

# 综合气象观测系统的发展

宋连春 李 伟

(中国气象局大气探测技术中心)

**提 要:** 回顾了气象探测发展史,分析了气象探测与气象预报、气象科学发展之间的紧密关系,指出了气象探测的发展推动了气象科学、气象预报和气象服务的发展;进一步描述了气象探测发展的现状,对于新技术的应用前景与气象仪器的未来发展趋势进行了分析与阐述,同时介绍了国际 GCOS、GEOSS、WIGOS 综合观测计划。

**关键词:** 气象观测 气象仪器 国际综合观测计划

## The Development of Integrated Meteorological Observation System

Song Lianchun Li Wei

(Atmospheric Observation Technology Center, CMA)

**Abstract:** To review the history of meteorological observation development, close relationship between meteorological observation and weather forecasting has been analyzed, and the result shows that meteorological observation development has promoted weather forecasting development. Furthermore current development of meteorological observation is described, the prospect of new meteorological observation technology application and the future trend of meteorological instrumental development are analyzed and depicted. Finally some international integrated meteorological observation plans such as GCOS, GEOSS and WIGOS are introduced.

**Key Words:** meteorological observation meteorological instrument international integrated meteorological observation plans

### 引 言

2008年世界气象日的主题是“观测我们的星球,为了更美好的明天”。气象观测是指

对地球大气圈及其密切相关的水圈、冰雪圈、岩石圈(陆面)、生物圈等的物理、化学、生物特征及其变化过程进行系统的、连续的观察和测定,并对获得的记录进行整理的过程<sup>[1]</sup>。气象观测具有准确性、代表性与可比

较性 3 个特点,要为气象预报预测、气象服务和气象科学研究提供高质量、可靠的观测数据<sup>[2]</sup>。

我们不仅面对台风、暴雨、干旱、高温、寒潮、沙尘暴、暴风雪、雷电、雾、霾和空间天气直接重大气象灾害,而且陆地、海岸带和海洋生态系统变化,农业的可持续发展和土地荒漠化问题,水资源缺乏问题,清洁能源的开发,保持生物多样性等等,均与气象工作有着直接或者间接的关系。IPCC 第四次报告表明,许多自然系统正在受到区域气候变化,特别是温度升高的影响,并且人为增暖已经对自然和许多生物系统产生了可辨别的影响<sup>[3]</sup>。因此我们要建立综合气象观测系统,把握天气气候变化的实况和造成的灾情,为弄清其变化机理,进而制作天气预报和气候预测提供可靠的依据。

## 1 气象观测发展概况<sup>[4]</sup>

气象观测是基础理论与现代科学技术相结合、多学科交叉融合的独立学科,处于大气科学发展的前沿。气象观测信息和数据是开展天气预警预报、气候预测预估及气象服务、科学研究的基础,是推动气象科学发展的动力。

1597 年,意大利物理学家和天文学家伽利略发明了空气温度表;1643 年意大利物理学家托里拆利发明了气压表;1662 年,英国的雷恩发明了虹吸式自记雨量计;1667 年英国物理学家和数学家胡克发明了压板式风速器;1783 年瑞士索絮尔发明了毛发湿度计。这些仪器以及其他观测仪器的陆续发明和不断改进,使气压、气温、大气湿度、风速等实现了定量观测,为大气科学的建立奠定了基础。气象要素的定量测量,尤其是气压表的发明,

使人们不仅获得了气压的概念,而且能够定量测出不易为人感知的大气压强,从而使研究气体状态方程、流体静力学方程和一切大气运动方程成为可能。1802 年拉马契克进行了云状分类,逐步发展了云和天气现象的目测内容。

观测站的建立,观测资料的积累,又使人们可以用图表等形式分析气象要素的空间分布和时间变化,为进一步研究大气环流和天气气候的变化提供了条件。而观测项目、观测时间和记录格式的统一,对于大气科学研究的进展具有非常重要的意义。意大利斐迪南二世于 1653 年在意大利佛罗伦萨建立了世界上第一个气象观测站;此后,德国医生卡诺尔德于 1717 年组织了国际性气象观测网。德国气象学家哈默尔在 1780 年代组建了由欧洲、北美洲和西伯利亚共 20 个国家的 57 个气象观测站构成的观测网,这个观测网的每个观测站都用统一的仪器、规范、观测时次和记录格式进行观测和记录,并将所得资料集中整理。从 1643 年到 20 世纪初的 200 多年里,地面气象观测得到长足的发展。

18 世纪中叶,人们开始进行高空探测的尝试。1748 年英国的威尔逊等人开始用风筝等携带温度表观测低空温度;1783 年法国的查理第一次用氢气球携带温度、气压等自记气象仪器测量各个高度的温度和气压等;1920 年代,随着无线电技术的发展,无线电探空仪的研制发展了高空探测技术,1928 年苏联莫尔恰诺夫发明无线电探空仪,大气探测扩展到更广阔的三维空间,探测高度可以达到 30km,而火箭探测的应用,可以将探测高度扩展到 100km。

大气遥感技术的发展极大地推动了大气探测的发展,扩展了大气探测的范围,提高了探测的连续性,突出标志是气象雷达与气象

卫星的应用。1941—1942年,出现了专门的云雨探测雷达,1960年4月,美国发射了第一颗气象卫星泰罗斯-1号。1960年代以来,声雷达、激光雷达、风廓线雷达、微波辐射计的研制与试验成功,拓展了获取高空三维空间气象信息的手段。随着电子传感器与单片机的发展,推动了气象观测的自动化进程,气象观测台站常规的温度、湿度、气压、风向、风速、辐射等气象要素实现了自动化观测,观测数据的稳定性、准确性与客观性都大为增强,观测数据实现了分钟级的采集,大大减轻了人工负担<sup>[5]</sup>。

随着气象仪器自动化程度的提高,多种遥测与遥感技术应用,一个崭新的现代地球大气探测系统已经展现在我们眼前。

## 2 气象观测推动了气象预报服务的发展

回顾历史,可以看到,地面观测系统的建立,形成了早期的天气图预报方法和有限能力的短期天气预报;全球高空气象探测网资料对于数值天气预报的发展做出了重要贡献;天气雷达网建设,有力地推进了中小尺度强对流天气的研究和短时临近天气监测预警的发展;而全球气象卫星观测网的形成,为地球系统科学研究和全球天气预报服务提供了实时覆盖全球的观测数据。每一次探测技术的革命性进步,都推动了气象科学与业务的巨大发展。

随着气象台站网的建立,使气象资料的组网应用成为可能。天气图的诞生,是近代气象学研究起点的标志。1851年,英国的格莱舍利用电报传送资料,绘制了天气图。法国巴黎天文台台长勒威耶在总结克里米亚战争黑海风暴事故天气原因的基础上,提出了组织气象台站网、开展天气图分析和天气预

报的建议,于1856年组织了气象观测网,1860年创立风暴警报业务。从此,绘制天气图便成为一项日常业务,并陆续推广到欧美各国。

气象观测从二维空间发展到三维空间,揭示了地面气压系统与高空气流之间的关系。芝加哥学派的领导人罗斯贝在高空天气图上发现了长波<sup>[6]</sup>,1939年他提出了长波动力学,并由此引出了位势涡度理论,创立了长波理论,从而开拓了作为天气分析、预报理论基础的大尺度大气动力学。此外,通过对于气象观测资料的分析,陆续发现了 ENSO 循环、南方涛动、北极涛动、北大西洋涛动、遥相关等现象,拓展了预报预测理论,推动了预报预测水平的提高。

因此,天气预报和气候分析预测的水平与观测技术的进步息息相关,气象观测的发展推动了气象理论的发展,气象探测对于气象科学与气象业务的发展起到先导的作用<sup>[7-10]</sup>。

气象科学理论的发展也会对观测技术提出新的需求,并指导气象观测的发展,进而推动气象观测技术水平的提高。以遥感技术和计算机技术为代表的新技术迅速发展<sup>[11]</sup>,1950年代开始,这些新技术被引进大气科学领域。

第二次世界大战后,大批军事雷达转为民用来探测云和降水的形成和发展,为天气分析、临近预报和降水天气的研究提供了重要手段,并开拓了雷达气象学和中尺度气象学。这些雷达在1990年代被多普勒雷达网替代,使人们能得到高分辨率的云内降水强度和径向风速,显著改善了对龙卷、下击暴流等中、小尺度强天气动力结构的认识 and 对其超短时预报的能力,也大大提高了在恶劣天气条件下飞机起落时的安全度<sup>[12]</sup>。中国正

在布设的 158 部多普勒雷达网,已经显著提高了短时临近预报水平。

无人值守的自动气象站使地面观测的加密成为可能,高时空密度的地面观测资料大大提高了预报与情报能力<sup>[13]</sup>。为了应对气候变化需求,全球建立了专门的气候观测网。美国建立了气候基准站网(USCRN),将提供可靠的并且高质量地面温度和降水资料。中国也开展了 5 个国家气候观象台试点建设,包括内蒙锡林浩特、安徽寿县、甘肃张掖、广东电白、云南大理,目前试点工作正在进行中,将为今后的扩大建设奠定基础。

随着全球变化问题的日益突出,WMO 于 1989 年开始组建全球大气观测网(GAW),在全球范围内开展大气成分本底观测,对具有重要气候、环境、生态意义的大气成分进行长期、系统和精确的综合观测。目前已有 60 个国家近 400 多个本底监测站(其中全球基准站 24 个)加入 GAW 网络,并按照 GAW 观测指南的要求,开展了大气中温室气体、气溶胶、臭氧、反应性微量气体、干—湿沉降化学、太阳辐射、持久性有机污染物和重金属、稳定和放射性同位素等的长期监测,涉及 200 多种观测要素<sup>[14]</sup>。1980 年代初,中国气象局陆续在北京上甸子、浙江临安和黑龙江龙凤山建立区域大气本底站<sup>[15-16]</sup>;1994 年建立中国大气本底基准观象台(瓦里关基准站),3 个新建区域大气本底站(云南、新疆、湖北)相关建设工作正在进行之中。最近,中国科学院系统依托其生态系统研究网络(CERN),在全国范围陆续建立 5 个大气成分要素观测站;国家环境保护总局也于近期开展了区域大气本底站的建设。另外,其它一些科研机构、大学等也开展了零散的大气成分观测研究。

高空气象探测发展迅速,目前基本上形

成了雷达测风、无线电经纬仪测风、罗兰导航测风、GPS 测风体制四类系统,中国正在完成从机械探空仪到电子探空仪的过渡,大气三维探测的探测精度与探空的时空密度都大为提高。

气象卫星以可见光、红外和微波波段提供了闪电、云顶温度、整层水汽和三维温、湿度和风场的分布,使人们能跟踪各种灾害性天气系统(如热带风暴、温带气旋、飕线、梅雨锋降水)的演变,也提供地—气系统辐射收支、陆表植被、土地使用、土壤特征和海面温度信息,这些观测资料为解决海洋、沙漠、高山等地区记录稀少的问题开辟了新途径。美国和日本于 1997 年底联合发射了一枚名为 TRMM 的热带降水观测卫星<sup>[17]</sup>,第一次把雷达安装在卫星上,能有效地观测出热带云团的降水、垂直结构,并使反演热带潜热加热垂直廓线成为可能。中国气象卫星和卫星气象研究在过去 30 年发展也十分迅速<sup>[18]</sup>,发射了涵盖极轨和静止轨道的风云系列卫星,这些高分辨率探测资料的使用必将大大改善中国的天气分析、数值预报、气候研究和环境监测。

为了填补海洋观测的空白,1970 年代开始建立至今已达 1500 个以上的海洋浮标站,美、欧许多商业船只和飞机还分别安装了海洋表面、洋流自动观测仪和气象自动探测器,加上卫星观测,基本覆盖了大部分海洋无资料区。

由于气象观测业务对社会经济的巨大影响和自身的重要科学价值,WMO 十分重视全球气象观测系统建设,现已建成了世界天气监视网(WWW)。除了常规的天气观测网以外,针对多种多样的服务需求,还形成了生态与农业气象、海洋气象、交通气象、城市环境气象、气候资源、干旱监测、雷电监测、水文

气象等专业观测网,为预报预测与专业气象服务提供了坚实的基础。

改进预报是大气观测的主要目的之一,而观测的可实现性限制了预报的提高,这也是一个历史性的难题;观测的改进为预报的改进提供了基础条件,但是观测的改进并不一定带来预报的明显改进,观测对预报的贡献依赖于观测的要素、位置、时间、天气形势等多方面的因素。改进观测的代价一般十分昂贵,必须充分考虑取得的效益。因此要由观测决定预报转到由预报指引观测的理念,推进观测与预报的互动。国际上正在开展THORPEX计划,通过适应性加密观测试验,确定观测对于数值预报的敏感区,进而有目的地改进观测系统。

### 3 综合气象观测系统发展展望

未来的气象观测将从人工观测向自动化遥遥感发展,从定性观测到定量观测,从单一的大气圈观测到地球各大圈层及其相互作用的综合观测;综合利用多种手段、多种技术,实现高精度、高时空分辨率、连续、自动、一体化定量观测。为了满足精细化气象服务的需求,探测设备空间网格更密,资料时间密度更高,从二维观测向三维立体观测发展,从大尺度的天气观测向中小尺度天气观测发展<sup>[19]</sup>。

#### 3.1 传感器技术发展

自动化与电子化是气象探测的发展方向,而传感器是其中的关键因素。当今传感器技术的主要发展动向是实现传感器的微型化、阵列化、集成化和智能化<sup>[20]</sup>。从当前高新技术发展趋势来看,传感技术发展方向具体表现在以下几个主要方面:

(1) 光纤测量技术的发展及应用:主要是温度、湿度、气压一体化测量方式,受电磁环境干扰小,可以在恶劣电磁环境下使用。

(2) 红外测量技术的应用:主要是测量地表温度,红外摄像技术。

(3) 超声波技术的应用:主要是测量雪深、蒸发等。

(4) 其他先进测量技术的发展:例如应力传感器、CCD摄像技术在气象观测上的应用。

#### 3.2 气象探测手段拓展

主动遥感技术将会得到进一步应用。风廓线雷达将越来越多地进入业务观测系统,实现风的全天候自动化遥感探测,获得边界层信息,从时空密度方面弥补常规探空的不足;随着技术成熟,地面激光雷达将被用来自动连续探测大气精细风场与大气成分;超声风设备以其采样频次高、设备免维护的特点,预期将在地面观测中得到广泛使用;值得注意的是国外已经有将声雷达应用到降水测量方面的例子,可以获取降水的粒子谱分布特征,拓展了降水的测量方法。

高空探测将由对流层向平流层发展。发展火箭探空、下投式探空、平飘气球等平流层探测手段,在探测项目上增加空间电场、空间辐射、臭氧等探测项目;此外美国提出发展平流层卫星探测计划,即发展平流层的飞机探测,在全球以12架飞机72小时覆盖全球获取探测资料。

移动观测也将成为未来气象业务的发展方向,特别是飞机探测以其机动性强的特点将会逐渐广泛应用于气象探测。飞机探测要综合发展无人飞机与有人专用飞机,形成平流层、对流层中上部、对流层底部与边界层三个不同层次的飞机观测体系;发展趋势将以

无人机为主,特别是载荷大、续航时间长的“全球鹰”,预期在应急机动观测与近海气象观测方面发挥重要作用。同时针对海上气象观测的薄弱环节,海上无人移动船也正在实验中,预期在不久的将来会进入海洋观测业务。

未来气象卫星将在过去靠接收地、气信号的“被动式”遥感探测基础上,添加微波和紫外波段进行“主动式”遥感探测,以获取云区风场和可降水量的三维结构信息;安装多普勒声雷达以提供无云区高分辨率三维风场;安装红外干涉仪使红外波段从今天的几十波段增加到几千波段,旨在提高无云区温、湿度遥感的垂直分辨率。加上空基 GPS 遥感提供的电离层电子浓度、平流层和对流层上部的高垂直分辨率温度、密度廓线和地基 GPS 提供的整层可降水量信息和地面遥感资料,可使时、空变化较大的水汽探测更为准确,并将使定量降水预报得到显著改善<sup>[21]</sup>。

### 3.3 国际地球观测系统计划

随着经济和社会的发展,气象灾害的影响越来越广泛,造成的损失也越来越大,与此相适应,国家和民众对气象服务的要求越来越高。因此气象观测的内容越来越广,将形成涵盖五大圈层的综合气象观测系统。

为进一步提高对全球气候变化的监测、预测能力,WMO 和有关国际组织正在推动建立全球气候观测系统(GCOS),对于不同的气候区进行目标性观测,开展多圈层综合观测<sup>[22]</sup>。

国际地球观测组织宣布将用 10 年时间建成全球地球观测系统(GEOSS)。这一全球地球观测系统将具备全球性和系统集成性等特点。全球性指它将尽可能包含世界上所有国家和地区以及所有涉及地球观测的机

构。系统集成性将保证把与地球观测有关的气候、海洋、大气、陆地、自然资源和人类活动等系统连在一起,形成一个前所未有的综合系统。因全球地球观测系统而获益的领域将有 9 个,其中包括自然和人为灾害影响研究、影响人类健康的环境因素研究、能源资源管理、农业可持续发展和遏制沙漠化等<sup>[23-24]</sup>。

为了进一步整合全球气象观测系统,WMO 正在建立综合全球观测系统(WIGOS),从观测仪器和方法标准、信息基础设施、终端产品质量保证等 3 个方面进行整合。WIGOS 是一个综合、协调一致和可持续发展的观测系统,它建立在所有 WMO 计划的观测需求基础上,确保通过 WIS 系统获取有用的资料和信息。观测系统的整合要提高不同系统的可相互操作性,从综合整体系统的角度着手解决大气、海洋、水文、平流层和陆地领域的需求问题<sup>[25]</sup>。

展望未来,随着现代化观测技术与观测设备不断发展,全球气象观测资源的持续有序整合,观测系统必将进一步提升气象观测水平,进而推动预报预测水平的发展,更好地为经济社会发展服务,为拥有一个更加美好的地球而服务。

### 参考文献

- [1] 秦大河,孙鸿烈. 中国气象事业发展战略研究-现代气象业务卷. 北京:气象出版社,2004:10.
- [2] WMO. 气象仪器和观测方法指南(第六版)[S], 2005:3-150.
- [3] 政府间气候变化专业委员会. IPCC 第四次评估报告[R]. WMO,2007.
- [4] 大气科学大事年表[M]. 中国大百科全书,大气科学、海洋科学、水文科学卷,北京:大百科全书出版社,1987:857-859.
- [5] 胡玉峰主编. 自动气象站原理与测量方法. 北京:气象出版社,2004.
- [6] Holton J R. An Introduction to Dynamic Meteorology[M]. 4th Edition. San Diego: Academic Press,

- 2004:535.
- [7] 黄荣辉, 章国材, 陆则慰. 21世纪初大气科学回顾与展望[M]. 国家自然科学基金委员会等编, 北京: 气象出版社, 2000:3-9.
- [8] 黄荣辉. 大气科学发展的回顾与展望[J]. 地球科学进展, 2001; (5):643-657.
- [9] 吕达仁. 大气物理学二十世纪成就与21世纪展望[M]. 见: 国家自然科学基金委员会等编 21世纪初大气科学回顾与展望. 北京: 气象出版社, 2001:159-164.
- [10] 张大林. 大气科学的世纪进展与未来展望[J]. 气象学报, 2005(5):812-824.
- [11] 邱金桓, 陈洪滨, 王普才, 等. 大气遥感研究展望[J], 大气科学, 2005, (1):131-136.
- [12] Doviak R J, Zrnici D S. Doppler Radar and Weather Observations[M]. San Diego: Academic Press, 1993年.
- [13] 李黄主编. 自动气象站使用手册[S]. 北京: 气象出版社, 2007:3.
- [14] WMO Global Atmosphere Watch (GAW) Strategic Plan: 2008-2015[R], World Meteorological Organization Global Atmosphere Watch.
- [15] 张人禾. 气候观测系统及其相关的关键问题[J]. 应用气象学报, 2006(6):705-710.
- [16] 符淙斌. 科学应对气候变化[J]. 科技导报, 2007(14):1.
- [17] Tao W · K, Adler R. Cloud Systems, Hurricanes, and the Tropical Rainfall Measurements Mission (TRMM)— A Tribute to Dr. Joanne Simpson[J]. Amer Meteor Soc, 2004:234.
- [18] 方宗义, 许健民, 赵凤生. 中国气象卫星和卫星气象研究的回顾和发展[J]. 气象学报, 2004, 62(5):550-560.
- [19] R. S. Serafin, 苏振生. 展望未来: 新的观测系统及其对中尺度研究和业务的影响[J]. 气象科技, 1992(4):31-35.
- [20] 栾桂冬, 张金铎, 金欢阳, 等. 传感器及其应用[M]. 西安电子科技大学出版社, 2002.
- [21] 陈世范. GPS气象观测应用的研究进展与展望[J], 气象学报, 1999(2):242-252.
- [22] 周秀骥. 全球气候观测系统(GCOS)简介[C]//全球气候观测系统中国委员会办公室. 全球气候观测系统中国委员会成立大会暨委员会专家组第一次全体会议文集. 北京: 气象出版社, 1997:17-21.
- [23] 国际地球观测组织. 全球综合地球观测系统一十年执行计划参考文件[R]. 2006.
- [24] 冯筠, 高峰, 黄新宇. 构建天地一体化的全球对地观测系统—三次国际地球观测峰会与GEOSS[J]. 地球科学进展, 2005(12):1327-1333.
- [25] WMO. Final report of first session of executive council working group on the WMO integrated global observing systems(WIGOS) and the WMO information system(WIS)[C]. Geneva; Switzerland, 4-7, December 2007.