

· 科技评述:2021 年诺贝尔奖评述(二) ·

## 气候系统和气候变化研究获 2021 年 诺贝尔物理学奖的启示

张人禾<sup>1\*</sup> 刘 哲<sup>2</sup> 穆 穆<sup>1</sup> 谭言科<sup>1</sup> 张 强<sup>3</sup>

1. 复旦大学 大气与海洋科学系/大气科学研究院,上海 200438
2. 国家自然科学基金委员会 地球科学部,北京 100085
3. 清华大学 地球系统科学系,北京 100084

**[摘 要]** 2021 年,诺贝尔物理学奖授予了大气科学领域从事气候系统和气候变化研究的美国科学家真锅淑郎和德国科学家克劳斯·哈塞尔曼。本文通过回顾获奖成果历史背景、分析获奖意义,对本次诺贝尔奖成果做了解读,说明该成果在认识地球气候这一复杂物理系统、甄别自然因素和人类活动对其影响方面的开拓性工作以及在推动人类社会发展中重要作用,进而指出大气科学与其他自然科学和社会科学多学科的交叉融合,是推动气候系统和气候变化研究取得开创性成果的重要原因。本文还对该领域未来发展作了展望,说明了从地球系统科学的视角开展地球系统多圈层相互作用及其与人类活动联系的研究、跨圈层整合的地球观测系统的建立以及地球系统模式的发展,是气候系统和气候变化领域未来重要的研究方向。

**[关键词]** 2021 年诺贝尔物理学奖;气候系统;气候变化;人类活动

2021 年 10 月 5 日,瑞典皇家科学院宣布 2021 年诺贝尔物理学奖一半授予美国科学家真锅淑郎(Syukuro Manabe)和德国科学家克劳斯·哈塞尔曼(Klaus Hasselmann),另一半授予意大利科学家乔治·帕里西(Giorgio Parisi),表彰他们“对理解复杂物理系统的开创性贡献”。三位获奖人中,真锅淑郎和克劳斯·哈塞尔曼为大气科学家,从事气候系统和气候变化研究,他们获奖的理由是“奠定了地球气候变异和人类对其影响的认知基础”和在“地球气候物理模拟、量化变异和可靠预测全球变暖”方面的卓越贡献。

这是与大气科学相关研究第 4 次获得诺贝尔奖。保罗·克鲁岑(Paul Jozef Crutzen)、马里奥·莫里那(Mario Molina)、舍伍德·罗兰(Sherwood Rowland)三位科学家因大气化学研究获得 1995 年诺贝尔化学奖,他们的开拓性贡献是对大气中的化学过程在臭氧形成和分解中的作用给出了解释。艾伯特·戈尔(Albert Arnold Gore Jr.)和联合国政府



张人禾 复旦大学特聘教授,中国科学院院士,从事气候动力学研究,研究方向包括热带大尺度海气相互作用、亚洲季风、青藏高原气象学等。曾荣获国家科学技术进步奖二等奖(排名第 1)、中国青年科技奖等学术奖励。发表 SCI 论文 170 余篇。主持过国家杰出青年科学基金、国家自然科学基金委员会创新研究群体项目、国家自然科学基金委员会重大项目和国家 973 项目等。

间气候变化专门委员会(IPCC)获得 2007 年诺贝尔和平奖,以表彰在增进和传播人为气候变化知识、提出消解人为气候变化对策方面的活动。威廉·诺德豪斯(William Nordhaus)因将气候变化与长期宏观经济分析的结合,获得 2018 年诺贝尔经济学奖。

气候变异和气候变化对人类生存环境以及经济社会发展正在发生重要影响,特别是气候变暖造成的影响已经成为人类社会所面临的巨大挑战,气候变化目前是各国政府和公众以及国际科技界广泛关注的问题。本文评述了 2021 年度两位气候学家获诺贝尔奖的原因和背景、获奖意义,也对此次诺

贝尔奖的启示及该领域研究的未来发展给出了评述。

## 1 获奖原因和背景

地球气候是一个典型的复杂物理系统,其变化具有明显的多时间尺度和多空间尺度特征。时间尺度上主要体现在从季节内、年际、年代际到百年甚至更长尺度,空间尺度可以从局地到全球,并且各种时间和空间尺度的变化还存在相互作用。地球气候的自然变化受到气候系统五大圈层(大气圈、水圈、冰冻圈、生物圈和岩石圈)的影响,海—陆—气相互作用是决定地球气候自然变化的核心。地球气候同时还受到自然和人为两类外强迫因素的影响。自然外强迫主要包括太阳辐射和火山活动,人为外强迫则主要是人类生产、生活使用化石燃料排放进入大气圈的温室气体、气溶胶等物质以及土地利用的变化。因此,地球气候是一个复杂物理系统,认识和理解这一复杂系统,是人类社会所面临的巨大挑战。

20世纪60年代中期,包括真锅淑郎在内的美国“地球物理流体动力学”国家实验室的科学家,相继建立了全球大气环流模式(AGCM)和海洋环流模式(OGCM)。由于地球气候的变异取决于海—陆—气相互作用,单独的AGCM或OGCM无法刻画地球气候及其变异。1969年,真锅淑郎首次建立了涵盖全球大气、海洋和陆面过程的一体化数学模型<sup>[1]</sup>,即全球海气耦合数值模式(A-OCGCM),从此开创了人类对地球气候的多圈层耦合模拟、实现了对地球气候及其变异的量化研究。

对地球气候最主要的人为影响,是人类生产生活使用的化石燃料排放到大气中的二氧化碳所产生的温室效应,造成大气变暖。1960年,美国科学家查里斯·大卫·基林(Charles David Keeling)根据观测,最早发现大气中化石燃料燃烧释放的二氧化碳含量在增加<sup>[2]</sup>。然而大气中的二氧化碳与气候变暖之间的量化关系却一直是个难题,对二氧化碳影响地球气候的程度及其后果缺乏定量认识。1967年,真锅淑郎和合作者建立了在给定相对湿度分布条件下的大气辐射对流平衡数学模型,证明了在实际大气相对湿度分布情形下,二氧化碳加倍可以导致地表大气温度升高大约 $2.3^{\circ}\text{C}$ <sup>[3]</sup>。该工作从理论上开创性地给出了大气二氧化碳增加与大气变暖的量化关系。随后他们进一步利用一个高度简化的三维大气环流模式,发现在二氧化碳加倍的情形下,模式中的对流层增暖(高纬更显著)、水循环加强、平流

层降温<sup>[4]</sup>。这些结果首次系统揭示了大气中二氧化碳增加对大气系统不同分量的影响。

针对复杂地球气候系统,克劳斯·哈塞尔曼1976年创建了一个随机气候变异模型,从时间尺度上分离了模型中快变的“天气系统”(如大气)和慢变的“气候系统”(如海洋、冰冻圈、陆地植被等),将前者作为随机强迫项,说明了慢变“气候系统”是对短周期快变“天气系统”不断随机激发的响应<sup>[5]</sup>。该项研究创造性地建立了复杂地球气候系统中不同时间尺度变化之间的联系,指出了复杂地球气候系统中快变过程对慢变过程的影响。随后在1993年,他提出了一个最优线性滤波器(指纹),用于检测存在自然气候变异噪声时随时间变化的多变量气候变化信号,将该最优“指纹”方法应用于气候观测或模拟资料时,可以得到具有最大信噪比的气候变化检测变量<sup>[6]</sup>。该工作为识别大气中二氧化碳增加对大气变暖的影响提供了基础方法。

## 2 获奖意义

真锅淑郎和克劳斯·哈塞尔曼开创了人类对复杂地球气候系统的理解以及对其变化的量化。特别是在理解和预测人类活动影响地球气候系统方面,真锅淑郎首先量化了大气中二氧化碳增加对大气增温的影响程度,克劳斯·哈塞尔曼提出的气候变化最优指纹检测提供了识别人类活动排放的二氧化碳对大气增温影响的方法。他们的开创性工作,为认识复杂地球气候系统以及人类活动对地球气候系统的影响奠定了科学基础。

真锅淑郎和克劳斯·哈塞尔曼的开创性工作引发了大量的后续研究,特别是气候变暖的人为成因及其影响和风险研究,近几十年得到了各国公众和政府的普遍关注。1988年,世界气象组织(WMO)和联合国环境规划署(UNEP)建立了IPCC,专门针对气候变化的科学事实、社会经济影响、以及未来气候变化风险开展评估。截至目前,IPCC已进行了6次评估报告。其中,2021年8月最新发布的IPCC第六次评估报告第一工作组报告《气候变化2021:自然科学基础》中(<https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i/>),明确指出人类活动影响全球气候变化是毋庸置疑的。在过去2000年中,近50年间的全球地表升温要快于任何其他50年,未来20年全球升温预计将达到或超过 $1.5^{\circ}\text{C}$ ;气候变化加剧水循环,影响降雨特征,增加了极端高温、降水、干旱和热带气旋发生可能性和

强度；冰川、冰盖、积雪显著减少，冻土融化；沿海地区的海平面持续上升，沿海低洼地区将发生更频繁、更严重的洪水和海岸侵蚀。

历次 IPCC 评估报告对气候系统和气候变化的科学认识，为国际社会和各国政府制定应对方案提供了重要依据，为国际气候谈判和决策提供了重要支撑。为了应对和减缓气候变暖对人类社会发展带来的挑战，国际上形成了一系列国际协议，如 1992 年制定的《联合国气候变化框架公约》、1997 年提出的《京都议定书》以及 2016 年实施的《巴黎协定》。由此可以看到，对复杂地球系统以及人类活动影响地球气候系统的科学认识，不仅开创了新的科学领域，提升了对气候系统及其变化的科学认识和理解，同时也对人类社会发展的道路选择产生了重要影响。

### 3 启示和展望

从大气科学相关领域获得 4 次诺贝尔奖来看，这些成果都是基于学科交叉融合，学科交叉融合已成为现代大气科学发展的一个重要特征，是现代大气科学发展的一个固有“基因”和内在动力。这些诺贝尔奖级成果均与“气候系统”和“气候变化”有着密切关系（大气中臭氧的变化也与气候变化相关联<sup>[7]</sup>）。“气候系统”和“气候变化”是“地球系统”的核心内容之一，是驱动 21 世纪地球系统科学发展的一个重要引擎。

从大气科学的发展演化来看，交叉融合推动了现代大气科学的蓬勃发展。随着传统气象学与数学、物理、化学等学科的深度融合，诞生了“大气动力学”“大气物理学”“大气化学”等分支学科，演化成一门从现象、到机理、再到预测的现代科学。随着大气科学在经济社会可持续发展中扮演越来越重要的作用，大气科学与其他相关领域亦在发生有机的交叉融合，“大气环境”“水文气象”“农林气象”“交通气象”“商业气象”“气候经济学”等学科不仅拓展了大气科学研究范畴的外延，也使得“强调过程机理”和“重视预测预报”等理念融入其他学科，推动了其他学科的发展。从知识链条来看，大气学科深远影响着物理、化学等基础学科（如 1995 年诺贝尔化学奖和 2021 年诺贝尔物理学奖成果）和社会经济知识领域（如 2007 年诺贝尔和平奖和 2018 年诺贝尔经济学奖）。目前大气科学与生物学、生态学、医学等领域亦在融合演进，其中，“生态气象”已初步形成理论体系，而“健康气象”方兴未艾。或许在未来，“气候

变化与健康”领域的突破性成果将成为角逐诺贝尔生理学或医学奖的有力竞争者。

从气候系统和气候变化领域的未来发展来看，虽然它们起始于大气科学学科<sup>[8]</sup>，但随着研究的深入和时代发展，其内涵和外延远远超出了大气科学范畴。对气候系统和气候变化的更加深入理解，需要从更广泛的地球系统科学的视角开展研究。地球系统中的物理、化学、生物和社会分量、过程和相互作用，确定了地球（包括生物和人类）状态和动力学<sup>[9]</sup>。其次，应更加注重综合地球观测系统的设计和建立。目前的地球观测系统基本上是为满足单一学科或业务需求而设立<sup>[10]</sup>，未来需要研究建立涵盖地球系统各圈层以及人类活动的空、天、地一体化观测系统，满足气候系统和气候变化领域多学科交叉研究的需求。最后，应更加注重地球系统模式的研发。地球系统模式是研究、评估和预测气候系统和气候变化及其影响的重要工具，在模式中需要包括表征地球系统各圈层的数学物理模型和表征人类活动的社会经济模型，合理体现地球系统的物理、化学和生物过程以及地球系统各分量的相互耦合过程。

从研究范式来看，应更加注重理论、观测和模式发展之间的融合，加强各类研究相互交流，使之互为依托、相辅相成、互相促进。要重视人工智能和大数据等新技术的应用，从数据科学的视角发掘新的知识，并通过揭示数据间的因果关系开展预报预测。对于科研资助和管理部门，除了对仪器、设备等硬件研制进行资助外，应该更加注重资助“软件”（如地球系统模式以及其中的各种分量模式）的研发。另外，除了对前沿热点科学问题进行支持外，还应积极支持“冷门”研究，如当时真锅淑郎所从事的温室气体与大气增温研究就不属于热点研究领域。

### 参 考 文 献

- [1] Manabe S. Climate and the ocean circulation: 1. the atmospheric circulation and the hydrology of the earth's surface. *Monthly Weather Review*, 1969, 97 (11): 739—774.
- [2] Keeling CD. The concentration and isotopic abundances of carbon dioxide in the atmosphere. *Tellus*, 1960, 12 (2): 200—203.
- [3] Manabe S, Wetherald RT. Thermal equilibrium of the atmosphere with a given distribution of relative humidity. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1967, 24 (3): 241—259.

- [4] Manabe S, Wetherald RT. The effects of doubling the CO<sub>2</sub> concentration on the climate of a general circulation model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1975, 32(1): 3—15.
- [5] Hasselmann K. Stochastic climate models: part I. Theory. *Tellus*, 1976, 28(6): 473—485.
- [6] Hasselmann K. Optimal Fingerprints for the detection of time-dependent climate change. *Journal of Climate*, 1993, 6(10): 1957—1971.
- [7] Zhou S, Zhang R. Decadal variations of temperature and geopotential height over the Tibetan Plateau and their relations with Tibet ozone depletion. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32: L18705.
- [8] 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(12): 1068—1075.
- [9] Reid WV, Chen D, Goldfarb L, et al. Earth system science for global sustainability: Grand challenges. *Science*, 2010, 330(6006): 916—917.
- [10] 张人禾. 气候观测系统及其相关的关键问题. *应用气象学报*, 2006, 17(6): 705—710.

## Enlightenment from the 2021 Nobel Prize in Physics for Research on Climate System and Climate Change

Zhang Renhe<sup>1\*</sup>    Liu Zhe<sup>2</sup>    Mu Mu<sup>1</sup>    Tan Yanke<sup>1</sup>    Zhang Qiang<sup>3</sup>

1. *Department of Atmospheric and Oceanic Sciences/Institute of Atmospheric Sciences, Fudan University, Shanghai 200438*

2. *Department of Earth Sciences, National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085*

3. *Department of Earth System Science, Tsinghua University, Beijing 100084*

(责任编辑 张强)

---

\* Corresponding Author, Email: rhzhang@fudan.edu.cn