

# 发展中的地基大气廓线探测

马舒庆<sup>1</sup> 高玉春<sup>1</sup> 张雪芬<sup>1</sup> 曹云昌<sup>1</sup> 张祥坤<sup>2</sup> 王振会<sup>3</sup> 吴蕾<sup>1</sup>

(1 中国气象局气象探测中心, 北京 100081; 2 中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100190;  
3 南京信息工程大学, 南京 210044)

**摘要:** 最初的大气廓线探测—无线电探空的出现和组网观测推动了气象学的发展。地基遥感大气廓线探测的发展将会推动对中小尺度天气系统变化规律的认识, 提高对强天气过程的认识和预报能力。地基遥感大气廓线探测的主体技术已经成熟, 但其复杂性和应用难度, 远高于无线电探空, 在应用环节、设备研制生产环节和多种技术的综合集成方面都面对技术挑战。多种大气廓线探测技术综合集成已成为大气廓线探测发展的重要特征和趋势。综合集成一方面能够提供更多要素, 以满足应用需求; 另一方面将改进、完善大气廓线探测能力, 提高探测精度。

**关键词:** 大气廓线, 地基遥感, 风廓线雷达, 微波辐射计

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.03.011

## Developing Ground-Based Remote Sensing of Atmospheric Profile

Ma Shuqing<sup>1</sup>, Gao Yuchun<sup>1</sup>, Zhang Xuefen<sup>1</sup>, Cao Yunchang<sup>1</sup>, Zhang Xiangkun<sup>3</sup>, Wang Zhenhui<sup>2</sup>, Wu Lei<sup>1</sup>

(1 Meteorological Observation Centre of China Meteorological Administration, Beijing 100081 2 Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044 3 National Space Science Center, CAS, Beijing 100190)

**Abstract:** The emergence of radiosonde and networking promote the development of meteorology. The development of ground-based remote sensing of atmospheric profile will promote the understanding of the evolvement of meso- and micro-scale weather systems and severe weather, and improve the ability of forecasting these systems. The main technologies of ground-based remote sensing of atmospheric profile have been mature, but it is more complex and difficult than radiosond. There are many problem needed to be solved in the aspect of application, research and development, comprehensive integration and so on. Comprehensive integration of varieties of technologies has become the characteristics and trend of the development of atmospheric profile detection. On one hand it will provide more elements to meet the application requirements, on the other hand it will improve the ability of atmospheric profile detection and improve the detection accuracy.

**Keywords:** atmospheric profile, ground-based remote sensing, wind profiler, microwave radiometer

### 0 引言

气象探测种类繁多: 按传感器工作方式可以分为直接探测和遥感探测; 按信号源产生方式可以分为主动遥感和被动遥感; 按传感器的位置可以分为地基、空基、天基; 按仪器的技术划分则种类更多。从描述大气运动变化的角度, 还可以把气象探测归结为气象要素探测和天气现象探测。地面到高空的气象要素探测就是大气廓线探测。大气廓线探测是对大气运动、变化的基本量进行探测, 反映大气的本质和规律。数值预报模式的初始场、预报场都可以表示为不同气象要素的空间分布, 即可以表示为空间3维坐标X、Y、Z的函数, 或者说数值预报模式的初始场、预报场就

是由不同空间分辨率的大气廓线构成。初始场的准确性、代表性和可比性取决于同化技术与大气廓线探测的准确性、代表性和可比性, 而初始场的准确性、代表性和可比性直接影响预报场的准确性。1927年, 无线电探空仪的发明翻开了对大气廓线(温度、气压、湿度、风速和风向)探测的新篇章, 这种探测技术的应用, 构筑了国家、洲际和全球无线电探空网, 由此气象学家更深刻地认识了大气的垂直分层结构、冷暖气团、急流和大气环流等, 并进一步建立了锋面学说等重要的气象学理论<sup>[1-3]</sup>。无线电探空仪对大气廓线的探测, 是大气科学发展史上的里程碑。

无线电探空网受成本和地理条件等因素影响, 国内外气象业务上每天实施不超过4次, 间隔最少6h。用卫星所携带的红外分光计和微波辐射计进行遥感, 可以反演大气垂直廓线参数, 但垂直分辨率和精度都

收稿日期: 2015年6月9日; 修回日期: 2015年8月31日  
第一作者: 马舒庆(1956—), Email: msqaoc@cma.gov.cn

受到一定限制<sup>[4]</sup>，采用双星组网对同一地点的观测时间分辨率最高只能达到6h间隔，均不能满足中小尺度灾害性天气预报和研究的需要。目前灾害性天气预报准确率平均不到30%<sup>[5]</sup>，如北京“7·21”特大暴雨事件中，发生暴雨的天气形势预报较准确，但其强度、降水程度、落点、持续时间等关键性信息未能准确预测，预报精细化程度不高。这种状况在本质上源于对中小尺度天气发生发展的规律和机理掌握不够<sup>[6]</sup>，而首先是对大气廓线探测能力不足。要想对中小尺度灾害性天气进行全面研究，充分探究其内部动力和热力过程的演变，离不开准确连续的大气廓线探测<sup>[7-8]</sup>。

为此，国内外学者一直在研究地基大气廓线遥感探测手段，以期获取连续的大气廓线资料，比较成熟的主要包括用微波辐射计探测大气温湿廓线<sup>[9-22]</sup>、用风廓线雷达探测风廓线<sup>[23-28]</sup>等方式。

## 1 主要地基遥感大气廓线探测技术

大气廓线探测的方法众多，从声波到无线电波，从毫米波长电磁波到微米波长电磁波，都有相应的探测方法和技术。无线电声学探测系统（RASS）探测大气温度廓线，激光雷达探测大气温度、湿度和风，红外辐射计探测大气温度、湿度廓线，微波辐射计探测大气温度、湿度廓线，风廓线雷达探测风廓线等。由于对环境的影响和对天气的适应能力等方面的原因，目前以天气预报应用为目标的成熟廓线探测仪器设备包括探测温度湿度廓线的微波辐射计和探测风廓线的风廓线雷达。本文主要讨论这两种廓线探测系统。

### 1.1 风廓线雷达

大气湍流主要是由大气动力和热力状态的不均匀分布引起的。当风廓线雷达向大气层发射一束无线电波时，由于湍流脉动使大气折射率产生相应的涨落，雷达发射的电磁波信号将被散射，其中的后向散射部分被风廓线雷达接收。这种由于大气折射率不均匀引起的回波信号与大气中的云雨质点回波散射有所不同，称之为晴空散射。风廓线雷达以晴空大气作为主要探测对象，利用大气湍流对电磁波的散射作用进行大气风场等要素的探测。风廓线雷达由天线、发射机、接收机、频综、信号处理器、终端和电源等部分构成。

风廓线雷达采用的天线技术、发射机技术、接收机技术、频综技术和信号处理技术等电子技术已经成熟。风廓线雷达有多种不同类型，根据天线技术，可以分成有源天线风廓线雷达（如有源相控阵天线风廓线雷达）和无源天线风廓线雷达（如COCO天线风廓线雷达）。有源天线风廓线雷达波束控制更灵活，无源天线风廓线雷达有较高的价格性能比。目前两种

天线体制并存。根据发射机，可以分为集中发射风廓线雷达和分布式发射风廓线雷达，两种发射体制分别与无源和有源天线类型相对应。根据接收机，可以分为模拟接收机风廓线雷达和数字接收机风廓线雷达，由于数字接收机具有稳定性高、动态范围大、线性好的优点，已经逐步取代模拟接收机。风廓线雷达中体现气象特征的核心技术是信号处理技术，包括相干积累、频谱分析、非相干积累和速度合成。相干积累、频谱分析是风信息提取的基础。相干积累和频谱分析能否获得良好的处理增益，取决于风廓线雷达系统的信号相干性，这种相干性由频综、发射、接收及采样的特性决定。目前国内外风廓线雷达的频综、发射、接收及采样的特性都能满足相干性的要求。

### 1.2 微波辐射计

地基微波辐射计通过测量60GHz附近不同频带微波辐射强度或亮度温度分布反演温度廓线，通过测量22GHz附近或183GHz附近不同频带微波辐射强度或亮度温度分布反演湿度廓线。微波辐射计主要由天线、接收机、信号处理器、终端、气象传感器、伺服和电源等部分构成。

地基微波辐射计，按照接收机通道工作方式，可以分为串行接收微波辐射计和并行接收微波辐射计。串行接收微波辐射计，通过依次改变接收机本振频率来实现多个频带亮度温度的探测；并行接收微波辐射计有多个接收通道，同时探测多个频带亮度温度。串行接收微波辐射计由于接收通道少，接收机体积小。并行接收微波辐射计有多个接收通道同时接收，不同频带亮度温度资料的时间一致，反演误差小。按照信号检测方式，微波辐射计可以分为直接检波微波辐射计和变频后检波微波辐射计。直接检波微波辐射计的优点是本机不产生高频信号，变频后检波微波辐射计的优点是接收通道可以复用。

微波辐射计探测大气温度、湿度廓线的准确性决定于两个环节：1) 各个频带微波辐射亮温的测量；2) 由亮温反演大气温度、湿度廓线。国外成熟的微波辐射计（如HATPRO和MP3000）在各个频带微波辐射亮温的测量上达到较高水平，能满足无云天气反演大气温度、湿度的要求。在无云天气条件下反演出的大气温度、湿度廓线能够满足天气分析的需要。国内研制的微波辐射计，受到元器件技术性能的限制，微波辐射亮温的测量与国外存在一定的差距<sup>[29]</sup>。

## 2 地基遥感大气廓线探测存在的问题

遥感探测相对于传感器直接与被测物质接触的测量或遥测，设备的复杂性、环境的约束性和不确定性

都要高得多，存在的问题也更多。地基遥感大气廓线探测的问题可以分为三类：1) 应用中的问题，包括设备工作参数选择、数据质量控制、资料和应用目标的时空匹配、廓线探测气象要素匹配；2) 设备工程问题，包括设备质量保障、信号处理和数据处理方法的标准化和规范化、设备运行监测和维护；3) 与探测原理相关的问题，包括微波辐射计有云和降水条件下的准确探测问题、风廓线在降水条件下的准确探测问题。考虑到篇幅和问题的突出，下面只展开讨论地基遥感大气廓线探测中与探测原理相关的问题。

### 2.1 微波辐射计有云和降水条件下的准确探测问题

微波辐射计可以连续探测大气温度、湿度廓线。在无云时，探测性能良好，温度、湿度廓线与同时次探空温度、湿度廓线趋势一致，相对差值也较小（图1a）；但在有云天气时，受云的影响，温度、湿度探测误差加大，趋势也与同时次探空不一致（图1b），其主要原因在于有云情况下微波吸收系数分布存在不确定性。

地球大气微波辐射传输方程可写为：

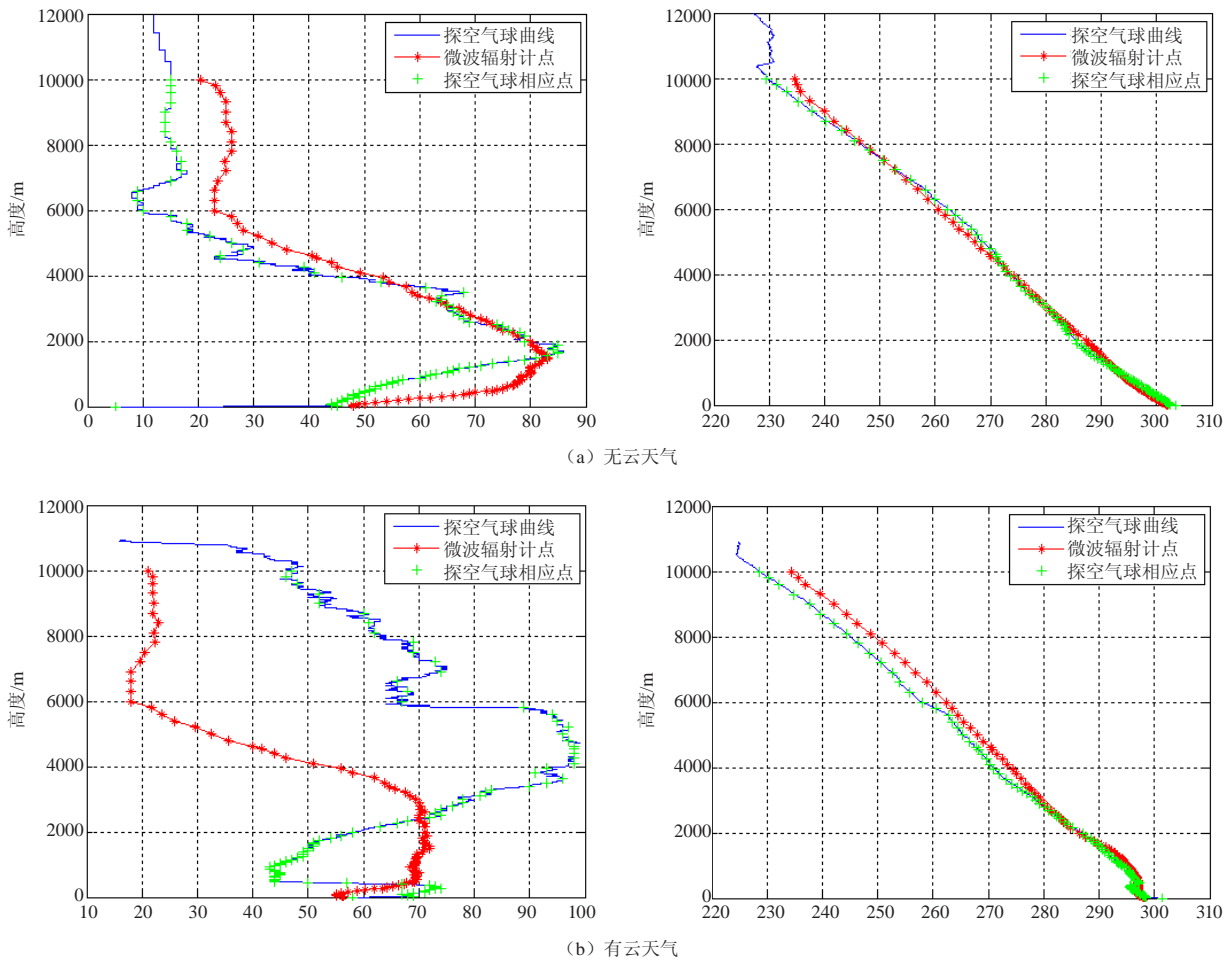


图1 微波辐射计探测与探空对比图

Fig. 1 Comparison chart of microwave radiometer with radiosonde under cloudless condition(a) and cloud condition(b)

$$T_{B\lambda}^{\downarrow}(\theta, 0) = \int_0^{\infty} T(z) \alpha_{\lambda} \sec \theta e^{-\int_0^z \alpha_{\lambda} \sec \theta dz'} dz + T_{c\lambda} \quad (1)$$

式中， $\alpha_{\lambda}$ 为微波吸收系数。在有非降雨云时，它包括三项，即 $\alpha_{\lambda} = \alpha_{H_2O} + \alpha_{O_2} + \alpha_c$ ， $\alpha_{H_2O}$ 、 $\alpha_{O_2}$ 和 $\alpha_c$ 分别为水汽、氧气和云的吸收系数。在降雨时，它包括四项即 $\alpha_{\lambda} = \alpha_{H_2O} + \alpha_{O_2} + \alpha_c + \alpha_r$ ，式中 $\alpha_r$ 为雨的吸收系数。

目前国内外的微波辐射计除了测量微波亮温外，

为了确定云、雨吸收系数，配置了远红外传感器，测量天空红外辐射亮温，由于云的红外辐射远大于大气，所以远红外传感器可以测定云的存在，并且给出云底高度。但是，由于大气、气溶胶和云体结构等因素的影响，远红外传感器反演云底高度有较大误差，也就是云的位置信息不准确。再者，还缺乏云厚等与微波辐射强度相关的信息，因此仍然不能给出准确的

$\alpha_c$ , 更提供不了准确的 $\alpha_r$ , 导致微波辐射计在有云和降水天气探测准确性和有效性低, 甚至失效。我国最早引入微波辐射计, 并大量应用的是人工影响天气领域, 微波辐射计主要在有云和降水天气下探测, 其探测资料的准确性和有效性之差可想而知。若要使微波辐射计能够在气象预报和人工影响天气中获得有效资料, 就必须解决云和降水对其探测的影响。

## 2.2 风廓线在降水条件下的准确探测问题

风廓线雷达整体技术已非常成熟, 但工作在UHF波段的风廓线雷达对降水粒子非常敏感, 因此, 在降水条件下特别是在对流性降水条件下风廓线雷达测风

性能会受到影响。Wuertz等<sup>[25]</sup>分析了降水对风廓线雷达探测精度的影响, 发现在均匀性降水条件下误差为2m/s, 是晴空条件下的误差的两倍, 在随时间和空间变化剧烈的降水条件下, 其探测误差达到4m/s以上。

在晴空, 风廓线雷达测得的径向速度 $v$ 是大气的运动分量, 如图2a中的 $v_a$ 。而当有降水粒子存在时, 由于其后向散射信号常常大于大气湍流的散射, 按照风廓线雷达检测多普勒谱中最大信号的方法, 就有可能测得降水粒子下落速度分量 $v_r$ , 如图2b, 由此造成测风和垂直速度误差。

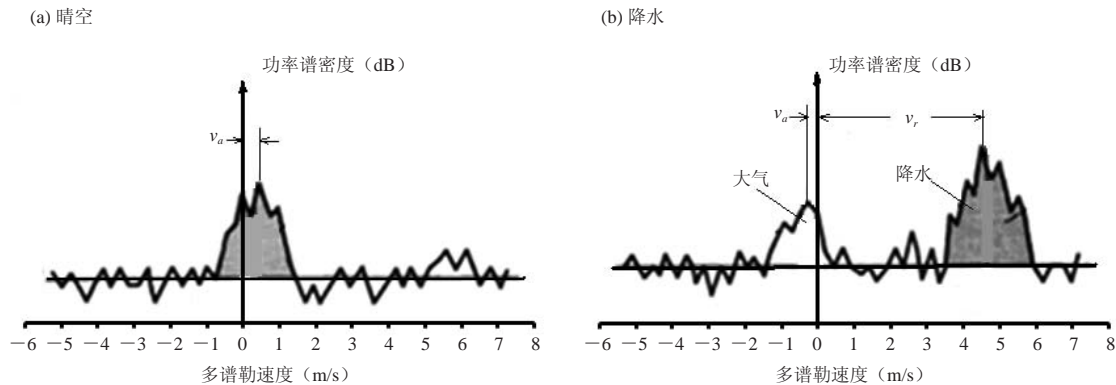


图2 风廓线雷达的多普勒速度谱

Fig. 2 Doppler velocity spectrum of wind profiler radar: (a) Clear sky; (b) Precipitation

## 3 多种探测技术综合是地基大气廓线探测发展的方向

为获取时空分辨率均较高的大气廓线, 欧美等国家均开展了相关综合观测计划。美国能源部出资成立大气辐射测量 (ARM) 计划, 建立先进的地面测站来研究云的形成过程以及其对辐射传输的影响, 其基础是大气廓线及各种要素的综合观测, 用以研究降水、云、气溶胶、地表通量对全球气候变化的影响<sup>[30]</sup>。ARM计划耗资4.6亿美元在各地建立观测站, 于1992年开始收集观测数据<sup>[31]</sup>, 并于近年来针对温度湿度廓线及云垂直结构开展了全面研究, 包括用微波亮温三维层析反演水汽密度<sup>[32]</sup>, 基于一维变分方法的地基毫米波辐射计反演极地温湿廓线<sup>[33]</sup>, 建立地基微波辐射计观测网并提供将近20年的观测资料<sup>[34]</sup>, 利用大气辐射传输模型反演方法研究云的光学厚度等属性<sup>[35]</sup>, 基于地基遥感方法探测极地单层云<sup>[36]</sup>, 结合氧A波段和雷达观测反演层云的垂直结构<sup>[37]</sup>等。

2001年, 欧盟通过了COST 720研究计划, 由德国、英国、荷兰等国家, 提出了“综合地基遥感探空站”的概念, 通过试验包括风廓线、微波辐射计、雷

达等多种综合遥感手段, 提供站点上空温度、湿度、风和水凝物的垂直廓线<sup>[38]</sup>。该计划中的温湿云廓线 (TUC) 试验于2003/2004年冬季在瑞士实施<sup>[39]</sup>, 包括基于地基微波辐射计的温湿廓线反演<sup>[32]</sup>, 以及云的垂直结构探测研究<sup>[40]</sup>。

为密切关注并便于交流大气廓线探测的相关研究, 国际上每隔三年举行一次对流层廓线探测国际研讨会 (ISTP), 该系列会议从1988年开始举办。2012年, ISTP大会针对大气温度、湿度廓线探测进行了深入讨论, 包括利用地基微波辐射计观测网获取对流层湿度廓线<sup>[41]</sup>、兰佩杜萨岛上基于微波辐射计的连续温湿廓线探测<sup>[42]</sup>, 以及根据晴空下常规探空计算得到的亮温修正了微波辐射计温度廓线的长期系统误差<sup>[43]</sup>等多方面的研究工作。

国内针对大气垂直观测也独立开展和参与了国际相关研究。2010年, WMO在中国阳江组织了第八届国际探空比对试验, 开展了包括探空仪和多种遥感设备在内的观测仪器设备对同一区域的综合观测试验, 进行了多种观测仪器设备综合观测方法的研究, 着重分析了探空仪在高空出入云的温湿特性, 评估了高层

云红外辐射对温度传感器的影响以及湿度传感器的系统偏差,并通过不同设备观测资料之间的对比,改进和完善了部分遥感仪器的关键算法<sup>[44]</sup>。2012年,中国科学院大气物理研究所开始开展大气成分综合探测系统的研制工作,通过该系统获得准连续的大气温度、湿度、风场、大气温室气体与污染气体、云和气溶胶的高垂直分辨率的廓线观测资料,并通过集成反演算法的建立实现对全大气层相对完整的同时观测,实现对大气垂直结构、运动变化与成分输送的研究。2013年8月,中国气象局气象探测中心在吉林白城同时布设了微波辐射计、业务用L波段探空系统、芬兰维萨拉RS92探空系统、系留气球探测系统、地基导航卫星遥感水汽(GNSS/MET)系统、100m气象塔分层探测和激光测云仪等高空观测系统,开展了为期一个月的综合对比试验,对温度廓线、相对湿度廓线、水汽密度廓线、总水汽量和云底高度等要素进行了综合分析对比,试验结果表明在无云情况下微波辐射计探测温湿廓线结果准确度较高,而有云情况下微波辐射计的温湿廓线反演结果相对较差。中国气象局气象探测中心与中科院空间中心等单位,针对改进微波辐射计有云和降水条件下的准确探测问题以及风廓线在降水条件下的准确探测问题,基于W波段毫米波固态功率器件技术、W波段毫米波发射接收链路技术、K与V波段微波信号直检技术、信号处理及廓线反演技术等,在已有的工作基础上,设计多波段微波遥感结合的大气廓线探测系统。

#### 4 小结

最初的大气廓线探测—无线电探空的出现和组网观测推动了气象学的发展。地基遥感大气廓线探测的发展将会推动对中小尺度天气系统变化规律的认识,提高对强天气过程的认识和预报能力。

地基遥感大气廓线探测基本走完了单项技术的发展阶段。无论风廓线雷达还是微波辐射计,从电子学和工程学的角度,主体技术都趋于成熟,风廓线雷达测量径向速度的准确性达到 $10^{-1}\text{m/s}$ 的量级,能够提取噪声电平以下20~30dB的大气湍流信号;成熟的微波辐射计测量微波辐射亮温的精度达到0.3K左右。

地基遥感大气廓线探测进入了多种技术综合应用阶段。综合应用可以提供多气象要素大气廓线资料,能更完整的描述大气状态和运动。通过多种技术综合集成还可以有效改进地基遥感探测的适应性,扩展其对气候的适应范围,例如,使微波辐射计不仅在无云天气能有效探测,而且在有云天气也能有效探测;改善风廓线雷达降水天气的探测能力。因此,多种地基

遥感大气廓线探测的结合,不仅扩大气象要素的覆盖,还将提升探测能力。

地基遥感大气廓线探测的复杂性和应用难度,远高于无线电探空。因此,在应用环节、设备研制生产环节和多种技术的系统集成方面都存在需要解决的问题。在正确认识地基遥感大气廓线探测基础上,通过不断努力,地基遥感大气廓线探测一定会发挥令人振奋的作用。

#### 参考文献

- [1] 叶笃正. 探空资料的应用(二). 气象, 1977, 3(11): 21-23.
- [2] 叶笃正. 探空资料的应用(一). 气象, 1977, 3(11): 5-7.
- [3] 孟显进. 探空资料在短期天气预报中的运用. 气象, 1979, 9: 21-22.
- [4] Wu X, Li J, Zhang W, et al. Atmospheric profile retrieval with AIRS data and validation of the ARM CART site. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2005, 22(5): 647-654.
- [5] 气象现代化指标体系研究. 北京: 中国气象局发展研究中心, 2012.
- [6] 俞小鼎. 2012年7月21日北京特大暴雨成因分析. 气象, 2012, 38(11): 1313-1329.
- [7] 盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 大气物理学. 北京: 北京大学出版社, 2003.
- [8] 寿绍文. 中尺度气象学. 北京: 北京大学出版社, 2003.
- [9] Meeks M L. Atmospheric emission and opacity at millimeter wavelengths due to oxygen. *Journal of Geophysical Research*, 1961, 66 (11): 3749-3757.
- [10] 赵柏林, 杜金林, 刘式达, 等. 微波遥感大气温度层结的原理和试验. *大气科学*, 1978, 2(4): 323-331.
- [11] 周秀骥. 大气微波辐射起伏及其遥感. *大气科学*, 1980, 4(4): 293-299.
- [12] Churnside J H, Stermitz T A, Schroeder J A. Temperature profiling with neural network inversion of microwave radiometer data. *J Atmos Oceanic Technol*, 1994, 11: 105-109.
- [13] Press F. Earth models obtained by Monte-Carlo inversion, *Journal of Geophysical Research*, 1968, 73(16): 5223-5234.
- [14] Smith W L. Iterative solution of the radiative transfer equation for the temperature and absorbing gas profile of an atmosphere. *Applied Optics*, 1970, 9(9): 1993-1999.
- [15] Westwater E R, Guiraud F O. Ground-based microwave radiometric retrieval of precipitable water in the presence of clouds with high liquid content, *Radio Science*, 1980, 15(5): 947-957.
- [16] Frate F D, Schiavon G. A combined natural orthogonal functions/neural network technique for the radiometric estimation of atmospheric profiles. *Radio Science*, 1998, 33(2): 405-410.
- [17] Peckham G E, Grippa M. Improved retrieval of tropospheric temperatures from remote measurements of thermal radiation using the adiabatic lapse rate as a constraint. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2000, 126(563): 749-760.
- [18] 魏重, 林海, 邹寿祥, 等. 微波遥感海上大气可降水和云液态含水量. *大气科学*, 1989, 13(1): 101-107.
- [19] 黄彦彬, 德力格尔, 王振会. 利用地基双通道微波辐射计遥感青藏高原大气气水特征. *南京气象学院学报*, 2001, 24(3): 391-397.
- [20] 姚志刚, 陈洪滨. 利用神经网络从118.75附近通道亮温反演大气温度. *气象科学*, 2006, 3: 252-259.
- [21] 刘亚亚, 毛节泰, 刘钧. 地基微波辐射计遥感大气廓线的BP神经网络反演方法研究. *高原气象*, 2010, 6: 1514-1523.
- [22] 刘咏, 官莉. 人工神经网络反演晴空大气湿度廓线的研究. *气象*, 2011, 3: 318-324.
- [23] Hardy K R, Katz I. Probing the clear atmosphere with high power, high resolution radars. *Proceedings of the IEEE*, 1969, 57(4): 468-480.
- [24] Strauch R G, Weber B L, Frisch A S, et al. The Precision and relative accuracy of profiler wind measurements. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1987, 4(4): 563-571.
- [25] Wuertz D B, Weber B L, Strauch R G, et al. Effects of Precipitation on UHF Wind Profiler Measurements. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1988, 5(3): 450-465.
- [26] 吴蕾, 陈洪滨, 高玉春, 等. 国产风廓线雷达对比试验初步分析.

- 现代雷达, 2013, 35(6): 24-28.
- [27] Strauch R G, Merritt D A, Moran K P, et al. The Colorado wind-profiling network. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1984, 1(1): 37-49.
- [28] May P T, Strauch R G. An examination of wind profiler signal processing algorithms. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1989, 6(4): 731-735.
- [29] 中国气象局气象探测中心. 微波辐射计对比测试报告. 2013.
- [30] Gerald M S, Schwartz S E. The atmospheric radiation measurement (ARM) program: programmatic background and design of the cloud and radiation test bed. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1994, 75(7): 1201-1221.
- [31] 山夫. 美国的“大气辐射测量计划”. *新疆气象*, 1992, 15(5): 56-57.
- [32] Padmanabhan S, Reising S C, Vivekanandan J, et al. Retrieval of atmospheric water vapor density with fine spatial resolution using three-dimensional tomographic inversion of microwave brightness temperatures measured by a network of scanning compact radiometers. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(11): 3708-3721.
- [33] Cimini D, Hewison T J, Martin L. Temperature and humidity profile retrievals from ground-based microwave radiometers during TUC. *Meteorologische Zeitschrift*, 2006, 15: 45-56.
- [34] Cadeddu M P, Liljegren J C, Turner D D. The Atmospheric Radiation Measurement (ARM) program network of microwave radiometers: instrumentation, data, and retrievals. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2013, 6: 2359-2372.
- [35] Matamoros S, Gonzalez J A, Calbo J. A simple method to retrieve cloud properties from atmospheric transmittance and liquid water column measurements. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2011, 50(2): 283-295.
- [36] Garrett T J, Zhao C. Ground-based remote sensing of thin clouds in the Arctic. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2013, 6: 1227-1231.
- [37] Li S, Min Q. Retrievals of vertical profiles of stratus cloud properties from combined oxygen A-band and radar observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(2): 769-778.
- [38] Engelbart D, Monna W, Nash J. EU COST action 720 integrated ground-based remote-sensing stations for atmospheric profiling: an overview. *TECO-2006*. Geneva, Switzerland, 4-6 December 2006.
- [39] Ruffieux D, Furger M. The COST 720 TUC experiment. *Meteorologische Zeitschrift*, 2006, 15(1): 3-4.
- [40] Ruffieux D, Nash J, Jeannot P, et al. The COST 720 temperature, humidity, and cloud profiling campaign: TUC. *Meteorologische Zeitschrift*, 2006, 15(1): 5-10.
- [41] Sahoo S, Bosch-Lluis X, Reising S C, et al. Tropospheric humidity retrieval using a ground-based network of scanning compact microwave radiometers. 9th International Symposium on Tropospheric Profiling, L'Aquila, Italy, 3-7 September 2012.
- [42] Pace G, Sferlazzo D, di Sarra A, et al. Continuous vertical profiles of temperature and humidity at Lampedusa Island. 9th International Symposium on Tropospheric Profiling, L'Aquila, Italy, 3-7 September 2012.
- [43] Maier O, Loehnert U, Haeefele A, et al. Managing accuracy and stability of micro-wave radiometers for operational, real-time retrieval of temperature profiles at MeteoSwiss Payerne. 9th International Symposium on Tropospheric Profiling, L'Aquila, Italy, 3-7 September 2012.
- [44] 李峰, 李柏, 吴蕾, 等. WMO 第八届阳江国际探空比对辅助遥感综合试验. *地球科学进展*, 2012, 27(8): 916-924.

## “互联网+”模式引领下气象教学的新方向

■ 刘文利 张德 郑远博

“信息技术与课程整合”的方法已经不适应现代社会的步伐, 而应以“互联网+”模式与移动设备的应用为代表的智慧课堂予以替代。移动端的出现给传统教育带来了更加宽广的视野。通过教学过程中的不断实践, 智能移动设备在教学中体现的功能越来越强, 具体表现在学习资源数字化、学习工具数字化以及学习管理数字化。

当前, 碎片化的学习越来越普及, 越来越多的微课可以通过智能移动终端实时观看, 对教师提出的问题 and 作业可以通过互联网快速找出答案。随着数字课堂向智慧课堂的迈进, 手机端等智能设备借助互联网及各种应用只会变得越来越强大。可以预见的是, 在信息化日益发展的今天, 会有越来越多的教师让学生在课堂上开展交流讨论, 通过手机、平板电脑和智能穿戴设备在互联网上获取更多的知识, 分享在网络中学到的东西。

在信息化的网络时代, 学习不仅是为了将前

人总结的知识继续发扬, 更需要后人在此基础上继续创新。在气象继续教育上, 培养创新型人才也是重中之重。培养创新型人才, 须为其建立一套独有的、富有个性化的知识体系。学习过程中, 记忆力已不再是首要考虑的因素, 学会创新, 举一反三才是至关重要。利用好“互联网+”和移动终端这一高效利器, 在教育实践环节充分发挥学员的创造性思维, 使学生养成创新习惯、掌握创新方法、养成创新习惯, 那么定能在今后的各种教育和教育活动中发挥创新能力。

“互联网+”与智能移动终端作为一种新型的教学模式, 能够极大解放教师上课的自由度, 开阔学员的思路, 不拘于传统的教学方式, 从而满足纷繁复杂的教学和实训需求, 具有积极的推动意义, 将成为未来气象继续教育课程与教学改革的新趋势。

(作者单位: 中国气象局气象干部培训学院)