中国台风科研业务百年发展历程概述

雷小途^{1,2*}

1. 中国气象局上海台风研究所, 上海 200030;

2. 上海市气象局, 上海 200030

* 通讯作者, E-mail: leixt@typhoon.org.cn

收稿日期: 2018-06-24; 收修改稿日期: 2019-04-24; 接受日期: 2019-06-12; 网络版发表日期: 2019-09-17

国家重点研发计划项目(编号: 2018YFC1506400)和国际合作专项项目(编号: IPOVAI-04-05)资助

摘要 台风是中国东南沿海地区最主要的自然灾害之一, 中国十分重视防台减灾工作, 在台风监测站网建设、预报预警及台风灾害联防等业务体系建设、台风活动的基础理论及预报关键技术研究等方面取得一系列重要进展. 文章简要回顾了近一个半世纪中国台风科研业务发展史上具有里程碑意义的重大事件, 以纪念百年来特别是改革开放以来为中国防台减灾事业发展做出历史贡献的先辈, 旨在为中国的台风科学研究和业务能力建设提供些许历史借鉴.

关键词 台风, 科研与业务, 发展历程, 综述

1 引言

发生在西北太平洋(含南海)的热带气旋, 通俗地统称为台风. 关于“台风”一词的来历, 一为“转音说”, 包括由广东话“大风”、闽南话“风筛”、荷兰人占领台湾期间根据希腊史诗《神权史》中的人物“泰丰(Typhaon)”演变而来; 二为“源地说”, 对于中国大陆而言, 台风多来自台湾及浙江台州一带而得名(竺可桢, 1922; 中国大百科全书编委会, 1987; 王存忠, 2006a). 目前, 认同度较高的说法是: 中国古代的航海家们, 每年夏秋季节航行到东海、南海, 特别是经过台湾岛周围及浙江省台州一带海域时, 常遇到一种猛烈的风暴, 其突出特征便是大风, 加之经常在台湾岛附近及台州沿海遇到, 东南沿海渔民的方言中便称之为“胎风”,

为进一步强调其“风”特征, 将“胎”的“月”部换成“风”便成了“飏”(繁体“台风”的台, 1956年简化为“台”)(李荣和冯爱珍, 2006; 刘建利, 1999).

中国是全球热带气旋灾害最严重的国家之一, 年均约有7个台风在中国东南沿海登陆, 并造成约0.4%的GDP直接经济损失和9000余人员伤亡(死500余人)(雷小途等, 2009a). 台风对中国的危害, 自古而然. 如元十七年(公元1280年), 元世祖派十万大军渡海东征, 在海上突遇台风, 元军全军覆没(逃还国内的只有3人), 是为东亚地区认识到海上台风灾害之始.

台风学科的发展史就是防台减灾的抗争史, 台风科研和业务系统建设, 在很大程度上由台风及其灾害事件牵引. 近代, 随着气象器测技术的发展, 特别是新中国成立和改革开放以来, 中国在台风监测、资料整

中文引用格式: 雷小途. 2020. 中国台风科研业务百年发展历程概述. 中国科学: 地球科学, 50: 321–338, doi: 10.1360/N072018-00176

英文引用格式: Lei X. 2020. Overview of the development history of China's typhoon research and operational work in the past century. Science China Earth Sciences, 63: 362–383, <https://doi.org/10.1007/s11430-018-9379-8>

编、预报关键技术及联防联控等领域均取得了长足进步(陈联寿, 1979; 费亮, 1982; 陈德辉, 1995; 陈联寿和孟智勇, 2001; 陈联寿等, 2004; 陈光华和裘国庆, 2005; 端义宏等, 2005; 程正泉等, 2005; 雷小途等, 2009b; 陈联寿, 2010; 丛春华等, 2011; 端义宏等, 2014; 陈联寿等, 2017)。本文简要回顾了近一个半世纪以来中国台风科研和业务系统建设中的重大事件, 初步分析了其对台风学科发展和防台减灾体系建设的重要影响, 旨在为新时代中国防台减灾提供些许历史借鉴。此外, 适逢改革开放40周年及新中国建国70周年之际, 谨以此文纪念过去一个半世纪, 特别是近70年来, 为中国防台减灾事业无私奉献并做出巨大历史贡献的先辈们。

2 百年前的历史积淀

2.1 古代史志中的台风记录为台风气候变化研究提供独特资料支撑(公元前1217~)

全球变暖对台风的影响自2005年以来广受关注, 但台风气候是否发生了变化以及该变化是否与全球变暖有关, 至今仍争议不断(雷小途等, 2009b; Emanuel, 2005; Webster等, 2005; Landsea等, 2006)。焦点之一便是“年限约为百年的器测资料是否足以表征气候尺度的变化趋势”, 寻找更长时间尺度的(代用)观测资料因此成为台风气候变化领域的关键研究内容之一(雷小途, 2011)。

中国自古就有修史编志的传统, 自有文字(甲骨文)开始(约公元前1217年)就有“东云自南, 雨”的记载(胡厚宜旧藏《甲骨文合集》)。中国的古籍和地方志等多有台风及其灾害的记载, 如早在1400多年前的南朝就有台风的记载, 当时把台风称为“飓风”或“惧风”。明末清初及以后的文献多采用“飏(台)风”。约清康熙30年(1694年)起, 出现“风大而烈者为飏, 又甚者为台”的记载。约20世纪初及以后的文献中, 多把飓风和台风笼统称为台风(自清朝末年或民国初期, 留洋的学子们将美国的hurricane译为飓风)(王存忠, 2006b)。此外, 中国古文献中还多用“海溢”“海塘坏”“潮涌”“大风雨”和“风潮”等与伴随台风的“典型词语”进行台风记载。

利用中国得天独厚的丰富的史志文献记录, 中国学者曾先后识别和整理了包含台风在内的系列气象资料集(如“中国三千年气象记录总集”(张德二, 2004)),

并在此基础上对百年甚至千年的台风活动特征进行过分析(如“近百年西北太平洋台风活动”(王继志, 1991)、“中国沿海台风百年遇重大灾害的Poisson分布特征”(杨元琴, 2001)、“最近一千年中国的登陆台风及其与ENSO的关系”(梁有叶和张德二, 2007)等)。中国气象局上海台风研究所则识别并整理出了15世纪(1450年)以来华东地区(江苏、浙江、上海)致灾台风的频数资料集, 并分析了其世纪尺度的变化特征(图1), 丰富了对台风气候变化问题的认识(Xu等, 2012)。

2.2 手绘台风结构及垂直截面旋风理论的提出开启了中国台风研究的先河(1879~)

自明朝(约1600年)开始中国已有雨量的定量观测。中国境内最早对气温、风向、气压、湿度和雨/雪量等的定时器测始于清道光年间(约1841年)建立的“北京地磁气象台”, 并断断续续延续至1914年。1872年建立的上海徐家汇观象台, 其气象观测自建台起延续至今(已近150年)从未间断(包括在“二战”期间, 在远东地区仅此一站)。

1879年7月31日徐家汇观象台的自记仪器成功记录到了一个台风过境上海时的风压等数据(图2a)。时任徐家汇观象台台长的能恩斯(Marc Dechvrens)根据当时有限的观测资料, 极富想象力地手绘了该台风的结构图(图2b)。令人称奇的是, 该结构图与现代气象卫星云图上的台风极为相象。能恩斯在此基础上提出了史称“台风垂直截面旋风理论”: 气旋(台风)低层有垂直上升气流, 该气流到了高层会向四周扩散, 因此可通过观测高层高积云和卷云来预报台风的来临。开启了中国台风观测研究及预报探索的先河。

图1 1450~1949年期间华东(江苏、浙江、上海)地区致灾台风的频数分布

引自Xu等(2012)

图 2 1879 年台风过境上海前后的气压记录(a)及能恩斯手绘的该台风结构图(b)

图片来源: 上海市气象局博物馆

2.3 台风图集的整编出版为台风研究和防台减灾奠定了坚实的资料基础(1882~)

中国十分重视资料的整理和汇编工作, 早在1882年, 时任徐家汇观象台台长的能恩斯在对1882年和1885年的台风研究基础上, 先后发表《1882年9月和10月的台风》和《1885年中国上海的台风(论远东大气的变化)》两部专著(图3a)。1920年, 时任徐家汇观象台台长的劳积勋(Aloysius Froc)整编了《620个台风路径图(1893—1918)》图集(图3b), 收集了25年中所观测到的620个台风和1264个低压的资料, 详细剖析了典型台风的活动特征及其影响。如图集记载的1915年7月28日袭击上海的一次典型台风个例: 台风穿越舟山群岛在上海登陆, 徐家汇站最大风速 38.3 m s^{-1} 、极大风速 43.9 m s^{-1} , 黄浦江中沉船300余艘、浮尸200余具, 苏州河两岸的房屋十之六七都坍塌了。

能恩斯的专著和劳积勋的图集出版成为当时远东航海所必备, 受到国际社会的广泛关注, 国际知名期刊《Nature》随后对徐家汇观象台的相关工作进行了较全面的报道。

2.4 创立的台风预警风球旗语体系被远东各地广为使用至今(1884~)

为及时给海上航行过往船只和当地百姓提供台风监测预警信息, 1884年徐家汇观象台创立了以悬挂圆柱形、球形和圆锥形为信号的“风球”及相关的“旗语”预警信号及发布体系(图4), 并在上海的外滩搭建了一个信号塔进行实时发布。该预警信号体系, 简捷、醒目、通俗、易懂, 东亚沿海多地相继引用(香港天文台

自1884年开始便使用“风球”信号对台风进行预警), 并被国际气象组织(International Meteorological Organization, IMO)推荐得到更广泛的使用, 后经不断完善, 于1930年形成了更为规范的暴风预警信号体系, 在远东各地广泛使用。

香港天文台和澳门地球物理暨气象局等直到2002年才不再悬挂实物的“风球”, 但是基于“风球”的台风预警体系却沿用至今。

3 新中国建国后的新篇章

中国近代气象学的奠基人竺可桢先生十分重视观测站网、防灾减灾和教育培训体系建设。他于1934年牵头成立中国地理学会; 1936年担任浙江大学校长时设立地理系气象组; 1940年学校因抗日战争被迫西迁贵州省遵义市时, 还在校园设立测候所供学生实习用。但直至解放前夕, 全国只有72个发报的地面气象观测站(没有高空气象观测), 当时的中央气象局只有4个预报员, 且未建立灾害性天气的发布途径和预警机制。1947年11月, 当时的中央气象局虽然预测到太平洋上有一台风将要袭击台湾和福建沿海, 但因没有发布渠道, 做出的预报只能存档, 过往船只因无任何避灾措施而沉没。灾后, 当时的《中央日报》登载: “大陆公司‘海阳号’轮船, 由招商局‘济安号’拖带途中, 在福州洋面突遇台风, 缆索告断随风浮去而沉没”。赵九章先生在1959年总结建国十年进展时写道: “解放前, 中国气象工作者在竺可桢先生的领导下, 惨淡经营, 多方提倡, 经过多年的努力, 逐渐建立了一点微小的阵地”(赵九章, 1959)。建国后, 中国气象科学开始了崭新的发展

图3 能恩斯著《1882年9月和10月的台风》(a)及劳积勋著《620个台风路径图(1893-1918)》(b)

图4 1884年创立的台风预警风球旗语体系
图片来源：上海市气象局博物馆

阶段，中国的台风研究及防台减灾体系建设也进入了新篇章。

3.1 台风预警信息发布机制建设

1949年7月24日晚至25日凌晨，上海突遇4906号台风的正面袭击，狂风大作，骤雨倾盆。上海气象台在7月

20日就已发现了该台风的动向，于23日下午作出“台风将于24日晚在宁波附近登陆后经杭州湾并于25日晨影响上海”的预报，并于24日制作台风紧急警报专门呈报主管机关(市军管会)，同时还将警报消息发送给各报馆。经上海气象台再三要求，24日出版的《新民报》晚刊在头版的右下角刊登了一则豆腐干大的台风警报，并未引起市民们的警惕。最终，全市因灾死亡1613人、208.3万亩农田受淹、63208间房屋倒塌、经济损失10亿元人民币(旧币)以上。事后查明，原来根据军管会的有关规定“报纸不得刊登气象消息，以防止敌特利用公开发布的天气预报进行空袭”。因此，台风警报当时属机密，不得公之于众，因而发挥不了其防台减灾的功效。为了避免类似事件重演，时任上海市市长陈毅签发市军管会通令，规定：“太平洋上之一切气象信息，各报馆及电台可根据上海气象台的报告发布，必要时报纸应在显著位置刊发”(张姚俊，2009)。上海的台风预警发布，从此走向正轨。

随后，上海气象台于1951年制定“台风警报发布办法”，由华东军政委员会颁发华东各有关部门执行，并同时通过人民广播电台对上海及华东全区发布台风警报。为了更有效地传递台风消息，还从华东沿海各渔港调来大批干部进行气象训练，成为政府在华东沿海各

渔港设立的暴风警报站的管理员, 负责收听气象报告并转告渔民. 为了进一步便利渔民海上安全作业, 从1952年起, 组建了通过人民广播电台每天定时对华东全区及上海市发布气象报告的节目, 并很快在生产建设上发挥了巨大作用. 如1956年8月1日, 在浙江象山登陆的强大台风正面袭击上海, 成为当时百年来最强的台风. 由于有了台风报告节目, 上海及沿海有关气象台预报准确及时, 各地政府及时采取防御措施, 所以未酿成巨大灾害, 困守在浙江舟山某小岛上的163个渔民也因政府的及时告警而安全脱险. 而类似的1915年7月28日华东沿海受强度相当的台风侵袭, 其风雨影响并不比1956年的大, 但造成的灾害巨大(束家鑫, 1964). 上海及华东地区有效的台风警报发布机制很快就推广至全国, 并促成了全国的台风及灾害性天气预警信息发布体系的建立.

3.2 台风年鉴资料的整编(1957~)

与能恩斯和劳积勋整编出版“台风图集”一脉相承的是, 中国的台风专家和沿海气象部门十分重视台风资料的收集和整理, 并先后整编出版了《台风路径图及其一些统计》(高由禧、曾佑恩, 1957年)、《东亚台风图集》(上海市气象局, 1959年)和《1957年台风年鉴》(上海中心气象台、广州中心气象台, 1960年).

为规范台风资料的整编出版工作, 1970年原中央气象局成立了“台风年鉴整编组”, 由陈德全负责, 并设立由范永祥任组长、朱永禔、田永祥等组成的技术组(任福民等, 2011). 历时三年多, 于1973年在上海市气象局完成了1949~1971年逐年的《台风年鉴》和《1949—1969年西北太平洋台风路径图》的整编和出版.

1972年后的“年鉴”整编工作步入正轨, 即每年整编出版一册《西北太平洋台风年鉴》(一般在次年完成), 沿续至今从未间断(图5a). 整编工作最初主要由中央气象台承担, 1978年9月上海台风研究所成立后, 此项工作转由上海台风研究所负责. 1989年后《西北太平洋台风年鉴》改名为《西北太平洋热带气旋年鉴》.

自2001年起, 光盘版《西北太平洋热带气旋年鉴》也同步发行, 并研发了具有路径和云图动态显示及灾情查询等功能的“西北太平洋热带气旋检索系统”, 广泛应用于全国(含香港和台湾)防台减灾部门. 2007年起, 中国气象局热带气旋最佳路径数据集在“中国台风网”(www.typhoon.org.cn)上实现了面向包括亚太经社会/世界气象组织(Economic and Social Commission for Asia and the Pacific/World Meteorological Organization, ESCAP/WMO)台风委员会各会员在内的公众在线共享.

上海台风研究所还重视台风气候资料及图集的整理, 先后整编出版了《西北太平洋台风基本资料集(1949—1980年)》、《西北太平洋热带气旋气候图集(1951—1980年)》、《影响华东地区热带气旋气候图集(1949—1998)》、《中国热带气旋气候图集(1951—2000)》、《西北太平洋热带气旋气候图集(1981—2010)》(图5b).

系列“年鉴”和相关图集的出版、年鉴资料的在线检索与共享等, 为中国台风研究和预警技术的研发奠定了坚实的资料基础. 其中“西北太平洋热带气旋最佳数据集”已作为“全球热带气旋资料集(IBTrACS)”之一, 为ESCAP/WMO台风委员会及IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)等相关的“台风气候

图5 上海台风研究所整编的系列《台风年鉴》(a)及《西北太平洋热带气旋气候图集(1981—2010)》(b)

变化”评估工作提供资料支撑。

3.3 亚太区域政府间的防台减灾国际合作机构建设(1968~)

为改善和协调亚洲及太平洋地区防灾规划和措施,减轻自然灾害特别是台风造成的人员及财产损失,亚太经社理事会(ESCAP)和世界气象组织(WMO)于1968年4月联合设立台风委员会(简称“亚太台风委员会”)。该委员会是个政府间国际合作组织,由中国政府、中国香港当局、日本政府、韩国政府、老挝政府、菲律宾政府和泰国政府等7个创始会员联合组建。委员会的秘书处设在菲律宾的马尼拉市,秘书长由Roman Kintanar先生担任(台风委员会的缔造者之一,世界气象组织的前主席,曾任菲律宾大气地球物理和天文管理局局长)。至1998年,亚太台风委员会的成员增加到14个,即柬埔寨、中国、朝鲜、中国香港、日本、老挝、中国澳门、马来西亚、菲律宾、韩国、新加坡、泰国、越南和美国(Liu和Yu, 2018)。

作为创始会员国,中国积极参与亚太台风委员会的各项工作和治理,发挥着举足轻重的作用。经过中国政府的努力,亚太台风委员会的秘书处自2007年2月起迁移至中国澳门,由澳门特别行政区政府向秘书处提供办公用房和现金捐款,供秘书处用于支付房舍的运转和保养费用。2007~2014年,亚太台风委员会的秘书长由Olavo Rasquino先生(原澳门地球物理暨气象局局长)担任,2015年至今改由喻纪新(原中国气象局国际合作司司长)担任。自2004年,亚太台风委员会设有咨询、气象、水文、防灾减灾、教育培训与研究等工作组,其中气象工作组(working group on meteorology, WGM)的组长先后由中国气象局时任预报司司长

的王邦中(2004~2008年)和中国气象局上海台风研究所雷小途(2009年起)担任。

亚太台风委员会与WMO热带气象研究工作组(working group on tropical meteorology research, WGTMR)合作紧密。近年来, WGTMR的主席先后由中国气象科学研究院陈联寿(2002~2010年)和端义宏(2011~2018年)担任。另, WMO分管全球热带气旋计划处(tropical cyclone program, TCP)的处长由原广东省气象局的彭涛涌担任(2014年起)。

3.4 沿海测台风的雷达建设(1972~)

1972年7月26日7203号超强台风“Rita(丽塔)”在黄海海面突然西折,并登陆山东省荣成石岛镇,随后进入渤海并于27日在天津市塘沽登陆(图6a)。期间9~10级向岸大风持续了6~7个小时(阵风达12级),在渤海沿海引发了风暴潮,致使停锚在渤海湾内的1172艘船只被毁及严重的经济损失和人员伤亡。

由于当时北方沿海没有布设气象雷达,以至于台风来到黄渤海海域后,就进入探测“盲区”,加之当时各国气象部门均预报该台风将向东北方向移动,导致各方几乎毫无防备的情况下“突遇”登陆台风袭击从而造成重灾。时任国务院总理的周恩来得知此事后,专门批示并于1974年在山东半岛顶端的成山头布设了中国北方沿海地区第一部703(10cm)的气象雷达,用于探测台风(图6b)。因此,7203号台风黄渤海海域突然西折,直接促成中国北方沿海第一部天气雷达布设。

目前,中国已经建立了包括198部天气雷达、超过2500个国家级观测站、6万多个自动气象站及9颗在轨风云系列卫星(1988年以来共成功发射16颗)等组成的综合观测系统。遍布沿海地区的雷达站、海岛站以及

图6 超强台风Rita(7203)移动路径(a)及中国研制生产的第一部703测台风雷达(b)

海上浮标站等,与气象卫星组成天-地-空一体化的监测体系,使台风的“行踪”尽收眼底。

3.5 台风科研协作及学术交流机制建设(1972~)

为加强台风研究和技术开发的联合,加强学术及业务经验的交流,规范预报技术的业务准入及全国台风预报信息共享,提高台风预报精度和防台减灾效益,1972年建立全国台风科研大协作机制:组建了“全国台风科研领导小组”和“技术组”,并在中国气象局设立了面向全国的“全国气象科学基金会台风专项(简称‘台风基金’)”。

“领导小组”主要负责台风基金的运行管理和全国台风学术交流。组建之初,“领导小组”由上海市气象局任组长,后调整为国家气象局气象科学研究院。1986年“台风基金”随着国务院“国家自然科学基金”的设立而终止,“领导小组”的主要职责也因此仅为组织全国台风学术交流。此后,“领导小组”的这一职责,也先后转移至中国气象学会天气与极地气象委员会、台风专业委员会(挂靠中国气象局上海台风研究所),“领导小组”也因此而终止。第一次全国台风科学讨论会于1972年在南宁召开,以后每2~4年召开一次,从未中断,至今已是第十八次了(2017年在浙江省温州市召开)。

“技术组”主要由全国台风研究专家及沿海台风业务预报专家组成,每年召开一次工作例会,回顾总结上年台风汛期防台减灾的经验得失,讨论台风监测预报及服务中的技术问题。1988年,受中国气象局职能司委托,由上海台风研究所对全国的台风业务定位、定强及路径(和强度)预报精度进行评定,并计算相对于气候持续性(CLIPER)预报方法的预报技巧。同年,“技术组”的年度例会增加了审议参加全国台风定位定强及预报精度、审查全国发报的台风客观预报方法等两项议题。在此基础上,规定连续2年均均为负技巧(相对于CLIPER)的客观预报方法将在下年停止参加全国发报,并以此作为中国气象局职能司批准业务准入的依据。该业务准入机制和流程沿用至今。

“技术组”后逐渐演变为“全国台风海洋专家工作组”,专家为任期制(4年一个任期,可以连任)。目前,工作组组长单位为国家气象中心,下设台风、海洋和防灾减灾3个工作小组,分别由上海、天津和广东省气象局任小组长,并同时任工作组副组长。目前,第八届工作组也已任期届满。

4 改革开放后的能力建设

20世纪50年代,中国台风研究除极少数的理论和物理图像探讨外,大量是以形态学为基础的经验总结,预报根据主要是气候平均和持续性因子以及形态特征和要素指标。60年代,随着电子计算机的使用,使多因子逐步筛选和多层动力模式等计算方案得以在业务中实现。70年代,台风数值模拟的试验研究得到开展,台风预报技术和研究迈入客观定量的时代,各类统计、动力及统计-动力相结合的预报方法研究和业务应用方兴未艾(陈联寿, 1979)。1978年党的十一届三中全会,开启了中国改革开放的伟大征程,台风的科学研究和防台减灾业务能力建设也迎来了“科学的春天”。

4.1 建立上海台风研究所(1978~)

为适应国家建设对防台减灾科技支撑的要求,加强全国的台风科学研究工作,在国家改革开放的大背景下,1978年1月,经上海市科学技术委员会批准,在上海市气象局内增设气象科研机构,组建成立上海市气象科学研究所。同年5月,中央气象局成立气象科学研究院,要求上海筹建“台风研究所”。9月20日,经中央气象局、上海市科学技术委员会批准,上海市气象科学研究所与中央气象局气象科学研究院上海台风研究所采取一个机构、两块牌子的形式,以上海市气象局为主,实行双重领导,在原气象科学研究所基础上调整、扩大机构设置及研究方向,重点承担国家台风科研项目,并负责全国台风科研协作的具体工作。

上海台风研究所自1978年9月20日成立后,重点承担国家级的台风科研项目、中国气象局(曾用名有“中央气象局”和“国家气象局”等)委托的台风业务基础技术支撑和业务关键技术研发工作。内容涉及牵头整编系列化的《西北太平洋台风年鉴》,评定全国台风业务定位定强及预报性能,研制台风路径、强度及风雨影响等监测预报关键技术(含台风数值预报模式研发),开展台风活动特征及其机制研究等。

台风所成立之初还承担了全国台风科研协作的组织工作:以全国台风科研协作技术组的名义承担全国台风科研协作组的协调和学术交流等任务,1978~1985年间共组织召开了4次全国台风科学讨论会,并编辑出版会议文集。随着改革形势的发展,1986~1990年间全国台风科研协作转变为国家气象局

气象科学基金委“台风项目评审组”拟定招标指南、审批课题申请、检查和验收项目及组织学术交流等形式,期间共资助和鉴定验收99项研究成果,并组织召开第八届全国热带气旋科学讨论会,交流研究成果。

4.2 出版台风经典著作(1979~)

全国台风科研大协作期间,结合系列性的全国台风科学讨论会的召开,曾出版了十几册《台风译文集》和《台风会议文集》,收录了当时大量的台风科研成果,对台风学术交流和科学研究发挥了重要的促进作用。

改革开放以来,中国台风领域的学者还编著出版了不少台风专业著作。如1979年陈联寿和丁一汇合著了《西太平洋台风概论》(科学出版社)、1987年王志烈和费亮编著了《台风预报手册》(气象出版社)。尤其以1979年出版了《西太平洋台风概论》最为经典,其中的大部分基于有限个例分析总结所得的结论,不断被后世的观测资料和数值模拟所证实,至今仍然正确和有效。另外,1987年出版的《台风预报手册》曾在台风业务预报中发挥过重要的指导作用,并为后来中国气象局“台风业务规定”的制定奠定了坚实的基础。

4.3 承办国际台风学术讨论会(1980~)

1980年10月6~11日,WMO在上海组织召开“国际台风学术讨论会”。来自中国、美国、澳大利亚、英国、苏联、加拿大、洪都拉斯、新西兰、印度、孟加拉国、缅甸、中国香港(地区)、菲律宾、马来西亚、泰国、日本、斯里兰卡和科克群岛等十七个国家和地区的74名代表参会,其中中国正式代表20名、列席代表20名。开幕式由WMO秘书长主持,国家气象局局长和上海市副市长出席,这也是改革开放后在国内召开的气象领域的第一次国际会议。会议共安排了36个学术报告(特邀报告19篇、大会报告17篇),其中来自中国的特邀报告2篇、大会报告6篇。会议报告的内容涵盖台风移动预报、台风发生发展、台风结构和暴雨及风暴潮等领域,涉及天气气候学分析、统计分析、动力学数值计算、流体模拟实验、卫星和雷达资料分析等(董克勤,1980)。会议期间,美国著名台风科学家(Bill Gray)教授阅读《西太平洋台风概论》目录的英译稿后,主动找到该书的第一作者(陈联寿)并邀请其赴美

进行客座研究。这是改革开放后中国第一位应邀出境从事台风客座联合研究的学者。

随着改革开放的深入和中国台风学科的发展,中国参与国际台风学术交流活动非常活跃。20世纪90年代以来,由中国(大陆)主办(或承办)的WMO及亚太台风委员会等的国际台风学术讨论会多次,如:1993年在上海召开的“亚太台风委员会SPECTURM-90第3次技术会议”,1998年在海口召开的“WMO第4届国际热带气旋研讨会(IWTC-IV)”,2004年在上海召开的“亚太台风委员会第37次届会”,2008年在北京召开的“亚太台风委员会第3届综合研讨会”,2009年在上海召开的“WMO第2届台风登陆过程研讨会(IWTCLP-II)”,2012年在杭州召开的“亚太台风委员会第44次届会”,2012年在南京召开的“亚太台风委员会第7届综合研讨会”,2012、2015年在上海举办的“WMO登陆台风预报示范项目技术小结及培训”,2015、2017年在上海召开的“亚太近海台风强度变化科学试验(EXOTICCA)组委会会议”,2016年在上海召开“WMO/TMRP工作组年会暨WMO示范项目(TLFDP和UPDRAFT)联合研讨会”等。此外,类似地在会上直接被邀请赴境外从事客座研究的情况也多次发生。

4.4 参与国际台风试验(1982~)

(1) 台风业务试验(TOPEX)。1977年亚太台风委员会组织对亚太地区的台风业务能力进行调研,中国参加了该调研并于1978年提议在西北太平洋地区实施台风业务试验(typhoon operational prediction experiment, TOPEX),得到多数会员的积极响应。经2年多(1979~1981年)的准备,试验于1982、1983年实施。试验分为气象和水文两部分,前者主要是通过加密观测组成区域性的台风实时分析-预报-警报系统,后者主要是利用现场实测洪水和风暴潮等资料对水文预报结果进行实际评估进而改进相关的模式预报能力。中国、日本、马来西亚、菲律宾、韩国、泰国、越南和中国香港参加了该试验,于1980年6月25日正式组建了由各参加会员的代表组成的项目管理委员会,并在日本气象厅设立了国际台风业务试验中心,具体负责试验台风的遴选、试验指令的发布和试验工作的指导。中国先后派张驯良、吴中海、董克勤、徐祥德、肖凯书等专家参加国际中心的工作,并在国内成立台风业务试验分中心和领导小组,下设试验办公室。北京气

象中心、广西至辽宁沿海8个省市气象局参与了台风业务试验, 重点是进行台风影响期间的地面和高空加密观测. 试验期间, 中国共进行地面加密观测发报32562站次、高空1726站次、雷达3214站次, 并有3种客观预报方法在国际中心参加对比试验. 试验取得圆满成功并极大提升了区域内的台风业务预报能力, 试验于1984年3月在日本召开小结会后结束.

(2) 台风转向和异常运动的特别试验(SPECTRUM-90). 20世纪90年代, 针对业务中对打转等台风异常路径的预报困难, 国际台风界同时实施了3个观测研究科学试验: TCM-90、TYPHOON-90和SPECTRUM-90. 其中, SPECTRUM-90是由亚太台风委员会发起的科学试验, 旨在通过收集覆盖台风路径的观测资料, 研究弱环境引导气流或路径弯折时的台风路径特征及形成机理, 以提高台风路径预报的精度. 科学试验使用了包括卫星、多普勒天气雷达、风廓线雷达、地面观测站、观测船、浮标、海上石油平台和飞机下投探空等多种观测手段, 对1990年8~9月间的西北太平洋目标台风Winona(9011)、Yancy(9012)、Abe(9015)、Dot(9017)、Ed(9018)、Flo(9019)和Gene(9020)实施了加密观测, 获得了大量的台风条件下的大气风温湿垂直廓线等实测资料. 中国和亚太台风委员会的大部分会员均参加了该项科学试验. 1990年12月, 在日本东京召开了SPECTRUM-90试验的指导评估委员会及第1次技术会议, 1991年11月在广州召开了试验的第2次技术会议, 并于1993年10月在上海召开第3次技术会议.

4.5 实施国家台风重大科研攻关(1991~)

中国的台风科研攻关始于1972年建立的“全国台风科研大协作”及在国家气象局设立的“全国气象科学基金会台风专项(简称‘台风基金’)”. 1986年国务院“国家自然科学基金”设立后, 每年也有涉及台风的研究项目, 但主要依托科学家自由申请, 系统性和持续性稍显不足.

鉴于此, 1991年中国气象局联合中国科学院和国家教委, 向国家科技委提交关于“台风、暴雨灾害性天气监测、预报技术研究”的申请并获批准, 列为国家“八·五”科技攻关85-906项目, 并设立“台风及其灾害天

气预报方法研究”和“台风科学、业务试验和天气动力学理论研究”以及“台风与暴雨”等3个独立的台风课题. 经5年协作攻关, 在台风监测、数值模式和台风风雨及灾害机理认识等方面均取得了显著进展, 成果汇编成册出版. 在此基础上, 对台风路径的客观预报和数值预报方法开展了较深入的研究, 成果丰硕, 如: 上海台风研究所发展了台风路径的统计-动力相结合预报方法(SD-75、SD-85、SD-90)、基于典型相关的集成预报方法、作为预报性能评定基准的气候持续性预报方法(CLIPER), 江苏、浙江、福建、广东、广西和海南等沿海省局发展的基于数值模式的统计订正和释用预报方法、人工神经网络应用、概率圆法决策、引用多维动态关联模型、用卡尔曼滤波改进基于预测误差平方和最小准则的预测模型、中期路径趋势预测模型等, 国家气象中心、上海和广州区域气象中心、辽宁省气象局等还研制建立了西北太平洋、东海、南海和黄渤海的台风数值预报模式, 且均投入了业务应用. 其中, 数值模式、人工神经网络、概率圆等预报方法后续不断改进一直沿用至今, 对于提高中国台风业务预报能力发挥了重要作用.

1996年, 中国气象局联合中国科学院、教育部、农业部、水利部向国家科技委申请“中国短期气候预测系统的研究”, 获批并列为国家“九·五”重中之重科技攻关96-809项目, 其中包括“台风气候研究”的专题. 经5年协作攻关研究, 将成果构建成国家和区域第一代短期气候监测、预测、评价和服务业务系统, 其中包含台风短期气候预测系统.

2001年, 中国气象局主持的“新一代数值天气预报模式研发”列为国家“十·五”攻关任务, 上海台风研究所在其研发的GRAPES模式基础上, 通过嵌入台风Bogus、改进模式积云参数化方案等技术手段, 改造成为GRAPES-TCM台风模式, 并自2003年投入业务应用至今. 同期, 国家气象中心发展了基于全球模式的台风预报(T213/T639-TCM), 广州热带海洋气象研究所发展了南海区域台风模式(TRAMS), 也都投入业务应用至今. 此后, 科技部先后设立涉及台风资料处理、台风强度预报、台风风雨分布及灾害评估等方面的基础性、社会公益性科研专项及公益性行业(气象)专项, 极大地推动了中国台风科研的深入和业务关键技术的研发.

4.6 参与台风命名规则的制定(1997~)

20世纪早期, 澳大利亚预报员(克里门兰格)给每个热带气旋都取一个他不喜欢的政治人物, 借此公开地戏称之。由于便于记忆和防台减灾信息的传播, 给台风命名的做法很快被美国采用。对西北太平洋的台风正式以人名进行命名始于1945年, 命名由美国联合台风警报中心(Joint Typhoon Warning Center, JTWC)负责。起初只用女人名, 后因受女权主义者的反对, 从1979年起, 改用男人名和女人名交替使用。

为了避免台风名称的混乱, 1997年11月25日至12月1日, 在香港举行的亚太台风委员会第30次年会上, 香港天文台(Hong Kong Observatory, HKO)提议, 采用亚洲风格的名字对西北太平洋(含南海)的台风进行命名, 以便于亚太地区的民众记忆和对台风逐渐接近时提高警惕从而增加警报的效用, 得到多数会员的积极响应和支持。

会议最终决定, 西北太平洋和南海的台风(达到热带风暴及以上等级的热带气旋)采用具有亚洲风格的名字进行命名, 各会员预先提供10个名称, 并按会员名的英文字母顺序(柬埔寨、中国、朝鲜、中国香港、日本、老挝、中国澳门、马来西亚、密克罗尼西亚、菲律宾、韩国、泰国、美国以及越南)排列组成命名表, 同时规定一旦某个台风对于生命财产造成了特别大的损失或人员伤亡而声名狼藉, 则将该名称从命名表中删除(或称“除名”), 其他台风不再使用这一名称, 也就是将这个名称永远命名给这个台风了, 空缺的名称则由原提供会员再重新推荐, 并经第二年的亚太台风委员会年会审议后进行增补。会议还决定从2000年1月1日起开始使用新的命名方法, 并改由亚太区域台风中心(RSMC-东京)具体负责日常的命名。

4.7 重组中国气象局上海台风研究所(2001~)

在国家级公益性研究院所的改革试点工作中, 2001年12月, 为更好地满足国家防台减灾战略新需求, 经国家科学技术部、财政部、中央编制办公室和中国气象局批准, 在原上海市气象科学研究所(上海台风研究所)的基础上, 重组为中国气象局的8个国家级公益性研究所之一, 并改名为中国气象局上海台风研究所, 以加强台风基础研究、应用基础研究和核心预报关键技术研发, 并逐渐建设成为专业特色突出、国内一流

并具有一定国际影响的台风科研机构和高水平台风专业人才的培养基地。

经过四轮为期16年的建设, 目前中国气象局上海台风研究所已形成了台风、海洋气象和区域数值预报3大优势学科领域。在台风机理研究、台风预报关键技术研发、台风条件下的海气相互作用、台风及区域数值天气预报、台风年鉴资料整编及台风定位定强和预报性能评定等方面取得一批重要创新成果, 在推进中国台风学科建设和业务技术发展等方面作出了重要贡献。据不完全统计, 国家级的台风科研项目、国家一级核心期刊相关台风的科研论文、参加全国发报的台风业务客观预报方法中, 约有一半出自上海台风研究所。

此外, 作为中国气象学会台风专业委员会的挂靠单位及全国台风海洋专家工作组的副组长单位, 中国气象局上海台风研究所还继承了“台风年鉴”整编、“定位定强及预报性能”评估及“全国台风科学讨论会”组织等中国气象局委托的相关业务工作。重组以来, 共组织召开了7次全国台风科学讨论会(第12~18届), 并代表中国气象局参与并在国际台风学术交流和技術合作中发挥着重要作用。

4.8 登陆台风外场观测试验(2002~)

中国的台风外场观测试验始于1982年参与的国际台风业务试验(TOPEX)。后在参与SPECTRUM-90期间, 结合国家“八·五”科技攻关计划的研究, 于1993~1994年汛期实施了“台风现场科学业务试验(CA-TEX)”, 并获得路径摆动、移向突变和双台风互旋等异常特征的8个登陆台风的大量探测资料, 据此研究台风路径、结构和强度突变及台风暴雨增幅机制和预报方法等, 取得新成果。

2002年, 依托科技部批准实施的“中国登陆热带气旋现场试验(CLATEX)”, 由中国气象科学研究院的陈联寿主持, 在广东省气象局的参与下, 在广东海陵岛基地设置多普勒雷达、风廓线仪、多普勒声雷达、超声风速温度仪、光学雨量计等探测设备, 对0214号登陆台风“黄蜂”实施了外场观测试验, 获取了台风内核外的边界层结构资料(含登陆点附近用三维超声风速仪CSAT3测得的近中心三维风速资料)。

2005年, 中国气象局上海台风研究所装备了一台集多种探测设备于一体的“追风”观测车, 用以跟踪探测登陆台风。自2007年首次在登陆点探测到“圣帕”和

“韦帕”台风完整的登陆过程以来, 共对20余个登陆台风实施了准业务的“追风”观测, 获取的目标台风资料包括: 基于微波辐射计探测的气温、相对湿度和水汽密度的高度-时间剖面图、基于移动GPS探空仪探测的风向风速随高度变化等。

2008年, 中国气象局(大气探测中心)组织国内多家无人机制造商实施了低空无人机探测台风的试验, 发现一款无人机能安全返回并带回正常的探测数据, 2014年上海台风研究所对该无人机进行了起飞技术改进, 并于2014年和2015年实施了台风探测试验。2009年, 中国(大陆)开展了首例有人飞机飞越0907号“天鹅”台风的下投探测试验, 并获成功。

4.9 召开登陆台风香山科学讨论会(2006~)

2006年4月, 中国气象局上海台风研究所策划召开了以“登陆台风的科学问题及防灾减灾对策”为主题的第275次香山科学讨论会。会议共设“台风有效预警关键技术和科学问题”“近海(登陆)台风的突变机制”“全球气候变化背景下台风活动的变化趋势”及“防治减灾的现状和科学问题”等四个中心议题, 由中国气象科学研究院陈联寿院士担任会议执行主席, 来自台风和防灾减灾领域的国内外专家、学者共45人参加了本次会议(赵生才, 2006)。

会议建议: (1) 提高登陆台风科学问题的认识。国家应为登陆台风研究设立持续的研究专项, 开展登陆中国台风的外场科学试验, 获取丰富资料, 揭示登陆台风变化机理。(2) 对近岸(海)台风实行飞机探测, 以改进科研和业务预报。应尽快进入专用气象飞机、气象船舶、浮标自动站综合立体探测台风的新阶段。(3) 加速发展海-陆-气模式耦合的台风数值预报系统, 尽早着手研制台风暴雨的集合预报方法、台风风雨袭击概率预报方法, 以提高台风强度、台风暴雨、台风大风等的预报水平。(4) 加强气象与海洋、水文、地质等有关部门的紧密合作。(5) 加强台风灾害风险诊断、预估方法以及防灾系统的研究, 特别是与防灾相关的灾情、防灾预案及减灾决策研究。(6) 深入开展国际合作、省际合作, 以及科研、业务和教育部门合作, 建立交流平台, 推进登陆台风科学研究。

4.10 组建国家台风与海洋气象预报中心(2007~)

为加强国家级的台风与海洋气象预报预警业务及

服务工作, 2007年中国气象局组建了中央气象台台风与海洋气象预报中心(简称“台海中心”), 主要负责西北太平洋和南海台风的监测、分析、预报、预警和服务, 负责中国近海海上大风、海雾、近海强对流等海洋灾害性天气监测预警。

自成立以来, 台海中心始终坚持提高预报准确率和提升服务效益的发展理念, 不断钻研台风监测预警技术。经过十年不懈努力, 已建立了以各类数值预报为基础、以MICAPS系统为平台、结合客观预报方法和预报员经验的业务流程。同时, 还开发了具有自主知识产权的台风路径集合预报订正方法TYTEC、基于数值模式和卫星反演资料相结合的台风风圈半径客观分析方法、基于国内外气象卫星的台风强度客观估计系统和台风客观定位系统、基于数值模式和台风特征物理量阈值相结合的南海台风生成预报方法等。

近年来, 中国台风预报预警业务取得长足进步, 台风预报时效不断延长、精细化程度不断提升、准确率不断提高。24小时台风路径官方预报误差, 较20年前减少了50%, 10年前(2007年)约为150km, 至2015年已不足70km(图7)。此外, 台海中心还代表中国气象局履行相关国际义务, 如: 通过GTS参与台风监测预警信息国际交换、为全球海上安全和遇险系统(GMDSS)XI海事卫星覆盖区制作和发布海洋气象预报警报、开展南海台风国际会商和区域联防、举办面向亚太台风委员会成员的台风业务国际培训等。

5 近十多年的新进展

随着中国经济社会的快速发展、中国气象局气象现代化建设及服务防灾减灾国家战略等重点工作的推进, 中国的台风科研、监测和预报预警水平不断提高, 服务国家防台减灾需求的针对性及参与国际台风“治理”能力不断增强。

5.1 台风双边国际合作(2008~)

近年来, 中国的双边台风国际合作趋于活跃。自2008年, 上海台风研究所作为中国的牵头单位(中央气象台台风与海洋气象预报中心、南京大学、南京信息工程大学、中国科学院大气物理研究所等参加), 与韩方的代表(韩国气象厅国家台风中心), 共同实施“中-韩”双边台风合作交流。双方派遣台风专家互访, 并组

图7 1985~2017年中国气象局台风路径预报误差
王靖等(2018)

组织召开每年一度的联合台风研讨会(China-Korea Joint Workshop on Tropical Cyclone, C-K JWTC), 交流研讨会由双方牵头单位轮流承办, 至2017年已召开了10次。中-韩双边台风交流机制, 增进了友谊, 促进了学术交流和台风科技成果的共享, 及时交换对亚太台风委员会相关事务的意见并达成共识。

自2011年, 上海台风研究所还承担了中国“中-美”台风双边合作交流任务, 美方合作单位是飓风研究中心(Hurricane Research Division, HRD)。双方重点围绕台(飓)风观测研究开展专家互访和学术交流, 并通过上海台风研究所承担的国家自然科学基金国际合作项目和WMO示范项目等, 开展联合研究。

此外, 上海台风研究所和国内各主要从事台风研究的机构, 还与美国夏威夷大学、美国飓风中心(National Hurricane Center, NHC)和澳大利亚气象局等国际知名台风科研业务机构建立了广泛而友好的合作交流。

5.2 台风973计划项目(2009~)

2006年召开的“香山科学会议”第275次学术讨论会促成了中国第一个针对台风的国家重点基础研究发展计划(973计划)项目“台风登陆前后异常变化及机理研究”于2009年立项。该项目由中国气象局上海台风研究所主持, 中国气象科学研究院、中国气象局广州热带海洋气象研究所、南京大学、南京信息工程大学和中国科学院大气物理研究所参加。项目针对导致台风登陆前后异常变化的环境场、海洋和陆面、内部中尺度系统等影响因子的变化特征及演变规律, 海-陆-气相互作用引起台风登陆前后异常变化的物理机制, 登

陆台风卫星和雷达观测资料的定量应用理论和方法及台风模式的海-陆-气耦合方法等科学问题, 经过5年的攻关, 系统性地开展了16个台风的外场观测试验, 在浅水区的海气拖曳系数、边界层高度变化等方面获得新的观测结果; 发展了针对登陆台风的多源资料融合方法, 台风雷达风场反演和同化技术取得进展; 揭示了不同尺度系统活动导致台风路径突变、登陆台风复苏、双眼壁的形成等的物理机制; 改进了模式涡旋初始化和积云对流参数化技术, 提出了新的云辐射参数化方案, 建立了台风海-陆-气耦合模式(端义宏等, 2014)。

海洋过程对于台风的发生发展, 特别是强度变化非常重要, 为进一步提高台风条件下的海气相互作用过程及其对台风强度的影响, 中国气象局上海台风研究所与国家海洋局第二海洋研究所等单位联合, 针对上层海洋的多尺度环流系统对台风的响应、上层海洋的动力和热力结构对台风强度的调制作用等科学问题, 于2013~2017年间, 开展国家重点基础研究发展计划(973计划)项目“上层海洋对台风的响应及调制机理研究”的联合研究(国家海洋局第二海洋研究所主持, 中国气象局上海台风研究所参加并承担台风海气浪耦合模式的研发)。经过5年的攻关, 在南海北部布放了5套实时通讯锚定浮标观测阵列、50个左右Argo浮标, 并发展了其他针对台风海气相互作用的观测系统; 阐明台风过境时海洋中尺度涡的响应特征和激发机制; 提出并确定了台风的“热泵”和“冷抽吸”作用对海洋层结的不同影响; 刻画了台风过境时上层海洋环境的变异特征及调整过程; 发展针对台风过程的海洋多尺度三维变分多源数据同化方法; 在2009年立项的973项目建立的台风海气耦合模式的基础上, 建立台风海-气-浪耦合模式及集合预报系统, 改进了模式的台风路径预报精度, 也提高了台风强度的模式预报能力(陈大可等, 2013)。

针对国家防台减灾对台风精细预报和影响评估的新要求, 2015年再次设立国家重点基础研究发展计划项目“登陆台风精细结构的观测、预报与影响评估”。该项目由中国气象科学研究院主持, 中国气象局上海台风研究所、中国气象局广州热带海洋气象研究所、南京大学、南京信息工程大学和中国科学院大气物理研究所参加。项目旨在通过登陆台风精细结构的外场观测, 进行登陆台风精细结构的多源资料分析理论和

方法研究, 探索登陆台风精细化结构演变规律及其对风雨分布的影响机理, 发展高分辨率的台风数值预报模式关键技术, 开展台风灾害影响(预)评估方法研究等, 揭示环境因子及其自身内部的多尺度系统相互作用如何影响登陆台风精细化结构的演变, 以及精细结构的演变如何影响台风风雨强度和分布, 力争提高登陆台风精细结构的模拟、预报和影响评估能力(端义宏, 2015).

5.3 登陆台风预报示范项目(2009~)

2009年, 第2届台风登陆过程国际研讨会(International Workshop of Tropical Cyclone Landfall Process, IWTC-LP)在上海召开, 中国气象局上海台风研究所承办了此次会议, 并在会上向WMO提议实施“WMO登陆台风预报示范项目(Typhoon Landfall Forecast Demonstration Project, WMO-TLFDP)”, 为2010年5月1日至10月31日(正值台风汛期)在上海举办的第41届世界博览会(EXPO 2010)提供先进的台风预报和预警服务. 2009年11月, WMO批准该项目自2010年起实施, 并由中国气象局上海台风研究所、华东区域气象中心和WMO东京区域台风中心联合牵头, 中国气象局国家气象中心、广州热带海洋气象研究所、香港天文台和韩国气象厅等十余个机构参加. WMO要求项目加强对登陆台风预报可信度的研究, 开展当前国际登陆台风预报性能的评估, 为实际预报业务提供更有应用支撑, 推进先进预报技术在WMO成员的业务转化和应用. WMO还决定该项目由WMO世界天气研究计划(WWRP)、热带气旋计划(TCP)和公共天气服务计划(PWS)联合支持和指导, 并作为WMO“上海多灾种早期预警项目”的一个组成部分(Tang等, 2012).

项目自2009年立项以来: (1) 收集全球各主要机构(含欧洲中期天气预报中心、美国联合台风预警中心、WMO-东京台风中心、香港天文台、韩国气象厅等共13家)自2010年5月以来对西北太平洋台风的实时预报产品(含台风路径、强度和风雨分布等), 并建立了共享平台(项目网站); (2) 联合WMO预报性能评估专家小组, 并通过奖学金计划与亚太地区科学家联合, 研制建立和完善了台风路径、强度、降水、登陆点及集合预报等预报性能评估技术体系, 主要成果已被WMO相关技术手册收录并向全球推广(Yu等, 2012); (3) 基于WMO认可的评估技术, 评估了全球各主要机

构对西北太平洋台风的预报性能, 所有性能评估信息均可通过项目网站实时共享; (4) 借鉴全国台风海洋专家工作组的工作机制(即由台风所评估全国台风业务预报方法的精度, 并据此确定来年准入业务的台风预报方法), 自2013年起在亚太台风委员会一年一度的届会上发布“亚太地区台风预报性能年度评估报告”, 现已成为亚太台风委员会制定其战略发展目标及下年优先工作计划的重要依据(Chen等, 2013); (5) 在此基础上, 研制基于集成员初期预报性能的优选集合预报技术, 取得满意的试验效果, 并已在业务应用中得到推广(Qi等, 2014).

WMO-TLFDP立项之初的主要目的是为EXPO 2010服务, 原计划的执行周期为3年(2010~2012年). WMO分别在2012年、2015年WMO-TLFDP成果小结及面向亚太预报员的培训会上, 对项目的执行效果及业务应用推广需求进行了评估, 并两度决定延期, 即继续由中国气象局上海台风研究所牵头实施第二期TLFDP-II(2013~2015)和第三期TLFDP-III(2016~2018)(雷小途和余晖, 2015). 目前, WMO希望再度延期, 即执行第四期TLFDP-IV(2019~2021).

5.4 台风气候变化评估报告(2010~)

随着IPCC评估报告的深入影响, 全球气候变化背景下台风是否增多增强等已成国际广泛关注的热点, 科学界争论不休(雷小途等, 2009b). 作为地区性权威官方国际组织的亚太台风委员会, 理应发出自己的声音.

鉴于此, 2009年亚太台风委员会气象工作组(working group on meteorology, 自2004年设立)在安排其年度优先工作计划时设立了“全球气候变化对亚太地区台风气候的影响评估”项目, 并组建了由中国(上海台风研究所)、日本、韩国、美国和中国香港的科学家组成的编写小组(台风所的专家任组长, 中国澳门的专家任联络员), 旨在研究并发布官方而专业的评估报告. 有别于IPCC评估报告仅依据已发表的论文进行评述, 亚太台风委员会的评估报告还将包括亚太地区各国的业务分析结果, 特别是台风对亚太台风委员会会员的风、雨、风暴潮、灾害损失等影响, 并分析不同机构整编的最佳数据集(目前主要有中国气象局上海台风研究所、日本东京台风中心、美国联合台风预警中心、中国香港天文台整编的西北太平洋区域的台

风资料集)在台风定位定强上的差异及其对评估结论的影响。

项目设立以来,以亚太台风委员会的名义分别于2010年和2013年发布了第一、第二份评估报告(TC-AR1, TC-AR2),对亚太地区台风频数、强度和移动(路径)趋势等进行了客观评估,主要结论发表在《Tropical Cyclone Research and Review》上并被IPCC的第5次评估报告(IPCC-AR5)引用,受到国际台风界的高度关注和好评(Lee等, 2010, 2012; Ying等, 2012; Lee, 2012)。

第3次评估报告(TC-AR3)已于2014年启动,目前已拟定了报告的编写计划和报告提纲、收集了相关领域的科研论文及委员会各成员以本地语言发表的论文、完成了相关章节的初稿。2018年12月召开编写专家组会议,报告将于2019~2020年IPCC的第六次评估报告(IPCC-AR6)之前发布。

5.5 台风专业学术期刊(2012~)

台风位居全球十大自然灾害之首,但却没有一本专门针对台风的专业学术期刊。有鉴于此,为更好更全面更及时地发表台风各相关领域的科学研究和业务技术开发的进展,促进科技成果的业务转化和亚太及全球台风灾害联防,中国气象局上海台风研究所于2009年提议,并经过近3年的策划,于2012年创办了台风领域唯一的国际学术期刊《Tropical Cyclone Research and Review》(TCRR)。该刊为季刊(国际期刊号: 2225-6032),编委会由国际知名台风科学家及亚太台风委员会相关会员的业务专家等组成,编辑部设在中国气象局上海台风研究所。

TCRR自2012年创刊以来,便设置了客座编辑制度,即由亚太台风委员会和中国气象局上海台风研究所共同资助,邀请亚太台风委员会的会员派专家赴编辑部进行客座访问并承担部分编辑工作,以加强国际台风专家的交流合作并扩大期刊的影响。至今,已有12位来自韩国、泰国、菲律宾、美国、越南和老挝等会员的专家应邀来访并进行客座编辑工作,在扩大期刊影响特别是及时发现和推介亚太台风委员会会员的优秀科技论文等方面,发挥了积极作用。

TCRR创刊以来,始终坚持国际一流期刊的高标准,始终坚持编委会、审稿专家和作者的国际化,至今已发表100多篇高水平的台风专题研究论文,受到

亚太台风委员会及WMO等的好评和国际台风界的广泛关注,美国、澳大利亚等国的作者和读者群不断增加(美国的全文下载数超过总量的50%)。创刊以来也受到文献类机构的高度关注,如与科爱科技服务有限公司签署关于TCRR推介的合作协议,借此扩大期刊的传播渠道。此外,继中国知网(CNKI)收入其期刊全文数据库后,TCRR还于2017年正式成为“新兴资源引用索引(Emerging Sources Citation Index, ESCI)”的源刊。

此外,在WMO的大力支持下,TCRR还结合国际台风界的重大活动及重要学术交流会议编辑出版专刊。例如,为纪念亚太台风委员会成立50周年,TCRR出版特刊,并于2018年2月在越南召开的亚太台风委员会第50次届会上发布;为配合WMO第4次台风登陆过程国际研讨会(IWTCLP-4)的召开,出版专刊。还策划为2018年12月召开的WMO第9次国际台风研讨会(IWTC-9)出版专刊。

5.6 国际台风科学试验(2014~)

随着卫星和数值模式等技术的进步,台风路径预报精度显著提高,但强度预报水平进展缓慢。有鉴于此,2013年在香港召开的亚太台风委员会第45次届会上,中国气象局(上海台风研究所)联合香港天文台提议在亚太地区联合实施针对亚太近海台风强度变化的科学试验,获得亚太台风委员会第46次届会(2014年2月,泰国曼谷)的批准,并决定由上海台风研究所和香港天文台联合牵头实施“亚太近海台风强度变化科学试验(EXOTICCA)”项目。

EXOTICCA项目设立了由亚太台风委员会咨询工作组(AWG)和参与会员代表组成的项目组织委员会,组长由中国气象局的矫梅燕副局长出任(香港天文台的黎守德助理台长任副组长),并分别于2015年和2017年在上海召开了第一和第二次组委会的会议,同时设立了由中国气象科学研究院的陈联寿任主任、美国资深台风观测研究专家Peter Black任副主任的项目科学指导委员会。项目首席科学家由上海台风研究所的雷小途和香港天文台的黄伟健担任。

项目实施以来,在台风探测技术研制、台风外场观测和近海目标台风结构和强度变化特征(特别是台风条件下风随高度的变化、不同时距平均风速间的转换等)示范应用研究方面,取得了较明显进展。

(1) 新型台风探测技术研发. 联合中国航天科工集团, 于2015年研发了利用火箭/导弹作为运载工具的台风下投探测系统, 实施了试验并获成功, 受到国际社会的高度关注(雷小途等, 2017); 与相关无人机公司合作, 于2014年完成小型低空无人机的改装, 并于2014、2015年进行飞行测试, 表明经“弹射”起飞改装后的小型无人机, 无需跑道及运载车助跑, 可在中国沿海丘陵地形及台风条件下起飞; 与国家海洋局合作, 于2014年在南海北部地区布设了5个浮标组成的浮标观测阵(含海洋、大气边界层要素观测设备); 自2014年先后购置了风廓线仪、微波辐射计、GPS自动探空仪及雨滴谱等观测仪器, 并布设在“华东登陆台风外场观测基地”及“大陈岛台风外场观测试验基地”等东南沿海. 香港天文台自2012年利用海上搜救飞机进行台风探测, 2016年完成了(有人)飞机的下投探空系统改装. 此外, 项目还升级了上海台风所原有的“追风”观测车(增加了车载气象探测设备、提升了整车抗风等性能), 布设了自动探空系统, 改造了近海海上百米测风塔, 设计了基于高空军用无人机的改装(包括提高升限至12~15km、延长航时至6h以上等)和基于“人影火箭”的下投探空等的改装技术指标体系, 相应的改装工作已经启动并可望在未来1~2年内进行测试.

(2) 协同观测方案研究及目标台风的外场观测. 对2014~2016年间的10个目标台风实施了外场协同观测试验, 获取了1416号“凤凰”等8个目标台风登陆前后的探空、边界层风廓线和雨滴谱等第一手的直接观测资料, 1409号“威马逊”和1415号“海鸥”台风过浮标阵前后的海面风和表层流等海-气通量相关探测资料, 1509号“灿鸿”台风登陆过程边界层(400m低空)结构的无人飞机探测资料, 1522号“彩虹”台风强度和内核结构的火箭弹(导弹)抛撒下投探空资料. 香港天文台成功获取了1510号“莲花”、1522“彩虹”、1604号台风“妮妲”和1608号台风“电母”的飞机观测资料.

(3) 外场观测资料示范应用研究. 基于外场观测资料, 开展了“莫兰蒂”“莎莉嘉”和“鲇鱼”等目标台风登陆过程中的边界层结构(含边界层高度等)变化及近地层湍流动量垂直通量逆梯度输送等特征, 重点分析了台风登陆前后风随高度变化、修订了台风不同时距风速间的转换关系, 并在《热带气旋年鉴》整编及Dvorak台风定强技术的改进等业务中得到应用. 此外, 外场

观测资料的价值, 除了通过提高台风过程的认识并对相应的参数化方案进行修改进而提高模式的预报能力外, 项目还进行了外场观测资料直接同化至模式的数值试验, 结果表明对台风路径和强度的模拟预报均有正贡献. 美国资深飓风观测研究专家(Peter Black)及飓风研究中心的张俊等科学家参与了外场观测资料质量控制和诊断分析等的国际合作(获国家自然科学基金及科技部国际合作重点项目资助), 泰国、越南、菲律宾和马来西亚先后派专家参与了外场观测资料的示范应用研究.

5.7 火箭/导弹下投探测台风新技术(2015~)

由美国主导的飞机飞越台风的观测, 特别是飞机的下投探空观测, 是当前获取台风内部精细结构特征的最有效的直接探测手段, 对台风定强和台风科研及业务预报具有重要价值, 敏感区的下投探空可使2~3天内的模式预报误差减少约30%. 然而, 实际业务中的台风敏感区及敏感要素因台风而异且随时间变化较快, 飞机花费1~2小时飞抵时原本敏感的区域已不再敏感的情况也并不鲜见, 从而导致几乎“无效”的飞机下投观测.

有鉴于此, 依托国家公益性行业(气象)专项, 中国气象局上海台风研究所联合航天科工集团, 创新性地设计研制了基于火箭弹(导弹)作为运载工具的台风下投探空技术(如图8所示), 解决了高速飞行中下投探空仪的“抛撒”、平稳下落及秒级数据的采集和传输等关键技术. 依托火箭/导弹的快速飞行性能, 实现了台风探测的“即要即测”(6min之内抵达300km内的任何敏感区, 并可采用大功率导弹抵达1500km内的指定位置, 位置精度达米级). 此外, “子母弹”技术的应用使得同时获取台风不同区域的结构及其变化的直接观测事实成为可能.

依托国际合作项目“亚太近海台风强度变化科学试验(EXOTICCA)”, 上海台风研究所联合中国航天科工集团、海南省气象局、香港天文台等, 于2015年成功实施了全球首例火箭/导弹下投探测台风试验, 即将下投探空仪搭载至导弹上, 利用车载导弹发射平台发射导弹, 在导弹飞越目标台风(1522号“彩虹”)的过程中多点“抛撒”探空舱, 并利用“子母弹”技术“弹射”出多个下投式探空仪(每个探空舱可“弹射”出多下投式探空仪).

图8 火箭弹探测台风技术示意图

(a) 火箭弹改装示意图; (b) 火箭弹探测台风示意图. 引自雷小途等(2017)

6 展望

中国社会经济快速发展对防台减灾的新需求牵引着中国台风学科发展和监测预警业务能力的不断进步, 客观上增强了服务国际社会和参与国际台风“治理”的能力。

近年来, 针对缺乏台风结构直接观测资料这一制约中国台风研究和业务水平进一步提高的瓶颈, 中国科学家先后组装“追风”观测车、试验飞机(含有人飞机及低空无人机)观测和浮标观测阵、建设近海梯度观测塔、创新研制火箭/导弹下投探空系统等, 并正改装中高空无人机、创新研制平流层飞艇等新型台风探测技术。为在中国漫长海岸带地区实施近海及登陆台风外场观测, 近年来还在业务观测站网基础上, 先后在广东省茂名市电白县的博贺镇、福建省宁德市霞浦县三沙镇沿海建设国家级海洋气象野外观测基地和国家级华东登陆台风外场观测基地。后者是“一站多点”式的综合观测基地, 包括三沙镇三凹村的基地本场、浙江省台州市大陈岛观测站及浙闽沿海的梯度观测塔。此外, 针对南海和东海近海台风的活动特征, 还分别在海南省万宁县和舟山-宁波及福州沿海设置了台风外场观测作业点。当前, 科技部及中国气象局正在组织台风观测方面的国家重点研究专项及军民融合计划项目, 将实施基于高空无人机、火箭/导弹、平流层飞艇及海上半潜艇等多平台的协同观测试验, 以弥补中国台风直接观测资料缺乏的瓶颈。

结合WMO-TLFD项目的实施和与WMO评估专

家组的合作, 中国气象局上海台风研究所已建立并不断完善台风预报性能评估技术体系, 自2013年起对亚太地区的台风预报性能进行评估, 年度评估报告在亚太台风委员会年会发布并成为其战略目标及年度优先工作计划设计的重要依据。在此基础上, 中国气象局正在申请成为WMO的台风预报性能评估领导中心(leader center-tropical cyclone forecast verification, LC-TCFV)。

针对南海台风生成后很快就可能登陆的特点, 结合“海上丝绸之路”防台减灾新需求, 近年来中国气象局加强了多源观测资料在台风定位定强中的应用研究, 对延长南海登陆台风的有效防御时效意义重大。目前正在积极申请和建设WMO南海台风预警中心。此外, 2012年依托WMO南京区域培训中心, 中国还在南京建立了亚太台风委员会台风培训中心, 开展面向亚太台风委员会会员及WMO成员的台风预报新技术培训。

在可以预见的将来, 中国已具备实施台风领域的大科学试验及国际合作条件, 并将推进台风学科发展和监测预警业务水平将进一步提高, 从而进一步增强服务国际社会和参与国际台风“治理”的能力。

值得注意的是, 美国在台风领域的先进装备、技术积累和一流人才队伍等在一定时期仍具有相当的比较优势。另外, 由于历史等原因, 日本东京仍是WMO亚太地区的区域台风中心。因此, 中国台风领域科技强国的建设前途光明, 但仍任重道远。当前, 迫切需要加强国家层面的顶层设计, 整合资源, 开展军民融合和国

际合作, 组建台风外场观测专业作业团队, 实施亚太台风大科学试验, 加强台风监测预警核心关键技术研究, 加强台风科技创新成果的业务转化和应用, 切实提高台风监测预警业务的科技支撑能力。

参考文献

- 陈大可, 雷小途, 王伟, 王桂华, 韩桂军, 周磊. 2013. 上层海洋对台风的响应和调制机理. 地球科学进展, 28: 1077–1086
- 陈德辉. 1995. 热带气旋数值预报新进展. 气象科技, 23: 7–12
- 陈光华, 裘国庆. 2005. 热带气旋强度与结构研究新进展. 气象科技, 33: 1–6
- 陈联寿. 1979. 中国台风预报和研究的进展. 气象, 5: 1–4
- 陈联寿. 2010. 热带气象灾害及其研究进展. 气象, 36: 101–110
- 陈联寿, 孟智勇. 2001. 中国热带气旋研究十年进展. 大气科学, 25: 420–432
- 陈联寿, 罗哲贤, 李英. 2004. 登陆热带气旋研究的进展. 气象学报, 62: 541–549
- 陈联寿, 孟智勇, 丛春华. 2017. 台风暴雨落区研究综述. 海洋气象学报, 37: 1–7
- 程正泉, 陈联寿, 徐祥德, 彭涛涌. 2005. 近10年中国台风暴雨研究进展. 气象, 31: 3–9
- 丛春华, 陈联寿, 雷小途, 李英. 2011. 台风远距离暴雨的研究进展. 热带气象学报, 27: 264–270
- 端义宏, 余晖, 伍荣生. 2005. 热带气旋强度变化研究进展. 气象学报, 63: 636–645
- 端义宏, 陈联寿, 梁建茵, 王元, 吴立广, 崔晓鹏, 马雷鸣, 李青青. 2014. 台风登陆前后异常变化的研究进展. 气象学报, 72: 969–986
- 端义宏. 2015. 登陆台风精细结构的观测、预报与影响评估. 地球科学进展, 30: 847–854
- 董克勤. 1980. 上海国际台风学术讨论会简况. 气象, 6: 33
- 费亮. 1982. 中国台风科研和业务预报的回顾及现状. 气象, 15: 9–15
- 雷小途. 2011. 全球气候变化对台风影响的主要评估结论和问题. 中国科学基金, 25: 85–89
- 雷小途, 陈佩燕, 杨玉华, 钱燕珍. 2009a. 中国台风灾情特征及其灾害客观评估方法. 气象学报, 67: 875–883
- 雷小途, 徐明, 任福民. 2009b. 全球变暖对台风活动影响的研究进展. 气象学报, 67: 679–688
- 雷小途, 余晖. 2015. WMO登陆台风预报示范项目研究进展. 气象科技进展, 5: 18–23
- 雷小途, 雷明, 赵兵科, 王江, 汤杰, 高辉文, 曾智华, 李国兰, 罗建平, 吴敏, 余晖, 叶雷, 方平治, 杨道安, 张帅, 邹勇波, 周鄂炯, 林立旻, 陈平, 钟业诚, 石保平, 何海龙, 李运生, 杨晓晖, 赵涛, 鲍旭炜, 刘卓, 陈国民, 郭华明, 吴丹, 黄飞, 王建军, 罗珊, 伊蕾. 2017. 火箭弹下投探测台风气象参数新技术及初步试验. 科学通报, 62: 3789–3796
- 李荣, 冯爱珍. 2006. 台风的本字. 科技术语研究, 8: 59–60
- 梁有叶, 张德二. 2007. 最近一千年来中国的登陆台风及其与ENSO的关系. 气候变化研究进展, 3: 120–121
- 刘建利. 1999. 台风小考. 海洋世界, 8: 26–27
- 任福民, 吴国雄, 王小玲, 王咏梅, 董文杰, 梁进, 白莉娜. 2011. 近60年影响中国之热带气旋. 北京: 气象出版社
- 束家鑫. 1964. 蓬勃发展的气象事业. 气象通讯, 5: 23–25
- 王存忠. 2006a. 台风名词探源及其命名原则. 科技术语研究, 8: 58–63
- 王存忠. 2006b. 台风与飓风的异同. 科技术语研究, 8: 45–48
- 王继志. 1991. 近百年西北太平洋台风活动. 北京: 海洋出版社
- 王靖, 钱传海, 张玲. 2018. 2017年西北太平洋和南海台风活动概述. 海洋气象学报, 38: 1–11
- 杨元琴. 2001. 中国沿海台风百年遇重大灾害的poisson分布特征. 气象, 27: 8–12
- 竺可桢. 1922. 说飓风. 科学, 7: 883–894
- 张德二. 2004. 中国三千年气象记录总集. 南京: 凤凰出版社
- 张姚俊. 2009. 陈毅怒斥把台风警报当“机密”文件. 世纪, 3
- 中国大百科全书编委会. 1987. 中国大百科全书(大气科学). 北京: 中国大百科全书出版社
- 赵九章. 1959. 十年来中国气象学研究的进展. 气象学报, 30: 206–211
- 赵生才. 2006. 登陆台风的科学问题及防灾减灾对策——香山科学会议学术讨论会综述. 香山会议, 13
- Chen G M, Yu H, Cao Q, Zeng Z H. 2013. The performance of global models in TC track forecasting over the western North Pacific from 2010 to 2012. Trop Cycl Res Rev, 2: 149–158
- Emanuel K. 2005. Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. Nature, 436: 686–688
- Landsea C W, Harper B A, Hoarau K, Knaff J A. 2006. Can we detect trends in extreme tropical cyclones? Science, 313: 452–454
- Lee T C. 2012. A review on the long term variations of tropical cyclone activity in the Typhoon Committee region. Trop Cycl Res Rev, 1: 41–50
- Lee T C, Lee W J, Nakazawa T, Ying M. 2010. Assessment report on impacts of climate change on tropical cyclone frequency and intensity in the Typhoon Committee region. Macao: ESCAP/WMO Typhoon Committee (http://typhooncommittee.org/docs/publications/ESCAPWMOED_0001.pdf)
- Lee T C, Leung C Y, Kok M H, Chan H S. 2012. The long term variations of tropical cyclone activity in the South China Sea and the vicinity of Hong Kong. Trop Cycl Res Rev, 1: 277–292
- Liu J P, Yu J X. 2018. The chronicle of events of the ESCAP/WMO Typhoon Committee from 1968 to 2017. Trop Cyc Res Rev, 7: 70–81
- Qi L B, Yu H, Chen P Y. 2014. Selective ensemble-mean technique for

- tropical cyclone track forecast by using ensemble prediction systems. *Q J R Meteorol Soc*, 140: 805–813
- Tang X, Lei X T, Yu H. 2012. Progress report of the WMO Typhoon Landfall Forecast Demonstration Project (WMO-TLFDP). Shanghai: WMO Workshop and Training Course on Operational Tropical Cyclone Forecast
- Webster P J, Holland G J, Curry J A, Chang H R. 2005. Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment. *Science*, 309: 1844–1846
- Xu M, Yang Q Z, Ying M, Deng Z Y, Yang Z Z. 2012. Reconstruction on tropical cyclone affecting East China during 1450–1949 from historical documents. *Trop Cycl Res Rev*, 1: 482–488
- Ying M, Knutson T R, Lee T C. 2012. The second assessment report on the influence of climate change on tropical cyclone in the Typhoon Committee region. Macao: ESCAP/WMO Typhoon Committee. ESCAP/WMO TC/TD-No.0004 (http://typhooncommittee.org/docs/publications/ESCAPWMOTD_0004.pdf)
- Yu H, Chan S T, Brown B, Kunitsugu M, Fukada E. 2012. Operational tropical cyclone forecast verification practice in the western North Pacific region. *Trop Cycl Res Rev*, 1: 361–372

(责任编辑: 孟智勇)