

李锐, 李正强, 赵坤, 等. 2023. 国家自然科学基金大气科学学科二级申请代码下设研究方向与关键词解读: D0509 大气观测、遥感和探测技术与方法 [J]. 大气科学, 47(1): 174–184. LI Rui, LI Zhengqiang, ZHAO Kun, et al. 2023. Research Directions and Keywords under the Secondary Application Codes of the Atmospheric Sciences Discipline of the National Natural Science Foundation of China: D0509 Atmospheric Observation, Remote Sensing and Detection Technology and Methods [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 47(1): 174–184. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2212.22309

国家自然科学基金大气科学学科二级申请代码 下设研究方向与关键词解读: D0509 大气观测、遥感和探测技术与方法

李锐¹ 李正强² 赵坤³ 孙业乐⁴

1 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230026

2 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094

3 南京大学大气科学学院, 南京 210023

4 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

摘 要 为顺应新一轮科技发展革命, 国家自然科学基金委员会积极开展了以“优化学科布局”为主要任务之一的改革工作, 学科申请代码的调整是该任务的重要组成部分和切入点。从 2019 年到 2022 年, 国家自然科学基金委大气科学学科对二级申请代码进行了调整, 将与大气探测相关的研究归并至“D0509 大气观测、遥感和探测技术与方法”, 并将其定义为“支撑技术”板块, 以区别于“分支学科”和“发展领域”。本文对 D0509 二级代码的修订过程进行了介绍, 并从大气观测、遥感和探测技术与方法的重要性、内涵与外延、发展趋势等视角, 对相关的研究方向和关键词进行了解读。特别是从学科基础层面和具体应用层面两个维度, 对 D0509 下设的六大研究方向, 以及各方向的关键词进行分析, 有助于申请人和评审专家根据自己的学术背景准确挑选关键词, 以利于申请书的精准评审。本文可以为科研人员在基金申请过程中关键词的选择提供参考。

关键词 国家自然科学基金 大气观测 遥感和探测 研究方向 关键词

文章编号 1006-9895(2023)01-0174-11

中图分类号 P41

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2212.22309

Research Directions and Keywords under the Secondary Application Codes of the Atmospheric Sciences Discipline of the National Natural Science Foundation of China: D0509 Atmospheric Observation, Remote Sensing and Detection Technology and Methods

LI Rui¹, LI Zhengqiang², ZHAO Kun³, and SUN Yele⁴

1 School of Earth and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026

2 Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094

3 School of Atmospheric Science, Nanjing University, Nanjing 210023

4 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100029

收稿日期 2022-11-10; 网络预出版日期 2023-01-11

作者简介 李锐, 男, 1974 年出生, 教授, 主要从事气候系统中的碳、水循环及相应能量平衡过程研究, 致力于发展先进的多源卫星遥感方法和数据集; 并将其应用于气候系统研究。E-mail: rli7@ustc.edu.cn

Abstract The National Natural Science Foundation of China has actively pursued reform work, with “optimizing the layout of disciplines” as one of the primary tasks, and the adjustment of discipline application codes is an important component and entry point of this task. This work is being done in order to adapt to the new round of scientific and technological development. From 2019 to 2022, the Department of Atmospheric Sciences of the National Natural Science Foundation of China reformed the secondary application codes. D0509, “Atmospheric observation, remote sensing, and detection technologies and methods,” incorporated all atmospheric observation research. The D0509 is defined as “supporting technologies” to differentiate it from “sub-disciplines” and “development areas” of science. At present, D0509 has designed six research avenues from two perspectives, based on the basic level of the discipline and the specific application level, with approximately 20 keywords for each direction. This article describes the reforming process of the D0509 code and interprets the research directions and keywords from the perspectives of the importance, connotation, extension, and development trend of atmospheric observation, remote sensing, and detection technologies and methods. It helps applicants and review experts accurately select keywords according to their academic backgrounds and facilitates the accurate matching of proper reviewers to each proposal.

Keywords National Natural Science Foundation of China, Atmospheric Observation, Remote Sensing and Detection, research areas, Keywords

1 引言

2019 年, 国家自然科学基金委员会(以下简称自然科学基金委)要求按照新时代科学基金资助导向, 以大气科学为试点, 率先开始改革, 其中核心任务之一是“优化学科布局”。通过梳理、调整申请代码以顺应学科发展态势与需求, 构建“源于知识体系逻辑结构、促进知识与应用融通的学科布局”, 形成以“分支学科”为主体, 辅以“支撑技术”, 服务于“发展领域”的整体结构; 要求大气科学学科下设的“研究方向”及其“关键词”需进一步细化诠释申请代码的内涵和外延, 体现申请代码内部逻辑结构、分支方向、特色与交叉、需求与导向。通过改革, 新的大气科学二级代码共有三大类(15 个), 包括分支学科类(8 个)、支撑技术类(4 个)和发展领域类(3 个)。旧版涉及到的大气探测两个二级代码(即“D0503 大气遥感和大气探测”和“D0515 大气观测原理方法及数据分析”)归并为一个新代码 D0509, 名为“大气观测、遥感和探测技术与方法”, 归类为“技术支撑”类(刘哲等, 2020)。

按照自然科学基金委的统一要求, 新的 D0509 二级代码优化调整工作主要考虑内涵、外延以及服务国家需求三大要点, 具体包括: (1) 导向清晰, 即完整涵盖“大气观测、遥感和探测技术与方法”资助范围, 体现对应的分支学科/技术支撑/发展领域的内涵与外延; (2) 数量适宜, 原则上, 每个“二级申请代码”下设不超过 6 个“研究

方向”, 每个“研究方向”下设不超过 20 个“关键词”; (3) 便于智能指派: 可基于“研究对象”“关键科学问题”“研究手段”及“其他相关内容”等因素, 设置“研究方向”和“关键词”, 以便智能指派系统精准匹配函评专家; (4) 结构清晰, 逻辑自洽。

在以上政策导向下, 自然科学基金委大气学科提前布局了战略研究项目组, 并成立了科学顾问组, 邀请战略专家领衔战略研究并担任科学顾问, 主要任务是把握学术方向并形成代表科学界的政策建议(刘哲等, 2020), 并在此基础上, 成立了二级代码调整秘书组; 由秘书组组织了 D0509 代码调整召集人工作组, 后者召开会议, 成立由数十名专家组成的代码调整工作组, 同时兼顾不同领域和不同单位的代表性。代码调整工作组经过广泛征求意见、集中讨论、多次修改, 形成了 D0509 代码初步方案, 并提交顾问组专家审阅, 做了进一步的调整。2019 年 12 月, 工作组形成了 2020 版 D0509 二级代码。2020 年自然科学基金申请和评审结束后, 自然科学基金委及时将新代码的相关使用情况通知给相关代码调整工作组, 特别是对未使用过的代码进行了讨论、调整, 在此基础上形成了 2021 版 D0509 二级代码。2021 年自然科学基金申请和评审结束后, 工作组再次根据代码使用情况, 对代码进行了优化调整, 形成了 2022 版 D0509 二级代码。

由于新版大气科学二级代码的研究方向和关键词高度凝练, 若仅阅读代码本身, 不容易准确把握其设计理念, 有可能造成一定的理解偏差, 导致申

请人和函评专家未能选择适合自己的关键词。本文作者作为 D0509 二级代码优化工作的召集人, 深度参与了代码编写工作, 并对代码研究方向和关键词的选择进行了多次深入研讨。鉴于此, 本文试图从作者个人的视角, 解读 D0509 研究方向和关键词的设计理念, 为学界同仁准确理解 D0509 的资助导向、正确的选择二级代码、研究方向及其关键词提供一定的参考。

2 “大气观测、遥感和探测技术与方法”的重要性

大气观测、遥感和探测技术与方法是大气科学发展的基础, 其发展推动和引领了大气科学的发展 (吕达仁等, 2003; 王体健等, 2019)。例如, 人类对热带对流云内部三维结构的理解, 从热塔模型到中尺度对流系统的深刻认识, 再到热带、全球尺度风暴的全面认识, 是紧紧伴随着大气探测平台 (地基—舰船—飞机—各类轨道卫星)、仪器 (传统仪器—可见光、红外、微波被动遥感仪器—各类主动遥感仪器等)、反演技术的发展而不断丰富起来的 (Houze, 2003)。

国务院颁布的《气象高质量发展纲要 (2022~2035 年)》指出, 到 2025 年, 气象关键核心技术要实现“自主可控”。近 30 年来, 中国自主研发的大气探测设备在大气科学发展和气象观测业务中发挥了重要作用, 以气象雷达 (Zhao et al., 2019)、成像光谱仪等为代表的遥感设备及技术得到了长足的发展。国产业务卫星系列 (风云、海洋、资源、高分等) 形成了稳定的业务观测能力, 对地观测卫星信息定量提取和综合应用形成了良好的规模 (许健民等, 2010; Zhang et al., 2019)。在一些方面, 中国气象卫星的观测能力已经国际领先, 如风云 3E “黎明星”的成功发射与运行, 使我国成为国际唯一同时具有上午、下午、黎明三轨观测卫星探测能力的国家 (Zhang et al., 2022)。

同发达国家相比, 我国在大气探测的基本原理、技术方法、仪器研制等诸多方面仍存在一定差距。随着国际形势的变化, 气象科技的“自主可控”成为国家迫切需求。具体到大气观测、遥感和探测技术与方法领域, 就是要打破对国外技术的依赖, 研发具有中国自主知识产权的大气探测理论、反演方法和仪器设备, 实现大气科学及相关领域的关键状

态参数和过程参数的精准测量。

2.1 大气观测、遥感和探测技术与方法的内涵和外延

虽然在新的自然科学基金委大气科学代码分类中, “大气观测、遥感和探测技术与方法”被归入“技术支撑”类别, 但不能将其简单地理解为对已有工程技术的应用。大气遥感充满着未知的科学问题、有待解决的技术难题、有待拓展和完善的应用领域, 是一个由基础研究、高技术和重大应用密切结合的学科分支 (吕达仁等, 2003)。

大气观测、遥感和探测技术与方法主要包括与大气中各种现象和参数测量相关的原理、技术、方法和仪器, 旨在为大气科学以及地球科学相关学科发现、验证和量化科学事实提供基础技术支撑。研究方法主要包括原位探测和遥感等, 研究对象包括大气温、压、湿、风和辐射等状态参数; 气体和气溶胶化学成分及其物理与光学属性; 云和降水的动力、热力和微物理特征以及相关的能量收支过程; 与大气过程密切相关的陆地表面和海表的状态参数和通量等。

在原理和方法层面, 大气遥感的原理基础包括电磁场理论、分子和原子光谱理论、波与介质相互作用理论等; 描述传感器所测信号与地—气物理参数之间物理联系的直接或间接模型构成了遥感的应用理论基础 (吕达仁等, 2003), 也就是反演的理论基础。辐射传输理论描述电磁波等与大气中不同成分的相互作用原理和计算过程, 结合气体分子、气溶胶、云粒子等的吸收、散射、发射等机理, 成为定量大气成分、气溶胶和云探测的重要基础 (胡斯勒图等, 2020)。大气中的各种降水粒子对雷达波的散射和吸收特征, 以及描述雷达波在大气中传播的雷达方程, 成为了气象雷达定量探测云和降水的基础。近年来, 人工智能和机器学习方法被逐渐应用于大气探测和遥感领域, 成为大气探测原理和方法基础的重要一部分。

在技术与手段层面, 根据是否与探测对象直接接触, 大气探测和遥感可分为直接测量和遥感两种类型。直接测量中又分为实验室测量和野外测量两大类。大气遥感技术有多种分类视角, 根据所利用的电磁波的光谱段可分为紫外遥感、可见光遥感、红外遥感和微波遥感等; 根据遥感信号的来源可分为主动和被动大气遥感; 根据遥感仪器所依托的平台可分为地基、空基 (飞机) 和星载三大类等。

在探测对象层面, 人类主要生活在地球表面。地表不仅仅是大气流体运动的下边界, 而且与大气有着直接的物质和能量交换, 因此地表状态和大气状态参数是大气探测的首要对象。其次, 云和降水是全球水循环和能量平衡的核心过程, 探测其时空变化是认识天气气候变化的关键。近年来, 以激光雷达、双偏振雷达和相控阵雷达等为代表的主动遥感新技术的蓬勃发展, 促进了大气成分、气溶胶、云和降水的精细结构和宏、微观物理特征的认识, 但其定量反演也一直是大气遥感的热点和难点问题。

综上, 从方法论的角度, 大气观测、遥感和探测技术与方法涉及原理、技术方法、仪器硬件; 从探测对象而言, 可大致分为地表状态、大气状态、大气气体成分、大气气溶胶、云和降水等。尽管众多大气观测研究均可以归纳为方法论的一种, 但不同对象所涉及的原理、技术、硬件可能差别很大。以“原理和方法”为例, 研究大气成分探测原理的学者, 专业背景可能是实验室化学, 而研究大气云和降水探测原理的学者, 专业背景可能是电磁波辐射传输。因此, 仅从方法论的角度对大气观测、遥感和探测技术与方法进行归类可能是不够的, 难以保证同一分类下的研究者具有相近的知识背景, 为此, 需要进一步区分探测对象, 进而提高相关分类的准确性, 这对精准匹配项目评审专家尤为重要。

2.2 大气观测、遥感和探测技术与方法的发展现状和趋势

自 1949 年新中国成立以来, 我国在大气观测、遥感和探测技术与方法研究中取得了丰硕成果, 相关文献对此作了详细的阐述(赵柏林, 1995; 吕达仁等, 2003; 张大林, 2005; 郗秀书等, 2008; 邱金桓等, 2008; 王体健等, 2019)。深入理解该学科方向的国内外发展现状、趋势和前沿动态, 是准确制定相应二级代码的前提与基础。

一些新物理、化学原理与技术、新兴材料和计算科学被应用到了大气探测和遥感仪器研发领域, 如高光谱分辨率激光技术、红外和微波成像、绝对低温辐射定标、纳米技术、相控阵雷达、超光谱成像探测等。而一些原理相对成熟的探测技术也伴随着材料科学和生产技术的发展和提升得到进一步发展和应用, 如小型傅里叶光谱技术、拉曼散射、中高层大气探测技术、下投探空等。同时, 观测平台从车载、船舶、无人机、飞机、飞艇, 发展到火箭、卫星、空间站, 这极大地拓展了大气

观测与探测的应用场景和探测范围。随着探测平台的拓展, 大气观测逐步从城市向极地、沙漠、深空等极端环境发起挑战, 且已从人们生活的大气边界层向平流层和热层延伸。大气观测与探测目前正在向高覆盖、高分辨、高精度方向发展, 并预期在未来实现对地球大气的宏观监控和微观探析。

大气成分探测方法和技术手段在过去二十年也得到了长足的进步, 有力推动了大气污染机制研究等相关学科分支的发展(孙业乐, 2018; Zhou et al., 2020)。在国家“碳达峰、碳中和”需求背景下, 温室气体如二氧化碳(CO_2)、甲烷(CH_4)、水汽(H_2O)和氧化亚氮(N_2O)等, 及其重要同位素如 ^{13}C 、 ^{17}O 和 ^{15}N 等的测量精度和时间分辨率均得到了大幅提升。与此同时, 大气中短寿命物种如大气自由基和大气氧化剂等测量方法和技术也在不断发展, 如化学电离质谱(CIMS), 激光诱导荧光技术(LIF)和差分吸收光谱技术(DOAS)等, 大幅提高了我们对大气自由基化学的认知。在实时在线测量技术和方法快速发展的同时, 由于经济、便携等优势, 基于化学传感器测量大气成分和气溶胶理化特性的技术与方法也在国内外迅速发展和应用, 但受限于标定方法和测量稳定性等影响, 未来仍需进一步发展数据质控方法, 并提高传感器的耐用性。大气污染和气候变化监测需求的日益增长对于大尺度大气成分的精细化探测提出了更高的要求。借助遥感手段, 通过偏振、多角度等先进探测技术, 可提高气溶胶光学性质探测精度(Li et al., 2018a, 2018b, 2019a), 并实现对气溶胶成分的初步识别。同时, 基于国产卫星平台的遥感监测大气污染气体成分(如臭氧及其重要前体物 NO_x 、VOC等)的仪器、方法和应用在过去五年也取得了许多重要进展, 有力支撑了环保和气象业务部门工作(Xia et al., 2021; Liu et al., 2022)。此外, 探测手段的丰富和探测精度的提高促进大气化学模式的快速发展, 急需集合多源、多变量观测以及数据同化方法建立高精度、高时空分辨率的气溶胶和大气成分数据集。

地球气候系统的水循环及其能量平衡对大气动力学、云雾物理、陆—气相互作用等重要的大气科学研究领域具有重要意义。近年来, 对水汽蒸散发、云、降水(黄美元等, 2003)及其相伴的长、短波辐射平衡、潜热释放等过程关键参数的探测水平有了很大发展。除了利用传统的地基通量观测、雨量计观测等手段对地表水汽通量、云、降水进行精

确的点测量之外,地基遥感(赵传峰和杨以坤, 2021)、气象雷达(Zhao et al., 2019; Weber et al., 2021)和卫星(Wang et al., 2019; Letu et al., 2020)遥感技术在该领域也取得了一系列进展。其中,气象雷达是基于云和降水粒子数量、大小、形状、指向和介电性能的遥感观测,通过双偏振、双波长等雷达技术的发展,能获取云和降水系统内部三维立体空间的粒子相态、大小分布等微物理结构特征,并提高定量降水估计精度(Huang et al., 2020)。目前国际上正在发展下一代的相控阵雷达探测技术,通过多波束快速扫描,实现对降水精细结构演变特征观测(Kollias et al., 2022)。

在降水的卫星遥感领域,1997年热带降水测量卫星 TRMM(Kummerow et al., 1998; Fu and Liu, 2001; Li and Fu, 2005)携带人类第一颗星载测雨雷达升空,第一次为人类提供了南北纬 37 度之间,全球性降水和潜热(Tao et al., 2006)的三维结构信息,并同时提供了降水云的雷达回波反射率因子、多通道微波亮温、多通道可见光及红外信号的联合测量,为全球性融合降水资料的产生提供了重要基础。2014 年全球降水测量卫星 GPM 携带了人类第一颗双频测雨雷达(Ku、Ka)升空,可以对南北纬 65 度之间,降水粒子的更细致微物理特征、以及潜热释放率(Tao et al., 2006; Li et al., 2019b; 李锐等, 2021)等提供观测信息。更重要的是 GPM 提出了全球降水测量“星群”的概念,即以一颗携带主、被动微波探测仪器的主星为参考,一群携带多通道微波辐射计(被动微波)的伴星组成卫星网络,实现对全球降水的连续探测(Skofronick-Jackson et al., 2017)。另外,中国第一颗、人类第三颗主动测雨雷达卫星风云降水星(谷松岩等, 2022)也即将升空,该星除了携带双频测雨雷达之外,还设计了通道更多的被动微波辐射计、弥补了 GPM 不具备可见光红外探测能力的不足、创新性的增加了对降水云偏振特性的观测,相信将对全球降水三维结构探测带来新的突破。

融合多平台、多通道、多种技术装备,在热点区域开展大气探测联合试验可以最大程度发挥探测功能,在大区域增进人类对复杂大气现象的综合理解并产生较大的科学发现。例如美国能源部和美国宇航局于 2011 年 4~5 月在俄克拉荷马进行了中纬度陆地对流云实验 MC3E(Jensen et al., 2016),通过多元观测的集成与分析,深刻揭示了对流运动

力学和微物理学特征,并为卫星遥感降水算法的改进提供了宝贵资料。中国淮河流域能量与水分循环试验和研究(丁一汇等, 2020)建立了一套覆盖不同尺度(α 、 β 、 γ)、常规与加密观测配合的地基大气与水文观测网,揭示了梅雨期大尺度环流和天气尺度系统的基本特点,揭示了不同类型梅雨锋系统内中小尺度系统发展演化的机理,同时促进了陆面过程与水文过程的模式发展。又如,青藏高原热动力作用与地气相互作用过程对我国的天气和气候具有极其重要的影响作用。经过国家自然科学基金重大研究计划“青藏高原地—气耦合系统变化及其全球气候效应”(周秀骥等, 2022)、国家自然科学基金委基础科学中心项目“青藏高原地球系统”等的推动,已在青藏高原建成了包含地基、空基、天基的多平台、多时空、多要素观测系统,取得了丰硕的成果。

综上所述,大气探测经历了从地基到天基、从宏观到微观,从人工到智能、从单一到协同的发展脉络。从大气科学发展对大气探测的需求来看,还有大量的科学问题亟需解决,需要从原理、技术、方法、仪器等多方面结合具体的观测对象进一步提高。

3 D0509 申请代码解读

3.1 目前 D0509 申请代码的研究方向解读

如 2.1 节所述,在新的大气科学学科申请代码分类中,D0509 属于“支撑技术”板块。然而,由于大气科学所涵盖的时间、空间尺度广,大气现象与人类所能感知的信息之间只有相对有限的联系,如何发现、测量、描述大气现象和参数不仅是一个“技术应用”问题,还是一个具备自身知识体系、研究方法、应用对象的独立学科。因此,研究方向的设立,首先应该把大气探测与遥感的主要学科分支单列出来,鼓励对本领域基础性原理、关键技术、重要仪器的创新性研究,其次是考虑如何利用这些手段对重要的大气参数进行测量。

根据第 2 节的分析,新版 D0509 的研究方向从学科基础层面和具体应用层面设计了 6 个研究方向,如图 1 所示。在学科基础层面,设计有“大气观测基本原理和反演方法”“大气探测与遥感技术和手段”和“大气观测仪器研发和定标”三大研究方向,为该学科的基本原理、实用技术、和硬件仪器奠定学科基础。

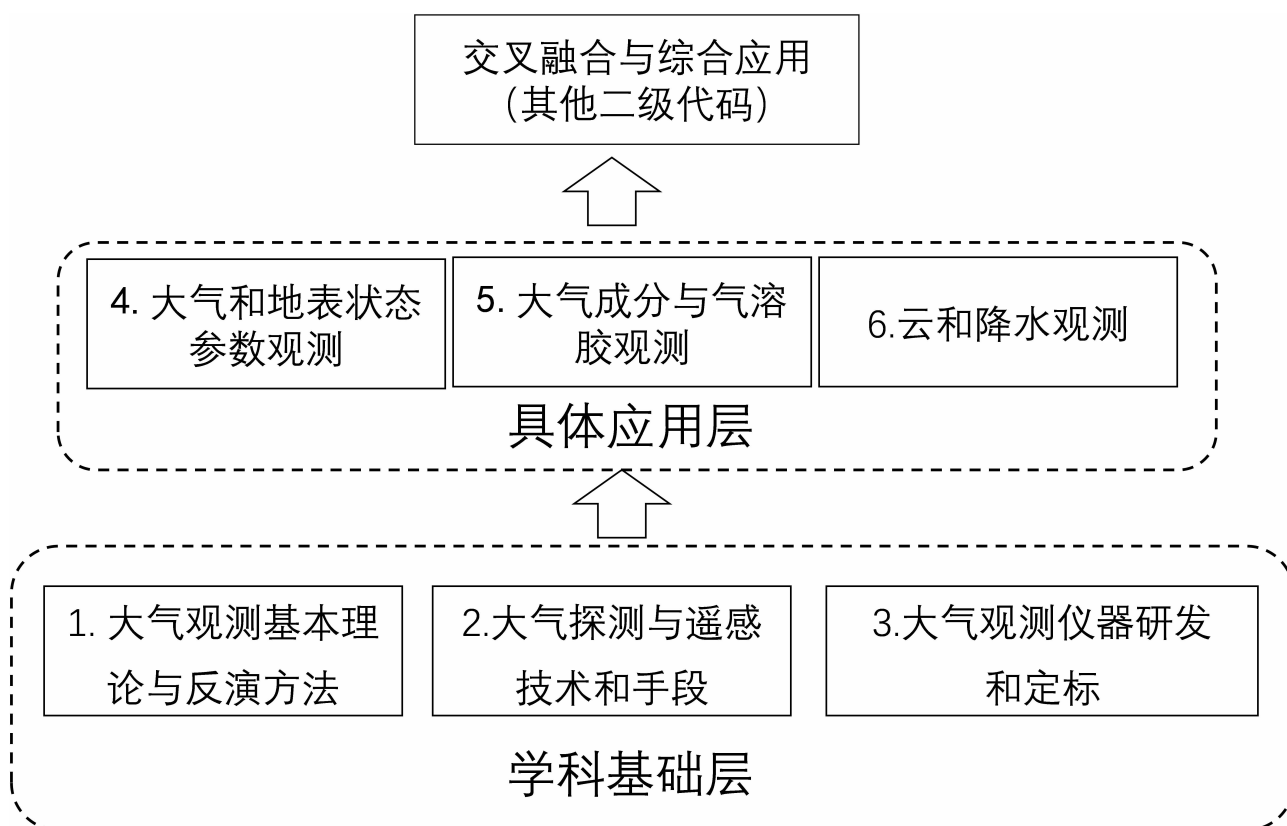


图1 “D0509 大气观测、遥感和探测技术与方法”的6个研究方向之间的逻辑关系及与其他二级代码的关系

Fig. 1 Relationship between the six research directions in D0509 “Atmospheric Observation, Remote Sensing and Detection Technology and Methods” and the relationship with other secondary application codes

概括而言，D0509 所包含的所有研究都可以归为以上三类其一，但是，实际上，大气科学的观测往往又是根据所观测的对象进行分类的，而且针对某一特定对象所研发的观测方法可以同时涵盖“原理”“技术”和“仪器”，如果仅仅包括上述三个研究方向，很可能导致某个研究特定研究对象的申请书难以对应到合适的评审专家。所以，目前的D0509 还设计了另外一个“维度”，以观测对象划分研究方向，包括“大气和地表状态参数观测”“大气成分与气溶胶观测”和“云和降水观测”。

以上两个分类维度的设计类似直角坐标系的 X 和 Y 坐标，而相应的关键词如同坐标值。一旦申请人分别选定了 X 、 Y 两个坐标上的关键词，而评审专家也准确地选择了自己所擅长评审的研究方向和关键词，就可以较为精准地将项目申请人和相应的评审人联系在一起。

研究方向1——大气观测基本原理和反演方法：主要包括原位探测和遥感所依赖的具有共性的基本测量原理，如光谱学、电磁学、辐射传输、涡动力

学；以及在未知量远多于控制方程情形下所发展出的最优化反演理论方法等。该方向下的研究成果对大气观测的学科发展有整体性、普惠性的推动作用，可以说属于D0509 的“基础研究”。

研究方向2——大气探测与遥感技术和手段：主要包括利用上一类研究成果，针对具体的观测目标和测量要求，研发和改进具体的大气观测、探测和遥感的实用技术和手段。

研究方向3——大气观测仪器研发和定标：一切理论和方法，要具体实践到大气探测上，不可缺少各类先进的仪器。仪器的研发和定标也成为了D0509 不可或缺的重要研究方向。该研究方向包括设计、研制和改良大气观测仪器，主要针对大型仪器的预研究和仪器定标研究。

研究方向4——大气和地表状态参数观测：主要针对大气温、压、湿、风、辐射等状态参数，以及和大气过程密切相关的陆地表、海表状态参数的观测研究。

研究方向5——大气成分与气溶胶观测：主要

针对大气中不同气相成分和气溶胶的物理、化学和光学等特性,利用多原理、多方法、多技术或仪器进行观测和分析。

研究方向 6——云和降水观测:针对云和降水的动力、热力和微物理特征、以及相关的能量收支过程参数的观测研究。

3.2 目前 D0509 代码各研究方向下的关键词解读

由于各个研究方向下的关键词总数有一定的限制(20 个左右),同时关键词是帮助申请书精准匹配评审专家的关键“输入”,因此对关键词的选择必须兼顾“概括性”和“具体性”。申请人对两大类研究方向都可以选取关键词,通过取交集的方式有利于精准匹配评审专家。此外,关键词的选取,应同时保留具有归纳和总结性质的关键词和较具体的研究重点、热点关键词,做到既“全覆盖(归纳总结性)”,又“精准匹配(具体)”。表 1 展示了 6 大研究方向及关键词,下面对 6 大研究方向所包含关键词的分类做一简要说明。

研究方向 1——大气观测基本原理和反演方法:
大气与电磁波相互作用的一些关键原理是大气

遥感的基础。如定量遥感大气气体成分依赖于原子和分子光谱、气体选择性吸收等系列理论;定量遥感气溶胶、云和降水依赖于粒子光学特性计算理论和辐射传输理论。注重基础理论研究才可能取得大气探测与遥感原创性突破,因此,该研究方向下的第一大类关键词是探测理论类关键词,如气体吸收、光谱学、激光光谱、光学特性计算、辐射传输理论、湍流理论和涡度相关理论等(参见表 1)。

其次,对上述相互作用过程的反向求解,牵涉到一系列独特的数学、统计方法和理论,这构成了该研究方向的第二类关键词,即反演方法类关键词,如物理反演、统计反演、贝叶斯、协同观测与反演等;

另外,针对大气探测数据的分析研究构成了第三类数据分析理论与方法类关键词,如数据同化、数据再分析、大数据、人工智能、机器学习、质量评估、数据融合等。

必须承认,上述分类并不是严格的,例如第三类关键词中的人工智能、机器学习方法也可以是归属为反演方法类。

研究方向 2——大气探测与遥感技术和手段:

表 1 “D0509 大气观测、遥感和探测技术与方法”研究方向和关键词

Table 1 Research directions and keywords of D0509 "Atmospheric Observation, Remote Sensing, Detection Technology and Methods"

序号	代码下设研究方向	关键词
1	大气观测基本原理和反演方法	探测理论类: 气体吸收、光谱学、激光光谱、光学特性计算、辐射传输理论、湍流理论、涡度相关理论 反演方法类: 反演、物理反演、统计反演、行星大气反演、贝叶斯、人工智能、协同观测 数据分析理论与方法类: 数据同化、数据再分析、大数据、机器学习、质量评估、数据融合
2	大气探测与遥感技术和手段	直接测量类: 实验室观测、云室、烟雾箱、单颗粒、化学成分、同位素、光谱、质谱、色谱、显微分析、电镜、荧光光谱、太阳光谱 间接测量类: 光学遥感、红外遥感、微波遥感、气象雷达、全球定位系统、激光雷达、拉曼光谱、高光谱、超光谱、垂直大气探测、层析、微波链路、偏振 平台类: 卫星遥感、空基遥感、地基遥感
3	大气观测仪器研发和定标	仪器类别和依托平台分类: 原位观测仪器、遥感仪器、探测仪器、偏振仪器、星载仪器、机载仪器 热点仪器: 多频雷达、气象雷达、相控阵雷达、云雷达、降水雷达、激光雷达、太赫兹 仪器校正与定标类: 定标、标准与计量、辐射校正、几何校正、实验室定标、替代定标、星上定标、地基校正、大气订正
4	大气和地表状态参数观测	大气状态参数类: 温压湿风、湍流、垂直速度、大气辐射、大气折射率、大气波导、重力波、垂直大气组分、大气边界层、中高层大气、云迹风 地表状态参数类: 地表辐射收支、蒸散发、碳通量、碳达峰、碳中和、地气通量、地表温度、海表盐度、植被、地表反照率、地表发射率、粗糙度、土壤湿度、积雪
5	大气成分与气溶胶观测	气相成分类: 大气成分、痕量气体、温室气体、大气自由基、大气氧化剂、挥发性有机物、氮氧化物、臭氧、卤素化合物、甲烷、氨气、二氧化碳、反应活性、通量、垂直廓线 气溶胶粒子类: 气溶胶、生物气溶胶、海洋气溶胶、黑碳、棕碳、重金属、气溶胶光学特性、吸湿性、挥发性、粒子谱分布
6	云和降水观测	宏观特性类: 云和降水、三维结构、光学特性、化学特性、可降水量、辐射特性、雷电特性、垂直运动、云廓线、三维风场 微观特性类: 微物理特征、相态识别、潜热、云滴谱、雨滴谱、参数化 研究热点类: 云和降水识别、灾害性天气、检测和分类、雷达估测降水、双偏振雷达、综合性数据集、气溶胶间接效应

直接测量类技术手段关键词：实验室观测、云室、烟雾箱、单颗粒、化学成分、同位素、光谱、质谱、色谱、显微分析、电镜等。

间接测量类技术手段关键词：荧光光谱、太阳光谱、光学遥感、红外遥感、微波遥感、气象雷达、全球定位系统（如水汽测量）、激光雷达、拉曼光谱、高光谱、超光谱等。

由于同样的技术手段，运用于不同平台时，或产生全新的科学问题，因此又按平台进行分类，如空基遥感、地基遥感、卫星遥感等。

研究方向 3——大气观测仪器研发和定标：

仪器类别和依托平台分类关键词：原位观测仪器、遥感仪器、探测仪器、偏振仪器、星载仪器、机载仪器等。

仪器校正与定标类关键词：定标、标准与计量、辐射校正、几何校正、实验室定标、替代定标、星上定标、地基校正、大气订正等。

另外，该研究方向下专设了热点仪器关键词：如多频雷达、气象雷达、相控阵雷达、云雷达、降水雷达、激光雷达、太赫兹等。严格意义上说，这里所列的关键词可能有所重叠，例如相控阵雷达也属于气象雷达的一种，但考虑到它较为先进、发展迅速、应用越来越广泛，因此也单列出来。这虽然降低了关键词的逻辑性，但提高了相关申请项目的匹配精准性。类似情形在其他研究方向中也有所体现，不再一一赘述。

研究方向 4——大气和地表状态参数观测：

大气状态参数类关键词：如温、压、湿、风、湍流、垂直速度、大气辐射、大气折射率、大气波导、重力波、垂直大气组分、大气边界层、中高层大气、云迹风等。

地表状态参数类关键词：如地表辐射收支、蒸散发、碳通量、地气通量、地表温度、海表盐度、植被、地表反照率、地表发射率、粗糙度、土壤湿度、积雪等。国家“双碳战略提出后，对碳达峰、碳中和相关的观测科学与技术研究增加，因此特别加入了这两个关键词。

研究方向 5——大气成分与气溶胶观测：

气相成分类关键词：如大气成分、痕量气体、温室气体、大气自由基、大气氧化剂、挥发性有机物、氮氧化物、臭氧、卤素化合物、甲烷、氨气、二氧化碳等。注意到这里的“大气成分”属于总揽性的关键词，可供少数申请书无法找到准确的关键词时选用，类似情形在其他研究方向中也可能存在。

所以给定方向下的关键词列表本身是在“逻辑自洽”和“精准匹配”之间的平衡所得结果。

气溶胶粒子类关键词：如气溶胶、生物气溶胶、海洋气溶胶、黑碳、棕碳、重金属、气溶胶光学特性、吸湿性、挥发性、粒子谱分布。

研究方向 6——云和降水观测：

宏观特性类关键词：如云和降水、三维结构、光学特性、化学特性、辐射特性、雷电特性、垂直运动、云廓线等。

微观特性类：如微物理特征、相态识别、潜热、云滴谱、雨滴谱等。

研究热点类：如云和降水识别、检测和分类、雷达估测降水、双偏振雷达、综合性数据集、气溶胶间接效应等。

4 结语

2020 年，新版的 D0509 二级代码首次投入使用。经统计，2020 年代码 D0509 的项目申请数为 222 项，占大气学科总数的 13.5%，居第二位（何建军等, 2020）。该结果说明我国的大气科学研究队伍中，有大量人员聚焦于大气观测、遥感与探测研究方向，也反映出该学科方向在整个大气学科中的重要性。同时，6 个研究方向均有研究人员选择，说明研究方向设定是合适的。其中，大气探测与遥感技术和手段研究方向收到了 111 项申请，是大气学科新版二级代码所有研究方向（共 78 个）中收到申请数量最多的。大气和地表状态参数观测方向收到的申请书最少，仅 8 项。一方面可能是因为传统的大气状态参数探测方向相对成熟，另一方面可能是因为地表参数探测有部分研究人员从其他学科（如地理）申请。但随着大气与地表耦合作用研究的交叉融合，特别是地球系统科学的兴起，相信这一研究方向的申请人会逐渐增多。另外，在大气学科 2020 年申请项目 Top5 关键词中，D0509 学科方向的“气溶胶”和“臭氧”入选（基金委内部交流材料）。

值得指出的是，作为支撑技术，D0509 与大气科学学科的分支学科、发展领域的其他二级代码存在确定的边界。自然科学基金委明确指出“支撑技术类代码服务于中国自主知识产权的技术研究，纯技术应用类研究不适合填报此类型代码，而应从“分支学科”或“发展领域”中选择相应的代码。”

(刘哲等, 2020)。也就是说, D0509 所针对的是如何发现和测量大气科学事实与关键参数, 而不是对数据结果的应用。举例而言, 研发卫星遥感原理和方法以揭示我国降水和潜热的三维结构, 并利用所获得结果验证、改进相关的原理方法, 属于 D0509 的范畴; 而直接利用所获得结果研究某地区、某天气和气候过程中的降水三维结构特征及演变则不属于 D0509 的范畴, 而属于大气物理、天气学或气候学等范畴。此外, 有些研究旨在提高大气探测数据精度, 因而对其作出分析、比较、评估研究, 其成果对大气观测、遥感和探测技术与方法的发展有重要推动作用, 事实上也属于 D0509 涵盖的范畴。随着科学技术水平的提高, 大气科学各个领域本身也是处于不断变化、发展过程中。其研究方向、重要关键词不可避免的会出现变化, 因此 D0509 二级代码也会有一定的动态调整。

在将来的 D0509 二级代码的修订中, 需要注意

(1) 征求更广泛的代码意见: 目前的代码优化调整, 征求了大部分学者专家的意见, 但仍有不足或者遗漏之处。为此, 在后续的修改中, 会进一步吸纳更广泛、更深入的专家意见, 并进一步优化调整和完善相关代码, 更好地服务于项目申请人。申请代码是所有学术界专家共同的工具, 每个研究者都有权利、有责任提出自己的见解, 只要保持言论畅通, 并且设置相应的管理机制, 高效吸纳这些合理化建议, 就能保持高质量的代码设计及其关键词匹配。

(2) 更精准的关键词: 在每个研究方向有限的关键词中 (约 20 个), 如何同时体现该方向自身的逻辑合理性和内涵完整性, 又反映该方向发展的前沿热点是后续代码调整考虑的重要因素。一方面, 有些关键词虽然重要, 但已趋于成熟, 相对新意较小, 但也不能保证没有新的突破出现; 另一方面, 有些关键词虽然代表着发展前沿, 但从事该研究的科研人员仍然较少。目前 D0509 研究方向下的关键词只是一定程度上体现了逻辑合理、内涵完整和方向前沿。

限于作者本身水平, 对二级代码的解读还存在很多局限、不足之处, 恳请国内外专家批评指正。

致谢 “D0509 大气观测、遥感和探测技术与方法”二级申请代码的制定是在国内几十位专家学者的共同努力下制定的, 在此表示深深的谢意。本文的写作得到了国家卫星中心张鹏, 大气物理研究所段民征,

空天信息创新研究院胡斯勒图, 北京大学赵传峰, 安徽省气象局黄勇, 合肥物质研究院刘东, 北京大学李婧, 武汉大学李四维, 浙江大学毕磊, 中国科学技术大学赵宏伟等的大力帮助, 在此表示衷心的感谢!

参考文献 (References)

- 丁一汇, 胡雯, 黄勇, 等. 2020. 淮河流域能量和水分循环研究进展 [J]. 气象学报, 78(5): 721–734. Ding Yihui, Hu Wen, Huang Yong, et al. 2020. The main scientific achievements of the first China-Japan cooperative GAME/HUBEX experiments: A historical review [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 78(5): 721–734. doi:10.11676/qxb2020.064
- Fu Y F, Liu G S. 2001. The variability of tropical precipitation profiles and its impact on microwave brightness temperatures as inferred from TRMM data [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 40(12): 2130–2143. doi:10.1175/1520-0450(2001)040<2130:TVOTPP>2.0.CO;2
- 谷松岩, 卢乃锰, 吴琼, 等. 2022. FY-3 气象卫星降水探测能力分析与展望 [J]. 海洋气象学报, 42(2): 1–10. Gu Songyan, Lu Naimeng, Wu Qiong, et al. 2022. Analysis and prospect of precipitation detection capability of FY-3 meteorological satellites [J]. Journal of Marine Meteorology (in Chinese), 42(2): 1–10. doi:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2022.02.001
- 何建军, 郭郁葱, 刘哲, 等. 2020. 2020 年度大气科学领域项目评审与资助成果简析 [J]. 地球科学进展, 35(11): 1201–1210. He Jianjun, Guo Yucong, Liu Zhe, et al. 2020. An introduction to the projects managed by division of atmospheric sciences, department of earth sciences, national natural science foundation of China in 2020 [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 35(11): 1201–1210.
- Houze Jr R A. 2003. From hot towers to TRMM: Joanne Simpson and advances in tropical convection research [M]//Tao W K, Adler R. Cloud Systems, Hurricanes, and the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM). Boston: American Meteorological Society, 37–47. doi:10.1007/978-1-878220-63-9_4
- 胡斯勒图, 施建成, 李明, 等. 2020. 基于卫星数据的地表下行短波辐射估算: 方法、进展及问题 [J]. 中国科学: 地球科学, 50(7): 887–902. Letu H, Shi Jiancheng, Li Ming, et al. 2020. A review of the estimation of downward surface shortwave radiation based on satellite data: Methods, progress and problems [J]. Science China Earth Sciences, 63(6): 774–789. doi:10.1007/s11430-019-9589-0
- Huang H, Zhao K, Zhang G F, et al. 2020. Optimized raindrop size distribution retrieval and quantitative rainfall estimation from polarimetric radar [J]. J. Hydrol., 580: 124248. doi:10.1016/j.jhydrol.2019.124248
- 黄美元, 沈志来, 洪延超. 2003. 半个世纪的云雾、降水和人工影响天气研究进展 [J]. 大气科学, 27(4): 536–551. Huang Meiyuan, Shen Zhilai, Hong Yanchao. 2003. Advance of research on cloud and precipitation and weather modification in the latest half century [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27(4): 536–551. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2003.04.08
- Jensen M P, Petersen W A, Bansemir A, et al. 2016. The midlatitude continental convective clouds experiment (MC3E) [J]. Bull. Amer.

- Meteor. Soc., 97(9): 1667–1686. doi:[10.1175/BAMS-D-14-00228.1](https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00228.1)
- Kollias P, Palmer R, Bodine D, et al. 2022. Science applications of phased array radars [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 103(10): E2370–E2390. doi:[10.1175/BAMS-D-21-0173.1](https://doi.org/10.1175/BAMS-D-21-0173.1)
- Kummerow C, Barnes W, Kozu T, et al. 1998. The tropical rainfall measuring mission (TRMM) sensor package [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 15(3): 809–817. doi:[10.1175/1520-0426\(1998\)015<0809:TTRMMT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1998)015<0809:TTRMMT>2.0.CO;2)
- Letu H, Yang K, Nakajima T Y, et al. 2020. High-resolution retrieval of cloud microphysical properties and surface solar radiation using Himawari-8/AHI next-generation geostationary satellite [J]. Remote Sensing of Environment, 239: 111583. doi:[10.1016/j.rse.2019.111583](https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111583)
- Li L, Dubovik O, Derimian Y, et al. 2019a. Retrieval of aerosol components directly from satellite and ground-based measurements [J]. Atmos. Chem. Phys., 19(21): 13409–13443. doi:[10.5194/acp-19-13409-2019](https://doi.org/10.5194/acp-19-13409-2019)
- Li R, Fu Y F. 2005. Tropical precipitation estimated by GPCP and TRMM PR observations [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 22(6): 852–864. doi:[10.1007/BF02918685](https://doi.org/10.1007/BF02918685)
- Li R, Shao W C, Guo J C, et al. 2019b. A simplified algorithm to estimate latent heating rate using vertical rainfall profiles over the Tibetan Plateau [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 124(2): 942–963. doi:[10.1029/2018JD029297](https://doi.org/10.1029/2018JD029297)
- 李锐, 傅云飞, 黄辰. 2021. 卫星遥感降水潜热的查表法和物理反演法简介 [J]. 暴雨灾害, 40(3): 259–270. Li Rui, Fu Yunfei, Huang Chen. 2021. Review of satellite retrieval of latent heating released from precipitation by Look-Up Table and physical retrieval methods [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 40(3): 259–270.
- Li Z Q, Xu H, Li K T, et al. 2018a. 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 [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 99(4): 739–755. doi:[10.1175/BAMS-D-17-0133.1](https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0133.1)
- Li Z Q, Hou W Z, Hong J, et al. 2018b. Directional polarimetric camera (DPC): Monitoring aerosol spectral optical properties over land from satellite observation [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 218: 21–37. doi:[10.1016/j.jqsrt.2018.07.003](https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2018.07.003)
- Liu C, Hu Q H, Zhang C X, et al. 2022. First Chinese ultraviolet–visible hyperspectral satellite instrument implicating global air quality during the COVID-19 pandemic in early 2020 [J]. Light: Science & Applications, 11(2): 28. doi:[10.1038/s41377-022-00722-x](https://doi.org/10.1038/s41377-022-00722-x)
- 刘哲, 丁爱军, 张人禾. 2020. 调整国家自然科学基金申请代码, 优化大气学科资助布局 [J]. 科学通报, 65(12): 1068–1075. Liu Zhe, Ding Aijun, Zhang Renhe. 2020. Adjusting application codes and optimizing funding layout for the discipline of atmospheric sciences in the National Natural Science Foundation of China [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 65(12): 1068–1075. doi:[10.1360/TB-2020-0146](https://doi.org/10.1360/TB-2020-0146)
- 吕达仁, 王普才, 邱金桓, 等. 2003. 大气遥感与卫星气象学研究的进展与回顾 [J]. 大气科学, 27(4): 552–566. Lü Daren, Wang Pucai, Qiu Jinhuan, et al. 2003. An overview on the research progress of atmospheric remote sensing and satellite meteorology in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27(4): 552–566. doi:[10.3878/j.issn.1006-9895.2003.04.09](https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2003.04.09)
- 鄯秀书, 吕达仁, 陈洪滨, 等. 2008. 大气探测高技术及应用研究进展 [J]. 大气科学, 32(4): 867–881. Qie Xiushu, Lü Daren, Chen Hongbin, et al. 2008. Advances in high technology of atmospheric sounding and application researches [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32(4): 867–881. doi:[10.3878/j.issn.1006-9895.2008.04.14](https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2008.04.14)
- 邱金桓, 王普才, 夏祥鳌, 等. 2008. 近年来大气遥感研究进展 [J]. 大气科学, 32(4): 841–853. Qiu Jinhuan, Wang Pucai, Xia Xiang'ao, et al. 2008. Recent progresses in atmospheric remote sensing researches [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32(4): 841–853. doi:[10.3878/j.issn.1006-9895.2008.04.12](https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2008.04.12)
- Skofronick-Jackson G, Petersen W A, Berg W, et al. 2017. The Global Precipitation Measurement (GPM) mission for science and society [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 98(8): 1679–1695. doi:[10.1175/BAMS-D-15-00306.1](https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00306.1)
- 孙业乐. 2018. 城市边界层理化结构与大气污染形成机制研究进展 [J]. 科学通报, 63(14): 1375–1389, 1374. Sun Yele. 2018. Vertical structures of physical and chemical properties of urban boundary layer and formation mechanisms of atmospheric pollution [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 63(14): 1375–1389, 1374. doi:[10.1360/N972018-00258](https://doi.org/10.1360/N972018-00258)
- Tao W K, Smith E A, Adler R F, et al. 2006. Retrieval of latent heating from TRMM measurements [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 87(11): 1555–1572. doi:[10.1175/BAMS-87-11-1555](https://doi.org/10.1175/BAMS-87-11-1555)
- 王体健, 高太长, 张宏昇, 等. 2019. 新中国成立 70 年来的中国大气科学研究: 大气物理与大气环境篇 [J]. 中国科学: 地球科学, 49(12): 1833–1874. Wang Tijian, Gao Taichang, Zhang Hongsheng, et al. 2019. Review of Chinese atmospheric science research over the past 70 years: Atmospheric physics and atmospheric environment [J]. Science China Earth Sciences, 62(12): 1903–1945. doi:[10.1007/s11430-019-9536-1](https://doi.org/10.1007/s11430-019-9536-1)
- Wang Y P, Li R, Min Q L, et al. 2019. A three-source satellite algorithm for retrieving all-sky evapotranspiration rate using combined optical and microwave vegetation index at twenty AsiaFlux sites [J]. Remote Sensing of Environment, 235: 111463. doi:[10.1016/j.rse.2019.111463](https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111463)
- Weber M, Hondl K, Yussouf N, et al. 2021. Towards the next generation operational meteorological radar [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 102(7): E1357–E1383. doi:[10.1175/BAMS-D-20-0067.1](https://doi.org/10.1175/BAMS-D-20-0067.1)
- Xia C Z, Liu C, Cai Z N, et al. 2021. First sulfur dioxide observations from the environmental trace gases monitoring instrument (EMI) onboard the GeoFen-5 satellite [J]. Science Bulletin, 66(10): 969–973. doi:[10.1016/j.scib.2021.01.018](https://doi.org/10.1016/j.scib.2021.01.018)
- 许健民, 杨军, 张志清, 等. 2010. 我国气象卫星的发展与应用 [J]. 气象, 36(7): 94–100. Xu Jianmin, Yang Jun, Zhang Zhiqing, et al. 2010. Chinese meteorological satellites, achievements and applications [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 36(7): 94–100. doi:[10.7519/j.issn.1000-0526.2010.07.016](https://doi.org/10.7519/j.issn.1000-0526.2010.07.016)

- 张大林. 2005. 大气科学的世纪进展与未来展望 [J]. 气象学报, 63(5): 812–824. Zhang Dalin. 2005. An overview of centenary advances and prospects in atmospheric sciences [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 63(5): 812–824. doi:[10.3321/j.issn:0577-6619.2005.05.025](https://doi.org/10.3321/j.issn:0577-6619.2005.05.025)
- Zhang P, Lu Q F, Hu X Q, et al. 2019. Latest progress of the Chinese meteorological satellite program and core data processing technologies [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 36(9): 1027–1045. doi:[10.1007/s00376-019-8215-x](https://doi.org/10.1007/s00376-019-8215-x)
- Zhang P, Hu X Q, Lu Q F, et al. 2022. FY-3E: The first operational meteorological satellite mission in an early morning orbit [J]. Adv. Atmos. Sci., 39(1): 1–8. doi:[10.1007/s00376-021-1304-7](https://doi.org/10.1007/s00376-021-1304-7)
- 赵柏林. 1995. 大气物理与大气探测的一些进展 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 31(3): 323–338. Zhao Bolin. 1995. Some progress of atmospheric physics and atmospheric exploration [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis (in Chinese), 31(3): 323–338. doi:[10.13209/j.0479-8023.1995.041](https://doi.org/10.13209/j.0479-8023.1995.041)
- 赵传峰, 杨以坤. 2021. 地基云遥感反演进展及挑战 [J]. 暴雨灾害, 40(3): 243–258. Zhao Chuanfeng, Yang Yikun. 2021. Progress and challenges of ground-based cloud remote sensing [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 40(3): 243–258. doi:[10.3969/j.issn.1004-9045.2021.03.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.03.003)
- Zhao K, Huang H, Wang M J, et al. 2019. Recent progress in dual-polarization radar research and applications in China [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 36(9): 961–974. doi:[10.1007/s00376-019-9057-2](https://doi.org/10.1007/s00376-019-9057-2)
- Zhou W, Xu W Q, Kim H, et al. 2020. A review of aerosol chemistry in Asia: Insights from aerosol mass spectrometer measurements [J]. Environmental Science: Processes & Impacts, 22(8): 1616–1653. doi:[10.1039/D0EM00212G](https://doi.org/10.1039/D0EM00212G)
- 周秀骥, 吴国雄, 徐祥德. 2022. 前言——国家自然科学基金重大研究计划“青藏高原地—气耦合系统变化及其全球气候效应”专题 [J]. 大气科学, 46(2): 440–441. Zhou Xiuji, Wu Guoxiong, Xu Xiangde. 2022. Foreword—The major research plan of the national natural science foundation of China: “Changes of the Qinghai–Tibet Plateau Earth–atmosphere Coupling System and its Effects on Global Climate” [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 46(2): 440–441.