

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

王体健, 高太长, 张宏昇, 葛茂发, 雷恒池, 张培昌, 张鹏, 陆春松, 刘超, 张华, 张强, 廖宏, 阚海东, 冯兆忠, 张义军, 郗秀书, 蔡旭晖, 李蒙蒙, 刘磊, and 佟胜睿

Citation: 中国科学: 地球科学; doi: 10.1360/SSTe-2019-0134

View online: <http://engine.scichina.com/doi/10.1360/SSTe-2019-0134>

Published by the [《中国科学》杂志社](#)

Articles you may be interested in

[新中国成立70年以来的中国大气科学研究: 天气篇](#)

SCIENTIA SINICA Terrae

[新中国成立70年以来的中国大气科学研究: 气候与气候变化篇](#)

SCIENTIA SINICA Terrae **49**, 1607 (2019);

[新中国大气环流研究的进展](#)

Chinese Science Bulletin **10**, 501 (1959);

[新中国成立70周年生命科学研究进展专辑编者按](#)

SCIENTIA SINICA Vitae **49**, 1183 (2019);

[新中国的科学研究工作——纪念新中国成立五周年为“苏联科学院通报”而写](#)

Chinese Science Bulletin **5**, 13 (1954);



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

王体健^{1*}, 高太长^{2†}, 张宏昇^{3‡}, 葛茂发^{4§}, 雷恒池⁵, 张培昌⁶, 张鹏⁷, 陆春松⁶, 刘超⁶,
张华⁸, 张强⁹, 廖宏¹⁰, 阚海东¹¹, 冯兆忠¹⁰, 张义军¹², 郗秀书⁵, 蔡旭晖¹³, 李蒙蒙¹,
刘磊², 佟胜睿⁴

1. 南京大学大气科学学院, 南京 210023;
2. 中国人民解放军国防科技大学气象海洋学院, 南京 211101;
3. 北京大学物理学院大气与海洋科学系, 北京 100871;
4. 中国科学院化学研究所, 北京 100190;
5. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029;
6. 南京信息工程大学大气物理学院, 南京 210044;
7. 国家卫星气象中心, 北京 100000;
8. 中国气象科学研究院, 北京 100081;
9. 清华大学地球系统科学系, 北京 100084;
10. 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 南京 210044;
11. 复旦大学公共卫生学院环境卫生学教研室, 上海 200032;
12. 复旦大学大气与海洋科学系, 上海 200032;
13. 北京大学环境科学与工程学院环境科学系, 北京 100871

* 通讯作者, E-mail: tjwang@nju.edu.cn

‡ 通讯作者, E-mail: hsdq@pku.edu.cn

§ 通讯作者, E-mail: gemaofa@iccas.ac.cn

† 通讯作者, E-mail: 2009gaotc@gmail.com

收稿日期: 2019-06-20; 收修改稿日期: 2019-10-31; 接受日期: 2019-11-04; 网络版发表日期: 2019-11-26

摘要 新中国成立70年以来, 中国大气物理与大气环境学科不断发展, 为大气科学的发展提供了重要支撑, 为国民经济的发展提供了重要保障。文章着重介绍新中国成立70年以来中国大气物理与大气环境学科发展的总体概况, 梳理改革开放40年大气物理与大气环境学科的主要研究进展, 总结21世纪以来的突出研究成果, 指出面临的重大问题和挑战, 提出未来的重点方向和发展建议。

关键词 大气物理, 大气环境, 大气探测, 大气化学, 大气遥感

中文引用格式: 王体健, 高太长, 张宏昇, 葛茂发, 雷恒池, 张培昌, 张鹏, 陆春松, 刘超, 张华, 张强, 廖宏, 阚海东, 冯兆忠, 张义军, 郗秀书, 蔡旭晖, 李蒙蒙, 刘磊, 佟胜睿. 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. 中国科学: 地球科学, 49, doi: [10.1360/SSTe-2019-0134](https://doi.org/10.1360/SSTe-2019-0134)

英文引用格式: Wang T, Gao T, Zhang H, Ge M, Lei H, Zhang P, Zhang P, Lu C, Liu C, Zhang H, Zhang Q, Liao H, Kan H, Feng Z, Zhang Y, Qie X, Cai X, Li M, Liu L, Tong S. 2019. Review of Chinese atmospheric science research over the past 70 years: Atmospheric physics and atmospheric environment. Science China Earth Sciences, 62, <https://doi.org/10.1007/s11430-019-9536-1>

1 引言

大气物理与大气环境是大气科学的一个重要分支学科,它以实验探测方法为基础,利用物理学和化学原理解释大气现象,理解发生在大气中的各种过程并建立定量规律,为认识大气变化规律、利用大气资源和改变大气中的某些特性以适应人类经济、社会活动和可持续发展提供理论和应用指导。

大气物理与大气环境学科主要包括大气边界层物理学、云和降水物理学、大气辐射学、大气声学、大气光学、大气电学、大气探测学、大气遥感学、雷达气象学、卫星气象学、平流层和高层大气物理学、大气环境学、大气化学等,主要研究发生在大气中的湍流运动、云和降水形成、辐射传输、声光电等物理过程,发展大气探测和遥感的基础理论和应用技术,研究大气组分的物理和化学特性、迁移转化规律以及它们与人类活动、气象和生态系统之间的相互影响。

本文将重点介绍新中国成立70年以来大气物理与大气环境学科发展的总体概况,梳理改革开放40年大气物理与大气环境学科的主要研究进展,总结21世纪以来大气物理与大气环境学科的突出研究成果,指出大气物理与大气环境学科面临的重大问题和挑战,提出未来大气物理与大气环境学科的重点方向和发展建议。

2 新中国成立以来大气物理与大气环境学科发展的总体概况

中国近代大气物理学起始于20世纪30年代,在近代气象学家创始人竺可桢的积极倡导和叶企孙、吴有训、严济慈等老一辈物理学家的热心培植下,中国大气物理研究开始萌芽,并不断发展,赵九章、顾震潮、叶笃正、陶诗言等中国大气科学领域的开创者们为这一时期研究做出了重要贡献(邱金桓等,2003)。1949年以后,中国大气物理研究迅速和全面发展,先后开创了中国云雾物理与人工影响天气、大气边界层物理、大气辐射与遥感、大气臭氧与大气光学等重大学科领域。改革开放以来,由于人类生产和生活活动增强,大气中人为排放物增加,为了充分掌握关系到人类社会发展的环境演变规律,大气环境与大气化学研究开始兴起,大气边界层与大气湍流研究活跃,大

气探测技术和应用研究蓬勃发展。同时,随着中国卫星以及航空技术与应用的飞速发展需要,大气物理学研究的另一领域——大气辐射与遥感研究迅速发展,形成了现代大气探测与遥感物理学。进入21世纪以后,随着全球气候变化研究日益升温,CO₂等微量气体的温室效应、平流层臭氧的环境与气候问题、气溶胶的辐射强迫与气候影响,先后成为大气科学的研究热点,加上中国大气污染严重,大气环境保护工作迫切,极大地推动了中国科学家在大气组分探测与变化趋势、大气复合污染化学、气溶胶的光学特性与辐射强迫、云-气溶胶-辐射的相互作用、中层大气等前沿领域的研究,并迅速跟上了现代大气物理与大气环境前进的步伐。以下分别就大气物理、大气环境与大气化学、大气探测与大气遥感三个方面进行介绍。

2.1 大气物理

大气边界层物理是大气物理的重要分支,20世纪50年代以来,中国科学家紧跟国际大气边界层研究前沿,开展了大气湍流、近地面层相似性关系、水热交换、农田微气象、大气边界层结构、大气边界层数值模拟研究,空气污染和新能源利用的需求更是极大促进了大气边界层探测和数值模拟研究,如官厅水库的水面蒸发实验,农田微气候实验研究,为核能和化工建设开展大气湍流扩散实验与研究,在西北干旱半干旱区、西北沙漠、北方农牧生态区、北方草原、青藏高原、东部沿海、南海、城市和城市群(区)等具有不同下垫面和区域特点地区开展以大气边界层为核心内容的综合实验研究。中国科学院、高校和气象部门开展了大气边界层探测仪器设备研制和应用的工作,包括超声风温仪、低空探空仪、温度脉动仪、波文比探测系统、系留气球、声雷达、激光雷达、边界层风廓线雷达等;在全国范围内建设了长期或定期的大气边界层综合观测站,包括北京325m、天津255m、深圳356m气象高塔观测平台、碳通量观测网络、青藏高原陆面观测网络、风能资源观测网络等。大气湍流和大气边界层理论研究也有了长足进展,包括湍流应力模式、分子动力学模型、湍流扩散模型、湍流场团块结构、非线性特征、近地层相似性关系参数化、稳定边界层、湍流间歇性、湍流斜波结构、不稳定层局地相似性等。建立了有中国特点的陆面过程模式、大涡模拟技术、印痕分析技术、大气边界层中尺度扩

散模式、城市能量平衡参数化方案、城市多层冠层模式、多尺度高分辨城市边界层模式(吕达仁, 1999; 蒋维楣等, 2009). 当前研究主要集中在大气边界层实验和探测方法、湍流理论和稳定边界层过程、陆面过程、复杂下垫面水热和物质输送、边界层物理过程对气候环境的影响和效应及相互作用等方面.

云雾物理是大气物理的另一重要方向, 为了满足人工影响天气的需要, 中国于1958年开始云雾降水物理研究. 科学家们自制仪器在衡山、泰山和庐山进行了云雾观测, 发现了云雾中垂直速度及云微物理量等的起伏、双峰分布、超绝热含水量等(毛节泰和顾震潮, 1963; 许焕斌, 1964; 朱珍华等, 1965), 分析了云雾水的化学组成特征(丁国安等, 1991). 除了观测, 顾震潮(1962)从理论上推导了云物理的系列方程, 奠定了云物理研究的基础. 之后, 中国科学家们揭示了过饱和度和起伏、云滴浓度和含水量的起伏、垂直速度的起伏、对流泡结构对云滴凝结和碰并增长、降水形成等的影响(顾震潮, 1962; 周秀骥, 1963). 赵柏林和丁荣良(1963)通过计算从理论上说明了人工播撒增雨的可能性, 并且给出了定量的结果. 随着机载探测设备、雷达和卫星观测技术的进步, 云雾物理的研究也得到了大力发展; 随着模式的研制和计算机能力的不断进步, 与云雾物理相关的模式从一维发展到二维再到三维, 从暖云发展到冷云, 谱分布方案从单参发展到双参到三参再引入分档方案, 先后建立了多种云-降水相关的数值模式(毛节泰和郑国光, 2006; 雷恒池等, 2008).

大气辐射是大气物理的重要方向之一, 从20世纪80年代起, 中国科学家在大气气体吸收、粒子散射和辐射模式三个方向分别开展了基础理论和基本算法研发的工作, 为大气探测方法和大气辐射模型的发展提供了大量理论基础. 21世纪以来, 研究内容变得更加广泛, 陆续涵盖了气体吸收光谱观测、吸收模式开发、云和气溶胶粒子光学模型、辐射传输算法和系统等研究内容, 建立了较完整的大气辐射研究体系. 经过40余年的研究积累和在国际合作中的学习, 中国大气辐射领域研究整体已经逐步接近国际水平, 但在吸收光谱测量、通用化的标准或快速辐射传输模式等个别领域还有待开展更加深入的工作.

大气电学作为大气物理的一个重要方向, 从20世纪60年代就受到了中国科学家的重视, 开展了雷暴云起电和雷电探测的理论研究和技术实践, 建立了云滴

湍流碰并中的电化机制, 提出了带电水滴破碎临界电场理论, 发展了一种新的单站测定雷电的理论方案, 研发了探空电场探测仪, 以了解雷暴云起电和放电过程(周秀骥和秦仁忠, 1964; 顾震潮, 1965; 袁箴等, 1965), 实现了中国大气电学从无到有的发展. 20世纪80年代, 中国大气电学研究进入了一个快速发展阶段, 发展了大气平均电场仪、快、慢电场变化仪等手段, 从美国引进了三站闪电定位系统, 结合天气雷达观测, 发现中国内陆高原地区雷暴云下部存在分布范围和持续时间较长的正电荷区, 这是有别于其他地区的独特电荷结构(Liu等, 1989). 自1976年中国成功实施人工触发闪电试验后, 这一技术得到了进一步发展, 并获得了人工触发闪电电流直接测量波形以及闪电通道高速摄像光学观测资料(刘欣生, 1999; 王道洪等, 2000). 建立了二维和三维雷暴云起电和放电数值模式, 研究了感应和非感应起电机理(言穆弘等, 1996a, 1996b). 进入21世纪, 随着电子技术的快速发展, 精细化雷电探测技术得到进一步提升, 发展了能够描绘闪电通道发展结构的低频和高频闪电探测技术, 以及三维闪电探测系统, 研究成果提升了对雷电物理过程和雷暴电荷结构的认识(Qie和Zhang, 2019).

2.2 大气环境和大气化学

中国的大气环境和大气化学研究伴随着大气污染控制进程逐步推进. 20世纪70年代以来由于人类活动对大气环境的影响逐步显现, 开始出现酸雨和光化学烟雾等大气污染问题, 大气化学研究开始在国内引起关注, 在这一时期对臭氧(O₃)和温室气体的观测以及烟雾箱实验研究也都开始起步. 到21世纪初, 大气化学是现代地球系统动力学核心过程的观点开始为学术界所接受(葛茂发, 2006; Wuebbles等, 2003). 21世纪以来中国进入区域性大气复合污染研究的新阶段, 大气化学研究开始了蓬勃发展, 从监测仪器的开发到应用, 从外场观测到实验室模拟和模式研究, 均得到迅速发展, 并逐渐具有重要的国际影响. 随着社会经济的发展, 各种人为活动向大气中排放了大量的污染物, 排放量远远超过了自然界的背景水平, 人为因素在空气质量变化过程中的主导作用日趋显著. 2013年1月北京持续近一个月的空气重污染, 大气二次细粒子和灰霾污染问题开始被广为关注(Huang等, 2014; Sun等, 2014). 2013年9月出台了“大气污染防治行动计划”, 这

一计划的核心是规定重点区域2017年的细颗粒物($PM_{2.5}$)浓度必须比2013年显著降低, 降幅从15%(珠三角)到33%(北京)不等。当前, 中国在大气自由基化学、新粒子形成、二次气溶胶形成机制这几个重要的前沿热点领域的研究都处于世界先进水平。

数值模式是支撑大气环境和大气化学研究的重要手段。近40年来, 中国大气环境数值模拟技术发展迅速, 自主研发和引进开发了多种空气质量模型, 从早期80年代的解析模式到现在的数值模式, 从单一污染到大气复合污染, 从单个污染源到多污染源, 从输送、扩散过程到沉降、化学、生物多过程, 从单一大气介质到大气-土壤-水-植被多种介质, 从局地尺度到全球尺度, 发展和应用的大气环境模式已经具有描述多物种、多来源、多过程、多介质、多尺度的综合特征, 广泛应用于大气污染机理研究、空气质量预报、环境管理与决策、大气环境影响评价, 成为模拟各种复杂大气污染问题的重要手段之一, 在重大活动空气质量保障、大气污染物总量控制、重点区域大气污染联防联控规划中发挥了不可替代的作用。

随着大气环境问题从传统的煤烟型污染向区域型复合性污染的转变, 中国大气环境管理模式经历了“排放浓度控制-‘两控区’ SO_2 排放控制-全面排放总量控制-环境质量控制”四个阶段。1972年参加联合国第一次人类环境会议标志着中国大气环境保护事业的开始, 此后中国开始加强大气环境立法和环境标准的建设。1973年中国召开第一次全国环境保护会议, 审议通过了《关于保护和改善环境的若干规定》, 这份文件构成了中国环境保护工作初期的基本法规。自此以后, 历经近40年的发展历程, 中国形成了以环境空气质量标准、大气污染物排放标准、评价方法标准和样品标准为主体结构的大气环境标准体系, 该体系在中国的大气环境管理中起到重要作用。

随着大气环境问题日益受到重视, 与大气污染物气候、生态和健康效应相关的研究也迅速发展。大气污染物与导致气候变化的长寿命温室气体(CO_2 、 N_2O 、 CH_4 等)通过辐射强迫影响天气和气候, 反过来天气和气候的变化又会影响大气污染物的浓度和分布。大气污染物生态效应的研究在20世纪80年代主要集中在盆栽植物叶片的生理生态和个体尺度上。20世纪末至21世纪初, 国内研究者开始利用田间设施原位研究空气污染对粮食作物、森林树木的影响, 识别了

不同空气污染物的植物叶片损伤症状, 建立了不同污染物-生态效应的剂量关系, 构建了中国范围内不同作物和森林的区域生态风险。大气污染物健康效应的研究早年通常是针对工业企业和家庭燃煤导致的局部空气污染调查与评估。几十年以来, 国内学者开展了从简单的横断面研究、生态学比较到较为复杂的时间序列研究、病例交叉研究, 再到更为精细的固定群组研究和更大规模的队列研究, 研究设计更加规范和系统化。这些研究为明确中国大气污染与人群健康危害之间的关系、特征和致病机理提供了重要的科学基础。

2.3 大气探测和大气遥感

大气科学是一门实验性学科, 大气探测学的发展推动和引领了大气科学的发展。新中国成立70年来, 中国气象观测业务系统不断完善, 大气探测新技术自主研发能力有所提高, 综合科学观测和试验基地建设逐步受到重视。

在气象观测业务系统建设方面: 新中国成立之时, 中国气象台站数量少、分布不均匀, 仪器设备简陋、陈旧。经过70年的发展, 中国已基本建成了门类比较齐全、布局基本合理的地基、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。此外, 还建立了包括沙尘暴观测、大气成分观测、海洋气象观测、农业气象观测、航空气象观测等一批新的观测业务系统。

在大气探测新技术新方法的研究方面: 中国从“第一个五年计划”开始, 相继研制了热敏电阻温度表、电接风向风速器、遥测雨量计、59型机械式探空仪等业务仪器(程纯枢和严开伟, 1959)和地面连续云滴谱仪、云滴电谱仪等科研专用设备(黄美元等, 1965; 赵燕曾等, 1964), 为新中国成立之初的气象观测业务和云降水物理学建立提供了一系列重要手段; 从60年代中期开始, 中国大气遥感开始起步, 研制了多波段太阳光度计、红宝石激光雷达、测温微波辐射计、风云系列气象卫星等大气遥感装备, 在云、降水、气溶胶、大气温湿度和风廓线等遥感探测方面发挥了重要作用(吕达仁等, 2003); 进入21世纪以来, 中国自行生产的六要素自动气象站和电子式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, 中国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(郟秀书等, 2008)。

在综合科学观测和试验基地建设方面: 中国自20世纪70年代末以来, 逐步开始积极组织或参与国际大型科学观测计划, 如90年代末首次由中国科学家发起和主持的大气与海洋综合观测试验——南海季风试验(巢清尘和丁一汇, 1999). 之后, 国内气象科研院所逐步建立了多个稳定的综合试验基地或观测平台, 为大气物理学与大气环境学科发展提供了有力支撑. 大气探测相关成果已经广泛应用于大气科学的许多领域, 为研究各种尺度气象系统的发生发展以及气候变化提供了丰富的观测事实, 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.

新中国成立以来, 中国气象雷达与雷达气象学发展迅速. 60年代末中国自行研制和生产了711型X波段测雨雷达. 70年代自主生产713型C波段天气雷达, 并在全国正式布网. 80年代自主研制具有数字处理系统的714S波段天气雷达. 1980年以后, 气象雷达与雷达气象学发展速度明显加快, 发展方向也趋于多样化, 诸如多普勒气象雷达、双线偏振多普勒天气雷达、测云雷达、相控阵天气雷达、晴空探测风廓线雷达陆续由国内科研机构自主研发并应用到实际业务当中. 相对于气象雷达不断地更新换代, 雷达气象学(基本内容包括: 气象回波形成的理论、探测方法与技术, 以及探测资料分析应用等诸多方面)也在不断地发展. 例如, 李其琛(1962)就从理论上分析了云和雨的相干散射, 并提出了更为普遍的雷达气象方程.

中国的气象卫星事业始于1969年, 次年中国决定发展极轨气象卫星, 并提出第一颗气象卫星的目标任务. 1971年7月, 国家卫星气象中心的前身卫星气象中心站组建成立. 1977年, 中国科学院上海技术物理研究所研制出了两通道扫描辐射计样机, 并进行了航空校飞试验. 由于极地轨道和静止轨道对于天气观测的互补优势, 中国在气象卫星发展初期即提出了同时发展极轨和静止两个系列气象卫星的思路. 风云卫星发展主要经历了4个阶段: 第一阶段聚焦在卫星技术的研发, 重点解决有无问题; 第二阶段聚焦卫星的业务化稳定运行, 风云卫星突破了长寿命稳定运行的技术瓶颈, 开始提供长期连续的业务观测资料; 第三阶段聚焦卫星的升级换代, 中国逐步完成了极轨和静止卫星的升级换代, 揭开了风云卫星地球观测的新篇章; 最新的第四阶段聚焦遥感仪器的定量观测品质, 特别在

图像导航定位和辐射测量定标方面不断取得新的进展, 全面支撑定量遥感和卫星资料同化应用. 目前, 中国已经成为世界上少数几个同时拥有极轨和静止气象卫星的国家之一. 风云极轨和静止气象卫星的业务观测能力已获得世界气象组织的认可, 成为全球天基观测系统的重要组成部分(杨军, 2012).

3 改革开放40年大气物理与大气环境学科的主要研究进展

3.1 大气边界层物理

改革开放以来, 随着国际交流合作的不断加强, 中国大气边界层物理研究水平迅速提高. 开展了HEIFE、IMGRASS、TIPEX等一系列大型野外科学实验和国际科研合作, 并与国际同步建设通量网络观测系统, 探究大气边界层密切相关的空气污染和新能源发展问题, 取得了具有中国特色的大气边界层实验、理论、数值模拟和应用的研究成果.

3.1.1 物理实验研究

西北干旱半干旱区不同下垫面综合实验研究, 如“黑河地区地气相互作用观测试验(HEIFE)”、“西北干旱区地气相互作用观测试验研究(NWC-ALIEX)”等, 发现了绿洲逆湿与水汽负梯度输送、绿洲效应和沙漠效应、干旱区地表水分“呼吸”现象, 探讨了复杂下垫面局地相似性理论的适用性、大气湍流频谱双峰结构、干旱区极端深厚大气边界层特征、绿洲与荒漠的相互作用(胡隐樵和高由禧, 1994; 张强等, 2009; 王介民, 1999; Yang等, 2002). “内蒙古半干旱草原土壤-植被-大气相互作用(IMGRASS)”重点研究了内蒙古半干旱草原下垫面地气交换和大气边界层结构及其与生态演化的关系(吕达仁, 1999); “干旱化和有序人类活动观测试验”探究了中国北方农牧交错带人类活动对陆面过程和大气边界层特征及其气候环境影响(刘辉志等, 2004); “绿洲系统能量与水分循环过程观测与模拟研究”给出了西北干旱区绿洲与干旱荒漠相互作用的分析(鲍艳和吕世华, 2006).

湿润半湿润地区研究, 如“淮河流域水分和能量循环实验(HUBEX)”研究了大气边界层过程与水文过程的相互关系和影响机理; “地表通量参数化与大气边界层过程的基础研究”揭示了华北白洋淀地区水陆非均

匀下垫面的大气边界层过程及近地面层微气象学特征(胡非等, 2006).

青藏高原地气交换和大气边界层研究, 如“青藏高原大气科学试验(TIPEX)”、“亚洲季风实验-青藏高原试验(GAME/Tibet)”等, 研究青藏高原特殊地形和大气环流形势下的地气交换和大气边界层热力、动力作用及其对中国气候和东亚季风的影响, 得到高寒环境下的大气边界层特征, 给出区域陆面过程参数; 珠峰北坡的实验结果显示青藏地区存在强热量输送等(徐祥德等, 2001; 马耀明等, 2006).

城市边界层和大气环境研究, 在京津冀、长三角、珠三角等地区开展了一系列大气边界层和大气环境综合观测试验, 如北京的BECAPEX科学试验, 提出北京城市污染“空气穹隆”概念模型(徐祥德等, 2004); 南京城市边界层气象观测, 给出城市下垫面微气象和城市热岛特征(蒋维楣等, 2009); 建立珠三角大气边界层概念模型, 解析海陆风、山谷风、热岛环流等局地环流对珠三角的空气质量的影响(范绍佳等, 2006); 北京325m气象塔和天津255m气象塔观测表明, 城市化使零平面位移和地表动力学粗糙度增加, 风速递减, 存在城市热岛和午后冷岛效应, 揭示了沙尘天气的大气边界层阵风结构、湍流相干结构和湍流输运作用机理(张美根等, 2008; Zhang和Li, 2014).

海洋大气边界层研究, 如“登陆台风的大气边界层实验研究(CLATEX)”、“华南海岸带海-陆-气相互作用的科学实验”、“追风实验”, 得到台风影响下的海气界面湍流特征和大气边界层结构(刘春霞等, 2012).

极地实验观测研究, 对极地边界层物理有了新的认识, 包括: 极地不同下垫面辐射平衡特征、大气边界层结构、边界层物理和海冰相互作用、适合南极地区的湍流通量参数化方案, 用湍流统计多尺度理论诠释了南极冰盖的热量逆梯度输送现象(李诗民等, 2010).

3.1.2 理论和方法研究

发现并解释了西北干旱区绿洲的冷岛效应; 验证了大气边界层湍流运动的三阶闭合方案(张强等, 2009). 给出湍流能量方程及湍流耗散率参数化不同下垫面湍流结构和输送特征, 探讨不同下垫面近地层通量-廓线关系及空气动力学和热力学参数(李富余等, 2004). 揭示了西北干旱区深厚边界层形成与干旱区强烈的热力作用、较强的风切变和特殊的残余层结构有

关(王敏仲等, 2018). 探究城市化与阵风的关系, 指出城市冠层的抬升对阵风结构没有显著影响; 探究湍流组织结构、地表能量闭合现象, 对流边界层垂直速度方差廓线规律, 以及不稳定条件下出现的逆温现象(胡非等, 2003). 给出湍流阶矩量的局地相似函数, 指出非均匀下垫面近地面层并不满足常通量层假设, 尤其是水汽的湍流通量随高度呈减小趋势(胡隐樵和张强, 1996). 基于大气边界层理论和方法开展物质的湍流通量研究, 得到细颗粒物、沙尘气溶胶和甲烷等痕量气体湍流通量的获取方法和输送参数化(Zhang和Li, 2014; Ge H X等, 2018).

3.1.3 数值模拟研究

给出了适用于干旱区、城市群、青藏高原的陆面过程参数化方案; 研发了三维复杂地形中尺度数值模式; 改进CoLM、SiB2等陆面模式并应用于干旱区和淮河流域的地气通量研究; 发展了冻土过程参数化方案并与CCM耦合, 研究青藏高原冻土过程的效应. 发展的三维中尺度数值模式、陆面过程与二维大气边界层耦合模式、一维地气耦合模式均可以有效地模拟绿洲、沙漠、戈壁下垫面大气边界层演变及其相互关系; 区域大气模拟系统RAMS可以模拟HEIFE实验区边界层大气运动, 以及绿洲冷岛效应、沙漠逆湿; 发展和检验了SVAT(土壤-植被-大气输送)模式和典型的局地LSP参数化方案, 给出适合内蒙古草原的参数化方案. 认识到大气边界层参数化方案对大气边界层高度及不同大气环流背景下动量和热量输送的描述不足, 影响天气预报与空气质量预报的准确性(林朝晖等, 2008).

3.2 云雾物理

改革开放以来, 中国云雾物理研究取得了较快的发展, 得益于诸如飞机、雷达、卫星等多种探测手段以及计算机技术的不断进步, 用于研究云雾物理相关领域的观测资料和模拟水平不断提高, 学者们对云雾宏观微观特征、云降水特征、云凝结核和冰核、云-气溶胶间接效应、云中闪电、云和气候等相关问题进行了深入研究, 并取得了一系列成果(Ma等, 2007). 图1总结了过去几十年中国云雾物理进展.

不同于新中国成立早期的观测研究大多只能在山地上进行, 随着探测手段的发展, 飞机、雷达、卫星等

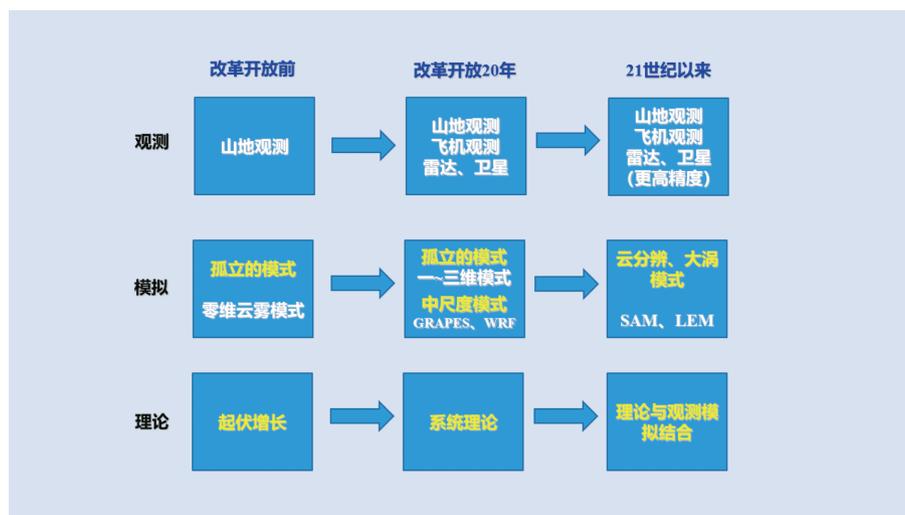


图1 新中国成立70年以来云雾物理的研究进展

资料对云雾物理方面的研究有着重要的促进作用。改革开放初期,国内学者们在相对有限的观测条件下,通过对高山、地面和空中云和降水的观测研究,在云宏观物理方面取得一系列重要研究成果,并且结合有限的卫星资料对降水进行了估算(牛生杰等, 1992; You和Liu, 1995)。在观测资料的基础上,提出了描述云物理的系统理论,认为最概然的谱分布是威布尔分布(Liu等, 1995)。而随着观测资料分辨率的进一步提高,对云雾物理的研究不再集中在单一的云或降水系统上,并能针对云内液水含量、粒子有效半径、云的光学厚度等微物理特性和光学特性进行分析,能够区分不同类型的降水水系,探测降水不同阶段下的云结构特征。

中国学者在已有模式的基础上,开发了多种模式,从之前的零维发展到一维、二维、三维,包含了更为详尽的微物理过程与更合理的动力学框架,涵盖了暖云、冷云、雾、气溶胶等(胡志晋, 1979; 孔凡铀等, 1990; 洪延超, 1996; Shi等, 1996),能够较好地模拟出相应的系统。此外,一些学者致力于开发模式中的参数化方案,以提高模拟效果,更好地研究云雾物理问题(赵高祥和汪宏七, 1994)。随着计算机水平的不断提高,模式发展朝着两个方面进行。一方面,更大范围、更长时间的模拟能力使得云雾物理的研究不再局限于某个独立的系统,中尺度模式、全球模式得到广泛应用,提高模式中云的模拟能力以更好地研究云对气候、全球能量收支平衡的影响。另一方面,更高的模

式分辨率和计算效率有利于云分辨模式、大涡模拟、分档模式的研究,更加精细的云微物理过程的表征使得云相关问题的模拟与观测能够更好的匹配。此外,将理论与观测、模拟结合对于深入探索云物理中的基本问题有着重要的指导意义。

3.3 大气辐射

改革开放以来,中国科学家在大气辐射领域做了一系列基础性工作,突出体现在针对气体吸收快速计算的K-分布方法、辐射传输算法以及对粒子散射的计算等方面。

对某一光谱区间而言,如何精确求取不同气体重叠吸收的透过率一直是大气辐射研究中一个长期存在的难点问题。为了满足天气、气候模式和遥感领域计算效率的需求,需要快速求解一定光谱区间内的带平均透过率。中国科学家最为突出的贡献是提出了在均匀和非均匀路径下,利用数值方法求解带平均透过率的K-分布和相关K-分布方法。石广玉(1998)全面论述了大气辐射计算中如何数值求解有效吸收系数的K-分布和相关K-分布模式,包括K-分布函数的半数值和半解析求解算法。张华(1999)提出了赝吸收线方法,利用不同压力重排的吸收系数曲线与混合加宽的Voigt线型的相似性,得到一个不同压力和温度下K-分布函数的简单表达式,可以直接用于气象与气候模式中的大气辐射计算,在满足一定精度的同时提高了计算效率。魏合理和宋正方(1995)利用单参数带模式计算大

气分子吸收, 研发了一套红外辐射大气透过率计算模式. 吴北婴等(1998)对LOWTRAN 7的汉化工作则极大推动了其在中国的应用. 此外, 中国学者还对大气中CO₂等主要温室气体的分子吸收光谱特性开展了实验室研究(孔琴心和王庚辰, 1990), 获得了计算这些气体总吸收及其变化的经验参数, 为实际应用提供了科学数据.

中国科学家在20世纪80年代末就开始了用基于几何光学的射线追踪法研究非球形粒子对光的散射问题, 利用这一方法可以有效地分析非球形冰云粒子的光学特性. 杨平等(1989)、杨平和蔡启铭(1990)、蔡启铭和杨平(1990)发展了矢量射线追踪、直接Stokes参量变换等射线追踪算法, 用于模拟非球形、大粒子的散射特性, 为认识和计算冰云粒子辐射特性提供了原始算法. 在气溶胶粒子方面, 饶瑞中(1996)以海盐和烟羽粒子为例, 研究了外混合气溶胶等效折射率的适用性. 云、雨粒子在微波波段的散射特性是气象雷达探测的基础, 20世纪80年代末, 中国科学家也开展了旋转椭球状粒子、锥球状粒子对雷达偏振电磁波的散射和衰减特性的研究(嵇驿民和王宝瑞, 1989; 王宝瑞和嵇驿民, 1989), 得到了粒子后向散射截面的准解析解. 金亚秋和曾亮(1992)、黄兴忠和金亚秋(1997)则开展了大量针对非球形粒子极化特性的研究工作.

毛节泰和栾胜基(1985)提出利用逐次迭代法计算多次散射与一次散射的比值来扣除多次散射以计算大气散射相函数的方法. 对辐射传输计算中的处理方法, 邱金桓(1986)提出了采用原始相函数结果修正一次散射分量的改进算法, 在使用较少勒让德展开项的条件下, 得到了比较精确的辐射强度解. 汪宏七和赵高祥(1989)通过分析散射相函数勒让德多项式近似展开及Gauss积分公式, 提出了由介质散射特性来确定展开项的方法, 更加精确地近似表征相函数, 从而在使用较少流数的情况下计算得到精确的辐射强度, 实现提高计算效率的目的.

辐射传输算法研究领域, 赵高祥等(1987)在二流近似的基础上, 将整个长波区分为两个宽的光谱带, 提出了计算晴空大气中长波辐射传输的方案, 研发了一种适用于大气环流模式的辐射传输的算法. 吴北婴和吕达仁(1989)在20世纪80年代开发了蒙特卡罗后向追踪的球面大气辐射传输模式, 并用于火山云气溶胶的曙暮光遥感.

3.4 大气电学

改革开放以来, 中国的大气电学研究得到快速发展, 将引进的三站雷电定位系统, 应用于强对流天气监测预警、森林雷击火监测等方面, 并促进了中国雷电定位技术的发展. 通过多站闪电电场变化观测分析发现, 中国北方雷暴云呈现出的独特电荷结构对闪电类型和极性等特征产生重要影响, 云下部正电荷的存在影响地闪的电磁辐射波形特征, 地闪先导过程之前存在一个持续数百毫秒的云内水平放电过程, 它发生在云下部正电荷区和其上部的负电荷区之间, 云内放电过程的K变化起始于负电荷区, 并向下部正电荷区传播(邵选民和刘欣生, 1987; 郗秀书等, 1998). 基于甚高频三维闪电探测系统的观测资料, 进一步揭示中国内陆高原雷暴电荷结构的演变特征(Li等, 2013), 利用雷暴云起电-放电模式, 讨论了形成雷暴特定电荷结构的物理原因, 模拟指出有90%的闪电发生于雷暴云下部正电荷与其上部的负电荷之间(张义军等, 2009), Tan等(2006)还发展了二维高分辨的双向随机放电模型, 研究了闪电通道的发展演变对云内电荷结构的影响. 人工触发闪电技术得到进一步发展, 研制了专用引雷火箭, 在中国南北方不同地区成功进行了人工引雷实验, 发现中国北方地区(甘肃和北京)人工引发雷电一般是正极性且没有回击过程, 南方地区(南昌、上海、广东)人工引发雷电一般是负极性的包括多个回击, 利用高速摄像对空中触发闪电的观测发现闪电正负先导的双向发展特征(刘欣生, 1999). 人工触发闪电试验在山东滨州和广东从化持续开展, 积累了一批人工触发闪电电流和电磁场观测资料, 揭示了人工触发闪电不同物理过程的产生机制(Zheng等, 2017; 张义军等, 2016).

3.5 大气化学

20世纪70年代, 对兰州市西固光化学烟雾现象的研究, 开启了中国大气光化学综合观测研究的先河, 通过这项研究北京大学建成了中国最早的室内光化学烟雾箱(唐孝炎等, 1982). 20世纪70年代末期, 中国开始了对酸雨的监测和研究, “七五”、“八五”、“九五”都把酸雨问题列为科技攻关重点项目. 阐明了中国酸雨污染状况、来源、成因等一系列重要规律, 为中国制定“酸雨控制区”和“SO₂控制区”提供了科技支撑.

1987年,中国科学院大气物理所开始对晚稻田 CH_4 的排放进行实地测定,取得了一系列重要成果,改变了国际学术界对稻田甲烷排放的认识.同时完成的《大气化学》《中国稻田甲烷排放》等著作(王明星,1999),对中国大气化学的早期发展产生了深远的影响.周秀骥领导开展了“八五”期间国家自然科学基金的重大项目“中国大气臭氧变化及其对气候环境的影响”,这是中国首次组织的大气臭氧的综合研究(周秀骥和李维亮,1997).

3.6 大气环境

3.6.1 大气环境模式

在20世纪70年代,国内学者针对污染扩散的特殊性对大气输送扩散模式进行发展和应用,在局地尺度污染扩散模式、烟气抬升模式的研究取得了重要进展.陈家宜(1981)研究了中性层结中湍流对烟云抬升的作用,发现即使在抬升的早期,环境湍流对弯曲烟云的路径有不可忽视的影响,并使烟云路径加速变平.李宗恺和朱玄玄(1987)发现虽然在抬升初期环境湍流的作用并不重要,但随着烟气上升速度的减小其影响越来越大,最终使烟气实际路径与 $2/3$ 次律有明显偏离.徐大海等(1997)基于大气扩散K理论,得到了直接利用脉动风速的概率密度函数而不用扩散参数计算浓度分布的大气扩散PDF模式,在许多大气扩散问题中有着可替代高斯模式的广泛应用前景.于洪彬和蒋维楣(1994)基于二阶矩闭合的边界层模式和随机游走模式建立了一个沿岸熏烟扩散的中尺度模拟系统,该模型与高斯熏烟模式相比更加合理,可以更好地预测热内边界层结构和沿海地区持续发生的熏烟扩散过程.20世纪80年代后期,中国开始关注酸雨研究,发展了一系列区域大气酸沉降模型.雷孝恩等(1985)、盛裴轩和毛节泰(1987)、殷达中和李宗恺(1993)等发展了拉格朗日酸雨模式,毛节泰(1992)、秦瑜和修艾军(1992)、郝吉明等(1996)、王体健等(1996)、高会旺等(1997)等开发了欧拉酸雨模式,分别应用于西南、华南、华东、东亚等地区酸雨的来源和成因研究、跨界输送研究、评价和预测研究、控制对策研究等,不同模式各有自身的特色.

3.6.2 大气污染效应

1980~2000年间,中国气溶胶气候效应的研究开始

起步,开始进行气溶胶光学参数(气溶胶光学厚度、气溶胶单次散射反照率)的观测,先后在华北、东北、青藏高原、西北沙漠及东部沿海等地利用多波段光度计观测大气气溶胶的光学特性,为系统地了解中国不同区域大气气溶胶光学特性和辐射效应奠定了基础.与此同时,区域和全球气候模式中开始考虑硫酸盐气溶胶的模拟.

改革开放以来,由于中国经济迅速发展对能源需求不断地扩增,其中能源结构以煤为主,并且多数直接燃用原煤,高硫煤,导致 SO_2 和 NO_x 等大气污染物大量排放,同时也使得酸雨问题日益严峻.20世纪80年代,酸雨主要分布在西南地区;到90年代中期,酸雨已扩展到长江以南、青藏高原以东以及四川盆地的广大地区;21世纪初,中国酸雨地区已占国土面积的近30%.因此,继欧洲、北美之后,中国一跃成为世界第三大酸雨高危区.鉴于当时中国酸雨的严重污染情况,国家从“七五”、“八五”到“九五”安排了相应的攻关课题,中国学者就空气污染和酸雨开展了一系列的重要工作.最具代表性的有冯宗炜在“八五”期间负责的攻关专题《我国酸沉降及其生态系统环境影响的研究》,主要包括:(1)研究了酸雨对农作物及其森林的影响;(2)评估了酸雨对农作物及其森林的经济损失;(3)发现了生态系统对酸雨的敏感性和临界负荷;(4)提出了针对酸雨严重地区生态系统恢复的可靠技术和措施.这些重要的研究成果为揭示酸雨污染的损害机理,治理和防护提供了宝贵的科学依据,同时利于促进国家上层制定控制酸雨污染相关的法律和政策.经过近几十年的不懈努力,中国的酸雨污染已得到较好治理,目前基本不会对生态系统造成直接危害.

改革开放后,中国沈阳、鞍山、北京和上海等个别城市开展了大气污染与人群健康的流行病学调查.这些研究采用了横断面研究、生态学比较等方法,发现在大气污染较重地区的人群死亡率、患病率、呼吸系统症状或功能指标,比污染较轻地区高或差的现象.这些研究选取了总悬浮颗粒物(TSP)、 SO_2 或 NO_x ,在城市层面初步揭示了中国部分大城市大气污染与人群死亡/患病率和部分临床症状或功能指标的相关性.

3.6.3 大气污染管控

中国的大气污染管控开始于20世纪70年代,其时在兰州西固工业区组织了大规模综合观测研究,证实

了中国存在光化学烟雾并发现不同于国外的成因, 并进而提出了控制策略(Tang等, 1989). 20世纪后期中国对酸雨和二氧化硫污染问题进行了研究. 基于十多年的综合研究提出了中国燃煤SO₂排放总体控制规模(郝吉明和贺克斌, 1996)和酸雨控制区和SO₂污染控制区的划设方案(刘炳江等, 1998). 柴发合等(2006)以95%保证率下硫沉降的临界负荷为约束条件, 计算了全国SO₂环境容量约为1700×10⁴吨. 中国于20世纪90年代开始治理机动车尾气污染, 评估了中国机动车污染状况并建立了机动车排放评估体系和排放清单(何东全, 2000; 范秀英等, 1999; 贺克斌等, 1996; 郝吉明等, 2002).

进入21世纪以来, 中国以PM_{2.5}和O₃为特征的区域性和复合型大气污染凸显, 并呈加重和蔓延趋势, 中国进入研究区域性大气复合污染的新阶段. 2000年起, 相关研究团队基于外场观测及数值模拟分析了北京及其他重点地区O₃和PM_{2.5}的污染特征、来源和形成过程(He等, 2001; Sun等, 2006; Song等, 2007), 基于这一系列研究初步建立了中国区域复合大气污染联防联控技术支撑体系, 并提出了北京奥运会期间空气质量保障方案. 珠三角地区也开展了类似研究, 相关研究成果支持了2010年广州亚运会空气质量保障工作(Zhang等, 2008). 近10年来, 为了应对日趋严重的大气污染形势, 中国科学家通过系统研究建立了空气质量决策支撑技术体系: 建立了中国排放清单编制技术体系, 推动了排放清单业务化进程(Zhang等, 2009; Li M等, 2017); 建立了源-受体关系评估体系, 评估了重点城市和地区PM_{2.5}污染来源(Wang等, 2011b; Zhang等, 2013); 建立了中国大气污染控制政策效果评估技术体系, 从多角度评估了中国大气污染控制政策落实效果, 并对潜在措施的效果进行评估, 有效支撑了中国的大气污染综合控制决策(Zheng等, 2018; Li等, 2019; Liu等, 2016; Zhao B等, 2018); 开发了以大气污染控制费用效益分析为核心的空气污染控制费用效益与达标评估系统(Air Benefit and Cost and Attainment Assessment System, ABaCAS), 为大气污染控制决策提供了综合评估工具(Wang等, 2011b). 中国工程院针于2016和2018年分别对《大气污染防治行动计划》的落实情况进行了两次系统评估.

3.7 大气探测与大气遥感

改革开放以来, 中国大气探测技术及相关业务取

得了较快的发展, 新型气象要素传感器和仪器开始出现, 地面(海面)气象观测和高空气象探测开始向自动化过渡, 以气象卫星和气象雷达为代表的大气遥感发展迅速, 大气成分观测和专业气象观测能力增强, 大气探测数据的可靠性和准确性稳步提高(郑国光, 2000).

3.7.1 地面(海面)气象观测

中国最早于20世纪70年代提出建设自动气象站的构想, 并研制了基于电子管的中国第一代自动气象站. 2000年以后, 成功研制了可以测量气温、气压、空气湿度、风向、风速、降水量等常规“六要素”的新型自动气象站. 此后, 通过网络逐步实现了多站组网观测和全国业务监控(李雁等, 2013). 自动气象站中的绝大多数传感器实现了国产化, 但高质量湿敏电容的制造仍是亟待解决的难题. 近年来, 以露点仪为代表的凝结法测湿技术(代中华等, 2016)以及TDLAS测湿技术取得了很大进步, 有望成为新的测湿手段. 国产称重式蒸发器、超声雪深仪、各型辐射表等也已应用于地面气象观测业务中.

随着光学技术的发展, 各种云、能见度、天气现象测量仪器不断出现. 前向散射能见度测量技术已经逐步应用于地面气象观测业务中, 透射式能见度测量技术已应用于机场气象观测中, 近年来关于湍流对测量结果的影响也受到关注(Han Y等, 2018). 20世纪末, 中国开始在摄像式能见度测量方法方面进行探索(谢兴生等, 1999), 但到目前为止仍处于研究阶段. 云的自动观测进展迅速, 发展了可见光测云、红外测云、激光测量云高和毫米波测云等技术(霍娟和吕达仁, 2002; 章文星和吕达仁, 2012), 基本具备云量、云底高和部分云状的昼夜自动观测能力(高太长等, 2010). 天气现象涉及众多观测项目和气象要素, 往往需要利用多种方法进行联合观测. 已有仪器主要是利用声、光、电等方式对降水现象、视程障碍现象、雷电现象等部分天气现象进行自动观测(马舒庆等, 2011).

此外, 中国已具备了初步的海面气象观测能力(黄彬和赵伟, 2017). 建立了包括海岸、海岛、塔台(海上石油钻井平台)自动气象观测站, 海上锚碇浮标观测站、志愿观测船等海面气象观测系统. 海面气象观测的项目、仪器设置与陆地站差别不大, 主要在防护、通讯等方面有特殊要求; 有些同时配备海洋水文观测

设备, 测量海温、海盐、海浪和海流等参数(陈洪滨等, 2019).

3.7.2 高空气象探测

中国从20世纪70年代开始研制电子探空仪, 使用热敏电阻、碳湿敏电阻或高分子湿敏电容、电容膜盒或硅压阻代替传统机械式传感器(张玉存和王卫平, 2001). 1997年, 中国启动新型高空探测雷达研制工作. 2001年, 研制成功L波段测风雷达-电子探空仪系统, 并于2002年开始业务布点. 至2010年完成了120个探空站设备的更新换代, 从而实现了中国高空气象探测的自动化. 此外, 在常规探空仪的基础上, 根据科研或试验的需要, 还研制了臭氧探空仪、电场探空仪、下投探空仪等特种探空仪.

在此期间, 中国的探空气球技术工艺从离子沉积法到热敏化法不断提升. 其中, 1600g气球可满足5hPa高度探空的需求, 打破了日本等个别国家长期垄断高空探测气象气球市场的局面(肖迪娥和张望, 2009). 气象火箭探测从采用液体燃料逐步发展到采用固体燃料, 从雷达跟踪定位测风逐步向卫星定位测风方向发展, 从最初只有温度探测拓展为现在的气压、密度、风等多要素同步探测. 基于灾害天气预警和人工影响天气的需要, 边界层气象火箭研究也受到重视(朱彦良等, 2016). 为了填补广阔海洋上空大气廓线现场测量的空白, 中国还发展了基于无人艇的海洋气象火箭探空技术(Chen等, 2019).

飞机气象探测是对常规高空探测的宝贵补充, 也是目标观测或适应性观测的关键探测手段. 2001年底中国气象局和中国民航总局启动了AMDAR项目, 并于2004年正式参加了AMDAR资料的GTS交换(崔喜爱等, 2015). 除了商用飞机, 中国对部分机型进行改造并安装专业的气象传感器和各种探测设备. 近年来, 研制了系列化气象无人机, 可实现关注区域的温度、湿度、气压及风向风速等气象参数的测量.

3.7.3 大气遥感

中国大气遥感研究始于20世纪60年代(邱金桓等, 2003). 改革开放40年来, 中国科技工作者在大气遥感反演方法研究和设备研制方面取得了很多成果.

在反演方法研究方面, 首次提出水汽遥感的最佳信息层的新概念, 最早引入空间滤波来理解反演解的

稳定性, 提出了微波辐射计与雷达相结合的主被动联合遥感反演方法和消光/小角散射联合遥感气溶胶特性等反演算法(吕达仁, 1999), 以及在完整地考虑大气多次散射的条件下利用天空散射光信息反演气溶胶微物理特性的方法(黎洁和毛节泰, 1989). 此外, 还建立了卫星红外遥感反演温度、水汽垂直分布的系统理论(曾庆存, 1974), 发展了系统的卫星微波遥感理论(周秀骥等, 1982), 以及提出了具有全球普适性的大气降水反演方法及双频段云水和水汽反演算法(吕达仁等, 2003).

在设备研制方面, 1967年研制了中国第一台红宝石激光雷达样机(周秀骥, 1979), 20世纪70年代成功研制了多通道微波辐射计样机, 并先后5次投入国际气候研究计划(WCRP)组织的赤道西太平洋海域野外观测. 80年代又相继研制了太阳/大气光谱仪和多波长曙暮光偏振光度计、米散射激光雷达、紫外差分吸收激光雷达等试验设备(吕达仁等, 2003), 具备了大气气溶胶总光学厚度及其分布、高对流层和平流层大气气溶胶以及平流层臭氧的科研探测能力. 在系统研究气溶胶散射特性、大气辐射特性的基础上, 研制了微脉冲激光雷达、米散射多普勒测风激光雷达、车载/机载激光雷达和拉曼激光雷达等, 进一步完善了大气气溶胶消光系数垂直廓线探测、大气环境监测的手段(谢晨波等, 2007; 华灯鑫和宋小全, 2008).

20世纪70年代, 中国启动风云系列气象卫星发展计划(张文建, 2001), 目前已建立起极轨与地球同步气象卫星相结合的卫星业务观测系统. 80年代后期, 中国天气雷达监测网历经模拟天气雷达和数字化天气雷达两代发展, 1998年开始建设新一代天气雷达网(许小峰, 2003), 在此基础上发展了双线偏振雷达和双(多)基地多普勒雷达探测技术, 进一步提高了雷达探测三维风场、微物理结构和反演地面降水产品的能力(刘黎平和葛润生, 2006). 自20世纪90年代起, 中国开始利用地基高精度双频GPS接收机信号反演大气积分水汽含量的方法研究. 国内的一些重大科学试验观测计划均把导航信号水汽反演作为观测内容之一而加以实施(毕研盟等, 2006), 推动了中国地基GNSS观测技术由研究、科学试验向业务服务应用方向发展. 目前, 中国已建立了GNSS/MET卫星水汽探测系统网, 可以获取高时间分辨率大气水汽探测资料, 极大增强对暴雨和强对流等灾害性天气的监测能力及预报时效性.

3.7.4 科学观测和科学试验

多个具有中国特色的科学观测计划和科学观测站推动了综合观测组织和处理能力的提高. 1980年开始的华东中尺度天气试验(张丙辰等, 1986), 首次整合了27个无线电探空和测风站、13个雷达站、260个地面气象观测站和1315个水文站的资料, 为了解掌握对流性天气规律、建立预报模式和方法、改善预报能力提供了重要数据. 1990年6月至1991年10月之间的“黑河地区地气相互作用观测试验研究(HEIFE)”计划, 专门建立了一个微气象自动观测网. 每个微气象站包括近地面6层风、温、湿, 2层地热流量、6层地温以及向上、向下的长波辐射、短波辐射和净辐射, 实现了自动连续采样. “西北干旱区陆-气相互作用野外试验(NWC ALIEX)”计划中(张强等, 2005), 采用了铁塔的风、温、湿梯度观测, 地表各辐射分量观测, 地表和土壤温度观测, 土壤空隙的气湿观测, 土壤湿度观测和土壤热流量观测, 超声观测风、温、湿脉动量, 系留气球观测的气压、风速、风向、温度和湿度、小球探测观测等等多种手段. 继1979年和1998年之后, 中国于2014年起开展第三次青藏高原科学试验(ITEPX)(赵平等, 2018), 建立新一代卫星遥感、探空、雷达、地面长期综合观测系统, 进行边界层、探空、卫星产品地面校验、雷达、飞机等综合观测, 为深入认识青藏高原陆面过程、边界层过程、云降水物理过程、对流层-平流层交换过程提供了大量综合观测数据及其融合分析产品.

科学观测试验需要理论与方法的指导, 取得的数据可以直接服务与天气气候预测. 中国学者提出了可预报性研究的条件非线性最优扰动方法(CNOP)(Mu等, 2003). 该方法可应用于大气探测的目标观测敏感区确定. 考虑不同观测平台的特点, 给出各观测平台应该优先进行目标观测的区域和要素, 从而为数值天气预报和气候预测提供更准确的初始场, 进而提高预报技巧. 他们在台风的目标观测研究方面的观测系统模拟实验研究结果表明, 因为该方法考虑了非线性过程的影响, 因而更有利于提高台风路径预报技巧(Qin和Mu, 2012; Chen等, 2013). 此外, 他们也开展了北大西洋涛动、厄尔尼诺-南方涛动、以及印度洋偶极子等极端天气、气候事件的目标观测研究, 识别了它们应该优先增加观测的区域, 并用观测系统模拟试验验证

了这些区域的目标观测对提高预报技巧的有效性(Mu等, 2015, 2003).

3.8 气象雷达探测

随着中国进入改革开放时期, 气象雷达的发展也驶入了快车道. 80年代研制出具有数字处理系统的714S波段天气雷达, 90年代研制出714CD、714SD型脉间相参多普勒天气雷达. 1999年以后, 在对美国WSR-88D天气雷达进行改进的基础上, 生产出了先进的S波段及C波段CINRAD/SA与CINRAD/CB型全相参脉冲多普勒天气雷达, 改进生产了CINRAD/SB型、CINRAD/SC型、CINRAD/CD型、CINRAD/CC型天气雷达. 在20世纪90年代末, X、C及S波段的双线偏振多普勒天气雷达也研发出来. 除了常规和双偏振多普勒天气雷达外, 中国在晴空探测风廓线雷达(WPR)也有突破性工作. 在20世纪末, 继美欧等国后, 中国第一部风廓线雷达研制成功, 并研制出了探测不同高度、多种型号的L及P波段风廓线雷达, XYE01型边界层风廓线雷达也研制成功.

21世纪以来, 气象雷达的发展更加迅速和多样化. 2007年, 中国第一部波长8.6mm测云雷达研制成功. 近年来, 国内还研制出具有多普勒功能的3mm测云雷达. 此外, 中国在相控阵气象雷达方面也取得了一定的突破, 在相控阵多波束雷达天气探测模式、危险天气识别算法以及数字阵列技术应用等方面有了深入研究和验证. 21世纪初, 国内主要生产新一代天气雷达的单位同时开始研制国产的信号处理器. 目前研制出的国产气象雷达数字信号处理器已应用在多种型号的雷达上, 其性能指标与美国VAISALA公司先进的RVP-8、RVP-9相近.

除了气象雷达的不断研发更新外, 提高雷达数据质量的新算法也在不断地创新. 国内学者实现了将多部天气雷达转换成同一等高面上各格点的拼图资料, 并对不同雷达间存在的强度差异进行合理处理, 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(张培昌等, 1989; 袁招洪等, 1993), 并通过气象雷达资料的应用得到了很多理论成果. 建立了尺度与入射波波长同量级的均质和非均质(指冰与水两种相态结构)旋转椭球、锥球、短圆柱状这些逼近降水粒子形状模型(王宝瑞等, 1997), 并从电磁场理论出发, 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. 对于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, 这些都是雷达气象以及微波大气工程技术中的重要物理参数(王宝瑞等, 1991; 王振会和张培昌, 1998). 此外, 有学者研究利用TRMM星载Ku波段雷达, 对中国江苏地区内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(Han J等, 2018; Li N等, 2017), 研究解决了星载测雨雷达(PR)与地基S波段业务雷达探测存在时空不一致性、有效照射体积的时空不匹配、地基雷达波束不完全充塞以及星载雷达在探测强降水时存在Mie 散射效应等质量控制与预处理问题.

在中国气象雷达业务建设方面, 以气象部门为主, 联合水利、民航部门共同形成了新一代天气雷达网; 初步建成了风廓线雷达69部, 并且在气象预报业务和北京奥运会、上海世博会、广州亚运会、西安世园会等重大活动的气象保障服务中发挥了积极作用. 进入21世纪, 中国自主开发了天气雷达产品生成软件

ROSE和天气雷达资料短时临近预报平台SWAN; 天气雷达单站软件和组网拼图中使用了部分质控算法; 风廓线雷达开展了组网数据质量控制及在数值预报模式中的同化试验. 中国气象雷达资料产品质量和在天气预报及气象服务业务中的应用水平不断提高.

3.9 气象卫星遥感

改革开放以来, 中国风云气象卫星发展迈入正轨, 共计成功发射了17颗气象卫星(见表1). 1988年, 中国的第一颗极轨气象卫星FY-1A成功发射, 1997年, 中国的第一颗静止气象卫星FY-2A成功发射, 分别实现了国产气象卫星在低轨和高轨的零的突破, 风云气象卫星开始进入世界气象卫星大家庭.

与FY-1A卫星研制同步, 地面资料接收和应用系统也解决了星地通讯和传输的关键技术, 建成了由一个资料处理中心(北京)和三个国内地面站组成(北京、广州和乌鲁木齐)的风云卫星地面应用系统, 实现了卫星资料的接收、处理、存档和监测服务. 1999年5月10日, 风云一号C星(FY-1C)成功发射, 该星装载了改进的10通道可见光红外扫描辐射计, 具有良好的光学成像

表1 改革开放以来发射的风云气象卫星

卫星名称	卫星类型	发射时间	卫星功能和状态
FY-1A	极轨	1988年9月7日	研发卫星, 退役
FY-1B	极轨	1990年9月3日	研发卫星, 退役
FY-1C	极轨	1999年5月10日	业务卫星, 退役
FY-1D	极轨	2002年5月15日	业务卫星, 退役
FY-3A	极轨	2008年5月27日	研发卫星, 退役
FY-3B	极轨	2010年11月5日	研发卫星, 在轨运行
FY-3C	极轨	2013年9月23日	业务卫星, 在轨运行
FY-3D	极轨	2017年11月15日	业务卫星, 在轨运行
FY-2A	静止	1997年6月10日	研发卫星, 退役
FY-2B	静止	2000年6月25日	研发卫星, 退役
FY-2C	静止	2004年10月18日	业务卫星, 退役
FY-2D	静止	2006年12月8日	业务卫星, 退役
FY-2E	静止	2008年12月23日	业务卫星, 退役
FY-2F	静止	2012年1月13日	业务卫星, 在轨运行
FY-2G	静止	2014年12月31日	业务卫星, 在轨运行
FY-2H	静止	2018年6月5日	业务运行, 在轨运行
FY-4A	静止	2016年12月11日	研发卫星, 在轨运行

质量, 在轨工作超过5年, 大大超过了设计寿命, 首次实现了中国气象卫星的业务化运行, 具有重大的里程碑意义(许健民等, 2010).

在风云气象卫星事业发展早期, 既要接收、处理和利用好国外卫星的资料, 又要设计、研制并使用好中国自己的气象卫星. 1989年, 建成并投入使用了“NOAA系列气象卫星资料接收处理系统和开发应用服务系统”. 该系统是中国80年代初第一个把数据获得和定量处理集为一体的完善系统, 达到国际80年代先进水平, 实现了从卫星资料模拟处理、定性分析到数字化处理和定量应用分析的转变.

2008年成功发射的FY-3A卫星实现了极轨卫星的升级换代, 星上装载了10台遥感仪器, 光谱覆盖紫外、可见近红外、红外和微波波段, 同时完成光学成像、红外-微波联合大气探测、微波成像、窄光谱大气成分探测、全谱段地球能量监测等5大类功能, 实现了全球、三维、定量和多光谱的全天候综合观测(Dong等, 2009). 2016年成功发射的FY-4A卫星装载了三台先进的对地遥感仪器, 其中光学成像仪AGRI和闪电成像仪LMI功能指标达到同期美国新一代静止卫星GOES-R的水平, 干涉式红外大气探测仪GIIRS是目前国际上唯一一台在静止轨道开展高光谱大气垂直探测的仪器(Yang等, 2017; Zhang P等, 2019b).

在卫星观测能力大幅提升的同时, 风云卫星的资料接收和处理的核心关键技术也得到了极大的提升. 2010年建成瑞典基律纳北极接收站并投入使用, 2018年租用挪威Troll南极接收站并投入使用, 确保风云卫星在全球任意地方的观测资料均可在2小时内完成接收、回传、处理和服务.

伴随中国气象卫星工程的发展, 气象卫星反演方法研究也在同步开展(张文建, 2001). 反演方法方面, 曾庆存将数学物理基础与大气温湿分布以及地表特征相结合, 建立了完整的卫星红外遥感反演温度、水汽垂直分布的系统理论(曾庆存, 1974). 周秀骥等发展了系统的卫星微波遥感理论, 将微波辐射计遥感与雷达遥感相结合, 在反演原理与传感器技术发展上推进了一步(周秀骥等, 1982). 80年代以来, 中国多个单位结合业务需求, 开展了大气温度廓线、云特性、气溶胶、降水和云迹风等反演理论和方法的系统性研究工作(董超华等, 2010; Wang等, 2017b).

4 21世纪以来大气物理与大气环境学科的突出研究成果

4.1 大气边界层物理

依据气候、环境变化研究、空气污染研究、新能源发展的迫切需求, 近20年开展了一系列综合实验观测、理论研究和数值模拟, 取得了一些有特色、高水平的大气边界层研究成果.

(1) 建立了西北干旱半干旱区荒漠和绿洲陆面过程参数化方案, 确定了地表反照率、土壤热力参数、动量和感热拖曳系数, 发现了戈壁和南疆沙漠地区存在深厚边界层(黄荣辉等, 2013; Zhao L等, 2018); 揭示了甘肃黑河流域地表水热交换的空间异质性, 获得了区域尺度的非均匀下垫面地表能量收支平衡(李新等, 2012).

(2) 揭示了青藏高原近地层和边界层动力、热力结构、强湍流运动规律、强对流热泡特征、“爆米花”对流云结构, 给出了高原边界层综合物理图像, 指出高原地区是中国东部洪涝对流云系统的重要源地之一; 发现青藏高原的强烈辐射是高原地表强热力强迫和热对流的动力源, 揭示了高原冷源、热源效应机理, 指出高原东部存在的强湍流输送有利于东部积云对流发展(徐祥德和陈联寿, 2006). 给出高原区域尺度的地表温度、地表反射率、标准化差值植被指数(NDVI)、校准的调整土壤植被指数(MSAVI)、植被覆盖度和叶面指数(LAI)、能量平衡各分量及蒸发(散)量的分布图像(马耀明等, 2006). 第三次青藏高原大气科学加密的实验观测发现地表湍流热交换系数、动量交换系数数值均低于以往估计值. 同时发现高原主体的对流云并非主要来自南亚季风区, 与局地发展所致, 揭示了夏季高原加热在维持亚洲大气“水塔”作用中的机理, 及其对亚洲和全球的气候的调节作用(赵平等, 2018).

(3) 获取了北京市城市边界层大气物理和大气化学过程的三维结构, 揭示了北京边界层动力、热力、湍流垂直结构和气溶胶分布的综合物理、化学特征; 提出了阵风新机制和阵风扰动参数化方案(Zeng等, 2010); 实验发现了长三角地区存在的“城市干岛”效应; 指出城市区风速减小原因为城市建筑物对气流的摩擦、阻尼和拖曳等作用, 部分大气运动的平均动能转化为湍流动能(蒋维楣等, 2010).

(4) 发展了大气非平衡态热力学理论, 证明了湍流

输送唯象关系涡旋定理和湍流强度定理, 以及大气系统动力过程和热力过程的交叉耦合效应, 提出大气边界层输送过程也应包括大气辐散和辐合运动对能量和物质的输送(胡隐樵和左洪超, 2004); 提出了辨识湍流相干结构的能量最大准则, 并应用于湍流相干结构、波形重构、奇异性 and 湍流间歇性研究(Li等, 2001); 证实湍流运动中z-less结构的存在及对湍流运动的作用(Wei等, 2017), 发现间歇湍流通量对颗粒物垂直输送的作用, 证明了间歇性湍流与污染过程和颗粒物扩散的相互作用机制, 揭示了湍流间隙与能量垂直运输相互关系(Ren等, 2019); 验证了复杂下垫面涡动相关法获取湍流通量在低频尺度的低估现象(李新等, 2012; Zhang H等, 2016); 定量给出了大气平均场转化为湍流场效率(刘罡等, 2009).

(5) 建立了适合城市地区的多层冠层模式, 并结合三维建筑物分布, 提高和完善城市区域气候模拟能力(蒋维楣等, 2010); 研发了一种采用非迭代方法的湍流通量参数化方案, 并耦合到中尺度天气预报模式(李煜斌等, 2009; Peng等, 2018); 提出了湍流相关长度 hT 的概念, 给出估算热力学粗糙长度 z_0 的参数化方案, 改进了近地层热通量的数值模拟效果(Yang等, 2002); 研发了大气边界层大涡模式和拉格朗日随机粒子扩散模式, 揭示不稳定大气边界层的湍流结构以及物质输送的特征与机制(蔡旭晖和陈家宜, 2000); 给出了复杂下垫面湍流通量和浓度观测结果的空间代表性(蔡旭晖, 2008).

(6) 研究了大气污染与边界层的相互作用, 指出了边界层高层相对低层变暖和一定程度受气溶胶污染累积影响是北京及周边地区气溶胶污染天气条件总体恶化的原因(Zhang X等, 2018), 发现了气溶胶的辐射冷却效应对局地天气气候的影响, 进一步加剧了气溶胶污染(Wang J等, 2018).

4.2 云雾物理

近20年中国在云雾物理方面取得的突出研究成果如下:

(1) 借助多种观测手段和模式分析对云雾宏观特征有了新的认知. 不同类型的云具有各自的宏观物理特征, 了解云的宏观特征对开发空中水资源等有重要意义. 学者们针对中国地区空中云水资源、云量变化趋势以及季节特征等进行了深入分析, 总结了

不同类型云的水平和垂直分布、全球云顶高度、云量空间分布、云量和地形的关系等特征. 随着分辨率的不断提高, 卫星也可以用于对云微物理的探测, 许多学者利用卫星资料对云内液水含量、有效半径、光学厚度等微物理特性进行了反演. 飞机观测能够更直接、具体地探测云内微物理信息, 研究了中国云系的空间分布不均匀的微物理结构, 还开展了针对云中重要物理过程的研究. 利用飞机观测资料还可以研究云中夹卷混合机制对云微物理的影响等, 对云中微物理、动力和热力相互作用有了更深更全面的理解(Lu C等, 2013). 此外, 云雷达和微波辐射计的发展也为云物理探测做出了很大贡献, 可以识别云粒子的相态和大小, 反演云中含水量(Zhao等, 2016; Ge J等, 2018). 在观测的基础上, 结合理论分析, 学者们也改进了模式中云物理的参数化方案或算法(Sun等, 2019). 雾研究方面, 许多学者利用观测或模式研究了辐射雾、平流雾、蒸发雾等的形成、发展、成熟和消散各阶段的微物理特征, 分析了不同雾在各阶段的理化特征及主导因子(Liu D Y等, 2011).

(2) 增强了对云降水过程、结构的理论认识. 云直接参与降水和潜热交换, 认识云的结构特征是进一步揭示降水特征的重要前提, 近20年来, 学者们利用观测和模式对云降水相关问题进行了深入的研究. 利用卫星资料, 实现了降水云与非降水有效区分, 揭示了不同地区(高原、平原、海洋)对流降水和层状降水的气候变化趋势、降水的垂直结构特征等(Fu等, 2018). 利用探测得到的雨滴谱分布研究了冰相降水、风暴降水的演变特征; 研究了不同地区、不同性质降水和不同阶段的雨滴谱差异, 形状因子、斜率因子、雷达反射率和降水率的关系(Chen等, 2016; Zhang H等, 2017). 另外, 雷达对降水特征的探测具有重要作用, 包括反演降水云的降水强度、云中降水含水量、雨滴下落末速度等参数以及三维风的演变、降水云中雨滴谱分布、降水云的分类和垂直结构等. 随着模式中对动力、云微物理和辐射等方面的描述越来越合理, 对降水过程的形成及演变模拟能力得到提高, MM5和WRF等中尺度模式普遍应用于研究云-降水相关问题中. 很多学者利用数值模拟与实验结果的对比, 揭示了冰相过程在降水中的重要性(Chen J等, 2017). 通过敏感性实验, 学者们还研究了初始条件、环境因子等对降水的重要影响, 发现它们能显著地改变地面降水中

心的降水量和中心位置, 还可能改变降水的起止时间(Jing等, 2019). 另外, 模式中参数化方案的改进与发展, 对更好地模拟云-降水相关问题也至关重要.

(3) 揭示了气溶胶作为云凝结核和冰核对云物理的影响机理. 气溶胶、云凝结核(CCN)、冰核(IN)和云性质的研究对于揭示背景气溶胶浓度、谱分布和化学成分与云和降水形成过程的关系非常重要. 学者们结合飞机、卫星资料和模式对CCN、IN进行了大量研究, CCN和IN的分布呈现出区域性特征, 且受到环境因素影响; CCN浓度升高形成大量云滴粒子, 减小云滴有效半径, 可能会使雨滴形成受到抑制(Guo等, 2016). Xiao等(2014)发现, 在不考虑城市效应的情况下, 地形云降水随着气溶胶增加而受到抑制; 之后他们又发现在污染较严重的条件下, 淞附和贝吉龙过程效率更高. 冰核浓度在冰相过程中十分重要, 增加冰核浓度可以使对流云中冰晶异质核化的速率增加, 但没有显著改变深对流云系统在地面的降水量(Deng等, 2018). 学者们也发展完善了卫星对云粒子有效半径和对流云CCN反演算法(Yue等, 2019), 将卫星云微物理参数反演技术应用于人影、灾害性天气预警、气溶胶间接效应等方面研究(Zhu等, 2015), 在定量评估气溶胶间接效应研究方面取得了突破性进展. Li R等(2017)综合观测和模拟结果, 验证了戈壁沙尘具有显著的异质冻结增强效应, 定量揭示了这种效应对冰云顶温度增暖的贡献约为40%. Chen Q等(2017)研究了暖相中气溶胶的变化对深对流系统的影响, 气溶胶浓度高时, 模拟得到的总云量更大, 同时高云云量、强上升气流和降水的频率也更大.

(4) 在模式改进了云相关参数化方案, 使云的气候效应变得更为合理. 云覆盖地球表面60~70%的区域, 显著影响着地气系统的辐射收支平衡. 低云云量增加4%即可抵消二氧化碳浓度加倍引起的2~3℃增温, 提高模式中气溶胶-云-辐射的模拟能力能够更好的研究云的气候效应. 气溶胶对云滴谱离散度的影响有很大争议, Xie等(2017)将不同的离散度参数化方案植入到气候模式中, 新的云参数化可以更好地模拟云短波辐射强迫, 并能显著减少人为气溶胶在云顶有效半径和液态水路径中引起的变化. Qin等(2018)将新的统计云方案在气候模式中进行测试, 使得低云云量和液水路径更为合理. Zhang H等(2018a)使用扰动参数集合实验研究了低云反馈的物理机制. Zhao W等(2018)将考

虑了云长波辐射效应的参数化方案耦合入气候模式中, 并指出了其对全球能量收支平衡的重要影响, 应该在未来的气候模式中引起重视.

4.3 大气辐射

21世纪以来, 中国大气辐射研究取得了较为迅速的发展, 在进一步优化气体吸收和辐射传输算法的基础上, 研究内容不断扩展, 在粒子散射(特别是气溶胶粒子)和辐射传输模式系统开发方面也取得了一系列成果.

(1) 气体吸收的计算方法方面取得了突出成果. 针对逐线积分模式, 中国科学家利用谱线半宽的特性, 提出了快速计算气体高光谱吸收系数的“追点方法”, 极大地减少了逐线方法的计算量(张华和石广玉, 2000; 石广玉, 2007). 在对影响逐线积分精度和计算时间的各种因子进行了分析后, 张华和石广玉(2000)、张华等(2005)研发了计算大气气体吸收系数及冷却率的快速数值方法, 满足了长波和近红外区间高精度辐射传输计算的需要. Zhang等(2003)提出了计算不同气体重叠吸收带透过率的优化方法, 同时, 通过分析不同线翼截断方式对吸收系数、大气透过率和冷却率的影响, 张华等(2007)提出以最大谱线线强为参考标准的相对线翼截断方法是最优的谱线线翼截断方法. 陈秀红等(2011)以逐线积分模式为基础, 提出了一种非线性拟合算法, 结合HITRAN数据库的分子吸收线参数, 发展了一套红外大气透过率模式, 并应用到辐射传输模型中. 基于逐线积分计算出的大气分子透过率参数, 可以通过数值拟合等方法, 快速计算窄带透过率(Wei等, 2007). 以上研究直接利用国际上成熟的LOWTRAN、HITRAN等数据库获得气体吸收谱线信息, 不涉及吸收谱参数的观测研究. 近年来, 中国科学家也开始参与气体分子吸收谱线的测量工作, 利用激光光腔衰荡光谱技术开展了CO₂、N₂O、CH₄等气体的高精度谱线参数测量研究(Kang等, 2018; Liu A W等, 2019).

(2) 粒子散射计算和非球形粒子光学特性研究明显增多. 中国科学家在T-矩阵、离散偶极子、时域法等算法的基础上, 开发和优化了多种非球形粒子光学特性的计算方法, 如桥接近似(Zhao和Hu, 2003)、多分辨率时域技术(刘亚文等, 2013; Hu等, 2018)、基于等效介质近似的离散偶极子算法(Liu等, 2018)等. 同时, 创新性地利用不变量嵌入法(Bi和Yang, 2014)和德

拜级数理论准确研究粒子散射特性(Lin等, 2017; Bi等, 2018c). 近十年, 国内学者针对气溶胶光学特性数值模拟的研究工作较多, 详细研究了基于不同形状模型粒子的光学特性, 揭示了粒子形状和性质对气溶胶粒子的散射特性的显著影响(高太长等, 2007; 黄朝军等, 2007). 针对不同种类的气溶胶, 中国学者研发了更为准确和系统的理论和数值模型, 这些模型涉及沙尘气溶胶(孙贤明等, 2010; 卫晓东和张华, 2011; Bi等, 2016; Jin等, 2016; Bi等, 2018a; Lin等, 2018)、海盐气溶胶(Bi等, 2018b)、黑碳气溶胶(黄红莲等, 2007; Cheng等, 2014; Liu等, 2018)、生物质气溶胶(Liu和Yin, 2016)、以及混合气溶胶等的光学性质的表征(王志立等, 2009; Zhang H等, 2018b; Liu等, 2017; Zeng等, 2019).

(3) 揭示了中国大气气溶胶的光学特性. 随着大气环境问题的突显, 气溶胶对区域及全球气候变化的影响日益显著, 中国也建立了相应的区域或行业性地基气溶胶观测网络, 在环境监测的同时, 开展了大量针对气溶胶光学特性的研究, 例如中国太阳分光观测网(Xin等, 2007; Wang Y S等, 2011)、中国气溶胶遥感网(Che等, 2015)、太阳-天空辐射计观测网(Li Z Q等, 2018)等. 同时也开展了大量典型区域的观测研究, 如华北(Ma等, 2012; Zhao等, 2019)、珠江三角(吴兑等, 2009)、黄土高原半干旱区(Huang等, 2008)等.

(4) 逐步开发了各具特点的适用于大气探测和卫星遥感领域的辐射传输算法和完整的大气辐射传输模式. 张华和石广玉(2000)建立了一个快速高效的逐线积分大气吸收计算方法ZS2000并与国际上广泛应用的LBLRTM进行了全面的比较(张华等, 2005). 刘广员和邱金桓(2004)建立了一个三维蒙特卡罗地气耦合辐射传输模式, 并应用于地气耦合、辐射率高分辨率模拟. Wang Z等(2017a)开发了基于蒙特卡罗的三维云-大气偏振辐射传输模拟系统MSCART并参与了国际IPRT比对计划, 效率和精度达到国际同类算法水平. 通过基于逐线积分非线性拟合分子吸收快速计算和分段拟合DISORT计算结果的方法, 魏合理等(2007)建立了一套基于中国大气模式的中分辨率快速辐射传输模式, 应用于大气修正等方面. Guo等(2007)根据单次散射理论建立了一个适用于紫外波段的临边辐射传输模式. Duan等(2010)开发的基于逐次散射法的全矢量大气辐射传输模式, 通过球谐展开函数计算相函数及原

函数分析式的差分方法提高模式性能, 目前该模式已经在海洋大气研究中得到了应用(李姣等, 2014). 在该算法基础上发展起来的大气非均匀分布临边矢量辐射传输模式(郜婧婧等, 2014), 满足了非均匀大气偏振临边辐射探测的仿真需求, 在标量计算方式下的辐射强度模拟与LGLTRAN有较好的一致性. 同时, 段民征和吕达仁(2007)还从理论上对矢量辐射传输中的 δ -M变换作了具体的推导, 给出规范的变化公式, 该 δ -M变化可以极大改善计算精度和计算效率. 针对高光谱的快速辐射传输模拟, 白文广等(2016)基于单色波长辐亮度计算加权组合的方法, 开发了一种快速准确的高光谱分辨率红外大气辐射传输计算模型FFRTM_IR, 可用于星载高光谱红外大气探测仪器的观测仿真和资料处理. 白文广等(2017)同样开发了中波和短波红外波段的高光谱快速辐射传输模式. Zhang F等(2019)开发了适用于卫星遥感的分段重排相关K分布辐射传输模式.

(5) 开展了针对天气和气候模式中辐射能量通量计算需求的辐射传输计算方法研究. Zhou等(2009)在二流辐射传输模式的基础上构建了一个应用于陆面模式的四流辐射传输参数化方案. 张华和卢鹏(2014)构建了用于非均匀大气辐射传输模式计算的短波二流-四流球谐谱展开混合辐射传输算法, 并将其应用于北京气候中心辐射传输模式BCC_RAD的研发中(张华, 2016). 此外, 张华(2015)还构建了二流-四流混合算法, 并在北京气候中心全球气候模式BCC_AGCM2.0(Zhang等, 2014)中得到应用. 中国科学家也提出了短波短波四流离散纵标累加和四流球谐函数谱展开累加方案(Zhang和Li, 2013), 减少了云和气溶胶的辐射强迫计算误差, 相关算法也被应用于长波辐射传输中多次散射问题的求解(Zhang F等, 2016, 2018). 在红外辐射传输研究领域, 中国科学家也发展了一系列近似方法来参数化红外漫射因子(石广玉和曲燕妮, 1985; Zhang和Shi, 2001; 张峰等, 2011; Zhao和Shi, 2013). 算法原理方面, 中国科学家提出了平面平行大气辐射传输方程的统一形式, 并给出了分解计算方案(Wang, 2017a), 在此基础上建立起来的四流半球形谐波方法, 在计算精度上部分优于四流离散纵标法和四流球面谐波方法(Wang, 2017b). 融合多年来中国在气体吸收、粒子散射和辐射传输的成果, 张华(2016)建立了可用于气候模式的辐射传输模式BCC_RAD, 并参与了国

际短波辐射方案比较计划(Randles等, 2013).

4.4 大气电学

近20年来, 高精度雷电探测和定位系统不断发展, 结合高速摄像观测, 揭示了闪电先导发展传输特征, 发现闪电先导发展头部之前的空间先导的存在以及与传播方向的关系(Qie和Zhang, 2019), 闪电光谱观测研究得到了闪电通道温度、电子密度等特征参量(袁萍等, 2004), 雷电电磁场的传播特性得到了系统研究(Zhang Q L等, 2012). 利用雷电甚高频窄带和宽带干涉仪描绘了闪电通道发展结构, 人工触发闪电技术不仅促进了雷电物理和机制方面的科学研究, 也在雷电防护技术测试中发挥了重要作用, 实现了真实雷击条件下的雷电破坏效应和防护测试(张义军等, 2016).

利用三维闪电探测系统的观测资料, 分析揭示了闪电放电起始特征和闪电通道传播特征以及它们与雷暴电荷结构之间的关系, 在闪电活动与雷暴结构关系研究中, 初步引入闪电尺度参量, 改善了量化关系(Zheng等, 2018). 对双极性窄脉冲放电事件(NBE), 这种特殊类型的放电过程的观测和计算得到了其发生高度和产生机制(Liu等, 2012c). 发展了中尺度雷电模式, 模拟揭示了不同非感应起电机对雷暴云电荷结构的影响(Xu等, 2016). 台风中的闪电活动研究指出, 眼壁区的闪电活动的突增对台风的增强有预警预报意义(Zhang等, 2015).

高建筑物雷电观测发现雷电连接过程中先导之间“头部-头部”和“头部-侧面”连接是两种基本连接行为, 且侧击现象更为普遍, 高建筑物上产生的上行连接先导长度可以达到公里量级, 其发展速度在连接前几微秒内迅速增加(Lu W等, 2013). 在观测的基础上, 提出了上行闪电放电参数化方案, 实现了在现有的雷暴云模型中模拟上行闪电放电(Tan等, 2019).

发生在中高层的瞬变发光事件(TLE)受到关注, 观测揭示了不同类型的中高层放电事件的基本特征, 研究了与其相关联的对流层闪电特征和雷暴条件(Qie和Zhang, 2019).

4.5 大气化学

21世纪以来, 在国家自然科学基金委大气科学“十一五”规划中把大气化学研究列入中国大气科学的优先发展领域, 取得的突出研究成果如下:

(1) 大气自由基化学的研究取得重要进展. 自由基在大气化学中的作用极为重要, 参与了大气中多种微量成分的氧化和去除反应. OH是大气中最重要的氧化剂之一, 是新粒子形成的主要驱动力, 促进灰霾形成和爆发性增长(Tan等, 2018). 大气OH自由基浓度极低、测量要求高, 直接测量难度很大. 中国对OH自由基的观测研究始于北京大学团队建立的一套激光诱导荧光系统(LIF)(任信荣等, 1999). 从20世纪末到21世纪初, 中国对HO_x自由基的研究观测由于测量技术的局限, 观测结果难以用于评估中国城市大气氧化性水平(陆克定和张远航, 2010). 2006年起北京大学在中国率先使用LIF在多地观测HO_x自由基, 技术较为成熟, 2006年陆克定等人在广州和北京相继开展大气HO_x的观测研究, 发现在中国OH的非传统再生机制(Lu等, 2012). 他们还在北京和河北地区开展多次HO_x的观测, 对观测和模拟结果进行了比较(Tan等, 2018).

HONO光解产生的OH自由基占日间OH总量的34~56%, 受到人们的广泛关注(Kleffmann, 2007). 中国对HONO的研究也日渐增多, 北京大学、中科院化学所、安光所等多家单位自主开发了HONO分析仪, 在中国多地区进行了一系列HONO的观测实验(Hou等, 2016; Tong等, 2016; Zhang W等, 2019), 证明吸附态硝酸和硝酸盐光解以及农业活动期间(如施肥过程)对HONO的来源有很大贡献(Liu Y等, 2019; Xue等, 2019). 也有研究表明大气中的NH₃能够促进NO₂水解生成HONO, 但是这些来源的作用机理和贡献比重存在极大的争议(Li L等, 2018). 安俊岭等人将室内排放和生物质燃烧排放耦合到WRF-Chem模型中, 提高了模式模拟的准确性(Zhang J等, 2019).

夜间, OH自由基因缺失光化学来源浓度迅速降低, NO₃自由基和O₃成为主要的大气氧化剂. NO₃自由基同样也是具有短寿命、高反应性和低浓度的特性, 但它对大气中多种痕量气体的氧化及损耗起着非常重要的作用. 中国安徽光学精密机械研究所、复旦大学、香港理工大学和北京大学等研究组搭建了NO₃自由基检测仪器, 并开展了观测实验(Wang H等, 2017; Li Z等, 2018).

在臭氧和烯烃反应的过程中, 会产生Criegee自由基中间体(CIs), 具有非常强的氧化性, 是目前国际研究的前沿热点问题. 复旦大学对含卤素的烯烃的臭氧氧化过程对新粒子生成贡献进行了研究(Wang N等,

2017). 山东大学团队在探究臭氧和呋喃反应中通过CIs的检测和研究确定了新的反应通道(Chang等, 2017).

(2) 大气新粒子生成的观测和机理研究取得重要突破. 自从1897年Aitken报道了大气中存在新粒子生成的依据, 大气中粒子成核问题的研究就一直是大气化学最前沿的研究领域. 从北极到欧洲森林地区, 从沿海区域到城市群, 均观测到了大气新粒子形成现象. 大气新粒子是二次气溶胶重要的来源, 可以贡献大约一半的云凝结核. 目前国际上关于新粒子成核理论主要有水-硫酸的二元成核、三元成核、离子诱导成核、碘参与成核等. 中国在新粒子研究方面起步较晚, 从21世纪初开始相关研究, 近20年取得了一系列重要的研究成果. 北京大学团队从2004年起开展了一系列外场观测研究, 证实了硫酸在新粒子形成中的重要作用, 发现了有机物在新粒子成核中的重要性(Yue等, 2010).

通过实际环境观测探究新粒子生成机制需要解决两个关键技术问题, 第一是对于空气动力学直径在3nm以下的颗粒物或分子团簇进行粒径数谱测量, 第二是针对这些颗粒物或分子团簇以及气态前体物进行实时化学组分测定. 清华大学团队(Jiang等, 2011)针对

3nm以下粒径数谱测量开展了一系列仪器技术研发, 成功实现了对于1~3nm颗粒物的检测. 复旦大学团队(Yao等, 2018)在上海开展的大气观测, 与实验室模拟相比较, 发现了硫酸-二甲胺-水三元成核体系, 可以有效解释上海大气新粒子生成事件机理. 北京理工大学等提出了高度污染地区污染物间的化学反应引发的气溶胶新粒子形成的物理化学新机制, 为中国复合大气污染条件下颗粒物形成提供了新的研究思路和理论指导(Li H等, 2018).

(3) 揭示了中国二次气溶胶的形成机制. 灰霾从本质上上看是细颗粒物(PM_{2.5})的污染(Liu X G等, 2013). 与世界其他地区相比, 北京的SOA浓度较高(Guo等, 2012). 近年来清华大学、中国科学院生态环境研究中心、北京大学、中国科学院化学研究所、复旦大学、中国科学院地球环境研究所、中国科学院广州地球化学研究所、北京理工大学、中国科学院大气物理研究所、中国环境科学研究院、中国气象科学研究院等团队开展了大量二次气溶胶形成机制的研究, 取得了一系列成果.

烟雾箱是研究二次气溶胶形成机制的有效手段, 从表2可以看出, 中国的烟雾箱逐渐从初期以检测气态

表2 中国自主搭建的烟雾箱及应用

单位	时间	体积及材料	配置
中国科学院生态环境研究中心 (吴海等, 2001)	2001	100L, Teflon	GC
中国人民解放军电子工程学院 (聂劲松等, 2002)	2002	23L, 石英玻璃	激光质谱
清华大学 (任凯锋等, 2005)	2005	23m ³ , Teflon, 双生	GC, NO _x 、O ₃ 分析仪, 温湿度测控仪, 辐照计
清华大学 (Lu等, 2009)	2005	2m ³	石墨气溶胶发生器, 原子化器, CO/O ₃ /NO _x 分析仪, SMPS, GC
中国科学院大气物理研究所 (Du等, 2007a)	2006	70L, Teflon	O ₃ /NO _x 分析仪, GC
中国科学院化学研究所 (Gai等, 2009)	2008	100~360L, Teflon	15~50℃, GC, O ₃ /NO _x 分析仪
中国科学院化学研究所 (Gai等, 2013)	2011	1~3m ³	O ₃ /NO _x 分析仪, GC, SMPS
中国科学院化学研究所 (Wang等, 2015)	2014	10m ³ FEP膜, 双生	SPMS, CRDS, CPMA, PT-MS, VUV-TOF-MS, CO/O ₃ /分析仪, 0~40℃
中国科学院广州地球化学研究所 (Wang等, 2014)	2014	30m ³	PTR-TOF-MS, HR-TOF-AMS, GC-MSD/FID, PILS-IC, O ₃ /NO _x /CO/ NH ₃ /SO ₂ 分析仪, SMPS
中国科学院生态环境研究中心 (Liu Y等, 2015)	2015	9m ³ , Teflon	HR-TOF-PTRMS, DMA, HR-TOF-AMS, SMPS, O ₃ /NO _x /CO/NH ₃ /SO ₂

污染物为主到现在实现多物种化学成分、颗粒物粒径分布、光学和吸湿性质等的全方位检测, 已经处于国际领先水平. 利用烟雾箱并结合流动管、烟雾箱、漫反射红外光谱、努森池、X射线衍射、电子显微镜、拉曼光谱等手段可以研究二次气溶胶的形成机制.

多相反应在二次气溶胶的形成中起着重要作用, 研究发现相对湿度、温度等环境条件对二次气溶胶的形成速率、形貌、产率以及光学性质都具有重要影响. NO_2 的存在能够促进 SO_2 的吸附和硫酸盐的生成, 可一定程度解释外场观测结果(Liu C等, 2012). 混合颗粒物中硫酸盐或硝酸盐参与反应也可促进二次颗粒物的形成(Tan等, 2016). 针对颗粒物表面的光化学反应也有相关研究(Du等, 2018).

大气中的有机物经过OH自由基、 NO_3 自由基、 O_3 以及Cl原子等氧化剂氧化会形成二次有机气溶胶(SOA). 中国科学院化学研究所团队早期对不饱和烯烃、烷烃、含硫有机物等与 O_3 、OH自由基Cl原子以及 NO_3 自由基的反应动力学过程(Gai等, 2013; Du等, 2007b). 中国生态中心团队研究了OH自由基、Cl原子等与含硫、不饱和酯、烯醇等挥发性有机物之间的反应动力学(Liang等, 2011; Wang等, 2008). 中国科学院安徽光学精密机械研究所和清华大学团队利用烟雾箱研究了甲苯以及蒽烯光氧化过程中SOA的形成以及产物分析(Hao等, 2006; Lu等, 2009). 北京大学团队发现大气中芳香烃排放对 $\text{PM}_{2.5}$ 形成有重要影响(Peng等, 2017). 中国科学院广州地化所团队(Liu T等, 2015)发现机动车空转排放的尾气对SOA生成贡献是初级有机气溶胶(POA)的12~259倍. 此外, 实际大气中 NO_x 、 SO_2 、 NH_3 等的加入有利于更真实的模拟实际大气污染过程.

(4) 获得了中国不同类型气溶胶的吸湿和吸光特性. 大气气溶胶对于环境和气候的影响则包括两个方面: 一方面通过散射和吸收太阳辐射影响地-气辐射平衡, 改变辐射效应, 造成能见度的变化, 对气候产生直接影响, 这一部分与气溶胶的光学特性密切相关; 另一方面气溶胶可以作为云凝结核(CCN)影响云反照率、改变云滴数浓度、尺寸等微物理性质, 对气候产生间接影响, 这一部分与气溶胶的吸湿特性密切相关.

黑碳气溶胶, 特别是老化的黑碳气溶胶对于可见波长的光具有强烈的吸收性. 北京大学团队在中国北京及美国休斯顿的实验发现, 黑碳气溶胶在空气中老

化后其光吸收能增加约3倍(Peng等, 2016). 在中国, 二次有机气溶胶能占到有机气溶胶的一半甚至更高, 中国科学院化学所团队自主开发了光腔衰荡光谱, 研究了典型人为源挥发性有机物如苯系物(BTEX)、长链烷烃(IVOCs)和生物源(BVOCs)等光氧化产生的SOA的光学性质, 发现直接受SOA化学成分的影响, 需要在模型中进行改进(Li K等, 2017).

在特定的相对湿度下, 气溶胶中的含水量主要取决于其化学成分和混合状态, 且国内外大量的研究表明, 有机组分对无机盐的吸湿性具有重要的影响. 中国气象科学研究院团队对近年来气溶胶散射吸湿增长特性的观测结果表明, 海盐气溶胶散射吸湿增长能力最强, 并随人为影响的增加气溶胶散射吸湿能力减弱; 城市型气溶胶散射吸湿增长能力次之; 沙尘气溶胶和生物质燃烧气溶胶散射吸湿能力最弱(Sun等, 2016). 北京大学团队利用自行搭建的吸湿性串联微分电迁移粒径分析仪(H-TDMA)开展颗粒物吸湿性测量研究发现, 不同环境、不同季节的大气颗粒物来源不同, 颗粒物吸湿性、粒径分布及模态分布特征差异大(Wang Y等, 2017). 中国科学院化学所团队利用自行搭建的HTDMA研究了一系列有机和无机气溶胶混合后的吸湿性质, 发现化学成分的改变对气溶胶的吸湿性质、相态都有重要影响, 模型当中需要将有机气溶胶的影响考虑进来(Wang Y等, 2017).

4.6 大气环境

近20年中国在大气环境方面取得的突出研究成果如下:

(1) 自主研发的大气环境模式得到迅速发展. 进入21世纪后, 中国科学家一直致力于发展适用于中国地区的大气环境模式, 将整个大气作为研究对象, 发展能在各个空间尺度上模拟所有大气物理和化学过程的第三代空气质量模式系统(表3), 如中国科学院大气物理研究所建立的嵌套网格空气质量预报模式(NAQPM)(王哲等, 2014)和全球环境大气输送模型(GEATM)(罗淦和王自发, 2006)、中国气象科学研究院发展的化学天气数值预报系统(CUACE)(Zhou等, 2008)和南京大学开发的区域大气环境模拟系统(RegAEMS)(Wang等, 2012)等. 伴随着研究的深入、技术的发展和持续的应用, 中国自主研发的空气质量预报模式的功能也在不断的更新改进, 逐步发展构建多模

表 3 国内自主研发的主要数值模式及应用

模式名称	开发单位	特点与发展过程	应用领域
NAQPMS	中国科学院大气物理研究所	耦合了多尺度双向嵌套、污染源解析、化学资料同化、过程分析、气象-化学双向反馈等模式先进技术, 可实现区域-城市尺度大气污染的高效、稳定、准确模拟预报	应用于国内多个省市的空气质量业务预报和重大活动空气质量保障
GEATM	中国科学院大气物理研究所	结合亚洲地区自身特点, 以硫酸盐、黑碳、沙尘气溶胶、二氧化硫等物质为主要研究对象的全球模式. 采用的动力框架为地形追随球坐标下的三维大气化学物质输送方程, 对主要化学过程采用参数化计算处理	对大气中多种化学物质的分布状况、输送态势进行数值模拟, 模拟了全球二氧化硫、硫酸盐、黑碳和沙尘的浓度分布
CUACE	中国气象研究科学院	包含了污染排放、气态化学、气溶胶、数值同化等模块; 加入沙尘长波辐射参数化方案, 提高了模型对气溶胶辐射效应的模拟能力; 加入了三维变量同化和气溶胶辐射反馈方案, 大大提高了模型对沙尘浓度、温度、气压、风速的模拟精度	建立有中国雾-霾数值预报系统(CUACE/Haze-fog), 可提供PM ₁₀ 和PM _{2.5} 7种气溶胶组分、O ₃ 和能见度等数值预报产品, 在2008年奥运期间首次应用, 并参与了2009年国庆阅兵, 在国家气象中心和一些地方气象部门推广应用. 此外还有在线化学天气预报系统(GRAPES-CUACE)和亚洲沙尘暴数值预报系统(CUACE/Dust)等
RegAEMS	南京大学	最早由1994年的NJUADMS酸雨模式发展而来, 用于计算SO ₂ 、NO _x 、硫酸盐等大气污染物浓度和酸沉降量. 2000年对化学过程作合理简化, 建立不同条件下SO ₂ 、NO _x 转化率数据库, 并对液相化学和湿清除过程进行参数化处理. 2008年后逐步耦合二次气溶胶模块、沙尘和海盐气溶胶过程、汞化学、大气污染源解析等模块, 增加了支持MM5、WRF等气象模式输出数据的接口, 具备了第三代空气质量模式的主要特征, 可用于区域大气复合污染模拟和空气质量预报	成功应用于2014年南京青奥会、2016年G20峰会、2018年青岛上合峰会、2019年青岛海军节的空气质量预报. 此外, 基于数值模型和受体模型的RegAEMS-CMB颗粒物来源解析方法为颗粒物合理控制提供了科学依据

式预报系统并研发污染源解析、集合预报、大气化学资料同化等先进技术, 成功应用于2008年北京奥运会、2010年上海世博会、2014年南京青奥会、2014年北京APEC峰会、2015年北京抗战胜利日阅兵、2016年杭州G20峰会和2018年青岛上合峰会等重大活动空气质量保障.

这一时期大气环境数值模拟技术发展的一个趋势是将区域和全球气候模式与大气化学模式耦合, 国内在空气污染与气候变化耦合模式的研究中也取得了重要进展(如表4所示), 例如中国科学院大气物理研究所开发了在线区域气候化学耦合模式系统(RIEMS-Chem)(Li和Han, 2016)、南京大学开发了区域气候化学模拟系统(RegCCMS)(Wang T J等, 2010)、中国气象局开发的全球气溶胶/大气化学-气候耦合模式(BCC_AGCM2.0_CUACE/Aero)(Zhang等, 2012, 2014; Wang等, 2014)等, 这些模式在深入认识大气污染与气候、季风的相互作用等方面发挥了重要作用.

(2) 将大气污染研究和气候、生态、健康效应研究紧密结合起来. 气溶胶气候效应的评估研究在

2000~2018年间成为气候变化研究的前沿和热点. 基于气溶胶消光系数与大气能见度、日照时间、地表温度以及降雨量之间相关系数的分析, 获得了气溶胶气候减少地表温度和降雨等的初步结论. 基于观测资料分析发现, 在全球变暖背景下, 中国夏季华中-华东出现冷池, 主要表现在日最高气温的降低, 其分布与气溶胶的光学厚度和辐射强迫具有很好的对应关系, 冷池的出现被认为与气溶胶有关. 气候模式中大气化学的模拟迅速发展完善, 能模拟大气中所有主要的气溶胶成分, 估算出气溶胶直接和间接辐射强迫及其对地表温度和东亚季风等的影响. 气溶胶使得东亚大陆气温降低, 并有效抑制了东亚地区温室气体产生的温室效应, 尤其在重污染期间, 气溶胶可使得局地气温下降2℃以上. 气候变化通过影响多尺度大气物理过程, 在季节、年际和年代际时间尺度上影响着大气环境, 形成了较为系统的结论.

21世纪以来, 大气污染生态效应的研究主要集中在地表O₃浓度升高、N沉降加剧对生态系统的影响方面. 通过野外调查, 学者发现当前大气O₃浓度已造成北

表 4 国内气候-化学耦合模式发展及其应用

耦合模式	应用实例
RegCCMS	将区域气候模式RegCM3和对流层大气化学模式TACM耦合发展而来, 能够实现对东亚地区特别是中国地区人为和自然气溶胶、臭氧及前体物的时空分布特征进行模拟, 可以用于评估中国地区主要气溶胶对东亚地区辐射、云、气温、降水和环流的影响
BCC_AGCM2.0_CUACE/Aero	将国家气候中心大气环流模式BCC_AGCM与中国气象科学研究院气溶胶/大气化学模式CUACE/Aero在线耦合发展而来, 是中国目前唯一参加气溶胶国际比对计划(AeroCom)的模式. 利用该模式获得的全球人为气溶胶直接辐射强迫、黑碳气溶胶垂直廓线和雪盖效应等成果被IPCC第五次评估报告引用
RIEMS-Chem	描述了人为和自然气溶胶在大气中经历的主要物理、化学过程及其与大气辐射和动力之间的相互反馈作用, 该系统在研究东亚区域气溶胶的时空演变以及对大气辐射和气候系统的影响方面表现出色, 可用于研究区域气溶胶的时空演变以及对大气辐射和气候系统的影响

京及其周边多地几十种植物叶片出现典型受害症状(Feng等, 2014). 国内大部分地区大气O₃浓度均已超过敏感植物受害的临界阈值(40nmol mol⁻¹)或欧盟设定的保护森林植物阈值标准(Li P等, 2018). 研究建立了典型植物(森林优势种、常见绿化树种和主要农作物)叶片光合生理、BVOCs释放、生物量和相对产量之间的剂量响应模型(Feng等, 2012; Feng等, 2018; Hu等, 2015; Shang等, 2017; Yuan等, 2017), 用于O₃风险的区域评估. 研究表明中国大气O₃污染已造成水稻、小麦、大豆、马铃薯、玉米、油菜、菠菜和青菜等作物产量和中国热带、亚热带和温带树种生物量显著减产(Li T T等, 2018; 冯兆忠等, 2018), 北方主要农作物产量损失达15%以上(Feng等, 2018; Jiang等, 2018), 对长江三角洲地区小麦和水稻减产的影响在10~40%(Zhao H等, 2018). 总得来说, 模型驱动与大量实验的结果吻合, 均表明O₃污染在不同尺度都对自然生态系统有显著的负效应.

中国N沉降影响研究主要集中在亚热带森林生态系统. N是植物生长必需的营养元素. 在一定范围阈值内, N输入促进植物光合作用, 增加株高和基茎, 有利于生态系统生产力和碳蓄积量的积累; 然而过量N沉降会引起土壤酸化, 降低土壤微生物多样性, 造成植物体营养失衡, 改变植物叶片营养元素吸收, 影响植物的逆境胁迫抗性, 不利于植物生长, 最终改变生态系统的物种组成及结构功能(李德军等, 2003; 段娜等). 生态系统的N沉降生态响应一般与生态系统植被类型、初始氮状况(氮限制或氮饱和)、土壤特征、演替阶段和生态系统管理方式等因素相关(吕超群等, 2007; Jones等, 2014).

进入21世纪以来, 随着《环境空气质量标准》

(GB3095-1996)及其修改单(环发[2012]1号)和《环境空气质量标准》(GB3095-2012)的颁行, 中国出现了针对颗粒物中健康危害更大的可吸入颗粒物(PM₁₀)和细颗粒物(PM_{2.5})、臭氧等二次污染物的流行病学研究. 主要体现在: 其一, 复旦大学、北京大学和中国疾病预防控制中心等机构开展的多中心时间序列研究, 基本上获得了中国大气污染短期暴露与居民日死亡率和入院率的暴露反应关系(Chen R J等, 2017; Tian等, 2018). 其二, 基于个体暴露监测等手段, 开展了形式多样的固定群组研究, 对中国大气污染短期暴露的急性健康效应机制开展了大量探索(Huang等, 2012; Niu等, 2018). 其三, 随着卫星遥感反演、土地利用回归等高分辨率的暴露评估模型的应用, 中国近年来出现了针对大气污染长期暴露健康危害的队列研究, 初步建立了中国大气污染长期暴露与人群死亡率或发病率的暴露反应关系(Yin等, 2017; Li T T等, 2018; Huang K Y等, 2019).

(3) 大气污染管控研究方面取得重要进展. 21世纪以来, 为了应对日益严峻的空气质量管理需求, 中国学者通过分析中国大气污染来源并研究大气污染控制对策, 逐步建立了中国的空气质量管理决策支撑技术体系.

大气污染来源分析是进行空气质量管理决策的基础. 在空气质量管理决策支持技术体系中, 大气污染物排放清单是识别污染来源的基础, 也是制订大气污染控制策略的重要依据. 近20年来, 中国学者建立了适合中国复杂源背景的多尺度动态排放清单编制技术体系, 编制了中国及区域尺度的大气污染物排放清单, 并推动了排放清单业务化进程(Li M等, 2017; Zhang等, 2009). 开展了基于卫星遥感和地面观测进行排放清单评估和反演的相关研究(Wang等, 2011a; Zhang Q等,

2012). 大气污染源-受体关系评估技术是支撑空气质量精准决策的重要技术. 中国学者结合观测和数值模拟评估了全国及重点地区污染物区域和部门来源, 定量前体物排放贡献, 依托源-受体响应模型构建了源-受体关系评估技术体系, 为大气污染控制决策提供理论支持(Wang等, 2011b; Zhang等, 2013).

大气污染控制政策研究基于对大气污染来源的科学认知, 结合观测和数值模拟等技术手段评估控制政策效果, 辅助决策过程, 是空气质量管理决策支持技术体系的重要组成部分. 近20年来, 中国学者建立了中国大气污染控制政策效果评估技术体系, 有效支撑了中国的大气污染综合控制决策和重大活动空气质量保障. 中国学者从多角度评估了大气污染控制政策对全国和区域空气质量改善的影响. 分析指出近年来PM_{2.5}污染治理取得了良好成效, 但需要关注O₃污染恶化的问题(Zheng等, 2018; Li等, 2019). 部门措施评估也证实了相关政策的有效性(Zhao B等, 2018; Shen等, 2019; Tao等, 2018). 总结已落实政策的成效与不足, 针对中国现阶段排放特征, 评估潜在减排措施效果, 提出了未来空气质量改善的政策建议(Liu等, 2016; Liu M等, 2019). 这一系列研究成果推动了诸如《大气污染防治行动计划》和《打赢蓝天保卫战三年行动计划》等大气污染综合控制政策的制定、完善和落实. 中国学者还通过研究针对性地提出了通过区域复合大气污染联防联控来保障北京奥运会等重大赛事活动期间空气质量的控制方案, 取得了良好成效(Wang等, 2009; Wang S等, 2010). 此外, 以中国科学家为核心的国际研究团队开发了以大气污染控制费用效益分析为核心的空气污染控制费用效益与达标评估系统(ABaCAS), 提供了从减排成本分析、空气质量响应到环境健康效益评估的全流程评估模块, 为大气污染控制决策提供了综合评估工具(Wang等, 2011b).

除了针对中国大气污染控制开展的一系列富有成效的研究, 近年来中国科学家也将研究对象瞄准了全球大气污染治理, 加深了对全球电力行业污染排放特征的了解(Tong等, 2018), 分析了国际贸易对区域大气污染转移的影响(Lin等, 2014; Lin等, 2016; Zhang Q等, 2017). 由于空气污染和气候变化具有同源性, 大气污染和气候变化协同控制研究也受到广泛关注. 中国学者初步开展了中国气候政策空气质量效益评估领域的研究(Cai等, 2018; Li M等, 2018).

4.7 大气探测与大气遥感

近20年中国在大气探测与大气遥感方面取得的突出研究成果如下:

(1) 云和天气现象具备了基本的自动观测能力. 发展了激光云高测量技术(杨成武等, 2011)、可见光测云技术(Huo和Lu, 2012)和红外测云技术(Liu L等, 2013), 基本具备云量、云底高和部分云状(Liu L等, 2011; Gan等, 2017)的昼夜自动观测能力. 国产前向散射式天气现象仪、激光雨滴谱仪和成像式雨滴谱仪(Liu等, 2014)等仪器的成功研制, 推动了降水现象的自动识别, 目前基本可以区分雨、毛毛雨、雪、冰雹等降水现象(刘西川等, 2017). 在上述工作中, 基于非致冷红外焦平面阵列的测云技术和单帧多曝光面阵列降水微物理特征测量技术是中国气象观测领域研究成果首次被世界气象组织《气象仪器与观测方法指南》引用.

(2) 电子式探空仪得到应用且传感器国产化水平不断提高. 中国于2001年开始正式启动L波段测风雷达-电子探空仪系统业务运行(张立功等, 2002), 替代了传统的机械式探空仪. 与此同时, 开展了基于导航测风技术的探空仪研制, 随着中国北斗导航卫星系统的发展, 成功研制了多型北斗探空仪(郭启云等, 2018; 赵世军等, 2012). 2010年阳江国际探空比对试验表明(李柏和李伟, 2011; Nash等, 2011), 中国研制的探空仪整体技术达到了世界先进水平, 明显高于日本、韩国和南非的GPS高空探测系统, 在测风、定位性能方面优于芬兰的RS92探空仪.

(3) 基本建立了大气电场监测、地闪定位和雷电放电物理过程观测相结合的探测体系. 目前, 中国自主研发的地闪定位网基本形成(Qie, 2012), FY-4搭载的闪电光谱成像仪已经初步投入使用(曹冬杰等, 2018), 用于监测全国雷电活动; 基于低频和甚高频的时差、甚高频干涉技术的三维闪电探测系统已经成熟(张广庶等, 2015; 史东东等, 2018), 可以实现重点区域兼顾云闪和地闪的全闪电三维探测. 建立了多个野外雷电试验基地(张义军等, 2012; 郝秀书等, 2012; Wang T等, 2018), 发展了基于高速摄像(Lu W等, 2013)、高速光电管阵列探测(Huang L等, 2019)、闪电光谱测量(袁萍等, 2004)的光学探测, 建立了闪电放电电场(邱实等, 2011)、磁场(Lu等, 2014)的测量方法. 得益于高速

大容量数据采集技术的进展, 提出了基于滑动窗的连续定位技术(Liu H等, 2012)、时间反转定位技术(Li Y等, 2018)、经验模态分解(Fan等, 2018)等高精度雷电三维定位新方法, 为弱辐射源以及同时多个辐射源的定位提供了有效手段。

(4) 大气廓线地基垂直遥感探测能力的自主化程度不断提高。目前, 中国地基遥感大气廓线的种类由传统温度、湿度拓展至云、气溶胶及气体成分等, 特别是在激光雷达及微波辐射计方面取得重要进展。多个研究机构在米散射激光雷达(Yan等, 2013; Zhong等, 2003)、拉曼激光雷达(石冬晨等, 2018; 尚震等, 2016)和多普勒测风激光雷达(刘智深, 2015; 孙东松等, 2006)等方面开展了系列算法研究和系统研制, 形成了激光雷达自主研发能力。此外, 多通道微波辐射计(卢建平等, 2014)的功能和指标均达到国外同类仪器水平。2018年, 吕达仁主持研制的“多波段多波长大气成分主被动探测系统”成功部署在海拔4300m的西藏羊八井, 实现了从地表到110km高度的垂直大气层进行多要素连续观测(Lu等, 2018)。近年来, 中国启动超大城市试验(Zhang Y等, 2019), 通过构建以地基遥感观测为主的增强观测网实现从大气边界层气溶胶、整层大气廓线到高层云垂直结构观测, 将进一步推动中国大气廓线地基垂直遥感探测能力和水平的提升。

4.8 气象雷达探测

近20年中国在气象雷达探测方面取得的突出研究成果如下:

(1) 初步形成了对大中小尺度灾害性天气有监测能力的天气雷达观测网。目前中国已经形成由S波段、C波段新一代天气雷达组成的国家骨干网和常规数字化天气雷达为补充的局地警戒天气雷达网, 初步具备了对大中小尺度灾害性天气的监测能力, 是世界上规模最大、技术水平较为先进的雷达观测网之一(沈瑾等, 2011)。近年来, 中国业务天气雷达开始升级为双线偏振雷达, 多家研究机构和生产企业都开展了S、C及X波段双偏振多普勒天气雷达的研制和生产, 并提供给国内外多个用户。此外, 相控阵技术应用于天气雷达也得到快速发展。自2005年起, 中国S波段(张志强和刘黎平, 2011)、X波段(刘俊等, 2015)相控阵天气雷达相继成功研制, 为监测快速变化中小尺度天气过

程(如冰雹、龙卷、微下击暴流、风切变等过程)提供了有效途径。

(2) 机载气象雷达云雨探测系统研制取得突破。由中国气象局气象探测中心、中国电子科技集团第14研究所和第38研究所联合承担的国家863计划项目“机载气象雷达云雨探测系统”, 实现了国内机载气象雷达的首次成功探测, 填补了国内空白。此外, 还研究了机载雷达对不同云雨的扫描模式、飞行路径、雷达数据质量控制以及气象产品生成算法等问题, 并通过试飞获取相关气象回波资料, 能够较好反映实际云况(刘黎平等, 2014; 高仲辉等, 2014; 魏鸣等, 2011)。

(3) 实现了中国自主知识产权的天气雷达应用软件系统研制。中国原有新一代天气雷达应用软件基于引进国外技术, 缺乏针对中国灾害性天气特征的自有产品。为此, 中国气象局气象探测中心于2012年提出开发有自主知识产权的软件产品生成子系统-ROSE, 其目的是为了充分发挥新一代天气雷达网的建设效益, 进一步提高天气雷达资料在天气预报和气象服务业务中的应用水平。此外, 中国气象局研发了以天气雷达探测数据应用为主体的短时临近预报平台SWAN。该系统提供实况数据、雷达数据、雷达拼图产品、雷达特征量数据、算法产品和算法检验产品、报警数据六大类产品, 基于这一共享的短时临近预报系统平台, 便于对各种短时临近预报方法进行本地化试验与改造, 提高短时临近预报的准确率。

(4) 在雷达气象理论与数据处理和应用方面不断创新。主要包括: 推导了小椭圆雨滴群在旋转轴不同取向、发射不同偏振波时的雷达气象方程(张培昌等, 2013); 提出了适用于“双/多基地双线偏振气象雷达探测小椭圆粒子群”的雷达气象方程(张培昌等, 2012)。此外, 系统地开展了多普勒雷达反演风场方面的研究工作。证实了单多普勒雷达采用涡度-散度方法、改进的VVP法、VAP方法进行三维风场反演具备一定的业务应用条件。发展了MUSCAT方法(周海光和张沛源, 2002)、变分方法(刘黎平等, 2005)进行双多普勒雷达三维风场反演方法, 提高了反演风场的准确性。利用天气雷达资料, 中国学者还开展了强对流天气降水特征观测分析(Wang等, 2016; Wen等, 2017); 使用天气雷达网资料对林业和电力部门关注的林火自动识别与预警进行了深入研究(张琛寿, 2017)等一系列有特色的研究工作。

4.9 气象卫星遥感

近20年中国在气象卫星遥感方面取得的突出研究成果如下:

(1) 风云系列卫星实现了从“试验应用型”向“业务服务型”转变. 中国独立自主地发展了风云极轨和静止气象卫星系列, 成为世界上少数几个同时具有极轨和静止两个系列业务气象卫星的国家和地区之一(许健民等, 2010). 截至2018年, 中国已成功发射了17颗风云(FY)系列气象卫星(包括8颗极轨气象卫星和9颗静止气象卫星). 极轨气象卫星实现了“上、下午星业务组网观测”, 静止气象卫星实现了“多星观测、在轨备份、适时加密”的业务布局. 2016年中国新一代静止轨道气象卫星风云四号FY-4A成功发射, 其探测能力已与国际水平相当(张志清等, 2017; 董瑶海, 2016). 其中, 搭载的世界上首个静止轨道干涉式大气垂直探测仪, 可对大气结构实现高精度定量探测(杨军等, 2018). 目前风云气象卫星已经在数值天气预报、气候分析、环保、农业及在重大服务保障、防灾减灾领域得到广泛应用, 为全球尤其是“一带一路”沿线国家提供了优质气象服务.

(2) 在仪器研制和观测能力方面, 中国先后为“风云”系列气象卫星研制了光学成像、大气探测、微波成像、高光谱痕量气体探测、全波段地球能量收支测量等5大类33种型号的被动遥感仪器. 中国的气象卫星实现了从二维遥感成像到三维综合大气探测, 从单一光学探测到全谱段宽波谱探测, 从公里级观测提高到百米级观测. 最新发射的FY-3D卫星和FY-4A卫星具备了同欧美同期卫星相当的观测能力, 特别是干涉式红外大气探测仪GIIRS是目前国际上唯一一台在静止轨道开展高光谱大气垂直探测的仪器(Yang等, 2017; Zhang P等, 2019b).

(3) 在星地站网布局和数据接收方面, 在原有有一个资料处理中心(北京)和三个国内地面站(北京、广州和乌鲁木齐)的基础上, 2010年建成瑞典基律纳北极接收站并投入使用, 2018年租用挪威Troll南极接收站并投入使用, 实现了从国内组网接收到全球组网接收的跨越发展, 风云卫星在全球任意地方的观测资料均可在2h内完成接收、回传、处理和服务.

(4) 在资料处理和核心应用方面, 卫星资料的定位定标处理技术也获得了长足的进步(许健民等, 2014),

精确轨道计算和仪器指向求解使定位精度在全球任一区域均优于一个像元, 中国遥感辐射校正场CRCS、全球伪不变定标场PICS、深对流卷云DCC、月亮等不同亮度自然稳定目标的联合使用可以有效订正在轨遥感仪器的非线性效应. 目前风云卫星遥感仪器的辐射定标精度可见近红外可以达到5%、红外达到0.4K、微波达到0.8K, 全面同化进入中国和欧洲的数值天气预报模式当中(Lu等, 2011; Liao等, 2019).

(5) 在资料服务方面, 到目前为止, 风云卫星有7颗在轨运行提供服务, 风云卫星以开放的数据政策和稳定优良的数据品质成为中国对地观测卫星的国际品牌. 在中国, 风云卫星为2500多家用户提供100多种卫星资料和产品. 在国际上, 风云卫星已被世界气象组织纳入全球业务应用气象卫星序列, 同时也是空间与重大灾害国际宪章机制下的值班卫星, 为93个国家和地区提供服务. 风云卫星提供用户直收、CMACast广播转发、门户网站注册下载、人工定制等多种方式的数据服务, 科学用户可以在线访问 (<http://satellite.nsmc.org.cn/portalsite/default.aspx>) 和下载数据.

5 大气物理与大气环境学科未来发展展望

展望未来, 人类社会将经历一场新的技术革命, 计算机、信息、人工智能、材料等学科领域将发生新的飞跃, 为大气物理与大气环境学科的发展提供新的实验技术手段和研究条件. 此外, 中国在灾害天气预测、气候变化应对、大气污染防治等方面将面临更多更高的需求, 必将推动大气物理与大气环境学科的发展.

5.1 大气物理

在大气边界层物理方向, 未来应考虑在基础理论、实验观测和高分辨数值模拟等方面开展工作, 包括: (1) 全球气候变化和环境变化涉及地球各圈层, 而大气边界层处于各圈层的交汇点, 应关注一系列的陆气、海气、大气边界层和自由大气间的水热、能量和物质交换和输送, 包括湍流基本结构、多尺度湍流结构和运动规律、边界层参数化、高分辨陆面过程模型. (2) 大气运动具有多尺度时空四维属性, 应加深理解边界层湍流运动尺度与中尺度、次中尺度的相互作用和相互关系, 边界层湍流运动和耗散尺度的相互作用和相互关系等. (3) 大气边界层特征参数和大气边

界层垂直廓线规律,特别是大气边界层高度的准确描述和确定,应加强实验观测与理论分析。(4)关注复杂下垫面湍流输运规律和边界层物理特征。(5)发挥遥感技术在大气边界层物理研究中的应用。(6)紧密联系大气环境需求,探究大气污染过程的理化三维结构,服务于提高空气质量预报水平。

在云雾物理方向,未来将集中在理论和应用两方面。深入探索云物理中的基本问题,例如暖云降水之谜、不同形状冰晶的形成等,指导人工影响天气作业;发展相应的云物理参数化方案,从而应用到天气和气候模式中。在研究手段方面,云室研究、高精度的直接数值模拟、大涡模拟、云分辨模拟、天地空观测都将大力推动云物理的理论和应用研究。

在大气辐射方向,近年来快速发展的卫星遥感领域亟需更为精确和高效的大气辐射正演算法,因此未来独立开发针对卫星遥感和资料同化应用的快速辐射传输系统是十分必要的。随着气象和气候业务中对天气气候模式精度要求的不断提高,对数值模式中辐射过程的描述和模拟精度也提出更高的要求。另一方面,高光谱太阳辐射观测、气体吸收谱线测量、针对中国气溶胶的单粒子光学特性实验研究等基础观测研究也有待加强。

在大气电学方向,雷电的起始机制仍然是最重要的研究方向之一,高时空分辨率的观测手段将进一步促进对闪电起始机制和物理过程的揭示,特别是最近发现地缘高能辐射事件的发生与闪电的起始相关,这方面的研究将会得到更多的关注。雷暴中的起电放电过程与动力、微物理过程的相关性研究是另一个需要深入开展的方向,多参数雷达和卫星观测有助于获得更详细的云中动力和微物理信息,而高时空分辨率的三维闪电探测系统可以给出闪电通道尺度、放电参量等,因此这些技术手段的结合将有望促进雷暴云起电和放电物理机制的揭示和理解。气溶胶对雷暴电活动的影响机制是需要加强研究的另一个方面内容。气溶胶浓度和尺度影响雷暴的微物理过程以及动力过程,进而影响雷暴的电过程,其影响机制需要更多的观测和模拟研究。雷电预警预报方法和技术是目前业务急需的,实时观测资料和中尺度数值模式的有机结合,将机器学习技术应用到雷电预警预报方法和技术研究,以实现雷电活动的预警预报。闪电是平流层 NO_x 的主要产生源,而雷暴中的强上升气流可以将水汽和

冰晶传输到对流层顶部甚至平流层下部,这都可能对气候产生强烈反馈,但对这些影响及其与闪电和雷暴特征的关系缺乏定量评估。

5.2 大气环境与大气化学

在大气化学方向,未来在自由基检测技术革新和发展的同时,需要对其相关大气物种进行闭合观测研究,以厘清自由基的消亡机制以及它们在大气循环中的作用。需要发展并完善针对新粒子形成过程关键前体物、中间体团簇以及粒径小于30nm的颗粒物化学成分及其吸湿、挥发性等物化参数的测量。同时急需开展不同区域的观测,评估不同区域特征环境条件下的关键成核机制,获得具有普适性的参数化方案,进一步推动模型发展,评估成核过程对于区域污染和全球气候的影响。气溶胶的pH、含水量的准确测定仍然面对较大困难,如何更好的将外场观测、实验室模拟以及模型相结合还具有挑战。需要建立大气物理—颗粒物化学组成—物化性质—大气能见度—大气辐射强迫综合监测网,对气溶胶颗粒物进行长期稳定的物理、化学和光学特性的研究,开展紧密结合地面立体观测、实验室模拟研究和模式模拟的综合研究。

在大气环境方向,未来大气环境模式需要不断发展完善,具备描述多物种、多来源、多过程、多介质、多尺度的综合能力,污染源反演、资料同化、集合预报、模式订正等新技术有待进一步发展,以提高模式的模拟和预报性能,在空气质量预报业务、重大活动环境保障、天气气候影响研究等方面发挥更大的作用。另一方面,大气环境模式与气象或气候模式的关系越来越密切,将与地球系统模式不断融合,以海洋、大气、陆面和冰圈等为研究主体,考虑对地球气候系统有影响的大气化学、生物地球化学和人为过程,在全球空气质量预报、气候与环境的演变机理、自然和人类与气候变化的相互作用以及气候变化的研究和预测等诸多方面得到广泛应用。

在大气污染物气候效应方面,未来研究需特别加强关于气溶胶粒径和混合状态的观测和模拟以及大气环境-气候相互作用中气溶胶间接气候效应的定量表达。此外,生态系统作为地球系统生物、物理和化学过程的重要组成部分,对大气环境和气候变化的影响和响应均极为重要。未来大气环境-气候的研究还需与社会经济模型相结合,用于评估国家政策对大气环境、

气候和生态系统的影响, 为国家大气污染治理和应对气候变化政策的制定提供科学支撑。

在大气污染物生态效应方面, 未来多尺度多因子的系统研究并建立耦合模型将成为今后研究的重点和热点。生态效应研究应以生态系统为研究对象, 连接大气-植被-土壤交互界面, 探讨地域异质性的污染成因以及跨区域的复合污染传输对不同生态系统的影响, 强调生态系统外在过程(大气污染引起的结构和功能的改变)和内在机理(生态系统变化的驱动力和规律)两方面。此外, 应采用多同位素示踪技术来分析空气污染物从大气进入生态系统(植物-土壤)中的迁移和转化的主要过程, 对评估空气污染的生态影响和优化生态系统过程模型提供了一种科学可行的研究方法。再次, 加强长期观测与联网实验。增设各个类型生态系统的空气监测站点并且联网, 揭示空气污染对不同区域生态系统过程、结构和功能的影响, 有助于开展生态系统地表过程的多途径与多过程模拟分析, 降低全球陆地耦合模型预测生态效应的不确定性。

在大气污染物健康效应方面, 未来应重点开展下面四方面的研究, 包括: (1) 针对空气污染的健康危害机理, 着眼于空气污染影响人体健康的全过程, 提出相应的关键致病通路, 筛选早期效应的生物标志; (2) 针对空气污染的理化特征, 着力开展颗粒物不同组分和粒径的流行病学研究, 识别具有关键健康危害作用的颗粒物特征; (3) 针对空气污染的长期健康损害及其特征, 尽早开展具有全国代表性、覆盖一般人群的前瞻性队列研究; (4) 强化科学研究的政策转化, 为中国进一步制修订环境空气质量标准提供本土科学依据。

大气污染管控方面, 未来研究需以支撑大气PM_{2.5}与O₃污染协同治理、协同改善环境空气质量与应对气候变化为目标。未来应关注构建全物种超高精度近实时源清单技术体系, 实现全物种源清单的超高时空精度与近实时动态表征及高精度独立校验评估, 为多目标环境管理提供系统化、精细化、动态化的污染源清单。通过突破大气复合污染多目标协同治理科学决策技术和大气污染治理与全球变化应对协同响应技术, 最终建立全链条多目标多污染物协同防控决策支持技术体系。

5.3 大气探测与大气遥感

在大气探测和遥感方向, 未来需要系统加强的重

点领域包括: (1) 发展与数值模式和理论研究紧密耦合的交互式观测系统。现在大气探测技术几乎是独立于数值模式发展的。未来需要加强探测技术与数值模式的结合, 实现观测与模式的双向作用, 即一方面观测为模式提供初值或边界条件, 另一方面模式也为观测和技术发展提供指导, 例如模式指导观测系统对敏感或目标区进行适当的加密或补充观测。需要研制数值大气探测与大气遥感设备模拟器, 这对探测技术与预报模式的耦合不可缺少, 同时也在大型仪器设备的研制和改进中有重要的应用, 有利于提高中国大气探测原理性创新和自主仪器研发能力。(2) 发展多种平台协同观测技术及相应观测数据融合处理方法。目前中国已经存在地基、空基和天基多种气象观测平台, 并且已经发展了各种直接探测和遥感探测仪器, 但互相之间的互补性和协同观测研究尚处于初级阶段。未来需要研究不同探测技术的综合、互补、协同和数据融合处理。这种协同观测和融合处理一方面体现在空间尺度上, 如多种平台协同有可能实现中小尺度天气系统的有效捕捉和监测。另一方面还体现在不同测量方法互为附加信息或约束条件, 使观测结果不是简单的多平台观测数据的堆积累加, 而是交融互补。应重视创造性地研究这些数据的处理方法, 加强探测数据的加工处理。需要指出的是, 这种协同融合应与服务对象的需求紧密配合, 形成相互反馈的综合探测系统。(3) 提高面向物理过程研究的科学观测能力和高精度测量的技术水平。尽管目前中国已经具备了一定的面向各种物理过程研究的科学观测能力, 但这些科学观测仪器主要依靠从国外购买, 试验方法以模仿重复为主, 影响了原创性成果的获得。大气动力、辐射和化学过程有复杂的相互作用, 描述状态参数和控制因子参数很多。应鼓励和支持面向科学研究的观测方法和仪器的研发, 发展全要素的高精度综合探测技术, 以满足大气各种过程研究的需要。(4) 重视公众参与和非专业探测手段的发展以及与专业探测网互补。应注意到气象行业以外的公民个人、社会机构或企业等开展的气象观测活动, 研究这些数据的可用性以及融入专业探测网的方法, 加快构建互联互通的数据平台和充分共享的应用机制。积极探索大数据、人工智能等新技术处理这类数据的方法, 形成公众参与和非专业探测手段与专业探测网深度融合的新型气象信息获取体系。(5) 加快开展大规模的大气探测科学试验与平台

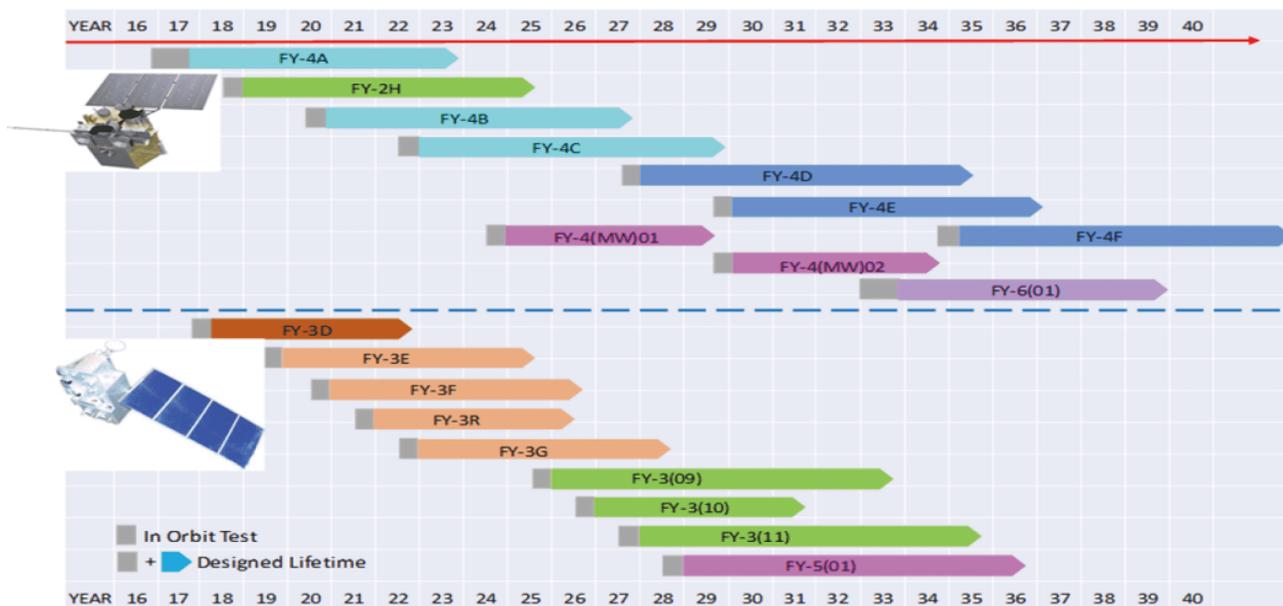


图 2 2035年中国风云气象卫星发展远景规划

建设. 大气科学是基于大量的试验观测事实不断发展的. 过去的研究表明, 大型观测系统的建设和综合野外观测试验已成为国际大气科学发展的重要途径. 中国已开展了一些有影响的科学试验, 并建立了零散的科学观测平台, 但目前在长期观测数据获取和积累、观测规范化和开放共享程度, 以及科学设备自主研发方面还有很大差距. 尤其中国尚没有可以支撑空中大型科学观测的气象科学试验飞机, 未来亟需建设.

在气象雷达研发方面, 需要重点考虑: (1) 现有业务气象雷达的升级采用什么体制. (2) 如何在卫星、飞机上装载高分辨率的合成孔径气象雷达. (3) 研发太赫兹亚毫米波云雷达用于高空稀薄云层的探测. (4) 采用在相控阵雷达及多基地雷达基础上发展起来的MIMO气象雷达, 以克服相控阵雷达固有的某些弱点. (5) 采用高空间分辨率调频连续波气象雷达, 对云雨内部微结构进行分析. (6) 研制具有标准化、模块化和数字化技术特点的开放式新型软件化气象雷达, 使雷达结构更简化, 性能更稳定可靠, 且便于升级改造. (7) 研究对I、Q信号中的干扰信号及相干信息进行过滤处理的技术, 进一步提高雷达基数据的质量与精度. 在雷达气象研发方面, 需要重点考虑: (1) 进一步研究非球形大粒子与带电粒子的微波特性(含散射、吸收、衰减)并进行实验验证; 对粒子群的相干散射和退相干技

术, 以及粒子间多次散射进行研究; 建立适用于新型气象雷达的雷达气象方程. (2) 进一步改进衰减订正方法. (3) 解决双线偏振物理量质量控制中的难点. (4) 雷达应用产品改进与新产品研制, 研究雷达回波强度与雨滴谱联合估测降水强度, 对强天气风暴回波随时间变化时移动路径的精细化预测, 风场反演产品的业务化应用, 研究提高龙卷识别准确率与预警时效的方法, 构建双线偏振物理量产品用于台风短时移动路径快速诊断, 多普勒气象雷达径向速度图的自动分析技术, 对各种奇异回波识别与解读.

在气象卫星研发方面, 根据《中国气象卫星及其应用发展规划(2011—2020年)》和《国家民用空间基础设施中长期发展规划(2015—2025年)》, 至2025年中国还将陆续发射9颗风云气象卫星(Yang等, 2012; Zhang P等, 2019a), 以确保风云卫星在全球尺度高频次高精度的定量气象遥感能力(图2). 与此同时, 第三代极轨和静止气象卫星已经开始了启动论证工作, 预计2030年前后形成观测能力. 同硬件能力的巨大提升相比, 风云卫星在资料定量应用能力方面同世界先进水平还有很大的差距, 特别在卫星遥感用大气辐射传输计算模型、卫星资料同化应用、历史资料再处理和卫星气候数据集建设等方面是需要关注的重点工作.

致谢 感谢陈仁杰、陈璞珑、郑逸璇、刘西川、胡帅、徐晓齐、朱磊、贾星灿、牛越、李倩惠、杨帆、曹云擎、高丽波等对本文撰写所做出的贡献。

参考文献

白文广, 张鹏, 张文建, 李俊. 2016. 一种高效计算高光谱分辨率红外大气辐射传输的方法. 红外与毫米波学报, 35: 99–108

白文广, 张鹏, 张文建, 马刚, 漆成莉. 2017. 遥感用途的高光谱中短波红外辐射传输精确计算. 中国科学: 地球科学, 47: 1483–1492

鲍艳, 吕世华. 2006. 干旱、半干旱区陆-气相互作用的研究进展. 中国沙漠, 26: 454–460

毕研盟, 毛节泰, 李成才, 符养. 2006. 利用GPS的倾斜路径观测暴雨过程中水汽空间分布. 大气科学, 30: 1169–1176

蔡启铭, 杨平. 1990. 六棱柱和三棱锥冰晶的散射相矩阵——一种矢量射线追踪方法. 气象学报, 48: 198–209

蔡旭晖, 陈家宜. 2000. 水平非均匀对流边界层热量平衡和平流输送作用的大涡模拟. 大气科学, 24: 95–102

蔡旭晖. 2008. 湍流微气象观测的印痕分析方法及其应用拓展. 大气科学, 32: 123–132

曹冬杰, 陆风, 张晓虎, 张志清. 2018. 风云四号卫星闪电探测产品在强对流天气监测中的应用. 卫星应用: 18–23

柴合合, 陈义珍, 文毅, 段宁, 谢绍东, 薛志钢, 曹东, 刘静, 宋国君, 王淑兰. 2006. 区域大气污染物总量控制技术与示范研究. 环境科学研究, 7: 163–171

巢清尘, 丁一汇. 1999. 南海季风试验. 科学, 2: 24–26

陈洪滨, 李军, 马舒庆, 胡树贞. 2019. 海洋气象观测技术研发进展. 科技导报, 37: 91–97

陈家宜. 1981. 环境湍流对烟云抬升的作用. 气象学报, 39: 59–69

陈秀红, 魏合理, 徐青山. 2011. 红外大气透过率的计算模式. 红外与激光工程, 40: 811–816

程纯枢, 严开伟. 1959. 十年来我国气象观测技术与仪器研究的进展. 气象学报, 30: 212–217

崔喜爱, 曹云昌, 赵培涛. 2015. 飞机气象观测研究述评. 气象水文海洋仪器, 32: 96–99

代中华, 高太长, 赵世军, 马宁, 苏伟. 2016. 二维傅里叶变换在露点仪镜面图像偏移修正中的应用. 气象科学, 36: 531–536

丁国安, 纪湘明, 房秀梅, 符基萌, 吴凡, 苏维瀚, 宋文质, 李巍, 俞香仁, 江祖凡, 许道国. 1991. 庐山云雾水化学组分的某些特征. 气象学报, 49: 190–197

董超华, 杨军, 卢乃锰, 杨忠东, 施进明, 张鹏, 刘玉洁, 蔡斌. 2010. 风云三号A星(FY-3A)的主要性能与应用. 地球信息科学学报, 12: 458–465

董瑶海. 2016. 风云四号气象卫星及其应用展望. 上海航天, 33: 1–8

段民征, 吕达仁. 2007. 矢量辐射传输方程求解中的 δ -M方法. 自然科学进展, 17: 488–493

段娜, 李清河, 多普增, 汪季. 植物响应大气氮沉降研究进展. 世界林业研究, 32: 6–11

范绍佳, 王安宇, 樊琦, 刘吉, 王宝民. 2006. 珠江三角洲大气边界层特征及其概念模型. 26: 4–6

范秀英, 张微, 韩圣慧. 1999. 我国汽车尾气污染状况及其控制对策分析. 环境科学, 20: 102–108

冯兆忠, 李品, 袁相洋, 高峰, 姜立军, 代碌碌. 2018. 我国地表臭氧生态环境效应研究进展. 生态学报, 38: 1530–1541

高会旺, 黄美元, 徐华英, 周玲. 1997. 欧拉型区域硫沉降模式研究. 大气科学, 21: 616–624

高太长, 刘磊, 李浩. 2007. 近红外波段气溶胶粒子形状和性质对散射特性的影响. 解放军理工大学学报(自然科学版), 8: 302–306

高太长, 刘磊, 赵世军, 孙学金, 刘剑. 2010. 全天空测云技术现状及进展. 应用气象学报, 21: 101–109

高仲辉, 黄兴玉, 魏鸣, 范辉, 吴举秀, 李勇. 2014. 机载W波段双线偏振测云雷达回波分析. 雷达科学与技术, 12: 561–568

郝婧婧, 段民征, 孙淑珍. 2014. 一个简单的非水平均匀的大气临边矢量辐射传输模式. 遥感技术与应用, 29: 735–743

葛茂发. 2006. 气候与环境变化中的大气化学研究, 21世纪初大气科学前沿与展望——第四次全国大气科学前沿学科领域研讨会论文集. 北京: 气象出版社

顾震潮. 1962. 论近年来云雾滴谱形成理论的研究. 气象学报, 32: 267–284

顾震潮. 1965. 雷电活动的单站定位问题. 科学通报, 10: 973–978

郭启云, 杨加春, 杨荣康, 钱媛, 曹晓钟. 2018. 球载式下投国产北斗探空仪测风性能评估. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 10: 629–640

郝吉明, 贺克斌. 1996. 中国燃煤二氧化硫污染控制战略. 中国环境科学 16: 208–212

郝吉明, 吴焯, 傅立新, 何东全, 贺克斌. 2002. 中国城市机动车排放污染控制规划体系研究. 应用气象学报, 13: 195–202

郝吉明, 周学龙, 傅立新, 李琪琳. 1996. 我国东部地区硫沉降模拟研究——模式开发和性能分析. 中国环境科学: 241–245

何东全. 2000. 城市机动车污染评价体系及排放控制目标研究. 博士学位论文. 北京: 清华大学

贺克斌, 郝吉明, 傅立新, 李铭哲, 刘阳. 1996. 我国汽车排气污染现状与发展. 环境科学, 17: 80–83

洪延超. 1996. 积层混合云数值模拟研究(I)——模式及其微物理过程参数化. 气象学报: 544–557

胡非, 洪钟祥, 陈家宜, 刘熙明. 2006. 白洋淀地区非均匀大气边界层的综合观测研究——实验介绍及近地层微气象特征分析. 大气科学, 30: 883–893

胡非, 洪钟祥, 雷孝恩. 2003. 大气边界层和大气环境研究进展. 大气科学, 27: 712–728

胡隐樵, 高由禧. 1994. 黑河实验(HEIFE)——对干旱地区陆面过程的一些新认识. 气象学报, 52: 285–296

- 胡隐樵, 张强. 1996. 大气边界层相似性理论及其应用. 地球科学进展, 11: 550-554
- 胡隐樵, 左洪超. 2004. 边界层湍流输送的若干问题和大气线性热力学. 高原气象, 23: 132-138
- 胡志晋. 1979. 积云形成暖雨的条件. 气象学报, 37: 72-79
- 华灯鑫, 宋小全. 2008. 先进激光雷达探测技术研究进展. 红外与激光工程, 37: 21-27
- 黄彬, 赵伟. 2017. 国家级海洋气象业务现状及发展趋势. 气象科技进展, 7: 53-59
- 黄朝军, 刘亚锋, 吴振森. 2007. 烟尘簇团粒子光学截面和散射矩阵的数值计算. 物理学报: 4068-4074
- 黄红莲, 黄印博, 饶瑞中. 2007. 内混合强吸收气溶胶粒子光散射的等效性. 强激光与粒子束: 1066-1070
- 黄美元, 洪钟祥, 熊尚清. 1965. 地面连续云滴谱仪. 气象学报, 32: 257-262
- 黄荣辉, 周德刚, 陈文, 周连童, 韦志刚, 张强, 高晓清, 卫国安, 侯旭宏. 2013. 关于中国西北干旱区陆-气相互作用及其对气候影响研究的最近进展. 大气科学, 37: 189-210
- 黄兴忠, 金亚秋. 1997. 随机分布的多个非球形群聚散射体的极化散射及其数值模拟. 电子科学学报: 376-381
- 霍娟, 吕达仁. 2002. 全天空数码相机观测云量的初步研究. 南京气象学院学报, 25: 242-246
- 嵇骅民, 王宝瑞. 1989. 扁旋转椭球状冰水混合粒子对偏振雷达波的散射. 南京气象学院学报: 56-66
- 蒋维楣, 苗世光, 张宁, 刘红年, 胡非, 李磊, 王咏薇, 王成刚. 2010. 城市气象与边界层数值模拟研究. 地球科学进展, 25: 463-473
- 蒋维楣, 王咏薇, 张宁. 2009. 城市陆面过程与边界层结构研究. 地球科学进展, 24: 411-419
- 金亚秋, 曾亮. 1992. 一层非均匀随机取向非球形粒子的全极化散射. 电子学报: 55-61
- 孔凡铀, 黄美元, 徐华英. 1990. 对流云中冰相过程的三维数值模拟——I: 模式建立及冷云参数化. 大气科学: 441-453
- 孔琴心, 王庚辰. 1990. 大气臭氧 $9.6\mu\text{m}$ 带和 $4.8\mu\text{m}$ 带的总吸收研究. 见: 大气科学文集
- 雷恒池, 洪延超, 赵震, 肖辉, 郭学良. 2008. 近年来云降水物理和人工影响天气研究进展. 大气科学: 967-974
- 雷孝恩, 贾新媛, 袁素珍, 骆启仁, 陈思龙, 徐渝. 1985. 重庆酸雨分布的一个数值模拟. 大气科学: 276-284
- 黎洁, 毛节泰. 1989. 光学遥感大气气溶胶特性. 气象学报, 47: 450-456
- 李柏, 李伟. 2011. 阳江第八届国际探空系统比对试验综述. 气象科技进展, 3: 6-13
- 李德军, 莫江明, 方运霆, 彭少麟, Gundersen P. 2003. 氮沉降对森林植物的影响. 生态学报: 1891-1900
- 李富余, 张宏升, 陈家宜. 2004. 大气边界层湍流能量交换特征研究进展. 气象科技, 32: 305-310
- 李姣, 段民征, 覃军. 2014. 基于逐次散射法的海洋——大气矢量辐射传输模式. 遥感技术与应用, 29: 181-211
- 李其琛. 1962. 云和雨的相干散射与雷达气象方程. 气象学报: 119-128
- 李诗民, 王先桥, 周明煜, 薛峰, 李丙瑞, 王署东. 2010. 极区通量观测系统及其在国际极地年(IPY)全球协同观测中的应用. 海洋预报, 27: 62-71
- 李新, 李小文, 李增元, 王建, 马明国, 刘强, 肖青, 胡泽勇, 车涛, 王介民, 柳钦火, 陈尔学, 阎广建, 刘绍民, 王维真, 张立新, 王锦地, 牛铮, 晋锐, 冉有华, 王亮绪. 2012. 黑河综合遥感联合试验研究进展: 概述. 遥感技术与应用, 27: 637-649
- 李雁, 李峰, 赵志强, 郭海平, 孙林花, 李仲龙, 周青, 周薇. 2013. 中国区域自动气象站运行监控系统建设. 气象科技, 41: 231-277
- 李煜斌, 高志球, 袁仁民, 苗世光, 张兵, 胡艳冰. 2009. 湍流通量参数化方案的非迭代方法研究. 大气科学, 33: 760-770
- 李宗恺, 朱玄玄. 1987. 机械湍流限定的热浮力烟流抬升模式. 中国科学B辑, 7: 780-788
- 林朝晖, 刘辉志, 谢正辉, 王爱慧, 刘少锋. 2008. 陆面水文过程研究进展. 大气科学, 32: 935-949
- 刘炳江, 郝吉明, 贺克斌, 柴发合, 薛志刚, 樊元生, 刘孜, 赵维钧. 1998. 中国酸雨和二氧化硫污染控制区区划及实施政策研究. 中国环境科学, 18: 1-7
- 刘春霞, 廖菲, 赵中阔. 2012. 热带海气边界层观测研究若干进展. 气象科技进展, 2: 27-31
- 刘罡, 孙鉴泞, 蒋维楣, 刘红年, 袁仁民, 罗涛. 2009. 城市大气边界层的综合观测研究——实验介绍与近地层微气象特征分析. 中国科学技术大学学报, 39: 23-32
- 刘广员, 邱金桓. 2004. 一个三维Monte-Carlo地气耦合辐射传输模式. 大气科学, 28: 69-77
- 刘辉志, 董文杰, 符淙斌, 石立庆. 2004. 半干旱地区吉林通榆“干旱化和有序人类活动”长期观测实验. 气候与环境研究, 9: 378-389
- 刘俊, 黄兴友, 何雨岑, 王振会, 王金虎. 2015. X波段相控阵气象雷达回波数据的对比分析. 高原气象, 34: 1167-1176
- 刘黎平, 葛润生. 2006. 中国气象科学研究院雷达气象研究50年. 应用气象学报, 17: 682-689
- 刘黎平, 莫月琴, 沙雪松, 苏涛. 2005. C波段双多基地多普勒雷达资料处理和三维变分风场反演方法研究. 大气科学, 29: 144-154
- 刘黎平, 吴林林, 吴翀, 汪旭东, 陈晓辉, 曹俊武, 庄薇. 2014. X波段相控阵天气雷达对流过程观测外场试验及初步结果分析. 大气科学, 38: 1079-1094
- 刘西川, 高太长, 胡云涛, 舒小健, 翟东力. 2017. 基于单帧双脉冲成像的降水微物理特征测量仪. 光学精密工程, 25: 842-849
- 刘欣生. 1999. 雷电物理及人工引发雷电研究十年进展与展望. 高原气象, 18: 266-272
- 刘亚文, 陈亦望, 徐鑫, 刘宗信. 2013. 基于辅助差分方程的完全匹配层在时域多分辨率分析算法中的应用与性能分析. 物理学报, 62:

- 122-127
- 刘智深. 2015. 多普勒测风激光雷达从车载到星载. 大气与环境光学学报, 10: 126-138
- 卢建平, 黄建平, 郭学良, 于子平, 雷连发, 张北斗. 2014. 探测大气温湿廓线的35通道微波辐射计设计原理与特点. 气象科技, 42: 193-197
- 陆克定, 张远航. 2010. HO_x自由基的实地测量及其化学机制解析. 化学进展, 22: 500-514
- 罗淦, 王自发. 2006. 全球环境大气输送模式(GEATM)的建立及其验证. 大气科学, 30: 504-518
- 吕超群, 田汉勤, 黄耀. 2007. 陆地生态系统氮沉降增加的生态效应. 植物生态学报, 31: 205-218
- 吕达仁, 王普才, 邱金桓, 陶诗言. 2003. 大气遥感与卫星气象学研究的进展与回顾. 大气科学, 27: 552-566
- 吕达仁. 1999. 我国大气物理研究进展. 物理, 28: 654-661
- 马舒庆, 吴可军, 陈冬冬, 汤志亚, 李肖霞, 杜波, 曹治国. 2011. 天气现象自动化观测系统设计. 气象, 37: 1166-1172
- 马耀明, 姚檀栋, 王介民. 2006. 青藏高原能量和水循环试验研究——GAME/Tibet与CAMP/Tibet研究进展. 高原气象, 25: 344-351
- 毛节泰, 顾震潮. 1963. 层状云含水量分布中超绝热含水量的形成. 见: 顾震潮, 等著. 云雾降水微物理的一些理论问题. 北京: 科学出版社. 59
- 毛节泰, 栾胜基. 1985. 大气散射相函数的计算. 大气科学, 9: 107-111
- 毛节泰, 郑国光. 2006. 对人工影响天气若干问题的探讨. 应用气象学报, 17: 643-646
- 毛节泰. 1992. 广东、广西地区酸沉降统计模式的研究. 环境科学学报, 12: 28-36
- 聂劲松, 秦敏, 杨勇, 张为俊. 2002. 用烟雾箱研究甲苯与OH自由基光化学反应. 原子与分子物理学报, 19: 304-306
- 牛生杰, 马铁汉, 管月娥, 卢玉莲. 1992. 宁夏夏季降水性层状云微结构观测分析. 高原气象, 11: 241-248
- 郗秀书, 刘欣生, 张广庶, 余晔, 郭昌明, 王道洪, 牛尾知雄, 渡边贞司. 1998. 甘肃中川地区雷暴的地闪特征. 气象学报, 57: 67
- 郗秀书, 吕达仁, 陈洪滨, 王普才, 段树, 章文星, 王鑫. 2008. 大气探测高技术及应用研究进展. 大气科学, 32: 867-881
- 郗秀书, 杨静, 蒋如斌, 王彩霞, 冯桂力, 吴书君, 张广庶. 2012. 山东人工引发雷电综合观测实验及回击电流特征. 大气科学, 36: 77-88
- 秦瑜, 修艾军. 1992. 一个欧拉型污染物沉降的中尺度模式. 北京大学学报(自然科学版), 28: 602-612
- 邱金桓, 吕达仁, 陈洪滨, 王庚辰, 石广玉. 2003. 现代大气物理学研究进展. 大气科学, 27: 628-652
- 邱金桓. 1986. 辐射传输方程的一个改进算法. 大气科学, 10: 250-257
- 邱实, 周璧华, 郭建明, 李炎新. 2011. 闪电电场测量研究. 电波科学学报, 26: 79-83
- 饶瑞中. 1996. 外混合气溶胶粒子光散射的等效性. 光学学报, 16: 77-86
- 任凯锋, 李建军, 王文丽, 张会强. 2005. 光化学烟雾模拟实验系统. 环境科学学报, 25: 1431-1435
- 任信荣, Matthiasotting, 邵可声, 唐孝炎. 1999. 气体扩张激光诱导荧光技术测量氢氧自由基. 现代科学仪器, 9: 11-13
- 尚震, 谢晨波, 钟志庆, 王邦新, 王珍珠, 赵明, 谭敏, 刘东, 王英俊. 2016. 用于测量对流层水汽的拉曼激光雷达. 红外与激光工程, 45: 184-189
- 邵选民, 刘欣生. 1987. 云中闪电及云下部正电荷的初步分析. 高原气象, 6: 317-325
- 石广玉, 曲燕妮. 1985. 一种新的处理漫射辐射的近似方法. 科学通报, 30: 1887-1887
- 沈瑾, 甘泉, 邓小丽, 宋小明. 2011. 天气雷达的现状与发展趋势. 电子设计工程, 19: 82-85
- 盛裴轩, 毛节泰. 1987. 我国大气污染物远距离传输的估计——I: 轨迹分析. 气象学报, 45: 65-71
- 石冬晨, 华灯鑫, 雷宁, 高飞, 汪丽, 闫庆, 周毅. 2018. 日盲紫外域拉曼激光雷达探测大气水汽技术研究. 光谱学与光谱分析, 38: 1430-1436
- 石广玉. 2007. 大气辐射学. 北京: 科学出版社
- 石广玉. 1998. 大气辐射计算的吸收系数分布模式. 大气科学, 22: 277-294
- 史东东, 郑栋, 张阳, 张义军, 黄治钢, 吕伟涛, 陈绍东, 颜旭. 2018. 低频电场变化探测阵列建设及其初步运行结果. 中国科学: 地球科学, 48: 113-126
- 孙东松, 钟志庆, 王邦新, 夏祥鳌. 2006. 基于FP标准具的直接探测多普勒测风激光雷达. 量子电子学报, 23: 303-306
- 孙贤明, 王海华, 刘万强, 申晋. 2010. 沙尘暴粒子的非球形模型及其对激光的多次散射特性研究. 光学学报, 30: 1506-1510
- 唐孝炎, 毕木天, 李金龙, 张学进, 汤大钢, 张雨田. 1982. 光化学烟雾箱的试制和性能实验. 环境化学, 1: 344-351
- 汪宏七, 赵高祥. 1989. 在强烈各向异性散射大气中用离散坐标法进行辐射强度计算. 中国科学B辑: 化学 生命科学 地学, 19: 1330-1339
- 王宝瑞, 嵇驿民. 1989. 分层均匀旋转椭球体对偏振电磁波的散射理论及数值计算. 大气科学, 13: 329-342
- 王宝瑞, 张培昌, 嵇驿民. 1991. 微波衰减的准解析计算方法. 南京气象学院学报, 14: 34-42
- 王宝瑞, 张培昌, 蒋修武, 嵇驿民. 1997. 分层旋转椭球散射场准解析解级数系数的确定. 南京气象学院学报, 20: 1-10
- 王道洪, 郗秀书, 郭昌明. 2000. 雷电与人工引雷. 上海: 上海交大出版社
- 王介民. 1999. 陆面过程实验和地气相互作用研究——从HEIFE到

- IMGRASS和GAME-Tibet/TIPEX. 高原气象, 18: 280-294
- 王敏仲, 徐洪雄, 王寅钧, 买买提艾力·买买提依明, 张建涛. 2018. 塔克拉玛干沙漠夏季晴空对流边界层大涡模拟. 中国沙漠, 38: 1275-1286
- 王明星. 1999. 大气化学. 北京: 气象出版社
- 王体健, 李宗恺, 南方. 1996. 区域酸性沉降的数值研究——I. 模式. 大气科学, 20: 606-614
- 王哲, 王自发, 李杰, 郑海涛, 晏平仲, 李健军. 2014. 气象-化学双向耦合模式(WRF-NAQPMs)研制及其在京津冀秋季重霾模拟中的应用. 气候与环境研究, 19: 153-163
- 王振会, 张培昌. 1998. 冰水混合球的微波吸收与散射. 南京气象学院学报, 21: 469-477
- 王志立, 郭品文, 张华. 2009. 黑碳气溶胶直接辐射强迫及其对中国夏季降水影响的模拟研究. 气候与环境研究, 14: 161-171
- 卫晓东, 张华. 2011. 非球形沙尘气溶胶光学特性的分析研究. 光学学报, 31: 0501002-1-8
- 魏合理, 陈秀红, 饶瑞中. 2007. 通用大气辐射传输软件CART介绍. 大气与环境光学学报, 2: 446-450
- 魏合理, 宋正方. 1995. 红外辐射大气透射率的计算. 红外与毫米波学报, 14: 159-160
- 魏鸣, 张思进, 刘佳, 邵程远, 刘晓东. 2011. 机载气象雷达扫描的理想模型仿真算法. 大气科学学报, 34: 28-35
- 吴北婴, 李卫, 陈洪滨, 李放, 章文星, 吕达仁. 1998. 大气辐射传输实用算法. 北京: 气象出版社
- 吴北婴, 吕达仁. 1989. 用Monte-Carlo方法模拟火山爆发后的曙暮光特征. 大气科学: 204-213
- 吴兑, 毛节泰, 邓雪娇, 铁学熙, 张远航, 曾立民, 李菲, 谭浩波, 毕雪岩, 黄晓莹, 陈静, 邓涛. 2009. 珠江三角洲黑碳气溶胶及其辐射特性的观测研究. 中国科学D辑: 地球科学, 39: 1542-1553
- 吴海, 牟玉静, 张晓山, 宋文质, 周丽. 2001. 相对速率法测OH自由基与几种低碳醇的反应速率常数. 环境科学学报, 21: 525-529
- 肖迪娥, 张望. 2009. 气象气球的现状和发展趋势(二). 中国橡胶, 25: 9-11
- 谢晨波, 周军, 岳古明, 戚福弟, 范爱媛. 2007. 测量大气气溶胶和水汽的车载式激光雷达系统. 红外与激光工程, 36: 365-372
- 谢兴生, 陶善昌, 周秀骥. 1999. 数字摄像法测量气象能见度. 科学通报, 44: 97-100
- 徐大海, 朱蓉, 李宗恺. 1997. 论边界层中的大气扩散PDF模式. 气象学报, 55: 670-680
- 徐祥德, 陈联寿. 2006. 青藏高原大气科学试验研究进展. 应用气象学报, 17: 756-772
- 徐祥德, 丁国安, 卞林根, 谢立安. 2004. BECAPEX科学试验城市建筑群落边界层大气环境特征及其影响. 气象学报, 62: 663-671
- 徐祥德, 周明煜, 陈家宜, 卞林根, 张光智, 刘辉志, 李诗明, 张宏升, 赵冀俊, 索朗多吉, 王继志. 2001. 青藏高原地-气过程动力、热力结构综合物理图象. 中国科学D辑: 地球科学, 31: 428-441
- 许焕斌. 1964. 衡山云雾微结构起伏的初步观测试验. 气象学报, 34: 539-547
- 许健民, 郭强, 陆其峰, 陆风, 张晓虎. 2014. 风云气象卫星数据处理算法的若干创新. 气象学报, 72: 1023-1038
- 许健民, 杨军, 张志清, 孙安来. 2010. 我国气象卫星的发展与应用. 气象, 36: 94-100
- 许小峰. 2003. 中国新一代多普勒天气雷达网的建设与技术应用. 中国工程科学: 7-14
- 言穆弘, 郭昌明, 葛正谟. 1996a. 积云动力和电过程二维模式研究 I. 理论和模式. 地球物理学报, 39(S1): 52-64
- 言穆弘, 郭昌明, 葛正谟. 1996b. 积云动力和电过程二维模式研究 II. 计算结果. 地球物理学报, 39(S1): 65-77
- 杨成武, 刘文清, 张玉钧. 2011. 半导体激光云高仪小波去噪算法研究. 大气与环境光学学报
- 杨军. 2012. 气象卫星及其应用. 北京: 气象出版社
- 杨军, 咸迪, 唐世浩. 2018. 风云系列气象卫星最新进展及应用. 卫星应用, 83: 8-14
- 杨平, 蔡启铭, 徐宝祥. 1989. 求解非球形大粒子光散射问题的一种简明数值计算方法. 高原气象, 8: 291-300
- 杨平, 蔡启铭. 1990. 椭球和圆柱形大粒子的光散射相矩阵. 大气科学, 14: 342-353
- 殷达中, 李宗恺. 1993. 一个远距离输送-化学转化模式及其在酸雨研究中的应用. 环境科学学报, 13: 11-21
- 于洪彬, 蒋维楹. 1994. 辐射熏烟浓度预测研究. 环境科学学报, 14: 191-197
- 袁萍, 刘欣生, 张义军, 鄯秀书, 张广庶, 王怀斌. 2004. 高原地区云对地闪电首次回击的光谱研究. 地球物理学报, 47: 42-46
- 袁绍洪, 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. 南京气象学院学报, 16: 432-438
- 袁箴, 蒋本汤, 任丽新, 周诗健, 郑达洲. 1965. 强电场探空仪及雷云电场探测结果的分析. 气象学报, 35: 440-448
- 曾庆存. 1974. 大气红外遥测原理. 北京: 科学出版社
- 张丙辰, 杨国祥, 章震越, 李建辉. 1986. 华东中尺度天气试验概述. 气象, 12: 2-5
- 张峰, 张华, 沈钟平, 卫晓东. 2011. 一种处理漫射因子的新方法. 物理学报, 60: 010702
- 张广庶, 李亚珺, 王彦辉, 张彤, 武斌, 刘妍秀. 2015. 闪电VHF辐射源三维定位网络测量精度的实验研究. 中国科学: 地球科学, 45: 1537-1552
- 张华. 1999. 非均匀路径相关K-分布方法的研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院大气物理研究所, 中国科学院大气物理研究所
- 张华. 2015. 大气吸收辐射研究. 北京: 气象出版社
- 张华. 2016. BCC_RAD大气辐射传输模式. 北京: 气象出版社
- 张华, 卢鹏. 2014. 多层四流球谐函数算法的构建及在大气辐射传输模式中的应用. 气象学报, 72: 1257-1268
- 张华, 石广玉, 刘毅. 2005. 两种逐线积分辐射模式大气吸收的比较

- 研究. 大气科学, 29: 581–593
- 张华, 石广玉, 刘毅. 2007. 线翼截断方式对大气辐射计算的影响. 气象学报, 65: 968–975
- 张华, 石广玉. 2000. 一种快速高效的逐线积分大气吸收计算方法. 大气科学, 24: 111–121
- 张立功, 王汝忠, 黄小明, 王小伟. 2002. L波段测风雷达-电子探空仪系统简介. 甘肃气象, 20: 30–32
- 张美根, 胡非, 邹捍, 洪钟祥, 赵翼俊, 高志球. 2008. 大气边界层物理与大气环境过程研究进展. 大气科学, 32: 923–934
- 张培昌, 胡方超, 王振会. 2013. 双线偏振雷达探测小椭圆粒子群的雷达气象方程. 热带气象学报, 29: 505–510
- 张培昌, 李晓正, 顾松山. 1989. 天气雷达组网拼图的思维同化方法. 南京气象学院学报, 12: 22–28
- 张培昌, 王振会, 胡方超. 2012. 双/多基地天气雷达探测小椭圆粒子群的雷达气象方程. 气象学报, 70: 867–874
- 张强, 黄荣辉, 王胜, 卫国安, 曹晓彦, 侯旭宏, 吕世华, 胡泽勇, 马耀明, 韦志刚, 聂彦将, 高洪春, 高红梅, 阎宇平. 2005. 西北干旱区陆-气相互作用试验(NWC-ALIEX)及其研究进展. 地球科学进展, 20: 427–441
- 张强, 王胜, 张杰, 王润元, 刘宏宜, 李岩瑛. 2009. 干旱区陆面过程和大气边界层研究进展. 地球科学进展, 24: 1185–1194
- 张沈寿, 魏鸣, 赖巧珍. 2017. 两次火情的新一代天气雷达回波特征分析. 气象科学, 37: 359–367
- 张文建. 2001. “风云”系列气象卫星的发展现状及其展望. 上海航天, 18: 8–14
- 张义军, 吕伟涛, 陈绍东, 郑栋, 张阳, 颜旭, 陈绿文, 董万胜, 但建茹, 潘汉波. 2016. 广东野外雷电综合观测试验十年进展. 气象学报, 74: 655–671
- 张义军, 言穆弘, 孙安平, 郭凤霞. 2009. 雷暴电学. 北京: 气象出版社
- 张义军, 杨少杰, 吕伟涛, 郑栋, 董万胜, 李斌, 陈绍东, 张阳, 陈绿文. 2012. 2006~2011年广州人工触发闪电观测试验和应用. 应用气象学报, 23: 513–522
- 张玉存, 王卫平. 2001. 二十世纪末气象仪器的现状与发展. 气象水文海洋仪器, 3: 1–9
- 张志强, 刘黎平. 2011. S波段相控阵天气雷达与新一代天气雷达探测云回波强度及结构误差的模拟分析. 气象学报, 69: 729–735
- 张志清, 陆风, 方翔, 唐世浩, 张晓虎, 许映龙, 韩威, 聂肃平, 申彦波, 周毓泉. 2017. FY_4卫星应用和发展. 上海航天, 34: 8–19
- 章文星, 吕达仁. 2012. 地基热红外云高观测与云雷达及激光云高仪的相互对比. 大气科学, 36: 657–672
- 赵高祥, B.Rockel, E.Raschke. 1987. 大气中红外辐射传输的参数化模式. 科学通报, 32: 1479–1482
- 赵高祥, 汪宏七. 1994. 云和辐射(II)环流模式中的云和云辐射参数化. 大气科学, 18: 933–958
- 赵平, 李跃清, 郭学良, 徐祥德, 刘屹岷, 唐世浩, 肖文名, 师春香, 马耀明, 余兴, 刘辉志, 假拉, 谌芸, 柳艳菊, 李建, 罗达标, 曹云昌, 郑向东, 陈军明, 肖安, 远芳, 陈东辉, 潘旸, 胡志群, 张胜军, 董立新, 胡菊旸, 韩帅, 周秀骥. 2018. 青藏高原地气耦合系统及其天气气候效应: 第三次青藏高原大气科学试验. 气象学报, 76: 833–860
- 赵世军, 高太长, 刘涛, 孙学金. 2012. 基于北斗一号的高空风探测方法研究. 气象科技, 40: 170–174
- 赵燕曾, 谢威光, 陈锡明. 1964. 云滴光谱仪. 气象学报, 34: 531–538
- 赵柏林, 丁荣良. 1963. 两层云人工增雨的可能性(一)——非封闭系统的冰水转化问题. 气象学报, 33: 382–391
- 郑国光. 2000. 大气探测系统设计和工程建设. 中国工程科学, 2: 21–26
- 周海光, 张沛源. 2002. 笛卡儿坐标系的双多普勒天气雷达三维风场反演技术. 气象学报, 60: 585–593
- 周秀骥, 李维亮. 1997. 中国地区大气臭氧变化及其对气候环境的影响——国家自然科学基金重大项目. Annual Report of CAMS: 9–12
- 周秀骥, 吕达仁, 黄润恒. 1982. 大气微波辐射及遥感原理. 北京: 科学出版社
- 周秀骥, 秦仁忠. 1964. 带电水滴破碎临界电场的理论分析. 气象学报, 34: 103–110
- 周秀骥. 1963. 暖云降水微观物理机制的统计理论. 气象学报, 33: 97–107
- 周秀骥. 1979. 大气遥感研究的进展. 大气科学, 3: 203–209
- 朱彦良, 陈洪滨, 凌超, 王勇, 孙宝来, 刘玉盛, 杨智强. 2016. 边界层微型火箭气象探空系统研制与应用. 气象与环境科学, 39: 102–107
- 朱珍华, 石可昭, 黄美元. 1965. 南岳锋面云系和降水(1962年4~5月)的微结构特征. 见: 顾震潮, 等著. 我国云雾降水微物理特征的研究. 北京: 科学出版社. 98
- Bi J R, Huang J P, Holben B, Zhang G L. 2016. Comparison of key absorption and optical properties between pure and transported anthropogenic dust over East and Central Asia. Atmos Chem Phys, 16: 15501–15516
- Bi L, Lin W S, Liu D, Zhang K J. 2018a. Assessing the depolarization capabilities of nonspherical particles in a super-ellipsoidal shape space. Opt Express, 26: 1726–1742
- Bi L, Lin W S, Wang Z, Tang X Y, Zhang X Y, Yi B Q. 2018b. Optical Modeling of Sea Salt Aerosols: The effects of nonsphericity and inhomogeneity. J Geophys Res-Atmos, 123: 543–558
- Bi L, Xu F, Gouesbet G. 2018c. Depolarization of nearly spherical particles: The Debye series approach. Phys Rev A, 98: 053809
- Bi L, Yang P. 2014. Accurate simulation of the optical properties of atmospheric ice crystals with the invariant imbedding T-matrix method. J Quant Spectrosc Ra, 138: 17–35
- Cai W, Hui J, Wang C, Zheng Y, Zhang X, Zhang Q, Gong P. 2018. The Lancet Countdown on PM_{2.5} pollution-related health impacts of China's projected carbon dioxide mitigation in the electric power

- generation sector under the Paris Agreement: A modelling study. *Lancet Planet Health*, 2: e151–e161
- Chang Y P, Merer A J, Chang H H, Jhang L J, Chao W, Lin J J M. 2017. High resolution quantum cascade laser spectroscopy of the simplest Criegee intermediate, CH₂OO, between 1273 cm⁻¹ and 1290 cm⁻¹. *J Chem Phys*, 146: 244302
- Che H, Zhang X Y, Xia X, Goloub P, Holben B, Zhao H, Wang Y, Zhang X C, Wang H, Blarel L, Damiri B, Zhang R, Deng X, Ma Y, Wang T, Geng F, Qi B, Zhu J, Yu J, Chen Q, Shi G. 2015. Ground-based aerosol climatology of China: Aerosol optical depths from the China Aerosol Remote Sensing Network (CARSNET) 2002–2013. *Atmos Chem Phys*, 15: 7619–7652
- Chen B Y, Mu M, Qin X H. 2013. The impact of assimilating dropwindsonde data deployed at different sites on typhoon track forecasts. *Mon Weather Rev*, 141: 2669–2682
- Chen B, Wang J, Gong D. 2016. Raindrop size distribution in a midlatitude continental squall line measured by Thies optical disdrometers over East China. *J Appl Meteorol Climatol*, 55: 621–634
- Chen H B, Li J, Xuan Y J, Huang X S, Zhu W F, Zhu K P, Shao W Z. 2019. First rocketsonde launched from an unmanned semi-submersible vehicle. *Adv Atmos Sci*, 36: 339–345
- Chen J, Wu X, Yin Y, Huang Q, Xiao H. 2017. Characteristics of cloud systems over the Tibetan Plateau and East China during boreal summer. *J Clim*, 30: 3117–3137
- Chen Q, Koren I, Altaratz O, Heiblum R H, Dagan G, Pinto L. 2017. How do changes in warm-phase microphysics affect deep convective clouds? *Atmos Chem Phys*, 17: 9585–9598
- Chen R J, Yin P, Meng X, Liu C, Wang L J, Xu X H, Ross J A, Tse L A, Zhao Z H, Kan H D, Zhou M G. 2017. Fine particulate air pollution and daily mortality. A nationwide analysis in 272 Chinese cities. *Am J Respir Crit Care Med*, 196: 73–81
- Cheng T H, Wu Y, Chen H. 2014. Effects of morphology on the radiative properties of internally mixed light absorbing carbon aerosols with different aging status. *Opt Express*, 22: 15904–15917
- Deng X, Xue H, Meng Z. 2018. The effect of ice nuclei on a deep convective cloud in South China. *Atmos Res*, 206: 1–12
- Dong C H, Yang J, Zhang W J, Yang Z D, Lu N M, Shi J M, Zhang P, Liu Y J, Cai B. 2009. An overview of a new Chinese weather satellite FY-3A. *Bull Amer Meteorol Soc*, 90: 1531–1544
- Du C, Kong L, Zhanakova A, Tong S, Yang X, Wang L, Fu H, Cheng T, Chen J, Zhang S. 2018. Impact of heterogeneous uptake of nitrogen dioxide on the conversion of acetaldehyde on gamma-alumina in the absence and presence of simulated solar irradiation. *Atmos Environ*, 187: 282–291
- Du L, Xu Y, Ge M, Jia L, Yao L, Wang W. 2007b. Rate constant of the gas phase reaction of dimethyl sulfide (CH₃SCH₃) with ozone. *Chem Phys Lett*, 436: 36–40
- Du L, Xu Y, Ge M, Jia L. 2007a. Rate constant for the reaction of ozone with diethyl sulfide. *Atmos Environ*, 41: 7434–7439
- Duan M Z, Min Q L, Lu D R. 2010. A polarized radiative transfer model based on successive order of scattering. *Adv Atmos Sci*, 27: 891–900
- Fan X P, Zhang Y J, Zheng D, Zhang Y, Lyu W T, Liu H Y, Xu L T. 2018. A new method of three-dimensional location for low-frequency electric field detection array. *J Geophys Res-Atmos*, 123: 8792–8812
- Feng Z Z, Bükér P, Pleijel H, Emberson L, Karlsson P E, Uddling J. 2018. A unifying explanation for variation in ozone sensitivity among woody plants. *Glob Change Biol*, 24: 78–84
- Feng Z Z, Sun J S, Wan W X, Hu E Z, Calatayud V. 2014. Evidence of widespread ozone-induced visible injury on plants in Beijing, China. *Environ Pollut*, 193: 296–301
- Feng Z Z, Tang H Y, Uddling J, Pleijel H, Kobayashi K, Zhu J G, Oue H, Guo W S. 2012. A stomatal ozone flux-response relationship to assess ozone-induced yield loss of winter wheat in subtropical China. *Environ Pollut*, 164: 16–23
- Fu Y, Pan X, Xian T, Liu G, Zhong L, Liu Q, Li R, Wang Y, Ma M. 2018. Precipitation characteristics over the steep slope of the Himalayas in rainy season observed by TRMM PR and VIRS. *Clim Dyn*, 51: 1971–1989
- Gai Y, Ge M, Wang W. 2009. Kinetic studies of O₃ reactions with 3-bromopropene and 3-iodopropene in the temperature range 288–328 K. *Atmos Environ*, 43: 3467–3471
- Gai Y, Wang W, Ge M, Kjaergaard H G, Jørgensen S, Du L. 2013. Methyl chavicol reactions with ozone, OH and NO₃ radicals: Rate constants and gas-phase products. *Atmos Environ*, 77: 696–702
- Gan J, Lu W, Li Q, Zhang Z, Yang J, Ma Y, Yao W. 2017. Cloud type classification of total-sky images using Duplex norm-bounded sparse coding. *IEEE J Sel Top Appl Earth Observ Remote Sens*, 10: 3360–3372
- Ge H X, Zhang H S, Zhang H, Cai X H, Song Y, Kang L. 2018. The characteristics of methane flux from an irrigated rice farm in East China measured using the eddy covariance method. *Agric For Meteorol*, 249: 228–238
- Ge J, Zheng C, Xie H, Xin Y, Huang J, Fu Q. 2018. Midlatitude cirrus clouds at the SACOL site: Macrophysical properties and large-scale atmospheric states. *J Geophys Res-Atmos*, 123: 2256–2271
- Guo J, Deng M, Lee S S, Wang F, Li Z, Zhai P, Liu H, Lv W, Yao W, Li X. 2016. Delaying precipitation and lightning by air pollution over the Pearl River Delta. Part I: Observational analyses. *J Geophys Res-Atmos*, 121: 6472–6488

- Guo S, Hu M, Guo Q, Zhang X, Zheng M, Zheng J, Chang C C, Schauer J J, Zhang R. 2012. Primary sources and secondary formation of organic aerosols in Beijing, China. *Environ Sci Technol*, 46: 9846–9853
- Guo X, Lü D R, Lü Y. 2007. A simple but accurate ultraviolet limb-scan spherically-layered radiative-transfer-model based on single-scattering physics. *Adv Atmos Sci*, 24: 619–630
- Han J, Chu Z G, Wang Z H, Xu D, Li N, Kou L L, Xu F, Zhu Y Q. 2018. The establishment of optimal ground-based radar datasets by comparison and correlation analyses with space-borne radar data. *Met Apps*, 25: 161–170
- Han Y, Gao P, Huang J, Zhang T, Zhuang J, Hu M, Wu Y. 2018. Ground-based synchronous optical instrument for measuring atmospheric visibility and turbulence intensity: Theories, design and experiments. *Opt Express*, 26: 6833–6850
- Hao L, Wang Z, Fang L, Zhang W, Wang W, Li C, Sheng L. 2006. Characterization of products from photooxidation of toluene. *J Environ Sci*, 18: 903–909
- He K, Yang F, Ma Y, Zhang Q, Yao X, Chan C K, Cadle S, Chan T, Mulawa P. 2001. The characteristics of PM_{2.5} in Beijing, China. *Atmos Environ*, 35: 4959–4970
- Hou S Q, Tong S R, Ge M F, An J L. 2016. Comparison of atmospheric nitrous acid during severe haze and clean periods in Beijing, China. *Atmos Environ*, 124: 199–206
- Hu E Z, Gao F, Xin Y, Jia H X, Li K H, Hu J J, Feng Z Z. 2015. Concentration- and flux-based ozone dose-response relationships for five poplar clones grown in North China. *Environ Pollut*, 207: 21–30
- Hu S, Gao T C, Li H, Liu L, Chen M, Yang B. 2018. Light-scattering model for aerosol particles with irregular shapes and inhomogeneous compositions using a parallelized pseudo-spectral time-domain technique. *Chin Phys B*, 27: 054215
- Huang J P, Zhang W, Zuo J Q, Bi J R, Shi J S, Wang X, Chang Z L, Huang Z W, Yang S, Zhang B D, Wang G Y, Feng G H, Yuan J Y, Zhang L, Zuo H C, Wang S G, Fu C B, Chou J F. 2008. An overview of the semi-arid climate and environment research observatory over the Loess Plateau. *Adv Atmos Sci*, 25: 906–921
- Huang K Y, Yang X L, Liang F C, Liu F C, Li J X, Xiao Q Y, Chen J C, Liu X Q, Cao J, Shen C, Yu L, Lu F H, Wu X P, Zhao L C, Wu X G, Li Y, Hu D S, Huang J F, Liu Y, Lu X F, Gu D F. 2019. Long-term exposure to fine particulate matter and hypertension incidence in China. *Hypertension*, 73: 1195–1201
- Huang L, Zhang Q, Qiu S, Shi L, Wang J, Gao C. 2019. Development of a high-speed optical system for lightning flash observation. *Measurement*, 131: 85–91
- Huang R J, Zhang Y, Bozzetti C, Ho K F, Cao J J, Han Y, Daellenbach K R, Slowik J G, Platt S M, Canonaco F, Zotter P, Wolf R, Pieber S M, Bruns E A, Crippa M, Ciarelli G, Piazzalunga A, Schwikowski M, Abbaszade G, Schnelle-Kreis J, Zimmermann R, An Z, Szidat S, Baltensperger U, El Haddad I, Prévôt A S H. 2014. High secondary aerosol contribution to particulate pollution during haze events in China. *Nature*, 514: 218–222
- Huang W, Wang G F, Lu S E, Kipen H, Wang Y D, Hu M, Lin W W, Rich D, Ohman-Strickland P, Diehl S R, Zhu P, Tong J, Gong J C, Zhu T, Zhang J F. 2012. Inflammatory and oxidative stress responses of healthy young adults to changes in air quality during the Beijing Olympics. *Am J Respir Crit Care Med*, 186: 1150–1159
- Huo J, Lu D. 2012. Comparison of cloud cover from all-sky imager and meteorological observer. *J Atmos Ocean Technol*, 29: 1093–1101
- Jiang J, Chen M, Kuang C, Attoui M, McMurry P H. 2011. Electrical mobility spectrometer using a diethylene glycol condensation particle counter for measurement of aerosol size distributions down to 1 nm. *Aerosol Sci Tech*, 45: 510–521
- Jiang L J, Feng Z Z, Dai L L, Shang B, Paoletti E. 2018. Large variability in ambient ozone sensitivity across 19 ethylenediurea-treated Chinese cultivars of soybean is driven by total ascorbate. *J Environ Sci*, 64: 10–22
- Jin C, Liu C, Yin Y, Bi L, Nousiainen T. 2016. Modeling the scattering phase matrix of red clays. *Opt Lett*, 41: 4879–4882
- Jing X Q, Geerts B, Wang Y G, Liu C H. 2019. Ambient factors controlling the wintertime precipitation distribution across mountain ranges in the interior western United States. Part II: Changes in orographic precipitation distribution in a Pseudo-global warming simulation. *J Appl Meteorol Climatol*, 58: 695–715
- Jones L, Provins A, Holland M, Mills G, Hayes F, Emmett B, Hall J, Sheppard L, Smith R, Sutton M, Hicks K, Ashmore M, Haines-Young R, Harper-Simmonds L. 2014. A review and application of the evidence for nitrogen impacts on ecosystem services. *EcoSyst Services*, 7: 76–88
- Kang P, Wang J, Liu G L, Sun Y R, Zhou Z Y, Liu A W, Hu S M. 2018. Line intensities of the 30011e–00001e band of ¹²C¹⁶O₂ by laser-locked cavity ring-down spectroscopy. *J Quant Spectrosc Ra*, 207: 1–7
- Kleffmann J. 2007. Daytime sources of nitrous acid (HONO) in the atmospheric boundary layer. *Chemphyschem*, 8: 1137–1144
- Li H, Zhong J, Vehkamäki H, Kurtén T, Wang W, Ge M, Zhang S, Li Z, Zhang X, Francisco J S, Zeng X C. 2018. Self-Catalytic Reaction of SO₃ and NH₃ To Produce Sulfamic Acid and Its Implication to Atmospheric Particle Formation. *J Am Chem Soc*, 140: 11020–11028
- Li J W, Han Z W. 2016. Aerosol vertical distribution over east China from RIEMS-Chem simulation in comparison with CALIPSO

- measurements. *Atmos Environ*, 143: 177–189
- Li K, Jacob D J, Liao H, Shen L, Zhang Q, Bates K H. 2019. Anthropogenic drivers of 2013–2017 trends in summer surface ozone in China. *Proc Natl Acad Sci USA*, 116: 422–427
- Li K, Li J, Liggio J, Wang W, Ge M, Liu Q, Guo Y, Tong S, Li J, Peng C, Jing B, Wang D, Fu P. 2017. Enhanced light scattering of secondary organic aerosols by multiphase reactions. *Environ Sci Technol*, 51: 1285–1292
- Li L, Duan Z, Li H, Zhu C, Henkelman G, Francisco J S, Zeng X C. 2018. Formation of HONO from the NH₃-promoted hydrolysis of NO₂ dimers in the atmosphere. *Proc Natl Acad Sci USA*, 115: 7236–7241
- Li M, Liu H, Geng G, Hong C, Liu F, Song Y, Tong D, Zheng B, Cui H, Man H, Zhang Q, He K. 2017. Anthropogenic emission inventories in China: A review. *Natl Sci Rev*, 4: 834–866
- Li M, Zhang D, Li C T, Mulvaney K M, Selin N E, Karplus V J. 2018. Air quality co-benefits of carbon pricing in China. *Nat Clim Change*, 8: 398–403
- Li N, Wang Z H, Xu F, Chu Z G, Zhu Y Q, Han J. 2017. The assessment of ground-based weather radar data by comparison with TRMM PR. *IEEE Geosci Remote Sens Lett*, 14: 72–76
- Li P, De Marco A, Feng Z, Anav A, Zhou D, Paoletti E. 2018. Nationwide ground-level ozone measurements in China suggest serious risks to forests. *Environ Pollut*, 237: 803–813
- Li R, Dong X, Guo J, Fu Y, Zhao C, Wang Y, Min Q. 2017. The implications of dust ice nuclei effect on cloud top temperature in a complex mesoscale convective system. *Sci Rep*, 7: 13826
- Li T T, Zhang Y, Wang J N, Xu D D, Yin Z X, Chen H S, Lv Y B, Luo J S, Zeng Y, Liu Y, Kinney P L, Shi X M. 2018. All-cause mortality risk associated with long-term exposure to ambient PM_{2.5} in China: A cohort study. *Lancet Public Health*, 3: e470–e477
- Li X, Hu F, Liu G, Hong Z. 2001. Multi-scale fractal characteristics of atmospheric boundary-layer turbulence. *Adv Atmos Sci*, 18: 787–792
- Li Y J, Zhang G S, Wen J, Wang D H, Wang Y H, Zhang T, Fan X P, Wu B. 2013. Electrical structure of a Qinghai-Tibet Plateau thunderstorm based on three-dimensional lightning mapping. *Atmos Res*, 134: 137–149
- Li Y, Qiu S, Shi L, Wang T, Zhang Q, Lei Q, Sun Z. 2018. Observed variation of three-dimensional return stroke speeds along the channel in rocket-triggered lightning. *Geophys Res Lett*, 45: 12569–12575
- Li Z Q, Xu H, Li K T, Li D H, Xie Y S, Li L, Zhang Y, Gu X F, Zhao W, Tian Q J, Deng R R, Su X L, Huang B, Qiao Y L, Cui W Y, Hu Y, Gong C L, Wang Y Q, Wang X F, Wang J P, Du W B, Pan Z Q, Li Z Z, Bu D. 2018. Comprehensive study of optical, physical, chemical, and radiative properties of total columnar atmospheric aerosols over China an overview of Sun-sky Radiometer Observation Network (SONET) Measurements. *Bull Amer Meteorol Soc*, 99: 739–755
- Li Z, Hu R, Xie P, Chen H, Wu S, Wang F, Wang Y, Ling L, Liu J, Liu W. 2018. Development of a portable cavity ring down spectroscopy instrument for simultaneous, *in situ* measurement of NO₃ and N₂O₃. *Opt Express*, 26: A433
- Liang P, Mu Y J, Daële V, Mellouki A. 2011. Kinetic studies of Cl reactions with 3-buten-1-ol and 2-buten-1-ol over the temperature range 298–363 K. *Chem Phys Lett*, 502: 154–158
- Liao M, Healy S, Zhang P. 2019. Processing and quality control of FY-3C GNOS data used in numerical weather prediction applications. *Atmos Meas Tech*, 12: 2679–2692
- Lin J, Pan D, Davis S J, Zhang Q, He K, Wang C, Streets D G, Wuebbles D J, Guan D. 2014. China's international trade and air pollution in the United States. *Proc Natl Acad Sci USA*, 111: 1736–1741
- Lin J, Tong D, Davis S, Ni R, Tan X, Pan D, Zhao H, Lu Z, Streets D, Feng T, Zhang Q, Yan Y, Hu Y, Li J, Liu Z, Jiang X, Geng G, He K, Huang Y, Guan D. 2016. Global climate forcing of aerosols embodied in international trade. *Nat Geosci*, 9: 790–794
- Lin W, Bi L, Dubovik O. 2018. Assessing superspheroids in modeling the scattering matrices of dust aerosols. *J Geophys Res-Atmos*, 123: 13917–13943
- Lin W S, Bi L, Liu D, Zhang K J. 2017. Use of Debye's series to determine the optimal edge-effect terms for computing the extinction efficiencies of spheroids. *Opt Express*, 25: 20298–20312
- Liu A W, Hu C L, Wang J, Perevalov V I, Hu S M. 2019. Cavity ring-down spectroscopy of ¹⁵N enriched N₂O near 1.56 μm. *J Quant Spectrosc Ra*, 232: 1–9
- Liu C, Chung C E, Yin Y, Schnaiter M. 2018. The absorption Ångström exponent of black carbon: From numerical aspects. *Atmos Chem Phys*, 18: 6259–6273
- Liu C, Li J, Yin Y, Zhu B, Feng Q. 2017. Optical properties of black carbon aggregates with non-absorptive coating. *J Quant Spectrosc Ra*, 187: 443–452
- Liu C, Ma Q, Liu Y, Ma J, He H. 2012. Synergistic reaction between SO₂ and NO₂ on mineraloxides: A potential formation pathway of sulfate aerosol. *Phys Chem Chem Phys*, 14: 1668–1676
- Liu C, Yin Y. 2016. Inherent optical properties of pollen particles: A case study for the morning glory pollen. *Opt Express*, 24: A104
- Liu D Y, Niu S J, Yang J, Zhao L J, Lü J J, Lu C S. 2011. Summary of a 4-year fog field study in northern Nanjing, Part 1: Fog boundary layer. *Pure Appl Geophys*, 169: 809–819
- Liu F, Zhang Q, van der A R J, Zheng B, Tong D, Yan L, Zheng Y, He

- K. 2016. Recent reduction in NO_x emissions over China: Synthesis of satellite observations and emission inventories. *Environ Res Lett*, 11: 114002
- Liu H, Dong W, Wu T, Zheng D, Zhang Y. 2012. Observation of compact intracloud discharges using VHF broadband interferometers. *J Geophys Res*, 117, doi: 10.1029/2011JD016185
- Liu L, Sun X, Chen F, Zhao S, Gao T. 2011. Cloud classification based on structure features of infrared images. *J Atmos Ocean Technol*, 28: 410–417
- Liu L, Sun X, Gao T, Zhao S. 2013. Comparison of cloud properties from ground-based infrared cloud measurement and visual observations. *J Atmos Ocean Technol*, 30: 1171–1179
- Liu M, Huang X, Song Y, Tang J, Cao J, Zhang X, Zhang Q, Wang S, Xu T, Kang L, Cai X, Zhang H, Yang F, Wang H, Yu J Z, Lau A K H, He L, Huang X, Duan L, Ding A, Xue L, Gao J, Liu B, Zhu T. 2019. Ammonia emission control in China would mitigate haze pollution and nitrogen deposition, but worsen acid rain. *Proc Natl Acad Sci USA*, 116: 7760–7765
- Liu T, Wang X, Deng W, Hu Q, Ding X, Zhang Y, He Q, Zhang Z, Lü S, Bi X, Chen J, Yu J. 2015. Secondary organic aerosol formation from photochemical aging of light-duty gasoline vehicle exhausts in a smog chamber. *Atmos Chem Phys*, 15: 9049–9062
- Liu X C, Gao T C, Liu L. 2014. A video precipitation sensor for imaging and velocimetry of hydrometeors. *Atmos Meas Tech*, 7: 2037–2046
- Liu X G, Li J, Qu Y, Han T, Hou L, Gu J, Chen C, Yang Y, Liu X, Yang T, Zhang Y, Tian H, Hu M. 2013. Formation and evolution mechanism of regional haze: A case study in the megacity Beijing, China. *Atmos Chem Phys*, 13: 4501–4514
- Liu X, Ye Z, Shao X, Wang C, Yan M, Guo C. 1989. Intracloud lightning discharges in the lower part of thundercloud. *Acta Meteorol Sin*, 3: 212–219
- Liu Y, Laiguang Y, Weinong Y, Feng L. 1995. On the size distribution of cloud droplets. *Atmos Res*, 35: 201–216
- Liu Y, Liggio J, Staebler R, Li S M. 2015. Reactive uptake of ammonia to secondary organic aerosols: Kinetics of organonitrogen formation. *Atmos Chem Phys*, 15: 13569–13584
- Liu Y, Lu K, Li X, Dong H, Tan Z, Wang H, Zou Q, Wu Y, Zeng L, Hu M, Min K E, Kecorius S, Wiedensohler A, Zhang Y. 2019. A comprehensive model test of the HONO sources constrained to field measurements at rural North China Plain. *Environ Sci Technol*, 53: 3517–3525
- Lu C, Liu Y, Niu S, Krueger S, Wagner T. 2013. Exploring parameterization for turbulent entrainment-mixing processes in clouds. *J Geophys Res-Atmos*, 118: 185–194
- Lu D, Pan W, Wang Y. 2018. Atmospheric profiling synthetic observation system in Tibet. *Adv Atmos Sci*, 35: 264–267
- Lu G, Jiang R, Qie X, Zhang H, Sun Z, Liu M, Wang Z, Liu K. 2014. Burst of intracloud current pulses during the initial continuous current in a rocket-triggered lightning flash. *Geophys Res Lett*, 41: 9174–9181
- Lu K D, Rohrer F, Holland F, Fuchs H, Bohn B, Brauers T, Chang C C, Häseler R, Hu M, Kita K, Kondo Y, Li X, Lou S R, Nehr S, Shao M, Zeng L M, Wahner A, Zhang Y H, Hofzumahaus A. 2012. Observation and modelling of OH and HO_2 concentrations in the Pearl River Delta 2006: A missing OH source in a VOC rich atmosphere. *Atmos Chem Phys*, 12: 1541–1569
- Lu Q F, Bell W, Bauer P, Bormann N, Peubey C. 2011. An evaluation of FY-3A satellite data for numerical weather prediction. *Q J R Meteorol Soc*, 137: 1298–1311
- Lu W, Chen L, Ma Y, Rakov V A, Gao Y, Zhang Y, Yin Q, Zhang Y. 2013. Lightning attachment process involving connection of the downward negative leader to the lateral surface of the upward connecting leader. *Geophys Res Lett*, 40: 5531–5535
- Lu Z, Hao J, Takekawa H, Hu L, Li J. 2009. Effect of high concentrations of inorganic seed aerosols on secondary organic aerosol formation in the m-xylene/ NO_x photooxidation system. *Atmos Environ*, 43: 897–904
- Ma J, Guo X, Zhao C, Zhang Y, Hu Z. 2007. Recent progress in cloud physics research in China. *Adv Atmos Sci*, 24: 1121–1137
- Ma N, Zhao C S, Müller T, Cheng Y F, Liu P F, Deng Z Z, Xu W Y, Ran L, Nekat B, van Pinxteren D, Gnauk T, Müller K, Herrmann H, Yan P, Zhou X J, Wiedensohler A. 2012. A new method to determine the mixing state of light absorbing carbonaceous using the measured aerosol optical properties and number size distributions. *Atmos Chem Phys*, 12: 2381–2397
- Mu M, Duan W, Chen D, Yu W. 2015. Target observations for improving initialization of high-impact ocean-atmospheric environmental events forecasting. *Nat Sci Rev*, 2: 226–236
- Mu M, Duan W S, Wang B. 2003. Conditional nonlinear optimal perturbation and its applications. *Nonlin Processes Geophys*, 10: 493–501
- Nash J, Oakley T, Vömel H, Wei L. 2011. WMO intercomparison of high quality radiosonde systems, Instruments and Observing Methods. WMO, Geneva
- Niu Y, Chen R J, Xia Y J, Cai J, Lin Z J, Liu C, Chen C, Peng L, Zhao Z H, Zhou W H, Chen J M, Kan H D. 2018. Personal ozone exposure and respiratory inflammatory response: The role of DNA methylation in the arginase-nitric oxide synthase pathway. *Environ Sci Technol*, 52: 8785–8791
- Peng J F, Hu M, Guo S, Du Z F, Zheng J, Shang D J, Zamora M L, Zeng L M, Shao M, Wu Y S, Zheng J, Wang Y, Glen C R, Collins D

- R, Molina M J, Zhang R Y. 2016. Markedly enhanced absorption and direct radiative forcing of black carbon under polluted urban environments. *Proc Natl Acad Sci USA*, 113: 4266–4271
- Peng J, Hu M, Du Z, Wang Y, Zheng J, Zhang W, Yang Y, Qin Y, Zheng R, Xiao Y, Wu Y, Lu S, Wu Z, Guo S, Mao H, Shuai S. 2017. Gasoline aromatics: A critical determinant of urban secondary organic aerosol formation. *Atmos Chem Phys*, 17: 10743–10752
- Peng Y, Wang H, Li Y, Liu C, Zhao T, Zhang X, Gao Z, Jiang T, Che H, Zhang M. 2018. Evaluating the performance of two surface layer schemes for the momentum and heat exchange processes during severe haze pollution in Jing-Jin-Ji in eastern China. *Atmos Chem Phys*, 18: 17421–17435
- Qie X. 2012. Progresses in the atmospheric electricity researches in China during 2006–2010. *Adv Atmos Sci*, 29: 993–1005
- Qie X S, Zhang Y J. 2019. A Review of atmospheric electricity research in China from 2011 to 2018. *Adv Atmos Sci*, 36: 994–1014
- Qin X H, Mu M. 2012. Influence of conditional nonlinear optimal perturbations sensitivity on typhoon track forecasts. *Q J R Meteorol Soc*, 138: 185–197
- Qin Y, Lin Y, Xu S, Ma H, Xie S. 2018. A Diagnostic PDF Cloud Scheme to Improve Subtropical Low Clouds in NCAR Community Atmosphere Model (CAM 5). *J Adv Model Earth Syst*, 10: 320–341
- Randles C A, Kinne S, Myhre G, Schulz M, Stier P, Fischer J, Doppler L, Highwood E, Ryder C, Harris B, Huttunen J, Ma Y, Pinker R T, Mayer B, Neubauer D, Hittenberger R, Oreopoulos L, Lee D, Pitari G, Di Genova G, Quaas J, Rose F G, Kato S, Rumbold S T, Vardavas I, Hatzianastassiou N, Matsoukas C, Yu H, Zhang F, Zhang H, Lu P. 2013. Intercomparison of shortwave radiative transfer schemes in global aerosol modeling: Results from the aerocom radiative transfer experiment. *Atmos Chem Phys*, 13: 2347–2379
- Ren Y, Zhang H S, Wei W, Wu B G, Cai X H, Song Y. 2019. Effects of turbulence structure and urbanization on the heavy haze pollution process. *Atmos Chem Phys*, 19: 1041–1057
- Shang B, Feng Z Z, Li P, Yuan X Y, Xu Y S, Calatayud V. 2017. Ozone exposure- and flux-based response relationships with photosynthesis, leaf morphology and biomass in two poplar clones. *Sci Total Environ*, 603–604: 185–195
- Shen G, Ru M, Du W, Zhu X, Zhong Q, Chen Y, Shen H, Yun X, Meng W, Liu J, Cheng H, Hu J, Guan D, Tao S. 2019. Impacts of air pollutants from rural Chinese households under the rapid residential energy transition. *Nat Commun*, 10: 3405
- Shi C, Sun X, Yang J, Li Z. 1996. 3D model Study on fog over complex terrain—Part I: Numerical study. *J Meteor Res*, 10: 493–506
- Song Y, Shao M, Liu Y, Lu S, Kuster W, Goldan P, Xie S. 2007. Source apportionment of ambient volatile organic compounds in Beijing. *Environ Sci Technol*, 41: 4348–4353
- Sun G, Li Y, Lu J. 2019. Cloud vertical structures associated with northward advance of the East Asian summer monsoon. *Atmos Res*, 215: 317–325
- Sun J, Zhang L, Shen X, Che H, Zhang Y, Fan R, Ma Q, Yue Y, Yu X. 2016. A review of the effects of relative humidity on aerosol scattering properties. *Acta Meteorol Sin*, 74: 672–682
- Sun Y, Jiang Q, Wang Z, Fu P, Li J, Yang T, Yin Y. 2014. Investigation of the sources and evolution processes of severe haze pollution in Beijing in January 2013. *J Geophys Res-Atmos*, 119: 4380–4398
- Sun Y, Zhuang G, Tang A A, Wang Y, An Z. 2006. Chemical Characteristics of PM_{2.5} and PM₁₀ in Haze-Fog Episodes in Beijing. *Environ Sci Technol*, 40: 3148–3155
- Tan F, Tong S, Jing B, Hou S, Liu Q, Li K, Zhang Y, Ge M. 2016. Heterogeneous reactions of NO₂ with CaCO₃-(NH₄)₂SO₄ mixtures at different relative humidities. *Atmos Chem Phys*, 16: 8081–8093
- Tan Y B, Tao S C, Zhu B Y. 2006. Fine-resolution simulation of the channel structures and propagation features of intracloud lightning. *Geophys Res Lett*, 33: L09809
- Tan Y B, Zheng T X, Shi Z. 2019. Improved lightning model: Application to discuss the characteristics of upward lightning. *Atmos Res*, 217: 63–72
- Tan Z, Rohrer F, Lu K, Ma X, Bohn B, Broch S, Dong H, Fuchs H, Gkatzelis G I, Hofzumahaus A, Holland F, Li X, Liu Y, Liu Y, Novelli A, Shao M, Wang H, Wu Y, Zeng L, Hu M, Kiendler-Scharr A, Wahner A, Zhang Y. 2018. Wintertime photochemistry in Beijing: Observations of RO_x radical concentrations in the North China Plain during the BEST-ONE campaign. *Atmos Chem Phys*, 18: 12391–12411
- Tang X, Li J, Dong Z. 1989. Photochemical pollution in Lanzhou, China—a case study. *J Environ Sci*, 1: 31–38
- Tao S, Ru M Y, Du W, Zhu X, Zhong Q R, Li B G, Shen G F, Pan X L, Meng W J, Chen Y L, Shen H Z, Lin N, Su S, Zhuo S J, Huang T B, Xu Y, Yun X, Liu J F, Wang X L, Liu W X, Cheng H F, Zhu D Q. 2018. Quantifying the rural residential energy transition in China from 1992 to 2012 through a representative national survey. *Nat Energy*, 3: 567–573
- Tian Y H, Liu H, Zhao Z L, Xiang X, Li M, Juan J, Song J, Cao Y Y, Wang X W, Chen L B, Wei C, Hu Y H, Gao P. 2018. Association between ambient air pollution and daily hospital admissions for ischemic stroke: A nationwide time-series analysis. *Plos Medicine*, 15
- Tong D, Zhang Q, Davis S J, Liu F, Zheng B, Geng G, Xue T, Li M, Hong C, Lu Z, Streets D G, Guan D, He K. 2018. Targeted emission reductions from global super-polluting power plant units. *Nat Sustain*, 1: 59–68

- Tong S, Hou S Q, Zhang Y, Chu B W, Liu Y C, He H, Zhao P S, Ge M F. 2016. Exploring the nitrous acid (HONO) formation mechanism in winter Beijing: Direct emissions and heterogeneous production in urban and suburban areas. *Faraday Discuss*, 189: 213–230
- Wang B. 2017a. A unified formulation of radiative transfer in plane-parallel atmospheres based on general decomposition of radiance. Part I: The theory. *J Atmos Sci*, 74: 4139–4151
- Wang B. 2017b. A unified formulation of radiative transfer in plane-parallel atmospheres based on general decomposition of radiance. Part II: An exemplifying application to the hemispherical harmonics method with four components. *J Atmos Sci*, 74: 4153–4176
- Wang H, Chen J, Lu K. 2017. Development of a portable cavity-enhanced absorption spectrometer for the measurement of ambient NO_3 and N_2O_5 : Experimental setup, lab characterizations, and field applications in a polluted urban environment. *Atmos Meas Tech*, 10: 1465–1479
- Wang H, Zhang Y, Mu Y. 2008. Rate constants for reactions of $\bullet\text{OH}$ with Several reduced sulfur compounds determined by relative rate constant method. *Acta Physico-Chim Sin*, 24: 945–950
- Wang J, Zhang X, Li D, Yang Y, Zhong J, Wang Y, Che H, Che H, Zhang Y. 2018. Interdecadal changes of summer aerosol pollution in the Yangtze River Basin of China, the relative influence of meteorological conditions and the relation to climate change. *Sci Total Environ*, 630: 46–52
- Wang M J, Zhao K, Xue M, Zhang G F, Liu S, Wen L, Chen G. 2016. Precipitation microphysics characteristics of a Typhoon Matmo (2014) rainband after landfall over eastern China based on polarimetric radar observations. *J Geophys Res*, 121: 12415–12433
- Wang N, Sun X, Chen J, Li X. 2017. Heterogeneous nucleation of trichloroethylene ozonation products in the formation of new fine particles. *Sci Rep*, 7: 42600
- Wang S, Xing J, Chatani S, Hao J, Klimont Z, Cofala J, Amann M. 2011a. Verification of anthropogenic emissions of China by satellite and ground observations. *Atmos Environ*, 45: 6347–6358
- Wang S, Xing J, Jang C, Zhu Y, Fu J S, Hao J. 2011b. Impact assessment of ammonia emissions on inorganic aerosols in East China using response surface modeling technique. *Environ Sci Technol*, 45: 9293–9300
- Wang S, Zhao M, Xing J, Wu Y, Zhou Y, Lei Y, He K, Fu L, Hao J. 2010. Quantifying the air pollutants emission reduction during the 2008 Olympic Games in Beijing. *Environ Sci Technol*, 44: 2490–2496
- Wang T J, Jiang F, Deng J J, Shen Y, Fu Q Y, Wang Q, Fu Y, Xu J H, Zhang D N. 2012. Urban air quality and regional haze weather forecast for Yangtze River Delta region. *Atmos Environ*, 58: 70–83
- Wang T J, Li S, Shen Y, Deng J J, Xie M. 2010. Investigations on direct and indirect effect of nitrate on temperature and precipitation in China using a regional climate chemistry modeling system. *J Geophys Res*, 115: D00K26
- Wang T, Shi L H, Qiu S, Sun Z, Zhang Q, Duan Y T, Liu B. 2018. Multiple-antennae observation and EMTR processing of lightning VHF radiations. *IEEE Access*, 6: 26558–26566
- Wang W G, Li K, Zhou L, Ge M F, Hou S Q, Tong S R, Mu Y J, Jia L. 2015. Evaluation and application of dual-reactor chamber for studying atmospheric oxidation processes and mechanisms. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 31: 1251–1259
- Wang X, Liu T, Bernard F, Ding X, Wen S, Zhang Y, Zhang Z, He Q, Lü S, Chen J, Saunders S, Yu J. 2014. Design and characterization of a smog chamber for studying gas-phase chemical mechanisms and aerosol formation. *Atmos Meas Tech*, 7: 301–313
- Wang Y S, Xin J Y, Li Z Q, Wang S G, Wang P C, Hao W M, Nordgren B L, Chen H B, Wang L L, Sun Y. 2011. Seasonal variations in aerosol optical properties over China. *J Geophys Res*, 116: D18209
- Wang Y, Hao J, McElroy M B, Munger J W, Ma H, Chen D, Nielsen C P. 2009. Ozone air quality during the 2008 Beijing Olympics: Effectiveness of emission restrictions. *Atmos Chem Phys*, 9: 5237–5251
- Wang Y, Wu Z, Hu M. 2017. Hygroscopicity of atmospheric sub-micrometer particles in various environments in China. *China Environ Sci*, 37: 1601–1609
- Wang Z, Cui S C, Yang J, Gao H Y, Liu C, Zhang Z B. 2017a. A novel hybrid scattering order-dependent variance reduction method for Monte Carlo simulations of radiative transfer in cloudy atmosphere. *J Quant Spectrosc Ra*, 189: 283–302
- Wang Z, Sui X, Zhang Q, Yang L, Zhao H, Tang M, Zhan Y, Zhang Z. 2017b. Derivation of cloud-free-region atmospheric motion vectors from FY-2E thermal infrared imagery. *Adv Atmos Sci*, 34: 272–282
- Wei H L, Chen X H, Rao R Z, Wang Y J, Yang P. 2007. A moderate-spectral-resolution transmittance model based on fitting the line-by-line calculation. *Opt Express*, 15: 8360–8370
- Wei W, Zhang H S, Schmitt F G, Huang Y X, Cai X H, Song Y, Huang X, Zhang H. 2017. Investigation of turbulence behaviour in the stable boundary layer using arbitrary-order hilbert spectra. *Bound-Layer Meteorol*, 163: 311–326
- Wen J, Zhao K, Huang H, Zhou B, Yang Z, Chen G, Wang M, Wen L, Dai H, Xu L, Liu S, Zhang G, Lee W C. 2017. Evolution of microphysical structure of a subtropical squall line observed by a polarimetric radar and a disdrometer during OPACC in Eastern China. *J Geophys Res-Atmos*, 122: 8033–8050
- Wuebbles D J, Brasseur G P, Rodhe H, Barrie L A, Crutzen P J, Delmas R J, Jacob D J, Kolb C, Pszenny A, Steffen W, Weiss R F. 2003. Changes in the chemical composition of the atmosphere and

- potential impacts. in *Atmospheric Chemistry in a Changing World*, 1–17. Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- Xiao H, Yin Y, Jin L, Chen Q, Chen J. 2014. Simulation of aerosol effects on orographic clouds and precipitation using WRF model with a detailed bin microphysics scheme. *Atmos Sci Lett*, 15: 134–139
- Xie X, Zhang H, Liu X, Peng Y, Liu Y. 2017. Sensitivity study of cloud parameterizations with relative dispersion in CAM5.1: Impacts on aerosol indirect effects. *Atmos Chem Phys*, 17: 5877–5892
- Xin J Y, Wang Y S, Li Z Q, Wang P C, Hao W M, Nordgren B L, Wang S G, Liu G R, Wang L L, Wen T X, Sun Y, Hu B. 2007. Aerosol optical depth (AOD) and Ångström exponent of aerosols observed by the Chinese Sun Hazemeter Network from August 2004 to September 2005. *J Geophys Res*, 112: D05203
- Xu L T, Zhang Y J, Liu H Y, Zheng D, Wang F. 2016. The role of dynamic transport in the formation of the inverted charge structure in a simulated hailstorm. *Sci China Earth Sci*, 59: 1414–1426
- Xue C, Ye C, Zhang Y, Ma Z, Liu P, Zhang C, Zhao X, Liu J, Mu Y. 2019. Development and application of a twin open-top chambers method to measure soil HONO emission in the North China Plain. *Sci Total Environ*, 659: 621–631
- Yan Q, Hua D, Li S. 2013. Observation and productization of the micro-pulsed Mie scattering lidar system. *Chinese J Quantum Elec*, 30: 123–128
- Yang J, Zhang P, Lu N, Yang Z, Shi J, Dong C. 2012. Improvements on global meteorological observations from the current Fengyun 3 satellites and beyond. *Int J Digital Earth*, 5: 251–265
- Yang J, Zhang Z, Wei C, Lu F, Guo Q. 2017. Introducing the new generation of Chinese geostationary weather satellites, Fengyun-4. *Bull Amer Meteorol Soc*, 98: 1637–1658
- Yang K, Koike T, Fujii H, Tamagawa K, Hirose N. 2002. Improvement of surface flux parametrizations with a turbulence-related length. *Q J R Meteorol Soc*, 128: 2073–2087
- Yao L, Garmash O, Bianchi F, Zheng J, Yan C, Kontkanen J, Junninen H, Mazon S B, Ehn M, Paasonen P, Sipilä M, Wang M, Wang X, Xiao S, Chen H, Lu Y, Zhang B, Wang D, Fu Q, Geng F, Li L, Wang H, Qiao L, Yang X, Chen J, Kerminen V M, Petäjä T, Worsnop D R, Kulmala M, Wang L. 2018. Atmospheric new particle formation from sulfuric acid and amines in a Chinese megacity. *Science*, 361: 278–281
- Yin P, Brauer M, Cohen A, Burnett R T, Liu J, Liu Y, Liang R, Wang W, Qi J, Wang L, Zhou M. 2017. Long-term fine particulate matter exposure and nonaccidental and cause-specific mortality in a large national cohort of Chinese men. *Environ Health Perspect*, 125: 117002
- You L, Liu Y. 1995. Some microphysical characteristics of cloud and precipitation over China. *Atmos Res*, 35: 271–281
- Yuan X Y, Feng Z Z, Liu S, Shang B, Li P, Xu Y S, Paoletti E. 2017. Concentration- and flux-based dose-responses of isoprene emission from poplar leaves and plants exposed to an ozone concentration gradient. *Plant Cell Environ*, 40: 1960–1971
- Yue D L, Hu M, Zhang R Y, Wang Z B, Zheng J, Wu Z J, Wiedensohler A, He L Y, Huang X F, Zhu T. 2010. The roles of sulfuric acid in new particle formation and growth in the mega-city of Beijing. *Atmos Chem Phys*, 10: 4953–4960
- Yue Z, Rosenfeld D, Liu G, Dai J, Yu X, Zhu Y, Hashimshoni E, Xu X, Hui Y, Lauer O. 2019. Automated Mapping of Convective Clouds (AMCC) Thermodynamical, Microphysical, and CCN Properties from *SNPP* /*VIIRS* Satellite Data. *J Appl Meteorol Climatol*, 58: 887–902
- Zeng C, Liu C, Li J, Zhu B, Yin Y, Wang Y. 2019. Optical properties and radiative forcing of aged BC due to hygroscopic growth: Effects of the aggregate structure. *J Geophys Res-Atmos*, 124: 4620–4633
- Zeng Q C, Cheng X L, Hu F, Peng Z. 2010. Gustiness and coherent structure of strong winds and their role in dust emission and entrainment. *Adv Atmos Sci*, 27: 1–13
- Zhang F, Li J N. 2013. Doubling-adding method for delta-four-stream spherical harmonic expansion approximation in radiative transfer parameterization. *J Atmos Sci*, 70: 3084–3101
- Zhang F, Wu K, Li J, Yang Q, Zhao J Q, Li J. 2016. Analytical infrared delta-four-stream adding method from invariance principle. *J Atmos Sci*, 73: 4171–4188
- Zhang F, Wu K, Li J, Zhang H, Hu S. 2018. Radiative transfer in the region with solar and infrared spectra overlap. *J Quant Spectrosc Ra*, 219: 366–378
- Zhang F, Zhu M, Li J, Li W, Di D, Shi Y, Wu K. 2019. Alternate mapping correlated k-distribution method for infrared radiative transfer forward simulation. *Remote Sens*, 11: 994, doi: 10.3390/rs11090994
- Zhang H, Li X. 2014. Review of the field measurements and parameterization for dust emission during sand-dust events. *J Meteorol Res*, 28: 903–922
- Zhang H, Jing X, Li J. 2014. Application and evaluation of a new radiation code under McICA scheme in BCC_AGCM2.0.1. *Geosci Model Dev*, 7: 737–754
- Zhang H, Nakajima T, Shi G Y, Suzuki T, Imasu R. 2003. An optimal approach to overlapping bands with correlated k distribution method and its application to radiative calculations. *J Geophys Res*, 108: 4641
- Zhang H, Shi G. 2001. An improved approach to diffuse radiation. *J Quant Pectrosc Radiat Transfer*, 70: 367–372
- Zhang H, Wang M, Guo Z, Zhou C, Zhou T, Qian Y, Larson V E, Ghan

- S, Ovchinnikov M, Bogenschutz P A, Gettelman A. 2018a. Low-cloud feedback in CAM5-CLUBB: Physical mechanisms and parameter sensitivity analysis. *J Adv Model Earth Syst*, 10: 2844–2864
- Zhang H, Zhang H, Cai X, Song Y, Sun J. 2016. Contribution of low-frequency motions to sensible heat fluxes over urban and suburban areas. *Bound-Layer Meteorol*, 161: 183–201
- Zhang H, Zhang Y, He H, Xie Y, Zeng Q. 2017. Comparison of raindrop size distributions in a midlatitude continental squall line during different stages as measured by parsivel over East China. *J Appl Meteorol Climatol*, 56: 2097–2111
- Zhang H, Zhou C, Zhao S. 2018b. Influences of the internal mixing of anthropogenic aerosols on global aridity change. *J Meteorol Res*, 32: 723–733
- Zhang J, An J, Qu Y, Liu X, Chen Y. 2019. Impacts of potential HONO sources on the concentrations of oxidants and secondary organic aerosols in the Beijing-Tianjin-Hebei region of China. *Sci Total Environ*, 647: 836–852
- Zhang P, Lu Q F, Hu X Q, Gu S Y, Yang L, Min M, Chen L, Xu N, Sun L, Bai W G, Ma G, Xian D. 2019a. Latest progress of the Chinese meteorological satellite program and core data processing technologies. *Adv Atmos Sci*, 36: 1027–1045
- Zhang P, Zhu L, Tang S H, Gao L, Chen L, Zheng W, Han X Z, Chen J, Shao J L. 2019b. General comparison of FY-4A/AGRI with other GEO/LEO instruments and its potential and challenges in non-meteorological applications. *Front Earth Sci*, 6
- Zhang W, Zhang Y, Zheng D, Wang F, Xu L. 2015. Relationship between lightning activity and tropical cyclone intensity over the northwest Pacific. *J Geophys Res-Atmos*, 120: 4072–4089
- Zhang Q, Geng G N, Wang S W, Richter A, He K B. 2012. Satellite remote sensing of changes in NO_x emissions over China during 1996–2010. *Chin Sci Bull*, 57: 2857–2864
- Zhang Q, Jiang X, Tong D, Davis S J, Zhao H, Geng G, Feng T, Zheng B, Lu Z, Streets D G, Ni R, Brauer M, van Donkelaar A, Martin R V, Huo H, Liu Z, Pan D, Kan H, Yan Y, Lin J, He K, Guan D. 2017. Transboundary health impacts of transported global air pollution and international trade. *Nature*, 543: 705–709
- Zhang Q, Streets D G, Carmichael G R, He K B, Huo H, Kannari A, Klimont Z, Park I S, Reddy S, Fu J S, Chen D, Duan L, Lei Y, Wang L T, Yao Z L. 2009. Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission. *Atmos Chem Phys*, 9: 5131–5153
- Zhang R, Jing J, Tao J, Hsu S C, Wang G, Cao J, Lee C S L, Zhu L, Chen Z, Zhao Y, Shen Z. 2013. Chemical characterization and source apportionment of PM_{2.5} in Beijing: Seasonal perspective. *Atmos Chem Phys*, 13: 7053–7074
- Zhang W, Tong S, Ge M, An J, Shi Z, Hou S, Xia K, Qu Y, Zhang H, Chu B, Sun Y, He H. 2019. Variations and sources of nitrous acid (HONO) during a severe pollution episode in Beijing in winter 2016. *Sci Total Environ*, 648: 253–262
- Zhang X, Zhong J, Wang J, Wang Y, Liu Y. 2018. The interdecadal worsening of weather conditions affecting aerosol pollution in the Beijing area in relation to climate warming. *Atmos Chem Phys*, 18: 5991–5999
- Zhang Y H, Hu M, Zhong L J, Wiedensohler A, Liu S C, Andreae M O, Wang W, Fan S J. 2008. Regional integrated experiments on air quality over Pearl River Delta 2004 (PRIDE-PRD2004): Overview. *Atmos Environ*, 42: 6157–6173
- Zhang Y, Zhou Q, Lv S, Jia S, Tao F, Chen D, Guo J. 2019. Elucidating cloud vertical structures based on three-year Ka-band cloud radar observations from Beijing, China. *Atmos Res*, 222: 88–99
- Zhao B, Zheng H, Wang S, Smith K R, Lu X, Aunan K, Gu Y, Wang Y, Ding D, Xing J, Fu X, Yang X, Liou K N, Hao J. 2018. Change in household fuels dominates the decrease in PM_{2.5} exposure and premature mortality in China in 2005–2015. *Proc Natl Acad Sci USA*, 115: 12401–12406
- Zhao C, Yu Y, Kuang Y, Tao J, Zhao G. 2019. Recent progress of aerosol light-scattering enhancement factor studies in China. *Adv Atmos Sci*, 36: 1015–1026
- Zhao C, Liu L, Wang Q, Qiu Y, Wang W, Wang Y, Fan T. 2016. Toward Understanding the properties of high ice clouds at the Naqu site on the Tibetan Plateau using ground-based active remote sensing measurements obtained during a short period in July 2014. *J Appl Meteorol Climatol*, 55: 2493–2507
- Zhao H, Zheng Y, Wu X. 2018. Assessment of yield and economic losses for wheat and rice due to ground-level O₃ exposure in the Yangtze River Delta, China. *Atmos Environ*, 191: 241–248
- Zhao J Q, Shi G Y. 2013. An accurate approximation to the diffusivity factor. *Infrared Phys Technol*, 56: 21–24
- Zhao J Q, Hu Y Q. 2003. Bridging technique for calculating the extinction efficiency of arbitrary shaped particles. *Appl Opt*, 42: 4937–4945
- Zhao L, Han B, Lv S H, Wen L J, Meng X H, Li Z G. 2018. The different influence of the residual layer on the development of the summer convective boundary layer in two deserts in northwest China. *Theor Appl Climatol*, 131: 877–888
- Zhao W, Peng Y, Wang B, Li J. 2018. Cloud longwave scattering effect and its impact on climate simulation. *Atmosphere*, 9: 153
- Zheng B, Tong D, Li M, Liu F, Hong C, Geng G, Li H, Li X, Peng L, Qi J, Yan L, Zhang Y, Zhao H, Zheng Y, He K, Zhang Q. 2018. Trends in China's anthropogenic emissions since 2010 as the consequence of clean air actions. *Atmos Chem Phys*, 18: 14095–14111
- Zheng D, Zhang Y, Meng Q. 2018. Properties of negative initial leaders

- and lightning flash size in a cluster of supercells. *J Geophys Res-Atmos*, 123: 12857–12876
- Zheng D, Zhang Y J, Zhang Y, Lu W T, Yan X, Chen S D, Xu L T, Huang Z G, You J, Zhang R, Su Z G. 2017. Characteristics of the initial stage and return stroke currents of rocket-triggered lightning flashes in southern China. *J Geophys Res-Atmos*, 122: 6431–6452
- Zhong Z, Zhou J, Qi F, Fan A, Yue G, Lan J. 2003. Portable mie lidar for monitoring atmospheric aerosol extinction. *High Power Laser and Particle Beams*, 15
- Zhou C H, Gong S L, Zhang X Y, Wang Y Q, Niu T, Liu H L, Zhao T L, Yang Y Q, Hou Q. 2008. Development and evaluation of an operational SDS forecasting system for East Asia: CUACE/Dust. *Atmos Chem Phys*, 8: 787–798
- Zhou W Y, Guo P W, Luo Y, Liou K N, Gu Y, Xue Y K. 2009. Four-stream radiative transfer parameterization scheme in a land surface process model. *Acta Meteorol Sin*, 23: 105–115
- Zhu Y, Rosenfeld D, Yu X, Li Z. 2015. Separating aerosol microphysical effects and satellite measurement artifacts of the relationships between warm rain onset height and aerosol optical depth. *J Geophys Res-Atmos*, 120: 7726–7736

(责任编辑: 穆穆)