

气候变化归因：应对气候变化的科学基础 ——从诺奖得主克劳斯·哈塞尔曼谈起*

罗勇[†]

(清华大学地球系统科学系 地球系统数值模拟教育部重点实验室 全球变化研究院 北京 100084)

Academic contribution of Klaus Hasselmann, winner of the 2021 Nobel Prize in Physics to climate change attribution

LUO Yong[†]

(Department of Earth System Science, Ministry of Education Key Laboratory for Earth System Modeling, Institute for Global Change Studies, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

2022-01-04 收到

[†] email: yongluo@tsinghua.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20220104

摘要 2021年诺贝尔物理学奖颁发给德国学者克劳斯·哈塞尔曼(Klaus Hasselmann)与另外两位科学家。克劳斯·哈塞尔曼是著名的海洋学家、气象和气候学家、物理学家。文章将简述哈塞尔曼的研究经历，介绍他在大气响应中的信噪比和气候变化归因的多模态指纹方法等方面的重要学术成就。还将结合最新的政府间气候变化专门委员会第六次评估报告中有关气候变化归因的主要结论，阐述在哈塞尔曼的开创性工作基础上建立起来的气候变化归因理论与方法，构成了人类合作应对气候变化的重要科学基础之一。

关键词 诺贝尔物理学奖，克劳斯·哈塞尔曼，气候变化归因，最优指纹法

Abstract The Nobel Prize in Physics in 2021 was awarded to the German scholar Klaus Hasselmann and two other scientists. Klaus Hasselmann is a famous oceanographer, meteorologist, climatologist and physicist. This paper will briefly describe Hasselmann's research career and introduce his important academic achievements in the aspects of signal-to-noise ratio in atmospheric response and multi-pattern fingerprint method of climate change attribution. Combining with the state-of-the-art conclusions about climate change attribution in the latest Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, this paper expounds the theory and methodology of climate change attribution based on Hasselmann's pioneering work, which constitutes one of the important scientific bases for addressing climate change.

Keywords Nobel Prize in Physics, Klaus Hasselmann, climate change attribution, optimal fingerprint method

1 克劳斯·哈塞尔曼的学术生涯^[1]

克劳斯·哈塞尔曼(全名 Klaus Ferdinand Hasselmann, 图1)于1931年10月25日生于德国汉堡。1934年在他大约3岁时，举家移民英国。1949年

高中毕业后，哈塞尔曼和家人一起返回德国。

1955年哈塞尔曼获汉堡大学物理学和数学毕业证书；1957年获哥廷根大学博士学位，师从 W. Tollmien 教授研究各向同性湍流的基本动力学方程。1957—1961年，哈塞尔曼在汉堡大学给本科时期的指导教师 K. Wiegardt 教授担任研究助理，继续研究湍流理论。在这期间，他发表了他

* 2021年度清华大学自主科研国际合作专项“基于自然的解决方案相关问题的研究”资助项目

的第一篇学术论文^[2]，揭示各向同性湍流的三倍速度相关性。

1961—1964年，哈塞尔曼应著名海洋科学家沃尔特·蒙克的邀请在美国斯克利普斯海洋研究所(加州大学圣地亚哥分校的前身)下属的地球物理和行星物理研究所(IGPP)担任助理教授和副教授，从事大型海洋波浪实验。哈塞尔曼和蒙克一直保持着合作关系和友谊，而且在2008年蒙克90岁生日之际，他和Hans von Storch合写了蒙克的传记^[3]。

1964年11月哈塞尔曼回到德国，在汉堡大学担任讲师，两年之后晋升为教授。1969年德国联邦科学技术部在汉堡大学创建了理论地球物理系，聘请哈塞尔曼为该系的主任。1970—1972年，他在美国伍兹霍尔海洋研究所作教授。1972年再次回国，担任汉堡大学理论地球物理研究所教授、主任。1975年他创建了马克斯·普朗克气象研究所并一直担任所长，在1988年之后兼任德国气候计算中心科学主任。1999年11月哈塞尔曼在他68岁时退休。

在获颁2021年诺贝尔物理学奖之前，哈塞尔曼获得过很多学术荣誉，主要包括美国地球物理学会颁发的James B. Macelwane Award(1964年)、美国气象学会颁发的Sverdrup Gold Medal(1971年)、遥感学会颁发的Belfotop-Eurosense Award(1981年)、美国国家科学院颁发的Robertson Memorial Lecture Award(1990年)、英国皇家气象学会颁发的Symons Memorial Medal(1997年)以及欧洲地球物理学会颁发的Vilhelm Bjerknes Medal(2002年)等。

2 克劳斯·哈塞尔曼的学术贡献

哈塞尔曼的研究兴趣十分广泛，涵盖气候动力学、随机过程、海浪、卫星遥感、综合评估研究以及气候变化政治学等。他一共发表127篇同行评议论文，还出版了7部论著。2021年他合著的论文基于共享的社会经济路径(SSPs)和典型浓度路径(RCPs)分析了欧洲、美国和中国的气候政策实施情景^[4]。有意思的是，自从20世纪60年代

中期写了关于地球物理波场中波一波相互作用的费曼图论文以来，哈塞尔曼一直在研究粒子物理学。在退休之后，他更是潜心于量子场论、基本粒子物理学、广义相对论和统一场研究。

哈塞尔曼在物理海洋学方面的成就主要体现在海浪非线性相互作用研究上。特别是，他曾在1968—1969年间成功组织协调英国、荷兰、美国 and 德国等国学者开展“联合北海海浪计划”(JONSWAP)，在北海160 km断面上布置了13个观测点，采用多种仪器观测海浪。这些研究为研制波浪模型(WAM)奠定了基础。迄今仍被广泛应用在海洋科学、海洋工程领域的海浪谱JONSWAP就是基于这次观测实验获取的。JONSWAP的成功以及他在组织此次联合实验计划时所展示出来的管理协调能力，对他后来被任命为马克斯·普朗克气象研究所所长有帮助。

瑞典皇家科学院决定将2021年诺贝尔物理学奖颁给哈塞尔曼，是为了表彰他在气候领域的两项学术贡献：气候变化的指纹辨识和随机气候模式的建立。哈塞尔曼发表的6篇论文与获奖内容相关^[5-10]。他在1979年首次揭示了大气响应中的信噪比问题^[5]，这可以说是证明人类活动对全球变暖作用的关键基础。借助信息领域的“信号”处理技术，他将长时间尺度的“慢变”气候变率与短时间尺度的混沌随机的天气过程联系起来，解释了气候系统低频内部变率的成因。但这篇原始论文非常晦涩难懂，所以他在20世纪90年代初重写了一篇论文^[7]。哈塞尔曼还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”，通过发展多模态“指纹”的归因方



图1 克劳斯·哈塞尔曼展示诺贝尔奖证书(拍摄者: Bernhard Ludewig, 来自: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2021/hasselmann/photo-gallery/>)

法，建立了20世纪中叶以来的全球变暖主要是由大气中二氧化碳浓度水平增加所引起的科学依据，从而构建了全球合作应对气候变化的重要科学基础，推动国际社会和公众将气候变化视为人类面临的重大挑战之一。

此外，哈塞尔曼在开发气候模型方面也做出了开创性工作。1976年，他基于湍流研究得到的启示开发了一个随机气候模型(哈塞尔曼模型)，借鉴布朗运动的随机波动性来表征大气的短期波动“噪音”，从而能够非常简单地解释气候系统自然内部变率的起源^[6]。引入随机强迫的概念使得分离气候系统中噪音的起源和结构时间尺度变得较为容易。后来，他和合作者在简单模型的基础上构建了更现实的复杂模型，即耦合的海洋—大气环流模型。

3 气候变化归因

在哈塞尔曼开创性工作基础上建立起来的气候变化归因理论与方法，构成了人类合作应对气候变化的重要科学基础之一。

我们现已知道，实际观测到的气候系统变化是由三种变化叠加而成的，即由大气、海洋和陆地之间相互作用而产生的气候系统内部变率，由自然强迫引起的自然变化以及由人类活动引起的人为变化。自然外强迫因素主要包括太阳辐照度变化和火山喷发导致的平流层硫化气溶胶增加；而人类活动外强迫则主要是人类活动引起的温室气体、气溶胶和臭氧浓度变化以及土地利用变化等。

所谓归因指的是，评估多个因果因素对变化或事件

的相对贡献及其信度水平的过程^[12]。具体到气候变化领域，人们迫切地想了解引起工业革命以来气候系统状态显著变化的原因是什么——在多大程度上是由人类活动引起的？在多大程度上是由自然强迫引起的？这种原因判断的可信度有多大？这个科学求知的过程就是气候变化归因。显然，只有在科学上令人信服地确认人类活动是引起气候变化的主因时，国际社会和各国政府、社会公众才有理由采取深度减少温室气体排放、实现碳中和与绿色低碳转型的减缓措施来应对气候变化。

气候变化归因，主要采用数理统计和气候模式相结合的方法，大体分为时间序列法、推理法和最优指纹法。时间序列法是将计量经济学中的因果关系检验法应用到气候变化归因中，这种方法既考察变量间的相互关系，又考虑其自身的

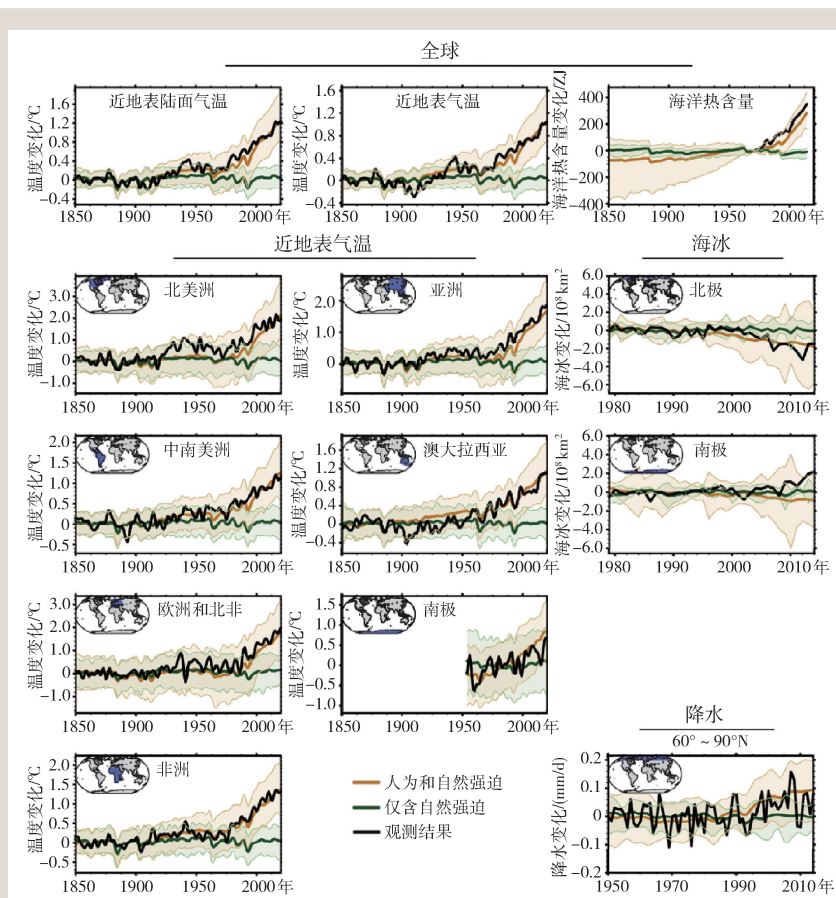


图2 模拟和观测的大陆、洋盆及更大尺度上气候系统各圈层的关键气候指标变化。这种识别气候变化“指纹”的方法就是基于哈塞尔曼的工作发展起来的^[11]

变化。推理法是把演绎与对标量因子假设的估计相结合,包括最高频率法和贝叶斯法等。目前,科学界使用最广泛的归因方法就是在哈塞尔曼工作基础上建立起来的最优指纹法(fingerprint)。它是一种通过最大化信噪比,增强气候变化信号特征使之排除内部变率噪声干扰的技术方法。

最优指纹法可以用广义多元回归来实现,即把观测的气候变化 y 看作是外部强迫引起的气候变化信号 X 的线性叠加,再加上气候系统内部变率 u ,即

$$y = Xa + u$$

其中, y 是经过滤波处理后的观测资料,使其能够充分反映观测到的气候时空变化;矩阵 X 包括对外部强迫的响应信号, a 为对应这些信号的响应系数。若 a 显著

大于0,表示可检测到该外强迫因子对观测结果的影响。矩阵 X 的信号可以利用复杂的地球系统模式,或简化气候模式如能量平衡模式(EBM)获取。利用地球系统模式模拟外部强迫驱动下的气候变化时,既包含气候系统对外部强迫的响应也包含了气候系统内部变率。要估计该外部强迫下的气候响应信号 X ,需要对多成员模拟做集合平均来消除内部变率的影响。

图2是对工业革命以来大陆、洋盆及全球尺度上气候系统各圈层的关键气候指标变化进行归因分析时开展的多个地球系统模式长时间数值模拟结果与相应观测的对比。如果仅考虑自然强迫因素,模式模拟的气温和海洋热含量(绿色曲线)与观测值(黑色曲线)的差距很大,特别是无法再现20世纪70年代以后的显著变暖;这说明,太阳活动和火山活动不是近50年气候变暖的主要原因。只有同时考虑人类活动因素,模式的模拟结果(红色曲线)才与观测一致。这里,气候在空间和/或时间上对特定强迫的响应模态就是哈塞

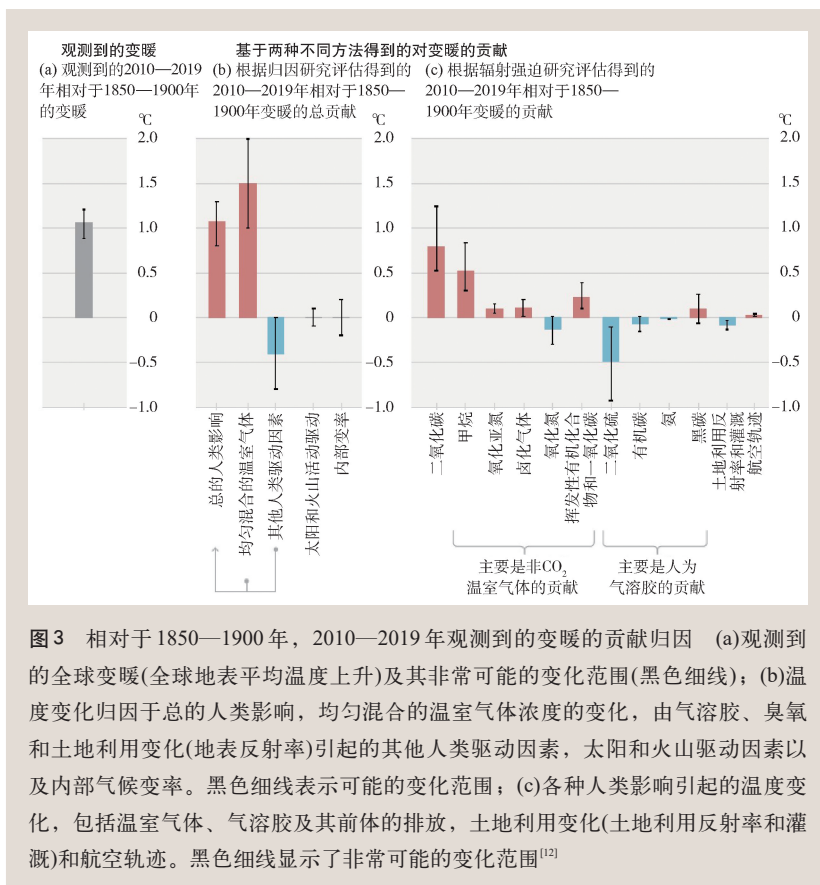


图3 相对于1850—1900年,2010—2019年观测到的变暖的贡献归因 (a)观测到的全球变暖(全球地表平均温度上升)及其非常可能的变化范围(黑色细线);(b)温度变化归因于总的人类影响,均匀混合的温室气体浓度的变化,由气溶胶、臭氧和土地利用变化(地表反射率)引起的其他人类驱动因素,太阳和火山驱动因素以及内部气候变率。黑色细线表示可能的变化范围;(c)各种人类影响引起的温度变化,包括温室气体、气溶胶及其前体的排放,土地利用变化(土地利用反射率和灌溉)和航空轨迹。黑色细线显示了非常可能的变化范围^[12]

尔曼所提出的“指纹”。换句话说,近50年来的气候变暖就是人类活动在观测到的全球地表温度变化上留下的“指纹”。除了地表气温和海洋热含量,我们在降水、海冰范围、季风、海平面、山地冰川、冻土等越来越多的变化中都能发现人类活动的“指纹”,可以证实人类活动所发挥的影响作用远超自然因素。

正是因为气候变化归因认知在应对气候变化中的重要性,联合国气候变化评估组织——政府间气候变化专门委员会(IPCC)在它的历次评估报告中均把归因结论作为最重要的科学发现。IPCC第一次评估报告确信,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,这将增强温室效应使地表升温。第二次评估报告指出,当前出现的全球变暖“不太可能全部是自然界造成的”,人类活动已经对全球气候系统造成了“可以辨别”的影响。第三次评估报告强调,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(66%以上可能性)。第四次评估

报告明确指出,全球变暖是不争的事实,近半个世纪以来的气候变化“很可能”是人类活动所致(90%以上可能性)。第五次评估报告进一步揭示,观测到的1951—2010年全球地表平均温度的上升,有一半以上是由人为温室气体浓度增加和其他人类强迫共同导致的,这一结论是非常可能的(具有95%以上的可能性)。

2021年8月发布的IPCC第六次评估报告指出,人类活动导致气候变暖的结论是毋庸置疑的(unequivocal)^[12]。图3显示的是这次评估报告给出的最新归因结论:相对于1850—1900年,各种均匀混合的温室气体大会使2010—2019年增温1.5℃,而气溶胶气体大致会降温0.4℃,太阳活动以及火山活动整体作用不明显。温室气体主要包括二氧化碳、甲烷以及氮氧化物,其中二氧化碳会增温0.8℃,甲烷会增温0.5℃,其他气体增温有限;气溶胶整体会消减温室气体的增温作用,其中硫化物气溶胶有0.5℃的降温作用,几乎抵消了甲烷的增温作用。黑碳具有微弱的增温作用。

综上所述,虽然IPCC历次评估报告对于人类活动在现代气候变化中作用的认识不断深化,但所用方法仍然基于哈塞尔曼建立的指纹方法。

4 结论

科学研究不断深化对气候变化及其与人类活动相互作用的认识,为应对气候变化提供科学基

础和决策依据。正是由于哈塞尔曼和一批杰出学者的先驱性研究工作,国际科学界形成了广泛共识:当前全球气候正经历着一场以变暖为主要特征的显著变化,深刻影响着人类的生存与发展,构成当今国际社会共同面临的重大挑战。通过合作和对话共同适应与减缓气候变化已上升为世界各国的政治共识,妥善应对气候变化涉及全球经济社会发展的深刻变革,是实现联合国可持续发展目标的重大任务,事关全人类的长远利益。我国已经提出2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和的目标,并将其纳入生态文明建设的整体布局,正在同国际社会一道书写构建人类命运共同体的新篇章。

从科学上来说,尽管目前科学界关于人类活动对气候变化的影响已经有了较为清晰的认识,但在有些领域仍然存在不确定性。例如:目前将观测到的变暖归因于人为气溶胶强迫的信度需要提高。相对于全球平均温度变化,对其他温度指标以及降水、大气环流、洋流等方面的归因能力仍然不足,难以给出有关人类贡献的确凿结论。只有在哈塞尔曼等杰出学者奠定的科学基础上,继续加大气候变化科学研究的广度和深度,不断改进和提高气候变化归因认知水平,才能减少气候变化及其影响的科学不确定性,从而从根本上夯实应对气候变化的科学基础。

参考文献

- [1] <https://mpimet.mpg.de/en/staff/externalmembers/klaus-hasselmann>
- [2] Hasselmann K. Deutsche Hydrographische Zeitschrift, 1958, 11: 207
- [3] von Storch H, Hasselmann K. Seventy Years of Exploration in Oceanography: A Prolonged Weekend Discussion with Walter Munk. Berlin: Springer, 2010
- [4] Hewitt R, Cremades R, Kovalevsky D *et al.* Climate Policy, 2020, 21: 434
- [5] Hasselmann K. On the Signal-to-noise Problem in Atmospheric Response Studies. In: Shaw D (Eds.). Meteorology Over the Tropical Oceans. Bracknell: Royal Meteorological Society. 1979, pp.251—259
- [6] Hasselmann K. Tellus, 1976, 28: 473
- [7] Hasselmann K. Journal of Climate, 1993, 6: 1957
- [8] Hasselmann K, Bengtsson L, Cubasch U *et al.* Detection of Anthropogenic Climate Change Using a Fingerprint Method. Report, Max-Planck-Institut für Meteorologie, 1995, p.168
- [9] Hegerl G, von Storch H, Hasselmann K *et al.* Journal of Climate, 1996, 9: 2281
- [10] Hasselmann K. Climate Dynamics, 1997, 13: 601
- [11] 胡婷, 孙颖. 气候变化研究进展, 2021, 17(6): 644
- [12] IPCC. 2021: Summary for Policymakers. In: 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 University Press, In Press