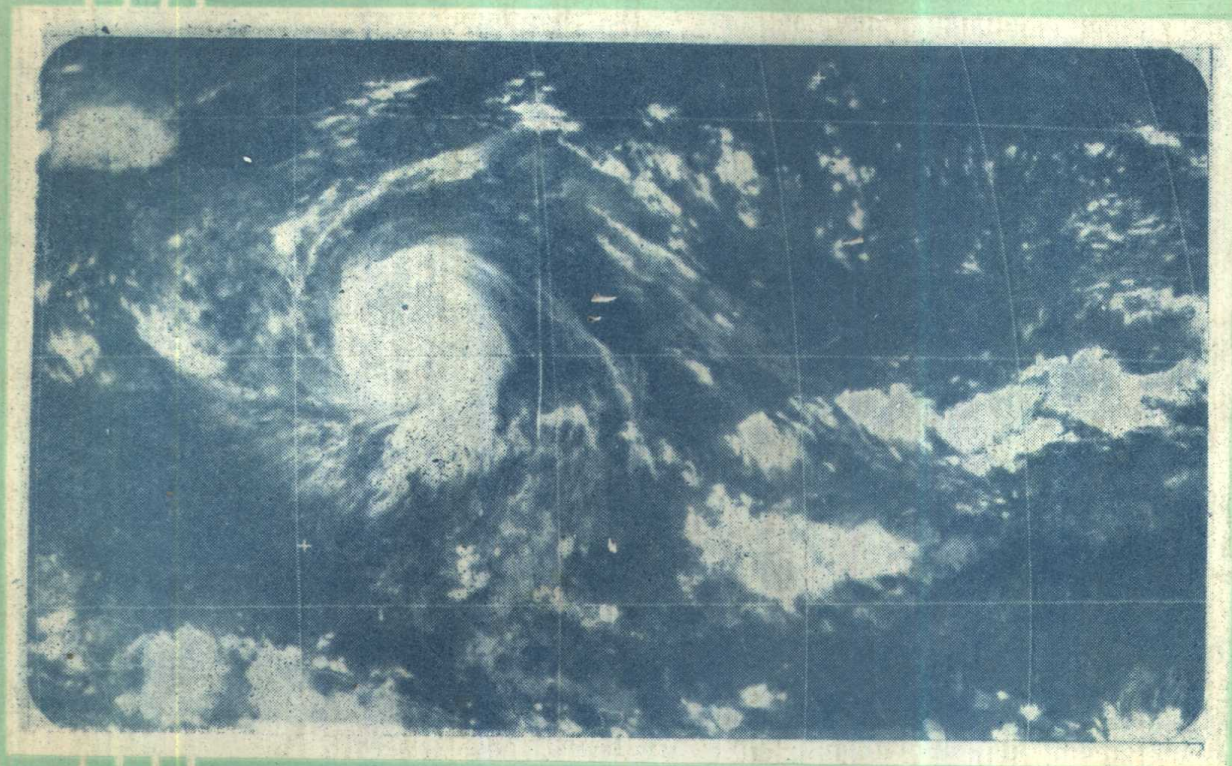




全国台风科研协作组



台风译文集

2

气象出版社

79

台风译文集

全国台风科研协作组编

2

气象出版社

内 容 简 介

本书选编了1977—1979年国外台风科研的部分成果，其中包括1977年第11届飓风和热带气象学术会议上具有代表性的论文。内容有：综合评述、台风的发生发展、路径、结构、天气和基础理论等方面。可供气象科研人员、气象台站实际工作者及气象院校有关专业师生参考。

台风译文集 (2)

全国台风科研协作技术组编

气象出版社出版

(北京西郊白石桥路46号)

北京丰台岳各庄印刷厂印装 新华书店北京发行所发行

开本：787×1092 1/16

印张：16.5 字数：410千字

1983年10月第1版

1983年10月第一次印刷

印数：1—2,000

统一书号：13194.0111

定价：1.75元

前 言

自一九七二年以来，全国台风科研协作组经过十年不懈的努力，建立了我国自行设计并经过系统业务应用的统计、动力和统计动力相结合的各种台风客观预报模型；广泛地总结了热带气旋的各种诊断分析工具和卫星云图、雷达回波的分析方法；研究了疑难台风和热带气旋的有关基础理论；因而使我国台风的科学研究有了显著提高，台风的实际预报工作也有了明显改进。

为了使我国科研向更为先进的水平发展，一九七六年台风科研领导小组会议决定，在每届全国台风科研协作会议之后，编译一本相应时期的台风译文集，以供我国台风科研和预报工作者参考。这有助于开阔思路，改进我们自己的工作。第一期译文集已于一九七八年印出。上海闵行全国台风会议（1978）以后，我们组织翻译了这本译文集，介绍一九七七至一九七九年国外在这一领域的有关研究成果，尤其介绍一九七七年十一届美国飓风会议的成果。关于一九八〇年上海国际台风科学讨论会论文的译文，已由上海台风研究所及时进行了组织，译文集已于一九八一年印出。

本书原组织译稿 67 篇。但在出版过程中，由于译者单篇另投他刊或同一原文的译文已见发表等，致使实际刊用的仅 30 篇。有的译校者花了不少精力和时间，但译稿未能尽收本书，我们表示歉意。

本书按论文性质，分为综合评述、台风的发生发展、台风路径、台风结构、台风天气和台风基础理论共六部分进行编排，以便读者查阅方便。

本译文集由上海台风研究所和全国台风科研协作技术组进行组织。参加翻译的单位基本上均为台风科研协作组织的成员。全部译文最后由北京台风科研协作组负责审定。由于参加翻译的人数众多，笔调和术语不尽统一；另外，汇编的时间仓促，错漏在所难免，敬希不吝指正。

全国台风科研协作技术组

一九八一年十二月三十一日

目 录

综合评述

飓风和热带气象.....	(1)
热带系统的十年总结.....	(14)
削台(STORMFURY)计划——现状和未来.....	(18)

台风的发生发展

由东风波形成热带风暴的一个发展判据.....	(22)
北大西洋西部热带低压增强的指标.....	(35)
热带扰动发展与不发展之间差别的观测分析.....	(44)
使用增强显示红外云图分析热带气旋的强度.....	(53)
Camille飓风(1969年)越过美国东南部期间的天气学及动能分析.....	(59)
用卫星微波资料估计热带气旋中心气压和外围风速.....	(67)
热带北大西洋和东太平洋风暴的超长期变化.....	(74)
大西洋热带试验中一个热带低压内部出现的中尺度系统.....	(82)

台风的路径

世界热带气旋预报模式综述.....	(95)
西北太平洋热带气旋预报误差的分析.....	(101)
评论飓风统计预报模式.....	(114)
调整初始风场改进台风移动的斜压预报模式.....	(122)
热带风暴的加速度.....	(128)
雷达测定飓风路径的振荡的谱分析.....	(135)
关于地面雷达测定热带气旋路径的问题.....	(141)

台风的结构

热带气旋的结构和能量学(I)——风暴结构.....	(145)
热带气旋的结构和能量学(II)——动力学和能量学.....	(161)
热带气旋的动量和动能过程.....	(176)

台风的天气

用地球静止卫星数字化云图实时估计登陆飓风的可能降水量.....	(184)
强飓风登陆时海上风速的减小.....	(190)
台风区域内风速的估计.....	(197)
用卫星资料研究热带气旋的降雨特征.....	(200)
台风环流内的海平面气压廓线和阵风.....	(207)

基 础 理 论

热带扰动向热带气旋的转化.....	(214)
飓风雨带形成的可能机制.....	(223)
热带气旋发生的数值模拟.....	(234)
考虑可分辨尺度潜热释放的热带气旋发展数值模拟 (I) —— 模式的描述和初步 结果.....	(243)

飓风和热带气象*

D. R. Rodenhuis, A. R. Anthes

一. 引言

本文材料系根据1977年12月13日—16日在迈阿密海滩举行的最近一次第11届飓风和热带气象技术会议所发表的研究结果。这次会议的结果已由 Pelissier 和 Koss(1978年)作了总结,会议上提出的文章已由美国气象学会作为献给 Max A. Eaton 和 Banner I. Miller 的毕生事业的正式文集出版了。

不过,这次会议的结果决不可能概括最近完成的研究内容。近年来,Wallace(1971年b),Garstang(1972年)和 Yanai(1975年)作了几个详尽的总结。此外,还有几个关于热带边界层和积云对流方面的专题总结(Garstang 和 Betts,1974年)。最近发表了一份 GATE 的科学研究结果的报告(GATE,1977年),一份 Chang(1977年)的有关即将实施的季风试验(MONEX)中一些科学问题的评述。

因此,我们在这篇总结中将有选择地提及一些目前在这一广泛的领域内特别有兴趣的发展情况。

当然,GATE 对热带气象的许多方面是一个重要的促进因素。有些涉及热带波动和积云总体(例如“云团”)热量和水汽平衡的重要结果均为这一国际试验的重要成果。但是,还有许多研究工作要做,因为校订和汇集来自许多国家卫星站的一套综合性资料要好几年。

热带气象另一方面的内容是季风环流(虽然它的影响范围并不限于热带)。在1979年全球天气试验的两次专门观测期间,将执行一项测量和模拟季风特征与动力学的国际计划(MONEX)(GARP,1976年)。这一试验系集中在大尺度环流和相应的降水,尤其重要的是确定洋面与全球环流的相互作用。

由于独立地开展了这些领域的试验,一些用云图来确定云的移动并估计降水率的研究也得出了一些有趣的成果。同样,热带扰动(例如,天气尺度)的数值模式和模拟积云对流某些特征的模式也有了独立的发展。当然,GATE 和早期的野外试验对这些模式也起了一定的促进作用。

非常规观测资料的整理分析和数值模拟的进展,对深入研究热带气旋的动力学和预告起到了指导作用。当前的几个问题是积云参数化、辐射效应、海气相互作用和模拟的人工影响试验。其中有些问题是用数值模式的方式提出来的,另一些是用热带高空历史资料来做的。通过审核得到的一份合成资料,可以识别初生的或发展中的风暴在环境方面的区域性气象条件的差别。未来几年内,将更多地致力于监视热带气旋和探讨人工影响的潜在可能性。

不过,热带风暴研究的一个特别重要的、鼓舞人心的内容是用动力学模式预报风暴位置的工作。数值模式将进一步用于检验人工影响一些风暴使之强度减弱的可能性。使用最新装备的飞机观测站,通过对积云尺度到风暴尺度的观测,将给飓风研究带来新的动力。

*本文是在美国气象学会第58届年会(1978年2月1日,佐治亚州萨凡纳)第七次科学评述座谈会上提出的报告。

二. 热带气象

这里我们挑选几个题目作一介绍，它们既代表了下列三方面(1) 热带波动，2) 积云对流，3) 在降水估计方面的应用)的成就，也表明了在这领域内兴趣的多样性。遗憾的是，限于时间和篇幅，我们未能小结一下边界层研究、云大气中的辐射、热带数值模式或中尺度对流的研究。但是，这些课题是重要的，读者可参阅所列举的报告和总结。

1. 热带波动

1974年 GATE 试验之前，就有不少的工作从观测和理论上提出热带波动方面的研究报告，Riehl 在五十年代对此已有记述。GATE 的直接结果更好地确定了从非洲大陆源地穿越大西洋传播的天气尺度的东风波。其平均波长约为 2500 公里 (图1)，周期约为 3.5 天，相应于约以 8 米/秒的速度向西传播。

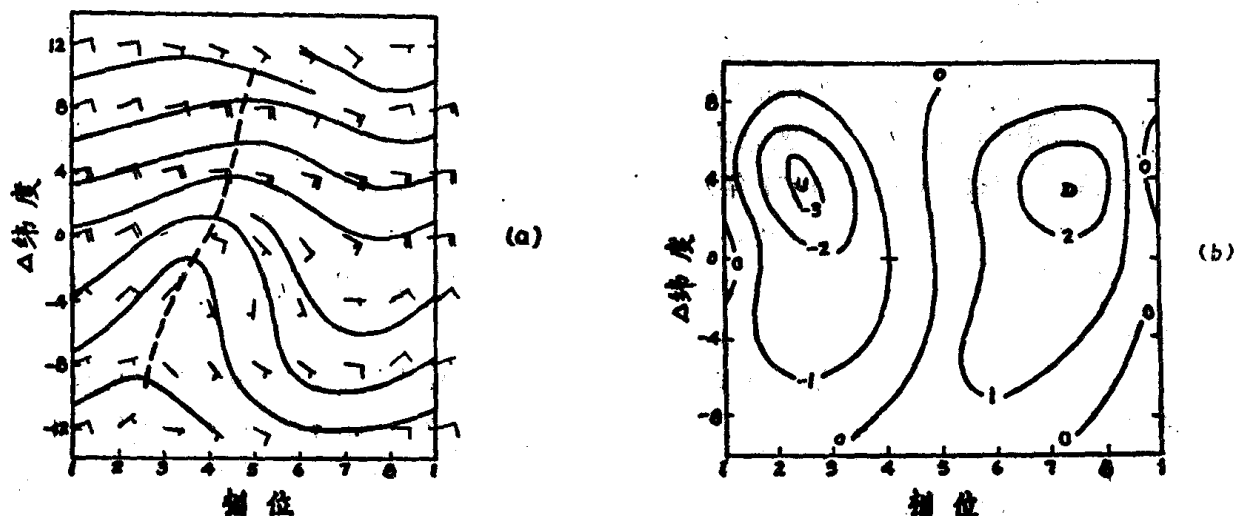
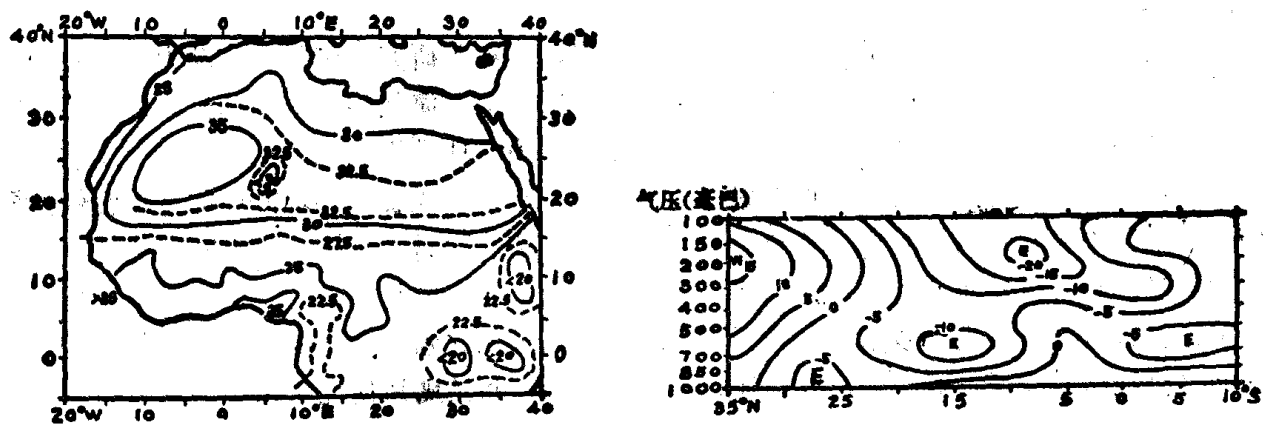


图1 (据 Reed 等人, 1977年原图)

(a) 东大西洋某28天内热带东风波700毫巴的合成流场。合成波是相对于标以相位4的波槽(700毫巴上涡度最大值处的经度)构成的(相位8是脊等等)。纵坐标表示相对于涡度最大值的纬度。涡度最大值的平均纬度约为 11°N ，平均波长约为 2500 公里(等于8个波动相位)。风向杆上一长杠表示 5 米/秒。虚线是最大涡度的槽轴(此线是外加的，在 Reed 等人 1977 年原图上没有——译注)

(b) 850毫巴上的合成铅直运动场(单位：每小时毫巴)。



(a) 八月地面日平均温度场(单位：摄氏度)

(b) 5°E 处八月纬向风的平均经圈剖面图(单位：米/秒)

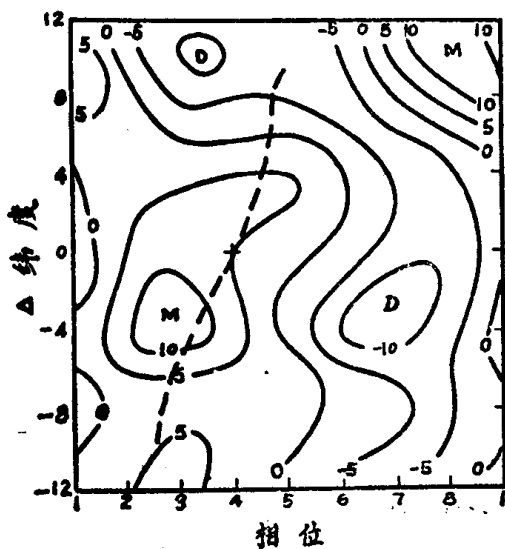
图 2 (据 Burpee, 1972年)

夏月(6—9月)这些波动作为平均东风气流不稳定的结果,发源在非洲大陆。增长性波动的能源是与水平温度分布有联系的位能和平均气流的动能。北面以及副热带中的沙漠热空气和南面较冷的西南季风气流之间的水平温度差(图2a)是同600毫巴附近的熟成东风和东风急流一致的。合成的纬向风结构(图2b)含有风的南北向和铅直向切变,每一种切变都是这二类能量转换强度的一个量度。在这种非洲大陆上空的环境中,典型波的振幅在600—700毫巴最大,如果没有摩擦耗散,约3天内可增长一倍。

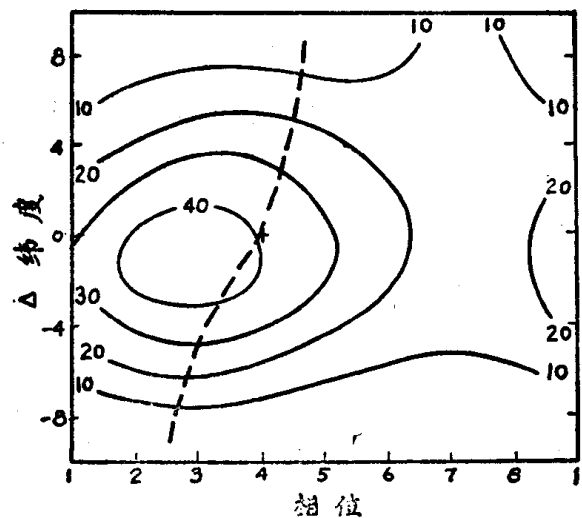
非洲以西最高洋面温度突然南移到赤道。但是,东风气流继续把大陆暖空气输送到浅薄的东北信风上空,风的铅直切变仅是缓慢地改变。由于东南季风气流同东北信风的对持,风的南北向切变在低层加大了。这样,正压能量转换在这里仍然是重要的。

天气尺度的波型把这些波中的积云对流组织了起来,以致最大降水一般出现在波轴稍稍偏西的地方,那里天气尺度的铅直上升运动也是最大(图3)。虽已证实对流受东风波的控制(或组织),但有迹象说明对流云的整体只对平均气流起着很弱的能量反馈作用,特别是在热带大西洋的上空。

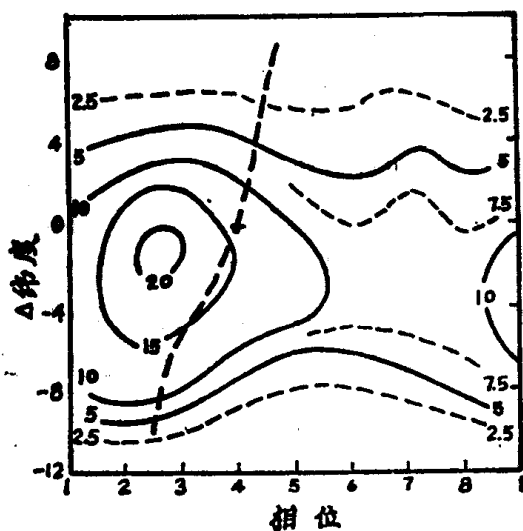
这番描述大部分是Burpee(1972年)和Reed等人(1977年)的工作,它已激起许多人



(a) 300毫巴偏离纬向平均值的合成湿度场(%),虚线表示100毫巴上的槽轴



(b) 由同步气象卫星的最明亮的红外云图主观估计得到的合成波的对流云量(%),虚线表示700毫巴上的槽轴



(c) 由船舶观测得到的平均降水率(每天毫米),虚线表示700毫巴上的槽轴

图3 (据Reed等人, 1977年)

独立的并且颇有成效的努力，以模仿热带环境中的东风波(Krishnamurti 等, 1977年; Shaw 和Rountree, 1976年; Miyakoda 等, 1976年)。而且, 许多有关稳定度的研究现在也倾向于支持正压-斜压的增长机制(例如, Mass, 1977年)。特别是, 似乎无需靠第二类条件不稳定机制来维持东大西洋的扰动, 虽然低层涡度场一般是与铅直运动和积云对流有关的。

作为对比, Nitta (1970年) 推断出潜热加热是维持热带太平洋扰动的一个重要因子(也可参阅 Wallace, 1971年 b)。这里, 积云产生的可用位能通过斜压能量转换起着直接供给动能的作用。这不过是热带地区不同地理位置扰动特征不同的一个例子。这些差别是最近一些研究的注意点, MONEX 和全球天气试验期间广泛收集到的观测资料将大大有助于这些研究。

随着对波状扰动了解的提高, 出现了许多检验弱扰动发展成热带风暴, 有时是飓风的条件的研究(例如, Gray, 1977年; Shapiro, 1977年; Erickson, 1977年)。作为风暴发展可能存在的控制因子提出来的一些物理参数(除洋面温度外)有: 风的铅直切变、最底层 100 毫巴内的正涡度、正涡度平流或水汽辐合。例如, 区分发展与不发展扰动的明显特征不是实测降水量的多少, 而是高低层涡度之间微小的差值(Zehr, 1976年; Erickson, 1977年; Arnold, 1977年)。

最后应该着重指出, 这一叙述有点过分简单了。与温带波动一样, 热带扰动之间可以有很大的不同; 而且对东风波动力学和积云对流的作用仅是从西非和东大西洋上相当少的样本中概括出来的。我们已经知道, 在天气尺度风场和温湿结构不同的其它热带地区存在有一些重要的差别。

2. 积云对流

一直在研究不同尺度(个别积云、合并云体、中尺度结构和云团)的对流的动力学。卫星云图, 特别是地球静止卫星(SMS 卫星系统)云图的应用促进了这方面的一些观测性的研究工作。从另一观点来看, 这个工作是积云动力学和云物理学的理论与数值模式的漫长历史的一部分(参阅 Cotton, 1975年)。

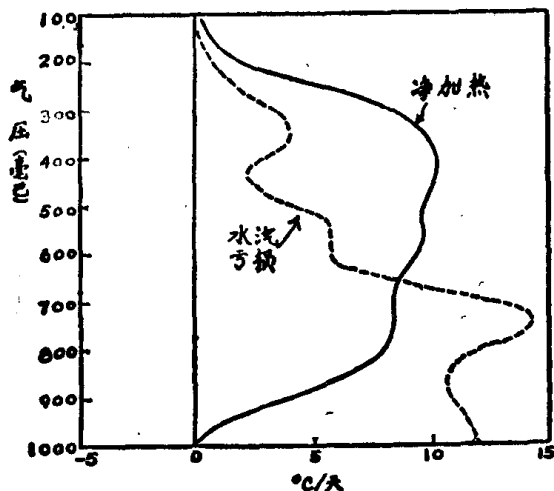


图4 热量和水汽不平衡的一个例子, 这种不平衡必须用辐射冷却和积云对流的综合效应来解释。

这些资料是一云团处于发展的成熟阶段在 GATE A/B 多边形(约 0.6×10^6 平方公里)范围内对 8 个观测时期合成的资料(据 Nitta, 1977年)

介乎观测研究和理论探讨之间的把数值模式与实况(尺度大于个别积云)结合起来的工作, 目的要估计积云对流的净效应或总效应。可以测定这些效应(净铅直运动、温度变化等), 也可以用对较大尺度运动的“反馈”来作某些估计。在考虑了许多不同的例子以后, 或许有可能说明云场四周的气象要素场是如何“控制”该地区积云体的强度和范围的。我们设想的这二个过程合起来就叫做积云对流“参数化”。当人们认识到云中微物理过程的微细变化的重要性和了解到积云云团的中尺度构造的多变性时, 如果不知道有关积云结构和生命史的许多细节就来谈论“参数化”积云的总效应, 那似乎有所不妥。然而, 一直在对这个问题作重大的努

力,并取得了一些很重要的结果。有一点尚待弄清即增长过程的“反馈”部分是否这样强,以致使一些参数云模式中的技术处理是正确的。

图4给出根据收支分析得到的一些最新结果中的一个例子(Nitta, 1977年)。间隔约为440公里的高空观测资料代表一天气尺度的网络,用这些资料来计算质量、热量和水汽的收支。深对流的特征是净加热曲线在高层有一最大值,水汽亏损的最大值在低层。

随后,把净铅直运动分解成积云尺度的上升和下沉气流(图5 a)剩余的下沉运动出现在云的四周。这一结果是在分解前述净质量铅直通量的约束之下,同时满足热量和水汽的不平衡(图4)而得出的。为了求得这样一种解,需要构造一个描述云内质量平衡和通过凝结与蒸发把水滴和水汽转换成感温变化的云模式。现已有几个适用于这一目的而并不相同的模式;最近的许多模式都是 Arakawa 和 Schubert (1974年)以及 Ogura 和 Cho (1973年)的夹卷气流云模式的变种。通过整体云模式解释的收支分析可得出云特征的详细结果:云量、降水和积云回流。图5a 和5b 给出一个这种结果的例子。

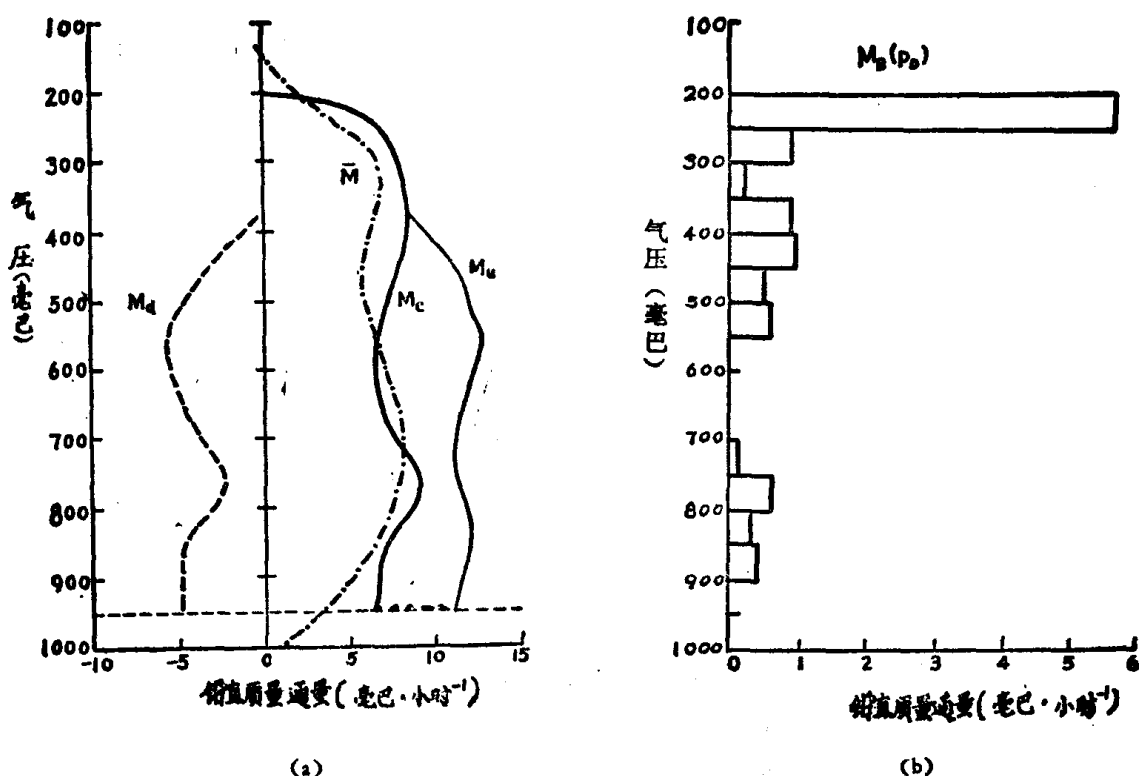


图5

(a) Nitta(1977年)求得的质量平衡的一些结果。大尺度质量输送(M)是净积云输送(M_c)和环境下沉气流(未列出)之和。净积云输送再进一步分成强上升气流(M_u)和饱和的局地下沉气流(M_d)

(b) Nitta(1977年)的一些结果,表示与不同高度上的云有联系的质量通量分布。用一个包括饱和和下沉气流在内的夹卷气流云模式来解释图4的资料,即得本结果

运动学收支的定量计算已成常规。为了减少随机误差和无代表性的资料的影响,需要合成的结果。但是,辐射加热和冷却项对云大气中的热量收支的贡献还未充分估定。现时已有一些重要的与辐射模式计算有关的工作(Ellingson 和 Gille, 1978年; Welch 和 Cox, 1977年),还有一些关于辐射项对收支的相对影响和把它们应用于云模式方面的工作(例如, Gray, 1977年; Silva Dias, 1977年)。

云模式可用来解释大尺度收支分析结果。当它们试图体现较现实的动力学和降水物理学时,就变得更为复杂。为了构成一个确定云部分和雨水部分的凝结率的现实的但还是参数的

方法，正在做许多试验。水分和下落水滴蒸发之间的转换可以决定该模式的降水率，这可以与实况进行比较。

最后，只有少数几例估计了积云对涡度收支的贡献(例如, Todd 和 Vincent, 1977年; Cheng 等, 1977年)，在对积云总体求解时一般不用它。但是 Cotton 和 Tripoli (1977年) 证实，在切变环境中的动量铅直输送对个别对流云泡的发展是重要的。最近，Stevens 等(1977年) 以及 Stevens 和 Lindzen (1977年) 用一简单模式来估计动量铅直输送，无需明显地计算积云上升和下沉气流。

3. 在降水估计方面的应用

积云对流对大尺度天气环境的反馈作用强(飓风)弱(东大西洋的初期扰动)不同。可是，即使是反馈作用弱的情况，有组织的积云对流对地面上人类活动有重要影响，尤其对降水的分布和强度更是这样。

对流参数化的云体模式能够预报模式中的降水或根据收支计算来诊断降水。另一个办法，假如存在有可用作校订的合适的“地面实况”降水，那可根据卫星云图从经验上推断降水估值。为此，有时利用雷达反射率的观测来估计降水，虽然这些结果也有赖于用有代表性的滴谱(Z-R关系)来校订。用地面站网的实测降水作校订对特定地区也是有可能的。当然，在水面上只能用雷达测量来直接比较，因为来自船舶稳定平台的这些观测资料是比较少的。遥感微波观测也已用于海洋上，但要根据雷达观测资料来校订，而后者已经过陆上降水观测资料作了校订(例如，Wilheit 等, 1977年)。

可是在 GATE 期间，一支装备有雷达测量定量降水的船队提供了一系列详细的降水估值(图6, 略)，就这类高分辨资料而言，它在时空范围方面是独一无二的。这些资料的使用才开始，但要把结果同陆地上的其它研究和各种降水估计的遥感技术进行比较。

大多数技术主要依据云的面积估计和云高或红外温度(例如，Waters 等, 1977年)。不过，必须辨认对流单体的相对强度以及区分活跃的对流云和一般的云块，因为并不是所有明亮的冷云都与降水有联系的(Cheng 和 Rodenhuis, 1977年)。另一个重要特征是合并云系和中尺度结构对总降水强度的影响(Wiggert 等, 1977年; Holle 等, 1977年)。根据连续几张卫星云图估计云块的增大，用它来识别强度(例如，Stout 等, 1977年)。此外，气象学家还利用他的专门经验来估计上述云特征的相对重要性以及不同的天气环境的影响，用它可以作出降水估计(Scofield 和 Oliver, 1977年)。

随着参数化对流模式的进展，外加有特定的机会作了极好的雷达分布[例如，GATE或佛罗里达州积云试验(FACE)]，不要很久一定会改进降水估值的方法。虽然平均误差有时接近50%，但个别估值却经常有较大的误差，有必要进行改进。可以把改进过的方法用于热带扰动、飓风和温带气旋，对全球重要地区都作对流降水的估计。

三. 飓 风

这份热带风暴研究评述的第一部分是围绕着热带气旋的物理性质来谈的。这一部分将考察我们所了解的下列几方面的最新进展：(1) 热带气旋的大尺度结构，(2) 凝结潜热的释放，(3) 辐射和(4) 海气相互作用。最后我们将讨论预告模式和飓风人工影响计划方面的一些最新进展。

1. 热带气旋的大尺度结构

用综合探空资料(Frank, 1977年 a-c; Núñez 和 Gray, 1977年) 和合成飞机资料(Gray 和

Shea(1976年)为我们提供了对热带气旋大尺度结构的更多的了解。按照资料相对于气旋的位置,对许多风暴把它们合成起来,可以得到稠密的观测网。按照风暴的范围、强度、季节或其它参数分档分析,可以揭示风暴之间的一些重要差别。在不把一个个风暴的重要的非对称性平均掉(有迹象表明,情况确实如此)的条件下,合成法提供了某类“典型”风暴的三维图形。这些分析对揭示热带风暴的重要物理性质是有价值的,在检验热带气旋的研究模式方面是有用的。

从这些研究得出的重要结果之一是更好地确定了热带气旋中的平均径向环流。特别是平均观测资料表明,在通常认为是湍流行星边界层(PBL)¹⁾的上面有相当厚一层(1—3公里)值得注意的向内的质量通量,如图7所示。即使在PBL以外的平均流入速度很小(约1米/秒),但它们的厚度很厚,这意味着在PBL上面有着显著的横向质量环流。

合成研究得到的第二个重要结果是验证了决定热带气旋移动的引导气流概念。George和Gray(1976年)发现,气旋速度与700毫巴气流相关最好,而移向则与500毫巴上的风一致。

最近的观测研究证实,热带气旋的云结构有着明显的日变化。Browner等(1977年)发现在17时(地方太阳时,下同)卷云量最大,在03时最小。Frank(1977年a)发现西北太平洋的降水有很小的日变化,午前最大,傍晚最小。不过,这些降水变化对风暴的动力结构没什么值得注意的影响。

关于热带扰动加强成热带气旋的研究早先已有总结。一直在采用理论分析、数值模式和资料分析等手段来研究这一重要问题。

2. 凝结潜热的释放

凝结潜热是热带气旋的一种重要能源,尽管认识到这一点已有一百多年了,但这种加热影响热带气旋加强和维持的机制仍然是深入研究和热烈争论的课题。因为积云对流的水平尺度只有几公里,而飓风环流所占的水平尺度在一千公里以上,气象学家们已试图从演变阶段上解释这二种尺度截然不同的运动之间的相互作用。Gray和他的同事们根据观测资料研究了小尺度的凝结热如何造成大尺度暖心结构的问题。从理论和数值模式的观点来看,通常的方法是用诸如水汽辐合那样的较大尺度的飓风参数把云尺度的潜热释放参数化。Anthes(1977年a,1977年b)和Hack(1977年)报告了具体论及该飓风问题的这方面的最新工作。当采用粗分辨率(水平格距>50公里)的模式时,这样一种参数化的方法看来是必要的,因为不必使这种尺度的格体达到饱和就可以出现大量的降水和伴生的能量释放。

另一方面,Yamasaki(1977年)和Rosenthal(1978年)最近的数值模拟表明,要是水平分辨率充分细致的话,即使没有参数化的积云对流,具有真实结构的模式热带气旋也可以发展(图8)。在这些模式中可分辨尺度的运动决定了可以是饱和的(或在液态水情况下是

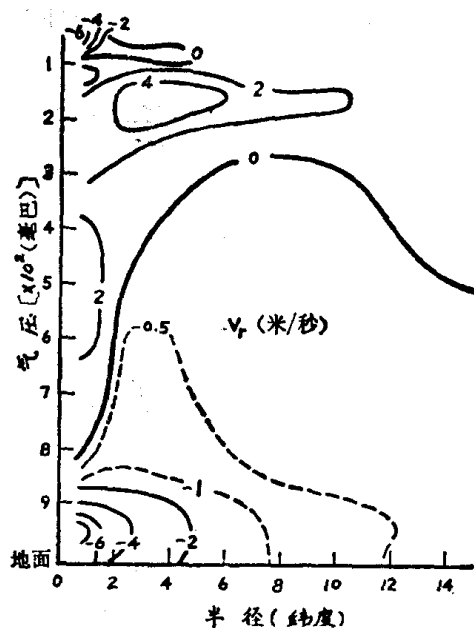


图7 大西洋西部合成飓风按方位平均的径向风分量(单位:每秒米)的铅直剖面图
(本图由 William Gray 供给)

1)这里我们把行星边界层定义为紧贴地面的小尺度湍流占优势的一层。这一层是和可以厚得多的流入层不相合的。

未饱和的) 格体内的凝结 (以及蒸发)。当灵敏的水平分辨率付之实用时, 这种凝结过程的显式处理法或许比采用参数化方案更可取, 后者常有一些在大尺度系统演变中起重要作用的经验因子或特定的假定。Rosenthal (1978年) 的一个值得注意的结果强调指出, 在条件不稳定大气中积分流体静力原始方程组不一定会引起计算不稳定或其它数值方面的困难, 如同五十年代和六十年代大家所认为的那样。

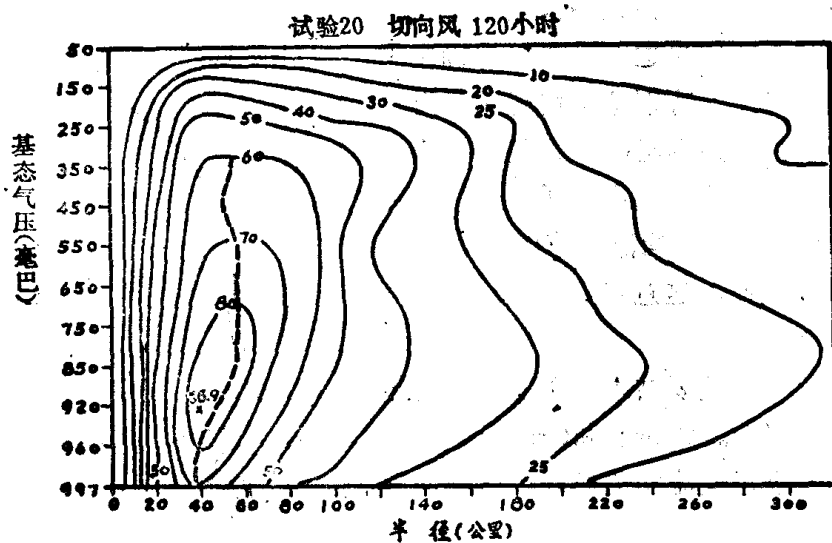


图 8 一个不用积云参数化的模式飓风所产生的切向风分量 (单位: 米/秒) 的铅直剖面图 (Rosenthal, 1978年)。

利用微波辐射仪由卫星估计瞬时降水率 (Adler 和 Rogers, 1977年) 可能大大有助于我们对热带气旋中潜热释放的时空可变性的了解。这是首次有可能估计降水的瞬时空间分布。这些观测资料可以帮助监视气旋的加强以及在风暴接近陆地时估计洪水泛滥的可能威胁。

3. 辐射

因为和非绝热凝结加热率 (每天 $100-400^{\circ}\text{C}$) 相比, 非绝热辐射加热率 (典型情况每天 1°C) 比较小, 所以辐射对热带气旋发展和维持的影响相对来讲不太受到注意。可是, 最近 Gray 和他的同事们已提出, 对流的日变化以及弱而深的流入层可以由飓风的云内区和相对无云的环境之间不同的辐射冷却来解释 (Gray 和 Jacobson, 1977年)。Fingerhut (1978年) 所作的数值模拟支持辐射加热的水平变化可以产生显著的大尺度散度场这一想法。不过, 也许辐散风分量的日变化和伴生的凝结可以与风暴旋转分量中仅为次要的变化一起出现, 因为旋转风适应辐散风分量的小变化需要很长一段时间。辐射在热带气旋中的作用现时还不清楚, 但是上述最近的研究认为, 在实际风暴中它也许比以前所想象的更为重要。

4. 海气相互作用

一直引起注意的热带气旋问题的另一个方面是飓风和海洋之间的相互作用。利用飞机观测资料 (Moss 和 Merceret, 1976年; Moss, 1977年) 和数值模式 (Anthes 和 Chang, 1978年) 的研究工作表明, 飓风的 PBL 是由原约 $500-1000$ 米的全混合层组成的, 其中位温、比湿和风随高度不变。飓风的 PBL 看来不是热力驱动的而是动力驱动的, 感热输送可能比以前所想象的小很多。尽管 PBL 中的空气流向低压时有绝热冷却作用, 但热量从高空湍流输入 PBL 似乎仍足以维持水平方向等温的 PBL。Tuleya 和 Kurihara (1978年) 所作的飓风登陆模拟表明, 蒸发的抑制是造成登陆风暴减弱的最重要的因子。

Johnson (1977年) 和 Black (1977年) 研究了海洋对大气的响应。这些研究业已证明海洋中的涌升、机械混合和惯性-重力波都是对移行飓风的响应。Elsberry 等 (1976年) 以及 Chang 和 Anthes (1978年) (图9, 略) 所作的数值模式研究表明, 一定要考虑地面应力驱动的铅直混合才能解释观测到的海洋混合层对热带风暴的热力响应。

5. 飓风预告模式

Hope 和 Neumann (1977年) 在一篇世界范围的综合评述中, 引用了在各预报中心使用的预告热带气旋移动的 31 个全业务模式。其中约 80% 是纯统计的, 10% 是纯动力的, 其余 10% 是统计-动力的。后一类模式在统计预告的方案内利用了数值模式的输出结果。纯统计模式占很大的优势, 这与以下事实有关: 世界上许多受热带气旋影响的区域缺少足够的计算能力或初始分析来作全业务数值预报。而且, 即使是在具有足够计算和分析能力的地区, 直至最近也未证明数值模式能改进统计方法导得的结果。

也许最近几年热带气旋研究的最大实际应用是改进动力模式, 使之能预告热带气旋的运动和强度。目前, 这些模式在预告风暴 48 小时路径方面已有长足的进展, 但还不能预告强度。

现时业务上用来预告风暴运动的最先进的飓风模式是国家气象中心 (NMC) 的 10 层模式 (Hovermale 和 Livezey, 1977年)。把潜热加热和 PBL 中的摩擦力参数化的这个模式对水平分辨率为 60 公里的 50×50 个格点作运算。该网格跟着风暴一起移动, 保持风暴处于预告域的中央。过去几年, 该模式已对威胁美国大陆的几个风暴作了业务运算, 它的性能满意地比得上国家飓风中心 (NHC) 现在使用的其它统计、统计-动力和正压模式以及正式的预报。的确, 该模式 48 小时预报的平均水平似乎比其它方法要好。在 1977 年飓风季节, 该 NMC 模式连同桑德斯正压模式 (SANBAR) (Sanders 等, 1975年) 一起对墨西哥湾的飓风 Anita 作出了杰出的预报。

改进统计模式的研究也在续继。最有前途的似乎是统计-动力模式。凡是大西洋热带气旋经过的地方, 在 1973—1976 年里, 平均而言, 统计动力的 NHC-73 模式 (Neumann 和 Lawrence, 1975年) 和正压的 SANBAR 模式优于 NHC 日常业务使用的其它预告模式。可是, 正如 Neumann (1977年) 所指出的那样, 新的客观分析方法的引用使某些统计模式 (包括 NHC-73) 的性能有所逊色。NHC 的最近工作朝着调整模式的方向开动, 使它们对分析 (Leftwich 等, 1977年) 上的改变不那么敏感。还有 Monte-Carlo 检验方案 (Neumann 等, 1977年) 可用来取消统计上不显著的预告因子。

除了 NMC 的工作之外, 还有其它研究组在研究用动力学模式改进飓风预告的方法。Ley 和 Elsberry (1976年) 已在试验一个三层三嵌套的预报模式, 最里面的分辨率是 51 公里。Madala 和 Hodur (1977年) 正在研制一个五层嵌套模式, 用来预告太平洋台风。地球物理流体动力学实验室的工作组 (Kurihara 等, 1977年) 以及国家飓风和实验气象实验室的工作组 (Jones, 1977年 a, b) 已研制出三维的嵌套飓风模式, 虽然它们本来是为研究工作而设计的, 但也会对业务模式的改进给予大力支持。

飓风模式用实际资料初值化似乎是能够改进飓风业务预告的一个重要方面。Hoke 和 Anthes (1977年) 把一个动力初值化方案用一个较普通的静力初值化方案作了比较。Shewchuk 和 Elsberry (1977年) 以及 Sanders 等 (1977年) 发现精确的初始位置和路径的信息能改进风暴位置的短期预报。Kurihara 和 Tuleya (1978年) 提出一个初值化飓风边界层的动力方案。按上述方向进一步研究下去, 并把卫星资料结合进初值化处理中去, 有希望把现有动力模式

的预报误差减到它们的最小值。

6. 热带气旋的人工影响

尽管最近缺少符合播撒标准的大西洋飓风，但是飓风基础研究领域中的进展一直与狂飙计划(Project Stormfury)有关(Sheets 和 Lascor, 1977年)。特别值得注意的是最近在探测飞机的测量能力方面的改进(图10和11, 略)。这些飞机现在能以前所未有的质量提供积云对流的云物理性质、飓风PBL的湍流结构和洋面情况等详细资料。

美国的测量工作和可能的人工影响试验(狂飙计划)集中在大西洋上。另外，菲律宾共和国已在考虑在太平洋上作台风人工影响试验的可行性。根据“狂飙”的经验，计划再加用一台机载多普勒雷达探测风暴环流的变化，使预定在两大洋上的试验就有充分的机会进行新的测量和人工影响试验。

四. 结论

这份短评记述了热带波动、对流的整体效应和遥感降水估计方面的几例重要的研究结果。飓风动力学研究也已进展到检验海气相互作用和辐射强迫作用等问题的阶段。然而，更完善地了解飓风结构和恰当地表示积云对流仍是观测规划和模式工作的焦点。

记住这些结果，有可能断定看来已经肯定的研究兴趣方面的几个发展方向。首先，对积云对流如何组织起来的兴趣越来越大，包括云团的内部结构、中尺度组织和烈性风暴、个别积云之间的云和云的相互作用。有组织的对流和较大尺度运动的相互作用看来确与对流随机分布的情形不同。与积云组织问题紧密相关的是边界层的影响、边界层的对流控制和来自成熟积云的边界层的反馈作用。

巴巴多斯海洋和气象试验(BOMEX)、GATE和其它热带试验对研究工作的促进很大。数据资料是十分充分、称心如意和独一无二的。有些重要结果就出自这些资料，只要继续给予这项工作以现有规模的人力和物力的支持，还将出现一些预见不到的重要结果。

这项研究的潜在的应用价值很大，由远距离站的资料估计对流降水就是一例。在这些技术方法发挥它们的全部潜力之前，应该同意使用参数模式和经验关系式。

不久的将来，还有几次现场试验将为热带分析提供新的资料。MONEX将给出季风环流的详细观测资料和季风扰动及其中的对流的分析。同时，全球天气试验将提供一全球资料基地，包括完整的热带赤道地区的地球静止卫星资料、高空飘浮气球的观测资料和飞机下投式探室仪的资料，它们将补充已扩大的热带高空探测计划。这样一份原始资料将有助于考察热带波动和对流的全球特性。我们也会有能力更清楚地推断与行星环流和与中纬度气象特征的相互作用。

其次，热带气象中的研究问题已经变得越来越跨学科了。找一些用几种专业词汇来表示的科学问题是极为普通的事，辐射和天气尺度的云量，边界层、湍流通量和对流输送，海洋混合层和热带气旋环流。而且，当今注明是“热带”气象的问题常常在温带也有类似的问题，来自许多学科的科学家在致力于弄清楚热带大气的特征。

最后，根据三维模式作热带气旋路径的数值预报是可行的，在更精确地知道初始条件的情况下它会越来越精确。而且，人工影响云和云系(包括飓风)的可能性仍是一件富有吸引力的冒险行动，至少也是自然科学研究的部分动力。在未来几年之内存在有这样一种可能性，即通过影响风暴强度作几次试验，以测定一下我们的物理知识。

致谢：这篇总结是用了许多科学家的论文写成的，但文中只提到了他们之中少数几位的名字。我们特别要向在第11届飓风和热带气象技术会议上提出文章的作者们致以谢意。

参 考 文 献

- Adler, R. F. and E. B. Rodgers, Satellite-observed latent heat release in a tropical cyclone, *Mon. Wea. Rev.*, 105 (1977), 956—963.
- Anthes, R. A., The dynamics and energetics of mature tropical cyclones, *Rev. Geophys. Space Phys.*, 12 (1974) 495—522.
- Anthes, R. A., A cumulus parameterization scheme utilizing a one-dimensional cloud model, *Mon. Wea. Rev.* 105 (1977 a), 270—286.
- Anthes, R. A., Hurricane model experiments with a new cumulus parameterization scheme, *Mon. Wea. Rev.* 105 (1977 b), 287—300.
- Anthes, R. A. and S. W. Chang, Response of the hurricane boundary layer to changes of sea surface temperature in a numerical model, *J. Atmos. Sci.*, 35 (1978) No. 7 1240—1255.
- Arakawa, A. and W. H. Schubert, Interaction of a cumulus cloud ensemble with the large-scale environment, *J. Atmos. Sci.*, 31 (1974), 674—701.
- Arnold, C. P., Tropical cyclone cloud and intensity relationships, *Atmos. Sci. Paper*, 1977 (No. 277) 154, Colorado State Univ., Ft. Collins.
- Black, P. G., Composite response of the ocean to hurricane forcing (Paper presented at the 11th Technical Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, Miami Beach), AMS, 13—16 Dec., 1977.
- Browner, S. P., W. L. Woodley, and C. G. Griffith, Diurnal oscillation of the area of cloudiness associated with tropical storms, *Mon. Wea. Rev.*, 105 (1977), 856—864.
- Burpee, R. W., The origin and structure of easterly waves in the lower troposphere of North Africa, *J. Atmos. Sci.*, 29 (1972), 77—90.
- Chang, C. P., Monsoon meteorology, *Geophys. Pure Appl.*, 115 (1977), 1087—1529.
- Chang, S. W. and R. A. Anthes, Numerical simulations of the ocean's nonlinear, baroclinic response to translating hurricanes, *J. Phys. Oceanogr.*, 8 (1978), 468—480.
- Cheng, L., Yip T. C. and Cho, H. R., Dynamic effects of cumulus clouds as observed in large-scale potential vorticity budget (Postprints, 11th Technical Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, Miami Beach), AMS, Boston, 1977, 35—39.
- Cheng, N. and D. R. Rodenhuis, An intercomparison of satellite images and radar rainfall rates, *ibid*, 1977, 224—226.
- Cotton, W. R., Theoretical cumulus dynamics, *Rev. Geophys. Space Phys.*, 13 (1975), 419—448.
- Cotton, W. R. and G. J. Tripoli, Implications of three-dimensional numerical simulation experiments on the cumulus scale to the parameterization of cumulus convection, (Postprints, 11th Technical Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, Miami Beach), AMS, Boston, 1977, 502—507.
- Ellingson, R. G. and J. C. Gille, An infrared radiative transfer model, Part 1, Model description and comparison of observations with calculations, *J. Atmos. Sci.*, 35 (1978), 523—545.
- Elsberry, R., T. Fraim and R. Trapnell, Jr., A mixed layer model of the oceanic thermal response to hurricanes, *J. Geophys. Res.*, 81 (1976), 1153—1162.
- Erickson, S. L., Comparison of developing vs. non-developing tropical disturbances, *Atmos. Sci. Paper*, 1977 (No. 274) 81, Colorado State Univ., Ft. Collins.
- Fingerhut, W. A., A numerical model of a diurnally varying tropical cloud cluster disturbance, *Mon. Wea. Rev.*, 106 (1978), 255—264.
- Frank, W. M., The structure and energetics of the tropical cyclone, Paper 1, Storm Structure, *Mon. Wea. Rev.* 105 (1977 a), 1119—1135.