

张 铭 黄 泓 张立凤 著

大气波谱分析 及其不稳定性

第三卷 热带气旋中的扰动



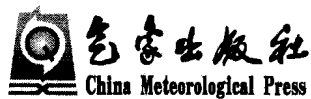
气象出版社
China Meteorological Press

大气波谱分析及其不稳定性

第三卷

热带气旋中的扰动

张 铭 黄 泓 张立凤 著



内 容 简 介

《大气波谱分析及其不稳定性》(第三卷)利用作者的正压无辐散模型、两层正压无辐散模型、正压模型、两层正压模型、准二维斜压模型和非绝热情形下的正压模型以及美国迈阿密大学 David S Nolan 教授开发的三维斜压模型对热带气旋中的扰动作了理论研究和波谱分析,讨论了基流失稳的条件和不稳定扰动的性质。研究发现,热带气旋中的扰动由两部分组成,一部分是传播的中性、发展或衰减的标准模波动(离散谱),另一部分则是相当于连续谱波包的瞬变扰动。在典型基流下有重力惯性波和涡旋 Rossby 波连续谱区的重叠,此时螺旋波的不稳定是涡旋 Rossby 重力惯性混合波的不稳定;其在径向的某些区间体现了准平衡涡旋 Rossby 波的性质,而在另一些区间又体现了重力惯性波的性质。本卷书可供从事热带气旋研究的学者参考,也可作该方面的研究生教材。

图书在版编目(CIP)数据

大气波谱分析及其不稳定性. 第3卷/张铭,黄泓,张立凤著. —北京:
气象出版社,2009.12
ISBN 978-7-5029-4916-7

I. 大… II. ①张…②黄…③张… III. ①大气运动学-波谱分析
IV. ①P433

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 241192 号

大气波谱分析及其不稳定性(第三卷)

Daqi Bopu Fenxi Jiqi Bu Wendingxing(Disanjuan)

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://www.cmp.cma.gov.cn>

责任编辑:王萃萃 李太宇

封面设计:王 伟

印 刷:北京中新伟业印刷有限公司

开 本:787 mm×1092 mm 1/16

字 数:403 千字

版 次:2010 年 1 月第 1 版

印 数:1~2000

邮政编码:100081

发 行 部:010-68409198

E-mail: qxcbs@263.net

终 审:黄润恒

责任技编:吴庭芳

印 张:15.75

印 次:2010 年 1 月第 1 次印刷

定 价:40.00 元

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等,请与本社发行部联系调换。

序

张铭教授一面精心教学,上堂讲课和指导研究生;一面潜心于相关的科学研究工作,二者相得益彰。教学所碰到的问题正是科学研究的重要对象,而深入研究所得的结果又正好解前人未解之困惑,使教学上升到一个新的高度。张铭教授淡薄名利,专注于此,兢兢业业,辛勤耕耘近40年,颇能有所发现,有所发明,促使学科发展前进,收获颇丰;也使满园桃李郁秀芳纷,张铭教授可谓得教学与科研结合之道者。

今他将近30年来科研成果,写成数卷本的专著《大气波谱分析及其不稳定性》出示给我,要我为此写一“短序”,其词诚诚恳恳。我和张教授相知有年,合作有年,彼此坦诚相见,切磋砥砺,相互规勉,相互帮助,可谓同志,可谓知心。要为其专著写“序”,于友谊于学问,义不容辞。但若要“序”写得“短”,我就没有那个水平了。因为好序的确要短,要十分精当,要一语中的,把书中最精彩、最精辟的独到之处昭然揭出,让读者在未读该书之前,就已初步领会该书的轮廓形象和深奥的内藏所在,于是深入书中,探取其珠玑,得读书的乐趣,又得获宝的喜悦。既然我今做不到写“短序”,就只好将对张铭教授这些研究工作之所知,以及粗读这本卷浩章多目细的专著的心得,写上几段,一则向张教授交卷,二则和读者作交流。如果张教授接受,读者们也认为有所启发或共鸣,那么我写的如下的几段文字也就多少可以起到“序”的一些作用,尽管非“短”,也就不至于有污张教授数十年心血所成之书,亦不至于误导读者,我就安心了。

张铭教授这本卷浩章多的专著主要是精微研究大气动力学中的两个基础性也是经典性的问题,一是大气运动的分类,一是基流的失稳(不稳定)和扰动的发展问题。因为这两个问题是基础性的,大学和研究生教材中都有所阐述,但都只局限于十分简单的特殊和理想的情况,而且论述大都是不严格的,如不加以引导,要想推广到稍微复杂些和现实些的情况中去,就可能会令人困惑或出错误。有鉴于此,本专著采取的是由简单情况到复杂情况,层层解析,使问题的复杂性逐个显露,但又是采用严谨的方法,以免人们产生错误的理解。头绪虽繁(那是由问题的实有特性而非人为故意做作所致的),但可使人领会方法之妙而得到正确的结论。

先就大气运动的分类说起。取最简单的静止无基流、稳定层结且层结参数为常数的情况,先忽略地球的球形即取平面地面近似,此时大气可分为声波、重力惯

性波和纯涡旋(无辐散)运动。教本中用的就是经典的“波谱分析”或曰“频谱分析”方法。除物理诠释外,声波和重力惯性波是传播的,前者最快,后者要慢些,而纯涡旋运动是常定即不随时间而变的。但当基流不为零,尤其是沿垂直方向(姑且不考虑水平方向)基流不为常数时,情况就要复杂得多,严格的方法是求与相应的线性化方程组(或曰算子)的谱(spectrum)和谱函数(spectral function),或不严格地说就是特征值和特征函数。将此法应用到上面已讲过的最简单的情况中去,不妨将解先沿空间坐标展为福氏级数或福氏积分,其“波数”用 (m, n, k) 表示,于是对每一组 (m, n, k) 有五个特征值(严格地说是五支谱),其中一对绝对值最大,各对应于向正反两方向传播的声波;另一对绝对值较小,对应于传速较声波为慢的重力惯性波;此外,还有一个孤立的特征值为零,这就是不传播的纯涡旋运动。和各个频谱对应的谱函数就描述了各该类运动的空间结构。要注意,所有可能的小扰动应该由所有这些谱函数的全体所表达,或曰可以按其展开。由此可知,它们至少要满足大气运动的上下边界条件。假定大气上界在无穷远高度处,那里空气密度趋向于零,且整气柱的总能量是有界的。这就使得在垂直方向具有类于波状结构的所谓单频“内波”是不可能存在的,是没有意义的。“内波”只可能以沿 k 作福氏积分的形式表达,因而在大气中最多只可能看到明显局限于局部地区的内波波包,它由集中于某个 k 的邻域的波谱积分所成。这也说明在本问题中相应的谱点不是分立的,而是连续变化的,即有“连续谱”(continuous spectrum)。不过,除了为零的那个特征值外,确实还有一支分立的谱点(discrete spectra),相应的谱函数又称为“模”(mode),在 (m, n) 固定情况下,就只有一个孤立的谱点,这就是所谓的“表面波”,对应的谱函数在垂直方向上不具有波动的形态特征而是单调变化的。在稳定度参数随高度变化时,也可能存在多个分立谱点,有数种“表面波”,其中有些垂直结构复杂,但不具有沿垂直方向传播的性质。

下面转到具有基流,尤其是基流具有切变甚至非线性廓线或复杂的等值面的情况。此时,即使假定大气有有限的厚度,而由于对应的线性化方程有奇异点,使得该问题一般都存在连续谱。当取大气为无限高,尤其是再取基流随水平和垂直方向同时有变化时,情况就更为复杂,此时分立谱和连续谱不但共存,而且甚至可以相混,即分立的离散谱可以进入连续谱区,更不用说原来在简单理想情况下明显可以分辨出几支离散谱点,在此时也可以相互接近,即不能简单地分为某几种波,而存在一些所谓的“混合型波”。涡旋也不再是纯粹而且常定的,而有一些分立的谱点和一支连续谱,由于它们的传速与基流同量级,不同于声波和重力惯性波有在量级上比基流大得多的传速,所以又称为慢波或涡旋波,而称后者为“快波”。对于所有这些情况,张教授的此专著中都逐一加以研究,讲得清清楚楚,读者既可以品味其复杂性,也可以品味出层次分明的阐述。此外,还需指出,在计及

地球的球形时,哪怕是只考虑科氏参数随纬度的变化时,就除带状环流而外,不再有常定的纯涡旋运动。即使在无基流情况下,它已演化为沿纬圈传播的惯性波,即所谓 Rossby 波或 Rossby-Haurwitz 波。还有,即使在无基流情况下,若大气的垂直层结是不稳定的,那就不存在重力惯性波,而代之为“干对流”,其中一种是随时间增长的,另一是随时间衰减的。但是在现实的大气中,不可能是全大气柱都是不稳定的层结,局部的对流虽可在不稳定层结的层次上发生,但它必定激发出不稳定层结以外的大气而产生波动,因而这类大气中的运动也必然是“混合型”的。张铭教授的专著也触及此类运动的特殊情况,并简单地计入湿空气上升的凝结加热作用,即所谓 Wave-CISK(第二类条件不稳定下的波动)。也许对具有不同层次位置 and 不同厚度的层结不稳定的大气情况下的运动形态还可以多做点研究,以便了解这类混合型运动的结构和演变行为以及影响它们的因子。

张教授此专著以更大精力研究基流的失稳和小扰动的发展问题。这既是基础性问题,又最具有在天气预报中应用的实际意义。欲判定基流是否可能在小扰动作用下失稳,现今大多应用构造广义的李亚普诺夫函数的方法,即寻求与动力学方程组对应的一个泛函(包含有运动变量自身的定积分),对它作变分运算,就可以得到一个含有小扰动各分量的一个二次型。如果此二次型是正定的,则基本态(包括基流及层结等因素)必定是对小扰动为稳定的,由此得到基态为稳定的充分性判据;如果此二次型是不定的,就有可能是不稳定的,由此得到基态为不稳定的必要性判据。取不同的大气基态,可以得到“正压不稳定”,“斜压不稳定”,“对流不稳定”,“对称不稳定”,“Wave-CISK 及第二类条件不稳定”和“非地转不稳定”等的必要条件。可是,要找到不稳定扰动的结构,却常常要用到经典的方法,即上述的波谱分解方法,求相应线性化方程所对应的算子的谱和谱函数。如果有一对虚部不为零的复数谱点,则其中一个是不稳定型发展(即随时间而增强)的扰动,另一个为随时间衰减的扰动。在张教授此专著中,对于各类不稳定,其条件,其相应的谱和谱函数,不稳定谱点的数值范围,以及谱函数的结构等,都有较详细的逐一剖析。除谱函数外,书中又用到了波包近似表示法。值得指出的是,在经典的研究中,大都只分析了与分立谱点对应的扰动,即所谓“发展模”和“衰减模”,只有很个别的情况(如斜压不稳定)才稍微涉及连续谱;而且大都只强调“发展模”,而不关心“衰减模”。其实,不稳定问题的研究本来是从天气系统演变的预报中抽象出来的,而对于此,天气系统的快速增强(“发展模”)和快速衰减或消亡(“衰减模”)都同等重要,更不用说基流和扰动的相互作用问题了。50、60 年前,由于理论研究结果尚不丰富,数值预报的模式也尚是以正压模式为主,常有天气预报说强寒潮要到来,第二天又不得不更正,说寒潮拐弯去了。事后分析,其所以误报是由于与那些寒潮相对应的扰动在垂直方向上具有斜压发展模结构,而在水平方向却

具有正压衰减模的结构。这些,即使求出了相应的“模”,也未必就能判定,因为它太复杂了。而实际上,高空的槽脊,无论是发展与衰减,大多是有上述结构的。只有极个别的是同时具有正压和斜压都发展的结构,那肯定是快速发展的;或者同时具有正压和斜压都衰减的结构,那肯定是快速衰减的。由此可以看出,不管基流是否为稳定的,也不管扰动的类别,只要分析所注意的局地扰动是否从基流中获得或向基流反馈能量,以及其量的多少,就可判定扰动是否发展和其演变的快慢来,这又常被称为“初始发展”(initial development)。由此可见波包表示法十分有用,这也进一步说明连续谱不能不重视。

张教授的研究本意集中在中尺度天气系统的演变问题,以便指导中尺度天气的分析诊断和预报。随着研究的深入,他不得不回到上述的两个基础性问题,以便廓清问题,解消困惑。于是发现在现实的大气中,具有难以预报的中尺度系统多半与混合型不稳定和混合型波(谱函数)有关,所以他对于混合型问题给了特别的关注。

在电子计算机发展到超海量和超高速的今天,似乎信息的处理和数值天气预报方法无所不能,计算解决一切。但读者自己也有时会困惑,那些基础性的理论研究往往要花九牛二虎之力,又往往不能直接应用于预报中,是否太学究式了?是否还值得?其实不然,天气预报技巧的提高需要数值预报模式和技术的进一步发展,需要对天气演变过程的规律性认识进一步提高。它们都需要相应的基础理论研究的发展。直到今天,我们仍不得不承认,大气动力学仍处在欠发达的阶段,有大量未解决的问题,等待着有志于此的学者潜心钻研。只要下决心,花精力,钻进去,就会豁然开朗,有所发现,有所发明,有所前进。张铭教授及其专著就是很好的启迪。

曾庆存^{*}

2008年夏

* 曾庆存,中国科学院院士。

自序

关于波谱分析及其计算方法的研究,早在 30 年前我在中国科学院大气物理研究所攻读硕士学位时,在恩师曾庆存院士的指导下,就开展过这方面的工作。硕士毕业后我到原空军气象学院(现解放军理工大学气象学院)任教,我和我的学生张立凤继续在该方面开展研究,并时断时续,一直延续至今。我们的主要研究工作集中在二维旋转层结大气的波谱分析(本书第一卷)、热带气旋尺度涡旋中扰动的波谱分析(本书第三卷)和球面大气上扰动的波谱分析(本书第二卷)三个方面,本书第四卷则给出了有关的应用。前两个方面主要研究的是中尺度的问题。早在 1979 年,曾庆存院士在其专著《数值天气预报的数学物理基础》中就明确指出:我们常见到的处于稳定状态的成熟阶段的中尺度系统,除了小槽小脊之外,确实是水平方向准一维的或者流形较对称的。前者例如有飑线等,后者如引起局地暴风雨的某些中尺度涡旋,甚至台风也是如此。后一个方面我们则用波谱分析方法研究了季风问题。

对于无基本气流或基本气流为常数的情况,在线性化的假定下,大家对这方面的问题均很熟悉,毋庸赘述。然而,当存在基本气流切变时,问题变得复杂,此时可有连续谱出现并可有非平衡不稳定发生。本书对这些问题作了探讨并给出了研究成果。

本书中的研究工作得到了自然科学基金“大气运动方程组谱点及谱函数的研究”(编号 49875008)和“ β 中系统的波谱研究及其在灾害性天气预报中的应用”(编号 40575023)的资助,在此向国家自然科学基金委员会地学部表示衷心感谢。本书的出版得到了我院领导和气象出版社的重视和支持,这里也向他们表示深深的谢意。这里还要感谢所有帮助和鼓励过我的气象界的同事和朋友们。最后,要感谢做过气象员的我的妻子李雪兰,没有她工作上对我的支持和生活上对我的照顾,本书是难以完成的。



2008 年 6 月 19 日

* 张铭,解放军理工大学气象学院教授。

本卷书说明

《大气波谱分析及其不稳定性》(第三卷)终于完成了,本卷书对热带气旋中的扰动,即螺旋带作了波谱分析,探讨了其动力学性质,发现热带气旋中内、外螺旋带不稳定的性质是涡旋 Rossby-重力惯性混合波。

这里要说明的是,由于原定要出的第四卷中的部分内容已收入第二卷和已有论文发表等原因,该卷书就不再出版了。本卷书的研究工作除得到自序中所列的国家自然科学基金的资助外,还得到了国家自然科学基金青年基金项目《热带气旋螺旋带波动性质的研究》(项目批准号:40905021)和中国气象局上海台风研究所台风研究基金课题《螺旋云(雨)带的形成机制及其与台风强度变化的关系的研究》(课题编号:2008ST06)的资助。这里向国家基金委地学部、中国气象局上海台风研究所、气象出版社、解放军理工大学气象学院领导以及所有帮助鼓励过我的气象界的同事朋友们表示衷心感谢。

最后还要感谢恩师曾庆存院士为本专著作序,并希望广大读者能认真阅读,序中曾先生精辟的思想值得大家好好体会和重视。

张 铭

2010 年 1 月 24 日

目 录

序

自序

本卷书说明

第 1 章 导言	(1)
1.1 热带气旋螺旋带的观测研究现状	(2)
1.2 热带气旋螺旋带的成因研究进展	(4)
1.2.1 重力惯性波理论	(4)
1.2.2 边界层非对称理论	(5)
1.2.3 涡旋 Rossby 波理论	(5)
1.3 热带气旋动力学研究方法回顾	(8)
1.3.1 常用方法介绍	(8)
1.3.2 波谱研究现状回顾	(9)
1.4 本卷书研究的目的和内容	(11)
第 2 章 正压无辐散涡旋模型	(12)
2.1 正压无辐散涡旋模型理论分析	(12)
2.1.1 引言	(12)
2.1.2 数学模型	(13)
2.1.3 广义能量方程推导	(15)
2.1.4 模型中的不稳定	(15)
2.1.5 半圆定理	(17)
2.2 波谱分析	(24)
2.2.1 波谱理论分析	(24)
2.2.2 波谱数值计算方案	(24)
2.2.3 基本气流的定义	(25)
2.3 计算结果及讨论	(28)
2.3.1 不稳定的性质及其与环境场的关系	(28)
2.3.2 不稳定扰动的结构与传播	(30)
2.3.3 连续谱和离散谱的区分及结构	(34)
2.4 本章小结	(37)
附录	(49)
第 3 章 两层正压无辐散涡旋模型	(51)
3.1 两层正压无辐散涡旋模型的理论分析	(51)
3.1.1 数学模型	(51)

3.1.2 广义能量方程推导	(54)
3.2 波谱分析	(54)
3.2.1 波谱理论分析	(54)
3.2.2 波谱数值计算方案	(55)
3.3 波谱计算结果及讨论	(56)
3.3.1 不稳定的性质及其与环境场的关系	(56)
3.3.2 谱点及谱函数分析	(62)
3.4 本章小结	(64)
第4章 正压原始方程涡旋模型	(67)
4.1 正压原始方程涡旋模型的理论分析	(67)
4.1.1 数学模型	(67)
4.1.2 广义能量方程推导	(68)
4.1.3 模型中的不稳定	(69)
4.2 波谱分析	(69)
4.2.1 波谱的理论分析	(69)
4.2.2 数值计算方案	(70)
4.3 不稳定扰动的结构及其与环境场的关系	(71)
4.3.1 基流失稳的判断以及与环境参数的关系	(71)
4.3.2 廓线 A 和廓线 B 不稳定扰动的结构分析	(72)
4.4 连续谱和离散谱的区分及结构分析	(78)
4.5 波谱分析数值解的检验	(122)
4.5.1 数学模型和数值计算方法	(123)
4.5.2 基流趋于零时的解析解	(124)
4.5.3 与数值解的比较	(125)
4.6 本章小结	(126)
附录	(129)
第5章 两层正压涡旋模型	(132)
5.1 两层正压涡旋模型的理论分析	(132)
5.1.1 数学模型	(132)
5.1.2 广义能量方程的推导	(133)
5.1.3 模型中的不稳定和讨论	(133)
5.2 波谱分析的数值计算模型	(134)
5.3 计算结果及讨论	(134)
5.3.1 不稳定扰动的性质探讨	(135)
5.3.2 不稳定扰动与环境场的关系	(144)
5.4 波谱分析	(148)
5.5 本章小结	(157)
附录 上下层均为原有基流时连续谱的区分	(166)

第 6 章 非绝热正压原始方程涡旋模型	(167)
6.1 数学模型	(167)
6.2 波谱分析的计算方案	(169)
6.3 讨论	(170)
6.4 计算结果分析	(170)
6.5 本章小结	(173)
第 7 章 基流垂直切变对螺旋波不稳定的影响	(174)
7.1 问题的提出和解决方案	(174)
7.1.1 问题提出	(174)
7.1.2 解决方案	(174)
7.2 数学模型及求解简介	(176)
7.3 不稳定增长率	(178)
7.3.1 增长率随半径的变化	(178)
7.3.2 Richardson 数的影响	(180)
7.4 本章小结	(181)
第 8 章 斜压涡旋模型	(182)
8.1 斜压涡旋中扰动分析和计算	(182)
8.1.1 数学模型介绍	(182)
8.1.2 基本气流的定义	(184)
8.2 正压基流中三维扰动的半圆定理	(185)
8.2.1 数学模型	(185)
8.2.2 $N^2 \geq 0$ 时半圆定理的推导	(190)
8.2.3 $N^2 < 0$ 时半圆定理的推导	(193)
8.2.4 不稳定增长率的确定	(194)
8.3 三维不稳定扰动的结构及性质分析	(197)
8.3.1 正压基流中三维不稳定扰动的结构特征	(197)
8.3.2 斜压情况下三条风廓线不稳定扰动的比较	(201)
8.3.3 有耗散情况下廓线 A 不稳定扰动的结构及性质分析	(215)
8.4 热力扰动的演变	(221)
8.5 本章小结	(224)
附录 I	(225)
附录 II	(227)
第 9 章 总结	(229)
9.1 本卷书主要结论	(229)
9.2 本卷书创新之处	(231)
参考文献	(233)

第1章 导 言

热带气旋是发生在热带海洋上的一种具有暖心结构的强烈气旋性涡旋,总是伴有狂风暴雨,常常给受影响的地区造成严重的灾害。在我国和东亚地区,这种强热带气旋被称为台风,在大西洋地区,被称为飓风,而在印度洋地区,则被称为热带风暴。

我国是全世界少数几个受台风影响最严重的国家之一^[1]。台风登陆十分频繁,平均每年我国登陆台风7~8个,是世界上台风登陆最多、灾害最重的国家。登陆台风除带来洪涝灾害以外,还带来严重的风灾和暴潮灾害。20世纪90年代有四个著名台风均对我国造成了重灾。9417号台风(Fred)引发了特大风暴潮,潮位打破历史最高记录;强台风Herb(9608号台风)在大陆上维持不消,袭击了福建、浙江、江西、湖南、河南、河北、山西、北京、天津等许多地区;9615号强台风(Sally)主要是风灾,它于1996年9月9日在广东吴州—湛江登陆时的极大风速竟超过60 m/s(32.7 m/s为12级大风);近10 a另一个对中国造成重灾的是9711号台风(Winnie),这个台风于1997年8月18日夜间在浙江温岭登陆,登陆时风力40 m/s,狂风暴雨又与天文大潮重合,引发了特大海潮,其暴雨灾害也十分严重,该台风袭击了福建、浙江、上海、江苏、安徽、山东、河南、河北、天津、辽宁、吉林等从南到北的广阔地带;2004年8月12日,浙江省遭受台风“云娜”袭击,造成115人死亡,859万人不同程度受灾,经济损失153亿元。2005年是我国台风灾害偏重年份。西北太平洋和南海上共有23个台风生成,其中8个在我国登陆。登陆我国的“海棠”、“麦莎”、“泰利”、“卡努”和“达维”及“龙王”风力均达到12级以上。由于台风强度强、影响大,给浙江、福建、海南、安徽等地造成严重损失,其中浙江省经济损失最大,安徽省人员伤亡最为严重。“麦莎”台风、“泰利”台风登陆后先后影响8个省(市),“龙王”台风给福建省造成严重灾害。8个登陆台风共造成9204万人(次)受灾,死亡386人,直接经济损失达821.39亿元人民币。

飓风也是美国最主要的自然灾害,美国遭受的10次最严重的灾害中,8次由飓风造成。1950年到2004年间,风暴季对美国大陆造成的损失平均每年56亿美元。在遭到飓风“安德鲁”侵袭的1992年风暴季,美国的损失超过440亿美元。2005年是有记录以来飓风活动最严重的年份之一。“丹尼斯”、“卡特里娜”和“奥菲莉亚”这三场飓风造成的损失将会超过1000亿美元。这个数字是1992年“安德鲁”飓风(此前造成损失最惨重的一场飓风)造成损失的4倍,也是2004年整个飓风季节损失值的3倍。其中绝大部分损失都是由“卡特里娜”造成的,其受灾范围就达到9万mile²^①,这几乎与英国国土面积相当;而且造成1209人死亡,迫使100万人离开家园。紧随其后的“丽塔”飓风过境时,整个墨西哥湾几乎所有的石油生产和30%的石油提炼被迫中断。

热带气旋给人类带来了很大的灾害,因此科学家曾经试图努力寻找方案阻止它。但是美国气象协会早在1998年就得出结论,认为不存在“合理的物理假设”来支持改变飓风的想法。说到底,飓风也有它存在的理由,它可以帮助地球驱散热量,能帮助缓解旱情,净化受到污染的

① 1 mile=1609.344 m。

沿海生态系统。因此最好的解决办法不是如何去改变飓风,而是学会如何在和飓风共处的前提下把损失降到最小。

综上所述,热带气旋预测的准确程度与国民经济发展密切相关。要减轻台风灾害,首先要给出台风活动的正确预报,但人类目前对自然界一些突变现象的预见能力很低,例如火山的喷发、突发性海啸、地震等,尚不能事先给出正确预报。共同的原因是:①关键性的观测资料缺乏;②对突变发生的物理机制尚未可靠地揭示出来。因此对少数异常台风,尤其是台风路径的突变、强度的突变以及台风暴雨的突然增幅预报能力仍很低,这是当今世界上尚未解决的三大台风难题^[2]。

在过去的 30 a 里,热带气旋的路径预报已经得到了稳定的发展,其机理研究和预测技术均取得了显著的进展^[3~7],这主要得益于观测资料,尤其是卫星^[8]和下投式探空仪^[9~11]资料的改进,以及对动力模式的改进和对控制热带气旋的物理过程和机制的认识的不断深化^[12]。相比之下,尽管使用了成熟的数值模式,而且使用了先进的卫星资料,但是对热带气旋强度及其变化的预报却没有多大进展^[13,14]。这种现状已经引起了气象学者的广泛注意,因此在这方面的研究日益成为一个前沿课题。秦曾灏等^[15]、党人庆^[16]、陈联寿等^[17]回顾了台风强度变化研究的进展,指出热带气旋强度变化和冷空气活动、高空急流、西风槽、中小尺度系统、地形作用、海面温度和喷沫等物理因子有关。Wu 和 Cheng^[18]通过资料分析研究了环境风切变、角动量通量、海表面温度、外流层及位涡等因素对于台风强度的影响。此外,还有部分学者对台风强度进行了统计分析^[19~23]。

造成台风强度研究滞后的原因除了因为海洋上的观测资料不是很充分,模式的分辨率和物理过程不是很合适,以及初始条件较差等原因以外,最主要的一个原因还在于对控制强度变化的物理过程不是很了解。热带气旋的发展、运动以及强度和结构的变化与多尺度相互作用有关。运动主要是与大尺度环境有关的引导气流决定的^[24~26],结构和强度变化在任何时候都是被一系列复杂的过程影响的,这些过程控制着内核结构以及风暴和海洋、大气的相互作用^[27~29]。所以了解和预报热带气旋的强度和结构比路径更难。

综上所述,控制热带气旋强度变化的主要物理机制应该是当前热带气旋研究的最重要的课题之一,而对其的研究可以在多方面展开,其中包括螺旋雨带、中尺度涡旋以及眼壁的内部动力学。传播的和静止的螺旋云(雨)带是飓风随处可见的不对称特征,并在热带气旋的结构和强度变化中发挥着重要的作用,其动力学是了解热带气旋发展的核心。所以要想了解热带气旋发展的动力学,就有必要对螺旋带的形成、发展以及结构、性质进行研究。对螺旋带的研究将丰富对台风强度的研究,这不仅是一个有意义的理论问题,而且具有非常重要的实用价值。本卷书研究工作的立足点也在于此。

1.1 热带气旋螺旋带的观测研究现状

螺旋带是热带气旋成熟阶段中一种特有的非对称特征,首次被发现是在第二次世界大战以后。当人们用雷达对飓风进行探测研究时,惊奇地发现风暴内部的降水回波并不是均匀分布的,而是有几条很清楚的螺旋雨带^[30,31]。Dunn^[32]指出从雷达和飞机对成熟热带气旋的观测中,能够辨识出的一个突出特征就是具有螺旋形态的大尺度带状的外观。根据 Ligda^[33]的观测,螺旋云带形成以后,将沿着气流方向绕着台风眼运动,其移动速度一般大于风速。1959

年, Senn 和 Hiser^[34]从天气监视雷达的观测中进一步揭示了这种螺旋带状具有向外传播的特性, 单个螺旋带具有 1~2 h 的生命史。他们分析了两个个例, 说明雨带并没有围绕风暴旋转, 而是仍然逗留在它们生成的象限内, 相对于风暴中心的径向速度为 3~6 m/s。因雨带显然在眼壁生成, 故他们认为能量可能是当雨带在云墙周围摆动时释放的。Tatehira^[35]同意 Senn 和 Hiser 关于雨带的起源和传播方向的结论。他指出雨带产生在眼区附近, 并举出了一个例, 其雨带相对于中心以 4 m/s 左右的速度向外移动。这种贯穿整个成熟热带气旋的大尺度螺旋带特征是人们最初对热带气旋螺旋带的认识。Gray^[36]认为一个典型的热带气旋包含方位平均(对称)流动和非对称流动, 而且后者常常在雷达和卫星图像上最显著, 而螺旋带是热带气旋非对称流动特征的表现。由此可见, Gray 对热带气旋螺旋带的认识又进了一步。根据雷达的观测资料, Diercks 和 Anthes^[37,38]发现热带气旋的螺旋带排列整齐, 围绕热带气旋中心移动, 其角速度一般大于基本气流的角速度。同时螺旋带还沿径向向外运动, 移速近于重力波的传播速度, 约为 28 m/s, 北半球螺旋带呈曳式, 以 2~4 条带居多, 相邻两条带的间距从几十千米到几百千米不等, 靠中心处间距较宽。之前人们多认为螺旋带沿径向向外传播, 直至 1978 年, Willoughby^[39]证明有些雨带, 看起来似乎是向外传播的波动, 但实际上是向里传播的。他把波动的传播速度分为视传播速度和真实传播速度。所谓的视传播速度是指相对于风暴中心是静止的观测者观测到的速度。真实速度是指为平均风运动的观测者所观测到的速度。这两个速度可以完全不同。在该文中, Willoughby 还利用雷达回波随半径和时间变化的图像, 对飓风 Caroline(1975)中的径向传播作了研究, 指出其向外的视径向速度为 4~8 m/s, 平均为 6 m/s。也有事实表明, 还存在着一些移动较快的雨带, 其移速为平均速度的 2~3 倍。观测资料表明, 有些螺旋雨带并不旋转但仍向外传播。还有证据表明, 除了向内和向外传播以外, 有些雨带相对于风暴来说几乎是静止的。Allison 等^[40]就曾经发现, 较大的外雨带, 相对于风暴中心来说会长时间地停留在同一位置。此后, 人们对于热带气旋螺旋带的认识没有多大改进。

直到 20 世纪 90 年代, Guinn 和 Schubert^[41]提出了对热带气旋螺旋带更深入的认识。他们指出热带气旋的螺旋带分为内螺旋带和外螺旋带, 其中内螺旋带位于涡旋中心附近, 在雷达回波上非常明显, 但是由于卷云的覆盖, 在卫星云图上总是看不出来。外螺旋带通常位于距离台风中心 500 km 以外的地方, 可能非常的长而狭窄。内核雨带区域中雨带和空气都围绕着热带气旋中心旋转, 外部区域大量空气移动穿过热带气旋。1995 年, Tuttle 和 Gall^[42]利用波列分析技术分析雷达反射场, 发现热带气旋中的小尺度螺旋带不同于量级为 100 km 尺度的带, 后者典型地包含几个小尺度带。这些发源于近眼壁的螺旋带向外传播, 其径向距离和传播速度量级分别为 10 km 和 4 m/s, 在 95 km 处(最大风速半径的 3 倍), 还存在一个静止波特征。此外, 螺旋带以小于局地平均切向速度沿切向移动。但 Gall 等^[43]对三个强台风的雷达资料分析后又指出, 热带气旋中心 100 km 左右范围内常常出现小尺度螺旋带, 横向具有 10 km 宽, 当它们以顺时针方向螺旋向外时, 能伸展到 100 km 的尺度, 它们还以接近切向风速的速度围绕台风移动, 这些螺旋带在高反射性区中具有高位涡特征, 它们还引起穿过带状的空气风速有至少 8 m/s 的变化。Reasor 和 Montgomery^[44]进一步从机载双向雷达的观测揭示螺旋带的小尺度结构特征, 将螺旋带视为涡度螺旋带, 其径向上位于热带气旋高涡度区域的外侧, 径向波长 5~10 km 的量级。Barnes^[45]和 May^[46]则认为螺旋带是在广阔的层积云降水背景下, 由有组织的强对流单体所组成, 有些螺旋带环绕中心旋转和径向传播。

从上述的观测事实可以看出螺旋带绕台风眼的转动速度不等于气流的旋转速度, 表明螺

旋带不是由同样空气质点组成的物质带;而且螺旋带有径向生长的趋势,表明在径向方向有能量的传播,因此可以明确这是一类波动现象。但是关于其成因,目前还没有达到共识。

1.2 热带气旋螺旋带的成因研究进展

为了解释飓风螺旋雨带的生成、结构和传播,自从 20 世纪 40 年代后期以来,气象学家开展了大量研究工作,提出了很多理论,大体可以分为三类,其一是重力波理论,其二是边界层非对称理论,此外是位涡扰动理论即涡旋 Rossby 波理论。下面将分别对这三种理论的研究进展进行回顾。

1.2.1 重力惯性波理论

在观测发现向外传播的螺旋云雨带以后,很多气象学家根据其观测特征用重力波理论对其进行解释。1958 年,Tepper^[47]首先提出,重力波在眼壁附近产生,然后向外传播成为螺旋云带。1966 年,Abdullah^[48]设计了一个两层模式,在该模式中,风暴外围的重力波是通过诸如远处传来的气浪这样一种外源产生的。Abdullah 证明了,在适当的条件下,上述大气引起的波动,会向风暴内传播,最后在眼壁附近减弱。这时,由减弱的波动所激发的飚线,会从眼区向外传播。在 Abdullah 的模式中,风暴中心附近产生了一条螺旋云带,并以 83 m/s 左右的速度向外传播。这速度虽然比大气中的实测速度快得多,但如果对该模式中两层的厚度和各层中的密度加以调整,就可以得到比较慢的移速。

飓风的三维数值模式中,已产生出向外传播的上升运动的螺旋带结构^[49,50]。这些模式中所模拟的带的结构和性质与重力内波相似,只是由于旋转而稍有不同^[51,52]。这些波动具有很确定的低层辐合分布和地面气压倾向,这些螺旋带的涡度和环境场的涡度几乎没有什么差别。上述模式中的螺旋状上升带,似乎是由于气旋式旋转的眼壁附近,质量场和风场之间的不平衡所造成^[50,53]。由一种正压不稳定引起的旋转不平衡,以重力波的形式向四周辐散能量。虽然在模式螺旋带内可以发生中等(10 mm/d)的降水率,但是该带对涡旋的总的影响似乎是微小的。Diercks 和 Anthes^[52]还指出,在离飓风中心较远的外围,螺旋带中虽然有降水发生,但带中的潜热加热对该带的维持和传播并不起重要作用。

为了解释螺旋带的产生和传播,Kurihara^[51]以一个斜压圆涡旋为基本状态,研究了螺旋扰动的增长过程。在 Kurihara 的六层模式中,在飓风区内,有三种扰动是加强的:一种是向外传播的扰动,它从基本气流的水平切变中取得能量;另外两种是向内传播的扰动。

Diercks 和 Anthes^[54]利用一个轴对称的基本状态为正压的涡旋对螺旋带的生成和传播作了研究。在他们的线性模式(作为一个初值问题求解)中,螺旋云带是随机扰动形成的。在不稳定的重力惯性波产生螺旋带之前,基本状态的旋转是一个必要条件。旋转也能把稳定扰动组成带状的形式。在这个简单的模式中,上升气流中的潜热加热,导致螺旋带之间的距离增大。

在研究雨带的起因的大量理论性文章中,Willoughby^[55]首先以梯度风平衡的正压涡旋为基本状态,把一组非静力平衡方程线性化。他讨论了一些扰动的发展过程,它们的振幅随时间、方位角和高度呈谐波变化。他指出,虽然可能有向外传播、发展的重力惯性波^[51],但由于它们的视频率太高,因此不可能是造成实际风暴中螺旋带的原因。只有在眼区大的风暴中,由于它的局地惯性频率低于眼小的风暴,因而才可能有符合实际情况的低频率发生。在以后发

表的文献中,Willoughby^[39,56]论证了向内传播的重力惯性波的特征和许多实际螺旋带相符合。由风暴边缘的能源所产生的这些波动,会向内传播,方向与平均切向气流相反,但比平均气流慢,因而它们缓慢地向下风方向平流。黄瑞新和巢纪平^[57]指出台风中螺旋云带本质上反映了一类重力惯性内波,并应用缓变波列理论讨论了这类螺旋波的色散关系和群速度,同时进一步指出曳式波发展的能源主要是背景场转动角速度在水平和垂直方向上的不均匀性,特别是垂直切变更为重要。刘式适等^[58,59]指出,台风螺旋结构的形成是台风中重力惯性内波,特别是重力内波的作用所致。重力惯性内波不仅形成台风的螺旋结构,而且是造成台风产生不稳定严重天气的主要原因。他还利用一个柱坐标不考虑摩擦条件的台风模型对台风中的波动进行了研究,指出台风中的重力惯性波主要由 Brunt-Väisälä 频率及惯性频率共同决定,具有频散性质。并给出了台风的不稳定判据,指出在层结较不稳定、纬度较低、台风半径较小,台风切向波数较大的条件下,台风较易不稳定。Chow 等^[60]开发了一个基于浅水方程的理论模型解释热带气旋中移动的螺旋带状结构的产生,指出近涡旋中心涡度分布的波动可以作为一个源,这个源可以产生能够形成带状结构的重力波。该文还用 MM5 模式的模拟结果对理论计算进行了检验,发现数值模拟的移动螺旋带与理论上计算的从中心区域出现的重力波十分吻合。模拟结果同样证明了这个结论:热带气旋中的螺旋带是由传播的重力波触发的。

综上所述,重力惯性波理论认为螺旋带作为上升运动和凝结的区域,是由传播的重力惯性波引起的。不过,对于重力波是由气旋内部区域的对流还是由热带气旋外部区域与其环境的相互作用所强迫,重力波理论的解释并不一致。

1.2.2 边界层非对称理论

边界层理论认为螺旋带是通过边界层流动结构的动力不稳定或者边界层内 Ekman 切变的不稳定强迫而产生的,小尺度螺旋特征与边界层起伏相类似。Faller^[61]指出螺旋带是一些由边界层不稳定产生,并呈螺旋形的滚轴状涡旋。Fung^[62]研究了边界层不稳定在产生短波(其波长大约为 30 km)螺旋带中的作用。她在理论分析中指出,由边界层径向风垂直切变决定的 Rayleigh 不稳定,能导致螺旋云带的形成。当径向云廓线中有拐点存在,并且雷诺数大于 110 时,就会发生雷利不稳定。因为这时边界层中的径向风速达到了局地最大值,所以满足了不稳定的必要条件和充分条件。能量取自平均风廓线的螺旋扰动,其走向大约偏向地转风左侧 14° ,并且相对风暴来说几乎是静止的。最不稳定扰动的径向波长,在眼壁附近约为 20 km,而在半径 300 km 处约为 50 km。Shapiro^[63]研究了飓风的移动在确定边界层风的分布以及对流组织化中的作用。并使用一个深度为常数的边界层模式分析了一个指定的处于梯度风平衡的定常流,诊断了线性和非线性非对称影响在确定边界层响应中的作用。Powell^[64,65]通过在飓风 Josephine(1984)和 Earl(1986)的外部雨带中进行的边界层实验,比较了这些风暴中的降水和动能结构发现这些主要的雨带在边界层中具有相似的中尺度和对流尺度特征。它们的两维中尺度结构表明这些雨带是由反射单体和层状雨的线性集合组成。雨带位于边界层上垂直于风切变的位置。与重力惯性波和涡旋 Rossby 波理论相比,该理论研究较少。

1.2.3 涡旋 Rossby 波理论

虽然有许多证据表明,螺旋云带是某种形式的重力波。但是 Macdonald^[66]在 1968 年提出螺旋云带应该是类似 Rossby 波的波动。他指出,螺旋雨带从风暴中心向外伸展的走向,与