

复杂气候系统和全球变暖*

胡永云[†]

(北京大学物理学院 大气与海洋科学系 北京 100871)

2021-11-29收到

[†] email: yyhu@pku.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20220102

The complex climate system and global warming

HU Yong-Yun[†]

(Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

摘要 两位气候学家和一位理论物理学家共同荣获2021年诺贝尔物理学奖。诺贝尔物理学奖委员会在背景介绍材料中指出,他们在“理解复杂物理系统领域做出了开创性贡献”。相信很多人会对两位气候学家获奖而感到惊讶,物理学奖委员会进一步具体指出,人类活动导致全球变暖这一论断建立在坚实的科学基础之上,两位气候学家获奖是因为他们基于物理原理模拟地球气候、量化气候变率、可靠地预测全球变暖所做出的杰出贡献。物理学奖委员会将诺贝尔奖授予两位气候学家,表明对基于物理理论解决现实世界复杂物理问题的高度重视,尤其是对人类身处其中的气候环境问题的重视。文章将解读两位气候学家的学术贡献,尤其是如何基于基础物理理论建立预测全球变暖的模型以及检测和归因人类活动导致全球变暖的方法。

关键词 2021 诺贝尔物理学奖, 全球变暖, 气候系统, 辐射与对流, 检测与归因

Abstract Two climatologists and a theoretical physicist were awarded the 2021 Nobel Prize in Physics “for groundbreaking contributions to our understanding of complex physical systems”. Many of us might be surprised why two climatologists have won the 2021 Nobel Prize in Physics. The committee of the Nobel Prize in Physics specifically pointed out that the understanding of global warming is founded on solid physics, and that the winning of the prize by the two climatologists is because they developed models based on physical principles to simulate the climate system, quantify climate variability, and reliably predict global warming. The prize indicates the importance of solving complex problems in the realistic world, especially the problem of global greenhouse warming. Here I address the scientific contributions of the two climatologists, focusing particularly on how they contributed to developing climate models and methods to solve the problem of global warming caused by anthropogenic activity.

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

* 国家自然科学基金(批准号: 41888101)资助项目

1 引言

荣获2021年诺贝尔物理学奖的两位气候学家分别是真锅淑郎(Syukuro Manabe)和哈塞尔曼(Klaus Hasselmann)^[1]。诺贝尔物理学奖委员会的背景说明中具体介绍了两位气候学家获奖的主要学术贡献,真锅淑郎获奖是因为建立了能够模拟地球气候和可靠预测全球变暖的气候模式,哈塞尔曼获奖是因为提出了检测人类活动对全球变暖贡献的最优指纹法。在此基础上,背景介绍材料明确指出,人类活动导致全球变暖这一论断是建立在坚实的科学基础之上的。

2012年,我曾在本刊发表了《全球变暖的物理基础和科学简史》一文^[2],系统地介绍了关于对全球变暖的认知是如何建立在物理学基础之上的以及全球变暖近200年的发展历史,有兴趣的读者可阅读该文,这里不再重复。在该文中,我也简要地介绍了真锅淑郎在气候模式发展和预测全球变暖中的重要贡献,那时,并没有料到真锅淑郎9年后将获得诺贝尔物理学奖。本文将对真锅淑郎的主要学术贡献做更详细的介绍,也将简要介绍哈塞尔曼的贡献。

2 气候系统是复杂物理系统

诺贝尔物理学奖委员会的背景介绍材料是从洛伦茨(Edward Norton Lorenz)建立的混沌系统开始的。洛伦茨是一位气象学家,生前是麻省理工学院的教授,他建立的混沌系统是基于天气预报的考虑。地表吸收太阳辐射之后,发射红外辐射加热大气,近地面大气被加热之后产生对流运动,天气现象(如降水)总是和大气对流运动联系在一起。因此,洛伦茨认为天气预报的本质是研究大气的对流运动。基于经典的瑞利—本纳德热力对流模型(Rayleigh—Benard thermal convection),他建立了理想的大气热力对流运动方程组^[3, 4]。洛伦茨最重要的结论是,天气预报模式对初始值非常敏感,初始值的微小误差,将导致天气预报结果的巨大偏差。他进一步指出,由于大

气系统的非线性属性,数值模式的预报误差将迅速增长,因此,数值天气预报的时效很难超过一周。尽管洛伦茨把天气系统尽量地简化,但其仍呈现混沌特征,由此可见真实的天气和气候系统是多么复杂。

洛伦茨所关注的天气变化主要涉及大气的内部变率,而气候系统的复杂性不仅来自大气内部,还涉及与地球其他圈层的相互作用。海洋和大气的相互作用决定了气候系统在年际到千年时间尺度的变化,例如厄尔尼诺和南方涛动(ENSO)是海气相互作用的结果,它决定了全球气候的年际变化,大洋环流的变化主控了气候系统从年代际到千年时间尺度的变化。地球轨道的变化主控了气候系统万年至十万年的变化,冰芯记录表明,近百万年的冰期—间冰期转换是由地球运行轨道变化引起的。地质构造活动导致的大气二氧化碳浓度变化是地球气候在百万至千万年冷暖波动的主要原因。

气候系统的复杂性还在于它包含了一系列正负反馈机制。碳酸盐—硅酸盐负反馈机制是稳定地球气候系统宜居气候环境的重要原因,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温室效应。这些反馈机制的抑制或放大作用使得气候系统的变化更加复杂。

随着科技的进步,人类对气候系统的影响在不断增强,已成为扰动气候系统的一个重要因素。特别是工业革命以来,人类燃烧大量的化石燃料,向大气排放越来越多的CO₂,工业革命前的CO₂浓度大约是280 ppm,2021年的CO₂浓度是417 ppm,增加了49%,这是导致近百年全球变暖的主要因素,也是国际社会呼吁减排和增汇,减缓全球变暖的重要原因。

气候系统的复杂性还在于很难通过实验室手段来验证它的变化。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。但气候系统的理论和观测事实只能通过数值模拟来验证。因此,可靠的气候模式的建立是模拟气候历史变化和预估未来变化的重要手段,这是两位气候学家获得诺贝尔奖的重要原因。

图1是第六次政府间气候评估报告(IPCC-AR6)给出的1850年以来全球年平均近地面气温变化的最新结果^[5]。1850—1900年,气温虽然有波动,但并没有呈现显著变化。1900—1960年,温度呈缓慢上升的趋势。20世纪70年代以来,温度快速升高,1900—2020年全球平均温度升高了1.3℃(黑线)。图1中的绿线和棕色线是气候模式的模拟结果。绿线表示,如果气候模式仅包含了自然因素对气候系统的影响(太阳活动和火山喷发),全球平均温度并没有呈现上升趋势。棕色线表示,如果气候模式既包含了人为温室气体和气溶胶排

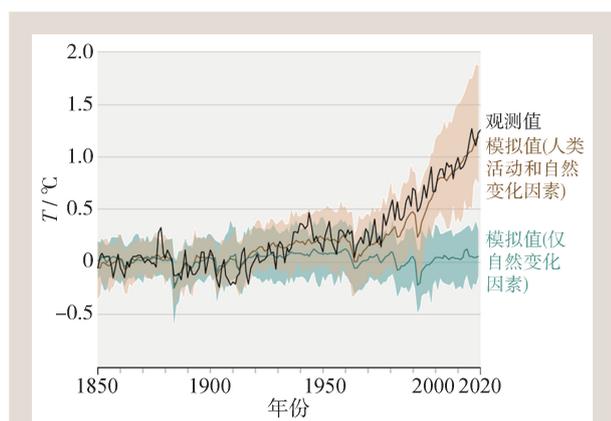


图1 全球年平均温度时间序列。黑线是观测温度的变化,绿线是气候模式模拟中仅包含自然变化因素(太阳活动和火山喷发)的温度变化,棕色线是气候模式模拟中既包含自然因素又包含人类活动的温度变化,阴影区是模拟结果的不确定性范围^[5]

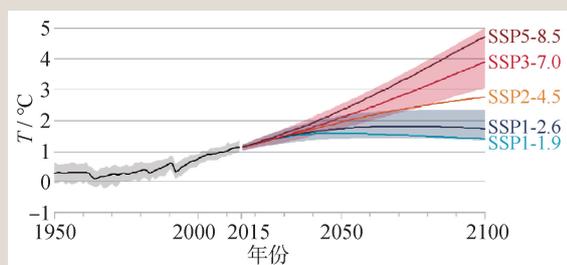


图2 IPCC-AR6给出的根据5种温室气体排放情形预估的21世纪全球近地面气温变化。1950—2015年(黑线)是观测的温度变化,2016—2100年是气候模式预估的温度变化,SSP5-8.5所表示的意思是:如果世界社会经济运行模式不考虑控制温室气体排放,到2100年,温室气体增加导致的地面辐射通量增加 $8.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,温度将升高约 $4.7 \text{ }^\circ\text{C}$,其中,SSP(shared socioeconomic pathways)是共享社会经济路径,SSP后方数字是21世纪末温室气体造成的辐射强迫(温室气体增加所导致的大气对地面红外辐射通量的增加)

放,也包含自然变化因素,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。第六次气候评估报告最重要的结论之一就是,“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”^[5]。

图2是IPCC-AR6给出的5种温室气体排放情形下2016—2100年全球年平均近地面温度变化的预估^[5]。如果不控制温室气体排放(SSP5-8.5),至21世纪末,温室气体增加所产生的大气向地表的辐射通量将增加 $8.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,相应地,全球平均温度将升高 $4.7 \text{ }^\circ\text{C}$;如果各国政府采取适当的措施控制温室气体排放(SSP3-4.5),全球平均温度在21世纪末将升高 $2.7 \text{ }^\circ\text{C}$;如果严格控制温室气体排放(SSP1-1.9或SSP1-2.6),温度将升高约 $1.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。各国政府于2016年在巴黎签订的《巴黎协定》的目标是把升温控制在 $1.5 \text{ }^\circ\text{C}$,希望不要超出 $2.0 \text{ }^\circ\text{C}$ 。根据图2的结果,如果要实现温控目标,各国政府需严格控制化石燃料燃烧和温室气体排放。

3 真锅淑郎的辐射对流模式

模拟和预估气候变化需要一个可靠的数值模式。在真锅淑郎建立起真正现代意义上的气候模式之前,关于全球变暖的认知已经历了100多年的历程,主要包括傅里叶(Joseph Fourier)首次提出大气具有温室效应;丁铎尔(John Tyndall)通过实验发现温室气体的成分是 CO_2 、 H_2O 、 CH_4 、 N_2O 和 O_3 等,而非大气的主要成分 N_2 和 O_2 ;阿伦尼乌斯(Svante Arrhenius)使用单层大气模式计算 CO_2 的气候敏感性;施瓦氏(Karl Schwartzchild)和钱德拉塞卡(Subrahmanyam Chandrasekhar)建立辐射传输理论;量子力学理论的建立促进了对气体分子吸收谱的认识;温室气体吸收和发射谱的实验室测量;计算机的发展;普拉斯的多层大气模式辐射传输计算,等等。

以上这些为真锅淑郎做了很好的铺垫。1967年,真锅淑郎与同事合作,建立了辐射对流模式(radiative-convective model)^[6]。该模式包括辐射传输和对流调整两个主要部分,相较于以前的研

究，真锅淑郎的辐射对流模式有4个方面的重大突破：

(1)包含精确测量的CO₂和H₂O吸收谱。在阿伦尼乌斯时代，还没有CO₂和H₂O吸收谱的实验室测量数据。阿伦尼乌斯推算CO₂和水汽的红外吸收谱所使用的数据是月光红外波段的观测资料。普拉斯的多层大气辐射传输模式虽然使用了CO₂吸收谱的实验室测量数据，但还没有H₂O的吸收谱测量数据，因为水汽的红外吸收谱较CO₂的更为复杂。

(2)使用固定相对湿度的方案，巧妙地包含了水汽的正反馈辐射效应。根据克拉珀龙—克劳修斯方程，我们知道大气的水汽含量取决于大气温度，当CO₂增加导致大气温度升高时，水汽含量也随之增加。水汽的温室效应比CO₂更强，水汽增加使得大气温度升高更多，构成了水汽的正反馈辐射效应。真锅淑郎使用固定相对湿度的方案，实际上意味着大气中的水汽含量随温度的升高而升高。如果是干空气，CO₂加倍只能使地表温度升高约1.5℃。如果考虑了水汽的正反馈，大气温度将升高约4.5℃。

(3)首次在辐射传输模式中加入了对流调整方案。如果仅考虑单纯的辐射平衡，辐射传输模式计算出的地表温度太高，而大气对流层顶温度太低，大气温度垂直递减率远大于干绝热温度递减率(|dT/dZ|=9.8 K)，大气的垂直层结是不稳定的。为此，真锅淑郎在模式中设置了一个条件，如果辐射平衡产生的大气温度垂直递减率大于6.5 K(这是大气稳定层结的实际观测值。因为水汽的潜热释放将加热大气，所以，实际观测值小于干绝热大气温度递减率)，大气将产生对流运动，下层过热的空气上升，把下层热量向上输送，而相邻的上层较冷的空气将下沉。热量交换的结果使大气层结处于稳定状态。因此，对流调整方案克服了大气层结的不稳定。

(4)特别关键的一点是，真锅淑郎的模式解决了大气层顶辐射能量平衡问题。前人的研究更多是关注了辐射传输过程本身以及CO₂增加对地表的加热作用，没有关注CO₂增加将导致大气温度的变化及其向外的红外辐射，其结果是大气对流

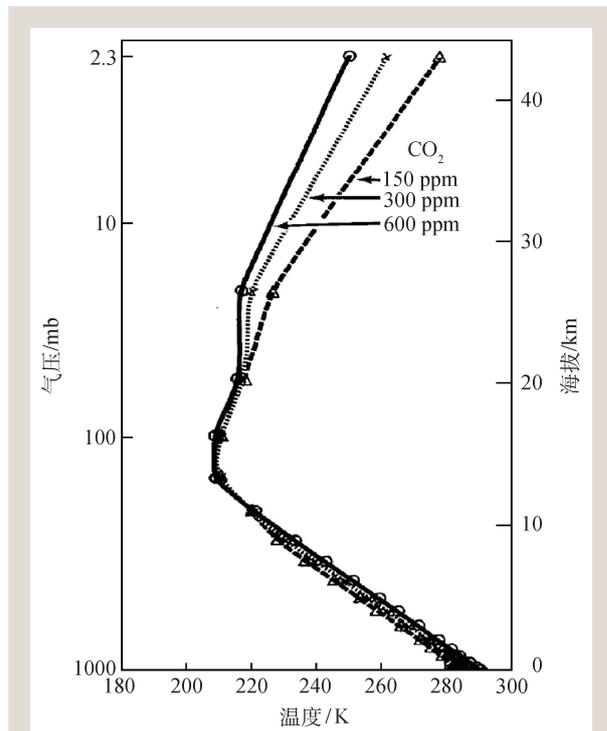


图3 在Manabe和Wetherald 1967年的文章^[6]中，辐射对流模式给出CO₂浓度为150 ppm、300 ppm和600 ppm时所对应的大气垂直温度廓线

层顶的入射和出射辐射是不平衡的，普拉斯及其之前的学者们甚至根本没有意识到这一严重问题，真锅淑郎建立的辐射对流模式彻底克服了这一问题。

图3是真锅淑郎和合作者使用辐射对流模式模拟的大气温度垂直廓线。在大气对流层(0—13 km)，大气温度随高度升高而递减，在平流层，由于臭氧吸收太阳紫外辐射，大气温度随高度升高而升高，这与观测的大气温度垂直廓线基本一致。当CO₂浓度从150 ppm增加一倍至300 ppm时，地表气温上升2.28℃，再增加一倍至600 ppm时，地表气温再升高2.36℃。由此可见，真锅淑郎的模式给出的CO₂的气候敏感性大约是2.32℃。

真锅淑郎等建立的辐射对流模式是一个里程碑式的工作，它全面地解决了辐射传输的各个问题，并使用大气对流调整方案，建立了一个可靠地计算CO₂增加导致全球变暖的气候模式。即使该模式仅是一个一维模式，它仍是我们今天理解全球变暖的基础。

随着计算机大规模计算能力和速度的提升,真锅淑郎后来还与同事们合作研发了国际上第一代三维大气环流模式^[7]。在三维大气环流模式中,辐射传输仍是模式的一个关键部分,相对湿度和温度垂直递减率不再是固定的,而是通过三维大气运动自我调整的,三维模式还包含了云的辐射效应和降水等,能够真实地模拟气候系统的变化。

现代的气候模式不仅包含了三维大气动力和物理过程,还包含了大气化学、三维海洋运动、陆面植被、地球生命化学过程,形成了一个更为复杂的系统,也被称为地球系统模式,其内涵已远超出了人们通常理解的气候系统概念。图4给出了气候系统或地球系统模式的发展历程。首先,气候模式的分量在不断增加。在1970年代,气候模式仅包含大气、陆面和海洋三个模块(其中,海洋是不流动的静态洋面,也称为平板海洋)。到1980年代,静态海洋变为流动的动态海洋。第二次评估报告(SAR)使用的气候模式增加了大气气溶胶辐射效应。第三次评估报告(TAR)使用的气候模式又增加了动态植被模块和碳循环过程,第四至六次评估报告增加了大气化学模块和陆地冰盖模块,未来还将把人类活动与地球系统模式直接耦合起来,而不是像图2那样,温室气体的排放情形是通过预估给定的。其次,每一个分量模块所包含的动力、物理和化学过程也在不断丰富。

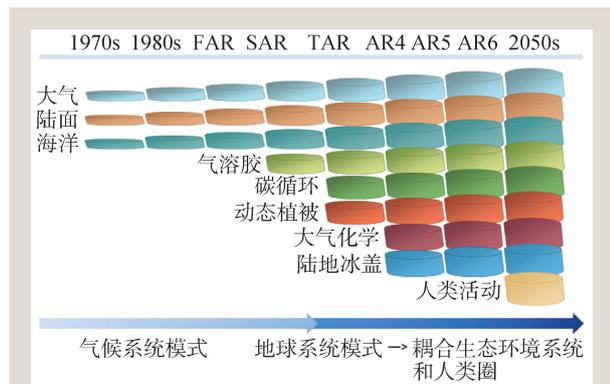


图4 气候模式和地球系统模式的发展历史与未来。图中的FAR、SAR、TAR、AR4、AR5和AR6分别表示IPCC第一至第六次评估报告,分别发布于1990、1995、2001、2007、2013和2021年

在建立数值气候模式的过程中,最重要的一项工作就是写模式代码。真锅淑郎早期的重要工作就是写程序代码,这是一项很枯燥的工作,他非但没有嫌弃这项工作,而且非常热爱这份工作。但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和研究目标,善于把自己的物理思想应用到气候模式研发中,并利用模式验证自己的科学思想,这是他取得巨大成就的关键。

真锅淑郎是日裔美籍人,在东京大学完成博士学位后,于1958年前往美国工作。1963年,美国海洋大气管理局(NOAA)在普林斯顿大学校园附近成立了地球物理流体动力学实验室(GFDL),真锅淑郎在GFDL一直工作到1997年退休。2002—2007年回日本工作了几年,又返回了美国,被普林斯顿大学聘为无薪酬的客座教授。

4 哈塞尔曼的最优指纹法

在认知人类活动影响气候变化的进程中,一个关键环节是如何检测和归因人类活动对全球变暖的贡献,或者说如何区分人类活动和气候系统的自然变率对全球变暖的分别贡献。哈塞尔曼建立的最优指纹法(optimal fingerprint)解决了这一关键问题^[8-10]。

哈塞尔曼在大学和博士阶段是学习物理的,获哥廷根大学物理学博士学位,博士后阶段开始进入物理海洋学领域,19世纪70年代开始气候变化研究。因此,他的研究方法并不是传统气候学的方法,而是从理论出发,建立方法模型。他提出的最优指纹法就是基于理论方法,试图分离人类活动和自然变化分别对全球变暖的贡献。

最优指纹法不仅强调气候系统的时间变化,也强调气候变化的全球空间分布,因此,也被称为时空指纹法。如图5所示,用 $Y(x, y, t)$ 代表观测的气温在二维空间和时间维度的变化,可将其分解为人类活动造成的温度变化 $\beta(t)X(x, y)$ 和气候系统自然变化 $\varepsilon(x, y, t)$ 两部分,也就是 $Y(x, y, t) = \beta(t)X(x, y) + \varepsilon(x, y, t)$ 。其中, X 是需要检测的人类活动产生的气温变化空间分布, β 表示 X 随时间变化的振幅, ε 代表气候系统的内部时空变率(假定

为高斯随机变化)。人类活动造成的气温变暖部分可通过对比气候模式的模拟结果与观测结果而得到,从而能够把人类活动造成的全球变暖在时空分布上与气候系统自然变率导致的气温变化区别开来,它给出的是人类活动导致的全球变暖在时空维度的变化。该方法就像在混乱的犯罪现场,通过检测罪犯留下的指纹痕迹把罪犯识别出来,因此被称为指纹法。

哈塞尔曼关于最优指纹法的第一篇论文发表于1979年,但由于内容太理论,在很长时间内并没有得到学术界的重视和应用。直到1990年代后期,学术界才意识到哈塞尔曼的最优指纹法的重要性,在众多学者的完善和改进之后,被广泛应用于检测人类活动对全球变暖的贡献,并且引起了IPCC评估报告的重视。IPCC评估报告迄今已有6次,关于人类活动对气候变化贡献的描述,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”。由此可见,哈塞尔曼方法的应用,使得检测和归因人类活动对全球变暖贡献的结论变得更加明确和肯定。

5 结论

真锅淑郎和哈塞尔曼的获奖确属实至名归,他们均为认知人类活动对气候系统的影响做出了开创性的贡献。相信真锅淑郎和哈塞尔曼从没有预料到自己将获得诺贝尔物理学奖,因为他们从事的并非传统的物理学研究。所以,获得诺贝尔

参考文献

[1] The Nobel Committee for Physics. Scientific Background on the Nobel Prize in Physics 2021, <http://www.kva.se>
 [2] 胡永云. 物理, 2012, 41(8):495
 [3] Lorenz E N. J. Atmos. Sci., 1963, 20(130):41
 [4] Lorenz E N. The Essence of Chaos. University of Washington Press, 1995
 [5] IPCC. 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, 2021

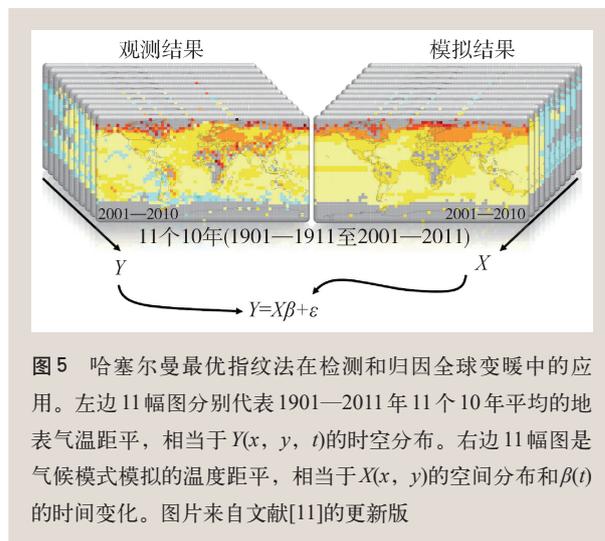


图5 哈塞尔曼最优指纹法在检测和归因全球变暖中的应用。左边11幅图分别代表1901—2011年11个10年平均的地表气温距平,相当于 $Y(x, y, t)$ 的时空分布。右边11幅图是气候模式模拟的温度距平,相当于 $X(x, y)$ 的空间分布和 $\beta(t)$ 的时间变化。图片来自文献[11]的更新版

奖并非他们的初衷,解决人类活动对气候环境影响的问题才是他们的科学目标。

2021年诺贝尔物理学奖授予两位气候学家,突显了物理奖委员会对我们身处其中的全球变暖问题的高度重视,强调了依据基本物理解决现实世界问题的重要性,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。

保护我们生活其中的气候环境是每一个地球公民的神圣职责。人类通过采取措施保护气候环境的一个成功例子就是南极臭氧洞的逐渐恢复。人工合成的氟利昂造成平流层臭氧损耗和南极臭氧洞的形成^[12]。近年来的观测表明,自从人类停止使用氟利昂以来,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。

[6] Manabe S, Wetherald R T. J. Atmos. Sci., 1967, 24:241
 [7] Manabe S, Wetherald R T. J. Atmos. Sci., 1975, 32:3
 [8] Hasselmann K. On the Signal-to-Noise Problem in Atmospheric Response Studies. In: Shaw D B Ed., Meteorology of Tropical Oceans. London: Roy Meteorol Soc., 1979. p.251
 [9] Hasselmann K. J. Climate, 1993, 6:1957
 [10] Hasselmann K. Clim. Dyn., 1997, 13:601
 [11] Weaver A J, Zwiers F W. Nature, 2000, 407:571
 [12] 胡永云. 科学通报, 2020, 65(18):1