

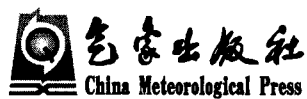
中国近海热带气旋 强度突变研究

Zhongguo Jinhai Redai Qixuan
Qiangdu Tubian Yanjiu

于玉斌 著

中国近海热带气旋强度突变研究

于玉斌 著



内容简介

本书分析了西北太平洋热带气旋强度变化的气候特征,依据平均值与标准差的数学含义提出了热带气旋强度突变的标准,采用合成资料分析了热带气旋强度突变的垂直结构特征、动能特征和热力特征。本书还选取了百年一遇的超强台风“桑美”(Saomai)(2006)作为典型个例,分析 Saomai 在我国近海突然增强的特征及机理。

书中对近海热带气旋突然增强的诊断分析作了数值试验,从非线性动力—热力方程组出发,建立了热带气旋的动力系统,分析影响热带气旋发展的物理因子和热带气旋发生强度突变的条件,同时,提出了可用于诊断热带气旋强度变化的物理参数。

本书可供从事天气预报的人员和大气科学工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

中国近海热带气旋强度突变研究 / 于玉斌著.

—北京:气象出版社, 2012.3

ISBN 978-7-5029-5443-7

I. ①中… II. ①于… III. ①近海—热带
低压—研究—中国 IV. ①P444

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 035808 号

Zhongguo Jinhai Redaiqixuan Qiangdu Tubian Yanjiu

中国近海热带气旋强度突变研究

于玉斌 著

出版发行:气象出版社

地 址:北京市海淀区中关村南大街 46 号

总 编 室:010-68407112

网 址:<http://cmp.cma.gov.cn>

责任编辑:李太宇

封面设计:博雅思企划

印 刷:北京中新伟业印刷有限公司

开 本:787 mm×1092 mm 1/16

字 数:189 千字

版 次:2012 年 6 月第 1 版

定 价:25.00 元

邮政编码:100081

发 行 部:010-68409198

E-mail: qxcbs@cma.gov.cn

终 审:黄润恒

责任技编:吴庭芳

印 张:7

印 次:2012 年 6 月第 1 次印刷

序

中国海岸线漫长,大陆海岸线长达 1.8 万多千米,是世界上少数几个受热带气旋影响最严重的国家之一,平均每年有 7 个热带气旋登陆,带来大风、强降水和风暴潮等灾害。几十年来,经过广大学者和气象工作者的共同努力,我们对热带气旋的结构和活动规律已有了较广泛的认识,取得许多重要研究成果。热带气旋研究和预报的焦点集中在路径和强度上,但是强度变化比路径要复杂得多。过去几十年,热带气旋路径预报取得较大进展,而强度预报技巧提高缓慢,在业务预报中很难对近海活动的热带气旋强度给出非常确定的预报;热带气旋发生发展的理论研究进展较慢,基本上没有重大突破,研究仍主要集中在现象和一般规律的揭示方面,尚未对其物理机制的认识形成较完备的理论解释,热带气旋强度变化问题是大气科学领域尚未解决的重要科学问题之一。

在中国近海地区,登陆前突然加强的热带气旋对中国影响大而又难以预报,往往造成十分严重的灾害。2006 年超强台风“桑美”是新中国成立以来登陆中国大陆最强的台风,是百年一遇的超强台风,也是在中国近海突然增强的台风,比 2005 年淹没美国新奥尔良的著名强飓风“卡特里娜”还要强,具有中心气压特别低、风速特别大、降雨特别集中、发展迅速、移动快等特点,共造成 430 人死亡、157 人失踪,直接经济损失达 194.77 亿元人民币。热带气旋强度突变的机理研究是热带气旋研究的重点和难点,目前对热带气旋强度突变的机理认识还很肤浅。因此,研究热带气旋强度突变的机理,尤其是近海热带气旋突然增强的机理,有助于提高热带气旋强度的预测能力。

本书第一章对热带气旋强度研究作了全面系统的回顾,在此基础上,利用再分析资料揭示了热带气旋强度突变的机理,得出了一些新的观点,比如:对流层低层的能量转换机制引起的旋转风动能增加可导致热带气旋突然增强;热带气旋中心附近对流层中上层非绝热加热随着高度增加、对流层低层垂直非均匀加热的增大有利于热带气旋突然增强;对流层高层高位涡中心叠加在中低层位涡柱之上、对流层高层或平流层的大值位涡下传有利于热带气旋突然增强;热带气旋中心附

近对流层高层辐散的增强、中心附近正涡度的增大和正涡度柱向对流层中上层伸展导致热带气旋突然增强,而对流层中层辐合的增加、高位涡中心的存在、垂直切变的增强可导致热带气旋突然减弱;热带气旋附近另一个热带气旋残涡正涡度的卷入是其在近海突然增强的重要原因。这些关于热带气旋强度变化的新观点为深入开展热带气旋的天气和动力学研究提供了依据,对改善热带气旋预报也具有重要的应用价值。

迄今国内外还没有一部关于热带气旋强度变化研究的专著,预期本书的出版将进一步推动热带气旋研究的深入开展。

陈联寿*

2012年5月

陈联寿,中国工程院院士。

前 言

本书的主要内容来源于著者博士学位论文和攻读博士学位期间公开发表的学术论文,集中反映了著者十余年来热带气旋强度研究成果。本书旨在对中国近海热带气旋强度突变的机理进行较为系统的研究,得出一些可被实际业务预报参考应用的结果和判据。出版本书旨在将著者多年的研究成果与读者交流。本书的付梓出版归功于良师益友的指导和帮助,归功于亲人的支持和帮助。谨向导师陈联寿院士致以诚挚的谢意,感谢陈先生 20 年的精心指导。陈先生的严谨学风和真诚品格,深深地感染和激励着我,让我领悟到“学高为师,身正为范”的真谛。“仰之弥高,钻之弥坚,瞻之在前,忽焉在后。夫子循循然善诱人,博我以文,约我以礼,欲罢不能。既竭吾才,如有所立卓尔。虽欲从之,未由也已”。感谢徐祥德院士和郑祖光、吴宝俊、王继志等专家的指导和帮助,感谢雷小途、李英、王慧、姚秀萍、杨昌贤、段海霞、炎利军、赵大军等提供的帮助。前辈学者的热带气旋研究成果给我启发良多,在此一并表示衷心的感谢。

全书共分九章,具体如下:

第 1 章:为热带气旋强度研究进展。阐述中国近海热带气旋强度突变研究的重要意义,综述热带气旋强度变化最新研究进展,简述本书研究的主要内容、研究方法和研究资料。

第 2 章:为西北太平洋热带气旋强度变化的气候特征。依据平均值与标准差的数学含义,给出热带气旋突然增强、缓慢增强、强度稳定、缓慢减弱和突然减弱的标准,分析西北太平洋热带气旋强度变化的基本特征。

第 3 章:中国近海热带气旋强度突变的垂直结构特征。应用 NCEP/NCAR 再分析资料,从热带气旋强度突变与环境风垂直切变、高低层涡度和散度的关系等方面,对中国近海突然增强和突然减弱的两组热带气旋进行合成分析和对比分析,揭示中国近海热带气旋强度突变的垂直结构特征。

第 4 章:中国近海热带气旋强度突变的动能特征。应用 NCEP/NCAR 再分析资料,对中国近海突然增强和突然减弱两组热带气旋的动能场进行合成分析和

对比分析,揭示中国近海热带气旋强度突变的动能变化特征。

第5章:中国近海热带气旋强度突变的热力特征。应用NCEP/NCAR再分析资料,对中国近海突然增强和突然减弱两组热带气旋的水汽分布及其输送特征、热量和水汽收支进行合成分析和对比分析;从包含热力作用的全型涡度倾向方程出发,侧重研究非绝热加热效应的贡献率,揭示中国近海热带气旋强度突变的热力特征。

第6章:超强台风“桑美”(2006)近海突然增强的机理研究。选取“桑美”(2006)作为中国近海突然增强台风的典型个例,分析“桑美”台风在中国近海突然增强的过程,揭示其突然增强特征及机理。

第7章:中国近海热带气旋强度突变过程的数值模拟。应用数值模式设计控制试验和敏感性试验方案,模拟“桑美”(2006)在中国近海突然增强过程,分析地形和凝结潜热加热等因子对台风强度变化的影响。

第8章:中国近海热带气旋强度突变的非线性机理探讨。从非线性动力—热力方程组出发,建立热带气旋的动力系统,从动能角度分析影响热带气旋发展的物理因子和热带气旋发生强度突变的条件,提炼出热带气旋能量发展的物理因子,将分析结果转化为分析预测热带气旋强度变化的实用指标。

第9章:结论与讨论。总结全书研究结果,提出今后需要进一步研究的问题。

本书研究得到国家自然科学基金项目“梅雨期东风带扰动对西太平洋副热带高压短期移动的影响及其机制”(40875030)、“登陆台风强度变化机理研究”(40730948)、“近海台风突变现象的研究”(40575018)等项目的资助,特此致谢!

本书既是著者多年来学习和研究的成果总结,也是今后进一步学习和深入研究的新起点。在本书写作过程中,我深深地感到自己在理论水平和学术能力等方面仍然存在许多不足,书中错误之处,敬请读者批评指正。

著 者

2012年1月

目 录

序

前言

第 1 章 热带气旋强度研究进展	(1)
1.1 热带气旋强度突变研究意义	(1)
1.2 热带气旋强度研究进展	(2)
1.3 本书研究内容	(5)
参考文献	(5)
第 2 章 西北太平洋热带气旋强度变化的气候特征	(9)
2.1 引言	(9)
2.2 热带气旋强度变化的统计特征	(10)
2.3 各类发展类型热带气旋的气候特征	(14)
2.4 结论	(17)
参考文献	(19)
第 3 章 中国近海热带气旋强度突变的垂直结构特征	(20)
3.1 引言	(20)
3.2 资料及方法	(20)
3.3 低空急流特征	(20)
3.4 环境风场垂直切变特征	(22)
3.5 散度场特征	(23)
3.6 涡度特征	(24)
3.7 位涡特征	(24)
3.8 相对涡度垂直切变特征	(25)
3.9 结论和讨论	(27)
参考文献	(27)
第 4 章 中国近海热带气旋强度突变的动能特征	(29)
4.1 引言	(29)
4.2 计算方法	(29)
4.3 动能变化特征	(31)
4.4 区域平均动能变化特征	(33)
4.5 结论与讨论	(34)
参考文献	(35)

第5章 中国近海热带气旋强度突变的热力特征	(36)
5.1 引言	(36)
5.2 水汽分布	(37)
5.3 水汽输送	(37)
5.4 热量和水汽收支	(41)
5.5 非绝热加热对热带气旋强度突变影响的诊断分析	(45)
5.6 结论与讨论	(52)
参考文献	(53)
第6章 超强台风“桑美”(2006)近海突然增强特征及机理分析	(55)
6.1 引言	(55)
6.2 超强台风“桑美”简介	(55)
6.3 资料及方法	(55)
6.4 强度突变的动力和能量特征	(57)
6.5 强度突变的热力特征	(62)
6.6 残涡卷入后的突然增强特征	(64)
6.7 结论和讨论	(66)
参考文献	(67)
第7章 中国近海热带气旋强度突变过程的数值模拟	(69)
7.1 引言	(69)
7.2 试验方案的设计	(69)
7.3 试验结果分析	(71)
7.4 结论与讨论	(83)
参考文献	(85)
第8章 中国近海热带气旋强度突变的非线性机理探讨	(87)
8.1 引言	(87)
8.2 基本方程组	(88)
8.3 波频率、波群速和波能量方程	(89)
8.4 热带气旋发展的物理因子分析	(90)
8.5 台风“桑美”加强(减弱)的物理因子分析	(92)
8.6 结论与讨论	(98)
参考文献	(99)
第9章 结论与讨论	(100)
9.1 结论	(100)
9.2 中国近海热带气旋突然增强机制	(102)
9.3 讨论	(102)

第 1 章 热带气旋强度研究进展

1.1 热带气旋强度突变研究意义

中国是世界上受热带气旋(TC)(因习惯称呼原因,本书中热带气旋与台风两词经常通用)影响最严重的国家之一,热带气旋带来的大风、暴雨和风暴潮等灾害,造成中国每年平均经济损失达 246 亿元人民币,死亡 570 人^[1~3]。中国平均每年有 7 个热带气旋登陆,沿海各省(区、市)以及中国中部地区,均可能遭受热带气旋之灾。热带气旋登陆与西风系统相互作用造成的暴雨及其衍生灾害(山洪、泥石流、洪水)影响的范围往往比热带气旋本身大得多。例如 0604 号强热带风暴“碧利斯”在福建登陆后,一路西行,使湖南、广东、福建、江西、广西、浙江等 6 省(区)出现严重暴雨洪涝、山洪和山地灾害,有 2962.2 万人不同程度受灾,因灾死亡 637 人、失踪 210 人,直接经济损失达 348.3 亿元人民币。据联合国亚太经社理事会(Economic and Social Commission for Asia and the Pacific, ESCAP)台风委员会年度报告公布的资料,中国热带气旋造成的直接经济损失是日本的 7.3 倍、菲律宾的 10.2 倍、越南的 22.3 倍,造成的人员伤亡分别是上述 3 国的 42 倍、7.6 倍和 19.3 倍。2005 年中国热带气旋造成的总损失达 800 亿元人民币,成为中国第一大灾。

统计研究表明^[4],平均有 16% 的热带气旋移到中国近海突然加强,另有一些则移到近海突然减弱甚至消失;也有分析表明^[5],90% 以上的近海热带气旋都减弱,只有少数突然增强。中国近海总面积约 472.7 km²,包括中国渤海、黄海、东海、南海及台湾省以东的太平洋一隅^[6,7]。在中国近海地区,特别是距离海岸线 300~400 km 的区域,登陆前突然增强的热带气旋对中国影响大而又难以预报,往往造成十分严重的灾害。比如 8807 号台风,1988 年 8 月 7 日在浙江沿海,12 h 内由一个热带低压迅速加强为台风并很快登陆,由于对登陆台风的加强猝不及防,浙江省遭受了巨大灾难,仅杭州市的直接经济损失就达 4 亿元人民币,80% 的电力瘫痪,通信中断 3 d,西湖风景区遭到严重破坏。2005 年近海突然加强发展的台风“达维”是登陆海南省仅次于 7314 号台风的强台风,也是海南建省以来最强的台风,给海南省带来严重的风雨灾害,直接经济损失达 116.46 亿元人民币。2006 年近海突然增强的“桑美”是新中国成立以来登陆中国大陆最强的台风,是百年一遇的超强台风,比 2005 年淹没美国新奥尔良的著名强飓风“卡特里娜”还要强,具有中心气压特别低、风速特别大、降雨特别集中、发展迅速、移动快等特点,共造成 483 人死亡,直接经济损失达 196.5 亿元人民币。2008 年强台风“黑格比”在广东近海加强并维持,广东和广西两省区直接经济损失达 130 亿元人民币。2009 年,在中国近海加强的热带气旋多达 5 个。伍荣生^[8]认为强度是决定热带气旋潜在灾害影响力的重要因子,要准确判定热带气旋的路径,必须了解其强度变化的情况。所以,近海突然增强热带气旋的研究意义重大,正确预报热带气旋是我们的重任^[2]。中国中央气象台负责西北太平洋上热带气旋监测和预警^[9],负责制作和发布未来两天的热带气旋路径和强度预报,从 2001 年开始,热带气旋的路径和强度预报的时效延长到 3 d。

热带气旋研究和预报的焦点集中在路径和强度上,热带气旋强度预报比路径预报复杂得多^[10],主要体现在两个方面。第一,预报技术方面。过去几十年热带气旋路径预报取得较大进展,而强度预报技巧提高缓慢,路径预报比强度和风雨分布的预报遥遥领先,在业务预报中很难对近海活动的热带气旋强度变化给出确定的预报^[2,11~15]。美国国家飓风中心(NHC)有5%的飓风24 h强度预报误差超过20 m/s^[16],其中绝大多数是由于飓风的突然增强造成的。NHC对1990—2008年大西洋飓风强度预报的准确率没有实质性提高,提高热带气旋强度预报水平业已成为NHC面临的最大挑战之一^[17]。Mundell^[18]研究了美国关岛联合台风警报中心(JTWC)对西北太平洋热带气旋强度的预报误差,发现在经历突然增强热带气旋较多的年份里,强度预报误差偏大,年平均强度预报误差和当年的突然增强热带气旋强度有着直接的关系。第二,研究方面。热带气旋发生发展的研究始于20世纪30年代,但是没有一个学说能够解释一系列现象而不遇到困难或矛盾的^[19]。而近30年,热带气旋发生发展的理论研究进展较慢,基本上没有重大突破,研究仍主要集中在现象和一般规律的揭示方面,尚未对其物理机制的认识形成较完备的理论解释^[20]。

热带气旋发生在海洋上,由于观测资料不足及对其强度变化的物理机制缺乏认识,热带气旋强度预报是大气科学领域至今尚未解决的重要科学问题之一^[21]。除了海洋上观测缺乏、模式分辨率不高以及初始场存在误差等因素外,对控制热带气旋强度变化的物理因子和过程了解不够是根本原因。热带气旋强度突变机理研究是热带气旋研究领域的重点和难点。研究热带气旋强度突变的机理,尤其是近海热带气旋突然增强的机理,有助于提高热带气旋强度的预测能力。

1.2 热带气旋强度研究进展

1.2.1 热带气旋强度变化影响因子

陈联寿等^[1,22]的研究认为热带气旋强度变化与以下物理因子有关:水汽通量和潜热输送、急流、西风槽、中尺度环流系统的合并、地形作用、海面温度等。影响近海热带气旋强度变化的因子可以分为3类^[23~25]:环境场、热带气旋内部结构和海洋。

(1) 环境场影响

一般通过数值模拟和简化的理论来研究环境对热带气旋强度的影响,重点研究环境流场对垂直切变和高空流出气流的影响。而环境场垂直切变的影响机制,不同的研究方案有不同的见解。主要有通风流理论^[26]、二级环流效应^[27,28]、倾斜和稳定性作用^[29]和罗斯贝渗透理论^[30]等。一般认为环境垂直切变(Vertical Wind Shear, VWS)对热带气旋强度具有抑制作用。如果用850、200 hPa分别代表对流层低层和高层,可用低层和高层的纬向风速之差表示环境垂直切变。Martin等^[31]的研究表明,对于小值VWS(2或4 m/s),在初始调整后热带气旋强度与没有VWS时相似;VWS为6或8 m/s时,热带气旋不增强,也不减弱;VWS为10 m/s时,热带气旋显著减弱。Linda等^[32]在研究影响澳大利亚的热带气旋时发现,弱的VWS(2~4 m/s)是热带气旋突然增强的必要条件。美国国家航空和航天局(NASA)实施的科学试验项目CAMEX(Convection and Moisture Experiment)分析研究表明^[33,34],弱的VWS有利于热带气旋的发展,而较大的VWS(8~15 m/s)对热带气旋强度具有重要的抑制作用。Titley等^[16]在研究西北太平洋超强台风Flo(9019)的突然增强时发现,300~150 hPa环境风垂直切变的迅速减小有利于热带气旋垂直向上伸展,从而加速热带气旋的发展。Klein等^[35]

的研究表明,热带气旋外流型的变化是热带气旋发展、增强以及变性的重要判据。余晖等^[36]认为对流层上部环境流场与热带气旋外流的相互作用在中国近海热带气旋强度突变过程中可能起着至关重要的作用。寿绍文等^[37]认为台风爆发性发展时刻副热带高压(简称副高)、低空辐合和高层辐散均增强。雷小途等^[38]研究表明,环境风场对热带气旋涡度的正(负)平流会引起热带气旋的发展(减弱)。梁建茵等^[39]对近海加强的热带气旋“黄蜂”(2002)的诊断分析表明,“黄蜂”登陆前的发展与北方小股干冷空气从中层进入,影响了热带气旋内部的热力结构,其位势不稳定得到加强有关。胡春梅等^[40]研究表明,突然增强的热带气旋位于副高的南侧,低空辐合和高空辐散较强。Wu Liguang 等^[41]通过数值试验研究表明,由环境场导致的非对称结构不利于热带气旋的加强发展。John 等^[42]研究表明,环境对流有效位能(CAPE)对热带气旋最大可能强度影响不大。刘辉等^[43]研究了冷空气对热带气旋形成的影响,指出热带气旋外区存在温度梯度将有利于扰动的发展,内区存在温度梯度不利于扰动的发展。徐祥德等^[44]研究了热带气旋与中纬度冷锋的相互作用,认为较弱的冷空气有利于热带气旋加强。

(2) 热带气旋内部结构影响

内部动力影响因子包括涡旋罗斯贝波^[45~47]、螺旋雨带^[45,48~51]、中尺度涡旋^[46,52,53]等。Montgomery 等^[45,46]研究指出,湿对流强迫的涡旋罗斯贝波向外传播使得非对称的涡旋轴对称化,引起台风增强。余志豪^[54]全面阐述了对罗斯贝波的新理解,论述了涡旋罗斯贝波的流体力学机理;陆汉城等^[55,56]揭示了台风内中尺度螺旋雨带及嵌在其中的深对流带的结构和传播特征,分析了台风内中尺度混合波的流体力学特征,又通过数值试验分析了爆发性发展热带气旋的中尺度特征。Pfeffer^[57]和 Molinari 等^[58]研究认为低层的角动量输入和上层角动量的向外输出是热带气旋增强不可缺少的条件之一。Krishnamurtt 等^[21]研究认为,热带气旋中心附近的角动量决定着热带气旋的强度。Duan Yihong 等^[59]分析了 β 效应和均匀流对热带气旋强度的影响,认为 f 平面上热带气旋更易发展。余晖等^[60]和 Wu Guoxiong 等^[61]研究表明倾斜位涡发展是热带气旋突然增强的原因。Montgomery 等^[45,46]认为正位涡(PV)的异常获取能导致涡旋中心附近总位涡的增加,从而导致涡旋的增强。钮学新^[62]研究认为,在热带气旋发生发展过程中,起主要作用的波动是不稳定状态下的惯性重力波。Chen Lianshou 等^[63]的研究认为,热带气旋与另一个中尺度小涡(MSV)的合并可导致近海热带气旋突然加强。

(3) 海洋影响

海洋是影响热带气旋强度变化的基本因素。海洋作为大气的下垫面在热带气旋的发生发展过程中起着重要作用,来自海洋的感热和潜热释放是热带气旋发展的主要能量来源。海温的高低决定了热通量的传递,从而影响热带气旋强度。Holliday 等^[64]分析表明,高于 28°C 的海表面温度是西北太平洋热带气旋突然增强的必要条件。Kaplan 等^[65]分析表明,大西洋约92%突然增强的热带气旋出现在海表面温度高于 27°C 的洋面上;在海表面温度高于 29°C 的洋面上,热带气旋突然增强的概率是热带气旋不突然增强的4倍。Bender 等^[66]研究发现,在热带气旋经过的洋面上,由于热带气旋低气压和大风引起海水上翻,使洋面温度下降,制约了热带气旋的发展;较暖的海水会向热带气旋提供更多的潜热和感热,抑制海水上翻所引起的冷却作用来促使热带气旋的突然增强。Chan 等^[67]数值研究表明,热带气旋强度对海表面温度变化的响应几乎是同时的,但不是线性的;当海表面温度在 $27\sim 30^{\circ}\text{C}$ 时热带气旋增强最快。端义宏^[68]研究表明,海洋与大气的耦合效应对于热带气旋强度变化有较大影响;当海洋的温度水平梯度较大时可以导致热带气旋强度变化,这可能是由于非均匀的海洋温度作用使得热带

气旋产生了非对称结构,继而引起热带气旋强度的变化;海面之下海温层结对热带气旋的强度变化也有重要作用。

1.2.2 热带气旋强度变化非线性机理

热带气旋的非对称性是普遍存在的。这种非对称结构可能是热力因素造成的,也可能是动力因素造成的。过去,关于热带气旋非对称结构对强度变化影响的研究并不多,工作也不太完善,其影响的物理机制更是不明确,研究结论仍有争议。非绝热加热是大气运动及其变化的主要能源,热带气旋发展和维持的主要能源是非绝热加热,特别是潜热加热、海洋感热输送和辐射冷却^[69]。动力学在大气科学中一直处于主导地位^[70],耗散结构概念和理论推动了大气热力学的发展^[71]。热带气旋不断从周围环境中吸取能量以生存和发展,无疑是一种耗散结构,处于非热力平衡态,具有耗散结构特征。吴国雄等^[72]明确指出,在具有外热源和耗散的场合,必须引进热力学方程予以研究。限于资料和技术条件,过去对热带气旋增强过程中动力和热力结构特征演变的研究较少。

近海热带气旋在西移过程中,一方面受外界强迫、耗散和内部非线性的作用而发展和增强,另一方面这些作用又抑制热带气旋的发展。西太平洋热带气旋在向中国近海移动的过程中,其强度和路径发生着两种形式的变化:缓变和突变。突变是非线性动力系统的本质属性,是热带气旋强度突变的内在原因。非线性动力系统的理论和方法是研究自然界突变现象的有力工具^[73],它揭示出动力系统当控制参数变化到某些临界值时,系统发生从一个平衡态急剧跳到另一个平衡态的现象,即突变现象。杨大升等^[74]应用非线性理论研究了静力稳定度参数和加热对热带气旋发生发展的作用。刘式适等^[75]根据台风内部的大气层结和惯性稳定度讨论了台风发展的热力学和动力学条件。刘式达^[76]建立了非线性对流模型,分析了对流控制因子的作用,并说明这些因子的变化会产生分岔和突变现象。徐祥德^[77]采用非线性动力系统模型研究指出,热带气旋扰动异变现象不仅与对流加热、耗散因子有关,而且还与系统外界热量、动量的非线性平流,下垫面的感热、潜热输送结构有关。夏友龙等^[78]和郑祖光等^[79]应用非线性动力系统的理论和方法研究指出,非绝热加热是热带气旋强度突变的重要因子。

上述分析表明,影响热带气旋强度突变的因素和物理机制十分复杂。热带气旋外场科学试验可以获得热带气旋强度突变时的数据,外场试验—建立数据库—理论研究—提高业务预报能力是大气科学研究的一条行之有效的技术路线^[22]。为此,近年来联合国和世界各国政府非常重视近海热带气旋的预报准确率,开展了一系列有针对性的外场科学试验。美国 CBLAST(Coupled Boundary Layer Air-sea Transfer)外场试验对美国一系列的强飓风成功地作了加密观测,中国 CLATEX(China Landfalling Typhoon Experiment)外场试验对 0214 号热带气旋“黄蜂”进行了观测试验,首次探测了强风背景下登陆热带气旋的边界层结构。CAMEX 是美国 NASA 实施的科学试验项目^[33,80],近年来已经成为研究热带气旋的重要项目,尤其是在 CAMEX-3(1998 年)和 CAMEX-4(2001 年)以及 2005 年进行的“热带云系统和过程”试验(Tropical Cloud Systems and Processes, TCSP),更是将研究的重点放在热带气旋的生成、强度变化、降水及改进物理过程参数化和模式数据同化等关键问题上。

中国在“八·五”期间,曾将热带气旋强度突变列为一个专题来研究,取得了一定的研究成果^[4,78,79,81]。陈联寿等^[1]和王斌等^[82]分别总结了 20 世纪 90 年代热带气旋研究进展和热带气旋动力学研究进展;端义宏等^[23]总结了热带气旋强度变化的主要研究成果。2009 年度国家重点基础研究发展计划(973 计划)“台风登陆前后异常变化及机理研究”项目将“台风登陆前后

结构和强度突变机理研究”列为专题,研究近海海面和环境大气对近海台风强度突变的影响,揭示台风登陆前后强度突变的主要机理,系统认识台风登陆前后强度突变特征,主要分析海温层结、大陆架海岸地形及环境大气对台风强度突变的影响;诊断分析近海中尺度云团与登陆台风环流的相互作用。2007年美国启动了飓风预报改进10a计划HFIP(Hurricane Forecast Improvement Project),每年投资大约1700万美元,旨在改进和提高对飓风的预报水平,重点研究飓风强度突变机理,计划到2017年达到如下目标:1~5d的飓风路径预报误差和强度预报误差均减少至计划实施前预报误差的50%;对于飓风强度突变,在1d前发现的概率提高到90%、5d前发现的概率提高到60%;对于飓风强度突变1d预报的虚警率减少到10%、5d预报的虚警率减少到30%;将飓风预报时效延长到7d。

1.3 本书研究内容

综上所述,尽管近年来在热带气旋强度变化研究方面取得了一定的进展,仍然存在许多问题没有解决,研究结论仍然需要进一步在实际工作中验证。热带气旋强度突变研究是一个非常复杂而又非常重要的课题。对于一个实际的热带气旋,影响其强度变化各因子的相对作用是不确定的,其强度变化可能是多个因子影响的综合结果。因此,在研究热带气旋强度变化的复杂过程中,要着力寻找问题的主要矛盾,进一步了解影响热带气旋强度变化各因子的作用,了解近海热带气旋突然加强的机理。

为此,本书的主要内容为:应用中国气象局《台风年鉴》^[83]和《热带气旋年鉴》^[84]资料(因研究时2006年《热带气旋年鉴》尚未正式出版,2006年的热带气旋资料来源于中国台风网),分析西北太平洋热带气旋强度变化的气候特征,选取中国近海突然增强和突然减弱两组热带气旋,利用逐日4次的NCEP/NCAR再分析资料,采用合成分析方法分析热带气旋的结构和演变特征,分析非绝热加热效应对近海热带气旋突然增强的影响,揭示动力和热力因子影响机制,找出近海热带气旋突然增强的前兆性特征;选取中国近海突然增强的热带气旋作个例分析,利用中尺度数值模式设计控制试验和敏感性试验方案,模拟热带气旋突然增强过程,从定量和时间演变角度分析验证动力和热力影响因子的时空结构特征;应用突变理论和方法,从动能、加热和环境场等几个角度,分析影响热带气旋突变的物理因子和临界条件。

参考文献

- [1] 陈联寿,孟智勇. 2001. 我国热带气旋研究十年进展. 大气科学, **25**(3):420-432
- [2] 陈联寿. 2006. 热带气旋研究和业务预报技术的发展. 应用气象学报, **17**(6):672-681.
- [3] 周秀骥,吴国雄. 2004. 中国气象事业发展战略研究:重大科学技术问题卷. 北京:气象出版社,12-46.
- [4] 阎俊岳. 1996. 近海热带气旋迅速加强的气候特征. 应用气象学报, **7**(1):28-35.
- [5] 冯锦全,陈多. 1995. 中国近海热带气旋强度突变的气候特征分析. 热带气象学报, **11**(1):35-42.
- [6] 沈文周. 2006. 中国近海空间地理. 北京:海洋出版社,1-2.
- [7] 孙湘平. 2006. 中国近海区域海洋. 北京:海洋出版社,1-2.
- [8] 伍荣生. 2007. 台风研究中的一些科学问题. 南京大学学报(自然科学), **43**(6):567-571.
- [9] 矫梅燕,龚建东,周兵等. 2006. 天气预报的业务技术进展. 应用气象学报, **17**(5):594-601.
- [10] Daniel J S, Shay L K. 2003. The role of oceanic mesoscale features on the tropical cyclone-induced mixed layer response: A case study. *J. Phys. Oceanography*, **33**:649-676.

- [11] James S G, Carles R S. 2004. A history of western North Pacific tropical cyclone track forecast skill. *Wea. Foreca.*, **19**:633-638.
- [12] Mark D, John K. 1999. An updated Statistical Hurricane Intensity Prediction Scheme (SHIPS) for the Atlantic and Eastern North Pacific Basins. *Wea. Foreca.*, **14**:326-337.
- [13] Emanuel K A. 1999. Thermodynamic control of hurricane intensity. *Nature*, 1999, **401**:665-669.
- [14] Knaff J A. 2006. Operational guidance and skill in forecast structure change. Sixth WMO International Workshop on Tropical Cyclones (IWTC-VI), San Jose, Costa Rica, 21-30 November. 160-184.
- [15] 韩珏靖, 白莉娜, 王栋等. 2007. 从《Science》和《Nature》看关于台风研究的热点问题. 南京大学学报(自然科学), **43**(6):681-694.
- [16] Titley D W, Elsberry L. 2000. Large intensity changes in tropical cyclones: A case study of super-typhoon Flo during TCM-90. *Mon. Wea. Rev.*, **128**:3556-3573.
- [17] Rappaport E N, Franklin J L, Avila L A, *et al.* 2009. Advances and challenges at the National Hurricane Center. *Wea. Foreca.*, **24**:395-419.
- [18] Mundell D B. Prediction of tropical cyclone rapid intensification events. //AFIT/CI/CIA-90-104, M. S. thesis. Colorado State Univ., Fort Collins, CO., 206pp.
- [19] 李宪之. 1956. 台风生成的综合学说. 气象学报, **27**(2):87-100.
- [20] 钮学新. 2008. 台风发生发展和变性研究的进展. 浙江气象, **29**(1):7-10.
- [21] Krishnamurtt T N, Pattnaik S, Stefanova L, *et al.* 2005. The hurricane intensity issue. *Mon. Wea. Rev.*, **133**:1886-1911.
- [22] 陈联寿, 徐祥德, 罗哲贤等. 2002. 热带气旋动力学引论. 北京:气象出版社.
- [23] 端义宏, 余晖, 伍荣生. 2005. 热带气旋强度变化研究进展. 气象学报, **63**(5):636-645.
- [24] Alexander L, Michael L B. 2008. Structural and intensity changes of hurricane Bret (1999). Part I: Environmental influences. *Mon. Wea. Rev.*, **136**:4320-4333.
- [25] John K, Mark D, John A K. 2010. A revised tropical cyclone rapid intensification index for the Atlantic and eastern North Pacific Basins. *Wea. Foreca.*, **25**:220-241.
- [26] Gray W M. 1968. Global view of origin of tropical disturbances and storms. *Mon. Wea. Rev.*, **96**:669-700.
- [27] Bender M A. 1997. The effect of relative flow in the asymmetric structure in the interior of hurricanes. *J. Atmos. Sci.*, **54**:703-724.
- [28] Tuleya R E, Kurihara Y. 1981. A numerical study of the effect of environmental flow on tropical storm genesis. *Mon. Wea. Rev.*, **109**:2487-2506.
- [29] DeMaria M. 1996. The effect of vertical shear on tropical cyclone intensity change. *J. Atmos. Sci.*, **53**:2076-2087.
- [30] Jones S C. 1995. The evolution of vortices in vertical shear. Part I: Initially barotropic vortices. *Quart. J. Roy. Meteor. So.*, **121**:821-851.
- [31] Martin L M, Johnny C L. 2004. Tropical cyclone intensity in vertical wind shear. *J. Atmos. Sci.*, **61**:1859-1876.
- [32] Linda A P, Barry N H, Noel E D, *et al.* 2005. Influence of environmental vertical wind shear on the intensity of hurricane-strength tropical cyclones in the Australian region. *Mon. Wea. Rev.*, **133**:3644-3660.
- [33] Wu Liguang, Scott A B, Halverson J, *et al.* 2006. A numerical study of hurricane Erin (2001). Part I: model verification and storm evolution. *J. Atmos. Sci.*, **63**(1):65-86.
- [34] Heymsfield G M, Halverson J, Ritchie E, *et al.* 2006. Structure of highly sheared tropical storm

- Chantal during CAMEX-4. *J. Atmos. Sci.*, **63**(1):268-287.
- [35] Klein P M, Harr P A, Elsberry R L. 2002. Extratropical transition of western North Pacific tropical cyclones, Midlatitude contributions to intensification//25th Conference on Hurricane and Tropical Meteorology (Preprint). 541-542.
- [36] 余晖,费亮,端义宏. 2002. 8807 和 0008 登陆前的大尺度环境特征与强度变化. *气象学报*, **60**(增刊): 78-87.
- [37] 寿绍文,姚秀萍. 1995. 爆发性发展台风合成环境场的诊断分析. *大气科学*, **19**(4):487-493.
- [38] 雷小途,陈联寿. 2001. 大尺度环境场对热带气旋影响的动力分析. *气象学报*, **59**(4):429-439.
- [39] 梁建茵,陈子通,万齐林等. 2003. 热带气旋“黄蜂”登陆过程诊断分析. *热带气象学报*, **19**(增刊): 45-55.
- [40] 胡春梅,端义宏,余晖等. 2005. 华南地区热带气旋登陆前强度突变的大尺度环境诊断分析. *热带气象学报*, **21**(4):377-382.
- [41] Wu Liguang, Scott A B. 2004. Effects of environmentally induced asymmetries on hurricane intensity: A numerical study. *J. Atmos. Sci.*, **61**:3065-3081.
- [42] John P, Montgomery M T. 2005. Is environmental CAPE important in the determination of maximum possible hurricane intensity. *J. Atmos. Sci.*, **62**:542-550.
- [43] 刘辉,董克勤. 1987. 环境温度场对台风等扰动发展和移动的影响. *气象学报*, **45**(2):188-194.
- [44] 徐祥德,陈联寿,解以扬等. 1998. 环境大尺度锋面系统与变性台风结构特征及其暴雨的形成. *大气科学*, **22**(5):744-752.
- [45] Montgomery M T, Kallenbach R J. 1997. A theory for vortex Rossby waves and its application to spiral bands and intensity changes in hurricanes. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **123**:435-465.
- [46] Montgomery M T, Enagonio J. 1998. Tropical cyclogenesis via convectively forced vortex Rossby waves in a three-dimensional quasigeostrophic model. *J. Atmos. Sci.*, **55**:3176-3207.
- [47] Wang Y. 2002. Vortex Rossby waves in a numerically simulated tropical cyclone. Part I: Overall structure, potential vorticity and kinetic energy budgets. *J. Atmos. Sci.*, **59**:1213-1238.
- [48] 伍荣生,余志豪等. 1983. *动力气象学*. 上海:上海科技出版社.
- [49] 钮学新. 1992. *热带气旋动力学*. 北京:气象出版社.
- [50] Reasor P D, Montgomery M T, Marks Jr F D, *et al.* 1981. Low-wavenumber structure and evolution of the hurricane inner core observed by airborne dual-Doppler radar. *Mon. Wea. Rev.*, **109**: 2487-2506.
- [51] May P T, Holland G J. 1999. The role of spiral rain bands in tropical cyclones. *J. Atmos. Sci.*, **56**: 1224-1228.
- [52] 罗哲贤. 2003. 台风轴对称环流和非轴对称扰动非线性相互作用的研究. *中国科学(D)*, **33**(7): 686-694.
- [53] Schubert W H, Montgomery M T, Taft R K, *et al.* 1999. Polygonal eyewalls, and asymmetries eye contraction, and potential vorticity mixing in hurricanes. *J. Atmos. Sci.*, **56**:1197-1223.
- [54] 余志豪. 2002. 台风螺旋雨带——涡旋 Rossby 波. *气象学报*, **60**(4):502-507.
- [55] 陆汉城,康建伟,寇正等. 2004. 台风内中尺度混合波的动力学特征. *自然科学进展*, **14**(5):541-546.
- [56] 陆汉城,钟科,张大林. 2001. 1992 年 Andrew 飓风中的中尺度特征. *大气科学*, **25**(6):827-836.
- [57] Pfeffer R L. 1958. Concerning the mechanics of hurricanes. *J. Meteor.*, **15**:113-120.
- [58] Molinari J, Vollaro D. 1989. External influences on hurricane intensity. Part I: Outflow layer eddy angular momentum fluxes. *J. Atmos. Sci.*, **15**:1093-1105.
- [59] Duan Yihong, Wu Rongsheng, Yu hui, *et al.* 2004. The role of β -effect and a uniform current on tropical

- cyclone intensity. *Adv. Atmos. Sci.*, **21**(1):75-86.
- [60] 余晖, 吴国雄. 2001. 湿斜压性与热带气旋强度突变. *气象学报*, **59**(4):440-449.
- [61] Wu G X, Liu H Z. 1997. Vertical vorticity development owing to down-sliding at slantwise isentropic surface. *Dyn. Atmos. Oceans*, **27**:715-743.
- [62] 钮学新. 1991. 不稳定状态下惯性重力波对台风发生发展和移动的作用. *海洋学报*, **13**(3):325-332.
- [63] Chen Lianshou, Luo Zhexian. 2004. Interaction of typhoon and mesoscale vortex. *Adv. Atmos. Sci.*, **21**(4):515-528.
- [64] Holliday C R, Aylmer H/Thompson. 1979. Climatological characteristics of rapidly intensifying typhoon. *Mon. Wea. Rev.*, **107**:1022-1034.
- [65] Kaplan, John, DeMaria, *et al.* 2003. Large-scale characteristics of rapidly intensifying tropical cyclones in the North Atlantic Basin. *Weat. Foreca.*, **18**:1093-1108.
- [66] Bender M A, Ginis I. 2000. Real-case simulations of hurricane-ocean interaction using a high-resolution coupled model: Effects on hurricane intensity. *Mon. Wea. Rev.*, **128**:917-946.
- [67] Chan J C L, Duan Y H, Shay L K. 2001. Tropical cyclone intensity change from a simple ocean-atmosphere coupled model. *J. Atmos. Sci.*, **58**:154-172.
- [68] 端义宏. 2004. 海洋及环境流场对热带气旋强度变化的影响研究(博士论文). 南京: 南京大学.
- [69] Anthes R A. 1982. Tropical cyclones: Their evolution, structure and effects. *Amer. Meteo. Soc.*, **19**(41).
- [70] 伍荣生. 1990. 大气动力学. 北京: 气象出版社.
- [71] 曹鸿兴. 2005. 大气热力学的若干新进展. *应用气象学报*, **16**(4):554-560.
- [72] 吴国雄, 刘屹岷. 2000. 热力适应、过流、频散和副高 I: 热力适应和过流. *大气科学*, **24**(4):433-446.
- [73] 丑纪范, 刘式达, 刘式适. 1994. 非线性动力学. 北京: 气象出版社, 27-54.
- [74] 杨大升, 丁敏芳. 1985. 台风发生的非线性动力机制//台风会议文集(1985). 北京: 气象出版社, 231-243.
- [75] 刘式适, 倪秉健. 1983. 惯性稳定度、层结稳定度对台风发展的影响//台风会议文集(1983). 上海: 上海科学技术出版社, 13-22.
- [76] 刘式达, 刘式适. 1984. 大气中对流的分岔和突变模型. *力学学报*, **16**(1):10-18.
- [77] 徐祥德. 1991. 轴对称涡旋非线性运动平衡态失稳和突变现象影响因子的研究. *大气科学*, **15**(2):63-72.
- [78] 夏友龙, 郑祖光. 1995. 台风内核与外围加热对其强度突变的影响. *气象学报*, **53**(4):424-430.
- [79] 郑祖光, 夏友龙. 1996. 台风内核与外围的强度突变. *气象学报*, **54**(3):294-302.
- [80] Ramesh Kakar, Michael Goodman, Robbie Hood, *et al.* 2006. Overview of the Convection and Moisture Experiments (CAMEX). *J. Atmos. Sci.*, **63**(1):5-18.
- [81] 吴达铭. 1997. 西北太平洋热带气旋强度变化的分布特征. *大气科学*, **21**(2):192-198.
- [82] 王斌, Russel L Elsberry, 王玉清等. 1998. 热带气旋运动的动力学研究进展. *大气科学*, **22**(4):535-547.
- [83] 中国气象局. 1950-1991. 台风年鉴(1949—1990). 北京: 气象出版社.
- [84] 中国气象局. 1992-2007. 热带气旋年鉴(1991—2005). 北京: 气象出版社.