

热带气旋数值预报新进展*

陈德辉

(中国气象局国家气象中心 北京,100081)

摘要 本文主要介绍近年来在热带气旋数值预报领域的研究与业务应用的新进展,其内容包括模式的资料初值化处理、模式预报以及基础研究等。并在此基础上,对如何进一步提高热带气旋数值天气预报水平的问题,作一简要讨论。

关键词 热带气旋,台风路径,数值预报

1 引言

近十几年来,热带气旋数值预报的研究与业务应用,得到了越来越广泛的开展。目前,已有英国、美国、澳大利亚、中国和日本等国建立了热带气旋业务数值预报系统,也取得了可喜的成果(表2),这主要得益于:(i)计算机技术的迅速发展,使模式分辨率得以大幅度提高;(ii)新的初值化技术的完善和改进;(iii)可用于模式同化系统的观测资料增加;(iv)模式对一些关键物理过程的较好描述。

本文试图分别从模式资料初值化、模式技术、基础研究、模式预报改进与未来发展等

方面作一综合评述。本文所引用资料主要参考文献^[1-5],文中不再特别说明。

2 模式资料初值化

由于热带地区洋面广,测站稀,日常观测资料少,而热带洋面又是热带扰动(气旋、台风、飓风)盛行的区域,因此,热带地区观测资料缺乏是热带气旋数值预报中的关键问题,如何开发利用新的资料源,改进资料初值化技术,对提高热带地区数值预报水平有着非常重要的意义。

2.1 开发利用非常规观测资料

* 获国家教育委员会留学回国人员研究项目支持。

卫星云迹风速资料 在 60 年代中后期,人们就开始了分析不同时刻的卫星云图所显示的云素位置等,推算云迹风速廓线。这种卫星云迹风资料在气象上(天气分析、数值天气预报等)、航空(航线的确定等)都得到了很好的应用。近年来(如日本卫星气象中心,美国国家环境卫星资料局 NESDIS 等),为了在数值预报模式中,更细致地描述初始时刻热带气旋周围低层的环流结构,当有热带气旋时,在气旋中心附近(10 个经—纬度的范围内)“加密”分析卫星云图风速资料,云图分析间隔时间由原来的 30 分钟缩短为 15 分钟,分辨率由原来的 1 个经—纬度提高到 0.5 经—纬度。目前,这“加密”卫星云迹风速资料的使用仍处于试验阶段。初步试验结果表明,其对于模式的客观分析有改进作用。

水汽场资料 从可见光和红外卫星云图反演得到的水汽资料,通过初值化系统的同化技术,使模式初始场资料的质量场与风场平衡、动力—热力结构更趋于协调合理,这点已为最近的研究工作所证实(Kuma, 1993)^[6]。

另外,有些气象中心也已开始使用卫星仪器 TOVS 和 ATOVS 探测辐射率资料,以及 SSM/I 的可降水量资料,也收到了一定的效果。

2.2 资料处理与初值化技术

这里所说的初值化技术,指的是模式预报初始场形成的技术,因此,其涉及的内容与范围较广,这里只能选择一些主要的进行评述。

物理初值化技术 物理初值化技术首先是由 Krishnamurti(1984)^[7]提出来的,现已有了较完善的改进。物理初值化技术的要点就是用从卫星观测到的向外长波辐射强度和某一微波段的辐射强度资料估算出的降雨率,去修正模式预报初始湿度廓线,以获得较好的模式预报初始场。在修正初始湿度廓线时分三段处理:低层,对近地面等值通量层顶层的水汽进行修正;中层(从云底到云顶),

按积云加热率廓线修正;高层,以使模式计算的和卫星资料推算的向外长波辐射之差达最小为约束条件进行修正。而且,这些修正过程都是在资料同化系统中完成的,因此,可以最大限度地确保加入水汽场与模式物理过程的协调一致。

人造台风技术 由于热带洋面资料缺乏,用常规资料很难分析出一理想的环境流场和台风结构场,为模式预报提供较合理的初值。为弥补这一不足,近年来提出了一人造台风模型初值化方法。该方法主要是依据人们对热带气旋的认识水平和台风警报资料(最大风速、范围、中心最低气压、台风位置等),人为地构造出一具有较为完善的台风环流和台风结构的对称性台风模型(BOGUS)。然后,把台风初始位移速度作为穿越台风中心的大尺度环境引导气流,连同所构造的人造台风模型场一起叠加于初始分析场上,形成台风模式合成初始场。这种方法已在世界上许多国家和地区(如欧洲中期数值预报中心、日本、美国、澳大利亚、中国等)的台风业务数值预报中得到了广泛应用,并取得了良好的效果。

最近,Kurihara 等人(1992)^[8]对这一人造台风技术进行了较重要的改进。首先,用平滑滤波的方法把浅台风扰动从初始分析场中分离出去,以取得较光滑清晰的大尺度环境场;然后,通过模式积分向目标廓线逼近的技术,构造一具有非对称结构的台风模型;再把人造台风模型场叠加于滤掉了浅台风扰动的初始大尺度环境分析场上;最后,利用模式的动力诊断方程对台风合成初始场进行质量场调整,使质量场向风场适应。与前一人造台风模型技术相比,后一方法的改进主要有三方面,一是用台风模式本身构造台风模型,缩短人造台风模型场与模式的“适应时间”(Spin-up 现象);二是人造台风模型场含有非对称分量,考虑了台风非对称结构的影响作用;三是进行了质量场与风场的适应调整,使初始质量场与风场处于较合理的平衡状态。

动力逼近技术 所谓动力逼近法指的是通过某一方式(如线性方式)使某些模式变量朝预先确定的估算值变化、逼近,从而对模式预报初始场进行调整修正。澳大利亚的热带业务模式就采用了这一逼近技术,而且在“逼近”过程中,以卫星资料估算的加热廓线替代模式中的 KUO 方案加热廓线。应用这一技术的主要优点是把更多的观测信息引入到模式预报初始场中,改进模式大气初始结构的合理性,有利于消除模式的初始模拟滞后现象,增加预报初期的模式预报降雨量,减少气旋初始位置偏差。其缺点是,有时,由于用卫星资料估算的加热廓线不合理,或者其与模式参数化加热廓线相差太大,会引起不正确的调整修正。

辐射率应用技术 卫星探测辐射率在热带气旋数值预报中的应用有两种方式,一种是应用“反演”理论,建立物理-经验性附加约束条件参数化反演方案,把卫星探测资料反演成相应的数值预报模式变量值(如温、湿度垂直廓线、地面温度等)资料而使用之,这是一种“间接”应用的方法;另一种则根据“正演”理论,把模式预报值代入辐射传输方程计算模式预报辐射率,附加优化约束条件,使预报辐射率与探测辐射率之差构成的泛函达极小,由此而生成模式变量资料,这是一种“直接”应用的方法。显然,直接方法的最大优点之一,是它可以避开了间接方法中的不适宜性和相关性引起的计算误差。后一种方法是近年来研究较多的方法,它是使数值预报模式(尤其是热带模式)更有效地应用卫星资料的重要方法。

四维同化技术 在一定的物理原理、动力模式以及误差结构等条件的约束下,把不同时刻、不同来源的气象观测资料“混合”在一起,形成其数值预报最优化的初始四维大气,这就是四维同化技术的基本意义。四维变分同化技术是近年来研究较多的热门课题。四维同化技术已开始在一些热带数值预报模式中得到应用,以较合理地构造热带观测资

料缺少地区的预报初始场,部分消除模式的“spin-up”现象。

3 模式数值预报

热带气旋数值预报业务化和全球模式预报试验,是近年来热带气旋数值预报领域的重要发展之一。本节将就这两方面作一扼要介绍。

3.1 业务预报模式

早在 60—70 年代,人们就开展了用简单的数值模式预报热带气旋运动的研究,但较广泛地用复杂的原始方程动力模式对热带气旋进行实时业务预报,那还是近十几年的事。

表 1 概括了世界上一些主要国家和地区现行的热带气旋业务预报模式的特点。从表中可以看出,这些模式的动力结构和物理框架主要由较成熟的中高纬模式技术移植而来;其最有热带模式特点的是人造台风初始环流模型技术,至少在现阶段它对热带数值模式的预报成功与否仍起着关键作用。

表 2 列举了部分热带气旋数值模式在一九九三年的台风路径业务(或实时)预报情况。虽然由于各模式的预报个例(表中括号内数字为所选台风个例数)不一样,这种简单的对比很难对这些模式的预报能力和水平作一很客观的评价,但表中所列的台风中心位置预报误差却基本反映了各模式对台风路径数值预报的水平,大体上,24 小时预报误差约 200 公里,48 小时预报误差约 400 公里。

3.2 全球模式预报试验

巨型计算机能力(速度和容量)的日益发展,使全球数值预报模式的分辨率得以大幅度的提高,业务模式的水平分辨率也已达 100 公里以下,这种模式分辨能力使那些想用全球模式预报热带气旋活动的企图成为了可能。目前已有不少的实验室和气象中心(欧洲中期数值预报中心、英国、日本、印度的中期数值预报中心、美国的飓风研究中心和佛罗里达州立大学气象系等)开展了这方面的研究,并获得了许多成功的模拟个例。但是,

表1 热带气旋(准)业务数值预报模式

	国别							
	中国	日本	澳大利亚	美国	英国	印度	韩国	欧洲中心
模式名称	MTTP	TYM	TAPS	QLM	AAPS	RAFS	KTM	GMMWF
水平分辨率	100km	50km	95km	40km	1.04°	1°×1°	50km	0.564°
垂直分层	15	8	19	16	19	10	8	31
垂直坐标	$\sigma = p/p_s$	$\sigma = p/p_s$	$\sigma = p/\ln p_s$	$\sigma = p/p_s$	$\eta = f(\sigma, p)$	$\sigma = p/p_s$	$\sigma = p/p_s$	$\eta = f(\sigma, p)$
预报区域	11°—41°N 105°—150°E	109×109 格点	45°S—40°N 80°—178°E	太平洋 大西洋	全球	印度、 附近洋面	109×109 格点	全球
预报时效	48小时	60小时	48小时	72小时	5天	24小时	60小时	10天
人造台风 模型	轴对称结构 滤去浅台风	轴对称结构 卫星湿度场	轴对称结构 动力逼近技术	综合资料 系统(SDS)	观测 BOGUS	轴对称结构	轴对称结构	观测 BOGUS
对流参数 化方案	KUO-74	湿对流 调整式	KUO-74 ANTHES77	简单 Arakawa-74	对流质量 通量式	KUO-74 Krishnamurti	KUO-74	对流质量 通量式
侧边界技术	DAVIE76 倾向量	DAVIE76 单向	DAVIE76 倾向量	DAVIE76 倾向量	无	DAVIE76 单向	DAVIE76 单向	无
初值化 技术	绝热、非线性、 正规模	非绝热、非线性、 正规模	绝热、非线性、 正规模	非绝热、非线性、 正规模	非绝热、非线性、 正规模	绝热、非线性、 正规模	绝热、非线性、 正规模	非绝热、非线性、 正规模

表2 1993年热带气旋中心位置平均预报误差

预报 时间	机构								
	日本	美国飓风中心	美国 NHCVICBAR	澳大利亚	欧洲中心	英国	持续预报	中国中央台	中国 NWP*
24 小时	178km (277)	188km (59)	217 (59)	238km (91)	270km (124)	271km (114)	237km (218)	208km (112)	167km (26)
48 小时	346km (245)	328km (43)	449 (43)	378km (76)	431km (103)	422km (100)	433km (170)	425km (83)	382km (23)

* 指中国气象局国家气象中心的台风模式数值预报

开展业务预报的还不多,目前只有欧洲中心(“兼”作热带台风预报)和英国(参看表1)开展了热带气旋路径业务预报。总的来说,目前的全球模式预报热带气旋的水平还不如有限区域模式的预报水平(参看表2)。然而,全球模式对于热带气旋预报时效的延长,以及热带气旋发生发展的预报都有着重要的意义。

4 热带气旋基础研究

中高纬气旋的数值预报较之热带气旋的数值预报要成功得多,其主要原因除了热带洋面地区资料缺少以外,人们对热带气旋的动力过程、热力过程以及其它物理成因的了解不够也是很重要的原因之一。因此,近年来人们也开展了大量的热带气旋基础性研究工作。

首先,进行了大量的现场观测试验,如 AMEX 季风试验(澳大利亚)、SPECTRUM90(世界气象组织、中国等)、TCM90(美国)、TYPHOON90(前苏联)、TAMEX83—93(台湾、美国)等等,通过对这些现场试验观测资料的分析研究,增加人们对热带气旋的物理、动力机制的了解认识,以帮助改进热带气旋数值预报模式的水平和能力。

陈联寿教授等学者分析研究了 SPECTRUM90 资料后指出,台风的非对称动力、热力结构对台风偏离环境引导气流的异常运动有着明显的影响作用。当环境引导气流偏弱时,台风的内部非对称结构与中尺度系统、台风涡旋的相互作用是造成台风运动的重要因素。

罗哲贤教授和陈联寿教授等学者,从非线性系统本质属性的角度,讨论了台风路径的可预报性问题。并通过相空间的构造和分维数的计算,得出了西太平洋台风路径可预报时间尺度为2~3天的结论。

美国 AOML/NOAA 飓风研究小组的 K. V. Ooyama 博士最近在他以前的研究工作基础上,开辟了另一模拟热带气旋的途径,提出了一新的热带气旋数值预报模式。该模式核心内容有两部分,一是有限元谱应用数值方法,简称 SAFER 方法(Spectral Application of Finite-Element Representation),二是热力学原始公式表示法,简称 RFT 方法[Radical (or "primitive") Formulation of Thermodynamics]。SAFER 方法用于建立模式的动力框架,RFT 方法用于处理物理过程,尤其是积云对流降雨过程的问题。该模式是一非静力平衡、水平嵌套、三维模式,热力学方程包含了熵和 Kessler 类微物理降雨过程;模式采用了半隐式时间积分方案,把动量、质量、总熵、总水量作为模式预报变量,以使模式方程具有保守特性。由于 SAFER 方法是谱方法和有限元方法的综合方法,且基函数采用了非正交的 β 样条函数(not orthogonal β -splines),因而,该嵌套模式满足重要条件:a) 细网格内区域能表示、而粗网格外区域不能表示的波,不会到达交界面(interface); b) 粗、细网格区域都能表示的波穿越交界面时,其计算相速不会改变。RFT 的主要思想,一是把描述湿大气属性的一些量(如温度、气压、水汽、凝结等)看成热力学平衡状态变量,可用“诊断”的方法而非“预报”的方法确定;二是把降雨过程作为 Kessler 类微物理过程处理,微物理过程包括下落大雨滴的产生、大雨滴的下落运动、雨滴与空气的热量交换以及雨滴穿越不饱和空气层时的蒸发。因而,该模式不包含次网格尺度降雨过程的参数化方案。该模式目前仍处于试验阶段。

5 热带气旋数值预报的改进与发展趋势

虽然,热带气旋数值预报近年来无论在科学研究、还是在业务应用方面都有了很大的发展。但是,与中高纬地区的数值天气预报水平相比,并考虑到公众对热带天气预报的实际要求,目前的热带气旋数值预报水平仍存在很大的差距。要缩短这一距离、进一步提高热带气旋数值预报的准确率,我们还有很多工作要做。

热带气旋数值预报的问题本质上仍属于初值问题的范畴。因此,如何解决热带地区常规观测资料不足的客观问题,对进一步提高热带气旋数值预报的水平仍是至关重要的。大规模地增加热带地区(洋面)的常规观测网点的可能性较少,而如何把大量的非常规观测资料(尤其是卫星资料)有效地利用起来,通过四维同化技术为数值模式构造出最理想的预报初值则为较实际可行的途径。

目前的热带气旋业务数值预报主要仍局限于热带气旋的移动路径数值预报,对于热带气旋的强度预报(如降雨、大风等),其水平仍不高,对于热带气旋发生、发展的预报就更困难了。这些都是今后一段时间内要研究解决的课题。

热带气旋的数值模式分辨率的进一步提高,甚至开发极高分辨率的全球谱模式(如 T213L40),将有助于增强数值模式对较小尺度重要天气过程的描述能力,进而改进数值模式的预报准确率和预报时效。

由于近地面(洋面)的热量和水汽输送是热带气旋发生发展的基本能量来源,而近地面的摩擦耗散则是热带气旋减弱消亡的耗散机制。因此,模式中的地表物理过程参数化方案的改进,对提高模式的预报水平有着重要的影响作用。

近年来,也有学者提出了热带气旋集合预报的设想,以解决所谓的“自由中- β 对流系统”的预报困难。

参考文献

- 1 第九届全国热带气旋科学讨论会《论文摘要》. 1994.6, 南京:气象学会
- 2 P K RAO 等编. 许健民等译.《气象卫星》——系统、资料及其在环境中的应用. 北京:气象出版社, 1994
- 3 Proceedings of International Meeting on Numerical Prediction of Tropical Cyclones. Tokyo' Japan, January 1994, 17—21
- 4 Numerical Weather Prediction Progress Report for 1992. NWPP report series No19, WMO/TD — No548, 1993
- 5 Numerical Weather Prediction Progress Report for 1993. NWPP report series No20, WMO/TD— No614, 1994
- 6 Kuma K. The Impact of Satellite Moisture Data upon the Numerical Prediction of Australian Monsoon Onset. J Meteor Soc Japan, 1993, 70: 545—551
- 7 Krishnamurti T N, K Ingles, S Cocke, T Kitade and R Pasch. Details of Low Latitude Medium Range Numerical Weather Prediction Using a Global Spectral Model. Part II: Effects of Orography and Physical Initialization. J Meteor Soc Japan, 1984, 62: 613—649
- 8 Kurihara Y, M A Bender and R J Ross. An initialization scheme of hurricane models by vortex specification. Mon Wea Rev, 1993, 121: 2030—2045