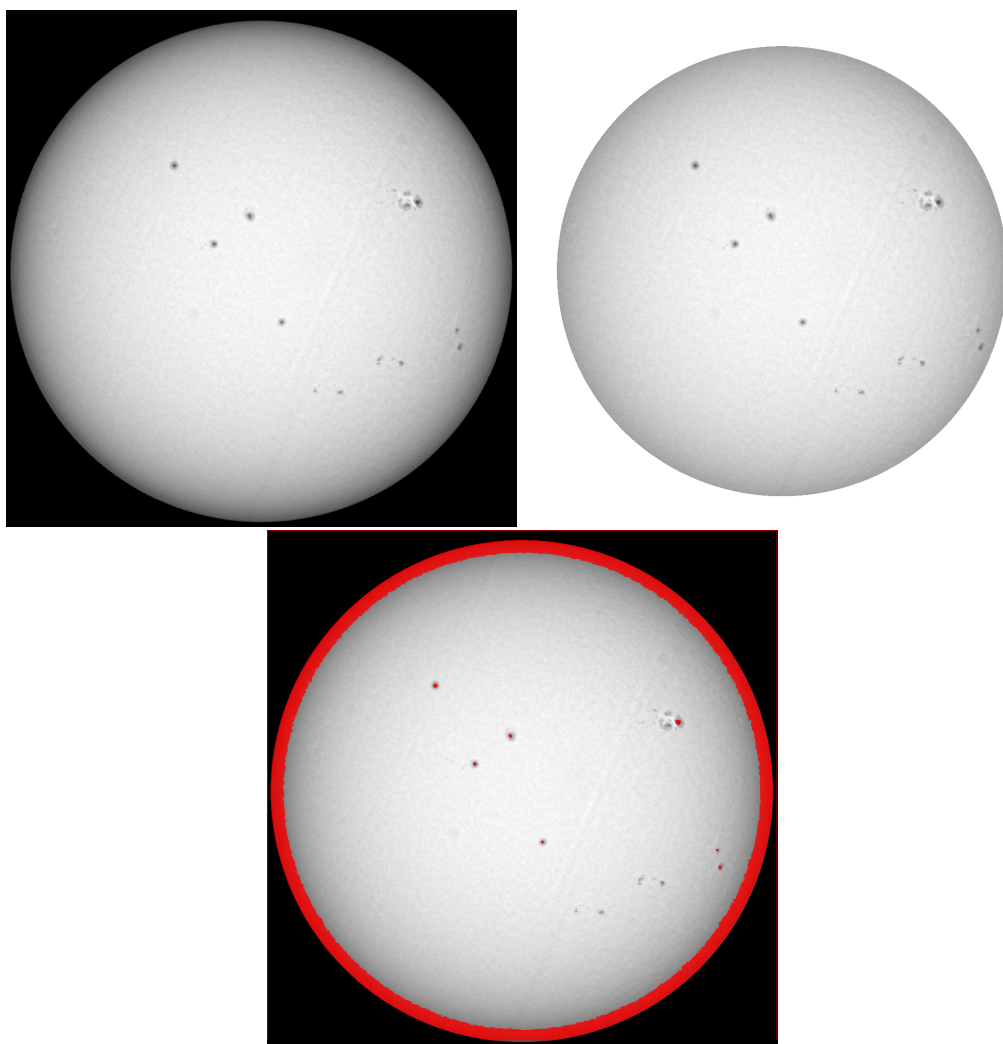


图 4.7: (a)原始图像；(b)日面边缘外的区域被处理为白色；(c)利用全局阈值对图像进行分割的结果，红色代表识别结果

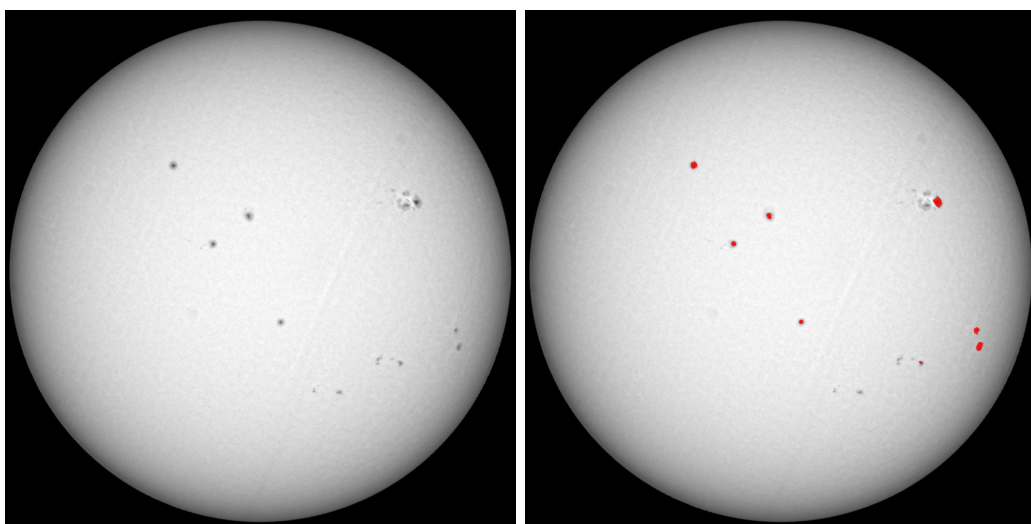


图 4.8: 区域生长法处理结果: (a)原始图像, (b)识别的太阳黑子

第五章 精度与讨论

上一章介绍了太阳黑子的自动识别方法，直观上得出基于数学形态学的识别方法是一种较好的方法，那么在本章，将通过精确的统计和计算进一步验证本方法的精度。

我们将通过比对不同方式提取的太阳黑子个数和全日面中的太阳黑子总面积进行检验，将比对：1) 本算法提取的日面黑子个数与手工提取的日面黑子个数；2) 本算法提取的日面太阳黑子总面积与USAF/NOAA提供的日面太阳黑子总面积，下面将逐一进行介绍。

5.1 比对本算法与手工提取的日面黑子个数

日面黑子个数是反映太阳活动剧烈程度的一个最基本的指标，在此将被用于检验本算法的精度。其思路是：从怀柔全日面单色像数据中随机选取小部分数据，分别利用本方法和手工的方式提取每个图像中的太阳黑子，得到两组数据，假设手工提取结果无误，则以此为参考。如果自动化提取的结果接近手工结果则说明算法精度较高，否则精度较低。由于手工提取和统计太阳黑子个数需较大人力，因此在这里我们将仅选取两个月的数据。

具体操作如下：1) 从怀柔全日面单色像中2011.11—2011.12的时间段内，在有观测日内每日随机提取一个数据，共得到37个数据（由于地面观测收到天气影响，部分日期内没有观测）。2) 手工提取并统计每个数据的日面太阳黑子个数，由于地面数据中日面较为模糊，人眼提取太阳黑子时，容易将小黑子漏掉，为防止这种现象发生，我们以清晰度较高的SOHO/HMI空间数据中为参考进行提取，这样就能保证手工提取的准确性。3) 再利用上一章提出的算法自动地识别这些数据中的太阳黑子，获取每个数据的日面黑子个数。4) 将两组数据进行比对，结果如表5.1。第一列是数据日期；第二列是手工提取的太阳黑子个数；第三列是自动地提取的太阳黑子个数，第四列是自动化方法未识别，但手工方式识别的太阳黑子，即未识别的太阳黑子个数；第五列是自动化方式识别，但手工方式没有识别的太阳黑子，即错识别的太阳黑子个数。

表5.1最后一行统计了手工识别的太阳黑子总数、自动识别的太阳黑子总

表 5.1: 本算法自动提取的太阳黑子个数与手工提取的黑子个数比对结果

日期	手工提取的 太阳黑子数	本方法自动提 取的太阳黑子数	未识别的太 阳黑子数	错识别的太 阳黑子数
2011-11-2	10	9	1	0
2011-11-6	12	12	0	0
2011-11-7	17	17	0	0
2011-11-9	15	15	0	0
2011-11-10	15	15	0	0
2011-11-11	18	18	0	0
2011-11-12	15	14	1	0
2011-11-14	15	15	0	0
2011-11-18	11	8	3	0
2011-11-19	9	8	1	0
2011-11-20	13	12	1	0
2011-11-21	9	7	2	0
2011-11-22	13	12	1	0
2011-11-23	11	10	1	0
2011-11-25	14	13	1	0
2011-11-30	17	17	0	0
2011-12-1	12	10	2	0
2011-12-3	14	12	2	0
2011-12-4	22	24	0	2
2011-12-7	12	12	0	0
2011-12-8	11	11	0	0
2011-12-9	7	7	0	0
2011-12-10	8	8	0	0
2011-12-12	3	4	0	1
2011-12-14	5	4	1	0
2011-12-15	4	4	0	0
2011-12-16	5	5	0	0
2011-12-19	11	11	0	0
2011-12-20	6	6	0	0

数、未识别的太阳黑子总数、以及错误识别的太阳黑子总数，根据这些数据，我们提出了本方法的正确识别率(简称识别率)和错误识别率（简称错误率），计算公式如下：

识别率= (自动识别的太阳黑子总数- 错误识别的太阳黑子总数)/(手工识别的太阳黑子总数)

$$= \frac{388-5}{403} = 95\%$$

错误率=错误识别的太阳黑子总数/手工识别的太阳黑子总数

$$= \frac{5}{403} = 1.2\%$$

从计算结果来看，本算法识别率较高，同时错误率也得到了控制，说明算法精度较高。

接下来对未识别的太阳黑子进行了分析，发现这主要是由以下几个原因造成的：1) 日面上有时候会存在一些粘连的太阳黑子，通过手工方式提取，会将它们视为2个太阳黑子，而自动识别则无法将它们分开，视为一个太阳黑子；2) 在本识别算法中，为了消除日面噪声，限定了太阳黑子区域的最大和最小灰度值之差应大于5个像素，这在大部分时候都是良好的成立的，但少数情况下，也会将一些非常弱小的太阳黑子进行剔除。那么这些未识别的太阳黑子是

表 5.2: 接表5.1

日期	手工提取的 太阳黑子数	本方法自动提 取的太阳黑子数	未识别的太 阳黑子数	错识别的太 阳黑子数
2011-12-21	10	9	1	0
2011-12-22	10	11	0	1
2011-12-23	9	9	0	0
2011-12-24	6	5	1	0
2011-12-25	8	8	0	0
2011-12-26	10	10	0	0
2011-12-28	9	8	1	0
2011-12-31	7	8	0	1
总计	403	388	20	5

一些对太阳影响较大的大黑子，还有一些影响相对较小的小黑子呢？为了回答这个问题，我们对这些太阳黑子的直径进行了计算，计算公式如下：

$$d = \frac{\sqrt{\frac{s}{\pi}}}{R} \times 180^\circ$$

s是自动程序计算得到的太阳黑子面积，R是日面半径，d是太阳黑子的直径，单位是度。

结果显示如表5.3，从中我们可以看到，这些太阳黑子的直径都小于 2° ，说明它们非常微小的太阳黑子，对太阳活动水平的影响非常微弱。由于没有大于 2° 的太阳黑子被遗漏，说明本文算法还是较为可靠的。

然后又对表1中错识别的太阳黑子直径进行了计算，结果如表5.4所示，发现它们主要是仪器噪声，说明本文的自动化方法并未完全消除仪器噪声，还存在改进的空间。

5.2 比对本算法与USAF/NOAA提供的日面黑子总面积

为了更进一步验证算法精度，我们将比对本算法计算的日面太阳黑子总面积与USAF/NOAA提供的日面黑子总面积。

太阳黑子总面积是日面上所有太阳黑子的面积总和，是反映太阳活动剧烈程度的直接参数，常被用于研究太阳活动周、预报太阳活动、以及监测空间环境。在这里被用于检验本算法的精度。

我们的思路和步骤如下：1) 从2006—2012年期间的怀柔光球单色像中每日随机挑选了一个数据，（怀柔全日面仪器于2009/08—2010/11 期间处于维修期，该段数据缺失），利用本文提出的自动化方法识别这些数据中的太阳黑子，并计算太阳黑子总面积；2) 然后，从USAF/NOAA(U.S. Air Force)的网站上下载和提取对应日期的日面太阳黑子总面积数据；3) 最后，比对了两组数据，如图5.1，横坐标代表观测日期，纵坐标代表日面太阳黑子总面积（太阳黑子总面积单位是相对于日面面积的百万分之一）。

从图5.1中可以看到，两组数据的整体趋势一致，计算得出它们的相关性高达95%（如图5.2，横坐标代表怀柔观测基地的日面太阳黑子总面积，纵坐标代表USAF/NOAA的日面太阳黑子总面积），说明这两种数据是基本一致的。

表 5.3: 本方法未识别的太阳黑子直径

未识别的太阳黑子编号	太阳黑子直径（度）
1	1.99
2	1.24
3	1.95
4	0.98
5	1.05
6	1.67
7	1.00
8	0.87
9	1.77
10	1.39
11	1.39
12	1.61
13	1.45
14	1.54
15	1.15
16	1.01
17	1.05
18	0.98
19	1.01
20	1.48

我们也分析了这两种数据的异同，发现怀柔单色像的太阳黑子面积要略高，我们认为这主要是以下原因造成的：1) 数据不同步：两种数据可能在同一天的不同时刻采集，这期间太阳黑子发生演化，导致其形态发生了改变，则太阳黑子的面积易随之改变；2) 受到地面大气干扰，怀柔全日面光球单色像的太阳黑子边缘较为模糊，两组数据中的黑子形态存在一定差异；3) 怀柔数据受到仪器噪声干扰，可能被误认为是太阳黑子，使得计算值偏大。

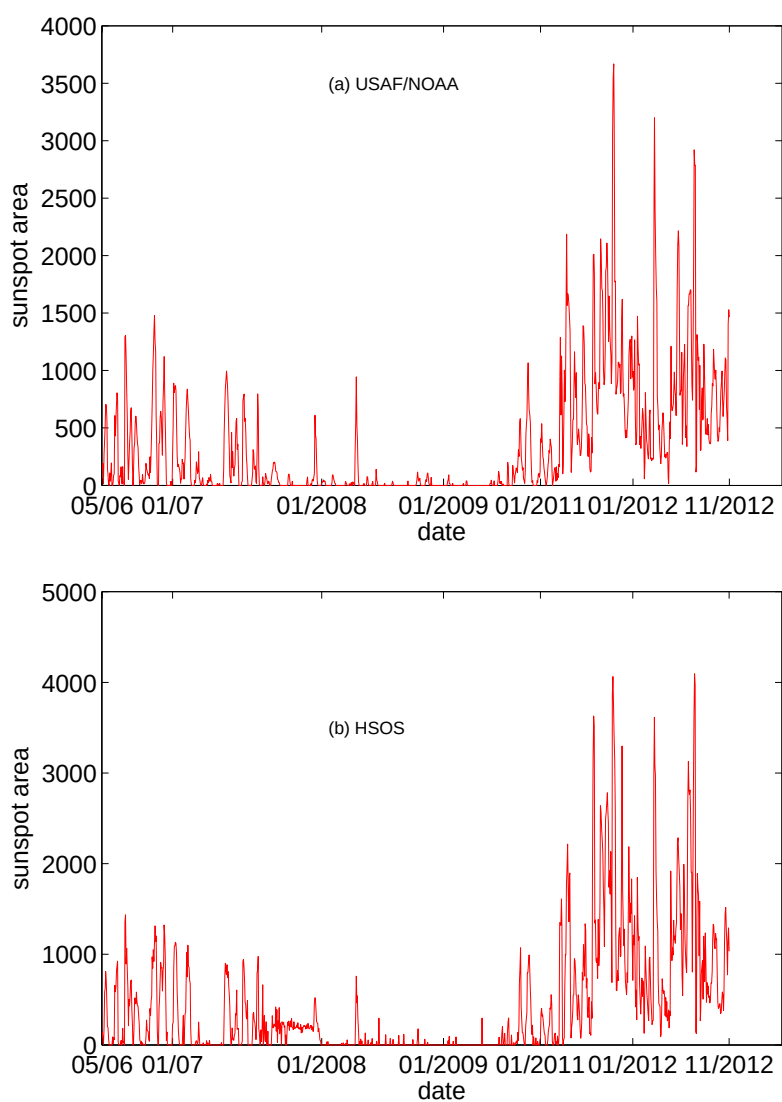


图 5.1: (a)NOAA/USAF提供的每日日面黑子总面积;(b)怀柔基地提供的每日日面黑子总面积

表 5.4: 本方法错误识别的太阳黑子直径

错误识别的太阳黑子编号	太阳黑子直径（度）
1	0.98
2	1.02
3	5.88
4	1.45
5	1.02

5.3 特色与创新

以上给出了本算法的精度，那么相比于其它太阳黑子自动识别算法，本算法精度如何呢？下面调研了几种太阳黑子自动识别方法的精度数据，并将它们与本算法结果进行比对。

表5.5是Zharkov,et al.(2005) [81]提出的太阳黑子自动识别算法对太阳黑子的识别结果。

根据该表，我们计算得出Zharkov,et al. (2005)中算法的识别率为84.3%，错误率为7.2%。

由他们的方法提取的日面黑子总面积与USAF/NOAA提供的日面黑子总面积进行比对的结果如图5.3，计算得到这两种结果的相关性为96%。

表5.6则是Curto, et al.(2008) [32]利用Ebro观测站的数据提取的太阳黑子个数，并与SFC数据库提供的太阳黑子个数进行比对的结果。根据该表计算得出，该算法对太阳黑子的识别率仅为70%，错误率则高达30%。

由这种方法所提取的日面黑子面积与USAF/NOAA提供的日面黑子总面积进行比对的结果如图5.4，计算得到这两种结果的相关性仅为70%。

Djafer et al.(2012) [35]在文中指出他们的算法对于太阳黑子日面面积与USAF/NOAA的相关性则达到了95%。

我们将以上几种方法的精度数据制成表5.7进行比对：

通过比对，得出本文的创新点在于：提出了一种太阳黑子的自动识别方法，其在识别率、错误率和与NOAA/USAF的相关性方面均有提升，因此是一种高精度的识别方法。

表 5.5: 太阳黑子自动识别与人工方式进行比对的结果, 基于Meudon天文台的Ca II K1观测数据

Date	Number of spots (Meudon)	Number of spots (case 1)	FAR (case 1)	FRR (case 1)	Number of spots (case 2)	FAR (case 2)	FRR (case 2)
01-Apr-02	16	17	2	1	19	4	1
02-Apr-02	20	18	0	3	18	0	3
03-Apr-02	14	13	0	3	24	10	2
04-Apr-02	13	15	2	2	20	6	1
05-Apr-02	16	18	0	2	18	1	2
06-Apr-02	10	10	0	5	15	5	5
07-Apr-02	11	9	1	5	13	4	4
08-Apr-02	14	17	3	2	22	7	0
09-Apr-02	16	17	0	2	17	0	2
10-Apr-02	12	12	0	4	14	1	3
11-Apr-02	12	9	0	7	10	1	7
12-Apr-02	18	20	2	0	21	3	0
14-Apr-02	20	23	2	2	34	13	2
15-Apr-02	13	16	1	4	18	2	3
16-Apr-02	10	13	3	1	19	9	1
17-Apr-02	11	11	1	1	13	2	0
18-Apr-02	12	11	1	1	12	1	0
19-Apr-02	11	14	0	0	15	1	0
20-Apr-02	13	10	0	2	11	1	2
21-Apr-02	9	8	1	1	15	7	0
22-Apr-02	12	13	1	0	15	3	0
23-Apr-02	14	13	0	1	15	1	0
24-Apr-02	18	15	0	3	17	0	1
25-Apr-02	17	13	0	3	17	2	1
27-Apr-02	9	7	0	1	9	2	1
28-Apr-02	9	10	1	0	11	2	0
29-Apr-02	8	12	5	0	20	13	0

表 5.6: Curto, et. 2008利用Ebro观测站数据计算的太阳黑子自动识别个数与SFC数据库提供的结果进行比对

Date	Number of sunspots(Ebro)	Number of sunspots(SFC)	FAR	FRR
04-May-2004	9	9	3	3
05-May-2004	9	3	6	0
06-May-2004	9	4	5	0
07-May-2004	4	7	1	4
08-May-2004	3	7	0	4
09-May-2004	4	6	2	4
10-May-2004	9	7	4	2
12-May-2004	21	4	17	0
13-May-2004	10	16	1	7
14-May-2004	20	18	5	3
15-May-2004	16	26	2	12
16-May-2004	20	22	3	5
17-May-2004	23	33	5	15
18-May-2004	17	24	2	9
19-May-2004	17	17	3	3
20-May-2004	15	17	4	6
21-May-2004	15	13	2	0
24-May-2004	28	13	15	0
27-May-2004	27	12	15	0
28-May-2004	12	6	6	0
29-May-2004	11	18	3	10
30-May-2004	12	22	0	10
31-May-2004	13	10	0	3
TOTAL	314	304	103	100

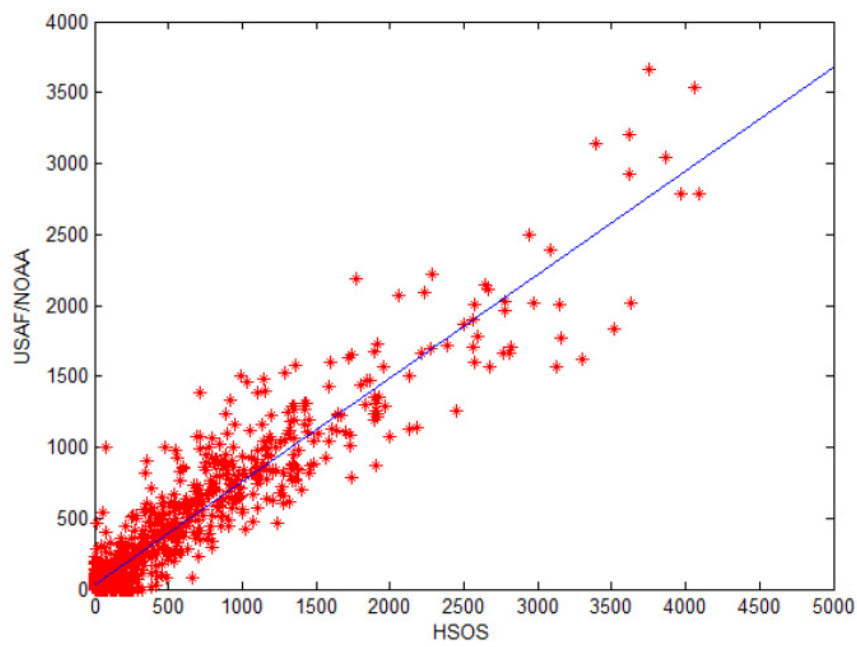


图 5.2: 图5.1中两组数据的相关性

表 5.7: 各种太阳黑子自动识别方法的精度比对

方法	识别率	错误率	与USAF/NOAA的相关性
Zharkov,et.	84.3%	7.2%	96%
J.J.Curto	70%	30%	70%
D.Djafer	无	无	95%
本文的方法	95%	1.2%	95%

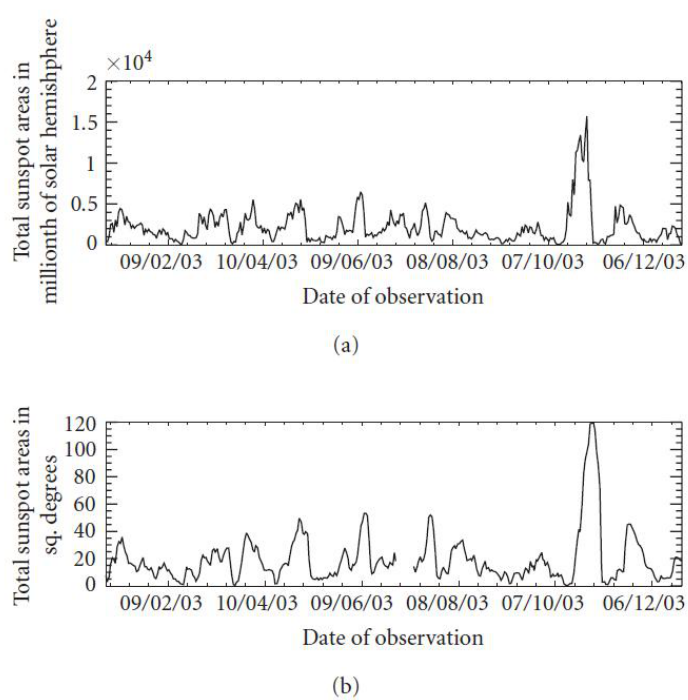


图 5.3: (a)Zharkov,et. 2005识别的日面太阳黑子总面积; (b)USAF/NOAA提供的日面太阳黑子总面积

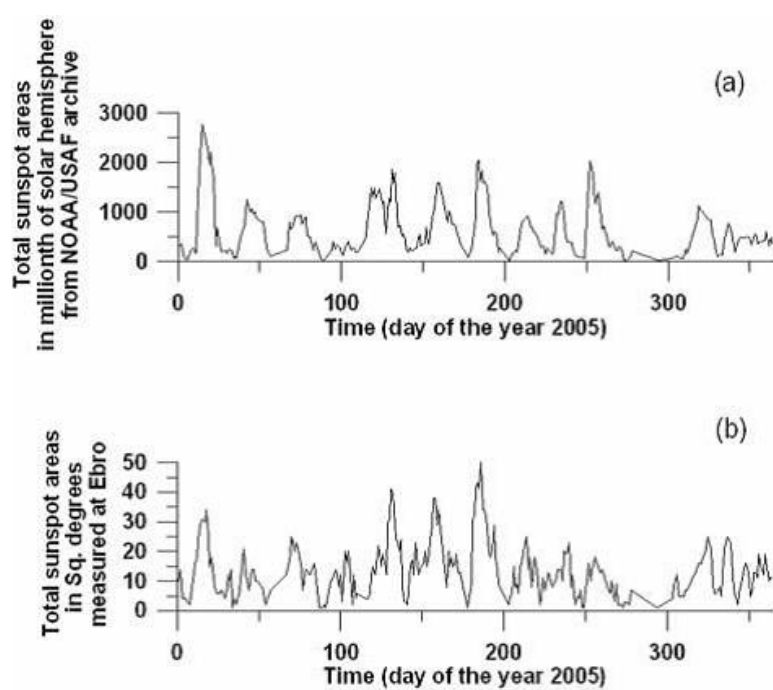


图 5.4: (a)Curto,et al.(2008)识别的日面太阳黑子总面积; (b)USAF/NOAA提供的日面太阳黑子总面积

第六章 总结与展望

6.1 本文工作总结

太阳是一颗典型的恒星，它是与人类关系最为密切的天体，地球上的昼夜交替、四季变换、风云雨雪……无不与之息息相关。理解太阳规律和活动对于人们了解日地关系有重要的作用。太阳黑子是日面上最常见的一种现象，研究和理解太阳黑子对于了解和认识太阳具有重要的意义。

为了了解太阳黑子，人们很早就开始观测太阳黑子，我国史书上就有丰富的太阳黑子目视记录。《汉书》中记载，成帝河平元年三月乙未“日出黄，有黑气，大如钱，居日中央”，则是全世界最早的黑子观测记录。人们从1610年开始用望远镜观测太阳黑子。之后人们用望远镜观测并手绘太阳黑子，随着仪器的更新改进，现在则主要通过CCD采集数字化的太阳黑子观测数据。

这些数据为研究太阳黑子提供了宝贵的资料。然而，为了充分发挥这些资料的作用，首先需要解决太阳黑子识别的问题（尤其是全日面资料）。准确、及时、高效地识别这些数据上的太阳黑子，是进行太阳黑子及有关研究的基石。

我国怀柔太阳观测基地从2006年开始观测太阳黑子，已经积累了丰富的数据资源，怀柔基地在地域和时段上均具有独特性，这些资料能够与其它台站资料形成互补，为太阳黑子的研究提供了更为完备的资料。因此，基于这样的背景，本文开展了基于怀柔全日面光球单色像的太阳黑子高精度自动识别技术的研究。

为了实现该研究，本文第二章充分调研了国内外有关太阳黑子识别的研究现状，包括早期基于手工识别的太阳黑子现状；以及近现代基于各种图像识别技术开展的自动识别太阳黑子技术，并扩展地调研了太阳耀斑、暗条以及日冕物质抛射的识别、跟踪及预报等自动化技术。这些调研对充分认识太阳黑子识别的现状、难点、关键点起到了重要作用，对我们提出一种基于怀柔全日面光球单色像的识别方法有很大帮助。

虽然目前已经出现了一些太阳黑子的自动识别技术，但是由于怀柔数据的特殊性，我们发现现有方法均无法较好的适用于怀柔数据。需要提出一种新的

基于怀柔数据的方法。因此，第三章调研了目前的图像识别技术。通过对这些技术的研究与分析，发现利用数学形态学的方法应该是一种比较适合怀柔数据的方法。

在第四章，我们利用此方法研究了太阳黑子识别的方法。识别过程分为了两部分：1) 基于数学形态学的日面轮廓的自动提取，这是为了便于计算太阳黑子的面积和位置；2) 基于数学形态学的太阳黑子自动识别方法。根据提出的方法，给出了几个太阳黑子的识别结果，直观上识别效果较好，太阳黑子边缘被准确地识别。由于怀柔部分数据受到仪器噪声干扰，我们又利用提出的方法对受噪声干扰的数据进行了处理，发现仪器噪声被消除，太阳黑子也能被准确识别。从直观上来看，基于数学形态学的方法应该是一种较合理的选择。另外，在这一章，我们也尝试了采用全局阈值法和区域生长法来识别太阳黑子，发现由于受到日面临边昏暗的影响，这两种方法均无法得到理想结果。因此，我们总结出，去除临边昏暗的影响是太阳黑子准确识别的前提。由于数学形态学法能够消除非均匀性背景，因此，在太阳黑子的识别过程中，它首先将日面背景和仪器噪声进行了消除，使得后面提取太阳黑子更加准确。

为了进一步检验算法的精度，本文利用统计和计算数据进行了算法检验，分别比对了本算法与手工提取的日面黑子个数和本算法与USAF/NOAA提取的日面太阳黑子总面积。比对结果显示，算法的识别率达到了95%、错误率为1.2%，与USAF/NOAA日面黑子总面积的相关性达到95%。我们将这一结果与其它的太阳黑子识别方法的精度进行了比对，得出从准确率、错误率以及与USAF/NOAA面积数据的相关性方面，本算法均处于较高和前沿的水平。

本方法将用于实时处理怀柔基地观测的光球全日面单色像数据，并利用本方法计算太阳黑子的几何和物理属性进行发布（可获取太阳黑子经纬度、日面面积、黑子个数、黑子群面积、黑子群分类、黑子磁场等属性），为相关的研究和应用提供准确、实时的数据资源。另外，本方法也将能够为其它台站太阳黑子观测数据的处理提供参考。

6.2 未来工作展望

下一步的工作将从以下几个方面展开：

1) 本算法的识别率和错误率都还有进一步提升和改进的空间，因此，在下一步的研究计划中，将更加深入的研究和探索这一问题。

2) 利用改进的算法, 计算太阳黑子参数。由于不同台站在仪器、观测条件等多个方面存在差异, 使得这些台站所获取的太阳黑子参数存在一定差异, 需根据其他台站的数据, 对怀柔基地的黑子参数进行对比和定标修正。

3) 利用mysql技术建立太阳黑子参数数据库, 将定标后的数据发布共享, 并提供给比利时的SIDC太阳黑子中心, 对国际太阳黑子相对数观测做出贡献。

4) 全日面中太阳黑子的准确分群也是一项有意义的工作, 能为有关研究提供帮助。在完成了全日面太阳黑子的识别的基础上, 还希望能够自动地将这些太阳黑子进行分群以及对黑子群进行自动地分类(例如基于McIntosh分型进行自动分类)。这方面的工作具有一些难度, 需要更多深入的研究和探讨。

附录 A 附录

A.1 基于数学形态学的日面轮廓自动提取程序

```
file=dir('test.jpg');
for ii=1:1
I=imread(['./',file(ii).name]);
[M,N]=size(I);
resultbw=zeros(M,N);
R=30;
se=strel('disk',R);
fo=imclose(I,se);
for i=1:R
for j=1:N
fo(i,j)=I(i,j);
end
end
for i=M-R+1:M
for j=1:N
fo(i,j)=I(i,j);
end
end
for i=1:M
for j=1:R
fo(i,j)=I(i,j);
end
end
for i=1:M
```

```

for j=N-R+1:N
fo(i,j)=I(i,j);
end
end
hold on
text(900,900,'(b)', 'FontSize',15,'color','y');
se=strel('disk',1);
f1=imdilate(fo,se);
hold on
text(900,900,'(c)', 'FontSize',15,'color','y');
f2=imsubtract(f1,fo);
hold on
text(900,900,'(d)', 'FontSize',15,'color','y');
level=graythresh(f2)
Iout=im2bw(f2,level);
Iout=bwmorph(Iout,'skel');
hold on
text(900,900,'(e)', 'FontSize',15,'color','y');
for xx=1:M
for yy=1:N
if  $(\frac{N}{2} - y)^2 + (\frac{M}{2} - x)^2 > 502^2$ 
Iout(xx,yy)=0;
end
end
end
[B,L]=bwboundaries(Iout,'noholes');
X=[];
Y=[];

```

```
    iii=1;
    for k=1:length(B)
        boundary=Bk;
        for jjj=1:length(boundary)
            X(iii)=boundary(jjj,2);
            Y(iii)=boundary(jjj,1);
            iii=iii+1;
        end
    end
    figure,imshow(I),title(file(ii).name);
    hold on
    text(900,900,'(f)', 'FontSize',15,'color','y');
    [xc,yc,Rs,a] = circfit(X,Y);
    hold on;
    plot(xc,yc);
    sunradius(ii)=Rs;
    alpha=0:pi/50:2*pi;
    x=Rs*cos(alpha)+xc;
    y=Rs*sin(alpha)+yc;
    plot(x,y,'-b');
    plot(x,y,'-r');
end
```

A.2 基于数学形态学的太阳黑子自动识别程序

```
file=dir('test.jpg');
for ii=1:1
    I=imread(['./',file(ii).name]);
    [M,N]=size(I);
```

```
origI=I;
resultbw=zeros(M,N);
radius=sunradius(ii);
figure,imshow(I);
hold on
text(900,900,'(a)', 'FontSize',15,'color','y');
R=30;
se=strel('disk',R);
fo=imclose(I,se);
for i=1:R
for j=1:N
fo(i,j)=I(i,j);
end
end
for i=M-R+1:M
for j=1:N
fo(i,j)=I(i,j);
end
end
for i=1:M
for j=1:R
fo(i,j)=I(i,j);
end
end
for i=1:M
for j=N-R+1:N
fo(i,j)=I(i,j);
end
```



```

end
figure,imshow(fo,[]);
hold on
text(900,900,'(b)', 'FontSize',15,'color','y');
f2=imsubtract(fo,I);
figure,imshow(f2,[]);
hold on
text(900,900,'(c)', 'FontSize',15,'color','y');
range=max(max(f2))-min(min(f2));
bw=im2bw(f2 > 0.15 × range);
tempimg=f2(1:1000,100:900);
tempbw=im2bw(tempimg>0.2 × range);
bw(1:1000,100:900)=tempbw;
count=0;
hold on;
resultbw=bw;
count=0;
figure,imshow(resultbw);
hold on
text(900,900,'(d)', 'FontSize',15,'color','y');
totalarea=0;
[L1 num1]=bwlabel(resultbw,8);
S=regionprops(L1,'Centroid','Area','PixelList');
figure, imshow(I);
hold on
text(900,900,'(e)', 'FontSize',15,'color','y');
for test=1:num1
if S(test).Area > 0

```

```

maxpix=0; minpix=256;
for j=1:S(test).Area
m=S(test).PixelList(j,1);
n=S(test).PixelList(j,2);
if (I(n,m)> maxpix) maxpix=I(n,m); end
if (I(n,m) < minpix) minpix=I(n,m); end
end
if maxpix-minpix > 5
for j=1:S(test).Area
m=S(test).PixelList(j,1);
n=S(test).PixelList(j,2);
I(n,m)=0;
hold on;
plot(m,n,'r');
end
sd=(S(test).Area×(10)6/(pi× radius × radius));
totalarea=round(totalarea+sd);
count=count+1;
end
end
end
disp(['日面太阳黑子数为: ' num2str(count)]);
disp(['日面太阳黑子面积为: ' num2str(totalarea)]);
end

```

参考文献

- [1] 李蓉, 崔延美, . . 基于支持向量机和k近邻的太阳质子事件预报模型. 科学技术与工程 7, 15 (2007), 3649–3654.
- [2] 吴琴娣, 周树荣, . 太阳耀斑与黑子群面积的关系. 紫金山天文台台刊, 1 (2000), 8–11.
- [3] 张翔, 刘媚洁, . 基于数学形态学的边缘提取方法. 电子科技大学学报 31, 5 (2002), 490–493.
- [4] 康牧, 许庆功, . 一种roberts自适应边缘检测方法. 西安交通大学学报 42, 10 (2008), 1240–1244.
- [5] 陈岚岚, . 数学形态学在图像处理中的应用. 现代电子技术 40, 8 (2002), 18–20.
- [6] 张永亮, . 基于prewitt算子的计算机数字图像边缘检测改进算法. 解放军理工大学学报:自然科学版 6, 1 (2005), 44–46.
- [7] 孙增国, . 基于laplacian算子的图像增强. 计算机应用研究 24, 1 (2007), 222–223.
- [8] 王磊, . Otsu方法在多阈值图像分割中的应用. 计算机工程与设计 29, 11 (2008), 2844–2845.
- [9] 我国历代太阳黑子记录的整理和活动周期的探讨. 天文学报, 2 (1976).
- [10] 松竹. 最早的太阳黑子记录. 中国科技史杂志, 3 (1984), 31–31.
- [11] 林元章. 太阳物理导论. 科学出版社, 2000.
- [12] 余成波. 数字图像处理及MATLAB实现. 重庆大学出版社, 2003.
- [13] 王咏胜. 基于数学形态学的灰度图像的边缘检测技术研究. PhD thesis, 哈尔滨工程大学, 2005.

- [14] 邢军. 基于sobel算子数字图像的边缘检测. *微机发展* 15, 9 (2005), 48–49.
- [15] 冈萨雷斯[美]. 数字图像处理(MATLAB版). 电子工业出版社, 2006.
- [16] 陈方昕. 基于区域生长法的图像分割技术. *科技信息:科学教研*, 15 (2008), 58–59.
- [17] 彭慧玲. 基于数学形态学的边缘检测研究. PhD thesis, 辽宁工程技术大学, 2011.
- [18] ALBREGTSEN, F., AND MALTBY, P. New light on sunspot darkness and the solar cycle. *Nature* 274, 274 (1978), 41–42.
- [19] ASCHWANDEN, M. J. Image processing techniques and feature recognition in solar physics. *Solar Physics* 262, 2 (2009), 235–275.
- [20] BECKERS, J. M., AND TALLANT, P. E. Chromospheric inhomogeneities in sunspot umbrae. *Solar Physics* 7, 3 (1969), 351–365.
- [21] BENKHALIL, A., ZHARKOVA, V. V., ZHARKOV, S., AND IPSON, S. Active region detection and verification with the solar feature catalogue. *Solar Physics* 235, 1 (2006), 87–106.
- [22] BENKHALIL, A., ZHARKOVA, V. V., ZHARKOV, S., IPSON, S., BENKHALIL, A., AND IPSON, S. Automatic identification of active regions (plages) in the full-disk solar images using local thresholding and region growing techniques. In *Aisb'03 Symposium on Biologically-Inspired Machine Vision, Theory and Application* (2003), pp. 66–73.
- [23] BERNASCONI, P. N., RUST, D. M., AND HAKIM, D. Advanced automated solar filament detection and characterization code: Description, performance, and results. *Solar Physics* 228, 1-2 (2005), 97–117.
- [24] BERRILLI, F., MORO, D. D., FLORIO, A., AND SANTILLO, L. Segmentation of photospheric and chromospheric solar features. *Solar Physics* 228, 1 (2005), 81–95.

- [25] BOBRA, M. G., AND COUVIDAT, S. Solar flare prediction using sdo/hmi vector magnetic field data with a machine-learning algorithm. *Astrophysical Journal* 798, 2 (2014).
- [26] BORDA, R. A. F., MININNI, P. D., MANDRINI, C. H., GÓMEZ, D. O., BAUER, O. H., AND ROVIRA, M. G. Automatic solar flare detection using neural network techniques. *Solar Physics* 206, 2 (2002), 347–357.
- [27] BURT, P. J., AND ADELSON, E. H. The laplacian pyramid as a compact image code. *Readings in Computer Vision* 31, 4 (1983), 532–540.
- [28] CARBONELL, M., AND BALLESTER, J. L. The periodic behaviour of solar activity - the near 155-day periodicity in sunspot areas. *Astronomy & Astrophysics* 255 (1992), 350–362.
- [29] COLAK, T., AND QAHWAJI, R. Automatic sunspot classification for real-time forecasting of solar activities. In *International Conference on Recent Advances in Space Technologies* (2007), pp. 733–738.
- [30] COLAK, T., AND QAHWAJI, R. Automated mcintosh-based classification of sunspot groups using mdi images. *Solar Physics* 248, 2 (2008), 277–296.
- [31] COLLIN, B., AND NESMERIBES, E. Pattern recognition applied to halpha spectroheliograms solar rotation and meridional circulation. In *ESA Special Publication* (1992), pp. 145–148.
- [32] CURTO, J. J., BLANCA, M., AND MARTÍNEZ, E. Automatic sunspots detection on full-disk solar images using mathematical morphology. *Solar Physics* 250, 2 (2008), 411–429.
- [33] DASI-ESPUIG, M., SOLANKI, S. K., KRIVOVA, N. A., CAMERON, R., AND PE?UELA, T. Sunspot group tilt angles and the strength of the solar cycle. *Astronomy & Astrophysics* 556, 22 (2013), 363–369.
- [34] DELOUILLE, V., MAMPAEY, B., VERBEECK, C., AND VISSCHER, R. D. The spoca-suite: a software for extraction and tracking of active regions and coronal holes on euv images. *Astronomy & Astrophysics* 561 (2012), A29.

- [35] DJAFER, D., IRBAH, A., AND MEFTAH, M. Identification of sunspots on full-disk solar images using wavelet analysis. *Solar Physics* 281, 2 (2012), 863–875.
- [36] DU, Z. L., AND WANG, H. N. The relationships of solar flares with both sunspot and geomagnetic activity. *Research in Astronomy & Astrophysics* 12, 4 (2012), 400–410.
- [37] EVERSHERD, J. *Radial movement in sun-spots*. Associated Publishing House,.
- [38] FULLER, N., AND ABOUDARHAM, J. Automatic detection of solar filaments versus manual digitization. *Lecture Notes in Computer Science* 3215 (2004), 467–475.
- [39] FULLER, N., ABOUDARHAM, J., AND BENTLEY, R. D. Filament recognition and image cleaning on meudon h α spectroheliograms. *Solar Physics* 227, 1 (2005), 61–73.
- [40] GALLAGHER, P. T., DENKER, C., YURCHYSHYN, V., AND SPIROCK, T. Solar activity monitoring and forecasting capabilities at big bear solar observatory. *Annales Geophysicae* 20, 7 (2002), 1105–1115.
- [41] GALLAGHER, P. T., MOON, Y. J., AND WANG, H. Active-region monitoring and flare forecasting II. data processing and first results. *Solar Physics* 209, 1 (2002), 171–183.
- [42] GAO, J., WANG, H., AND ZHOU, M. Development of an automatic filament disappearance detection system. *Solar Physics* 205, 1 (2002), 93–103.
- [43] GIOVANELLI, R. G. The relations between eruptions and sunspots. *Astrophysical Journal* 89, 5 (1939), 555–567.
- [44] GOEL, S., AND MATHEW, S. K. Automated detection, characterization, and tracking of sunspots from soho/mdi continuum images. *Solar Physics* 289, 4 (2014), 1413–1431.

-
- [45] GYORI, L., BARANYI, T., AND LUDMÁNY, A. Photospheric data programs at the debrecen observatory. *Proceedings of the International Astronomical Union* 6, S273 (2010), 403–407.
- [46] HARALICK, R. M., STERNBERG, S. R., AND ZHUANG, X. Image analysis using mathematical morphology. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence* 9, 4 (1987), 532–550.
- [47] HATHAWAY, D. H., WILSON, R. M., AND REICHMANN, E. J. Group sunspot numbers: Sunspot cycle characteristics. *Solar Physics* 211, 1-2 (2002), 357–370.
- [48] HIGGINS, P. A., GALLAGHER, P. T., MCATEER, R. T. J., AND BLOOMFIELD, D. S. Solar magnetic feature detection and tracking for space weather monitoring. *Advances in Space Research* 47, 12 (2011), 2105–2117.
- [49] HONG-QI, ZHANG, DONG-GUANG, WANG, YUAN-YONG, DENG, KE-LIANG, JIANG-TAO, JIA-BEN, AND GANG-HUA. Solar magnetism and the activity telescope at hsos. *中国天文和天体物理学报:英文版* 7, 2 (2007), 281–288.
- [50] HOYT, D. V., AND SCHATTEN, K. H. Group sunspot numbers: A new solar activity reconstruction. *Solar Physics* 181, 181 (1998), 491–491.
- [51] JIANG, J., CAMERON, R. H., AND SCHUESSLER, M. The cause of the weak solar cycle 24. *Astrophysical Journal* 808, 1 (2015).
- [52] JOSHI, A. D., SRIVASTAVA, N., AND MATHEW, S. K. Automated detection of filaments and their disappearance using full-disc h α images. *Solar Physics* 262, 2 (2009), 425–436.
- [53] LIU, Y., KUROKAWA, H., KITAI, R., UENO, S., AND SU, J. T. A study on surges: I. automatic detection of dynamic h α dark features from high-cadence full-disk observations. *Solar Physics* 228, 1-2 (2005), 149–164(16).

- [54] MCATEER, R. T. J., GALLAGHER, P. T., IRELAND, J., AND YOUNG, C. A. Automated boundary-extraction and region-growing techniques applied to solar magnetograms. *Solar Physics* 228, 1 (2005), 55–66.
- [55] MCINTOSH, P. S. The classification of sunspot groups. *Solar Physics* 125, 2 (1990), 251–267.
- [56] NGUYEN, T. T., WILLIS, C. P., PADDON, D. J., AND NGUYEN, H. S. A hybrid system for learning sunspot recognition and classification. In *International Conference on Hybrid Information Technology* (2006), pp. 257–264.
- [57] OHTSU, N. A threshold selection method from gray-level histograms. *Systems Man & Cybernetics IEEE Transactions on* 9, 1 (1979), 62–66.
- [58] OLMEDO, O., ZHANG, J., WECHSLER, H., POLAND, A., AND BORNE, K. Automatic detection and tracking of coronal mass ejections in coronagraph time series. *Solar Physics* 248, 2 (2008), 485–499.
- [59] PODLADCHIKOVA, O., AND BERGHMANS, D. Automated detection of eit waves and dimmings. *Solar Physics* 228, 1 (2005), 265–284.
- [60] PREMINGER, D. G., WALTON, S. R., AND CHAPMAN, G. A. Solar feature identification using contrasts and contiguity. *Solar Physics* 202, 1 (2001), 53–62.
- [61] QU, M., SHIH, F., JING, J., AND WANG, H. Automatic solar flare tracking using image-processing techniques. *Solar Physics* 222, 1 (2004), 137–149.
- [62] QU, M., SHIH, F. Y., JING, J., AND WANG, H. Automatic solar flare detection using mlp, rbf, and svm. *Solar Physics* 217, 1 (2003), 157–172.
- [63] QU, M., SHIH, F. Y., JING, J., AND WANG, H. Automatic solar filament detection using image processing techniques. *Solar Physics* 228, 1-2 (2005), 119–135.

-
- [64] QU, M., SHIH, F. Y., JING, J., AND WANG, H. Automatic detection and classification of coronal mass ejections. *Solar Physics* 237, 2 (2006), 419–431.
- [65] SAMMIS, I., TANG, F., AND ZIRIN, H. The dependence of large flare occurrence on the magnetic structure of sunspots. *Astrophysical Journal* 540, 1 (2008), 583–587.
- [66] SCHATTEN, K. H., AND HEDIN, A. E. A dynamo theory prediction for solar cycle 22: Sunspot number, radio flux, exospheric temperature, and total density at 400 km. *Geophysical Research Letters* 11, 9 (1986), 873 – 876.
- [67] SCHWABE, S. H. Sonnenbeobachtungen im jahre 1843. von herrn hofrath schwabe in dessau. *Astronomische Nachrichten* 21, 17, 233.
- [68] SEZGIN, M., AND SANKUR, B. *Survey over image thresholding techniques and quantitative performance evaluation*. Journal of Electronic Imaging, 2004.
- [69] SHIH, F. Y., AND KOWALSKI, A. J. Automatic extraction of filaments in h α solar images. *Solar Physics* 218, 1-2 (2003), 99–122.
- [70] STEINEGGER, M., BONET, J. A., VÁZQUEZ, M., AND JIMÉNEZ, A. *On the Intensity Thresholds of the Network and Plage Regions*. Springer Netherlands, 1998.
- [71] TURMON, M., JONES, H. P., MALANUSHENKO, O. V., AND PAP, J. M. Statistical feature recognition for multidimensional solar imagery. *Solar Physics* 262, 2 (2010), 277–298.
- [72] TURMON, M., MUKHTAR, S., AND PAP, J. Bayesian inference for identifying solar active regions. *Proc Knowledge Discovery & Data Mining* (2000).
- [73] WANG, H., LIU, C., WANG, S., DENG, N., XU, Y., JING, J., AND CAO, W. Study of rapid formation of a delta sunspot associated with the 2012 july 2 c7.4 flare using high-resolution observations of new solar telescope. *Astrophysical Journal Letters* 774, 2 (2013), 61–66.

- [74] WANG, X., SU, J., AND ZHANG, H. The non-uniform pattern in full-disc vector magnetograms and its correction. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 387, 4 (2008), 1463 – 1469.
- [75] WATSON, F., FLETCHER, L., DALLA, S., AND MARSHALL, S. Modelling the longitudinal asymmetry in sunspot emergence: The role of the wilson depression. *Solar Physics* 260, 1 (2009), 5–19.
- [76] WIEGELMANN, T., INHESTER, B., LAGG, A., AND SOLANKI, S. K. How to use magnetic field information for coronal loop identification. *Solar Physics* 228, 1 (2005), 67–78.
- [77] YOUNG, C. A., AND GALLAGHER, P. T. Multiscale edge detection in the corona. *Solar Physics* 248, 2 (2008), 247–259.
- [78] YUAN, Y., SHIH, F. Y., JING, J., WANG, H., AND CHAE, J. Automatic solar filament segmentation and characterization. *Solar Physics* 272, 272 (2011), 101–117.
- [79] ZENG, Z. X., WEI, Y. L., AND LIU, J. S. *A Method to Automatic Detecting Coronal Mass Ejections in Coronagraph Based on Frequency Spectrum Analysis*. Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [80] ZHANG, J., WANG, Y., AND LIU, Y. Statistical properties of solar active regions obtained from an automatic detection system and the computational biases. *Astrophysical Journal* 723, 2 (2016), 1006–1018.
- [81] ZHARKOV, S., ZHARKOVA, V., IPSON, S., AND BENKHALIL, A. Technique for automated recognition of sunspots on full-disk solar images. *Eurasip Journal on Advances in Signal Processing* 2005, 15 (2005), 2573–2584.
- [82] ZHARKOVA, V., IPSON, S., BENKHALIL, A., AND ZHARKOV, S. Feature recognition in solar images. *Artificial Intelligence Review* 23, 3 (2005), 209–266.

-
- [83] ZHARKOVA, V. V., AND SCHETININ, V. A neural-network technique for recognition of filaments in solar images. In *International Conference on Knowledgebased Intelligent Information & Engineering Systems Kes* (2005), pp. 148–154.
- [84] ZIRIN, H., AND STEIN, A. Observations of running penumbral waves. *Astrophysical Journal* 178, 2 (1973), L85.

发表文章及其它科研成果目录

[1] 发表文章列表:

- (1) Cui Zhao, GangHua Lin, YuanYong Deng and Xiao Yang. Automatic Recognition of Sunspots in HSOS Full-Disk Solar Images[J]. Publications of the Astronomical Society of Australia(PASA), 2016, 33.(SCI)
- (2) 赵翠, 林钢华, 邓元勇,等. 怀柔太阳观测基地数据流量统计系统设计与实现[J]. 天文研究与技术, 2014(3).(国内核心期刊)
- (3) Lin G, Zhao C, Yang X. A complete solar eruption activity processing tool with robotization and real time (II)[J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2014, 9152(2):175.

[2] 专利、软件著作权列表:

- 赵翠、林钢华、邓元勇, 一种基于怀柔全日面单色像的太阳黑子自动识别方法.专利号: 201510067024.3, 受理
- 赵翠、邓元勇、林钢华, 中国巨型太阳望远镜科学文件在线管理系统.登记号: 2014SR154150
- 赵翠、邓元勇、林钢华, 怀柔太阳观测基地内部管理系统.登记号: 2014SR154148
- 赵翠、林钢华、邓元勇, 怀柔太阳观测基地数据流量统计系统. 登记号: 2014SR154152

[3] 主持基金列表:

- 国家自然科学基金(青年科学基金项目),太阳黑子高精度的自动识别及其分群方法研究,2015-01-01——2017-12-31,基金号: 11403058

简 历

基本情况

赵翠，女，湖北省潜江人，1986 年 12 月出生，中国科学院国家天文台在读博士研究生。

教育状况

2004 年 9 月至 2008 年 7 月，武汉大学测绘学院，本科，专业：测绘工程。

2008 年 9 月至 2011 年 7 月，中国科学院国家天文台，硕士，专业：天文技术与方法。

导师：林钢华研究员

2012 年 9 月至今，中国科学院国家天文台，博士研究生，专业：天文技术与方法。

导师：邓元勇、林钢华研究员

工作经历

2011 年 7 月至 2014 年 7 月，中国科学院国家天文台，助理工程师。

2014 年 7 月至今，中国科学院国家天文台，工程师。

研究兴趣

天文图像处理，天文数据库设计及软件系统研发。

联系方式

通讯地址：北京市朝阳区大屯路甲20号国家天文台

邮编：100012

E-mail: zhaocui@bao.ac.cn

致 谢

四年的博士生活即将划上句号，回首走过的岁月，心中充满感激，感激在我生活中走过的人、感激在工作和生活中给予我指引和帮助的人。

首先，感谢我的导师邓元勇研究员和林钢华研究员。邓老师是一位沟通和理解能力极强的老师。他对我工作的每每点拨都能让我茅塞顿开、为我的学习和工作指明方向。在与邓老师沟通的过程中，总能让我学到很多东西。林老师学识渊博、为人严谨求实，悉心指导我的研究方向和工作，并为我提供了很多学习机会，提升了我的科研能力和理论水平，正因为她的帮助，才使我真正完成了由一个科学的门外汉向一个科研工作者的转变，使我的博士论文得以顺利完成。林老师不仅在工作上给予我极大的支持和帮助，而且在生活上也非常细心，大事小事经常为我考虑。我很荣幸在学习生涯中，能够遇到如此一位温和细心、对学生关怀备至的好老师！谨在此向两位恩师表示最崇高的敬意和最衷心的感谢。

其次，感谢跟我在一个团组的师兄师姐、师弟师妹们。跟我在同一办公室的王晓帆师兄学识渊博，对我的工作给予了很多指导；杨潇师姐乐于助人，思虑周全，对我的工作和生活给予了很多很多帮助；侯俊峰善于思考、对待工作认真、积极的态度让我印象深刻。还要感谢张洪起研究员、张枚研究员、王东光总工程师、苏江涛研究员、姜杰研究员，你们学术渊博、工作努力认真，是我学习的榜样！感谢王薏老师，您乐观开朗的性格，对待我如家人和朋友一般，非常感激！同时要感谢怀柔基地的如下同事和同学们：郭娟、陈洁、高裕、杨尚斌、徐海清、腾飞、刘锁、李坦达、林佳本、张志勇、孙英姿、孙文君、曾真、汪国萍、荆帅、王绚、张鼎波、阮文东、王立东、杨桂莲、包亚东、白先勇、宋永亮、郭晶晶、张洋、魏烨艳、张小敏、Priya,T.G.，在这样的团组中，我深深地感受到了怀柔基地是一个温暖的大家庭。另外，还要特别感谢北师大的毛信杰教授，帮助我修改学术论文、在生活中也对我关怀备至！

感谢对我的博士论文进行评阅的几位老师，你们花费了大量宝贵时间和精力来阅读论文，并给予了非常宝贵的建议。这不但提升了论文质量，也使我更加明晰了深入进行科研工作的方向，在此深表感谢！

最后，不得不说的是，感激我的父母对我无尽的包容与关爱！感激一直陪

伴我的爱人柯宝贵，他热爱科研和科学，对我的工作给予了极大的支持和鼓励！也要感激我的婆婆田云娣女士，在我读书期间，她不但细心地帮我照顾我的孩子，也把家里打理的整洁、干净，让我没有了后顾之忧！感谢我可爱的孩子柯其昕，你的降临给妈妈的学习生涯和生活带来了特别的意义！

要感谢的人太多太多、在此不一一列出，祝福你们都身体健康、生活幸福美满！

赵翠

2016年4月