

# 近 10 年中国台风暴雨研究进展

程正泉<sup>1,2</sup> 陈联寿<sup>1</sup> 徐祥德<sup>1</sup> 彭涛涌<sup>2</sup>

(1. 中国气象科学研究院, 北京 100081; 2. 广东省气象台)

## 提 要

登陆台风造成的灾害往往由暴雨引起,因此在台风研究领域中,台风暴雨一直是最受重视的研究课题之一。近 10 年来,随着我国一系列台风外场科学试验加密观测数据的获得、天气监测网的逐步完善、大气模式的改进以及电子计算机的飞速发展,台风与中纬度系统的相互作用、台风与地形下垫面相互作用、台风中小尺度及其动力学等方面均得到深入研究。概述了近 10 年该领域取得的研究进展,并对目前存在的问题进行讨论。

**关键词:** 台风 暴雨 进展

## 引 言

我国是世界上台风登陆最多、灾害最重的国家,平均每年登陆我国的台风约有 7~8 个<sup>[1]</sup>。台风登陆造成的灾害往往是台风引发的暴雨造成的,暴雨会引起山洪爆发或大型水库崩塌而造成洪水泛滥,带来巨大的损失。因此多年来台风暴雨研究一直是受到重视的研究课题之一。

很早以来,我国学者和预报员就针对台风暴雨作了许多工作<sup>[1]</sup>。大量的统计事实表明,地形对台风降水的分布及强度有影响,而台风与中纬度系统的相互作用能够产生远距离暴雨,同时,在台风眼壁和螺旋雨带上发现有中尺度对流体。各地气象学者<sup>[2~8]</sup>利用台风降水资料,结合本地区情况分别统计了台风暴雨强度、时空分布、暴雨突然增幅等气候特征以及相应的影响因子,获得了大量的事实。然而海洋上资料的缺乏、台风内部观测资料的稀少和对台风运动物理机制的了解不够,使得许多工作开展得不够深入,严重影响了台风研究领域的发展。过去 10 多年来,我

国连续不断地开展了台风外场科学试验,如 1993~1994 年夏季开展的代号为“CATEX”的国内台风现场试验<sup>[9]</sup>、2002~2004 年间开展的 CLATEX 外场科学试验<sup>[10]</sup>,获取到多种加密观测资料;另外,我国天气监测网日趋完善,所获得的常规观测资料在空间和时间上的密度较以前改善很多;同时高分辨率中尺度数值预报模式的飞速发展。诸多方面的发展,极大地推动了我国台风科研的发展和数值模式的改进和业务能力的提高。本文对近 10 年来我国台风暴雨研究领域的进展作一综述,并对某些问题展开讨论。

## 1 中低纬环流相互作用与台风暴雨

台风本身是一个热机,在向极移动的过程中,携带了大量的热带扰动动量和暖湿气流进入中纬度地区,促使中纬度环流斜压系统的强烈发展,引起该地区许多严重的灾害性天气。当台风外围环流或倒槽遇上急流、西风槽、冷空气等西风带系统时,往往能产生远距离暴雨,此类暴雨往往比台风本身环流的降水大得多。

台风远距离暴雨与高空急流有着较为密切的关系。台风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。统计发现<sup>[11]</sup>,台风暴雨发生时,200hPa 高空一般为西南风急流,暴雨区位于高空急流右后方,暴雨增幅时,200hPa 高空急流有一个增强转竖的趋势;数值模拟和诊断试验表明,在高空急流右后侧的次级环流与降水产生的潜热反馈、高空非纬向风场的增强之间存在一种有利于远距离暴雨增幅的正反馈机制。陈久康和丁治英<sup>[12]</sup>研究了高低空急流与台风的中尺度暴雨之间的关系,认为 Wave-CISK 过程和斜压基流的对称不稳定可能是低空急流发展和倒槽形成的更切合实际的动力机制。

当中纬度冷槽遇上台风携带的暖湿空气时,会使不稳定度增大而导致降水增加。数值研究表明<sup>[13]</sup>,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,而台风强度直接影响到台风远距离暴雨降水和雨区的分布,且西风槽的加强和减弱将导致到降水的加强和减弱。个例研究<sup>[14]</sup>表明,初始场的西风槽的加深可导致降水增幅 30%。

登陆台风北上,冷空气的侵入和变性常常会加剧台风暴雨。研究发现,暴雨增幅时有效位能释放,冷空气处在台风外围时有效位能释放最多,增幅最大<sup>[15]</sup>;而当冷空气侵入中心后,非绝热加热迅速减小,中心降水明显减少,但其外围与倒槽的降水仍明显加大<sup>[16]</sup>。另外,当与冷空气相遇时,热带气旋高耸积雨云对锋面层云的“播种”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<sup>[17]</sup>。

台风登陆北上有时会遇上中纬度锋面发生变性。蒋尚城<sup>[18]</sup>认为半热带气旋北部的半热带锋面上升运动很强,是中国北方暴雨形成的一个重要原因,其能量来源是潜热和

斜压能量的释放。徐祥德等<sup>[19]</sup>的数值结果表明,锋面斜压结构及其强度与台风变性暴雨增幅呈显著正相关特征。

台风活动与东亚梅雨锋活动有着密切的关系。观测表明,梅雨期间长江中下游的降水量与盛夏西北太平洋(包括南海)的台风频数呈反相关关系。统计表明<sup>[20]</sup>有 85% 的南海台风和转向台风对梅雨有显著影响,而 35% 的台风会导致梅雨的结束。台风登陆造成出梅的概率是 48%,在南海北部登陆的台风对应于几乎 100% 的出梅概率,越往南概率越小<sup>[21]</sup>。1991 年的梅雨结束即与 9106 号台风的活动关系密切<sup>[22]</sup>。数值研究<sup>[23]</sup>表明,9106 号台风的扰动在对流层低层激发出的水平流场,减弱了西南季风,因而减弱了其向江淮地区的水汽输送,减小了江淮地区的水汽通量的辐合。同时,该台风还通过影响副高的位置对梅雨结束产生间接作用。

台风环流与中纬度系统相互作用有时也能间接产生暴雨或导致暴雨增幅。四川盆地的一次特大暴雨过程的分析<sup>[24]</sup>结果表明,台风通过外围环流与西南涡相互作用,建立向暴雨区输送大量水汽和能量的通道,同时改变了低涡内及东侧的大气层结和结构,其动力强迫激发的辐合和正涡度持续增长,从而在该区域产生连续性强降水。郁淑华和何光碧<sup>[25]</sup>的数值研究表明,在秋季,海南岛、台湾岛附近活动的热带气旋能通过对副高的制约、川西北槽的稳定维持以及对低层的水汽稳定辐合等作用来影响华西地区的降水强度及持续时间。

## 2 山脉、海岸线及下垫面对台风暴雨的影响

不同结构的台风登陆不同的地区(地形不同),其暴雨强度和分布极不相同。由于海岸地形与台风环流的辐合作用,登陆台风的降水强度和分布与在海上时有较大差异。多数台风登陆时在其前进方向的右半圆区内的暴雨范围及强度要明显大于左半圆区。

台风登陆后,由于地表的摩擦作用,台风强度通常会减弱从而降水也随之减弱。但是,由于地形的抬升作用以及地表的拖曳效应,在一定时间内能够增加台风的降水。9216号台风数值模拟<sup>[26]</sup>结果表明,地形的抬升辐合在台风暴雨的增幅中起到很大的作用,因此山脉迎风坡的降水比背风坡明显要大<sup>[27]</sup>。同时,浙闽山地地形起伏增强了地面对大气的拖曳效应<sup>[28]</sup>,一方面使垂直运动加强,另一方面也改善了积云对流和大尺度降水条件,增加了对流降水和大尺度降水,从而引起台风暴雨的增幅。

大陆海岸线的分布可以使登陆台风结构发生突变从而影响到暴雨强度及落区的变化。9216号台风暴雨的模拟试验表明<sup>[29]</sup>,暴雨中心随海岸线的扩展而移动,地形坡度削弱会引起地形性降水减少,从而使台风暴雨幅度有所减弱。

登陆台风暴雨常造成陆面近似饱和的湿地状况,这种饱和湿地对台风维持及暴雨增幅有重要影响。陈联寿<sup>[30]</sup>指出,如果登陆后的台风环流停滞在一块大的水面(湖泊、水库)上或一块被台风暴雨浇出的饱和湿地上,则能维持较长时间,同时台风暴雨下饱和土壤层和积水对台风产生水汽反馈,反过来加剧该地的暴雨。7503号台风个例数值试验表明<sup>[31]</sup>,湿地边界层各通量输送对台风降水强度和范围有重大影响,其中热量通量对台风降水的强度和分布起主要作用,而潜热通量对降水的影响要大于感热通量的影响;边界层动量通量(热量通量)不利(有利)于台风螺旋结构的维持;而动量交换对台风降水具有局地增幅作用。

### 3 中小尺度系统与台风暴雨

中小尺度系统往往是台风暴雨中的主角。观测发现,台风环流中强降水出现在中尺度的眼区云墙和螺旋云带上。徐祥德等<sup>[32]</sup>将云顶亮温(TBB)进行尺度分离后发

现,次天气尺度结构清晰显示出台风云带中尺度螺旋波特征。陈联寿等<sup>[33]</sup>的研究表明,在台风环境最大风速半径处,有时会出现一个或几个中尺度涡旋,涡旋的向内核输送会导致台风的增强。另外,当台风趋近陆地时,因地形影响在台风前部低空辐合加强,有时会形成台前飚线;登陆后的台风受山脉影响,经常在台风的右前方生成一系列的龙卷、雷暴等强烈天气。地形作用还常在台风环流与地形辐合区产生一系列的中尺度强对流活动。而有的台风在地形作用下会产生诱生低压<sup>[34]</sup>。台风登陆形成的倒槽内,常常有多个中尺度系统活动<sup>[35]</sup>。另一方面,台风向中纬度地区的能量频散,还能激发中纬度的中小尺度系统。此类中、小尺度系统产生的降水,往往比台风本身环流的降水大得多,直接影响到台风暴雨的强度和分布。

研究发现<sup>[36]</sup>,在台风强降水中心区,低空有非常清楚的中尺度气旋性涡旋,高空有非常清楚的反气旋性涡旋或辐散线;而且,湿台风或暴雨增幅台风上空有明显的中尺度辐散结构<sup>[37]</sup>。台风暴雨增幅前12h,其东侧常伴有地面中尺度辐合区或出现中尺度气旋性涡旋,并有水汽通量的辐合,台风暴雨区即位于它们的重叠处或紧邻处<sup>[38]</sup>。数值研究和诊断分析<sup>[39]</sup>表明,这种中尺度环流系统的产生与台风和大尺度环境场的非线性相互作用有关。观测研究<sup>[40]</sup>发现,这类中小尺度系统往往出现在台风前进方向的右侧;部分南海台风则出现在前进方向的左侧。另外,台风与中纬度系统的相互作用非常显著地表现在中尺度系统的活动上,而台风及西风槽强度的改变将直接导致中尺度系统强度的变化,从而造成降水强度的不同<sup>[41]</sup>。

### 4 台风暴雨动力学研究

台风暴雨与中、小尺度系统密切相关。罗哲贤<sup>[42]</sup>利用准地转正压模式讨论了中小尺度涡旋与台风的相互作用,结果表明,线性

平流的作用将促使小尺度涡旋的发展和延伸,  $\beta$  效应可造成热带气旋的非对称结构, 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。而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与台风的实际情况十分类似。

关于螺旋雨带形成的理论有多种, 其中主要的观点有: 认为螺旋雨带实际上是一种重力惯性波, 它可以在台风边缘由外部强迫产生<sup>[43,44]</sup>, 然后向中心传播。而另一种观点认为螺旋雨带也可以在眼壁附近产生, 并向外传播<sup>[45]</sup>, 可能是一种类似 Rossby 波的运动<sup>[46]</sup>。由于重力惯性波理论有着重大的缺陷(理论波速比螺旋雨带实测移速大一个量级)<sup>[47]</sup>, 前几年开始, 气象学家们提出了涡旋 Rossby 波的概念<sup>[48,49]</sup>, 并逐渐被普遍接受。余志豪<sup>[47]</sup>综述了国内外文献涡旋 Rossby 波新观点, 并证明了在绝对涡度(或位涡)守恒原理支配下, 经典 Rossby 波(由科氏参数随纬度变化造成)、地形 Rossby 波(由环境涡度随地形变化造成)和涡旋 Rossby 波(由台风基本气流的涡度随径向的变化造成)在动力学上的成波机理是等价的。徐祥德等<sup>[50]</sup>对目标台风卫星 TBB 资料分析指出, 台风影响域螺旋波表现出显著次天气、中尺度波动特征, 其波动周期尺度及其传播相速可类似重力内波与涡旋 Rossby 波, 扰动 TBB 场时间偏差分布呈类似涡旋 Rossby 波螺旋波列, 其波列路径与涡旋 Rossby 波传播特征相似, 并提出了台风涡旋螺旋波结构模型。

## 5 台风暴雨数值研究

随着最近十几年来观测手段日益更新、大气模式的不断发展和计算机能力的飞速提高, 台风暴雨数值研究也取得新的进展。

热带气旋初始场准确与否是影响其路径、强度以及风雨分布的预报精度的重要因子之一。为了解决海洋上台风观测资料的缺

乏, 在国外卫星遥感资料和雷达资料得到了广泛的研究和应用。我国学者也展开了积极的尝试。TBB<sup>[51]</sup>、云迹风<sup>[52]</sup>、QuikScat<sup>[53]</sup>、TRMM<sup>[54]</sup>、AMSU-A<sup>[55]</sup>等卫星反演资料、风廓线仪<sup>[56]</sup>以及 Doppler 雷达资料<sup>[57]</sup>用于改善模式初始场, 在数值模拟试验取得了较好的效果。而非对称 Bogus 的构造也取得一定的进展。非常规资料的应用, 反映了人造台风中的中尺度信息和非对称结构, 使之更加接近于实际台风, 试验效果优于使用对称人造涡旋。

另外, 高分辨率中尺度数值预报模式的采用, 也进一步推动了台风暴雨的研究。中尺度模式 MM5 用于登陆台风暴雨的模拟预报均有一定成效, 尤其是将大量非常规资料包括卫星遥感资料和雷达资料进行同化后形成的初始场或使用 Bogus 技术来构造台风涡旋将能明显提高模式预测能力。大量的模拟试验表明 MM5 能够较好地模拟出台风及其暴雨等天气系统。有试验表明<sup>[58]</sup>, MM5 模拟台风降水的能力随模式水平分辨率的提高而加强。目前该模式已被广泛地应用于台风暴雨的诊断和预报研究中。

## 6 结 语

近 10 年来, 我国台风暴雨研究取得了较明显的进展。我国学者制定了台风特大暴雨和暴雨增幅的标准, 并借助于高分辨中尺度数值模式对台风暴雨突然增幅的物理机制作了深入的研究。详细考察了台风与高低空急流、西风槽、冷空气等中纬度天气系统的相互作用, 发现西风槽等中纬度系统与台风相互作用时往往能获得大量斜压能量, 引起台风环流结构的改变甚至变性, 从而导致暴雨增幅。而西北太平洋台风的生成是梅雨中断或出梅的一个强信号, 当台风移入输入梅雨锋的水汽通道范围时, 通道将被阻断, 水汽将被卷入台风, 而使输入梅雨锋的水汽输送中断。同时, 地形及下垫面对台风降水的影响机制

也有细致的研究。研究表明,登陆时地形抬升以及地面拖曳效应会使暴雨增幅,而饱和湿下垫面对台风潜热通量输送对台风降水的范围和强度有重要影响。另外,随着观测技术及手段的发展,在台风环流中以及台风与中纬度系统相互作用的区域发现多种中小尺度系统,对这些中小尺度的发生及发展作了进一步的研究,研究表明,除了台风眼壁及螺旋雨带上的中尺度对流体外,台风与地形、中纬度系统等相互作用能激发这些中小尺度系统,同时中小尺度系统与台风通过相互作用而影响到降水的强度和分布。对台风螺旋雨带的解释,更加合理的涡旋 Rossby 波理论建立并逐渐取代了重力惯性波理论。而多种非常规观测资料以及非对称 Bogus 技术的引入,使得台风暴雨的模拟和预测工作有了进一步的发展。

尽管目前台风暴雨研究取得相当进展,然而对台风降水的预报尤其是登陆时和登陆后的暴雨的强度和分布预报仍然十分困难。这是由于台风暴雨的预报不仅涉及到台风路径、强度、移速、本身结构,还与台风环流与下垫面、不同纬度的不同尺度环流系统的相互作用有关。从观测资料来说,我们目前业务上对台风结构的细致观测仍然不够,而对卫星遥感、雷达等非常规观测资料的应用也十分有限,因此获取台风精细结构仍有困难。其次,对台风与不同纬度、不同尺度的环流系统相互作用的机制仍然了解得不是很清楚,在数值模式中相应的物理过程仍需进一步改进和完善。第三,数值预报模式的分辨率不够。Molinari 指出台风数值模式的水平分辨率应小于 5km,可目前在业务上和科研中都很难达到<sup>[59]</sup>。因此,目前台风暴雨的数值研究工作主要还只是在模拟和诊断研究上,业务上用数值模式进行台风暴雨预报仍需要大量的工作。另外,集合预报在台风路径预报应用中显示出了很好的效果,而其在台风暴

雨预报中的应用还远远不足。可见,尽管台风暴雨的研究和预报取得较大的进展,目前仍面临着相当的困难,需要长期艰苦的努力。

#### 参考文献

- 1 陈联寿,丁一汇.西太平洋台风概论.北京:科学出版社,1979.
- 2 毛夏,贺忠,毛绍荣.华南热带气旋特大暴雨统计特征.热带气象学报,1996,12(1):78~84.
- 3 金秀兰.华东台风暴雨突然增幅的气候特征和环流条件分析.南京大学学报(自然灾害成因与对策专辑),1996,32:179~184.
- 4 周砚耕,陈景耀.海南岛热带气旋特大暴雨天气气候分析和预报.第九届热带气旋科学讨论会论文摘要(预印本),1994:83.
- 5 张喜君,朱官忠,曹刚锋.华北地区登陆北上热带气旋的暴雨增幅研究.南京气旋学院学报,1995,18:197~200.
- 6 邹树峰,顾润源,朱官忠等.影响我国北方热带气旋的若干统计特征.气象,1997,23(7):42~45.
- 7 边清河,丁治英,吴明月等.华北地区暴雨的统计特征分析.气象,2005,31(3):61~65.
- 8 林爱兰,万齐林,梁建茵.登陆华南热带气旋过程降水分析.热带气象学报,2003,19(增):65~73.
- 9 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.
- 10 Chen Lianshou, et al. An Overview of Tropical Cyclone and Tropical Meteorology Research Progress. Advances in Atmospheric Sciences, 2004, 21(3): 505~514.
- 11 丁治英,张兴强,何金海等.非纬向高空急流与远距离台风中尺度暴雨的研究.热带气象学报,2001,17(2):144~152.
- 12 陈久康,丁治英.高低空急流与台风环流耦合下的中尺度暴雨系统.应用气象学报,2000,11(3):271~281.
- 13 朱洪岩,陈联寿,徐祥德.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.
- 14 刘铭,陈久康.9012号台风暴雨的数值试验.台风科学、业务试验和天气动力学理论的研究(第四分册),北京:气象出版社,1996:97~100.
- 15 丁治英,陈久康.有效位能和冷空气活动与台风暴雨

- 增幅的研究. 热带气象学报, 1995, 11(1): 80~85.
- 16 钮学新, 杜惠良, 刘建勇. 0216号台风降水及其影响降水机制的数值模拟试验. 气象学报, 2005, 63(1): 57~68.
- 17 陈联寿, 徐祥德, 罗哲贤等. 热带气旋动力学引论. 北京: 气象出版社, 2002: 11.
- 18 蒋尚城, 张覃, 周鸣盛. 登陆北上减弱台风所导致的暴雨-半热带系统暴雨. 气象学报, 1981, 39: 18~271.
- 19 徐祥德, 陈联寿, 解以扬等. 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.
- 20 Kang Di, Li Wenhong, Chen Lianshou. Typhoon 9106's Effect on Meiyu's ending in Jianghuai Valleys. International Symposium Torrential Rain and Flood, Huangshan, 1992: 259~260.
- 21 任金声. 南海登陆热带气旋与江淮出梅. 气象, 1993, 19(3): 25~28.
- 22 陈联寿. 1991年江淮特大暴雨预报评述. 黄山: 国际暴雨洪涝学术讨论会, 1992: 3~4.
- 23 徐海明. 9106号台风的热力作用对出梅影响的数值研究. 热带气象学报, 1994, 10: 231~237.
- 24 陈忠明, 黄福均, 何光壁. 热带气旋与西南低涡相互作用的个案研究 I: 诊断分析. 大气科学, 2002, 26: 352~360.
- 25 郁淑华, 何光碧. 热带气旋对华西秋季暴雨影响的数值试验. 第十二届全国热带气旋科学讨论会论文摘要文集, 2002: 299~302.
- 26 郑庆林, 吴军, 蒋平. 地形对 9216 号台风暴雨增幅影响的数值研究. 台风科学、业务试验和天气动力学理论的研究(第四分册), 北京: 气象出版社, 1996: 197~205.
- 27 朱官忠, 赵从兰. 登陆北上热带气旋的特大暴雨落区探讨. 气象, 1998, 24(11): 16~21.
- 28 郑庆林, 宋青丽. 一个台风暴雨模式和山地地面拖曳效应对登陆台风暴雨增幅影响的数值研究. 台风科学、业务试验和天气动力学理论的研究(第四分册), 北京: 气象出版社, 1996: 215~221.
- 29 郑庆林, 吴军, 蒋平. 我国东南海岸线分布对 9216 号台风暴雨增幅影响的数值研究. 热带气象学报, 1996, 12(4): 304~313.
- 30 Chen Lianshou. Decay after landfall. WMO/TD, 1998, 875: 1. 6. 1—1. 6. 5.
- 31 李英. 登陆热带气旋维持机制的研究. 中国气象科学研究院与南京气象学院联招博士研究生学位论文, 2004: 135~136.
- 32 徐祥德, 许健民, 王继志等. 大气遥感再分析场构造技术与原理. 北京: 气象出版社, 2003: 230.
- 33 Chen Lianshou, Luo Zhexian. Interaction of Typhoon and Mesoscale Vortex, Advances in Atmospheric Sciences, 2004, 21(4): 515~528.
- 34 Meng Zhiyong, Nagata Masashi, Chen Lianshou. A Numerical Study on the Formation and Development of Its Land-Induced Cyclone and Its Impact on Typhoon Structure Change and Motion. ACTA. Meteorological Sinica, 1996, 10(4).
- 35 郑峰. 一次热带风暴外围特大暴雨分析. 气象, 2005, 31(4): 77~80.
- 36 江敦春, 党人庆, 陈联寿. 卫星资料在台风暴雨数值模拟中的应用. 热带气象学报, 1994, 10(4): 318~324.
- 37 党人庆, 江敦春. 台风降水的数值模拟和中尺度研究. 台风科学、业务试验和天气动力学理论的研究(第四分册), 北京: 气象出版社, 1996: 145~149.
- 38 党人庆, 江敦春. 台风降水的数值模拟和中尺度结构. 台风科学、业务试验和天气动力学理论的研究(第四分册), 北京: 气象出版社, 1996: 145~149.
- 39 江敦春, 党人庆. 台风暴雨中尺度结构的数值研究. 85-906 项目组: 台风科学、业务试验和天气动力学理论的研究(第四分册), 北京: 气象出版社, 1996: 143~144.
- 40 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.
- 41 孟智勇, 徐祥德, 陈联寿. 9406号台风与中纬度系统相互作用的中尺度特征. 气象学报, 2002, 60(1): 31~39.
- 42 Luo Zhexian. Effect of Smaller Vortices in the Peripheral Region on Typhoon Structure. Adva. Atmos. Sci, 2000, 18: 299~306.
- 43 Willoughby H. E. A possible mechanism for the formation of hurricane rainbands. J. Atmos. Sci., 1978, 35(5): 838~848.
- 44 Willoughby H. E. The vertical structure of hurricane rainbands and their interaction with the mean vortex. J. Atmos. Sci., 1978, 35(5): 849~858.
- 45 Tepper M. A theoretical model for hurricane radar bands. Preprints of Seventh Weather Radar Conference. Miami. Amer. Meteor. Soc., 1958: 56~65.
- 46 Macdonald N. J. The evidence for the existence of Rossby-like waves in the hurricane vortex. Tellus, 1968, 20: 138~150.

- 47 余志豪. 台风螺旋雨带-涡旋 Rossby 波. 气象学报, 2002, 60(4): 502~507.
- 48 Montgomery M T. A theory for vortex Rossby-wave and its application to spiral bands and intensity changes in hurricanes. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1997, 123: 435—465.
- 49 Montgomery M T. Tropical cyclone via convectively forced Vortex Rossby-wave in a three-dimensional quasi-geostrophic model. *J Atmos Sci*, 1998, 55: 3176—3207.
- 50 徐祥德, 张胜军, 陈联寿等. 台风涡旋螺旋波及其波列传播动力学特征: 诊断分析. 地球物理学报, 2004, 47(1): 33~41.
- 51 孟智勇. 基于卫星 TBB 资料的台风非对称结构的设计及其对 9806 号台风路径的影响研究. 第十二届全国热带气旋科学讨论会论文摘要文集, 2002: 108~111.
- 52 张守峰, 王诗文. 利用卫星云导风资料的台风路径数值预报试验. 热带气象学报, 1999, 15(4): 347~355.
- 53 曾智华, 端义宏, 梁旭东等. QuikScat 资料三维变分同化对台风 Rusa 数值模拟的影响. 第十三届全国热带气旋科学讨论会论文摘要文集, 2004: 2-56~2-58.
- 54 丁伟钰, 万齐林. TRMM 降水率三维变分同化及其对台风“杜鹃”(0313)预报的改进. 第十三届全国热带气旋科学讨论会论文摘要文集, 2004: 2-29~2-31.
- 55 赵颖, 王斌等. AMSU-A 反演资料对台风(DAN)预报的数值研究. 第十三届全国热带气旋科学讨论会论文摘要文集, 2004: 2-18~2-20.
- 56 张胜军, 徐祥德, 吴庆梅. 中国登陆台风外场科学试验风廓线仪探测资料在四维同化中的初步应用研究. 应用气象学报, 2004, 15(增): 101~109.
- 57 万齐林. 登陆热带气旋风场的雷达探测信息变分同化反演技术. 第十三届全国热带气旋科学讨论会论文摘要文集, 2004: 3-10~3-14.
- 58 Wu C C and K H Chou. Evolution of Typhoon Zeb (1998) in a nonhydrostatic mesoscale model. 24th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology. Fort Lauderdale, FL, May. 29—June. 2, Amer. Meteor. Soc., 2000: 272~273.
- 59 雷小途, 陈联寿. 热带气旋的登陆及其与中纬度环流系统相互作用的研究. 气象学报, 2001, 59(5): 602~609.

## Research Progress on Typhoon Heavy Rainfall in China for Last Ten Years

Cheng Zhengquan<sup>1,2</sup> Chen Lianshou<sup>1</sup> Xu Xiangde<sup>1</sup> Peng Taoyong<sup>2</sup>

(1. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081;

2. Guangdong Meteorological Observatory)

### Abstract

Most of damages of landing typhoon result from heavy rainfall, therefore typhoon heavy rainfall is one of the most focused problems in the typhoon research community. During the last 10 years, with the acquisition of much valuable intensive observations in a series of typhoon field experiments, the improvement of the weather monitoring network, the upgrade of atmospheric numerical models and the rapid development of computer powers, many problems in typhoon heavy rainfall research are further studied, such as the interaction between typhoons and mid-latitude weather systems, the interaction between typhoons and topography and underlying surface, the mesoscales of typhoons and the dynamics and so on. The research progresses in recent 10 years are briefly summarized, and some existing issues are discussed.

**Key Words:** typhoon heavy rainfall progress