

RED AI QIXUAN DONG LIXUE

热带气旋动力学

钮学新 编著



气象出版社

热带气旋动力学

钮学新 编著

气象出版社

(京)新登字046号

内 容 简 介

本书用动力学和运动学原理分析热带气旋的形成、发展、移动及其预报问题。全书共分九章：第一章绪论；第二章热带气旋动力学基础；第三章热带气旋的结构及其动力学分析；第四章热带气旋发生发展的动力学分析和预报；第五章热带气旋移动的动力学分析；第六章热带气旋路径的数值预报和动力—统计、诊断预报方法；第七章热带气旋的数值模拟、数值实验和人工影响热带气旋的试验；第八章热带气旋天气及预报；第九章热带气旋研究和预报的展望。该书取材新颖，内容丰富，基本上反映了该领域国内外最新的进展和科研成果，其中包括作者在热带气旋研究方面的成果及丰富的预报实践经验。所以这是一本理论与实践相结合的好书。

本书可供从事热带气象研究的科技人员、有关大专院校师生及热带天气预报人员参考。

热 带 气 旋 动 力 学

钮学新 编著

责任编辑 徐 昭

气象出版社 出版

(北京西郊白石桥路46号)

北京市顺义兴华印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行 全国各地新华书店经销

1992年3月第一版 1992年3月第一次印刷

开本：850×1168 1/32 印张：9.875 字数：252千字

印数：1—800 定价：9.10元

ISBN 7-5029-0816-1/P·0417

前 言

热带气旋是全球性最严重的灾害性天气系统，人们很早就重视对它的观测和研究。本世纪50年代以前，人们只是用天气学和气候学的方法，对热带气旋进行简单的分析。从50年代起，开始用动力学分析方法对热带气旋进行研究，接着，用统计分析方法研究它的定量预报。60年代起，由于对热带气旋的天气学和动力学的分析研究取得很大成就，计算数学、高速电子计算机的迅速发展和应用，以及气象卫星资料的获取和应用，以统计预报为基础的热带气旋的客观预报投入业务，并且对热带气旋进行数值模拟和数值预报的研究和试验。70年代起，优秀的套网格热带气旋数值预报模式投入业务应用，并开始出现模拟试验和人工影响热带气旋的研究。到80年代，对热带气旋的形成、发展、结构、移动及其引起的天气现象等已有了较好的了解，对其预报也取得了可喜的成就。

本书向读者介绍了国内外学者对热带气旋的研究成果，特别是动力学分析、研究的成果，其中包括作者的一些研究结果和体会。希望本书能对从事热带气旋研究和业务的科技工作者有所帮助。

本书内容包括以下九章：第一章、绪论，其中包含热带气旋的气候概况；第二章、热带气旋动力学基础；第三章、热带气旋的结构及其动力学分析；第四章、热带气旋发生发展的动力学分析和预报；第五章、热带气旋移动的动力学分析；第六章、热带气旋路径的数值预报和动力-统计、诊断预报；第七章、热带气旋的数值模拟和模拟实验；第八章、热带气旋天气及其预报；第九章热带气旋研究和预报的展望。

本书写作过程中,先后得到金汉良、秦曾灏、李崇银、刘式适和余志豪教授的热情帮助,也得到浙江省气象台的支持,作者在此表示衷心感谢。由于作者水平有限,书中缺点错误在所难免,望读者批评指正。

作者

1991年3月

目 录

前言

第一章 绪论	(1)
§ 1 热带气旋的定义及其影响	(1)
§ 2 热带气旋的气候概况	(2)
§ 3 热带气旋研究和预报的现状	(9)
第二章 热带气旋动力学基础	(12)
§ 1 基本方程组	(12)
§ 2 不稳定理论概述	(15)
§ 3 潜热反馈和 CISK 理论	(22)
§ 4 积云对流参数化	(26)
第三章 热带气旋的结构及其动力学分析	(37)
§ 1 热带气旋结构的概况	(37)
§ 2 热带气旋宏观结构的动力学诊断分析	(42)
§ 3 热带气旋中的风速和气压的分布及中心眼	(45)
§ 4 热带气旋中的螺旋云雨带	(53)
§ 5 热带气旋中的非线性波动	(59)
§ 6 热带气旋的内力	(72)
第四章 热带气旋发生发展的动力学分析和预报	(77)
§ 1 热带气旋形成的理论	(77)
§ 2 热带气旋发生发展的基本条件	(82)
§ 3 惯性重力波的不稳定与热带气旋的发生发展	(84)
§ 4 水汽凝结加热在热带气旋发生发展中的作用	(89)
§ 5 积云尺度运动与热带气旋的关系、CISK 机制动力学	(96)
§ 6 基本气流和环境温度场对热带气旋发生发展的影响	(101)
§ 7 热带气旋发生发展过程中的非线性动力机制	(107)
§ 8 热带气旋发生发展的动力-统计预报	(115)

§ 9	热带气旋发生发展的统计预报方法	(124)
第五章	热带气旋移动的动力学分析	(131)
§ 1	热带气旋移动的引导气流理论和诊断分析	(131)
§ 2	几种热带气旋路径的动力学分析	(138)
§ 3	环境流场、温度场对热带气旋移动的影响	(142)
§ 4	热带气旋的初速度和初始位置对热带气旋移动的影响	(145)
§ 5	CISK 动力学过程对热带气旋移动的影响	(148)
§ 6	β 效应和赤道高压对热带气旋移动的影响	(153)
§ 7	热带气旋的非对称结构和内力对其移动的影响	(161)
§ 8	双台风运动的分析	(165)
§ 9	热带气旋移向、移速突变的一些分析	(173)
第六章	热带气旋路径的数值预报和动力-统计、诊断预 报方法	(187)
§ 1	热带气旋数值预报模式以及初值和边值问题	(187)
§ 2	热带气旋数值模拟和数值预报中考虑的主要物理过程	(194)
§ 3	热带气旋数值预报中的计算格式、平滑处理、套网格技术 和中心定位	(204)
§ 4	一个热带气旋路径的数值预报模式	(209)
§ 5	目前国内外热带气旋数值预报的状况	(215)
§ 6	热带气旋路径的动力-统计和相似预报方法	(218)
§ 7	几种特殊热带气旋路径的诊断预报	(225)
第七章	热带气旋的数值模拟、模拟实验和人工影响热带气 旋的试验	(233)
§ 1	热带气旋的数值模拟及一些重要模式的简介	(233)
§ 2	热带气旋数值模拟的结果	(238)
§ 3	热带气旋模拟实验的发展及其物理基础	(252)
§ 4	热带气旋模拟实验的一些结果	(255)
§ 5	人工影响热带气旋的试验	(267)
第八章	热带气旋天气及预报	(273)
§ 1	影响热带气旋降水的物理因素	(273)
§ 2	热带气旋降水的计算和预报	(279)

§ 3	热带气旋大风及其预报	(283)
§ 4	台风风暴潮及其预报	(287)
第九章	热带气旋研究和预报的展望	(303)

第一章 绪 论

热带气旋是伴有狂风、暴雨、巨浪的灾害性天气系统，因此早就引起了人们的高度重视，并用天气学、统计学、动力学分析和数值模拟、模拟实验等各种方法对它不断地进行研究，以求能正确地预测它、防止它，进而能在一定程度上改变它、利用它。本章介绍有关热带气旋及其研究和预报的一些基本知识和简单情况。

§ 1 热带气旋的定义及其影响

热带气旋是一种生成在热带洋面上、活动于热带和副热带洋面、岛屿和陆地的气旋性低压环流。按国际规定，根据强度可以分为四类：(1)近中心最大风力在8级以下(风速 < 17.2 米/秒)者，称为热带低压(tropical depression)；(2)最大风力在8~9级(风速在 $17.2\sim 24.4$ 米/秒)者，称为热带风暴(tropical storm)；(3)最大风力为10~11级(风速在 $24.5\sim 32.6$ 米/秒)者，称为强热带风暴(severe tropical storm)；(4)最大风力达12级及以上(风速 ≥ 32.7 米/秒)者，称为台风(typhoon)或飓风(hurricane)等。

那些很强的热带气旋(风速 ≥ 32.7 米/秒)，在不同的地区有不同的名称：在西北太平洋上称为台风，在东北太平洋和大西洋上称为飓风，在孟加拉湾、阿拉伯海称为风暴，在南半球的洋面上统称为热带气旋。

由于热带气旋是一种强气旋性涡旋，其中心周围有很大的风速。因此它来临时，常带来狂风、暴雨，在海面上引起巨浪和风暴潮，给人类带来严重的灾害。例如，1970年11月，一个孟加拉湾风暴引起的巨浪和大潮，使30万人丧生。1959年8月，一个西太

平洋台风登陆日本伊势湾,使 10 万人无家可归。我国是世界上受热带气旋影响最严重的国家之一。1922 年一个台风登陆广东省汕头市,使 6 万人丧生,汕头市几乎夷为平地。1975 年 3 号台风登陆后深入内陆,其低压环流维持数日不消,引起了历史上罕见的河南特大暴雨,使数十万人和几个地区受到严重灾害。华南、华东地区每年都要受到热带气旋的影响。特别是地处东南沿海的广东、海南、福建、台湾、浙江、广西等省,都是我国受热带气旋影响最多的几个省份。1949 年以来,我国最大的两次暴雨出现在台湾:即 6718 号台风,在台湾新寮的过程雨量达 2749 毫米;6312 号台风,在台湾百新的过程雨量为 1794 毫米。上面提到的 7503 号台风在河南林庄的过程雨量为 1631 毫米,居第三位。另外,在台风影响下,江苏潮桥、浙江庄屋曾分别达 945 和 868 毫米的过程雨量纪录。广东、福建、海南等省过程雨量超过 600 毫米的台风暴雨出现过多次。这些都曾引起了一定程度的严重灾害。

当然,热带气旋也有有利的方面,它的大量降水可以有效地解除旱情。我国东南沿海地区在很大程度上就是靠热带气旋降水来解除伏旱和秋旱的。如果能准确地预测热带气旋的影响,事先做好防风、排涝或蓄水、保墒等工作,就可以趋利避害。

§ 2 热带气旋的气候概况

要认识、研究、预报热带气旋,首先需要了解它的一些气候概况。

1. 全球热带气旋的时空分布

热带气旋的地理分布以西北太平洋为最多,南太平洋和东北太平洋其次。南、北印度洋较少。表 1.1 是 Gray 用 1958~1984 年资料统计的热带气旋全球分布情况^[1]。

热带气旋的时间分布是:北半球集中在 6~11 月,占全年的 84% 以上,尤其集中在 7~9 月,占全年的 41% 以上;而南半球则集中在 11 月到次年 4 月,占全年的 91% 以上,尤其是 1~3 月,占

表 1.1 热带气旋的全球分布

洋 域	年 平 均	占全球%	最多年个数	最少年个数
西北太平洋	26.1个	33%	35个	17个
东北太平洋	14.2	18	21	6
西北大西洋	8.9	11	14	4
北印度洋	5.5	7	9	2
南印度洋	9.0	11	13	5
澳大利亚-南太平洋	16.4	20	24	11
全 球	80.1	100	116	45

表 1.2 热带气旋的月际分布

时 段(月)		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	全年	资料年限
西 北 太平洋	热带气旋	0.7	0.4	0.6	0.9	1.2	2.6	5.4	8.1	6.8	4.9	3.2	1.8	36.6	1949~ 1988年
	风暴和台风	0.5	0.3	0.4	0.8	1.1	1.9	4.2	5.9	5.3	4.0	2.7	1.4	28.5	
东 北 太平洋	热带气旋					0.9	2.8	5.3	4.6	3.9	2.4	0.5	0.1	20.5	1966~ 1987年
	风暴和飓风					0.5	1.9	4.0	4.0	3.0	1.9	0.3	0.1	15.7	
北印度洋	热带气旋	0.2	0.0	0.1	0.4	1.1	1.8	2.3	2.5	2.4	2.3	1.9	0.9	15.8	1891~ 1987年
	风 暴	0.1	0.0	0.0	0.3	0.7	0.6	0.5	0.3	0.5	1.0	1.2	0.5	5.6	
南印度洋	热带气旋	2.3	1.9	1.4	0.6	0.2	0.0	0.1	0.1	0.1	0.3	0.5	1.5	9.0	1958~ 1985年
西南太平洋	热带气旋	1.8	2.2	1.8	0.8	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	1.0	8.0	1939~ 1989年

全年的 62 %以上。表1.2是根据不太完整的资料统计的热带气旋月际分布情况。

2. 西北太平洋上热带气旋的时空分布

西北太平洋热带低压的源地在菲律宾以东到关岛西南附近洋面的大范围地区和南中国海。热带低压发展成为热带风暴的地理位置有三个相对集中的海区：菲律宾以东、关岛西南附近洋面以及南中国海。热带气旋频繁发生的区域，其纬度随着月份或季节有明显的变化。5 月份以前发生的高频区主要集中在 5~10°N，以

后逐渐向北移动,7~9月份移到 15°N ,9月份以后又向南移。这与副热带高压及热带辐合带位置的季节变化相一致。

从关岛附近到菲律宾以东洋面和南海东南海域是热带气旋的加强区。向西北,则转为减弱区,即靠近中国大陆和副高平均脊线(盛夏为 30°N 左右,初夏和初秋为 $25^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$)附近转为减弱区。中国大陆和 35°N 以北的中纬度洋面是主要减弱区。一般情况下,热带气旋强度从登陆前24小时起开始减弱,直到登陆后30小时;特别是从登陆前6小时到登陆后12小时,是热带气旋减弱最快的时段。其中盛夏季节,热带气旋强度的减弱主要出现在中心登陆后的12小时之内;而初夏和初秋,热带气旋减弱的时间持续较长,可达30~36小时或更长。

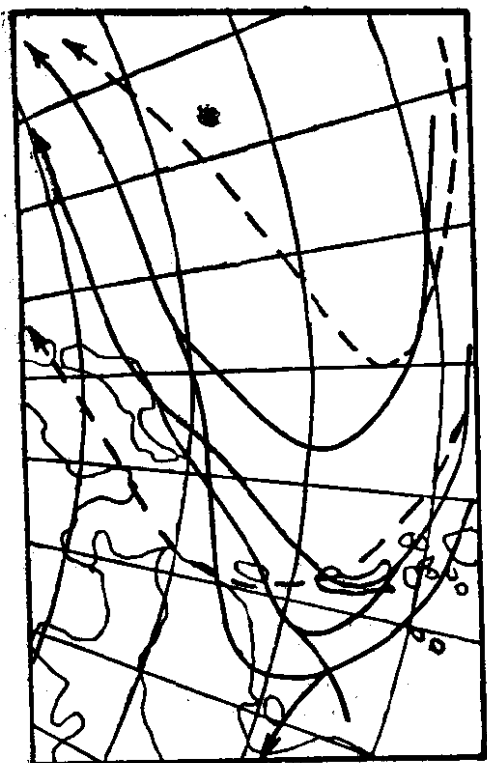
3. 西北太平洋热带气旋的路径

西北太平洋热带气旋的路径大致可分三条主要通道:一为西行,二为在海上北上转向,三为向西北方向移动登上中国大陆。由于季节不同,热带气旋路径主通道的地理位置也有所不同(见图1.1)。

11~4月,一条主通道在 10°N 附近,热带气旋西行进入南海,然后登陆越南或在南海消亡,少数登陆海南、广西。另一条在菲律宾以东的洋面上,热带气旋急转东北,转向点一般在 20°N 以南。

5月份和10月下旬的热带气旋主通道,一条在 15°N 以南,热带气旋西行进入南海,然后登陆广东、海南,或经海南附近洋面登陆越南北部,或在南海北部消亡;其中少数登陆广东的热带气旋进入西风带之后转向东北,可进入闽、浙、赣甚至进入东海。另一条在菲律宾的东北海面上,热带气旋北上,在台湾以东洋面上转向东北,转向点一般在 20°N 附近。

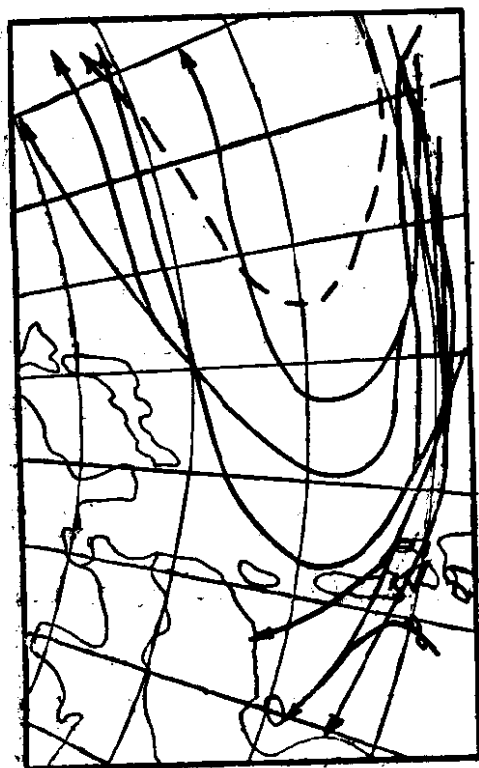
6月和10月的上、中旬处于季节过渡时期。热带气旋的主通道,一条在 15°N 附近,热带气旋西行进入南海后登陆海南、粤西、广西和越南,或在南海北部消亡。一条是西行进入巴士海峡后转向西北,然后登陆广东、闽南和台湾。另一条是热带气旋在台湾以



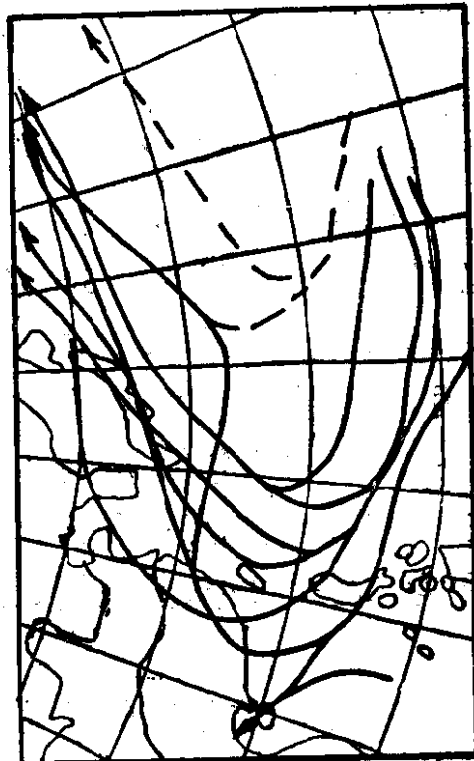
b. 5 月



d. 8 月



a. 11—12月



c. 6 月

图 1.1 西北太平洋地区热带气旋路径概图
(根据国家气象局 1949~1980 年台风年鉴改画而成)

东洋面上转向东北,转向点一般在 $20\sim 25^{\circ}\text{N}$ 。登陆粤、闽的热带气旋之中,少数在陆地上转向东北,进入赣、浙,甚至在长江口附近入海。

7~9月是热带气旋活动最频繁的季节,其路径主通道有三条:一条是热带气旋在 $15\sim 20^{\circ}\text{N}$ 间西行进入南海,然后登陆越南北部、广西、广东和海南,或在南海北部消亡;一条是热带气旋向西北方向移动,登陆台湾、福建、浙江和上海。登陆后大部分深入内陆消亡,少数转向北上,到长江口附近入海。有的紧靠沿海北上进入黄海,登陆山东半岛、河北、辽宁或朝鲜半岛。另一条是热带气旋在 125°E 以东洋面上北上转向,转向点一般较北,在 $26\sim 30^{\circ}\text{N}$ 。

西北太平洋上东支热带气旋路径主通道转向点的纬度随季节的变化与洋面上副热带高压脊线的平均位置随季节的变化相一致,热带气旋路径转向点在副热带高压脊线附近或稍南一些。

根据 1949~1980 年的资料,西北太平洋上热带风暴平均每年登陆中国的有 7.2 个,登陆菲律宾的有 4.9 个,登陆日本的有 3.5 个,登陆越南的有 2.3 个,登陆朝鲜的有 1.0 个,登陆苏联的有 0.5 个。热带风暴登陆各国的时期并不相同,中国为 5~12 月,集中在 7~9 月,占全年的 76%;菲律宾为 1~12 月,集中在 8~12 月,占全年的 66%;日本为 5~11 月,集中在 7~9 月,占全年的 83%;越南为 6~12 月,集中在 8~10 月,占全年的 67%;朝鲜为 5~11 月,集中在 7~9 月,占全年的 91%;苏联为 6~9 月,集中在 8~9 月,占全年的 90%。

登陆中国的热带风暴和台风的各月分布见图 1.2,最多的是 8 月,平均每年 2.2 个,其次是 9 月和 7 月,分别为 1.8 个和 1.7 个。

我国各省、市、自治区的登陆热带风暴和台风的数量以广东为最多,平均每年有 2.5 个,其次是海南、福建、台湾,平均每年分别有 1.5, 1.0 和 0.6 个,浙江、广西和山东又次之,平均每年各有 0.3

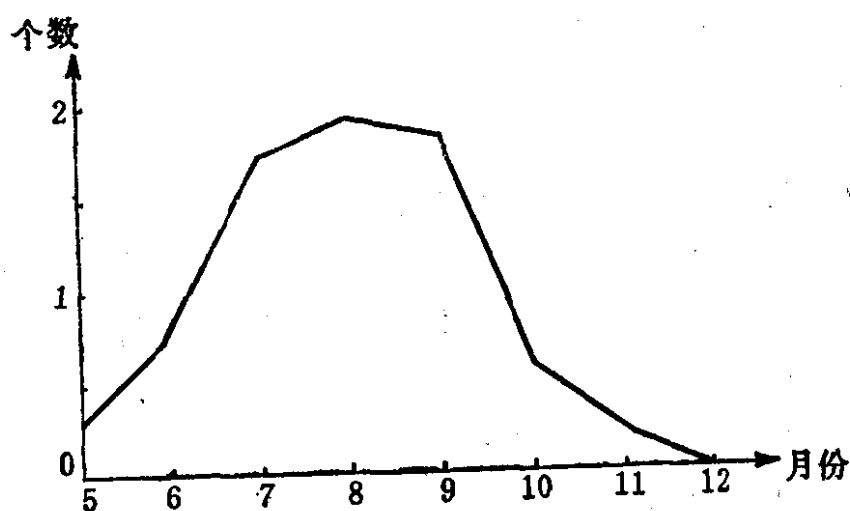


图 1.2 登陆中国热带风暴数逐月分布

表 1.3 沿海各省(市、自治区)平均各月登陆热带风暴和台风数
(1949~1985年)

省 份	月 份	5	6	7	8	9	10	11	12	合 计
辽 宁	宁	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2
山 东	东	0.0	0.0	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3
江 苏	苏	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
上 海	海	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.2
浙 江	江	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2
福 建	建	0.0	0.0	0.3	0.4	0.3	0.0	0.0	0.0	1.0
台 湾	湾	0.0	0.1	0.1	0.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.6
广 东	东	0.1	0.3	0.7	0.7	0.5	0.1	0.1	0.0	2.5
海 南	南	0.1	0.3	0.2	0.5	0.4	0.1	0.0	0.0	1.6
广 西	西	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.5

个左右。各省每个月的登陆风暴和台风的数量又不一样，详见表 1.3。登陆的近中心最大风力达 8 级以上的热带气旋中台风所占的比例数以登陆浙江和台湾的为最高，福建、广东、海南次之，登陆广西、江苏、山东、辽宁等省只有热带风暴，而无台风。

从热带风暴和台风进入各海区的个数来看，进入南海区的最

多,平均每年有14个,登陆6.2个;东海次之,平均每年有7.7个进入,登陆3.8个;黄海平均每年有1.6个进入,登陆0.3个;渤海平均每年有0.3个进入,登陆0.3个。

双台风出现的时间主要集中在7~10月,以8月份为最多。双台风活动的地理分布主要集中在琉球群岛附近和小笠原群岛至硫磺群岛东南附近洋面;其次是在南海东北部。

4. 热带气旋给我国带来的暴雨

热带气旋是造成我国暴雨及大风的最重要的天气系统之一。由热带气旋环流直接造成以及它和西风带冷空气相结合造成我国的暴雨,影响范围涉及南北约30个纬度,东西可达50个经度左右。全国除新疆之外,其他地区都可受到热带气旋直接或间接的影响而产生暴雨。可能造成我国热带气旋暴雨的时间为5月初到12月初,其中以7~9月为最多,强度最强且范围最大。

5月份,热带气旋暴雨只影响到浙江以南的沿海地区,以广东、海南、广西、浙江为多,但日雨量200毫米以上的特大暴雨仅出现广西沿海地区。6月份,热带气旋暴雨出现范围在长江口到广西的沿海300公里范围之内,以广东和闽南为多,但日雨量200毫米以上的特大暴雨只出现在广东沿海和海南省。7月份,热带气旋暴雨出现范围从东南沿海地区扩展到江南大部、华北和东北南部,以广东、闽北和浙南为最多,而日雨量200毫米以上的特大暴雨只出现在广西、粤东沿海和海南省。8月份,热带气旋暴雨出现次数最多,影响范围也最广,以广东沿海和海南为最多,其次依次为浙东、山东半岛、吉林南部、江西、湘南、河南、河北、辽宁等地区,而日雨量200毫米以上的特大暴雨则主要出现在海南、广西、粤东沿海和台湾省,北至辽宁南部,西至长江中游、淮河上游也偶有出现。9月份与8月份相比,热带气旋暴雨活动范围向东南沿海收缩,多发区为海南、台湾、广东沿海、浙江东部和福建省等地,日雨量200毫米以上的特大暴雨一般只出现在长江口以南的沿海地区,以浙江东南沿海、海南和珠江口附近为最多。10~11月份,热

带气旋暴雨主要集中在广东沿海和海南省,其次是浙江东部和台湾东部,但日雨量 200 毫米以上的特大暴雨仅限于广东沿海和海南省。

1951~1980年资料表明,日雨量 400 毫米以上特大的热带气旋暴雨主要出现在广西和粤东沿海、海南南部、台湾中部、浙中沿海与杭州湾等少数地区。日雨量 500 毫米以上特大的热带气旋暴雨出现范围更小,主要出现在广西沿海、台湾和海南南部等地区。

§ 3 热带气旋研究和预报的现状

由于热带气旋具有强大的威力,因此加强对它的研究以及做好预报和服务工作,对于保护人民的生命财产和生产建设有着十分重大的意义。

近十几年来,由于世界各国观测站网的改善和包括气象卫星和雷达在内的监测系统的不断完善,以及大型高速电子计算机和数学、物理学等学科新的理论、新方法的不断引入和应用,并进行专门的热带气旋计划与试验,从而使得热带气旋的研究和预报有了长足的进步。通过时空加密的探测和大量的天气学、动力学的分析研究,以及大量的热带气旋数值模拟和模拟实验,现在对于热带气旋的形成与演变的过程和原因、热带气旋的结构、运动等有了更为清楚、全面的认识。人们普遍认为,热带气旋形成的能量主要来自基本气流的动能;在其发展过程中,主要能量来自水汽的凝结释放潜热。Charney和Eliassen(1964)及Ooyama(1964)等人提出的CISK机制(即热带气旋发生发展的第二类条件不稳定理论)较为合理地解释了热带气旋的发生发展过程。近年来Ooyama(1982)等人提出的多尺度相互作用促使热带气旋的形成和发展的理论,使热带气旋的形成学说有了进一步的发展。

数值预报模式的不断更新和完善,统计预报的不断发展,使热带气旋的路径、强度及其引起的天气现象的预报从天气学经验的定性预报走向客观、定量的预报。特别是动力学(主要是数值预