第25卷 第3期
2001 年 5 月

大 气 科 学
Chinese Journal of Atmospheric Sciences

Vol. 25, No. 3
May 2001

我国热带气旋研究十年进展*

陈联寿　　孟智勇

（中国气象科学研究院，北京　100081）

摘　要　90 年代初，国内外开展了几次大规模的热带气旋现场试验，取得了许多宝贵的加密观测资料．利用这些资料，对热带气旋尤其是异常热带气旋开展了一系列的研究．我国科学家在国家科技攻关 85-906 项目中的"台风科学、业务试验和天气动力学理论的研究"等与热带气旋有关的课题和国际热带气旋研究合作项目"SPECTRUM（Special Experiment Concerning Typhoon Recurvature and Unusual Movement)"中对台风的突变现象和预报技术进行了重点研究．从而在过去 10 年中，在台风运动突变、结构和强度突变、台风暴雨的突然增幅、热带气旋路径预报方法研究等方面都取得了新的进展．作者将对这些进展作简要综述．

关键词：热带气旋；台风；中国

1　引言

我国是世界上受热带气旋影响最为严重的国家之一，热带气旋登陆十分频繁，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 号强台风（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，竟袭击了福建、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 年内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．

过去 10 年中我国连续不断地开展了热带气旋的研究工作，这也是减轻灾害的重要对策．尤其在 1991～1996 年间，组织了国家科技攻关 85-906-07"台风科学、业务试验和天气动力学理论的研究"等课题。并于 1993～1994 两年夏季开展了代号为"CATEX (China Abnormal Typhoon Experiment)"的国内热带气旋科学试验[1]，把部分靠近沿海即将登陆的 8 个台风选为目标试验台风，取得了大量地面加密资料和雷达、卫星等资料。此外，美国和前苏联 1990 年在西北太平洋发起了代号分别为 TCM-90 和 TYPHOON-90 的外场科学试验。联合国亚太经社理事会和世界气象组织（ESCAP／

2000-01-18 收到，2001-10-18 收到再改稿
* 国家自然科学基金资助项目 49775264

万方数据

WMO）台风委员会响应这一国际科学活动，也组织了代号为 SPECTRUM-90 的外场热带气旋科学试验[2]．这三个试验的共同科学目标在于采集热带气旋内部高低空和热带气旋周围环境以及海面和深海的加密观测资料，以研究热带气旋的异常运动。三个试验独立进行，分工合作，资料共享．这是 20 世纪规模最大的一次热带气旋外场科学试验。这次国际合作的热带气旋科学试验共选取了 7 个目标台风，这些目标台风的特征包括路径摆动、移向突变和双台风回旋等异常路径，有很高研究价值（表 1）。这次试验取得了丰富的热带气旋内部和环境加密观测资料。利用这些宝贵的加密观测资料，85-906-07 课题的研究得以顺利实施。这一项目于 1995 年底完成，部分成果已投入业务应用．另外，在此期间，我国还建立了一套热带气旋数值预报方法（85-906-03），首次系统地在业务预报中应用并发报．与此同时，我国还进一步发展了以统计技术和统计动力相结合的技术为基础的热带气旋客观预报方法（85-906-05），预报时效达 2～3 天。以上预报技术 24、48 小时的平均预报误差分别小于 200 km 和 400 km。上述科研项目的完成使我国热带气旋的研究和业务技术取得了明显的进步。通过该项目的实施及其以后几年来的研究，我国热带气旋研究工作在热带气旋运动尤其是异常运动的机理、热带气旋结构和强度变化机制、热带气旋暴雨以及相应预报方法的研制等方面都取得了新的成果。本文将从以下几个方面对所取得的研究成果作一综述。

表 1　SPECTRUM 目标试验台风的特征

目标台风名	Winona Yancy Abe Dot Ed Flo Gene
转向台风	Winona Abe Flo Gene
西移台风	Yancy Dot Ed
双台风三对	Yancy-Zola Abe-Becky Ed-Flo
受台湾地形影响	Yancy Dot
摆动路径	Yancy（8 月 18 日之前）
突然北折路径	Yancy（8 月 18 日）
突然西折路径	Yancy（8 月 19 日）
打转路径	Yancy（8 月 19 日之后）

2　热带气旋的结构

热带气旋结构和结构的变化是热带气旋研究最基本的领域．结构变化不仅是结构本身的问题，它还影响到热带气旋的强度变化、路径的偏折[1)]、热带气旋暴雨落区和雨强甚至风暴潮的强弱。

热带气旋结构和结构变化除了受其能量输送、中尺度强对流活动及其分布等影响外，还受到环境的重要影响，尤其是中纬度环流系统对变性等的巨大影响[3]。观测分析[4]表明，深秋季节，冷锋侵入热带或低纬度地区与热带气旋相遇有时会造成热带气旋的空心结构。小股冷空气会侵入热带气旋的内部并造成眼壁、强对流及热带气旋暖心结构的破坏．这是由于冷空气的侵入使得热带气旋眼区变得比较稳定，眼壁附近的最大风

1）雷小途，热带气旋的结构对其路径偏折的分析，第 11 届全国热带气旋科学讨论会论文摘要文集，中国气象科学研究院，1999，58～60.

万方数据

速突然消失，而在热带气旋与冷锋相接的热带气旋外区由于气压梯度加大而导致风速加强。

台风周围的小尺度涡旋也会影响台风的结构．基于准地转正压模式，讨论了线性平流、β项以及非线性平流在不同尺度涡旋演变过程中的作用[5]．结果表明，线性平流的作用将造成初始扰动的发展，并保持4波对称性类螺旋结构（图1b）。β效应可造成热带气旋的非对称结构（图1c），非线性平流的作用主要是使小尺度涡旋破碎，并形成更小尺度的涡旋（图1d）．综合考虑上述三项所得到的台风非对称结构以及台风边缘区域小尺度涡旋的分布状况（图1e），台风结构的这种变化在弱引导环境中会使其路径产生摆动甚至打转，引起路径与引导气流的偏差．

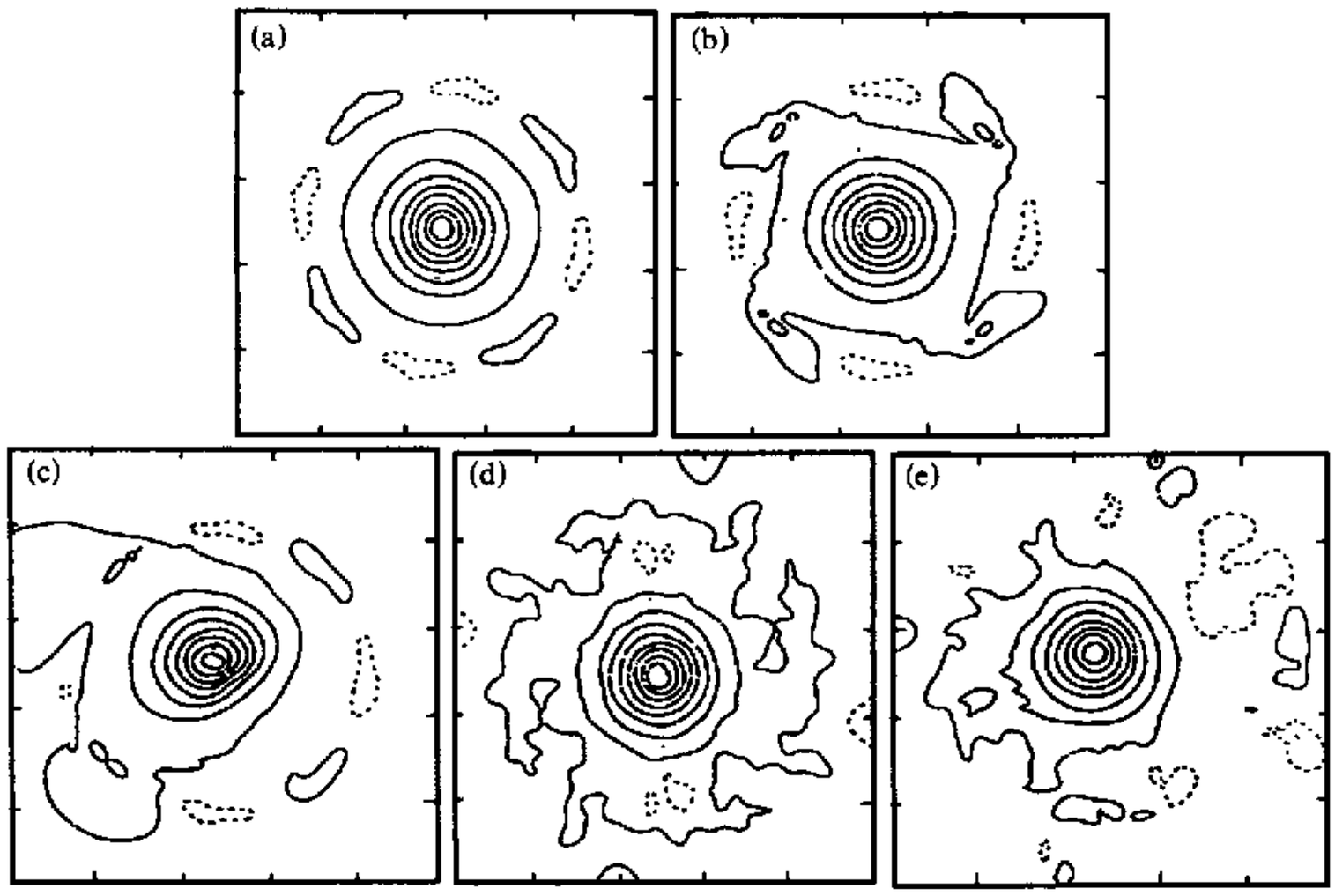

图1 不同物理过程作用下台风边缘区域小尺度系统与台风的模拟流函数分布
实线表示负值，虚线表示正值，区域面积为2000 km×2000 km
（a）积分初始场；（b）只考虑线性平流；（c）只考虑β效应；
（d）只考虑非线性平流；（e）三种因子的综合效应，（b）～（e）为24小时积分场

地形也是影响热带气旋结构变化的一个重要因素．数值研究[6]表明当台风接近台湾岛时，在岛屿的另一侧会有诱生涡旋生成。在适当条件下，台风原来的低层中心因地形的阻挡而消失，高层中心移过岛屿，其相应的正涡度中心与低层的诱生涡旋耦合，使诱生涡旋得以发展加强而代替原来的台风。模拟结果清晰地展现了这一“跳跃”过程．分析表明岛屿诱生涡旋的形成与山脉背风坡降压有密切关系．此外，地形高度、台风强度、登陆点以及海峡宽度也会影响诱生涡旋的强度．尤其当原台风上空的流出气流层罩住诱生低压时，其抽吸作用将会使低压得到更大的发展而代替原来的台风，原台风则由于脱离其流出气流而消亡．这种跳跃现象往往导致路径预报的失败．但出现这种现象的频率不高．

万方数据

3　热带气旋的强度变化

统计研究表明[7]，平均有 16%的热带气旋移到中国沿海突然加强，另有一些则移到沿海突然减弱甚至消失，热带气旋结构和强度变化与以下物理因子有关[1)]。

(1) 冷空气　冷空气可使热带气旋变性而具有温带斜压特征。这种结构特征将使涡旋获得斜压能量，位能转化成动能而使涡旋得以迅速加强发展。弱的冷空气将使涡旋位势不稳定能量聚集，造成强对流发展而使弱的涡旋再生。另一方面，如果冷空气过强，会彻底破坏热带气旋的暖心结构，将其填塞消失。

(2) 急流　热带气旋趋近高空西南急流将加剧热带气旋上空的流出气流。很多热带气旋在这支吹向东北方向的急流和急流南侧负涡度区的共同作用下得到迅猛发展。但当热带气旋移入这支急流下方遭遇强垂直切变时，热带气旋往往突然减弱甚至消失。

(3) 西风槽　西风大槽 TUTT（Tropical Upper Tropospheric Trough）的涡度下传、槽前高压对低层上升运动的激发等都会改变热带气旋的结构并使其强度发生变化。中纬度中低空西风槽与热带气旋南北同位相时，往往会加剧热带气旋外围的切变，激发热带气旋螺旋云带中尺度系统的活动，从而使热带气旋加强。

(4) 中小尺度系统　热带气旋中的中小尺度系统将显著影响热带气旋的强度变化。数值试验的结果[8]表明，台风内部中尺度强对流运动的发展、强降水和潜热释放将引起台风内部风速的增强。这种内部中尺度强对流运动的发展往往是由高空流出气流的突然增强而激发起来的。中小尺度强对流活动往往也出现在台风前部，尤其是在台前飑线强对流云带中，其强烈天气甚至超过台风本身。1989 年 23 号热带风暴 9 月 15 日傍晚登陆浙江温岭，其右前方强对流带中竟频发龙卷，袭击了江苏 11 个县。观测研究[9]表明，这类中小尺度系统往往出现在热带气旋前进方向的右侧。也有部分南海热带气旋则出现在前进方向的左侧。这类中小尺度系统的发展往往造成热带气旋的增强。

(5) 地形作用　地形在一定条件下会改变热带气旋的局部结构而使其强度变化。陆地磨擦影响总的趋势是使热带气旋减弱消亡，但也有短时间使热带气旋增强的作用。当热带气旋趋近海岸、陆地、岛屿时，向岸风或沿海山脉迎风坡的辐合作用将加剧对流运动，陆地上山脉地形增强的辐合对流会不断产生中尺度对流系统。地形的这些作用均会使热带气旋得到短时间的加强。

(6) 海面温度和喷沫（spray）　海温是影响热带气旋强度变化的重要因素。当热带气旋从暖海面移经冷海面（或反之）或热带气旋移到前一个热带气旋遗留的冷尾迹时，强度会对海温的变化产生响应。研究结果[10]表明，海洋表面温度变化可以引起热带气旋中心气压的突然变化，例如下垫面海温升高 2°C 时，热带气旋中心气压将加深 16 hPa。这种响应时间为 8～12 小时。这说明，一个从冷海面移经暖海面的热带气旋，其强度将显著加强。另外，数值试验[11]还表明，在一个热带气旋冷尾迹上移动的热带气旋，其强度往往减弱，但由于其他因素的作用也并非绝对如此。最近的研究[12]还表

1) 陈联寿，台风科学试验及其主要成果，中美减轻自然灾害研讨会，1997 年 12 月 19～22 日，北京，1997，64.

万方数据

明，由于台风强风所引起海面的喷沫（spray）蒸发将影响台风边界层的热量交换和分布从而会影响台风的强度变化，这种作用将使台风的加强率减慢.

4 热带气旋的运动

影响热带气旋运动的因子很多，除经典的引导气流对运动有重要作用外，本文将从不同尺度系统和不同纬度环流的相互作用、热带气旋的内部结构以及下垫面地形等因素对运动的影响进行论述。

4.1 不同尺度系统的相互作用

在影响热带气旋运动的诸因子中，大尺度环境引导气流是最重要和最基本的．热带气旋的运动突变经常是由大尺度环流的调整所引起，比如副高的进退、ITCZ 的断裂、赤道缓冲带的形成和消退、行星波经纬向流型的转换以及信风和季风的交替等等都会引起相应热带气旋运动的突变．大尺度环流从一种状态向另一种状态的转变将引起热带气旋周围环境引导气流的突然变化，从而导致热带气旋的运动发生突变．研究结果[13]表明基本气流速度的变化会显著影响热带气旋的运动，这种现象对称热带气旋表现得比非对称热带气旋明显。另外，水平均匀的具有不同垂直结构的环境气流可造成热带气旋显著不同的运动.

除大尺度天气系统以外，热带气旋环流周围的其他天气尺度系统也可通过与热带气旋的相互作用导致热带气旋的异常运动。研究表明[1)]，东风波或另一个热带气旋的靠近，就会引起热带气旋运动的突变。当热带气旋位于东风波波谷西侧，热带气旋将向西南方向转折。当热带气旋位于东风波谷的正南方，热带气旋将向偏北方向移动，当热带气旋位于东风波波谷的东侧时，热带气旋将向西北方向移动．这将形成一种摆动运动。

热带气旋的运动有时还会受到其周围中小尺度系统的影响。研究结果表明[14]热带气旋与其周边中尺度系统（MSS）的相互作用也可导致热带气旋路径的摆动（图 2)。当 MSS 位于热带气旋的东北象限时，热带气旋路径摆动的振幅最大（图 2a，实线)，当 MSS 位于东北或东南象限时，热带气旋路径将比无 MSS 的路径偏西（图 2a 实线、图 2d)，而当 MSS 位于西北或西南象限时，热带气旋路径将偏东（图 2b、c)。

4.2 动力和热力非对称结构对热带气旋运动的影响

近年来，热带气旋非对称结构对运动的影响越来越引起科学家的关注，尤其在弱环境流场中，这种影响将变得十分显著．对 SPECTRUM-90 三个转向的目标试验台风 Abe、Flo、Gene 的研究[15,16]表明，这三个台风在转向前其等压线呈东北密、西南疏的不对称分布，而且这种不对称分布围绕热带气旋中心作逆时针旋转，当等压线稠密区转到西南象限呈西南密、东北疏的不对称分布时，台风将减速，并向偏北和东北方向转向，而且台风具有前一种不对称分布时的移速是具有后一种不对称分布时的 3.2 倍。用正压模式采用四个不同的初始场对台风移速作了数值模拟，这 4 个初始场的代号分别为：ANE——等压线东北方向稠密的不对称结构，SCC——同心圆结构，ASW——西

1) Chen Lianshou, Cause Analysis on Tropical Cyclone Unusual Motion. International Conference on Tropical Meteorology, Brisbine, Australia, 1988.

万方数据

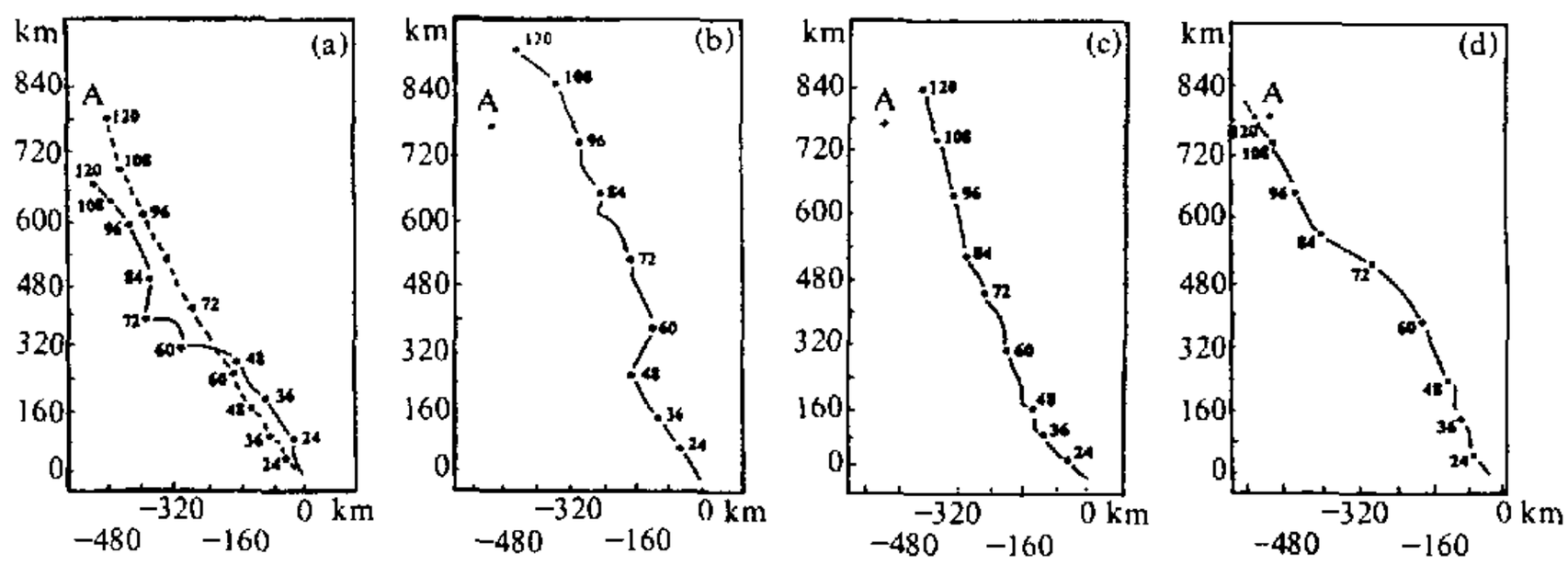

图 2　不同象限的中尺度对流系统对热带气旋路径的影响
(a) 虚线表示无中尺度系统，实线表示中尺度对流系统位于东北象限；
(b) 中尺度对流系统位于西北象限；(c) 中尺度对流系统位于西南象限；
(d) 中尺度对流系统位于东南象限
A 点表示热带气旋无环境中尺度系统影响时第 120 小时的积分位置

南方向稠密的不对称结构，ASW+SNC——西南方向稠密的不规则圆结构。模拟结果（表 2）表明，具有东北方向等压线稠密结构台风的移速是两个西南方向稠密台风移速的 5.8 倍和 7.7 倍。这在理论上证实台风运动速度的减低往往是其转向的前兆。

表 2　4 种不同初始台风结构的相应移速（km/ d）

EXP(1)	EXP(2)	EXP(3)	EXP(4)
ANE	SCC	ASW	ASW+SNC
572	185	97	74

用 β 平面上准地转正压涡度方程所做的数值试验[17]表明，β 项将引起热带气旋等压线东密西疏的不对称，而涡度平流项则有相反的作用，使不对称变得对称或均匀化。试验结果还表明（图 3），热带气旋东密西疏的不对称越强，向西的移速越快。上述研究表明热带气旋内部的非对称结构对其运动有明显的影响。

此外，利用 TCM−90 的加密观测资料，研究了加密观测在热带气旋动力非对称结构分析中的重要性[18]。研究结果表明，应用加密探空和飞机下投资料的分析场减去无加密观测资料的 T42 分析场，所得 500 hPa 的差值流场上的台风环流区域会出现一对偶极子（图 4a、c）。流场的不对称结构在加入加密探空和飞机下投资料后就显示了出来。分析发

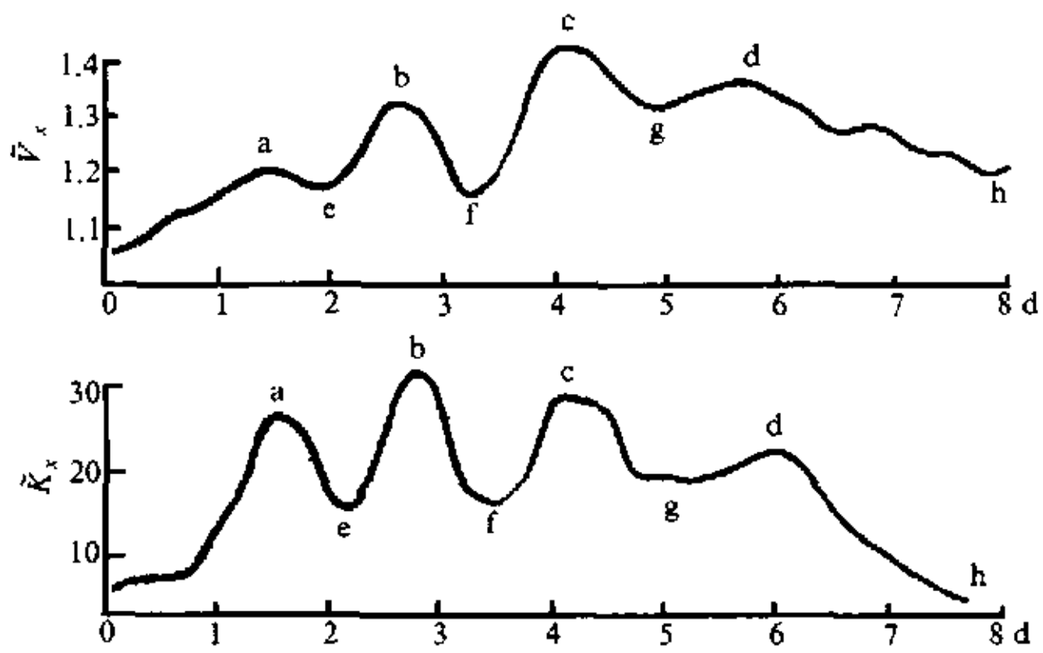

图 3　X 方向的不对称度 $\tilde{K}_x$ 与偏西移速分量 $\tilde{V}_x$ 随时间的演变
（$\tilde{V}_x$ 的单位：km / 6 h）

万方数据

现，该偶极子的气旋和反气旋之间的通风流恰与台风移向一致。而且，200 hPa 偏差流场上同时出现了另外一对辐散、辐合中心的偶极子结构（图 4b、d），两个中心的连线也恰与台风运动方向一致。这种不对称流场对诊断台风的移动方向是有参考价值的。

除了动力不对称结构，热带气旋的热力不对称结构也会显著影响热带气旋的运动。热带气旋内部中尺度强对流系统的存在就是热带气旋热力非对称结构的一种表现。数值研究表明[19]，热带气旋有向其内部对流不稳定区运动的趋势。在弱环境流场中，这种热力非对称结构往往可成为一种重要因子而导致热带气旋打转、转折或偏离弱环境引导气流等种种异常运动。而且，对流越强，这种引导作用越大（图 5）。

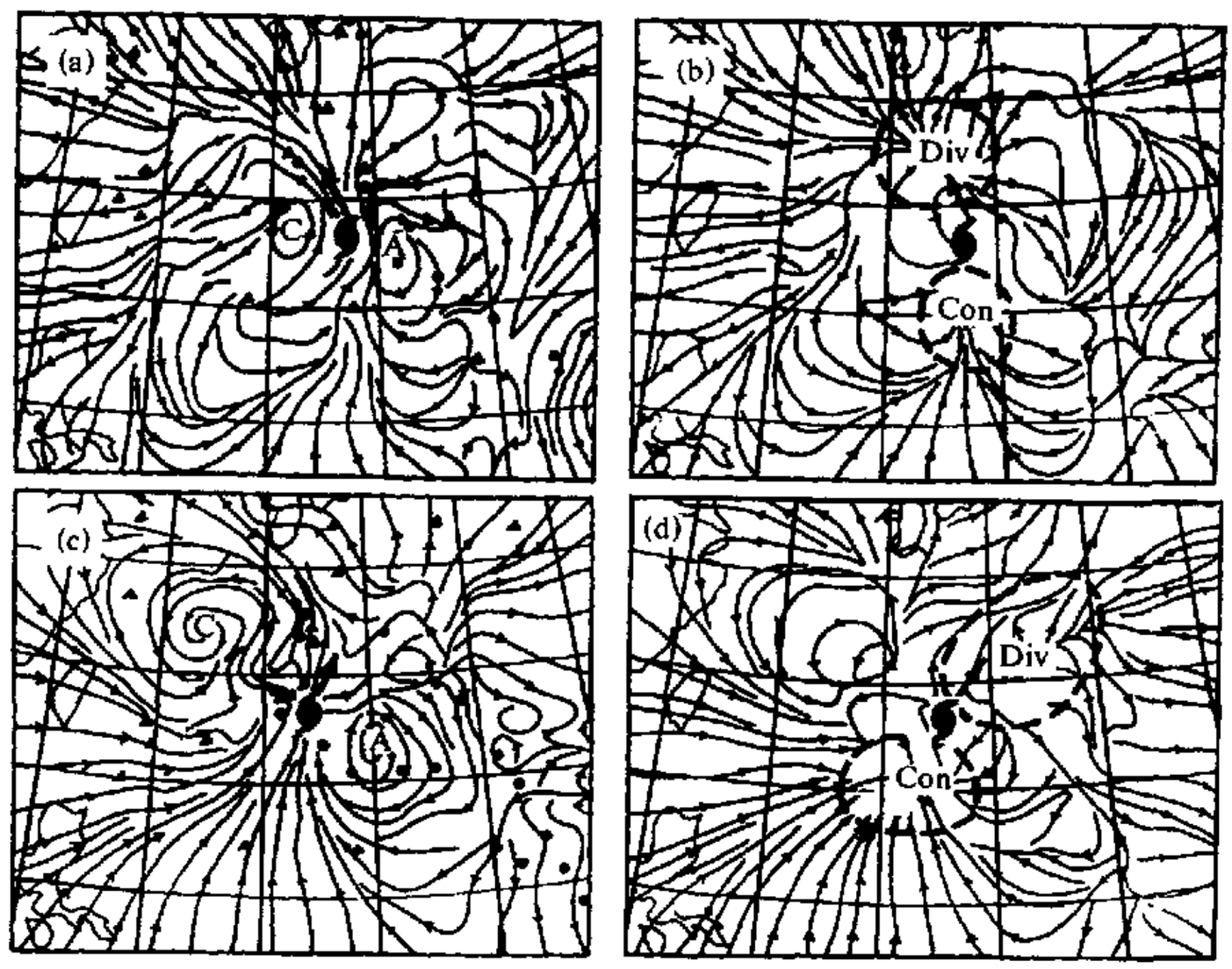

图 4 台风 Flo（9019）的偏差流场，△：无线电加密探空，·：飞机下投探空
A 表示反气旋中心，C 代表气旋中心，Div 代表辐散中心，Con 代表辐合中心
(a) 1990 年 9 月 16 日 0000UTC，500 hPa；(b) 1990 年 9 月 16 日 0000UTC，200 hPa；
(c) 1990 年 9 月 17 日 0000UTC，500 hPa；(d) 1990 年 9 月 17 日 0000UTC，200 hPa

4.3 中低纬度系统相互作用对热带气旋运动的影响

热带气旋与中纬度环流系统的相互作用不仅会引起热带气旋结构和强度的突变，还会引起热带气旋和中纬度槽前暴雨的加剧，更为突出的是这种作用往往会引起热带气旋运动的突变。这类中纬度系统主要是长波槽和高空切断冷涡。

热带气旋的运动受中纬度高空切断冷涡的影响十分显著。研究表明[1)]，东海台风在东亚大槽前一般是向北或东北方向移动。然而，当西风槽加深并在其南端切断出冷涡，

1) 张胜军、陈联寿、徐祥德，对两类异常台风的数值模拟研究，第 11 届全国热带气旋科学讨论会论文摘要文集，中国气象科学研究院，1999, 178.

万方数据

大槽两侧的大陆高压和副热带高压在槽的断裂处反气旋式打通且合并加强，往往导致槽前台风突然西折。副热带高压的增强西伸和台风南侧的高空切断冷涡的共同作用是东海北上台风突然西折的主要原因。数值研究[20]也表明高空冷涡可使台风运动方向发生突然转折，冷涡的大小和深度的变化可改变台风的垂直结构，导致台风上下层中心的偏离，形成垂直风切变，从而影响台风运动。

数值试验的结果表明[21]青藏高原的高空流型与西北太平洋热带气旋的运动有着密切的关系。在仲夏青藏高压稳定加强的阶段，东亚一般为西风大槽，副高在近海一般为经向型，此时热带气旋多向北移动或在西北太平洋西侧转向东北方向。当高原上空为槽时，高原上空高压东移，使得副高西伸加强，热带气旋多在副高南侧东风气流引导下西行。

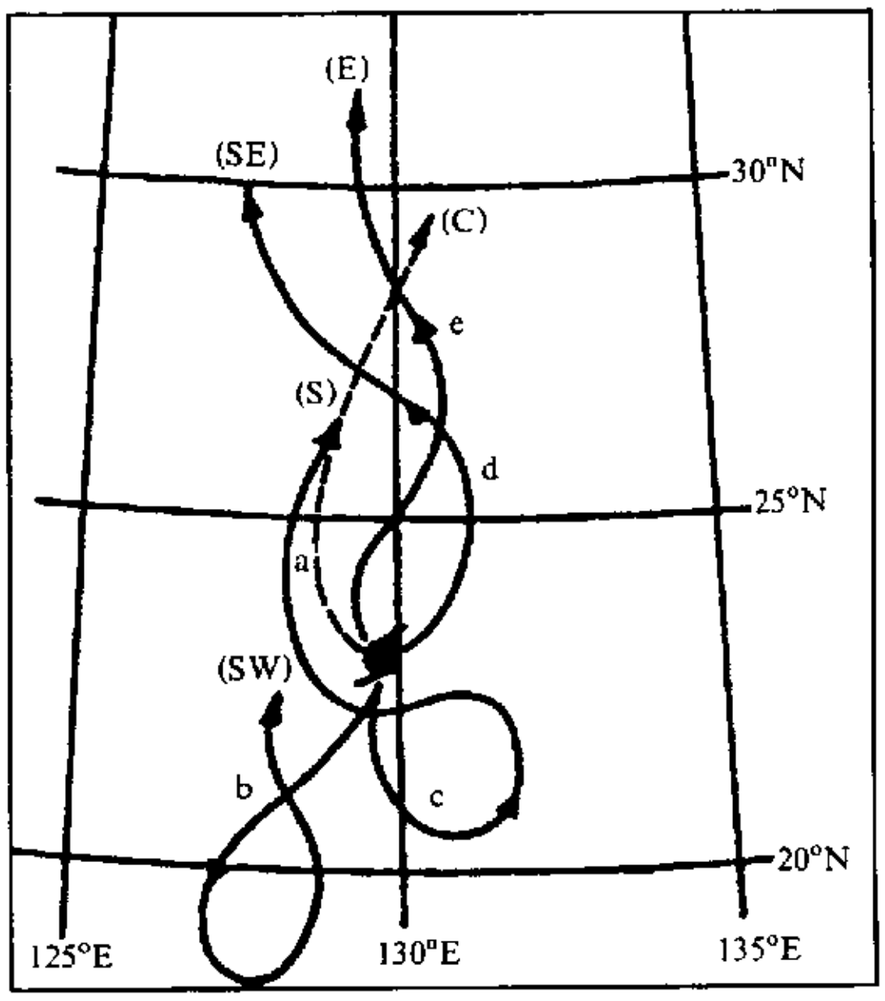

图 5　不同方位不稳定对流对台风 FLO（9019）路径的影响
实线：不稳定对流位于台风的东部（E）、东南部（SE）、南部（S）、西南部（SW）的敏感性试验的台风路径；虚线：台风的实际路径（C）

另一方面，热带气旋与冷锋相遇往往会导致热带气旋突然停滞或打转。当南海热带气旋向西北方向移动临近登陆时若遇到中国南部沿海的冷锋，热带气旋会突然停滞、转向西南方向而不登陆，这种遭遇过程往往使南海热带气旋最终在华南近海减弱消失。

4.4　地形对热带气旋运动的影响

弱环境引导下，热带气旋不仅会受到其内部结构以及不同尺度系统相互作用的影响，地形效应也是一个十分重要的影响因子。

统计分析[22]表明，台湾岛附近热带气旋运动发生偏折的机率最大，且台湾岛周围也是产生诱生低压的高频区。

研究表明[22]台湾岛可在背景场中诱生出一对偏差偶极涡（有台湾地形的平均积分场减去无地形平均积分场）。在东风背景下，偶极涡的低中心位于岛屿西侧，高中心位于岛屿东侧。这对偶极涡可使从不同方位趋近岛屿的热带气旋形成不同的转折路径。

东风场中（图 6a），岛屿西侧为低中心，东侧为高中心，当热带气旋从台湾东北部接近台湾时，东侧的高中心与热带气旋环流相互作用能使热带气旋运动右偏，西侧的低中心使热带气旋向西南方转向，即“左折”现象。当热带气旋从台湾东南部接近台湾时，东侧的高中心可使热带气旋向南偏转，西侧的低中心则可使热带气旋向北运动。西风场中（图 6b），岛屿东侧为低中心，西侧为高中心，此时的情况刚好与东风场相反，从台湾西北部接近台湾的热带气旋先向北然后转为偏东南方向运动；从台湾西南部接近台湾的热带气旋则先向南然后转向偏东或东北方向运动。

万方数据

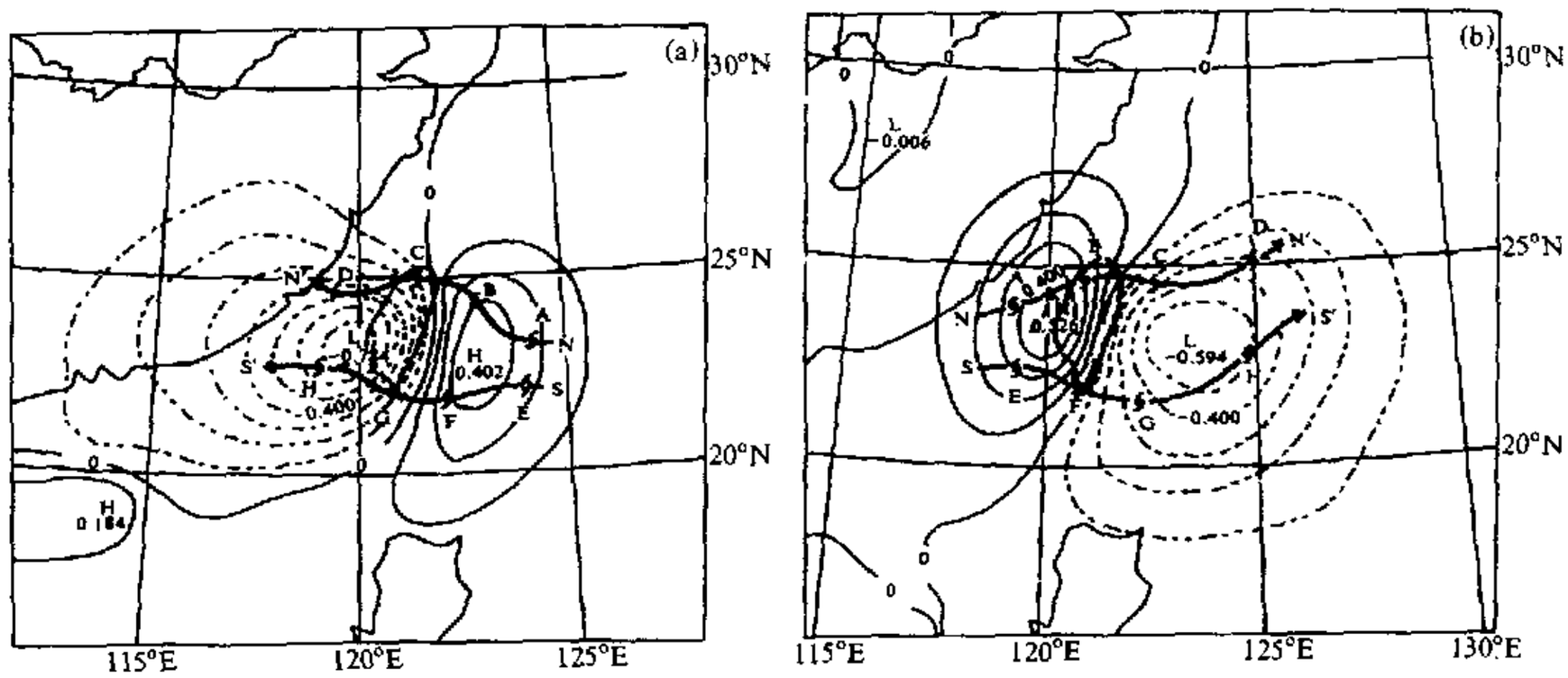

图6 台湾地形偏差偶极涡（有无地形的地面气压各时次积分平均场的差）对热带气旋运动的影响
(a) 东风场中诱生偏差偶极涡对从东北（NN′）和东南（SS′）部靠近台湾的热带气旋的运动轨迹曲率的影响；(b) 西风场中诱生偏差偶极涡对从西北（NN′）和西南（SS′）部靠近台湾的热带气旋的运动轨迹曲率的影响

另外，利用一个 β 平面准地转正压涡度方程从另一角度分析了热带气旋接近台湾时的"右偏"现象[23]，结果表明当热带气旋距台湾岛小于 150 km 时，其路径会受地形影响而向右偏转（图 7），偏移幅度可达 100 km. 这可能是由于地形造成的热带气旋环流的最大风速区向中心收缩的缘故. 此外，通过对热带气旋运动方程的分析[24]指出，地形可能会通过强迫抬升、动量、质量和水汽的交换以及摩擦和地形造成的大尺度环流的演变等直接或间接地影响热带气旋的运动。

4.5 热带气旋的预报方法

到目前为止，国家气象中心、广州和上海区域气象中心已建立了用于实时预报的热带气旋业务数值预报系统.

(1) 国家气象中心的台风路径预报模式（MTTP）

该模式是国家气象中心在有限区暴雨预报模式（LAFS）基础上发展起来的[1)]，是一个单向双重嵌套模式. 其粗（细）网格的范围为 0～49.69°N 和 84.38～159.38°E (10.31～40.31°N 和 105～150°E)，格距为 1.875°（0.9375°）. 垂直方向包括 15σ 层.

(2) 上海区域气象中心的台风预报模式（ETCM）

该模式主要用于进入东海警戒区的热带气旋的预报. 它是在 MM4 的基础上发展起来的[25]。其水平方向为单向移动套网格，即细网格随热带气旋移动。粗（细）网格距分别为 150 km（50 km）. 垂直方向为 10σ 层.

(3) 广州区域气象中心的台风预报模式（STCM）

该模式主要用于进入中国南海警戒区的热带气旋的预报。它是在热带有限区业务预报模式（TL10）基础上发展起来的[26]。水平方向为单向双重套网格. 粗（细）网格为 56.6°N～31.2°S 和 50～170°E（36.2°N～3°S 和 89～150°E），格距为 333 km（111

1) Wang Shiwen, Numerical Typhoon Track Prediction of National Meteorological Center, Beijing, China, Paper presented at the Fourth International Technical Conference on SPECTRUM (Held in Japan), 1995.

万方数据

km)。垂直方向为 10σ 层。

上述数值预报方法自投入业务以来运行稳定，其平均误差 24 小时一般小于 200 km，48 小时一般小于 400 km。填补了我国热带气旋业务数值预报的空白。随着计算条件的改善和观测手段的进步，热带气旋数值研究也取得了一定的成果。研究表明[27]，地面加密观测资料可显著优化模式初始场，尤其在较高分辨率的情况下，对预报有明显的改进。

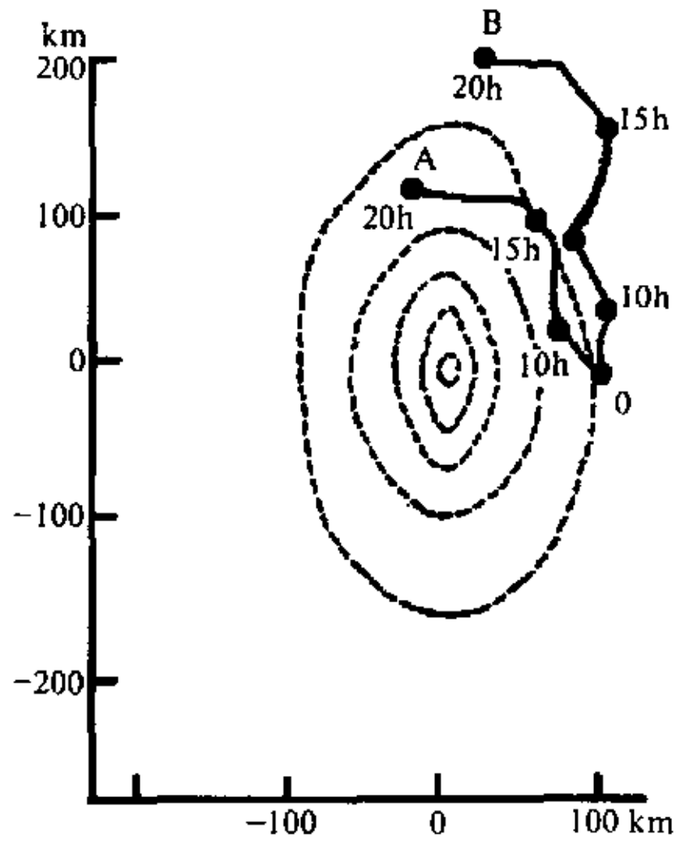

图 7　热带气旋靠近台湾岛屿时路径的右偏现象

虚线：台湾地形等高线；OA：无台湾地形的模拟路径；OB：有台湾地形的模拟路径

近年来，由于以大气动力学和热力学为基础的数值天气预报有了巨大的进展，因此数值预报产品的统计释用将是提高热带气旋路径客观预报性能的途径之一。例如通过对数值预报产品的订正和统计释用，研究建立了一个时效可达 72 小时的热带气旋路径客观预报模式[28]。该模式目前也正在投入业务应用，主要用于东海和浙江沿海一带的热带气旋路径预报。

人工智能预报方法是一个新的动向。以热带气旋智能数据库为核心，开发了适用于热带气旋路径预报的人工神经网络模型[29]。

另外，针对西北太平洋、东海和南海三个海区，采用典型相关[30,31]、条件概率组合[32]和新回归系数估计[33]等统计数学模型，建立了包括日本数值预报结果在内的客观综合集成方法。还从模糊数学优化理论观点出发，将表示热带气旋路径预报方法性能的六个指标统一起来，设计了多因子综合评价模型[34]，并建立了热带气旋路径预报评估的业务系统。

早在 70 年代中期，我国就有 9 种客观预报方法投入业务应用并发报广播。20 年来，旧的方法逐步淘汰，新的方法不断涌现并逐步优化。目前投入业务广播的预报结果有 6 种。除了上述的三种数值预报方法 MTTP、ETCM、STCM 外，还有三种客观预报方法投入广播，分别归为统计预报、统计动力预报和集合预报。这 6 种方法 24 小时的预报技巧以统计预报较高，48 小时以统计动力预报为最高。我国的台风数值预报还有待于进一步提高。

5　热带气旋暴雨的研究

热带气旋暴雨长期以来受到人们的关注，因为热带气旋造成灾害的主要部分往往是由热带气旋引发的暴雨洪涝灾害。

热带气旋与西风槽相互作用可导致热带气旋远距离暴雨的发生，热带气旋低压环流往往在低空形成一条宽广的偏东南风急流带，并成为暴雨区的主要水汽通道和能量通道。这条急流带可在中纬度地区产生深厚的湿层和强水汽辐合，并导致不稳定性增强和不稳定能量的积蓄和释放。数值研究表明[35]，台风可通过水汽和能量输送直接影响台

万方数据

风远距离降水区的分布。西风槽可为台风远距离降水提供低层辐合、高层辐散以及槽前正涡度平流的大尺度背景，这将有利于垂直运动的发展和降雨的维持。试验结果表明台风东侧的水汽向中纬度槽前输送可直接影响槽前降水的强度。

下垫面环境对热带气旋暴雨也有重要作用，山脉地形在一定条件下形成的地形辐合线往往是热带气旋低压内部制造中尺度强对流系统的源。开阔湖面和水库也会加剧热带气旋暴雨，热带气旋强暴雨区饱和的土壤层和积水对热带气旋会产生水汽反馈，反过来加剧该地的暴雨。当与冷空气相遇，热带气旋高耸积雨云对锋面层云的"播种"（seeding）微物理效应在几场热带气旋特大暴雨的分析中都显示出它不可忽视的重要机制。

另一方面，热带气旋与东亚梅雨锋的活动有着密切的关系[1)]，梅雨维持时期很少有台风生成，而一旦有强台风活动时，梅雨往往减弱或消退。当一个台风趋近准静止的梅雨锋时，台风具有对输向梅雨锋水汽的阻断作用；另外，原来造成梅雨锋系强垂直运动、水汽通量、低空强正涡度和高空强散度的能量犹如被热带气旋系统"吸收"了进来，而使梅雨锋系的能量迅速耗散。

对 E–P 通量和瞬变波活跃通量的诊断分析和数值研究结果[36]表明，台风还通过对西风急流和副高的强迫来影响梅雨系统。一方面，台风的生成可以作为 ITCZ 活跃的表征，ITCZ 的加强可通过二维 Rossby 波的径向传播，造成副高的加强北移；另一方面，台风本身携带大量低纬扰动能量，可以看作是一个从热带向中纬度能量频散的强瞬变扰源，它不仅可以对时间平均西风气流产生净局地强迫，造成急流北跳，又可以利用瞬变波与缓变波的相互作用强迫副高北抬东退，进而改变原有静止少变的梅雨锋结构。促使梅雨中断或结束。从位涡动力学的角度来讲，台风东侧强的负位涡距平平流是东侧副高加强北跳的一个重要原因。台风外围的负位涡能量亦可造成位涡拟能的辐合，减弱西风平均流，强迫急流北跳。这也是梅雨中断的重要原因。

6 结语

在过去的 10 年中，热带气旋的结构、强度、运动、热带气旋暴雨等研究都取得了明显进展。而且，在热带气旋的科研成果业务转化方面也有了不少进展，然而热带气旋活动尤其是其异常活动的预测仍未解决。一是观测资料的缺乏，二是对热带气旋运动及结构机理认识不足。尽管已取得显著进展，但不少问题仍有待继续研究。在诸如热带气旋的强度预报、异常路径和热带气旋的登陆及登陆区的风雨强度和分布等的预报还有大量工作要做。据统计[37]，热带气旋灾害伤亡人数之多在十大自然灾害中高居首位，我国又是世界上热带气旋灾害最为严重的国家，可见研究热带气旋对减轻我国风暴灾害具有重要作用。但在这一领域的研究我国目前已经落后多年，要十分重视对这一重大自然灾害的研究和防治，才能适应国家经济建设和国防建设发展的需求。

1) Chen Lianshou, An evolution on forecast capability of torrential rains in the period of Meiyu season in 1991, Proceeding of International Symposium on Torrential Rain and Flood, Huangshan, Anhui, China, 5～9 Oct. 1992, 3～4.

万方数据

参 考 文 献

1 范永祥，台风现场科学业务试验综述，台风科学业务试验和天气动力学理论研究（一），北京：气象出版社，1996, 1～4.

2 Chen Lianshou, An overview on tropical cyclone disasters and preliminary study on SPECTRUM–90, tropical cyclone disasters, *Proceedings of ICSU / WMO International Symposium*, 12～16 Oct. 1992, Beijing, China, Peking University Press, 1993, 31～44.

3 徐祥德、陈联寿等，环境场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，1998, **22**(5), 744～752.

4 Chen Lianshou, An overview on the impact of interaction between low–mid latitude circulation on rainfall and tropical cyclone behavior, Paper presented at the 24th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, 29 May～2 June, Fort Lauderdale, FL, USA, 2000, 63.

5 罗哲贤，边缘区域扰动演变对台风结构的影响，大气科学，1994, **18**(5), 1～8.

6 Meng Zhiyong, Nagata Masashi and Chen Lianshou, A numerical study on the formation and development of island–induced cyclone and its impact on typhoon structure change and motion, *Acta Meteorologica Sinica*, 1996, **10**(4), 430～443.

7 阎俊岳，近海热带气旋迅速加强的气候特征，台风科学业务试验和天气动力学理论研究（三），北京：气象出版社，1996, 1～7.

8 林元弼，环境场对近海台风强度突变影响的数值试验，台风科学业务试验和天气动力学理论研究（三），北京：气象出版社，1996, 31～38.

9 沈树勤，台风前部的龙卷，热带气旋科学讨论会文集，北京：气象出版社，1999, 109～111.

10 端义宏等，海温变化对热带气旋强度影响的数值试验（I）——热带气旋强度的数值模拟和海温试验，台风科学、业务试验和天气动力学理论的研究（三），北京：气象出版社，1996, 129～134.

11 端义宏等，海温变化对热带气旋强度影响的数值试验（II）——海气耦合模式的试验结果，台风科学、业务试验和天气动力学理论的研究（三），北京：气象出版社，1996, 135～140.

12 Wang Yuqing, The impact of sea spray evaporation on tropical cyclone intensification, Paper presented at the 23rd Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, Vol. 1, 10–15 Jan., Dallas, Texas, USA, 1999, 26～29.

13 朱永禔，大尺度基流速度变化对热带气旋移动影响的数值研究，台风试验和理论研究（二），北京：气象出版社，1996, 39～41.

14 Chen Lianshou and Luo Zhexian, Effect of the interaction of different–scale vortices on the structure and motion of typhoons, *Adv. Atmos. Sci.*, 1995, **12**(2), 207～214.

15 Chen Lianshou, The effect of different motion scale interaction and structure features on tropical cyclone motion, Papers presented at the Technical Conference on SPECTRUM, Nov. 1991, Guangzhou, China, WMO / TD, 1992, No. 472, IV., 1～15.

16 Chen Lianshou and Luo Zhexian, Some relations between asymmetric structure and motion of typhoons, *Acta Meteorologica Sinica*, 1995, **9**(4), 412～419.

17 Chen Lianshou and Luo Zhexian, Numerical study on function affecting tropical cyclone structure and motion, *Acta Meteorologica Sinica*, 1998, **12**(4), 504～512.

18 徐祥德、陈联寿，TCM–90现场科学试验台风FLO"β陀螺""通风流"非对称动力结构特征，气象学报，1996, **54**(5), 536～543.

19 陈联寿、徐祥德、谢以扬、李文弘，台风异常运动及其外区热力不稳定非对称结构的影响效应，大气科学，1997, **21**(1), 83～90.

20 赖碧波，台风与冷涡（Bogus方案）相互作用的数值试验，台风科学业务试验和天气动力学理论研究（二），北京：气象出版社，1996, 153～164.

21 徐晶、陈联寿、徐祥德，青藏高原高空流型对西北太平洋台风路径的影响的诊断分析，应用气象学报，1999, **10**(4), 410～420.

22 孟智勇等，台湾岛地形诱生次级环流系统对热带气旋异常运动的影响机制，大气科学，1998, **22**(2), 156～168.

23 罗哲贤、陈联寿，台湾岛地形对台风移动路径的应用，大气科学，1995, **19**(6), 701～706.

万方数据

24 杨平章，非线性水平动量平流作用对热带气旋运动的影响，中山大学学报，1995, 34(1), 82～89.
25 顾建锋等，东海热带气旋路径预报模式的试用结果，台风、暴雨业务数值预报方法和技术研究，北京：气象出版社，1996, 52～58.
26 王康玲等，南海区域台风路径数值预报业务模式研究试验，台风、暴雨业务数值预报方法和技术研究，北京：气象出版社，1996, 44～51.
27 朱宗申、马青云、郝民、陶士伟，台风试验陆地加密观测在数值天气预报中的应用，应用气象学报，1999, 10(1), 105～111.
28 金一鸣、钟元、谢玲娟，台风路径模式预报的统计订正和释用预报方法的研制，台风及其灾害性天气业务预报方法的研究，北京：气象出版社，1996, 62～65.
29 周增奎，台风人工智能预报方法的思路流程总体设计和功能特征，台风路径模式预报的统计订正和释用预报方法的研制，台风及其灾害性天气业务预报方法的研究，北京：气象出版社，1996, 284～288.
30 吴天泉等，用典型相关分析作热带气旋路径集成预报（一），台风及其灾害性天气业务预报方法的研究，北京：气象出版社，1996, 356.
31 吴天泉等，用典型相关分析作热带气旋路径集成预报（二），台风及其灾害性天气业务预报方法的研究，北京：气象出版社，1996, 322～325.
32 朱定真、樊永富、周增奎，用概率圆法决策台风路径预报，台风及其灾害性天气业务预报方法的研究，北京：气象出版社，1996, 312～314.
33 谢玲娟，试用一种新"回归系数估计"方法制作南海责任区的台风路径集成预报，台风及其灾害性天气业务预报方法的研究，北京：气象出版社，1996, 315～321.
34 王德隽、史久恩、吕玉芳，模糊贴近度在热带气旋路径预报评价中的应用，台风及其灾害性天气业务预报方法的研究，北京：气象出版社，1996, 357.
35 朱洪岩等，中低纬度环流系统的相互作用及其暴雨特征的模拟研究，大气科学，2000, 24(5), 669～675.
36 Cheng Zhaohui, Kang Di, Chen Lianshou and Xu Xiangde, Interaction between tropical cyclone and Meiyu front, *Acta Meteorologica Sinica*, 1998, 13(1), 35～46.
37 Bindi, B. SHAH, *Disasters*, 1983, 7(3), 202～209.

An Overview on Tropical Cyclone Research Progress in China during the Past Ten Years

Chen Lianshou and Meng Zhiyong
(*Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing* 100081)

Abstract At the beginning of the 1990s, several large-scape tropical cyclone (TC) field experiments were launched internationally and domestically. Much valuable intensive observational data have been obtained. With these data, a series of studies on tropical cyclone especially on abnormal typhoons were carried out in China. Under the national key project related to tropical cyclone such as "Typhoon scientific operational experiment and studies on its synoptic and dynamic theories" and international cooperative project on typhoon named "SPECTRUM", TC sudden change phenomena and forecast techniques were investigated with emphasis in China. During the past 10 years, much improvements have been achieved in sudden changes of tropical cyclone motion, its structure and intensity, sudden intensification of typhoon caused heavy rain, TC track forecast methods etc. This paper will summarize briefly these developments.

Key words: tropical cyclone; typhoon; China

万方数据