

新一代气候模型： 迈向净零和气候适应的巨变

概要

气候模型是了解气候变化和预测其风险的基础。气候模型可以为预测影响、指导适应决策以及制定减排目标提供依据。随着气候变化迅速扩大，同时为了在 2050 年之前实现净零排放的目标，社会现在需要更加详细准确的信息，才能做出稳健的决策。

针对新一代超级计算和地球系统科学，开展全新水平的国际合作与投资，充分利用现有的技术潜力与科学能力。这种巨变式转型可以提供稳健的科学支撑，推动未来几十年减排以及适应工作的宏图伟业。

思路

- 新一代国际气候模拟中心以百万兆级计算和数据设施为基础，可以实现目前在模拟能力方面可能实现的巨变，从而支持实现净零排放和气候适应投资的技术路线图。
- 这种专门设施规模空前，作用类似于 CERN（欧洲核子研究中心）在粒子物理学方面的作用，以近 50 年来最伟大的一大科学成就——地球系统模型为基础，可以克服科学和技术障碍，从而为下一个世纪提供及时、详细、一致和可行的气候预测。
- 最新研究表明，新一代高分辨率模型可以彻底改变可用于减排和适应的信息质量，包括从全球气候和区域气候影响，到前所未有的极端天气以及危险气候变化的风险等方面。
- 通过与这样一个全新的全球设施建立伙伴关系和合作关系，世界各地的国家气候模拟和服务将发展到全新的能力水平，从而为国家公民，乃至是全世界人民造福。
- 为了确保能够领会和使用最新预测，该设施还可以包含专门的运营数据服务，采用人工智能 (AI)、机器学习和高级可视化等数据分析和信息学方面的最新数字技术。
- 可以通过“孵化器”推动持续发展，激发有关新一代模拟的新思路。“开放数据实验室”可以在基于数据云和应用程序编程接口 (API) 的尖端数字解决方案方面，促进公私合作伙伴关系，与学院合作，培养气候模型信息的开发人员和用户。

1. 当前现状

1.1. 预测未来地球气候变化

地球的气候极其复杂。尽管科学家可以通过观测发现气候方面的诸多变化，但仅凭这些观测并无法解释气候变化的原因，也无法预测未来气候的变化趋势。所以，我们才需要建立气候模型。

早在 1896 年，Arrhenius 便根据简单的能量平衡理论，提出二氧化碳浓度加倍会引起全球升温 4°C ¹。20 世纪 50 年代计算机问世后，模拟全球环流响应的气候模型得以与数值天气预报系统共同发展起来。这类模型的基础是从基本物理定律的第一原理出发对天气和气候进行模拟。这些物理定律采用数学方程表示，必须使用复杂的数值技术进行求解。将地球上的大气、海洋、陆地和冰川区域划分成数百万个网格单元，然后及时对方程正向求解，可以在每个单元中模拟出世界天气和气候在未来几小时甚至几十年的演变情况²。

模型的建立一直无法解决的一大主要难点是，如何才能在比模型网格更精细的尺度上，以最佳的形式呈现出云形成和积云对流等过程。这些过程对于确定气候变化的幅度和速度、预测降水变化以及捕捉热带气旋和洪水等恶劣天气事件均至关重要。尽管对于这类过程在气候模型中的呈现方式，已经进行了显著改善，但由于缺乏对其进行详细模拟的能力，未来气候——特别是在区域及地方层面，仍存在尤为显著的不确定性³。

1.2. 利用现有计算能力和基础科学造福人类

自建立以来，气候模型便需要进行大量的计算，而计算能力的发展程度则决定了可执行模拟的复杂程度与类型。如今，这些模型部分属于超级计算最复杂的应用程序，通常包括一百万行以上的代码。

模拟物理天气和气候方面已取得了一定优势，在此基础上，随着与海洋和陆地生态系统有关的大气化学和生物地球化学循环（例如碳和氮循环）的引入，近年来又在模型中添加了地球系统过程。有了这些模型，专家能够超越气候变化的物理属性，综合考虑自然和管理资源以及生态系统在决定未来气候及其影响方面的作用⁴（图 1）。

对地球系统进行模拟的计算机模型的建立，使科学家能够根据基本的物理原理预测天气及气候的演变趋势，这是过去 50 年所取得的最伟大的一项科学成就。这样，社会各界才能够展望未来，认识到全球变暖的影响。因此，所有国家及地区现在均已达成一致，应对气候变化是 21 世纪一项决定性的挑战^{5, 6}。

气候模型以及对不同排放情景的预测，构成了减排和适应气候变化的证据基础⁷。科学家现已了解，对于未来几十年气候变化的情况而言，具有巨大储热能力的海洋具有举足轻重的作用⁸。科学家已经了解，气候变化会导致极端降雨和洪水频发，加剧干旱⁹。科学家已经了解，陆地生物圈对气候变暖和降雨模式变化的反应，可能意味着陆地生物圈将成为效率较低的碳汇，而这反过来又可能使人类碳排放所导致的温室效应情况加重¹⁰。

气候模型也让科学家得以探索，地球系统变暖可能会向着远比目前预期¹¹更加危险的状态发展，而且这一过程还可能无法逆转。这种趋势发展可能还涉及物理气候系统，例如冰原迅速

流失或海洋热盐环流崩溃，以及陆地碳循环，例如永久冻土融化或亚马逊雨林消失。这种性质的变化将对全球的适应能力和国际减排政策产生巨大影响，例如，减少未来允许的碳排放“预算”。

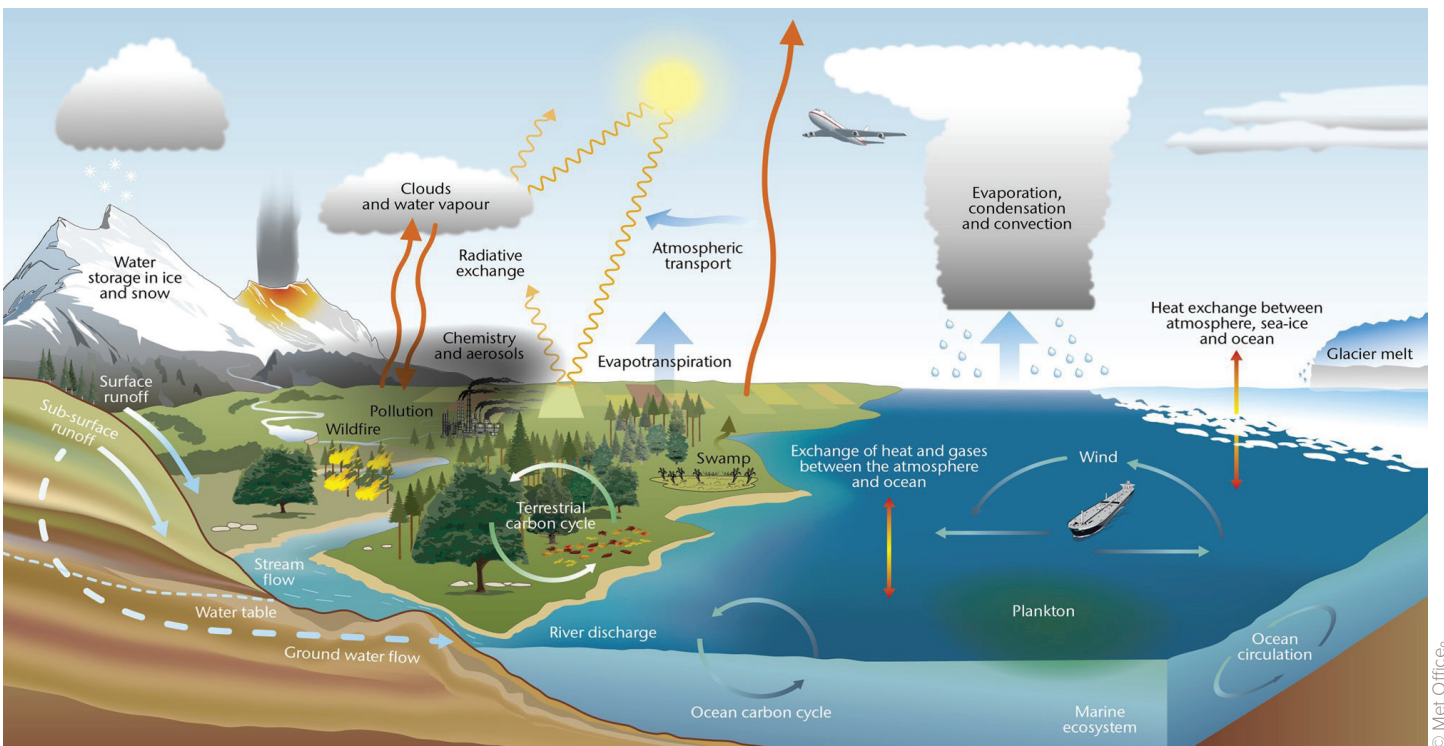
尽管已取得诸多进展，气候科学家清楚，气候模型及其预测仍然存在严重缺陷，部分原因是缺乏对地球系统基础知识的了解，同时部分也是因为超级计算能力本身所固有的科学限制。若模拟界要成功实现共同的集体科学目标，即提供所需的详细信息，为计划的全面适应和减排行动提供支持，就必须将此作为紧急事项加以解决。

尽管过去 50 年之间已取得巨大进展，但气候模型及其预测仍然存在严重不足。这主要是由于超级计算能力发展本身所存在的科学限制，因此必须作为紧急事项加以解决。

图 1

当代气候模型

显示当代气候模型所含物理和生物过程的示意图。图中显示了大气和海洋流动在推动地球基本循环（水、碳、大气化学和海洋生物地球化学）中的重要性。



2. 气候模型在气候行动中的重要地位

当今，气候科学的发展正处于分水岭。科学和技术进步程度已足以预见新一代的气候模型有望实现巨大飞跃。

2030 年之前的这几年尤为关键，气候模型将为减排和适应气候变化提供重要信息。

2.1. 了解各种减排策略的影响

国家和国际减排政策是否可行，必须利用基于气候模拟和预测所作出的评估进行检验。这有助于让社会了解无法实现必要减排目标可能引发的后果，以及极端事件对区域的影响和风险。只有借助于最佳气候模型，我们才能显示存在哪些风险，可能会失去什么，以及未来气候破坏情况和不作为将会付出的代价。

实现净零排放的途径将转变地貌格局，加大对风力、太阳能和水电等天气主导的可再生资源的依赖，并可能会给水-食物-能源关系带来压力（参见简报9：气候变化与土地；以及10：可持续满足一百亿人口的温饱需求）。为了确保减排行动与天气随气候变化的方式相适应，并且不会产生意想不到的后果，至关重要的一点就是拥有坚实的气候科学基础。

2.2. 为适应策略和长期抵御能力提供信息

在适应方面，需要制定计划，使生活、城镇和城市既能抵御气候变化，又能保护自然环境。正如联合国秘书长 Antonio Guterres 所言，“‘打造抵御能力’与‘实现净零目标’同样重要。”¹²。越来越多的证据显示，人类的影响加剧了许多极端天气事件发生的可能性和严重性¹³。受大气中碳的积累以及系统惯性的影响，即使排放量下降，未来气候变化也已无法避免。

气候模型预测可以为全球、区域和地方层面的适应工作提供信息，对保护生命、民生和关键基础设施，进而确保粮食、水和能源的可持续供应具有深刻影响。

对于适应工作的潜在投资规模，加之世界各地社会脆弱性与日增加，都十分需要掌握未来几十年甚至是更长期的时间段内，天气及气候（特别是极端天气灾害）可能演变趋势的更加详细、准确的信息。位置具体、内容详细的气候信息可以保障基础设施项目在选址、建设和管理方面能够抵御气候变化的预期影响，从而保障未来几十年数万亿美元的投资。（参见简报8：抵御风暴：科学如何通过适应提高全球气候抵御能力）。

当今，气候科学的发展正处于分水岭。科学和技术进步程度已足以预见新一代的气候模型有望实现巨大飞跃，这些模型可以为社会迫切需要的减排和适应工作提供详细的科学证据基础，从而进一步支持决策并指导和保障世界必须进行的投资。国际谈判为决策者搭建了一座论坛平台，使其得以与气候科学界开展合作，加速这一进展的实现。

3. 新一代气候模型：气候模拟及其应用的革命性潜力

3.1 预测未来气候的明显挑战

由于当前计算能力所限，现有模型在模拟区域天气和气候方面仍存在严重不足。这些模型无法解决诸如热带气旋、低气压和持续高压系统等系统的详细结构和生命周期，从而引发更加惨重的气候变化影响，例如沿海溢洪、洪水、干旱和山火；而且也无法解决对气候变化和区域气候变化均至关重要的洋流问题¹⁴。

自 1990 年 IPCC 发布第一份评估报告 (AR1) 以来，模型在分辨率和复杂程度方面逐渐发展进化，同时越来越多的国家/地区加入到了这一过程中来。AR1 气候模型使用的是间距为 300 公里的水平网格，而当前的 IPCC AR6 气候模型的分辨率约为 100 公里。就当前可用的计算资源而言，很难实现这一点，因为分辨率每减小一倍（比如从 100 公里到 50 公里），需要将计算能力增加 10 倍才能实现。

与此同时，在 IPCC 报告的 30 年间，天气预测领域发生了一场“无声的革命”¹⁵。目前，气象模型的分辨率在全球预测方面能达到 10 公里，区域预测能达到公里级别。这些进展都充分说明，为了准确模拟重要的天气成分，例如云系统、对流、有组织的季风雨带和热带气旋以及当地的极端事件，需要将分辨率提高到接近一公里的级别。

那么，为什么气候模拟没有遵循同样的路径呢？原因很简单，因为对多个场景进行多世纪全球模拟所需的计算能力规模，远远超出对未来几周进行可操作性天气预测所需的计算能力。

3.2 模拟全球气候系统，为大到全球小到地方各级的行动提供信息

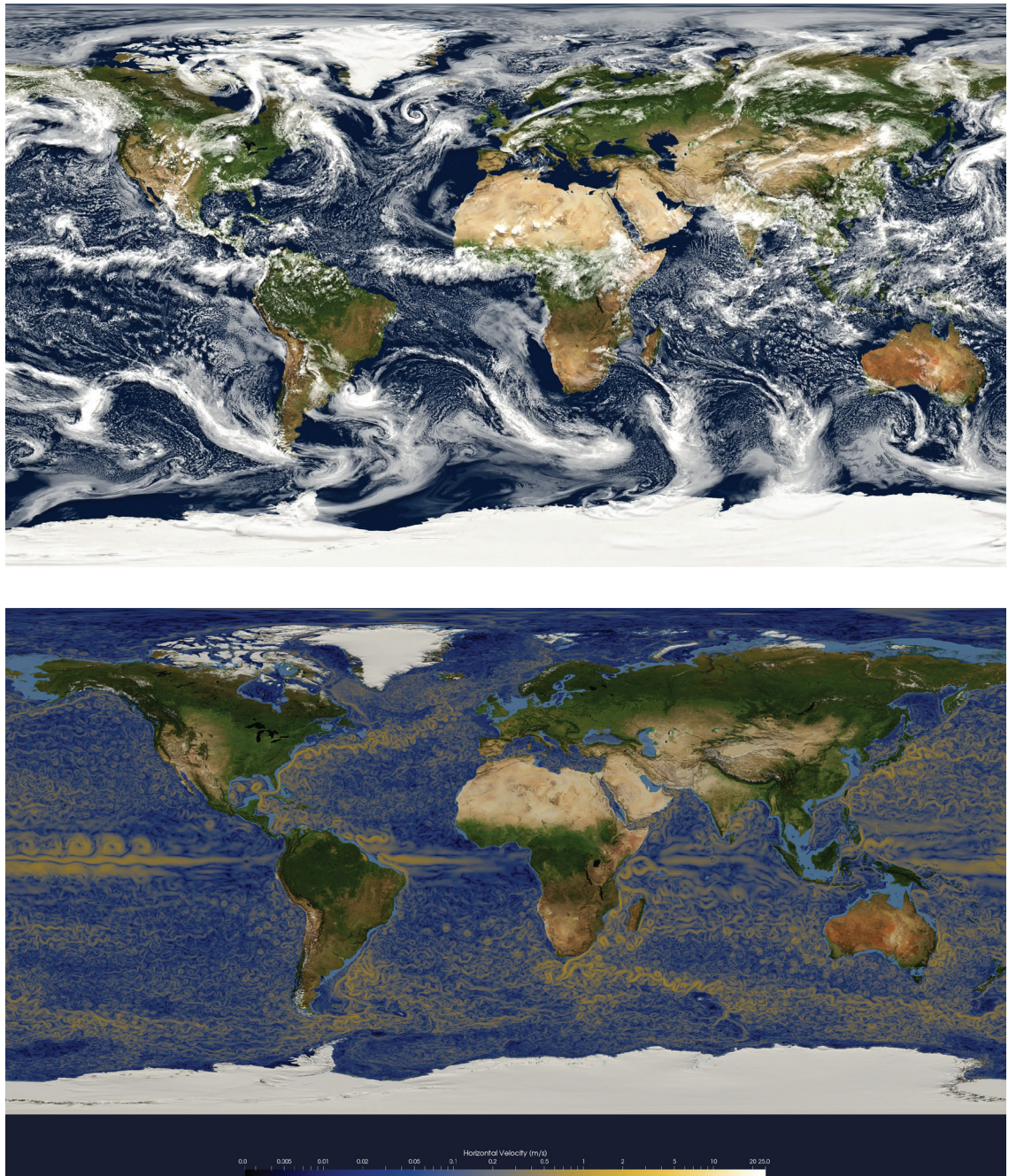
问题的核心在于需要以公里尺度的分辨率模拟整个全球气候系统，特别是大气和海洋，而且模拟的时间跨度要长达几十年甚至几百年。这是必不可少的工作，因为破坏程度最大的极端天气事件运行级别可达到公里级别，而至重要的是，其性质还受到更大尺度的海洋和大气环流的影响。而且，大尺度和小尺度之间的影响是相互的；换句话说，天气和气候是能量级联的连续体，能量从最小尺度到最大行星环流，然后再重新返回。

全球模型达到公里尺度级别的巨大飞跃最终可以实现以精细尺度的运动调节较大尺度的运动，反之亦然。这就是为什么区域模拟的方法虽然有用，但本身并不充分的根本原因。如今，通过新一代全球模型可以实现预测全球气候，明确预测风暴和海洋涡流等公里尺度现象。

图 2

新一代全球风暴和海洋涡旋解析气候模型明确显示了天气系统（上图）和海洋涡流及洋流（下图）¹⁶

这种分辨率水平可以让我们更加自信地预测水资源可用性、破坏性天气、海洋吸收热量和碳的方式以及对自然生态系统服务相关影响的变化情况。凭借这种知识，我们能够对与栖息地流失、疾病传播、野火风险、空气质量和作物、渔业和森林产量等社会相关的因素进行量化。



图片由马克斯-普朗克研究所 (Max Planck Institute for Meteorology, MPI-M) 和德国气候计算中心 (German Climate Computing Centre, DKRZ) 经 Bjorn Stevens 教授和 Jochem Marotzke 教授提供。

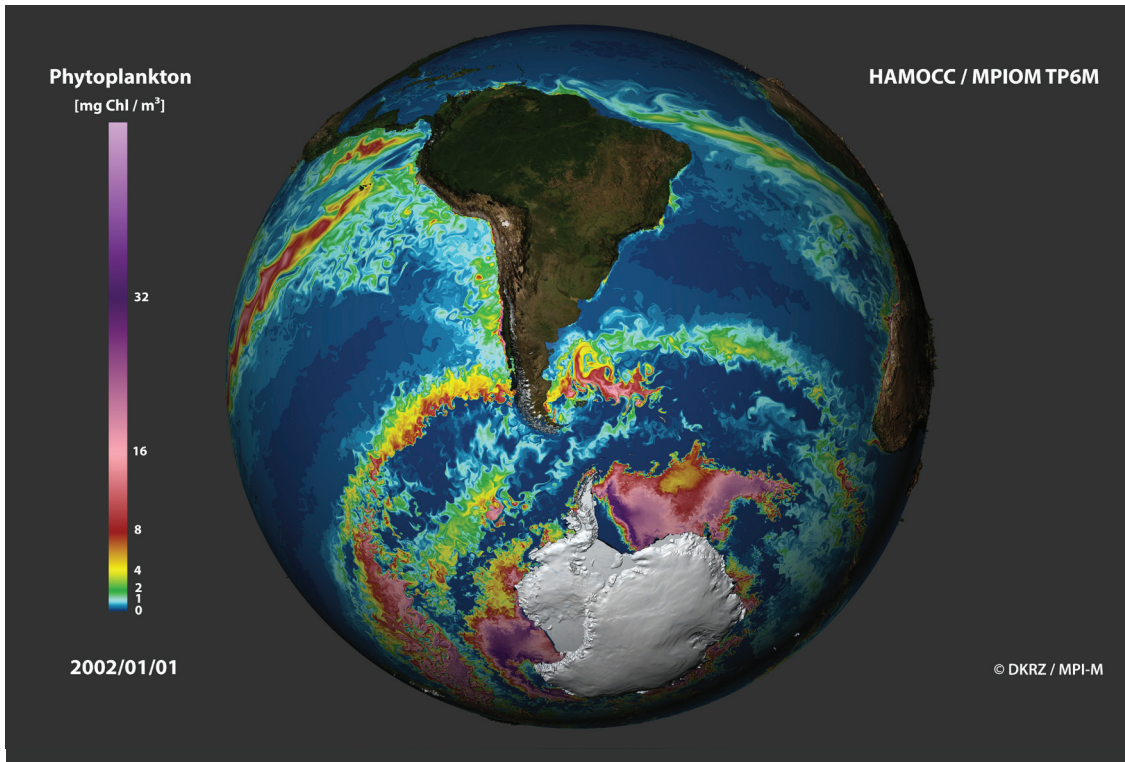
现在正在构建这种公里级模型的原型，进行有限时间范围的模拟（通常为 10 天），其分辨率水平具有开创性的意义（图 2）^{17,18}。新一代模型将彻底改变支持气候变化决策的气候信息质量——从全球气候敏感性（通常通过二氧化碳浓度翻倍的温度变化进行量化）和区域气候影响，到前所未有的极端天气和危险气候变化的风险⁹。

除了物理气候系统，这类模型还将为了解地球系统的其他组成部分提供新思路，例如碳、气溶胶和海洋营养物质，了解其对精细尺度的大气和海洋环流（图 3）的依赖情况，可能如何对气候轨迹的方式造成实质性的改变（参阅简报 7：碳循环）。植被与土壤碳之间、海洋循环与海洋生态系统之间以及人类活动之间复杂相互作用的详细表征，为新一代气候/地球系统模型奠定了基础，使其得以研究气候不稳定、极端、不可逆转的转变所产生的风险对社会和自然系统的影响。

图 3

预测浮游植物繁殖的未来

对于了解未来海洋生态系统的健康状况以及未来海洋碳吸收情况而言，预测浮游植物繁殖的未来可谓至关重要。浮游植物繁殖与海洋环流中的精细尺度结构（例如涡流、锋面和沿海上升流区）有关，新型公里尺度地球系统模型首次实现了对这些机构的捕捉。



图片由马克斯-普朗克研究所 (Max Planck Institute for Meteorology, MPI-M) 和德国气候计算中心 (German Climate Computing Centre, DKRZ) 经 Bjorn Stevens 教授和 Jochem Marotzke 教授提供。

4. 国际行动?

对于未来十年所面临的挑战，只有通过训练有素和资源充足的科学工作者在全球范围内展开合作工作方能解决。

要实现净零排放和气候抗御能力这两大目标，需要大幅加快提供可操作的气候信息。

对于未来十年所面临的挑战，只有通过训练有素和资源充足的科学工作者在全球范围内展开合作工作方能解决。要实现净零排放和气候抗御能力这两大目标，需要大幅加快提供可操作的气候信息。过去 30 年气候模型取得了稳步的发展，在此基础上，从现在的技术发展情况来看，我们有望实现能力的巨变。任务艰巨：不仅在科学和技术层面上来讲高度复杂，而且还需要解决从地方到全球各个层面的社会需求。要取得这一工作的成功，必须得到强大全球伙伴关系的支持。

4.1 全球合作，造福全球

今天，构建和执行最先进的全球气候模型所需的企业规模正在成为少数人的领域；所需的人力、计算、数据和能源资源十分巨大，并且已经开始要超过个别国家的能力。为了接近最佳模型分辨率，需要达到百万兆级计算（ 10^{18} 或每秒十亿乘十亿次计算）²⁰，就电力和成本而言皆可谓是前所未有的水平。与此同时，数据挑战的规模十分巨大，数据生产很快便会达到艾字节（十亿千兆字节）的水平。

可喜的是，模拟界人士已掌握了技术和科学的解决方案。与核聚变 (ITER) 和寻找希格斯玻色子 (CERN) 等其他重大全球科学挑战工作一样，可以在国际水平上汇集基础设施和智力知识来实现必要的巨变，进而实现这一目标^{21, 22}。

这一工作的核心要求是建立一个规模空前的计算和数据设施，专门负责对地球系统进行及时模拟、预测和数据分析，作为国家气候设施网络的枢纽，与全世界共享成果。在每个阶段，都必须以从地方到全球级别的社会需求为指导。

这样的行动可以提供克服科学和技术障碍的路径，得以在地球系统复杂程度日益增加的情况下以公里尺度为下个世纪提供及时、详细、一致和可操作的气候预测。

设施可以是类似于 CERN 的物理实体，也可以是国家/国际百万兆级设施的紧密网络集合体。总体目标就是提供公里尺度的全球气候预测和服务，让所有国家都可以根据自身的需求和能力获得这些预测和服务。至于能否取得成功，在很大程度上要取决于大到学术界、国家气候研究中心，小到气候服务提供者等全球气候科学、模拟和服务界人士专业知识和智力网络的扶持与发展。

这是一项宏伟的事业，需要在国际层面开展全新的投资与合作。但这种投资必须权衡不开展此类合作的利弊进行。受天气和气候事件影响，世界已经受到了巨大的人员和经济损失，而且随着气候的变化，这些损失只会有增无减。联合国减灾办公室 (UN Office for Disaster Risk Reduction) 估计，自 2000 年以来，受灾害事件影响，已有 123 万人丧生，每年的经济损失约为 3 万亿美元或 1500 亿美元²³。从这一方面出发考虑，这一行动的好处远远超出投资的风险。

4.2 加快科技进步与创新

为了实现其目的，这样的设施中心需要利用和鼓励计算机和数据科学和技术的创新，提供一系列独特的尖端设施和服务，在当前国家能力的基础上，参与并加强国家能力建设。利用对地球观测所投入的巨额投资，打造计算平台，将观测数据进行情景化，用于推进地球系统科学，以及初始化预测和评估模型性能。

这种巨变还能制造机会，打造专用操作数据服务和模拟能力。这还能确保使用 AI（人工智能）、机器学习和高级可视化等最新的数据分析和信息学数字技术进行预测。这样，便可以为所有人提供权威的信息和数据服务来源。这种服务门户可以是单一实体，也可以是欧盟哥白尼气候变化服务中心 (EU Copernicus Climate Change Service) 之类紧密联系的主要区域气候服务提供商组织²⁴。

要实现这一进步，还需要建立“孵化器”进行加强，激发新思想的产生和发展，并为专家提供一个可以会面共同工作的平台。以 CERN 为例，模拟工作还可以从“开放数据实验室”中受益。开放数据实验室是一种独特的公私合作伙伴关系，致力于加快为全球气候科学和用户社区开发尖端数字解决方案。

就人员能力而言，这样的中心将配备真正的全球科学家和工程师队伍，而且要制定能够与全球各国气候科学工作进行交流的计划，开设一家世界气候科学学院，培养气候模型信息方面所需的未来开发人员和用户。

这一工作的核心要求是建立一个规模空前的计算和数据设施，专门负责对地球系统进行及时模拟、预测和数据分析。

5. 2030 年和 2050 年的气候模拟展望

到 2030 年，若能够突破百万兆级计算的大关，而且可以部署新一代公里尺度的全球风暴解决气候模型，则有望实现用于决策的气候变化信息革命。

世界各地的社会均可了解到可能会出现哪些考验其抵御能力的天气和当地极端情况，清楚降水在分布、频率和强度方面如何以及为什么会发生变化，以及洋流会如何移动和影响区域气候和海平面上升。掌握了这些物理气候系统知识，就可以更加有效地管理粮食、水和能源资源，保障所有人都能享有安全、可持续和健康的未来。

到 2050 年，预计会出现一种地球生命系统模拟器，可以在全球和国家层面预测物理环境和自然环境之间的多种关系，还可能包括与社会之间的关系。从本质上说，这将构成地球的物理数字双胞胎——地球系统的动态图，以最佳方式混合模型与观测结果，绘制人类活动的数字双胞胎，从而探索整个地球系统现在和可能的未来。欧盟的“目的地地球” (DestinE) 计划：《塑造欧洲数字未来》已经开始探讨这种事业的可行性²⁵（参见简报 2：净零计算）。

最后，带领 Charles Darwin 完成重要航行、同为英国气象局 (UK Met Office) 创始人，并发布了第一条公众天气预报的贝格尔号船长 Robert Fitzroy，曾经说过一句话，值得深思。1859 年，在一场可怕的风暴中，他失去了皇家特许状 (Royal Charter)，随后他写信给《泰晤士报》，信中说：“人类无法阻止狂风暴雨，却能对其进行预测。人类无法平息风暴，却可以规避风暴的摧残，只要能恰当地使用一切可以用于救死救难[逃脱海难]的工具，也许就可以奇迹般地减轻这些可怕的灾祸所产生的后果。”

150 多年前，Fitzroy 开始了漫长的预测之旅，探寻如何减少和管理恶劣天气的影响。对于气候变化管理而言，这同样适用。从全球到局部地区，从几个小时到几十年，对天气和气候，甚至可以说是整个地球系统的了解以及随之进行的预测，让社会得以规划未来，保证人民和自然环境的安全。

本简报只是探讨科学技术在全球实现净零排放和适应气候变化中作用的系列简报中的一篇。世界各国都在制定各自在 2050 年之前实现净零的路线图，该系列简报旨在就科学所能有助于理解和采取行动的 12 个方面，为各国决策者献计献策。

要观看完整系列内容，请访问 royalsociety.org/climate-science-solutions

要查看简报编著人，请访问 royalsociety.org/climate-solutions-contributors

本文中的文本根据《创作共用署名许可协议》(Creative Commons Attribution License) 条款授权使用，该协议允许在注明原作者和出处来源的前提下，进行无限制使用。许可协议访问网址：creativecommons.org/licenses/by/4.0。图片不在本许可授权范围内。

发布日期：2021 年 6 月 DES7639_1 © The Royal Society

参考文献

1. Arrhenius S. 1896 *On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground.* *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science.* **41**(251):237–76. (doi: 10.1080/14786449608620846)
2. Carbon Brief. 2018 Q&A: *How do climate models work?* 15 January 2018. 参见 <https://www.carbonbrief.org/qa-how-do-climate-models-work> (访问日期 2021 年 2 月 25 日)。
3. Fiedler S. et al. 2020 Simulated tropical precipitation assessed across three major phases of the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP). *Monthly Weather Review.* **148**(9):3653–80. (doi: 10.1175/MWR-D-19-0404.1)
4. Bonan GB, Doney SC. 2018 Climate, ecosystems, and planetary futures: The challenge to predict life in Earth system models. *Science.* **359**(6375):eaam8328. (doi: 10.1126/science.aam8328).
5. UNFCCC, United Nations Framework Convention on Climate Change. 1992 (FCCC/INFORMAL/84 GE.05-62220 (E) 200705), New York. 参见 <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf>
6. UNFCCC, United Nations Framework Convention on Climate Change. 2015 Adoption of the Paris Agreement, 21st Conference of the Parties (FCCC/CP/2015/L.9/Rev.1), Paris. 参见 <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/109r01.pdf> (访问日期 2021 年 2 月 25 日)。
7. IPCC. 2014 *Climate Change 2014: synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Pachauri, Meyer LA (eds). Geneva, Switzerland: IPCC. 参见 <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/> (访问日期 2021 年 3 月 29 日)。
8. IPCC. 2019 *IPCC special report on the ocean and cryosphere in a changing climate.* Pörtner H.-O et al. (eds). In press. 参见 <https://www.ipcc.ch/srocc/> (访问日期 2021 年 3 月 29 日)。
9. IPCC. 2012 *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. A special report of working groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Field, CB et al. (eds). Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press. 参见 <https://archive.ipcc.ch/report/srex/> (访问日期 2021 年 3 月 29 日)。
10. IPCC. 2019 *Climate change and land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems.* Shukla PR et al. (eds). In press. 参见 <https://www.ipcc.ch/srcccl/> (访问日期 2021 年 3 月 29 日)。
11. Lenton TM et al. 2019 *Climate tipping points — too risky to bet against.* *Nature.* **575**(7784):592–5. (doi: 10.1038/d41586-019-03595-0).
12. United Nations Secretary-General. 2020 Secretary's General address at Columbia University: "The State of the Planet". 参见 <https://www.un.org/sg/en/content/sg/speeches/2020-12-02/address-columbia-university-the-state-of-the-planet> (访问日期 2021 年 2 月 25 日)。
13. Carbon Brief. 2021 *Attributing extreme weather to climate change.* 参见 <https://www.carbonbrief.org/mapped-how-climate-change-affects-extreme-weather-around-the-world> (访问日期 2021 年 2 月 25 日)。
14. Marotzke J et al. 2017 *Climate research must sharpen its view.* *Nature Climate Change.* **7**(2):89–91. (doi: 10.1038/nclimate3206).
15. Bauer P, Thorpe A, Brunet G. 2015 *The quiet revolution of numerical weather prediction.* *Nature.* **525**(7567):47–55. (doi: 10.1038/nature14956).
16. Stevens, B. et al. 2019 DYAMOND: the DYNAMICS of the atmospheric general circulation modeled on non-hydrostatic domains. *Progress in Earth and Planetary Science,* **6**(1). (doi: 10.1186/s40645-019-0304-z).
17. Satoh, M. et al. 2019 Global cloud-resolving models. *Current Climate Change Reports.* **5**(3), 172–184. (doi: 10.1007/s40641-019-00131-0)
18. *Op. cit.* note 16.
19. Palmer, T, and Stevens, B. 2019 *The scientific challenge of understanding and estimating climate change.* *Proceedings of the National Academy of Sciences,* **116**(49), 24390–24395. (doi: 10.1073/pnas.1906691116)
20. Neumann, P. et al. 2019 *Assessing the scales in numerical weather and climate predictions: will exascale be the rescue?* *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences.* **377**(2142), 20180148. (doi: 10.1098/rsta.2018.0148).
21. *Op. cit.* note 19.
22. Palmer, T. 2011. *A CERN for climate change.* *Physics World* **24**(03), 14. (doi: 10.1088/2058-7058/2024/3/24).
23. United Nations Office for Disaster Risk Reduction. 2020 *Human Cost of Disasters. An overview of the last 20 years (2000 – 2019).* 参见 <https://www.undrr.org/news/drrday-un-report-charts-huge-rise-climate-disasters> (访问日期 2021 年 2 月 25 日)。
24. European Union (EU) Copernicus Climate Change Service. 参见 <https://climate.copernicus.eu> (访问日期 2021 年 2 月 25 日)。
25. Destination Earth (DestinE): 参见 <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/destination-earth-destine> (访问日期 2021 年 2 月 25 日)。