

国际热带气旋飞机观测综述

钱传海^{1,2} 李泽椿² 张福青³ 端义宏²

(1 南京信息工程大学, 南京 210044; 2 国家气象中心, 中国气象局, 北京 100081; 3 宾夕法尼亚州立大学, 美国)

摘要: 所谓热带气旋飞机观测, 是指根据用户的请求, 将机载观测平台在合适的时间派遣到合适的地点和高度用合适的仪器开展热带气旋相关要素的测量, 将所获取的资料按相关格式进行编码并传送给用户。美国是世界上最早开展飓风飞机观测的国家, 也是当今世界开展飓风飞机观测技术最成熟的国家, 至今已有近70年历史。自2003年始我国台湾地区也启动了名为DOTSTAR的台风飞机观测研究计划, 迄今已取得了非常令人鼓舞的成果。飞机观测资料在提升热带气旋结构及其变化认知、提高热带气旋路径和强度预报准确率等方面发挥了至关重要的作用, 产生了显著的社会经济效益。本文通过介绍国际上热带气旋飞机观测的先进技术和经验, 为中国大陆将来开展台风飞机观测提供可参考的经验和做法, 从而为进一步提高我国台风路径、强度及风雨等预报准确率和防灾减灾成效奠定更坚实基础。

关键词: 热带气旋, 飞机观测

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2012.06.001

Review on International Aircraft Reconnaissance of Tropical Cyclones

Qian Chuanhai^{1,2}, Li Zechun², Zhang Fuqing³, Duan Yihong²

(1 Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 National Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

3 Pennsylvania State University, USA)

Abstract: Aircraft reconnaissance of tropical cyclones (TCs) is the concept of dispatching an aircraft with a meteorological sensor platform in the atmosphere at the right time, right place and right altitude, collecting the TC related data with right instruments, and relaying those data to the customer in a coded form. The first country over the whole world is the USA, whose air force flew into the eye of a TC in July 1943 and created a legacy shared by other reconnaissance crews for almost seven decades. Taiwan, China, also launched a new surveillance program of DOTSTAR starting from 2003, and got encouraging results for TC forecasts, based on the dropwindsonde data. The obtained data by flight operation and resultant research helped to increase an understanding of TC structure and structure change, motion, etc., and to improve the accuracy of TC track, intensity and rainfall forecasts, and have got remarkable social and economic benefits. This paper tries to introduce the advanced technologies and abundant achievements of international TC aircraft reconnaissance, hoping to provide useful reference to our future TC aircraft reconnaissance.

Keywords: tropical cyclone, aircraft reconnaissance

1 引言

近几十年来, 热带气旋的路径预报取得了持续而稳定的进步, 这主要归因于数值模式、涡旋BOGUSING方案和资料同化等的改进^[1-3], 同时也得益于一些新的观测手段和技术的发展, 比如卫星观测、飞机观测以及目标观测(或适应性观测)技术的发展和运用, 其中飞机观测资料在帮助提高对热带气旋的认知和改进热带气旋路径预报方面做出了重要贡献^[4-6]。

Henderson^[7]概述了美国空军早期执行天气侦察

任务的组织机构、任务类型、机载观测仪器、观测资料误差、观测资料使用, 并从飞机及机载仪器性能、基地选址等对飞机观测的效率进行了评估。Gray^[8]曾探讨了用喷气式飞机(如商用客机)开展对流层上层温度(温度距平)观测, 从而推算热带气旋低层风场和海平面气压场的可行性。Shoemaker等^[4]评估了西北太平洋台风飞机观测资料对美国联合台风预警中心(Joint Typhoon Warning Center, 简称JTWC)台风路径预报误差的影响, 其结论是, 增加飞机观测资料后, 24, 48和72h台风路径预报误差要比没有飞机观测时分别减少10%, 17%和20%。Gray等^[9]指出虽然卫星观测资料在热带气旋监测和预报中发挥越来越重要的作用, 相应的技术也越来越成熟, 但如果能得到额外的飞机观测资料, 卫星定位和强度估计的结果将很

收稿日期: 2012年7月8日; 修回日期: 2012年10月29日

第一作者: 钱传海(1968—), Email: chqian@cma.gov.cn

资助信息: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目

(2009CB421503); 中国气象局台风预警工程项目—台风预报预警系统(2009—2012)

大程度上依据飞机观测资料予以订正。Martin等^[10]应用1979—1986年期间西北太平洋200多个热带气旋资料研究了飞机观测对热带气旋定位、定强及预报准确率的贡献，并对卫星和飞机资料在定位、定强方面的差别进行了分析。

Burpee等^[5]应用当时最好的3个业务指导模式（VICBAR，GFS和GFDL）对美国飓风研究中心（Hurricane Research Division，简称HRD）1982—1993年实施的18次飞机观测（WP-3D）资料进行了效益评估，结果表明，机载下投探空观测所获得的对流层中低层资料极大地改进了模式的飓风路径预报，12~60h路径预报误差减少16%~30%，相当于美国国家飓风中心（National Hurricane Center，简称NHC）过去20~25年来业务预报所取得的累积进步。

Aberson等^[6]在回顾P-3飞机投入飓风观测30年应用研究成果时指出，正是由于P-3所获得的各类观测资料，极大地丰富和更新了先前对于飓风运动和结构的描述及理解。所获得的资料包括微观尺度的，也包括天气尺度的，这些资料的实时应用和研究成果的转化，帮助气象学家和预报员更好地理解热带气旋的运动、强度、对流活动的演变，从而提高了热带气旋的路径、强度和降水预报。

Zhang等^[11]应用集合卡曼滤波方法（EnKF）对2008—2010年北大西洋飓风季节61次飞行任务（NOAA P-3）所获取的高分辨率雷达资料进行同化，其结果不仅对飓风路径预报有改进，而且还显示了极好的飓风强度预报的前景，和同时期美国国家飓风中心的官方强度预报相比，EnKF方法的24~120h的强度预报误差要偏低20%~40%。

本文依据相关文献和资料回顾了国际上热带气旋飞机观测的起源和发展，并对当前国际上开展热带气旋飞机观测的主力机型、机载仪器、飞行路线、数据处理和传输、美国飓风飞机观测效益等进行了概述，最后对热带气旋飞机观测的未来发展方向做了简单的讨论。

2 热带气旋飞机观测的起源和发展

2.1 酒吧里的“打赌”逐渐演变为观测科学

美国飓风飞机观测最早可追溯到20世纪40年代。据说起初是两个空军飞行员在酒吧里打赌，彼此挑战看谁有足够的勇气驾驶飞机穿越飓风^①。1943年7月27日美国空军中校Joseph P. Duckworth驾驶一架单引擎螺旋桨教练机从位于德克萨斯州的空军基地起飞，进入了（墨西哥湾）飓风眼区，此举开创了美国空军

飞机观测飓风之先河^[6, 7, 12]。那天Duckworth中校先后两次飞抵风暴眼区，第一次是和一名领航员一起，第二次则是和一名气象官员一起。Duckworth甚至描述了当时穿越飓风中心的情形：“当我们闯入飓风眼区时，很庆幸我们的飞机居然完好无缺，我们还能看见太阳和海面，飓风眼看起来犹如一个巨大的倾斜的漏斗……”。

美国历史上真正称得上基于研究目的而专门开展的首次飓风飞机观测试验是由美国军方于1944年实施的^[13-15]，而随后的一次飞机观测则发生在1947年，他们飞临大西洋飓风的对流层上层开展观测^[16]。20世纪50年代初期，美国军方基于百慕大（大西洋）和关岛（太平洋）这两个空军基地开展了带有准业务性质的飓风/台风飞机侦测^[17]。

1954年美国发生了严重的飓风灾害，强烈飓风Carol, Edna以及Hazel造成近200人死亡，飓风横扫美国东部各州，其影响甚至波及加拿大南部^[18]；1955年又有3个飓风袭击北卡罗来纳州。连续两年的飓风灾害促使美国国会于1955年拨出专款用于资助国家气象局开展国家级飓风专项研究（the National Hurricane Research Project，简称NHRP）。1956年8月始，参加该项目的气象学家们启动了后来逐渐演变成年度项目的热带气旋飞机观测研究。

1962—1983年，美国国家大气海洋管理局（NOAA）和美国国防部共同实施了一项雄心勃勃的试验项目——人工影响飓风强度（项目名称为STORMFURY），他们尝试用飞机在飓风外围云带中播撒碘化银，期望对云带中的过冷水滴进行催化来激发飓风外围对流活动，从而减少飓风中心的高能入流，进而降低飓风强度。但利用P-3最初对几个主要飓风（Major Hurricanes，指3级或更高级别的飓风）的飞机观测中发现，融化层（Melting Level）以上绝大部分是由冰粒子构成，过冷水非常非常少，人工催化效果很差，于是STORMFURY项目于1983年停止了人工影响飓风强度的尝试^[19]，转而专注于通过对飓风及其环境的观测研究，从而着力提高飓风路径和强度预报。

2.2 美国自1987年起停止了西北太平洋台风飞机观测业务

由于第二次世界大战以来美国在西北太平洋的军事存在，美国空军自1940年代以来就一直利用位于关岛的空军基地开展台风飞机观测业务^[17]。1987年8月起美国国防部停止了西北太平洋的台风飞机观测业务^[4, 9]，停飞的主要原因是基于经济（预算）方面的考

① http://www.403wg.afrc.af.mil/library/factsheets/factsheet_print.asp?fsID=7483&page=1

虑,另一方面是国防部经过评估后认为即便没有飞机观测资料,也不会对JTWC的台风预警产生严重影响(JTWC于2000年1月由关岛迁至夏威夷)。事实上,若对比1987年前后西北太平洋台风最佳路径资料中最大风速的比较,可以“依稀”看见停止台风飞机观测后所带来的影响,1987年之前西北太平洋台风中心最大风速曾高达90, 100m/s,甚至110m/s(1958年Ida台风最大风速达110m/s,1964年Sally台风最大风速达100m/s)^①;而1987年后,仅依赖卫星资料分析和预报员经验所估测出的台风最大风速鲜有达到75m/s。

在1987年美国决定停止西北太平洋台风飞机观测业务时,美国国防部的一些专家甚至讨论有否可能大幅减少北大西洋的飓风飞机观测,抑或干脆就像西北太平洋一样完全停止北大西洋飓风飞机观测业务。此言一出引起了美国东南沿岸饱受飓风灾害之苦的普通百姓和各级政府机构的不安。美国气象学会下属的热带气象和热带气旋委员会在1987年4月举行的一次会议上成立特别小组,从技术层面上对该问题展开研究。评估结论是^[14, 91],从全球范围来讲,气象卫星理应是开展台风观测最有效的手段,不断改进的卫星分析技术在台风定位和强度估计方面非常行之有效,但若能获得关键区域、关键时段和关键层次的飞机观测资料,仍能对卫星分析结果做出不小的订正,而正是这些“额外的”飞机观测资料有时会对台风预报产生重要影响。所以即便美国国防部于1987年停止了位于关岛基地的台风飞机观测业务,也不曾舍得停止或减少北大西洋和东北太平洋的飓风飞机观测,甚至不断升级或购置新型飞机及其他观测设备,以确保该项业务的持续稳定发展。

2.3 台湾地区 DOTSTAR 项目的兴起

2003年我国台湾地区启动了由台湾大学主导,美、日等国相关科研和业务单位共同参与的“追风计划”——侵台台风之飞机侦察及下投探空观测试验(Dropwindsonde Observation for Typhoon Surveillance near the Taiwan Region,简称DOTSTAR)^[20, 21]。其目标是针对可能侵袭台湾的台风,以机载GPS下投探空对台风周遭环境大气实施观测,进而增进对台风动力学理论的理解,提高台风路径预报准确率。2003年9月1日,DOTSTAR对“杜鹃”(Dujuan)台风实施了首次飞机观测,这是1987年美国停止关岛基地的台风飞机观测业务以后,16年来西北太平洋重现飞机测台身影。从2003年计划实施至2012年台风季节结束,DOTSTAR项目已针对西北太平洋49个台风完成了64航次的飞机观测任务,并成功投送1051个下投探空

仪,取得了丰硕的科研和业务效果。目前台湾地区已成国际上飞机观测台风的一支重要力量,先后参加了2008年T-PARK(The Observing System Research and Predictability Experiment (THORPEX) Pacific Area Regional Campaign)和2010年ITOP(Impact of Typhoon on the Ocean in the Pacific)等国际观测项目。

3 热带气旋飞机观测分类、主力机型、观测仪器和飞行路线

3.1 热带气旋业务和科研飞机观测及主力机型

热带气旋飞机观测其根本目的是为满足业务预报和科学研究之需求,所以若按任务性质分类,热带气旋飞机观测大致可分为业务和科研观测两类。如前所述,美国自1940年代便开始尝试飓风飞机观测,目前在美国有能力并且已开展飓风飞机观测的大型机构单位有NOAA,USAF(美国空军),NAVY(美国海军),NCAR和NASA。USAF基本上以业务观测为主,当然也参与一些科研观测;NOAA业务和科研并举,而NAVY,NCAR和NASA则以科研观测为主。另外科研观测还分为常规科研观测和大型外场观测试验,而有些观测项目早期属于科研观测,而正是通过科学观测试验认识到其对热带气旋实际预报业务的重要价值后,逐渐转为常规业务观测。

USAF是美国最早开展飓风飞机观测的部门。空军第53空勤中队(绰号Hurricane Hunters——飓风猎人)是美国空军专门负责天气侦察的一个独特中队,他们将大西洋、加勒比海、墨西哥湾及中太平洋的热带气旋的飞机观测资料提供给国家飓风中心。他们的另一使命是对美国东西海岸附近发生的冬季风暴开展侦察。1990年代末期第53空勤中队开始逐步升级原有机型,1999年9月,他们接收了第一架“超级大力士”WC-130J,直到2005年9月,新换装的10架WC-130J全部到位,并且从2003年开始,他们还新增了一项任务,就是在飓风前进路径上投放小型海洋观测浮标。

NOAA的飓风飞机观测研究起步于1956年的NHRP,早期所涉及的机型包括WB-50, WB-47, DC-6等。1973年NOAA向洛克希德飞机制造公司订购了2架WP-3D(P-3)飞机。这2架飞机是按照NOAA的要求定制的,主要目的是用来观测研究热带气旋的结构和动力学特征、监测热带气旋生成,当然其最终目的还是提高热带气旋的预报准确率、减轻热带气旋灾害、降低生命财产损失。这2架飞机分别于1976和

① 中国气象局台风年鉴资料

1977年到位。从那时起, NOAA就一直拥有并维护这2架飞机, 使其成为当今世界上首屈一指的用于开展飓风观测研究的主力机型之一。1976—2005年间, 仅这两架飞机就针对134个热带气旋(119个北大西洋热带气旋、13个东太平洋热带气旋、2个澳大利亚热带气旋)共执行了550次飞行观测任务, 其中对2005年最著名的飓风“卡特里娜”(Katrina)进行了4次飞机观测, 而对2005年的另一个北大西洋飓风“奥菲莉娅”(Ophelia)则进行了13次飞机观测, 为单个飓风飞机观测次数之最。

1996年, NOAA又购买了一架Gulfstream-IV jet(湾流4号喷气式飞机, 简称G-IV), G-IV飞行速度快、高度高, 主要用于携带GPS下投探空仪对飓风环境实施观测。1997—2006年, G-IV主要用于观测研究, 以检验观测资料对数值模式飓风预报的改进效果。这10年间, G-IV针对58个热带气旋共执行了174次飞行观测任务。自2007年飓风季节开始, G-IV转为业务观测, 即以前由HRD研究人员所承担的各项任务, 如绘制飞行路线、机组人员配备、飞机观测资料评估等全部改由NOAA的相关业务中心来承担^[22]。

事实上中国台湾地区实施的DOTSTAR项目, 也属于外场观测试验, 其所用机型为以色列IAI公司的ASTRA双引擎喷气式飞机(美国湾流公司100改良型), 主要用于投放机载GPS下投式探空仪。

国际上应用无人(遥控)飞机开展热带气旋观测目前处于试用阶段, 无人飞机也称为UAVs(Unmanned Aerial Vehicles)。2005年NOAA启动了跨年度的改进热带气旋强度预报的试验项目(the Intensity Forecasting Experiment, 简称IFEX)。2005年9月16日, IFEX外场试验中一架无人机成功地飞抵热带风暴“奥菲莉娅”(Ophelia)眼区附近, 并获取了低层(约750m高度处)风场观测资料; 2005年10月1日, 我国台湾地区科研人员应用UAV对“龙王”台风成功实施眼区穿越观测^[23]。作为UAVs的杰出代表, “全球鹰”(Global Hawk)具有滞空时间长(>30h)、飞行高度高(>16.8km)等优点, NASA已将“全球鹰”用于飓风环境观测试验。可以预计“全球鹰”将会成为开展热带气旋观测的主力机型。

上述主要机型及性能指标参见表1, 表2则列举了近10年来国际上涉及热带气旋飞机观测的一些大型外场试验。

表1 国际热带气旋飞机观测主力机型性能指标

	WP-3D	G-IV	C-130J	ASTRA	G-Hawk
飞行高度(km)	7.6	12.0	8.6	12.0	16.8
最大航程(km)	4100/6100 (高空/低空)	7000	5250	5570	
最长航时(h)	8.5/10.5 (高空/低空)	10	10	7	30
飞行速度(m/s)	170	240	186	248	
飞机尺寸(m)					
长度:	34.2	26.9	29.3	17.0	
翼展:	30.6	23.7	39.7	16.6	
高度:	10.4	7.4	11.9	5.5	
机组人员(人)	18	10	5	4	—
所属	NOAA	NOAA	USAF	中国台湾	NASA
备注	螺旋桨式	喷气式	螺旋桨式	喷气式	

3.2 机载气象观测仪器

在多普勒导航系统^[7]、OMEGA/GPS下投探空仪及机载多普勒雷达应用之前, 机组人员往往依赖目测法来估计海面风速, 领航员则利用“双偏流测风法”(Double Drift)来估计飞行层高度风速^①。

机载下投式探空仪是目前对热带气旋及其环境实施观测的最有效工具之一, 用于获取从飞行层至海平面之间热带气旋和环境大气的风速和风向、温度及湿度垂直廓线。“欧米加”型下投式探空仪(Omega Dropwindsondes, 简称ODWs)于1982年在HRD实施的飓风观测试验中首次得以使用, 主要对飓风环境场进行观测^[5, 6]。而由NCAR研发的基于GPS技术的新一代下投式探空仪于1996年投入业务(图1)^②, 并取代了ODWs^[24, 25]。新的GPS探空仪对风的观测精度有很大的提高^[3], 目前美国及我国台湾地区基本上都用GPS探空仪进行热带气旋环境场观测^③。表3为GPS下投式探空仪观测要素及指标。

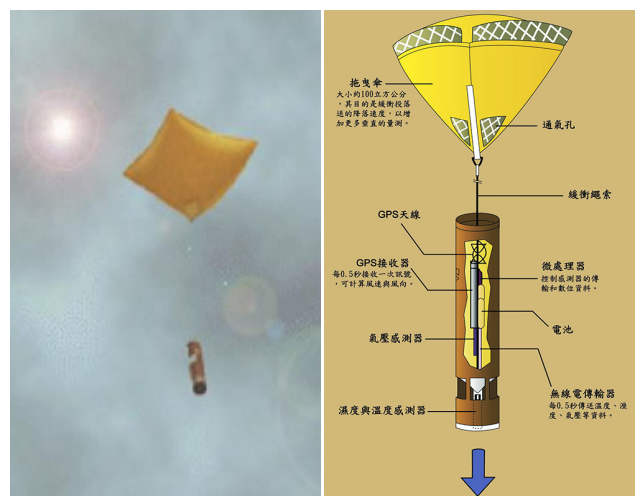


图1 GPS下投式探空仪结构示意图

① <http://www.awra.us/514TH.html>
 ② <http://www.eol.ucar.edu/isf/facilities/dropsonde/gpsDropsonde.html>
 ③ <http://typhoon.as.ntu.edu.tw/DOTSTAR/tw/intro/equip.php>

表2 近10年国际上涉及热带气旋飞机观测的大型外场试验

项目名称	牵头单位	项目目的	迄止时间	所涉飞机	试验区域	项目全称
CAMEX-4	NASA	研究台风路径、强度变化及登陆影响	2001年	DC-8 ER-2	北大西洋	The Convection and Moisture EXperiment
DOTSTAR	台湾大学	增进台风动力学理论的理解, 提高台风路径预报准确率	2002—2012年	ASTRA	西北太平洋	Dropwindsonde Observation for Typhoon Surveillance near the Taiwan Region
CBLAST	NAVY	加强对海气交互面通量过程的理解	2003—2004年	WC-130J WP-3D	北大西洋 东太平洋	Coupled Boundary Layer Air-Sea Transfer Experiment
IFEX	NOAA	提高对台风强度变化的理解, 改进台风强度预报	2005—2012年	WP-3D ER-2 G-IV	北大西洋 东太平洋	The Intensity Forecasting EXperiment
RAINEX	NOAA	加强对台风内核和雨带相互作用的理解	2005年	WP-3D G-IV WC-130 P-3B	北大西洋	The Hurricane Rainband and Intensity Change Experiment
TCS-08	NAVY	提高对热带气旋形成、强度及结构变化的理解和预报	2008年	WC-130J P-3B	西北太平洋	The Tropical Cyclone Structure-2008
T-PARC	UCAR	增进对高影响天气机理认识, 提高该类天气预报技术	2008年	WC-130J P-3B DLR Falcon	西北太平洋	THORPEX Pacific-Asian Regional Campaign
TCS-10/ITOP	NAVY	研究海洋对台风的响应	2010年	WC-130J ASTRA	西北太平洋	The Tropical Cyclone Structure-2010/Impact of Typhoons on the Ocean in the Pacific
PREDICT	NCAR	加强对台风生成的理解, 提高台风生成预报水平	2010—2011年	G-V	北大西洋	The PRE-Depression Investigation of Cloud-systems in the Tropics
HFIP	NOAA	改进数值模式, 为NHC提供更好的指导产品	2011—2015年	P-3 Twin Otter UAVs	北大西洋 东太平洋	Hurricane Forecast Improvement Program
HS3	NASA	增进对台风强度变化机制的理解	2011—2015年	G-Hawk	北大西洋	Hurricane and Severe Storm Sentinel

飞机一般还搭载其他仪器用以测量飞行层温度、气压和水汽, 飞机的惯性导航系统还可以用于飞行层风速的计算, 其精度可达 $0.1\sim 0.3\text{m/s}$ 。另外WP-3D机舱还可携带24支附有降落伞装置的深海温度测量器 (AXBT), 用以测量海表面以下300m以内的海洋温度。WP-3D在机翼尖端处曾配有粒子测量系统, 用来区分水滴和冰粒子, 同时估测粒子大小。

机载雷达是岸基雷达的延伸, 可有效用于探测热带气旋的细微结构和风场。WP-3D是美国海军海洋侦察飞机的改装版, 其出厂时所配置的当时最先进的设备是3部数字化雷达, 至今仍然在用。其中位于机腹及机尾、波长分别为5.5cm和3cm的两部雷达用于记录反射率信号, 而位于机鼻的3.1cm波长的雷达则用于帮助飞行员识别并避免湍流天气。1990年以前, NOAA对机载雷达系统进行了升级, 加装了Doppler信号处理系统和精细雷达数据系统。美国正计划对机

载多普勒雷达进行升级, 改用更为先进的相控阵雷达技术; 而NASA和欧洲中心正调研和讨论安装天基多普勒雷达的可能性。

3.3 飞机观测路线

飞行路线往往依观测任务不同而不同。一般来讲有3种飞行观测任务^[4]:

(1) 热带风暴生成调查。派遣飞机飞抵热带扰动区域上空以调查该扰动是否有发展成为热带风暴的迹象。

(2) 热带风暴中心定位及定强。对一个已发展成型的热带风暴 (含热带风暴以上强度), 获取其详细的气象数据并进行精确的风暴中心位置和强度的测量。

(3) 热带风暴环境观测。对热带风暴周围环境大气, 尤其是沿风暴前进方向开展对流层环境要素测量, 以确定环境大气对风暴未来移动的影响。

图2a显示的是早期美国空军在西北太平洋执行热带风暴环境观测示意图^[4]。飞行路线靠近副热带高压脊线附近, 一般来说位于风暴中心以北 $5\sim 10$ 个纬度处, 飞行高度在400hPa层次, 飞行方向往往由东向西。图2b显示了台湾DOTSTAR对2010年10月17日超强台

表3 GPS下投式探空仪观测要素及指标^①

	观测范围	误差	分辨率
气压	1080~100hPa	$\pm 1.0\text{hPa}$	0.1hPa
温度	$-90\sim 60^\circ\text{C}$	$\pm 0.2^\circ\text{C}$	0.1 $^\circ\text{C}$
湿度	0~100%	$\pm 5.0\%$	1.0%
水平风	0~200m/s	$\pm 0.5\text{m/s}$	0.1m/s

① <http://www.eol.ucar.edu/isf/facilities/dropsonde/gpsDropsonde.html>

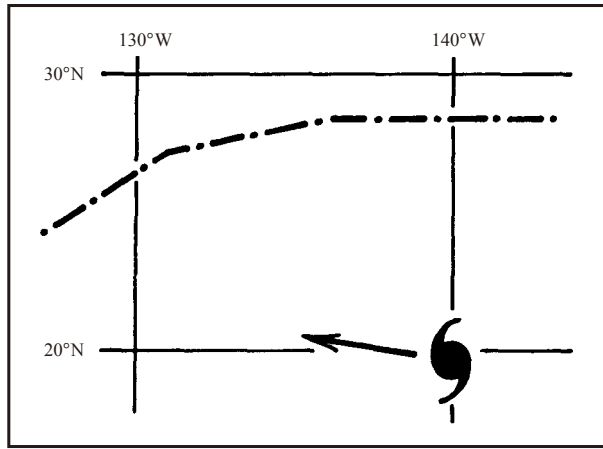


图2a 美国空军早期（1987年之前）在西北太平洋开展热带风暴环境观测示意图（点划线为飞行路线，台风符号表征台风中心当前位置，箭头表示台风移动方向，飞行高度在400hPa层次）

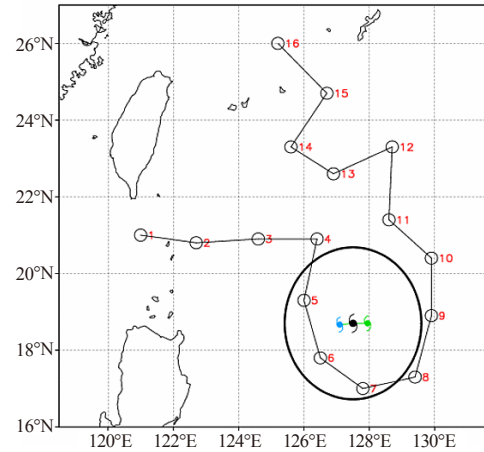


图2b 台湾DOTSTAR对2010年10月17日超强台风“鲑鱼”（Megi）所进行的环境观测示意图^①（黑色台风符号表示2010年10月17日08时（北京时）台风中心位置，绿色符号表示第一颗下落式探空仪落入海面时台风中心位置，蓝色符号表示最后一颗下落式探空仪落入海面时台风中心位置，红色数字1~16为各探空仪编号）

风“鲑鱼”（Megi）所进行的环境观测示意图，该次观测共释放16颗下投式探空仪，从第一颗探空仪落入海面到最后的一颗落入海面，前后共历时4小时6分钟。

当飓风可能会影响美国本土、波多黎各、美属维京群岛及夏威夷时，根据业务预报或研究项目的需求，相关专家组（含预报员、科研人员、机组和后勤保障人员等）事先便讨论选定观测目标、明确观测任务、飞行路线（含起飞时间、路线转折点、作业时长）、观测频次等，并根据飓风强度、路径变

化及移动快慢等进行适当调整。尤其是伴有机载多普勒雷达实施风场观测试验时，根据飓风强度及范围大小，飞行路线一般有“4字型”（Single figure-4 pattern）、“蝴蝶型”（Butterfly pattern）、“旋转4字型”（Rotating figure-4 pattern）、“除草机型”（Lawnmower pattern）、“箱体-螺旋线型”（Box-spiral pattern）^[26]。图3是2004年9月12日NOAA针对飓风“伊万”（IVAN）实施飞机“穿心”观测路线图。

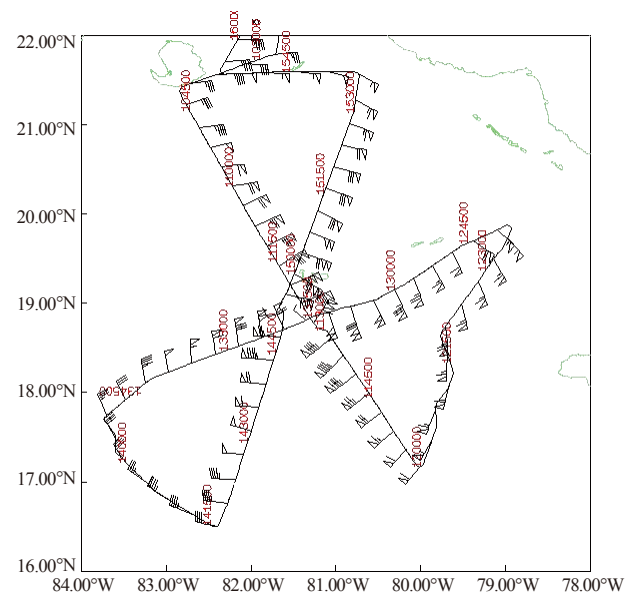
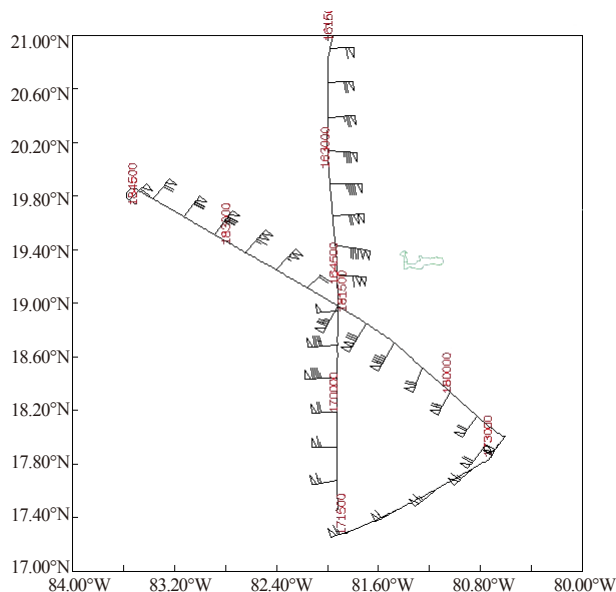


图3 2004年9月12日NOAA针对飓风“伊万”（IVAN）实施飞机“穿心”观测路线图

(a) “4字型”飞行路线；(b) “蝴蝶型”飞行路线

① <http://typhoon.as.ntu.edu.tw/DOTSTAR/tw/flight.php?id=51>

4 观测资料处理及传输

由于早期机载仪器的性能、数据记录及处理器功能尚不完善,通信手段也较落后,飞机观测数据尚不能在第一时间提交给科研人员开展分析研究,据说NHRP第一次观测试验数据拖了好几个月之后才能提供给研究人员分析研究^[6]。随后的数十年间,飞机及机载仪器的性能得以逐步提高,计算机及通信技术的迅猛发展,为观测数据的传输提供了极大便利。HRD早在1990年代初期就开发了机载工作站,用于实时处理飞行层观测资料(温度、露点、风速、风向、高度等)、机载雷达反射率、径向多普勒雷达速度以及垂直探空资料等各种飞机观测资料。从1992年飓风季节开始,借助于静止卫星通信系统,NOAA飞机观测资料每隔15min便能将过去30次观测资料(每30s实施1次观测)下传至NHC^[27]。

目前飞机观测数据已能实时提供给预报员和科学家开展各项业务和科学研究。如NOAA的G-IV和台湾的ASTRA实施下投探空仪后,经机载设备接收、处理(含质量控制、编码等)后,经由卫星通信系统在第一时间将探空资料传送至预报员分析了解热带气旋及环境大气的风、温、湿等垂直廓线,同时该资料也即时传送至业务模式中心和相关科研部门,用于全球模式/区域模式的资料同化,从而为业务预报提供更好的指导产品。图4展示了台湾DOTSTAR飞机观测资料的数据流程^①。

5 热带气旋飞机观测成果及投入产出比分析

5.1 热带气旋飞机观测对业务和研究的贡献

热带气旋飞机观测所获得的“额外的”、“现场

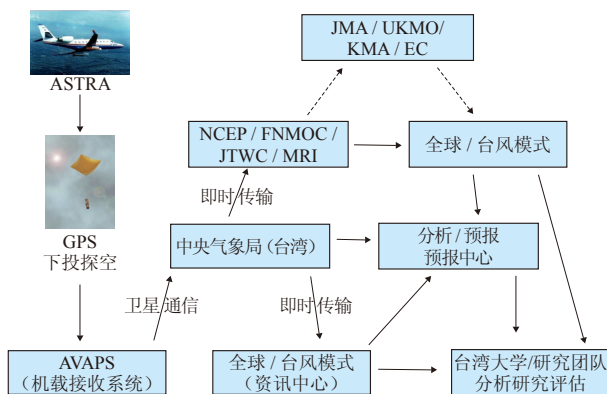


图4 台湾DOTSTAR飞机观测资料流程

(NCEP: 美国国家环境预报中心; FNMOC: 美国海军数值预报与海洋中心; JTWC: 美国联合台风警报中心; MRI: 日本气象厅气象研究所; JMA: 日本气象厅; UKMO: 英国气象局; KMA: 韩国气象局; EC: 欧洲中期天气预报中心)

① <http://typhoon.as.ntu.edu.tw/DOTSTAR/tw/intro/dataflow.php>

”观测资料,如风、气压、温度、湿度等水平分布/垂直廓线及雷达回波资料等,能给业务/科技人员提供关于飓风结构及其环境场丰富的、常规渠道所不能获得的信息。图5显示的是2架WP-3D飞机利用ODWs于1982年9月16日00时(世界时)对飓风Debby开展环境风场观测的个例,ODWs准确地捕捉到了对流层中层西风槽的位置和强度,而该西风槽是影响Debby移动的主要天气尺度系统,同时ODWs也识别出了位于飓风中心西北侧500km外的西风槽北端的切断低涡,这些观测资料帮助预报员准确判断Debby的未来移动起到了非常重要的作用^[5]。

飞机观测资料在帮助提高热带气旋路径和强度预报准确性的同时,也对提高和修正先前对于热带气旋动力学、热力学、结构及其变化、热带气旋与环境相互作用等的理解方面起了至关重要的作用。如NOAA的P-3投入观测研究之前(20世纪70年代中后期),科学家们对飓风结构的认识还停留在飓风只是一个“圆形的、轴对称的涡旋,其风速从地面直到400hPa高度基本维持常数”的认识水平,而那时的飓风数值模式则局限于基于“理想的”二维模式(idealized two-dimensional model)开展研究。早期由于缺乏对飓风眼区附近海平面风场的有效测量,同时由于飞行层和海平面风速推算关系的不确定性,使得飓风中心附近海平面风场分析的精确性不那么十分可信。1997年P-3机载下投探空首次为预报员和科学家们提供了飓风眼区高分辨率的风场和其他热力学参量的垂直廓线。

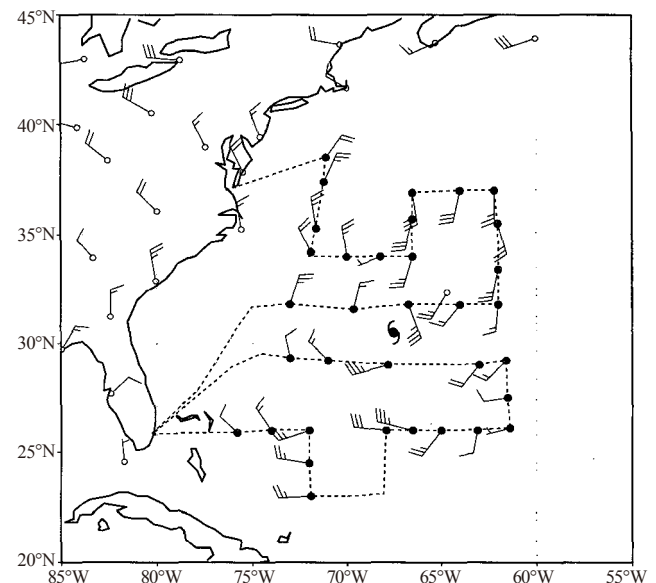


图5 WP-3D飞机对1982年大西洋飓风Debby实施的500hPa环境风场观测(虚线为2架WP-3D飞机观测路线,○代表陆基/岛屿无线电探空,●代表飞机下投探空)

通过对洋面上飓风眼区附近的数百个垂直廓线的统计分析,科学家得出飓风中心附近海平面风速与700hPa(标准飞行层高度)风速之比为0.9。NHC据此对其业务做了规定:如果没有其他额外资料,飓风中心附近海平面最大风速(1min平均)估测值为700hPa飞行层所观测10秒风速极值的90%。P-3机载多普勒雷达资料极大地增进了科学家对飓风结构和导致飓风强度变化的内核动力学过程的理解;P-3所释放的海洋表层温度测量仪帮助科学家更好地描述了海洋上层温度结构与飓风强度的反馈,这将有助于改进业务和研究模式中海一气相互作用的物理参数化。另外,对飓风结构和动力学等认识水平的提高不仅有助于改进飓风业务预报,也有利于改进与飓风有关的风暴潮模式和风险评估模式。同时基于飓风飞机观测的成功经验,NOAA已发展了其他高影响天气的飞机观测,如对北美大陆中纬度近海冬季风暴开展飞机观测。

5.2 热带气旋飞机观测成果及投入产出比分析

热带气旋飞机观测确实在预报业务和科研活动中发挥了重要作用。当然飞机观测毕竟是一项经济投入较大的事情,但这样的投入和热带气旋预报准确率的提高所产生的经济社会效益相比,是非常划算的。Burpee等^[28]、Franklin等^[29]曾对飓风飞机观测费用与沿海居民对飓风警报发布后相应的准备活动(不涉及人员撤离)所产生的费用进行了对比。Burpee等^[5]列举了1993年8月30日针对飓风Emily所实施的双机观测试验费用,该次试验总共投放了44个下投式探空仪,每个探空仪耗资642美元,每架WP-3D飞机作业时间9h,单架飞机每小时作业费用2800美元,为获得这些探空资料总花费约8万美元,尚未包括人员加班及差旅费用(现在美国和台湾地区DOTSTAR基本上都用GPS下投式探空仪,每个耗资约500美元^[30])。

在美国,NHC通常在飓风可能登陆前24~36h发布飓风警报,平均单个飓风警报所覆盖的海岸线长度为555km^[5,9],而真正遭受飓风强度风力袭击的海岸线平均来说少于185km,所以现在的飓风警报所覆盖区域有2/3属于“过度预警”。这是在现有预报水平下不得已而为之的折中方案,即既要保证预报准确性从而尽量缩小飓风预警区域,同时也要保证有足够长的预警提前量,留给公众有足够时间进行避灾准备,但预警提前量太多,预报准确性就会下降。图6为2005年“卡特里娜”飓风警报示例^①。Sheets^[31]曾估测出NHC发布飓风警报后警报区域内每千米范围居民采取相关避灾准备活动的费用为9万美元,当然不包括

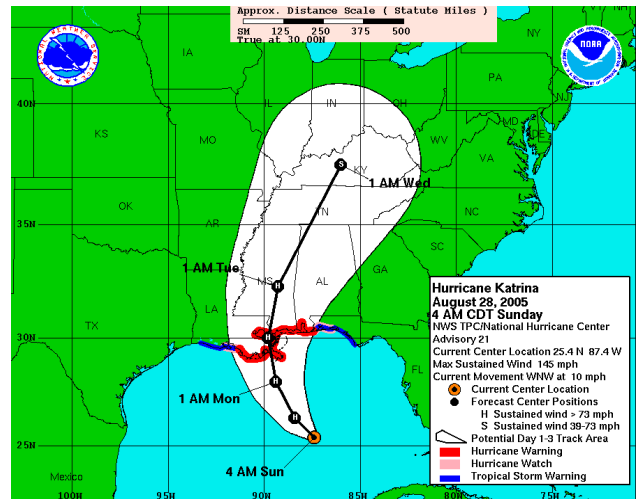


图6 2005年8月28日NHC发布的“卡特里娜”飓风警报(红色海岸线为飓风警报覆盖区域,蓝色为热带气旋警报覆盖区域)

间接的经济损失,如商业或生产因暂停而造成的损失等;而Jarrell^[5]在1995年的统计分析则指出该项费用为近35万美元。假设预报员在获得飞机观测资料后提高了路径预报准确度,将“过度预警”区域如仅仅减少5%(18~19km),其所带来的经济效益将是飞机观测费用的80倍!

Whitehead^[32]认为飓风警报后人员撤离/转移费用依赖于人口密度和飓风强度。以美国东海岸北卡罗来纳州为例,每6英里^②人员撤离/转移费达100万美元,在该研究中,每英里海岸人口密度设定为608人。但美国南部墨西哥湾沿岸和东部其他地方人口密度更大,平均来讲,这些地方每英里人员撤离/转移费高达100万美元,若按照佛罗里达州的人口密度来说,这个数字将会更高。

NOAA的业务科技人员和飓风应急管理部门的官员一直希望并致力于减少飓风“过度预警”比率,他们希望将这个比率由目前的3:1减少到未来的2:1^[24],也就是将“过度预警”海岸线长度由370km减少至185km。这将是一项巨大的挑战,当然离不开各类常规和非常规观测资料的支撑,其中包括飞机观测资料的贡献。

6 热带气旋飞机观测的技术优势、风险及关键问题

6.1 热带气旋飞机观测的技术优势

在气象卫星上天之前,美国主要依靠军用飞机监测热带气旋的生成,受各种客观因素的限制,难免会漏掉一些热带气旋。气象卫星的问世对热带气旋的

① http://www.nhc.noaa.gov/archive/2005/KATRINA_graphics.shtml

② 1英里=1609.344m,下同

监测产生了革命性影响，热带气旋形成之前的早期迹象，如热带扰动或热带低压，在卫星云图上已是一目了然，对热带气旋的监测不再有“漏网之鱼”。从全球范围来看，气旋卫星理应是开展热带气旋监测最有效的手段，尤其是卫星遥测技术越来越先进，各种直接的观测和间接的反演产品越来越丰富，为热带气旋的业务和科研工作提供了强有力支撑。但气象卫星也不是无所不能，它还不能对气旋内部的气象要素进行直接测量，尚不能确定风暴中心气压，也不能给出精确的风速信息，而这些信息对准确预报风暴的发展和运动又是如此之重要。而飞机能直抵风暴外围的螺旋云带，甚至风暴中心，并在不同高度层开展最直接的“现场”观测。和卫星大范围的遥测对比，这些范围虽小，但从业务角度来讲又至关重要的飞机观测资料显得尤为珍贵。

飞机观测在热带气旋预报业务和理论研究中发挥了重要作用。即便将来卫星、雷达或者其他探测仪器得以进一步发展，飞机观测仍将显示其重要价值，因为作为一个移动观测平台，在常规观测资料稀缺的海洋上空通过飞机观测所获得的宝贵的现场观测资料除继续用于提高热带气旋预报外，还将用于对卫星、雷达等遥感资料的评估和校正。

6.2 热带气旋飞机观测的风险

热带气旋飞机观测的风险主要来自于热带气旋内部强烈的对流/湍流对飞机机体结构或通信及导航设备等的损坏，历史上确曾发生过机毁人亡的惨痛事件。飓风Janet是1955年大西洋飓风季节最强的一个飓风，也是大西洋飓风史上最强的飓风之一，它以5级飓风的强度登陆墨西哥东南部的尤卡坦半岛，共造成687人死亡。在Janet袭击中美洲之前，美国海军派遣一架飞机飞抵风暴中心附近开展侦测，恶劣天气导致飞机失去控制，机上7名机组人员全部遇难，这也是大西洋飓风飞机观测史上唯一的一次机毁人亡事件^①。除此之外，也发生过飞机受损和人员受伤等事件。

飞机观测的其他风险主要是机载仪器在恶劣天气条件下不能正常工作，如下投式探空仪直接坠入洋面或因通信原因观测资料不能正常接收或传输等。

6.3 热带气旋飞机观测的关键问题

热带气旋飞机观测的关键问题是如何降低观测风险、提高观测效率和发挥观测效益。

在降低飞机作业风险方面，应主要做好以下几个

方面的工作：（1）制订及遵守标准作业程序；（2）在飞机可飞行时数下进行观测，以台湾ASTRA飞机为例，飞机的飞行时数为6.5h，那么观测的时间不会超过6h；（3）依飞机类型和观测科目不同制定详细的作业航线，如台湾ASTRA飞机只用于台风环境场观测，它尽力避免观测航点通过台风中心100km内的区域，即眼墙区域，若有此情况，则改变航线或放弃观测；（4）机组人员需参加每年一次的安全演练，并亲自操作飞机迫降及逃生等；（5）机组人员透过卫星电话实时与地面观测人员讨论航线上对流发展情况，若有强对流出现则随时调整航线。

为提高飞机观测效率，目前国际上正发展目标观测（Targeted Observation）或适应性观测（Adaptive Observation）技术。其策略之一是通过估测集合预报系统中初始条件的不确定性和误差增长潜力，识别出需要增加观测资料的关键“敏感区”，从而引导机组人员飞抵“敏感区”开展相关观测^[3]。2003年NOAA实施了13次目标观测试验，NCEP全球模式热带气旋路径预报准确率在24和48h预报时段内平均提高了18%~32%^[33]；台湾大学DOTSTAR研究团队开发了基于共轭模式敏感引导向量（Adjoint-Derived Sensitivity Steering Vector，简称ADSSV）的敏感区确定方法^[21]，该方法被美国飓风研究中心执行飞机观测任务时采用。

相对于飞机观测本身，如何真正发挥飞机观测效益更有意义。除科学设定观测目标、观测线路、观测科目外，观测数据的实时采集和传输、观测数据的质量控制、观测数据的实时显示与分析、观测数据的同化应用、观测资料的影响评估研究、观测资料的后续分析与研究等，对提高观测效益和热带气旋预报准确率起着关键作用。Zhang等^[11]建立了基于集合卡曼滤波方法（EnKF）的飓风预报系统，已能实时同化机载高分辨率雷达资料，显示了极好的飓风路径和强度预报前景，从2011年飓风季节开始，该预报系统已实时为NHC预报员提供指导产品。

7 结语

如上所述，国际上开展热带气旋飞机观测已有近70年历史，并早已被证明是提高热带气旋路径和强度预报行之有效的有效手段。目前美国和台湾地区用于热带气旋观测的飞机，如WP-3D，WC-130J以及G-IV，ASTRA等都是有人驾驶飞机，作业成本较高，同时机组人员也冒着一定程度的生命危险。另外这些飞机还

^① http://en.wikipedia.org/wiki/Hurricane_Janet

受飞行高程的限制,其最大升高一般在10km左右,而热带气旋环流往上可延伸至18km左右,因此近几年国际上开始尝试应用无人(遥控)飞机开展热带气旋观测试验。早在1993年Langford等^[34]就探讨了用无人飞机投放下落式探空仪开展飓风观测的可能性,并展望了这种新的、低成本、超高飞行高度的无人飞机在丰富观测手段、提高飓风预报准确率、增强气候监测能力等方面的巨大潜力。美国及台湾地区已有应用无人飞机成功开展热带气旋观测的范例。NASA在其组织实施的HS3(Hurricane and Severe Storm Sentinel)项目中,计划于2012—2014年间应用两架“全球鹰”无人飞机针对12个或更多飓风开展长航时飞机观测。可以预计,有人机和无人飞机相结合开展热带气旋飞机观测将成为一种趋势。

我国是世界上受热带气旋灾害最严重的国家之一,平均每年约有9个热带气旋(含热带低压、热带风暴及以上强度)在我国大陆登陆。迄今为止,我国大陆尚未开展飞机观测业务,只是在2008年7月18日和9月15日分别针对“海鸥”(Kalmaegi)和“森拉克”(Sinlaku)做过两次小型无人飞机观测试验(受中国气象局2008年台风业务科研发展专项支持,由中国气象局气象探测中心实施);2009年8月7日和9日针对“莫拉克”(Morakot)和“天鹅”(Goni)做过两次机载下投式探空观测试验(受行业专项“热带西太平洋观测试验与我国高影响天气可预报性研究”支持,由中国气象科学研究院实施)。受多种条件的制约,上述观测试验所取得的科学结论和经验非常有限。因此若能对国际上热带气旋飞机观测的先进技术和经验有较全面的了解,学为己用,必将有效推动中国大陆热带气旋飞机观测技术水平,建立中国大陆热带气旋飞机观测业务,进一步提高热带气旋路径、强度及风雨甚至风暴潮预报水平,从而更有效减轻热带气旋灾害。

本文只是对国际上,尤其是美国和中国台湾地区的热带气旋飞机观测的历史和现状做了一个简单的介绍,由于作者认知及参阅资料的局限性,对相关的一些技术细节尚有不尽正确或遗漏之处。读者若想了解更多详细的内容,可参考相关文献或登录美国NOAA及其下属单位、台湾大学DOTSTAR等相关网站进行查阅。

参考文献

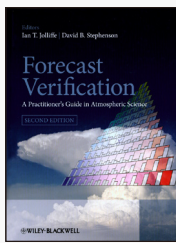
- [1] Kurihara Y, Bender A, Tuleya R E, et al. Improvements in the GFDL hurricane prediction system. *Mon Wea Rev*, 1995, 123: 2791-2801.
- [2] Zou X, Xiao Q. Studies on the initialization and simulation of a mature hurricane using a variational bogus data assimilation scheme. *J Atmos Sci*, 2000, 57: 836-860.
- [3] Wu C C, Chou K H, Lin P H, et al. The impact of dropwindsonde data on typhoon track forecasts in DOTSTAR. *Wea Forecasting*, 2007, 22: 1157-1176.
- [4] Shoemaker D W, Gray W M, Sheaffer J D. Influence of synoptic track aircraft reconnaissance on JTWC tropical cyclone forecast errors. *Wea Forecasting*, 1990, 5: 503-507.
- [5] Burpee R W, Franklin J L, Lord S J, et al. The impact of Omega dropwindsonde on operational hurricane track forecast models. *Bull Amer Meteor Soc*, 1996, 77: 925-933.
- [6] Aberson S D, Black M L, Black R A, et al. Thirty years of tropical cyclone research with the NOAA P-3 aircraft. *Bull Amer Meteor Soc*, 2006, 87: 1039-1055.
- [7] Henderson R S. USAF aerial weather reconnaissance using the Lockheed WC-130 aircraft. *Bull Amer Meteor Soc*, 1978, 59: 1136-1143.
- [8] Gray W M. Tropical cyclone intensity determination through upper-tropospheric aircraft reconnaissance. *Bull Amer Meteor Soc*, 1979, 60: 1069-1074.
- [9] Gray W M, Neumann C, Tsui T. Assessment of the role of aircraft reconnaissance on tropical cyclone analysis and forecasting. *Bull Amer Meteor Soc*, 1991, 72: 1867-1883.
- [10] Martin J D, Gray W M. Tropical cyclone observation and forecasting with and without aircraft reconnaissance. *Wea Forecasting*, 1993, 8: 519-532.
- [11] Zhang F, Weng Y, Gamache J F, et al. Performance of Convection-Permitting Hurricane Initialization and Prediction during 2008-2010 with Ensemble Data Assimilation of Inner-core Airborne Doppler Radar Observations. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38, L15810, doi:10.1029/2011GL048469.
- [12] Sumner H C. North Atlantic hurricanes and tropical disturbances of 1943. *Mon Wea Rev*, 1943, 71: 179-183.
- [13] Wexler H. The structure of the September, 1944, hurricane when off Cape Henry, Virginia. *Bull Amer Meteor Soc*, 1945, 26: 156-159.
- [14] Wood F B. A flight into the September, 1944, hurricane off Cape Henry, Virginia. *Bull Amer Meteor Soc*, 1945, 26: 153-156.
- [15] Dorst N M. The National hurricane research project: 50 years of research, rough rides, and name changes. *Bull Amer Meteor Soc*, 2007, 88: 1566-1588.
- [16] Simpson R H. Hurricanes. *Scientific American*, 1954, 109: 22-37.
- [17] Simpson R H. Exploring the eye of Typhoon "Marge", 1951. *Bull Amer Meteor Soc*, 1952, 33: 286-298.
- [18] Davis W R. Hurricanes of 1954. *Mon Wea Rev*, 1954, 82: 370-373.
- [19] Willoughby H E, Jorsensen D P, Black R A, et al. Project STORMFURY: A scientific chronicle 1962-1983. *Bull Amer Meteor Soc*, 1985, 66: 505-514.
- [20] Wu C C, Coauthors. Dropwindsonde observations for typhoon surveillance near the Taiwan region (DOTSTAR): An overview. *Bull Amer Meteor Soc*, 2005, 86: 787-790.
- [21] Wu C C, Chen J H, Lin P-H, et al. Targeted observations of tropical cyclones based on the adjoint-derived sensitivity steering vector. *J Atmos Sci*, 2007, 64: 2611-2626.
- [22] Aberson S D. 10 years of hurricane synoptic surveillance (1997-2006). *Mon Wea Rev*, 2010, 138: 1536-1549.
- [23] Lin P H, Lee C S. The eyewall-penetration reconnaissance observation of typhoon Longwang (2005) with unmanned aerial vehicle, aerosonde. *J Atmos Oceanic Technol*, 2008, 25: 15-25.
- [24] Aberson S D, Franklin J L. Impact on hurricane track and intensity forecasts of GPS dropwindsonde observation from the first-season flight of the NOAA Gulfstream-IV jet aircraft. *Bull Amer Meteor Soc*, 1999, 80: 421-427.
- [25] Franklin J L, Black M L, Valde K. GPS dropwindsonde wind profiles in hurricanes and their operational implications. *Wea Forecasting*, 2003, 18: 32-44.

- [26] Murillo S, Coauthors. 2011 Hurricane Field Program Plan. 2011.
- [27] Griffin J S, Burpee R W, Marks Jr F D, et al. Real-time airborne analysis of aircraft data supporting operational hurricane forecasting. *Wea Forecasting*, 1992, 7: 480-490.
- [28] Burpee R W, Marks D G, Merrill R T. An assessment of Omega dropwindsonde data in track forecasts of Hurricane Debby (1982). *Bull Amer Meteor Soc*, 1984, 65: 1050-1058.
- [29] Franklin J L, DeMaria M. The impact of Omega dropwindsonde observation on barotropical hurricane track forecasts. *Mon Wea Rev*, 1992, 120: 381-391.
- [30] Hock T F, Franklin J L. The NCAR GPS dropwindsonde. *Bull Amer Meteor Soc*, 1999, 80: 407-420.
- [31] Sheets R C. The National Hurricane Center—Past, present, and future. *Wea Forecasting*, 1990, 5: 185-232.
- [32] Whitehead J C. One million dollars per mile? The opportunity costs of hurricane evacuation. *Ocean Coastal Manag*, 2003, 46: 1069-1083.
- [33] Aberson S D. Targeted observations to improve operational tropical cyclone track forecast guidance. *Mon Wea Rev*, 2003, 131: 1613-1628.
- [34] Langford J S, Emanuel K A. An unmanned aircraft for dropwindsonde deployment and hurricane reconnaissance. *Bull Amer Meteor Soc*, 1993, 74: 367-375.

新书架

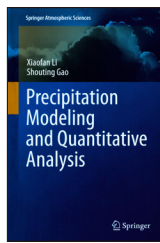
NEW BOOK

感兴趣的读者可以到中国气象局图书馆阅览室阅读或凭索书号借阅



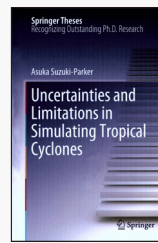
Forecast Verification—
A Practitioner's Guide in
Atmospheric Science
《预报检验：从业人员大气科学指南》

编著者：Ian T. Jolliffe 等
出版者：John Wiley
出版年：2011



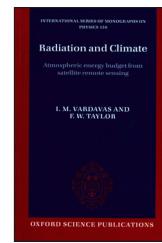
Precipitation Modeling and
Quantitative Analysis
《降水模拟和定量分析》

编著者：Xiaofan Li 等
出版者：Springer
出版年：2011



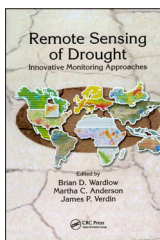
Uncertainties and Limitations in
Simulating Tropical Cyclones
《热带气旋模拟中的不确定性
和局限性》

编著者：Asuka Suzuki-Parker
出版者：Springer
出版年：2011



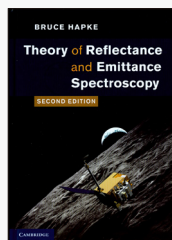
Radiation and Climate:
Atmospheric Energy Budget
from Satellite Remote Sensing
《辐射与气候：卫星遥感大
气能量收支》

编著者：I. M. Vardavas 等
出版者：Oxford University Press
出版年：2011



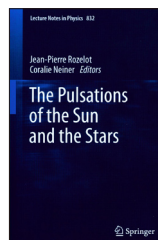
Remote Sensing of Drought:
Innovative Monitoring
Approaches
《干旱遥感：创新监测方法》

编著者：Brian D. Wardlow
出版者：CRC Press
出版年：2012



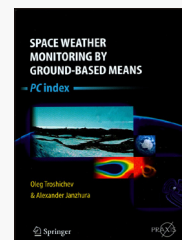
Theory of Reflectance and
Emittance Spectroscopy
《反射率和发射率光谱理论》

编著者：Bruce Hapke
出版者：Cambridge
出版年：2012



The Pulsations of the Sun and
the Stars
《太阳和恒星的脉动》

编著者：Jean-Pierre Rozelot 等
出版者：Springer
出版年：2011



Space Weather Monitoring by
Ground-Based Means: PC Index
《地基空间天气监测：
PC 指数（丛书）》

编著者：Oleg Troshichev 等
出版者：Springer
出版年：2012