

谨以此论文献给伴我前行的人们

-----XXX

多源卫星西北太平洋热带气旋风场信息提取研究

学位论文答辩日期: _____

指导教师签字: _____

答辩委员会成员签字: _____

独 创 声 明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含未获得(注：如没有其他需要特别声明的，本栏可空)或其他教育机构的学位或证书使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文作者签名： 签字日期： 年 月 日

学 位 论 文 版 权 使用 授 权 书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，并同意以下事项：

- 1、学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。
- 2、学校可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。同时授权清华大学“中国学术期刊(光盘版)电子杂志社”用于出版和编入 CNKI《中国知识资源总库》，授权中国科学技术信息研究所将本学位论文收录到《中国学位论文全文数据库》。(保密的学位论文在解密后适用本授权书)

学位论文作者签名： 导师签字：

签字日期： 年 月 日 签字日期： 年 月 日

多源卫星西北太平洋热带气旋风场信息提取研究

摘要

西北太平洋热带气旋是对东南亚国家和地区危害性最大的中尺度极端天气系统，研究热带气旋风场对减少其造成的经济损失和人员伤亡至关重要，同时有助于提高人们对海气相互作用、全球气候变化过程等的认识。受观测技术和成本等因素的限制，目前尚难获取热带气旋内核风场的常规观测资料，这使得人们对于其内核结构和物理过程的理解受到限制，从而直接影响了业务预报的准确性。长期以来，研究人员利用气象卫星云图数据进行了大量反演热带气旋风场的尝试，但是这些研究局限于大西洋，且高度依赖于飞机侦测资料。本文利用卫星云图、JTWC (Joint Typhoon Warning Center) 台风最优路径数据、SHIPS (Statistical Hurricane Intensity Prediction Scheme) 统计模型数据以及 QuikSCAT 海面风场数据开展西北太平洋热带气旋风场信息提取方法研究。

热带气旋中心的实时精确定位是天气预报最关心的问题之一，也是利用卫星云图提取热带气旋海表面风场的基础。本论文根据热带气旋红外和水汽通道卫星云图数据，结合数学形态学原理和数字图像处理技术，利用卫星云图提取热带气旋螺旋云带主体云系；对有眼气旋，基于云顶亮温梯度矢量场的散度场和涡度场进行有眼热带气旋中心定位；对无眼气旋，通过构造双高斯混合模型曲线，计算以热带气旋主体云系感兴趣区域内所有点为参考的云顶亮温廓线，比较高斯模型曲线与计算得到的亮温廓线得到两者之间的相关系数矩阵，基于相关系数矩阵进行无眼热带气旋中心定位。实验结果表明：利用本论文方法得到的热带气旋中心位置与 JTWC 最优路径数据一致，定位误差稳定，平均距离偏差约 30km。

强度是衡量热带气旋破坏力的主要指标，也是决定热带气旋风场结构的关键参数。本论文改进了热带气旋强度估计 DAV-T 技术，提出了描述热带气旋发展程度的无量纲参数；利用卫星云图云顶亮温廓线计算了用于描述热带气旋内核、眼区、螺旋云带和外核区域尺度及特征的多个参量；通过逐步回归建立了估计热带气旋强度的线性模型。模型估计得到热带气旋强度与 JTWC 最优路径数据之间的平均绝对误差小于 10 节，结果表明该模型能够比较准确地估计热带气旋强度，尤其对强台风系统效果更好。

在利用卫星云图得到热带气旋中心位置和强度之后，本文利用卫星云图发展热带气旋最大风速半径及其他关键风速节点的估计方法；利用 SHIPS 统计模型数据训练利用卫星云图估计 850 hPa 高度距离热带气旋中心 500km 处的切向风速的方法，并将其校准到海表面高度；根据热带气旋最外围环流区域无强对流的假设，利用打靶法数值求解估算热带气旋和环境风场不可区分的半径位置 R_0 ；利用上述得到的所有信息训练热带气旋切向风场 Wood-white 参数化模型；拟合得到切向风的径向廓线；通过叠加热带气旋移动矢量获得完整的二维热带气旋海表面风场。

本论文利用 QuikSCAT 观测到的热带气旋海表面风场数据与本文结果进行对比分析，并讨论散射计在热带气旋内核风场观测、强度估计等方面存在的问题。结果表明利用卫星云图数据提取热带气旋海表面风场的方法能够比较准确地得到热带气旋海表面风场的结构特征。论文研究对于利用卫星云图数据研究热带气旋中心定位、强度、尺度、海表面风场等具有参考意义。

关键词：海表面风场，热带气旋强度，中心定位，关键风速节点，卫星云图，

QuikSCAT

Tropical Cyclone Winds Estimation Using Multiple-Platform Satellite Data

Abstract

Tropical Cyclones (TCs) in the Northwestern Pacific are some of the most devastating extreme mesoscale synoptic systems which cause extensive economical losses and casualties of the east and northeast Asia each year, it is therefore of great importance to advance our understanding concerning the structure, especially the surface wind structure, of such natural hazards. Unfortunately, because of the limitation of observation techniques, the cost of air reconnaissance and the paucity of novel field measurements, our current knowledge regarding the inner core structure and processes of TCs is quite superficial, which, as a consequence, lead to problems and errors in operational forecast. In the past few decades, researchers have been endeavored in training algorithms to retrieve surface winds of TCs from geostationary satellite images. However, these studies are highly dependent upon air reconnaissance and are limited to the Atlantic Ocean. Therefore, in this study, we attempt to develop objective techniques to estimate the sea surface winds of TCs in the absence of aircraft reconnaissance. The inputs in this study include the satellite images, the best track information derived from the Joint Typhoon Warning Center (JTWC), the model outputs of the Statistical Hurricane Intensity Prediction Scheme (SHIPS) and the QuikSCAT observed seas surface winds.

The basis for precisely estimating the surface winds of TCs lies in the accurate estimation of TC centers. Therefore, a new technique, based on the differences between infrared (IR) and water vapor (WV) channel cloud-top brightness temperatures (BTs), and in combination with the mathematical morphology principles and digital image processing techniques, is proposed to extract the main cloud cluster of TCs from the satellite images. Then, two different techniques are developed to objectively locate TC centers from satellite images. For TCs with visible eyes, the BT gradients are computed and rotated anticlockwise by an angle of $\pi/5$ to reconstruct the convergence and vorticity pattern of cyclone. The combination of vorticity and divergence of the BT gradients, which we called the combined field, is used to seek the TC center. For non-eye TCs, based on the general pattern of their BT profiles, a specific double Gauss mixture model is built to match with the region of interest within the main cloud cluster, this produce a correlative coefficient matrix which is then used to determine the TC centers. Experiments results show a steady root-mean-square Euclidean distance error of around 30km compared to the JTWC best-track, indicating that the techniques introduced in this paper, especially the one for eye-cyclones, are robust enough for operational use.

Intensity, indicating the damage potential of TCs, is one of the most important factors deciding TCs' structure in numerical simulation works. A linear regression model for

estimating the current intensity of TCs using signals extracted from satellite images is presented. The intensity is correlated to some critical signals extracted from the satellite IR images, by training the 325 tropical cyclone cases from 1996-2007 typhoon season. To begin with, deviation angles and radial profiles of IR images are calculated to extract as much potential predators for intensity as possible. These predators are examined strictly and included into (or excluded from) the initial predictor pool for regression manually. Then, the “thinned” potential predictor pool are regressed to the intensity by performing a stepwise regression procedure, according to their accumulated variance contribution rates to the model. Finally, the regressed model is verified using 52 cases from 2008-2009 typhoon season. The R-square and Root Mean Square Error are 0.77 and 12.01 knot in the independent validation tests respectively. Analysis results demonstrate that this model performs well for strong typhoons, but produces relatively large errors for weak tropical cyclones.

When the TC center and intensity are available, it is still needed to determine the Radius of Maximum Winds (R_{MAX}) for building the profile of the symmetry tangential wind profile. Therefore, a simple technique is proposed to determine R_{MAX} based on previous studies. In addition, for more accurately depicting the wind profile, a general cluster of techniques are developed to estimate the critical wind points R34, R50, and R64 from satellite images. Furthermore, the tangential wind azimuthally averaged at radius of 500km and 850 hPa height (V500) derived from SHIPS is used to train a method to estimate it from satellite images. The V500 is then adjusted to the surface by a reduction factor of 0.75. Finally, by assuming that there is no strong convective at the outermost region far away from the inner core, the radius at which the TCs cannot be distinguished from the background is calculated by the shooting method using all above winds and their radius.

With all above wind points estimated, the Wood-white parametric model is adopted and trained to construct the symmetry part of the surface winds, the full 2-D surface winds is eventually achieved under the hypothesis that the TC motion vector is the only contributor to the wind asymmetry. For validating the methods introduced in this paper, the QuikSCAT sea surface winds are used to make comparative analysis. Results demonstrate that the techniques proposed in this study can be used to estimate the basic structure of the TCs’ surface winds from satellite images, while it is still needed to improve the technique for estimating the asymmetry surface radial winds. In addition, the weakness of scatterometer in monitoring the inner core and estimating the intensity of TCs is discussed by comparing with techniques developed in this paper. In summary, this paper could provide references for TC center location, intensity estimation, size climatology, surface winds analysis and other related research.

Key Words: Sea Surface Winds, Tropical Cyclone Intensity, Center Location, Critical Wind Points, Satellite Images, QuikSCAT

目 录

1. 引言	1
1.1 背景介绍.....	1
1.2 研究现状.....	2
1.2.1 热带气旋风场观测进展.....	2
1.2.2 基于卫星云图的热带气旋强度研究.....	4
1.2.3 基于卫星云图的热带气旋风场结构研究.....	7
1.3 本文研究内容和架构安排.....	8
2. 数据介绍	10
2.1 多源卫星平台云图数据集.....	10
2.2 QuikSCAT 海面风场数据	11
2.3 JTWC 台风最优路径数据	12
2.4 SHIPS 统计模型资料	12
3. 热带气旋中心定位	13
3.1 热带气旋主体云系提取.....	13
3.2 有眼热带气旋中心定位.....	15
3.2.1 卫星云图云顶亮温梯度矢量场.....	15
3.2.2 基于卫星云图的有眼热带气旋中心定位.....	17
3.3 无眼热带气旋中心定位.....	19
3.4 结果和讨论.....	22
3.5 小结.....	24
4. 热带气旋强度估计模型	25
4.1 模型训练.....	25
4.1.1 DAV-T 技术的改进与参数化	25
4.1.2 卫星云图关键信息提取.....	28
4.1.3 热带气旋强度多元线性回归模型.....	30
4.2 模型验证与评价.....	33
4.2.1 依赖性检验.....	33
4.2.2 独立性验证.....	35
4.3 模型讨论.....	37
4.4 小结.....	39
5. 热带气旋海表面风场提取	40
5.1 卫星云图云顶亮温预处理.....	42
5.2 热带气旋关键风速节点估计.....	44
5.2.1 最大风速半径.....	44
5.2.2 其他关键风速节点.....	46
5.2.3 二维风场构建.....	51
5.3 与 QuikSCAT 的对比分析.....	56
5.4 小结.....	64
6. 总结和展望	65
参考文献	67

1. 引言

1.1 背景介绍

热带气旋(Tropical Cyclone)是一种生成于热带或副热带洋面上具有暖心结构的中尺度涡旋低压系统，其主要活动区域包括西北太平洋、东北太平洋、北大西洋、北印度洋、南太平洋和南印度洋。人们按照习惯对不同海域生成的热带气旋命名不同。北大西洋和东北太平洋热带气旋通常被称为飓风(Hurricane)，印度洋热带气旋被称作热带风暴(Tropical Storm)，而在西北太平洋和东南亚海域生成的热带气旋则通常被称为台风(Typhoon)。根据美国关岛联合台风预警中心 JTWC (Joint Typhoon Warning Center)发布的 1965-2014 年热带气旋活动统计数据，西北太平洋是全球海域中热带气旋发生频数最多的海域之一，平均每年约有 28 个热带气旋生成，其中超过 8 个达到强台风级别(最大持续风速大于 96 节，1 节 $\approx 0.514\text{m/s}$)。

热带气旋对于海洋生态系统、海洋环境和全球气候调节等具有重要作用。同时，伴随热带气旋发生的暴风、强降雨和风暴潮等恶劣天气现象，往往造成严重的灾害，这些灾害具有突发性强，可预报性低，影响范围大等特征。观测表明，多数热带气旋系统通常在热带洋面生成后途径亚热带海域最终到达中高纬度地区转为温带气旋，给中纬度沿海城市和地区造成极大经济损失，例如，2005 年的“卡特里娜”飓风将新奥尔良市一夜之间变为废墟，2013 年的台风“海燕”造成数千人死亡。因此，准确实时的天气预报对于减少热带气旋造成的灾害至关重要。为此，当前最重要的是提高我们对于热带气旋物理机制的认识，从而更为全面的理解热带气旋的生成、发展以及衰亡期间的热动力过程。

目前，我们对于热带气旋结构的认知十分有限。一方面是由于热带气旋结构的复杂性所致，另一方面归咎于所能获取到的有效观测资料的限制。由于热带气旋主要发生在热带洋面上，现场观测资料十分匮乏，幸运的是，自上世纪 70 年代人类开始进入卫星时代，一系列卫星观测技术包括光学、微波、雷达等的不断发展为热带气旋观测和研究提供了新的思路和方法。研究人员借助于卫星观测资料展开的一系列研究，使得我们对热带气旋水平风场和气压场分布的认识得到了不断地提升。早期，借助于对地静止气象卫星获得的云图影像资料，研究人员建立了系统的热带气旋强度判别技术，近年来这些技术得到了不断的发展和提高。但是目前关于热带气旋水平风场的理解仍然主要依赖于飞机侦测[1]。

从 1991 年的 ERS 系列开始，到 NSCAT 和 QuikSCAT，再到目前业务化运行的 ASCAT、OSCAT、RapidScat 以及我国于 2011 年发射的搭载于“海洋-2”卫星上的 HY-2A/SCAT，散射计为观测热带气旋海表面风场提供了最为直接的数据资料。然而，由于工作方式及数据反演算法等问题，散射计在热带气旋海表面风场结构观测和研究方面仍然存在很多问题[2]。为此，研究人员一直致力于利用其他卫星观测资料间接地反演热带气旋海表面风场。其中研究最多的是利用红外和可见光云图反演热带气旋海表面风场并借助飞机侦测对结果进行校正和检验。

对于西北太平洋，因飞机侦测代价高、难度大等原因，数据资料非常稀缺，相关研究也相对较少。为此，本文在飞机侦测资料缺乏的条件下设法利用多源卫星平台数据建立适用于西北太平洋的热带气旋海表面风场提取方法。本文的研究结果对提高我们对热带气旋海表面风场的理解，尤其是对热带气旋强度和结构的认识具有参考意义，可为热带气旋预报相关工作提供支持。

1.2 研究现状

1.2.1 热带气旋风场观测进展

热带气旋内核的动力学过程的观测和再现到目前为止仍然是一个巨大的挑战，相关研究也主要依赖于飞机横穿气旋中心所获得的现场观测资料[1]。事实上，在众多的热带气旋风场观测技术当中，飞机侦测或是最佳选择。但是，由于外场飞机侦测实验代价巨大，很难对发生的每一个热带气旋都进行飞机现场观测从而获取风场、气压场、中心位置等信息[3]，所以目前我们仅能获取发生于大西洋和东北太平洋的部分热带气旋的飞机观测资料[4, 5]。在太平洋东部和中部，飞机侦察任务受美国国家飓风中心 NHC (National Hurricane Center) 所控制。而对于其他热带气旋常发生的海域，热带气旋内核风场结构测量则完全依赖于非常不确定的数据源，例如：船只，浮标和地面气象观测站等[2]。

下投式探空仪(dropwind-sonde)是一种从飞机或其他飞行平台上下投到大气中的探测仪器。该设备在下降的同时可以获取大气温、湿、压、风等气象要素。目前世界上能够提供高质量、高分辨率的大气剖面数据的下投式探空仪系统是 NCAR (National Center for Atmospheric Research) 的 AVAPS (Airborne Vertical Atmospheric Profiling System) 系统[6]，该系统观测数据自 1996 年开始用于热带气旋路径和强度预报[7]、动力和热动力结构[8]、热带气旋垂直风场剖面[1, 9]相关研究中。和飞机

侦测一样，下投式探空仪代价巨大，难以提供业务化连续观测数据资料。另外，下投式探空仪难以在强降雨天气下工作且不能探测 500m 以下海表面风场信息。

尽管飞机侦测和下投式探空仪可提供最为准确的热带气旋风场结构信息，但是由于上述代价、可操作性、实施难度等问题的限制，其业务化观测难以实现。为此，有必要寻找一个可替代观测平台或方法直接或间接地获取热带气旋风场信息。卫星海洋遥感关键技术的发展为此提供了可能。

星载微波散射计是监测全球海域海面风场的一种主动式微波雷达，随着微波散射计海面风场反演算法的不断改进和提高，散射计数据已经被广泛应用到了热带气旋的气候学[10-12]、数值模拟[13-15]、风场结构[16-18]等研究当中。受地球物理模式函数的限制，对于高风速海况(一般大于 20m/s)，散射计一般很难精确地反演得到海表面风场。另外，散射计的工作易受降雨和陆地的干扰。因此，散射计观测到的海面风场数据，仅对于研究强度较弱的热带气旋或距离热带气旋云墙大风区和强降雨带较远的热带气旋外围风场结构有效[2]。

近年来，星载被动微波成像仪，包括 NOAA 的 Advanced Microwave Sounding Unit (NOAA/AMSU)[19]，搭载于美国国防气象卫星计划上的 Special Sensor Microwave Imager (SSM/I)[20]，搭载于 Aqua 上的 Advanced Microwave Scanning Radiometer-E(AMSR-E)，以及 Tropical Rainfall Measurement Mission(TRMM) Microwave Imager (TMI)[21]等，逐渐被应用到热带气旋海表面风场观测研究中[22, 23]。这些传感器为热带气旋风场结构研究提供了宝贵的数据资料。相较可见光和红外传感器，星载被动微波成像传感器能够有效地捕捉到热带气旋底层环流结构信息[20]。然而同样受微波特性限制，微波成像仪也主要应用于热带气旋外围风场观测，同时受极轨卫星观测空间不连续等问题影响，微波成像仪难以提供实时连续的热带气旋风场信息[24]。

微波散射计和成像仪无法获取高时空分辨率的海面风场信息。微波辐射计和微波雷达高度计也只提供风速信息。合成孔径雷达(SAR)却能提供高分辨率的海表面风场数据。但是如同所有的微波传感器一样，SAR 向海面发射电磁波测量海面的后向散射系数，根据地球物理模式函数反演海表面风场，可以在任何天气状况下提供大范围覆盖的高分辨率海表面风场数据[25]。星载 SAR 数据自 20 世纪 80 年代中后叶开始就被广泛地应用到海表面风场提取研究中[26]。此后研究人员展开了大量利用 SAR 数据提取热带气旋风场信息关键参数的研究[27-30]。但是，同样受地

球物理模式函数的限制, SAR 在无雨、中低风速条件下提取海表面风场信息较为准确而在高风速海况下存在问题。另外, SAR 尽管能提供高空间分辨率数据, 但是仍然受较低的时间分辨率限制难以实现热带气旋的连续观测。

与微波遥感技术相比, 气象卫星可以连续观测热带气旋发生期间的高层大气和云过程, 其研究云、锋面和气旋等的能力已得到充分证明[31, 32]。对地静止气象卫星自 1970 年开始提供了近 40 年的热带和亚热带洋面红外和可见光云图数据。科研人员利用卫星云图数据发展了热带气旋强度估计、中心定位及路径追踪等技术, 其中较为著名的是 Dvorak 方法。近年来, 卫星云图数据逐渐被应用到热带气旋海表面风场提取当中。卫星云图的优点有: (1) 相对微波遥感和飞机侦测, 具有更高的时空分辨率。(2) 能够连续覆盖整个热带洋面, 从而提供热带气旋从生成、发展、增强直到消亡整个生命周期中几乎所有的关键云图信息, 可以白用来获取包括路径, 强度和其他一些结构参数。

尽管卫星遥感技术为间接获取热带气旋海表面风场提供了可能, 但是因时间和空间覆盖等问题, 很难实现利用某单一卫星对热带气旋进行连续观测, 解决办法之一是综合多源卫星平台数据各自的优势探索获取热带气旋海表面风场的技术[31, 33, 34]。本文综合利用对地静止气象卫星红外和水汽通道云图及微波散射计数据提取热带气旋海表面风场结构信息。

1.2.2 基于卫星云图的热带气旋强度研究

热带气旋强度, 通常用海表面最大持续风速或最低气压衡量(本论文中指最大持续风速), 是衡量热带气旋破坏能力的关键参数。目前对地静止气象卫星因其覆盖范围广且可连续观测的优点被认为是西北太平洋热带气旋强度监测的主要工具[35]。

利用卫星云图数据监测热带气旋强度的历史最早可以追溯到 1960s[36, 37]。Dvorak(1973)在总结前人研究结果的基础上提出了著名的 Dvorak 热带气旋强度估计技术(DT)[38, 39], 该方法至今仍被许多科研机构和天气预报中心沿用。Dvorak 方法概述了可见光云系形态变化与热带气旋强度发展之间的关系并给出了热带气旋强度发展的模型曲线集, 利用该技术估计气旋强度主要包括以下三个过程: (1) 对观测到的云图, 用热带气旋指数 T 定量描述内核(包括台风眼和眼壁)与外核螺旋云带, 将两者的 T 指数相加得到热带气旋的总气旋指数。(2) 根据热带气旋的发展趋势, 将其调整为当前强度指数[38]。(3) 最后通过查表, 将当前强度指数转化为 1-min

最大持续风速和中心最低海表面气压[40]。Dvorak 方法的主要缺点是：因为在整个方法执行过程中需要人为地将当前卫星云图和数据库进行比较，因此该方法高度依赖于天气预报人员的经验，主观性强，工作量大。Zehr(1989)[41]在原始 Dvorak 基础基础上初步讨论了数字 Dvorak 技术(Digital DT)。为了尽可能地克服 DT 方法的主观性，Velden (1997)[42]改进了 DT 技术并进一步发展了基于红外数字信息的客观 Dvorak 技术(Objective Dvorak Technique, ODT)，并用 1995 到 1996 期间发生于大西洋的飓风案例对该方法进行了验证分析。统计分析表明该方法能够和原始的 DT 方法相媲美，甚至在有些情况下具有更高精度[42]。但是 ODT 技术仅对强度达到热带风暴的热带气旋有效，同时热带气旋中心位置的确定仍然依靠外部数据源。

尽管 ODT 被许多热带气旋预警业务中心所采用，但是在使用的过程中发现了很多问题，这些问题的反馈使得 ODT 技术得以不断改进和提高，应用范围得以进一步拓展，云型分析和识别技术的主观性偏差得以进一步消除等[40]，Olander[43, 44]发展了改进的客观 Dvorak 技术(Advanced Objective Dvorak Technique, AODT)。DT 技术的最新版本是 Olander 和 Velden 于 2007 年发展的 ADT (The Advanced Dvorak Technique) 技术[45]。ADT 是基于原始 DT 技术的原理和规则并包含 ODT 技术和 AODT 技术的最新版本，该技术被证明能够提供全球海域热带气旋强度的准确估计。图 1-1 所示为 Dvorak 技术的发展过程示意图(引自[45])。

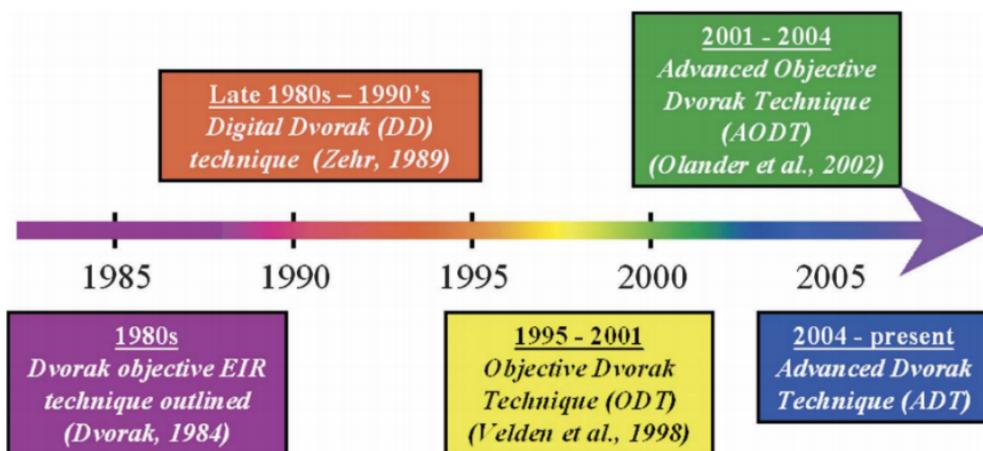


图 1-1 客观 Dvorak 技术发展过程示意图

在 Dvorak 技术一直被沿用的同时，不同机构对该技术进行了不同的改进。这些改进使得即使对于同一个热带气旋系统，不同机构发布的强度数据也有很大差异[46, 47]。因此，很有必要发展一种具有普适性的方法提高热带气旋强度估计的准

确性。近年来，研究人员基于气象卫星云图发展了一系列新的热带气旋强度估计方法。Liu(2009) [48]分析了台风“龙王”的云系结构，发现高层卷云的形态变化或与其强度变化有关。Chao(2010)[24]利用西北太平洋红外和可见光云图数据计算了从台风中心沿半径向外三个环状云带(分别是 130-260, 130-400,, 130-500km)的旋转角速度。结果表明距离台风中心越近的环状云带的旋转速度越快。因此 Chao(2010)[24]利用与热带气旋强度相关系数最大的 130-260km 环状云带的旋转速度建立了热带气旋强度的定量关系。

长期以来，热带气旋内核强对流及其和热带气旋强度变化的关系备受研究和业务预报关注[39, 41, 49]。Velden 和 Olander(1998)[42]利用地球同步卫星数据初步研究了热带气旋内核的强对流过程。Olander 和 Velden(2009)[50]利用红外和水汽云图云顶亮温差(T_{IR-WV})描述了热带气旋内核强对流过程，并指出 T_{IR-WV} 能够用于热带气旋内核物理过程和强度监测等相关研究中。Jaiswal (2012) [51]利用 2000-2005 年 GOES-8 和-12 红外云图数据计算了径向方位角直方图，通过比较和匹配当前热带气旋红外云图与数据库中强度已知的云图的径向方位角直方图确定当前热带气旋强度。Zhuge (2015)[46]结合 T_{IR-WV} 与红外云图云顶亮温信息提出了一个新的确定西北太平洋热带气旋强度的参数，并将这个参数与日本气象厅 JMA(Japan Meteorology Agency)最优路径数据提供的台风强度进行了比较和验证。研究表明其提出的新参数相比其他基于地球同步卫星数据的方法能提供更为准确的热带气旋强度估计。此外，Fetanat (2013)[52]对当前和先前 6、12 和 24 小时时刻的热带气旋云图云顶亮温从热带气旋中心沿径向以 10km 为间隔，计算了 14 个(5、15、25、...、695km)径向带的方位角亮温平均值和标准差。然后根据最近邻法从历史数据库中挖掘出和当前热带气旋云图最类似的十个热带气旋，用它们的平均值作为当前热带气旋强度的最优估计。

另外一个比较著名的热带气旋强度估计方法是最初由 Piñeros (2008)[53]提出，该方法被称为云顶亮温梯度矢量场偏离角方差技术 DAV-T (Deviation Angle Variance Technique)。DAV-T 通过衡量热带气旋云图云顶亮温的组织和轴对称程度来判别热带气旋的发展状态：对于一个发展成熟的强台风，台风眼，眼壁和云墙结构相对规则，云顶亮温呈规则对称分布。Piñeros, Ritchie, 和 Tyo 等 [53-55]计算了热带气旋云顶亮温梯度矢量和这些矢量相对于指定参考点的偏离角，并分析了偏离角的直方图。他们发现偏离角直方图的分布和热带气旋强度相关：热带气旋越强，直方图分布越集中。Ritchie(2012)[56]将 DAV-T 技术应用到北大西洋飓风强度估计

中，在热带气旋中心已知的前提下，计算了云图亮温梯度矢量相对于热带气旋中心的偏离角和偏离角方差，拟合得到了热带气旋强度和偏离角方差的 S 型曲线模型。Ritchie(2013)[57]将该方法应用到太平洋，进一步证明了 DAV-T 理论的准确性。基于 DAV-T，Liu(2014)[58]结合偏离角的几个统计参数提出了一个无量纲的热带气旋强度参数 TI，实验表明该参数更适合于估计云图分布比较规则的热带气旋强度。

1.2.3 基于卫星云图的热带气旋风场结构研究

目前，各大热带气旋业务预警中心主要采用一些关键风速节点来描述热带气旋风场结构。这些关键风速节点包括最大风速(V_{MAX})及其半径(R_{MAX})、34 节风速半径 R_{34} (Gale Force Wind)、50 节风速半径 R_{50} (Damaging Force Wind) 和 64 节风速半径 R_{64} (Hurricane Force Wind)。这些关键风速节点客观地描述了不同程度大风的破坏范围。此外，NOAA 飓风研究中心自 1996 年开始了 H*wind 项目，该项目旨在使用多源平台(地面、海洋、空间和飞机等观测平台)数据发展一个热带气旋分析系统，该项目的实验产品包括风场数据(海表面速度和方向) [59]。

尽管飞机侦测、可见光和微波遥感为热带气旋海表面风场结构研究提供了重要的信息，但是这些观测技术的一个共同特点是它们不能在时间或者空间上实现高分辨率连续观测。而对地静止卫星则克服了这个问题。虽然从卫星云图估计热带气旋最大风速相关技术在过去数十年间已经得到了长足的发展，利用红外云图精确地提取热带气旋风场结构依然十分困难。Mueller(2005)[3]对处理得到的 1995-2003 大西洋和东太平洋飓风季的 405 个热带气旋案例，利用多元线性回归技术估计了热带气旋的最大风速半径(R_{MAX})和距离热带气旋中心 182km 处切向风速(V_{182})，并结合变形的 Rankine 环流模型估计了热带气旋切向风场廓线。最后将热带气旋移动导致的风场不对称分量叠加到切向风场上得到了完整的二维热带气旋海表面风场结构。Kossin(2006)[2]进一步发展了利用红外云图数据提取热带气旋海表面风场的技术：对于云图上气旋中心清晰可见的案例，计算了气旋眼区半径，并将之与飞机侦测得到的 R_{MAX} 进行了线性拟合得到利用红外云图估算热带气旋 R_{MAX} 的方法。实验结果表明，由于 R_{MAX} 和热带气旋强度之间的紧密相关性，通过线性拟合得到的 R_{MAX} 能够有助于减小热带气旋强度估计的误差；对于一般的热带气旋红外云图，Kossin(2006)[2]发展了利用红外云图估算 R_{64} 、 R_{50} 、 R_{34} 的方法。最后，为了估计热带气旋二维海表面风场，Kossin(2006)[2]采用单场主成分分析方法得到了热带气旋径向风场廓线，并沿用 Mueller(2005)[3]中将热带气旋移动导致的风场不对称分

量叠加到切向风场上的方法得到了从气旋中心向外 2-182km 区域的热带气旋二维海表面风场。

为寻求一种通用的热带气旋尺度衡量标准, Knaff(2013)[60]对红外云图云顶亮温数据的径向廓线进行了经验正交分解 EOF(Empirical Orthodox Function), 并利用 EOF 函数回归了 850 hPa 高度距离气旋中心 500km 处平均切向风风速, 进而推算得到风速为 5 节的半径 R5, 最后利用 V_{MAX} 和 R5 拟合得到 R34。Knaff(2014)[61]对 Mueller(2005)[3]和 Kossin(2006)[2]的方法进行了进一步改进, 主要改进内容有以下三个方面: (1) 采用更多的飞机侦测资料训练回归模型。 (2) 使用更高分辨率的热带气旋风场再分析数据资料。 (3) 将二维 IR 云顶亮温数据和热带气旋风场波数 0、1 和 2 的幅度和相位谱进行了统计分析以更好地再现热带气旋海表面风场的不对称分量。

尽管 Mueller(2005)[3],Kossin(2006) [2], Knaff(2013)[60]和 Knaff(2014)[61]等的研究为利用红外云图数据提取热带气旋海表面风场提供了新的方法。但是, 这些技术存在以下问题: (1) 其提取海面风场关键节点的线性回归模型依赖于飞机侦测数据; (2) 提取过程用到了热带气旋相关信息的外部数据, 如热带气旋强度和中心位置等, 其客观性尚待提高; (3) 利用卫星云图数据获取海表面切向风速廓线方法的精度有待提高。此外, 由于西北太平洋无常规飞机侦测数据, 本文试图克服从卫星云图到飞机侦测再到海表面风场的中间过程, 设法直接利用卫星云图数据获取同样甚至更高可信度的热带气旋海表面风场。

1.3 本文研究内容和架构安排

卫星遥感观测资料是目前热带气旋观测、研究和预报的主要依据。不同卫星传感器的工作特性各有差异, 整体来讲, 微波遥感是获取海表面风场最直接有效的传感器, 但是受陆地、降水等客观条件和提取技术等主观因素的限制, 其在热带气旋内核(200km 以内)风场观测上仍然不能满足需求。而光学传感器由于云的作用虽不能直接观测海表面风场但却提供了热带气旋活动期间云系云团的热动力信息。在过去十几年内, 利用红外和可见光卫星数据估计热带气旋海表面风场的研究也逐渐展开。

本文主要结合红外和水汽通道云图数据和微波散射计数据开展西北太平洋热带气旋风场提取研究。为发展一个客观的热带气旋海表面风场提取方法, 本文最终得到的利用卫星云图提取热带气旋海表面风场的方法不使用关于热带气旋本身的任何外部数据信息, 但是这些信息对于后续提取海面风场至关重要, 因此, 在获取完

整的海表面二维风场之前需要先利用卫星云图获取热带气旋中心位置、强度等信息。在利用卫星云图提取得到海表面风场之后，借助散射计观测得到的粗分辨率的热带气旋海表面风场数据对结果进行验证。

本文结构安排如下：

第一章为引言，主要阐述了本文的研究背景、选题依据、研究目的和内容。主要论述了目前观测热带气旋风场的传感器平台以及各自的优缺点；回顾了热带气旋强度估计的发展历程和最近提出的几种新技术；简要论述了利用卫星云图数据提取热带气旋海表面风场的几种新方法。

第二章主要介绍了本文所用到的数据。主要包括卫星云图数据、QuikSCAT 卫星散射计数据、JTWC 最优路径数据和 SHIPS 统计模型数据。

第三章利用卫星云图数据研究热带气旋中心定位。首先利用热带气旋红外和水汽通道云顶亮温数据，结合图像处理和数学形态学原理，提取了热带气旋的主体云系。此后提出了针对有眼和无眼气旋进行中心定位的方法。

第四章利用卫星云图数据训练了热带气旋的强度估计模型。通过从红外和水汽通道云图数据提取关键参数，并利用这些参数进行线性回归得到热带气旋的当前强度估计模型。最后对该模型进行了验证和评价。

第五章主要利用卫星图数据提取热带气旋海表面二维风场。利用 JTWC 最优路径数据资料，综合热带气旋中心位置和强度以及利用卫星云图中提取得到的其他关键参数和信息，估计得到海表面风场关键风速节点，包括 R_{MAX} 、 R_{34} 、 R_{50} 、 R_{64} 、 V_{500} 和 R_0 。此后使用得到的这些关键风速节点信息训练了热带气旋切向风场 Wood-white 模型，得到热带气旋切向风的径向廓线，并通过叠加热带气旋移矢量得到了完整的热带气旋海表风场。将得到的结果与 QuikSCAT 微波散射计海表面风场数据进行了对比分析。

第六章为本论文的总结和展望，讨论了本文中存在的问题和需要进一步改进的地方，并对未来工作进行了简要的展望。

2. 数据介绍

2.1 多源卫星平台云图数据集

到目前为止，大量观测资料为热带气旋研究提供了数据支持[62]。美国喷气动力实验室 JPL (Jet Propulsion Laboratory)热带气旋信息系统 TCIS (Tropical Cyclone Information System, <http://tropicalcyclone.jpl.nasa.gov/>)收集了 1999-2009 年全球海域热带气旋发生期间的多源数据资料，该数据集囊括了 AIRS、CloudSAT、MLS、AMSU-B、QuikSCAT、Argo floats、GPS 以及模式输出等产品。所有数据被采集到一个以气旋中心为中心的 2000*2000km² 的经纬度窗口[62, 63]。

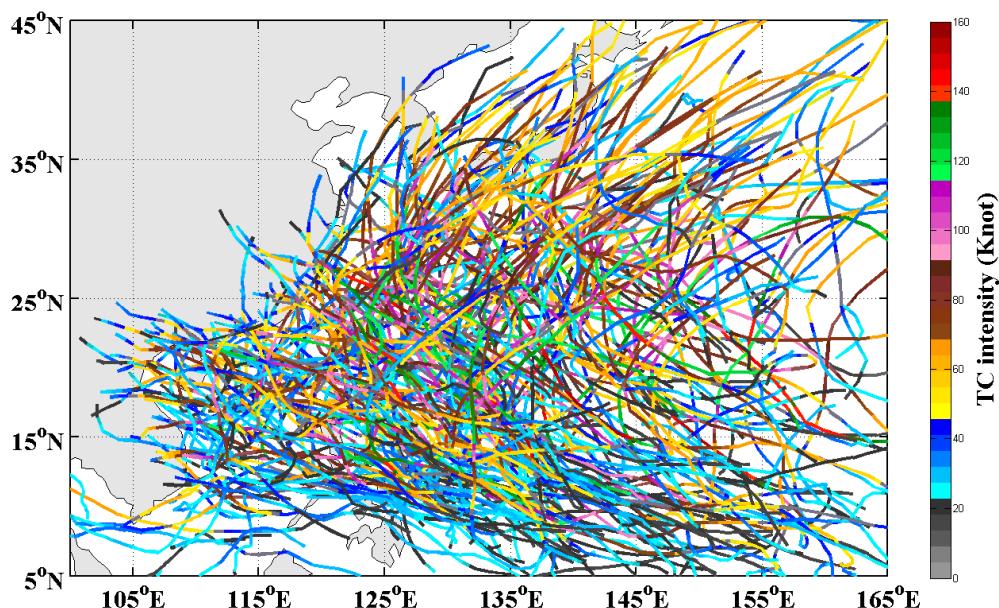


图 2-1 本文的研究区域及使用到的于 1996-2009 年发生该区域的热带气旋案例

本文的研究区域为西北太平洋海盆 5° -45° N, 100°-165°E 区域(如图 2-1 所示)。文中用到的卫星数据主要为红外(10.3-11.3μm)和水汽(6.5-7.0 um)通道卫星云图。数据下载自 TCIS (<http://tropicalcyclone.jpl.nasa.gov/>)。TCIS 西北太平洋卫星云图数据资料集是一个融合的分析数据集，其最初由 HURSAT-B1 (Hurricane satellite data), <http://www.ncdc.noaa.gov/hursat/index.php> 生产提供。尽管 HURSAT-B1 包含了自 1978 年到 2009 年西北太平洋热带气旋的所有卫星云图数据，但是有记录的卫星云图水汽通道数据最早只能追溯到 1996 年 GMS-5 的业务化运行。因此，本文最终使用的卫星云图数据主要来自于 HURSAT-B1(1996-1998)和 TCIS(1999-2009)。该数据

集为分辨率为 3 小时，8km 的 05 版的 HURSAT-B1 数据集，数据集包括 Meteosat-5 (Meteosat satellite 5)、GMS-5 (Geostationary Meteorological Satellite 5)、GOES-9 (Geostationary Operational Environmental Satellite 9)、GOES-10、中国 FY-2 (Chinese geostationary FengYun meteorological satellite) 以及日本 MTSAT-1R (Japanbased Multifunctional Transport Satellite 1R) 等对地静止气象卫星观测得到的数据产品[64]。论文中研究所使用的 1996-2009 年发生于西北太平洋的 377 个热带气旋案例如图 2-1 所示。

在使用 HURSAT-B1 数据集之前，我们对其进行了严格的数据质量控制：(1) 剔除了 JTWC 最优路径数据中无记录的热带气旋案例；(2) 剔除了位于陆地上空或中心距离陆地 1° 以内的所有图像数据；(3) 使用 $3*3$ 窗口进行了低通平滑滤波以去除图像上的高频噪声和不合理的云顶亮温大幅度跳变；(4) 对于我们发现的大量的云图数据丢失区域进行了最邻近插值处理。

2.2 QuikSCAT 海面风场数据

1997 年，搭载于日本 ADEOS-1 上的美国宇航局 (NASA) 研制的散射计 NSCAT 因电源故障在运行仅 9 个月后宣布任务失败，为此，NASA 于 1999 年 6 月 19 日发射了人类历史上第一个双波束笔形圆锥扫描微波散射计 SeaWinds，为了和搭载于 ADEOS-2 上的 SeaWinds 进行区别，该散射计通常被称为 Quik Scatterometer (QuickSCAT)，2009 年 11 月，QuikSCAT 在超额运行 4 年 (设计寿命 5 年) 后因机械老化等问题不再提供数据。QuikSCAT 数据为气候变化、极地、热带气旋等的研究和业务天气预报提供了非常宝贵的数据资料集[65]。

QuikSCAT 为太阳同步卫星，其轨道高度 803km，倾角 98.6° ，工作频率 13.4GHz (ku 波段)，入射角为 46° 的内波束采用 H 极化，入射角为 54° 的外波束采用 V 极化。飞行速度为 7km/h，因此其每 24 小时可以获取 14 轨数据，对应地面刈幅宽度 1800km，覆盖全球 90% 以上海域[66]。本文使用 JPL 反演的分辨率为 0.125° 的 QuikSCAT L2B 3.0 海表面风场数据。该数据产品在原始 L2B 数据的基础上做了以下改进：(1) 采用改进的地球物理模式函数反演风场；(2) 使用神经网络方法校正降雨的影响；(3) 估计并剔除了轨道交叉区域的风速偏差[67]。

2.3 JTWC 台风最优路径数据

在许多热带气旋最优路径数据集中，JTWC 台风最优路径数据集是应用最广泛的一个[68]。已有研究表明，对于西北太平洋，相较其他最优路径数据集而言，JTWC 数据集可信度更高[69-71]。因此本文采用 JTWC 热带气旋最优路径数据资料集(<http://www.usno.navy.mil/JTWC>)。该数据集包含西北太平洋热带气旋的中心位置、强度、最大风速半径，以及四个地理象限(NW, NE, SW, SE)的热带气旋风场关键风速节点数据。JTWC 数据时间分辨率为 6 小时，为了和卫星云图数据匹配起来，我们将原始 JTWC 最优路径数据进行线性插值的都 3 小时时间间隔的数据。

2.4 SHIPS 统计模型资料

在过去的几十年间，热带气旋路径预报准确度得到了大幅度提升，与此同时强度的预报仍然是一个难题，由于热带气旋强度变化过程的复杂性，目前热带气旋强度预报依然使用经验统计预报模型。美国国家飓风中心 NHC (National Hurricane Center)自 1988 年开始不断改进和完善 SHIPS (Statistical Hurricane Intensity Prediction Scheme) 统计模型，该模型综合热带气旋强度的历史统计数据、气象资料、大气以及海洋观测等估计气旋当前海表面最大持续风速。除强度之外，SHIPS 模型同时提供了不同高度热带气旋气压场和风场等信息。

为了得到完整的气旋二维海表面风场结构，论文使用了 SHIPS 模式分析计算得到的 850 hPa 高度距离气旋中心 500km 处切向风平均风速(以下记作 V500)数据 [72]。

3. 热带气旋中心定位

目前热带气旋中心定位方法主要包括：云系形态识别定位、风场结构分析定位、云体温湿提取定位、时空运动匹配定位等。这些方法各有优势和不足[73]。实际业务预报中，热带气旋中心位置的确定主要依赖于天气预报人员的经验判断，其过程主观性强、工作量大且操作复杂。因此，利用卫星技术实现自动、准确的热带气旋中心定位具有重要意义。研究人员利用数字图像处理技术和数学形态学原理从云图中提取热带气旋螺旋云带主体云系边界和骨架等形态特征以确定气旋中心[74-76]。但是由于气旋内核螺旋云带的复杂和多变，使用图像处理和形态学方法进行中心定位难以实现客观、统一和通用[74-76]。另外，无眼热带气旋的中心定位一直是目前工作的难点。为此，本章主要讨论利用卫星云图云顶亮温特征实现无眼和有眼气旋的客观中心定位。

3.1 热带气旋主体云系提取

因为螺旋云带外围随机分布着的一些小的云团常会给计算造成干扰。因此为了利用卫星云图实现热带气旋中心定位的自动化，首先需要从云图数据中提取其螺旋云带主体云系。

根据 Alexanin(2010)[77]，我们首先选用亮温 248.15 K 的阈值初步剔除螺旋云带主体云系外围高度较低的随机云团(亮温 $>248.15\text{ Kelvin}$)。Laszlo(1993)[78]和 Velden(2009)[50]计算了卫星云图水汽通道和红外通道云顶亮温的差($T_{\text{WV-IR}}$)，提出了对流过度顶 COT (Convective Overshooting Top)的概念，COT 的定义为距离气旋中心最近的 $T_{\text{WV-IR}}$ 从负到正的跳变点位置。这里我们利用 COT 从卫星云图中提取螺旋云带主体云系。在热带气旋内核区域，由于对流的强迫作用，位于对流层顶的水汽被输送到平流层，在平流层更高温度的作用下再次蒸发放热形成水汽增温的正反馈，因此，水汽通道在该区域探测到的云顶亮温高于红外通道。与此同时在远离气旋内核的外围区域由于无强对流的发生，一般为低云、半透明或者晴空区域，红外通道观测到的亮温高于水汽通道。

这里以 2009 年西北太平洋第 20 号台风 Melor(2009)为例说明水汽通道和红外通道亮温数据的差异特征。台风 Melor(2009)是 2009 年第二个达到 Category-5 的极端台风系统，其于 10 月 4 号 1200 UTC 时刻中心气压达到 911hPa ，最大持续风速达到 150 节。图 3-1(a)为 10 月 4 日 1200 UTC 时刻 Melor(2009)的红外通道云顶亮温

云图, 图 3-1(b)为水汽通道云顶亮温云图。很明显, 在螺旋云带外围, 水汽通道探测得到的云顶亮温相较红外通道低。如图 3-2 所示为沿图 3-1 中黑线穿过台风中心的径向亮温剖面。很明显, 在距离台风中心 400km 外围和台风眼睛空区域 T_{WV-IR} 为负。而在 400km 以内除台风眼外的台风内核区域, T_{WV-IR} 约等于或者大于 0, 其表征强烈的对流层-同温层对流过程。因此有: (1) 若 $T_{WV-IR} \approx 0$, 则为厚的不透明高云区; (2) 若 $T_{WV-IR} < 0$, 则为晴空、低云或半透明的高云区; (3) 若 $T_{WV-IR} > 0$, 则为深对流区。

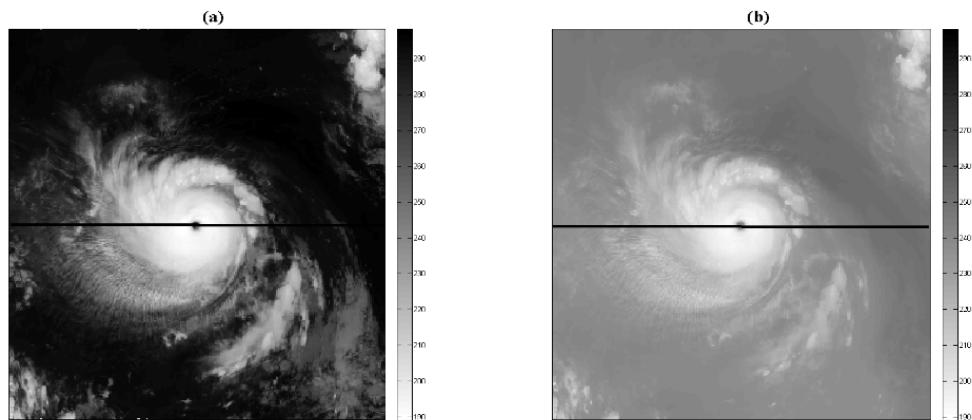


图 3-1 台风 Melor(2009)于 10 月 4 日 1200 UTC 时刻的 (a)红外云顶亮温云图, (b)水汽通道云顶亮温云图

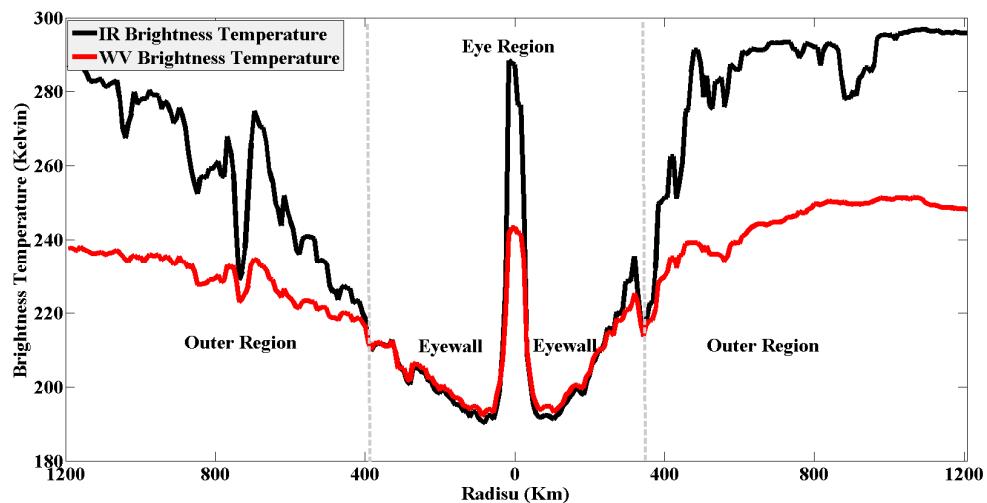


图 3-2 穿过台风 Melor(2009)中心(图 3-1 中黑色剖线)的红外(黑色曲线)与水汽(红色曲线)通道云顶亮温剖线

根据气旋内外核区域水汽通道和红外通道云顶亮温的上述差异特征，可以利用红外云图中初步提取螺旋云带的主体云系区域。但是上述过程得到的主体云系可能会受螺旋云带外围未能成功使用亮温阈值剔除掉的离散云图的影响，为此，我们对上述初步获得到的主体云系进行数字图像形态学处理以尽可能地缩小主体云系范围但不丢失主体信息。首先，我们对初步得到的主体云系亮温数据采用最大类间方差法[79]计算得到全局图像阈值，利用该阈值将主体云系处理成二值图像，此后，使用 $5*5$ 的圆盘形结构元素对其进行闭操作和开操作处理最终得到热带气旋的主体云系。如图3-3(a)所示为对台风Melor(2009)的红外云图使用亮温阈值剔除主体云系外围随机云团后得到的水汽通道和红外通道亮温差 T_{WV-IR} 。对 T_{WV-IR} 依次进行二值化处理、闭操作和开操作，结果如图3-3(b)中红色闭合线所示为使用Canny算子检测得到的螺旋云带主体云系的边界线。

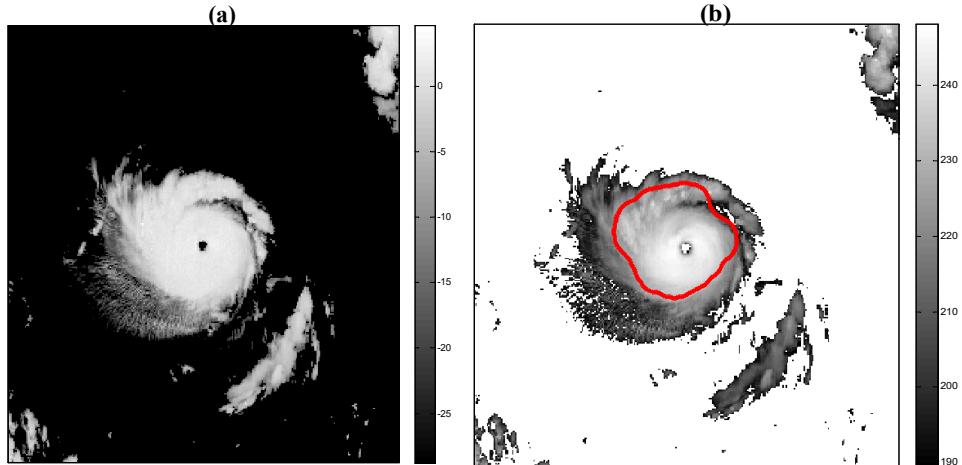


图3-3 (a) 水汽通道和红外通道云顶量温差 T_{WV-IR} , (b)红外通道云图, 其中红色闭合曲线内部为提取得到的螺旋云带主体云系

3.2 有眼热带气旋中心定位

3.2.1 卫星云图云顶亮温梯度矢量场

卫星云图云顶亮温能够反映热带气旋内核的结构特征，例如云顶亮温和云顶高度相关，因此，热带气旋内核云顶亮温本身表征着上升流的强弱，高(冷)的云对应剧烈的上升气流。也即，云顶亮温云图的形态和热带气旋活动的强弱程度相关。

热带气旋从生成到不断加强的过程中，其云系逐渐趋于规则、对称的气旋性涡旋，而眼区结构一般出现于发展成熟、结构规则的比较强的热带气旋系统中。根

据 Piñeros 和 Ritchie 等 [53-57]发展的用于估计热带气旋强度的 DAV-T 技术，热带气旋发展和规则程度可以用云顶亮温梯度矢量场来表征。因此，我们首先使用式(3.2)所示的 3*3 的 Sobel 算子对低通滤波处理后的二维亮温图像函数 $z = f(x, y)$ 进行卷积以计算在经向和纬向上的梯度，其亮温梯度 $\nabla f(x, y)$ 可以表示为：

$$\nabla f(x, y) = \begin{bmatrix} \partial f(x, y) / \partial x \\ \partial f(x, y) / \partial y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Gx \\ Gy \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

其中 Gx 和 Gy 分别表示二维亮温图像函数 $f(x, y)$ 沿径向和纬向的梯度。我们使用 3*3 滑动 Sobel 算子对 $f(x, y)$ 进行卷积处理以获得其亮温梯度，Sobel 算子如下所示：

$$Mx = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad My = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

于是，

$$Gx = f(x, y) Mx = \begin{bmatrix} z_1 & z_2 & z_3 \\ z_4 & z_5 & z_6 \\ z_7 & z_8 & z_9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$Gy = f(x, y) My = \begin{bmatrix} z_1 & z_2 & z_3 \\ z_4 & z_5 & z_6 \\ z_7 & z_8 & z_9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

为更加直观地说明热带气旋云图云顶亮温梯度矢量场的获取过程，我们构造理想有眼热带气旋云顶亮温图像，如图 3-4(a)(b) 所示，其中，图 3-4(a) 为有眼热带气旋云图云顶亮温的方位角平均廓线，图 3-4(b) 为相应的二维云图图像，我们对图 3-4(b) 中黑色正方形内部数据使用式(3.2)(3.3)(3.4) 计算其梯度矢量场，结果如图 3-4(c) 所示，可以看到，亮温梯度矢量场沿径向向涡旋中心辐聚。

由图 3-4(c) 我们发现，云顶亮温梯度矢量场虽然可以非常直观地反映气旋的涡旋性辐聚特性，但是不能反映热带气旋的气旋性涡旋特性。为此我们对如图 3-4(c) 所示得到的梯度矢量场进行逆时针旋转一定角度，注意这里对梯度矢量场进行逆时针旋转的操作仅为体现气旋的逆时针涡旋特性而无任何物理含义。经过大量实验测试，本文最终选取固定的旋转角度 $\pi/5$ 。得到如图 3-4(d) 所示的旋转后的云顶亮温

梯度矢量场。图 3-4(d)同时体现了热带气旋的向内辐聚特性和涡旋特性。依据这些特性结合矢量场的相关理论可以进一步通过数学计算获取矢量场的中心位置。

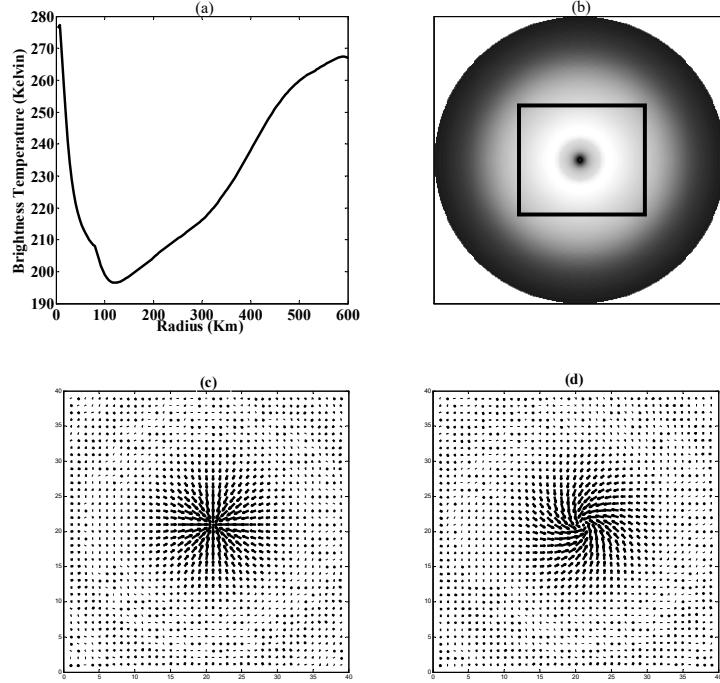


图 3-4 理想热带气旋卫星云图云顶亮温的 (a) 方位角平均径向廓线, (b) 二维云顶亮温云图, (c) 亮温梯度矢量场, (d) 逆时针旋转 $\pi/5$ 后的梯度矢量场

3.2.2 基于卫星云图的有眼热带气旋中心定位

散度是衡量速度矢量场辐散、辐合强度的物理量，辐散时为正，辐合时为负。由于大气运动为准水平运动，这里仅考虑风矢量场水平散度。为描述方便，下文用 u 、 v 表示风场沿经度方向和沿纬度方向的分量，用 x 、 y 分别表示经度和纬度。需要注意的是，水平散度计算中用到的实测风数据，须位于同一水平面或者等压面。

水平散度的表达式为：

$$D = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \quad (3.5)$$

天气学中，涡度可以用来衡量空气质块旋转运动强度。根据涡度的变化和分布，可以了解天气系统的生长变化。尽管涡度是一个矢量，但由于大气的准水平运动，一般只考虑它的垂直分量，亦即垂直相对涡度或相对涡度垂直分量。 ζ 的表达式为：

$$\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (3.6)$$

按照涡度的定义， ζ 表示风场绕垂直轴的旋转，其中 $\zeta > 0$ 风场做气旋式旋转——正涡度； $\zeta < 0$ 风场做反气旋式旋转——负涡度。

如图 3-4(d)所示为得到的旋转后的想热带气旋云顶亮温梯度矢量场，其表现为向气旋中心辐聚的气旋式涡旋。因此，理论上在涡旋中心存在小于零的散度极小值和大于零的涡度极大值。将散度场和涡度场做乘积得到散度场和涡度场的复合场，理论上，则会在台风涡流风场结构范围内出现复合场的最小值，该最小值由散度场的极小值和涡度场的极大值共同决定，使得其在数值上远远区别于邻域内的其他值。从而，台风中心可以很容易地被区分出来。也即，通过搜索复合场中的最小值即可得到涡旋中心位置。复合场的优势在于：(1) 其规避了因单独计算散度场和涡度场所引入的不确定性误差，(2) 涡旋中心位置处复合场中的最小值与邻域中其他复合场值存在数量级的差异，从而避免了涡旋中心的误判。复合场(DV)可表示如(3.7)所示：

$$DV = D * \zeta \quad (3.7)$$

由(3.5)(3.6)(3.7)可知，为得到云顶亮温梯度矢量的复合场，最关键的在于计算数值微分，由于数值微分是一个不适定问题[80]，舍入误差或其它误差会严重地影响问题的结果。求解不适定问题的普遍方法是用一组与原不适定问题相“邻近”的适定问题的解去逼近原问题的解，这种方法称为正则化方法。20世纪 60 年代，前苏联科学院院士 Tikhonov 提出了正则化理论。该理论已被学者证明对于解决不适定问题是非常有效的。本文将采用该方法计算数值微分进而计算台风风矢量场的水平散度和垂直相对涡度[81]。

如图 3-5 所示为利用上述方法对图 3-4 中理想热带气旋云顶亮温梯度矢量场进行数值微分进而求得的散度场(图 3-5(a))，涡度场(图 3-5(b))和复合场(图 3-5(c))，从图 3-5(c)可以明显观察到在涡旋中心存在量级上区别于周围像素的最小值区域，该区域对应于构造的理想有眼热带气旋云顶亮温梯度矢量场的中心区域。

这里继续以极端台风 Melor(2009)为例进行分析，对图 3-2(b)中提取得到的台风 Melor(2009)的主体云系，图 3-6(a)为旋转后的中心区域云顶亮温梯度矢量场。在台风眼区存在明显的涡旋性辐聚区域。对图 3-6(a)中所得到的矢量场采用 Tikhonov 正则化原理进行数值微分并计算得到其散度场(图 3-6(b))，涡度场(图 3-6(c))和复合

场(图 3-6(d))。由图 3-6(d)我们发现，在台风中心位置存在多个复合场的极小值点，为此，我们搜索出值最小的九个像素点，并对其位置取平均最终得到台风中心。

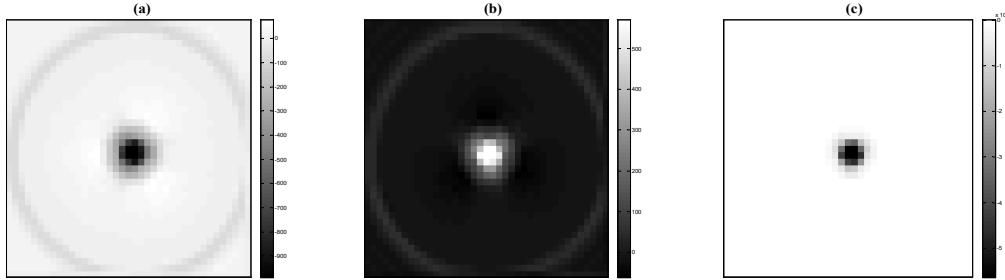


图 3-5 理想有眼热带气旋云图云顶亮温梯度矢量场的(a)散度场, (b)涡度场和(c)复合场

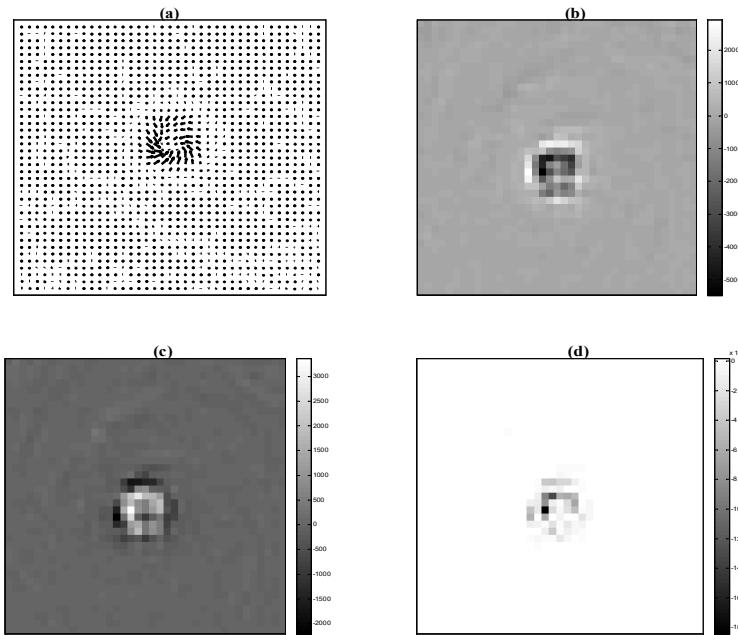


图 3-6 (a)极端台风 Melor(2009)的螺旋云带主体云系云顶亮温梯度 (a)矢量场, (b)散度场, (c)涡度场, (d)复合场

3.3 无眼热带气旋中心定位

相对于有眼热带气旋而言，无眼热带气旋中心定位的精度目前尚难满足实时预报的需求。同时，无眼气旋由于云系形态的复杂性和多变特征，难度也相对较大。但是，无论有眼无眼，热带气旋都在围绕自身中心高速旋转的同时向前移动，所不同的是，有眼热带气旋云系在卫星云上表现为高亮云团中心存在一块暗区，而无眼

气旋则复杂多变。整体而言，其卫星云图主体云系表现为密闭的低亮温明亮区域，而气旋中心位置存在明显的高温谷值。

为描述无眼热带气旋云顶亮温的共性特征，我们以 JTWC 最优路径数据气旋中心位置为真值计算了 1996-1999 年 113 个热带气旋案例的 2,612 幅无眼气旋云图云顶亮温的平均径向廓线，如图 3-7 所示，该廓线沿径向的分布可以利用双高斯混合模型进行准确地拟合。也即，以气旋中心为参考的无眼气旋云顶亮温廓线一般沿径向呈双高斯混合曲线模型分布。因此，可以通过判别以不同点为中心得到的云顶亮温径向廓线与双高斯混合模型之间的相似程度来判别气旋中心。

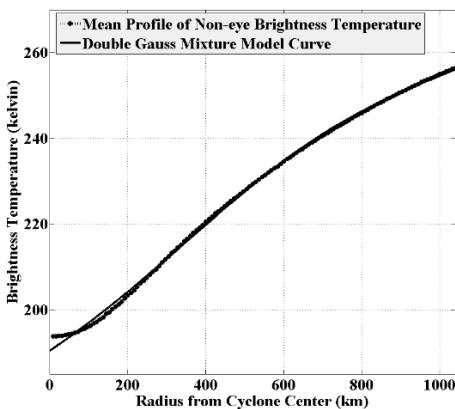


图 3-7 无眼热带气旋云顶亮温以其中心为参考的方位角平均径向廓线示意图

基于以上分析，我们首先对主体云系中所有云顶亮温数据用式(3.8)进行归一化处理。同时计算主体云系轮廓线的几何中心，以该几何中心为中心向外延伸得到闭合轮廓线内部的最小圆和最大圆，最后取以最小圆和最大圆半径平均值 R_c 为半径的圆形区域为气旋中心位置可能出现的感兴趣区域。我们针对该感兴趣圆形区域构造唯一的双高斯混合模型如式(3.9)所示：

$$BT_{normal} = \frac{BT_i - MAX(BT)}{MAX(BT) - MIN(BT)} \quad (3.8)$$

$$f(r) = - \left(\frac{e^{-r^2/\sigma_1^2}}{\sigma_1} - \frac{e^{-r^2/\sigma_2^2}}{\sigma_2} \right) \quad (3.9)$$

其中， r 为双高斯混合模型的半径， $r \in [0, 2R_c]$ ，取 $\sigma_2 = 2\sigma_1 = 2R_c$ 。对于上述得到的半径为 R_c 的圆形区域内部的所有点，逐次假设其为气旋中心位置将 BT_{normal} 进行方位角平均得到以该点为参考的云顶亮温廓线，将该廓线与 $f(r)$ 进行比较分析并计算

得到两者的相关系数 R^2 ，最后我们得到半径为 R_c 的热带气旋中心位置感兴趣区域相关系数矩阵，这里称其为相关系数矩阵。根据上述分析，该矩阵中相关系数最大的点理论上为气旋中心。

为直观地说明上述无眼热带气旋中心定位方法，我们以如图 3-8(a)所示的台风 Abel(1996)于 10 月 18 日 1800 UTC 时刻的红外云图为例进行分析，图 3-8(b)为穿过台风中心的云顶亮温剖线。很明显，该无眼台风主体云系在卫星云图上表现为一个密闭低亮温区域，且在台风中心附近区域存在亮温的谷值。但是，气旋内核水汽和红外通道云顶亮温的分布规律与有眼气旋类似。如图 3-9(a)所示为提取得到的 Abel(1996)于 10 月 18 日 1800 UTC 时刻主体云系(红色闭合曲线)，其中蓝色闭合圆为以红色闭合曲线几何中心为中心得到的半径为 R_c 的圆。图 3-9(b)为针对图 3-9(a)构造的用来进行匹配的双高斯混合模型曲线，最终得到的气旋中心位置如图 3-9(a)中黑色十字所示。

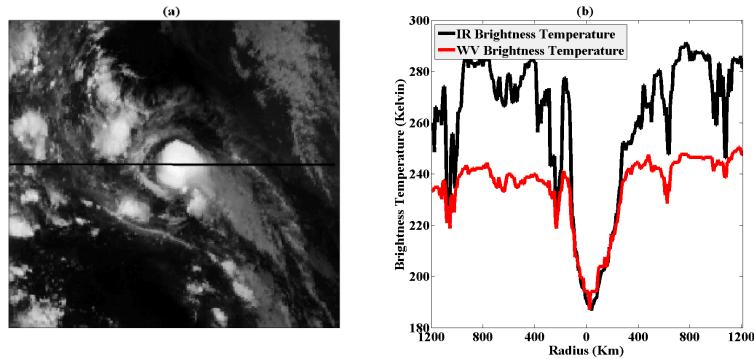


图 3-8 (a)台风 Abel (1996)于 10 月 18 日 1800 UTC 时刻的红外云图，(b)沿穿过(a)中台风中心黑线的红外和水汽通道云顶亮温剖线

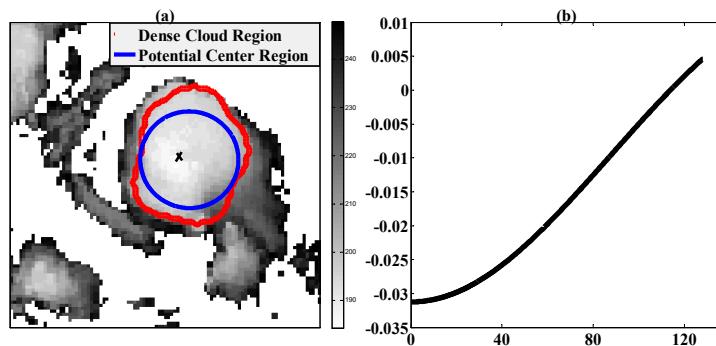


图 3-9 (a) 台风 Abel (1996)于 10 月 18 日 1800 UTC 时刻的主体云系，其中黑色十字为最终得到的热带气旋中心位置，(b)为针对(a)构造的双高斯混合模型曲线

3.4 结果和讨论

由于强度太弱的热带气旋的云系形态复杂多变甚至无确定的云系特征，我们仅考虑强度达到热带低压以上级别的热带气旋案例，通过对 1996-2009 年热带气旋卫星云图数据进行筛选，本文搜集了 377 个热带气旋的 12,873 幅时间分辨率为 3h 的卫星云图数据，根据 Saffir–Simpson 气旋分级标准，这 377 个热带气旋中有 118 个热带低压系统(tropical depression)，53 个热带风暴(tropical storm)，54 个弱台风(typhoons)，33 个中强度台风(moderate typhoons)，26 个强台风(severe typhoon)，57 个超强台风(super typhoon)，和 33 个极端台风(extreme typhoon)。这 12,873 幅卫星云图中，4,160 幅可以清晰的观察到高亮温气旋眼区，剩余 8,716 幅云图上气旋表现为不规则的云团或低亮温密闭云团。采用上文介绍的两种热带气旋中心定位方法，我们分别对这两组云图数据进行了气旋中心定位，将得到的结果与 JTWC 最优路径数据进行对比以分析上述方法的误差，需要注意的是：JTWC 最优路径数据集记录的气旋中心位置为使用多源观测平台以及模式数值模拟得到的海表面风场的中心位置，而气旋系统在垂直方向上因垂直风切等所导致的结构变化使得其中心位置随高度有所差异，因此 JTWC 热带气旋中心位置和利用云图得到的中心位置会有一定出入，但是这样的系统偏差的具体量值尚不明确。

如图 3-10 所示为利用本文介绍的定位方法得到的热带气旋中心位置和 JTWC 最优路径数据的比较，其中左侧为对 4,160 幅具有眼区特征的卫星云图采用云顶亮温梯度矢量场的复合场方法进行定位得到的结果，右侧为对 8,716 幅无明显眼区特征的云图数据采用高斯模板匹配定位得到的结果。图 3-10 中第一行为气旋中心位置的经度定位结果，第二行为气旋中心位置的纬度定位结果。很明显，使用两种方法在不同数据样本中得到的结果均与插值后的 JTWC 最优路径数据一致。为了定量描述这两种方法的定位误差，我们计算了插值后的 JTWC 最优路径热带气旋中心位置和利用云图定位得到热带气旋中心位置之间的欧氏距离偏差，结果如图 3-11 所示。很明显，对于有眼热带气旋，利用基于云顶亮温梯度矢量场的复合场的方法得到的热带气旋中心位置误差整体较小；而针对无眼气旋发展的基于双高斯混合模型曲线匹配的方法得到的结果与 JTWC 最优路径数据之间的偏差相对较大。

为了进一步说明两种方法的优劣性，我们对实验结果的误差进行了统计分析，结果如表 3-1 所示。从定位得到的气旋中心经纬度和 JTWC 最优路径的相关系数 R^2 可以明显看出，两种方法得到的结果与真值之间差异非常稳定。从平均绝对误差和误差的标准偏差可以看出，针对有眼气旋的基于云顶亮温梯度矢量场的复合场进

行中心定位的方法精度更高。整体而言，两种方法定位得到的气旋中心欧氏距离绝对偏差在 30km 左右，其表现在卫星云图上大约在 3*3 的像素窗口内。以上表明本文针对有眼和无眼气旋利用卫星云图进行中心定位的技术精度较高，具有一定的实用价值。

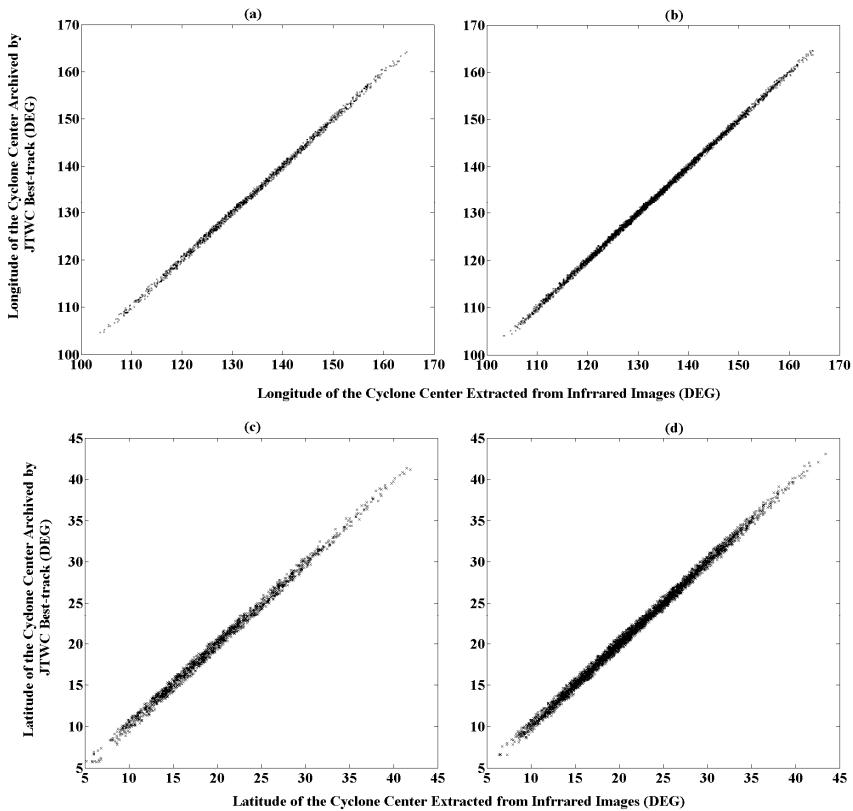


图 3-10 利用卫星云图定位得到的气旋中心位置与 JTWC 最优路径数据散点图，(a) 有眼热带气旋中心经度，(b) 无眼气旋中心经度，(c) 有眼气旋中心纬度，(d) 无眼气旋中心纬度

表 3-1 热带气旋中心定位结果误差统计分析

		R^2	Absolute Mean	Standard Deviation	Median
Eye (N=2,160)	Longitude (DEG)	0.999	0.182	0.218	-0.030
	Latitude (DEG)	0.996	0.180	0.217	0.050
	Euclidean distance (km)	-	31.70	13.33	31.73
Non-eye (N=6,716)	Longitude (DEG)	0.999	0.189	0.2444	0.007
	Latitude (DEG)	0.997	0.194	0.252	0.028
	Euclidean distance (km)	-	33.34	20.54	30.32

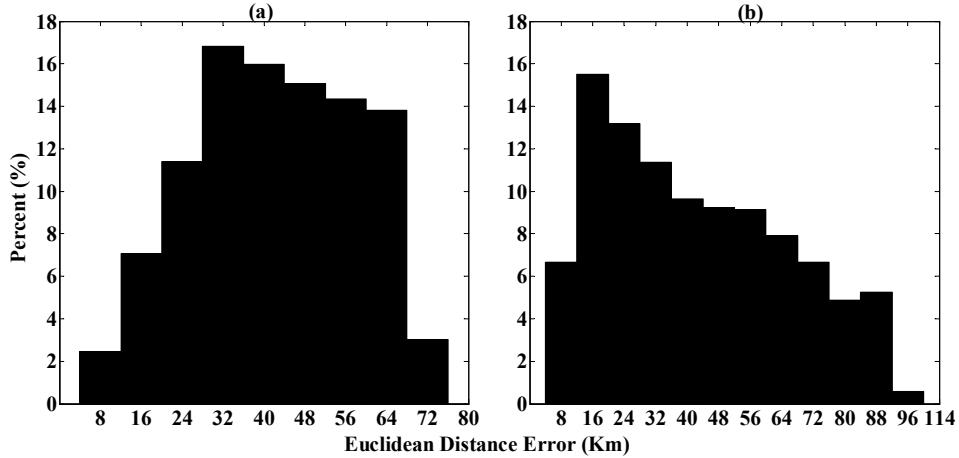


图 3-11 利用卫星云图估计得到热带气旋中心位置与 JTWC 最优路径数据气旋中心位置欧氏距离偏差直方图, (a) 有眼热带气旋, (b) 无眼热带气旋

3.5 小结

本章介绍了针对有眼和无眼热带气旋利用卫星云图进行中心定位的两种方法, 是本文利用卫星云图提取热带气旋海表面风场的关键和第一步。首先, 根据热带气旋红外和水汽通道云顶亮温特征以及 248.15 kelvin 亮温阈值的假设, 结合数字图像处理及数学形态原理提取了热带气旋螺旋云带主体云系。此后, 针对有眼和无眼热带气旋云图的特征, 讨论了相应的气旋中心位置确定方法。对有眼气旋, 计算了红外云图云顶亮温梯度矢量场, 利用 Tikhonov 正则化原理计算了其散度场和涡度场, 最后提出了用于最终客观地确定热带气旋中心位置复合场概念。对无眼气旋, 首先锁定了气旋中心位置的感兴趣区域, 对该区域中的每一点, 用构造的双高斯混合模型曲线与以该点为参考计算得到的方位角平均亮温廓线进行比较分析, 最终确定相关性最高的位置为气旋中心位置。使用 1996-2009 年西北太平洋 12,873 幅卫星云图数据对提出的两种方法进行了实验和误差分析, 结果表明, 本文介绍的方法具有实用价值。

4. 热带气旋强度估计模型

强度是热带气旋研究和预报工作中最为关注的几个参数之一，也是决定热带气旋结构尤其是风场结构特征的关键参数。为利用卫星云图提取热带气旋海表面风场，在获得热带气旋中心位置后还需要利用卫星云图设法获取其强度信息。

4.1 模型训练

4.1.1 DAV-T 技术的改进与参数化

DAV-T (Deviation Angle Variance Technique) 技术为利用卫星云图估计热带气旋强度提供了参考。我们继续以台风 Abel (1996)于 10 月 18 日 1800 UTC 时刻和台风 Melor(2009)于 10 月 4 日 1200 UTC 时刻的卫星云图为例来直观地说明 DAV(Deviation Angle Variance)与热带气旋强度之间的关系。取用第 3 章中介绍的方法定位得到的气旋中心为中心半径为 300km 的圆形区域，计算该区域内部云顶亮温梯度矢量的偏离角 DA (Deviation Angle)：首先，利用式(3.3)(3.4)计算半径为 R_c 的圆形区域内云图云顶亮温梯度矢量场，这里记作 $\vec{U}=\nabla f(x,y)=(G_x,G_y)$ ，对于半径为 R_c 的圆内部每个像素点，以热带气旋中心位置 (x_0, y_0) 为参考用式(4.1)计算其位置向量：

$$\overrightarrow{V(i,j)} = (Px, Py) = (x_i - x_0, y_i - y_0) \quad (4.1)$$

定义该点的亮温梯度矢量和其位置矢量之间的夹角为偏离角 DA，如 (4.2) 式所示：

$$DA = \cos^{-1} \left(\frac{\vec{U} \cdot \vec{V}}{|\vec{U}| |\vec{V}|} \right) \quad (4.2)$$

其中， \vec{U} 为云顶亮温梯度矢量， \vec{V} 为位置矢量。如图 4-1 所示为偏离角 DA 的示意图。通过计算半径为 300km 的圆内部所有点的偏离角的方差得到 DAV。由于本文发展的气旋中心定位方法存在平均值约 30km 的误差(约 3*3 像素窗口)，因此这里采用定位得到的气旋中心周围的 3*3 中心区域为参考计算得到 9 个 DAV，并取其平均值为最优估计，以下其他参数的计算如无特殊说明均同 DAV 的获取过程。如图 4-2(c)(d)所示为台风 Melor(2009)和台风 Abel(1996)的卫星红外云图云顶亮温梯度矢量场的偏离角直方图，很明显，对于强台风 Melor(2009)，其偏离角较为集中分布于 0°附近，DAV 较小，而弱台风 Abel(1996)则表现出了相反的特征。

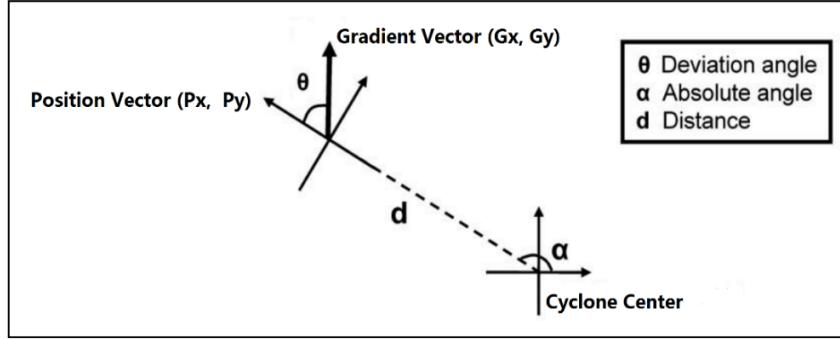


图 4-1 偏离角 DA 计算示意图

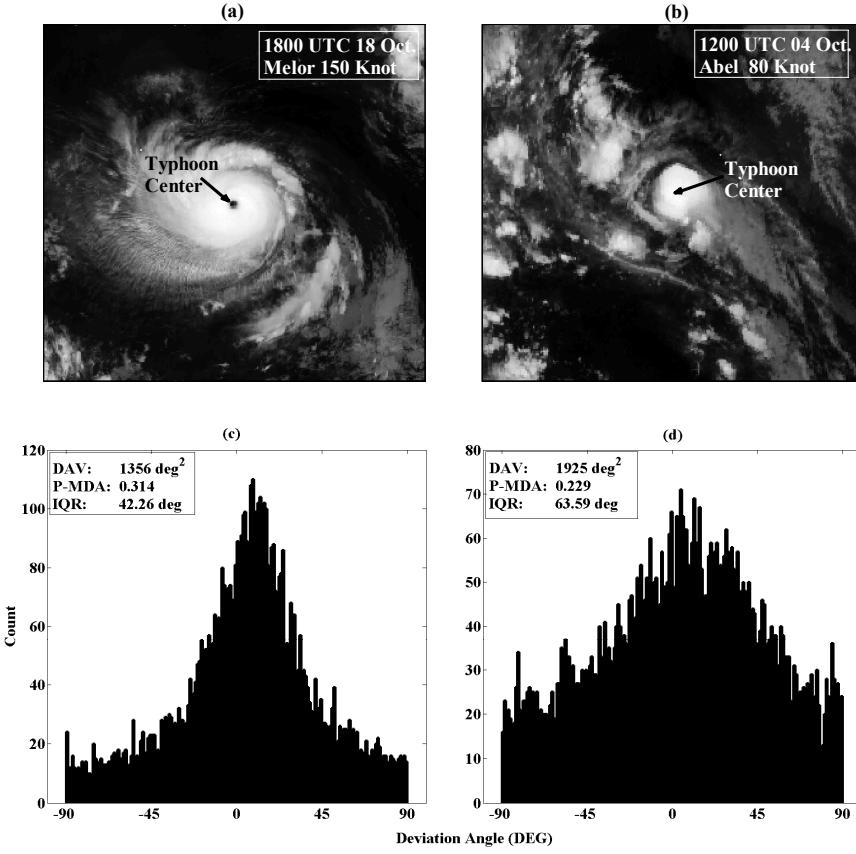


图 4-2 (a)台风 Melor(2009)于 10 月 4 日 1200 UTC 时刻的卫星云图, (b)台风 Abel (1996)于 10 月 18 日 1800 UTC 时刻的卫星云图, (c)和(d)分别为(a)和(b)中云图云顶亮温梯度矢量偏离角的直方图

Piñeros 和 Ritchie 等[53-57]采用了固定半径(300km)计算 DAVs, 但是由于不同气旋在卫星云图上的主体云系形态和尺度等特征各有区别, 所以采用固定半径不甚合理。此外, Ritchie(2014)[57]构造了 DAVs 与气旋强度的 S 形关系模型, 使用本文

收集到的 1996-2007 年期间的 325 个热带气旋案例对其进行了验证，其结果表明对于这 325 个案例，其 DAVs 与气旋强度之间的关系不甚明显(R^2 仅 0.40)。因此，本文通过改善以上两个问题对 DAV-T 技术进行改进。首先，本文第 3.3 节中计算了热带气旋主体云系内半径为 R_c 的封闭圆，而热带气旋主体云系主要集中于该区域，因此本文采用变化的半径 R_c 计算 DAV。此外，我们在 DAV-T 技术的基础上通过增加一些其他统计性参数，来提高 DAV 与气旋强度之间的相关性。

首先考虑到的统计参数是 Liu(2015)[58]提出的平均偏离角的概率密度 P_MDA (Probability Density of Mean Deviation Angle)，P_MDA 的大小反映偏离角在直方图均值附近的频数，如图 4-2 所示，对于强台风系统，偏离角平均值在 0°附近频数较大，因此概率密度 P_MDA 也相应较大。也即，较大的 P_MDA 对应较强的台风系统。Liu(2015) [58]依据气旋强度与 P_MDA 及 DAV 之间的线性关系，提出了热带气旋强度估计的线性指数 TI(Typhoon Intensity Index)，尽管 P_MDA 与强度之间存在明显的正相关关系，但是只考虑偏离角平均值处的孤立概率密度值显然不够合理和客观。因此，我们将 P_MDA 重新定义为区间 $\overline{DAs} - 2\sqrt{\text{RMSE}(DAs)}$ 到 $\overline{DAs} + 2\sqrt{\text{RMSE}(DAs)}$ 之间的偏离角 DA 的累计概率密度，这使得 DA 直方图中大多数的峰值被考虑进来，从而规避因单独考虑偏离角平均值处概率密度所引入的不确定性误差。第二个统计参量为偏离角的四分位差 IQR，IQR 直观反映中间 50% 数据的离散程度，其数值越小(大)，说明中间的数据越集中(分散)。四分位差不受极值的影响，从而规避了计算偏离角过程中引入的不合理的误差。

由以上对台风 Melor(2009)和台风 Abel(1996)的分析，我们总结如下规律：对于一个比较弱的热带气旋系统，其云系反映在卫星云图上为不规则、无组织、对称性差的云团。因此其云顶亮温的梯度矢量一般表现出极度离散分布，梯度矢量的 DAs 的方差相对较大。对于这样的气旋系统，其 P_MDA 较小而 IQR 较大。因此，在得到 DAV，P_MDA，IQR 后，我们通过结合这三个参量来寻求一种能够最大化这三个统计参数的信息量的模式来描述热带气旋结构的发展程度。经过大量实验测试后，最终得到的结果如(4.3)所示：

$$DAO = \frac{100}{IQR} \times \left[\frac{10}{\log(DAV)} \right]^{P_{MDA}} \quad (4.3)$$

注意，这里 DAO 只是为了和 DAV 进行区分，其本身不代表任何物理参量，系数 100 的引入是为了放大 DAO 尺度而并不影响其效果。我们对式(4.3)中各个参量作

如下解释：因气旋强度越强，其 IQR 越小，也即强度反相关于 IQR，所以在 DAO 中，取 IQR 的倒数；根据 Ritchie (2013)[56]中图 3，对于强度较弱的气旋系统，大幅度的 DAV 变化对应微弱的强度变化，而对于强度较强的台风系统，则相反。为此，这里对 DAV 取对数操作来压缩大的和扩展小的 DAVs 的变化；P_MDA 为指数形式，因为强度不同的气旋其 DAV 值可能相同或差别不大，但是对于相对较强的气旋系统，在其平均值邻域内会存在较多 DA 的峰值，这对应于较大的 P_MDA，因此，这里使用 P_MDA 的指数形式对这样的气旋系统进行区分。

4.1.2 卫星云图关键信息提取

对卫星云图以气旋中心为参考进行方位角平均得到云顶亮温径向廓线 BTP (Brightness Temperature Profile)是一种常用的从云图中提取热带气旋结构特征关键信息的方法，本文利用 BTP 来提取热带气旋强度的潜在回归因子。首先将笛卡尔经纬度坐标系转换为极坐标系，然后对其以 4km 为间隔进行方位角平均，注意虽然文中用到的卫星云图的空间分辨率为 8km，但是因为这里取方位角平均，所以原始数据 8km 的分辨率并不影响将其转换为径向分辨率为 4km 的径向廓线。另外，同样考虑热带气旋中心的定位误差，在提取 BTP 时我们采用和计算 DAV 相同的以中心 9 个像素点为中心提取得到 9 条廓线，然后对其求平均得到亮温廓线最优估计。

根据 Croxford, Weatherford, Gray 等[82-84]的定义，热带气旋的核心区域可以被人为地分成内核(径向 0-1°)区域和外核(径向 1-2.5°)区域。因此我们使用提取得到 BTPs 计算其内核亮温平均值 ICBT (Inner Core Average BT)和外核亮温平均值 OCBT (Outer Core Average BT)。此外，对于热带气旋外围区域，我们提取其廓线上的最小值和最大值 (Minimum and Maximum BT within the Outer Core Region, MIBT and MABT)。如图 4-3 所示为上述参量的分布示意图，其中黑色曲线为云顶亮温廓线的平均值(本文收集到的 16,216 幅卫星云图数据的 BTPs 的平均)。

根据 Sanabia (2014)[85]，气旋内核 BTP 可以用位于距离气旋中心 200km 半径以内的四个关键节点来表征。第一个关键节点为最低亮温值的径向位置 CCT (Radial Location of the Coldest Cloud Top)，注意这里 CCT 和 MIBT 的定义不同。第二个关键节点为廓线上的第一个对流过度顶位置 FOT (The First Convective Overshooting Top)。该点通过计算水汽通道和红外通道亮温差 T_{WV-IR} 得到，也即距离气旋中心位置最近的第一个 T_{WV-IR} 为正的位置。第三和第四个关键节点定义气旋内核的最小和最大尺度，内核最小尺度(L45)为从气旋中心往外第一个 BTP 趋于从

水平变成垂直(45°)的临界点，而内核最大尺度(U45)则为从气旋中心往外第一个BTP 趋于从竖直变成水平(45°)的临界点。这些节点信息的确定方法详参 Sanabia (2014)[85]，但是，因为本文使用未经颠倒的笛卡尔坐标系，这里 L45 和 U45 的定义和 Sanabia (2014)[85]有所区别。

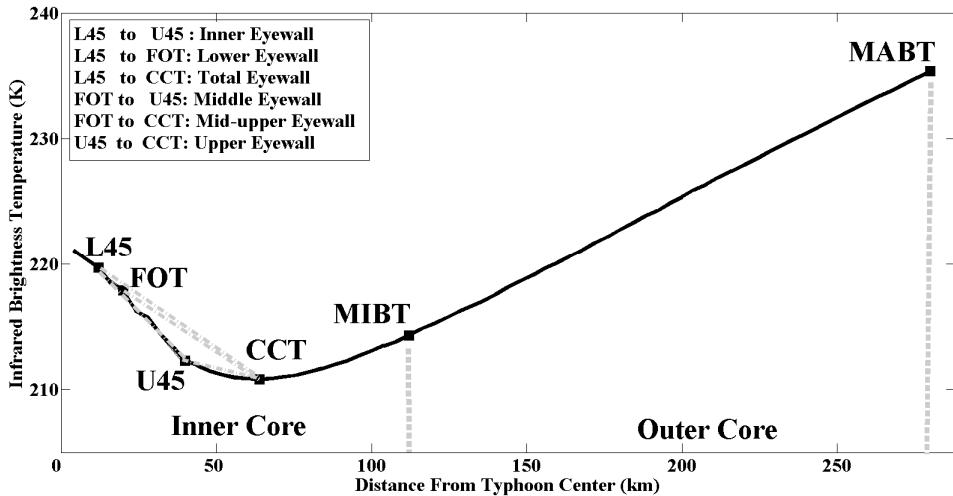


图 4-3 云顶亮温径向廓线示意图(黑色曲线)，垂直虚线将核心区域分成了内核与外核区域

获取 L45 和 U45 的一个前提是 CCT 不在气旋中心，也即 BTP 遵从图 4-3 中黑色曲线的基本形态，但是并非所有的热带气旋卫星云图满足这样的条件，尤其对于比较微弱的气旋系统，其中心为密闭的低亮温云团。因此，对于这样的弱气旋系统，这里假设其 L45 和 U45 为那些可以计算得到 L45 和 U45 的案例的平均。另外一个获取 L45 和 U45 的障碍是：对于一些气旋，其云墙和眼区结构非常不明显，从而其亮温径向廓线上不存在 45° 的拐点。对于类似的案例，我们迭代的调整阈值 45° 到更小的角度直到找到 BTP 上从准水平(竖直)到准竖直(水平)变化的临界点位置。但是，这个阈值不能低于 30° 。在得到这四个关键节点信息后，我们进一步计算每两个节点之间的斜率。例如，L45 与 U45 之间的斜率：

$$S_{L45-U45} = \frac{BT_{L45} - BT_{U45}}{L_{45} - U_{45}} \quad (4.4)$$

这里 $S_{L45-U45}$ 的物理含义为气旋内核云墙相对云高，也即 $S_{L45-U45}$ 表征内核对流强度，其中 BT_{L45} 和 BT_{U45} 分别为 L_{45} 和 U_{45} 处的云顶亮温。图 4-3 中给出了这四个关键节点之间的六条红外云图云顶亮温斜率线，这六条线可以直观地表征整个气旋内核包括

云墙云带不同尺度范围内的对流强弱。最后，我们计算了每两个关键节点之间的平均亮温。对于以上得到的所得所有参量，我们认为这些参量的变化可能和气旋强度有关，但是其关系如何尚不明确，如表 4-1 所示为从云图上所提取到的可能的强度回归因子。注意本文所使用的关于这些节点的术语遵循 Hazelton (20013)[86] 和 Sanabia (2014)[85]。

表 4-1 利用卫星云图提取到的热带气旋强度潜在回归因子

Potential predictors	Description
ICBT	Average BT within the inner core (0-1° radially)
OCBT	Average BT within the outer core (1 -2.5° radially)
MIBT	Azimuthally averaged minimum BT within the outer core
MABT	Azimuthally averaged maximum BT within the outer core
S _{L45-FOT}	The slope of the lower eyewall
S _{L45-U45}	The slope of the inner eyewall
S _{L45-CCT}	The slope of the total eyewall
S _{FOT-U45}	The slope of the middle eyewall
S _{FOT-CCT}	The slope of the mid-upper eyewall
S _{U45-CCT}	The slope of the upper eyewall
A _{L45-FOT}	The average BT within the lower eyewall
A _{L45-U45}	The average BT within the inner eyewall
A _{L45-CCT}	The average BT within the total eyewall
A _{FOT-U45}	The average BT within the middle eyewall
A _{FOT-CCT}	The average BT within the mid-upper eyewall
A _{U45-CCT}	The average BT within the upper eyewall

4.1.3 热带气旋强度多元线性回归模型

尽管从云图上提取尽可能多的强度回归因子是可行的，但是因为这些回归因子当中很多是互相关的，从而提供不必要的冗余信息，所以将所有回归因子都考虑进来并非明智的选择。为此，在进行最终的线性回归之前，有必要对这些回归因子进行合理的取舍以筛选出对模型贡献率最大的主要回归因子。这里注意，尽管很多研究证明热带气旋的中心位置纬度等信息对于回归气旋强度非常有用[3, 60, 61, 64]，但是为了训练一种客观的热带气旋强度回归模型，本论建立的文热带气旋强度估计模型不使用有关于热带气旋本身的信息。

对于 DAV-T 技术相关参量，我们最终选用参数 DAO 和 DAV²。对于从亮温廓线上提取得到的回归因子，首先，通过测试 1996-2007 年的 325 个热带案例，我

们手动地剔除了和强度关系比较弱的($R^2 < 0.5$)回归因子。经过筛选，初步得到了包含 12 个回归因子的回归因子集，它们是：DAV², DAO, ICBT, OCBT, MIBT, S_{L45-U45}, S_{L45-CCT}, S_{FOT-U45}, A_{L45-U45}, A_{L45-CCT}, A_{FOT-U45} and A_{U45-CC}。对 ICBT 和 OCBT, 使用 A_{L45-U45}, A_{L45-CCT}, A_{FOT-U45} 和 A_{U45-CCT} 对其进行除法操作从而引入八个新的回归因子到回归因子集。最终，回归因子集里包含总共 20 个潜在因子。

在得到回归因子集后，我们使用逐步回归方法根据回归因子对已有线性模型的统计显著性选择剔除或者引入该回归因子到已有模型。具体过程如下：初始模型仅包含常数项，每输入一个新的回归因子，计算 F-统计的 P-value，并与未输入该回归因子之前的模型进行比较。如果该因子当前不在回归模型中，零假设为：如果引入这个因子则其系数为 0，如果有充分的证据来反驳这个假设，则将该因子引入模型当中。相反，如果该因子当前在模型当中，零假设为：该因子的系数为 0，如果没有足够的证据接受零假设，则该因子被从模型中剔除出去。当新加入的回归因子不能显著地提高模型时，我们终止回归过程。这里，我们设定最低置信水平为 99.99%，这意味着我们要求对于一个回归因子，其接受条件为 P-value 小于 0.0005，而拒绝条件为 P-value 大于 0.001。

表 4-2 回归模型统计参数

Predicatos	Added Order	Coefficients	P-Value	RMSE after addition of the predictor (knot)	Coefficients for Normalized Predicatos	Relative Contribution (%)
DAV ²	1 ST	-6.04e-06	3.39e-61	31.11	-22.37	1.66
DAO	2 ND	44.64	4.35e-115	19.41	43.69	3.24
ICBT/A _{L45-U45}	3 RD	-2703.25	0	17.22	-565.05	41.92
ICBT/A _{FOT-U45}	4 TH	2730.51	0	16.46	543.39	40.31
S _{L45-U45}	5 TH	12.81	4.90e-112	15.46	84.61	6.28
OCBT/A _{L45-FOT}	6 TH	-201.98	3.46e-33	13.16	-57.45	4.26
OCBT/A _{U45-CCT}	7 TH	126.48	1.42e-16	12.69	31.34	2.32

通过上述逐步回归过程，最终得到的回归模型包含共计七个回归因子，他们分别是：DAV², DAO, ICBT/ A_{FOT-U45}, ICBT/ A_{L45-U45}, OCBT/ A_{U45-CCT}, OCBT/ A_{L45-FOT} 和 S_{L45-U45}。其中，根据已有研究结果，模型第一个引入 DAV²，其他六个因子的引入顺序(表 4-2 第 2 列)由其对于模型累计方差的贡献率决定。表 4-2 所示为使用 1996–2008 年 325 个热带气旋案例的 16,126 幅卫星云图训练线性回归模型得到的统计参数。为了说明模型中每个因子对该模型的相对贡献率，我们对这 7 个回归因子各自

进行了归一化处理，用归一化后的因子集重新进行了回归训练，如表 4-2 最后两列所示，因子 $ICBT/A_{L45-U45}$ 和 $ICBT/A_{FOT-U45}$ 对该模型的贡献最大(41.92% 和 40.31%)，紧随其后的是 $S_{L45-U45}$ (6.28%) 和 $OCBT/A_{L45-FOT}$ (4.26%)。很明显。这些因子的引入使得模型得到了很大的改进(RMSE 净差 18.42 节，误差提高百分比 59.21 %)。

最终，我们训练得到的热带气旋强度的线性回归模型如式(4.5)所示：

$$\begin{aligned} IV_{MAX} = & -6.04 * 10^{-6} * DAV^2 + 44.64 * DAO + 2730.51 \frac{ICBT}{A_{FOT-U45}} - 2703.25 \frac{ICBT}{A_{U45-L45}} \\ & + 126.48 \frac{OCBT}{A_{U45-CCT}} - 201.98 \frac{OCBT}{A_{L45-FOT}} + 12.81 * S_{L45-U45} + 69.11 \end{aligned} \quad (4.5)$$

其中， IV_{MAX} 表示热带气旋强度(Infrared Image Estimated V_{MAX})。如图 4-4 所示为模型估计得到的气旋强度和 JTWC 最优路径数据提供的强度之间关系的散点图，我们对该散点图用最小二乘法进行了拟合，结果如图 4-4(a)中黑色直线所示。整体而言，该模型精度较高，散点图拟合系数为 1，相关性 R^2 为 0.77，RMSE 为 12.69 节。但是很明显对于弱气旋系统，该模型高估了其强度。图 4-4(b)为误差(这里定义为模型估计得到的与 JWC 提供的强度之间的差值)的分布，其分布可以用一个均值为 2.00 方差为 12.69 节的高斯模型表示，从图 4-4(b)可以发现，68.26% 的误差分布在 14.69 节和 11.69 节之间，95.44% 分布在-27.38 节到 23.38 节的区间。

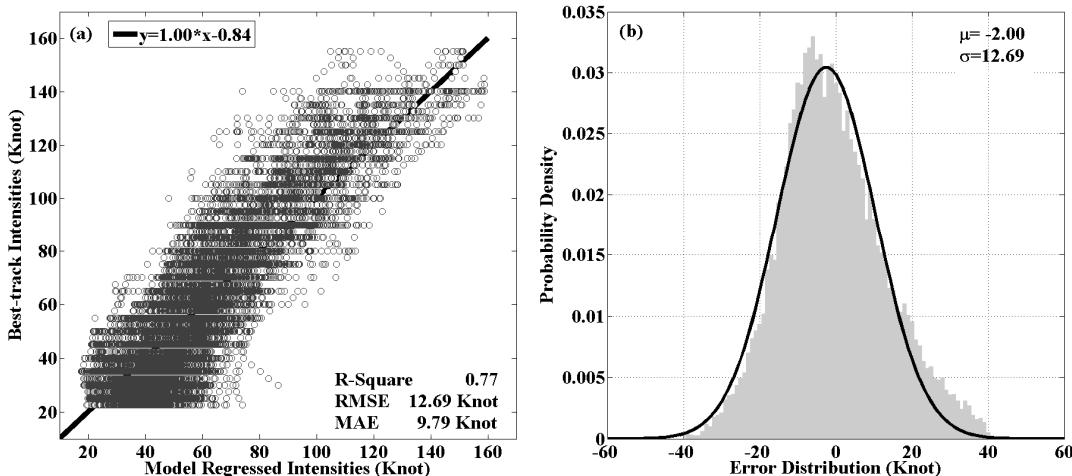


图 4-4 (a) 模型估计和 JTWC 最优路径强度关系散点图，其中黑色斜线为对散点的拟合结果，(b) 模型估计和 JTWC 最优路径强度之间偏差分布，其中黑色曲线为对直方图的拟合结果

4.2 模型验证与评价

我们对训练得到的模型进行了多次测试验证，以说明其是否有效。首先，对用于模型训练的 1996-2007 年的 325 个热带气旋案例进行了依赖性检验，其次，使用未用于训练该模型的 2008-2009 年的 52 个热带气旋案例进行了独立性验证。

4.2.1 依赖性检验

为说明本文得到的模型对训练数据集中每个热带气旋案例强度估计的误差，我们采用 N 重交叉验证方法 (N-fold Cross Validation)。首先，将 16,216 幅气旋卫星云图数据分成相互独立的 325 组(每组一个气旋案例)，然后进行了 325 次迭代的独立验证。对第 k 次($k=1,2,\dots,325$)验证，我们将第 k 个案例从这 325 个案例中预留出来，用剩下的 324 个案例训练模型的系数。然后，用预留出来的这个案例对训练得到的模型进行验证。该过程得到了 325 个不同的模型，但是这些模型几乎无差异且和式(4.5)所示的模型非常接近。对每次验证，我们计算了平均绝对偏差 MAE (Mean Absolute Error)，均方根误差 RMSE (Root-Mean-Square Error) 和平均绝对相对误差 MARE (Mean Absolute Relative Error)，结果如图 4-5 所示，其中图 4-5(a)为对其绝对误差按照误差大小累积得到的误差累积分布，可以看到，50%、75% 和 90% 的模型估算的气旋强度的 MAE 分别小于 7、13 和 20 节。图 4-5(b)为 N 重交叉验证得到的 325 个气旋强度估计的平均 RMSE，其中超过 75% 的案例的强度估计误差的 RMSE 小于 12 节。图 4-5(c)和(d)为平均 MARE 和偏差(和 JTWC 最优数据的差值)关于这 325 个案例的分布，MARE 的平均值为 19.91%，平均绝对偏差为 4.47 节。

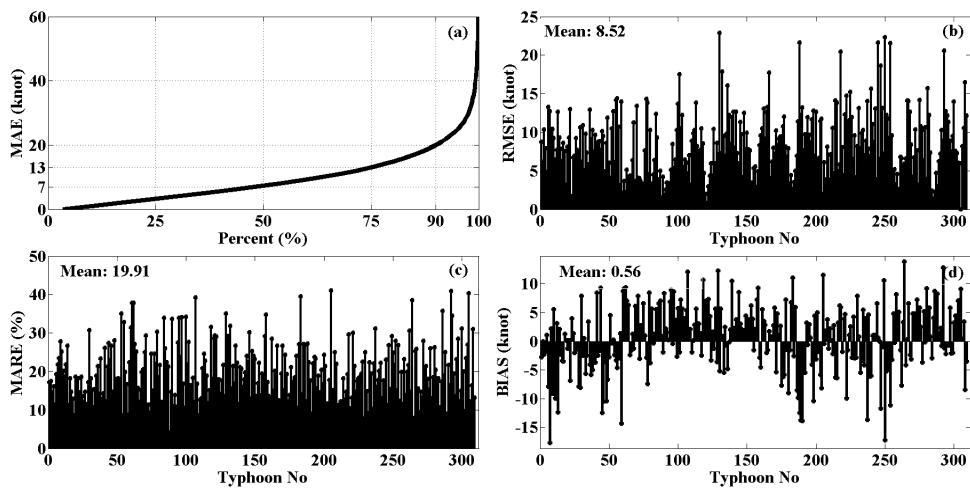


图 4-5 N 重交叉验证结果，(a) 平均绝对累积偏差，(b) 均方根误差，(c) 绝对相对误差，(d) 偏差

为了检验训练得到的模型是否与热带气旋强度有关，我们将 16,126 幅云图按照每 5 节为一个强度单元分成了 25 个单元，并对每个单元内所有模型估计值相对于 JTWC 最优路径提供的强度信息的 RMSE, MARE 和偏差取了平均值，结果如图 4-6 所示。图 4-6(a)为每个强度单元中云图的数据量，图 4-6(b)中 RMSE 平均值的变化趋势表明对于强度低于 130 节的气旋系统，模型误差随着气旋强度增强而增大。然而从图 4-6(c)中平均 MARE 随强度的变化曲线可以发现对于较强的气旋系统(≥ 55 节)，该模型的绝对相对误差较低，而对于较弱(< 55 节)的气旋系统，则有较大的 MARE($\geq 15\%$)。这表明尽管对于较强的气旋系统，该模型误差较大，但其相对误差很小。从图 4-6(d)所示的平均偏差随强度的变化可以发现，对于比较弱(< 25 节)的热带低压系统，该模型明显地高估(绝对偏差 > 10 节)了其强度，而对于比较强(> 150 节)的台风系统，该模型明显地低估了(绝对偏差 > 10 节)其强度。

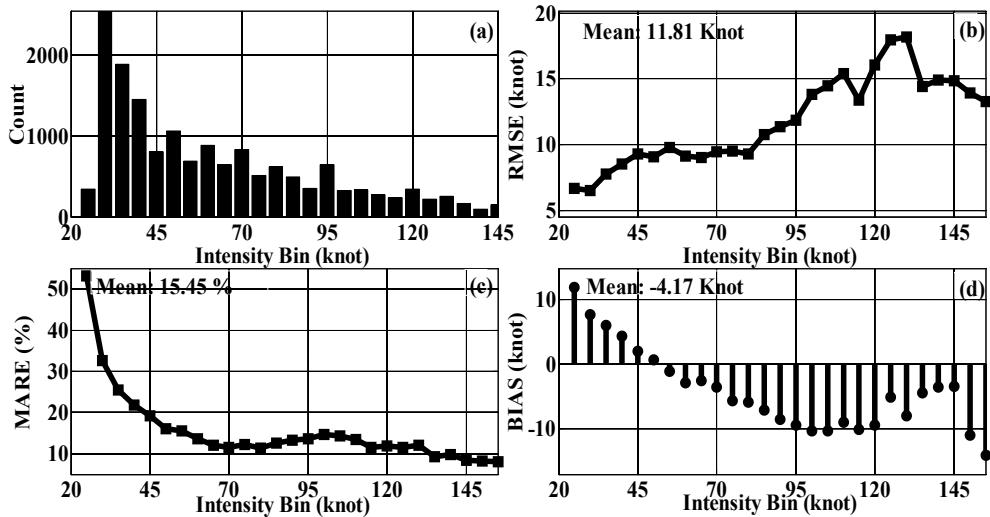


图 4-6 依赖性检验结果，(a)不同强度单元中卫星云图的数据量，(b) 模型在不同强度单元产生的平均 RMSE，(c) 模型在不同强度单元产生的平均 MARE，(d) 模型在不同强度单元产生的平均偏差

为了进一步说明该模型这种对于弱气旋系统强度的高估和强台风系统强度的低估现象，我们将这 16,216 幅云图数据依据 Saffir–Simpson 分级标准分成了 7 组，计算了每个分组中该模型的误差(RMSE 和 MARE)。如表 4-3 所示，可以看出，RMSE 随着强度的增大而增大，但是 MARE 随着气旋级别的变化表明该模型对除了热带风暴和热带低压以外的其他级别的气旋系统的强度估计的绝对相对误差较小。这其中，热带低压和热带风暴占据了主要的数据样本(29.47% 和 34.19%)，尽管对这两类气旋强度估计的 RMSE 较小(7.77 和 9.95 节)，其绝对相对误差却非常大(30.35%

和 18.46%)。图 4-4(a), 图 4-6(d)和表 4-3 同时表明这样的误差主要是源于对较弱的气旋系统强度的高估, 同时对于 1 到 5 级台风, 随着强度的增加, 模型逐渐趋向于低估其强度值。整体而言, 对于 16,216 幅卫星云图数据, 57.76% 的强度被低估, 而 42.24% 被高估, 整体的 RMSE 为 12.69 节, 整体 MARE 为 19.78%, 这样的 MARE 主要由弱气旋系统(热带低压和热带风暴)造成, 当把这些案例从实验数据集中剔除后, MARE 可以减小到 12.55%。

表 4-3 按照 Saffir–Simpson 气旋分级标准将 16,216 幅卫星云图划分为 7 组进行依赖性检验的结果

Bins	No. of samples (%)	No. of overestimated (%)	No. of underestimated (%)	RMSE (knot)	MARE (%)
Tropical Depression	4,752 (29.47)	4,597 (96.74)	155 (3.26)	7.77	30.35
Tropical Storm	5,513 (34.19)	3,575 (64.85)	1,938 (35.15)	9.95	18.46
C1 (Typhoon)	2,444 (15.16)	766 (31.34)	1,678 (68.66)	10.52	12.71
C2 (Moderate Typhoon)	1,242 (7.70)	397 (31.96)	845 (68.04)	12.94	14.79
C3 (Severe Typhoon)	910 (5.64)	247 (27.14)	663 (72.86)	15.68	14.26
C4 (Super Typhoon)	1,041 (6.46)	391 (37.56)	650 (62.44)	17.49	11.82
C5 (Extreme Typhoon)	224 (1.39)	107 (47.76)	117 (52.24)	18.93	10.69
Overall	16,126 (100)	9,314 (57.76)	6,812 (42.24)	12.69	19.78

4.2.2 独立性验证

为了验证该模型在实际应用中的有效性和准确性, 本文采用 2008-2009 年发生于西北太平洋的 52 个热带气旋案例(如图 4-7 所示)对训练得到的模型进行独立性验证。这 52 个案例当中有 5 个热带低压系统, 23 个热带风暴, 5 个台风, 6 个中强度台风, 3 个强台风, 5 个超级台风, 5 个极端台风。由于这 52 个案例没有用于训练气旋强度估计模型, 其结果能够在一定程度上表明这个模型在实际应用中的效果。为了进行客观比较分析, 我们根据最大强度阈值 <60 , $60\text{-}120$ 和 ≥ 120 节将这 52 个案例平均分成了三组(分别产生 690, 689 和 603 幅卫星图像, 分别记为 G1, G2, G3), 此后对这三组数据各自独立的进行了验证。

如图 4-8 所示为对这三组数据, 模型估计得到的和 JTWC 最优路径提供的强度关系的散点图。可以看出, 相较 JTWC 最优路径数据而言, 模型准确性较高, 如图所示, 对 G1(图 4-8(a)), 其结果误差较大, 这是因为在 G1 中存在大比例的弱气旋系统, 模型对其强度过高估计造成了较大的误差分布。对 G2(图 4-8(b)), 模型表现相对较好(R^2 为 0.66), 而对于 G3(图 4-8(c)), 因其中存在最大比例的强台风系统,

而模型对这类系统的强度估计精度相对较高，其结果精度最高(R^2 为 0.84)。表 4-4 列出了将这 52 个案例分成三组进行独立性验证产生的统计参数。对所有的 52 个案例整体而言，RMSE, MAE, bias, MARE 和 R^2 的平均值分别为 12.01, 9.50, 2.00 节, 21.67%，和 0.77。

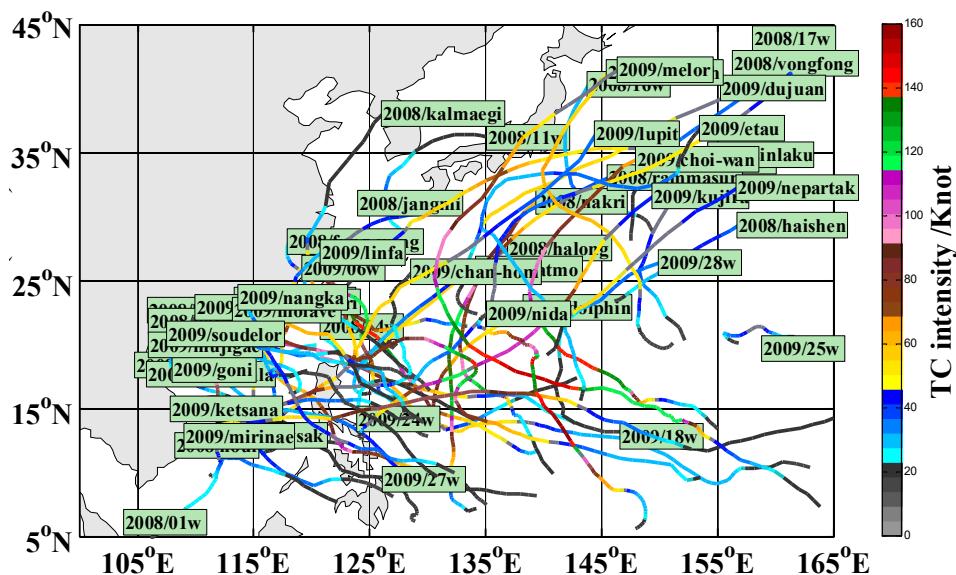


图 4-7 用于进行独立性验证的 52 个热带气旋案例

表 4-4 独立验证结果

	<60 knot (N=690)	60-120 knot (N=689)	≥ 120 knot (N=603)	Overall (N=2072)
RMSE (knot)	6.47	11.22	12.29	12.01
MAE (knot)	8.30	8.92	9.47	9.50
Mean Bias (knot)	7.30	0.01	0.73	2.00
MARE (%)	26.34	18.76	15.16	21.67
R^2	0.47	0.66	0.84	0.77

如图 4-9 所示为 G1 到 G3 中热带气旋案例强度变化序列，其中灰色实线为 JTWC 最优路径提供的强度变化序列，黑色曲线为本文模型估计得到的强度序列。不难发现，对于 G3，模型估计得到的强度序列和最优路径数据高度一致。而对 G1，正如所料，其强度估计值偏差较大且模型对其强度的高估现象十分明显。从图 4-9 我们还发现：卫星云图形态的变化并不一定意味着气旋强度的显著变化。根据以上验证分析，我们得出结论：该模型在实际应用中表现良好，尤其是对强度较强的台风系统效果更好，模型能够很好地利用卫星云图云顶亮温数据估算热带气旋的当前强度。

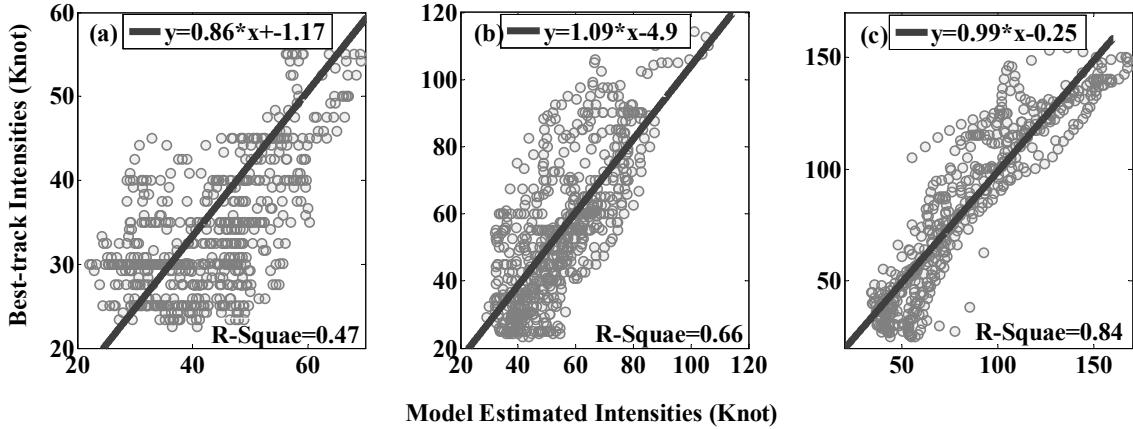


图 4-8 模型估计和 JTWC 最优路径强度关系散点图, (a)气旋系统最大强度<60 节, (b)气旋系统最大强度为 60-120, (c)气旋系统最大强度>120 节。图中黑色斜线为散点图的拟合结果

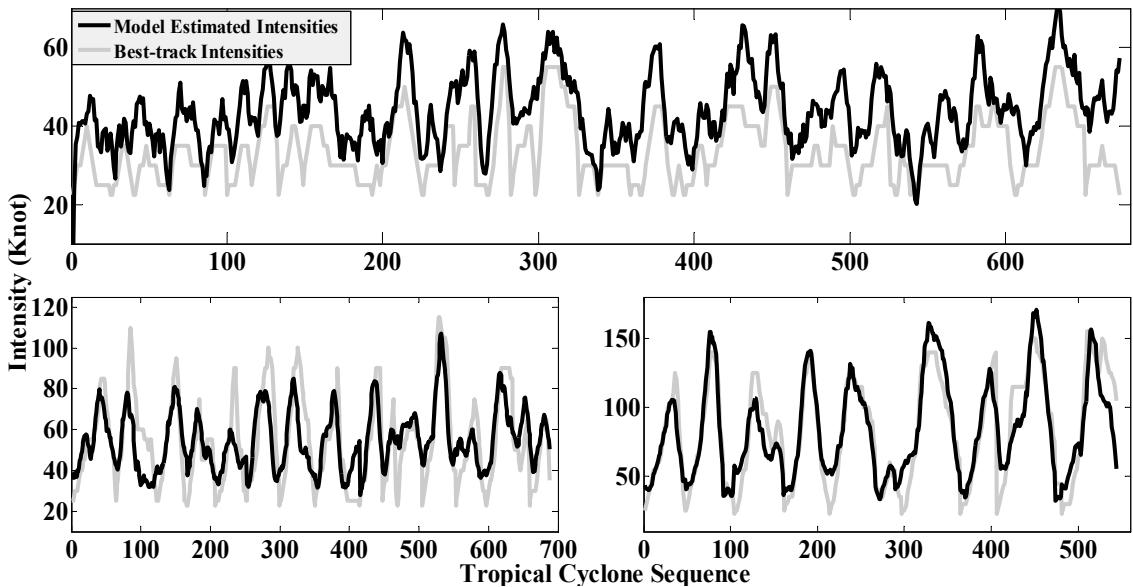


图 4-9 52 个热带气旋系统在三个分组中的强度变化序列

4.3 模型讨论

为分析本文发展的模型的误差源, 我们继续采用台风 Melor(2009)为例进行讨论, 如图 4-10(b)所示为台风 Melor(2009)的强度变化序列, 其中, 黑色虚线为 JTWC 最优路径强度变化曲线, 灰色曲线为模型估计得到的强度变化曲线, 黑色曲线为对模型估计结果进行 12-h 平滑得到的曲线。

从图 4-10(b)上可以明显地观察到，在大多数情况下，模型对台风 Melor(2009)强度估计值偏低(平均偏差为-3.66 节)，但是在其强度达到峰值和在随后的 48 小时内，模型对其强度估值偏高，我们对该时间段内的卫星云图进行了仔细的检查后发现，大部分卫星云图上不存在 L45 和 U45，因此我们有理由怀疑假设其 L45 和 U45 的值为其他存在 L45 和 U45 的案例的平均可能引入误差。其次，正如本文第 2 章中数据介绍部分所述，对于部分云图上存在带状数据丢失现象，我们对其进行最邻近插值处理，因为这种插值处理会给计算云顶亮温的梯度矢量场和径向廓线引入不确定的误差，我们怀疑插值过程也可能是误差的来源。

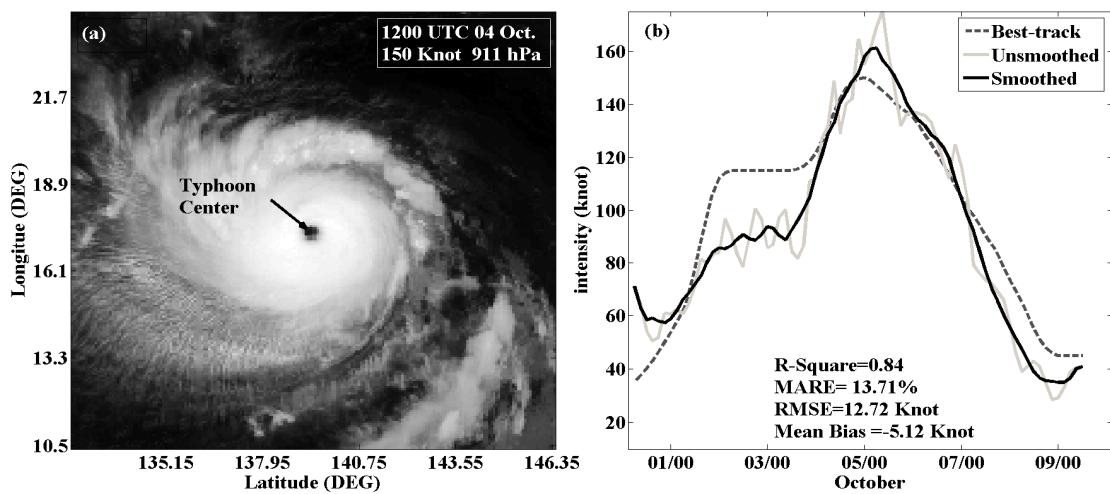


图 4-10 (a) 台风 Melor(2009)于 10 月 4 日 1200 UTC 时刻的红外云图, (b) 台风 Melor(2009)的强度变化序列

另外，从图 4-10(b)上 JTWC 最优路径强度序列可以看到台风 Melor(2009)经历了一个强度稳定期(10 月 2 日到 10 月 4 日)，但是模型估计得到的强度序列在此期间呈现出逐渐上升的趋势，为此，我们对这段时间内的 JTWC 最优路径数据进行了仔细检查，发现在 JTWC 最优路径数据记录中，Melor (2009)从 10 月 2 日 0000 UTC 到 10 月 3 日 0600 UTC 期间确实经历了强度为 115 节的稳定期，但是其强度于 10 月 3 日 1200 UTC 时刻增强到 120 节 并于随后达到了 130 节。因此，很明显，对 JTWC 强度数据进行插值处理并用插值后的数据作为最优数据训练模型引入了误差。为此，我们使用未经插值处理的原始 JTWC 气旋强度信息和相应时间的卫星云图重新训练了强度估计模型。如表 4-5 所示为使用原始和插值处理后的 JTWC 强度数据训练模型并对其进行依赖性和独立性验证得到的统计参数的对比分析。很明显，使

用原始 JTWC 强度数据信息训练得到的模型误差更小。这表明：如果能够提供高时间分辨率且准确的热带气旋强度数据，本文发展的模型的精度可以得到进一步提升。

表 4-5 使用原始和插值处理后的 JTWC 强度数据训练得到的模型的比较

Dependent tests		Independent tests	
Interpolated 16,126 images)	Original (8,652 images)	Interpolated (1,982 images)	Original (931 images)
R ²	0.77	0.78	0.77
RMSE (knot)	12.69	9.88	12.01
MARE (%)	19.78	14.93	21.67
			15.55

4.4 小结

本章主要讨论利用卫星云图估计热带气旋强度的多元线性回归模型。首先，通过改进和发展 DAV-T 技术，提出了定量热带气旋云图发展程度的新参数 DAO，同时通过对云顶亮温径向廓线的处理提取了强度的潜在回归因子，对这些因子进行筛选后，使用逐步回归方法得到了热带气旋当前强度的估计模型。最后，使用 1996-2009 年 377 个热带气旋案例共计 18,288 幅红外云图数据对文中模型进行了依赖性检验和独立性验证。使用 2008-2009 年 52 个热带气旋案例对模型进行独立性验证的结果表明本文建立的模型可以比较准确地估计热带气旋当前强度，该回归模型具有一定的实用价值。

5. 热带气旋海表面风场提取

利用卫星云图提取热带气旋海表面风场技术的可行性主要在于以下两个方面：(1) 可以利用已有的飞机侦测案例研究云图信息和飞机侦测高度气旋风场结构的关系[2, 3]；(2) 已有关于飞机侦测高度和海表面热带气旋风场结构之间的关系研究[1]。以上从卫星云图云顶亮温信息到飞机侦测高度热带气旋风场结构再到海表面风场的过程中，飞机侦测到的风场数据是必不可少的。然而，对于西北太平洋，这样的数据资料非常稀缺。因此，我们避开飞机侦测数据的中间环节，直接利用卫星云图提取海表面风场。

热带气旋的海表面风场应当为对称的切向风场和不对称的径向风场的叠加。其中切向风表征涡旋的环流强弱，而径向风则表征海表面流场在气旋的作用下向气旋中心辐聚的强弱。一方面，径向风场的观测和研究十分困难，另一方面，径向风的量值相对切向风较小。因此，本论文首先设法利用卫星云图数据尽可能精确地提取原点对称的热带气旋的切向风场分量。在得到切向风场后，我们假设气旋移动是造成风场不对称的唯一原因，并通过将热带气旋移动矢量叠加到切向风场上最终得到完整的热带气旋海表面二维风场。

在利用卫星云图提取得到气旋中心位置和强度这两个最为关键的信息后，可以将其作为输入进一步设法利用卫星云图提取得到热带气旋的海表面切向风场。热带气旋的切向风风速通常表现为在涡旋中心为 0，沿径向距离增加而风速逐渐增大直到达到最大值，随后减小直至逼近于 0[87]。目前，公认的有三种主要的切向风理论模型，与实际观测也较为接近：理想非粘性 Rankine 环流模型[88]、粘性 Burgers–Rott[89, 90]环流模型和 Sullivan 环流模型[91]，如图 5-1 所示。为讨论方便，我们首先选用使用最为广泛的理想非粘性 Rankine 环流模型说明切向风廓线的构造过程。Rankine 环流模型如式(5.1)所示。

$$V(r) = \begin{cases} V_{MAX} \left(\frac{r}{R_{MAX}} \right), & r \leq R_{MAX} \\ V_{MAX} \left(\frac{R_{MAX}}{r} \right)^m, & r > R_{MAX} \end{cases} \quad (5.1)$$

其中， $V(r)$ 表示切向风风速， V_{MAX} 为最大切向风速， R_{MAX} 为最大风速半径， r 为半径， m 为无量纲的正常数，与涡旋的尺度大小相关。需要注意的是 Rankine 环流仅考虑切向风，忽略了径向风的作用。

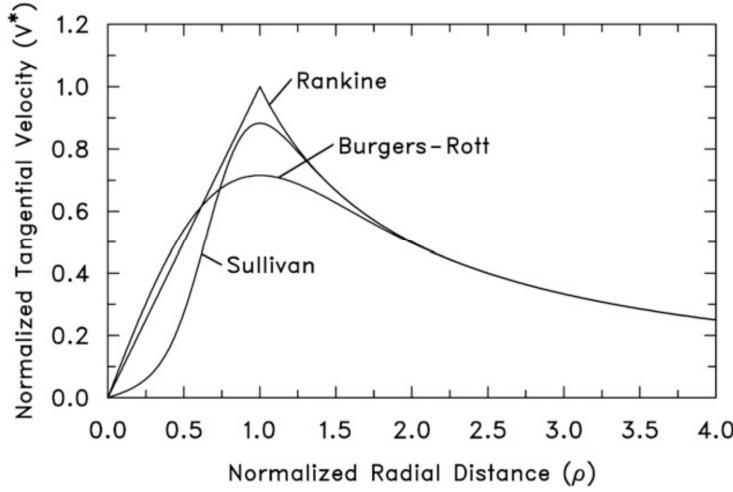


图 5-1 热带气旋切向风的径向廓线理论模型，归一化径向距离 $\rho = r / R_x$ ，其中 r 为距涡旋中心距离， R_x 为归一化最大风速所在半径位置

从云图数据上直接提取切向风廓线目前尚难以实现。解决这个问题的一种方法是设法获取廓线上的一些关键节点的位置和风速，这些关键节点包括气旋的中心位置纬度 Lat、气旋强度(V_{MAX})以及最大风速半径(R_{MAX})、R34、R50、R64 等在 JTWC 最优路径扩展数据集中有所记录，同时 SHIPS 统计模型提供了 2000-2012 年西北太平洋热带气旋不同气压高度的距离气旋中心 500km 处切向风速数据资料，这里我们选用 850 hPa 的切向风速 V_{500} ，根据 V_{500} 可以通过一定方法推算得到热带气旋风场和背景风场的边界线位置 R_0 。表 5-1 列出了这些关键风速节点信息，这些热带气旋切向风场廓线上的关键节点信息可以用来比较准确地拟合得到切向风廓线函数。

表 5-1 热带气旋风场关键风速节点

Terminology	Description
Lat	The latitude of the location of the TC center
V_{MAX}	The maximum sustained wind
R_{MAX}	The radius of maximum wind
R34	The radius at which the wind is 34
R50	The radius at which the wind is 50 knot
R64	The radius at which the wind is 64 knot
V_{500}	Tangential wind at the radius of 500 kn from TC center
R_0	The radius at which the TC cannot be distinguished from the environment

本章使用的关于气旋本身的信息，包括其中心位置的纬度 Lat 和强度 V_{MAX} 已经在第 3 和 4 章进行了详细地介绍，这些信息加上气旋的持续时长(这里定义为其从

达到热带风暴级别(≥ 34 节)到当前经历的小时数)将被用来提取以上所述热带气旋的关键风速节点，使用这些关键风速节点可以拟合得到切向风廓线，进而得到对称的切向风场，最后通过叠加径向风场信息即可构造完整的二维海表面风场。

5.1 卫星云图云顶亮温预处理

考虑到 SHIPS 统计模型数据时间跨度为 2000-2012，而 HURSAT-B1 数据集的时间跨度为 1996-2009 年，所以本章研究时间跨度为 2000-2009 年。此外，由于弱气旋系统一般不存在 R64 和 R50 等风速半径，出于研究结果可信度的考虑，本章主要考虑强度达到台风级别($V_{MAX} \geq 64$ 节)的热带气旋系统。经过与 SHIPS 数据的匹配和筛选，最终确定了 137 个热带气旋案例，6,667 幅卫星云图。我们采用第 4.1.2 节所述方法将卫星云图云顶亮温数据处理成方位角平均的径向亮温廓线，利用这些廓线提取了 FOT、CCT、ICBT、OCBT、MIBT、MABT 以及 CCT 处的亮温值等信息，这些信息在一定程度上可以近似刻画云顶亮温廓线的形状。

这里，我们采用经验正交分解 EOF (Empirical Orthogonal Function) 对计算得到的云顶亮温廓线数据进行降维处理。EOF 是一种常用的提取数据的主体特征的数学方法，其最早由 Loren(1956)[92] 引入到气象数据分析当中。目前，EOF 在地学相关学科尤其是气象数据统计分析中的应用十分普遍。这里我们简单介绍其原理。

假设某气象变量场的观测资料以矩阵形式给出：

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2n} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ X_{m1} & X_{m2} & \dots & X_{mn} \end{pmatrix} \quad (5.2)$$

其中 m 为空间点， n 是观测时间序列，对矩阵 \mathbf{X} 进行自然正交展开，即将 \mathbf{X} 分为时间函数 \mathbf{T} 和空间函数 \mathbf{S} 两部分，亦即：

$$\mathbf{X} = \mathbf{ST} = \sum_{k=1}^p S_{ik} T_{kt} = S_{i1} T_{1t} + S_{i2} T_{2t} + \dots + S_{ip} T_{pt} \quad (5.3)$$

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & \dots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \dots & S_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{m1} & S_{m2} & \dots & S_{mn} \end{pmatrix} \quad \mathbf{T} = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} & \dots & T_{1n} \\ T_{21} & T_{22} & \dots & T_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ T_{m1} & T_{m2} & \dots & T_{mn} \end{pmatrix} \quad (5.4)$$

其中 $i=1,2,\dots,m$, $t=1,2,\dots,n$, $k=1,2,\dots,p$, 也即气象场第 i 个格点上的第 t 次观测可以看做是 p 个空间函数 S_{ik} 和时间函数 T_{kt} 的线性组合。 $\mathbf{S}_j = (S_{1j}, S_{2j}, \dots, S_{nj})^T$ 为第 j 个典型场, 其只是空间的函数。第 t 个空间场可以表示为:

$$\begin{bmatrix} X_{1t} \\ X_{2t} \\ \vdots \\ X_{nt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{1t} \\ S_{2t} \\ \vdots \\ S_{nt} \end{bmatrix} T_{1t} + \begin{bmatrix} S_{1t} \\ S_{2t} \\ \vdots \\ S_{nt} \end{bmatrix} T_{2t} + \dots + \begin{bmatrix} S_{1t} \\ S_{2t} \\ \vdots \\ S_{nt} \end{bmatrix} T_{mt} \quad (5.5)$$

式(5.5)表明: 第 t 个时间测量场可以表示为 m 个空间典型场按不同的权重的线性叠加, 其中 \mathbf{S} 的每一列表示一个空间典型场。

因此, 对于计算得到的云顶亮温径向切线廓线, 我们以半径为空间函数, 以热带气旋云图观测序列为时间函数构造二维矩阵(这里记为 \mathbf{X})并对其进行 EOF 分解。其具体步骤如下:

- 1) 将 \mathbf{X} 按空间维度处理成距平的形式;
- 2) 计算 \mathbf{X} 与其转置矩阵 \mathbf{X}^T 的交叉积得到协方差矩阵 $\mathbf{C}_{m \times n} = \frac{1}{n} \mathbf{X} \times \mathbf{X}^T$;
- 3) 计算 $\mathbf{C}_{m \times n}$ 的特征向量 $V_{m \times n}$ 和特征根 $\lambda_{1,2,\dots,m}$, 二者满足 $\mathbf{C}_{m \times n} \times V_{m \times n} = V_{m \times n} \times \eta$, 其中 η 为 $m \times m$ 维对角阵

$$\eta = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \lambda_m \end{bmatrix}$$

- 4) 对特征根 $\lambda_{1,2,\dots,m}$ 按从大到小的顺序排列从而调整特征向量的顺序, 其中每一个非零特征根对应于一个特征向量 EOF, 也即典型空间场;
- 5) 将 EOF 投影到原始矩阵 \mathbf{X} 上计算所有空间典型场所对应的时间系数(主成分 $\mathbf{PC}_{m \times n}$), 即

$$\mathbf{PC}_{m \times n} = \mathbf{EOF} \times \mathbf{X}_{m \times n}$$

其中, \mathbf{PC} 每行对应一个 EOF 模态的时间加权系数, 实际应用中, 我们只需要计算 EOF 的前几个模态就可以得到 \mathbf{X} 的主体特征。

本文中, 我们采用云顶亮温廓线的前五个主要模态, 也即 EOF1 到 EOF5, 如图 5-2 所示为前五个主要模态随半径的分布。这五个模态可以解释 98% 以上的云顶

亮温径向廓线随着时间的变化情况。如图 5-2 所示, EOF-1 随半径的变化与图 4-3 中平均云顶亮温廓线的分布极为相似, 因此可以认为 EOF-1 表征云顶亮温从热带气旋中心向外沿半径的平均, 其主成分 PC-1 对应于云图时间序列相对于该平均值的偏离程度。EOF-2 在气旋内核表现出了剧烈的变化过程, 尤其在气旋中心存在极大值而在气旋眼区存在局部凹槽, 此后随半径的变化微乎其微, 因此, EOF-2 可能和热带气旋内核眼区结构相关, 其主成分 PC-2 表征眼区的尺度。EOF-3 变化趋势和 EOF-2 类似, 不同的在于其峰值和谷值位置沿半径方向滞后, 尤其在半径 100-300km 处存在大尺度凹槽, 因此这可能和气旋眼区外围大尺度的强对流和外围环流有关。EOF-4 和 EOF-5 呈现出随着半径多变的形态, 主要刻画细微的结构变化。这五个主要模态足以反映卫星云图云顶亮温径向廓线的结构变化特征, 为本文后续研究提供了重要的参考。

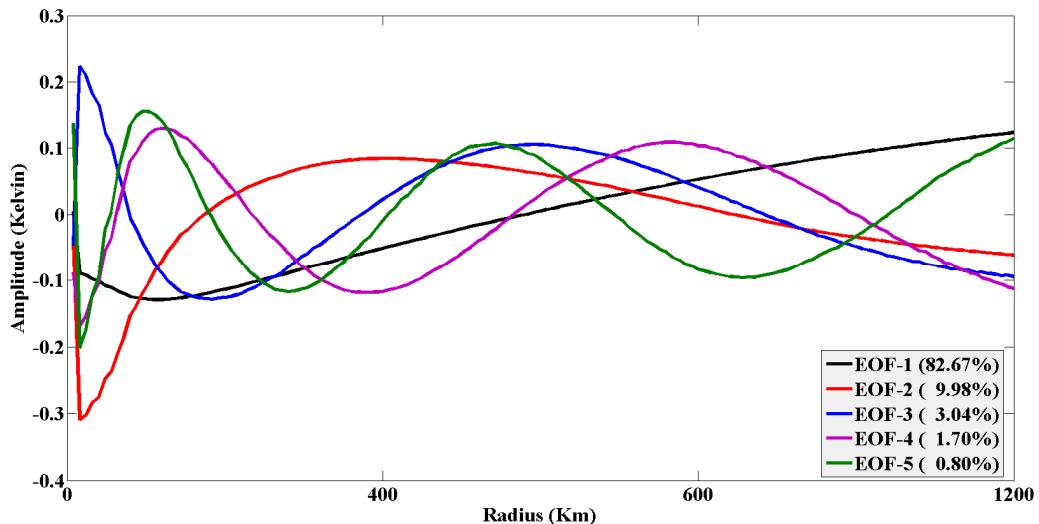


图 5-2 方位角平均云顶亮温径向廓线的前 5 个主模态

5.2 热带气旋关键风速节点估计

5.2.1 最大风速半径

根据切向风速的 Rankine 环流模型(5.1), 除了气旋中心和最大风速, 最大风速半径 R_{MAX} 对于确定切向风沿径向的分布形态也至关重要。传统上, 研究人员主要依赖于飞机侦测和海表面气压场的分布规律获得 R_{MAX} 。Hsu (2000)[93]提出了可以根据卫星云图上亮温最低点和眼区亮温最大值点之间的距离判断 R_{MAX} 的方法, 并用单一的气旋案例说明了该方法的可行性。该方法的依据是气旋眼区周围的最低亮

温带实质上代表强对流发生的区域，这意味着使用该方法估计 R_{MAX} 仅限于眼区清晰可辨的热带气旋。Kossin(2006) [2] 和 Knaff (2015)[61] 等研究表明， R_{MAX} 的变化或与气旋强度、气旋中心位置所在纬度等有关。除此之外，鲜有文献尝试使用卫星云图数据提取 R_{MAX} 。由于一般情况下， R_{MAX} 位于强对流云墙附近，而该区域在云图上表现为高亮度低亮温区域，同时云墙的最大尺度和对流过度顶 FOT 有关，因此，我们有理由认为 CCT 和 FOT 的尺度变化或与 R_{MAX} 的变化相关。

在使用筛选得到的 6,667 幅卫星云图值之前，首先将其和插值后的 JTWC 最优路径数据进行匹配，剔除无 R_{MAX} 记录的云图数据。因此我们从 6,667 幅云图中共获取了 4,283 幅云图数据，对这些数据按照第 3.5 节和第 5.1 节中介绍的方法进行处理。对于 FOT 和 CCT，我们计算了两者之间的距离 FOT-CCT，其物理含义为强对流发生区域云团的径向尺度，注意这里我们认为半径小于 CCT 的区域主要是气旋眼睛空区。此后，使用 V_{MAX} 、 V_{MAX}^2 、FOT-CCT 以及 EOF，利用第 4.1 节所述方法对 R_{MAX} 进行了线性回归，结果如式(5.6)所示

$$\begin{aligned} R_{MAX} = & -2.23V_{MAX} + 0.016V_{MAX}^2 - 0.029(FOT - CCT) \\ & - 0.029PC1 - 0.088PC2 + 0.036PC3 \end{aligned} \quad (5.6)$$

同样，为了定量描述这些回归因子对于 R_{MAX} 的贡献率，我们对所有回归因子各自进行归一化处理后重新使用逐步回归法进行了实验，结果表明，对于该回归模型，前三个因子的贡献率达到了 90%，其中， V_{MAX} 50.13%， V_{MAX}^2 30.65%， $FOT - CCT$ 10.03%。

如图 5-3(a)所示为使用(5.6)回归得到的 R_{MAX} (以下称 IR_{MAX})与 JTWC 最优路径数据 R_{MAX} 的散点图，两者之间的相关系数 R^2 为 0.45，平均绝对偏差 10.77 节，均方根误差 9.86 节。图 5-3(b)为两者之间绝对偏差的直方图。根据图 5-3(a)可以看出，对于较小和较大的 R_{MAX} ， IR_{MAX} 误差比较显著。

最后，我们将本节得到的 IR_{MAX} 的误差统计和已有研究结果进行比较，比较对象包括 Mueller(2005)[3]，Kossin(2006) [2]，Knaff (2014)[60]，结果如表 5-2 所示，可以看到，相比其他研究成果，本章发展的方法的平均绝对误差的值显著减小。最后，考虑到热带气旋的半径尺度一般达 300-1000km，卫星云图数据的空间分辨率为 8km，而 IR_{MAX} 的平均绝对偏差仅为 10.77km。因此， IR_{MAX} 的误差在合理的范围内，能够满足后面研究的需要。

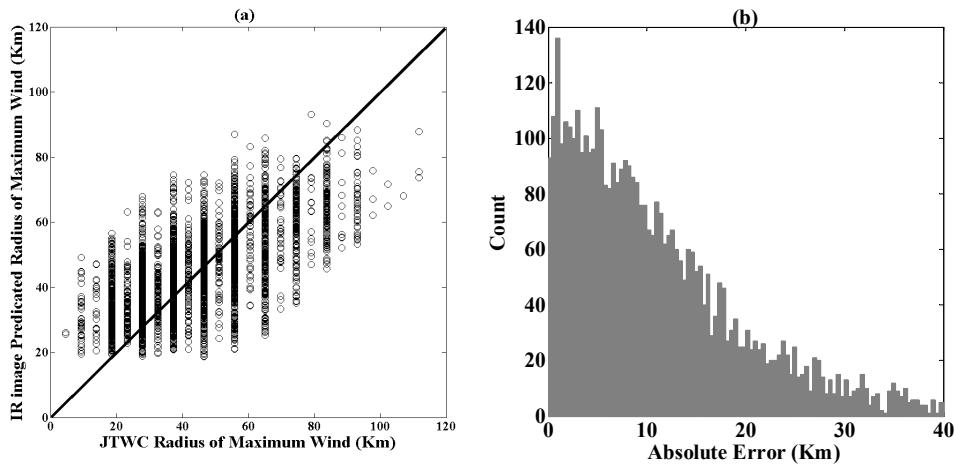


图 5-3 (a) 利用卫星云图估计得到的 IR_{MAX} 与 JTWC 最优路径数据 R_{MAX} 散点图, (b) 绝对偏差直方图

表 5-2 IR_{MAX} 与已有研究的比较

Technique	R^2	MAE (km)
Mueller(2005)	0.29	27.3
Kossin (2006)	0.30	-
Knaff (2014)	0.34	26.9
IR_{MAX}	0.45	10.77

5.2.2 其他关键风速节点

本节我们提供一种利用卫星云图提取关键风速节点的通用技术,为此,我们对获得的 6,667 幅卫星数据再次进行严格的筛选。首先,对于 JTWC 数据,我们要求 $R_{MAX} \leq R64$, $R_{MAX} \leq R50$, $R_{MAX} \leq R34$, 且满足 $R34 > R50 > R64$, 即不满足这些关系的 JTWC 记录将被从本章研究当中剔除出去。其次,同 5.2.1 节, 我们要求对每一幅云图数据, 都可以找到与之匹配的 JTWC 记录。JTWC 最优路径数据集记录了四个地理象限(NE, SE, NW, SW)内的 R34、R50 和 R64 的半径, 为了方便处理, 同时为了和卫星云图亮温廓线对应起来, 在使用前我们首先对 JTWC 记录的 R34、R50 和 R64 取平均处理。

基于已有研究结果,首先我们考虑热带气旋的强度、中心位置的纬度、气旋发展时间等信息可能为提取这些关键风速节点提供帮助。其次,同 IR_{MAX} , 我们考虑 EOF 对提取这些关键风速节点的作用。在这些信息的基础上, 我们引入三个新

的参量：OCBT、ICBT 以及 CCT 处的亮温 MBT (Minimum Brightness Temperature)。这些信息都可能和热带气旋风场关键风速节点有关系，但这些关系尚不明确。同获取热带气旋的强度和 IR_{MAX} ，这里我们仍然采用逐步回归方法将这些信息回归到关键风速节点上。

如图 5-4(a)所示为得到的 R34(以下记为 IR34)和插值后的 JTWC 最优路径数据 R34 的散点图，图 5-4(b)为 IR34 与 R34 之间绝对相对偏差随 R34 大小的分布，可以看出，对于 R34 较小的案例($\leq 100\text{km}$)，IR34 误差非常大，但是这种案例非常少(小于 3%)，而对于 $R34 \geq 100\text{km}$ 的情况，绝对相对偏差平均值较小(15%左右)。R34 与 IR34 的相关系数 R^2 为 0.59，平均绝对偏差 42.70km，均方根误差 54.9km。为了定量描述新引入的从卫星云图云顶亮温廓线提取的参量对估计 R34 的影响，我们将这些参量从回归因子集中剔除掉后使用 Kossin(2006)[2]介绍的方法重新进行了实验，

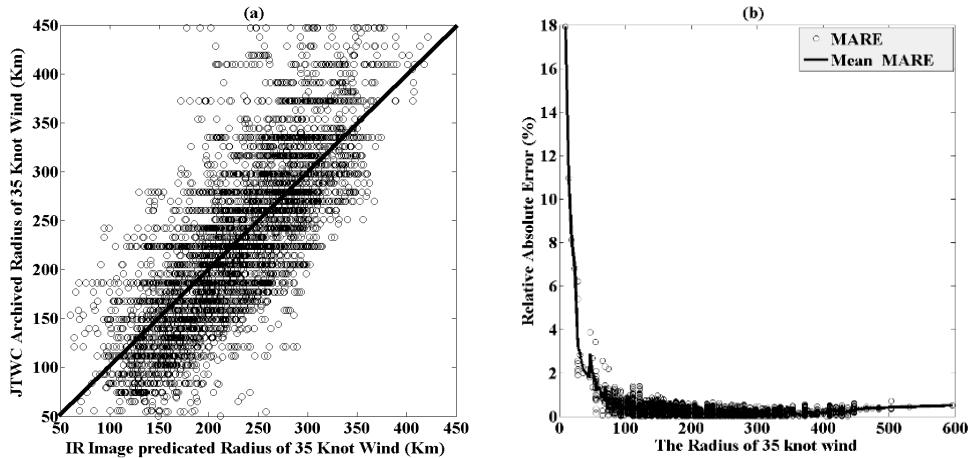


图 5-4 (a) IR34 和 JTWC 最优路径 R34 散点图，(b) IR34 的相对绝对偏差随 R34 分布关系

如表 5-3 所示为利用 Kossin(2006)[2]中介绍的方法和使用本文方法估计关键风速节点得到的结果。可以看出新引入的参量明显地减小了 R34 的估计误差。具体地，这些新参数的引入使得 R34 估计值的 R^2 净提高 0.13，净提高百分比 28.26%，平均绝对误差净提高 6.86km，净提高百分比 13.84%。表 5-3 列出了每个回归因子的系数以及截距，需要注意的是，由于不同回归因子的数量级不同，表 5-3 列出的系数大小与该因子对相应节点风速估计的贡献值无关。为了避免冗余，本章不再仔细介绍 R50 以及 R64 的估计过程，其误差的统计结果亦如表 5-3 所示，不难发现，由于新的参量的引入，R50 和 R64 的估计精度也得到了明显的提高。

如图 5-5 所示为引入新的参量后 R34、R50 和 R64 的估计误差分布，其中左侧为估计误差的直方图，右侧为绝对误差累积分布曲线。可以看出，80% 的 R34、R50 和 R64 估计误差分别小于 70、40 和 30km。这样的误差相对于相应风速半径的尺度而言是合理的。

在得到 R_{MAX} 、R34、R50 和 R64 后，我们可以近似的得到气旋内核的切向风径向廓线。由于最大风速半径和 R64，R50 以及 R34 已经足以表征气旋内核风场廓线，我们将注意力转移到外核风场。Knaff (2013)[60] 将 V500 的变化和气旋中心位置的纬度以及亮温廓线的前三个主要模态联系了起来，使用 SHIPS 提供的 V500 数据间接地研究了热带气旋尺度的气候学特征，这为利用卫星云图提取 V500 提供了参考。

表 5-3 关键风速风速节点 R34、R50 和 R64 的估计结果，左侧为使用 Kossin(2006) 技术得到的拟合结果，右侧为引入本章介绍的新的参量后得到的结果，表中给出了在拟合每个关键风速节点时符合条件的卫星云图数据量，拟合结果的好坏用 R^2 、MAE 和 RMSE 衡量

Kossin(2006)				New Parameters Introduced			
Predicator	R34 N=5074	R50 N=4340	R65 N=3486	Predicator	R34 N=5074	R50 N=4340	R65 N=3486
Lat	1.89	1.05	0.79	V_{max}	6.38	-	-
V_{MAX}	2.53	1.72	1.03	V_{max}^2	-0.04	0.01	0.01
ΔT	0.26	0.08	0.04	sin (Lat)	154.71	192.26	204.98
PC-1	-0.19	-0.10	-0.06	Cos (Lat)	-	354.44	385.11
PC-2	-0.19	-0.09	-0.06	ΔT	0.28	0.10	0.05
PC-3	-0.18	-0.08	-0.06	MBT	-5.40	-	-0.16
				ICBT	3.68	-	-
				OCBT/ICBT	586.19	-142.45	-169.17
				MBT/OCBT	1091.11	-98.97	-
				PC-1	-0.18	-0.06	-
				PC-2	-0.05	-0.06	-
				PC-3	-	-	0.04
				PC-4	-0.14	-	-0.15
				PC-5	-	-	-
				Intercept	-1279.8	-1444.8	-175.90
R^2	0.46	0.41	0.32	R^2	0.59	0.49	0.41
MAE (knot)	49.56	38.09	25.01	MAE (knot)	42.70	25.65	17.75
RMSE (knot)	61.03	37.20	29.08	RMSE (knot)	54.90	24.11	22.86

由于 SHIPS 中 V500 的高度为 850 hPa，因此，在使用前，根据 Franklin(2003) [6] 提供的不同高度热带气旋内外核风速关系表，我们选用权重 0.75 将 V500 校准到海面高度。此后，同 R34 等的估计方法，我们对 V500 进行了拟合。如图 5-6(a) 所示为 IV500 与 V500 之间的偏差分布，图 5-6(b) 为绝对误差的累积分布曲线，可以看到，超过 75% 的 V500 的估计值偏差在 2m/s 之间，图 5-6(c) 为与 SHIPS 匹配得到的 5,074 幅卫星云图的 V500 序列，其中黑色曲线为使用红外云图数据估计得到的 IV500，灰色虚线为 SHIPS 数据，可以看到，除一些特殊的极值点外，IV500 与 V500 的变化一致。

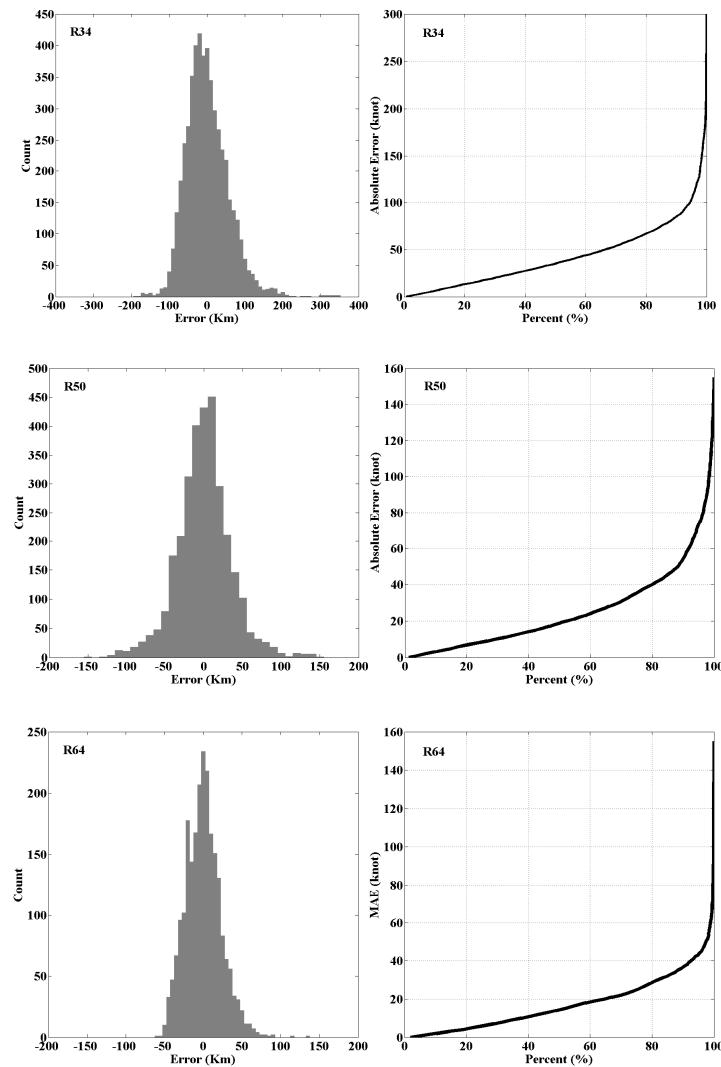


图 5-5 关键风速节点 R34, R50, R64 估计结果的偏差直方图(左)和误差累积分布(右)

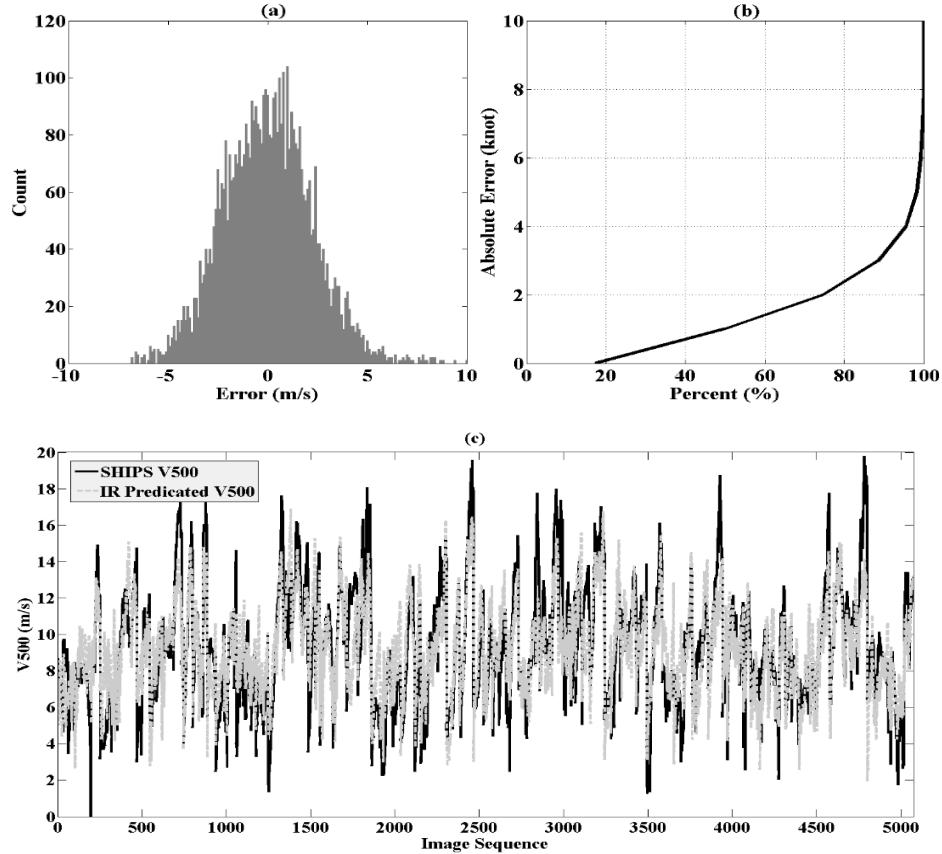


图 5-6 (a) V500 误差分布直方图, (b) 累积绝对偏差分布, (c) V500 序列, 其中灰色虚线为 SHIPS 数据, 黑色曲线为利用卫星云图数据估计得到的 IV500

根据 Emanuel [2004] [94]热带气旋外围风场结构模型, 热带气旋最外围可以假设为无强对流发生的稳定轴对称环流区域, 从而形成沉降增温和辐射冷却的局部平衡, 因此, 可以假设次云层角动量平衡为静止的:

$$-\frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial z} \frac{\partial M}{\partial r} = -r \frac{\partial \tau_\theta}{\partial z} \quad (5.7)$$

这里 φ 为质量流函数, τ_θ 为方位角湍流应力。 M 是单位质量绝对角动量, 其物理定义如下:

$$M = rV + \frac{1}{2}fr^2 \quad (5.8)$$

其中, V 是方位速度, f 为科氏力参数。在式(5.7)(5.8)中, r 和 z 为径向和垂直坐标系, 假设湍流应力在次云层顶部消失的同时质量流函数在海表面变为 0, 并将式(5.7)对次云层沿垂直方向积分得到:

$$\frac{\partial(rV)}{\partial r} \approx \frac{r^2 C_d V^2}{\varphi} - fr \quad (5.9)$$

这里，我们用气动电力公式(bulk aerodynamic drag formulation)阻力系数 C_d 代替为方位角湍流应力 τ_θ ，由于在热带海域温度垂直梯度(lapse rate)和晴空状态下的冷却辐射接近常数，因此可假设均衡沉降速度 W_{rad} 为常数。同时，为了防止边界层顶大幅度垂直温度梯度的出现，对流层自由空气在埃克曼抽吸的作用下被夹带运输到边界层。根据热带气旋最外围区域无强对流的假设，在均衡状态下。埃克曼抽吸应当与均衡沉降速度 W_{rad} 相抵消，因此有：

$$\frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} = -W_{rad} \quad (5.10)$$

由式(5.9)不难发现，当半径 r 达到气旋与环境风场不可区分的位置 r_0 时 φ 趋近于0，因此将(5.10)沿半径积分并使用此边界条件得到流函数的径向廓线

$$\varphi = \frac{1}{2} W_{rad} \pi (r_0^2 - r^2) \quad (5.11)$$

将(5.11)代入(5.9)得到：

$$\frac{\partial(rV)}{\partial r} \approx \frac{2r^2 C_d V^2}{W_{rad} (r_0^2 - r^2)} - fr \quad (5.12)$$

式(5.12)为非线性一阶数值微分问题，无解析解。但是，根据上文得到的 R_{MAX}、R34、R50、R64 和 V500 等信息，我们可以利用打靶法求取其数值解。最后，我们使用求解得到的 R0 来表征气旋和环境风场不可区分的边界。需要注意的是由于环境风场并不为0，根据 Knaff(2013)[60]中 V500 与 R5(风速为 5m/s 的半径)的气候学关系，可以假设 R0 处的切向风速为 V500 / 2。

5.2.3 二维风场构建

为说明切向风场的分布特征，本章开篇介绍了 Rankine 环流模型。尽管 Rankine 环流模型与实际观测到的气旋内核和外核切向风场分布非常接近，且较为简单，但是从图 5-1 可以看出该模型在最大风速半径处的尖角峰值与实际风场分布有出入，这意味着一旦用有限量的离散观测数据近似实际风场将会造成严重的数值高估偏差。因此，本文采用 Wood 等[87, 95]发展的切向风廓线的 Wood-whiite 参数化模型。Wood-whiite 模型如式(5.13)(5.14)所示：

$$V_{WW}(\rho, \mathbf{m}) = V_x \phi(\rho, k, \eta, \lambda) \quad (5.13)$$

$$\phi(\rho; k, \eta, \lambda) = \frac{\eta^\lambda \rho^k}{(\eta - k + k \rho^{\eta/\lambda})^\lambda} \quad l \leq k < \eta, \lambda > 0 \quad (5.14)$$

这里 V_{WW} 为切向风速, $\rho = r / R_{MAX}$ 为无量纲的归一化半径, \mathbf{m} 为 Wood-white 模型中几个关键参数的向量, $\mathbf{m} = (V_{MAX}, R_{MAX}, k, \eta, \lambda)^T$ 。 k 、 η 和 λ 是三个结构数, 其中, k 控制涡旋内核风速增长模式, η 控制涡旋外核风速衰减模式, λ 控制涡旋的尺度大小, 这些参数的详细物理含义参见 Wood 等(2010,2012)[87, 95]。

在使用 Wood-white 模型之前, 我们对卫星云图数据进行了严格的筛选, 要求每一幅云图数据, 其相对应的插值后的 JTWC 记录中包含 R_{MAX} , $R64$, $R50$, $R34$, 且严格满足 $R_{MAX} \leq R64 \leq R50 \leq R34$ 。最后我们得到了 1,814 幅满足条件的卫星云图数据, 利用从这 1,814 幅云图中提取的关键风速节点训练 Wood-white 模型。如表 5-4 所示为训练得到的模型结构参数 k 、 η 和 λ 的统计数据。为了和 Rankine 环流进行比较, 我们同时使用这 1,814 幅云图数据训练得到了 Rankine 环流模型(式(5.1)), 如图 5-7 所示为训练得到的热带气旋切向风场径向廓线 Wood-white 模型(使用结构参数的平均值得到, 黑色实线)和 Rankine 模型(黑色三角形曲线), 很明显, 两者变化趋势相似, 但是使用 Rankine 环流模型得到的廓线丢失了很多细节信息, 尤其在最大风速半径处 Rankine 环流模型表现为急速的不平稳过渡。

表 5-4 训练得到的 Wood-white 参数化模型结构参数

	Mean	Standard Deviation	Median	First Quartile	Third Quartile
k	3.07	1.16	3.99	1.58	4.00
η	3.74	1.25	4.59	2.00	4.73
λ	0.96	0.05	0.99	0.94	0.99

使用上述得到的 Wood-white 参数化模型, 我们得到了这 1,814 幅卫星云图上热带气旋切向风的径向廓线如图 5-8 所示, 可以看出以上我们发展的利用卫星云图估计切向风场径向廓线的技术能够很好地刻画切向风廓线的基本形态, 为了定量描述本文介绍的方法的误差, 我们计算了利用本文方法估计得到的切向风廓线从热带气旋中心到 600km 的绝对偏差分布, 结果如图 5-9 所示, 可以看出本文估计得到的风速误差最大值出现在最大风速半径处, 其值在 10-12 节之间, 此后随着半径的增加(风速衰减), 其误差逐渐减小直到半径为 200km 左右(热带气旋内核边界)。在热带

气旋内核的外围区域，风速估计误差约为 6 节，由于文中研究的热带气旋案例的强度在 64-160 节之间，以上表明本文介绍的估计气旋切向风速廓线的方法误差合理。

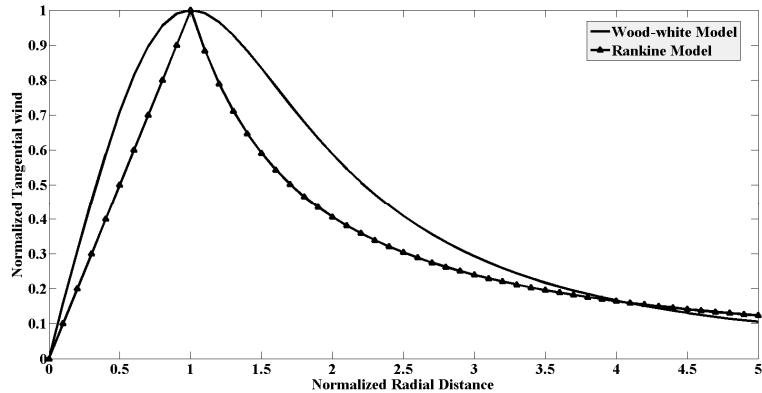


图 5-7 热带气旋切向风场径向廓线 Wood-white 参数化模型(使用结构参数的平均值得到，黑色实线)和 Rankine 环流模型(黑色点划线，衰减系数 m 为 0.99)

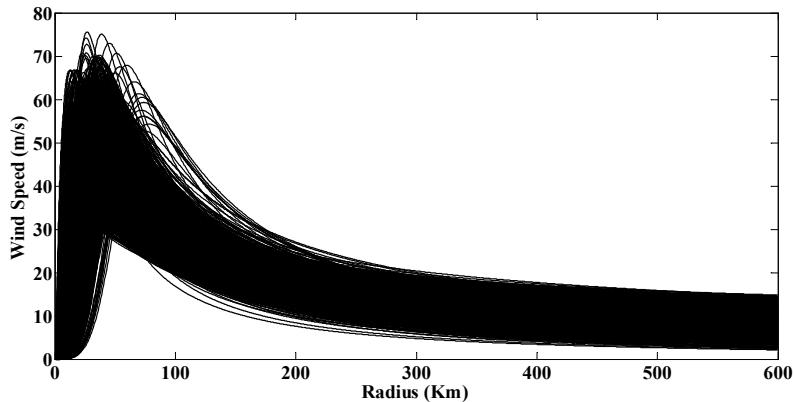


图 5-8 利用 1,814 幅卫星云图得到的热带气旋切向风径向廓线

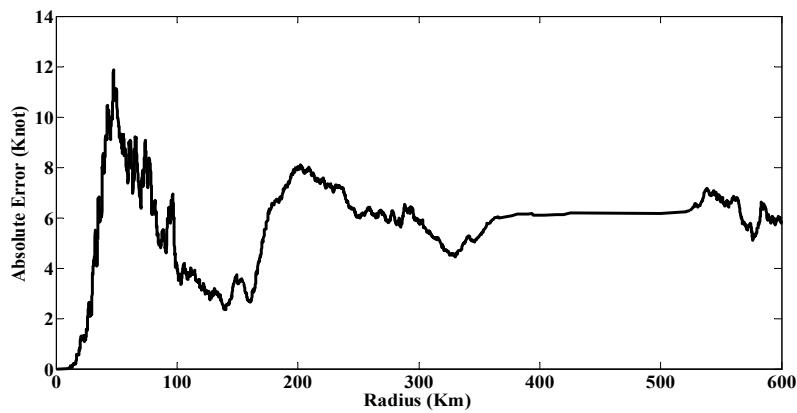


图 5-9 风速估计误差随半径的分布

到目前为止我们从卫星云图上提取了热带气旋的中心位置，最大风速 V_{MAX} 及其半径 R_{MAX} ，关键风速节点等信息，并用这些信息构造了切向风速廓线。根据第3章得到的气旋当前和3-h以前的中心位置，可以粗略得到气旋的移动矢量，以其方向为纵轴正方向构建笛卡尔坐标系，将得到的关于原点对称的热带气旋切向风场分解到该坐标系上，再将气旋的移动矢量进行叠加后合成完整的二维海表面风场。需要注意的是，尽管热带气旋径向风场(也即风场不对称分量的主要原因)可能与很多因素有关，如垂直风切变，对流强弱引起的风场不对称分布等，但是由于观测资料受限，目前我们无法定量这些因素导致的风场不对称分布。因此，本文仅考虑气旋移动所引起的不对称风场分量。

我们仍然以台风 Melor(2009)于10月4日1200 UTC时刻的卫星云图为例说明其二维海表面风场的构造过程。首先使用本文中介绍的方法，定位得到气旋中心位置(如图5-10所示为使用本文气旋中心定位方法得到的超级台风 Melor (2009)的路径)，估计得到气旋强度和最大风速半径，并利用本章介绍的方法得到关键风速节点。利用这些信息和 Wood-white 参数化模型，拟合得到关于原点对称的热带气旋切向风场，其方位角平均廓线如图5-11所示，图中红色方块为使用本文方法从云图上提取得到的关键风速节点，蓝色实心圆代表 JTWC 最优路径数据及 SHIPS 数据提供的关键风速节点。可以看出，利用本文介绍的方法得到的关键风速节点和真值比较一致，利用得到的这些信息训练 Wood-white 模型得到的切向风场廓线可以很好地刻画切向风沿径向的分布。

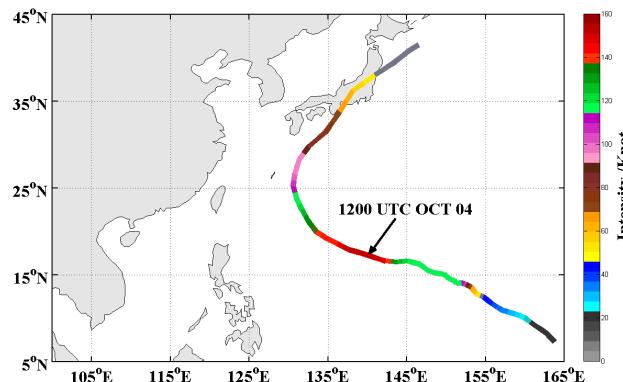


图 5-10 使用本文方法得到的超级台风 Melor(2009)的路径和强度变化图

如图5-12(a)所示为最终得到的台风 Melor(2009)于10月4日1200 UTC时刻的海表面切向风场。图5-12(b)为将气旋移动矢量叠加到对称的切向风场上后得到的完整的二维海表面风场结构。如图5-10中黑色箭头所示位置，使用本文第3章介绍

的有眼气旋中心定位方法，我们发现该时刻 Melor (2009)位于东经 139.35° ，北纬 17.43° 位置，其以 8.11m/s 向西， 2.58m/s 向北的速度快速向中国海域移动，从图 5-12 (b)上可以看到最大风速半径闭合等值线(R_{MAX})主要出现在相对气旋移动方向的右侧，这与以往现场观测以及客观事实一致。图 5-12 (b)中同时标注了 $R64$ 、 $R50$ 和 $R34$ 的位置，可以看到，仅考虑气旋移动所导致的风场结果显然和客观事实不太符合，但是仍然可以粗略地描述这些风速半径的位置。

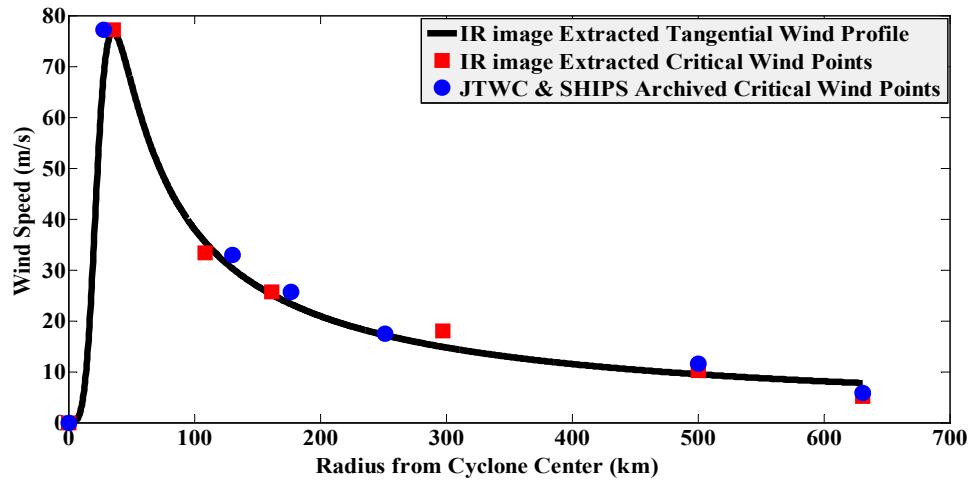


图 5-11 利用卫星云图提取得到的台风 Melor(2009)于 10 月 4 日 1200 UTC 时刻的海表面切向风廓线(黑色曲线)，红色和蓝色点分别代表使用本文方法从云图上提取得到的关键风速节点和 JTWC 最优路径数据及 SHIPS 模型数据提供的关键风速节点

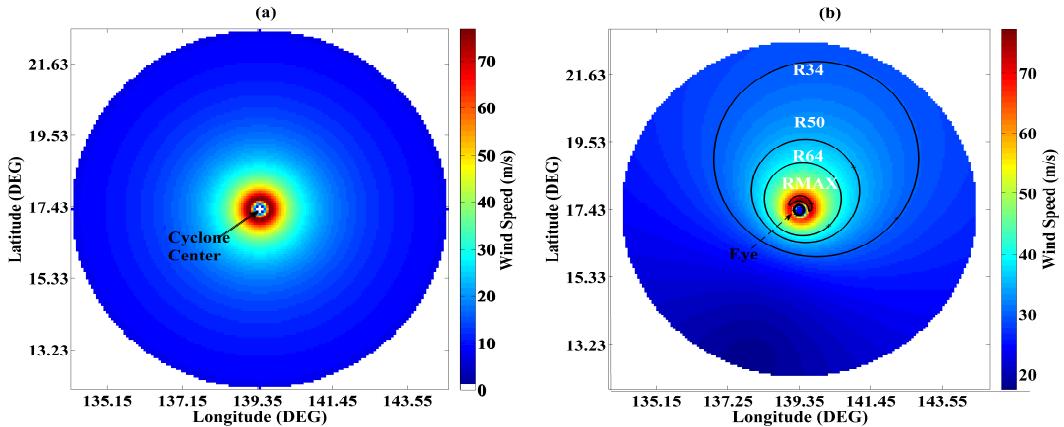


图 5-12 (a)利用卫星云图提取得到的台风 Melor(2009)于 10 月 4 日 1200 UTC 时刻的海表切向风场，(b)叠加热带气旋移动矢量后得到的完整海表面风场，其中等值线分别为最大风速半径、 $R64$ 、 $R50$ 和 $R34$ 的位置，最中心闭合圆圈为气旋眼区

为了便于观察本文得到的 Melor(2009)于 10 月 4 日 1200 UTC 时刻的海表面风矢量场，我们选取其内核 $560*560\text{km}^2$ 的窗口呈现风矢量场的结构。如图 5-13 所示，从图中可以清晰的观察到位于气旋移动方向右侧的最大风速带和明显的风矢量涡旋环流结构。以上分析表明，尽管本文在估算海表面风场不对称分量时仅考虑了气旋移动的作用，文中介绍的方法仍然能够比较准确地捕捉热带气旋海表面风矢量场结构信息。

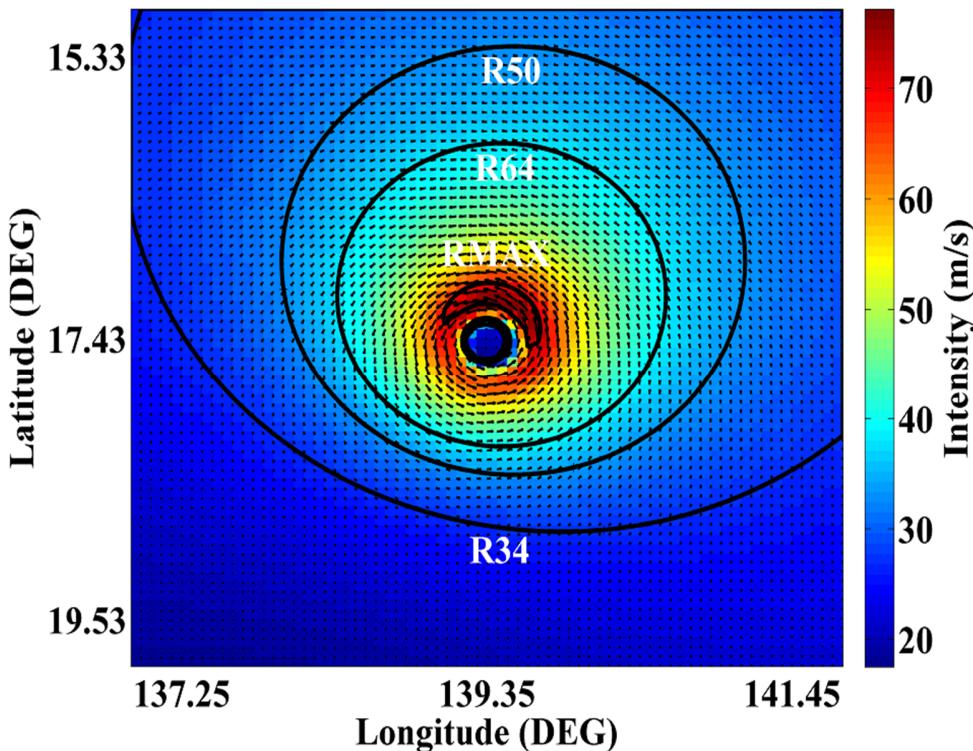


图 5-13 利用卫星云图提取得到的台风 Melor(2009)于 10 月 4 日 1200 UTC 时刻的内核海表面风矢量场

5.3 与 QuikSCAT 的对比分析

为了验证本论文介绍的方法，我们继续以台风 Melor(2009)为例，采用 QuikSCAT 观测到的海表面风场数据与使用本文中介绍的基于卫星云图的热带气旋中心定位方法、热带气旋强度估计模型和热带气旋海表面风场提取方法得到的结果进行对比分析。

2009 年 9 月 28 日，一个初始扰动生成于波纳佩岛东北约 370 公里处，29 日傍晚，JTWC 发布了热带气旋 Melor (2009) 的生成预警；10 月 4 日，JTWC 将其强度

升级为五级台风；Melor(2009)于10月8日登陆日本，此后于10月11日与一个生成于阿拉斯加北部的温带风暴合并并向美国西海岸靠近，在台风 Melor(2009)从生成到离开西北太平洋期间的13天里，QuikSCAT共观测到32轨海表面风场数据，这32轨数据中，15轨数据观测到了 Melor(2009)，其中11轨数据包含了大于70%以上的台风涡旋环流结构信息。对这11轨数据，我们基于风矢量场的复合场定位得到了其中心位置[81]，以得到的气旋中心为中心提取了 $1000 \times 1000 \text{ km}^2$ 窗口(80×80)大小的 QuikSCAT 数据得到了11幅 Melor(2009)的海表面风场数据，这其中仅3幅数据与本文收集到的时间分辨率为3小时的卫星云图数据在时间上能够进行匹配：10月3日2100 UTC、10月5日2100 UTC和10月6日0900 UTC，如图5-14所示为 QuikSCAT 于这三个时刻观测到的台风 Melor(2009)的海表面风场，为了观察方便，图5-14中窗口大小为 $500 \times 500 \text{ km}^2$ 。

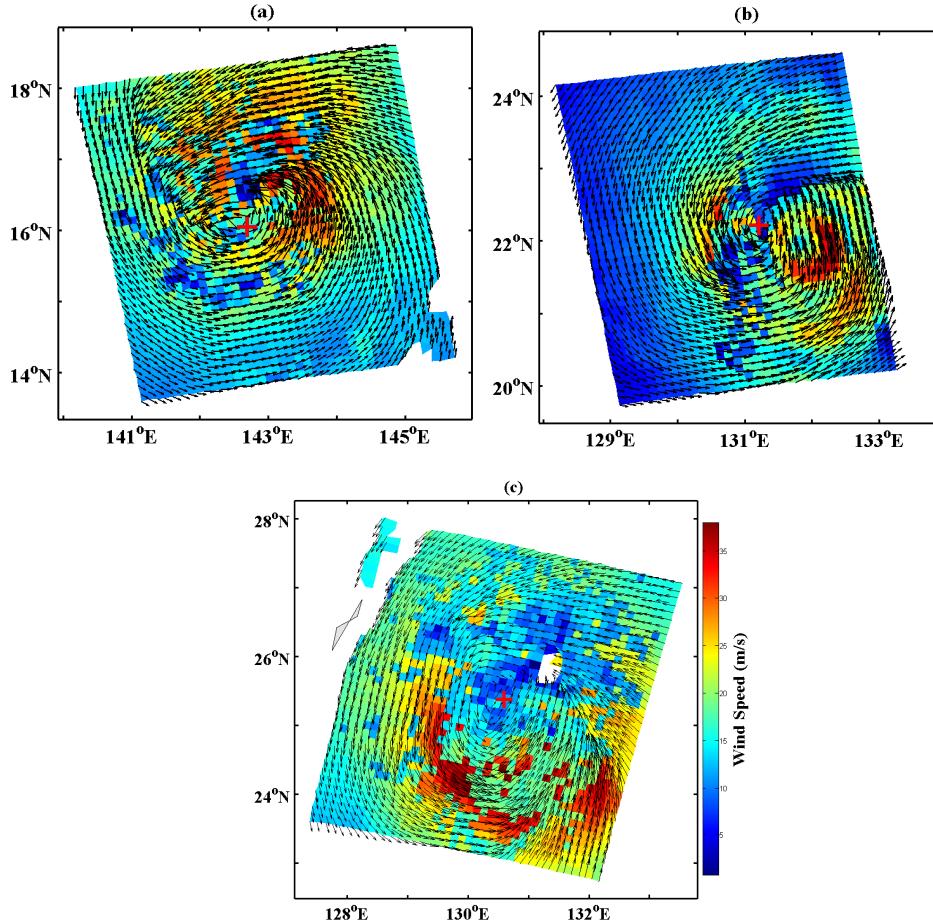


图 5-14 QuikSCAT 观测到的台风 Melor(2009)的海表面风场，(a) 10月3日2100 UTC, (b) 10月5日2100 UTC, (c) 10月6日0900 UTC

将利用 QuikSCAT 海面风场数据定位得到的台风中心位置与使用卫星云图定位得到的结果以及 JTWC 最优路径进行比较, 结果如图 5-15 所示, 图中黑色曲线代表 JTWC 最优路径, 红色曲线为利用卫星云图追踪得到的台风路径, 紫色实心菱形为利用 QuikSCAT 海面风场数据定位得到的台风中心位置。很明显, 利用卫星云图追踪得到的台风路径与 JTWC 最优路径一致但仍存在偏差, 与此同时, QuikSCAT 观察到的台风中心相比另外两者差异比较大。这一方面可以归咎为散射计比较低的分辨率, 另一方面也再次证明台风中心在垂直方向上因垂直风切等因素造成的水平偏离现象。总体来讲, 利用三种数据得到的台风中心位置比较一致。最后, 值得一提的是, 自 10 月 9 日凌晨开始 JTWC 将 Melor(2009) 归为温带风暴并不再记录其信息, 而气象卫星和 QuikSCAT 观察到了 Melor(2009) 转变为温带气旋后的路径。

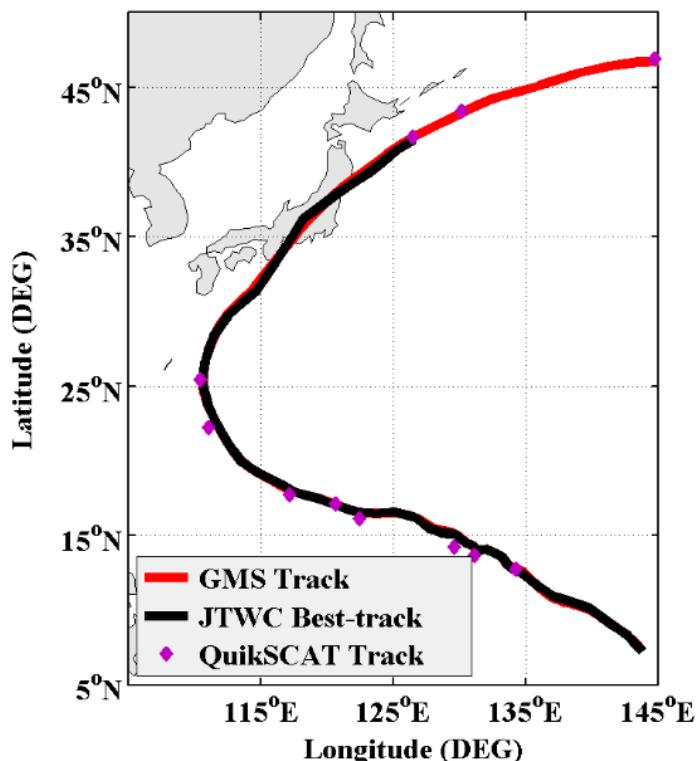


图 5-15 台风 Melor(2009)的路径

为说明散射计在观测热带气旋强度中存在的问题, 我们计算了散射计观测到的海表面最大风速: 首先, 为了考虑最大风速的不对称分布, 我们以台风中心为参考将风场数据按照四个地理象限(同 JTWC)分割成四部分。此后, 以台风中心为参

考将四个地理象限内的风场进行方位角平均得到四个象限内的风速廓线，取四条廓线各自的最大值得到台风在四个地理象限内的最大风速值，最后取四个最大值中较大的前两个的平均值为散射计观测到的台风强度。图 5-16 为 Melor(2009) 的强度变化序列，其中黑色实线为使用本文发展的模型估计得到的台风强度变化曲线，蓝色曲线为 JTWC 最优路径数据提供的强度变化序列，绿色实心圆点为 QuikSCAT 观测到的有效最大风速，红色实心圆点为 QuikSCAT 观测到的无效最大风速。模型估计得到的台风强度序列已在 4.3 中进行了详细的讨论。因此，这里我们主要讨论利用散射计观测数据计算得到的台风强度。很明显，由于散射计数据反演算法等问题的影响，在台风强度达到 40m/s 以上以后，散射计观测到的最大风速不能表征台风强度，而对于强度低于 40m/s 的热带气旋系统，就本例而言，QuikSCAT 散射计观测数据与其他两者比较一致。

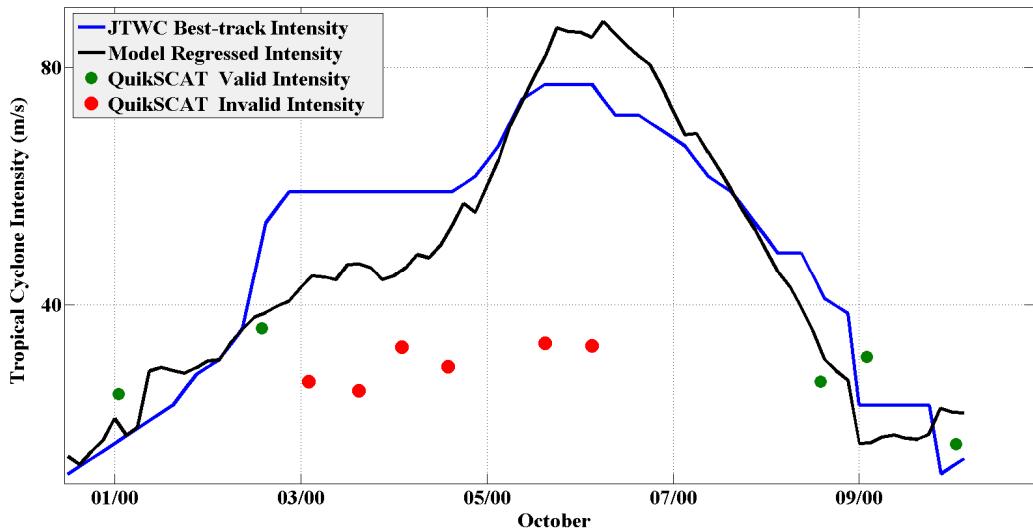


图 5-16 台风 Melor(2009) 的强度序列

对于关键风速节点 R50 和 R64，考虑到散射计在高风速海况下观测能力和数据精度等问题，这里以 R34 为例讨论本文中获取关键风速节点的方法与实际观测之间的差异。同利用 QuikSCAT 散射计计算最大风速的过程，我们将海表面风场以台风中心为参考划分成四个地理象限并得到相应的四条风速廓线，同时对所有数据进行 360° 方位角平均得到整个风场的风速廓线，我们从这五条廓线上提取了 R34(约 17m/s) 风速的半径位置，结果如图 5-17 所示，其中红色曲线为使用卫星云图估计得到的 R34 的变化序列，黑色误差条为 JTWC 提供的四个地理象限内的 R34 的变化序列，蓝色误差条为使用 QuikSCAT 海表面风场四个地理象限以及 360° 方位角平均

计算得到的 R34 的变化序列。从图 5-1 可以发现：(1) 三者的变化趋势基本一致；(2) 本文发展的利用云图估计 R34 的方法在大多数情况下略微高估了 R34；(3) QuikSCAT 观测到的 R34 在不同地理象限内的变化显著。

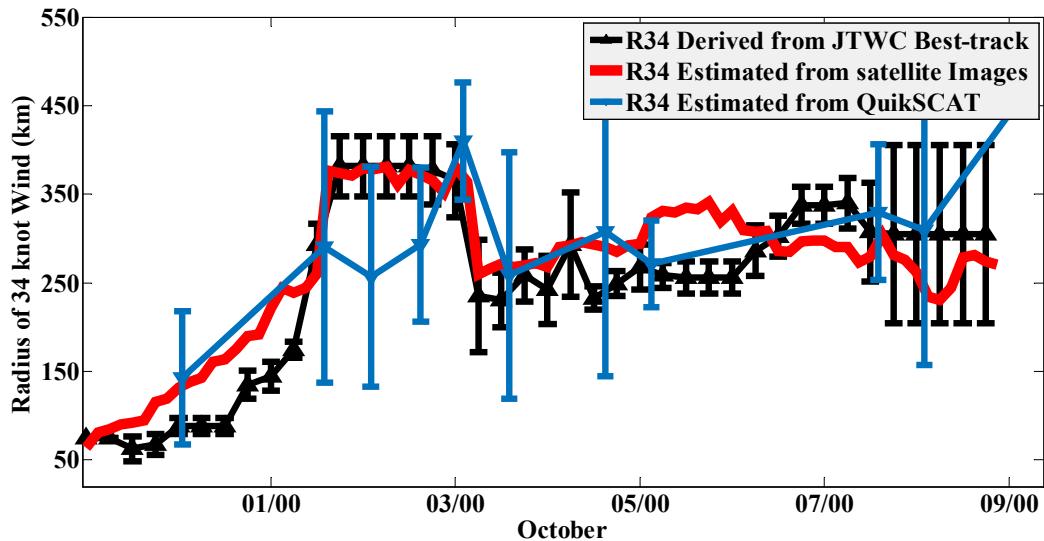


图 5-17 台风 Melor(2009)的 R34 序列

为了评价本文中发展的利用卫星云图提取热带气旋海表面风场的对称分量的方法，我们对比了利用本文提出的方法得到的台风 Melor(2009)的海表面风场与散射计的观测结果。这里以图 5-14 中三幅数据为例进行分析，由于 QuikSCAT 于 10 月 5 日 2100 UTC 时刻仅观测到该台风中心位置以东 150km 的区域，我们仅选取 10 月 3 日 2100 UTC 时刻和 10 月 6 日 0900 UTC 时刻为例进行讨论。如图 5-18 所示为这两个时刻的台风海表面切向风场廓线，其中黑色曲线由本文介绍方法得到，蓝色曲线为对 QuikSCAT 海表面风场以台风中心为参考计算得到的方位角平均，红色实心方块为使用本文介绍方法估计得到的关键风速节点，蓝色实心圆点为 JTWC 最优路径数据提供的关键风速节点。尽管提取得到的关键风速节点和最优路径数据之间存在细微差异，但是本文介绍的方法比较准确地还原了台风海表面对称风场随半径的分布。利用 QuikSCAT 海表面风场数据计算得到的切向风廓线在台风内核($\leq 1.5^\circ$)表现出极度的偏差，而在内核外围区域与本文得到的风场廓线一致。因此，我们总结以下结论：(1) 本文发展的方法能够比较准确地利用卫星云图数据提取台风的对称切向风场；(2) 本文发展的方法能够弥补散射计等不能有效观测台风内核风场的缺陷；(3) 本文中介绍的利用卫星云图估计热带气旋关键风速节点的方法比较准确。

最后，我们以 10 月 3 日 2100 UTC 时刻为例，讨论分析采用本文介绍的方法得到的二维海表面风场。为此，我们将本文得到的空间分辨率为 8km 的海表面风场数据与 QuikSCAT 空间分辨率为 12.5km 的海表面风场数据进行融合处理，结果如图 5-19 所示，图中黑色箭头为本文得到的完整的台风海表面风矢量场，彩色背景为散射计观测到的海表面风速场，尽管两者的台风涡旋结构中心位置有细微差异（经向和纬向各约 0.25°，约 25km），但是两者的风场涡旋结构一致。

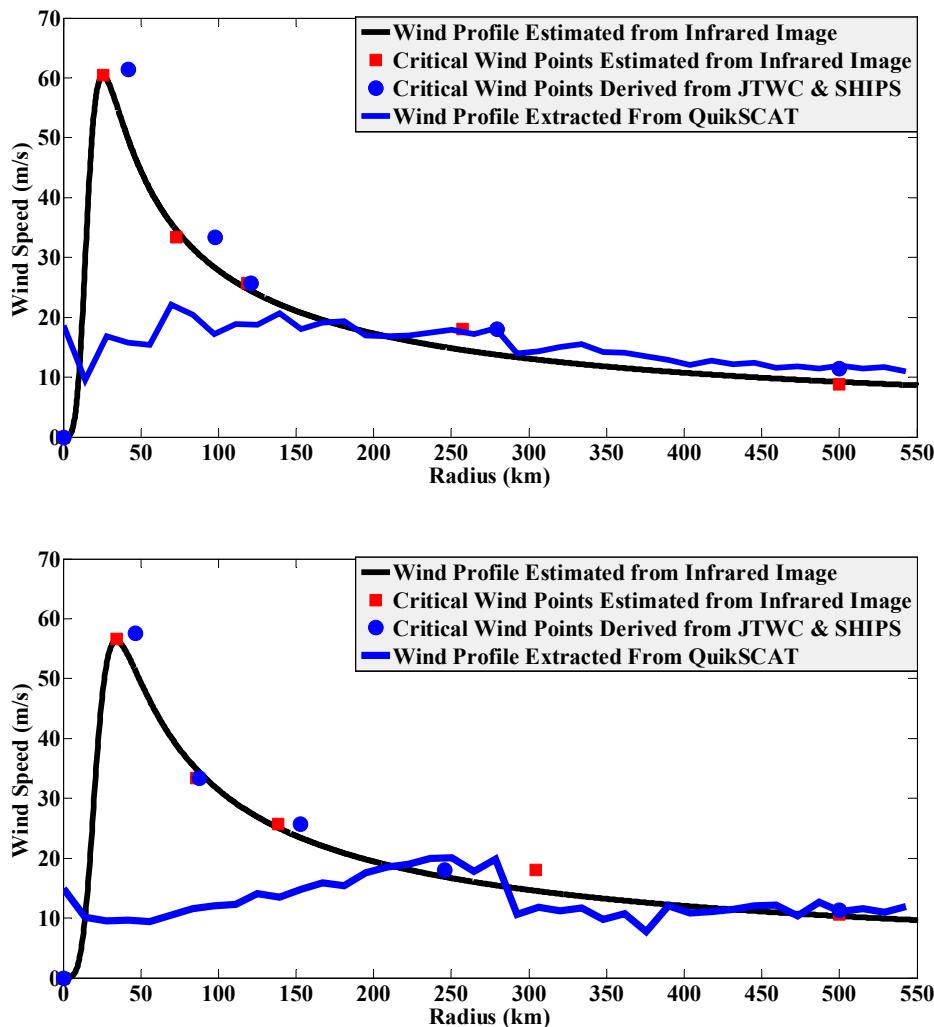


图 5-18 台风 Melor(2009)切向风廓线，(a)10 月 3 日 2100 UTC (b) 10 月 6 日 0900 UTC

为了进一步比较两者速度场和矢量场之间的差异，同时为了便于观察台风内核的涡旋环流结构，我们选取台风中心位置 $500 \times 500 \text{ km}^2$ 的窗口进行讨论。图

5-20(a) 为利用卫星云图提取得到的风速场与 QuikSCAT 风矢量场融合产品, 图 5-20(b) 为利用卫星云图提取得到的风矢量场与 QuikSCAT 风速场融合产品。综合图 5-20(a)(b) 不难发现: (1) 两者的风矢量涡旋辐聚结构相互一致的同时, QuikSCAT 因降雨等因素的影响在台风内核出现了风场不连续区域; (2) 利用卫星云图提取得到的海面风场相比 QuikSCAT 细节信息更为丰富; (3) 从卫星云图提取得到的风速场中位于台风中心东北方向区域的最大风速带和 QuikSCAT 一致, 所不同的是, QuikSCAT 海表面风场数据表明该最大风速带的位置距离台风中心位置较远, 这表明本文中采用台风移动矢量计算台风风场的不对称分量的方法能够在一定程度上还原实际的台风海表面风场结构, 但仍然存在问题。总之, 以上分析表明本文使用的方法能够比较准确地估计台风海表面风场的基本结构形态。

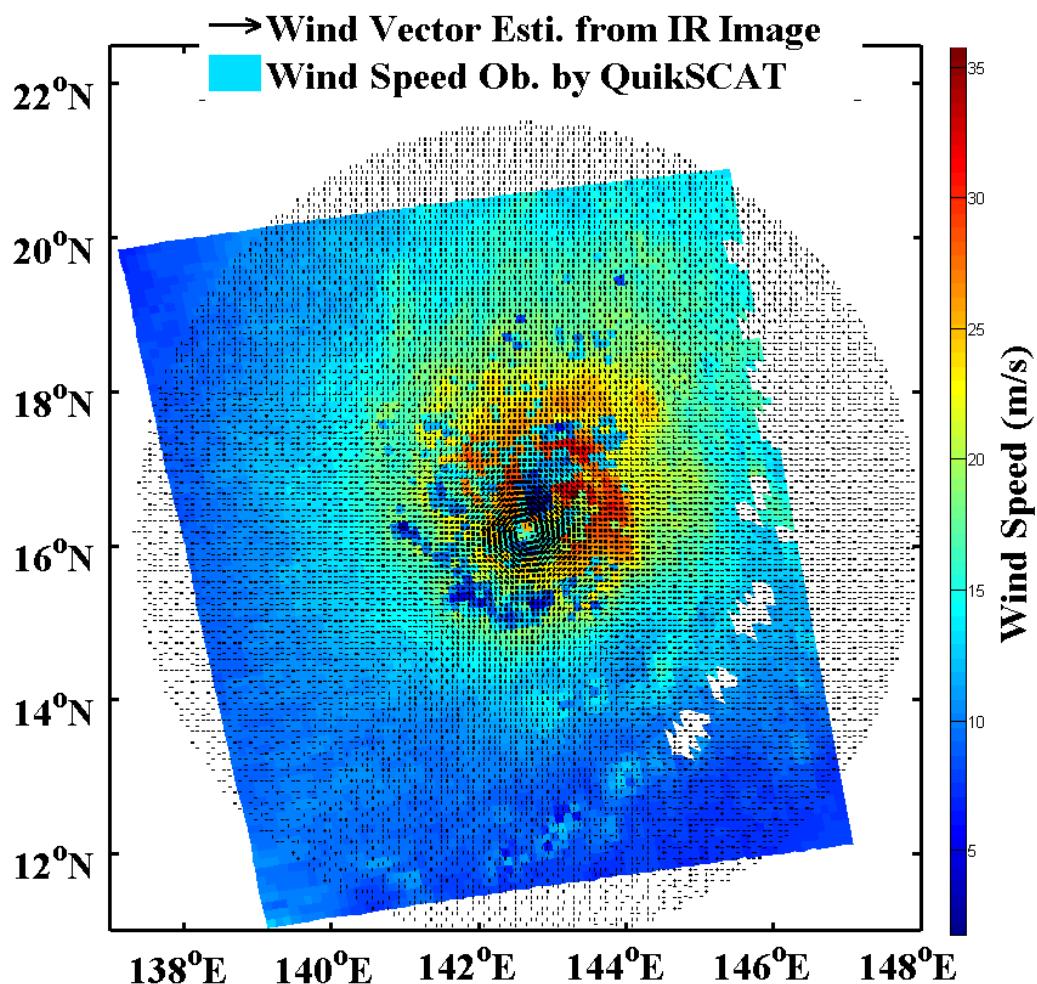


图 5-19 利用本文介绍的方法得到的台风 Melor(2009)的海表面风场与 QuikSCAT 于 10月3日 2100 UTC 观测到的海表面风场的数据融合产品

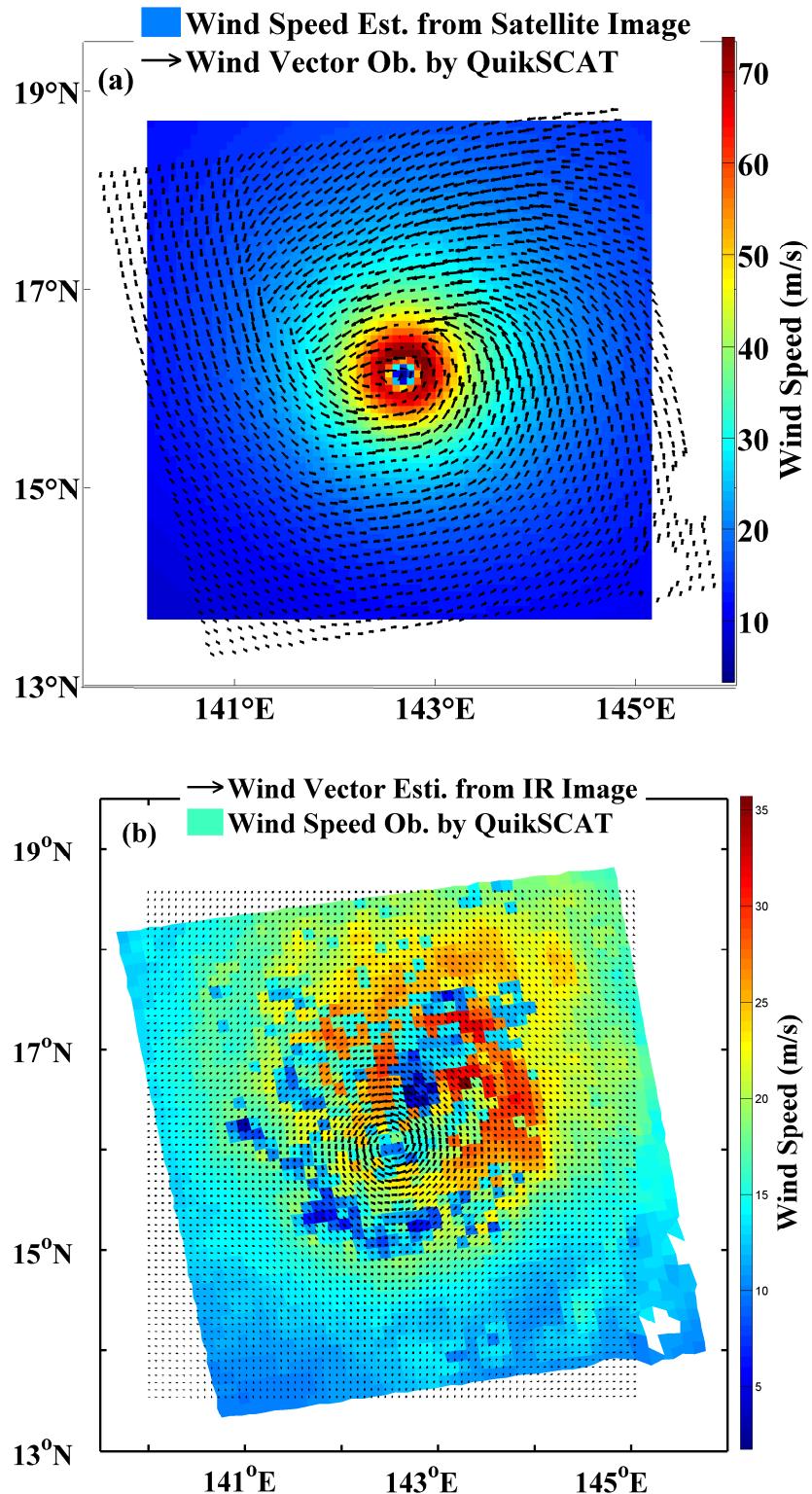


图 5-20 (a)利用卫星云图提取得到的风速场与 QuikSCAT 风矢量场融合产品, (b) 利用卫星云图提取得到的风矢量场与 QuikSCAT 风速场融合产品

5.4 小结

本章主要介绍利用卫星云图提取热带气旋二维海表面风场的过程。首先，在已有的研究基础上利用卫星云图云顶亮温信息对最大风速半径的估计方法进行了改进。此后，逐步获取了 R34、R50、R64 和 V500 等关键风速节点。根据热带气旋最外围环流区域无强对流的假设计算得到了气旋和环境风场不可区分的临界点位置。利用得到的这些关键风速节点训练了热带气旋切向风场 Wood-white 参数化模型得到了对称的二维热带气旋海表面切向风场。最后通过叠加热带气旋的移动矢量得到了完整的二维热带气旋海表面风场。利用 QuikSCAT 海表面风场数据与本文中介绍的方法进行了比较分析，讨论了微波散射计在热带气旋强度和内核风场观观测中存在的问题，验证了本文介绍的热带气旋中心定位、强度估计、海表面风场关键风速节点提取以及二维海表面风场提取等方法。

6. 总结和展望

热带气旋海表面风场的准确获取对于热带气旋的理论研究、天气预报、政府决策等都具有重要的意义。由于当前观测技术和成本等问题的限制，热带气旋海表面风场的观测和研究目前仍是难题。尽管美国、韩国和中国台湾等国家和地区在过去的几十年里利用飞机侦测等获取了有限且宝贵的热带气旋风场和气压场等数据资料，但这些资料远远不能满足研究和业务需求。近年来，研究人员不断探索利用静止气象卫星观测数据，并结合飞机现场测量数据反演海表面风场的方法，但是这些研究仅限于大西洋和东太平洋。本文在无飞机侦测数据的条件下利用卫星云图数据和 JTWC 最优路径数据开展了西北太平洋热带气旋海表面风场信息提取研究。

本文的研究内容和主要结论如下：

本文首先讨论了利用多通道卫星云图数据提取热带气旋主体云系的方法，以及针对有眼和无眼气旋进行中心定位的两种技术。利用 1996-2009 年 377 个热带气旋的 12,873 幅卫星云图数据，以 JTWC 最优路径数据为最优估计对两种热带气旋中心定位方法进行了验证和分析：利用本文方法得到的热带气旋中心位置和 JTWC 最优路径之间的欧氏距离绝对偏差约 30km，其中针对有眼热带气旋提出的利用旋转后的云顶亮温梯度矢量场的复合场进行气旋中心定位的方法精度更高。

本文详细介绍了利用卫星红外和水汽通道云图数据估计热带气旋强度的多元线性回归模型。结合理论分析和大量实验改进了 DAV-T 技术。利用云顶亮温数据定义了多个描述气旋眼、云墙等结构特征的参量，最后利用逐步回归方法得到了利用卫星云图估算热带气旋当前强度的模型。模型估计强度的平均绝对误差小于 10 节，均方根误差约 12 节，大量测试和验证表明本文建立的模型对强台风系统的强度估计精度更高，与此同时对于强度较弱的低压和风暴系统则会明显地高估当前强度。总体而言，该模型相比同类方法精度得到了明显提高。

本文最后介绍了利用卫星云图提取热带气旋海表面风场的方法。首先改进了利用红外云图估计热带气旋最大风速半径的方法，进而利用云顶亮温廓线估计了气旋关键风速节点 R34、R50 和 R64 等。根据热带气旋最外围无强对流的假设，估计了气旋和环境风场不可区分的最外围半径 R0。最后，利用这些关键风速节点数据训练获得热带气旋切向风廓线 Wood-white 参数化模型，得到对称的热带气旋海表面切向风场，通过叠加气旋移动矢量最终构造了完整的海表面风场。利用

QuikSCAT 观测到的 2009 年第 20 号台风 Melor(2009)对本文发展的方法进行了验证。结果表明，本文中发展的方法能在基本获取热带气旋海表面风场的结构和特征的同时提供高时空分辨率的海表面风场数据，文中获取得到的关键节点风速对热带气旋不同级别破坏力风场的尺度研究和预报具有参考价值。

本文主要利用卫星云图开展了热带气旋中心定位、强度估计和风场提取等研究。本文建立的热带气旋强度估计模型对较弱的热带风暴和低压系统的强度估计精度还需进一步提高；此外，本文关于热带气旋海表面不对称风场的假设和实际观测相比仍然存在问题。因此，今后工作主要围绕以下三个问题展开：（1）优化利用卫星云图提取热带气旋结构信息的技术，改进本文建立的热带气旋强度估计模型，以改善存在的问题并进一步提高模型精度；（2）改进热带气旋海表面不对称风场（径向风）的获取技术，以期获得更合理、准确的热带气旋二维海表面风场；（3）利用本文得到的热带气旋关键风速节点的估计方法，开展热带气旋尺度等的气候学研究；（4）结合散射计和卫星云图各自的优势，开闸热带气旋内核物理过程和机制的研究。

参考文献

- [1] J. L. Franklin, M. L. Black, and K. Valde, "GPS dropwindsonde wind profiles in hurricanes and their operational implications," *Weather and Forecasting*, vol. 18, pp. 32-44, 2003.
- [2] J. P. Kossin, J. A. Knaff, H. I. Berger, D. C. Herndon, T. A. Cram, C. S. Velden, *et al.*, "Estimating hurricane wind structure in the absence of aircraft reconnaissance," *Weather and forecasting*, vol. 22, pp. 89-101, 2007.
- [3] K. J. Mueller, M. DeMaria, J. Knaff, J. P. Kossin, and T. H. Vonder Haar, "Objective estimation of tropical cyclone wind structure from infrared satellite data," *Weather and forecasting*, vol. 21, pp. 990-1005, 2006.
- [4] B. W. Stiles, R. E. Danielson, W. L. Poulsen, M. J. Brennan, S. Hristova-Veleva, T.-P. Shen, *et al.*, "Optimized Tropical Cyclone Winds From QuikSCAT: A Neural Network Approach," *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, vol. 52, pp. 7418-7434, 2014.
- [5] E. N. Rappaport, J. L. Franklin, L. A. Avila, S. R. Baig, J. L. Beven, E. S. Blake, *et al.*, "Advances and challenges at the National Hurricane Center," *Weather and Forecasting*, vol. 24, pp. 395-419, 2009.
- [6] J. Wang, K. Young, T. Hock, D. Lauritsen, D. Behringer, M. Black, *et al.*, "A Long-Term, High-quality, High Vertical Resolution GPS Dropsonde Dataset for Hurricane and Other Studies," *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2014.
- [7] S. D. Aberson and J. L. Franklin, "Impact on hurricane track and intensity forecasts of GPS dropwindsonde observations from the first-season flights of the NOAA Gulfstream-IV jet aircraft," *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 80, pp. 421-427, 1999.
- [8] J. A. Zhang, R. F. Rogers, P. D. Reasor, E. W. Uhlhorn, and F. D. Marks Jr, "Asymmetric hurricane boundary layer structure from dropsonde composites in relation to the environmental vertical wind shear," *Monthly Weather Review*, vol. 141, pp. 3968-3984, 2013.
- [9] J. L. Franklin, M. L. Black, and K. Valde, "Eyewall wind profiles in hurricanes determined by GPS dropwindsondes," in *Preprints, 24th Conf. on Hurricanes and Tropical Meteorology, Fort Lauderdale, FL, Amer. Meteor. Soc*, 2000, pp. 446-447.
- [10] K. Liu and J. C. Chan, "Size of tropical cyclones as inferred from ERS-1 and ERS-2 data," *Monthly Weather Review*, vol. 127, pp. 2992-3001, 1999.
- [11] L. Dean, K. A. Emanuel, and D. Chavas, "On the size distribution of Atlantic tropical cyclones," *Geophysical Research Letters*, vol. 36, 2009.
- [12] K. T. Chan and J. C. Chan, "Global climatology of tropical cyclone size as inferred from QuikSCAT data," *International Journal of Climatology*, 2015.
- [13] Y. Yu, W. Zhang, Z. Wu, X. Yang, X. Cao, and M. Zhu, "Assimilation of HY-2A scatterometer sea surface wind data in a 3DVAR data assimilation system—A case study of Typhoon Bolaven," *Frontiers of Earth Science*, vol. 9, pp. 192-201, 2015.
- [14] V. Prasad, A. Gupta, E. Rajagopal, and S. Basu, "Impact of OSCAT surface wind data on T574L64 assimilation and forecasting system—a study involving tropical cyclone Thane," *Curr. Sci*, vol. 104, pp. 627-631, 2013.
- [15] S.-H. Chen, "The impact of assimilating SSM/I and QuikSCAT satellite winds on Hurricane Isidore simulations," *Monthly weather review*, vol. 135, pp. 549-566, 2007.

- [16] M. J. Brennan, C. C. Hennon, and R. D. Knabb, "The Operational Use of QuikSCAT Ocean Surface Vector Winds at the National Hurricane Center," *Weather and Forecasting*, vol. 24, pp. 621-645, Jun 2009.
- [17] J.-h. Zou, M.-s. Lin, D.-l. Pan, and Z.-h. Chen, "Applications of QuikSCAT in typhoon observation and tracking," *Journal of Remote Sensing*, vol. 13, pp. 840-846, 2009.
- [18] D. R. Chavas and J. L. Vigh, "QSCAT-R: The QuikSCAT Tropical Cyclone Radial Structure Dataset."
- [19] K. Bessho, M. DeMaria, and J. A. Knaff, "Tropical cyclone wind retrievals from the Advanced Microwave Sounding Unit: Application to surface wind analysis," *Journal of applied meteorology and climatology*, vol. 45, pp. 399-415, 2006.
- [20] R. L. Bankert and P. M. Tag, "An automated method to estimate tropical cyclone intensity using SSM/I imagery," *Journal of Applied Meteorology*, vol. 41, pp. 461-472, 2002.
- [21] S. Hoshino and T. Nakazawa, "Estimation of tropical cyclone's intensity using TRMM/TMI brightness temperature data," 氣象集誌 第2輯, vol. 85, pp. 437-454, 2007.
- [22] M. Goodberlet, C. Swift, and J. Wilkerson, "Remote sensing of ocean surface winds with the Special Sensor Microwave/Imager," *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)*, vol. 94, pp. 14547-14555, 1989.
- [23] J. Hollinger, *Special Sensor Microwave/imager: User's Guide*: Naval Research Laboratory, 1987.
- [24] C.-C. Chao, G.-R. Liu, and C.-C. Liu, "Estimation of the upper-layer rotation and maximum wind speed of tropical cyclones via satellite imagery," *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 50, pp. 750-766, 2011.
- [25] G. Zhang, B. Zhang, W. Perrie, Q. Xu, and Y. He, "A Hurricane Tangential Wind Profile Estimation Method for C-Band Cross-Polarization SAR," *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, vol. 52, pp. 7186-7194, 2014.
- [26] 冯倩, "多传感器卫星海面风场遥感研究 [D]," 中国海洋大学, 2004.
- [27] W. G. Pichel, X. Li, F. Monaldo, C. Wackerman, C. Jackson, C.-Z. Zou, *et al.*, "ENVISAT ASAR applications demonstrations: Alaska SAR demonstration and Gulf of Mexico hurricane studies," in *Proceedings of Envisat Symposium*, 2007, pp. 23-27.
- [28] J. Horstmann, "Estimating Winds from Synthetic Aperture Radar under Typhoon Conditions," DTIC Document2012.
- [29] A. Reppucci, S. Lehner, J. Schulz-Stellenfleth, and S. Brusch, "Tropical cyclone intensity estimated from wide-swath SAR images," *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, vol. 48, pp. 1639-1649, 2010.
- [30] 周旋, 杨晓峰, 李紫薇, 于暘, 毕海波, 马胜, *et al.*, "基于星载 SAR 数据的台风参数估计及风场构建," *中国科学: 地球科学*, vol. 2, p. 016, 2014.
- [31] Y.-H. Cheng, S.-J. Huang, A. K. Liu, C.-R. Ho, and N.-J. Kuo, "Observation of typhoon eyes on the sea surface using multi-sensors," *Remote Sensing of Environment*, vol. 123, pp. 434-442, 2012.
- [32] K. Holmlund, C. S. Velden, and M. Rohn, "Enhanced automated quality control applied to high-density satellite-derived winds," *Monthly Weather Review*, vol. 129, pp. 517-529, 2001.
- [33] S.-S. Ho and A. Talukder, "Automated cyclone tracking using multiple remote satellite data via knowledge transfer," in *Aerospace conference, 2009 IEEE*, 2009, pp. 1-7.

- [34] J. A. Knaff, M. DeMaria, D. A. Molenar, C. R. Sampson, and M. G. Seybold, "An automated, objective, multiple-satellite-platform tropical cyclone surface wind analysis," *Journal of applied meteorology and climatology*, vol. 50, pp. 2149-2166, 2011.
- [35] C. Velden, B. Harper, F. Wells, J. L. Beven, R. Zehr, T. Olander, *et al.*, "The Dvorak tropical cyclone intensity estimation technique: A satellite-based method that has endured for over 30 years," *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 87, pp. 1195-1210, 2006.
- [36] J. C. Sadler, "Tropical cyclones of the Eastern North Pacific as revealed by TIROS observations," *Journal of Applied Meteorology*, vol. 3, pp. 347-366, 1964.
- [37] L. F. Hubert and A. Timchalk, "Estimating hurricane wind speeds from satellite pictures," *Monthly Weather Review*, vol. 97, pp. 382-383, 1969.
- [38] V. F. Dvorak, "Tropical cyclone intensity analysis and forecasting from satellite imagery," *Monthly Weather Review*, vol. 103, pp. 420-430, 1975.
- [39] V. F. Dvorak, *Tropical cyclone intensity analysis using satellite data*: US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Environmental Satellite, Data, and Information Service, 1984.
- [40] 刘喆, 王新, 李万彪, 韩志刚, and 朱元竞, "Dvorak 技术估测热带气旋强度研究进展," *气象科技*, vol. 35, pp. 453-457, 2007.
- [41] R. ZEHR, "Improving objective satellite estimates of tropical cyclone intensity," in *Conference on Satellite Meteorology and Oceanography, 4 th, San Diego, CA*, 1989.
- [42] C. S. Velden, T. L. Olander, and R. M. Zehr, "Development of an Objective Scheme to Estimate Tropical Cyclone Intensity from Digital Geostationary Satellite Infrared Imagery," *Weather and Forecasting*, vol. 13, pp. 172-186, 1998/03/01 1998.
- [43] T. L. Olander, C. S. Velden, and M. A. Turk, "Development of the Advanced Objective Dvorak Technique (AODT)–Current progress and future directions," in *25th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology*, 2002, pp. 585-586.
- [44] T. L. Olander, C. Velden, and J. Kossin, "The Advanced Objective Dvorak Technique (AODT)–Latest upgrades and future directions," in *26th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology*, 2004, pp. 294-295.
- [45] T. L. Olander and C. S. Velden, "The advanced Dvorak technique: Continued development of an objective scheme to estimate tropical cyclone intensity using geostationary infrared satellite imagery," *Weather and forecasting*, vol. 22, pp. 287-298, 2007.
- [46] X.-Y. Zhuge, J. Guan, F. Yu, and Y. Wang, "A New Satellite-Based Indicator for Estimation of the Western North Pacific Tropical Cyclone Current Intensity."
- [47] T. Nakazawa and S. Hoshino, "Intercomparison of Dvorak parameters in the tropical cyclone datasets over the western North Pacific," *Sola*, vol. 5, pp. 33-36, 2009.
- [48] C.-C. Liu, T.-Y. Shyu, C.-C. Chao, and Y.-F. Lin, "Analysis on Typhoon Longwang intensity changes over the ocean via satellite data," *Journal of Marine Science and Technology*, vol. 17, pp. 23-28, 2009.
- [49] J. Steranka, E. B. Rodgers, and R. C. Gentry, "The relationship between satellite measured convective bursts and tropical cyclone intensification," *Monthly weather review*, vol. 114, pp. 1539-1546, 1986.

- [50] T. L. Olander and C. S. Velden, "Tropical cyclone convection and intensity analysis using differenced infrared and water vapor imagery," *Weather and Forecasting*, vol. 24, pp. 1558-1572, 2009.
- [51] N. Jaiswal, C. Kishtawal, and P. Pal, "Cyclone intensity estimation using similarity of satellite IR images based on histogram matching approach," *Atmospheric Research*, vol. 118, pp. 215-221, 2012.
- [52] G. Fetanat, A. Homaifar, and K. R. Knapp, "Objective Tropical Cyclone Intensity Estimation Using Analogs of Spatial Features in Satellite Data," *Weather and Forecasting*, vol. 28, pp. 1446-1459, 2013.
- [53] M. F. Piñeros, E. A. Ritchie, and J. S. Tyo, "Objective measures of tropical cyclone structure and intensity change from remotely sensed infrared image data," *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, vol. 46, pp. 3574-3580, 2008.
- [54] M. F. Piñeros, E. Ritchie, and J. S. Tyo, "Detecting tropical cyclone genesis from remotely sensed infrared image data," *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, vol. 7, pp. 826-830, 2010.
- [55] M. F. Piñeros, E. A. Ritchie, and J. S. Tyo, "Estimating tropical cyclone intensity from infrared image data," *Weather and Forecasting*, vol. 26, pp. 690-698, 2011.
- [56] E. A. Ritchie, G. Valliere-Kelley, M. F. Piñeros, and J. S. Tyo, "Tropical cyclone intensity estimation in the North Atlantic basin using an improved deviation angle variance technique," *Weather and Forecasting*, vol. 27, pp. 1264-1277, 2012.
- [57] E. A. Ritchie, K. M. Wood, O. G. Rodríguez-Herrera, M. F. Piñeros, and J. S. Tyo, "Satellite-Derived Tropical Cyclone Intensity in the North Pacific Ocean Using the Deviation-Angle Variance Technique," *Weather and Forecasting*, vol. 29, pp. 505-516, 2014.
- [58] C.-C. Liu, C.-Y. Liu, T.-H. Lin, and L.-D. Chen, "A satellite-derived typhoon intensity index using a deviation angle technique," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 36, pp. 1216-1234, 2015.
- [59] M. D. Powell, S. Murillo, P. Dodge, E. Uhlhorn, J. Gamache, V. Cardone, *et al.*, "Reconstruction of Hurricane Katrina's wind fields for storm surge and wave hindcasting," *Ocean Engineering*, vol. 37, pp. 26-36, 2010.
- [60] J. A. Knaff, S. P. Longmore, and D. A. Molenar, "An objective satellite-based tropical cyclone size climatology," *Journal of Climate*, vol. 27, pp. 455-476, 2014.
- [61] J. A. Knaff, S. P. Longmore, R. T. DeMaria, and D. A. Molenar, "Improved Tropical-Cyclone Flight-Level Wind Estimates Using Routine Infrared Satellite Reconnaissance," *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 54, pp. 463-478, 2015.
- [62] S. M. Hristova-Veleva, "Using the JPL Tropical Cyclone Information System for Research and Applications," in *28th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology*, 2008.
- [63] B. Knosp, C. Ao, Y. Chao, V. Dang, M. Garay, Z. Haddad, *et al.*, "The JPL Tropical Cyclone Information System: Data and Tools for Researchers," in *AGU Fall Meeting Abstracts*, 2008, p. 1051.
- [64] K. R. Knapp and J. P. Kossin, "New global tropical cyclone data set from ISCCP B1 geostationary satellite observations," *Journal of Applied Remote Sensing*, vol. 1, pp. 013505-013505-6, 2007.

- [65] T. Lungu and P. Callahan, "QuikSCAT science data product user's manual: Overview and geophysical data products," *D-18053-Rev A, version*, vol. 3, p. 91, 2006.
- [66] R. N. Hoffman and S. M. Leidner, "An introduction to the near-real-time QuikSCAT data," *Weather and Forecasting*, vol. 20, pp. 476-493, 2005.
- [67] A. G. Fore, B. W. Stiles, A. H. Chau, B. A. Williams, R. S. Dunbar, and E. Rodriguez, "Pointwise wind retrieval and ambiguity removal improvements for the QuikSCAT climatological data set," *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, vol. 52, pp. 51-59, 2014.
- [68] J.-H. Chu, C. R. Sampson, A. S. Levine, and E. Fukada, "The joint typhoon warning center tropical cyclone best-tracks, 1945–2000," *Ref. NRL/MR/7540 - 02*, vol. 16, 2002.
- [69] J. C. Chan, "Decadal variations of intense typhoon occurrence in the western North Pacific," in *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2008, pp. 249-272.
- [70] H. Zhao, L. Wu, and R. Wang, "Decadal variations of intense tropical cyclones over the western North Pacific during 1948–2010," *Advances in Atmospheric Sciences*, vol. 31, pp. 57-65, 2014.
- [71] H. ZHAO, L. WU, and W. ZHOU, "Interannual Changes of Tropical Cyclone Intensity in the Western North Pacific," *Journal of the Meteorological Society of Japan*, vol. 89, pp. 243-253, 2011.
- [72] M. DeMaria, M. Mainelli, L. K. Shay, J. A. Knaff, and J. Kaplan, "Further improvements to the statistical hurricane intensity prediction scheme (SHIPS)," *Weather and Forecasting*, vol. 20, pp. 531-543, 2005.
- [73] C. Zhang, Y. Chen, and J. Lu, "Typhoon center location algorithm based on fractal feature and gradient of infrared satellite cloud image," in *International Symposium on Optoelectronic Technology and Application 2014*, 2014, pp. 92990F-92990F-6.
- [74] T.-L. Pao and J.-H. Yeh, "Typhoon locating and reconstruction from the infrared satellite cloud image," *Journal of Multimedia*, vol. 3, pp. 45-51, 2008.
- [75] T.-L. Pao, J.-H. Yeh, M.-Y. Liu, and Y.-C. Hsu, "Locating the typhoon center from the IR satellite cloud images," in *Systems, Man and Cybernetics, 2006. SMC'06. IEEE International Conference on*, 2006, pp. 484-488.
- [76] 刘正光, 邱海明, 吴冰, and 刘还珠, "基于卫星云图的无眼台风中心定位算法," *天津大学学报: 自然科学与工程技术版*, vol. 36, pp. 668-672, 2003.
- [77] A. Alexanin, A. Eremenko, D. Bolovin, and S. Dyakov, "Automatic Computation of Tropical Cyclone Tracks on Geostationary Satellite Imagery," in *Proceedings of First Russia and Pacific Conference on Computer Technology and Applications (RPC 2010)*, 2010, pp. 6-9.
- [78] S. Fritz and I. Laszlo, "Detection of water vapor in the stratosphere over very high clouds in the tropics," *Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012)*, vol. 98, pp. 22959-22967, 1993.
- [79] N. Otsu, "A threshold selection method from gray-level histograms," *Automatica*, vol. 11, pp. 23-27, 1975.
- [80] 王彦博, "数值微分及其应用," 上海: 复旦大学, 2005.
- [81] 赵勇, 赵朝方, and 王志雄, "基于卫星散射计海面风场数据的台风中心定位研究," in *第19届中国遥感大会*, 中国西安, 2014, pp. 1854-1865.

- [82] C. L. Weatherford and W. M. Gray, "Typhoon Structure as Revealed by Aircraft Reconnaissance. Part I: Data Analysis and Climatology," *Monthly Weather Review*, vol. 116, pp. 1032-1043, 1988/05/01 1988.
- [83] C. L. Weatherford and W. M. Gray, "Typhoon structure as revealed by aircraft reconnaissance. Part II: Structural variability," *Monthly Weather Review*, vol. 116, pp. 1044-1056, 1988.
- [84] M. Croxford and G. M. Barnes, "Inner core strength of Atlantic tropical cyclones," *Monthly weather review*, vol. 130, pp. 127-139, 2002.
- [85] E. R. Sanabia, B. S. Barrett, and C. M. Fine, "Relationships between tropical cyclone intensity and eyewall structure as determined by radial profiles of inner-core infrared brightness temperature," *Monthly Weather Review*, vol. 142, pp. 4581-4599, 2014.
- [86] A. T. Hazelton and R. E. Hart, "Hurricane eyewall slope as determined from airborne radar reflectivity data: Composites and case studies," *Weather and Forecasting*, vol. 28, pp. 368-386, 2013.
- [87] V. T. Wood and L. W. White, "A new parametric model of vortex tangential-wind profiles: Development, testing, and verification," *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 68, pp. 990-1006, 2011.
- [88] W. Rankine, "A Manual of Applied Physics," ed: Charles Griff and Co, 1882.
- [89] J. M. Burgers, "A mathematical model illustrating the theory of turbulence," *Adv. in Appl. Mech.*, vol. 1, pp. 171-199, 1948.
- [90] N. Rott, "On the viscous core of a line vortex," *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik ZAMP*, vol. 9, pp. 543-553, 1958.
- [91] R. D. Sullivan, "A two-cell vortex solution of the Navier-Stokes equations," *Journal of the Aerospace Sciences*, 2012.
- [92] E. N. Lorenz, "Empirical orthogonal functions and statistical weather prediction," 1956.
- [93] S. Hsu, M. Martin Jr, and B. Blanchard, "An evaluation of the USACE's deepwater wave prediction techniques under hurricane conditions during Georges in 1998," *Journal of coastal research*, pp. 823-829, 2000.
- [94] K. Emanuel, "Tropical cyclone energetics and structure," ed: Cambridge University Press, 2004, pp. 165-191.
- [95] V. T. Wood, L. W. White, H. E. Willoughby, and D. P. Jorgensen, "A new parametric tropical cyclone tangential wind profile model," *Monthly Weather Review*, vol. 141, pp. 1884-1909, 2013.

致 谢

本论文得到国家基金委-山东省联合基金项目(No.U1406404)和国家高新技术研究发展计划(No.2013AA09A505)的支持。感谢 NASA 喷气推进实验室 JPL、NOAA 环境信息中心 HURSAT-B1、美国关岛联合台风预警中心 JTWC 和美国国家飓风中心 SHIPS 等提供的免费数据支持。感谢 NOAA 的 Kenneth Knapp 教授在本文热带气旋强度回归模型训练过程中给予的宝贵建议和意见；感谢新南威尔士大学 Elizabeth Ritchie-Tyo 教授对本文 DAV-T 技术发展提供的技术指导；感谢香港城市大学 Kelvin T. F. Chan 教授在散射计数据处理方面给予的技术支持和帮助。

两年的硕士学习生涯即将结束，与可敬可亲可爱的导师 xxx 教授结识亦有四年之久。四年来我每每被赵老师的品行、修养和气度所折服。赵老师高尚、严谨、专业的学者风范，温和、谦卑、躬亲的生活态度，细心而不拘泥，稳中求进的行事风格值得我此生学习。感谢能够与 xxx 相识，感谢 xxx 的悉心教导，感谢 xxx 的默默支持，感谢 xxx 给予我前进的动力。

感谢中国海大六年的培养，感谢教导过我的所有老师和校园内普普通通的忙碌着的身影；感谢“INOCENT BOYS”全体成员这两年来的支持和带给我的欢乐；感谢我的同门王臣、丁润杰和孙如瑶等在研究生期间和论文撰写过程中给予我的帮助。

最后，特别感谢我伟大的母亲给予我一直以来的养育和支持。

个人简历

1991年8月出生于陕西省咸阳市；

2010年9月考入中国海洋大学信息科学与工程学院通信工程专业，后学习于海洋技术专业，2014年6月本科毕业并获得海洋技术专业理学学士；

2014年10月推荐免试进入中国海洋大学信息科学与工程学院海洋探测技术专业攻读硕士学位至今。

论文发表

- (1) XXX, XXX et al. A Multiple Linear Regression Model for Tropical Cyclone Intensity Estimation from Satellite Infrared Images, *Atmosphere*, 7(3)40,1:17, doi: 10.3390/Atmos7030040 (SCI)
- (2) XXX, XXX, XXX. Application of HY-2A/SCAT Sea Surface Winds in Understanding Surface Wind Structure of Typhoons Over Northwestern Pacific Ocean, EORSA 2016, Accepted (IEEE Xplorer)
- (3) XXX, XXX, XXX, HY-2A 散射计数据在台风“苏力”海表面风场结构研究中的应用, 海洋湖沼通报 (中文核心)
- (4) XXX, XXX, XXX, 基于卫星散射计海面风场数据的台风中心定位研究, 第19届中国遥感大会论文集 3(5):1854-1865, 西安, 2014 (会议论文集)
- (5) XXX XXX et.al. The Improvement of HY-2A Scatterometer Wind Retrieval and Its Application in Studying Typhoons over Northwestern Pacific Ocean, 2015 Annual Academic Meeting of Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology. (Poster)