

# 气象万千 探本溯源—— 南京信息工程大学“大气探测学科”发展历程回顾与展望

张培昌\*, 顾松山, 王振会, 魏鸣, 官莉, 郜海阳, 寇蕾蕾

南京信息工程大学 大气物理学院, 江苏 南京 210044

\* 联系人, E-mail: dou7dou@aliyun.com

2020-10-04 收稿, 2020-10-29 接受

**摘要** 大气探测学科是大气科学学科重要的核心学科分支之一。我校大气探测学科从1973年创建至今, 经47年的风雨征程, 几代人的努力与执着, 历经重组和调整, 始终围绕学校发展目标, 将专业建设与国家需求紧密接合, 不断探索和加强人才培养、师资建设和提升科研水平, 建立了特色鲜明的学科体系, 为学校和气象事业的发展做出了重要贡献。本文概略介绍了大气探测学科内涵和我校大气探测学科概况, 从初始建立、改革发展、发展提升等三个阶段描述学科沿革拓展、师资队伍壮大、实习实验设备、课程教材建设、基础理论技术研究、气象系统开发、学科建设成果及未来发展规划等。

**关键词**

大气探测;  
大气科学;  
大气遥感;  
南京信息工程大学

## 1 大气探测学科内涵与我校大气探测学科概况

### 1.1 大气探测学科内涵

大气探测学科是大气科学学科(管兆勇, 2020)中最重要的核心学科之一, 既很重要又颇具特色, 专门研究地球大气中各种现象和状态参数的探测理论、技术方法和数据应用。通过定量估测描述地球大气物理及化学性质的各种特征参量, 对获得的各种信号、数据进行加工处理, 提取表征大气状态和成分的温、湿、压、风、云、雨、雪、雾等多种信息, 并对这些信息进行实时或非实时综合分析应用, 为社会生产和人类生活提供服务。大气探测业务观测和科学实验观测为大气科学的各分支学科研究与应用提供数据支撑(林晔和顾松山, 1994)。

探测手段的创新通常会带来以往难以预计的重大发现, 大气探测学及时融合相关电子计算、微波、信号数据处理以及数理等领域的新成果, 新型气象传感器更新拓展探索大气探测技术方法(王振会等, 2016)。20世纪大气科学取得迅速发展, 其原因

之一就是重视观测系统建设和新探测技术应用。国际几个大型研究计划, 如全球能量和水分循环研究计划(Global Energy and Water Cycle Experiment, GEWEX)、气候变化与可预报性研究计划(Climate Variability and Predictability Programme, CLIVAR)、世界天气研究计划(World Weather Research Programme, WWRP)都把观测系统建设放在首位, 并积极发展新的大气探测技术。目前卫星遥感技术、无人机技术、相控阵天气雷达技术、激光应用技术、微波辐射计技术等等, 一代接着一代, 仪器设备能力越来越强、观测数据量越来越大, 信息应用水平越来越高。我国已基本建成门类齐全、布局合理的地基、空基和天基综合气象观测系统。常规气象要素和各种大气现象已经基本实现了规范化的地基台站网观测和记录, 同时还建立了包括沙尘暴、大气成分、海洋气象、农业气象、航空气象等一批新的观测业务系统。自主研发生产的自动气象站和高空探测系统正式投入业务运行, 气象雷达和气象卫星进入业务体系, 自主研发的探测设备在气象观测业务和大气科学发展中发挥了重要作用(王体健等, 2019)。

**引用格式:** 张培昌, 顾松山, 王振会, 等, 2021. 气象万千 探本溯源——南京信息工程大学“大气探测学科”发展历程回顾与展望[J]. 大气科学学报, 44(2): 165-177.

Zhang P C, Gu S S, Wang Z H, et al., 2021. Review and prospect of Atmospheric Sounding in Nanjing University of Information Science & Technology[J]. Trans Atmos Sci, 44(2): 165-177. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20201004001. (in Chinese).

## 1.2 我校大气探测学科概况

我校的大气探测学科以气象卫星和天气雷达为主要探测技术,同时倚重气象要素的直接测量,以现代电子信息、数据处理和网络技术为支撑,获得大气以及地表的各状态参数为对象,发展大气遥感科学理论与技术应用为目的,为我国气象事业和遥感、探测相关行业培养既具有大气探测科学特色、又能广泛适应于相关行业需求的高层次专门人才。经过近50年的发展,本学科形成了在国内研究院所和高校中均处于前列、在国际也都有一定影响的六大研究方向:1)多种波段的气象雷达、多种型号的气象卫星及遥感信息反演;2)雷达、卫星资料在气象及相关领域中的同化应用;3)大气辐射传输及遥感机理研究;4)大气遥感新技术研究及与其他探测技术的综合应用;5)卫星和雷达遥感数据在各种时空尺度天气过程分析和天气预报中的应用研究;6)相关传感器及仪器设备开发研究。

我校拥有“大气遥感与大气探测”二级学科硕士和博士学位授予点,并招收留学生。2019年我校大气科学一级学科入选国家“双一流”建设学科,在教育部一级学科评估中蝉联全国第一、获评A+等级。我校大气科学专业和大气科学一级学科因包含大气探测专业方向以及“大气遥感与大气探测”学科而更有特色。

## 2 我校大气探测学科发展历程及主要成果

我校大气探测学科自1973年大气探测专业创办至今经历三个阶段:初始建立阶段、改革发展阶段、发展提升阶段。每个阶段中都涌现出诸多优秀人才和标志性成果。在60周年校庆来临之际,对大气探测学科的发展、重要成果和贡献进行总结,回顾历史,继往开来,志存高远,进一步推动大气探测学科蓬勃发展。

### 2.1 初始建立阶段(1973—1977年)

20世纪70年代初,南京气象学院党委书记黄鹏、院长罗漠组织教师调查研究认识到:气象雷达、气象卫星等已成为大气探测业务新的装备和手段,气象业务部门急需一批专业人才。经国家批准1973年初成立大气探测专业,任命张培昌为专业主任、储长树为支部书记,行政归属于申忆铭领导的农业气象学系。由张培昌、顾松山、汤达章、陈渭民、戴铁丕、杜秉玉、田明远、袁立功、孙勇鹤、王德勤、朱清坤、林国藩等教师组成大气探测教研室,张培昌、顾

松山担任教研室正、副主任。教研室下设两个教学小组,一个小组负责探测原理、方法及资料分析应用等,另一个小组负责探测技术、设备、信号处理、传感器等,分别制定雷达气象学、卫星气象学、天气雷达原理、微波技术与天线、电子线路等课程的教学大纲,编写教材讲义,筹建气象雷达实验室、气象卫星实验室及电子技术实验室,强调对学生业务技能的培养。

1974年大气探测专业开始招生。1975年初夏,教师带领第一届学生到安徽省灵璧县,利用711及探空雷达实时探测资料参与指挥三七高炮进行人工消雹,获得成功,受到当地政府与群众的高度赞扬。1976、1977年,教师继续带领第二、三届学生到江苏省响水等县以同样的方案指挥小火箭消雹,同时为学生开设了《雷达气象学》《卫星气象学》的理论课与实验实习课,使学生既学到了理论知识及资料分析,又学会了对新型探测设备的操作使用及维护检修,了解这些设备在监测灾害性天气和人工影响天气方面的重要意义,取得了很好的教学效果。至1977年初,初步形成特色鲜明的专业体系,成为我国第一个以雷达气象和卫星气象为培养特色的大气探测专业。

在初建阶段,除教学外,同时开展科学研究(张培昌,2020),其中重要的科研成果是“建立双因子算法精确测定降水诸物理量”。张培昌、汤达章、戴铁丕、杜秉玉等(戴铁丕等,1980;汤达章等,1980;汤达章和张培昌,1984;张培昌等,1989)仔细分析后认识到,通常用雷达测得的反射率因子 $Z$ 这一单因子去反演出雨强 $I$ ,用的是统计关系,故对某一次降水往往精度不高。原因是 $Z$ 与 $I$ 均可由雨滴谱确定,而雨滴谱分布模型由两个参数决定,因此必须在 $Z$ 值之外再增加一个可测的已知量形成双因子,才能较精确测定雨强 $I$ 。为此开展“雷达定量测定降水诸物理量方法研究”,在一定假设下推导出几个双因子函数关系式,分别用于确定理论的雨强 $I$ 、静止大气中下落末速度 $V_T$ 以及速度标准差 $\sigma_v^2$ 这些物理量,并使用实测雨滴谱资料进行验证,结果表明这种双因子关系在精度上有很大提高,物理意义更清晰。专家鉴定认为,该成果处于当时国内领先水平。1979年,“雷达定量测定降水诸物理量”的成果,获得江苏省人民政府颁发的奖状。

### 2.2 改革、发展阶段(1977—2008年)

#### 2.2.1 学科沿革拓展

1978年初学校恢复“大气物理系”建制,王鹏飞

担任大气物理系主任,张培昌任系副主任。大气物理系设有大气探测专业和人工影响天气专业,分别于1977年冬、1978年开始招生。1978年初学校专为大气物理系建的电子楼落成,张培昌升任副院长,顾松山任副系主任,人工影响天气改为云雾物理专业,后按教育部学科分类定为大气物理学与大气环境,1982年获准招收大气物理学与大气环境专业(含大气探测)硕士研究生,1999年获准招收大气物理学与大气环境(含大气探测)专业博士研究生。王鹏飞退休后,顾松山任系主任,1989年汤达章任系主任,1998年王振会任系主任,期间章澄昌、周文贤、刘晓阳、黄兴友、肖稳安先后任副系主任。常德顺、李子华、顾松山、陈建勋先后任书记,任维贞、蔡桂香先后任副书记。

1990年学校批准以大气探测气象电子技术师资及实验室为基础,新设应用电子技术专业(1990年开始招收专科生,1995年升格招收本科生),1998年按照教育部有关规定更名为电子信息工程专业。2000年新设电子信息工程雷电防护与电磁兼容方向,2004年按照教育部有关规定更名为雷电科学与技术专业。大气探测与应用电子技术两专业相互促进,学科水平、教学质量有了显著的提高。学校首个工科类硕士点“信号与信息处理”于2003年获国家批准。自主设置“雷电防护科学与技术”硕士博士学位点于2005年获得国家批准。在此意义上,我校电子信息工程专业和雷电科学与技术专业是大气探测专业的延伸和发展。至此,大气探测专业作为学校发展过程中的主干专业之一,已被记录在南京气象学院校史卷中。

2002年按照教育部学科调整大气探测专业本科按“大气科学专业(大气探测方向)”招生。2003年按国务院学位办自主设置二级学科的“大气遥感科学与技术专业”招收博士生。

### 2.2.2 师资队伍壮大

1980年前后从气象业务部门及科研单位调入一批老师,充实教师队伍,并先后派出部分教师出国做学术访问和进修,同时陆续邀请英国著名雷达气象学家布朗宁、日本名古屋大学武田乔男教授、美国强风暴实验室专家范森特等来校讲学,积极开展国际学术交流,顾松山、陈钟荣多次应邀赴日本、韩国参加台风、海陆水循环国际学术交流。2002年以后,学校扩大办学规模,招生专业、人数增加,组建科研创新团队,通过从国内外知名高校和科研团队引进和留校两种方式进一步加强了大气探测专业师资力量。

### 2.2.3 实习实验设备

20世纪70年代初期,进一步扩展传统的地面气象观测、高空气象探测实习台。1973年自己动手建设了实时接收美国第一代极轨气象卫星资料的APT站,随后陆续添置两部711、一部713天气雷达。1987年购进日本GMS气象卫星接收设备。1984年学校获得一笔世界银行贷款,时任南京气象学院副院长章基嘉从全局考虑,立足高远,力主引进当时最先进的S波段脉冲多普勒天气雷达,先于业务部门十多年,使大气探测专业拥有了世界一流、能定量探测云雨降水和监测预警强对流天气的有力手段。此后又相继引进了地球观测系统(EOS)、风云静止卫星接收系统、激光雷达探测系统等,建成大气遥感信号与信息处理实验室。1997年电子技术实验室扩展为由模拟电路、数字电路、高频电路、微波技术四个分室组成的电子技术实验室。2000年电子技术实验室改名为电工电子实验室,后来成为江苏省电工电子示范教学实验中心。

### 2.2.4 课程教材建设

本科生除数理外等公共课程外,开设的主要基础及专业课程有大气探测学、天气学、大气物理学、雷达气象学、卫星气象学、电子技术、天气雷达原理。硕士研究生开设数字图像处理、大气微波遥感基础。其中雷达气象学和卫星气象学一直是我校在全国知名的专业课程。教材建设是专业和学科发展的重要保证,多年来,大气探测学科教师们重视教材建设,通过辛勤耕耘,课堂上认真教书育人,课下总结经验,调研科技发展最新成果,及时吸纳、提炼,编写出一批适合专业需要和发展并紧跟时代步伐的系列教材。由我校主编的《雷达气象学》(张培昌等,1988)和《卫星气象学》(陈渭民等,1988)经气象出版社出版后,被全国高校有关专业、科研单位及业务部门采用,且多次再版印刷。《雷达气象学》1992年被中国气象局评为优秀教材二等奖,并列入普通高等学校“九五”国家级重点教材。《卫星气象学》获江苏省教材建设二等奖。

1994年林晔、顾松山等编写出版《大气探测学教程》,1995年由张培昌、王振会编著出版《大气微波遥感基础》,1998年赵恒轩编写出版《天气雷达及其信号处理》及《微波技术与天线》。

### 2.2.5 基础理论技术研究

#### 1) 非球形降水粒子微波电磁特性的研究

1993年王宝瑞、张培昌教授组建科研团队,蒋修武、研究生忻翎艳及嵇驿民等参加(张培昌等,

1990;嵇驿民等,1991;王宝瑞等,1996,1997),对申请到的国家自然科学基金课题“非均质轴对称形状气象粒子电磁波散射理论研究(含实验)”开展研究,包括针对旋转椭球、锥球、短圆柱状这些逼近降水粒子形状的模型,从电磁场理论出发,采用分离变量法、积分方程法等求解出这些粒子的散射场;用椭球函数展开法编制了计算粒子散射、吸收特性的程序。并对在气象上有重要应用价值的降水粒子雷达截面、衰减系数以及雷达反射率因子等随电磁波型、波长和降水粒子参数变化的数据进行了计算。专家鉴定一致认为该项研究达到当时国内领先、国际先进水平,并获中国气象局气象科学三等奖。

### 2) 大气折射指数对雷达波束影响

为了提高雷达探测精度,张培昌、戴铁丕带领研究生郑学敏、詹煜等(詹煜等,1994,1995;涂强等,1995;张培昌等,1995;戴铁丕和詹煜,1996),研究建立了国内几个地区大气微波折射指数垂直分布的统计模式;还研究了三种计算雷达波束轴线总折射角的方法。通过交叉谱、时空谱以及最大熵谱分析,给出不同地域多频振荡周期和时空演变规律,1995年编写出版了《雷达气候学》。

### 3) 多普勒天气雷达风场反演方法的研究

Gu et al.(1994)用3D云模式生成对流单体三维风场作为真值,用径向速度通达涡度方程反演切向速度,用谱分析方法建立单多普勒雷达实测径向速度反演水平风场概念模式,用于自动识别雷达回波图像中特定天气特征。

### 4) 开展天气雷达组网拼图技术的研究

1986年承担国家“七五”重大科技攻关项目子专题“天气雷达组网拼图技术的研究”,张培昌和顾松山等带领研究生李晓正、袁招洪等(袁招洪等,1993)开展将多部天气雷达回波强度资料,用统一地理经纬坐标拼图,在低速通讯条件下设计了一套专用调制解调器及针对雷达回波图像资料特点进行数据压缩编码软件,用于数据传输,最终在国内首次实现南京、上海、盐城三地天气雷达回波准实时自动拼图。从而扩大了雷达资料的可视范围,能够实时、有效地追踪和预警灾害性天气系统降水回波的移动、演变等情况,为短时和临近天气预报提供直观的分析依据。随后上海市气象局扩大到13部天气雷达拼图。专家评审认为该专题的项目达到国内领先,优于20世纪80年代初国际水平,1991年获江苏省重大科技成果三等奖。

### 5) 天气雷达资料的收集和预处理方法研究

1985年顾松山教授承担国家七五重大科技攻关项目专题“天气雷达资料的收集和预处理方法研究”(南京气象学院首次承担国家重大科技攻关项目专题),与研究生及教师赵放、黄兴友、陈建章等研究天气雷达资料PC机处理显示编码传输,地杂波特征及抑制、数据质量检测控制等,1991年获江苏省重大科技进步三等奖。

### 6) 建成国内第一个“数字化天气雷达定量估测区域降水量业务系统”

在“八五”国家重大科技攻关项目“我国台风、暴雨灾害性天气监测、预报业务系统”中,张培昌、顾松山、戴铁丕、杜秉玉、汤达章等承担“雷达定量估算降水强度和区域降水监测技术的研究”子专题,培养了刘传才、伍志芳、邓勇、胡雯、林炳干、刘晓阳、李建通、王登炎、魏鸣等一批优秀研究生(邓勇和张培昌,1989;伍志芳等,1989;刘晓阳和张培昌等,1992;张培昌等,1992,1993;胡雯等,1993;顾松山等,1994;李建通和张培昌,1997;林炳干和张培昌,1997;张培昌和刘传才,1998;马翠平和张培昌,1999;陈家慧和张培昌,2000;潘江和张培昌,2000)。从理论和实验两个方面,全面、深入地研究了雷达反射率因子与雨强的各种关系及其适用条件,提出了采用雷达与地面雨量计联合估测降水强度分布的多种方法进行研究,由于暴雨中许多雨滴为非球形,研究推导建立了新的雷达气象方程,率先研发了国内第一个能用于业务的先进“数字化天气雷达定量估测区域降水量的实时系统”。专家组鉴定认为该成果整体上达到当时90年代国际先进水平,部分内容已进入当时国际前列。1996年该子专题获中国气象局科学技术二等奖,该项目1997年获得国家重大科技成果二等奖。

### 7) 长江三角洲地区灾害性天气预报研究

1987年顾松山教授与南京大学徐玉貌教授承担国家自然科学基金项目“长江三角洲地区灾害性天气预报研究”,与研究生教师赵放、刘晓阳、黄兴友、魏鸣、焦玉玲等研究基于多普勒天气雷达资料进行临近天气预报的技术方法,1992获中国气象局科学技术奖三等奖。

### 8) 双PRF扩展不模糊速度范围新方法研究

双PRF扩展不模糊速度区间的算法,由于速度方差变大,会引起对灾害性中小尺度天气产品产生误判。鉴于此情况,2008年,由汤达章教授主持、张培昌教授参与,建立了一种基于双PRF的逻辑判断

新方法,使速度方差可保持不变。与安徽四创电子有限公司合作,在雷达信号处理器上试验成功,成为具有自主知识产权的新算法。安徽四创电子有限公司已用于新生产的多普勒天气雷达上。

#### 9) 回波衰减订正的研究

针对早先用于衰减订正的解析法和迭代法存在的问题,2001年王振会、张培昌(Wang and Zhang, 1999;张培昌和王振会,2001)设计了衰减订正的逐库解法及由此产生的逐库近似算法,定量给出影响数值计算稳定性的临界值,有效防止过量订正和提高了订正计算效率,通过实例试验证明此法有效,被许多业务应用单位采用。

#### 10) 气象卫星数据的计算机处理系统研发与应用

1987年起,蒋本汤副教授带领王振会以及研究生陈建章等,组织团队开展气象卫星数据的计算机处理系统研发,建成了基于小型机的极轨气象卫星数据计算机解码和存储系统,并开发了静止气象卫星图像导风研究实验系统(王振会等,1997;Wang et al., 2017),为后续实验室升级、学科建设和国家级项目申报奠定了基础。肖稳安副教授带领研究生研究静止卫星云图并结合大气电场、闪电定位等观测数据分析预报强对流天气,促进了卫星云图等多种数据的综合分析及其在天气分析预报中的业务应用(张春龙等,2012)。

### 2.2.6 气象工程系统开发

#### 1) 积极参与国家现代多普勒天气雷达网建设

20世纪90年代初,中国气象局决定与美国洛马公司合资在中国成立“北京敏视达雷达有限公司”,主要生产S与C波段多普勒天气雷达,以此在国内构建世界一流水准的现代天气雷达网。张培昌、顾松山、汤达章被聘为顾问,张培昌教授任专家顾问组组长,并为合资公司中方董事之一。赵垣轩、潘江、陈佳慧、鲁迎春等老师直参加了公司初期运作,张培昌、顾松山教授长期参与该雷达的检查检测定标验收。顾松山教授与研究生刘钧、沃伟峰、王岩等为该雷达设计配置了中国数字地理信息系统(王岩等,2002)。大气探测专业师生为我国现代多普勒天气雷达网建设做出了极其重要的贡献。

#### 2) 天气雷达二次气象产品开发平台及系统软件

20世纪80年代末,根据科研积累及行业需求预估,顾松山教授自立选题,历时十余年(Gu et al., 1993),持之以恒,与沃伟峰、刘钧、胡胜、徐芬、吴

蕾、楚志刚、胡汉峰、官莉、王蕊、李杰、李劲、吴林林、徐月飞、严红梅、陶岚等一批优秀研究生及老师研制了天气雷达二次气象产品开发平台及系统软件。其中地理信息系统,已成为我国所有天气雷达厂原始软件标配,内含天文年历精度可确保使用50年。该专业软件包已被十四所恩瑞特公司系列天气雷达及其他军用雷达投入业务运用,该软件包共获十七件国家计算机软件著作权登记证书;天气雷达二次气象产品开发平台软件、天气雷达地理信息处理软件、天气雷达中尺度气旋自动识别软件、天气雷达阵风锋自动识别软件、太阳法定标软件、天气雷达估测降水软件、天气雷达反演大气风场软件、天气雷达DEM地形图软件、天气雷达数据格式归一化软件等。目前该气象工程软件包由楚志刚博士维护升级。其中优秀硕士沃伟峰毕业后,承担SWAN系统中的软件总体架构、数据处理框架、客户端功能设计、雷达基数据解码和显示平台开发等。优秀博士毕业生胡胜负责研发和改进SWAN系统对风暴识别与追踪算法(SCIT),在全国推广应用,为我国强对流天气监测预警业务提供了有力支撑。

#### 3) 前向散射能见度仪的研制

顾松山教授承接北京市气象局八五国家科技攻关项目组委托试研能见度仪,后联合中国气象科学研究院大气探测所曾书儿正研究员主持的国家重点课题组正式研制红外前向散射能见度仪,经反复外场对比试验,采用闭环锁相及过采样,大大提高了信噪比及弱信号检测能力,可比探测指标超过同类型国外产品。顾松山与李祥超、陈钟荣及研究生刘钧、冯民学、何玉翔、朱成建、涂钢、莫月琴等在实验室生产此仪器,与江苏省气象局交通气象研究合作,建成国内第一条高速公路(沪宁)平均间隔10 km的自动能见度监测站,能见度值实时传送到省局预报台,长期投入业务使用,获一致好评。博士研究生冯民学编著出版《高速公路交通气象智能化监测预警系统研究》。其中优秀硕士生刘钧毕业后研发并推广了两代自动气象站,累计生产近10万台,目前正致力于第三代自动气象站的研制;基于云+端的系统架构使得地面气象观测系统将变得越来越智能。

#### 4) 大气中飞行昆虫监测雷达、大气中漂浮作物花粉自动采集器及雾水采集器的研制

2006年陈钟荣、黄建松老师应有关单位要求,开发研制数部调频连续波测虫雷达供有关部门使用。2008年顾松山、胡汉峰配合应用气象学院姚克敏教授等承担的国家级课题研制大气中漂浮作物花

粉自动采集器,研究不同气象条件下不同作物花粉扩散规律。2017年胡汉峰、杨军开发研制数套雾水采集器供有关部门使用。胡汉峰、楚志刚开发简易人工影响天气作业雷达。上述仪器设备均获用户一致好评。另外在20世纪70年代,林国藩、田明远老师研制出UHF模拟量闪电定位仪。孙勇鹤、赖明、林有任、杨径富老师研制硅基半导体压力传感器并转工厂生产。

大气探测学科在雷达、卫星和新探测技术的教学科研及气象工程开发领域取得的成绩,在行业中起到了一定的引领作用。

### 2.3 发展提高阶段(2008年一现在)

2008年大气探测学系参与成立大气物理学院。此后,大气探测学科进入了快速发展阶段。

目前的大气探测学科师资队伍拥有教授7人、副教授9人,其中博士生导师8人、硕士生导师15人,均拥有博士学位,90%以上的导师具有海外留学经历。同时,聘有中国气象局国家卫星气象中心许健民院士、大气探测专业优秀毕业生中国气象科学研究院特聘专家翁富忠研究员等,以及新西兰皇家科学院 Geoffrey Austin 院士、英国皇家工程院 Ian Cluckie 院士等作为大气探测学科兼职教授。

大气探测学科的师资队伍具有雄厚的科研实力和浓厚的学术氛围,多年来荣获国家“海外高层次人才引进计划”、江苏省“六大人才高峰”、“青蓝工程”、“333人才工程”和“双创人才”11人次、涂长望青年气象科技奖1人次。在校内主要由大气探测学科师资队伍组成,由王振会为首席的“灾害天气遥感技术”团队多年来在我校教育部气象灾害重点实验室以及江苏省气象灾害协同创新中心等平台建设一直发挥着重要作用,并继续支持着其他学院相关学科和专业的建设。

在实验室建设方面,已建成“大气遥感信号与信息处理实验室”,拥有完备的天气雷达探测系统(包括X波段车载雷达、国内一流的C波段双偏振多普勒天气雷达、S波段多普勒天气雷达数据处理系统)、气象卫星(风云三号 and 风云四号)数据接收及处理系统(含60套数据终端)、激光雷达系统、先进自动气象站等。建设过程中,原中国气象局局长郑国光教授(我校优秀毕业生)在任期间通过局党组研究,一致同意对我校在气象装备、学生培养等方面给予大力支持,特别及时地为学校提供了一部当代最先进的C波段双线偏振多普勒天气雷达,为先进设备超前业务部门得到应用、并为开展科学研究

与培养学生实际动手能力提供了极好的基础。近几年,大气探测学科还在湖北、深圳等省市气象局建立了大气探测学科生产实验实习基地,这不仅为大气探测学科的师生提供了实验实习环境,也为提高全校大气科学类专业学生的现代气象科学实践(习)能力提供强有力的保障。

在教学方面,张培昌等编著的《雷达气象学》和陈渭民编著的《卫星气象学》,历经多次修订再版,如今几乎通用于气象类各高校有关专业,也是业务和科研部门的权威参考书。王振会组织卫星气象学教学团队编写出版了《卫星气象学实习教程》,组织大气探测学教学团队、有关教师和业务部门专家先后编写出版了《大气探测学》(第一、第二版)和《新编大气探测学》,既培养了年轻教师,也有力地加强了重点课程教学建设、提高学生实践能力。刘超带领辐射团队翻译出版了《大气辐射》,作为本科及研究生大气辐射学课程的教材。2018至2020年,张培昌、魏鸣、陈渭民带领相关教师分别先后出版了《双线偏振多普勒天气雷达探测原理与应用》《卫星云图观测原理和分析预报》《龙卷形成原理与天气雷达探测》《大气辐射学》《电磁原理与大气遥感基础》等多部著作,内容紧跟时代步伐,成为雷达气象和卫星气象学这两门课程中非常有价值的参考书目。大气探测学科自成立以来,编写教材及教学参考书30多本。

在科学研究方面,大气探测学科在项目、经费、成果多方面实现了新的跨越。近10年来主持或参加国家级项目53项,总经费超过3000万元,发表期刊论文共455篇,其中SCI收录文章100余篇、授权专利82项。主要代表性成果如下:

1) 基于TRMM星载雷达的我国S波段业务雷达网反射率因子一致性研究

王振会带领李南、寇蕾蕾、楚志刚等教师以及博士生韩静等在公益性(气象)行业专项支持下,研究了利用TRMM星载雷达,对我国江苏地区内S波段业务雷达群的雷达反射率因子进行一致性标定与评估,解决了星载测雨雷达与地基S波段业务雷达数据时空匹配和预处理、业务雷达网观测系统差异的一致性标定、标定效果的评估等问题(Li et al., 2017; Han et al., 2018; Kou et al., 2018)。项目成果得到鉴定专家的一致认可。

2) 机载气象雷达云雨探测系统和强降水系统的临近预报研究(Wei et al., 2009)

魏鸣教授指导博士生和硕士生在国家863计划

等项目的支持下,研究了机载测云雷达的回波机理和云微物理参数的反演,进行不同云雨与其他设备的对比观测,研发了对雷达数据质量控制以及气象产品生成算法,填补了W波段双线偏振多普勒测云雷达回波分析的空白(高仲辉等,2014)。同时,在国家自然科学基金及行业专项等项目的支持下,利用多普勒天气雷达、双偏振多普勒天气雷达、静止气象卫星、探空、地面自动站、风廓线雷达、闪电定位仪、GPS/MET、AMDAR及微波辐射计等资料,研究资料质量控制(如多普勒雷达资料的退速度模糊、三维风场反演等)、信息提取、参数反演及产品研发,研究强对流及暴雨的结构与演化,探索灾害性天气预报的预测机理、临近预报及潜势预报方法。利用TRMM/PR、GPM/DPR、FY2C/2D、FY4闪电定位仪和垂直温湿廓线资料作强降水系统的临近预报研究与产品开发,部分产品已在业务运行。

3)大气粒子散射理论研究、大气辐射传输算法和模式的开发

刘超教授团队(Wang et al., 2019)在科技部公益性行业专项和多项自然科学基金的支持下,研发了多种准确表征大气粒子光学特性的数值模型。其团队研发的快速辐射传输算法(刘超等,2017),已经被应用于国内外多个卫星光学仪器的仿真模拟,并先后荣获Waterman散射青年奖、第十七届涂长望青年气象科技奖等奖项。胡方超副教授与张培昌教授推导了小椭圆粒子群偏振雷达的气象方程和取向正态分布下的粒子散射与衰减特性(张培昌等,2012;胡方超等,2017),改进了AOD反演方法,提高了模拟卫星接收辐射的精度。王震博士独立自主开发了蒙特卡罗三维云大气偏振辐射传输模式MSCART软件,可以处理大气分子吸收和水云、冰云、气溶胶和瑞利散射(章超等,2016),已参与IPRT和I3RC等国际辐射传输比对计划,数值计算精度和效率得到国际认可。杨元建副教授(Yang et al., 2019)提出了气象探测环境的卫星遥感评估技术,进一步发展了客观的卫星遥感台站分类方法(参考站选取),被气象部门应用推广;发展了基于卫星遥感的云参数和单柱辐射传输模式相结合的云辐射计算方案,定量解决了高云(卷云和云砧)辐射强迫不确定性问题。张小林副教授(Zhang and Mao, 2020)发现长距离气溶胶输送有助京津地区灰霾的形成爆发,提出一种比当前主流内混合气溶胶复折射率参数化方案误差更低的新方案,为辐射传输、模式应用以及气候效应评估等提供指导和参考。

4)多源卫星遥感数据的产品开发和应用

官莉教授(官莉,2007;官莉等,2008;Xue and Guan, 2019)在多项国家和江苏省自然科学基金的支持下,是国内外较早开展星载红外高光谱探测资料引用的科学家之一,在国内首次将人工神经网络算法应用于星载红外高光谱资料大气温、湿度廓线反演,并第一时间对我国自主研发的风云气象卫星系列微波和红外高光谱探测器的观测资料质量进行评价,为资料的后续开发、应用及将来仪器的设计和改进提供及时指导和参考。陈爱军副教授(陈爱军等,2018)应用极轨业务卫星NOAA搭载的微波探测仪AMSU-A/B数据开展了微波遥感监测积雪覆盖范围和雪深研究;建立了中国风云三号极轨气象卫星、风云四号静止气象卫星地表反照率业务化反演算法,正在进行业务化运行调试。王剑庚副教授(Wang et al., 2018)定量研究天山地区典型流域的融雪过程,揭示复杂地形条件下雪粒径与环境参数的相互作用机制。郜海阳副教授(Gao et al., 2017)在国际上首次解释双层夜光云的形成机理,并利用CIPS/AIM数据研究了小尺度重力波对夜光云亮度影响的特征和机理。钱博博士利用我国新一代极轨气象卫星FY-3/MWRI六年的观测数据建立了一个全新的全球热带气旋亮温特征数据库(Qian et al., 2020)。吴莹博士(Wu et al., 2019)开展了微波数据RFI订正及我国典型地区地表微波发射率反演研究,改进了现有的微波地表发射率计算模型和反演算法。许丹博士(Xu et al., 2011)基于卫星观测优化高反射率地表沙尘辐射模型,并研究了基于CALIPSO星载雷达和AIRS星载高光谱探测器的主被动联合雾霾遥感。王泓博士利用机器深度学习的研究方法,研究发生空气污染、极端气象条件以及台风等事件时,不同经济水平、不同地理位置以及不同人群承受的健康风险。

5)天气雷达数据反演与气象应用

黄兴友教授团队(黄兴友等,2013)在多项国家和江苏省自然科学基金的支持下,利用地基毫米波云雷达和微波辐射计联合测云,不仅反演出云粒子谱等参数,也准确地监测云的发展演变,为云物理研究等提供基础数据,同时研究了多普勒与双偏振天气雷达及云雷达的资料质量控制和反演。李南副教授(李南,2011)建立了基于支持向量机的多普勒雷达风场反演方法,新方法对于中小尺度降水尤其适用,能够得到更高分辨率、更准确的风场反演结果。寇蕾蕾副教授(Kou et al., 2018;寇蕾蕾等,2019)对

地基和星载雷达探测降水资料进行了对比研究,揭示了雷达强降水数据小波域统计特征,建立了雷达强降水数据的尺度内和尺度间综合性参数化模型,并研发了地基和星载雷达降水数据的最优融合理论和算法。沈菲菲副教授(沈菲菲等,2018)率先建立了云分辨尺度下具有吸收高频雷达观测资料的4D-EnVar同化系统,并在此基础上进一步发展了基于水凝物控制变量的雷达反射率因子直接同化技术,有效改进对我国近海登陆台风的数值预报水平。楚志刚博士(Chu et al., 2019)研制了“面向区县的强对流临近预报及区域预警系统”,已应用于南京五区一县气象局、陕西渭南、华山气象局。于华英博士(Yu et al., 2019)对我国东部的雾过程,从气候到天气尺度有详细的理论和分析基础,研发了云雾降水过程的实地观测和预报模型。

#### 6) 大气探测新方法、技术和装备的研发

卜令兵教授团队(Bu et al., 2020)依托科研实验平台,在国家自然科学基金和企事业单位项目的支持下,建成了南信大瑞利-拉曼-米散射激光雷达系统;与南京大学、南京先进激光研究院等单位合作,建立了国内第一台工作波长为 $2\sim 4\ \mu\text{m}$ 的中红外差分吸收激光雷达,用于观测多种痕量气体。鲍艳松教授(Zhu et al., 2020)在多项“973”计划课题、重点研发课题和企事业单位项目的支持下,建立了一套可用于业务的“大气温湿度遥感反演系统”,该成果整体上达到了国际先进水平。曹念文教授(Cao et al., 2006)在国家自然科学基金的支持下,研究了南京地区气溶胶拉曼-米-偏振激光雷达综合探测反演及分类方法,并开发了南京地区 $\text{SO}_2$ 和 $\text{O}_3$ 浓度廓线较高精度同时综合观测反演新方法。陈钟荣副教授(陈钟荣等, 2005)在研究了宽带复杂雷达发射信号在大气边界层精细结构探测中的应用,并成功研发了基于红外光散射原理的能见度测量仪、云雨、昆虫等多目标探测多普勒雷达,在应用的过程中也获得了广泛认可。郜海阳副教授(Gao et al., 2020)利用被动光学遥感原理,研制了一台气辉光谱成像仪,并成功实现了对南京郊区上空中高层(约94 km)大气温度的有效探测。王金虎副教授(Wang et al., 2020)带领团队成功研发了空天地一体化的大气污染物监测系统,并已实现技术转化,已在相关部门实现了应用。夏俊荣博士带领无人机团队参加第二次青藏高原综合科考,在青藏高原开展大气要素垂直向观测。胡汉峰和黄建松实验师着眼于新型探测仪器设备的研发,擅长气象仪器组网及

数据无线传输技术,涉及大气廓线资料测量,大气成分观测,微物理结构获取,成功研发了针对城市内涝及水利水电的观测预警系统。

### 3 我校大气探测学科未来发展方向

根据国内外进展以及我校大气探测学科力量现状,我们希望未来着重提高以下几方面的研究水平:1)探索大气探测新原理、新方法和新技术,同时以产学研和校企合作为依托,大力加强大气探测新装备的自主研发能力;2)发展与数值模式和理论研究同步结合的现代化大气探测系统,实现观测与模式的双向支撑作用,从而提高大气探测技术的原理性创新;3)开展空天地一体化多种平台协同观测及数据融合处理方法研究和应用。探索海量观测数据在不同探测原理、数据类型、时空分布等层面上的深度融合,从而真正实现多平台协同观测的科学价值。

目前,我校已形成4个有特色和影响力的研究方向,除传统的雷达气象和卫星气象之外,在各种波段遥感技术和大气辐射传输等领域也已有丰硕的成果。展望未来,我校大气探测学科也将围绕这4个方向开展创新性和引领性的研究:

#### 1) 雷达气象方向

近期的研究方向主要集中在C波段雷达数据处理和应用、地基和星载雷达探测云降水数据最优化融合研究、多普勒雷达的风场反演、高频雷达观测资料4D-EnVar同化系统的开发、双偏振雷达的水凝物相态识别及应用、双偏振雷达探测降水演变的灵敏性的散射机理、双/多基地双偏振天气雷达探测原理等方面。在未来的发展上,雷达气象团队将继续在前沿领域重点开展以下研究:新体制雷达(如合成孔径雷达、太赫兹云雷达、相控阵雷达等)数据质量控制和气象参数的反演方法;进一步研究非球形大粒子与带电粒子的回波特性;研究多参数联合估测降水强度的方法,结合深度学习和人工智能方法,研究精细化临近预报的方法和预报系统。

#### 2) 卫星气象方向

近期的研究方向主要围绕基于星载红外高光谱观测用机器学习和物理的算法反演全天候大气参数、典型流域雪粒径与融雪过程的卫星遥感定量研究、热带气旋强度估计算法及气旋亮温特征数据库的开发、我国典型地区地表微波发射率反演研究等方面展开、GPM及高分辨率卫星资料的应用等方面展开。在未来的发展上,卫星气象团队将继续在前沿领域重点开展以下研究:围绕我国新一代极轨气



象卫星风云5号开展主动遥感方法和技术预研,并在星载仪器遥感观测的大气辐射传输计算模型和多源卫星资料同化应用等方面开展深入研究。

### 3) 各种波段遥感技术和装备方向

近期团队的研究重点在机载二氧化碳-气溶胶测量激光雷达、探测痕量气体的中红外差分吸收激光雷达、用于临近空间探测的气辉光谱温度仪、空天地一体化的大气污染物监测系统、云雨、昆虫等多目标探测多普勒雷达、针对城市内涝及水利水电的观测预警系统等技术 and 装备的研发,另外也在开展全天候大气温湿反演、最优观测科学布局、资料融合系统的研究工作。未来遥感技术团队将主要围绕星载激光雷达的正演模型、反演算法、数据产品、实验室定标测试、机载协同观测等方面开展前沿科学研究,另外也会涉及多波段遥感新方法和技术、气溶胶云降水组网观测等方面的深入研究。

### 4) 大气辐射传输方向

目前团队的研究重点主要在卫星反演冰云特性的不一致性、沙尘气溶胶光学特性数值模拟中非球形问题、高时空分辨率多源卫星遥感气象灾害产品的融合、主被动观测系统下云和气溶胶辐射偏振态逐阶演变机理、逐阶优化的三维云大气辐射传输模式研究等方面。未来大气辐射团队将重点在适用于大气探测和卫星遥感领域的辐射传输算法、完整大气辐射传输模式、快速辐射传输系统、风云系列卫星

观测仿真和云定量产品的研发等方面开展研究。

## 4 结语

六十年的风风雨雨,几代人的热情与执着,大气探测学科在48年的历程中,将学科的建设与国家的需求紧密接合,不断加强人才培养、师资建设和提升科研水平,建立起特色鲜明的专业学科体系,为学校和中国气象事业的发展做出了重要贡献。

大气探测专业和大气遥感探测研究生硕士博士研究生培养点招生数十载,培养数千人。毕业生受到用人单位的欢迎与好评,在不同的岗位上涌现出许多优秀的校友。有的成为气象业务部门的骨干、首席预报员和首席科学家;有的在学校教书育人,既开出精品课程,又培养研究生;有的在科研单位做出创新性的重要成果并获奖;有的在不同的领导岗位上勤奋工作,使所在单位或个人评为先进;有的在企业内肩负重要职责,攻坚克难,取得突破性进展;有的在基层第一线长期坚持做好测报预报工作,被评为模范或优秀工作者。毕业生的成绩令母校骄傲。

回顾历史,展望未来,不断改革和创新,进一步加强学科交叉融合,丰富学科内涵,强化专业特色,在同类高校和行业中起到引领作用,为将我校大气科学建设成为世界一流学科贡献力量,也为我国气象事业和社会经济发展做出更大贡献。

## 参考文献 (References)

- Bu L, Wang Q, Xu J, et al., 2020. Validation of an airborne high spectral resolution Lidar and its measurement for aerosol optical properties over Qinhuangdao, China [J]. *Opt Express*, 28(17): 24471-24488. doi: 10.1364/OE.397582
- Cao N, Li S, Fukuchi T, et al., 2006. Measurement of tropospheric O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub> and aerosol from a volcanic emission event using new multi-wavelength differential-absorption lidar techniques [J]. *Appl Phys B*, 85(1): 163-167. doi: 10.1007/s00340-006-2392-x.
- 陈爱军, 曹晓云, 韩琛惠, 等, 2018. 2000—2016年青藏高原地表反照率时空分布及动态变化 [J]. *气候与环境研究*, 23(3): 355-365. Chen A J, Cao X Y, Han C H, et al., 2018. Spatial-temporal distribution and variation of land surface albedo over the Tibetan Plateau during 2000—2016 [J]. *Clim Environ Res*, 23(3): 355-365. doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17113. (in Chinese).
- 陈家慧, 张培昌, 2000. 用天气雷达回波资料作临近预报的BP网络方法 [J]. *南京气象学院学报*, 23(2): 283-287. Chen J H, Zhang P C, 2000. The back propagation network method for nowcasting using weather radar data [J]. *J Nanjing Inst Meteor*, 23(2): 283-287. doi: 10.3969/j.issn.1674-7097.2000.02.019. (in Chinese).
- 陈渭民, 肖稳安, 陈广玉, 等, 1988. *卫星气象学* [M]. 北京: 气象出版社. Chen W M, Xiao A W, Chen G Y, et al., 1988. *Satellite meteorology* [M]. Beijing: China Meteorological Press. (in Chinese).
- 陈钟荣, 李祥超, 顾松山, 2005. 双基多普勒天气雷达信号采集方法研究 [J]. *仪器仪表学报*, 26(8): 1005-1006. Chen Z R, Li X C, Gu S S, 2005. Research on the collection method of bistatic Doppler weather radar signals [J]. *Chin J Sci Instrum*, 26(8): 1005-1006. doi: 10.3321/j.issn.0254-3087.2005.08.079. (in Chinese).
- Chu Z, Liu W, Zhang G, et al., 2019. Continuous monitoring of differential reflectivity bias for C-band polarimetric radar using online solar echoes in volume scans [J]. *Remote Sens*, 11(22): 2714. doi: 10.3390/rs11222714.
- 戴铁丕, 汤达章, 张培昌, 1980. 用雷达反射率因子Z和衰减系数K确定雨强I的方法 [J]. *南京气象学院学报*, 3(2): 176-185. Dai T P, Tang D Z, Zhang P C, 1980. Determination of rainfall intensity I by radar reflectivity factor Z and attenuation coefficient K [J]. *J Nanjing Inst Meteor*, 3(2): 176-185. (in Chinese).

- 戴铁丕,詹煜,1996.我国20个地区大气折射指数垂直分布的三种统计模式[J].南京气象学院学报,19(4):456-463. Dai T P,Zhan Y,1996. Three statistical models for vertical distribution of atmospheric refractive index in 20 regions of China[J].J Nanjing Inst Meteor,19(4):456-463.(in Chinese).
- 邓勇,张培昌,1989.利用数字雷达柱体最强回波图象作强对流天气路径临近预报[J].南京气象学院学报,12(4):405-414. Deng Y,Zhang P C,1989.Nowcasting the course of severe convective weather by using the most intensive echo image in the digital radar cylinder[J].J Nanjing Inst Meteor,12(4):405-414.(in Chinese).
- Gao H Y,Shepherd G G,Tang Y H,et al.,2017.Double-layer structure in polar mesospheric clouds observed from SOFIE/AIM[J].Ann Geophys,35(2):295-309.doi:10.5194/angeo-35-295-2017.
- Gao H Y,Li L C,Bu L B,et al.,2020.Measurement of mesopause temperature using the mesospheric airglow spectrum photometer (MASP)[J].Opt Commun,464:125546.doi:10.1016/j.optcom.2020.125546.
- 高仲辉,黄兴玉,魏鸣,等,2014.机载W波段双线偏振测云雷达回波分析[J].雷达科学与技术,12(5):561-568. Gao Z H,Huang X Y,Wei M, et al.,2014.Analysis of cloud echo observed by airborne W-band dual-linear polarization cloud radar[J].Radar Sci Technol,12(5):561-568.doi:10.3969/j.issn.1672-2337.2014.05.020.(in Chinese).
- Gu S S,Gu H Q,Wang C R,et al.,1993.A new approach to suppressing clutter for a weather radar[C]//26th International Conference on Radar Meteorology:228-231.
- Gu S S,Zawadzki I,Laroche S,1994.Retrieval of horizontal wind perturbation fields from simulated single Doppler radar observations[J].Acta Meteorologica Sinica,8(1):89-108.doi:CNKI:SUN:QXXW.0.1994-01-009.
- 顾松山,张培昌,孙海冰,1994.雷达估测区域降水量的外场试验流程[C]//中国气象学会大气专业委员会大气探测论文集. Gu S S,Zhang P C,Sun H B,1994.Flow chart of field test for radar estimation of regional precipitation [C]//Collection of papers on atmospheric exploration of atmosphere committee of Chinese meteorological society.(in Chinese).
- 官莉,2007.星载红外高光谱资料的应用[M].北京:气象出版社. Guan L,2007.Application of spaceborne infrared hyperspectral data [M]. Beijing:China Meteorological Press.(in Chinese).
- 官莉,HUANG H L,王振会,2008.红外高光谱资料反演有云时大气温湿廓线的模拟研究[J].遥感学报,12(6):987-992. Guan L,Huang H L, Wang Z H,2008.Simulation of atmospheric profile retrieval from hyperspectral infrared data under cloudy condition[J].J Remote Sens,12(6):987-992.doi:10.3321/j.issn:1007-4619.2008.06.023.(in Chinese).
- 管兆勇,2020.回首甲子峥嵘,再展万千气象:南京信息工程大学大气学科60年发展历程回顾[J].大气科学学报,43(1):39-58. Guan Z Y, 2020.Great efforts and brilliant achievements;a retrospect of the development of Atmospheric Sciences in NUIST since 1960[J].Trans Atmos Sci,43(1):39-58.doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20200126009.(in Chinese).
- Han J,Chu Z G,Wang Z H,et al.,2018.The establishment of optimal ground-based radar datasets by comparison and correlation analyses with spaceborne radar data[J].Meteorol Appl,25(1):161-170.doi:10.1002/met.1682.
- 胡方超,辛岩,张培昌,等,2017.偏振雷达探测小椭球粒子群LDR的雷达气象方程[J].大气科学学报,40(5):715-720. Hu F C,Xin Y,Zhang P C,et al.,2017.Radar meteorological equation of LDR for polarimetric radar detecting small spheroids[J].Trans Atmos Sci,40(5):715-720.doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20160408001.(in Chinese).
- 胡雯,张培昌,顾松山,等,1993.多卜勒天气雷达预报强对流回波移动模式[J].南京气象学院学报,16(3):302-307. Hu W,Zhang P C,Gu S S, et al.,1993.A model for predicting strong convection echo shift with the weather doppler radar information[J].J Nanjing Inst Meteor,16(3):302-307.doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.1993.03.007.(in Chinese).
- 黄兴友,樊雅文,李峰,等,2013.地基35GHz测云雷达回波强度的衰减订正研究[J].红外与毫米波学报,32(4):325-330. Huang X Y,Fan Y W,Li F,et al.,2013.The attenuation correction for a 35GHz ground-based cloud radar[J].J Infrared Millim Waves,32(4):325-330.doi:10.3724/SP.J.1010.2013.00325.(in Chinese).
- 嵇驿民,王宝瑞,张培昌,1991.计算雷达截面的积分方程法[J].南京气象学院学报,14(1):61-72. Ji Y M,Wang B R,Zhang P C,1991.The integral equation method for computing radar cross-section[J].J Nanjing Inst Meteor,14(1):61-72.doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.1991.01.008.(in Chinese).
- Kou L L,Wang Z H,Xu F,2018.Three-dimensional fusion of spaceborne and ground radar reflectivity data using a neural network-based approach[J].Adv Atmos Sci,35(3):346-359.doi:10.1007/s00376-017-6334-9.
- 寇蕾蕾,王振会,沈菲菲,等,2019.基于小波域高斯尺度混合模型的天气雷达图像高分辨率插值[J].气象学报,77(1):142-153. Kou L L, Wang Z H,Shen F F,et al.,2019.High resolution interpolation for weather radar data based on Gaussian-scale mixtures model in wavelet domain [J].Acta Meteorol Sin,77(1):142-153.doi:10.11676/qxxb2019.001.(in Chinese).
- 李建通,张培昌,1997.欧拉方程中三个参数选取与雷达测定区域降水量的精度[J].气象,23(9):3-7. Li J T,Zhang P C,1997.Selecting of three parameters in eular equation and accuracy of area precipitation measurement by weather radar[J].Meteor Mon,23(9):3-7.(in Chinese).
- 李南,2011.多普勒雷达资料的退速度模糊、风场反演和临近预报的研究[D].南京:南京信息工程大学. Li N,2011.Studies on the velocity dealiasing,wind retrieval and nowcasting of the Doppler radar data [D].Nanjing:Nanjing University of Information Science & Technology.(in Chinese).
- Li N,Wang Z H,Xu F,et al.,2017.The assessment of ground-based weather radar data by comparison with TRMM PR[J].IEEE Geosci Remote Sens

- Lett, 14(1):72-76. doi:10.1109/LGRS.2016.2626320.
- 林炳干,张培昌,1997.天气雷达测定区域降水量方法的改进与比较[J].南京气象学院学报,20(3):334-340. Lin B G, Zhang P C, 1997. Improvement of weather radar measured regional rainfall with comparison to other techniques[J]. J Nanjing Inst Meteor, 20(3):334-340. (in Chinese).
- 林晔,顾松山,1994.大气探测学教程[M].北京:气象出版社. Lin Y, Gu S S, 1994. A course in atmospheric sounding[M]. Beijing:China Meteorological Press. (in Chinese).
- 刘超,银燕,闵敏,2017.风云4A成像仪辐射仿真模拟系统开发[C]//第34届中国气象学会年会(S21):新一代静止气象卫星应用论文集. Liu C, Yin Y, Min M, 2017. Development of radiation simulation system for FY-4a imager[C]//The 34th Annual Meeting of Chinese Meteorological Society (S21): new generation geostationary meteorological satellite application proceedings. (in Chinese).
- 刘晓阳,张培昌,1992.用折叠线跟踪算法退除多卜勒速度折叠[J].南京气象学院学报,15(4):493-499. Liu X Y, Zhang P C, 1992. Tracking aliased line to dealias Doppler velocity[J]. J Nanjing Inst Meteorol, 15(4):493-499. (in Chinese).
- 马翠平,张培昌,1999.用单多卜勒雷达确定中尺度气旋环流中心及最大风速半径[J].南京气象学院学报,22(3):403-407. Ma C P, Zhang P C, 1999. Determination of mesocyclone center and radius of maximum wind with a single-Doppler radar[J]. J Nanjing Inst Meteor, 22(3):403-407. doi:10.3969/j.issn.1674-7097.1999.03.018. (in Chinese).
- 潘江,张培昌,2000.利用垂直积分含水量估测降水[J].南京气象学院学报,23(1):87-92. Pan J, Zhang P C, 2000. Estimating precipitation by radar-measured vertical integration of liquid water[J]. J Nanjing Inst Meteor, 23(1):87-92. doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2000.01.014. (in Chinese).
- Qian B, Jiang H Y, Weng F Z, et al., 2020. Climatology of passive microwave brightness temperatures in tropical cyclones and their relations to storm intensities as seen by FY-3B/MWRI[J]. Remote Sens, 12(1):147. doi:10.3390/rs12010147.
- 沈菲菲,许冬梅,闵锦忠,等,2018.云尺度雷达资料的混合同化对台风“桑美”的数值模拟研究[J].海洋学报,40(5):48-61. Shen F F, Xu D M, Min J Z, et al., 2018. Assimilation of radar observations with En3DVAR at cloud-resolving scale for the prediction of Typhoon Saomai[J]. Acta Oceanol Sin, 40(5):48-61. doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2018.05.005. (in Chinese).
- 汤达章,张培昌,1984.用雷达反射因子Z和雨强I估算雨滴谱的方法[J].南京气象学院学报,7(2):211-218. Tang D Z, Zhang P C, 1984. A method for deducing raindrop size distribution by reflectivity factor and rainfall rate[J]. J Nanjing Inst Meteor, 7(2):211-218. doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.1984.02.008. (in Chinese).
- 汤达章,张培昌,楼文珠,等,1980.雨滴在静止大气中的平均多卜勒速度[J].南京气象学院学报,3(1):60-68. Tang D Z, Zhang P C, Lou W Z, et al., 1980. Average Doppler velocity in a static atmosphere [J]. J Nanjing Inst Meteor, 3(1):60-68. doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.1980.01.008. (in Chinese).
- 涂强,王宝瑞,张培昌,1995.分层均匀介质折射率廓线的重建[J].南京气象学院学报,18(2):179-186. Tu Q, Wang B R, Zhang P C, 1995. Reconstruction of refractivity profile for uniformly stratified medium[J]. J Nanjing Inst Meteor, 18(2):179-186. (in Chinese).
- 王宝瑞,忻翎艳,张培昌,等,1996.锥球状粒子对偏振雷达电磁波的散射和衰减特性[J].南京气象学院学报,19(4):387-392. Wang B R, Xin L Y, Zhang P C, et al., 1996. Electromagnetic scattering/attenuation of homo-geneous and heterogeneous tapered-spheric hailstones[J]. J Nanjing Inst Meteor, 19(4):387-392. doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.1996.04.001. (in Chinese).
- 王宝瑞,张培昌,蒋修武,等,1997.分层旋转椭球散射场准解析解级数系数的确定[J].南京气象学院学报,20(1):1-9. Wang B R, Zhang P C, Jiang X W, et al., 1997. Series-expanded coefficients of scattering quasi-analytic solution by a layered particle[J]. J Nanjing Inst Meteor, 20(1):1-9. doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.1997.01.001. (in Chinese).
- Wang J G, Feng X Z, Xiao P F, et al., 2018. Snow grain-size estimation over mountainous areas from MODIS imagery[J]. IEEE Geosci Remote Sens Lett, 15(1):97-101. doi:10.1109/LGRS.2017.2775207.
- Wang J H, Xie B Z, Cai J H, 2020. The distribution of aircraft icing accretion in China-preliminary study[J]. Atmosphere, 11(8):876. doi:10.3390/atmos11080876.
- Wang J J, Liu C, Yao B, et al., 2019. A multilayer cloud detection algorithm for the Suomi-NPP Visible Infrared Imager Radiometer Suite (VIIRS)[J]. Remote Sens Environ, 227:1-11. doi:10.1016/j.rse.2019.02.024.
- 王体健,高太长,张宏昇,等,2019.新中国成立70年以来的中国大气科学研究:大气物理与大气环境篇[J].中国科学:地球科学,49:1833-1874. Wang T J, Gao T C, Zhang H S, et al., 2019. Review of Chinese atmospheric science research over the past 70 years: atmospheric physics and atmospheric environment[J]. Scientia Sinica Terrae, 62:1903-1945. doi:10.1360/SSTe-2019-0134. (in Chinese).
- 王岩,顾松山,沃伟峰,等,2002.多普勒天气雷达地图系统的设计与实现[J].南京气象学院学报,25(6):772-778. Wang Y, Gu S S, Wo W F, et al., 2002. Design of a map-editor for Doppler radar[J]. J Nanjing Inst Meteor, 25(6):772-778. doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2002.06.007. (in Chinese).
- 王振会,陈金娥,曾维林,1997.卫星云迹风导出系统的结果分析[J].南京气象学院学报,20(3):382-386. Wang Z H, Chen J E, Zeng W L, 1997. Cloud motion wind from CWIS in comparison to others[J]. J Nanjing Inst Meteor, 20(3):382-386. (in Chinese).
- Wang Z H, Zhang P C, 1999. A study on the algorithm for attenuation correction to radar observations of radar reflectivity factor[C]//29th International Conference on Radar Meteorology:910-913.
- 王振会,黄兴友,马舒庆,2016.大气探测学[M].2版.北京:气象出版社. Wang Z H, Huang X Y, Ma S Q, 2016. Atmospheric Sounding[M]. 2nd

- edited. Beijing: China Meteorological Press. (in Chinese).
- Wang Z H, Sui X X, Zhang Q, et al., 2017. Derivation of cloud-free-region atmospheric motion vectors from FY-2E thermal infrared imagery [J]. *Adv Atmos Sci*, 34(2): 272-282. doi: 10.1007/s00376-016-6098-7.
- Wei M, Liu Y N, Pan J W, et al., 2009. New velocity dealiasing of Doppler radar with the interactive method [C]//2009 WRI World Congress on Computer Science and Information Engineering. Los Angeles, CA, USA, IEEE; 7-11. doi: 10.1109/CSIE.2009.840.
- Wu Y, Qian B, Bao Y S, et al., 2019. Microwave land emissivity calculations over the Qinghai-Tibetan Plateau using FY-3B/MWRI measurements [J]. *Remote Sens*, 11(19): 2206. doi: 10.3390/rs11192206.
- 伍志方, 戴铁丕, 张培昌, 1989. 用变分方法校准天气雷达测定区域降水量的数值计算和精度分析 [J]. *气象科学*, 9(3): 223-235. Wu Z F, Dai T P, Zhang P C, 1989. Digitized calculus and accuracy analyses of area precipitation measurement by weather radar with calculus of variations for adjustment [J]. *Sci Meteor Sin*, 9(3): 223-235. (in Chinese).
- Xu D, Qu J J, Niu S J, et al., 2011. Sand and dust storm detection over desert regions in China with MODIS measurements [J]. *Int J Remote Sens*, 32(24): 9365-9373. doi: 10.1080/01431161.2011.556679.
- Xue Q M, Guan L, 2019. Identification of Sun glint contamination in GMI measurements over the global ocean [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 57(9): 6473-6483. doi: 10.1109/TGRS.2019.2906380.
- Yang Y J, Yim S H L, Haywood J, et al., 2019. Characteristics of heavy particulate matter pollution events over Hong Kong and their relationships with vertical wind profiles using high-time-resolution Doppler lidar measurements [J]. *J Geophys Res: Atmos*, 124(16): 9609-9623. doi: 10.1029/2019JD031140.
- Yu H Y, Li T, Liu P, 2019. Influence of ENSO on frequency of wintertime fog days in Eastern China [J]. *Clim Dyn*, 52(9/10): 5099-5113. doi: 10.1007/s00382-018-4437-3.
- 袁招洪, 张培昌, 顾松山, 1993. 一种数字化天气雷达回波原始资料的数据压缩方法 [J]. *南京气象学院学报*, 16(4): 432-438. Yuan Z H, Zhang P C, Gu S S, 1993. A compression method for the primitive data of the digital weather radar echoes [J]. *J Nanjing Inst Meteor*, 16(4): 432-438. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.1993.04.009. (in Chinese).
- 詹煜, 张培昌, 戴铁丕, 1994. 北半球中纬度地区大气折射指数多年时空振荡研究 [J]. *南京气象学院学报*, 17(2): 205-212. Zhan Y, Zhang P C, Dai T P, 1994. Study of long-term space-time oscillation of northern midlatitude atmospheric refractive index [J]. *J Nanjing Inst Meteor*, 17(2): 205-212. (in Chinese).
- 詹煜, 戴铁丕, 张培昌, 1995. 大气折射指数垂直分布的气候特征计算 [J]. *南京气象学院学报*, 18(4): 578-583. Zhan Y, Dai T P, Zhang P C, 1995. Calculated climatic features of vertical distribution of atmospheric refractivity index [J]. *J Nanjing Inst Meteor*, 18(4): 578-583. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.1995.04.019. (in Chinese).
- 章超, 王震, 杨军, 等, 2016. 三维有云大气辐射变温率数值模拟研究: 邻云辐射效应 [J]. *气象学报*, 74(4): 598-612. Zhang C, Wang Z, Yang J, et al., 2016. A numerical study of radiative heating rate in the three-dimensional cloudy atmosphere: Adjacent-cloud-induced radiative effects [J]. *Acta Meteorol Sin*, 74(4): 598-612. doi: 10.11676/qxb2016.040. (in Chinese).
- 张春龙, 肖稳安, 邓树民, 等, 2012. 基于气象卫星观测资料的雷电预报指标研究 [J]. *黑龙江气象*, 29(1): 21-24. Zhang C L, Xiao W A, Deng S M, et al., 2012. Research on lightning forecast index based on meteorological satellite observation data [J]. *Heilongjiang Meteorology*, 29(1): 21-24. doi: 10.14021/j.cnki.hljqx.2012.01.013. (in Chinese).
- 张培昌, 2020. 雷达气象文选 [M]. 北京: 气象出版社. Zhang P C, 2020. *Literary selections of Radar Meteorology* [M]. Beijing: China Meteorological Press. (in Chinese).
- 张培昌, 刘传才, 1998. 旋转椭球雨滴群的雷达气象方程及测雨订正 [J]. *南京气象学院学报*, 21(3): 307-312. Zhang P C, Liu C C, 1998. Radar meteorological equation for groups of rotating spheroidal raindrops and correction for rainfall measurement [J]. *J Nanjing Inst Meteor*, 21(3): 307-312. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.1998.03.002. (in Chinese).
- 张培昌, 王振会, 2001. 天气雷达回波衰减订正算法的研究(1): 理论分析 [J]. *高原气象*, 20(1): 1-5. Zhang P C, Wang Z H, 2001. A study on algorithm to make attenuation correction to radar observations of radar reflectivity factor (1): theoretical analysis [J]. *Plateau Meteor*, 20(1): 1-5. doi: 10.3321/j.issn:1000-0534.2001.01.001. (in Chinese).
- 张培昌, 杜秉玉, 戴铁丕, 等, 1988. 雷达气象学 [M]. 北京: 气象出版社. Zhang P C, Du B Y, Dai T P, et al., 1988. *Radar meteorology* [M]. Beijing: China Meteorological Press. (in Chinese).
- 张培昌, 戴铁丕, 曾春生, 1989. 用 Z 和 I 确定雨滴在静止大气中的多卜勒速度标准差 [J]. *南京气象学院学报*, 12(2): 129-136. Zhang P C, Dai T P, Zeng C S, 1989. Determination of standard deviation of Doppler velocity in the static atmosphere based on Z and I [J]. *J Nanjing Inst Meteor*, 12(2): 129-136. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.1989.02.001. (in Chinese).
- 张培昌, 王宝瑞, 嵇驿民, 1990. 椭球状降水粒子群微波特性的理论计算 [J]. *南京气象学院学报*, 13(2): 158-166. Zhang P C, Wang B R, Ji Y M, 1990. Theoretical calculation of the microwave properties of spheroidal precipitatus particle group [J]. *J Nanjing Inst Meteor*, 13(2): 158-166. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.1990.02.003. (in Chinese).
- 张培昌, 戴铁丕, 傅德胜, 等, 1992. 用变分方法校准数字化天气雷达测定区域降水量基本原理和精度 [J]. *大气科学*, 16(2): 248-256. Zhang P C, Dai T P, Fu D S, et al., 1992. Principle and accuracy of adjusting the area precipitation from digital weather radar through variational method [J]. *Chin J Atmos Sci*, 16(2): 248-256. (in Chinese).

- 张培昌,王登炎,顾松山,等,1993.多卜勒天气雷达 PPI 上  $0^{\circ}\text{C}$  层亮带模式识别系统[J].南京气象学院学报,16(4):399-405. Zhang P C, Wang D Y, Gu S S, et al., 1993. A model system for identifying the presence of  $0^{\circ}\text{C}$ -level bright zone on the weather Doppler radar PPI [J]. J Nanjing Inst Meteor, 16(4):399-405. (in Chinese).
- 张培昌,詹煜,戴铁丕,1995.大气折射指数气候振动特征的最大熵谱分析[J].南京气象学院学报,18(1):87-92. Zhang P C, Zhan Y, Dai T P, 1995. Maximum entropy spectrum analysis of climatic oscillations in atmospheric refractive indices[J]. J Nanjing Inst Meteor, 18(1):87-92. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.1995.01.013. (in Chinese).
- 张培昌,王振会,胡方超,2012.双/多基地天气雷达探测小椭球粒子群的雷达气象方程[J].气象学报,70(4):867-874. Zhang P C, Wang Z H, Hu F C, 2012. Radar meteorological equations for bistatic/multistatic weather radar systems detecting small spheroid raindrops[J]. Acta Meteorol Sin, 70(4):867-874. doi:10.11676/qxxb2012.072. (in Chinese).
- Zhang X L, Mao M, 2020. Radiative properties of coated black carbon aerosols impacted by their microphysics[J]. J Quant Spectrosc Radiat Transf, 241:106718. doi:10.1016/j.jqsrt.2019.106718.
- Zhu L H, Bao Y S, Petropoulos G P, et al., 2020. Temperature and humidity profiles retrieval in a plain area from Fengyun-3D/HIRAS sensor using a 1D-VAR assimilation scheme[J]. Remote Sens, 12(3):435. doi:10.3390/rs12030435.

## Review and prospect of Atmospheric Sounding in Nanjing University of Information Science & Technology

ZHANG Peichang, GU Songshan, WANG Zhenhui, WEI Ming, GUAN Li, GAO Haiyang, KOU Leilei

*School of Atmosphere Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China*

Atmospheric sounding is one of the most indispensable branch of atmospheric discipline. Since its inauguration in 1972 at Nanjing Institute of Meteorology (the former Nanjing University of Information Science and Technology), atmospheric sounding in NUIST had an experience of 48 years journey which owned the trials and hardship. In the consideration of the efforts and persistence of duo generations, reorganization and adjustment, the subject had always focused on the development goal of the school. This discipline is closely linked with construction subdivision which managed the national buildings demand, continuously explored and strengthened the individuals training. The establishment of qualified faculty and higher-level scientific research, made this systematic discipline a an established distinctive system, which has made a distinctive contribution in the development of the University and the meteorological department of China. This paper briefly introduces the connotation of atmospheric sounding, the overall situation of this discipline in NUIST and its development stages from its origin to establishment stage. In addition to this perception, different stages of the reforms development, the development and promotion stages in view of the discipline evolution and expansion, faculty development progression and practice and experimental equipments. Furthermore, the curriculum and teaching materials development, basic theory and technology research, meteorological system development, discipline construction and achievements were discussed in detail, and the prospects outlook of this discipline in the consideration of batter future.

**atmospheric sounding; atmospheric science; atmospheric remote sensing; Nanjing University of Information Science & Technology**

doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20201004001

(责任编辑:刘菲)