

热带气旋季节预报业务进展

李菁楠^{1,2}, 李响^{1,2}, 张蕴斐^{1,2}, 凌铁军^{1,2}, 渠鸿宇^{1,2}

(1. 国家海洋环境预报中心, 北京 100081; 2. 国家海洋局 海洋灾害预报技术研究重点实验室, 北京 100081)

摘 要: 主要回顾了近30 a来国内外热带气旋季节预报的研究和业务进展,对热带气旋季节预报的发展历史进行系统性梳理,总结了国内外有关热带气旋季节预报的主要研究/业务机构、预报模式及预报产品等。进一步的,讨论了热带气旋季节预报发展中存在的问题,并对尚待研究的问题进行了展望,为我国热带气旋季节预报的研究和业务化工作提供参考。

关键词: 热带气旋; 季节预报; 业务化; 预报模式

中图分类号: P457.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2018)06-0092-08

1 引言

热带气旋(Tropical Cyclone, TC)是指发生在热带、亚热带洋面上的一种强烈的气旋系统^[1]。由热带气旋导致的狂风、暴雨及次生灾害会对海洋沿岸人民的生命财产安全造成重大威胁。季节预报通常指3—12个月的短期气候预测。通过季节预报可以了解短期气候变化的大体趋势和特定地区出现特定气候类型的可能概率^[2-3]。做好热带气旋的季节预报,可为政府、保险业、旅游业提供信息支持,对政府决策、商业决策具有重要作用^[3-4]。

影响热带气旋季节变化的主要因子,如海表温度、大尺度大气环流等,都变化缓慢且具有可预报性,这使得热带气旋的季节预测成为可能^[5]。值得注意的是,影响因子与热带气旋的季节变化既存在空间的遥相关关系,同时也存在时间的非线性效应。空间的遥相关关系使得太平洋海域部分热带气旋的季节变化与大西洋海表温度变化间呈现相关性^[6],而时间的非线性效应使得热带气旋的季节变化受多种时间尺度的影响因子控制^[5,7]。影响因子的可预报性决定了热带气旋季节变化的可预报

性,空间的遥相关关系和时间的非线性效应决定了热带气旋季节预报工作不应该仅仅局限在小尺度,而应该考虑更大的空间、时间尺度。

目前,国内外主要的预报机构已经针对热带气旋季节预报开展了长期的研究和业务化工作,发布了一系列预报产品。在理解热带气旋季节预报科学背景的基础上,本文介绍了国内外主要的热带气旋季节预报机构,同时也对这些机构的研究、业务化进展及相关预报产品进行介绍。

2 国内外热带气旋季节活动研究进展

国际上,热带气旋季节预报最早开展于澳大利亚海域及大西洋海域。为了研究澳大利亚海域热带气旋频率与厄尔尼诺-南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)现象的关系, Nicholls^[8-9]在1979年首次建立了针对澳大利亚海域热带气旋季节活动的预报系统。之后,为研究北大西洋海域热带气旋季节活动与 ENSO 的关系, Gray^[10-11]在1984年首次对北大西洋进行了热带气旋季节预报。之后30多 a,随着越来越多的关于热带气旋季

收稿日期: 2018-05-17; 修回日期: 2018-06-12

基金项目: 全球变化与海气相互作用专项(GASI-IPOVAI-06); 国家重点项目研究发展计划项目(2014CB7450014); 国家自然科学基金面上基金(41376016); 国家自然科学基金青年基金(43106008; 41506040)。

作者简介: 李菁楠(1988-),女,研究实习员,博士,主要从事陆架海湍流和热带气旋季节预报研究。Email: ljnouc@hotmail.com

节预报工作的开展,世界上主要的科研/业务机构实现了对不同海域的热带气旋季节预报。热带气旋季节预报业务的快速发展主要与两方面因素有关:一是观测、计算、分析技术的发展,如卫星观测、陆地观测系统的升级,计算机性能的升级,全球及区域数值模式的发展,数据再分析技术的发展,针对历史再分析资料的大规模整合^[12]等,均促进了预报系统的进一步升级;二是热带气旋季节活动物理机制研究的发展。其中,关于ENSO对热带气旋季节活动影响的研究^[10-11],奠定和促进了热带气旋季节预报的产生和发展^[13]。

2.1 预报机构

以Nicholls和Gray的研究为起点,针对热带气旋季节预报的研究及业务化工作逐渐扩展到世界各主要预报机构。目前,全球有超过10所的业务机构开展了热带气旋季节预报业务,并发布业务化预报产品。

1995—1998年期间,古巴气象局(1995、1996年)、美国国家海洋大气局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)(1997、1998年)、美国科罗拉多州立大学(Colorado State University, CSU)(1998年)分别开始了针对大西洋、太平洋海域的热带气旋季节活动的预报研究,发布了飓风、台风数量预报,热带气旋登陆概率预报等预报产品^[4,13-17]。其中NOAA大西洋飓风季节展望发布于<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/outlooks/hurricane.shtml>,CSU大西洋季节飓风活动预报产品及相关预报信息发布于<https://tropical.colostate.edu/>。1982—2017年,CSU模拟的大西洋热带ACE(Accumulated Cyclone Energy)与观测值相比,线性相关系数为0.74^[18]。从2000年开始,热带风暴网(Tropical Storm Risk, TSR)(2000年)、欧洲中期天气预报中心(European Center for Medium Range Weather Forecast, ECMWF)(2001年)、美国国际气候与社会研究所(International Research Institute for Climate and Society in USA, IRI)(2003年)、英国气象局(Met Office)(2007年)等机构也陆续开展业务工作,发布了北大西洋、西北太平洋、澳大利亚区域等海域热带气旋活动的季节展望^[4,13-17]。1990—2016年,ECMWF模拟的北大西洋热带风暴频数与观测

值相比,线性相关系数为0.71,均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)为0.40^[19]。英国气象局2018年北大西洋热带风暴季节预测发布于<https://www.metoffice.gov.uk/weather/tropicalcyclone/seasonal/northatlantic2018>,TSR热带风暴季节展望发布于<http://tropicalstormrisk.com>。我国针对热带气旋季节活动预报开展时间与国际同步,主要机构有上海台风所(1990年代中期),中国气象局国家气候中心(1994年)及香港城市大学(1997年)^[20-21]。表一给出了热带气旋季节预报的主要机构、区域、模式及产品。

2.2 预报区域

在热带气旋季节预报的研究初期,北大西洋、西北太平洋作为热带气旋活动最活跃的两个海区,受到了研究人员的密切关注。随着研究的发展,虽然北大西洋和西北太平洋仍是研究的重点,但针对其他海域的热带气旋季节预报也逐渐展开。

NOAA太平洋飓风中心自1997年开始发布太平洋中北部飓风数量的季节预报^[4],之后于2004年开始发布太平洋东部、中北部的飓风活动季节展望^[13]。TSR自2000年开始发布北大西洋、西北太平洋、澳大利亚区域热带气旋的季节展望^[13],并关注美国东海岸、墨西哥湾、加勒比海小安地列斯群岛及澳大利亚的飓风登陆活动^[13]。ECMWF基于一个耦合的全球环流模式^[22],将研究区域拓展到东北太平洋、南太平洋、澳大利亚、南印度洋及北印度洋海域。IRI从2003年开始,针对东北太平洋、南太平洋和澳大利亚等海域开展热带气旋季节预报^[13]。

目前,我国的热带气旋季节预报关注区域仍以西北太平洋海域为主,但预报区域更加精细化,重点关注受台风影响的沿海区域。香港城市大学在2009年和2010年,研究了ENSO与南中国、朝鲜及日本台风登陆数之间的相关性^[23-24],并据此建立了热带气旋季节预报系统。上海台风研究所2016年台风季节预报产品包括华东地区以及影响长三角、上海地区的热带气旋年频数和逐月频数预报。

2.3 预报模式

热带气旋季节预报方法包括统计方法、动力方法和统计-动力混合的方法。统计方法开始最早,使

用范围最广,是目前最主流的热带气旋季节预报方法^[5,7]。在早期,Nicholls^[8]和 Gray^[10-11]的热带气旋研究主要利用统计学方法进行。统计方法通过使用观测数据和再分析数据,寻找热带气旋季节变化的影响因子,建立统计模式^[5,13]。统计模式具有一定的时空局限性,当超出一定范围时,统计模式的预报技巧显著下降^[5]。

动力方法通过海气相互作用等物理原理构建动力模式^[7],弥补了统计方法时空不连续的缺点。理想的动力模式应该在各海区各时间段都能产生准确的预报结果,但由于目前对热带气旋季节变化的理论机制研究仍处于探索阶段,物理机制并不完善,导致动力模式在不同海区的预报技巧不同,甚至在一些海区几乎没有预报技巧^[7,13]。在个别海域个别时间段内,尽管一些动力模式的预报技巧与统计模式相似甚至优于统计模式^[7],但总体来说,目前统计模式的预报技巧依然高于动力模式^[5]。动力模式时空连续统一的优点,使其成为未来热带气旋季节预报发展的主流^[5,13]。

混合模式结合了动力模式和统计模式的优点,先通过观测数据和再分析数据建立一个可靠的统计模式,找到相关物理量的影响因子,构建影响因子与预报产品的关系,再通过动力模式计算输出该影响因子,代入统计模式,完成预报^[25]。

近年来,热带气旋季节预报模式取得了长足的进步,从早期单纯使用统计模式到目前统计、动力、统计-动力混合模式共同发展,随着预报工作的深入和发展,动力、统计-动力混合方法的重要性不断提高^[26]。NOAA 在 1998 年发布了针对大西洋海域的飓风活动季节展望^[13,27],预报同时使用了统计模式、动力模式和统计-动力混合模式。ECMWF 从 2001 年开始进行针对热带气旋的季节动力预报^[7,13]。从 2003 年开始,IRI 使用德国马普气象研究所的 ECHAM4.5 (ECMWF 和 Hamburg) 大气模式进行实验性动力预报^[28-30]。英国气象局使用全球动力海气耦合集合模式 GloSea5 (Global Seasonal Forecasting System)^[31],开展了北大西洋海域热带气旋季节预报的研究。韩国气象局国家台风中心利用统计模式、动力模式、统计-动力混合模式预报一段特定时期的热带气旋数^[32]。自 2010 年起,NOAA 的地球流体力学实验室 (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory,

GFDL) 利用一个统计-动力混合模式进行北大西洋飓风频数的实验性实时预报^[33]。我国国家气候中心采用动力模式发布西北太平洋的台风季节展望。中国气象局上海台风所在 2011 年之前主要依赖统计模式,但在 2011 年开发了热带气旋预报的动力模式,脱离了对统计模式的单纯依赖,2013 年又进一步研制开发了混合预报模式。

在预报方法从纯统计方法转向统计、动力、统计-动力混合方法发展的同时,各机构使用的动力模式也在不断升级更新。2017 年起 ECMWF 启用了全新的系统 SEAS5 (Seasonal Forecast System 5) 进行热带气旋季节预报的业务化工作^[34],系统对海洋模式 NEMO (Nucleus for European Modeling of the Ocean), 大气模式 IFS (Integrated Forecasting System) 进行了升级,并增加了新的海冰模式 LIM2 (The Louvain-la-Neuve sea Ice Model)。大气模式水平空间分辨率由 T_L255 改为 T_{co}319,海洋模式由 NEMO v3.3 升级为 NEMO v3.4,水平空间分辨率由 1° 改为 0.25°,垂向分辨率由 42 层增加到 75 层。ECMWF 的预报结果不对公众开放。英国气象局在 2015 年将原耦合预报系统 GloSea5 升级为 GloSea5-GC2 (Global Coupled model 2.0),对耦合模式中大气、海洋、海冰和陆地模块 (网址: <https://www.metoffice.gov.uk/research/climate/seasonal-to-decadal/gpc-outlooks/notice>) 进行系统升级。其中,大气模式水平分辨率为 0.83° × 0.55°,海洋模式水平分辨率为 0.25° × 0.25°。英国气象局北大西洋热带风暴季节预测中,1992—2013 年模拟的热带风暴频数与观测值的线性相关系数为 0.59,ACE 指数的相关系数为 0.52^[35]。

2.4 预报产品

在一个或多个热带气旋季内,研究者主要通过热带气旋的时间、空间、数量及能量特征来进行热带气旋的研究。这 4 种特征演化出了多种业务化预报产品,这些产品不但能够被用于热带气旋年内规律研究,也可以用于研究热带气旋年际变化。

在热带气旋季节预报发展的早期,预报产品相对比较单一,主要预报热带气旋的年频数^[8,10-11]。随着研究/业务的不断深入开展,各机构^[4,5,13,16,20-21,23-24,31,36-37]陆续开发出更精细的热带气旋季节预报产品。这些

表1 热带气旋季节预报的主要机构及研究海域、方法、产品

| 机构名称 | 研究海域 | 研究方法 | 主要预报产品 |
|------------|----------|------|--------------------|
| 国家气候中心 | 西北太平洋 | 统计模式 | 热带风暴数 |
| | | 动力模式 | 热带风暴在中国登陆数 |
| 中国气象局 | 西北太平洋 | 统计模式 | 热带风暴数 |
| 上海台风所 | | 动力模式 | 热带风暴比率 |
| | | 混合模式 | 热带风暴登陆中国数 |
| | | | 影响中国特定区域热带风暴年、月频数 |
| 香港城市大学 | 西北太平洋 | 统计模式 | 被命名热带气旋/热带风暴/台风数 |
| CSU | 北大西洋 | 统计模式 | 被命名热带气旋/(强)飓风数 |
| | | | 被命名热带气旋/(强)飓风天数 |
| | | | ACE |
| NOAA | 西北/中北太平洋 | 统计模式 | 被命名热带气旋/(强)飓风数 |
| | 北大西洋 | 动力模式 | 飓风数量概率 |
| | | 混合模式 | 风暴/(强)飓风季的季节范围 |
| | | | ACE/PDI |
| IRI | 西北/东北太平洋 | 动力模式 | 被命名热带风暴数 |
| | 南太平洋 | | 北半球ACE |
| | 北大西洋 | | 西北太平洋热带风暴生成的平均位置 |
| | 澳大利亚海域 | | 热带风暴生成概率 |
| ECMWF | 西北/东北太平洋 | 动力模式 | 被命名热带风暴数/飓风数/台风数 |
| | 南太平洋 | | ACE |
| | 北大西洋 | | 热带风暴生成的平均位置 |
| | 澳大利亚海域 | | 热带风暴密度异常 |
| | 南/北印度洋 | | |
| Met Office | 北大西洋 | 动力模式 | 被命名热带风暴/(强)飓风数 |
| | | | 路径密度 |
| | | | ACE |
| TSR | 西北太平洋 | 统计模式 | 被命名热带风暴数 |
| | 北大西洋 | | (强)飓风/(强)台风数 |
| | 澳大利亚海域 | | ACE/登陆的热带气旋的ACE |
| | | | 被命名热带气旋/(强)飓风的登陆数 |
| 墨西哥气象局 | 东北太平洋 | 统计模式 | 热带气旋数/热带风暴数/(强)飓风数 |
| 古巴气象局 | 北大西洋 | 统计模式 | 被命名的风暴和飓风数 |
| | | | 未发展成为风暴或飓风的热带风暴 |
| | | | 登陆热带气旋 |
| 韩国气象局 | 西北太平洋 | 统计模式 | 热带气旋数/热带风暴数/台风数 |
| 国家台风中心 | | 动力模式 | 西北太平洋归一化台风活动指数 |
| | | 混合模式 | 可能影响朝鲜半岛的热带气旋数 |
| | | | 热带气旋的总路径密度和异常 |
| | | | 朝鲜半岛受台风袭击的概率 |

预报产品总体上可以分为4类:

(1)体现热带气旋时间特征的预报产品有:热带气旋季的起始、终止和持续时间,被命名的热带

气旋天数;

(2)体现热带气旋空间特征的预报产品有:热带气旋位置、平均生成地点、运动轨迹、影响范围、

路径密度、热带风暴密度,平均热带气旋生成地点;

(3)体现热带气旋数量特征的预报产品有:热带气旋频率及热带风暴比率;

(4)体现热带气旋能量特征的预报产品有:累积气旋能量(Accumulated Cyclone Energy, ACE)及总功率耗散指数(Power Dissipation Index, PDI)。

表2给出了现阶段热带气旋季节预报的各主要产品的详细介绍。

3 影响预报准确性的因素

尽管热带气旋季节预报已经取得了非常大的进步,但其预报准确性和可靠性尚不能满足公众需求^[3-4]。热带气旋季节预报误差可能的来源有:观测数据、物理机制和模式分辨率。

在观测数据的采集、预处理和再分析过程中,都可能产生误差。由于数据观测方式的更新升级,不同时期数据采集导致的误差也会有所不同,如美国海军在1987年前后,由于观测方式由飞机采集升级为卫星观测,导致数据在分辨率等方面存在显著差异^[5]。对观测数据的处理分析也可能是误差的来源之一,在统计方法中,对观测数据的截取会导致误差的产生,进而影响统计关系的建立:当数据截取过长时,可能引入不必要的噪声,当截取过短时,可能遗漏重要信息。除了观测数据外,预报结果的后处理方式也会对预报结果的可靠性产生影响,如何针对预报结果进行合理的误差订正,也是热带气旋季节预报研究中一个重要的方向^[29]。

研究人员对热带气旋季节变化物理机制的错误归因也会对预报结果产生影响,一个很明显的例子就是热带气旋预报中的“漏报”和“空报”现象,当热带气旋的影响因子没有找全或建立了错误的物理机制时,预报中很容易出现虚假的热带气旋或缺少应有的热带气旋^[1]。由于对物理机制的了解不够深入完善,导致动力预报中,同一个模式在不同海区呈现不同的预报技巧^[7,24,38]。同样由于气象预报自身的特性,初始的微小误差经过长时间积累,最终会在预报中产生较大的偏差。季节预报并不能对每个热带气旋的发生发展过程进行精确预报,只能对某类型的气候现象做一个大致的概率描述,虽然通过这种大致描述的方法,误差的累积可以被减

弱,但并不能被完全消除,这也是季节预报误差的一个重要来源^[39]。

热带气旋季节预报中,动力模式的分辨率是一个很重要的因素。在一些模式中,过低的分辨率导致预报的热带气旋路径与观测比偏短,同时强度偏弱^[40]。而高分辨率模式^[41],以集合预报为例,由于受计算资源限制,只能进行部分集合成员的计算^[5]。除此之外,季节预报的另外一个模式误差来源是,当使用模式模拟真实的气候系统时,由于模式计算的特性,会在计算中对数据进行截断,因此从根本上来讲,模式无法准确的模拟真实的气候系统^[39]。

除了由以上3方面的因素导致的热带气旋季节预报误差外,热带气旋的季节预报本质上仍是基于自然界中实际的热带气旋发生概率进行的预报。因为预报自身的不确定性,预报系统对自然界的模拟很难达到完全真实,这是预报工作的固有属性^[13]。但对预报现象的无限贴近,是科学工作者需要追求的目标。

4 总结与展望

过去30余a,热带气旋季节预报取得了长足的进步,扩展了预报区域,升级了预报方式,丰富了预报产品,但热带气旋的季节预报工作依然存在着巨大的挑战,主要体现在以下几个方面。

目前,大多数热带气旋季节预报产品往往针对一个较长的时间段进行数据统计,如统计一个热带气旋季内或一年内的热带气旋频数,短时间的逐月预报的业务化工作较少,预报精度也低于季、年统计的精度。但逐月预报却具有重要的意义,通过热带气旋月生成频数的分布,可以判断热带气旋季的长短、起始结束时间、和实际活跃时间^[5]。因此,对热带气旋进行逐月化预报是科研/业务中需要努力的方向。

热带气旋登陆的相关研究不仅在天气尺度具有重要意义,在季节预报中同样是科学家们关心的问题^[42]。在热带气旋季节预报的业务中,热带气旋登陆的季节预报是最有挑战性、具有最多不确定性的业务之一。尤其是在使用动力模式进行热带气旋登陆的概率预报方面,热带气旋路径及登陆位置的系统偏差依然是一个尚待解决的问题^[4]。提高模

表2 热带气旋季节预报主要产品

| 产品 | 说明 |
|--------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 热带气旋数/频率 | 单位时间内热带气旋数量。 |
| 被命名的热带气旋天数 | 单位时间发生热带气旋的总天数。 如同时发生多个热带气旋,时间只计算一次,不可累加。 |
| 热带气旋季起始和终止时间 | 一年内第一个热带气旋的产生时刻为热带气旋季的起始时间,最后一个热带气旋消失时刻为终止时间。 |
| 热带气旋位置 | 某时刻热带气旋所在经纬度。 热带气旋位置的分布形态可以揭示热带气旋所在的主要海域、各海域的热带气旋密度、一年中受热带气旋影响概率最大的区域等。 |
| 热带气旋运动轨迹 | 热带气旋位置的连续时间序列组成了热带气旋的运动轨迹。 |
| 热带气旋影响范围 | 热带气旋位置与热带气旋半径结合,可以揭示热带气旋的影响范围。 |
| 热带气旋路径密度 | 某区域单位时间通过热带气旋的数量。热带气旋密度一定程度上表明了某地区受到热带气旋袭击的概率大小。 热带气旋路径密度分布形态也可以用来研究热带气旋和大范围海、气过程的相关性。 |
| 归一化热带风暴密度 | 揭示了热带风暴的分布形态。 |
| 热带气旋密度异常 | 去除平均趋势后,进一步凸显热带气旋密度的分布规律。 |
| 平均热带气旋生成地点 | 热带气旋生成地点一般定义为热带气旋第一次达到热带风暴时所在经纬度。平均热带气旋生成地点标志着热带气旋整体的源头,平均生成地点的变化可能揭示热带气旋的不同形态,可用来研究与大范围海、气变化的相关性。 |
| 热带气旋登陆数 | 一段时间内登陆特定区域的热带气旋的数量。在热带气旋季节预报中,热带气旋登陆数作为一个基础量,可以用来计算其他热带风暴登陆的相关概率。 1. 热带气旋登陆比率: 登陆热带气旋数比总生成热带气旋数。 2. 某区域受到热带气旋登陆风险预估: 特定区域在一段时间内受热带气旋登陆的概率。 |
| 热带风暴比率 | 强度在热带风暴以上的热带气旋和所有强度的热带气旋的比值。热带风暴比率的年际变化揭示了真正具有危害性的热带气旋的年际变化趋势。可以用来研究热带气旋发展的影响因子。 |
| ACE | 表征热带气旋的强度。 |
| PDI | 表征热带气旋的强度。 |

式分辨率,研究偏差产生的原因、机制,进一步修正热带气旋路径及登陆位置偏差,也是需要努力的方向。

ENSO事件与热带气旋的季节活动紧密相关,由于目前ENSO的预报仍然存在误差,导致了无法进一步精确模拟热带气旋季节活动^[4]。无论是统计方法还是动力方法,提高包括ENSO事件在内的大尺度海、气背景场的预报准确性,是进一步提升热带气旋季节预报准确性的关键。

影响热带气旋季节变化的因素除了海洋、大气等主要因素外,还有一些次要因素,如土壤湿度、海冰、大气化学构成和气溶胶等。目前,我们对这些

因素对热带气旋季节活动的影响机制了解有限,因此在预报过程中缺少对这些因素的考虑^[5]。如果未来需要建立更加全面的热带气旋季节预报系统,进一步提高预报精度,冰冻圈、陆地表面等相关变量的参数化工作将是一个不容忽视的问题^[5]。

大数据的应用也会对热带气旋季节预报起到助力作用,2017年国家气象中心(网址:http://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xgzdt/201708/t20170811_446085.html)开展了针对台风卫星数据的大数据应用工作。大数据系统的合理建设和完善发展不仅能促进天气尺度的热带气旋研究,也可以帮助发展更加完善的统计和动力模式,最终促进热带气旋季

节预报业务提高。

参考文献:

- [1] 陈联寿, 丁一汇. 西太平洋台风概论[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [2] Vitart F, Robertson A W. The sub-seasonal to seasonal prediction project (S2S) and the prediction of extreme events[J]. *npj Climate and Atmospheric Science*, 2018, 1: 3.
- [3] Torralba V, Doblas-Reyes F J, MacLeod D, et al. Seasonal climate prediction: a new source of information for the management of wind energy resources[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2017, 56(5): 1231-1247.
- [4] Camargo S J, Barnston A G, Klotzbach P J, et al. Seasonal tropical cyclone forecasts[J]. *WMO Bulletin*, 2007, 56(4): 297-309.
- [5] Zhan R F, Wang Y Q, Ying M. Seasonal forecasts of tropical cyclone activity over the western North Pacific: a review[J]. *Tropical Cyclone Research and Review*, 2012, 1(3): 307-324.
- [6] Gao S, Chen Z F, Zhang W. Impacts of tropical North Atlantic SST on western North Pacific landfalling tropical cyclones[J]. *Journal of Climate*, 2018, 31(2): 853-862.
- [7] Vitart F, Stockdale T, Ferranti L. Seasonal forecasting of tropical storm frequency[R]. ECMWF Newsletter No.112, 2007.
- [8] Nicholls N. A possible method for predicting seasonal tropical cyclone activity in the Australian region[J]. *Monthly Weather Review*, 1979, 107(9): 1221-1224.
- [9] Nicholls N. Predictability of interannual variations of Australian seasonal tropical cyclone activity[J]. *Monthly Weather Review*, 1985, 113(7): 1144-1149.
- [10] Gray W M. Atlantic seasonal hurricane frequency. Part I: El Niño and 30 mb quasi-biennial oscillation influences[J]. *Monthly Weather Review*, 1984, 112(9): 1649-1668.
- [11] Gray W M. Atlantic seasonal hurricane frequency. Part II: forecasting its variability[J]. *Monthly Weather Review*, 1984, 112(9): 1669-1683.
- [12] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-Year reanalysis project[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996, 77(3): 437-470.
- [13] Klotzbach P J, Barnston A G, Bell G, et al. Seasonal forecasting of tropical cyclones[M]//Guard C. *Global Guide to Tropical Cyclone Forecasting*. World Meteorological Organization, 2010.
- [14] Gray W M, Landsea C W, Mielke P W, et al. Predicting Atlantic seasonal hurricane activity 6-11 months in advance[J]. *Weather and Forecasting*, 1992, 7(3): 440-455.
- [15] Gray W M, Landsea C W, Mielke Jr P W, et al. Predicting Atlantic basin seasonal tropical cyclone activity by 1 August[J]. *Weather and Forecasting*, 1993, 8(1): 73-86.
- [16] Davis M A S, Brown G M, Leftwich Jr P W. A tropical cyclone data tape for the eastern and central North Pacific basins, 1949-1983: contents, limitations, and uses[R]. NOAA Technical Memorandum NWS NHC 25, 1984.
- [17] Bell G D, Chelliah M. Leading tropical modes associated with interannual and multidecadal fluctuations in North Atlantic hurricane activity[J]. *Journal of Climate*, 2006, 19(4): 590-612.
- [18] Klotzbach P J, Bell M M. Extended range forecast of atlantic seasonal hurricane activity and U.S. landfall strike probability for 2008[R]. Fort Collins, CO: Colorado State University, 2018.
- [19] Haiden T, Janousek M, Bidlot J R, et al. Evaluation of ECMWF forecasts, including 2016-2017 upgrades[R]. ECMWF Technical Memorandum 817, 2017.
- [20] Chen T C, Weng S P, Yamazaki N, et al. Interannual variation in the tropical cyclone formation over the western North Pacific[J]. *Monthly Weather Review*, 1998, 126(4): 1080-1090.
- [21] Chan J C L, Shi J E, Liu K S. Improvements in the seasonal forecasting of tropical cyclone activity over the western North Pacific[J]. *Weather and Forecasting*, 2001, 16(4): 491-498.
- [22] Anderson D, Stockdale T, Alonso-Balmaseda M, et al. Development of the ECMWF seasonal forecast system 3[R]. ECMWF Technical Memorandum 503, 2007.
- [23] Goh A Z C, Chan J C L. An improved statistical scheme for the prediction of tropical cyclones making landfall in South China[J]. *Weather and Forecasting*, 2010, 25(2): 587-593.
- [24] Goh A Z C, Chan J C L. Variations and prediction of the annual number of tropical cyclones affecting Korea and Japan[J]. *International Journal of Climatology*, 2012, 32(2): 178-189.
- [25] Zhan R F, Wang Y Q. CFSv2-based statistical prediction for seasonal accumulated cyclone energy (ACE) over the western North Pacific[J]. *Journal of Climate*, 2016, 29(2): 525-541.
- [26] Zhang W, Villarini G, Vecchi G A, et al. Statistical-dynamical seasonal forecast of western North Pacific and East Asia landfalling tropical cyclones using the high-resolution GFDL FLOR coupled model[J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2016, 8(2): 538-565.
- [27] Landsea C W, Pielke Jr R A, Mestas-Núñez A M, et al. Atlantic Basin hurricanes: indices of climatic changes[J]. *Climatic Change*, 1999, 42(1): 89-129.
- [28] Roeckner E, Arpe K, Bengtsson L, et al. The atmospheric general circulation model ECHAM-4: model description and simulation of present-day climate[R]. Hamburg, Germany: Max Planck Institute for Meteorology, 1996.
- [29] Camargo S J, Barnston A G. Experimental dynamical seasonal forecasts of tropical cyclone activity at IRI[J]. *Weather and Forecasting*, 2009, 24(2): 472-491.
- [30] Camargo S J, Barnston A G. Description and skill evaluation of experimental dynamical seasonal forecasts of tropical cyclone activity at IRI[R]. Columbia University Libraries, 2008.
- [31] MacLachlan C, Arribas A, Peterson K A, et al. Global seasonal forecast system version 5 (GloSea5): a high-resolution seasonal forecast system[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological*

- Society, 2015, 141(689): 1072-1084.
- [32] Kwon H J, Lee W J, Won S H, et al. Statistical ensemble prediction of the tropical cyclone activity over the western North Pacific[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(24): L24805.
- [33] Vecchi G A, Zhao M, Wang H, et al. Statistical-dynamical predictions of seasonal North Atlantic hurricane activity[J]. *Monthly Weather Review*, 2011, 139(4): 1070-1082.
- [34] Stockdale T, Johnson S, Ferranti L, et al. ECMWF's new long-range forecasting system SEAS5[R]. ECMWF, 2018.
- [35] Camp J, Roberts M, MacLachlan C, et al. Seasonal forecasting of tropical storms using the Met Office GloSea5 seasonal forecast system[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2015, 141(691): 2206-2219.
- [36] Liu K S, Chan J C L. Climatological characteristics and seasonal forecasting of tropical cyclones making landfall along the South China Coast[J]. *Monthly Weather Review*, 2003, 131(8): 1650-1662.
- [37] Villarini G, Vecchi G A. Projected Increases in North Atlantic tropical cyclone Intensity from CMIP5 models[J]. *Journal of Climate*, 2013, 26(10): 3231-3240.
- [38] Vitart F, Anderson D, Stockdale T. Seasonal forecasting of tropical cyclone landfall over mozambique[J]. *Journal of Climate*, 2003, 16(23): 3932-3945.
- [39] Weisheimer A, Palmer T N. On the reliability of seasonal climate forecasts[J]. *Journal of the Royal Society Interface*, 2014, 11(96): 20131162.
- [40] Vitart F, Huddleston M R, Déqué M, et al. Dynamically-based seasonal forecasts of Atlantic tropical storm activity issued in June by EUROSIP[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(16): L16815.
- [41] Manganello J V, Hodges K I, Cash B A, et al. Seasonal forecasts of tropical cyclone activity in a high-atmospheric-resolution coupled prediction system[J]. *Journal of Climate*, 2016, 29(3): 1179-1200.
- [42] Murakami H, Vecchi G A, Villarini G, et al. Seasonal forecasts of major hurricanes and landfalling tropical cyclones using a high-resolution GFDL coupled climate model[J]. *Journal of Climate*, 2016, 29(22): 7977-7989.

Review on the progress of operational seasonal forecast of tropical cyclones

LI Jing-nan^{1,2}, LI Xiang^{1,2}, ZHANG Yun-fei^{1,2}, LING Tie-jun^{1,2}, QU Hong-yu^{1,2}

(1. National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081 China; 2. Key Laboratory of Research on Marine Hazards Forecasting, State Oceanic Administration, Beijing 100081 China)

Abstract: This article briefly reviewed the progress of operational seasonal forecast of tropical cyclones in the last 30 years. The article introduces the major operational center or research institutions, organizations, models, and the forecast products around the world, with a brief summary of the historical development of tropical cyclone seasonal forecast and a discussion of the potential issues and research gaps hindering further improvement of tropical cyclone seasonal forecast. This summary will contribute to the improvement of research and operational seasonal forecast system of tropical cyclones in China.

Key words: tropical cyclone; seasonal forecast; operational; forecast model