

任福民,向纯怡. 登陆热带气旋降水预报研究回顾与展望[J].海洋气象学报,2017,37(4):8-18.
Ren Fumin,Xiang Chunyi. Review and prospect of researches on the prediction of precipitation associated with landfalling tropical cyclones [J].Journal of Marine Meteorology,2017,37(4):8-18. DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2017.04.002. (in Chinese)

登陆热带气旋降水预报研究回顾与展望

任福民¹,向纯怡²

(1. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京 100081; 2. 国家气象中心,北京 100081)

摘要: 重点围绕登陆热带气旋(LTC)降水预报研究进行了回顾和总结,指出针对 LTC 降水有三类预报技术:动力模式、统计方法和动力-统计结合的预报方法。以数值天气预报(NWP)模式为代表的预报技术对 LTC 降水的预报能力仍然非常有限。改进 NWP 模式预报误差的途径主要有两条:一是发展 NWP 模式;二是发展动力-统计结合的方法。分析表明,动力-统计相似预报是一项很有潜力的技术;针对现有研究中的不足,开展 LTC 降水动力-统计相似预报研究,探索减小数值模式 LTC 降水预报误差的有效方法,将是一个充满希望的研究领域和方向。

关键词: 登陆热带气旋; 降水预报; 研究回顾; 展望

中图分类号: P444 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2017)04-0008-11

DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2017.04.002

Review and prospect of researches on the prediction of precipitation associated with landfalling tropical cyclones

REN Fumin¹, XIANG Chunyi²

(1. State Key Laboratory on Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China;
2. National Meteorological Center, Beijing 100081, China)

Abstract This paper mainly reviews and summarizes the researches on the prediction of precipitation associated with landfalling tropical cyclones (LTC), and pointed out that there are three types of forecasting techniques for precipitation: dynamic model, statistical method and dynamic-statistical combining forecasting method. The forecasting technology, mainly represented by the numerical weather prediction (NWP) model, is still very limited in its ability to forecast LTC precipitation. There are two main ways to improve the forecast error of NWP model: one is to develop NWP model; the other is to develop the dynamic-statistical method. The analysis shows that the dynamic-statistical similarity prediction is a promising technology. In view of the shortcomings in the existing research, to study on the dynamic-statistical similarity forecasting method and to explore the effective method to reduce the numerical model prediction error for LTC precipitation will be a promising field and direction of study.

Key words landfalling tropical cyclone; precipitation prediction; research review; prospect

引言

登陆热带气旋(以下简称 LTC, 热带气旋简称

TC)强降水(暴雨及以上级别降水,即日降水量 ≥ 50 mm)是 LTC 暴雨灾害的主因。我国历史上由 TC 强降水引起的灾害令人触目惊心:1975 年 8 月,7503

收稿日期:2017-10-26; 修订日期:2017-11-19

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41375056, 41675042);厦门市科技计划项目(3502Z20174051)

作者简介:任福民(1968—),研究员,主要从事热带气旋和极端天气事件研究,fmren@163.com。

号台风 Nina(妮娜)登陆后在河南驻马店地区引发历史罕见特大暴雨(日降水量高达1 062 mm),导致6座大中型水库垮坝,至少2.6万人死亡,冲毁京广铁路102 km,中断行车18 d;1996年7月底—8月初,9608号台风 Herb(贺伯)不仅肆虐了台湾岛,其特大暴雨横扫大陆10多个省市,造成700多人死亡,直接经济损失超过650亿元(占当年GDP的1%);2006年,强热带风暴 Bilis(碧利斯)因持续性暴雨造成800多人死亡和近350亿元的经济损失;0908号台风 Morakot(莫拉克)以高达3 059.8 mm的过程降水量对台湾南部造成了灾难性的后果,导致约700人死亡或失踪;2013年台风 Fitow(菲特)给浙江中北部沿海带来的极端暴雨和风暴潮导致余姚等城市被淹超过一周时间,直接经济损失超过600亿元。

登陆热带气旋强降水成因和降水预报研究始终是科学家们关注的热点之一。譬如,2010年3月在台北召开了台风 Morakot 国际研讨会,总结了导致其强降水的四大因素^[1]:1)强劲的西南季风和在水汽输送;2)由台风环流与季风气流辐合所形成的横跨台湾海峡的东西向对流带;3) Morakot 翻越台湾中央山脉时的缓慢移速;4)陡峭地形对暖湿气流的剧烈抬升。

在科学上,LTC降水(风雨)是热带气旋科学面临的三大挑战(另两项分别为TC路径突变和强度突变)之一^[2-3]。围绕这一科学问题,本文重点对LTC降水预报研究进行了回顾和总结,并针对LTC降水预报技术研究现状及其未来发展展开了讨论和展望,以期有助于该领域研究的不断推进;考虑到TC强降水成因研究是LTC降水预报的重要基础,本文对TC强降水成因研究也进行了简要回顾。

1 热带气旋强降水成因研究简要回顾

陈联寿^[4]指出,登陆台风强降水问题与三方面要素有关:1)登陆台风内部中尺度对流系统的生消;2)登陆台风与其环境大气的相互作用;3)与下垫面的相互作用。就LTC强降水成因研究,简要总结为以下三个方面。

1.1 环境条件是TC强降水发生的关键外因之一

环境条件是指TC外围的大气环境,包括水汽输送或急流、冷空气或西风槽、垂直风切变、台风倒槽与东风波以及其他环境条件。

1)水汽输送或急流

稳定的水汽输送是TC强降水产生的重要条

件^[1,5-12],这样的水汽输送常常与低空急流有关^[7,9,12]。台风与高、低空急流的有利配置还容易造成台风远距离暴雨^[13-14]。

2)冷空气或西风槽

冷空气侵入台风的强度和位置不同,对降水影响差异较大^[15],低层适度冷空气入侵或西风槽的作用可以加强TC降水^[8,16-21];河南“75·8”、台湾“67·10”特大暴雨过程均与冷空气活动有关^[22];西风槽是影响TC远距离暴雨的重要系统^[23],且西风槽有利于TC变性^[24-25]和导致中尺度系统强度发生变化^[26];台风环境场斜压锋面结构及其强度与台风暴雨强度有正相关^[27];TC变性会导致TC强度和结构的显著变化,变性加强TC是TC降水增幅的一个可能原因,两者之间的联系还有待深入研究^[28]。

3)垂直风切变

垂直风切变对于TC降水分布有重要影响^[19,29-32];当垂直切变较强时,强对流和最大降水容易出现在切变下风方向左侧^[19,29]。

4)台风倒槽与东风波

台风倒槽在有利环流配置下容易产生暴雨^[7-8,33]。6718号热带风暴 Carla 外围东风波和冷锋系统相遇在迎风坡喇叭口地形形成了“67·10”台湾新寮特大暴雨(24小时降雨1 672 mm)^[22]。

5)其他环境条件

当由于某种原因(如受大陆高压的阻挡、进入两环副高之间的断裂区等)使得TC的移动变得缓慢时易出现暴雨加强^[1,13,19,34-37]。当出现双TC相互作用,一个弱的TC或残涡并入另一个TC时,容易增强TC降水^[38-40]。

1.2 下垫面条件是TC强降水发生的另一个关键外因

下垫面条件是指TC在移动过程中所经历的下垫面状况,如山地、海岸线、城市、水面、湿地等地形。

模拟研究和诊断分析均显示,山地地形对TC降水具有显著的增强作用^[1,15,22,41-50]。海岸线的分布既能影响TC强降水的落区,也影响其强度^[51-55],通常TC降水强度右侧强于左侧。另外,“城市热岛”在TC强降水过程中也可能发挥重要作用^[56]。水面(湖泊、水库)和湿地有利于登陆后的台风环流维持和降水加强^[57-59]。

1.3 内部条件是TC强降水发生的关键内因

内部条件是指TC环流内的螺旋云带或螺旋雨带、活跃于其间的中小尺度系统以及云微物理过程等。

中小尺度系统是台风强降水的主角^[22,26,33,60-66], 涡旋 Rossby 波理论很好地解释了这些现象^[67-70]; 环境条件或下垫面条件与 TC 相互作用能够激发中尺度系统活动从而易于加剧强降水的发生^[50,59], 而这种作用通常是通过涡旋 Rossby 波传播使 TC 得以增强^[71]; 由卫星云图分析得到, 有三类 TC 云系合并可以引起强降水加强^[72]; TC 螺旋雨带和中尺度系统之间存在相互作用, 两者之间的正反馈作用会导致强降水加强^[73]; 另外, 云微物理过程与 TC 降水存在密切联系^[74-75]。

一些研究分别针对台湾^[76]、两广^[77]、海南^[78]和东南沿海^[79]等不同地区, 指出 LTC 强降水与 LTC 路径、强度和移速之间存在密切关系。

2 登陆热带气旋降水预报研究回顾

2.1 基于数值模式的 LTC 降水预报研究成果不断涌现

这方面的研究可概括为以下三类:

第一类研究侧重于同化技术对模式初始场的改进。常用的同化技术包括三维变分同化(3DVAR)、集合卡尔曼滤波(EnKF)和混合集合变分同化(Hybrid EnVar)。Xiao et al.^[80]的研究表明, 反射率因子有利于改善台风 Rusa (2002) 的短时定量降水预报。袁炳等^[81]对登陆台风韦帕的 4DVAR 数值模拟分析指出, 引入 ATOVS 资料能够改进降水强度和落区。Zhao et al.^[82]对比研究了雷达径向速度和反射率因子指出, 反射率因子越大越有利于提高台风 Meranti (2010) 的降水预报。Zhang and Pu^[83]的集合卡尔曼滤波研究表明, 地表资料同化可以显著改善飓风 Katrina (2005) 登陆过程中的定量降水预报。

第二类研究侧重于不同物理过程参数化的改进。薛根元等^[84]开展不同边界层参数化和对流参数化方案下登陆浙闽台风强降水过程的数值模拟, 并给出根据预报和研究对象的特点来选择对流参数化方案的建议。张亚洲等^[85]利用中尺度 AREM 和 WRF 模式采用不同的积云和边界层参数化方案进行集合预报技术的 TC 降水预报试验, 取得有意义的结果。基于 WRF 模式, 通过调整 Kain-Fritsch 对流参数化最优参数估计的热带气旋定量降水预报模拟效果良好, 尤其对于 TC 强降水事件而言^[86]。

第三类研究则关注集合预报方案的研究。Zhang et al.^[87]采用高分辨率对流中尺度集合模式系统对台风 Morakot (2009) 破纪录的极端降水进行

预报试验, 结果表明该系统能够提供有价值的预报结果。Hsiao et al.^[88]发展了一个与水文模式实现单向耦合的集合气象模拟系统, 用于开展台湾山区流域台风降水与洪水的集合预报。Fang and Kuo^[89]利用概率匹配技术针对台湾地形增强的台风强降水改进了基于集合的定量降水预报。Wu et al.^[90]对台风 Sinlaku (2008) 3 类路径分类集合模拟显示, 越接近最佳路径的成员, 其模拟的台湾北部降雨分布与观测的一致性越好。基于集合预报系统, Hong et al.^[91]发展了台湾台风集合定量降水预报模型, 该模型能提供更合理的预报并实现了实时业务应用。陈博宇等^[92]利用集合预报成员优选订正技术有效地改进了登陆台风暴雨过程预报。

2.2 关于 LTC 降水预报统计方法的研究受到关注

贡九鼎等^[93]关注到了相似 TC 降水对于实际 TC 降水预报的有用性, 设计了一个台风降水预报的数学模型并给出多重解之定义, 通过先求解多重解再进行集成的方式实现了对 TC 降水的预报。岳彩军等^[94]基于 QPE 结果, 采用外推法初步实现了对登陆台风未来 0~3 h 的短时定量降水预报。Wei^[95]发展了一种基于主成分分析(PCA)和半径基函数(Radial Basis Function, RBF)技术改进的神经网络方法, 该方法能提供台风影响期间可信赖的降水临近(1~6 h)预报。Wei^[96]研制了两种支撑矢量机(小波支撑矢量机 W SVM 和高斯支撑矢量机 GSVM)用于热带气旋逐时降水预报, 并与线性回归及 MM5 模式进行对比试验, 发现小波支撑矢量机的预报效果相对更好。针对业务需求, Li et al.^[97]基于登陆地点距离深圳 700 km 范围内历史 LTC 的登陆方向、强度及距离, 提出了一种非参数方法用于预报深圳市热带气旋短时降水的客观方法。

2.3 动力-统计结合的 LTC 降水预报方法研究受到较多关注

这方面的研究可分为以下三类:

第一类, 利用数值模式的 TC 预报路径和历史观测降水, 一些研究从气候平均角度做出 TC 降水预报。Marks et al.^[98]利用地面观测资料和 TRMM 卫星资料发展了沿 TC 路径 500 km 范围内的热带气旋降水预报的气候持续性模型(R-CLIPER)。Lee et al.^[99]基于 371 站历史小时降水, 建立了考虑地形抬升和与 TC 半径相联的降水率两个因子的台湾台风降水预报气候模型, 该模型能够根据台风中心位置给出任意台站或流域的逐时降水预报。Lonfat et al.^[100]基于降水的气候持续性模型(R-CLIPER), 增

加考虑了垂直风切变和地形的影响,进而建立了参数化的飓风降雨模型(PHRaM),该模型对飓风过程降水的预报效果较R-CLIPER模型明显改进。

第二类,采用数值模式的TC预报路径和起报时刻TC雨强分布,一些学者开展TC降水预报研究。Kidder et al.^[101]发展了热带降水潜势(TRaP)技术,该技术将起报时刻卫星估测的TC雨强分布与预报的TC路径相结合,在预报时段内积分进而得到未来的TC降水;Liu^[102]将TRaP技术应用于不同路径台风对台湾降水影响的研究时发现,地形对TC降水有重要影响。当同时使用多种卫星遥测资料时,Ebert et al.^[103]进一步发展了集合热带降水潜势(eTRaP)技术;目前TRaP和eTRaP技术在美国国家海洋和大气管理局(NOAA)得到业务应用。

第三类,采用数值模式的预报要素场,通过动力相似判别进行TC降水预报研究。钟元等^[104]提出一个热带气旋定量降水预报的动力相似方案,该方案通过构造预报时段内预报区域环境要素场与历史热带气旋样本相应变量之间的28个客观相似判据,寻找相似样本并对相似样本的历史降水量进行相似指数的权重综合,从而实现TC降水的定量预报;个例预报试验表明该方案具有一定预报技巧。李博和赵思雄^[105]采用综合多级相似预报技术(简记为SMAT)建立台风强降水预报模型的试验研究——该技术利用数值模拟结果对样本间的相似程度进行描述,同时将描述样本相似程度的物理量由单因子拓展为因子组合,并通过对13年间历史资料的试验,得出了台风强降水预报模型,该模型具有较好的平均预报能力。

3 LTC降水预报方法研究领域存在的主要问题及可能出路

3.1 以数值天气预报(NWP)模式为代表的预报技术对LTC降水预报能力目前仍非常有限

目前,全球各大气中心针对LTC降水预报业务,常用的数值天气预报(NWP)模式主要包括:美国国家环境预报中心(NCEP)全球集合预报系统、欧洲中期天气预报中心(ECMWF)集合系统、英国气象局统一全球模式、日本气象厅全球模式、中国气象局全球模式(T639)、中国气象局GRAPES模式、澳大利亚气象局全球和区域集合预报系统^[106-108]。此外,还有一些区域模式^[109-111]、统计模型^[97]和动力-统计模型^[101,103]也在TC降水预报中发挥作用。

尽管如此,以NWP为代表的技术方法对LTC降水的预报能力仍然非常有限^[106-107,109,112]。目前,LTC降水预报能力的不足主要表现在三个方面:1)强降水落区预报偏差大;2)强降水强度预报的准确性不高;3)缺乏精细降水分布的预报能力^[3]。

3.2 对于LTC降水预报,发展NWP模式是主流方向,但短时间内其预报能力很难取得突破

NWP模式针对LTC降水预报在短时间内很难取得突破。自1904年挪威学者Bjerknes首先提出数值天气预报理论以来,NWP模式的发展涉及模式动力框架、物理过程参数化、资料同化、模式程序软件等多方面;经过百余年的发展历程,数值天气预报学科有了飞跃的发展;特别是自20世纪90年代以来,大气科学以及地球科学的研究进展,高速度、大容量的巨型计算机及网络系统的快速发展,更加快了数值天气预报的发展步伐^[113]。但是应该看到,NWP模式的发展是一个长期的渐变过程,要提高数值模式的预报技巧越来越难^[114-115]。

对于LTC降水而言,如果从TC自身特征角度看,TC结构是至关重要的因子,TC强度则是另一个重要因子。图1给出热带气旋三维结构示意图,其复杂性和精细程度依靠卫星、雷达、飞机乃至新发展的火箭技术等现有探测手段尚难以获得满意的观测,但通过外场科学试验可以有限地改善某些TC个例的结构观测^[116-117];将这些观测参与资料同化,尽管能够一定程度上改善NWP模式初始场中的TC结构,甚至对于预报时效内的TC结构和强度取得了一定程度的改进^[118-125],但对于LTC降水预报的改进仍十分有限。另外,目前对于影响LTC降水的TC中小尺度动力学机制、海陆交界面的物理过程描述等问题仍难以准确认识^[126-129]。不难看出,上述现状大大降低了NWP模式对于LTC降水的预报能力在短时间内取得突破的可能性。

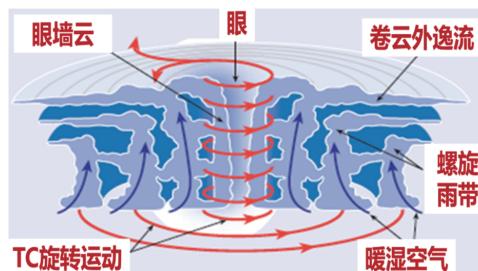


图1 热带气旋三维结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of three dimensional structure of tropical cyclone

3.3 以减小数值模式 LTC 降水预报误差为目标, 动力-统计相似预报方法研究前景值得期待

统计方法不是预报技术的主流发展方向。LTC 降水预报统计模型主要是各种数理统计方法的应用。统计方法利用了大量的实况资料, 却没有利用或没有充分利用已经掌握的物理知识^[130]。统计方法由于缺乏物理基础, 自身无法克服预报效果的不稳定性, 始终不能成为预报技术的主流发展方向。

动力模式与统计方法结合是预报技术发展的一条重要途径, 其本质是通过引入历史观测数据信息有针对性地减小数值模式的预报误差^[130-131]; 其中动力-统计相似预报是行之有效的理论方法^[132-133]。首先, 顾震潮^[134]从数学上证明了同一高度、不同时刻的温压场和同一时刻、不同高度上的温压场是等价的。这从理论上给出了数值预报中使用历史资料的可能性。此后, 他的学生丑纪范院士^[130-131]沿着这一方向开展了系统的研究, 在上述基础上探索实现该思想的原理与方法, 将微分方程初值问题转变为等价的泛函极值问题, 丑院士等长期致力于利用历史资料的研究, 构建了利用历史资料改进数值预报的体系框架^[132, 135-140]。其中, 采用统计-动力相结合的相似误差订正法^[132-133]是一条行之有效之路。这一理论首先在我国汛期降水预测方法研究中得到成功展示, 研究建立了动力-统计集成的中国季节降水预测模型(FODAS)^[141]。

关于动力-统计结合的 LTC 降水预报方法研究尽管受到不少关注, 但总体上其预报能力未能突破数值模式的水平。结合动力-统计相似预报理论在我国汛期降水预测方法研究中的成功经验, 探索建立合适的动力-统计相似预报方法, 可能是 LTC 降水预报研究的一条出路。

LTC 降水相似预报是一条值得深入探索之路, 这当中, 动力-统计如何结合可能是能否成功的关键。前面对动力-统计 LTC 降水预报方法研究回顾显示, 现有研究可分为三类, 其中第三类为相似预报; 前两类研究都用到了 TC 预报路径, 这说明 TC 预报路径是 LTC 降水预报的关键因子之一。而且我们还知道, 数值模式过去 30 年在热带气旋研究及其预报业务发展中所取得的最大成功是越来越准确的 TC 路径预报^[142-145]。然而, 第三类相似预报研究却并未采用 TC 预报路径, 而主要是从预报要素场相似的角度考虑了动力相似方案。因此, 充分吸收数值模式关于 TC 预报方面的最大优势——TC 预报路径, 开展 LTC 降水相似预报研究可能是一个

值得深入探索的方向。

最近, Ren et al.^[146-147]发展了 TC 路径相似的面积指数 TSAI, 并将该指数应用于对 LTC“1409 号超强台风威马逊”过程降水分布的预报研究: 挑选了历史上与威马逊登陆路径最相似的 10 个 LTC 的过程降水分布, 采用最大值集成方案进行登陆降水预报试验, 并将结果与三个数值模式(EC、GFS 和 T639)做了对比。由图 2 可见, 基于两个评估指标(100 mm 以上过程降水的 TS 评分和降水预报场与观测场的相关系数)均表现为该相似预报结果(TS: 0.47; 相关系数: 0.84) 优于三个数值模式(TS: 0.36, 0.44 和 0.39; 相关系数: 0.83, 0.79 和 0.73)。进而, 初步建立了第一代 LTC 降水的动力-统计相似集合预报模型(LTP_DAF), 并利用第一代 LTP_SAF 模型, 对华南地区 2012—2016 年造成华南单站日降水极值超过 100 mm 的 21 个 TC 的过程降水进行了模拟预报试验^[148-150], 试验结果表明: 1) 无论对于建模样本还是独立样本, LTP_DAF 模型对于不同阈值以上强降水(≥ 50 mm、100 mm 或 250 mm)的模拟及预报能力均优于动力模式; 2) 引入强度因子后 LTP_DAF 模型的模拟及预报能力均有提升。

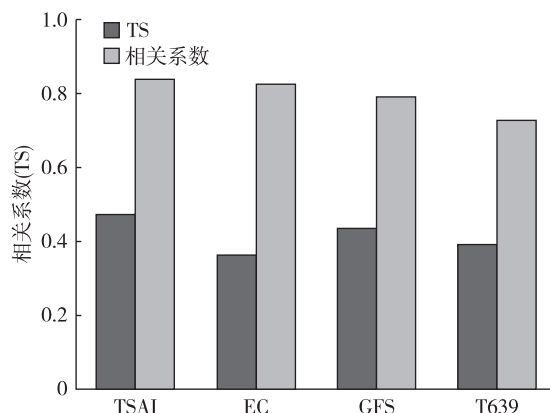


图2 四种方法对 1409 号超强台风威马逊登陆过程降水预报效果对比(TSAI: TC 路径相似的面积指数, EC、GFS 和 T639 为三个数值模式, TS: 基于台站的 100 mm 以上过程降水的 TS 评分)

Fig.2 A comparison of landfalling accumulated precipitation forecasting on super typhoon Rammasun (1409) by TSAI (Tropical cyclone track Similarity Area Index), EC, GFS, and T639 (TS: Threat scores of precipitation (≥ 100 mm) measured at weather stations)

上述模拟预报试验已表现出令人鼓舞的结果。不难想见, 沿着 LTC 降水动力-统计相似预报方向深入探索, 将丰富的 TC 历史资料信息(TC 路径、TC 降水、TC 自身特征及环境场特征)与数值模式的相

关(预报及初值场)信息进行更全面(多物理因子)、更充分(增大分析时段)的结合来开展 LTC 降水动力-统计相似预报研究,探索减小数值模式 LTC 降水预报误差的有效方法,无疑将是一个充满希望的研究领域和方向。

4 小结与展望

登陆热带气旋强降水成因研究回顾表明,造成 LTC 强降水的原因包括环境条件、下垫面条件和 TC 自身特征。以数值天气预报(NWP)模式为代表的预报技术对 LTC 降水的预报能力仍然非常有限,模式预报误差还很大。

改进 NWP 模式预报误差的途径主要有以下两条:

1) 发展 NWP 模式,这是核心途径,也是正面解决问题的办法。相关模式关键技术包括模式动力框架、物理过程参数化、资料同化和提高模式网格分辨率等。经过百余年的发展历程,数值天气预报学科有了飞跃的发展;但是应该看到,NWP 模式的发展是一个长期的渐变过程,要提高数值模式的预报技巧越来越难^[114-115]。事实上,台风内部精细结构直接观测手段和资料的匮乏,已成为当今制约台风结构、路径、强度乃至降水预报能力等进一步提高的主要瓶颈,NWP 模式针对 LTC 降水的预报效果在短时间内很难取得突破。

2) 动力-统计结合,这是一条重要途径,也是巧妙解决问题的办法,特别是其中的相似预报。针对动力-统计 LTC 降水预报方法研究中存在的对 TC 预报路径重视不足的问题,Ren et al.^[146-147] 发展了 TC 路径相似的面积指数 TSAI,并将该指数应用于 LTC 降水预报试验,表现出优于数值模式的令人鼓舞的结果。开展 LTC 降水动力-统计相似预报研究,探索减小数值模式 LTC 降水预报误差的有效方法,将是一个充满希望的研究领域和方向,值得期待。

致谢: 论文形成过程中与陈联寿院士、丑纪范院士、黄建平教授、费建芳教授、王元教授、高守亭研究员、李维京研究员、封国林研究员、张庆红教授、孟智勇教授、盛立芳教授、李建平教授、陈德辉研究员、沈学顺研究员、任宏利研究员、吴立广教授、李国平教授、闵锦忠教授、钟中教授、许映龙研究员、余晖研究员、程正泉研究员、张义军研究员和徐丹亚教授进行了有益的讨论交流,在此对他们的宝贵

建议和意见一并深表谢意!

参考文献:

- [1] Lee C-S, Wu C-C, Chen Wang T-C, et al. Advances in understanding the "Perfect monsoon-influenced typhoon": Summary from international conference on typhoon Morakot (2009) [J]. *Asia-Pac J Atmos Sci*, 2011, 47 (3): 213-222.
- [2] Chen L, Li Y, Cheng Z Q. An overview of research and forecasting on rainfall associated with landfalling tropical cyclones [J]. *Adv Atmos Sci*, 2010, 27(5): 967-976.
- [3] Woo W C, Hogsett W, Mohapatra M, et al. Challenges and advances related to TC rainfall forecast [C]. Jeju, Republic of Korea: The third international workshop on tropical cyclone landfall processes (IWTCLP-III), 2014.
- [4] 陈联寿. 登陆热带气旋暴雨的研究和预报 [C] // 第十四届全国热带气旋科学讨论会论文摘要集. 2007: 3-7.
- [5] Dimego G J, Bosart L F. The transformation of tropical storm agnes into an extratropical cyclone, Part II: Moisture, vorticity and kinetic energy budgets [J]. *Mon Wea Rev*, 1982, 110(5): 412-433.
- [6] 丁治英, 陈久康. 台风暴雨与环境水汽场的数值试验 [J]. *南京气象学院学报*, 1995, 18(1): 33-38.
- [7] 朱官忠, 曹钢锋, 张善君. 9216 号台风倒槽暴雨增幅的机理分析 [M] // 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: 129-137.
- [8] 孙建华, 赵思雄. 登陆台风引发的暴雨过程之诊断研究 [J]. *大气科学*, 2000, 24(2): 223-237.
- [9] 李英. 登陆热带气旋维持机制的研究 [D]. 北京: 中国气象科学研究院-南京气象学院, 2004.
- [10] 李英, 陈联寿, 徐祥德. 水汽输送影响登陆热带气旋维持和降水的数值试验 [J]. *大气科学*, 2005, 29(1): 91-98.
- [11] 段丽, 陈联寿. 热带风暴“菲特”(0114)特大暴雨的诊断研究 [J]. *大气科学*, 2005, 29(3): 343-353.
- [12] 程正泉, 陈联寿, 李英. 登陆台风降水的大尺度环流诊断分析 [J]. *气象学报*, 2009, 67(5): 840-850.
- [13] 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 [J]. *应用气象学报*, 2000, 11(3): 271-281.
- [14] 张兴强, 丁治英, 王焱. 高空急流与中纬度系统影响下台风暴雨的研究现状 [J]. *气象*, 2001, 27(8): 3-8.
- [15] 陈联寿, 丁一汇. 西太平洋台风概论 [M]. 北京: 科学出版社, 1979: 442-447.
- [16] 仇永炎. 北方盛夏台风暴雨的天气型及其年际变率 [J]. *气象*, 1997, 23(7): 3-9.
- [17] 孙建华, 张晓玲, 卫捷, 等. 20 世纪 90 年代华北大暴雨过程特征的分析研究 [J]. *气候与环境研究*, 2005, 10

- (3):492-506.
- [18] 钮学新,杜惠良,刘建勇.0216号台风降水及影响降水机制的数值模拟试验[J].气象学报,2005,63(1):57-68.
- [19] Chen L. Observations and forecasts of rainfall distribution [C]// Report on topic 0.3 of sixth international workshop on tropical cyclones.2006: 36-42.
- [20] 梁军,陈联寿,张胜军,等.冷空气影响辽东半岛热带气旋降水的数值试验[J].大气科学,2008,32(5):1107-1118.
- [21] 李英,陈联寿,钱传海,等.登陆台风Rananim(0414)环流内中尺度辐合线的形成和发展研究[J].气象学报,2010,68(5):640-651.
- [22] 陶诗言.中国之暴雨[M].北京:科学出版社,1980.
- [23] 朱宏岩.台风与中纬度相互作用形成槽前大暴雨的数值研究[J].大气科学,2000,24(5):669-675.
- [24] 李英,陈联寿,雷小途.高空槽对9711号台风变性加强影响的数值研究[J].气象学报,2006,64(5):552-563.
- [25] Foley G R, Hanstrum B N. The capture of tropical cyclones by cold fronts off the west coast of Australia[J]. Weather and Forecasting, 1994,9(4):577-592.
- [26] 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[J].气象学报,2002,60(1):31-39.
- [27] 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[J].大气科学,1998,22(5):744-752.
- [28] 董美莹.登陆热带气旋降水增幅机制研究[D].北京:中国气象科学研究院-南京信息工程大学,2010.
- [29] Rogers R, Chen S, Tenerelli J, et al. A numerical study of the impact of vertical shear on the distribution of rainfall in Hurricane Bonnie (1998) [J]. Mon Wea Rev, 2003,131(8):1577-1599.
- [30] Corbosiero K L, Molinari J. The effects of vertical wind shear on the distribution of convection in tropical cyclones [J].Mon Wea Rev, 2002,130(8):2110-2123.
- [31] Corbosiero K L, Molinari J. The relationship between storm motion, vertical wind shear and convective asymmetries in tropical cyclones[J].J Atmos Sci,2003,60(2):366-376.
- [32] Yu J,Tan Z-M,Wang Y.Effects of vertical wind shear on intensity and rainfall asymmetries of strong tropical storm Bilis (2006)[J].Adv Atmos Sci, 2010,27(3):552-561.
- [33] 孙建华,齐琳琳,赵思雄.“9608”号台风登陆北上引发北方特大暴雨的中尺度对流系统研究[J].气象学报,2006,64(1):57-71.
- [34] Gao S, Meng Z, Zhang F, et al. Observational analysis of heavy rainfall mechanisms associated with severe tropical storm Bilis (2006) after its landfall[J].Mon Wea Rev, 2009, 137(6): 1881-1897.
- [35] 刘爱鸣,林毅,刘铭,等.“碧利斯”和“格美”登陆后暴雨强度不同的天气学对比分析[J].气象,2007,33(5):36-41.
- [36] 张东,蔡安安,林良勋.强热带风暴“碧利斯”致洪暴雨的特征及成因[J].广东气象,2007,29(1):22-24.
- [37] Yen T H, Wu C C, Lien G Y. Rainfall simulations of typhoon Morakot with controlled translation speed based on EnKF data assimilation[J].Terr Atmos Ocean Sci, 2011,22(6): 647-660.
- [38] 于玉斌.我国近海热带气旋强度突变的机理研究[D].北京:中国气象科学研究院-南京信息过程大学,2007.
- [39] Wu C-C,Cheung K K W,Chen J-H, et al.The impact of tropical storm Paul (1999) on the motion and rainfall associated with tropical storm Rachel (1999) near Taiwan [J].Mon Wea Rev, 2010,138(5):1635-1650.
- [40] 谢惠敏,任福民,李国平,等.超强台风“丹娜丝”对1323号强台风“菲特”极端降水的作用[J].气象,2016,42(2):156-165.
- [41] Meng Z, Nagata M, Chen L. A numerical study on the formation and development of its land-induced cyclone and its impact on typhoon structure change and motion [J].Acta Meteor Sinica, 1996,10(4):430-443.
- [42] 蔡则怡,宇如聪.LASG η 坐标有限区域数值预报模式对一次登陆台风特大暴雨的数值试验[J].大气科学,1997,21(4):459-471.
- [43] Wu C C.Numerical simulation of typhoon Gladys(1994) and its interaction with Taiwan terrain using the GFDL hurricane model [J]. Mon Wea Rev, 2001, 129(6): 1533-1549.
- [44] Lin Y L, Ensley D B, Chiao S, et al. Orographic influences on rainfall and track deflection associated with the passage of a tropical cyclone [J]. Mon Wea Rev, 2002,130(12):2929-2950.
- [45] Wu C-C, Yen T-H, Kuo Y-H, et al. Rainfall simulation associated with Typhoon Herb (1996) near Taiwan. Part I: The topographic effect[J].Wea Forecasting, 2002, 17(5):1001-1015.
- [46] Cangialosi J, Chen S S. A numerical study of the topographic effects on the structure and rainfall in hurricane Georges(1998)[C]. University of Miami, Coral Gables, Florida; 26th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, 2004.
- [47] Murata A. A cloud-resolution numerical simulation for characteristic rainfall induced by typhoon Meari (2004) [C]//Team member report on topic 0.3 of Sixth International Workshop on Tropical Cyclones. 2006.

- [48] 何立富, 梁生俊, 毛卫星, 等. 0513号台风泰利异常强暴雨过程的综合分析[J]. 气象, 2006, 32(4): 84-90.
- [49] 段丽, 陈联寿, 徐祥德. 山脉地形对热带风暴 Fitow 结构和运动影响的数值试验[J]. 气象学报, 2006, 64(2): 186-193.
- [50] 冀春晓, 薛根元, 赵放, 等. 台风 Rananim 登陆期间地形对其降水和结构影响的数值模拟试验[J]. 大气科学, 2007, 31(2): 233-244.
- [51] Dunn G E, Miller B I. Atlantic Hurricanes [M]. Baton Rouge: Louisiana State University Press, 1960: 377.
- [52] Parrish J R, Burpee R W, Marks F D, et al. Rainfall pattern observed by digitized radar during the landfall of hurricane Frederic (1979) [J]. Mon Wea Rev, 1982, 110(12): 1933-1944.
- [53] Powell M D. Changes in the low-level kinematic and thermodynamic structure of Hurricane Alicia (1983) at landfall [J]. Mon Wea Rev, 1987, 115(1): 75-99.
- [54] Rodgers E B, Chang S W, Pierce H F. A satellite observational and numerical study of precipitation characteristics in western North Atlantic tropical cyclones [J]. J Appl Meteor, 1994, 33(2): 129-139.
- [55] 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[J]. 热带气象学报, 1996, 12(4): 304-313.
- [56] 曾智华, 陈伯民, 胡非, 等. 盛夏“城市热岛”对上海“01·8·5”特大暴雨影响的数值模拟[J]. 气象学报, 2002, 60(增刊): 58-64.
- [57] Chen L. Decay after landfall [R]. WMO/TD, 1998: 1.6.1-1.6.5.
- [58] Shen W, Ginis I, Tuleya R E. A numerical investigation of surface water over land on landfalling hurricanes [J]. J Atmos Sci, 2002, 59(4): 789-802.
- [59] 李英, 陈联寿. 湿地边界层通量影响热带气旋登陆维持和降水的数值试验 [J]. 气象学报, 2005, 63(5): 683-693.
- [60] Simpson R H. On the structure of tropical cyclone as studied by aircraft reconnaissance [C]. Tokyo, Japan: UNESCO Symposium on Typhoons, 1954.
- [61] Houze R A Jr, Hobbs P V. Organization and structure of precipitating cloud system [J]. Adv Geophys, 1982, 24: 225-315.
- [62] Atkinson B W. Mesoscale atmospheric circulation [M]. Academic Press, 1982.
- [63] 寿绍文, 励申申, 崔波. 中尺度系统和台风降水增幅的关系//台风科学、业务试验和天气动力学理论的研究(第四分册) [M]. 北京: 气象出版社, 1996: 161-166.
- [64] 姜勇强, 王昌雨, 张维桓, 等. 台风倒槽内 β 中尺度低涡及特大暴雨的数值模拟 [J]. 气象学报, 2003, 61(3): 312-322.
- [65] 徐祥德, 许建民, 王继志, 等. 大气遥感再分析场构造技术与原理 [M]. 北京: 气象出版社, 2003.
- [66] 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 [J]. 地球物理学报, 2004, 47(1): 33-41.
- [67] Willoughby H E. A possible mechanism for the formation of hurricane rainbands [J]. J Atmos Sci, 1978, 35(5): 838-848.
- [68] Montgomery M T, Kallenbach R J. A theory for vortex Rossby-wave and its application to spiral bands and intensity changes in hurricanes [J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1997, 123: 435-465.
- [69] Montgomery M T, Enagonio J. Tropical cyclone via convectively forced vortex Rossby-wave in a three-dimensional quasi-geostrophic model [J]. J Atmos Sci, 1998, 55(20): 3176-3207.
- [70] 余志豪. 台风螺旋雨带——涡旋 Rossby 波 [J]. 气象学报, 2002, 60(4): 502-507.
- [71] 罗哲贤, 徐祥德, 陈联寿. 涡旋合并过程的数值研究 [J]. 大气科学, 2002, 26(6): 807-816.
- [72] 党人庆, 江敦春. 台风降水的熟知模拟和中尺度结构研究 [M]//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.
- [73] Charmaine N F, Greg J H, Peter T M. Mechanisms for the generation of mesoscale vorticity features in tropical cyclone rainbands [J]. Mon Wea Rev, 2006, 134(10): 2649-2669.
- [74] Tao W K, Shi J J, Lin P L, et al. High-resolution numerical simulation of the extreme rainfall associated with typhoon Morakot. Part I: Comparing the impact of microphysics and PBL parameterizations with observations [J]. Terr Atmos Ocean Sci, 2011, 22(6): 673-696.
- [75] 卓鸿. 台风特大暴雨及其云微物理过程关系的研究(博士后研究工作出站报告) [R]. 北京: 中国气象科学研究院, 2012.
- [76] Xie B, Zhang F. Impacts of typhoon track and island topography on the heavy rainfalls in Taiwan associated with Morakot (2009) [J]. Mon Wea Rev, 2012, 140(10): 3379-3394.
- [77] 夏侯杰, 朱伟军, 任福民. 两广地区热带气旋极端降水特征及成因初探 [J]. 热带气象学报, 2017, 33(4): 510-518.
- [78] Jiang X, Ren F, Li Y, et al. Characteristics of tropical cyclone extreme rainfall and its preliminary causes over Hainan Island [J]. Adv Atmos Sci, 2017, accepted.
- [79] Qiu W, Ren F, Wu L, et al. Characteristics of tropical cyclone extreme precipitation and its preliminary causes

- in Southeast China[J]. Meteor Atmos Phys, 2017, revised.
- [80] Xiao Q, Kuo Y-H, Sun J, et al. An approach of radar reflectivity data assimilation and its assessment with the inland QPF of typhoon Rusa (2002) at landfall [J]. J Appl Meteor Climatol, 2007, 46(1): 14-22.
- [81] 袁炳, 费建芳, 王云峰, 等. 应用 ATOVS 资料和非对称 Bogus 资料对登陆台风韦帕的 4DVAR 数值模拟分析 [J]. 气象, 2010, 36(5): 13-20.
- [82] Zhao K, Li X, Xue M, et al. Short-term forecasting through intermittent assimilation of data from Taiwan and mainland China coastal radars for Typhoon Meranti (2010) at landfall [J]. J Geophys Res, 2012, 117(D6): 108.
- [83] Zhang H, Pu Z. Influence of assimilating surface observations on numerical prediction of landfalls of hurricane Katrina (2005) with an ensemble Kalman filter [J]. Mon Wea Rev, 2014, 142(8): 2915-2934.
- [84] 薛根元, 张建海, 陈红梅, 等. 不同对流参数化方案在登陆浙闽台风降水预报中的比较试验 [J]. 高原气象, 2007, 26(4): 765-773.
- [85] 张亚洲, 李盛林, 邓文彬, 等. 基于多模式短期集合预报技术的热带气旋降水预报试验 [J]. 气象与减灾研究, 2011, 34(2): 26-33.
- [86] Yu X, Park S K, Lee Y, et al. Quantitative precipitation forecast of a tropical cyclone through optimal parameter estimation in a convective parameterization [J]. SOLA, 2013, 9(4): 36-39.
- [87] Zhang F, Weng Y, Kuo Y-H, et al. Predicting typhoon Morakot's catastrophic rainfall with a convection-permitting mesoscale ensemble system [J]. Wea Forecasting, 2010, 25(6): 55-68.
- [88] Hsiao L-F, Yang M-J, Lee C-S, et al. Ensemble forecasting of typhoon rainfall and floods over a mountainous watershed in Taiwan [J]. J Hydrol, 2013, 506(17): 55-68.
- [89] Fang X, Kuo Y-H. Improving ensemble-based quantitative precipitation forecasts for topography-enhanced typhoon heavy rainfall over Taiwan with a modified probability-matching technique [J]. Mon Wea Rev, 2013, 141(11): 3908-3932.
- [90] Wu C-C, Chen S-G, Lin S-C, et al. Uncertainty and predictability of tropical cyclone rainfall based on ensemble simulations of typhoon Sinlaku (2008) [J]. Mon Wea Rev, 2013, 141(10): 3517-3538.
- [91] Hong J-S, Fong C-T, Hsiao L-F, et al. Ensemble typhoon quantitative precipitation forecasts model in Taiwan [J]. Wea Forecasting, 2015, 30(1): 217-237.
- [92] 陈博宇, 郭云谦, 代刊, 等. 面向台风暴雨的集合预报成员优选订正技术研究及应用试验 [J]. 气象, 2016, 42(12): 1465-1475.
- [93] 贡九鼎, 钮学新, 李慧武. 华东台风降水预报的一种集成 [J]. 大气科学, 1995, 19(1): 101-110.
- [94] 岳彩军, 陈佩燕, 雷小途, 等. 登陆台风短时定量降水预报方法初探 [J]. 气象科技, 2006, 34(1): 32-36.
- [95] Wei C-C. RBF neural networks combined with principal component analysis applied to quantitative precipitation forecast for a reservoir watershed during typhoon periods [J]. J Hydrometeorol, 2012, 13(2): 722-734.
- [96] Wei C-C. Wavelet support vector machines for forecasting precipitation in tropical cyclones: Comparisons with GSVM, regression, and MM5 [J]. Wea Forecasting, 2012, 27(2): 438-450.
- [97] Li Q, Lan H, Chen Z, et al. An operational statistical scheme for tropical cyclone include rainfall forecast [J]. J Trop Meteor, 2015, 21(2): 101-110.
- [98] Marks F D Jr, Kappler G, DeMaria M. Development of a tropical cyclone rainfall climatology and persistence (RCLIPER) model [C] // 25th Conf. on Hurricanes and Tropical Meteorology. San Diego: American Meteor Society, 2002: 327-328.
- [99] Lee C-S, Huang L-R, Shen H-S, et al. A climatology model for forecasting typhoon rainfall in Taiwan [J]. Nat Hazards, 2006, 37(1): 87-105.
- [100] Lonfat M, Rogers R, Marchok T, et al. A parametric model for predicting hurricane rainfall [J]. Mon Wea Rev, 2007, 135(9): 3086-3097.
- [101] Kidder S Q, Kusselson S J, Knaff J A, et al. The tropical rainfall potential (TRaP) technique. Part I: Description and examples [J]. Wea Forecasting, 2005, 20(4): 456-464.
- [102] Liu C-C. The influence of terrain on the tropical rainfall potential technique in Taiwan [J]. Wea Forecasting, 2009, 24(3): 785-799.
- [103] Ebert E, Kusselson S J, Turk M, et al. Ensemble tropical rainfall potential (eTRaP) forecasts [J]. Wea Forecasting, 2011, 26(2): 213-224.
- [104] 钟元, 余晖, 滕卫平, 等. 热带气旋定量降水预报的动力相似方案 [J]. 应用气象学报, 2009, 20(1): 17-27.
- [105] 李博, 赵思雄. 用 SMAT 建立台风暴雨预报模型的试验研究 [J]. 气象, 2009, 35(6): 3-12.
- [106] Tuleya R E, Demaria M, Kuligowski R J. Evaluation of GFDL and simple statistical model rainfall forecasts for U. S. landfalling tropical storms [J]. Wea Forecasting, 2007, 22(1): 56-70.
- [107] Wang Y, Shen X, Chen D. Verification of tropical cyclone rainfall predictions from CMA and JMA global models

- [J]. *J Trop Meteor*, 2012, 18(4): 537-542.
- [108] 麻素红, 吴俞, 瞿安祥, 等. T213 与 T639 模式热带气旋预报误差对比 [J]. *应用气象学报*, 2013, 23(2): 167-173.
- [109] 黄伟, 余晖, 梁旭东. GRAPES-TCM 对登陆热带气旋降水的预报及其性能评估 [J]. *气象学报*, 2009, 67(5): 892-901.
- [110] 姚日升, 涂小萍, 董加斌. GRAPES_TCM 模式对影响浙江省热带气旋的降水预报评估 [J]. *气象科学*, 2013, 33(2): 215-221.
- [111] 陈子通, 戴光丰, 罗秋红, 等. 模式动力过程与物理过程耦合及其对台风预报的影响研究 [J]. *热带气象学报*, 2016, 32(1): 1-8.
- [112] Marchok T, Rogers R, Tuleya R. Validation schemes for tropical cyclone quantitative precipitation forecasts: Evaluation of operational models for U.S. landfalling cases [J]. *Wea Forecasting*, 2007, 22(4): 726-746.
- [113] 陈德辉, 薛纪善. 数值天气预报业务模式现状与展望 [J]. *气象学报*, 2004, 62(5): 623-633.
- [114] 王太微, 陈德辉. 数值预报发展的新方向——集合数值预报 [J]. *气象研究与应用*, 2007, 28(1): 6-12.
- [115] Bauer P, Thorpe A, Brunet G. The quiet revolution of numerical weather prediction [J]. *Nature*, 2015, 525(7567): 47-55.
- [116] 雷小途, 雷明, 赵兵科, 等. 火箭弹下投探测台风气象参数新技术及初步试验 [J]. *科学通报*, 2017, 已接受.
- [117] Melhauser C, Zhang F. Development and application of a simplified coplane wind retrieval algorithm using dual-beam airborne Doppler radar observations for tropical cyclone prediction [J]. *Mon Wea Rev*, 2016, 144(7): 2645-2666.
- [118] Rogers R, Aberson S, Aksoy A, et al. NOAA'S hurricane intensity forecasting experiment: A progress report [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 2013, 94(6): 859-882.
- [119] Wang M, Xue M, Zhao K, et al. Assimilation of T-TREC-retrieved winds from single-Doppler radar with an ensemble Kalman filter for the forecast of typhoon Jangmi (2008) [J]. *Mon Wea Rev*, 2014, 142(5): 1892-1907.
- [120] Li Z, Pu Z, Sun J, et al. Impacts of 4DVAR assimilation of airborne Doppler radar observations on numerical simulations of the genesis of typhoon Nuri (2008) [J]. *J Appl Meteor Climatol*, 2014, 53(10): 2325-2343.
- [121] Zhang F, Weng Y. Predicting hurricane intensity and associated hazards: A five-year real-time forecast experiment with assimilation of airborne Doppler radar observations [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 2015, 96(1): 25-33.
- [122] Braun S A, Newman P A, Heymsfield G M. NASA'S hurricane and severe storm sentinel (HS3) investigation [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 2016, 97(11): 2085-2102.
- [123] Chavas D R, Lin N, Dong W, et al. Observed tropical cyclone size revisited [J]. *J Climate*, 2016, 29(8): 2923-2939.
- [124] Guimond S R, Heymsfield G M, Reasor P D, et al. The rapid intensification of hurricane Karl (2010): New remote sensing observations of convective bursts from the global Hawk platform [J]. *J Atmos Sci*, 2016, 73(9): 3617-3639.
- [125] Creasey R L, Elsberry R L. Tropical cyclone center positions from sequences of HDSS sondes deployed along high-altitude overpasses [J]. *Wea Forecasting*, 2017, 32(1): 317-325.
- [126] 沈新勇, 毕明玉, 张玲, 等. 中尺度对流系统对台风“风神”移动路径影响的研究 [J]. *气象学报*, 2012, 70(6): 1173-1187.
- [127] 李青青, 周立, 范轶. 台风云娜(2004)的高分辨率数值模拟研究: 眼壁小尺度对流运动 [J]. *气象学报*, 2009, 67(5): 787-798.
- [128] 赖巧珍, 吴立广, Shie C-L. 0908 号台风“莫拉克”登陆过程中海表面温度变化特点及其对“莫拉克”的影响 [J]. *热带气象学报*, 2013, 29(2): 221-234.
- [129] Powell M D, Houston S H. Surface wind fields of 1995 hurricanes Erin, Opal, Luis, Marilyn, and Roxanne at landfall [J]. *Mon Wea Rev*, 1998, 126(5): 1259-1273.
- [130] 丑纪范. 为什么要动力-统计相结合? ——兼论如何结合 [J]. *高原气象*, 1986, 5(4): 367-372.
- [131] Chou J. A problem of using past data in numerical weather forecasting [J]. *Sci China Ser A*, 1974, 17(6): 108-119.
- [132] 任宏利, 丑纪范. 统计-动力相结合的相似误差订正法 [J]. *气象学报*, 2005, 63(6): 988-993.
- [133] 丑纪范, 任宏利. 数值天气预报——另类途径的必要性和可行性 [J]. *应用气象学报*, 2006, 17(2): 240-244.
- [134] 顾震潮. 天气数值预报中过去资料的使用问题 [J]. *气象学报*, 1958, 29(3): 176-184.
- [135] 邱崇践, 丑纪范. 改进数值天气预报的一个新途径 [J]. *中国科学(B辑)*, 1987, 17(8): 903-910.
- [136] 黄建平, 王绍武. 相似-动力模式的季节预报试验 [J]. *中国科学(B辑)*, 1991, 21(2): 216-224.
- [137] 张邦林, 丑纪范. 经验正交函数在气候数值模拟中的应用 [J]. *中国科学(B辑)*, 1991, 21(4): 442-448.
- [138] 曹鸿兴. 大气运动的自忆性方程 [J]. *中国科学(B辑)*, 1993, 23(1): 104-112.
- [139] 郝吉东, 丑纪范. 数值天气预报中的两类反问题及一种数值解——理想试验 [J]. *气象学报*, 1994, 52(2): 129-137.
- [140] 龚建东, 李维京, 丑纪范. 集合预报最优初值形成的四

- 维变分同化方法[J]. 科学通报, 1999, 44(10): 1113-1116.
- [141] 封国林, 赵俊虎, 支蓉, 等. 动力-统计客观定量化汛期降水预测研究新进展[J]. 应用气象学报, 2013, 24(6): 656-665.
- [142] Fraedrich K, Raible C C, Sielmann F. Analog ensemble forecasts of tropical cyclone tracks in the Australian region [J]. *Wea Forecasting*, 2003, 18(1): 3-11.
- [143] Langmack H, Fraedrich K, Sielmann F. Tropical cyclone track analog ensemble forecasting in the extended Australian basin: NWP combinations [J]. *Q J R Meteorol Soc*, 2012, 138(668): 1828-1838.
- [144] WMO. 2014: Pre-Workshop Topic Reports [C]. Jeju, Republic of Korea: Eighth WMO International Workshop on Tropical Cyclones (IWTC-III), 2014.
- [145] Cangialosi J, Franklin J. 2014 National Hurricane Center Forecast Verification Report [R]. NOAA/NWS/NCEP/National Hurricane Center, 2015.
- [146] Ren F, Qiu W, Jiang X, et al. A new technique for landfalling tropical cyclone quantitative precipitation forecast (QPF) [C]. Singapore: 14th Annual Meeting of the Asia Oceania Geosciences Society, 2017.
- [147] Ren F, Qiu W, Ding C, et al. An objective index of tropical cyclone track similarity and its preliminary application in the prediction of the precipitation associated with landfalling tropical cyclones [J]. *Q J R Meteorol Soc*, 2017, submitted.
- [148] Ren F, Qiu W, Ding C, et al. A new technique for landfalling tropical cyclone quantitative precipitation forecast (QPF) [C]. Macau, China: Fourth International Workshop on Tropical Cyclone Landfall Processes and Project Progress Meeting, 2017.
- [149] 丁晨晨, 任福民, 邱文玉, 等. 登陆热带气旋降水预报的一种新方法——基于路径相似的登陆热带气旋降水之动力-统计集合预报模型 [J]. *气象学报*, 2017, 已投稿.
- [150] 任福民, 丁晨晨, 邱文玉, 等. 登陆热带气旋降水预报新方法研究进展与展望——动力-统计相似预报理论与方法研究 [C]. 温州: 第十八届全国热带气旋科学讨论会, 2017.