2021年诺贝尔物理学奖解读: 从温室效应到地球系统科学

周天军^{1,2*}, 张文霞¹, 陈德亮³, 张学斌⁴, 李超⁵, 左萌¹, 陈晓龙¹

1. 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室(LASG), 北京 100029;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. Regional Climate Group, Department of Earth Sciences, University of Gothenburg, Gothenburg 40530, Sweden;

4. Environment and Climate Change Canada, Toronto M3H 5T4, Canada;

5. Max Planck Institute for Meteorology, Hamburg 20146, Germany

* 通讯作者, E-mail: zhoutj@lasg.iap.ac.cn

收稿日期: 2021-10-25; 收修改稿日期: 2021-12-10; 接受日期: 2021-12-14; 网络版发表日期: 2022-02-18

国家重点研发计划项目(编号: 2018YFC1507701)资助

摘要 2021年诺贝尔物理学奖被授予气候学家真锅淑郎(Syukuro Manabe)和克劳斯·哈塞尔曼(Klaus Hasselmann), 以表彰他们“对地球气候的物理模拟、量化变率和可靠地预测全球变暖”作出的贡献。从1827年温室效应被提出到气候学家被授予诺贝尔物理学奖, 气候变化科学经历了漫长的195年的发展历程, 中间有若干重要的阶段性或里程碑式的进展, 研究范畴也从单纯的温室效应拓展到地球系统科学。文章在解读两位气候学家获奖工作的基础上, 从历史的维度, 通过回顾气候物理学的跨世纪发展历程, 管窥气候变化科学的发展规律, 探讨未来学科发展方向。

关键词 温室气体, 气候变暖, 大气环流模式, 检测归因, 气候系统, 地球系统

1 引言

2021年10月5日, 2021年度诺贝尔物理学奖正式揭晓, 其中一半授予两位气候学家真锅淑郎(Syukuro Manabe)和克劳斯·哈塞尔曼(Klaus Hasselmann), 以表彰他们“对地球气候的物理模拟、量化变率和可靠地预测全球变暖”所作出的贡献。这是历史上诺贝尔物理学奖首次授予气候学家。两位气候学家获奖的理由, 与第三位物理学家获奖者乔治·帕里西(Giorgio Parisi)一样, 都是在研究复杂系统(complex system)上具有突破

性贡献。

复杂系统的基本特征包括: 拥有多个分量, 分量间通过物质、能量、动量等交换产生相互作用, 有诸多直接或者间接的反馈环, 是开放系统(与所处的环境有能量交换), 具有记忆力, 由相互作用决定复杂系统的行为, 具备自我适应能力(即有能力自我调整)(图1)。地球表层的大气圈、水圈、冰冻圈、生物圈和岩石圈表层5个圈层组成了一个复杂的系统, 因为后4个圈层都可以和大气圈相互作用而影响地球气候状态, 故这一复杂系统被称作气候系统。气候变化是指气候系统5

中文引用格式: 周天军, 张文霞, 陈德亮, 张学斌, 李超, 左萌, 陈晓龙. 2022. 2021年诺贝尔物理学奖解读: 从温室效应到地球系统科学. 中国科学: 地球科学, 52(4): 579–594, doi: 10.1360/SSTe-2021-0338

英文引用格式: Zhou T, Zhang W, Chen D, Zhang X, Li C, Zuo M, Chen X. 2022. Understanding and building upon the pioneering work of Nobel Prize in Physics 2021 laureates Syukuro Manabe and Klaus Hasselmann: From the greenhouse effect to Earth system science and beyond. Science China Earth Sciences, 65(4): 589–600, <https://doi.org/10.1007/s11430-022-9906-4>

图1 复杂系统的特征示意图

根据Slingo等(2009)图7重新绘制

个圈层的变化。气候系统5个圈层以及它们之间的相互作用组成的全球系统, 具备复杂系统的所有特征, 是复杂系统的典型代表(Slingo等, 2009)。两位气候物理学家的获奖研究表明, 我们关于气候的知识, 是基于对气候系统观测数据的严格分析建立在坚实的科学基础之上的。

从1827年温室效应最早被提出到气候学家首次被授予诺贝尔物理学奖, 经历了195年的漫长历程, 在这期间, 我们关于气候变化科学的知识逐渐积累、认识水平逐步加深, 中间有若干重要的阶段性进展(王绍武, 2000; Archer和Pierrehumbert, 2011; 胡永云, 2012; 王绍武等, 2013)。本文在扼要介绍两位气候学家获奖成果的基础上, 从气候物理学和气候系统科学发展历程的角度, 解读支撑两位气候学家获奖背后的关键科学进步, 从中管窥气候变化科学的发展规律, 探讨未来学科发展方向。

2 获奖成果概述

2.1 可靠地预测二氧化碳增加导致的全球变暖

围绕着工业革命以来全球气候的增暖问题, 科学界面临两个核心问题需要回答: 一是如何从物理上诠释二氧化碳(CO_2)对全球气候变暖的作用并准确预测其影响, 二是人类活动对工业革命以来的全球增暖到

底有多大贡献。真锅淑郎的工作清晰地回答了第一个问题, 首次可靠地计算了 CO_2 浓度加倍后全球温度的变化。真锅淑郎来自美国国家海洋大气局(NOAA)地球流体动力学实验室(GFDL), 同时是普林斯顿大学的教授, 其主要学术贡献概况如下:

(1) 通过考虑辐射平衡与对流的相互作用, 并考察水汽的温室效应, 可靠地预测了 CO_2 浓度加倍导致的全球变暖。

1967年, 真锅淑郎和理查德·韦瑟尔德(Richard Wetherald)合作在美国气象学会《大气科学杂志》上发表了题为“固定相对湿度分布的大气热平衡”的著名论文(Manabe和Wetherald, 1967)。在文章中, 他们基于辐射传输理论的最新进展, 发展并利用一维辐射对流平衡模型, 通过考虑辐射和对流的作用, 重新分配了垂直方向上从地表往上各层间的能量, 真实地模拟重现了观测的大气温度廓线。他们基于该模型, 计算了大气中 CO_2 浓度从150ppm($1\text{ppm}=1\mu\text{L L}^{-1}$)增加到300ppm, 以及从300ppm增至600ppm时的近地面气温变化; 结果发现 CO_2 浓度每增加一倍, 全球平均温度将会升高约 2.3°C 。该工作的创新之处在于真实地模拟重现了大气温度廓线对辐射的响应, 合理估算了 CO_2 导致的全球增暖。他们创造性地利用向外长波辐射曲线而非地表温度来直观地解释 CO_2 的变化如何导致地表增暖, 解释了水汽反馈如何提高气候敏感度。

(2) 研发了世界上第一个考虑了三维大气环流的气候模式, 从而衍生发展出现代气候模式, 开启了基于地球流体动力学和热力学规律发展三维气候模式的序幕, 在气候变化研究中发挥了无可替代的作用.

1967年, 真锅淑郎和韦瑟尔德的辐射对流模式把整个地球气候表示为一个单柱, 温度分布受由辐射和对流产生的垂直热交换制约(Manabe和Wetherald, 1967). 不过, 地球表面的温度变化远非均匀, 要得到完整的气候变化图像, 除了需要能够预测变暖的地理分布, 还需要预测降水等的变化. 为此, 需要完整地考虑水循环过程以及与水汽、海冰和积雪等有关的复杂反馈过程. 三维大气环流气候模式能够完整刻画上述过程的需要求解控制全球热量、水汽、动量传输的三维流体动力学和热力学方程组, 同时还要实现流体方程与控制辐射、对流和地表热交换物理过程的方程的耦合.

1975年, 真锅淑郎和理查德·韦瑟尔德合作在美国气象学会《大气科学杂志》上发表了题为“二氧化碳浓度加倍对一个环流模式的气候影响”的论文(Manabe和Wetherald, 1975), 这篇论文的发表标志着大气环流(气候)模式的诞生. 在论文中, 他们构建了一个理想海陆分布的大气-海洋耦合模式, 其中海洋被简化处理为“湿地”、不考虑海洋环流及其热输送的作用. 通过这样一个理想化的大气环流模式, 他们证明CO₂增加所导致的全球增暖要比简单的辐射对流模式计算的结果更强, 指出全球变暖伴有极地强化现象和全球水循环的增强.

2.2 架起天气和气候之间的桥梁, 寻找人类活动影响的指纹

天气过程很大程度上是随机的、混沌的, 气候过程大多是缓变的, 其中既包含气候系统自身的内部变率, 又包含气候系统对外部强迫的响应, 即源于自然和人为的外强迫信号. 气候变化信号永远叠加在噪音的背景之上. 只有在理解“噪音”规律的基础上, 我们才能有效寻找所关注的“信号”, 即人类活动影响的“指纹”, 进而定量估算人类活动对增暖的贡献. 哈塞尔曼在这方面作出了卓越贡献. 哈塞尔曼来自德国汉堡的马普气象研究所, 是该研究所的创始人, 他在气候领域的学术贡献主要包括:

(1) 提出了描述气候系统的随机气候模型, 把长

时间尺度的气候变率解释为短时间尺度天气过程的“累积”, 从而在混沌随机的天气过程和慢变的气候状态之间架起了桥梁, 解释了气候系统内部低频变率的成因.

大气的运动方程是高度非线性的, 非线性系统的初始数值哪怕有微小变化, 也足以使随后时刻的天气系统变得大不相同. 这一现象被美国气象学家洛伦兹形象地比喻为“蝴蝶效应”, 即巴西的蝴蝶扇动一下翅膀就可能影响美国德克萨斯州是否出现龙卷风. 大气本身是混沌的这一事实, 使得长期的天气预报不可能超越大气自身对初始条件的最大记忆能力, 即14天左右(Lorenz, 1963). 那么更长时间尺度的气候变率和变化是否可以预报呢?

洛伦兹在20世纪60年代发现混沌现象, 表明一个混沌系统下的具体轨迹是难以预报的, 但其轨迹的形状是稳定的. 表现在天气气候上, 混沌性的短期天气尽管无法进行两周以上的预报, 但其长期气候状态可以是稳定的, 可以用数学物理方程来模拟. 假设外强迫保持不变, 在足够长时间尺度的平衡态下, 气候系统可视为闭合系统. 在该系统中, 各种物理过程(如大气对流、辐射交换、土壤湿度变化等)非常复杂, 各种因子之间存在着复杂的反馈. 由于这些原因, 一个闭合的气候系统也能产生比较大的气候变率, 这被称作洛伦兹机制.

得益于长期从事湍流及海浪研究的经历, 哈塞尔曼从最简单的布朗运动着手, 提出了描述气候过程的一个统计模型. 他于1976年发表在《Tellus》的文章建立了随机气候模型并指出了气候自然内部变率的起源, 表明快速变化的白噪声天气过程, 可造成气候系统的慢变红噪声响应(Hasselmann, 1976). 以大气对海洋的强迫为例, 时刻都处于运动之中的快速变化的大气, 对海洋混合层温度形成扰动, 海洋混合层将延迟表层海温对快变大气响应的时间, 起到类似阻尼器的作用, 最终使得缓慢变化的海洋产生长时间尺度乃至年代际的变率, 例如太平洋的年代际振荡PDO(杨修群等, 2004), 海洋随后又在大气中引起长时间尺度的振荡. 快速变化的大气能够导致海洋的缓慢变化, 这就从理论上给我们开展短期气候预测带来了希望.

后人通过数值试验等方式对两种理论进行了检验(Schneider和Kinter, 1994), 哈塞尔曼机制和洛伦兹机制, 被认为是能够解释“为何气候能够对快速变化的天

气尺度过程产生慢变响应”的两大机制. 这些用简单模型建立起来的有关气候变率的基础理论概念, 为后来发展复杂的气候模式打下了基础.

气候“内部变率”是在没有人为和自然外强迫变化情况下, 气候系统内部产生的自然振荡. 从气候变化的角度来说, 随机气候模型的另一重要作用是能够解释自然内部变率, 从而为我们理解叠加在人为气候变化“信号”之上的自然内部“噪音”的演变规律提供理论基础. 当前国际上关于内部变率的研究, 已经从机制探讨转向如何综合各种观测资料和气候模拟技术来准确描述自然变率的演变规律(Mitchell等, 2001; 陆静文等, 2020). 因为这事关如何从观测到的气候变化中寻找人类活动影响的“信号”, 也就是哈塞尔曼的另一科学贡献——如何寻找人类活动影响的指纹.

(2) 哈塞尔曼提出包括温室气体在内的外部影响因子会在气候系统中留下特定的“指纹”, 通过分离出这种指纹, 可以检测出人类活动引起的气候变化. 这是开展气候变化检测归因研究的理论基础.

自然气候变率的存在, 使得气候变化的检测问题类似于通讯上的信号处理问题, 成为“信号-噪音”检测问题. 1977年, 哈塞尔曼在英国皇家气象学会出版的《热带海洋气象》一书中, 提出从大气的自然气候变率中有效鉴别大气平均态对外强迫的响应问题可以被处理成分布型检测问题(Hasselmann, 1979). 随着1990年IPCC第一次评估报告(FAR)的发布, 气候变化检测归因问题变得愈发重要. 哈塞尔曼于1993年在美国气象学会《气候杂志》撰文提出包括温室气体在内的外强迫因子会在气候序列中留下特定的信号, 这种特定的信号可以通过提高“信噪比”, 即把气候系统对其特定的相位空间进行旋转, 来更清晰地显现出来, 从而检测出人类活动的影响, 这是最优检测思想的首次提出. 后续工作进一步把该方法延伸到气候归因研究. 围绕着“最优检测”的技术实现, 检测归因研究领域还提出了最优加权、最优滤波等方案, 这些方案尽管其数学形式差别很大但核心是一样的(Hegerl和North, 1997), 后来随着回归方程概念的引入(Allen和Tett, 1999), 该方法变得更易于理解, 从而被推广使用.

哈塞尔曼的两项成就, 一是解释了气候系统内部低频变率的成因, 二是创造了提炼气候变化信息的工具, 这对我们定量估算人类活动在气候变化中的贡献来说都是不可或缺的. 正是基于检测归因技术, IPCC

第六次评估报告得出结论, “毋庸置疑, 人为影响正在使大气、海洋和陆地变暖. 与1850~1900年相比, 2010~2019年人为导致的全球表面温度变化的最佳估计为 1.07°C ”(IPCC, 2021)(图2和3).

3 气候变化科学的跨世纪发展历程

两位获奖人的工作是建立在气候变化科学发展历程的基础上. 回顾跨越近乎两个百年的征程, 气候变化科学的物理理论得到科学界的认同委实不易.

3.1 从温室效应到全球变暖的事实显现

以时间为序, 气候变化科学的发展, 经历了以下重要阶段(图4):

1827年, 约瑟夫·傅里叶(Joseph Fourier)最早研究了温室效应的物理过程(Fourier, 1827). 随后, 瑞典气象学家尼尔斯·古斯塔夫·埃克霍尔姆(Nils Gustaf Ekholm)在1901年提出了“温室效应”的概念(Ekholm, 1901). 傅里叶指出, 地球的温度由能量接收和能量损失之间的平衡决定, 由于地球大气对阳光基本透明但对红外线相对不透明, 结果使得地球保持温暖. 尽管傅里叶的推理只是定性的, 但鉴于他所处时代的热力学等物理领域还处在襁褓之中, 这种定性的结论也无损其伟大.

1861年, 约翰·丁铎尔(John Tyndall)在实验室证明了温室效应(Tyndall, 1861). 丁铎尔改进了测量气体分子和红外辐射相互作用的技术, 通过实验指出气体能吸收红外辐射也能发射红外辐射, 大气中大部分温室效应都是由少量的水汽和 CO_2 等痕量气体引起的. 他特别强调空气湿度的变化, 认为大气中的水汽作为温室气体对气候有重要作用.

1896年, 斯凡特·阿伦尼乌斯(Svante Arrhenius)开辟了利用气候模型来对有大气层的行星进行定量研究这一方向(Arrhenius, 1896). 阿伦尼乌斯设计了一个单层模型, 考虑了大气和太空之间、大气和地面之间, 以及地面和太空之间的辐射能量交换, 该模型还考虑了大气中的水汽含量. 他指出满足大气顶部和表面能量平衡的重要性, 提出了水汽反馈的概念来解释 CO_2 增暖效应被放大的原因; 他提出了冰反照率反馈的概念并用来解释高纬度地区的变暖加剧现象, 该机制至今依然被广泛使用. 他还计算了 CO_2 浓度翻倍所导致的

图2 1850年以来全球平均地表气温的变化及其归因模拟试验

观测(黑线)和第六次耦合模式比较计划(CMIP6)多模式模拟的全球平均温度相对于1850~1900年的变化。同时包含人为和自然外强迫的模拟试验(棕色)能合理再现观测增温,而单独自然外强迫(太阳和火山活动;绿色)无法解释观测增温。实线为多模式集合平均,阴影为多模式集合的很可能(>90%可能性)范围(引自IPCC AR6决策者摘要图SPM.1)

变暖,这被现代气候学家称之为“气候敏感度”。阿伦尼乌斯1896年的论文为气候科学奠定了坚实的物理基础,代表着现代气候科学的诞生。此外,他还是一位杰出的化学家,于1903年获得诺贝尔化学奖,是瑞典第一位诺贝尔奖获得者。

1956年,吉尔伯特·普拉斯(Gilbert Plass)准确计算了CO₂辐射强迫(Plass, 1956)。依托天文学家和天体物理学家在辐射传输研究方面的系列重要进展、更精确的CO₂红外光谱数据的提供以及计算机能力的快速提升,吉尔伯特·普拉斯于1956年第一次准确地计算了CO₂的辐射强迫,确定了大气CO₂造成的红外冷却速率和大气层顶的净射出辐射,讨论了大气CO₂浓度变化对上述物理量的影响。一年之后的1957年,查理斯·基林(Charles D Keeling)开始在美国夏威夷莫纳罗亚观测大气CO₂浓度,这是人类社会利用器测资料记录大气CO₂浓度的起点(Keeling, 1960, 1970)。

1967年,真锅淑郎和理查德·韦瑟尔德首次可靠地预测了CO₂浓度加倍后所引起的变暖的大小(Manabe和Wetherald, 1967)。该文是辐射对流模型的集大成者,从能量平衡、对流加热、水汽反馈等角度为讨论地球气候变化提供了经典的基础框架,代表着全球变暖研究进入现代时期。

图3 2010~2019年相对于1850~1900年的全球平均增温及其归因

(a) 观测到的全球平均地表气温变化及其很可能(>90%可能性)范围。(b) 不同外强迫因子和自然内部变率对观测增温的贡献,垂直线表示可能范围(>66%可能性)(引自IPCC AR6决策者摘要图SPM.2)

1975年,以真锅淑郎和韦瑟尔德的文章发表为标志,代表着三维大气环流气候模式的诞生(Manabe和Wetherald, 1975)。该模式是第一个能够处理CO₂加倍的大气环流模式,他们重新证实了阿伦尼乌斯所预测的全球变暖“极地放大”现象,并利用冰雪反馈和极地大气层结变化来进行解释。

1979年,受美国科学院国家研究委员会委托,朱尔·查尼(Jule G. Charney)组织编写了题为《二氧化碳与气候》的科学评估报告,目的是回答化石燃料使用排放的CO₂是否会造成地球气候变化,这就是著名的《查尼报告》(Charney等, 1979)。报告指出,没有理由怀疑大气CO₂浓度加倍会导致全球平均温度出现显著改变,CO₂浓度加倍将令全球温度升高1.5~4.5°C(此即我们现在所说的“气候敏感度”)。这非常接近2021年IPCC AR6给出的最新结果:平衡态气候敏感度的最佳估计值为3°C,范围可能(概率>66%)为2.5~4°C(Chen D等, 2021)。

1984年,詹姆斯·汉森(James Hansen)定量分析了

图 4 全球变暖科学历史上的重要阶段性工作

气候反馈，发现云反馈过程会对气候敏感度产生很大影响(Hansen等, 1984)。1975年，真锅淑郎和韦瑟尔德工作的不足是未能预测云的分布的变化(Manabe和Wetherald, 1975)。汉森等人在这方面取得显著进展，最早证明云反馈过程会对气候敏感度产生很大影响(Hansen等, 1984)。从气候反馈定量分析的角度，该文被视为气候模式发展一项里程碑式的工作。该文的另一个重要发现是由海洋热存储所引起的延迟变暖的“惯性增暖”现象，也就是即使保持当前大气CO₂浓度不变，全球变暖仍会持续几百年才最终达到某个平衡态。

1986年，观测数据揭示出全球变暖现象。这以菲利普·琼斯(P.D. Jones)等发表的著名的“1861~1984年的全球平均温度变化”文章为代表(Jones等, 1986)。

气候变化科学跨世纪的成果积累，是真锅淑郎等在全球变暖物理机理研究上取得突破的重要支撑。这

也意味着，气候变化科学作为一门具有严格数学和物理基础的科学，从此被科学界广泛认同。

3.2 从随机气候模型到寻找人类活动影响的最优指纹

内部变率总是叠加在自然外强迫因子(太阳辐射和火山气溶胶)和人为外强迫因子(温室气体和人为气溶胶浓度的增加等)所引起的气候变化信号之上，这给从观测到的变化中检测和归因人类活动的影响带来困难。围绕如何从观测到的气候变化中检测出人类活动的影响，并对人为强迫因子的贡献进行定量归因，气候学界经历了漫长的过程。1979年，《查尼报告》指出“没有理由怀疑大气CO₂浓度加倍后会导致全球平均温度出现显著的改变”，对国际社会提出了警告。此后，“世界气象组织”(WMO)和“联合国环境署”(UNEP)于1988年成立了“政府间气候变化专门委员会”(IPCC)，

其第一工作组是自然科学评估组, 负责根据已发表的自然科学方面的成果对气候变化做出评估。

1990年IPCC FAR及其1992年的补充报告, 确信“人类活动产生的各种排放正在使大气中的温室气体浓度显著增加, 这将使温室效应增强, 平均来说就是使地表更暖”。但同时也指出, “要毫无疑问地从观测资料中检测出增强的温室效应引起的升温, 在未来十年或更长时间似乎不太可能”(IPCC, 1990, 1992; 表1)。1996年的第二次评估报告(SAR)指出, “当前出现的全球变暖不太可能全部是由自然界造成的, 人类活动已经对全球气候系统造成了可以辨别的影响”(IPCC, 1996; 表1)。IPCC FAR和SAR在全球增暖的归因问题上未能给出高信度的结论, 原因是多方面的, 包括当时的人为气候变化信号与内部变率相比较弱、观测资料不足、模式性能不够, 以及对外强迫、气候系统的响应、内部变率等方面的科学认识水平不够。

为了从噪音中有效地检测出信号, 哈塞尔曼提出了最优检测的思想, 思路是在相位空间里通过“避开内部变率最强方向”的分量来提高“信噪比”, 因为响应强的方向往往也是噪音比较大的方向(Hasselmann, 1979, 1993, 1997)。基于这一核心思想, 在IPCC SAR之后, 最优检测技术得到诸多改进, 被用于表面温度(Hegerl等, 1997, 2000)和温度垂直变化方面的检测(Allen和Tett, 1999)。

检测到气候在变化并不意味着我们知道了造成这种变化的原因。哈塞尔曼在1997年指出, 进行归因需要气候模式模拟的信号强度与观测状况一致(Hasselmann, 1997)。随后, 归因技术得到快速发展(Hegerl等, 1997, 2000; Tett等, 1996, 1999)。2001年的IPCC第三次评估报告(TAR)第一次明确指出, 过去50年观测到的大部分增暖“可能”归因于人类活动造成的温室气体浓度上升(IPCC, 2001; 表1)。关于降水的变化, 其空间分布和变化机制远比温度复杂, 6年之后, Zhang等(2007)针对20世纪陆地降水分布的变化进行检测和归因, 首次指出“人类活动导致了陆地降水型的大尺度变化”, 这一结论被写入IPCC AR5(IPCC, 2013)。

随着人为气候变化信号的不断增强、观测资料的完善、模式模拟试验样本量的增加、检测归因方法的发展和改进, 以及对物理过程认知水平的提高, 归因研究的证据更为确凿, 在人类活动对全球变暖的可归因贡献方面, IPCC报告的归因结论的信度逐步提

高: 从2001年第三次评估报告的“可能”, 到2007年第四次评估报告的“很可能”, 到2013年第五次评估报告的“极有可能”, 再到2021年最新的第六次评估报告的“毋庸置疑”(详见表1; 图2和3; IPCC, 2001, 2007, 2013, 2021)。

自20世纪70年代哈塞尔曼提出和发展了最优检测的理论和方法以来, 检测归因研究在四个方向取得显著进展: 一是涵盖的气候要素更广泛, 从早期的温度和降水扩展到大气环流, 从大气圈拓展到海洋和冰冻圈, 空间范围上从全球细化到大陆再到区域尺度; 二是检测归因对象从气候平均态拓展到极端事件; 三是从长期变化发展到事件归因; 四是从现代气候变化拓展到检测过去千年火山和太阳活动等自然强迫因子对气候的影响(如Hegerl等, 2003; Zhang等, 2007; Schurer等, 2013; Eyring等, 2021; Seneviratne等, 2021)。

近十年来, 检测归因技术也被应用于中国区域的气候变化研究, 明晰了人类活动对于中国地区平均和极端温度变化的贡献(Wen等, 2013; Sun等, 2014, 2016, 2021; Xu等, 2015; 赵天保等, 2016; Zhai等, 2018; Li等, 2020; Zhou和Zhang, 2021), 而人类活动对于中国地区降水变化的影响仍在逐渐显现的过程中(Ma等, 2017; Chen和Sun, 2017; 周天军等, 2020a; Chen Y等, 2021; Sun等, 2021)。

明确是人类活动导致了气候增暖这一结论, 为国际社会采取行动来适应和减缓气候变化提供了重要科学基础。从提出随机气候模型理论到通过“最优检测”来寻找人类活动影响的“指纹”, 哈塞尔曼为回答“人类活动对气候变化有多大影响”这一问题作出了卓越贡献。从他基于湍流研究得到的启示建立随机气候模型来理解气候系统自然内部变率的起源, 再到借助信息领域的“信号”处理技术来建立检测归因的方法, 哈塞尔曼向我们完美地展示了学科交叉的长处。

4 气候系统科学的发展

与传统的物理学在关键方向上的突破方式不同, 气候物理学的任何突破, 都需要建立在学科发展长期积累的基础之上。今年获奖气候学家的突破, 就是建立在观测资料的累积和事实揭示、气候物理学理论的完善、气候系统科学概念的形成以及高性能计算机和数值模拟技术等新技术的发展基础上的。

表 1 历次IPCC第一工作组科学评估报告关于全球平均增温的检测归因结论^{a)}

IPCC评估报告	检测归因关注时段	该时段观测 增温	各因子(人为外强迫、自然外强迫、 自然内部变率)的定量贡献	检测归因结论
FAR及1992年补充 报告(1990, 1992)	决策者摘要(SPM)中未综合给出检测归因的定量估算结果			“人类活动产生的各种排放正在使大气中的温室气体浓度显著增加, 这将使温室效应增强, 平均来说就是使地表更暖。”“观测到的0.3~0.6℃度增温(过去一个世纪中)…与气候模式预测的结果总体一致, 但其量值与气候自然变率亦相仿. 所以观测到的升温可能很大程度是自然变率引起, 另一种可能是自然变率或其他人为因素已经部分抵消了由人类活动引起的更大的温室效应引起的增温. 要毫无疑问的从观测资料中检测出增强的温室效应引起的升温, 在未来十年或更长时间似乎不太可能.”
SAR(1996)	SPM中未综合给出检测归因的定量估算结果			“当前出现的全球变暖不太可能全部是由自然界造成的, 人类活动已经对全球气候系统造成了 可以辨别 的影响.”
TAR(2001)	SPM中未综合给出检测归因的定量估算结果			“过去50年观测到的大部分增暖 可能 归因于人类活动造成的温室气体浓度上升(66%以上的可能性).”
AR4(2007)	SPM中未综合给出检测归因的定量估算结果			“全球变暖是不争的事实, 近半个世纪以来的全球变暖 很可能 是人类活动所致(90%以上可能性)”
AR5(2013)	1951~2010	0.6~0.7℃ (可能范围)	可能(>66%)范围: 人为强迫: 0.6~0.8℃; 温室气体强迫: 0.5~1.3℃; 其他人为强迫: -0.6~-0.1℃; 自然外 强迫: -0.1~0.1℃; 自然内部变率: -0.1~0.1℃	“ 极有可能 (95%以上可能性)的是, 观测到的1951~2010年全球平均地表温度升高的一半以上是由温室气体浓度的人为增加和其他人为强迫共同导致”
AR6(2021)	1850~1900至 2010~2019(与前几次评 估报告相比, 归因时段 延伸至工业革命以来)	0.9~1.2℃ (可能范围)	可能(>66%)范围: 人为强迫: 0.8~1.3℃; 温室气体强迫: 1.0~2.0℃; 其他人为强迫: -0.8~-0.0℃; 自然外 强迫: -0.1~0.1℃; 自然内部变率: -0.2~0.2℃	“人类活动导致大气、海洋 和陆地增暖是 毋庸置疑 的”

a) 表中检测归因的定量结果和信度均基于决策者摘要(SPM)陈述. 人类活动和全球增暖信号的不断增强, 对于归因结论信度的提高有重要作用

首先, 观测事实的积累发挥了举足轻重的作用. 从阿伦尼乌斯、丁铎尔到真锅淑郎以及著名的《查尼报告》, 气候物理学研究已经从理论上阐明了以CO₂为代表的温室气体导致全球增暖的机理, 并对未来变化进行了理论预测. 但是, 若要从理论研究上升到对人类活动导致的气候变化进行可靠的预测, 还需要大量的观测数据来检验模型的预测结果. 基林1957年在夏威夷开始大气CO₂浓度观测、1960年发表的文章指出大气CO₂浓度在稳定上升, 这为证明全球变暖理论提供了温室气体观测基础(Keeling, 1960, 1970; Pales和Keeling, 1965). 随后, 著名的全球温度时间序列“琼斯曲线”于1986年发表. 琼斯等人并不是第一个整编全球平均温度的工作, 但这篇文章首次给出了全球温度自20世纪70年代开始上升这一全球变暖的确凿证据

(Jones等, 1986). 由于20世纪70年代之前刚经历了一次由于自然变率和人为气溶胶强迫导致的气温下降, 因此当时还无法确认全球变暖的现象. 在此背景下, 琼斯等人的工作弥足珍贵.

第二, 气候物理学理论的日常臻完善是成果被认同的基础. 从1827年傅里叶发现温室效应、1861年丁铎尔在实验室证明温室效应并提出水汽的重要作用、1896年阿伦尼乌斯提出从能量平衡的角度解释CO₂造成的增暖并提出水汽反馈、冰雪反照率反馈等概念、1956年普拉斯准确地计算CO₂辐射强迫, 到1967年真锅淑郎和韦瑟尔德首次可靠地预测CO₂增加导致的全球变暖, 气候物理学研究经历了140年的漫长征程. 此后, 1975年真锅淑郎和韦瑟尔德设计了第一个能够处理CO₂加倍的三维大气环流气候模式, 1979年《查尼

报告》较为准确地估算气候敏感度, 1984年汉森提出云反馈过程会对气候敏感度有很大影响, 到1988年IPCC正式成立并开始对气候变化进行系统的科学评估, 这中间又经历了20余年的历程. 最终, 从1827年发现温室效应到今天诺贝尔物理学奖首次授予气候学家, 前后经历了195年的漫长历程. 从哈塞尔曼1976年提出随机气候模型理论来解释内部变率, 1979、1993和1997年的工作提出通过最优检测来寻找人类活动的指纹, 到2001年IPCC TAR第一次明确指出近50年观测到的大部分增暖可能归因于人类活动造成的温室气体浓度上升, 再到2021年IPCC AR6指出人类活动导致大气、海洋和陆地增暖是毋庸置疑的, 科学界也走过了46年的历程(当然重要原因还包括这期间伴随着温室气体排放的累积, 气候变化的信号更加清晰). 如果说真锅淑郎和哈塞尔曼的获奖是气候科学发展历史上的一个里程碑, 那么这一里程碑实际上是建立在气候物理学近200年的研究积累基础上的, 他们是站在巨人的肩膀上翻越高峰的.

第三, 气候系统科学的形成为认识气候变化提供了全局视野. 传统的气候被定义为温度、气压、湿度等天气要素的长期平均. 20世纪后半叶以来, 现代气候学研究的一个重要进展是提出气候系统的概念, 强调要把大气圈、水圈、冰冻圈、生物圈、岩石圈表层作为一个整体来研究. 20世纪60年代末, 观测到的大气CO₂浓度升高以及萨赫勒干旱等气候异常的出现, 促使气候变化问题进入国际社会视野. 1974年, 联合国授权WMO开展气候变化研究. 1979年2月, 第一次世界气候大会在日内瓦成功召开, 主题为“气候与人类”. 这是气候学发展史上的一个里程碑, 极大地推动了气候学研究. 会议倡导成立了世界气候计划(WCP), 包括四个子计划, 其中之一就是最为活跃并执行至今的“世界气候研究计划”(WCRP). WCRP组织实施了“气候变率和可预报性”(CLIVAR)、“全球能量和水循环”(GEWEX)、“平流层-对流层过程及其气候影响”(SPARC)、“气候与冰冻圈”(ChC)等四大科学计划. WCRP在促进从气候系统的角度开展气候变化研究方面贡献巨大, 也直接推动了WMO和UNEP于1988年联合建立IPCC.

IPCC第三次评估报告对气候系统的组成及其耦合作用过程给出了清晰的定义(参见IPCC TAR的图1.1), 强调气候系统随时间变化的过程既受到自身内

部动力学的影响, 又受到外部强迫的影响, 包括自然外强迫(火山喷发、太阳活动、轨道强迫)和人为强迫(大气成分和土地利用变化等). 因此, 需要从多圈层相互作用的角度, 来理解气候的变化规律和机理. 气候系统科学的形成, 使得我们能够从全局来认识气候变化机理.

第四, 地球系统科学的形成拓展了气候变化研究范畴. 在气候系统研究的基础上, 人们发现生物地球化学循环过程对于气候演变也具有重要影响. 因此, 在“气候系统”的概念基础上, 科学界又进一步提出了“地球系统”的概念. “国际地圈-生物圈计划(IGBP)”在地球系统发展方面起到了关键作用. IGBP由国际科学理事会于1987年创立. 2000年, IGBP的副主席、诺贝尔奖得主保罗·克鲁岑(Paul Crutzen)在IGBP的《全球变化》杂志上刊文指出地球已经进入了一个新的地质时期, 也就是“人类世”(Crutzen和Stoermer, 2000). 2001年在阿姆斯特丹召开了一次重要的国际地球系统会议, 参会者由来自WCRP和IGBP的学者组成, 他们在会议著名的《阿姆斯特丹宣言》中正式提出了“地球系统科学”.

作为地球系统科学形成的重要标志, NASA学者弗朗西斯·布雷瑟顿(Francis Bretherton)于1988年提出的著名的“布雷瑟顿简图”(Bretherton Diagram)(图5), 它清晰地描绘了地球系统圈层相互作用的关键过程及人类活动的影响. 时至今日, 布雷瑟顿简图依然被WCRP在其最新的《WCRP战略规划(2019–2028)》中所引用.

最新公布的WCRP战略规划, 对气候系统和地球系统给出清晰的定义: “地球系统是地球上相互作用的物理、生物地球化学、生物学和人类系统, 包括大气、陆地、水圈和冰冻圈”, 而“气候系统是地球系统中与气候有关的部分, 包括大气、海洋、陆表和冰冻圈, 以及它们之间的耦合过程和反馈机制”(WCRP, 2019). 图6来自《WCRP战略规划(2019–2028)》, 清晰地展示了气候系统和地球系统两个概念所关注的科学问题的侧重点: 前者强调圈层间相互作用的内部动力过程、对外强迫的响应和各种反馈过程, 实质是关注物理气候系统; 后者强调圈层间的碳通量、能量和水通量的交换, 实质是关注生物地球化学循环过程.

地球系统概念的提出, 拓展了气候变化研究的范畴, 特别是关于陆气、海气等圈层相互作用过程的研究.

图5 布雷瑟顿简图示意图

描绘了地球系统圈层相互作用的关键过程及人类活动的影响, 其中青色部分为物理气候系统, 浅绿色为生物地球化学循环等地球系统过程 (原图见NRC, 1086; 本文根据Steffen等(2020)图2修改绘制)

图6 地球系统示意图

根据《世界气候研究计划战略规划(2019–2028)》的图1绘制

究, 在传统的侧重能量与水循环交换的“气候反馈”的基础上, 又增加了“碳反馈”过程。

第五, IPCC通过其科学评估报告, 极大地推动了气候变化科学研究。IPCC的建立旨在定期为决策者提供气候变化的科学基础、气候变化的影响、未来风险、适应和减缓气候变化的政策选择。IPCC每隔6~7年定期对每年发表的数千份科学论文进行评估, 将科学界当前关于气候变化相关风险信息的最佳认知提供

给决策者。同时, 确认科学界在哪些方面能够达成共识, 又在哪些方面存在分歧, 以及哪些方面需要进一步的研究。科学报告的内容与政策相关但无政策倾向, 科学报告不提倡特定的观点或行动, 但会从科学的角度提供几种选择的评估结果(秦大河, 2021)。自1988年成立到2021年, IPCC已经发布六次科学评估报告和系列特别报告。这些科学报告的成果体现了全世界气候变化科学界的集体智慧, 从学科交叉、多时空尺度、多研究手段、多圈层综合等角度, 集科学界关于气候变化认知水平之大成, 极大地推动了气候变化科学的发展。

第六, 依托高性能计算机的发展, 数值模拟技术已经和理论研究、观测研究共同成为支撑现代气候学研究的三大手段。自真锅淑郎和韦瑟尔德的工作发表以来(Manabe和Wetherald, 1975), 国际上气候模式的发展包括以下几个阶段(图7): 一是20世纪70年代中期, 大气环流模式得到快速发展; 二是20世纪80年代中期, 开始实现大气环流模式和陆面过程模式的耦合, 而海冰则是给定的; 三是20世纪90年代初期, 大气环流模式实现与“沼泽”海洋耦合, 并用于IPCC FAR的气候预估试验; 四是1995年前后, 大气环流模式开始描述硫酸盐气溶胶和火山气溶胶, 开始纳入完整的大洋环流模式, 海-陆-气-冰耦合模式开始用于IPCC SAR的气候预估试验; 五是2001年前后, 陆面模式引入径流过程以闭合水循环, 大气模式对气溶胶的处理日臻完善,

地球系统模式发展的历史, 现状和未来

图 7 地球系统模式发展的历史、现状和未来

从气候系统模式到地球系统模式, 未来的地球系统模式将在物理气候系统基础上耦合生态环境系统和人类圈。圆柱体高度表示模块的完善和复杂程度(在IPCC AR5的图1.13基础上(Cubasch等, 2013), 增加IPCC AR6的模式信息和模式研发领域最新动态设计绘制)

海洋模式能够再现经圈翻转环流, 许多模式开始描述气候系统中的碳循环过程, 支撑IPCC TAR的模式系统在物理过程上得到完善; 六是2007年前后, 陆面模式开始引入动态植被, 大气模式开始引入大气化学过程, 海气耦合过程不再使用“通量订正”技术; 七是2013年前后, 气候系统模式开始向地球系统模式发展, 海洋模式的生态系统模块、陆面模式的全球植被动力学模块对生物地球化学循环过程的模拟能力得到提升(见周天军等, 2014的综述文章); 八是随着高性能计算机性能的提高, 模式的分辨率不断提高, IPCC AR6用到的模式中, 大气平均分辨率接近100km, 海洋分辨率接近75km, 大气和海洋都达到25km乃至10km的海气耦合模式已经开始出现, 大气模式逐渐向对流分辨率尺度、海洋模式逐渐向涡旋分辨率方向发展(周天军等, 2019; Chen D等, 2021)。

在上述模式发展进程中, 从气候系统模式到地球系统模式是一个重要的飞跃。气候系统模式关注的是物理气候系统分量, 把生物地球化学过程和人类活动作为外强迫来处理。而地球系统模式则把物理气候、生物地球化学系统及二者间的相互作用作为一个完整

的耦合系统来处理, 人类系统的影响和自然强迫(太阳和火山活动)依然作为外强迫处理(WCRP, 2019)。

与模式复杂性和过程完备性的提高同步, 开展全球模拟的模式研发中心或联盟的数量也显著增多。1979年, 著名的《查尼报告》编写时, 只有GFDL 真锅淑郎和NASA GISS 汉森领导研发的两个模式的气候预估结果可用。1995年IPCC SAR出版时, 参加CMIP1的研究机构有11家; 2014年IPCC AR5出版时, 参加CMIP5的有19家(见周天军等, 2014的综述文章); 到2021年AR6出版时, 参加CMIP6的则有28家(图8), 被IPCC AR6正式采用的模式版本有39个, 其中有11个是包含碳循环过程的地球系统模式(IPCC, 2021: Annex II)。中国的气候模式对IPCC科学评估报告作出了重要贡献, 参与了迄今为止所有评估报告的编写(图8)。同时模式研发队伍得到壮大, 来自大陆的模式从CMIP1的1个增加到了CMIP6的8个(见周天军等, 2019的综述), 模式总体性能也有显著提升(周天军等, 2020b)。

气候模式能够合理描述多圈层相互作用的物理和化学过程, 使得大气科学和气候系统科学成为一门“可

图8 为CMIP做出贡献的模式研发中心的全球分布

分别给出了所在城市、研发单位以及各模式参与CMIP1~CMIP6以及CORDEX的情况。不同的颜色表示参加不同阶段的CMIP, 颜色越多表示模式参与的历史越长, 中国科学院气候模式在AR4以前以IAP-LASG(大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室)的名称参加, AR5和AR6以CAS(中国科学院)的名称参加, 名称的改变使得原图即AR6图1. 20对中国科学院参与CMIP的历史标注有遗漏, 本图在原图的基础上进行了修订绘制

实验的科学”。真锅淑郎和韦瑟尔德发表于1975年的第一个大气环流气候模式采用的是高度简化的理想海陆分布。当今的气候系统模式, 无论从气候系统分量的组成、物理和生态乃至化学过程的完善, 还是分辨率的提高, 都远超真锅淑郎等当年的模式。真锅淑郎及其合作者所开拓的研究方向已经得到发扬和光大。现在, 能够完整地描述大气、海洋、陆面和海冰等的气候系统模式和包含碳循环的地球系统模式, 在模拟历史气候变化、开展检测归因和预估未来变化中发挥着不可替代的作用。

气候变化检测归因依赖气候模式及其模拟试验结果, 没有气候模式支撑, 哈塞尔曼的检测归因理论和方法就无从得到应用; 同时, 若没有哈塞尔曼关于信噪比和检测归因的理论研究及其方法, 气候模式的重要性就无法充分体现。因此, 两位获奖人的工作相辅相成, 支撑他们工作的是观测数据、理论研究和数值模拟三者的结合。

5 未来之路

诺奖官方新闻稿写道: “我们不能再说我们不知道, 因为气候模式是明确的。地球在升温吗? 是的。是因为大气中温室气体含量的增加吗? 是的。可以仅仅用自然因素来解释吗? 不能。人类的排放物是温度升高的原因吗? 是的。”答案的背后, 是以真锅淑郎和哈塞尔曼为代表的气候学界百余年的努力和积累。

展望未来, 下一个需要气候学界回答的问题会是什么? 一个大概率的问题会是: “请告诉我们如何应对。”这是决策者和公众都热切希望知道的答案, 其中包含了从对极端事件、气候临界点的科学认知, 到提升生态系统恢复力的措施, 减缓气候变化的经济代价和人类与自然系统的健康效益之间的平衡, 再到全球碳交易中的政治博弈等诸多维度(陈德亮等, 2019; Martin等, 2021)。要回答这一问题, 气候学界需要提供精准的信息来预测气候变化的影响、指导气候适应措

施的选择和设定气候变化减缓目标。

为了适应国际社会应对气候变化的需求, 下一代地球系统模式研发已经被提上日程(Bonan和Doney, 2018), 其复杂程度将超过传统的气候系统模式。它将是一个综合物理气候系统和自然生态环境系统、考虑人类活动影响的公里尺度的复杂地球系统模拟器。未来的地球系统模式, 将在地球系统五大圈层——大气圈、水圈、冰冻圈、生物圈和岩石圈表层的基础上加入“人类圈”系统(图7), 能够支撑我们探究“人类圈”和“五大圈层”之间的相互作用规律、可靠地预测未来, 从而为气候变化应对、自然灾害防御、能源和农业等涉及可持续发展的行动提供科技支撑(Slingo等, 2021)。

未来的地球系统模式发展面临着三大挑战: 一是如何真实再现复杂气候系统的多尺度特征? 二是在地球系统模式中描述自然生态系统和人类系统的响应? 三是如何在千万亿次的计算机架构上开发模式代码? 应对前面两大挑战的, 基础是增进对地球系统基本规律的认识, 尤其是目前建立的自然生态系统或者生物圈的理论基础, 远不如物理气候系统成熟。地球自然环境生态系统是复杂系统, 处理时需要像真锅淑郎当年那样, 在抓住核心过程的前提下先对其进行简化, 从而能够实现当时计算机水平下的求解, 然后再逐步发展完善。下一代地球系统模式的构建, 第一步是建立能够真实再现复杂气候系统的多尺度特征的公里尺度对流分辨模式, 第二步是实现自然环境生态系统与物理气候系统通过物理、化学和生物学过程的耦合, 第三步是在耦合系统中实现表达人类对气候和环境变化的响应和反馈。与模式研发同步的, 还有地球系统综合观测网络的建立完善、地球系统多圈层间及其与人类圈相互作用的理论研究, 它们将为数值模式的研发提供数据和理论基础。这是一个宏伟的、但可以有序实现的目标。

从温室效应到气候系统再到地球系统, 概念提升背后反映的是人类对地球环境认知水平的巨大提升, 以及人类可持续发展对气候科学支撑需求的日益提高。气候科学建立在物理学的基础之上, 并极大地受益于数学、化学和生物学的发展, 以及高性能计算机、空基和地基遥测遥感技术的整体支持。未来的地球系统研究同样离不开理论和观测、多学科交叉以及新技术的支撑。

致谢 感谢中国科学院大气物理研究所LASG国家重点

实验室江洁博士、胡帅博士、任子坤、邱慧、何林强等同学帮助检索历史文献和提供相关素材。

参考文献

- 陈德亮, 秦大河, 效存德, 苏勃. 2019. 气候恢复力及其在极端天气气候灾害管理中的应用. 气候变化研究进展, 15: 167–177
- 胡永云. 2012. 全球变暖的物理基础和科学简史. 物理, 41: 495–504
- 陆静文, 周天军, 黄昕, 张文霞, 邹立维. 2020. 表面气温内部变率估算方法的比较研究. 大气科学, 44: 105–121
- 秦大河. 2021. 气候变化科学概论. 北京: 科学出版社. 1–378
- 王绍武. 2000. 20世纪气候学理论研究的十项成就. 地球科学进展, 15: 277–282
- 王绍武, 罗勇, 赵宗慈, 闻新宇, 黄建斌. 2013. 全球变暖的科学. 北京: 气象出版社. 1–205
- 杨修群, 朱益民, 谢倩, 任雪娟, 徐桂玉. 2004. 太平洋年代际振荡的研究进展. 大气科学, 6: 979–992
- 赵天保, 李春香, 左志燕. 2016. 基于CMIP5多模式评估人为和自然因素外强迫在中国区域气候变化中的相对贡献. 中国科学: 地球科学, 46: 237–252
- 周天军, 陈梓明, 邹立维, 陈晓龙, 俞永强, 王斌, 包庆, 鲍颖, 曹剑, 何编, 胡帅, 李立娟, 李建, 林岩奎, 马利斌, 乔方利, 容新尧, 宋振亚, 唐彦丽, 吴波, 吴统文, 辛晓歌, 张贺, 张明华. 2020b. 中国地球气候系统模式的发展及其模拟和预估. 气象学报, 78: 332–350
- 周天军, 张文霞, 张丽霞, 张学斌, 钱云, 彭冬冬, 马双梅, 董步文. 2020a. 人为气溶胶导致全球陆地季风区降水减少的动力和热力过程. 中国科学: 地球科学, 50: 1122–1137
- 周天军, 邹立维, 陈晓龙. 2019. 第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)评述. 气候变化研究进展, 15: 445–456
- 周天军, 邹立维, 吴波, 金晨曦, 宋丰飞, 陈晓龙, 张丽霞. 2014. 我国地球气候系统模式研究进展: CMIP计划实施20年回顾. 气象学报, 72: 892–907
- Allen M R, Tett S F B. 1999. Checking for model consistency in optimal fingerprinting. *Clim Dyn*, 15: 419–434
- Archer D, Pierrehumbert R T. 2011. The Warming Papers: The Scientific Foundation of the Climate Forecast. Oxford: Wiley Blackwell Press
- Arrhenius S. 1896. On the influence of carbon acid in the air upon the temperature of the ground. *Philos Mag*, 41: 237–276
- Bonan G B, Doney S C. 2018. Climate, ecosystems, and planetary futures: The challenge to predict life in Earth system models. *Science*, 359: 533
- Charney J, Arakawa A, Baker D J, Bolin B, Dickinson R, Goody R, Leith C, Stommel H, Wunsch C. 1979. Carbon dioxide and climate: A scientific assessment. Report of an Ad Hoc Study Group on Carbon Dioxide and Climate. Washington D C: National Academy

- of Sciences Press
- Chen D, Rojas M, Samset B H, Cobb K, Diongue Niang A, Edwards P, Emori S, Faria S H, Hawkins E, Hope P, Huybrechts P, Meinshausen M, Mustafa S K, Plattner G K, Tréguier A M. 2022. Framing, context, and methods. In: Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, Connors S L, Péan C, Berger S, Caud N, Chen Y, Goldfarb L, Gomis M I, Huang M, Leitzell K, Lonnoy E, Matthews J B R, Maycock T K, Waterfield T, Yelekçi O, Yu R, Zhou B, eds. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press. In press
- Chen H, Sun J. 2017. Contribution of human influence to increased daily precipitation extremes over China. *Geophys Res Lett*, 44: 2436–2444
- Chen Y, Li W, Jiang X, Zhai P, Luo Y. 2021. Detectable intensification of hourly and daily scale precipitation extremes across Eastern China. *J Clim*, 34: 1185–1201
- Crutzen P J, Stoermer E F. 2000. The “Anthropocene”. *Global Change Newsletter*, 41: 17
- Cubasch U, Wuebbles D, Chen D, Facchini M C, Frame D, Mahowald N and Winther J G. 2013. Introduction. In: Stocker T F, Qin D, Plattner G K, Tignor M, Allen S K, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley P M, eds. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press. 119–158
- Ekholm N. 1901. On the variations of the climate of the geological and historical past and their causes. *Q J R Meteorol Soc*, 27: 1–62
- Eyring V, Gillett N P, Achuta Rao K M, Barimalala R, Barreiro Parrillo M, Bellouin N, Cassou C, Durack P J, Kosaka Y, McGregor S, Min S, Morgenstern O, Sun Y. 2021. Human influence on the climate system. In: Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, Connors S L, Péan C, Berger S, Caud N, Chen Y, Goldfarb L, Gomis M I, Huang M, Leitzell K, Lonnoy E, Matthews J B R, Maycock T K, Waterfield T, Yelekçi O, Yu R, Zhou B, eds. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press. in Press
- Fourier J B F. 1827. On the temperatures of the terrestrial sphere and interplanetary space. *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*, 7: 569–604
- Hansen J, Lacis A, Rind D, Russell G, Stone P, Fung I, Ruedy R, Lerner J. 1984. Climate sensitivity: Analysis of feedback mechanisms. In: Hansen J E, Takahashi T, eds. *Climate Processes and Climate Sensitivity*. AGU Geophysical Monograph 29, Maurice Ewing Vol. 5. American Geophysical Union. 130–163
- Hasselmann K. 1976. Stochastic climate models Part I. Theory. *Tellus*, 28: 473–485
- Hasselmann K. 1979. On the signal-to-noise problem in atmospheric response studies. In: Shaw B D, ed. *Meteorology Over the Tropical Oceans*. Bracknell: Royal Meteorological Society Publication. 251–259
- Hasselmann K. 1993. Optimal fingerprints for the detection of time-dependent climate change. *J Clim*, 6: 1957–1971
- Hasselmann K. 1997. Multi-pattern fingerprint method for detection and attribution of climate change. *Clim Dyn*, 13: 601–611
- Hegerl G C, Crowley T J, Baum S K, Kim K Y, Hyde W T. 2003. Detection of volcanic, solar and greenhouse gas signals in paleo-reconstructions of Northern Hemispheric temperature. *Geophys Res Lett*, 30: 1242
- Hegerl G C, Hasselmann K, Cubasch U, Mitchell J F B, Roeckner E, Voss R, Waszkewitz J. 1997. Multi-fingerprint detection and attribution analysis of greenhouse gas, greenhouse gas-plus-aerosol and solar forced climate change. *Clim Dyn*, 13: 613–634
- Hegerl G C, North G R. 1997. Statistically optimal methods for detecting anthropogenic climate change. *J Clim*, 10: 1125–1133
- Hegerl G C, Stott P A, Allen M R, Mitchell J F B, Tett S F B, Cubasch U. 2000. Optimal detection and attribution of climate change: Sensitivity of results to climate model differences. *Clim Dyn*, 16: 737–754
- IPCC. 1990. Climate Change. In: Houghton J T, Jenkins G J, Ephraums J J, ed. *The IPCC Scientific Assessment Contribution of Working Group I to the First Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge and New York: Cambridge University Press. 1–365
- IPCC. 1992. Climate Change 1992. In: Houghton J T, Callander B A, Varney S K, eds. *The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment*. Cambridge: Cambridge University Press. 200
- IPCC. 1996. Climate Change 1995. In: Houghton J T, Meira Filho L G, Callander B A, Harris N, Kattenberg A, Maskell K, ed. *The Science of Climate Change Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge and New York: Cambridge University Press. 1–572
- IPCC. 2001. Climate Change 2001. In: Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, Noguer M, van der Linden P J, Dai X, Maskell K, Johnson C A, ed. *The Scientific Basis Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge and New York: Cambridge University Press. 1–881

- IPCC. 2007. Climate Change 2007. In: Solomon S D, Qin M, Manning Z, Chen M, Marquis K B, Tignor A M, Miller H L, ed. The Physical Science Basis Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge and New York: Cambridge University Press. 1–996
- IPCC. 2013. Climate Change 2013. In: Stocker T F, Qin D, Plattner G K, Tignor M, Allen S K, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley P M, ed. The Physical Science Basis Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge and New York: Cambridge University Press. 1–1535
- IPCC. 2021. Annex II: Models (Gutiérrez J M, Treguier A M, eds.). In: Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, Connors S L, Péan C, Berger S, Caud N, Chen Y, Goldfarb L, Gomis M I, Huang M, Leitzell K, Lonnoy E, Matthews J B R, Maycock T K, Waterfield T, Yelekçi O, Yu R, Zhou B, eds. Climate Change 2021: The 18 Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the 19 Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press. In press
- IPCC. 2021. Summary for policymakers. In: Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, Connors S L, Péan C, Berger S, Caud N, Chen Y, Goldfarb L, Gomis M I, Huang M, Leitzell K, Lonnoy E, Matthews J B R, Maycock T K, Waterfield T, Yelekçi O, Yu R, Zhou B, eds. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press. In press
- Jones P D, Wigley T M L, Wright P B. 1986. Global temperature variations between 1861 and 1984. *Nature*, 322: 430–434
- Keeling C D. 1960. The concentration and isotopic abundances of carbon dioxide in the atmosphere. *Tellus*, 12: 200–203
- Keeling C D. 1970. Is carbon dioxide from fossil fuel changing man's environment? *Proc Amer Philosoph Soc*, 114: 10–17
- Li C, Sun Y, Zwiers F, Wang D, Zhang X, Chen G, Wu H. 2020. Rapid warming in summer wet bulb globe temperature in China with human-induced climate change. *J Clim*, 33: 5697–5711
- Lorenz E N. 1963. Deterministic nonperiodic flow. *J Atmos Sci*, 20: 130–141
- Ma S, Zhou T, Stone D A, Polson D, Dai A, Stott P A, von Storch H, Qian Y, Burke C, Wu P, Zou L, Ciavarella A. 2017. Detectable anthropogenic shift toward heavy precipitation over Eastern China. *J Clim*, 30: 1381–1396
- Manabe S, Wetherald R T. 1967. Thermal equilibrium of the atmosphere with a given distribution of relative humidity. *J Atmos Sci*, 24: 241–259
- Manabe S, Wetherald R T. 1975. The effects of doubling the CO₂ concentration on the climate of a general circulation model. *J Atmos Sci*, 32: 3–15
- Martin M A, Sendra O A, Bastos A, Bauer N, Bertram C, Blenckner T, Bowen K, Brando P M, Rudolph T B, Büchs M, Bustamante M, Chen D, Cleugh H, Dasgupta P, Denton F, Donges J F, Donkor F K, Duan H, Duarte C M, Ebi K L, Edwards C M, Engel A, Fisher E, Fuss S, Gaertner J, Gettelman A, Girardin C A J, Golledge N R, Green J F, Grose M R, Hashizume M, Hebden S, Hepach H, Hirota M, Hsu H H, Kojima S, Lele S, Lorek S, Lotze H K, Matthews H D, McCauley D, Mebratu D, Mengis N, Nolan R H, Pihl E, Rahmstorf S, Redman A, Reid C E, Rockström J, Rogelj J, Saunio M, Sayer L, Schlosser P, Sioen G B, Spangenberg J H, Stammer D, Sterner T N S, Stevens N, Thonicke K, Tian H, Winkelmann R, Woodcock J. 2021. Ten new insights in climate science 2021: A horizon scan. *Glob Sustain*, 4: e25
- Mitchell J F B, Karoly D J, Hegerl G C, Zwiers F W, Allen M R, Marengo J. 2001. Observed climate variability and change. In: Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, Noguer M, van der Linden P J, Dai X, Maskell K, Johnson C A, eds. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press. 881
- Pales J C, Keeling C D. 1965. The concentration of atmospheric carbon dioxide in Hawaii. *J Geophys Res*, 70: 6053–6076
- Plass G N. 1956. The influence of the 15 μ carbon-dioxide band on the atmospheric infra-red cooling rate. *Q J R Met Soc*, 82: 310–324
- Schneider E K, Kinter J L. 1994. An examination of internally generated variability in long climate simulations. *Clim Dyn*, 10: 181–204
- Schurer A P, Hegerl G C, Mann M E, Tett S F B, Phipps S J. 2013. Separating forced from chaotic climate variability over the past Millennium. *J Clim*, 26: 6954–6973
- Seneviratne S I, Zhang X, Adnan M, Badi W, Dereczynski C, Di Luca A, Ghosh A, Iskandar I, Kossin J, Lewis S, Otto F, Pinto I, Satoh M, Vicente-Serrano S M, Wehner M, Zhou B. 2021. Weather and climate extreme events in a changing climate. In: Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, Connors S L, Péan C, Berger S, Caud N, Chen Y, Goldfarb L, Gomis M I, Huang M, Leitzell K, Lonnoy E, Matthews J B R, Maycock T K, Waterfield T, Yelekçi O, Yu R, Zhou B, eds. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press. In press
- Slingo J, Bates K, Nikiforakis N, Piggott M, Roberts M, Shaffrey L, Stevens I, Vidale P L, Weller H. 2009. Developing the next-

- generation climate system models: Challenges and achievements. *Phil Trans R Soc A*, 367: 815–831
- Slingo J, Bauer P, Bony S, Christensen J H, Cox P, Flato G, Hegerl G, Hurrell J, Jakob C, Kattsov V, Kimoto M, Krishnan R, Marotske J, Shepherd R, Stephens G, Stevens B, Stocker T, Sutton R, Zhou T. 2021. Next generation climate models: A step change for Net Zero and climate adaptation. Royal Society Science and Technology for Climate Action Briefing
- Steffen W, Richardson K, Rockström J, Schellnhuber H J, Dube O P, Dutreuil S, Lenton T M, Lubchenco J. 2020. The emergence and evolution of Earth System Science. *Nat Rev Earth Environ*, 1: 54–63
- Sun Y, Zhang X, Ding Y, Chen D, Qin D, Zhai P. 2021. Understanding human influence on climate change in China. *Natl Sci Rev*, 9: nwab113
- Sun Y, Zhang X, Ren G, Zwiers F W, Hu T. 2016. Contribution of urbanization to warming in China. *Nat Clim Change*, 6: 706–709
- Sun Y, Zhang X, Zwiers F W, Song L, Wan H, Hu T, Yin H, Ren G. 2014. Rapid increase in the risk of extreme summer heat in Eastern China. *Nat Clim Change*, 4: 1082–1085
- Tett S F B, Mitchell J F B, Parker D E, Allen M R. 1996. Human influence on the atmospheric vertical temperature structure: Detection and observations. *Science*, 274: 1170–1173
- Tett S F B, Stott P A, Allen M R, Ingram W J, Mitchell J F B. 1999. Causes of twentieth-century temperature change near the Earth's surface. *Nature*, 399: 569–572
- Tyndall J. 1861. on the absorption and radiation of heat by gases and vapours, and on the physical connection of radiation, absorption, and conduction. *Philos Trans R Soc*, 152: 59–98
- WCRP Joint Scientific Committee (JSC). 2019. World Climate Research Programme Strategic Plan 2019–2028. WCRP Publication 1/2019
- Wen Q H, Zhang X, Xu Y, Wang B. 2013. Detecting human influence on extreme temperatures in China. *Geophys Res Lett*, 40: 1171–1176
- Xu Y, Gao X, Shi Y, Zhou B. 2015. Detection and attribution analysis of annual mean temperature changes in China. *Clim Res*, 63: 61–71
- Zhai P, Zhou B, Chen Y. 2018. A review of climate change attribution studies. *J Meteorol Res*, 32: 671–692
- Zhang X, Zwiers F W, Hegerl G C, Lambert F H, Gillett N P, Solomon S, Stott P A, Nozawa T. 2007. Detection of human influence on twentieth-century precipitation trends. *Nature*, 448: 461–465
- Zhou T, Zhang W. 2021. Anthropogenic warming of Tibetan Plateau and constrained future projection. *Environ Res Lett*, 16: 044039

(责任编辑: 穆穆)