



从全球变暖到复杂物理系统——2021年诺贝尔物理学奖解读

胡永云

北京大学物理学院大气与海洋科学系气候与海气实验室, 北京 100871

E-mail: yyhu@pku.edu.cn

2021年诺贝尔物理学奖授予了两位气候学家和一位理论物理学家, 以表彰他们在“理解复杂物理系统领域所做出的开创性贡献”。诺贝尔物理学奖委员会巧妙地把地球气候系统问题与理论物理问题“统一”在一起, 凸显对基于物理理论解决复杂现实世界问题, 尤其是地球气候变化问题的高度重视, 而非把评奖目标仅限于传统的物理学领域。

本文将从以下4个方面解读为何2021年诺贝尔物理学奖授予两位气候学家: 工业化以来的全球变暖问题, 全球变暖的物理基础和科学简史, 两位气候学家是如何基于基础物理理论可靠地预估全球变暖以及如何检测和归因人类活动导致全球变暖的。最后, 将结合我国“碳达峰、碳中和”国家战略, 简要介绍21世纪气候变化的最新预估结果。

人类身处其中的地球气候系统是一个复杂物理系统。一方面, 在太阳辐射这一外强迫作用下, 气候系统具有足够的稳定性。另一方面, 在内部和外部扰动的作用下, 气候系统展现出不同时空尺度的变率。在百万年至千万年构造时间尺度上, 地质活动是气候系统波动的主控因素, 与板块运动相关的地球深部-表层-大气之间的碳循环导致了深时气候环境的冷-暖转换。在万年至十万年时间尺度上, 地球轨道的变化是气候系统波动的主控因素, 这就是著名的米兰科维奇循环。在年际到千年时间尺度上, 海洋环流的波动主导了气候系统的变化。几周以内的天气变化则主要是由于大气内部波动造成的。

这些不同时间尺度的主控因素只是触发了气候系统的变化。在气候系统内部一系列反馈机制的作用下, 这些主控因素导致的气候变化或被放大或被抑制, 使得气候系统的波动更加复杂化。例如, 碳酸盐-硅酸盐负反馈机制是在构造时间尺度上稳定地球气候系统的重要因素; 冰-雪反照率正反馈是气候系统在冰期-间冰期之间转换的放大机制; 水汽正反馈机制放大了二氧化碳(CO₂)的温室效应。

气候系统的复杂性还包括地球圈层之间的相互作用。例如, 厄尔尼诺和南方涛动(El Nino and Southern Oscillation, ENSO)是海气相互作用的结果, 它在很大程度上影响了全球气候的年际变化, 温盐环流的变化主控了气候系统从年代际



胡永云 北京大学物理学院大气与海洋科学系博雅特聘教授, 中国气象学会副理事长, 多个国内外期刊编委, 曾任北京大学物理学院大气与海洋科学系主任、副院长。2000年于芝加哥大学获博士学位, 2000~2002和2002~2004年分别于华盛顿大学和哥伦比亚大学做博士后。研究领域为现代气候变化、深时古气候、行星气候和宜居性。

到千年时间尺度的变化。地球内部活动与大气层的相互作用导致了大气CO₂浓度的变化, 这是地球气候在百万至千万年冷暖波动的主要原因。大气层与生物圈的相互作用也对气候系统有着重要的影响。

另外, 气候系统的复杂性还在于其不可能通过传统物理的实验室手段来验证。传统的物理实验可以把一个系统孤立起来, 在实验室或者大型科学实验装置中进行, 但气候系统的观测现象和理论只能通过数值模拟来验证。因此, 建立可靠的气候模式是模拟气候历史变化和预估未来变化的重要工具。

人类出现至今大约有250万年的历史, 这是地球气候一个相对偏冷的时期。在人类历史的绝大部分时间内, 人类仅仅在适应气候环境的条件下生存。但随着文明的进展和科技的进步, 人类对气候系统的影响力不断增强, 逐渐成为扰动气候系统的一个重要维度。尤其是工业革命以来, 大量化石燃料的燃烧, 释放愈来愈多的CO₂到大气层, 造成全球变暖。人工合成的一些化合物也对气候环境产生重要影响, 如氟利昂对臭氧层的破坏作用。

因此, 2021年诺贝尔物理学奖授予气候学家真锅淑郎(Syukuro Manabe)和哈尔塞曼(Klaus Hasselmann)^[1], 表明物理学奖委员会对全球变暖这一复杂物理问题的高度重视。两位气候学家获奖必将进一步引起国际社会对全球变暖问题的关注。

1 工业化以来的全球变暖问题

当我们谈论全球变暖时,其实包含三个层面的问题:(1)观测记录表明,全球平均温度在近百年上升了将近1°C;(2)人类燃烧化石燃料导致的温室气体排放增加是全球变暖的主要原因;(3)全球变暖将导致海平面上升和极端灾害性天气、气候事件频发等一系列问题,对人类生存环境造成极大的危害。

图1给出的是第六次政府间气候变化评估报告给政策制定者的总结报告(IPCC-AR6 SPM)中关于全球温度变化的最新结果^[2]。1850年以来的全球温度升高是过去2000年最快的(图1(a)),20世纪70年代以来全球气温升高尤其显著(图1(b))。IPCC-AR6 SPM的结论是,温室气体增加导致的温度升高大约是1~2°C,人类活动排放的气溶胶增加造成了0.0~0.8°C降温,人类活动造成的全球温度净升高大约是0.8~1.3°C。

图1(b)给出的是气候模式模拟的1850~2020年全球平均温度变化与器测温度变化的比较。如果气候模式仅包含自然因素的影响,全球平均温度并没有呈现上升趋势。但是,如果气候模式包含了人为温室气体和气溶胶排放,则全球平均温度的变化趋势与观测的非常一致,说明人类活动确实是造成全球变暖的主要原因^[2]。

2 全球变暖的物理基础和科学简史

2021年诺贝尔物理学奖的背景介绍材料明确指出,关于全球变暖是人类活动造成这一论断是建立在坚实的科学基础之上的。2012年,我曾应邀为《物理》撰写了“全球变暖的物理基础和科学简史”一文,简述了全球变暖的物理基础,并

全面回顾了其近200年的科学认知历史^[3]。《The Warming Papers》一书收集了关于全球变暖研究最重要的文献,并对相关文献给予了评论^[4]。本文对这方面的内容做简要总结,以便给读者一个系统的认识。

关于全球变暖的科学历史,通常追溯到傅里叶(Baron Jean Baptiste Joseph Fourier, 1768–1830)在1827年第一次提出地球大气具有温室效应^[5]。假定没有大气层的存在,根据辐射能量平衡,可计算出全球平均地表温度是 $T = -18^{\circ}\text{C}$ 。而实际的观测值是 15°C ,这表明大气层的温室效应把地表温度升高了 33°C 。傅里叶在提出大气具有温室效应时,并没有给出定量计算,只是定性地论述了这一问题,也没有使用温室效应这个比喻,因为那时现代物理学在许多方面都还处于“婴儿”阶段。那时红外辐射仍然被称为“暗热”(dark heat)或“暗辐射”(dark radiation),很类似今天所说的“暗能量”,也不清楚如何定量地计算红外辐射传输。今天,我们知道红外辐射是电磁波谱的一部分,同样能够在真空中传播。

大气层具有温室效应并不意味着所有大气成分都具有温室效应。1861年,爱尔兰化学家丁铎尔(John Tyndall, 1820~1893)通过实验室测量指出,大气中只有含量很少的三原子分子具有温室效应,分别是 CO_2 、 H_2O 、 CH_4 、 N_2O 和 O_3 等,而大气的主要成分 N_2 和 O_2 则没有温室效应^[6]。

CO_2 和 H_2O 等是三原子气体分子,当它们的分子结构从基态向非对称拉伸和弯曲振动态转化时,都需要吸收或发射一定的能量。根据量子力学的原理,气体分子吸收或发射的能量是量子化的,也就是 $E_n = nh\nu$ ($n = 1, 2, 3, \dots$)。振动跃迁需要的光子频率位于电磁波的红外波段,所以是温室气体。如 CO_2 的振动跃迁所需要的光子波长大约在2、3、4 μm 附

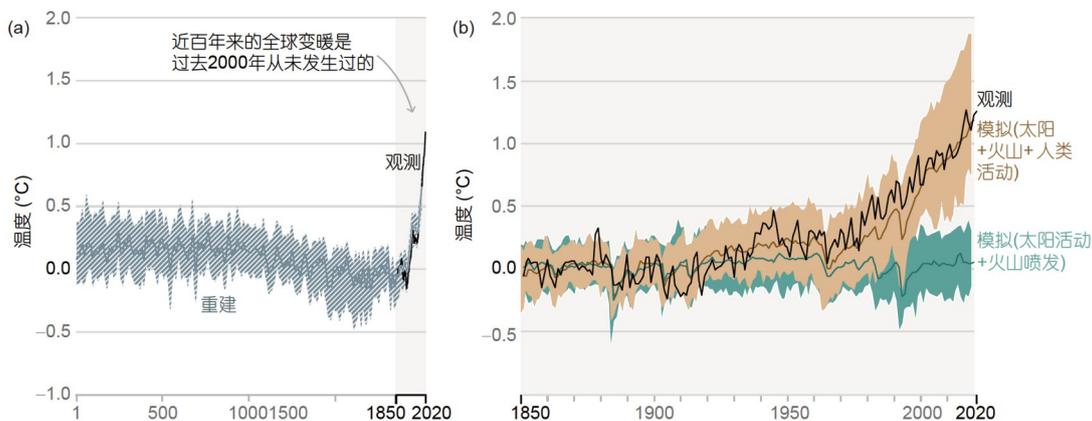


图1 全球年平均温度时间序列。(a)近2000年温度变化,其中1~2000是根据替代资料重建的温度,1850~2020是器测温度,灰色阴影区表示重建温度的可能变化范围。(b)1850~2000年温度变化,黑线是观测温度,绿线是气候模式模拟的仅包含自然变化因素(太阳活动和火山喷发)的温度变化,棕色线是气候模式模拟的既包含自然因素又包含人类活动的温度变化,阴影区是模拟结果可能变化范围。修改自文献^[2]

Figure 1 Time series of global and annual mean surface air temperatures. (a) Temperature reconstructed from paleoclimate archives (solid grey line, 1–2000) and from direct observations (solid black line, 1850–2020), both relative to 1850–1900 and decadal averaged. (b) Changes in global surface temperature over the past 170 years (black line) relative to 1850–1900 and annually averaged, black line is observation, green line is from simulations that only include natural forcings (Solar activity and volcanic eruptions), and brown line is from simulations that include both anthropogenic and natural forcings. Colored shades show the very likely range of simulations. Adapted from Ref. ^[2]

近, 弯曲模态所对应的波长在13~17 μm .

H_2O 和 O_3 分子与 CO_2 的分子结构不一样, 不是直线排列的, 具有永久的偶极矩. 所以, 它们除了具有振动-弯曲跃迁之外, 还有转动跃迁. 转动跃迁所需的能量较振动-弯曲跃迁能量低一些. 水汽的一个重要的振动-弯曲吸收带位于波长6.3 μm , 其转动模态位于波长大于12 μm 的红外波段.

N_2 和 O_2 都是双原子分子, 对称性的电荷分布决定了它们没有振动和转动能量跃迁, 其能量变化是由电子能级跃迁造成的. 电子能级跃迁产生的吸收和发射谱位于电磁波的紫外和更高频波段, 所以不是温室气体.

1896年, 瑞典物理化学家阿伦尼乌斯(Svante Arrhenius, 1859~1927)定量地计算了 CO_2 的气候敏感性^[7]. 在阐述大气温室效应时, 阿伦尼乌斯设计了一个理想的单层气候模式(图2). 该模式在垂直方向只有一个等温大气层, 还考虑了水汽的正反馈和冰-雪反照率的正反馈. 当地表吸收太阳辐射(F_{\odot})之后, 向大气层发射红外辐射(F_G). 大气层吸收地表辐射之后, 同时向上和向下发射红外辐射(F_A), 其中, 向下的部分就代表了大气的温室效应. 在没有大气层的情况下, 这一部分能量是没有的.

利用该模式, 阿伦尼乌斯的计算表明, 如果大气中的 CO_2 浓度增加一倍, 全球平均地表温度将升高6 $^{\circ}\text{C}$, 与真锅淑郎和现在三维气候模式给出的 CO_2 加倍的气候敏感性相比, 阿伦尼乌斯的模式过高地估计了气候对 CO_2 变化的敏感性. 其误差主要来源于两点: (1) 阿伦尼乌斯所推算的 CO_2 和水汽吸收谱并不准确, 过高地估计了 CO_2 的温室效应, (2) 他的单层等温大气模式高估了大气层向外的红外辐射, 降低了大气的温室效应. 二者的综合结果高估了 CO_2 和水汽的温室效应.

在阿伦尼乌斯时代, 还没有 CO_2 和 H_2O 吸收谱的实验室测量数据, 他推算 CO_2 和水汽对红外辐射的吸收谱所使用的数据是来自美国天文学家S. P. Langley积累的月光红外波段

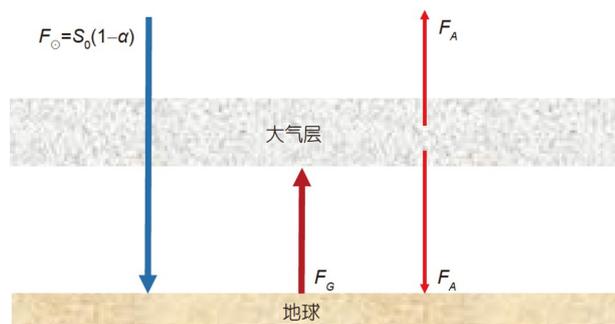


图2 (网络版彩色)阿伦尼乌斯的一层大气能量平衡模式示意图. $F_{\odot} = S_0(1-\alpha)$ 代表到达地表的太阳辐射, F_G 代表地表向外发射的红外辐射, F_A 代表大气层向外和向地表发射的红外辐射

Figure 2 (Color online) Schematic plot of Arrhenius' one-layer energy balance model. $F_{\odot} = S_0(1-\alpha)$ indicates solar radiation on the surface, F_G denotes infrared radiation emitted from Earth's surface, and F_A denotes infrared radiation emitted by the atmosphere

的观测资料. 阿伦尼乌斯的想法是使用这些观测数据来计算整个大气柱中 CO_2 和水汽对月光红外辐射的吸收特性. 如果把今天准确的 CO_2 和水汽吸收谱放到阿伦尼乌斯的气候模式, 其结果是气候对 CO_2 的敏感性要弱得多.

尽管阿伦尼乌斯的结果有较大的误差, 但他是第一位定量地计算了气候对 CO_2 的敏感性, 也是第一位提出了人类燃烧化石燃料可能导致全球变暖, 并且有可能阻止气候系统向下一个冰期演变的科学家. 但有意思的是, 阿伦尼乌斯认为气候变暖将有助于人类生存环境的改善, 而且, 日益增加的人口需要更为温和的气候环境. 这一观点也是目前那些认为全球变暖并非是一件坏事的主要论据之一.

3 辐射传输的定量计算

虽然傅里叶、丁铎尔和阿伦尼乌斯的研究为我们理解大气温室效应、温室气体和 CO_2 的气候敏感性奠定了基础, 但精确计算大气温室效应和 CO_2 的气候敏感性还需要更完整知识体系的建立. 进入20世纪之后, 气候科学研究极大地得益于物理学的飞速发展, 尤其是关于分子结构的认识以及量子力学的建立极大地促进了对气体分子吸收谱(分子光谱)的理解. 在此基础上, 随着实验技术的提高, 温室气体的吸收谱也在实验室得到了准确的测量.

另一个对全球变暖问题具有重要贡献的是天文学领域辐射传输理论的建立和完善. 20世纪初期, 天体物理学家基于对恒星结构以及恒星内部核聚变能量通过对流和辐射向外发射的研究, 建立了辐射传输的基本方程, 这方面的代表性工作是施瓦氏(Karl Schwartzchild, 1873~1916)^[8]在1906年发表的论文. 20世纪40年代, 辐射传输问题成为了非常活跃的研究领域, Hugh Elsasser, Richard Goody和Lou Kaplan等学者均开展辐射传输研究, 但都没有专门探讨 CO_2 增加的气候效应. 著名天体物理学家钱德拉塞卡(Subrahmanyan Chandrasekhar, 1910~1995)^[9]在1950年发表了关于辐射传输的专著, 系统地建立了电磁波辐射传输理论.

到了20世纪50年代, 计算机的发展为准确地计算多层大气辐射传输和 CO_2 的气候敏感性提供了可能. 普拉斯(Plass)^[10]首先使用了更为准确的 CO_2 吸收谱数据和多层大气辐射传输模式来计算 CO_2 变化对气候的影响. 他的计算结果表明, CO_2 加倍将造成地面增温大约3~6 $^{\circ}\text{C}$, 说明阿伦尼乌斯的结果仅是 CO_2 气候敏感性的上边界.

虽然普拉斯的结果比阿伦尼乌斯的更为准确, 但普拉斯工作存在3个关键的问题: (1) 那时还没有完整的水汽吸收谱的测量结果; (2) 没有考虑大气的垂直对流运动; (3) 一个关键性的错误是对地面辐射能量平衡的解释. 在普拉斯的模型中, 为了计算 CO_2 加倍造成的地面升温, 而固定了大气温度, 其结果是大气层顶入射太阳辐射和向外的红外辐射处于不平衡状态. 实际上, 在大气中 CO_2 加倍之后, 大气对流层的温度必将升高, 正是由于对流层温度的升高, 大气向下的辐射红外

增加才造成了地面温度的升高,而在大气层顶,入射太阳辐射和出射红外辐射是平衡的。

4 真锅淑郎的辐射-对流模式

从傅里叶的模糊认识到普拉斯定量计算,经过100多年的发展,人们对大气温室效应和CO₂气候敏感性的理解愈来愈清楚,但一个真正现代意义上的气候模式直到1967年才由Manabe和Wetherald^[11]完成,就是他们建立的辐射-对流模式(radiative-convective model)。Manabe和Wetherald建立的辐射-对流模式相较于以前的研究工作有四方面重大突破。

(1) 该模式包含了精确测量的水汽吸收谱。如前所述,水汽分子不仅具有振动-弯曲能量跃迁,还具有转动跃迁,其吸收谱更为复杂,延伸到了远红外波段。直到20世纪60年代,水汽的吸收谱才得到了较为准确的测量。

(2) 在考虑水汽的正反馈辐射效应时,真锅淑郎使用了固定相对湿度的方案。他们根据观测的相对湿度垂直廓线,给定地表相对湿度为80%,线性递减至对流层顶的10%。在模式积分过程中,该垂直廓线保持不变。当CO₂加倍时,对流层大气温度升高,水汽含量也随之升高,水汽的温室效应使得大气温度进一步升高,很好地体现了水汽正反馈效应。

(3) 首次在模式中加入了对流调整方案。在单纯辐射平衡条件下,对流层大气温度垂直递减率远大于干绝热温度递减率,大气层结是不稳定的,势必产生对流运动,把近地面层热量向上输送,从而使大气层结处于稳定状态。真锅淑郎使用每升高1000 m温度降低6.5 °C作为大气层结稳定的判据。该对流调整方案实际上相当于一个最简单的对流参数化方案(无云、无潜热释放)。

(4) 最为关键的一点是,他们的辐射-对流模式解决了大气层顶辐射能量平衡问题。阿伦尼乌斯的单层大气模式考虑了辐射能量平衡问题,但普拉斯等的多层辐射传输模式则有这方面的缺陷,他们甚至根本没有意识到这一问题。

真锅淑郎建立的辐射-对流模式对理解气候变暖是一个里程碑式的工作。第一次全面解决了辐射传输的各个问题,并与对流调整相结合,建立了一个可靠的计算CO₂增加导致全球变暖的数值模式。图3是真锅淑郎辐射-对流模式模拟的大气温度垂直廓线^[12]。以300 ppm(每百万体积单位中所占的分量,1 ppm = 10⁻⁶ m³/m³) CO₂作为控制试验(黑线),当CO₂加倍时(红线),地表气温升高2.36 °C。而当CO₂减半时(蓝线),地表气温下降2.28 °C。今天,即使人们更多地使用三维大气-海洋耦合模式模拟和预估全球变暖,Manabe和Wetherald^[11]的论文仍是我们理解全球变暖的基础。

真锅淑郎是日裔美国人,1931年生于日本爱媛县,在东京大学完成本科到博士阶段的学习,1958年博士毕业后前往美国气象局工作。第二次世界大战之后的日本,生活非常艰苦,许多年轻人都希望前往美国留学或工作。20世纪50年代,一批日本气象学家去了美国,其中多人后来作出了很大成就,

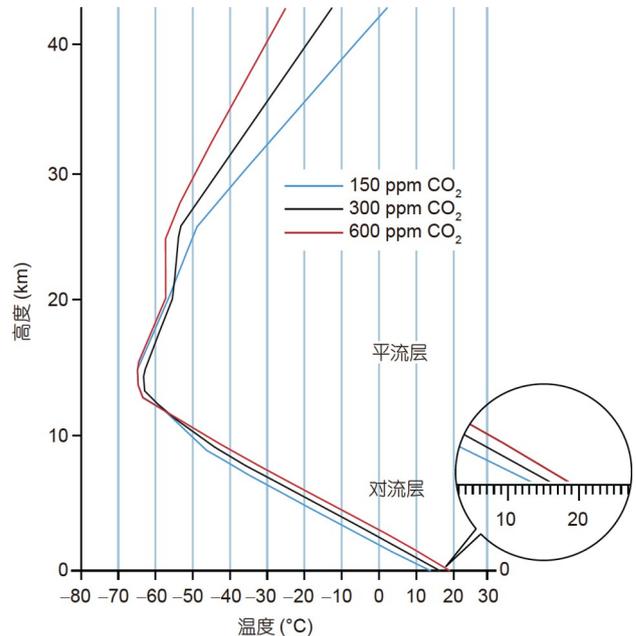


图3 诺贝尔物理学奖委员会根据文献[12]的图16重新制作的CO₂加倍和减半模拟大气温度垂直廓线。黑线是300 ppm CO₂的模拟结果,蓝线是CO₂减半(150 ppm),红线是CO₂加倍(600 ppm)

Figure 3 Vertical profiles of thermal equilibrium atmospheric temperatures simulated by the radiative-convective model. It is Figure 16 in Ref. [12], which is modified by the Royal Swedish Academy of Sciences. Black line: 300 ppm CO₂, blue line: 150 ppm CO₂, and red line: 600 ppm CO₂

如后来在芝加哥大学任教的Fujita和在加州大学洛杉矶分校任教的Arakawa等。1963年,美国海洋大气管理局在普林斯顿大学附近成立了地球流体动力学实验室(Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, GFDL),真锅淑郎在GFDL一直工作到1997年退休。之后,他回到日本工作至2002年,因不适应日本的工作环境,又回到了美国,被普林斯顿大学聘为无薪酬客座教授。

20世纪60年代是美国数值天气预报模式蓬勃发展的时期,与之相关的辐射传输模式也是亟需的,三维大气环流模式刚开始发展。在Manabe和Wetherald论文之前,真锅淑郎等人合作已建立了包括水汽吸收谱的单纯辐射平衡模式^[13]和包括对流调整的模式^[14],同时,他也已开始研发三维大气环流模式(atmosphere general circulation model, AGCM)^[12]。真锅淑郎早期的工作主要是写模式程序。写模式代码是一项辛苦的工作,但真锅淑郎并没有嫌弃,而是非常热爱这份工作。真锅淑郎并不是一个单纯的程序员,他具有清晰的物理思想,并把自己的物理思想运用到气候模式研发中,这是他取得巨大成就的关键原因。今天,我们把他称为现代气候模式之父并不为过。

5 CO₂观测和最优指纹法

以上从理论和数值计算方面回顾了CO₂的温室效应以及

全球变暖问题. 在认知全球变暖和人类活动影响的历史进程中, 还有两个关键环节: 一个是大气CO₂浓度观测, 另一个是如何检测和归因人类活动对全球变暖的贡献.

1957年是国际地球物理年¹⁾, 世界各国开展了大规模的地球观测. 加州大学圣地亚哥分校教授Charles D. Keeling (1928~2005)在夏威夷的Mauna Loa山顶建立了世界上第一个CO₂观测站, 获得了时间最长的CO₂浓度器测资料. 图4是Keeling观测的大气CO₂浓度时间序列. CO₂浓度从1958年的316 ppm增加到2021年10月的大约417 ppm. 与工业革命前的CO₂浓度(280 ppm)相比, 增加量已超过了137 ppm. 图中的红线代表月平均时间序列, 曲线的波动是CO₂浓度的季节变化, 幅度大约是7 ppm. Keeling关于CO₂观测最重要的两篇论文分别发表在1960和1970年^[15,16]. 1960年, 观测才刚开始2年, 他的论文并没有引起轰动, 但1970年的论文则产生了巨大的影响, 学术界和国际社会才开始认真地考虑人类燃烧化石燃料造成的CO₂增加将有可能导致全球气候变暖. 因此, Keeling是第一位根据观测事实揭示人类排放的CO₂是导致全球变暖的主要因素的研究人员.

关于检测和归因人类活动对全球变暖的影响, 通常使用两种方法. 一种是如图1(b)所示的, 比较两类气候系统模式模拟结果, 自然因素扰动和人为因素强迫. 很显然, 在气候模式中加入温室气体增加的因素之后, 温度升高与观测的一致, 说明人类活动是导致全球变暖的主要原因.

另一种方法就是哈尔塞曼(Hasselmann)建立的最优指纹法(spatial-temporal fingerprint). 最优指纹法不仅强调气候系统的时间变化, 也强调全球气候变化的空间分布, 因此, 也被

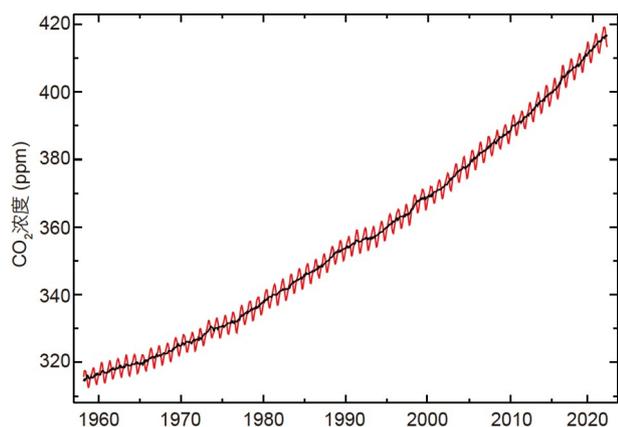


图4 (网络版彩色)夏威夷Mauna Loa观测站给出的月平均CO₂浓度1958~2020年时间序列(修改自<https://keelingcurve.ucsd.edu>)
Figure 4 (Color online) Monthly mean CO₂ concentration from Mauna Loa over 1958~2020 (Data from Scripps Institution of Oceanography, <https://keelingcurve.ucsd.edu>)

称为时空指纹法^[17-20]. 图5是最优指纹法的一个示例^[21]. Y 代表观测的气温时空变化(1946~1996年), 图5左侧的每一幅图代表10年平均全球地表气温距平. X 代表气候模式模拟的人类活动造成的温度变化空间分布, 同样, 图5右侧每一幅图代表模式模拟的10年平均全球地表气温距平. ϵ 代表气候系统的内部变率(呈高斯分布), β 表示 X 空间模态随时间变化的振幅. 这样就根据气候模式的模拟结果把观测的全球温度变化分解为人类活动影响和气候系统的自然变率两部分. 其中, 模式模拟的人类活动造成的气温变暖空间分布可与观测的相比较, 而变暖的幅度可由 β 得到. 因此, 哈尔塞曼的最优指纹法可把人类活动造成的全球变暖在时空尺度上与气候系统的自然变率导致的气候变化区别开来.

哈尔塞曼关于最优指纹法的第一篇论文发表于1979年, 在将近20年时间内, 并没有引起学界的重视. 直到20世纪90年代后期, 他的学生将该方法用于检测和归因人类活动对气候变化的影响^[22,23], 才逐步引起学界的重视, 特别是引起了IPCC评估报告的重视. 经过气候变化研究领域学者的不断完善和改进, 尤其是针对全球变暖检测和归因的应用, 国际同行才意识到哈尔塞曼研究成果的重要性^[24]. 回顾IPCC到目前的6次评估报告关于人类活动对气候变化影响的结论, 从第一次评估报告到第六次分别是稍显模糊的说明、“可辨别”、“可能”、“很可能”、“极可能”和“毋庸置疑”, 哈尔塞曼方法的应用使得全球变暖的检测和归因变得愈来愈明确和肯定.

本人作为主要作者参加了IPCC-AR5检测和归因的撰写(第10章), 其中最重要的一句话就是“超过1/2的1951~2010年全球平均温度升高是由于人类活动产生的温室气体增加造成的(More than half of the observed increase in global mean surface temperature (GMST) from 1951 to 2010 is very likely due to the observed anthropogenic increase in greenhouse gas (GHG) concentrations)”. 这一章的作者反复斟酌和修改这一句话. 虽然检测和归因得出的结论是人类活动对全球变暖的贡献“超过2/3”, 但撰写AR5时, 正好经历“全球变暖停滞”, 因此, 那一章作者们认为气候系统的自然变率对气候变化的作用可能更大, 最后把结论修正到“超过1/2”. 我个人的感受是, 参与IPCC报告撰写的作者整体是相对保守的, 给出的评估结论也是相对保守的, 因为IPCC评估报告将在国际社会引起巨大的反响.

与真锅淑郎的学术人生不同, 哈尔塞曼的学术生涯变换了三个不同的研究领域, 并在多个科研机构工作过. 他是物理学博士, 毕业后转向物理海洋方向, 20世纪70年代转向气候变化研究. 但有一点是相同的, 他们都在思考影响人类生存环境的根本科学问题, 并根据自己的特长解决问题. 哈尔塞曼具有良好的数理基础, 他建立的最优指纹法是一种理论

1) 国际地球物理年(international geophysical year)指的是1957年7月1日~1958年12月31日(为期18个月)世界各国共同进行的一次全球性的联合观测.

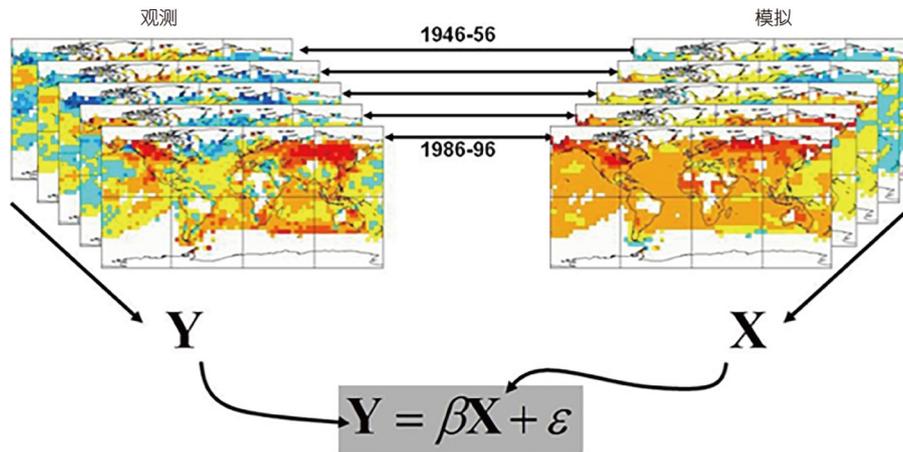


图5 最优指纹法示例. 来自文献[21]

Figure 5 Example of the optimal fingerprint. Adapted from Ref. [21]

性很强的数学方法, 目的是为把人类活动对气候系统的影响与气候系统的自身变率分离开来.

6 恰尼报告和IPCC评估报告

尽管阿伦尼乌斯早在1896年就已提出了人类燃烧化石燃料将导致大气CO₂增加, 并将造成气候变暖, 但直到20世纪50年代, 一些学者才开始向社会呼吁, 人类活动导致的CO₂增加将造成全球变暖. 1979年, 美国著名气象学家恰尼(Jule G. Charney, 1917~1981)受美国科学院国家研究顾问委员会的委托提交了一份研究报告, 后来被称为“恰尼报告”(The Charney Report)^[25]. 在考虑了各种可能的气候系统反馈机制、真锅淑郎的辐射-对流模式结果以及三维气候模式结果之后指出, CO₂加倍毫无疑问将导致全球平均温度升高1.5~4.5 °C, 这也是当时给出的CO₂气候敏感性. 该报告公布之后, 人类活动导致全球变暖的概念开始进入公众的视野, 并引起欧美各国政府的高度重视. 也是从那个时候开始, 气候变化成为了大气和海洋领域的主要研究方向, 再后来甚至成为了整个地球科学的重要研究方向.

1988年, 世界气象组织和联合国环境署共同成立了“政府间气候变化专门委员会”, 为世界提供全球气候变化的进展状况和气候变化对社会、环境与经济的潜在影响的综合科学评估. IPCC于1990、1995、2001、2007、2013和2021年分别发表了6次评估报告, 在最新的第6次评估报告中(IPCC-AR6), CO₂加倍将造成2.5~4 °C的增温^[2], 这与恰尼报告的结果基本一致. IPCC-AR6最重要的结论: “人类影响毋庸置疑地已经导致了大气、海洋和陆地变暖, 大气、海洋、冰冻圈和生物圈广泛分布的迅速变化已经出现”^[2].

7 21世纪气候预估和双碳战略

图6是IPCC-AR6给出的21世纪全球年平均温度变化最

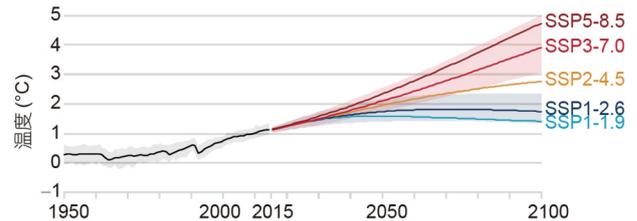


图6 气候模式预估的5种温室气体排放情形下21世纪全球平均近地面气温变化. 修改自文献[2]

Figure 6 Projected near-surface temperature changes for the 21st century. Adapted from Ref. [2]

新预估. IPCC给出了5种温室气体排放情形下的气温变化预估. 如果不控制温室气体排放(SSP5-8.5), 21世纪末全球平均温度将升高约4.7 °C. 如果严格控制排放(SSP1-1.9或SSP1-2.6), 温度将升高约1.5 °C, 这是2016年各国政府签订的《巴黎协定》所期望达到的目标.

为减缓全球变暖, 全球178个缔约方于2016年4月22日共同签署了气候变化协定, 也就是《巴黎协定》(The Paris Agreement), 对2020年后全球应对气候变化的行动做出了统一安排. 《巴黎协定》的长期目标是将全球平均气温较工业革命前上升幅度控制在2 °C以内, 并努力将温度上升幅度限制在1.5 °C以内.

为履行《巴黎协定》, 我国制订了碳达峰、碳中和的“双碳”战略目标, 计划在2030年我国CO₂的排放量达到峰值, 之后逐步下降, 通过使用低碳能源取代化石燃料、增加碳汇, 以抵消自身产生的CO₂排放量, 2060年实现CO₂净零排放. “双碳”计划的核心是减排和增汇, 它不仅涉及能源政策、产业结构调整、陆地和海洋生态系统维护, 也包含减排和增汇所伴随的气候环境变化问题. 因此, “双碳”计划需要从能源政策、产业结构到气候环境和生态系统的综合研究.

8 结论

气候系统也许是我们面对的最复杂的物理系统。它不仅包括不同时空尺度的自身内部变率、圈层之间的相互作用以及各种反馈机制，还包括工业革命以来人类活动的影响。2021年诺贝尔物理学奖授予两位气候学家，凸显了物理学奖委员会对我们身处其中的气候系统变化问题的高度重视，强调了依据基本物理原理理解和解决现实世界问题的重要性。

真锅淑郎和哈尔塞曼的获奖是实至名归，他们均为认知人类活动对气候系统的影响作出了开创性的贡献。虽然真锅淑郎和哈尔塞曼的学术道路有很大的不同，但他们的共同点是对科学的热爱，一直思考和试图解决人类活动是如何影响气候环境的。他们应该从没有思考过他们的研究成果将获得诺贝尔物理学奖，因为他们从事的并非传统物理学研究。所以，获得诺贝尔奖并非他们的目标，解决人类活动对气候环

境的影响才是他们的初衷。

随着科学技术的发展，人类影响气候环境的能力也愈来愈强，很好地保护我们生存其中的气候环境是每一位地球公民的神圣职责。人类保护自然环境的一个成功例子就是停止使用氟利昂。大量的研究表明，人工合成的氟利昂造成臭氧层损耗和南极臭氧洞形成^[26]。自1987年蒙特利尔破坏臭氧层物质管制议定书签订和逐步停止使用氟利昂之后，臭氧层和南极臭氧洞有逐步恢复的趋势，说明人类完全可以通过自身的努力减少对自然环境的破坏。同样，通过减排和增汇温室气体也能够达到减缓全球变暖的目的。

本文主要从全球变暖的物理基础和科学简史的角度，解读真锅淑郎和哈尔塞曼的开创性科学贡献。周天军等从地球气候系统的角度对两位获奖人的学术贡献作出了解读^[27]，可供读者参考。

致谢 感谢国家自然科学基金(41888101)资助。周天军和孙颖博士为本文撰写提供了大量信息，张诗妍博士阅读了初稿，提出了修改意见，魏强博士帮助修改图片，在此向他们表示感谢。

推荐阅读文献

- 1 The Nobel Committee for Physics. Scientific Background on the Nobel Prize in Physics 2021. 2021
- 2 IPCC. Summary for Policymakers. In: Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, 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, 2021
- 3 Hu Y Y. Physical basis of global warming and a brief history of Science (in Chinese). *Physical*, 2012, 41: 495–504 [胡永云. 全球变暖的物理基础和科学简史. *物理*, 2012, 41: 495–504]
- 4 Archer D, Pierrehumbert R P. *The Warming Papers: The Scientific Foundation for the Climate Change Forecast*. Hoboken: Wiley-Blackwell, 2011
- 5 Fourier J B. On the temperatures of the terrestrial sphere and interplanetary space. *Mem l'Acad Roy Sci*, 1827, 7: 569–603
- 6 Tyndall J. On the absorption and radiation of heat by gases and vapours, and on the physical connexion of radiation, absorption, and conduction. *Philosoph Magaz*, 1861, 22: 169–194
- 7 Arrhenius A. On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. *Phil Mag*, 1896, 41: 237–275
- 8 Schwarzschild K. On the equilibrium of the sun's atmosphere. *Nach König Gesell Wiss Göttingen Math-Phys Klasse*, 1906, 195: 41–53
- 9 Chandrasekhar S. *Radiation Transfer*. Oxford: Oxford University Press, 1950
- 10 Plass G N. The influence of the 15μ carbon-dioxide band on the atmospheric infra-red cooling rate. *Q J R Met Soc*, 1956, 82: 310–324
- 11 Manabe S, Wetherald R T. Thermal equilibrium of the atmosphere with a given distribution of relative humidity. *J Atmos Sci*, 1967, 24: 241–259
- 12 Manabe S, Wetherald R T. The effects of doubling the CO_2 concentration on the climate of a General Circulation Model. *J Atmos Sci*, 1975, 32: 3–15
- 13 Manabe S, Möller F. On the radiative equilibrium and heat balance of the atmosphere. *Mon Wea Rev*, 1961, 89: 503–532
- 14 Manabe S, Strickler R F. Thermal equilibrium of the atmosphere with a convective adjustment. *J Atmos Sci*, 1964, 21: 361–385
- 15 Keeling C D. The concentration and isotopic abundances of carbon dioxide in the atmosphere. *Tellus*, 1960, 12: 200–203
- 16 Keeling C D. Is carbon dioxide from fossil fuel changing man's environment? *Proc Am Philo Soc*, 1970, 114: 10–17
- 17 Hasselmann K. Stochastic climate models part I. Theory. *Tellus*, 1976, 28: 473–485
- 18 Hasselmann K. On the signal-to-noise problem in atmospheric response studies. In: Shaw D B, ed. *Meteorology of Tropical Oceans*. London: Royal Meteorol Society, 1979. 251–259
- 19 Hasselmann K. Optimal fingerprints for the detection of time-dependent climate change. *J Clim*, 1993, 6: 1957–1971
- 20 Hasselmann K. Multi-pattern fingerprint method for detection and attribution of climate change. *Clim Dyn*, 1997, 13: 601–611
- 21 Weaver A J, Zwiers F W. Uncertainty in climate change. *Nature*, 2000, 407: 571–572

- 22 Hegerl G C, Hasselmann K, Cubasch U, et al. Multi-fingerprint detection and attribution analysis of greenhouse gas, greenhouse gas-plus-aerosol and solar forced climate change. *Clim Dyn*, 1997, 13: 613–634
- 23 Hegerl G C, North G R. Comparison of statistically optimal approaches to detecting anthropogenic climate change. *J Clim*, 1997, 10: 1125–1133
- 24 Santer B D, Bonfils C J W, Fu Q, et al. Celebrating the anniversary of three key events in climate change science. *Nat Clim Chang*, 2019, 9: 180–182
- 25 Charney J G, Arakawa A, Baker D J, et al. *Carbon Dioxide and Climate: A Scientific Assessment*. Washington DC: National Academy Sciences, 1979. 22
- 26 Hu Y Y. The discovery of the Antarctic ozone hole (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2020, 65: 1797–1803 [胡永云. 南极臭氧洞的发现. *科学通报*, 2020, 65: 1797–1803]
- 27 Zhou T J, Zhang W X, Chen D L, et al. 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. *Sci China Earth Sci*, 2022, 65, <https://doi.org/10.1007/s11430-022-9906-4> [周天军, 张文霞, 陈德亮, 等. 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*, 2022, 52: 579–594]

Summary for “从全球变暖到复杂物理系统——2021年诺贝尔物理学奖解读”

From global warming to complex physical systems: Reading of the 2021 Nobel Prize in Physics

Yongyun Hu

Laboratory of Climate and Ocean-Atmosphere Studies, Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China

E-mail: yyhu@pku.edu.cn

Two climatologists and a theoretical physicist are awarded the 2021 Nobel Prize in Physics “for groundbreaking contributions to our understanding of complex physical systems”. The Nobel Committee for Physics greatly integrates the complex climate system with theoretical physics, indicating that the Committee highly emphasizes the importance of applying physical principles to solve problems in our realistic world, especially to understand global warming and habitability of the climate environment experienced by humans, instead of limiting the Prize within the traditional fields of physics.

In the present paper, I would love to share my views on the 2021 Nobel Prize in Physics, focusing on the contributions of the two climatologists. First, I will address why the climate system is a complex physical system. Then, I will show the most recent assessment results of global warming released by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Next, I will briefly introduce the physical basis of the climate system and the scientific history of global warming studies, including Fourier’s first proposal of the greenhouse effect of Earth’s atmosphere, Tyndall’s laboratory measurements of greenhouse gases, Arrhenius’s pioneer work on the climate sensitivity of carbon dioxide (CO₂), and the establishment of radiation transfer theory by Schwarzschild and Chandrasekhar.

These pioneer works paved the road for Manabe and his colleagues to establish a modern climate model for reliably quantifying and predicting global warming. Manabe’s most important contribution to global warming studies is his single-column numerical climate model, i.e., the radiative-convective model. In developing this model, Manabe’s groundbreaking contributions are: fixing relative humidity that greatly includes the positive feedback of water vapor, adding convective adjustment with considering vertical thermal convection, having the model radiatively balanced at the top of the atmosphere, which was not recognized in previous studies. Manabe’s radiative-convective model is a milestone in the history of global warming studies. It remains a useful tool for our understanding of climate change even at present. In addition, Manabe is also one of the pioneers in developing three-dimensional atmospheric general circulation models.

Hasselmann’s contribution is his theoretical method for detecting and attributing anthropogenic contributions to global warming, i.e., the optimal fingerprinting method. It is a spatio-temporal generalization of multivariate regression adapted to the detection of climate changes and the attribution of climate changes to anthropogenic signals. Spatio-temporal fingerprints, which separate climate changes into spatial patterns and time variations, provide a tool of discrimination between observed climate changes and natural variability. We can convincingly detect and attribute the contributions of anthropogenic activities to the observed global warming.

Finally, I will show the projected global warming in the 21st century assessed by IPCC-AR6. I will also briefly introduce China’s peak carbon dioxide emissions and carbon neutralization strategy in responding to the Paris Agreement. It is emphasized that as Earth citizens, we all have the responsibility to protect our living environment from increasing disasters, weather and climate events associated with global warming.

2021 Nobel Prize in Physics, global warming, climate system, radiation and convection, detection and attribution

doi: [10.1360/TB-2021-1147](https://doi.org/10.1360/TB-2021-1147)