

从辐射对流平衡到全球气候模式 ——诺奖得主真锅淑郎工作解读*

林岩銮[†]

(清华大学地球系统科学系 北京 100084)

2021-12-20收到

[†] email: yanluan@tsinghua.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20220103

From radiative-convective equilibrium to global climate models—an introduction to the work of the 2021 Nobel laureate in Physics, Syukuro Manabe

LIN Yan-Luan[†]

(Department of Earth System Science, Tsinghua University, Beijing 10084, China)

摘要 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”。文章主要介绍其中一位气候学家真锅淑郎(Syukuro Manabe)的工作。作为一个复杂物理系统,全球气候系统具有高度的复杂性,作为对这个复杂系统的高度近似,真锅淑郎的辐射对流平衡模型计算首次明确无误地量化了二氧化碳翻倍导致的升温幅度(2.36 °C)。另外,他也被公认为世界气候模式之父,气候模式已经成为研究全球气候变化机理和预估未来全球气候变化不可或缺的工具。文章主要介绍辐射对流平衡模型的思想以及最近的发展和存在的问题。在全球气候模式方面,简要介绍模式的组成,侧重强调模式的物理基础以及存在的问题,讨论未来的发展趋势和方向。

关键词 2021年诺贝尔物理学奖,辐射对流平衡,全球变暖,全球气候模式

Abstract The 2021 Nobel Prize in Physics was awarded to two climate scientists and one theoretical physicist for their groundbreaking work on our understanding of complex physical systems. Here the major work of one of them, Syukuro Manabe, is introduced. As a complex system, the global climate system exhibits high complexity. Manabe's radiative-convective equilibrium model, as an approximation to this system, for the first time reliably quantifies the warming magnitude (2.36 °C) induced by the doubling of CO₂. He is also named the father of global climate models, which have become an indispensable tool for our mechanistic understanding of global climate change and for the projection of future climate change. The basic idea of the radiative-convective equilibrium model as well as its recent development and remaining issues are introduced. The components of the global climate model are also briefly described with an emphasis on the physical basis and remaining challenges. Future directions and trends of climate model studies and development are discussed.

Keywords 2021 Nobel Prize in Physics, radiative-convective equilibrium, global warming, global climate model

* 国家自然科学基金(批准号: 41975127)资助项目

1 引言

地球，作为人类生存的家园，充满了难以想象的复杂性。其中的5大圈层(大气、海洋、陆地、冰冻圈、生物圈)不仅自身充满变数，还通过能量和物质在不同圈层间的交换相互影响，最终形成了丰富复杂的地球系统。地球系统经历了漫长的演变，但人类对这个系统的影响从工业革命之后逐渐开始。自工业革命以来，人类活动导致二氧化碳的排放激增，地球上的自然碳汇无法吸收人类活动产生的过量二氧化碳气体，使得其含量逐年快速递增。基于20世纪50年代后期开始的在夏威夷莫纳罗亚火山进行的测量，人们开始清楚地认识到大气中的二氧化碳浓度在不断上升。这一上升趋势被称为“基林曲线”，如图1所示，是以开始测量的科学家查理斯·大卫·基林(Charles David Keeling)的名字命名的。从图1我们可以看到，二氧化碳浓度已经从1958年的不到320 ppm增加到最近的近420 ppm，而且还在继续增加。温室气体就像温室的玻璃，允许太阳短波辐射的进入，却减少了地面向太空的长波辐射——形成了我们熟知的温室效应。温室效应无疑将造成全球气候变暖，但究竟会变暖多少，以及变暖之后会带来怎样的影响，是全球变化研究亟需回答的问题。

对温室效应的研究可以追溯到19世纪，傅里叶(Fourier)在1824年发表了《地球及其表层空间温度概述》，人们开始了解到组成大气层的某些气体能够捕获辐射能量。到20世纪，光子的吸收和发射过程被发现，进一步推动了辐射理论的形成。随着我们对大气中各种气体吸收和发射光谱的深入了解以及计算机的发展，已经有可能对整个大气层(通常从地表到平流层顶)分层进行逐层的辐射能量收支计算。

20世纪60年代末，真锅淑郎(Syukuro Manabe)等人开发了第一个全面考虑温室气体(包括水汽)辐射吸收以及对流能量输送的一维模型，并首次对大气中二氧化碳翻倍造成的温度变化进行了量化计算。同时他们开始开发三维的大气环流模

式，并考虑陆面和海洋，成为现代日益复杂的气候系统模式和地球系统模式的前身和基础。普林斯顿大学地球科学和国际事务教授迈克尔·奥本海默(Michael Oppenheimer)说：“Suki是第一个现代气候模型的制作人，如果没有Suki发起的气候科学模式，我们可能仍然知道地球的温室效应由于人类活动而增加，并且地球正在变暖，但将这两个事实联系起来会更加困难，而且不可能在任何有用的细节水平上定量预测未来。”^[1]

2021年的诺贝尔物理学奖颁发给了三位物理学家，表彰他们“对我们理解复杂系统的开创性贡献”。其中一位便是普林斯顿大学—美国大气海洋局地球物理流体动力实验室(GFDL)的真锅淑郎，以致敬其对地球气候物理模型的开创性工作和对全球变暖的量化预测。他的主要贡献包括第一个辐射对流模型(radiative-convective equilibrium, RCE)和第一个完整意义上的全球气候模式，他也因此被称为气候模式之父。文章围绕他的辐射对流平衡模型和全球气候模式展开了一些基本的介绍，并讨论目前存在的问题和未来的发展趋势，这些工作体现了物理知识的积累和计算机科学的发展是如何有效推进气候变化研究进展的。

2 辐射对流平衡模型

2.1 辐射平衡模型

要理解地球的冷暖变化，首先需要知道地球温度究竟因何变化？我们在烧开水的时候，锅中

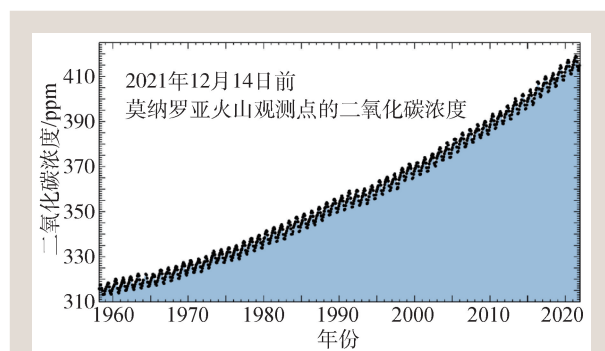


图1 大气二氧化碳含量的变化——“基林曲线”(图片来自 <https://keelingcurve.ucsd.edu/>)

水吸收的能量远大于其自身向四周散发的热量，导致温度上升；而把火关掉后，锅中水则净向外放出热量，温度逐渐下降。其实地球在宇宙空间中也如出一辙，只不过能量的收支是通过电磁波辐射进行的——任何物体只要温度大于绝对零度，都会以电磁波的形式向外辐射能量。根据普朗克辐射定律，物体温度越高，其辐射电磁波的波长越短，且能量越高。太阳表面的温度近6000 K，辐射主要以可见光波段的电磁波为主；而地球表面只有近300 K，辐射的主要是红外长波，我们肉眼无法察觉。所以对地球而言，能量源来自太阳的短波辐射，而能量损失则是自身的长波辐射。

黑体——能够吸收外来全部电磁辐射的理想化物体，常应用于辐射相关的研究中。其辐射能量可以根据斯特藩—玻尔兹曼定律进行量化：

$$B(T) = \sigma T^4,$$

其中， σ 为斯特藩—玻尔兹曼常数，数值为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

对于地球整体而言，其辐射能量收支状况的表征，即净辐射，决定了系统是升温还是降温(图2)。从长期平衡来看，地球温度基本保持恒定，可以认为净辐射为0，如果不考虑大气对太阳和地球辐射的影响，这时依据辐射平衡可知：

$$\sigma T_e^4 = \frac{S}{4}(1-A),$$

其中， A 是地球平均反射率，取0.3作为计算值； S 是太阳常数，指在日地平均距离上大气层

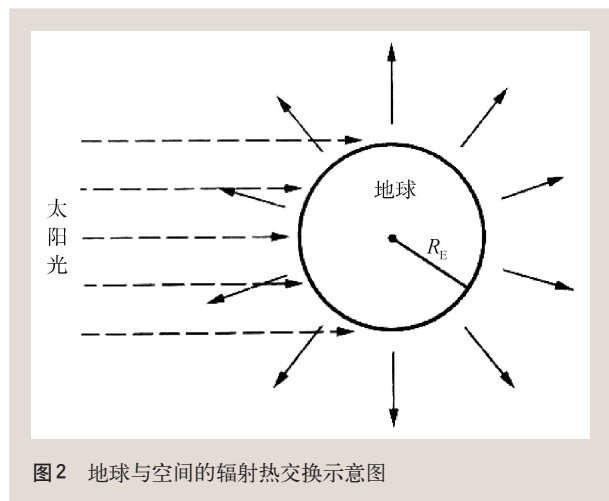


图2 地球与空间的辐射热交换示意图

顶垂直于太阳光线的单位面积每秒钟接收的太阳辐射，取 $1367 \text{ W}/\text{m}^2$ 。计算得到辐射平衡时地球表面的有效温度为 $T_e = 255 \text{ K}$ ($-18 \text{ }^\circ\text{C}$)，这显然与我们的认知大相径庭，地球实际的全球地表平均温度在 288 K ($15 \text{ }^\circ\text{C}$) 左右，原因就在于大气的温室效应。

地球大气虽然看不见摸不着，却对地球系统的能量收支起了重要的作用。上面的简单计算表明，如果没有大气地表的温度会比现在低得多，那有了大气之后会怎样呢？首先需要考虑大气中各种气体的辐射特性。氮气和氧气虽然是大气的主要成分，但由于它们是双原子分子，没有温室效应。大气中主要的温室气体是臭氧、二氧化碳和水汽等。这些气体的吸收光谱是由它们的分子结构和量子力学特性决定的，具体可以参考胡永云的文章[2]。由于大气基本不吸收可见光，很难直接从太阳辐射获取能量，主要是通过对地表长波辐射的吸收得到部分加热的。

由于大气在垂直方向上有明显的温度和温室气体含量(主要是水汽)的变化，我们不能把大气像地表一样当做简单的一层来考虑。在了解了大气的垂直温度结构(这个垂直结构本身受辐射影响)后，不难想象，我们可以通过逐层计算太阳短波辐射和长波辐射在每层中的收支情况，得出大气的垂直温度廓线和地表温度。具体而言，可以把整个地球大气简化为一个一维的大气柱模型，每一层大气被加热或冷却的速率与它收到的净辐射有关，而这层大气自身的辐射又与自身的温度和温室气体含量有关。整个的求解其实是一个初值问题的渐近解或平衡解计算问题。

模型需要给定各种温室气体的分布，比如 CO_2 是固定的300 ppm，臭氧的分布廓线按当时的观测进行拟合，最大值约在22 km处。地表反射率给定为0.102。具体计算中把整个大气大致按质量分成18层(大气层顶高度大约为43 km)，再加上地表，初始状态为一个等温的大气层^[3]。确定了逐层的辐射计算后，还需要考虑大气层顶和地表的边界条件，例如在辐射平衡状态下可以假定大气层顶进来的太阳短波辐射和出去的长波辐射

相等，地表得到的净太阳短波辐射和净长波辐射相等，不存在温度的不连续性等。

辐射平衡的意思就是对地表和大气来讲能量的收支都仅通过辐射来确定。与真实的大气温度垂直分布相比，辐射平衡给出的分布在大气高层吻合较好，也较好地模拟出了平流层，这主要是臭氧对太阳紫外辐射吸收的结果。但在大气低层偏离较大，具体的问题是对流层温度的垂直梯度过大(图3显示可达到每千米近 20°C)，也就是说下层的气团总比其上方的气团热很多；地表则更加炙热，达到了 60°C 左右。我们知道地球大气的温度递减率超过每千米 9.8°C (干绝热递减率，即气块在地球大气中绝热上升过程中由于膨胀做功导致的温度下降的速率)就是不稳定的，会发生对流，从而输送能量，加热大气，改变温度的垂直廓线。

2.2 辐射对流平衡(RCE)模型

之前的计算仅以地表的辐射平衡为出发点，这会导致不合理的地表温度和大气温度廓线(图3黑色实线)。真锅淑郎等的第一个创新是把地表和大气考虑为一个整体，考虑大气层顶的能量平衡，同时考虑到地表的辐射能量净收支(地表吸收的太阳短波辐射通常大于净长波辐射)用来平衡整个大气的净辐射冷却从而确保地表的净能量收支为零。具体来讲就是地表到大气的感热和潜热通量必须平衡整个大气的辐射冷却。具体的做法是在模式中引入了对流调整方案^[3]。对流调整是对模型施加限制，使得下层空气的密度不低于上层。大气密度受到气压、温度、水汽含量等多种要素的影响，但早期的版本只考虑了气压和温度的影响(水汽含量对空气密度的影响通常小于2%)。在实际计算中，采用逐步迭代的方法，一旦温度梯度大于规定值(采用湿绝热递减率每千米 6.5°C)时，认为发生对流调整，通过迭代使温度分布回到规定值。如此一来，对于任一高度层上的大气，短波辐射、长波辐射和对流造成的热通量达到平衡，称为辐射对流平衡。

他们的第二个创新是对水汽的考虑。作为一

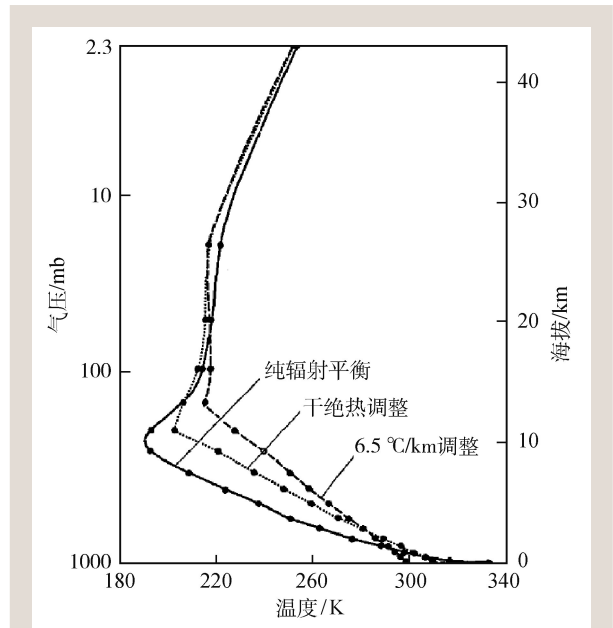


图3 辐射平衡和考虑对流调整(调整到干绝热递减率和湿绝热递减率)之后的大气温度廓线^[3]

种温室气体，水汽是大气中最为多变的一个变量，时空变化巨大。就算在一维的RCE模型中，如何考虑水汽也至关重要。他们1964年的文章[3]假定大气的绝对湿度(也就是水汽的绝对含量)不变，这在研究当时的气候状态时没有太大的问题，但要研究温室效应和全球变暖就不太适用了。在大气温度变化的情况下，饱和水汽压会随着温度的升高而升高(根据克劳修斯—克拉珀龙方程，在 300K 左右温度每升高 1°C ，饱和水汽增加约7%)。实际情况是大气相对湿度基本保持不变，所以变暖会伴随着大气中水汽的增加。1967年的文章[4]主要就是增加考虑了这一点，实际做法是参考观测假定相对湿度从近地面的77%随高度逐渐下降到2%。

考虑这两点之后，模型计算得到了和实际大气吻合很好的温度垂直廓线(图4)。注意在辐射平衡下，假定相对湿度不变后得到的温度递减率比假定绝对湿度不变的温度递减率还要大。这主要是因为假定相对湿度不变后水汽随着温度下降而急剧下降，大大降低了温室效应。通过比较我们可以发现，在平流层辐射平衡假定和辐射对流平衡假定的差别不大，基本满足辐射平衡，而在对流层差异巨大，不考虑对流的影响，无法得到和

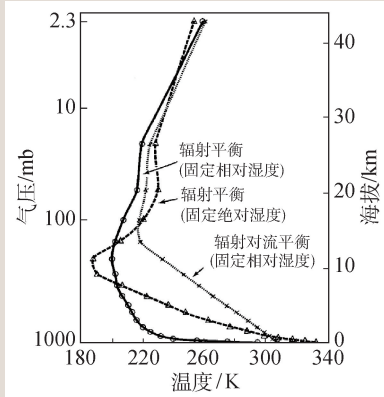


图4 辐射平衡(分别考虑固定绝对湿度和相对湿度)和辐射对流平衡(固定相对湿度)下的温度廓线^[4]

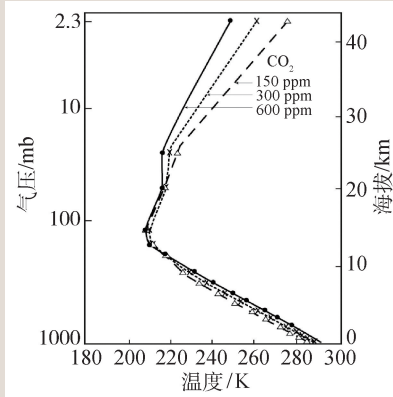


图5 不同二氧化碳浓度下模型计算的温度廓线^[5]

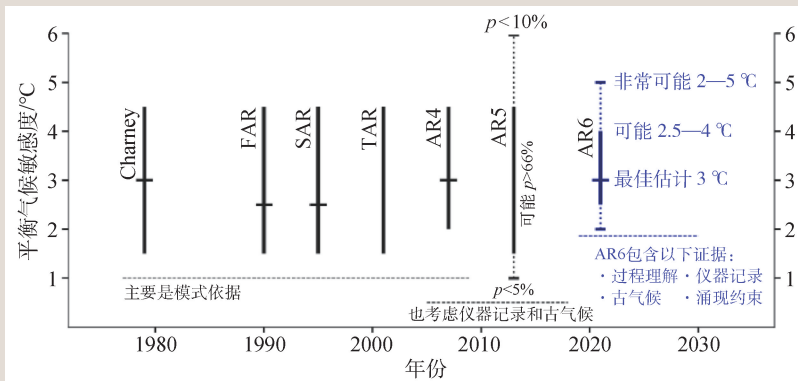


图6 IPCC 历次评估报告对平衡气候敏感度(ECS)的估计^[6]

观测接近的廓线, 这表明在对流层除辐射外, 必须考虑对流的能量输送。

在这个基础上, 真锅淑郎等用这个模型计算了大气的温度廓线在 CO_2 翻倍和减半下的状态(图5), 这也是诺贝尔奖网站上显示的一个非常重要的图。可以看到在 CO_2 浓度从 300 ppm(体积比)增加到 600 ppm 后, 地表温度增加了 $2.36\text{ }^\circ\text{C}$, 而减少到 150 ppm 后降低了 $2.28\text{ }^\circ\text{C}$ 。这个温度的变化比在假定绝对湿度不变的情况下要增加大约 80%, 体现了水汽对气候变化强大的正反馈作用^[4]。这个计算首次定量确定了 CO_2 翻倍造成的地球增温幅度。 CO_2 翻倍后地球系统达到平衡后的增温幅度通常称作平衡气候敏感度, 这个模型计算的 $2.36\text{ }^\circ\text{C}$ 成为平衡气候敏感度第一个可靠的估计。随后开始的政府间气候变化专门委员会(IPCC)对平衡气候敏感度的估计范围一直在 $1.5\text{ }^\circ\text{C}$

到 $4.5\text{ }^\circ\text{C}$ 之间, 到了最近的第六次评估报告(AR6)认为可能的范围是 $2\text{--}5\text{ }^\circ\text{C}$ (图6)。造成这么大的不确定性的一个主要原因是云反馈的不确定性, 如何降低平衡气候敏感度的不确定性范围是目前气候科学中最为重要也最有挑战的科学问题之一。

另外一个有意思的发现是随着 CO_2 的增加, 平流层温度有明显的下降, 这是怎么回事呢? 主要原因是平流层温度主要由太阳短波辐射加热率(主要是臭氧吸收)和温室气体的红外辐射冷却率的平衡决定。二氧化碳增加导致红外辐射冷却“效率(比辐射率)”增强, 在太阳辐射加热率(臭氧吸收)不变的情况下, 平流层温度必须降低来达到和以前一样的红外辐射冷却率。这一重要的发现被后来的观测证实。

2.3 辐射对流平衡模型的应用和发展

上面讨论的模型很好地模拟了现在气候的状况以及对 CO_2 的响应, 但还有一些进一步改进的空间, 比如这个模式的对流调整方法是强行把温度廓线拉回湿绝热递减率, 没有明确的水循环, 云是给定的, 云对辐射的影响较为简单等。后续 RCE 模型的发展采用了更为复杂的对流参数化方案, 考虑云微物理(成云致雨过程)的影响等^[7]。这些辐射对流平衡模型有很多的应用, 下面简要介绍这些模型揭示的一些有趣发现。

水汽作为一种主要的温室气体会随着温度的升高而不断升高, 其结果就是系统的长波辐射冷却能力会达到一个上限(大气的辐射上限大约是 $290\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ^[8]), 也就是天顶的长波辐射不再随着地表温度的增加而增加。如果这时候地球吸收的

太阳短波辐射大于这个辐射上限，系统就无法通过升温达到一个新的平衡态，导致温度不断升高，引发进一步的蒸发，大气中的水汽继续增加，增强温室效应，最终导致温室气体失控^[9]。根据目前的计算，科学家普遍认为金星就经历过温室气体失控过程，导致金星上的水都蒸发最后逃逸到外太空，成为一颗酷热没有生命的星球^[9]。目前辐射对流平衡模型计算的结果是：这个辐射上限在大气长波光学厚度小的区间(optically thin regime)大概在 $275 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 左右，但在对流活动极为活跃导致进入大气长波光学厚度大的区间的辐射上限是 $295 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ^[7]。因此如果吸收的太阳辐射在这两者之间时还可能出现多气候平衡态(图 7)。目前地球吸收的天顶太阳辐射大约为 $240 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ，离进入温室气体失控状态还有很大的距离^[7]。当然这些计算还没有详细考虑云对辐射的影响，因此还有较大的不确定性。云随着全球变暖如何变化，对变暖是一个正的还是负的反馈，反馈的强度以及这种反馈是否依赖于气候状态本身是当前气候变化研究领域最具挑战的科学问题之一。

时至今日，一维辐射对流平衡模式已成为诸多教科书上的重要章节，被认为是有史以来气候科学方面最伟大的论文之一。随着计算机运算能力的不断增长，对这种高度简洁概括模型的需求似乎已成为过去。如今的辐射对流平衡模式不仅在空间的水平和垂直方向都更加精细，更是在模式中考虑更为复杂的环流、降水、云辐射相互作用等。然而，经典的辐射对流平衡模式并未被持续发展的复杂的全球气候模式和地球系统模式完全取代，如今仍是研究气候科学问题的有力工具。一个重要原因是辐射对流平衡模型在水平均质边界条件处理上的简洁性以及抓住了气候系统中最为关键的热力和辐射过程，可以帮助学界在相对简单的情况下更好地认识最基本的气候系统准平衡响应问题，极大地促进了气候变化科学的进展。

从将对流高度简化的对流调整模型，到现在显式表达对流的云解析模型，从早期的一维模型到现在的三维模型，从以前的不考虑动力过程，到现在的考虑水平和垂直运动以及地球的旋转

等，辐射对流平衡模型仍然在帮助我们进一步更好地理解 and 阐明真实的复杂气候系统中最为关键和本质的部分。例如：由于引入了复杂的辐射传输、表面通量、对流等参数化模块，如今的辐射对流平衡模型可以自行计算云、水汽以及温度的垂直分布，以至于如今采用更高分辨率的云解析的辐射对流平衡模型与早期单柱模型已经有明显的差别，但这些更复杂的模型仍然产生了与早期单柱模型类似的温度廓线，能让我们在大尺度良好约束的情形下讨论更为复杂的云、辐射和对流问题。

一个重要的例子是对流、云和辐射的复杂相互作用，即使在目前世界上最先进的全球气候模式中，仍然有较大的偏差和不确定性。作为全球或者热带大气平均状态的理想模型，科学家们仍然在使用理想化的 RCE 模型研究许多有趣的问题，例如：科学研究发现在特定条件下，平常看起来杂乱无章的随机对流会突然组织起来形成结构化的对流组织(称为对流自发聚合现象，如图 8 所示)。对流自发聚合会改变整个大气的云和水汽分布，从而影响辐射，同时还会影响大气和下垫面的水汽和动量交换，影响环流。这个对流—辐射—水汽—表面通量等之间的反馈机制会极大地影响气候系统对变暖的响应，因此，IPCC 甚至专门组织了辐射对流平衡模型的多模式比较计划^[10]。

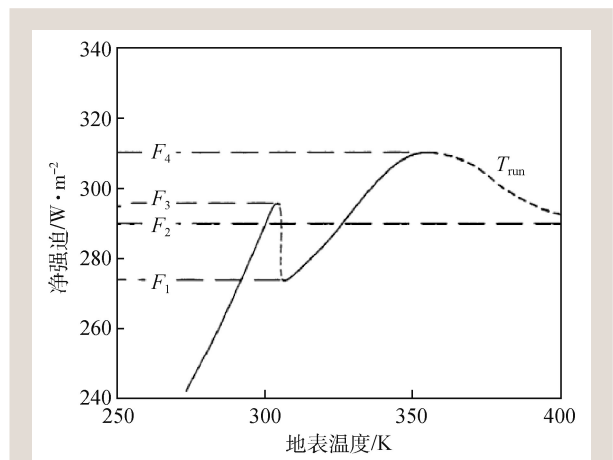


图 7 辐射对流平衡模型计算的净强迫和地表温度的关系：净强迫小于 F_1 时，只有一个平衡解；净强迫在 F_1 和 F_2 之间时，有两个线性稳态平衡解；净强迫在 F_2 和 F_3 之间时，有两个线性稳态平衡解和一个温室气体失控态；净强迫大于 F_3 时，只有一个温室气体失控态^[7]

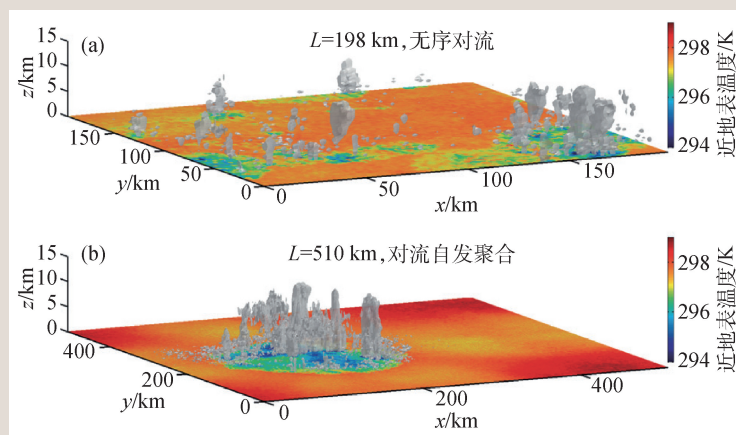


图8 理想RCE模拟下的对流自发聚合现象^[11]

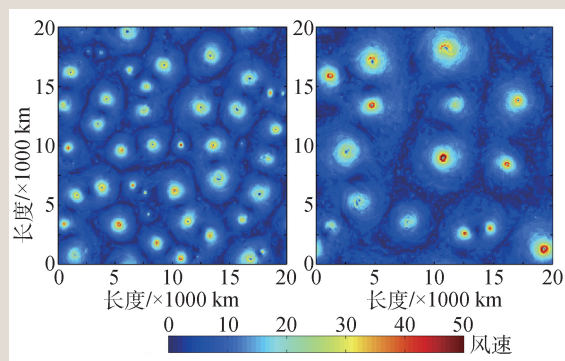


图9 考虑地转的理想RCE模拟中类似台风的涡旋, 和它的近地面风速(左图: 297 K; 右图: 305 K)^[13]

此外, 在三维的RCE模型中增加旋转后, 会模拟出很多类似理想“台风”的旋转对流涡旋(图9)。这些组织化的旋转对流如何改变整个大气的能量收支, 以及它们如何随全球变暖而变化也是一个激动人心的科学前沿问题。进一步来讲, 这些模拟甚至可以帮助我们理解现实世界中台风的生成、频数、尺度问题以及其在气候系统中的作用^[12]。

如果把辐射对流模型看成是真锅淑郎给气候变化科学画的一幅素描的话, 那他在全球气候模式方面的一系列工作就是色彩斑斓的风景画了。

3 全球气候模式的发展

前面讨论的RCE模型是一个一维单柱模型, 可以认为是一个全球平均状况的高度近似, 对理解全球平均气候状态如何响应温室气体的变化具有深刻的科学意义。虽然简化的气候模式(如辐射

对流平衡模式)可以定量地确定地球平均气候态(全球平均气温及其垂直廓线)随外强迫和温室气体的变化, 但不能提供不同时空的演变特征和空间分布。因此随着计算机能力的不断提高, 建立在坚实的数学和物理基础上的全球气候系统模式开始出现。这些模式在球面上通过数值离散方法求解纳维—斯托克斯方程和能量收支方程, 同时对各种无法直接求解的次网格过程, 如对流、湍流和云降水过程, 采用不同复杂程度的参数化方案进行表达。真锅淑郎研发了最早的全球气候模式, 取得了一系列新的科学认识, 极大地推动了气候科学的进展^[14-17]。

早期的全球气候模式主要考虑大气环流, 对下垫面(海洋和陆面)的处理较为简单, 因此也称为大气环流模式^[14, 15]。后来逐步耦合更为合理的陆面和海洋环流模式, 成为海气耦合模式, 也称为全球气候模式(global climate model)或气候系统模式(climate system model)。这些模式通常不考虑地球系统中的生物、地球和化学过程。随着模式的进一步发展, 现在的地球系统模式(earth system model, ESM)还考虑地球不同圈层之间的相互作用、生物地球化学过程以及物质和能量在这些不同圈层之间的交换。

全球气候模式对于理解整个地球系统的运行规律有十分重要的意义。在真锅淑郎发展的全球气候模式的基础上, 现在全球已经有40余个气候模式参加了最新一轮的多模式比较计划(CMIP6)。虽然这些气候模式的网格结构、动力框架、物理过程、复杂程度甚至耦合方式存在一定程度的差异, 但它们都是基于坚实的数学和物理原理开发出来的, 都能较好地模拟过去的历史气候变化以及未来的全球变暖趋势, 这些都不断增强人们对于模型和模拟的信心。这些模型模拟在具体的升温幅度和区域气候方面的预估还有较大的不确定性, 反映了地球气候系统的复杂性以及我们对其理解的局限。气候系统作为一个超级复杂系统, 我们对其的科学认识还处在一个不

断深化的过程，最终的理解和科学认识离不开基础学科如数学、物理以及计算机科学的快速发展。

4 结论和展望

地球作为一个复杂系统，还蕴藏着诸多的未知等待人类发现。气候模式虽然能够对未来地球的变化做出一定程度的预估，但我们目前还无法完全理解这些模式大规模计算背后的物理理论。一只南美的蝴蝶扇动翅膀，可能会给美国带来一场龙卷风。一个微不足道的初始扰动，会使模式计算结果千差万别。复杂系统的不确定性及其科学认识是我们面临的最大挑战之一，这次诺贝尔物理学奖颁发给三位研究复杂系统的科学家就是希望我们能在在这方面进一步加强研究，更好地认识我们生活其中的地球，实现可持续发展。我们最终的目的是更好地理解地球这一典型的复杂系统究竟是怎么工作的，人类又将会怎样影响地球的未来，而这需要在观测、理论和模拟三方面共同推进。

观测方面，我们已经积累了大量的气候系统观测数据，从地面站点观测到全球卫星监测，但更为重要的是如何在海量数据背后发现新的规律和认知，引导人们对气候科学做出创新性的认识。理论方面，当今对于复杂系统的认知还不够清晰，很多天气气候现象背后的物理规律还处于

探索之中，并且基础物理学科本身也面临着诸多困难有待解决，例如对流和湍流问题。复杂系统科学和基础物理科学的进步将进一步推动气候模式的发展和气候科学的进步。最后，气候模式仍然是我们理解和预估地球气候系统演变的主要工具。一方面，我们需要不断改进气候模式的准确性、可靠性和模拟能力，同时为增进理解，我们还需要一系列不同复杂程度的气候模式，包括本文重点介绍的辐射对流平衡模型，以及研究古气候变化的中等复杂程度气候模式，最终到综合考虑各种生物地球化学和碳氮循环过程的完整的地球系统模式。

虽然目前大众对气候模式还有一些疑惑，但今年诺贝尔物理学奖的颁布无疑是对气候模式和气候科学研究的重大肯定。任何时候气候模式和气候科学都要建立在扎实的物理基础上，未来还需要不断改进模式的准确性和可靠性，同时更需要不断增进对气候系统本身的科学认识。一方面模型需要变得更加全面，考虑更多的过程，但同时我们也更加需要真锅淑郎等科学家开发的简化模型，抽丝剥茧般提取出研究问题的主要矛盾，真正把握复杂系统中的关键决定性因素。

致谢 施文和张机时博士为本文撰写提供了大量信息，周宇峰阅读初稿提出了修改意见，在此向他们表示感谢。

参考文献

- [1] <https://www.princeton.edu/news/2021/10/05/princetons-syukurom-anabe-receives-nobel-prize-physics>
- [2] 胡永云. 物理, 2012, 41: 495
- [3] Manabe S, Strickler R F. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1964, 21: 361
- [4] Manabe S, Wetherald R T. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1967, 24: 241
- [5] Manabe S, Anthony J B. *Beyond Global Warming: How Numerical Models Revealed the Secrets of Climate Change*, Princeton: Princeton University Press, 2020. p.193
- [6] Arias P A *et al.* Technical Summary. 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. 2021, In Press
- [7] Renno N O. *Tellus*, 1997, 49(4): 423
- [8] Nakajima S, Hayashi Y Y, Abe Y. *Journal of Atmospheric Sciences*, 1992, 49: 2256
- [9] Ingersoll A P. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1969, 26: 1191
- [10] Wing A A *et al.* *Geosci. Model Dev.*, 2018, 11: 793
- [11] Muller C J, Held I M. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2012, 69(8): 2551
- [12] Merlis T M, Held I M. *Current Climate Change Reports*, 2019, 5(3): 185
- [13] Zhou W, Held I M, Garner S T. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2014, 71(3): 1058
- [14] Manabe S, Smagorinsky J, Strickler R F. *Monthly Weather Review*, 1965, 93(12): 769
- [15] Smagorinsky J, Manabe S, Holloway J L. *Monthly Weather Review*, 1965, 93(12): 727
- [16] Manabe S, Wetherald R T. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1975, 32: 3
- [17] Manabe S, Bryan K, Spelman M J. *Journal of Physical Oceanography*, 1975, 5(1): 3