

大气科学资助体系布局研究

孙建奇¹, 王会军^{2,1}, 谈哲敏³, 李薇⁴, 刘哲^{4*}

1. 中国科学院大气物理研究所, 竺可桢-南森国际研究中心, 北京 100029

2. 南京信息工程大学, 气候系统预测与变化应对全国重点实验室, 南京 210044

3. 南京大学大气科学学院, 南京 210023

4. 国家自然科学基金委员会地球科学部, 北京 100085

* 联系人, E-mail: liuzhe@nsfc.gov.cn



刘哲 国家自然科学基金委员会研究员, 从事地球科学领域项目管理和资助战略研究等工作。

1 学科发展简史

大气科学是研究地球和行星大气中发生的各种现象及其变化规律, 进而利用这些规律服务社会发展的学科, 是地球科学中最为活跃的分支学科之一。现代意义的定量大气观测以17世纪Medici国际气象观测网络的建立为重要标志^[1]。随着大气探测技术、卫星遥感技术等的发展, 气象观测从地基拓展到空基和天基, 实现了对地球大气全天候的观测, 并逐步向地球系统观测迈进。随着观测网络的建设和观测数据的积累, 大气科学的基础理论于20世纪上半叶开始快速发展, 这以挪威学派和芝加哥学派的形成为代表。经过半个多世纪的发展, 创立了描述大气运动基本热力、动力学过程以及海—气、陆—气相互作用的理论体系, 并推动了天气学、气候学、大气物理学、大气化学等分支学科的发展。理论的发展和计算机技术的进步推动了数值模式的快速发展。自20世纪50年代, 数值模式蓬勃兴起, 预报能力逐步提升, 已成为现代气象预报业务的主要工具。世界气候研究计划(WCRP)组织的国际大气模式比较计划(AMIP)及后续的耦合模式比较计划(CMIP)^[2~6]不断推动数值模式的发展和应用, 为政府间气候变化专门委员会(IPCC)系列科学评估报告和应对气候变化提供了有力的科学支撑。始于20世纪80年代的WCRP大大推动了气候系统理论的发展, 并促进了地球系统科学的形成及系列相关研究。

我国大气科学在过去一个世纪也得到了快速发展。1924年, 中国气象学会成立; 1928年, 中央研究院气象研究所成立。1949年12月中国气象局的前身——中央军委气象局成立, 这标志着新中国气象事业进入了蓬勃发展的新时期。之后, 气象台站网、气象业务和科研等工作大力开展, 奠定了我国气象事业的坚实基础。20世纪80年代开始, 气象现代化建设全面实施, 风云系列气象卫星等新技术广泛应用, 我国大气科学的科研与业务快速发展。我国科学家在东

亚大气环流理论、积云动力学、中尺度动力学、青藏高原气象学、地转适应理论、数值天气预报数学物理基础、季风动力学等重大基础理论方面取得了系统、原创的研究成果^[7~18]。天气预报的准确性和时效性明显提高，服务社会的能力明显增强^[19~22]。此外，几乎与国际同步，我国气候模式的研发工作也逐步开展，并积极参与了历次国际模式比较计划，有力推动了全球和我国气候变化应对与治理工作^[23,24]。当前，我国气象卫星技术已达到国际先进水平，数值天气预报模式基本实现核心技术自主可控，建成规模及综合技术水平位于世界前列的地球系统数值模拟装置，在大气环境污染成因领域取得系列成果，在人工智能和数值预报融合领域具有一定优势^[25~32]。

21 世纪以来，大气科学的研究得到进一步深化与拓展，与其他学科有了更深入的交叉融合。跨学科融合使得大气科学与海洋学、地理学、生态学、地质学、信息科学等领域的结合日益紧密，形成了更加综合的研究方向，为解决复杂的地球科学问题提供了新的思路和方法。

2 学科发展态势及社会需求

大气科学最早是以现象描述为主的学科，后与数学、力学、物理等学科深度结合，实现了基础理论的突破。大气科学的研究首先关注大气内部热力和动力过程及其影响，提出了锋面气旋理论^[33]、大气长波理论^[34]、斜压不稳定理论^[35]、混沌理论^[36]等。随着研究的深入，发现大气与海洋、陆面等的相互作用对天气气候具有重要影响，提出了厄尔尼诺—南方涛动（ENSO）动力学^[37,38]等气候系统圈层耦合理论。随着地球系统概念的提出，多圈层相互作用的重要性日益凸显，大气科学必将实现多学科的深度交叉融合，促进复杂系统动力学等的发展，实现大气科学研究走向精细化、智能化，进而更好地服务社会的可持续发展（图 1）。

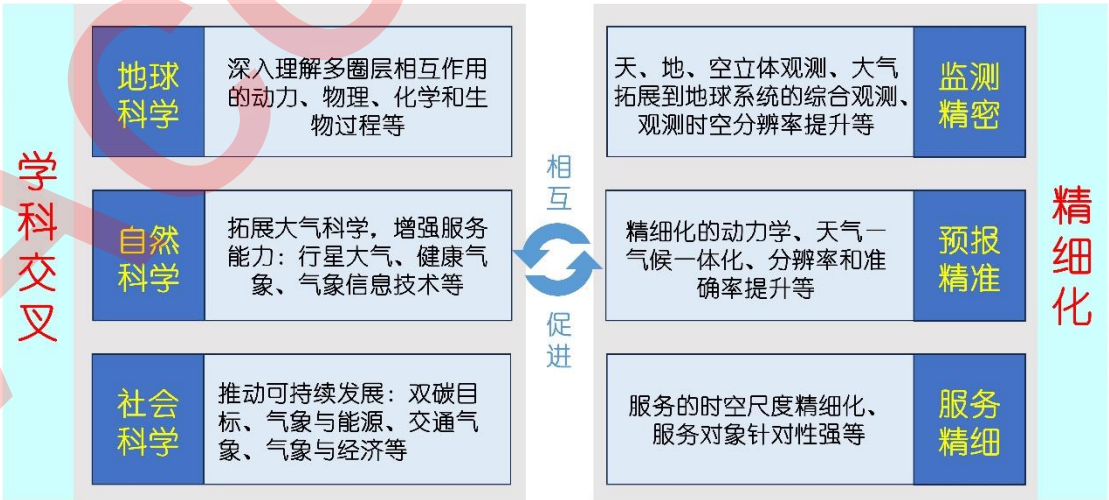


图 1 大气科学学科发展态势

Figure 1 Development trend of atmospheric science

大气科学对社会发展具有重要的支撑作用。世界气象组织和联合国减少灾害风险办公室联合发布的《天气、气候和水极端事件造成的死亡和经济损失图

集（1970 - 2019）》显示：1970~2019 年，天气、气候和水相关的灾害占有所有灾害的 50%，占有所有报告死亡人数的 45%，占有所有报告经济损失的 74%。由此可见，社会经济发展和人民生命安全对气象服务的需求日益迫切。

大气科学与国家安全紧密相关。我国 97 个国民经济行业中，大气科学对超过 60% 的行业有着直接或间接的影响。党的二十大报告提出“以中国式现代化全面推进中华民族伟大复兴”。中国式现代化要实现高质量发展，促进人与自然和谐共生，推动构建人类命运共同体，创造人类文明新形态。但近年来高温干旱、暴雨、洪涝、台风等极端天气气候事件频繁发生，环境污染事件屡屡出现，对社会经济的高质量发展和人民生命健康造成了严重威胁。中国气象局发布的气候公报显示：1991~2022 年，平均每年气象灾害直接经济损失超 2400 亿元，且呈上升趋势。随着全球变暖加速和气候极端化加剧，给气象预报预测水平和防灾减灾能力提出了更高的要求^[39]。此外，如何应对、减缓和适应由人类活动引起的气候变化问题，是全人类面临的共同挑战。要解决上述问题和挑战，需要深入理解天气—气候—环境系统与人类活动的相互影响机制。因此，大气科学发展的纲领性科学问题可总结为“天气—气候—环境系统的自然变率及其与人类活动互馈”，纲领性技术问题总结为“天气—气候—环境系统的无缝隙精准和智能预测”。

3 学科重点领域

在对整个大气科学进行体系化梳理和需求研判的基础上，针对大气科学发展的纲领性科学和技术问题，面向重大科学前沿和国家需求，凝练出了六个重点领域（图 2）。其中，“能量水分循环与季风”聚焦气候变化背景下地球多圈层耦合关键过程与季风变异，提升对地球系统变化的认知，支撑人类生存环境安全和优化；“灾害性天气”旨在突破跨尺度、无缝隙的精准预报理论和方法，提升预报水平，维护人民生命安全；“大气环境与健康”破解大气理化耦合机制、提升健康风险科学认知，保障人体健康；“地球—社会经济系统耦合”聚焦地球系统大数据构建、地球—社会系统耦合机理、数值建模与气候变化应对，助力数字中国和双碳战略目标；“动力学—人工智能融合预报预测”旨在推动大气科学与信息科学深度融合，助力新质生产力和智慧化转型；“重大复合气象灾害”聚焦重大复合气象灾害的机理、预报预测、风险防范与应对，构筑国家防灾减灾第一道防线。上述重点领域的科学突破，可望从天气、气候、环境三大领域，深入对地球与社会系统互馈机制的科学认识，突破数值模式、动力学—人工智能融合预报预测等关键核心技术，推动无缝隙精准和智能预报预测的发展，构建灾害防范体系，增强大气科学服务社会的整体能力，从而支撑国家防灾减灾、气候变化应对、双碳目标、生态文明建设等重大需求。

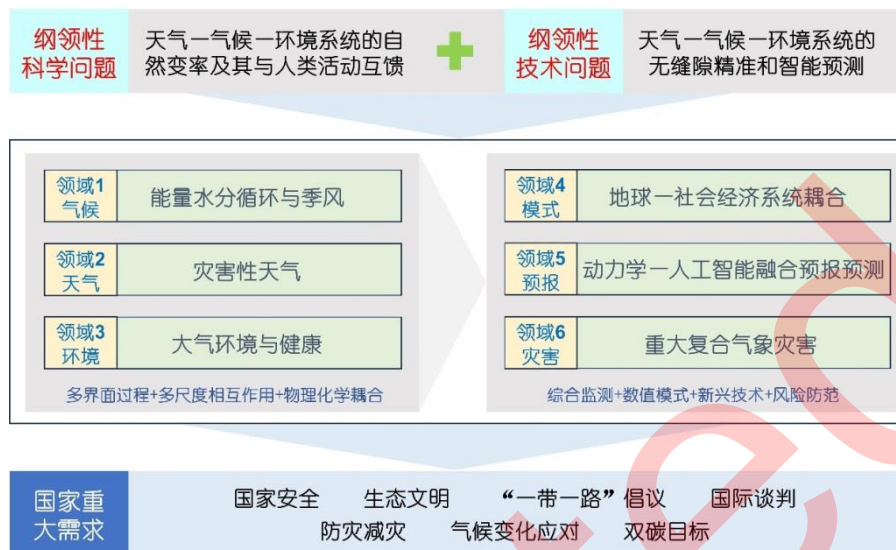


图 2 大气科学学科重点资助领域结构.

Figure 2 Structure of the key funding areas of atmospheric science

3.1 能量水分循环与季风

地球系统变化的复杂性主要表现为各圈层内部变化与多圈层相互作用的叠加，其中多圈层相互作用的核心是圈层间的能量、水分交换及其伴随的物理、化学和生物过程。季风是全球最典型的气候系统之一，影响全球约三分之二的人口，其异常对自然环境和人类社会造成重大影响。该领域关键的科学问题是：地球系统内的物质—能量—动力过程及其驱动季风异常的机制。具体研究内容包括地球系统多圈层耦合关键的能量水分循环过程、季风系统变异机理，以及进一步的两者相互作用。

(1) 能量水分循环过程. 针对季风区、干旱半干旱区、极地、青藏高原、特大城市（群）下垫面等重点关注区域，开展多尺度能量和水分循环过程及其变化机制研究，包括水分和能量交换、地球系统不同界面物理、化学、生物过程等；开展全球变暖和人类活动对能量和水分循环过程的影响研究。

(2) 季风系统变异机理. 开展季风系统（包括季风降水、温度、季风环流等）多时空尺度变异研究，揭示变异特征；研究大尺度环流、边界层过程及下垫面异常、平流层—对流层相互作用等对季风系统变异的影响机制；开展人为和自然外强迫影响季风系统变异的检测归因研究；开展气候系统内部变率和外部强迫对季风变异的协同影响研究。

(3) 能量水分循环过程与季风系统相互作用. 开展多尺度能量水分循环过程与季风系统相互作用的机制研究，包括水汽输送与相变、能量转化与输送和季风系统变异的相互作用，生物化学过程、全球变暖和人类活动等对能量水分循环过程与季风系统相互作用的影响；在此基础上，发展能量水分循环与季风变异的预测理论和技术。

3.2 灾害性天气

台风、暴雨、强对流、风暴、寒潮、高温等灾害性天气常导致巨大的人员伤亡和财产损失，提高防灾减灾能力的关键是提高预报的准确率和延长预报时效，从分钟到季节尺度的无缝隙预报是重要的发展方向。该领域关键的科学问题是：不同尺度灾害性天气系统间相互作用及影响演变的过程和机理。具体研究内容包括自然过程、人类活动的影响，以及在此基础上的无缝隙天气预报理论和方法的发展。

(1) 灾害性天气系统演化过程. 研究灾害性天气系统内部的热动力过程以及外强迫的作用，深入理解灾害性天气系统的结构特征和演变规律；在此基础上，深入研究各种天气系统之间的相互作用过程，揭示灾害性天气系统间的跨尺度作用机理，为无缝隙预报提供理论支撑。

(2) 人类活动影响下的灾害性天气系统. 深入揭示气候变化导致的灾害性天气环境场的改变，以及人类活动引起的温室气体和气溶胶排放、能量传输及转换以及下垫面的变化等引起的灾害性天气发生演变规律的改变，进而提高受人类活动影响的灾害性天气系统的预报能力。

(3) 无缝隙天气预报理论与方法. 发展不同时间尺度天气系统的预报理论与方法，研究不同尺度天气系统的可预报性，发展概率预报，进而发展从分钟到季节时间尺度的灾害天气预报方法，为天气灾害风险预警提供支撑。

3.3 大气环境与健康

大气环境是人类赖以生存的空间，大气成分变化可引起空气污染，加剧气候变化，威胁人群健康和生态系统安全，带来严重的经济损失。该领域关键的科学问题是：人类活动引起大气成分变化与大气化学物理跨尺度多相态耦合对天气、气候和环境的影响及其生态与人群健康风险的传递与级联效应。具体包括大气成分变化、理化相互作用及对生态和人群健康影响三个层面的链式研究。

(1) 大气成分变化关键过程. 聚焦排放与沉降、大气氧化性、多相态过程等方向。其中排放与沉降主要考虑物理过程、大气氧化性考虑化学过程、多相态则聚焦化学物理耦合过程，深入研究气候变化背景下人为和自然排放变化、大气成分圈层交换通量和干湿沉降、大气氧化性驱动的活性成分变化、大气成分多相态化学物理转化等，发展三维多相高分辨观测和全耦合大气化学模型，阐明决定大气成分变化的关键过程。

(2) 多尺度化学物理相互作用. 聚焦小尺度、中尺度和大尺度的化学物理过程，深入研究湍流—化学、边界层—气溶胶、大气成分—天气、气溶胶—辐射、气溶胶—云—降水—气候等之间的相互作用，厘清数值模式中亟需刻画的关键理化交互过程，发展多尺度耦合模型和理化耦合同化再分析技术，阐明多尺度的天气气候系统对大气成分变化的影响和反馈。

(3) 多尺度生态和人群健康影响. 研究气候变化、极端天气、大气污染对农业和碳汇的影响，尤其强调气候—天气—污染—生态关系链中植被的响应与反馈，研究多尺度大气污染暴露与人群健康影响，健全生态防灾减灾和人群健康气象技术体系；发展有毒有害物质识别和筛选方法，建立耦合评估模型，阐明不同尺度下气候—天气—污染对生态系统和人群健康的影响。

3.4 地球—社会经济系统耦合

地球系统模式和综合评估模型是研究气候变化和人类活动关系的主要工具。前者主要描述地球系统中复杂的动力学、热力学和生物化学等过程，后者主要整合了能源、经济、政策、气候变化的影响等过程。该领域的关键科学问题是：定量刻画地球系统跨圈层相互作用过程及其与人类活动的耦合。具体内容包括数据构建、模式发展、耦合与气候变化应对三方面逐层递进的研究。

(1) 监测及数据构建. 开展地球系统多圈层的原位探测、遥感探测以及综合性探测实验等；发展资料同化和多源数据融合技术，构建高质量、长序列、多圈层覆盖的地球系统格点化再分析数据集；进一步构建地球—社会系统大数据。

(2) 地球系统模式构建及模拟. 研制满足大规模和异构众核计算的高效、稳定且能量和物质循环守恒的高精度模式动力框架；发展多圈层、跨尺度耦合的生物物理化学过程参数化方案以及高效计算技术；研发多尺度、多圈层耦合的同化理论和技术方法；构建包含大气、海洋、海冰、陆面、陆地冰川等分量的地球系统模式，支撑地球系统精细化数值模拟、预测和预估研究。

(3) 地球—社会经济系统耦合及气候变化应对. 发展能源经济、经济社会、气候变化损失、政策管理、人体健康等分量模型，构建社会经济系统模型；研发耦合关键技术，实现地球系统模式与社会经济系统模型的双向耦合；开展降碳减污、碳源汇与碳循环、清洁能源、气候工程、双碳预测与路径优化、社会经济与人体健康等气候变化应对和减缓研究。

3.5 动力学—人工智能融合预报预测

动力学与人工智能（AI）相融合是大气科学预报预测的新兴领域和重要发展方向。可用于改进数值模式的计算方案和物理参数化方案、数据同化和预测技术，以提高天气、气候和环境系统预报预测的准确性和时效性。该领域的关键科学问题是：动力模式与人工智能融合技术与预报模型的可行性、可解释性以及可适应性。具体研究内容是从数值模式、同化方法、预报预测方法三个层面实现与人工智能的融合。

(1) 融合数值模式. 基于动力学方法和 AI 技术改进数值模式复杂物理过程参数化方案、优化关键参数；发展数值模式中次网格物理过程的 AI 替代方案；研制基于 AI 的数值算子，提升数值模式计算效能；发展中央处理器（CPU）/图形处理器（GPU）兼容方案、基于 AI 的并行求解器等，优化数值模式。

(2) 融合同化方法. 基于 AI 算法，建立地基、空基和天基观测资料的预处理技术，实现观测资料的质量控制、偏差订正和数据清洗等；研发基于物理约束的 AI 观测算子，提升数据处理效能；基于 AI 技术，优化同化算法与关键参数等，发展融合同化方法。

(3) 融合预报预测方法. 研发 AI 预报预测小模型、大模型；研究 AI 技术和模式扰动融合算法，发展高效的集合预报技术；发展 AI 和动力学相结合的偏差溯源、误差订正方法；研发天气和气候模式产品的 AI 降尺度和多模式融合技术，提升预报预测效能。

3.6 重大复合气象灾害

气象灾害是我国最为主要的自然灾害，其导致的经济损失占全部自然灾害的 70%左右。随着全球变暖，复合气象灾害愈发频繁，其影响远高于单一灾害，对防灾减灾和气候变化应对提出更大的挑战。该领域的关键科学问题是：多尺度过程叠加的非线性放大效应及其导致灾害聚集与传递的动力学机理。具体研究内容包括大气科学三大领域的灾害：天气灾害、气候灾害和环境灾害。

(1) 极端天气及次生灾害. 聚焦暴雨—城市内涝、暴雨—滑坡泥石流、低温—冷害/冻害、台风—风暴潮、冰雹—雹害等，研究其形成过程中水汽和不稳定能量等热动力特征的非线性变化，探讨气溶胶—云—降水相互作用以及跨尺度相互作用对灾害的影响机理，厘清极端天气及次生灾害事件中多致灾因子的耦合作用和非线性放大效应；有效利用高时空分辨率的相控阵雷达网和新一代卫星，结合 AI 技术，开发极端天气及次生灾害的自动识别、追踪和报警技术；对不同的承灾体，研究极端天气及次生灾害的致灾机理，建立风险评估模型；开发有效的群策群防体系，降低灾害风险。

(2) 复合极端气候灾害. 研究不同类型复合极端气候灾害形成机理与致灾过程，分析多种致灾因子协同影响复合极端气候灾害变化的放大效应，揭示大气热力和动力过程和驱动因素叠加影响复合极端气候灾害的物理过程；研究气候变化对复合极端气候灾害的影响机理，构建复合极端气候灾害致灾物理模型；识别复合极端气候灾害的可预测源，发展风险预测评估理论，研发危害性分析与评估技术，增强复合极端气候灾害的风险预测与防范能力。

(3) 环境与气候变化协同致灾. 研究臭氧空洞、野火、沙尘暴、酸雨、火山喷发等事件的频率和强度变化及其生态影响、突发性灾害（如核电站事故导致的有毒有害物质大气迁移）、以及重污染事件等对人群健康的影响；发展多要素监测、灾害事件和空气污染预报预警技术，建立有毒有害物质迁移和生态健康风险评估体系、健康驱动的降碳减污协同治理体系等。

4 科学理念和方法变革

大气科学的发展历经了多次科学理念和方法变革。随着温度计、气压计等观测仪器的出现，大气科学从定性判识走向定量观测的时代；随着数学、力学、物理等学科的发展，大气科学实现跨越式变革，锋面理论、大气长波理论、混沌理论等相继出现，建立了大气科学的重要理论基础；随着计算机等科学的快速发展，大气科学与之交叉融合，开创了地球科学的数值模拟试验研究，实现了天气气候的定量预报预测，服务社会能力显著提升。当前，国际地学进入地球系统科学时代，大气科学有力推动了地球系统科学概念的形成和学科交叉的发展。在此背景下，大气科学需要从地球系统科学的视角研究大气，精细刻画地球系统多圈层、跨尺度的物理、化学、生物等耦合过程，拓展大气科学学科知识链的长度，深度融合大气科学与信息科学和社会科学等，实现大气科学定量化研究走向精细化、智能化，更好地服务于社会的可持续发展。

要突破大气科学纲领性科学和技术问题，亟需采用“观测—机理—预测—服务”的整体性研究思路，构建地球系统多要素“空天地”一体化、精细化观测技术体系，建立物理机制与数据驱动相结合的研究体系，发展天气—气候—环境无缝隙精准预报预测系统，探索大气科学与社会科学相结合的研究范式，

提升大气科学的社会服务能力，保障社会的可持续发展。

5 现有团队、平台和人才基础

我国大气科学经过多年的发展，基本形成了多层次、多维度、多领域人才体系，强有力地推动了大气科学学科的发展。其中，现有中国科学院和中国工程院院士 30 余人，中青年领军人才 200 余人，多集中在气候学、天气学、大气环境、大气探测和模式发展等研究领域。

依据设有大气科学一级学科博士点和硕士点的高校和科研院所 2020~2023 年招生录取数据统计，现阶段大气科学专业在读博士和硕士研究生共计约 5000 人，其中博士研究生 1600 余人，硕士研究生 3300 余人，为大气科学的未来发展提供了充足的人才储备。

自 2015 年来，大气科学依托科技部创新人才推进计划重点领域创新团队和自然科学基金委卓越研究群体项目、创新研究群体项目及重大项目，形成 10 余个国家级重点研究团队，分布在高等院校、科研院所及国家气象业务部门。这些团队聚焦科学前沿、国家需求和人才培养，在天气与气候系统、大气环境、预报预测等领域开展创新研究，取得了系统性、原创性研究成果，培养了一批优秀的中青年骨干科学家。

目前大气科学国家级研究平台主要包括地球系统数值模拟大科学装置（1 个）、全国重点实验室（5 个）、国家级野外观测台站以及数据平台（国家气象信息中心）等，兼顾了基础研究、应用基础研究的需求。这些学科平台主要聚焦在地球系统模式、季风动力学、大气边界层、大气化学与环境、灾害性天气动力学等方向的研究。

6 未来展望

如上所述，大气科学经过多年的发展，成为了地球系统科学体系中的引领性学科，有力地支撑了全球经济的发展和实施国家重大战略。在新的国际和国内形势下，我国大气科学的发展面临诸多挑战，但机遇与挑战并存。

建设世界科技强国，要持续加强基础研究，催生原始创新^[40,41]。大气科学对标服务人类生存环境安全和社会经济可持续发展的目标，其基础研究的前瞻性和原创性十分重要。经过过去百年的发展，大气科学的基础理论已经得到显著加强。但是我们仍需清醒意识到，大气科学仍有许多基础性科学问题尚未解决；特别是，在全球变暖背景下，天气气候系统呈现出诸多新特征，如极端事件频发、群发等。这需要我们一方面重新审视已有基础理论并加以完善，另一方面要不断探索新规律，以基础研究创新夯实大气科学的理论之基。此外，大气科学还应该发挥国际合作的优势，围绕气候变化等全球问题，拓展和深化中外联合科研，不断融入全球创新网络^[40]。自然科学基金委作为国家资助基础研究的主渠道，需持续加强顶层设计和资助体系布局优化，坚持原始创新、继承创新、开放创新一体设计^[42]。聚焦国际科学前沿和国家重大需求背后的关键科学问题，处理好自由探索和需求牵引的资助导向；持续加强优势学科发展，同时重视培育新兴学科、扶持薄弱学科^[43]，从而推动大气科学基础研究的深度和广度。

对标国家提出的气象高质量发展“监测精密、预报精准、服务精细”的要求，大气科学在基础研究的基础上，以国家的重大需求为导向，不断拓展应用

领域，解决社会和经济迫切亟需的现实问题。进一步完善综合观测网络，发展基于新兴技术的资料同化和多源数据融合方法，显著提升地球系统的观测精度与水平；构建更加完善的天气—气候—环境一体化数值模式，结合人工智能等新兴技术，增强预报产品的精细和精准程度；增强气象服务意识，从时间、空间和对象等多个维度实现精细化服务，有力支撑国家防灾减灾、社会经济发展、人体健康等重大需求，服务于国家的高质量发展。

双碳目标对大气科学的发展带来新的机遇与挑战。为防范气候变化带来的风险，需要科学认识地球系统与人类经济社会系统之间的相互作用，评估双碳目标完成过程中对自然和经济社会可持续发展带来的潜在风险，以及清洁能源的开发利用等多个方面。需进一步拓展大气科学的学科交叉，不仅限于大气科学与其他自然科学之间的交叉融合^[44]，这需大气科学与社会科学进行主动交叉。这将进一步突破大气科学研究的范式，开辟大气科学研究的新赛道，增强服务社会发展的能力，开创我国大气科学发展的新格局。

随着大气科学应用场景的不断拓展，需积极拓展资助渠道，引导企业和其他社会组织等资金开展联合资助，探索和建立联合资助新机制，促进成果转化，以创新研究提升大气科学对行业的服务能力。

在未来重大研究计划方面，积极响应国家提出的《积极牵头组织国际大科学计划和大科学工程方案》的战略部署，凝练大气科学领域的前沿基础科学问题，结合我国的现实需求与研究现状，提出并设立我国主导的国际大科学研究计划，汇聚国内外优势科研力量协同攻关，提升我国科学家在国际大气科学界的影响力，从而更好地服务人类命运共同体的构建。

致谢：本项梳理工作得到了国家自然科学基金（42342063）的资助。在此期间，共召开二十五次会议，张人禾院士、戴永久院士、张小曳院士、黄建平院士、朱彤院士、沈学顺院士及大气科学领域专家共计六百余人次参会讨论，作出了突出贡献，在此一并表示感谢。

参考文献

- 1 Camuffo D, Bertolin C. The earliest temperature observations in the world: the Medici Network (1654–1670). *Clim Change*, 2012, 111: 335-363
- 2 Gates W L, Boyle J S, Covey C, et al. An overview of the results of the Atmospheric Model Intercomparison Project (AMIP I). *Bull Am Meteorol Soc*, 1999, 80: 29-56
- 3 Meehl G A, Covey C, Delworth T, et al. The WCRP CMIP3 multimodel dataset: A new era in climate change research. *Bull Am Meteorol Soc*, 2007, 88: 1383-1394
- 4 Taylor K E, Stouffer R J, Meehl G A. An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bull Am Meteorol Soc*, 2012, 93: 485-498
- 5 Eyring V, Bony S, Meehl G A, et al. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geosci Model Dev*, 2016, 9: 1937-1958
6. Dunne J P, Hewitt H T, Arblaster J, et al. An evolving Coupled Model Intercomparison Project phase 7 (CMIP7) and Fast Track in support of future climate assessment. *EGUsphere*, 2024, <https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-3874>

- 7 Staff Members of the Section of Synoptic and Dynamic Meteorology. On the general circulation over Eastern Asia (I). *Tellus*, 1957, 9: 432-446
- 8 Blumen W, Washington W M. Atmospheric dynamics and numerical weather prediction in the People's Republic of China 1949–1966. *Bull Am Meteorol Soc*, 1973, 54: 502-518
- 9 Ye D Z, Gao Y X. Meteorology of the Tibetan Plateau (in Chinese). Beijing: Science Press, 1979 [叶笃正, 高由禧. 青藏高原气象学. 北京: 科学出版社, 1979]
- 10 Zeng Q C. Mathematical and physical foundations of numerical weather prediction (in Chinese). Beijing: Science Press, 1979 [曾庆存. 数值天气预报数学物理基础. 北京: 科学出版社, 1979]
- 11 Tao S Y, Chen L X. The East Asian summer monsoon. In: *Proceedings of International Conference on Monsoon in the Far East*, 1985: Tokyo, Nov. 5-8, 1-11
- 12 Ding Y H. Some aspects of rainstorm and meso-scale meteorology (in Chinese). *Acta Meteorol Sin*, 1994, 52: 274-284 [丁一汇. 暴雨和中尺度气象学问题. 气象学报, 1994, 52: 274-284]
- 13 Gao S T, Zhao S X, Zhou X P, et al. Progress of research on sub-synoptic scale and mesoscale torrential rain systems (in Chinese). *Chin J Atmos Sci*, 2003, 27: 618-627 [高守亭, 赵思雄, 周晓平, 等. 次天气尺度及中尺度暴雨系统研究进展. 大气科学, 2003, 27: 618-627]
- 14 Huang R H, Chen W, Ding Y H, et al. Studies on the monsoon dynamics and the interaction between monsoon and ENSO cycle (in Chinese). *Chin J Atmos Sci*, 2003, 27: 484-502 [黄荣辉, 陈文, 丁一汇, 等. 关于季风动力学以及季风与ENSO循环相互作用的研究. 大气科学, 2003, 27: 484-502]
- 15 Wang H J, Xu Y F, Zhou T J, et al. Atmospheric science: A vigorous frontier science (in Chinese). *Adv Earth Sci*, 2004, 19: 525-532 [王会军, 徐永福, 周天军, 等. 大气科学: 一个充满活力的前沿科学. 地球科学进展, 2004, 19: 525-532]
- 16 Tan Z M, Zhao S X, Sun J H, et al. Structure and evolution mechanism of meso- β -scale strong convective systems in Southern China (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2013 [谈哲敏, 赵思雄, 孙建华, 等. 中国南方 β 中尺度强对流系统结构与机理. 北京: 气象出版社, 2013]
- 17 Wu G X, Liu Y M, Bao Q, et al. Recent progresses on dynamics of the Tibetan Plateau and Asian summer monsoon (in Chinese). *Chin J Atmos Sci*, 2016, 40: 22-32 [吴国雄, 刘屹岷, 包庆, 等. 青藏高原和亚洲夏季风动力学研究的新进展. 大气科学, 2016, 40: 22-32]
- 18 Huang J P, Chen W, Wen Z P, et al. Review of Chinese atmospheric science research over the past 70 years: Climate and climate change. *Science China Earth Sciences*, 2019, 62: 1514–1550 [黄建平, 陈文, 温之平, 等. 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. 中国科学: 地球科学, 2019, 49: 1607-1640]
- 19 Wu R S, Tan Z M, Wang Y. Discussions on the scientific and technological development of Chinese operational weather forecast (in Chinese). *J Meteorol Sci*, 27: 112-118 [伍荣生, 谈哲敏, 王元. 我国业务天气预报发展的若干问题思考. 气象科学, 27: 112-118]
- 20 Jiao M Y, Gong J D, Zhou B, et al. An overview of the development of weather

- forecasting (in Chinese). *J Appl Meteor Sci*, 2006, 17: 594-601 [矫梅燕, 龚建东, 周兵, 等. 天气预报的业务技术进展. *应用气象学报*, 2006, 17: 594-601]
- 21 Zhang R H, Shen X S. Development of China's new generation national operational numerical forecasting system GRAPES (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2008, 53: 2393-2395 [张人禾, 沈学顺. 中国国家级新一代业务数值预报系统 GRAPES 的发展. *科学通报*, 2008, 53: 2393-2395]
- 22 Xu J M, Yang J, Zhang Z Q, et al. Chinese meteorological satellites, achievements and applications (in Chinese). *Meteorol Mon*, 2010, 36: 94-100 [许健民, 杨军, 张志清, 等. 我国气象卫星的发展与应用. *气象*, 2010, 36: 94-100]
- 23 Zeng Q C, Lin Z H. Recent progress on the earth system dynamical model and its numerical simulations (in Chinese). *Adv Earth Sci*, 2010, 25: 1-6 [曾庆存, 林朝晖. 地球系统动力学模式和模拟研究的进展. *地球科学进展*, 2010, 25: 1-6]
- 24 Zhou T J, Chen Z M, Zou L W, et al. Development of climate and earth system models in China: Past achievements and new CMIP6 results (in Chinese). *Acta Meteorol Sin*, 2020, 78: 332-350 [周天军, 陈梓明, 邹立维, 等. 中国地球气候系统模式的发展及其模拟和预估. *气象学报*, 2020, 78: 332-350]
- 25 Ding J, Zhu T. Studies on multiphase chemical reactions on the surface of fine particles in the atmosphere (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2003, 48: 2005-2013 [丁杰, 朱彤. 大气中细颗粒物表面多相化学反应的研究. *科学通报*, 2003, 48: 2005-2013]
- 26 Mu M, Wang Q. Applications of nonlinear optimization approach to atmospheric and oceanic sciences (in Chinese). *Sci Sin Math*, 2017, 47: 1207-1222 [穆穆, 王强. 非线性最优化方法在大气-海洋科学研究中的若干应用. *中国科学: 数学*, 2017, 47: 1207-1222]
- 27 Meng Z Y, Zhang F Q, Luo D H, et al. . Review of Chinese atmospheric science research over the past 70 years: Synoptic meteorology. *Science China Earth Sciences*, 2019, 62: 1946–1991 [孟智勇, 张福青, 罗德海, 等. 新中国成立 70 年来的中国大气科学研究: 天气篇. *中国科学: 地球科学*, 2019, 49: 1875-1918]
- 28 Wang T J, Gao T C, Zhang H S, et al. Review of Chinese atmospheric science research over the past 70 years: Atmospheric physics and atmospheric environment. *Science China Earth Sciences*, 2019, 62: 1903–1945 [王体健, 高太长, 张宏晟, 等. 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. *中国科学: 地球科学*, 2019, 49: 1833-1874]
- 29 Dai Y J. Issues in research and development of land surface process model (in Chinese). *Trans Atmos Sci*, 2020, 43: 33-38 [戴永久. 陆面过程模式研发中的问题. *大气科学学报*, 2020, 43: 33-38]
- 30 Shen X S, Wang J J, Li Z C, et al. China's independent and innovative development of numerical weather prediction (in Chinese). *Acta Meteorol Sin*, 2020, 78: 451-476 [沈学顺, 王建捷, 李泽椿, 等. 中国数值天气预报的自主创新. *气象学报*, 2020, 78: 451-476]
- 31 Zhang X, Xu X, Ding Y, et al. The impact of meteorological changes from 2013 to 2017 on PM_{2.5} mass reduction in key regions in China. *Science China Earth Sciences*, 2019, 62: 1885–1902 [张小曳, 徐祥德, 丁一汇, 等. 2013~2017 年气象条件变化对中国重点地区 PM_{2.5} 质量浓度下降的影响. *中国科学: 地球科学*,

- 2020, 50: 483-500]
- 32 Zhang P, Yang J, Guan M, et al. WMO space program and internationalization of FengYun meteorological satellites (in Chinese). *Adv Meteorol Sci Technol*, 2022, 12: 56-63 [张鹏, 杨军, 关敏, 等. WMO 空间计划与风云气象卫星的国际化发展趋势. *气象科技进展*, 2022, 12: 56-63]
- 33 Bjerknes J. Life cycle of cyclones and the polar front theory of atmospheric circulation. *Geofys Publ*, 1922, 3: 1-18
- 34 Rossby C G. Relation between variations in the intensity of the zonal circulation of the atmosphere and the displacements of the semi-permanent centers of action. *J Mar Res*, 1939, 2: 38-55
- 35 Charney J G. The dynamics of long waves in a baroclinic westerly current. *J Atmos Sci*, 1947, 4: 136-162
- 36 Lorenz E N. Deterministic nonperiodic flow. *J Atmos Sci*, 1963, 20: 130-141
- 37 Bjerknes J. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. *Mon Weather Rev*, 1969, 97: 163-172
- 38 Zebiak S E, Cane M A. A Model El Niño-Southern Oscillation. *Mon Weather Rev*, 1987, 115: 2262-2278
- 39 Wang H J, Sun J Q, Chen H P, et al. Global warming acceleration and climate extremization: comments on major climate research advances in China 2024. *Trans Atmos Sci*, 2025, 48: 1-7 [王会军, 孙建奇, 陈活泼, 等. 全球变暖加速和气候极端化—2024年中国气候研究重大进展速评. *大气科学学报*, 2025, 48: 1-7]
- 40 Dou X K. Effectively enhance the capacity for basic research and original innovation. *Qiushi*, 2025 [窦贤康. 切实提升基础研究和原始创新能力. *求是*, 2025]
- 41 Dou X K. High-quality basic research bolsters the building of a world-leading science and technology nation. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2024, 38: 727-731 [窦贤康. 以基础研究高质量发展支撑世界科技强国建设. *中国科学基金*, 2024, 38: 727-731]
- 42 Lan Y J. Enhancing the efficiency of science foundation funding to support the integrated high-quality development of education, science and technology talents. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2024, 38: 223 [兰玉杰. 提升科学基金资助效能助力教育科技人才一体化高质量发展. *中国科学基金*, 2024, 38: 223]
- 43 Di Y B, Meng Q F, Yao Y P. A brief discussion on the five major relationships in the management of National Natural Science Foundation of China: Based on the thinking and practice of its deepening reform. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2022, 36: 785-789 [邸月宝, 孟庆峰, 姚玉鹏. 浅论科学基金资助管理工作的五大关系—基于对科学基金深化改革理念与实践的思考. *中国科学基金*, 2022, 36: 785-789]
- 44 Liu Z, Ding A J, Zhang R H. Adjusting application codes and optimizing funding layout for the discipline of atmospheric sciences in the National Natural Science Foundation of China (in Chinese). *Sci Bull*, 2020, 65: 1068-1075 [刘哲, 丁爱军, 张人禾. 调整国家自然科学基金申请代码, 优化大气学科资助布局. *科学通报*, 2020, 65: 1068-1075]

Research on the layout of atmospheric science funding system

Jianqi Sun¹, Huijun Wang^{2, 1}, Zhemin Tan³, Wei Li⁴, Zhe Liu^{4*}

¹ Nansen-Zhu International Research Centre, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

² State Key Laboratory of Climate System and Risk Management, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

³ School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China

⁴ Department of Earth Sciences, National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085, China

* Corresponding authors, E-mail: liuzhe@nsfc.gov.cn

Atmospheric science, an active branch of Earth science, focuses on phenomena and changes in the Earth's and planetary atmospheres to serve societal development. Over the past century, rapid advances in observations, theories, and numerical models have positioned atmospheric science as a leading discipline in Earth system science, significantly bolstering global development and supporting critical national strategies. Under current international and domestic circumstances, atmospheric science in China faces distinct opportunities and challenges, necessitating the strengthening of systematic research deployment to address frontline scientific priorities and urgent national needs. To this end, coordinated by the atmospheric science division of the Earth Science Department at the National Natural Science Foundation of China, we synthesized the discipline's historical development, societal demands, international research trends, and domestic academic capabilities. This analysis concluded key scientific and technical issues: "the natural variability in the weather–climate–environment system and its mutual feedback mechanisms with human activities", and "seamless, precise, and intelligent prediction of the weather–climate–environment system", respectively. To address the two key issues, six key research areas were proposed: (1) Energy–water cycles and monsoons, examining multi-sphere coupling processes and monsoon dynamics under climate change to enhance the understanding of the Earth system change and optimize the human living environments; (2) Disastrous weather, developing theory and method to deepen disasterous weather understanding and improve the forecasting accuracy, safeguarding people's lives and property; (3) Atmospheric environment and health, unravelling atmospheric physicochemical coupling mechanism to increase scientific understanding of health risks and protect human health; (4) Earth system–socioeconomic coupling, focusing on big data integration, Earth–socioeconomic coupling mechanisms, and numerical modeling to address climate change and support digitalization and dual-carbon strategies of China; (5) Integrated dynamics–artificial intelligence forecasting, fostering the in-depth integration of atmospheric and information sciences to realize intelligence predictions and technological transformation; and (6) Compound meteorological disasters, exploring mechanisms, predictions, and risk prevention for compound meteorological disasters to establish the first line of national disaster defense and resilience. Breakthroughs in these key areas and associated scientific and

technological issues will contribute to the development of new atmospheric science theories, deepen the understanding of the coupling processes of the Earth system's layers, elucidate the intricate feedback mechanisms between the Earth and societal systems, advance prediction capabilities, and enhance the overall ability of atmospheric science to underpin sustainable societal development.

atmospheric science, key scientific and technical issues, key research areas, earth science

Accepted