

肖志祥,姚才,赵金彪,等.广西热带气旋预报业务和研究进展[J].气象研究与应用,2020,41(4):20–27.

Xiao Zhixiang, Yao Cai, Zhao Jinbiao, et al. Guangxi tropical cyclone forecast operation and research progress [J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2020, 41(4): 20–27.

广西热带气旋预报业务和研究进展

肖志祥¹, 姚才^{1*}, 赵金彪², 何启玄³, 蓝玉峰⁴

(1.广西壮族自治区气象科学研究所, 南宁 530022; 2.广西壮族自治区气象台, 南宁 530022;

3.北海市气象局, 北海 536000; 4.广西壮族自治区气象培训中心, 南宁 530022)

摘要:热带气旋往往会造成途经地区严重损失,但也会带来可观的社会经济效益,准确的预报预测是实现趋利避害的前提。本文梳理了近十年广西热带气旋预报业务进展,并从热带气旋暴雨、大风、风暴潮、气候变化与预测、影响和灾害等方面介绍了广西气象工作者取得的成果。最后,总结了当前热带气旋业务与研究中存在的问题,提出广西未来热带气旋业务和研究发展的重点。

关键词:热带气旋;预报预测;气候变化;灾害;进展

中图分类号: P467

文献标识码: A

doi: 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2020.4.04

OSID:



引言

广西地处低纬地区,南临北部湾,热带气旋是影响广西最重要的天气系统之一。据统计,平均每年约有5个热带气旋影响广西,常给广西带来强风、暴雨、风暴潮等灾害^[1-3]。热带气旋易造成严重经济损失和人员伤亡,如“威马逊”(1409)造成广西10人死亡,直接经济损失超过138亿元。与此同时,广西时常面临干旱威胁,热带气旋降水可有效缓解广西旱情,增加农业用水,也有利于水利发电^[4]。因此,开展热带气旋基础研究与预报业务具有重要科学意义,也是趋利避害的现实需要。近年来,雷达、卫星、地面自动站等海陆空一体化气象观测体系的完善建立,数值天气预报模式的快速发展和模式产品的广泛应用,广西在热带气旋监测、预报预测技术及灾害防御等方面的进步都非常明显^[5-8]。本文简要回顾了近十年广西热带气旋预报业务的进展,并展示了广西气象工作者在热带气旋研究中取得的一些成果,进一步提出广西未来热带气旋研究与业务发展的方向。

1 广西热带气旋预报业务进展

在业务工作中,通常将中心进入19°N以北、112°E以西地区的热带气旋定义为影响广西的热带气旋^[9]。2020年11月实施的广西地方标准《影响和登陆广西的热带气旋》(DB45/T 2154—2020)将影响广西的热带气旋定义为“当热带气旋或减弱的低压中心进入广西热带气旋影响区(19°N—28°N, 104°E—112°E),并满足以下条件之一:a)热带气旋等级达到热带风暴及以上;b)广西国家气象站观测到最大日降水量≥25mm或者大风(瞬时风力达到或超过8级)”。广西气象预报业务将登陆华南影响广西的热带气旋路径划分为东路型、中路型和西路型三类:东路型指热带气旋在珠江口以东至福州之间沿海登陆,中路型表示热带气旋在湛江市到珠江口以西之间的沿海地区登陆;在湛江市以西(或以南)沿海登陆的热带气旋定为西路型^[10]。

在热带气旋业务预报系统和预报方法方面,广西壮族自治区气象局研发的广西遗传神经网络热带

收稿日期: 2020-10-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41665006, 41465003, 41905077)、广西台风与海洋预报服务创新团队

作者简介: 肖志祥(1986—),男,博士,高级工程师,主要从事天气气候研究。E-mail: xiaozx_gx@163.com

* 通讯作者: 姚才(1963—),男,博士,正研级高工,主要从事天气气候研究。E-mail: gxyaocai@126.com

气旋预报系统自 2006 年起经中国气象局批准,开始发布南海台风路径和强度的全国预报广播业务。该预报系统从 2011 年开始,逐步扩展为西太平洋热带气旋的 24h、48h 和 72h 预报时效的路径和强度业务预报。经全国台风与海洋专家委员会评定,该预报系统近 10a 对热带气旋的强度预报精度超过了全部参加公开广播的国内外数值预报模式(包括欧洲中心和美国的 NCEP 模式)和其他客观预报方法,排名第一,详见金龙等^[8]。广西台风预报业务取得了持续而稳定的进步,2013—2020 年广西 24~48h 台风路径预报误差平均值分别为 78km、159km,其中 24h、48h 路径预报误差比 10a 前减少了 20~30km(图 1)。目前广西台风路径预报准确率和国内外先进水平基本相当^[11]。

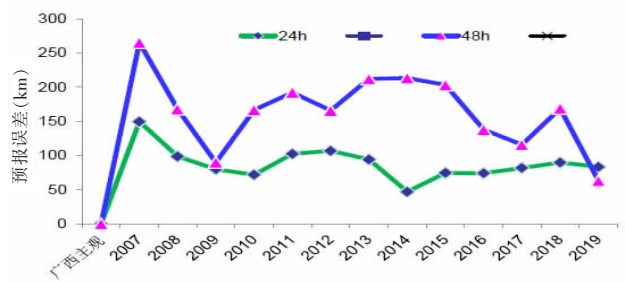


图 1 广西热带气旋主观预报路径误差 (km)

[数据来源于历年《气象》杂志热带气旋预报性能评述文章]

目前广西尚无有效的台风大风客观预报方法,实际业务中多根据预报员主观经验或概念模型,然后再基于台风登陆时的(预报)强度及局地地形等来判断受影响区域的大风级别。一般而言,台风强风的破坏多限于近海海域和沿海地区,而台风暴雨洪涝引起的灾害往往比台风大风更加严重。90 年代初,广西气象台就开始研制广西台风暴雨预报专家系统^[12]。2007 年,基于大样本资料合成分析,广西气象台建立了严重影响广西的西太平洋台风暴雨天气概念模型和南海热带气旋暴雨天气概念模型^[10],最近研发的多模式集成和集合概率预报产品得到广泛应用。

在业务支撑平台方面,2012 年以前,广西区市县各级台站为顺利开展台风海洋气象预报工作,基于桌面计算机系统开发了相应的业务系统平台,如基于人工神经网络的热带气旋路径和强度预报系统、广西沿海地市海洋气象预报服务系统、台风服务系统等。从 2013 年开始,广西壮族自治区气象局开始进一步加强广西天气预报服务集约化业务系统的发展,开发了海洋精细化预报、台风实时监测预警等

模块,逐步完善“广西海洋气象预报预警服务系统”,并于 2015 年逐步向全区地市气象台站投入业务应用。该系统具有海洋灾害天气自动识别报警功能,能够完成港口、海岛、航线精细化要素预报产品的集约化制作和发布,并与全国海洋气象信息业务共享平台有机衔接,使得海洋预报业务流程更加完善和规范化^[13]。目前,该系统已成为支撑广西开展海洋气象服务业务的工作平台。在热带气旋灾害预评估和灾后评估方面,2008 年对广西热带气旋灾害的影响进行多层次、多因素的综合分析,以地理参数、风综合参数、雨综合参数 3 个亚评估指标和路径参数、最大风速、大风站数、暴雨指数、日最大降雨量、过程最大雨量等 7 个单项指标为基础,建立了影响广西的热带气旋灾害评估模型,开发了广西热带气旋灾害评估系统,大大提高了台风数据分析和决策的效率,评估结果比较理想^[14]。

2 影响广西热带气旋机理分析

热带气旋带来的大风、暴雨、风暴潮三方面灾害往往造成广西严重的财产损失和人员伤亡,而这些灾害与热带气旋的路径和强度密切相关,广西科研与业务人员对此开展了大量研究。

2.1 热带气旋路径和强度

热带气旋路径和强度突变一直是研究和业务预报的难点,这里主要对路径和强度变化的机理研究成果进行总结。

通常,热带气旋的移动路径在很大程度上受引导气流的影响。唐文和苏洵^[15]指出“莎莉嘉”(1621)后期路径北折主要是副高南落、台风与西风带锋面云系结合形成的东北向引导气流控制,而台风路径的摆动很可能是引导气流的波动所致^[16]。台风“尤特”(1311)登陆减弱后,引导气流与变压梯度力达到近似平衡的状态,使其长时间在广西内陆打转停留;随后,变压梯度力受弱冷空气侵入而改变,在引导气流的协同影响下“尤特”得以继续向西南移动^[17]。

据统计,进入华南近海的热带气旋约有 9.3% 存在强度突然增强的特点^[18]。南亚高压、西太副高、低空急流、弱垂直风切变、异常暖海温等系统的相互作用是台风近海急剧增强的主要影响因子^[19]。Xiao 等^[20]指出还需关注季风气流的低频振荡信号,南海和西太副热带夏季风的同位相变化有利于形成深厚的偏南季风气流,减小垂直风切变,在高海温配合下有利于“威马逊”(1409)在沿岸快速增强(图 2)。环流重

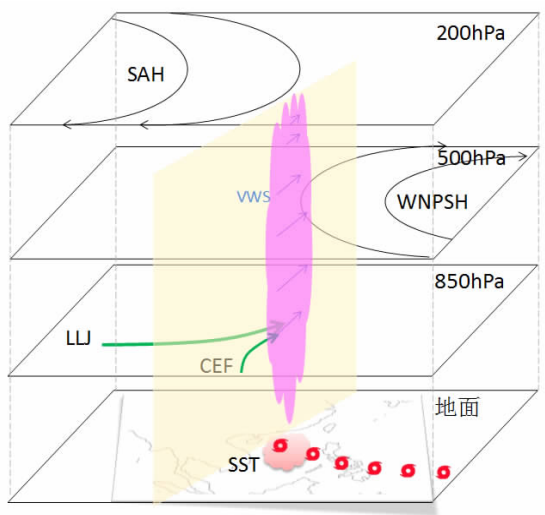


图2 超强台风“威马逊”近海快速增强示意图

SAH 为南亚高压, WNPSH 表示西太平洋副热带高压, VWS 为垂直风切变, LLJ 为低空急流, CEF 为越赤道气流, SST 为海温。[引自 Xiao 等^[20]图 15a 并重新绘制]

组^[21]、对流非对称发展^[22]都是台风近海突然增强的可能原因。

研究表明, 进入广西内陆或者北部湾的热带气旋仅有约 16% 仍保持在台风级别, 其余大多都呈减弱趋势, 这主要是登陆华南后热带气旋在西移过程中受地形摩擦作用的影响^[23]。但在适宜条件下, 仍有部分热带气旋强度增强或者长时间维持。陈见等^[24]分析了进入北部湾后强度突然增强的 7 个热带气旋, 发现五个有利的环流背景场: (1) 热带辐合带北抬, (2) 西太副高加强西伸, (3) 西南季风较为活跃, (4) 有弱冷空气侵入, (5) 东风波西移影响。而黄荣成等^[25]指出在中高纬阻塞高原崩溃南压引导横槽转竖的大背景下, 虽然副高有所减弱, 但仍有利于台风“芭玛”(0917)在北部湾迅速加强。地形摩擦耗散的作用是进入北部湾的热带气旋强度减弱的主要因子, 但如果热带气旋从琼州海峡进入北部湾, 摩擦耗散小, 台风强度仍能维持^[2]。季风气流输送的水汽和不稳定能量、高空强出流条件及保持相对完整的结构是超强台风“威马逊”(1409)在登陆后强度减弱缓慢的主要原因^[26]。

2.2 热带气旋暴雨

热带气旋暴雨影响因子众多, 形成条件复杂多变, 其除了与热带气旋路径、强度、移速、自身结构等因素密切相关外, 下垫面、多尺度环流的相互作用使其更难以预测。热带气旋暴雨可分为眼壁暴雨、螺旋雨带暴雨、倒槽暴雨、切变暴雨等环流内暴雨和台前

飊线暴雨、远距离暴雨、下游效应等环流外暴雨两大类暴雨。雨强和降雨落区是热带气旋暴雨两个最重要的因素, 要提升其预报质量就必须准确预报强度和落区, 二者缺一不可^[27]。研究表明, 充足的水汽是引发广西热带气旋暴雨的基本条件之一^[28-29]。在适宜条件下, 冷空气侵入可加强台风动力和热力不稳定, 增强降水^[18,30-33], 但是台风后期侵入的冷空气容易破坏台风的暖心结构, 加速台风填塞, 不利于暴雨长期维持^[34]。台风停编后残存的低压环流中心在一定条件下可得到维持和加强, 是热带气旋暴雨的主要成因之一。研究表明, 超过 80% 的台风残余环流都会出现明显降水, 在适宜地形条件配合下, 残涡地形增幅降水可达到局地年降水量的 30% 以上^[35]。据统计, 1970—2014 年共有 18 次残涡影响广西, 年均约 0.4 次^[36]。陈见等^[2]在研究“尤特”(1311)残涡时指出季风涌的卷入再次为其提供了充足的水汽和能量, 有利于台风残涡的二次发展从而增强了降水。台风残涡暴雨不确定性强, 预报难度大, 业务工作中容易因台风停编而放松警惕, 导致预报失误, 需要对台风残涡暴雨引起足够重视。此外, 地形抬升作用也是有利于广西台风暴雨形成的重要因素之一^[37-39], 台风局地特大暴雨与地形增幅降水存在极为密切的联系^[37]。偏南风急流和侵入冷空气对暖湿气流的抬升作用在有利地形配合下容易形成“列车效应”, 对流活动得到发展从而加强了降水^[33]。

广西中小地形复杂, 加之易受冷空气南侵影响, 热带气旋降水多具有非对称性的特点, 使得强降水落区的预报更为困难。覃丽等^[40]指出动力背景场的不对称分布是强降水位于热带气旋南侧的重要因素, 垂直风切变矢量和水汽辐合条件是预报热带气旋暴雨落区的有效判据。倾斜涡度发展理论认为湿位涡诊断也适用于低纬度地区, 它是暴雨诊断和预报的重要参考工具之一^[41]。因此, 在广西研究热带气旋暴雨落区的研究工作中湿位涡诊断也是较为常用的方法。一般来说, 湿斜压项正值和湿正压项负值中心重合区域是热带气旋强降水分布的关键指示区^[30,33,39]。副高的活动也会导致台风环流非对称变化, 是“莫拉菲”(0906)强降水落区主要出现在南侧的重要原因^[42]。

2.3 热带气旋大风

大风是热带气旋三大灾害之一, 它和热带气旋强降水一样都可以引发严重的灾害。但相对于强降水, 广西气象工作者对热带气旋大风的研究要少得

多。研究表明在影响广西的热带气旋中,超过 60% 都会在广西造成大风,造成 15 站以上大范围风灾的比例约为 10.8%;在月季分布上,7 月是最容易出现大中范围风灾,而小范围风灾高峰出现在 8 月^[43]。热带气旋大风除了上述共性,其个性和区域特点更强。何洁琳和管兆勇^[44]指出强度大、移速快的台风容易造成较大的变压梯度,导致过程性大风的出现,而移速慢、逗留时间过长的台风也会导致严重风灾,桂东南地区则以局地瞬时大风影响为主。新观测设备的使用,可大大提升我们对热带气旋大风精细化监测能力。何如等^[45]利用钦州湾 55m 高测风塔上的超声风观测仪,详细分析了台风“启德”过程的风向转变、湍流强度、湍流功率谱等特征。

3 热带气旋气候变化与预测

在全球气候变化背景下,影响华南热带气旋的初旋日期、终旋日期、频数、强度都发生了显著的变化。登陆华南的热带气旋平均影响期为 78d,就长期趋势而言,华南地区初旋和终旋日期都有提早的趋势,其中东路热带气旋终旋日期可提前 $5.8d \cdot (10a)^{-1}$ ^[46]。华南地区受热带气旋影响的主要时段是 7—9 月,姚

才等^[47]研究发现该时段登陆华南热带气旋呈弱增加趋势,但是近 10a 来登陆华南的强台风有明显增多的趋势。据统计,2004 年以后 9.4% 的台风登陆华南前经历了快速增强过程,而 1973—1987 年和 1988—2003 年这一比例仅为 1.6% 和 3.1%。登陆台风强度的整体提升导致了登陆华南强台风数量的增加,而这主要是受台风强度增长率加速的控制,三阶段影响登陆华南台风的主要系统如图 3 所示,2004 年以后强台风增加的主要物理机制为:南海北部显著增暖,有利于形成偏东引导气流引导台风西移登陆华南,并伴随着近岸低层水汽辐合和涡度的增强,有利于台风在登陆前快速增强^[48]。在影响华南台风强度呈增长趋势的大背景下,影响广西热带气旋也存在类似的变化特征。乔守文等^[23]研究发现虽然影响北部湾的热带气旋时长和频数都存在减小的趋势,但强度的波动增加使得广西海岛灾害损失呈增大趋势^[49-50]。但就整个华南地区而言,1995 年之后由于西太副高脊线西伸,登陆华南热带气旋有所减少,叠加较弱的水汽通量辐合作用,使得华南地区热带气旋降水年代际减少^[51]。

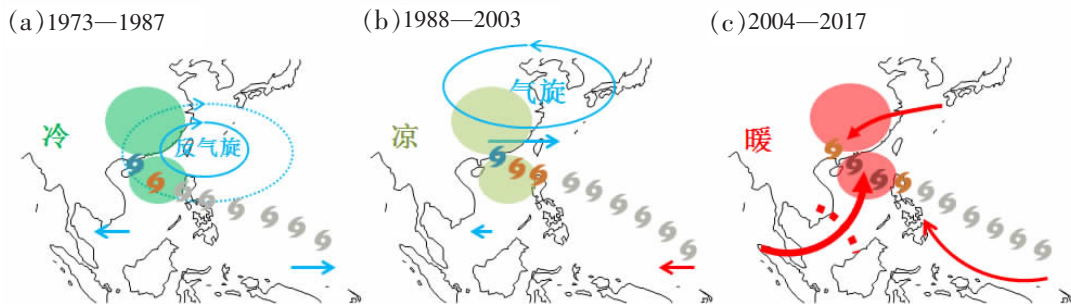


图 3 三阶段影响登陆华南台风主要系统示意图

(a) 1973—1987; (b) 1988—2003; (c) 2004—2017

暖色调表示有利台风西行和强度增强的条件,冷色调表示不利条件,箭头方向表示异常引导气流方向,填色圆形表示异常冷(绿色)、暖(红色)陆面和海洋[引自 Yao 等^[48]]

热带气旋短期气候预测方法主要有统计预测、动力—统计预测和动力预测三种。统计预测多通过利用回归、相关、合成等统计方法对前期信号进行分析,从而建立统计预测模型。陆虹等^[52]利用相似分析和逐步回归方法发现海温因子对影响广西热带气旋年频数的预测效果要好于高度场。人工神经网络等新技术也较早地在广西热带气旋的预测中得到应用。陆虹等^[53]在神经网络中考虑多因子的预测效果要好于单因子预测模型,而何慧等^[55]利用 BP 神经

网络构建的预测模型效果优于逐步回归模型,能够在汛期业务预测中应用。数值模式能够往前提供预报信息,数值模式产品的解释应用也是当前研究型业务发展的重点方向之一。徐圣璇等^[55]利用 CFSv2 模式回报数据对登陆影响华南台风频数开展了相关预测,结果表明模型具有正的预报技巧,模式低层风场 EOF 分量对热带气旋具有较高的可预报性。

4 影响广西热带气旋灾害影响与评估

狂风、暴雨、风暴潮是热带气旋带来的三大主要灾害,但其深远的社会影响和引发的次生灾害远不止如此。李菁等^[57]分析了三类路径热带气旋对广西的影响,发现水产养殖业主要是受途经沿海地区热带气旋的影响,途经桂东南地区的台风造成大量人员伤亡的占比最大,而从桂东北进入广西的台风易造成局地洪涝灾害。桂南、桂东南地区是广西热带气旋灾害承灾体高脆弱区^[58],人口较为密集且经济相对发达的中心城镇是受热带气旋影响最重的区域,而山区容易发生滑坡等热带气旋次生灾害^[59],台风暴雨是诱发北部湾经济区地质灾害的重要因素^[60]。通过概率神经网络^[61]、多因子组合回归模型^[62]、PSO-ELM 预测模型^[63]等方法构建的台风灾情预评估模型预测精度较高,是预估广西台风灾情的有效途径。

热带气旋对广西的影响不仅仅带来灾害,对沿海风电场而言,绝大多数热带气旋(78%)具有客观的经济效益,仅有少量(6%)热带气旋会产生破坏^[64]。但是,对于内陆输电电网而言,热带气旋大风和暴雨会造成电线杆倒塌、线路折断,引发大范围停电。2014 年超强台风“威马逊”和强台风“海鸥”造成广西停电用户均超过 160 万户^[65],是引起最大范围停电的两个台风。此外,热带气旋外围气流容易引发广西冰雹^[66]、龙卷^[67]及高温^[68-70]等高影响天气。

灾害性海浪和风暴潮容易引发船舶倾覆、毁坏岸堤,给水产养殖、海上航行、风力发电、渔业捕捞等海洋经济活动带来危害。据统计,北部湾灾害性海浪主要由台风和冷空气两种主要天气系统引起,其中台风灾害性海浪持续时间更长、危害性更大,比例达到 60%^[71]。陈宪云等^[72]也指出风暴潮是广西沿海地区最主要的海洋灾害,其中又以热带气旋风暴潮最为严重。1986—2010 年,广西沿海风暴潮造成 108 人死亡,上千万人受灾,经济损失超过 94 亿元。研究表明,北部湾地区受风暴潮影响最严重的区域位于铁山港,由于进入北部湾的热带气旋均会在涠洲岛产生风暴潮,使得涠洲岛最易受热带气旋风暴潮影响^[73],因此需做好海岸线的防护工作。

5 总结与展望

本文从热带气旋的路径、强度、风雨、灾害、气候变化等角度梳理回顾了广西气象工作者近十年来取

得的丰硕科研成果:(1)广西热带气旋业务预报质量位于国内先进行列;人工智能方法的使用、预报业务支撑平台的快速发展极大提升了广西热带气旋业务质量;(2)广西对热带气旋强度变化的机理认识得到显著提升;副高、引导气流、低空急流、夏季风低频振荡、地形摩擦耗散等因素都是影响热带气旋强度的重要因子;(3)热带气旋暴雨触发机制得到深入剖析;触发广西热带气旋暴雨的因子包括台风残涡、地形增幅、冷空气侵入、“列车效应”等;(4)热带气旋气候学研究成果丰硕:华南地区初旋和终旋日期都有提早的趋势,强台风有增多的趋势,热带气旋灾害和影响不容忽视。在取得丰硕成果的同时,也存在一些问题亟待解决:首先,大量研究集中在热带气旋的个例、定性分析,系统性、集成研究成果不多;其次,业务支撑平台对科研支撑作用不够;第三,热带气旋时空产品精细化程度不高;第四,热带气旋气候研究业务重视程度不够;最后,新方法和新观测数据应用不够充分。

因此,在未来的研究工作中有以下几点可重点关注:

(1)连续、全面、高质量的台风数据集的收集与整理,开展大样本集成研究。

(2)高效、智能、针对性强的台风业务与科研平台的深度融合和发展,提升业务平台对科研的支撑能力,适应新时代研究型业务发展的需要。

(3)在时间、空间上提升热带气旋客观产品精细化水平,提升客观预报预测产品的丰富程度。

(4)加强气候变化背景下热带气旋气候预测技术的研究,重视对极端热带气旋、次季节热带气旋发生发展的预测。

(5)加大新技术和新观测数据在热带气旋业务中的应用力度,最大限度发挥新观测数据、新方法对热带气旋预报业务的促进作用

本文仅对近十年广西在热带气旋业务与研究领域的相关工作进行了简要回顾和总结,限于篇幅和资料来源有限,不免有疏漏之处,仅供广大读者参考。

参考文献:

- [1] 陈波.北部湾台风暴雨研究现状与展望[J].广西科学, 2014,21(4):325-330.
- [2] 陈见,赖珍权,罗小莉,等.“尤特”超强台风残留低涡引发的广西特大暴雨成因分析[J].暴雨灾害,2014,33(1):

- 19-25.
- [3] 卢小丹,王黎娟,刘国忠,等.两个不同季节台风引发广西特大暴雨的水汽和螺旋度对比分析[J].热带气象学报,2017,33(3):375-385.
- [4] 黄卓,廖雪萍.2016年台风“莎莉嘉”对广西的影响评估[J].气象研究与应用,2017,38(1):40-42.
- [5] 李艳兰,欧艺,周绍毅,等.广西热带气旋灾害评估系统的开发与应用[J].气象研究与应用,2008,29(4):1-3.
- [6] 黄荣成,赵金彪,曾小团,等.广西海洋气象预报预警服务系统的设计研发[J].气象研究与应用,2016,37(2):12-15,123.
- [7] 赖珍权,翟丽萍,古文保.1415号台风“海鸥”的卫星云图及雷达资料分析[J].气象研究与应用,2017,38(2):10-13,115-116.
- [8] 金龙,黄颖,姚才,等.人工智能技术的热带气旋预报综述(之一)——BP神经网络和集成方法的热带气旋预报研究和业务应用.气象研究与应用,2020,41(2):1-6.
- [9] 蒙远文,蒋伯仁,韦相轩,等.广西天气及其预报[M].气象出版社,1989,p1-458.
- [10] 《广西天气预报技术手册》编写组.广西天气预报技术和方法[M].气象出版社,2012:1-201.
- [11] 李泽椿,张玲,钱奇峰,等.中央气象台台风预报业务的发展及思考[J].大气科学学报,2020,43(1):10-19.
- [12] 广西气象台台风暴雨预报专家系统课题组.广西气象台台风暴雨预报专家系统.广西气象,1990,11(3):17-20.
- [13] 黄荣成,赵金彪,曾小团,等.广西海洋气象预报预警服务系统的设计研发[J].气象研究与应用,2016,37(2):12-15,123.
- [14] 李艳兰,欧艺,周绍毅,等.广西热带气旋灾害评估系统的开发与应用.气象研究与应用,2008,29(4):1-3.
- [15] 唐文,苏洵.1621秋季台风“莎莉嘉”路径突变和暴雨成因分析[J].气象研究与应用,2017,38(4):32-38,118.
- [16] 陈伟斌,黄荣成,屈梅芳,等.快速台风“海鸥”强度、路径特点及成因分析[J].中国农学通报,2015,31(26):200-209.
- [17] 覃武,罗小莉,钟利华,等.台风“尤特”登陆后复杂路径的环境场特征[J].气象与环境科学,2019,42(1):110-118.
- [18] 陆波,钱维宏.华南近海台风突然增强的初秋季节锁相[J].地球物理学报,2012,55(5):1523-1531.
- [19] 韩慎友,陈伟斌,陈见.超强台风“天鸽”(1713)近海急剧加强特征及诊断分析[J].气象研究与应用,2020,41(1):70-74.
- [20] Xiao Z X, Yao C, Luo X, et al. A Comparative Study on the Offshore Intensification of Supertyphoon Rammasun (2014) and Typhoon Rumbia (2013): the Role of Summer Monsoon [J]. Asia-Pacific Journal of the Atmospheric Sciences, 2020, <https://doi.org/10.1007/s13143-020-00204-3>.
- [21] 曾小团,黄海洪,罗建英,等.台风“芭玛”(2009)近海突然加强的模拟研究[J].气象研究与应用,2018,39(3):1-6.
- [22] 覃丽,吴启树,曾小团,等.对流非对称台风“天鸽”(1713)近海急剧增强成因分析[J].暴雨灾害,2019,38(3):212-220.
- [23] 乔守文,边志刚,隋意,等.1980—2015年间北部湾海域热带气旋的变化及特征分析[J].广西科学,2019,26(6):663-668.
- [24] 陈见,高安宁,陈润珍,等.热带气旋进入北部湾后强度增强的环流特征分析[J].气象研究与应用,2007,28(1):19-24.
- [25] 黄荣成,陈见,赵金彪,等.台风“芭玛”在北部湾迅速加强的特征分析[J].中国农学通报,2016,32(8):136-146.
- [26] 黄滢,黄春华,林文桦.台风“威马逊”登陆后长时间维持原因分析[J].气象研究与应用,2019,40(4):24-27,49.
- [27] 陈联寿,孟智勇,丛春华.台风暴雨落区研究综述[J].海洋气象学报,2017,37(4):1-7.
- [28] 周云霞,翟丽萍,何珊珊.2019年“5.27”广西靖西市极端暴雨成因及可预报性分析[J].气象研究与应用,2020,41(2):68-74.
- [29] 洪展.一次台风暴雨过程的水汽特征分析[J].气象研究与应用,2014,35(4):16-18.
- [30] 赵金彪,韩慎友,李佳颖.影响广西的两次台风暴雨中尺度对比分析[J].暴雨灾害,2014,33(2):156-162.
- [31] 黄翠银,农孟松,陈剑飞.台风“山神”和“海燕”对广西影响对比分析[J].气象研究与应用,2014,35(2):7-13,39.
- [32] 黄增俊,黄归兰,丘良,等.冷空气侵入超强台风“海燕”造成广西强降雨增幅成因分析[J].气象研究与应用,2015,36(1):31-37.
- [33] 黄莉,黄增俊,白龙,等.台风“海燕”(2013)暴雨非对称结构及中尺度特征分析[J].热带气象学报,2017,33(3):334-344.
- [34] 卢小丹,王黎娟,刘国忠.深秋季节台风“海燕”(1330)引发广西特大暴雨的水汽和螺旋度分析[J].中国农学通报,2016,32(11):141-148.
- [35] Ritchie E A, Wood K M, Gutzler D S, et al. The Influence of Eastern Pacific Tropical Cyclone Remnants on the Southwestern United States [J]. Monthly Weather Review, 2011, 139(1):192-210.
- [36] 蒙炤臻,陈见,韩慎友,等.广西台风残涡暴雨发生特征分析[J].气象研究与应用,2017,38(1):20-25.
- [37] 黄巾旗,王盛繁,梁毅进,等.2015年秋季台风“彩虹”暴雨诊断分析[J].中国农学通报,2017,33(14):87-94.
- [38] 苏玉婷,林开平,肖志祥,等.广西沿海地形对超强台风“威马逊”影响的数值试验[J].气象研究与应用,

- 2018,39(1):11-14,154.
- [39] 覃武,赵金彪,黄荣成,等.台风“山竹”登陆结构变化及造成广西强降水异常分布的成因分析[J].热带气象学报,2019,35(5):587-595.
- [40] 覃丽,黄海洪,吴俞,等.1306号热带气旋“温比亚”非对称降水的环境场特征[J].暴雨灾害,2014,33(2):121-128.
- [41] 吴国雄,蔡雅萍.湿位涡和倾斜涡度发展[J].气象学报,1995,53(4):387-405.
- [42] 胡勇林,钟韬,洪展.0906台风“莫拉菲”影响期间广西暴雨落区的分析[J].安徽农业科学,2012,40(12):7262-7264,7279.
- [43] 周惠文,陈冰廉,苏兆达,等.广西台风灾害性大风的气候特征[J].灾害学,2007,22(1):13-17.
- [44] 何洁琳,管兆勇.桂东南热带气旋大风的统计特征及典型个例研究[J].热带气象学报,2006,22(2):184-191.
- [45] 何如,周绍毅,苏志,等.广西钦州湾台风“启德”风场特征实测研究[J].气象研究与应用,2015,36(4):34-37,130.
- [46] 罗小莉,姚才,谭金凯.登陆华南台风的频数及强度变化特征分析[J].海洋预报,2018,35(4):58-67.
- [47] 姚才,罗小莉,张成扬,等.7-9月登陆华南台风气候变化特征及大尺度环流系统分析[J].气象研究与应用,2019,40(1):1-6,10.
- [48] Yao C,Z X Xiao,S Yang, et al. Increased severe landfall typhoons in China since 2004[J]. International Journal of Climatology, 2021,41(S1):E1018-E1027.
- [49] 何如,黄梅丽,罗红磊,等.近五十年来广西海岛的气候变化与气旋灾害特征分析[J].气象研究与应用,2015,36(2):31-35,39.
- [50] 何洁琳,谢敏,黄卓,等.广西气候变化事实[J].气象研究与应用,2016,37(3):11-15.
- [51] 罗小莉,姚才,肖志祥,等.近60年来登陆华南热带气旋降水的气候变化特征及其成因[J].海洋预报,2020,37(4):76-85.
- [52] 陆虹,黄永新,郭小军.影响广西的热带气旋年频数的初步研究[J].广西气象,2000,21(S1):73.
- [53] 陆虹,金龙,缪启龙,等.影响广西热带气旋年频数的神经网络预测模型[J].南京气象学院学报,2003,26(1):56-62.
- [54] 何慧,欧艺,李艳兰.影响广西的热带气旋年频数的BP神经网络预测模型[J].热带气象学报,2009,25(4):407-412.
- [55] 徐圣璇,张成扬,陈丹.登陆华南台风频次影响因子的气候模式预测能力研究[J].气象研究与应用,2020,41(3):16-20.
- [57] 李菁,陈建伟,祁丽燕.基于灰色关联分析的不同路径台风灾害研究[J].灾害学,2017,32(2):48-53.
- [58] 莫建飞,黄思琦,钟仕全,等.基于GIS的精细化广西台风灾害承灾体脆弱性评价[J].暴雨灾害,2017,36(2):177-181.
- [59] 刘合香,徐庆娟.基于r维正态扩散的区域热带气旋灾害模糊风险分析[J].数学的实践与认识,2011,41(3):150-159.
- [60] 曾维刚,吴福.广西北部湾经济区台风暴雨引发的地质灾害风险评价[J].中国地质灾害与防治学报,2017,28(1):121-127.
- [61] 陈燕璇,刘合香,谭金凯.基于等距特征映射降维的台风灾情概率神经网络预评估模型[J].灾害学,2016,3(3):20-25.
- [62] 谭金凯,刘合香,倪增华,等.台风致洪灾害的广义模糊熵模型研究[J].模糊系统与数学,2016,30(1):182-190.
- [63] 陈燕璇,刘合香,倪增华.基于Copula熵因子选取的PSO-ELM台风灾情预测模型[J].气象研究与应用,2019,40(2):7-11,55.
- [64] 罗红磊,凌丽嘉,苏志,等.影响广西沿海风电场的热带气旋特征分析[J].气象研究与应用,2017,38(3):41-44,144.
- [65] 黄志都,俸波,叶庚姣,等.影响广西电网输电线路的台风“威马逊”和“海鸥”环流特征分析[J].气象与环境科学,2018,41(4):90-97.
- [66] 覃艳秋,赖雨薇,刘蕾.柳州夏季一次雨夹冰雹的天气过程分析[J].气象研究与应用,2015,36(1):63-67,129.
- [67] 黄荣,黄晴,屈梅芳,等.1713号台风“天鸽”外围龙卷特征及成因分析[J].气象研究与应用,2018,39(1):28-32,90,154.
- [68] 覃卫坚,李耀先.2010年广西高温热浪气象灾害成因分析[J].气象研究与应用,2011,32(4):13-16.
- [69] 张凌云,刘蕾,王艺,等.近56a柳州高温天气的气候特征及类型分析[J].气象研究与应用,2017,38(4):1-6,117.
- [70] 周冬梅,骆炳兰,黄肖寒,等.1959-2014年田阳高温天气特征及成因分析[J].气象研究与应用,2017,38(2):35-37.
- [71] 苏志,赵飞,郑凤琴,等.北部湾海域灾害性海浪特征及影响天气系统分析[J].气象与环境科学,2019,42(2):55-61.
- [72] 陈宪云,刘晖,董德信,等.广西主要海洋灾害风险分析[J].广西科学,2013(3):248-253.
- [73] 蒋昌波,赵兵兵,邓斌,等.北部湾台风风暴潮数值模拟及重点区域风险分析[J].海洋预报,2017,34(3):32-40.

Guangxi tropical cyclone forecast operation and research progress

Xiao Zhixiang¹, Yao Cai^{1*}, Zhao Jinbiao², He qixuan³, Lan Yufeng⁴

(1. Guangxi Institute of Meteorological Sciences, Nanning Guangxi 530022;

2. Guangxi Meteorolocial Observatory, Nanning Guangxi 530022;

3. Beihai Meteorological Bureau, Beihai Guangxi 536000;

4. Guangxi Meteorolocial Training Center, Nanning Guangxi 530022)

Abstract: Tropical cyclones often cause serious losses in passing areas, but they also bring considerable social and economic benefits. Accurate forecasting is the prerequisite for achieving advantages and avoiding disadvantages. This paper summarized the progress of tropical cyclone forecasting in Guangxi in the past ten years, and introduced the achievements of Guangxi meteorologists in terms of tropical cyclone heavy rainfall, gale, storm surge, climate change and prediction, impact and disasters. The existing problems in current tropical cyclone business and research were summarized, and the key points for future tropical cyclone business and research development in Guangxi were pointed out.

Key words: Tropical cyclones; Forecast and Prediction; Climate change; Disaster; Research Progresses