

郅秀书, 吕达仁, 陈洪滨, 等. 大气探测高技术及应用研究进展. 大气科学, 2008, **32** (4): 867~881

Qie Xiushu, Lü Daren, Chen Hongbin, et al. Advances in high technology of atmospheric sounding and application researches. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2008, **32** (4): 867~881

大气探测高技术及应用研究进展

郅秀书 吕达仁 陈洪滨 王普才 段树 章文星 王鑫
宣越健 王勇 霍娟 白建辉 杜睿

中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境探测实验室, 北京 100029

摘 要 大气探测技术是支撑大气科学, 特别是大气物理和大气环境学科发展的重要基础, 其主要任务是发展新的探测和试验手段、原理和方法, 为认识大气运动以及大气中各种物理、化学、生物过程的基本规律及其与周围环境的相互作用提供技术手段和方法。除了充分利用国内外已有的成熟技术和产品对大气科学发展提供支持外, 大气探测还存在一系列科学与技术问题需要研究和开发, 这也是大气探测科学与高技术的前沿。本文从强对流和降水探测技术、雷电探测技术、云特性探测技术、臭氧和气溶胶等大气成分探测技术、地基 GPS 观测反演大气和海洋参数、大气与环境综合探测平台六个方面综述近五年来中国科学院大气物理研究所在地面大气探测高技术研发、实验观测及相关研究领域所取得的一些主要进展, 并对未来发展进行展望。

关键词 大气探测 强对流和降水遥感探测 雷电探测 云特性遥感 大气成分和大气参数探测

文章编号 1006-9895 (2008) 04-0867-15

中图分类号 P412

文献标识码 A

Advances in High Technology of Atmospheric Sounding and Application Researches

QIE Xiushu, LÜ Daren, CHEN Hongbin, WANG Pucai, DUAN Shu, ZHANG Wenxing,
WANG Xin, XUAN Yuejian, WANG Yong, HUO Juan, BAI Jianhui, and DU Rui

Laboratory for Middle Atmosphere and Global Environment Observation (LAGEO), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract Atmospheric sounding is very important for providing crucial technological and observational support to the atmospheric science, especially to the atmospheric physics and atmospheric environment. The main missions are to develop new principle, methodology and state-of-the-art techniques of detection and observation for better understanding the atmospheric motion, the physical, chemical and biological processes in the atmosphere, and the interactions between atmosphere and its circumstance. In addition to utilizing the up-to-date technologies and products, many scientific and technological issues need to be explored and developed in the domain of atmospheric sounding. The main advances, achieved in the Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, in the area of ground-based atmospheric sounding technologies and related researches in the last five years have been reviewed in the paper. The technologies in the detection of severe convection, precipitation and lightning, the sounding of cloud

收稿日期 2008-03-07, 2008-03-17 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40227001、40475013, 中国科学院重大科研装备研制项目 YZ0608

作者简介 郅秀书, 女, 1963 年出生, 研究员, 博士生导师, 主要从事大气和空间电学, 雷电和雷暴电学方面的研究。

E-mail: qiex@mail.iap.ac.cn

characteristics, the in-situ measurement and remote sensing techniques of atmospheric constituents, mainly ozone and aerosol, the retrieval techniques of atmospheric and oceanic parameters from ground-based GPS observation, and the development of multi-function experiment platform have been concentrated.

Key words atmospheric sounding, detection of severe convection and precipitation, detection of lightning, sounding of cloud characteristics, observation of atmospheric constituents and parameters

1 引言

以日益发展和成熟的物理学原理、现代电子技术和信息技术为基础的先进大气探测技术是支撑大气科学,特别是大气物理和大气环境学科发展的重要基础。20 世纪 90 年代以来,国际上基于卫星、飞机、气球和地面各类平台的探测技术迅猛发展,形成了从全球、区域层面,到中小尺度、微尺度层面的立体探测,对大气中各种物理和化学过程的理解和定量联系的建立并增进对大气科学各个分支的认识发挥了重要作用。极端天气与环境的探测技术的突破性进展也为防灾减灾,以及大气环境质量的了解和改善提供了重要的技术基础和条件,这里包括利用激光雷达对复杂地表陆气边界与大气边界层结构的多尺度同时探测,利用气溶胶激光雷达、太阳光度计、辐射组表等对气溶胶粒子和大气化学成分的同步探测,利用多参数雷达和高时空精度雷电定位系统开展的强风暴云中降水元、三维动力结构、电过程的同时探测等等。

除了大气科学本身的发展需求外,大气探测技术发展的动力还源自日益增长的人类对大气状况和要素的了解需求,同时人类在大气中的空间活动范围也不断增大,对其空间环境的了解十分迫切,这些需求都大大推动了大气探测技术的发展。为适应现代大气科学研究的需要,也为监测和预测天气气候、了解大气变化与空气质量,满足国防、航空、航天、通信、国家决策、防灾减灾、改善大气环境质量等国家需求,几十年来中国科学院大气物理研究所(简称大气所)瞄准国际技术前沿,在大气探测高技术及相关研究领域取得了许多重要的研究成果^[1~3],并形成了以位于河北香河的大气探测综合试验站、河北兴隆的大气本底观测站、北京市区的大气所实验楼顶三个不同背景场条件的综合试验探测基地。考虑到本专刊同时有专门的文章对大气环境和卫星遥感的方法、理论和结果进行回顾^[4],本文将重点对大气所近五年来在地基大气探测高技术

领域及相关的研究进展进行概述与回顾,并重点介绍强对流和降水探测技术、雷电和大气电学探测技术、云特性探测技术、臭氧和气溶胶等大气成分探测技术、地基 GPS 观测反演大气和海洋参数、大气与环境探测平台 6 个方面的进展与成果。

2 多参数气象雷达技术及探测应用研究

强对流天气系统不仅常产生迅猛的降水、破坏性大风和冰雹等严重的天气灾害,而且还伴有强烈的雷电,其潜势预报和临近预报准确性的提高,依赖于对其中各种物理过程及其相互作用关系的充分认识。集双偏振和多普勒功能于一体的多参数雷达同时具有实时识别云和降水粒子相态变化以及观测其风场结构的能力,为强对流天气中的动力场、微物理结构和降水的同步观测提供了良好的技术条件,是国际上气象雷达技术的发展趋势。

2.1 X 波段双偏振多普勒气象雷达技术

多普勒天气雷达是目前我国气象部门探测降水、监测和预警强对流天气的主要工具,双偏振探测技术则是国际上下一代天气雷达的主要功能之一,多普勒与双偏振技术的结合代表了气象雷达技术的发展趋势。与常规天气雷达相比,双偏振雷达增加了双偏振反射率差等参数的测量,通过发射/接收水平和垂直偏振波,可获得降水目标的水平偏振反射率和垂直偏振反射率之差,即差分反射率,可反映降水粒子在水平和垂直方向尺度大小的差异,用于降水粒子形状和相态特征的识别。在降水粒子中,大滴多是扁椭球体,而冰相粒子的形状各异,其空间取向通常是随机的。由于这两种粒子在形状和空间取向上的不同,用差分反射率可以区分它们。联合使用反射率因子和差分反射率反演降水强度,不仅可以对降水粒子的形状、相态、雨滴和冰雹进行识别,而且降水强度的测量精度也可得到明显改善。

为了更好地研究云雨结构及其形成和发展机

制,我们跟踪国际气象雷达探测技术的发展,在中国科学院知识创新工程重大科研装备研制改造项目的支持下,在双波长雷达辐射计的基础上,通过升级天馈、伺服控制、收发、数据采集及处理系统,研制了 X 波段双偏振多普勒、双波长微波主被动联合遥感系统^[5]。该系统将双偏振、双波长、主被动合为一个集成系统,再配以多波长辐射计遥感水汽、降水和非降水云,是国际国内唯一具有短厘米波-毫米波、双偏振雷达-辐射计合一的技术系统;系统实现的双偏振多普勒功能、毫米波探测能力及系统综合探测能力可实现对云雨粒子场和速度场的同时探测。图 1 为所研制的 X 波段双偏振多普勒雷达系统框图,表 1 给出了其主要参数。本雷达系统在国内天气雷达中首次实现双波长、双偏振共用一个天馈系统,采用高速高功率偏振开关,脉间变换分时工作方式(单发单收)实现双偏振功能,所采用的一些关键技术为我国气象雷达的发展提供了技术基础,具有很大的推广价值。

我们研制的双偏振多普勒雷达作为一部研究型雷达,固定安装于大气所实验楼顶,用于北京地区

表 1 X 波段双偏振多普勒雷达主要参数
Table 1 Parameters of the X-band dual-polarization Doppler radar

参数	指标	参数	指标
频率	9370 MHz	接收机噪声系数	≤4 dB
发射功率	≥60 kW	接收机动态范围	≥70 dB
脉冲频率	350~1860 Hz	数据采集处理	12 bit 双路
相位噪声	-90 dBc/Hz(偏离 1 kHz)	偏振方式	水平/垂直

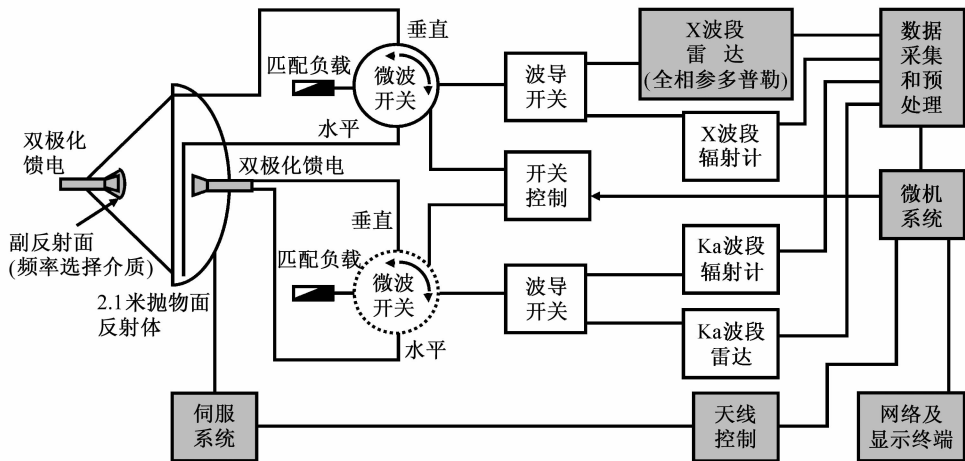


图 1 X 波段双偏振多普勒、双波长微波主被动联合遥感系统
Fig. 1 The diagram of bi-wavelength X-band dual-polarization Doppler radar system

的强对流天气和降水的高时空分辨率监测,不但能探测云的流场特征,还能探测降水粒子的相态、形状和空间取向。在 2007 年夏季强对流活动期间利用该雷达进行观测实验,图 2 (见文后彩图)为 2007 年 7 月 3 日对一次强降雨过程的实际观测结果。从已取得的实际观测结果看,该雷达不仅具有测量气象目标的强度、速度和谱宽信息的新一代多普勒天气雷达功能,而且还具有确定粒子形状、相态、尺度谱、排列取向等微物理场信息的多种偏振功能,可更精确地定量遥感探测降水分布。

除上述固定多参数气象雷达外,大气所云降水物理与强风暴实验室(LACS)还研制了“车载 X 波段全相参多普勒偏振气象雷达系统”,雷达采用双通道发射和接收体制,并与微波辐射计有机结合,实现了雷达波双路发射和双路接收、单路发射和双路接收、单路发射和单路接收加微波辐射计工作,以及微波辐射计单独工作四种功能。由于是车载雷达,机动性能好,便于外场观测使用,在冰雹、强降水、大风、雷击等局地灾害性天气监测预警、灾害防御、航空飞行保障服务和人工影响天气等许多方面具有巨大的应用潜力。

2.2 雷达对强对流天气的探测及研究应用
雷达资料在降水探测及强对流天气的监测和预警方面有重要的应用前景,为了获得雷达降雨测值误差的定量值,张凌等^[6, 7]曾对降雨的小尺度不均匀性以及雷达降雨测量误差的影响进行了研究,结果表明,降雨的小尺度不均匀性非常显著,甚至在 1 km 的雷达分辨尺寸内,反射率不均匀度可达

到 10 dB 以上,由此产生的雨强平滑误差不可忽略。刘红燕等^[8]利用 2004 年北京雨滴谱资料分析降水强度和雷达反射率因子的关系。冯桂力等^[9, 10]利用地面多普勒雷达资料和雷电定位资料,并结合 TRMM 卫星的 LIS、PR、TMI 产品分析典型强对流系统包括雹暴和飑线的降水结构及其闪电活动特征,发现典型雹暴的降水结构特征是:大于 30 dBZ 的强回波单体多集中于系统的前缘,系统后部伴有稳定性的层状云降水区,其对流降水的贡献率分别占到 85% 和 97%,闪电主要出现在强回波区(>30 dBZ)及其周围,飑线和雹暴的闪电频数可达近 200 次/min,且降雹天气过程的正地闪比例较高。

3 雷电探测与人工引发雷电技术

大气所的雷电探测和雷电物理研究始于建所之初,早在 1965 年,我国大气科学开创者之一的顾震潮先生就曾对雷电活动的单站定位问题进行了阐述^[11],之后在雷暴和雷电探测方面开展了许多开创性的工作^[12, 13]。由于雷电的发生十分迅速,且有很大的时空随机性,因此借助高速大容量数据采集和存储技术,对其电磁辐射场的快速探测和定位成为现代雷电研究的重要技术基础^[14];利用在一定时间和空间尺度上可以控制的人工引发雷电技术,对雷电放电电流的直接测量和近距离电磁场的同步观测则提供了认识雷电机理和改进防雷技术的重要手段。

3.1 雷电综合探测与定位技术

雷电放电过程中由于其瞬间产生的大电流将在空间激发频段很宽的电磁辐射,不同频段的电磁信号与雷电放电过程中不同的物理过程有一定的相关性。为适应对雷电不同距离、不同频段电磁辐射或电磁场变化的探测,我们自行研制了一套雷电综合

探测系统,包括雷电慢电场变化仪、快电场变化仪、VHF 辐射脉冲探测仪、雷暴地面电场仪、短基线雷电 VHF 辐射定位仪各 1 套。图 3 为安装于大气所实验楼顶的雷电快、慢电场变化仪的室外传感器照片,其控制电路和数据的高速大容量采集与记录位于室内。该综合探测系统实现了从直流到 200 MHz 频段内对雷电信号的综合探测,基于这些传感器的多站高精度 GPS 时间同步观测和定位分析软件,可以实现对雷电辐射脉冲源的三维定位和跟踪。

近距离的雷电电磁场对电子设备有较强的破坏作用,是雷电防护设计所必须了解的重要参量。为了探测几十米距离上强烈的雷电电磁场变化,杨静等^[15]发展了专门用于近距离雷电观测的磁场测量系统,并在高压实验室进行检验和标定,自制的磁场测量系统采用高、低两种增益天线,能够较好地对外来雷电电磁场信号进行响应,高增益天线的增益为低增益天线的三倍。当采用低增益天线时,能测得闪电通道最大电流为 84.4 kA。利用近距离磁场测量系统,结合专用分压器对水平导体中感应电压的测量,他们详细分析雷电的发展过程、放电参数以及雷电在水平导体上产生的感应电压特征^[16~18]。利用 1000 fps (frames per second) 的高速摄像系统和自行研制的快、慢电场变化仪,郅秀书等^[19]和孔祥贞等^[20]对所观测到的由同一先导的四个不同分支引发的多回击地闪和正地闪先导进行详细研究,这种罕见的多接地点回击和强烈的正地闪对雷电的防护提出了更高的要求。

强烈的对流层雷电可以在雷暴云与电离层之间诱发瞬态放电现象,被称为中高层大气放电现象,包括红闪(或红色精灵, Red Sprite)、蓝色喷流(Blue Jet)、Elves (Emissions of Light and VLF perturbation due to EMP Sources) 和巨型喷流

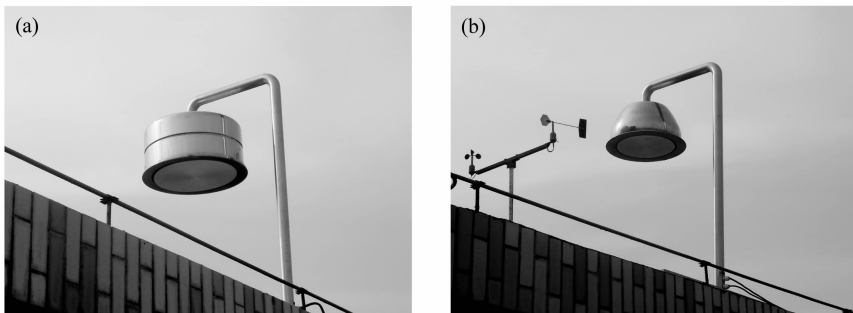


图 3 雷电慢电场变化仪 (a) 和快电场变化仪 (b) 的室外传感器照片

Fig. 3 Pictures of out-door sensors for (a) slow antenna and (b) fast antenna

(gigantic jets) 四种类型, 由美国科学家于 1989 年首次发现。2007 年夏季, 我们在山东东部沿海首次拍摄到了发生于大约 300 km 距离远处的雷暴云上部的 17 次红闪^[21], 研究发现所有红闪均成簇出现, 并呈现柱状、带有天使状翅膀的柱状、胡萝卜状和跳舞状等多种形态 [图 4 (见文后彩图)], 其持续时间为 20~80 ms。红闪多出现于雷暴系统的减弱阶段, 常由正地闪所激发, 与母体雷电的时间差平均为 7.1 ms。

3.2 人工引发雷电及相关的测量技术

人工引雷技术是在适宜的雷暴条件下通过向雷暴云体发射拖带金属导线的专用火箭以将雷电人为地引发到地面的专门技术^[22, 23], 从而使本来随机发生的自然雷电在时间和空间可以控制的状态下进行, 便于集中各种测量手段在很近距离内对雷电进行同步观测, 为雷电物理、雷电监测及防护等问题的研究开辟了一条有效途径。2005 年以来, 我们与中国科学院寒区旱区环境与工程研究所合作进行的山东滨州人工引发雷电实验中, 在人工引发雷电底部直接测量到了国内第一个 1 μ s 时间分辨率的雷电电流完整波形以及 60 m 和 550 m 处的同步电磁场波形^[24], 为我国的雷电防护设计和电流波形标准的建立提供了宝贵的基础资料。图 5 为 60 m 和 550 m 距离远处的两次人工引发雷电的静态照片, 图中的亮条纹由同一次闪电放电中的 10 次大电流回击过程所引起, 大风导致了放电通道的水平移动。2005~2007 年共成功引发雷电 8 次, 包含大电流回击过程 27 次, 测量到的回击最大电流达 45.0

kA。回击引起的微秒量级辐射场变化随水平距离 r (单位: m) 的增加回击辐射场以 $r^{-1.119}$ 衰减。

4 全天空云特性探测技术

天空云量、云型是非常重要而又难以定量获取的参数。准确、及时地获取云的信息, 不仅对于天气气候学研究有重要意义, 而且对于气象预报、人工影响天气以及国民经济和军事等诸多领域都有重要的应用价值。目前气象站对云量的观测还主要是以人工观测为主, 观测次数有限, 而且容易引进人为误差。为了实现对云的精确、自动观测, 我们自 2001 年起开展了地基全天空自动化观测系统的研制和开发工作。经过几年的研究, 已成功研制一套可见光全天空成像仪自动观测系统 (All Sky Imager, ASI)^[25~27]。此后, 依据云在白天或夜晚具有相同红外辐射特性 (8~14 μ m) 的性质, 又研制成功了扫描式全天空热红外云像仪, 实现了云量的全天候观测^[28]。

4.1 可见光全天空成像仪

全天空成像仪 (ASI) 在实现功能上主要分两个部分: 一是成像控制部分, 实现对天空状况的拍摄和图像数据获取; 另一部分为遮挡太阳控制部分, 实现对太阳直射入射光的遮挡, 保护电荷耦合单元 (CCD) 不被灼伤。仪器及全天空照片如图 6 所示。

该系统图像拍摄频次最高为每 30 秒 1 张, 可提供分辨率为 2272 $\times$ 1704 的 24 bit 全天空彩色图像。全天空成像仪的太阳跟踪和遮挡部分, 采用一个圆形中密度滤光片作为遮挡片, 带有遮挡片的

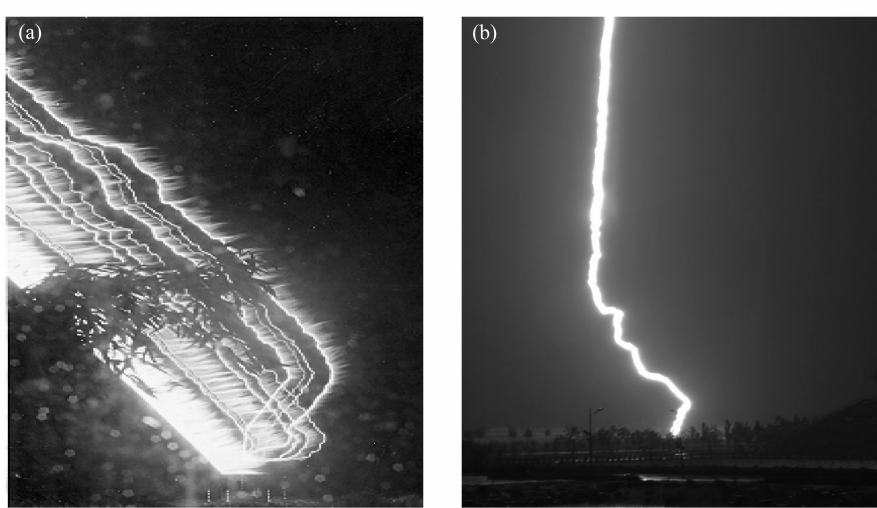


图 5 在 60 m (a) 和 550 m (b) 距离远处的两次人工引发雷电的静态照片 (引自文献[24])

Fig. 5 Pictures of two triggered flashes 60 m (a) and 550 m (b) away (from reference [24])

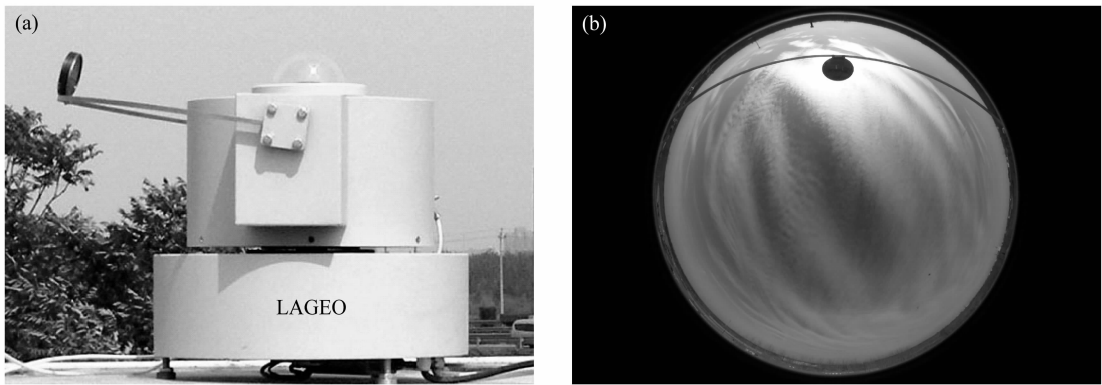


图 6 可见光全天空成像仪：(a) 仪器照片；(b) 所观测的天空图像
Fig. 6 (a) Pictures of ASI and (b) observed all-sky image

表 2 全天空成像仪主要性能参数	
Table 2 The parameters of the all-sky imager (ASI)	
性能	规格
图像分辨率	2272×1704, 24 bit JPG 彩色图像
图像采样频次	可调, 最高每 30 秒一张
环境温度	0~40℃, 温度调节装置
重量及电源	约 25 kg; 220 V

半圆杆由程序控制随着机身转动(上半部分)以及遮挡杆的上抬下走动作,实现跟踪和遮挡太阳。整套系统完全由程序控制,每日日出时刻开始观测,日落时刻停止。为使全天空成像仪能够适用于野外观测,该系统内放置一个热敏元件,将数字相机环境温度控制在 0~40℃之间。表 2 列出了全天空成像仪的主要性能。

从 2003 年开始,该系统曾先后在中国内蒙古、新疆、西藏、北京、河北香河等地投入野外观测,并在香河站(39.75°N, 116.96°E)和大气所实验楼顶(40°N, 116.7°E)长期进行全天空云与大气的实时观测试验。

4.2 扫描式全天空热红外云像仪

从地面向天空任一方向观测,在热红外波段(8~12 μm)均可感测到来自该方向的热辐射(以辐射率或亮温表示)。由于云是热红外波段的强发射体,而且在白天和夜间具有相同的红外辐射特性,厚度不大的云在热红外波段就可以看作黑体,根据天空红外辐射强度的分布可以进行云宏观参数的反演。

近年来,我们利用地基热红外辐射观测,结合辐射传输模式和地面气象资料,进行地基遥感反演云宏观参数的研究。首先利用辐射传输方程进行一

表 3 SIRS 技术参数	
Table 3 Parameters of the Scan Infrared Image System (SIRS)	
参数	指标
波长	热红外波段(8~14 μm)
测量范围	-50℃~+200℃
响应时间	35 ms
测量精度	0.5℃±0.75%×目标与环境温度的差
视场角	2°
距离比	40:1
全天空扫描时间	4.5 min (在现有窄视场探测器条件下)可获得无缝隙全天空云像图一幅
工作温度	-30℃~+60℃
相对湿度	10%~90%
电源	220 V 交流

注：全天时(24×7)不间断工作(下雨雪时,由雨感器控制自动停止测量,进入保护状态)。

系列数值模拟研究,系统研究地基观测天空热红外辐射对于近地气溶胶层和不同云底高度的敏感性,以及不同强度(以地面能见度表示)和不同类型气溶胶情况下,晴空和各种云所形成的天空红外亮温随天顶角的变化。在此基础上,自主研发发展了用于地基观测的扫描式全天空热红外云像仪(SIRS)及相应的软件,并进行了全天候准连续观测。

我们所研制的 SIRS 是一个易携带安装、适合进行全天候自动观测的仪器。主要用于测量天空任意方向 8~12 μm 波段的热红外亮温,测得的数据可以用于判断该观测方向天空是否有云,以及初步判定中低云云底的高度。对全天空进行扫描测量,可以得到全天空云的分布情况。表 3 给出了主要的技术参数。

SIRS 由室内和室外两部分组成，图 7 为室外部分，主要由一个热红外感应头、一个控制箱和一个双轴（方位、仰角）步进马达姿控平台系统，以及一个地面气象温湿度传感器组成。热红外感应头内除装有一个热红外亮温传感器外，还有温度测量电路和控制电路，用于监测传感器内部温度和观测

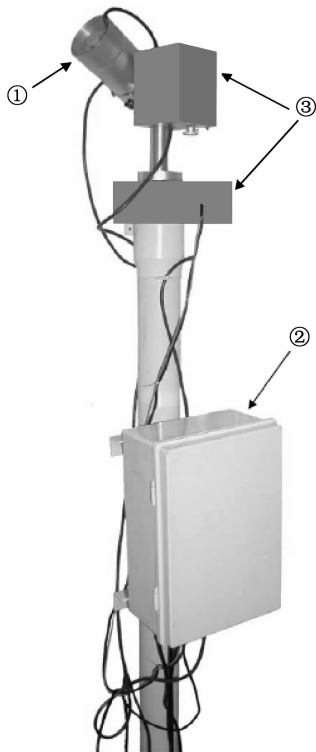


图 7 SIRS 的室外部分：①热红外感应头；②控制箱；③双轴（方位、仰角）步进马达控制平台
Fig. 7 Outdoor sensors of the SIRS: ①infrared sensor; ②control box; ③step-motor control platform in azimuth and elevation

控制、数据传输等。控制箱内装有总控制电路、数据接收和控制接口电路以及电源电路等。总控制电路板上的微处理器用于数据获取和步进马达系统的控制。通过控制程序驱动步进马达工作，带动热红外感应头进行扫描探测，与此同时，观测数据经数据传输线传输至微机进行存储、显示及后续处理。此外，在观测仪器的外部还装有降雨监测器，在全自动观测状态时，如果降雨监测器检测到降雨，控制器将置于停机状态，热红外感应头垂直对地，以保护仪器的光学系统。

室内部分为用于控制和数据采集分析的计算机，主要由控制及数据处理反演软件构成，其工作流程如图 8 所示。计算机控制程序按照用户要求的观测方式和时间定时进行观测，首先根据观测数据和对应的方位角和仰角形成全天空亮温分布图，然后结合观测地点当前时刻的温度和湿度，利用云判别和云底高度反演算法计算得到全天空云和云底高度的分布图。图 9（见文后彩图）为 SIRS 观测的天空红外亮温和反演得到的云底高度分布。

5 大气成分探测

近几十年来，温室效应、臭氧层空洞和酸雨等一系列全球性重大环境问题越来越受到重视，成为全球变化的热点科学问题，因而，国际上对与之相关的大气成分探测和研究都给予了极大关注。近五年来，我们在大气成分的遥感和直接探测理论、方法和技术方面都取得了重要进展，考虑到在卫星或地基遥感理论、反演技术和方法等方面有专门文章进行总结^[6]，下面仅就大气臭氧廓线和柱总量探

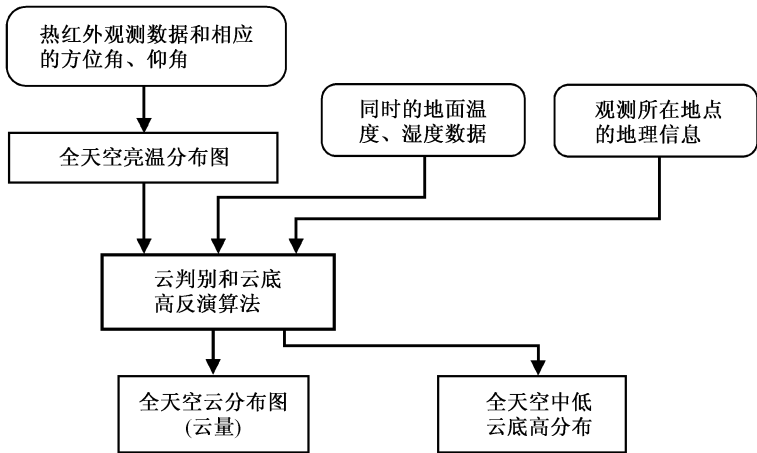


图 8 SIRS 的室内控制和数据采集分析工作流程图
Fig. 8 Flow chart of the indoor control and data processing of the SIRS

测、大气生物气溶胶和微量气体成分等地面观测方面的工作进行回顾。

5.1 大气臭氧柱总量和廓线探测

大气臭氧在大气物理、化学和动力学过程中有着特殊的作用,因此,长期以来一直是大气科学研究的重要内容。大气所在大气臭氧研究方面有较长的历史,早在 20 世纪 60 年代初就先后在我国河北香河和云南昆明陆续建立了臭氧观测站,率先在我国开展大气臭氧总量的规范观测,并加入了国际地基臭氧和紫外辐射监测网。卞建春等^[29]曾利用北京和昆明两地的 DOBSON 臭氧仪对大气臭氧总量的观测,对两地的大气臭氧总量变化特征进行详细研究。2001 年我们发展了具有自主知识产权的 GPS 臭氧探空系统^[30],从而结束了中国没有大气臭氧直接探测手段的历史,为在中国开展大气臭氧高空探测业务化创造了条件。

2002 年 3 月开始,我们与中国气象局监测网络合作,在北京利用自制的 GPS 臭氧探空仪进行连续观测,获取了我国大陆至今时间最长的单站大气臭氧廓线资料。为促进中国大气臭氧高空探测业务化进程,双方联合组织对国产 GPS 数字化大气臭氧探空仪(GPSO3)和芬兰 Vaisala 公司产大气臭氧探空仪(Vaisala)的主要技术性能进行对比^[31, 32]。对两类大气臭氧探空仪现场平行施放比对试验结果的分析表明,两种臭氧探空仪所获得的大气中臭氧浓度随高度的变化特征之间有很好的的一致性。在 12~27 km 高度范围内,两种探空仪臭氧测值之间的相对误差平均在 10% 以内,而在 10 km 以下和 27 km 以上,GPSO3 探空仪的臭氧测值偏高。卞建春等^[33]利用北京地区 2002 年 9 月~2006 年 7 月的 GPS 臭氧探空资料与卫星臭氧廓线进行对比,发现二者的差别在对流层顶附近是最小的。王庚辰等^[34, 35]利用观测资料对北京地区上空的大气臭氧垂直分布特征进行了研究。宗雪梅等^[36]对北京地区边界层大气臭氧浓度变化特征进行了分析。

5.2 大气中主要微量气体成分探测

大气中的气体成分(如 O_3 、 NO_x 、 SO_2 、 CO 、 CO_2 、VOC 等)因成分不同在大气物理、化学过程中扮演着不同的角色。化学发光、色谱分析、激光探测等技术已被广泛地运用到气体成分的测量。

近五年来,我们依托香河站、兴隆站、大气所三个代表性区域站点以及其他地区,利用先进的观

测设备开展关于主要微量气体成分(O_3 、 NO_x 、 SO_2 、 CO 、 CO_2)的监测和研究,对北京市区及其周边地区(城乡交界地区、相对洁净地区)大气主要成分浓度、变化特征等开展了一系列研究^[37~40]。另外,也开展了我国其他地区(如黑龙江漠河、亚热带森林地区)臭氧的综合测量和研究^[41, 42]。近年来,北京及其周边大城市工农业、经济、交通等的高速发展以及人口数量的逐渐增加将导致该区域大气中各种气体浓度的变化,因此长期监测和研究该区域 O_3 及其前体物的背景值以及变化、相关影响因子(包括辐射、气象参数、气溶胶等)和控制因素,对于我们全面认识该区域 O_3 及其前体物的基本特征和变化规律,以及如何控制 O_3 光化学污染等具有重要的科学意义和应用价值。

另外,王庚辰等^[43]对内蒙古草原 1999~2002 年生长季大气中 CO_2 的浓度进行测量和研究,白建辉等^[44~50]开展了我国不同地区植物(森林、草地等)VOC 排放的测量和研究,获得了关于不同植物 VOC 排放特征的初步认识,包括典型树种与草种 VOC 的排放速率、橡胶林异戊二烯的排放通量、内蒙古草地异戊二烯的排放通量等。

5.3 大气生物气溶胶探测

我国大气生物气溶胶研究始于 20 世纪 80 年代,由于空气微生物与人体健康密切相关而受到关注,生物气溶胶在环境、气候方面的影响和作用也正逐渐被人们所认识。鉴定生物气溶胶的主要方法为电子显微镜法、微生物遗传型鉴定法、细胞化学成分鉴定法、气相色谱法等。杜睿^[51, 52]分别在北京、兴隆、香河等地开展大气生物气溶胶分布特征的研究,并进行花粉气溶胶采样仪器的改进,使其研究结果可以与国际上的结果进行对比,另外还开展了实验室模拟生物气溶胶对于大气云凝结核与冰核冻结温度影响方面的实验。

6 地基 GPS 观测反演大气和海洋参数

除了高精度导航与定位目的之外,自 20 世纪 80 年代以来,GPS 作为一种新兴的遥感手段已进入到大气与海洋探测、研究与应用众多领域,并受到了众多的关注。近年来,GPS 掩星技术、GPS 反射技术以及地基 GPS 遥感技术的应用,已成为大气与海洋遥感技术研究中的热点。

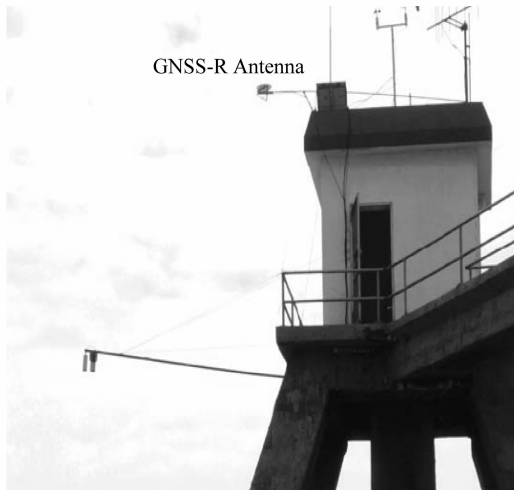


图 10 CORE 实验站及观测设备

Fig. 10 CORE observation site and equipments

6.1 GPS 大气遥感

利用 GPS 遥感可以获得大气水汽总量、电离层电子总量、大气温度、压力、湿度等廓线，其中水汽是 GPS 大气探测中的重点，也是难点之一。地基 GPS 遥感难以获得准确的垂直结构，而 GPS 掩星技术由于多路径效应及水汽模糊问题导致廓线反演中容易出现较大偏差，针对这一问题，我们提出将空基与地基探测技术相结合，利用 GPS 地基探测与 GPS 掩星技术，联合探测并反演大气水汽廓线。为此，我们在香河建立地基 GPS 观测站，进行长期连续观测，并利用其数据对北京附近区域的水汽长期变化特征进行统计分析；利用 GPS/MET、CHAMP 等掩星数据进行廓线反演方法的研究；进行了水汽廓线线性及非线性联合反演^[53~57]。研究表明，利用物理光学反演方法可以较好地降低对流层低层的多路径效应影响。与单纯的掩星反演相比，通过地基 GPS 与 GPS 掩星联合反演，可以有效地提高反演精度，获得更为准确的水汽廓线。

6.2 GPS 海洋遥感

GPS 反射技术遥感海洋参数是 GPS 应用研究中的前沿。利用该技术可对海风、海浪及潮汐进行全天候遥感，获取海面风速、风向、有效波高、海面高度等参数。我们密切关注该领域的最新研究进展，与国际前沿研究组织建立了联系。2006 年，与西班牙 Starlab 研究所在我国开展 CORE (China Ocean Reflection Experiment) GPS 海洋反射遥感

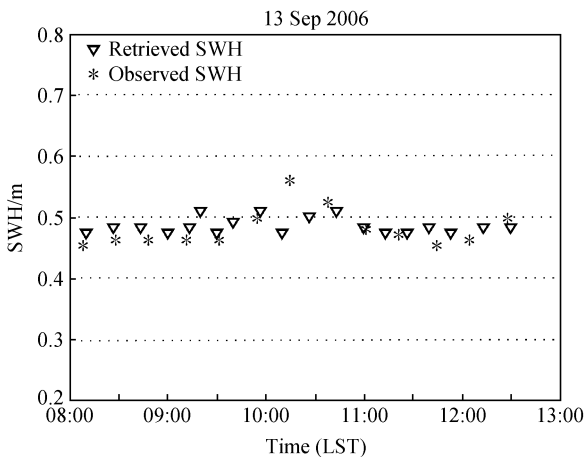


图 11 有效波高 (SWH) 反演结果与超声波浪仪监测对比

Fig. 11 Comparison between results of retrieved Significant Wave Height (SWH) and ultrasonic wave sensor

实验，同时联合国家海洋局第三研究所，中国科学院武汉物理与数学研究所、空间科学与研究中心等多个单位的研究人员，得到了最新研究成果，并与国内外专家学者展开了深入研究与交流。如图 10 所示，实验站面向开阔海面，自然观测条件优越，实验中同时采用超声波浪仪、潮位计、风速风向仪器进行同步原位观测。GPS 反射技术遥感海浪受近岸影响较小，同时具有全天候工作的优势，能够实现对观测站及周围海浪变化的实时监测。图 11 为实验中 GPS 反射所得有效波高与超声波浪仪同步监测结果对比，横轴为地方时，纵轴为有效波高^[57]。GPS 大气与海洋遥感，特别是地基与岸基

遥感技术不受恶劣天气环境影响,便于长期连续观测的开展及数据积累,对于风暴潮、海气相互作用等研究及生产应用具有重要的意义。

7 大气和环境探测平台研发

卫星、飞机和气球是大气和环境探测与遥感的三大重要平台。除了一些重要的探测系统和传感器的研制外,我们还开发了 XLS-II 型系留气艇探测系统^[58]和 GPS 导航微型无人驾驶飞机(UAV)探测平台。UAV 是观测大气三维结构的良好平台,使用飞机可以提供大气成分和大气参量的宝贵资料,我们利用 UAV 进行大气探测已有 10 余年的历史,取得了丰富的经验。到目前为止,我们已经自主开发了三种型号的 UAV。陈洪滨等^[59]早在 20 世纪 90 年代就研制了一架微型 UAV 以及一套基于 UAV 的航拍航摄系统,并在内蒙古锡林郭勒盟进行了数次航拍和航摄草地遥感试验。近几年,我们又连续发展了两种型号的具有 6~8 小时续航能力、升限 5~8 km 的自动驾驶飞机,可以探测地面至 5~8 km 高度的大气温度、气压、湿度和风速风向等大气参数的垂直分布。

7.1 气象探测无人机

已经研制成功气象探测无人机实验样机和机载 O₃、PTUW(压温湿风)探测系统,并成功进行了试飞探测,飞行高度可达 5 km,飞行时间 6 小时,可以探测地面至 5 km 高度的大气参数^[60]。作为大气探测和地面遥感的一个重要平台,也可以根据应用目的的不同,搭载多种不同的探测传感器,如大气成分、风场等。通过数十次的野外飞行试验,已经证明了该型无人驾驶飞机在气象探空上的有效性和实用性。

7.2 长航时高空无人机

根据应用需求,采用 4 缸大功率航空发动机,结合新研制的增压系统,最新研制了长航时高空无人机,可达到升限 8 km,载重 60~80 kg,航时 4~6 小时。该型无人机不仅大大扩展了探测的大气范围,在强对流天气的实地观测中也有重要的应用前景。该长航时高空无人机作为一个可靠的多功能探测平台,必将在大气、特殊天气事件、环境、地表特征的探测和遥感中发挥重要作用。

8 结语和展望

中国科学院大气物理研究所近年来在大气探测

高技术领域开展了一系列创新性研究和开发,本文力求对五年来在地基大气探测方面的一些最近技术成果,以及据此开展的一些相关研究成果进行较全面的总结。除了本文提到的一些技术外,我们还正在积极研发一些新的大气探测高技术装备:

中层大气探测方面,在 20 世纪 80 年代研制的 VHF 相控阵雷达基础上,已经开始 MST 雷达的研制,该雷达作为我国重大科技工程“子午工程”重要的无线电分系统,将在我国的中高层大气探测中发挥重要作用。另外,在中国科学院知识创新工程重要方向项目支持下的“平流层气球下投大气和海温海流探测技术”也已经取得了重要进展。

在强对流灾害性天气的监测方面,在国家自然科学基金仪器专项支持下正在研制多基地多普勒气象雷达探测系统,与已有的 X 波段双偏振多普勒雷达配合,将共同构成强天气的立体监测网,成为当前小区域强天气探测的重要手段。

在雷电与大气电学探测方面,在中国科学院知识创新工程重大项目的支持下正在研制“雷电综合探测网络和新一代人工引雷系统”,其中新一代人工引雷系统将在火箭箭体、点火系统和测量技术方面进行重大改进,新一代人工引雷火箭首次在国内采用复合材料代替正在使用的不锈钢材料,增加了火箭的安全性。该系统的研制成功将在雷电灾害监测、防护等方面发挥重要作用,并为积累具有我国自主知识产权的雷电流波形数据和科学的雷电防护提供重要的技术支撑。

在大气状态探测方面,在中国科学院知识创新工程重大项目支持下正在研制的“多普勒测风激光雷达”,将在对流层三维风场分布探测和研究中发挥重要作用。

大气探测高技术的未来发展将继续以人类生存环境、灾害性天气事件与气候变化研究为中心,结合探测新原理与遥感反演理论和模型,研究、开发大气参数与过程探测的新技术和新方法,特别是一些特殊大气探测和极端天气事件现场探测,如水汽和大气成分探测、中层大气状态与成分探测、强对流系统(雷暴、台风、暴雨等)中的微物理量和电参量直接探测等等。这些大气探测技术的发展和完善,将形成对流层和平流层大气与环境的综合探测系统,在促进大气科学及其交叉科学的发展,特别是在增进地球系统科学的认识和发展方面发挥重要

作用。

致谢 本文得到了中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境实验室 (LAGEO) 很多专家的建议和帮助, 在此一并表示感谢。

参考文献 (References)

- [1] Lü Daren, Yi Fan, Xu Jiayao. Advances in studies of the middle and upper atmosphere and their coupling with lower atmosphere. *Adv. Atmos. Sci.*, 2004, **21** (3): 361~368
- [2] Qiu Jinhuan, Chen Hongbin. Recent progresses in atmospheric remote sensing research in China—Chinese national report on atmospheric remote sensing research in China during 1999–2003. *Adv. Atmos. Sci.*, 2004, **21** (3): 475~484
- [3] Qiu J, Chen H, Wang P, et al. Recent progress in atmospheric observation research in China. *Adv. Atmos. Sci.*, 2007, **24** (6): 940~953
- [4] 邱金桓, 王普才, 夏祥鳌, 等. 近年来大气遥感研究进展. 大气科学, 2008, **32** (4): 841~853
Qiu J, Wang P, Xia X, et al. Recent progresses in atmospheric remote sensing researches. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2008, **32** (4): 841~853
- [5] 段树, 张凌, 刘锦丽, 等. 双线偏振双波段(X/Ka)主被动微波遥感系统的研制与初步试验. 遥感学报, 2002, **6** (4): 89~293
Duan Shu, Zhang Ling, Liu Jinli, et al. Development of an active and passive dual-wavelength (X/Ka) dual-polarization remote sensing system and its preliminary test. *Journal of Remote Sensing* (in Chinese), 2002, **6** (4): 289~293
- [6] 张凌, 吕达仁, 段树, 等. 降雨空间不均匀性与雷达测雨空间平滑误差. 遥感技术与应用, 2003, **18** (6): 364~373
Zhang Ling, Lü Daren, Duan Shu, et al. Rain spatial non-uniformity and spatial smoothing error of radar rainfall measurement. *Remote Sensing Technology and Application* (in Chinese), 2003, **18** (6): 364~373
- [7] Zhang Ling, Lü Daren, Duan Shu, et al. Small-scale rain nonuniformity and its effect on evaluation of nonuniform beam-filling error for spaceborne radar rain measurement. *J. Atmos. & Oceanic Tech.*, 2004, **21** (8): 1190~1197
- [8] 刘红燕, 陈洪滨, 雷恒池, 等. 利用 2004 年北京雨滴谱资料分析降水强度和雷达反射率因子的关系. 气象学报, 2008, **66**: 125~129
Liu Hongyan, Chen Hongbin, Lei Hengchi, et al. Relationship between rain rate and radar reflectivity based on the rain-drop distribution data in Beijing during 2004. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2008, **66**: 125~129
- [9] 冯桂力, 鄒秀书, 袁铁, 等. 雹暴的闪电活动特征与降水结构研究. 中国科学, 2007, **37** (1): 123~132
Feng Guili, Qie Xiushu, Yuan Tie, et al. Analysis on lightning activity and precipitation structure of hailstorms. *Science in China* (Series D), 2007, **50** (4): 629~640
- [10] 冯桂力, 鄒秀书, 吴书君. 山东地区冰雹云的闪电活动特征. 大气科学, 2008, **32** (2): 289~299
Feng Guili, Qie Xiushu, Wu Shujun. Cloud-to-ground lightning characteristics of hail clouds in Shandong Province. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2008, **32** (2): 289~299
- [11] 顾震潮. 雷电活动的单站定位问题. 科学通报, 1965, **11**: 973~978
Gu Zhenchao. The issues on the single station lightning location. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 1965, **11**: 973~978
- [12] 袁蓓, 蒋本汤, 任丽新, 等. 强电场探空仪及雷雨云电场探测结果的分析. 气象学报, 1965, **35** (4): 440~448
Yuan Zhen, Jiang Bentang, Ren Lixin, et al. The strong electric-field-radiosonde and the analysis of the results obtained in thunderclouds. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1965, **35** (4): 440~448
- [13] 中国科学院大气物理研究所. 雷暴探测和雷电物理研究(中国科学院大气物理研究所专刊第 4 号). 北京: 科学出版社, 1976
Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences. *Research of the Thunderstorm Detection and Lightning Physics* (The NO. 4 Special Issue of the Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences) (in Chinese). Beijing: Science Press, 1976
- [14] Qie Xiushu, Zhang Yijun, Zhang Qilin. Characteristics of lightning discharges and electric structure of thunderstorm. *Acta Meteorologica Sinica*, 2006, **20** (2): 244~257
- [15] Yang J, Qie X, Zhang G, et al. Magnetic field measuring system and current retrieval in artificially triggering lightning experiment. *Radio Science*, 2008, doi: 10.1029/2007RS003753
- [16] 杨静, 鄒秀书, 张其林, 等. 人工触发闪电直窜先导——回击放电参量的估算. 中国电机工程学报, 2006, **26** (增刊): 125~130
Yang Jing, Qie Xiushu, Zhang Qilin, et al. Parameters of dart-leader return stroke in artificially-triggered lightning. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering* (in Chinese), 2006, **26** (Suppl.): 125~130
- [17] 杨静, 鄒秀书, 张其林, 等. 一次人工引发闪电初始电流及其电磁场变化特征. 高原气象, 2007, **26** (3): 556~562
Yang Jing, Qie Xiushu, Zhang Qilin, et al. The current and electromagnetic field in the initial stage of an artificially-triggered lightning. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2007, **26** (3): 556~562
- [18] 杨静, 鄒秀书, 王建国, 等. 雷电在水平导体中产生感应电压的观测及数值模拟研究. 物理学报, 2008, **57** (3): 1968~1975
Yang Jing, Qie Xiushu, Wang Jianguo, et al. Observation of

- the lightning-induced voltage in the horizontal conductor and its simulation. *Acta Physica Sinica* (in Chinese), 2008, **57** (3): 1968~1975
- [19] Qie X, Kong X. The progression features of a stepped leader process with four grounded leader branches. *Geophys. Res. Lett.*, 2007, **34**: L06809, doi: 10.1029/2006GL028771
- [20] Kong X, Qie X, Zhao Y. Characteristics of downward leader in a positive cloud-to-ground lightning flash observed by high-speed video camera and electric field changes. *Geophys. Res. Lett.*, 2008, **35**: L05816, doi: 10.1029/2007GL032764
- [21] 杨静, 郗秀书, 张广庶, 等. 发生于山东沿海雷暴云上方的红色精灵. 科学通报, 2008, **53** (4): 482~488
Yang Jing, Qie Xiushu, Zhang Guangshu, et al. Red sprites over thunderstorms in the coast of Shandong Province, China. *Chinese Science Bulletin*, 2008, **53** (7): 1079~1086
- [22] Liu X, Wang C, Zhang Y, et al. Experiment of artificial triggering lightning in China. *J. Geophys. Res.*, 1994, **99**: 10727~10731
- [23] 张义军, 刘欣生, 肖庆复. 中国南北方雷暴及人工触发闪电特征对比分析. 高原气象, 1997, **16** (2): 113~121
Zhang Yijun, Liu Xinsheng, Xiao Qingfu. An analysis of characteristics of thunderstorm and artificially triggered lightning in the north and south of China. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1997, **16** (2): 113~121
- [24] 郗秀书, 张其林, 周筠琚, 等. 两次强雷暴系统中雷电的人工引发及其特征放电参量的测量与估算. 中国科学, 2007, **34** (4): 564~572
Qie Xiushu, Zhang Qilin, Zhou Yunjun, et al. Artificially triggered lightning and its characteristic discharge parameters in two severe thunderstorms. *Science in China* (Series D: Earth Sciences), 2007, **34** (8): 1241~1250
- [25] 霍娟, 吕达仁, 王越. 全天空云识别阈值法的数值模拟初步研究. 自然科学进展, 2006, **16** (4): 480~484
Huo Juan, Lü Daren, Wang Yue. Simulation of cloud detection threshold in all-sky images. *Progress in Natural Science* (in Chinese), 2006, **16** (4): 480~484
- [26] 霍娟, 吕达仁. 晴空与有云大气辐射分布的数值模拟及其对全天空图像云识别的应用. 气象学报, 2006, **64** (1): 31~38
Huo Juan, Lü Daren. Characteristics and distribution of all-sky radiance by libradtran modeling: For cloud determination algorithm in all-sky images. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2006, **64** (1): 31~38
- [27] 霍娟, 吕达仁. 云的移动轨迹成像模拟及云量变化分析. 南京气象学院学报, 2006, **29** (2): 209~214
Huo Juan, Lü Daren. Track-simulation of cloud's motion and the analysis of variations of cloud-fraction. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 2006, **29** (2): 209~214
- [28] 章文星, 吕达仁, 常有礼. 地基热红外亮温遥感云底高度可行性的模拟研究. 地球物理学报, 2007, **50**: 354~363
Zhang Wenxing, Lü Daren, Chang Youli. A feasibility study of cloud base height remote sensing by simulating ground-based thermal infrared brightness temperature measurements. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 2007, **50**: 354~363
- [29] Bian Jianchun, Chen Hongbin, Zhao Yanliang, et al. Variation features of total atmospheric ozone in Beijing and Kunming based on Dobson and TOMS data. *Advance in Atmospheric Sciences*, 2002, **19** (2): 279~286
- [30] 王庚辰, 孔琴心, 宣越健, 等. 中国大气臭氧探空仪的研制和应用. 地球科学进展, 2003, **18** (3): 471~475
Wang Gengchen, Kong Qinxin, Xuan Yuejian, et al. Development and application of ozonesonde system in China. *Advance in Earth Science* (in Chinese), 2003, **18** (3): 471~475
- [31] 宣越健, 马舒庆, 陈洪滨, 等. 国产 GPSO_3 与芬兰 Vaisala 臭氧探空仪的比对试验. 高原气象, 2004, **23** (3): 394~399
Xuan Yuejian, Ma Shuqing, Chen Hongbin, et al. Intercomparisons of GPSO_3 and Vaisala ECC Ozone Sondes. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2004, **23** (3): 394~399
- [32] 王庚辰, 孔琴心, 宣越健, 等. GPSO3 和 Vaisala 臭氧探空仪平行施放比对结果的初步分析. 应用气象学报, 2004, **15** (6): 672~680
Wang Gengchen, Kong Qinxin, Xuan Yuejian, et al. Preliminary analysis on parallel comparison of GPSO3 and Vaisala ozonesondes. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 2004, **15** (6): 672~680
- [33] Bian J, Gettelman A, Chen H, et al. Validation of satellite ozone profile retrievals using Beijing ozonesonde data. *J. Geophys. Res.*, 2007, **112**: D06305, doi: 10.1029/2006JD007502
- [34] 王庚辰, 孔琴心, 陈洪滨, 等. 北京上空大气臭氧垂直分布的特征. 地球科学进展, 2004, **19** (5): 743~748
Wang Gengchen, Kong Qinxin, Chen Hongbin, et al. Characteristics of ozone vertical distribution in the atmosphere over Beijing. *Advance in Earth Science* (in Chinese), 2004, **19** (5): 743~748
- [35] 王庚辰, 孔琴心, 陈洪滨. 北京地区对流层顶变化及其对对流层/下平流层区域臭氧变化的影响. 大气科学, 2006, **30** (4): 587~595
Wang Gengchen, Kong Qinxin, Chen Hongbin. Variation of the tropopause height and its influence on ozone variation in upper troposphere/lower stratosphere over Beijing. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, **30** (4): 587~595
- [36] 宗雪梅, 王庚辰, 陈洪滨, 等. 北京地区边界层大气臭氧浓度变化特征分析. 环境科学, 2007, **28** (11): 2615~2619
Zong Xuemei, Wang Gengchen, Chen Hongbin, et al. Analysis on concentration variety characteristics of atmospheric ozone under the boundary layer in Beijing. *Environmental Science* (in Chinese), 2007, **28** (11): 2615~2619
- [37] 王庚辰, 谢骅, 万小伟, 等. 北京地区空气中 PM₁₀ 的元素组

- 分及其变化. 环境科学研究, 2004, **17** (1): 41~44
- Wang Gengchen, Xie Hua, Wan Xiaowei, et al. Chemical composition of PM₁₀ and its variation in the atmosphere in Beijing area. *Research of Environmental Sciences* (in Chinese), 2004, **17** (1): 41~44
- [38] 王庚辰, 谢骅, 万小伟, 等. 北京地区气溶胶质量浓度及组分随高度的变化. 环境科学研究, 2004, **17** (1): 37~40
- Wang Gengchen, Xie Hua, Wan Xiaowei, et al. Variation of aerosol mass concentration and element composition with height in Beijing area. *Research of Environmental Sciences* (in Chinese), 2004, **17** (1): 37~40
- [39] Wang Gengchen, Bai Jianhui, Kong Qinxin, et al. Black carbon particles in the urban atmosphere in Beijing. *Advance in Atmospheric Sciences*, 2005, **22** (5): 640~646
- [40] 白建辉, 王庚辰, 孟昭阳, 等. 华北洁净地区微量气体变化特征的初步研究. 环境科学研究, 2006, **19** (6): 15~19
- Bai Jianhui, Wang Gengchen, Meng Zhaoyang, et al. Primary study on the characteristics of trace gas in clean area of North China. *Research of Environmental Sciences* (in Chinese), 2006, **19** (6): 15~19
- [41] 白建辉, Baker B, Johnson C, 等. 西双版纳热带森林挥发性有机物的观测研究. 中国环境科学, 2004, **24** (2): 142~146
- Bai Jianhui, Baker B, Johnson C, et al. Observational studies on volatile organic compounds of the tropical forest in Xishuangbanna. *China Environmental Science* (in Chinese), 2004, **24** (2): 142~146
- [42] 白建辉. 漠河地区臭氧的观测和计算. 气候与环境研究, 2006, **11** (2): 221~228
- Bai Jianhui. The measurement and the calculation of atmospheric ozone in the Mohe area. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2006, **11** (2): 221~228
- [43] 王庚辰, 孔琴心, 杜睿, 等. 内蒙古草原生长季节大气中 CO₂ 浓度及其变化特征研究. 草地学报, 2004, **12** (2): 145~149
- Wang Gengchen, Kong Qinxin, Du Rui, et al. Atmosphere CO₂ concentration and its variation characters above Inner Mongolia grassland in grass growing season. *Acta Agrestia Sinica* (in Chinese), 2004, **12** (2): 145~149
- [44] 白建辉, 王庚辰, Baker B, 等. 内蒙古草地挥发性有机物的预研究. 科学技术与工程, 2003, **3** (2): 179~181
- Bai Jianhui, Wang Gengchen, Baker B, et al. Prestudy on the volatile organic compound in Inner Mongolia grassland. *Science Technology and Engineering* (in Chinese), 2003, **3** (2): 179~181
- [45] 王庚辰, 杜睿, 孔琴心, 等. 中国温带典型草原土壤呼吸特征实验研究. 科学通报, 2004, **49** (7): 692~696
- Wang Gengchen, Du Rui, Kong Qinxin, et al. Experimental study on soil respiration of temperate grassland in China. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 2004, **49** (7): 692~696
- [46] 白建辉, Baker B. 内蒙古草原典型草地异戊二烯的排放特征. 环境科学学报, 2005, **25** (3): 285~292
- Bai Jianhui, Baker B. Emission characteristics of isoprene at typical grassland in the Inner Mongolia grassland. *Acta Scientiae Circumstantiae* (in Chinese), 2005, **25** (3): 285~292
- [47] Bai Jianhui, Wang Gengchen, Wang Mingxing. An empirical correlation between surface O₃ and its factors. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**: 4419~4423
- [48] 白建辉, Baker B. 不同类型草地挥发性有机物排放特征的研究. 大气科学, 2006, **30** (1): 119~130
- Bai Jianhui, Baker B. A study of the emission characteristics of volatile organic compounds at different grasslands. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, **30** (1): 119~130
- [49] 白建辉. 多云天气异戊二烯排放通量的计算. 环境科学研究, 2006, **19** (1): 99~103
- Bai Jianhui. The calculation of isoprene emission flux under cloudy sky conditions. *Research of Environmental Sciences* (in Chinese), 2006, **19** (1): 99~103
- [50] Bai Jianhui, Baker B, Liang Baosheng, et al. Isoprene and monoterpene emissions from an Inner Mongolia grassland. *Atmospheric Environment*, 2006, **40** (30): 5753~5758
- [51] 杜睿. 大气生物气溶胶的研究进展. 气候与环境研究, 2006, **11** (4): 546~552
- Du Rui. The progress of atmospheric bioaerosol research. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2006, **11** (4): 546~552
- [52] 杜睿. 北京及周边地区大气边界层中花粉气溶胶的观测. 中国环境科学, 2007, **4**: 477~481
- Du Rui. Measurement research of pollen aerosols in atmospheric boundary layer of Beijing and around areas. *China Environmental Science* (in Chinese), 2007, **4**: 477~481
- [53] 王鑫, 吕达仁, 薛震刚. GNSS 掩星中大气水汽的非线性反演. 地球物理学报, 2005, **48** (1): 32~38
- Wang Xin, Lü Daren, Xue Zhen'gang. A non-linear inversion method for retrieval of water vapour from radio occultation measurements. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 2005, **48** (1): 32~38
- [54] 王鑫, 吕达仁. 空基与地基 GPS 联合反演水汽廓线. 电波科学学报, 2007, **22** (Suppl.): 197~199
- Wang Xin, Lü Daren. Combined retrieval of atmospheric water vapor profiles with space-borne and ground-based GPS observation. *Chinese Journal of Radio Science* (in Chinese), 2007, **22** (Suppl.): 197~199
- [55] 吴建军, 王鑫, 吕达仁, 等. 北京可降水量变化特征的地基 GPS 观测与分析. 南京气象学院学报, 2007, **30** (3): 377~382
- Wu Jianjun, Wang Xin, Lü Daren, et al. Observation and analysis of the variation features of Beijing precipitable water by the ground-based GPS technique. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 2007, **30** (3): 377~

382

- [56] 王鑫, 吕达仁. GPS 无线电掩星技术反演大气参数方法对比. *地球物理学报*, 2007, **50** (2): 346~353
Wang Xin, Lü Daren. Comparative analysis of inversion methods of retrieving atmospheric profiles with GPS occultation measurements. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 2007, **50** (2): 346~353
- [57] 王鑫, 孙强, 张训械, 等. 中国首次岸基 GNSS-R 海洋遥感实验. *科学通报*, 2008, **53** (5): 589~592
Wang Xin, Sun Qiang, Zhang Xunxie, et al. First China ocean reflection experiment using coastal GNSS-R. *Chinese Science Bulletin*, 2008, **53** (7): 1117~1120
- [58] 王庚辰, 李立群, 王勇, 等. XLS-II 型系留气艇探测系统. *气象科技*, 2004, **32** (4): 269~273
Wang Gengchen, Li Liquan, Wang Yong, et al. XLS-II tethered balloon sounding system. *Meteorological Science and Technology* (in Chinese), 2004, **32** (4): 269~273
- [59] 陈洪滨, 马舒庆, 汪改, 等. 基于微型自动驾驶飞机的航拍航摄遥感系统. *遥感技术与应用*, 2001, **16** (3): 144~147
Chen Hongbin, Ma Shuqing, Wang Gai, et al. Remote sensing systems on board autonomous miniature aircraft. *Remote Sensing Technology and Application* (in Chinese), 2001, **16** (3): 144~147
- [60] 马舒庆, 陈洪滨, 王改, 等. A miniature robotic plane meteorological sounding system. *Adv. Atmos. Sci.*, 2004, **21** (6): 890~896

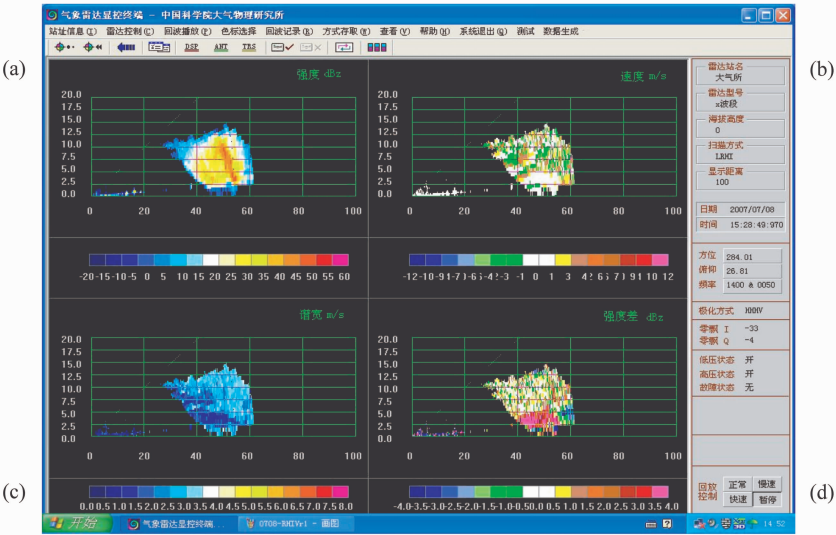


图 2 利用 X 波段双偏振多普勒气象雷达对一次强降雨过程的实际观测：(a) 强度；(b) 径向速度；(c) 谱宽；(d) 强度差
Fig. 2 Observation on a severe convective process by using the X-band dual-polarization Doppler radar: (a) Echo intensity; (b) velocity; (c) spectrum width; (d) difference of intensity

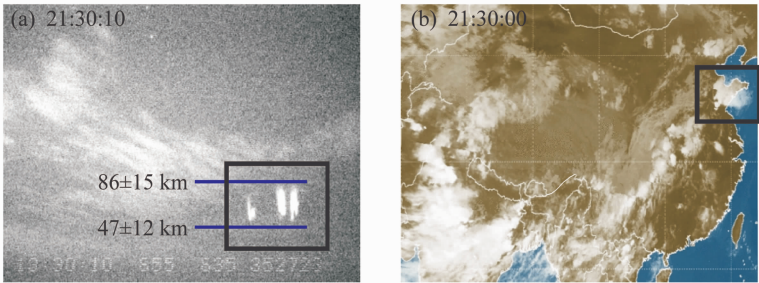


图 4 2007 年 8 月 1 日发生于 350 km 外的雷暴云上部的红闪静态图像 (a, 方框) 与雷暴云卫星云图 (b, 方框) (引自文献[21])
Fig. 4 (a) The image of red sprite about 350 km away (square) and (b) the corresponding thunderstorm from the satellite image (square) on 1 Aug 2007 (from reference [21])

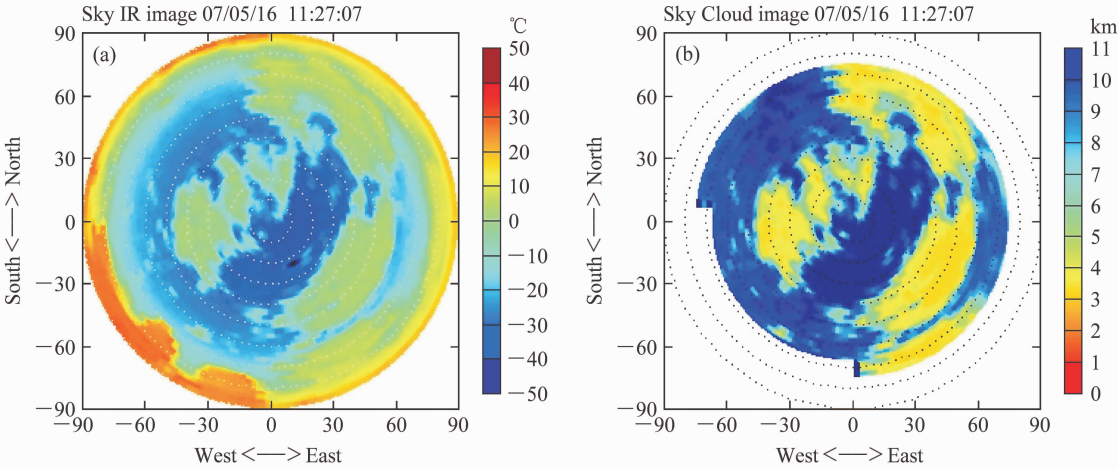


图 9 SIRS 观测的天空红外亮温 (a) 和反演得到的云底高度分布 (b)
Fig. 9 (a) The observed all-sky brightness temperature by the SIRS and (b) the retrieved cloud base height