

林开平,陈伟斌,刘国忠,等. 广西暴雨业务预报技术回顾与展望[J]. 气象研究与应用,2020,41(4):13-19.

Lin Kaiping, Chen Weibin, Liu Guozhong, et al. Review and prospect of operational forecast technology of rainstorm in Guangxi[J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2020, 41(4): 13-19.

广西暴雨业务预报技术回顾与展望

林开平, 陈伟斌*, 刘国忠, 覃月凤, 董雪晗, 熊思章

(广西壮族自治区气象台, 南宁 530022)

摘要: 回顾了广西暴雨业务预报技术 60 年发展历程,总结了近 30 年气象工作者对广西暴雨研究与暴雨预报技术取得的主要成果。广西暴雨研究进展主要是从广西暴雨天气机理研究、广西几种主要暴雨类型统计分析等方面进行综述。暴雨预报技术着重对多源资料的应用、数值预报产品的释用、集合预报技术的应用、人工智能的应用等客观预报技术在广西暴雨预报的应用方面进行归纳。

关键词: 暴雨预报业务;暴雨研究进展;预报技术;客观预报

中图分类号: P49

文献标识码: A

doi: 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2020.4.03

OSID:



引言

广西地属中、亚热带季风气候区,是中国季风最明显的地区之一。夏季受东南季风和西南季风影响,活跃的季风加上复杂的地形影响,广西经常出现暴雨天气,是华南地区中尺度暴雨活动最频繁的地区之一^[1-2]。随着全球气候变暖,广西由暴雨引发的洪涝、城市渍涝等灾害更加严重,防灾、减灾形势越发严峻^[3-4]。因此,暴雨预报方法和技术研究与开发,在广西天气预报和气象服务中具有十分重要的地位。

广西 4—9 月为主要雨季,总降水量占全年降水量的 70%~85%,可以分为前汛期和后汛期两个阶段,分割点大致在 6 月中下旬^[5]。前汛期暴雨主要出现在桂北,后汛期暴雨主要出现在桂南。广西的暴雨空间分布极不均匀,具有东部多,西部少;丘陵山区多,河谷平原少;夏季迎风坡多,背风坡少等特点。广西最常见的暴雨类型是西风带暴雨,此外,由于东邻

广东省,南濒北部湾,台风暴雨也是广西暴雨的主要类型之一。影响广西暴雨的重要天气系统除了高空槽、低涡切变、低空急流、副热带高压、锋面、热带气旋外,还有季风云团、北部湾低压等^[6]。

1 广西暴雨业务预报技术发展回顾

广西暴雨预报业务从上世纪 60 年代至今,大致可分为五个阶段。第一个阶段为上世纪 60—70 年代,广西地市级及以上的区域暴雨预报主要是基于天气图的天气形势分析和对天气系统的一些外推。在对暴雨过程进行分析总结的基础上,根据环流形势和天气系统对影响广西的暴雨进行初步的分型,并归纳总结出一些基于天气图的暴雨预报指标。县级的单站暴雨预报主要依据简易天气图和上级气象台的天气形势预报,结合本站的气象观测资料。一些气象站利用单站剖面图资料建立了单站暴雨指标和预报工具^[7-8]。

第二阶段为上世纪 80 年代,广西地市级及以上

收稿日期: 2020-11-06

基金项目: 国家自然科学基金(41765002)、广西自然科学基金(2018GXNSFAA281229, 2018GXNSFAA294128, 2017GXNSFDA198030)、中国气象局预报员专项项目(CMAYBY2020-095)、广西气象局气象科学研究与技术开发项目(桂气科 201502)、广西气象局气象科研计划项目(桂气科 2019M07)

作者简介: 林开平(1960—),男,正研级高工,主要从事暴雨研究及天气预报工作。E-mail: Lin_kaiping@163.com

* 通讯作者: 陈伟斌(1982—),男,高级工程师,主要从事天气预报服务和技术研究。E-mail: wbchen@163.com

的区域暴雨预报仍然是以天气图的天气形势分析和对天气系统的一些外推为主,对暴雨的分型和基于天气图的一些暴雨预报工具、预报指标得到了进一步的改善。同时,全区各级气象台站通过传真图的接收获得了一些日本、欧洲的数值预报产品,各级预报员对如何利用这些数值预报产品为天气预报服务做了一些有益的尝试^[9]。在此基础上,广西壮族自治区气象局在 1984—1986 年,多次组织广西壮族自治区台和各地市气象台站的预报业务骨干集中开展了基于数值预报产品的 MOS 预报大会战,归纳总结出了基于数值预报产品传真图的暴雨等各种天气的预报指标,并建立了基于 MOS 方法的暴雨预报工具^[10-11],对促进数值预报产品在天气预报的应用打下了一定的基础。

第三阶段为上世纪 90 年代,随着“9210 工程”的实施,气象部门的通信网络获得了质的飞跃,广西各级气象台站气象数据的传输和接收能力得到了飞速发展。基于天气图的天气形势分析和对天气系统的一些外推在广西地市级及以上的区域暴雨预报仍然发挥重要作用。但随着数值预报的快速发展,广西壮族自治区气象台和一些地市气象台在接收数值预报产品的传真图的同时,也逐步获得了欧洲中心粗网格和国家气象中心 T42 数值预报产品的格点资料,数值预报产品的天气形势预报成为各级气象台站暴雨预报的重要参考。广西壮族自治区气象台的黄香杏、高安宁等^[12]还将原来基于天气图的暴雨预报指标逐步用数值预报产品替代,使暴雨预报的时效得以延长。张诚忠、林开平等^[13]针对广西的暴雨开展了中尺度物理量等分析与研究,开发了中尺度物理量诊断与分析系统,并建立了广西暴雨中尺度物理量库,对广西暴雨分析研究和预报起到了促进作用。林开平、杨望月等^[14-15]在国家气象中心刘还珠研究员指导下,开展了数值预报产品在暴雨预报释用方法的研究,建立了基于相似方法、预报模型和指标的广西暴雨预报系统,促进了数值预报产品在广西暴雨预报的应用。

第四阶段为新世纪 00 年代,随着气象通讯网络的飞速发展和国内外数值预报产品的日益丰富,广西的暴雨预报逐步转变为以数值预报为主。各地气象台站以往所建立的基于天气图、单站资料的暴雨预报系统、预报工具和预报指标完全用数值预报产品替代。高安宁、李菁等^[16-17]针对广西区域以上的暴雨过程,在原来暴雨分型的基础上,建立了完全基于

数值预报产品的各类暴雨概念模型和指标,并在预报业务中得到了应用和推广。随着卫星云图接收能力的提高和 MICAPS 的业务应用,卫星云图在广西的暴雨分析与预报中逐步得到了应用。林宗桂、林开平等^[18]对卫星云图进行了量化分析,建立了卫星云图量化分析系统,提取了与广西暴雨密切相关的一些特征量,建立了基于卫星云图的广西暴雨概念模型和预报指标,对促进卫星云图在广西暴雨预报的应用起到了重要作用。广西新一代天气雷达的建成和组网,以及区域自动站建设逐步铺开,广西暴雨的监测及短时临近预报能力得到了很大的提高^[19]。在特聘专家金龙的带领下,开展了人工神经网络在广西短期降水预报方面的建模及应用研究^[20]。曾小团等人在分析总结广西暴雨等灾害性天气过程的基础上,开发了广西灾害性天气预报学习系统,为广西各级预报员进行暴雨客观预报工具开发和暴雨概念模型应用提供了平台。

第五阶段为最近 10a,广西的暴雨预报基本上以数值预报及基于数值预报产品释用技术的客观方法为主。高安宁等人把暴雨概念模型与数值预报产品相结合,用相似分析原理和预报指标判别规则,研发了广西暴雨天气过程中短期预报警戒系统。林宗桂等人综合利用卫星云图、雷达资料和区域自动站资料,研发出基于中尺度变压场和卫星云图、雷达资料的广西不同种类的暴雨概念模型、预报指标,在此基础上建立了广西暴雨短时临近预报系统。黄小燕、赵华生等人充分利用海量的数值预报产品,通过深度学习,针对每一个市县和月份采用多种智能算法,构建了多个主要针对强降水模型,建立了基于人工智能的广西降水客观预报系统。陈伟斌、刘国忠、韩慎友等人研究了集合预报技术在广西暴雨预报上的应用,研发出基于集合预报的广西暴雨预报系统。此外广西暴雨预报技术创新团队也进行了基于风云 2/风云 3/风云 4 卫星资料的暴雨短时临近预报方法方面的研究,通过融合多种常规及非常规气象资料,采用光流法云图外推、云图卷积化处理、云图特征参数提取等,进行 2h 配料降雨预报法、2hMOS 降雨预报法、6hBlending 预报法和 6h 中尺度变压场预报法等短时临近降水预报。

广西暴雨业务预报技术发展 60a 来,随着气象探测技术迅猛发展,实况观测和数值预报模式资料越来越丰富,天气分析研究技术的改善,广西气象工作者在暴雨多尺度作用机理和预报方法与技术方面

取得了长足的进展。广西暴雨预报业务从以经验为主的主观天气过程预报发展到主、客观融合的定量预报,是广西暴雨业务预报技术的巨大进步。特别是近年来,得益于各种数值预报模式预报能力的提高,包括人工智能、深度学习等各种数值预报产品释用方法在广西暴雨预报的深入研究和应用,各种暴雨概念模型、暴雨预报模型和暴雨预报系统的建立和进一步的完善,广西各级台站的暴雨预报能力和预报质量有明显的提升,在暴雨、洪涝等灾害性天气的预报服务和重大活动的气象保障中发挥了重要作用。

2 广西暴雨研究进展

2.1 广西暴雨天气机理研究

广西暴雨天气的影响系统多且复杂,有西风带系统,也有热带系统。多尺度、多系统的相互作用造成了广西高频率、高强度的暴雨天气过程。

廖胜石等^[21]分析西江流域暴雨的中尺度特征及其发生、发展的机制,认为中低层弱的对流不稳定与强的风垂直切变和湿斜压性共存是暴雨产生和持续发展的重要机制;林宗桂等^[22]认为不同尺度天气系统一般都具有明显的结构特征,天气系统结构的配置与降雨强度存在对应关系,发现在地面有中尺度负变压区时,对流主要发生在中尺度负变压区内;黄明策等^[23]认为中低层低涡沿切变线东移,低空西南急流建立以及地面浅薄冷空气活动等天气系统相互作用触发了中尺度对流系统(MCS)的发展,造成广西的暴雨;李向红等^[24]分析孟加拉湾强对流在广西暴雨发生前 3d 发展最为旺盛,受孟加拉湾低槽引导,对流云团爬上中南半岛进入广西,当其与高原东移的云团相结合时再次发展,造成广西大范围暴雨;林确略等^[25]使用 WRF 对广西的一次回流暴雨过程进行数值模拟,认为冷空气东移入海后形成的高压后部形势,低层经南海回流的东南气流相对于孟加拉湾西南气流和越赤道气流是干冷的,不同性质气流汇合形成的锋面、辐合线是抬升条件,边界层条件性对称不稳定和中低层对流性不稳定是此次暴雨中尺度对流系统发生发展的不稳定机制,边界层辐合和能量锋生是暴雨的主要触发条件;刘国忠等^[26]对一次广西持续性暴雨过程进行多尺度特征分析认为,南亚高压经历了双体型构建,副热带长波槽有利于冷空气南下和高空急流的建立;El Niño 状态下,副高强度偏强,位置偏西、偏南,有利于暖湿气流广西输送;南亚高压过渡层与副高对峙,有利于冷暖

空气在广西交汇;影响天气系统为高空槽、切变线、冷锋、低空急流、季风槽及涡旋等天气系统。

2.2 广西几种主要暴雨类型的统计分析

对广西暴雨历史个例进行分析、分类和统计,结合天气学和动力学原理,归纳得到多个类型的暴雨过程,包括锋面暴雨、暖区暴雨、西南涡暴雨和热带系统暴雨等,针对每一类暴雨,凝练出相应的预报指标,可用于暴雨预报业务。

2.2.1 锋面暴雨

广西的锋面暴雨天气过程平均每年汛期出现 10d,桂北明显多于桂南。李菁等^[27]将广西的锋面暴雨过程分为五种类型:湘黔桂低涡型、深槽型、波动型、华北槽+南支槽型和南支槽+高后型。针对每一种类型建立预报模型和预报指标。李向红等^[28]认为,广西锋面暴雨过程发生时,暴雨区位于高空急流出口右侧正散度区和 500hPa 强上升区内,低空急流的左侧,这种高低空急流耦合是暴雨触发机制,当 700hPa 附近的湿位涡垂直分量小于 0 同时在等压面上的垂直分量大于 0 时较易产生大暴雨。陈见等^[29]统计发现广西大范围(日暴雨 30 站以上)的锋面暴雨年平均出现 0.8 次,5 月出现最多,1990 年以后呈增多趋势,桂北多于桂南;暴雨预报关键区南风指数 $\geq 45\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,同时北风指数 $\leq 0\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,是该类暴雨预报的关键指标。

2.2.2 暖区暴雨

暖区暴雨可分为三类^[7],锋前暖区暴雨、变性高压脊后部辐合型暖区暴雨和副热带高压边缘暖区暴雨。陈见等^[30]将南海季风槽划分为西南季风扰动型和西南季风与东南季风辐合扰动型两类,建立两类季风槽暖区暴雨预报着眼点。赵金彪等^[31]认为低空急流迅速建立、北抬有利产生锋前暖区暴雨,广西的中尺度环境存在南北明显差异,可能是形成双雨带的主要原因。罗建英等^[32]利用中尺度数值模式对广西的一次暖区暴雨过程进行数值模拟,认为高空急流稳定维持与低空急流持续加强是暖区暴雨发生发展的动力机制,低空急流核以接力振荡的形式快速东传,而不是向北面的锋区运动,有利于暖区累积充沛的水汽和不稳定能量及有组织的对流活动在暖区反复生成和发展,从而导致了暖区不仅降雨量大,而且雨强更强。叶朗明等^[33]探究回流暖区暴雨和锋前暖区暴雨的成因上发现两种类型暴雨不仅降水的分布、中尺度云团活动、雷达特征等存在明显的差异,而且在天气形势、水汽输送、动力机制、中尺度环境

条件以及暴雨的触发机制等存在着不同点,这些差异可能是造成两类暖区暴雨降水落区及量级差异的主要原因。

广西暴雨预报技术创新团队近年建立了两类典型的暖区暴雨模型:一是季风槽暴雨型(图 1a),低

层有风速风向辐合的桂南是暴雨易发区,沿海地区叠加地形辐合影响,暴雨频数最大。二是偏南急流暴雨型(图 1b),暴雨主要由低层偏南风风速辐合或低空急流脉动加上地形的抬升效应,以及地面中尺度暖式切变线所触发,暴雨区多位于沿海和桂东。

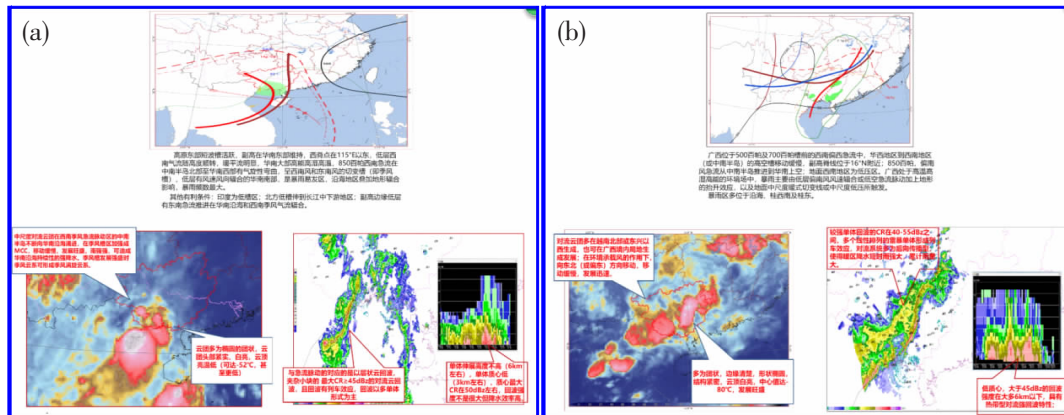


图 1 新型暖区暴雨概念模型

(a)季风槽暴雨型;(b)偏南急流暴雨型

2.2.3 西南涡暴雨

广西的汛期暴雨大多数与低涡活动有关。刘国忠等^[34]统计 1996—2005 年 4—9 月汛期的西南低涡及其产生的致洪暴雨,认为影响广西的西南涡移动路径主要有三条,偏东路径:经贵州东部移至湖南到达江西的东南部,广西的暴雨区主要出现在桂东北;东南路径:经贵州中部至广西东部到达广东中部,广西的暴雨区主要出现在中东部;偏南路径:经贵州西部至广西西部到达沿海,广西的暴雨主要出现在中西部和南部。高安宁等^[35]对比分析不同环境风场条件下的华南西部低涡暴雨过程,发现西南低涡的影响下有无低空急流配合对强降水的强度和维持有重大影响。陈涛等^[36]在位涡守恒和反演理论的框架下,对 2008 年广西“6.12”特大暴雨过程中的西南低涡系统发展过程及其伴随的中尺度对流系统活动特征进行了分析,位涡反演诊断表明,西南涡的发展在天气尺度上是一个准平衡的动力过程,平衡流能够描述西南涡风场结构的主要分量;而非平衡流结构对西南涡中尺度对流系统的发展有更清晰的预报指示意义。

2.2.4 热带系统暴雨

造成广西暴雨的热带系统最多的为台风,另外还有热带辐合带、东风波等。关于热带气旋,影响广西的热带气旋基本路径划可分为 I 类(西路型)、II 类(中路型)和 III 类(东路型)^[7],其中第 I 类最多

(49%),第 II 类次之(33%),第 III 类最少(18%),但造成广西出现暴雨过程的比例则相反,第 III 类最高(83.3%),第 II 类次之(69.7%),第 I 类最少(32.7%)。而广西东风波暴雨主要出现在 7—9 月,当台湾海峡出现东风波后,第二天就可以影响广西,东风波一般只造成广西出现局部性暴雨,但当广西在低压、高温、高湿条件下,再有东风波西移影响时,暴雨范围较广些,可达 10~15 站暴雨/日。另外,热带气旋在华南东部或华东登陆北上远离广西并减弱后,副热带高压没有及时西伸控制华南,随热带气旋北上的热带辐合带(ITCZ)在北部湾演变成一个近东西向的低压槽,南海的西南季风持续影响广西也会造成广西的暴雨,有时强盛西南季风北进,也能把 ITCZ 推进到北部湾和广西沿海,ITCZ 上常常有扰动和小涡旋及其南侧的西南气流中的对流云团,可使广西出现暴雨^[37-40]。

3 暴雨客观预报技术在广西的应用

近 20a 来,随着数值预报技术的进步,探测手段的日臻完善和丰富,以及高性能计算机快速发展和应用,现代天气预报技术取得了显著的进步,天气预报新技术、新资料、新方法的层出不穷,集合预报、概率预报和智能预报等新技术的应用,促进了广西暴雨预报业务水平的提高。

3.1 多源资料在广西暴雨预报上的运用

广西 2700 多个自动站,多普勒天气雷达组网,北海双偏振雷达改造,风云卫星资料接收、本地化以及再研究等,对广西暴雨预报产生巨大影响。在多源资料运用上,林宗桂等^[41]综合利用卫星云图和自动站资料,设计了一种从自动气象站气压观测资料分离出中尺度变压场的新方法,并将其应用到暴雨分析与预报中,发现中尺度负变压中心区与强降水落区有很好的对应关系,中尺度负变压区的出现往往比强降水出现提早 2~3h,对暴雨的短临预报有较好的预示作用。黄明策等^[42]利用实时多普勒天气雷达、边界层风廓线雷达和自动站资料对超强台风“威马逊”第 4 次登陆广西沿海时台风结构的演变特征进行研究,对比两种雷达风场产品,发现 VWP 产品出现无效数据时,可以用风廓线雷达产品作为补充,这对业务和科研的运用十分重要。张诚忠等^[43]采用雷达水汽反演同化方案来提高模式初始水汽场质量,在热启动的基础上,同化雷达反演的水汽后,不仅较好模拟前 6h 的降水,也可以预报出 6~12h 的降雨带变化趋势。

另外,广西暴雨预报技术团队通过融合多种常规及非常规气象资料建立针对华南区域特色的卫星资料处理、预报分析及暴雨预报产品生成研发,实时输出未来 6h 暴雨短时预报产品;综合处理卫星资料、自动气象站、数值预报产品和雷达资料分析暴雨大、中尺度环境场条件,结合暴雨概念模型数据库的相似度匹配,形成逐小时输出未来 0~6h 和逐 3h 输出未来 24h 的广西暴雨预报格点产品。

3.2 数值预报产品在广西暴雨预报的释用

对于数值预报产品在广西暴雨预报的释用,广西气象工作者做了大量的工作。梁利等^[44]对 T213、日本、德国三家数值模式在广西区域的降水预报能力进行分析、比较后发现,T213 模式的暴雨预报能力最强,日本模式在大雨及以下各级降水预报中预报能力最强,但降水的量级比实况偏小。林开平等^[45]利用数值预报产品,采用相似高度法进行环流形势、影响系统等的相似分析,然后在考虑热力相似和动力过程相似的关联下,建立了广西暴雨落区短期预报系统。刘国忠等^[46]利用数值预报产品根据暴雨概念模型及配料法建立的桂西北持续性暴雨 24h 短期客观预报工具按年计算的预报正确率(TS)可以稳定在 10%以上,略低于中央气象台降雨主观指导预报正确率,在空漏率方面各有所长,该方法为广西暴

雨预报提供另外的一种思路。

3.3 集合预报技术在广西暴雨预报上的应用

进入 21 世纪,集合预报产品已被广泛应用于预报业务中,并起到相当重要的作用。最近几年,广西暴雨预报技术创新团队研发了基于 TS 的最优百分位动态融合、综合考虑降水量级气候概率与集合预报概率相协调的频率订正、将集合平均落区与具有更好量级准确度的集成员融合形成的概率匹配融合等三类暴雨集合预报产品,并投入业务应用。赵华生等^[47]采用最大相关最小冗余算法,对 EC 集合预报成员进行筛选,选取若干个与预报对象相关性最大、相互冗余度最小的成员作为暴雨预报模型的预报因子。陈伟斌等^[48]利用常规观测资料和 EC 集合预报资料,基于集合敏感性方法,对广西沿海局地特大暴雨过程的影响天气系统及关键区进行分析,得到不同层次气压场及风场的降水敏感特征以及集合预报降水预报偏差的可能主要原因。韩慎友等利用欧洲集合预报模式产品(成员数为 51 个)结合本地暴雨统计、评分数据等研发了适用于广西的概率匹配暴雨预报方法、最优百分位暴雨预报方法和频率订正预报方法。

3.4 人工智能在广西暴雨预报上的应用

广西是最先将人工智能方法应用于降水预报的省区之一。在广西壮族自治区气象局特聘专家金龙的带领下,广西人工智能预报创新团队经过十多年的努力,在人工智能方法气象预报应用,特别是在台风预报和强降水预报应用方面做了大量的研究,取得了丰硕的成果。林开平等^[49]基于数值预报产品,采用遗传算法优化神经网络的方法,建立了广西区域逐日降水的遗传-神经网络预报模型。林建玲等^[50]利用广西前汛期 5 月、6 月区域平均日降水量作为预报对象,采用人工神经网络方法进行新的数值预报产品释用预报研究,建立的 3 个区域日平均降水量神经网络预报模型。农吉夫等^[51-52]采用径向基函数神经网络与主成分分析相结合,建立广西中部降水预报模型;赵金彪等^[53]则建立了乡镇降水预报神经网络预报模型。

近年来,广西暴雨预报技术团队进一步优化神经网络预报建模方法,增加模式资料运用,提高预报精度,针对不同的降水强度和落区,采用不同模块参数,研发格点暴雨预报产品,使暴雨预报的精细化程度和准确率都有明显地提高。暴雨预报产品通过广西天气预报集约化平台每天提供给全区各级气象台

站使用,为广西暴雨定点、定量、定时预报提供了重要的技术支撑。

4 广西暴雨业务预报技术存在的主要问题及改进建议

通过对广西暴雨业务预报技术发展历程的回顾和广西暴雨研究的总结,归纳出广西暴雨预报存在的主要问题及改进建议。

(1) 虽然广西气象工作者对广西暴雨形成机理进行了大量研究,取得了暴雨成因方面的诸多成果,在暴雨预报中发挥了重要作用,但由于广西暴雨形成的复杂性,广西暴雨成因并未完全清楚。随着多源气象资料越来越丰富和研究技术的改进,对广西暴雨形成机理要进行更为精细化的研究,获得暴雨成因更为精细的结果,为广西暴雨业务预报提供基础理论依据。

(2) 广西暴雨预报业务技术从以经验为主的主观定性天气过程预报发展到客观定量预报,紧跟暴雨预报技术发展的科技前沿,是广西暴雨业务预报技术的巨大进步,但广西暴雨定点、定量的客观预报准确率依然较低。要发展基于确定性预报和集合预报产品数理释用、配料法、人工智能等暴雨客观预报技术和方法,提高暴雨定点、定量的预报准确率,提供精细化的客观预报产品,为智能网格预报提供有力支撑。

(3) 随着气候变暖,广西极端暴雨事件多发,极端暴雨预报技术已经不能满足防灾救灾的需要,利用中尺度区域自动站、高分辨率气象卫星、新一代天气雷达及数值预报模式等提供的数据资料,研究极端暴雨预报技术,应用在业务预报中,充分发挥气象现代化的作用。

参考文献:

- [1] 陶诗言,丁一汇,周晓平.暴雨和强对流天气的研究[J].大气科学,1979,3(3):227-238.
- [2] 陶诗言.中国之暴雨[M].北京:科学出版社,1980:1-71.
- [3] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2014: 1535pp.
- [4] 秦大河,周波涛,效存德.冰冻圈变化及其对中国气候的影响[J].气象学报,2014,72(5):869-879.
- [5] Yuan F, Wei K, Chen W, et al. Temporal variations of the frontal and monsoon storm rainfall during the first rainy season in South China[J]. Atmos Oceanic Sci Lett, 2010, 3(5): 243-247.
- [6] 黄海洪,林开平,高安宁等.广西天气预报技术和方法[M].北京:气象出版社,2012.
- [7] 蒙远文等.广西天气及其预报[M].北京:气象出版社,1989.
- [8] 韦纯束等.广西通志·气象志[M].南宁:广西人民出版社,1996.
- [9] 彭淑琼.日本降水预报图在我区检验情况[J].广西气象,1985(1):13-18.
- [10] 高翔明.用传真预报图作 MOS 预报[J].气象,1982,8(2):14-15.
- [11] 高翔明,汪玉.短期 MOS 试验及效果检验——试论我区开展 MOS 预报的可行性[J].广西气象,1985(1):18-23.
- [12] 黄香杏,高安宁.应用数值预报产品制作广西灾害性天气的中短期预报[J].广西气象,1997(S1):2-3,23.
- [13] 张诚忠,林开平.中尺度暴雨生成的机制分析[J].广西气象,1997,18(4):18-20.
- [14] 林开平.广西“94.6”特大洪涝暴雨过程的中尺度分析[J].广西气象,1994,15(3):158-161.
- [15] 杨望月,李菁,林开平,等.广西盛夏西南涡暴雨特征及应用数值预报产品作落区预报的研究[J].广西气象,2000,21(2):3-6.
- [16] 高安宁,陈见.流场中的奇异线(点)特征与汛期广西暴雨分析[J].气象研究与应用,2007,28(3):1-7.
- [17] 李菁,黄治逢,高安宁,等.广西重大锋面暴雨天气过程的特征分析[J].气象研究与应用,2008,29(1):1-4,12.
- [18] 林宗桂,林开平,陈翠敏,等.一次暴雨过程天气尺度云系演变特征分析[J].广西气象,2005,26(3):1-4,8.
- [19] 李向红,唐伍斌,李垂军,等.广西强对流天气的天气形势分析与雷达临近预警[J].灾害学,2009,24(2):46-50.
- [20] 金龙.人工神经网络技术发展及在大气科学领域的应用[J].气象科技,2004,32(6):385-392.
- [21] 廖胜石,罗建英,姚秀萍,等.广西西江流域致洪暴雨过程中尺度特征及机制分析[J].高原气象,2008,27(5):1161-1171.
- [22] 林宗桂,林墨,林开平.强降雨监测预警产品原理和应用[J].气象研究与应用,2014,35(2):23-26,125.
- [23] 黄明策,李江南,农孟松,等.一次华南西部低涡切变特大暴雨的中尺度特征分析[J].气象学报,2010,68(5):748-762.
- [24] 李向红,黄嘉宏.广西大范围暴雨期间孟加拉湾强对流演变及东移特征[J].气象科技,2006,34(2):151-156.
- [25] 林确略,寿绍文,杨华.基于数值模拟对一次广西前汛期回流暴雨形成机制的分析[J].气象,2015,41(7):852-862.
- [26] 刘国忠,赖珍权,钟祥平,等.“15.7”广西超长持续性暴雨过程多尺度特征分析[J].热带气象学报,2017,33(3):357-367.

- [27] 李菁,祁丽燕,黄治逢.华南西部重大锋面暴雨天气过程研究[J].热带气象学报,2009,25(S1):48-58.
- [28] 李向红,蒋丽娟,姚立宏.夏季风系统影响下广西锋面型强暴雨动力及水汽输送特征[J].气象科技,2006,34(3):254-259.
- [29] 陈见,高安宁,唐文.广西超大范围锋面暴雨发生特征及预报方法研究[J].气象研究与应用,2013,34(1):7-12.
- [30] 陈见,梁维亮,高安宁,等.华南季风槽暴雨特征分析[J].热带气象学报,2015,31(4):536-548.
- [31] 赵金彪,罗建英,高安宁,等.2008年6月广西锋前暖区暴雨过程分析[J].热带地理,2010,30(2):145-150.
- [32] 罗建英,廖胜石,黄归兰,等.广西前汛期锋前暖区暴雨过程的模拟与分析[J].气象,2009,35(10):50-57.
- [33] 叶朗明,徐碧裕.两次不同类型暖区暴雨的对比分析[J].气象研究与应用,2014,35(4):5-10,52,129-132.
- [34] 刘国忠,丁治英,贾显锋,等.影响华南地区西南低涡及致洪低涡活动的统计研究[J].气象,2007,33(1):45-50.
- [35] 高安宁,赖珍权,张瑞波,等.不同环境风场条件下两次华南西部低涡暴雨个例对比分析[J].气象,2013,39(1):11-19.
- [36] 陈涛,张芳华,端义宏.广西“6.12”特大暴雨中西南涡与中尺度对流系统发展的相互关系研究[J].气象学报,2011,69(3):472-485.
- [37] 梁志和.影响广西的热带气旋陆地路径与暴雨[J].广西气象,1992,13(4):1-5.
- [38] 吴兴国.两广登陆台风暴雨增强幅天气型落区的特征分析[J].广西气象,1994,15(2):100-102.
- [39] 孔宁谦,杨澄梅.广西沿海热带气旋暴雨分析[J].海洋预报,2000(4):44-48.
- [40] 何小娟,丁治英.广西北部湾地区台风暴雨的统计特征[J].气象研究与应用,2007,28(2):31-35,53.
- [41] 林宗桂,林墨,林开平,等.一类降水过程多尺度天气系统结构特征[J].气象研究与应用,2014,35(3):1-4,125.
- [42] 黄明策,翟丽萍,林开平,等.利用两类雷达探测资料分析超强台风“威马逊”登陆期间结构演变特征[J].气象科技,2015,43(6):1142-1148.
- [43] 张诚忠,陈子通,万齐林,等.雷达反演水汽在华南前汛期短时临近降水预报应用试验[J].热带气象学报,2014,30(5):801-810.
- [44] 梁利,林开平,黄海洪.几种数值预报模式在广西降水预报效果的比较[J].气象研究与应用,2012,33(2):1-4,8.
- [45] 林开平,郑宏翔,董良森.用数值预报产品根据相似法制作广西暴雨落区预报[J].广西气象,1999(2):2-3,6.
- [46] 刘国忠,黄开刚,罗建英,等.基于概念模型及配料法的持续性暴雨短期预报技术探究[J].气象,2013,39(1):20-27.
- [47] 赵华生,黄小燕,黄颖.ECMWF集合预报产品在广西暴雨预报中的释用[J].应用气象学报,2018,29(3):344-353.
- [48] 陈伟斌,翟舒楠,韩慎友,等.一次沿海局地特大暴雨的集合敏感性分析[J].气象研究与应用,2019,40(1):11-15.
- [49] 林开平,金龙.基于遗传-神经网络的数值预报产品在短期降水预报释用方法研究[J].气象学报,2005,63(S):193-197.
- [50] 林健玲,金龙,彭海燕.区域降水数值预报产品人工神经网络释用预报研究[J].气象科技,2006,34(1):12-17.
- [51] 农吉夫,金龙.基于MATLAB的主成分RBF神经网络降水预报模型[J].热带气象学报,2008,24(6):713-717.
- [52] 农吉夫.基于主成分分析和支持向量机的区域降水预测应用研究[J].广西民族大学学报(自然科学版),2009,15(2):89-93.
- [53] 赵金彪,罗建英,何冬燕.基于遗传神经网络的乡镇降水量预报方法试验[J].气象研究与应用,2011,32(1):29-33.

Review and prospect of operational forecast technology of rainstorm in Guangxi

Lin Kaiping, Chen Weibin*, Liu Guozhong, Qin Yuefeng, Dong Xuehan, Xiong Sizhang
(Guangxi Meteorological Observatory, Nanning Guangxi 530022)

Abstract: This paper reviewed the 60 years' development of operational forecasting technology of rainstorm in Guangxi, and summarized the main achievements made by meteorologists in recent 30 years. The research progress was summarized from the aspects of rainstorm weather mechanism and statistical analysis of several main rainstorm types in Guangxi. The summary of rainstorm forecast technology focused on the application of multi-source data, the interpretation of numerical forecast products, the application of ensemble forecast technology, the application of artificial intelligence and other objective forecast technologies in Guangxi.

Key words: rainstorm forecast operation; rainstorm research progress; forecast technology; objective forecast