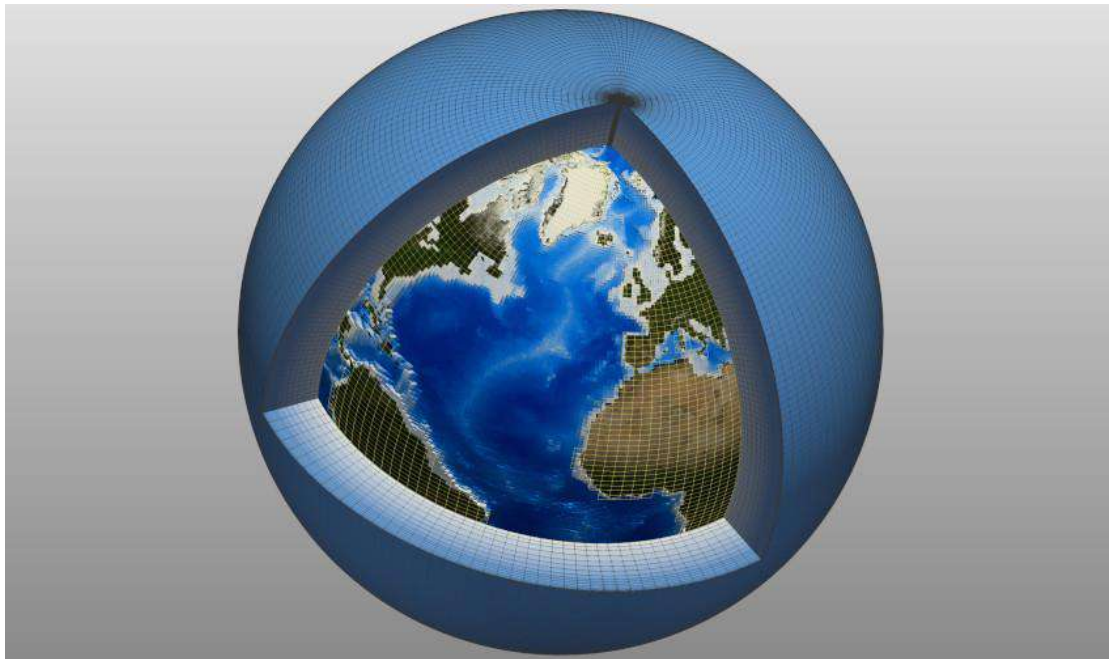


## 气候模式

作者：

**沃尔杜瓦尔·奥罗拉** (VOLDOIRE Aurore)，法国国家气象研究中心 (CNRM)，法国气象组织/法国国家科学研究院 (CNRS)，图卢兹大学。

**圣马丁·大卫** (SAINT-MARTIN David)，法国国家气象研究中心 (CNRM)，法国气象组织/法国国家科学研究院 (CNRS)，图卢兹大学。



什么是气候模式？它们是基于什么而建立的？如何对它们进行评估？它们是否可靠？如何探索未来的气候？本文试图通过强调这些模式的局限性以及它们所提出的科学问题来回答这些问题。气候模式是理解气候并预测未来气候变化的有价值的工具。最重要的是，气候模式构成了一个能够让科学家探索组成气候系统复杂过程的数字实验室。利用模式进行预测时采用相同的初始条件和边界条件，可以对不同模式产生的模拟结果进行严格的比较。这样，我们可以量化气候预测中模式的不确定性。

### 1. 气候模式由几个部分组成

气候模式是气候系统的数字表现形式（参见：[“气候机器”](#)）。这里所描述的气候模式是用于对下个世纪进行气候预测的模型，旨在表达几个世纪以来正在发生的气候变化的过程。这些模式代表了这些时间尺度上发生变化的所有气候系

统：大气圈、海洋、冰冻圈和生物圈（图 1）[1]。在模式中，不同的部分通常是单独开发的，可以单独或结合在一起使用。

## 1.1 海洋与大气

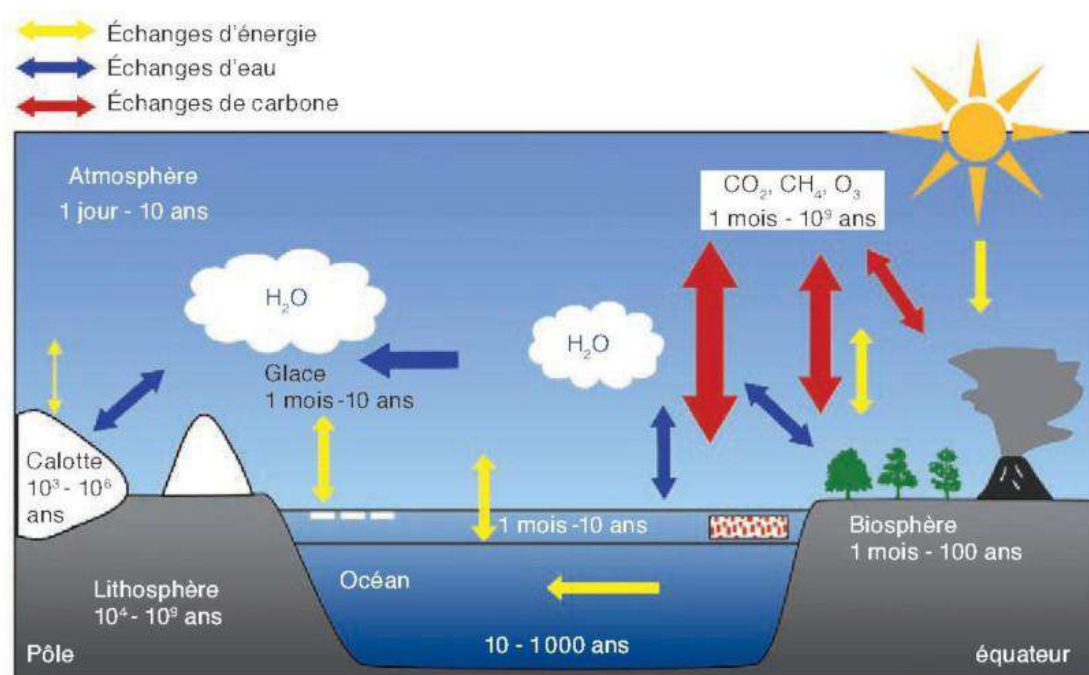


图 1. 气候系统图，显示了气候系统不同的组成部分：大气圈、海洋、冰冻圈、生物圈和岩石圈。图中还包含了它们的时间常数以及它们在能量、水和碳交换方面的相互作用。[图片来源：Joussaume, 1993. ref. <sup>[1]</sup>, © CNRS éditions, 2011]

海洋和大气运动方程是基于流体力学和热力学方程式以及质量[2]和能量守恒的原理建立的。为了将这些方程式转化为数值形式，将球体切成小的立方体，这些**网格**（图 2）[3]的积分是在连续的时间步长中完成的。表示流体力学微分方程的数值方法可能因模式而异，重点取决于模式计算的准确性或效率。这些方程式用于确定在每个时间步长中每个网格上的气候参数（温度、湿度等）的平均值。**海洋模式**是根据相同的原理构建的，并考虑到了水与空气不同的特性，特别是水比空气粘稠。

在气候模拟中，网格的大小约为一百公里，时间步长为几十分钟。因此，网格内过程（例如云或降水的形成）不能用流体力学方程直接表示。但是，这些过程又必须被考虑，为了描述它们，使用了**参数化**的方法，以一种经验/半经验方程的形式描述这些过程在格点尺度上的影响[4]。

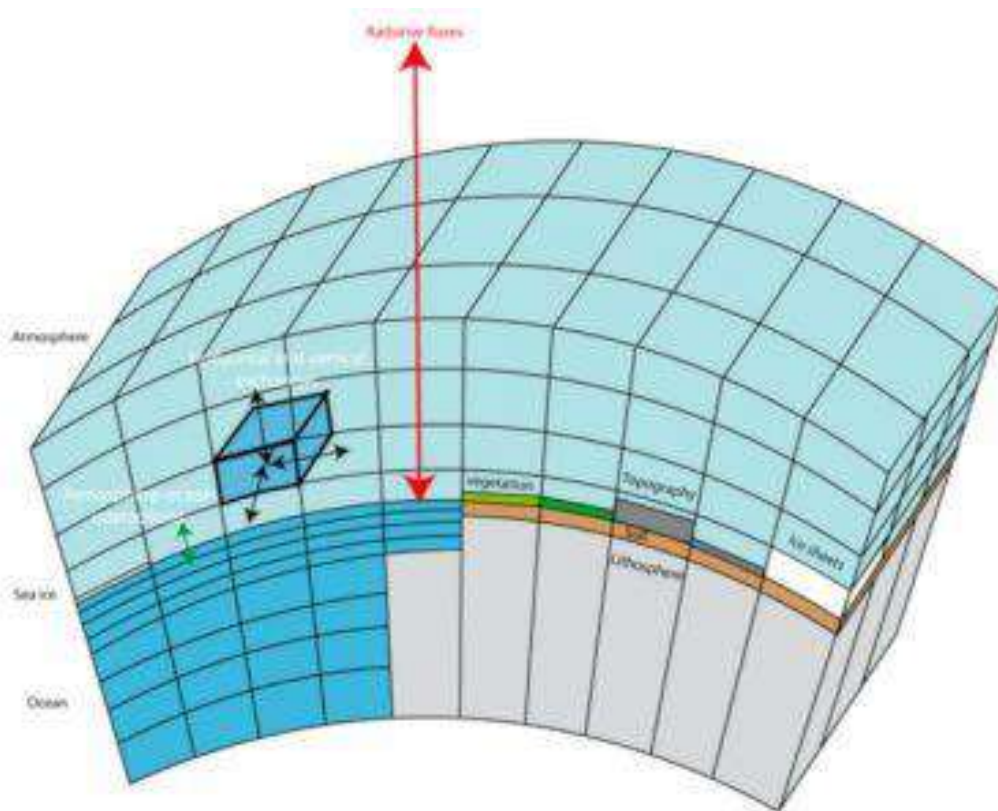


图 2.气候系统模式的网格图

[来源：© H.Goose et al., réf. [3], licence CC-BY-NC]

大气模式包括辐射的参数化过程，湍流、对流、云和降水形成过程，云与辐射的相互作用等。海洋模式还包含辐射穿透到水中的参数化过程，与小尺度涡旋有关的混合，潮汐引起的混合和湍流过程。参数化还用于表示海洋与大气之间水、能量和动量的传递。参数化是根据观察经验得出的方程式。这些方程在给定的模式中是通用的，从某种意义上说，它们在地球上的任何地方都是相同的。

因此，用于气候模拟的大气模式与天气预报模式的构造方式相同。二者差异在于模式的积分时间长短以及结果的解释方式（请参阅第 3 部分）。总的来说，全球天气预报模式将地球的大气层划分为宽度几公里，垂直几百米的网格。为了减少计算成本，气候模式使用较大的网格（请参见图 2）[3]，尤其是在水平尺度上，这使得它们模拟数十年甚至几个世纪的大气特征。即使网格较大，气候模式也能代表许多连续的天气现象，例如降雨、干旱、气旋等。

## 1.2 陆地表面

陆面模式旨在代表土壤，生物圈和大气层之间水和能量的交换。它们基于能量和水分守恒原则。例如，森林区域相较于覆盖满草地的草场会吸收更多的

太阳能，因为森林区域的颜色更暗（**反照率**较低）。另一方面，如果表层土壤干燥，在深根系的作用下，树木将能够利用深层土壤中的水，并通过**蒸散作用**将水输送到大气，而草无法做到。这些模式还能描述陆地上的季节性降雪以及土壤中的霜冻。与大气模式一样，许多过程的规模小于网格大小，因此需要进行参数化处理。

### 1.3 海冰和冰盖

海冰模式代表了海冰与海水之间以及浮冰与大气之间的水、盐和能量的交换。在这些模式中，浮冰的移动是近地表风和洋流的函数。这些运动导致一些地区**海冰堆积**，而另一些地区则发生了**海冰破碎**[5]。

气候模式中包含的冰盖模式一般都是非常简化的，主要是为了表示冰层对陆地的影响，但其范围没有变化。已经存在更复杂的冰盖模式，特别是针对**北极和南极冰盖**，但是与目前的全球气候模式相比，它们需要用更精细的网格来表示大气参数。它们与**气候模式的耦合**是当前气候建模的挑战之一，对于长期的气候模拟（几个世纪）而言变得至关重要。

### 1.4 耦合器

在气候模式中不同的组成部分是相互耦合的：它们**同时演变**，彼此相互作用。通常，陆面模式和大气模式在其每个时间步长（几分钟）上都会相互作用。海洋模式和大气模式之间的交换每天至少发生一次甚至每小时一次，这主要具体取决于模式的设计。

## 2.模式适用性的复杂程度



## 2.1 模式的复杂程度

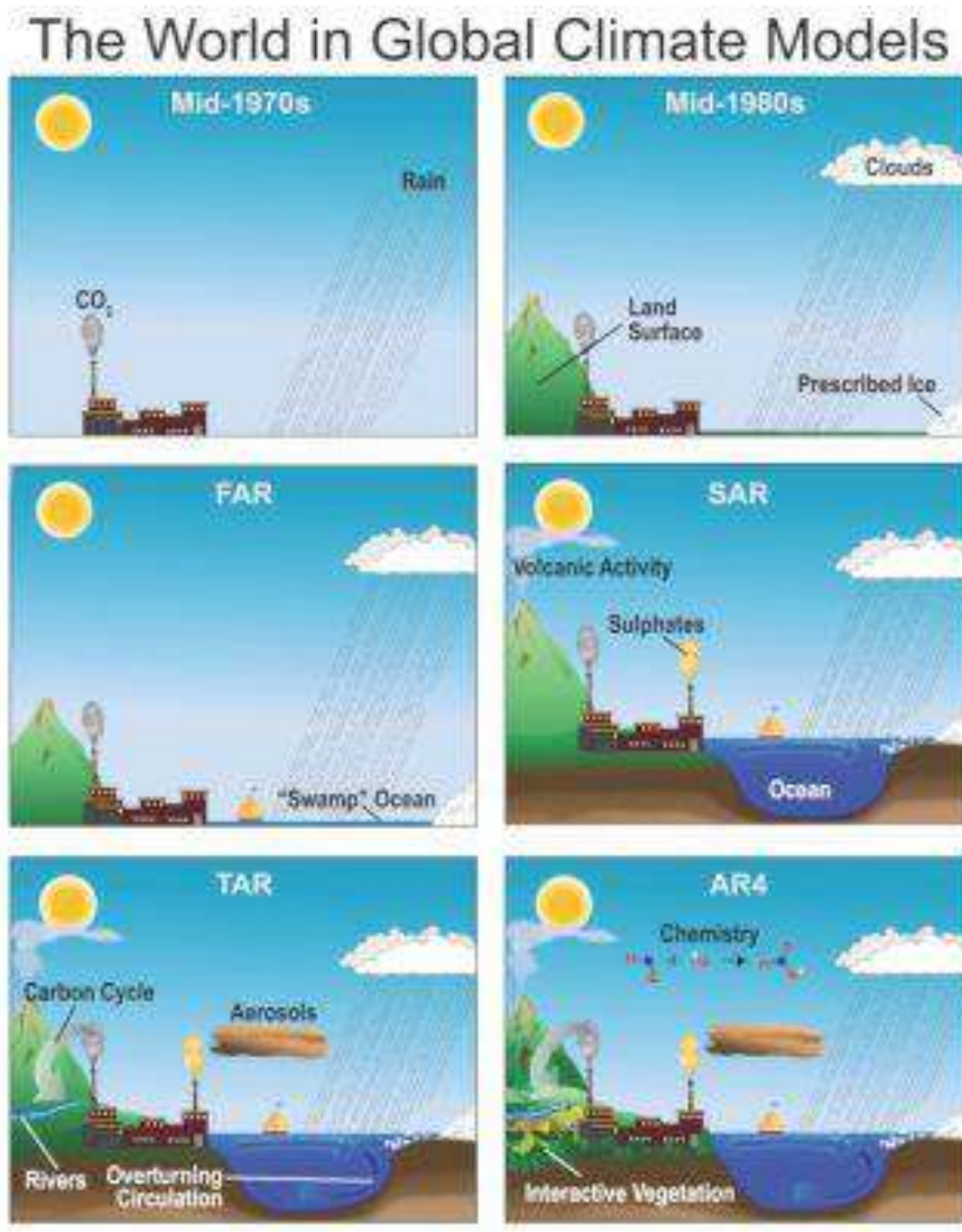


图 3：模式复杂程度与所表示的分量的关系

[来源：©IPCC, AR3 /开源]

为了尽可能做出真实的气候预测，气候模式必须描述气候系统的四个组成部分：大气、海洋、生物圈和冰冻圈。因此，将模式的复杂性定义为模式所考虑到的气候过程的数量。20 世纪 70 年代开发的第一个气候模式仅代表大气分量。随着模式的迅速发展，并在 20 世纪 90 年代后期设法包含了所有四个组成部分。从那时起，通过细化现有的参数并加入新的气候过程，模式得到了不断的改进。

例如，目前大多数模式都反映了**悬浮在大气中的微粒**，即气溶胶(aerosols, 参见：“空气污”)的**生命周期**。因此，这些模式可以描述它们在风中的传输，它们与云形成过程的相互作用以及降雨的湿沉降作用。

表示完整**碳循环**的模式最为复杂，这类模式使估算不同组分之间的碳交换量成为可能。这些交换本身取决于气候、海水的性质以及植被和海洋生物将碳转化为有机物的能力。

还有非常简化的基于**地面辐射平衡**的一维模型，该模型仅模拟**全球平均温度**但不能显示区域差异。但是，为了表示这些简单模型中二氧化碳浓度增加带来的影响，他们也需要来自上述完整模式的信息。在这些高度简化的能量平衡模型和完整模式之间，存在针对特定应用而开发的一系列复杂性不断提高的模式(图3)。

## 2.2 模式的适用性

就计算时间而言，最复杂的模式计算成本也更高。但是，正在进行的研究表明模式中**考虑所有的气候过程是没有必要的**。特别是碳循环过程的完整表示仍依赖于一些尚不确定的参数，并且这些过程的反馈作用可能很重要。例如，为了研究大气中二氧化碳浓度的人为增加对气候过程(如厄尔尼诺现象)的影响，最好使用不涉碳循环的模式，这样其结果将更易于解释。因此，有时有必要**将问题分离**。

因此，最复杂的模式并不**一定适合所有用途**。随着复杂程度的提高，模式系统也引入了更多的自由度。这使它的**校准和验证变得复杂**，有时会以牺牲模式的稳定性为代价。结果的解释也更加微妙。而且，模式越复杂，所需的**计算机越强大**，计算时间就越长。然而，为了对气候机理进行研究，往往需要进行几次测试，才能得出可靠的结论。因此，**合理的计算成本**是非常重要的，以便能够执行多次测试。

## 2.3 模式的费用计算

气候模式的运行成本随着其复杂性及其分辨率(即**网格的大小**)的增加而**增加**。计算成本还取决于用于表示模式方程的数值方法。因此，如果仅使用一个处理器，当前气候模式模拟一年的气候变化的计算成本从**几十个到上千个模式日**不等。这就是为什么要在世界上功能最强大的**超级计算机**上实现这些模式并行运算

的原因。通过同时使用大量处理器，一年的模拟可以在几个小时内完成。例如，要模拟 100 年的气候需要花费几周的时间。模拟过程中**数据的生成量**也非常大，每个模拟年大约产生数据百千兆字节（GB），而对于 100 年的模拟则大约需要几十 TB。

气候模式是用于检验假设的数字实验室，这在带有试管的生物学中可以想象得到。在生物学中，通常对多个个体重复相同的治疗，以通过一组实验验证其有效性。同样，在气候方面通常以**集合**形式进行模拟。由于气候系统是混乱的，有时很难将外部强加（例如温室气体增加）所引起的气候变化与气候系统的**内部变化**区分开来（阅读：[“气候变化：北大西洋涛动的案例”](#)）。然后执行受相同外部外强迫但起始状态稍有不同的模拟集，以确定所施加的外部外强迫的影响。模式的数值成本越低，可以执行的集合规模越大，对模式结果的解释就越有信心。

## 2.4 区域化

计算成本也决定了气候模式的网格大小。尽管某些模式的精度设法达到几十  $\text{km}^2$ ，但目前这些网格的平均大小仍为 **100 km x 100 km**。这种空间分辨率已经可以表示许多现象，例如中纬度或热带季风的持续干扰。另一方面，这些全球模式不能描述**更多局部现象**，例如气旋和与地形直接相关的区域环流。因此，在分辨率为 100 km 的气候模式中地形太过平坦，以致于小尺度的山谷无法被清晰地表现出来，使得山谷风在模式中无法表现出来。

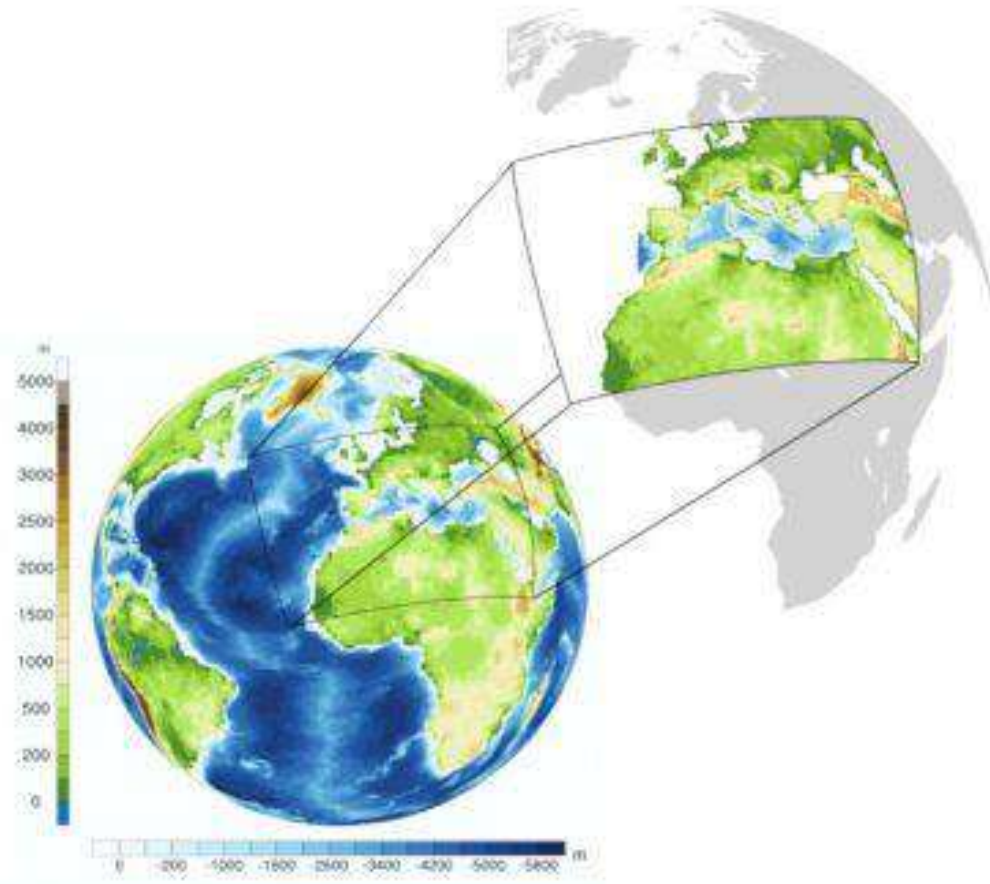


图 4：100 km 分辨率的全球气候模式和 12 km 分辨率的欧洲区域模式的地形图和海洋测深图

[来源：© CNRM / Realisation Pierre Nabat and Aurore Voldoire]

为了对更高分辨率的现象进行研究，可以像天气预报一样使用**区域气候模式**。细网格区域模式需要全球气候模式在其区域的边界上提供数据（图 4）。区域模式建立在**与全球模式相同的原则上**（相似的算法，相同的过程），它们本身的复杂性可以自行把握。一些模式仅包含大气分量，但也有一些模式耦合了区域海洋-大气模式。因此，此类模式使得研究较小规模的现象成为可能，但是结果既取决于使用的区域模式也取决于在域边界使用的全球模式。因此考虑到这种双重不确定性是非常重要的，例如可以通过执行由多个全球模式强迫的一组区域模拟来降低这种不确定性。

### 3.如何验证气候模式？

#### 3.1 分量验证



模式的每个分量都是通过将观测数据作为输入变量而独立开发出来的。在这个受约束的框架内，可以证明该模式产生了真实的结果。因此，将气象观测作为输入变量单独使用陆面模式进行模拟，并验证是否与温度、土壤湿度和植被的观测结果一致。

因此，每个分量都与其他分量分开进行调整和评估。每个分量还可用于特定环境的研究。在此步骤中，可以将一些模式参数视为不受观测值的约束，并将评估这些参数的可接受值范围。一旦完整的模式组装完成，这些参数最终可以在此范围内调整。在受观测约束的步骤中，模拟结果可以直接与观测结果进行时间演化的比较。

### 3.2 数据输入

使用气候模式进行模拟时有两种类型的输入数据：**初始状态**和**外强迫**。在天气预报中初始状态是关键的数据；在气候建模中，外强迫是最重要的输入。主要的外强迫因子有：**温室气体浓度**（水汽除外，由大气成分模拟）、**气溶胶浓度**，以及**植被分布**、**火山爆发**和在大气顶部接收的**太阳能**。由于气候系统是混沌的，因此初始状态下的信息会很快丢失，所以初始条件对几十年来的气候模拟影响不大。

但是，气候系统的记忆时间比天气预报模式的记忆时间长，因为海洋的演化速度不及大气快，并且这种延迟延长了系统的记忆时间。正是这个属性用来进行**季节尺度的预测**。季节预报模式是基于观测结果对大气和海洋分量进行初始化后的气候模式。他们利用海洋具有显著**延迟**这一事实来预测未来几个月的趋势。这些系统的可靠性远不及天气预报模式，但可以提供一些现象演变的相关信息，例如**厄尔尼诺现象**，以及有关热带变化的信息。*回报试验*在过去的许多年中可以用来测试季节预测模式，这是模式验证的一种方式。但是，这种类型的验证**仅限于几个月的时间**，与气候预测的时间尺度相比仍然很短。

使用气候模式预测更长的时间范围是当前的研究主题[6]。一些研究认为长达**一两年**的可预测性是可以达到的[7]。数年后，初始条件的重要性不再高，施加的外强迫成为主导因子。

### 3.3 对整个系统的验证

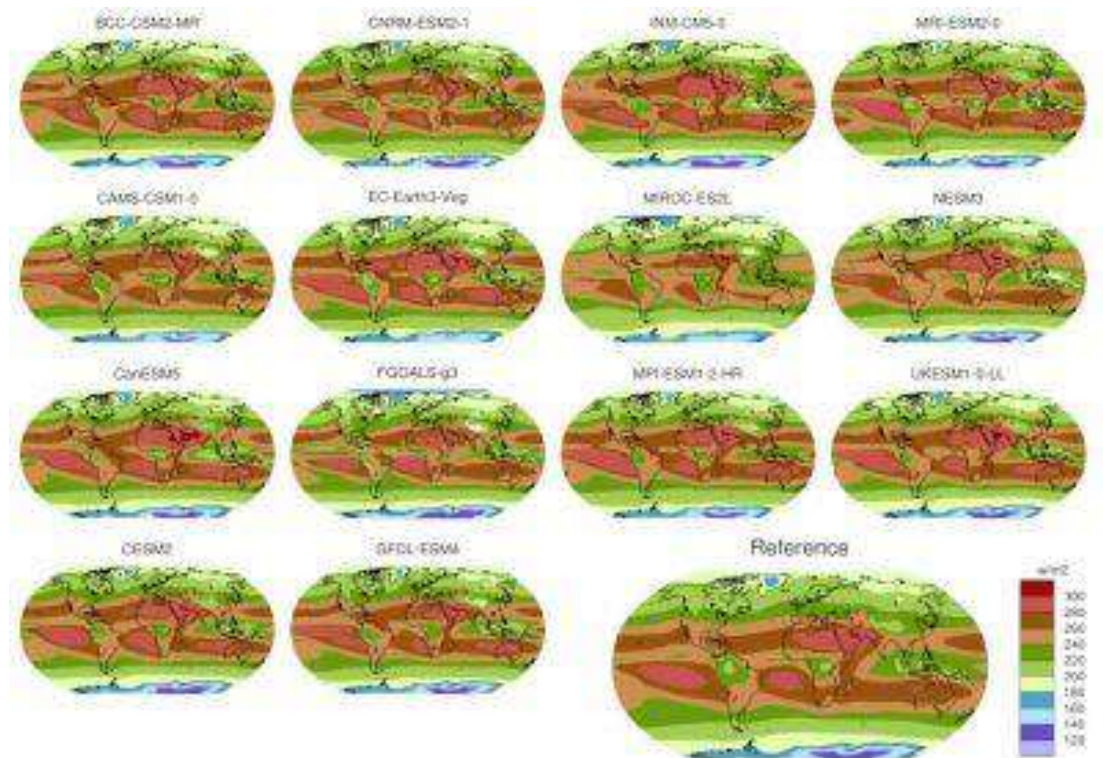


图 5: CMIP6 数据库中一组模式模拟的 30 年 (1985-2014) 平均大气顶部长波辐射的“历史”值。右下角的地图表示从卫星测量获得的同期参考估计值 (CDR 月度产品“外向长波辐射”)

[来源: ©CNRM / Aurore Voldoire production]

气候系统的混沌性质对如何验证一个完整的气候模式具有重要影响。即使是在观察到的外强迫作用下, 因为这种混沌的性质 (以及模式不完善), 持续数十年的模拟也不会遵循观察的时间顺序。即使该模式是完美的, 也将无法跟踪天气事件的发生顺序。因此, 不可能将一个国家的温度变化与观测结果相比较。另一方面, 该模式将能够表示气候的平均特征 (图 5) [8]: 30 年平均温度和降水的季节循环可以与观测的 (平均) 气候学数据相比较。同样, 可以将长期趋势与观测结果进行比较。例如, 该模式显示了 20 世纪中纬度地区春季积雪覆盖的减少<sup>[9]</sup>。

验证不仅涉及长期气候特征。它还将评估模式所能表示降水日变化的能力, 即它表示全球给定位置在给定季节中干燥天数和潮湿天数的能力。还可以评估模式表示极端事件 (例如风暴) 的能力 (参见: “[极端天气事件和气候变化](#)”)。

该验证步骤决定了这些模式的局限性。例如, 它们通常能够表示全球不同类型的云的分布, 但在大多数情况下, 目前它们还不能充分表示热带海洋东部边缘的薄层积云的形成, 如智利、加利福尼亚或安哥拉[10]。当分析这些对未来气候

的模拟结果时，必须考虑这些缺点，作为这些地区模式可靠性的限制。验证步骤还指明了建模者需要通过哪些过程来改进模式，以使它们更可靠。

因此，气候模式会产生从日周期到世纪尺度的**所有时间尺度**的信息(图 1)。因此，模式的评估取决于它们在所有这些时间和空间尺度上表示许多过程的能力。正是基于整体的**物理一致性**，我们对这些模式充满了信心。所以在建模工作的下游，气候研究人员的工作还包括使用适当的统计方法处理大量数据。

#### 4.气候预测，有哪些假设？

为了做出气候预测，建模者必须指定未来一个世纪的外部**外强迫**作为气候模式的输入数据。

对于**太阳辐射和火山**，很难预测它们未来的活动水平。因此做出简单的假设，对于太阳辐射以最后观察到的 **11** 年作为周期，在下一个世纪周期性地出现[11]。对于火山，未来仅考虑其平均作用，而不会发生变化（但针对此问题进行了更具体的研究）。

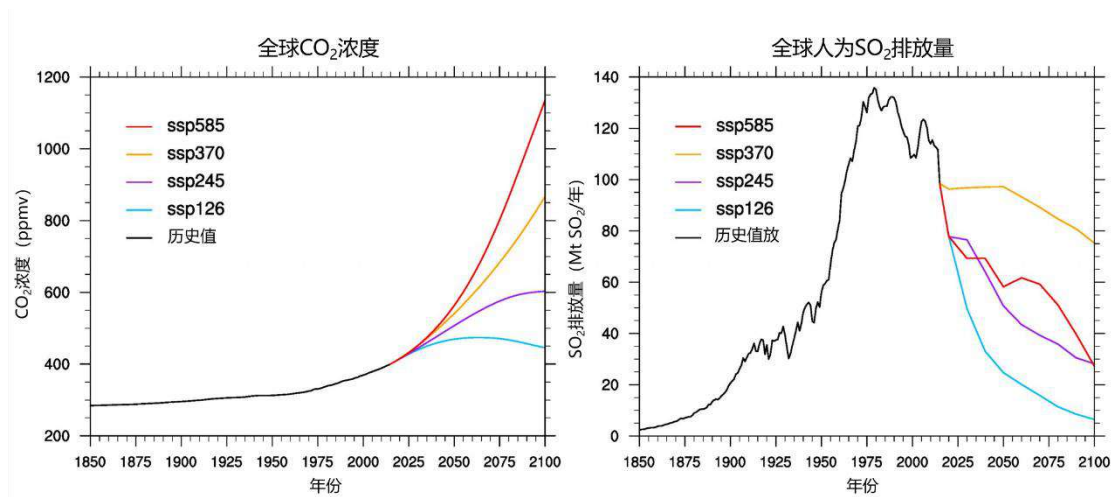


图 6 (a)所监测到的 CO<sub>2</sub> 浓度变化并预测出 21 世纪 CO<sub>2</sub> 浓度变化的 4 种情景；(b)根据所监测到的硫酸盐气溶胶排放预测出 21 世纪硫酸盐气溶胶的 4 种演变情景。

[来源：© CNRM / Realisation Pierre Nabat]

对于其他外强迫，**温室气体，气溶胶和土地利用**的变化，其演变高度依赖于人类活动的变化。这些外强迫称为**人为外强迫**。经济学家基于人口和经济对这些外强迫的影响假设提供了不同的情景(图 6)。经济学家为此使用了特定的模式，即“综合评估模型” [12] 。

根据人口是否意识到风险并适应其做法，同时根据人口变化和区域是否正在自我转变，大家**设想了几种演变类型**。因此，经济学家提出了几种温室气体浓度变化的情景。然而实际将要遵循的情景仍然不确定，在查看气候预测结果时，必须考虑**几种外强迫情景**。

在这些经济情景下，气候模式在 21 世纪通过各种不同的外强迫被积分。初始条件是从 20 世纪的模拟中得到的，并且在本质上包含了过去的外强迫的影响。

根据模式的复杂程度，可以调整外强迫类型。例如，对于不包含碳循环的模式，将在模式中指定 CO<sub>2</sub> 浓度。反之，如果模式包含碳循环部分，则该模式将应用人为碳排放作为外强迫，而自然排放则在模式中动态表示。同样，对于不包含气溶胶生命周期的模式，气候模式将规定这些颗粒的浓度，这些颗粒浓度本身是来源于选择的经济情景使用特定的模式计算得出的。

## 5. IPCC 和模式比对工作

### 5.1 IPCC

政府间气候变化专门委员会（**IPCC**）定期发布报告，旨在总结有关气候的科学知识状况、气候演变、影响以及适应预测变化的方法。为了协调在世界各地实施气候模式的各个团队的工作，在 **IPCC** 报告的上游进行了模式比较计划（*Coupled model intercomparison project -CMIP*）。这些项目的目的是向建模中心提出**通用的实验规程**，这将使研究气候变化和表征与建模相关的不确定性成为可能。

**CMIP** 项目还为建模中心提供了存储空间和工具，以共享模式产生的数据。这些**数据库是公开的**[13]，可供世界各地的研究人员用来进行气候变化研究。在 2021 年应提交的下一份 **IPCC** 报告中，有 29 个团队发布了 54 种不同模式的数据（截至 2020 年 3 月 4 日）。许多中心通过利用模式的复杂性和/或其空间分辨率来实现几个模式的耦合。

## 5.2 未来的外强迫情景

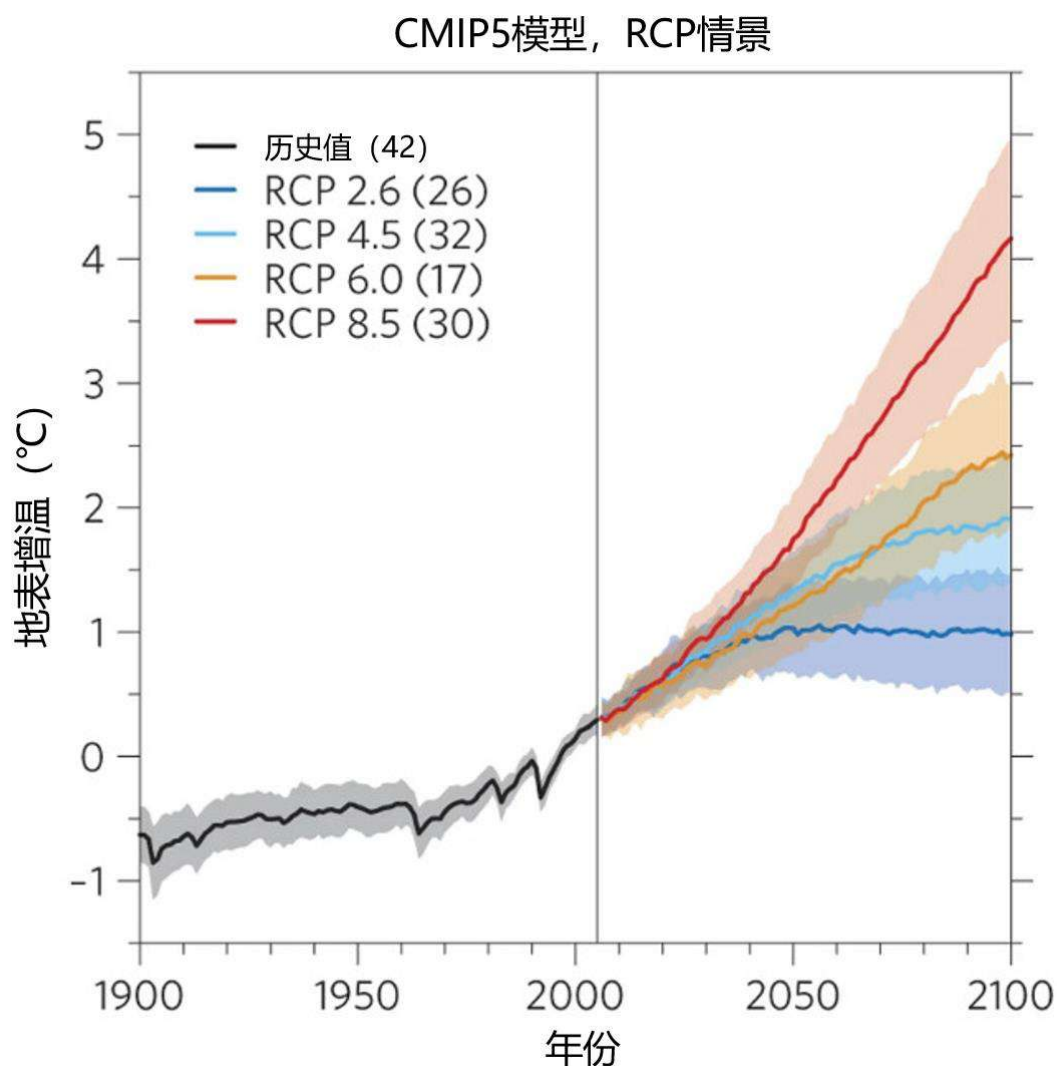


图 7. 基于 4 种温室气体浓度变化轨迹（GCT）模拟得到的全球平均温度变化情景（以 °C 为单位）。零基准是 20 世纪末（1986-2005 年）的平均值。每条曲线的不确定性包括气候模式的选择和气象灾害。括号中数字给出了每种情况和时段进行的模拟次数。  
[来源：图片源于 Knutti & Sedláček 的文献<sup>[14]</sup>，经 Springer Nature 许可转载]

对于第六次模式对比项目（CMIP6），采用了温室气体和主要气溶胶变化的 4 种情景来强迫模式运行（图 7）：

- **ssp126** 是一种浓度非常低的方案，要求从本世纪中叶开始减少排放并从 2080 年开始负排放；
- **ssp585** 是一种以当前速率增加的排放方案，该方案预测 2100 年的 CO<sub>2</sub> 浓度为 1135 ppm；



- **ssp245** 和 **ssp370** 是处在这两个极端之间的方案，意味着社会可以部分适应的未来，而后者特点在于气溶胶的浓度较高，即预测的气溶胶排放减少量较低。

先前的耦合模式比较计划（CMIP5，图 7）[14]通过比较给定情景情景下所有模式的预测，以评估**模式不确定性**（不同于情景的不确定性）。根据多模式预测结果，相较于 20 世纪末全球温度将发生约 1.6°C 到 4°C 的变化。众所周知，这种完全的不确定性源于对未来人口和经济（情景）的不确定性以及对人为排放所导致的气候演变的不确定性。

为了更好地将模式进行比较，气候建模人员定义了一个更理论化的指标，称为**气候敏感度**，该指标对应于 CO<sub>2</sub> 浓度比工业化以前增加一倍后地表温度上升的程度。这是平衡时的温度变化，这意味着该模式必须经过足够长的时间才能使全球表面温度稳定下来。这一理论上的数值使我们能够比较 CO<sub>2</sub> 浓度增加后气候系统中出现的**反馈的强度**。确实，CO<sub>2</sub> 的第一个影响是局部加热空气，但是这种加热会有多种后果，称为**反馈**。例如，如果空气变暖，则 **Clausius - Clapeyron 关系**表明它将能够容纳更多的水蒸气。这可能会影响云的形成，云的位置等。这些不同反馈的相对重要性是不确定的，研究几个模式可以更好地理解它们。

对于最近的一次对比项目（CMIP6），模式之间的不确定性已经相当大[15]；特别是十几个模式模拟的平衡敏感度超过了先前 IPCC 所报告的建立在 1.5°C-4.5°C 范围，这一范围在 1979 年 Charney 的报告中已经考虑过[16]。这些初始结果基于对较少的模式数量的分析，当更多模式的数据可用时则需要进一步进行验证。对于某些模式来说，这种敏感度增加的原因是一个深入研究的课题。一些研究还试图利用最近的观测来约束敏感性的估计。**确定这些巨大的价值是否合理确实至关重要。**

因此，气候模式是用来更好地了解气候系统内的过程并促进知识的实验工具。但是，不应忘记这些模式是**不完善的**。有必要将它们与观察结果进行比较，以了解其局限性并不断加以**改进**。

## 6.要记住的信息

- 气候模式是气候系统的数字表示。

- 气候模式具有不同程度的复杂性，复杂度是根据研究的科学目的进行选择的。
- 气候模式允许对未来的气候做出预测，但是这些预测都是基于经济和人口变化的情况。
- 预测的不确定性不仅来自气候模式的不确定性，还来自经济和人口发展的不确定性。
- 气候模式是促进我们对气候系统了解的宝贵的实验工具。

---

## 参考资料及说明

**封面图片：**用数值模型表示大气图示：地球被切成小立方体 [图片来源：© CEA 2020 / Realisation: P. Brockmann (LSCE)]

- [1] Joussaume S. (2011) Le climat : un thème de recherche pluridisciplinaire ; dans “Le climat à découvert“, Jeandel C. & Mosseri R. (Eds.), CNRS Editions.
- [2] Mass of dry air for the atmosphere, salt for the ocean and water for all components.
- [3] Goosse H., P.Y. Barriat, W. Lefebvre, M.F. Loutre & V. Zunz, (06/06/2020). Introduction to climate dynamics and climate modeling. Online textbook available at <http://www.climate.be/textbook>.
- [4] Solved scale: scale of time and space represented by the fluid dynamics equations which is inherently larger than the mesh of the models.
- [5] Divergence: indicates that dynamic tends to export ice to other regions. For example, along a coast if sea ice is transported offshore by local winds, the ice will tend to disappear or become thinner at the coast.
- [6] Boer, G. J., Smith, D. M., Cassou, C., Doblas-Reyes, F., Danabasoglu, G., Kirtman, B., Kushnir, Y., Kimoto, M., Meehl, G. A., Msadek, R., Mueller, W. A., Taylor, K. E., Zwiers, F., Rixen, M., Ruprich-Robert, Y., and Eade, R. (2016). The Decadal Climate Prediction Project (DCPP) contribution to CMIP6, *Geosci. Model Dev*, 9, 3751-3777, doi: 10.5194/gmd-9-3751-2016.
- [7] Predictability: Predictability measures the ability to predict with respect to the target time frames under the assumption that the initial state is well known.
- [8] Hai-Tien Lee and NOAA CDR Program (2018): NOAA Climate Data Record (CDR) of Monthly Outgoing Longwave Radiation (OLR), Version 2.7. NOAA National Centers for Environmental Information. <https://doi.org/10.7289/V5W37TKD> [2020-05-29]

- [9] Brown, R. D. and Robinson, D. A. (2011) Northern Hemisphere spring snow cover variability and change over 1922-2010 including an assessment of uncertainty, *The Cryosphere*, 5, 219-229, doi: 10.5194/tc-5-219-2011.
- [10] Zuidema, P., et al (2016) *Challenges and Prospects for Reducing Coupled Climate Model SST Biases in the eastern tropical Atlantic and Pacific Oceans: The US CLIVAR Eastern Tropical Oceans Synthesis Working Group*, *B. Am. Meteorol. Soc.*, doi: 10.1175/BAMS-D-15-00274.1.
- [11] Cyclicity simulated from reconstructions over 9400 years for CMIP6 (Matthes et al., 2017), available at <https://solarisheppa.geomar.de/cmip6>
- [12] O'Neill, B. C., Tebaldi, C., van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J.-F., Lowe, J., Meehl, G. A., Moss, R., Riahi, K., and Sanderson, B. M. (2016) The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6, *Geosci. Model Dev*, 9, 3461-3482, doi: 10.5194/gmd-9-3461-2016.
- [13] Earth System Grid Federation
- [14] Knutti, R., & J. Sedláček (2012) Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections. *Nat. Climate Change* 3, 369-373, doi:10.1038/nclimate1716
- [15] Zelinka, M. D., Myers, T. A., McCoy, D. T., Po-Chedley, S., Caldwell, P. M., Ceppi, P., et al. 2020. Causes of higher climate sensitivity in CMIP6 models. *Geophysical Research Letters*, 47, e2019GL085782. doi: 10.1029/2019GL085782.
- [16] National Research Council. 1979. *Carbon Dioxide and Climate: A Scientific Assessment*. Washington, DC: The National Academies Press. doi: 10.17226/12181.
- 

译者：郑翔宇

审校：效存德（教授）

责任编辑：杨茹月