# 气候科学速成课

联合国气候变化框架公约青年科学工作组





### 亲爱的伙伴们,

请允许我自我介绍一下。我叫Tanvi,是YOUNGO新成立的科学工作组的联络人之一。我在泰国曼谷长大,我相信你们大多数人都知道,这个城市正面临着全球变暖带来的洪水威胁。因此,气候变化对我来说并不是什么新消息,而且一直是我想研究的问题。

我已经完成了生物科学的本科学习,尽管有点跨学科的优势,因为我的论文是关于生物地理学和氢能经济学的。目前,我正在写一篇关于环境治理哲学的论文。

我在青年气候领域工作了三年多,参加了各种会议,会见了许多优秀的同事,他们都为我们共同的美好明天愿景增添了重要的声音。然而,在这三年里,我也注意到缺乏具备有效和深入参与气候谈判技能的年轻人,特别是从科学方面,这让我感到难过,因为我们的声音需要得到更认真的对待,以建设我们想要的未来。

现在,我有一件事要坦白。

今年的三位科学CP都是科学家,因此我们关于全球环境挑战以及如何找到解决方案等主题的对话通常非常丰富和引人入胜。我们希望你们也有这种能力,能够在更精细的层面上理解气候变化背后的科学,这样你们在这个领域的贡献就更有分量了。

我们希望这个工作组与大家像家人一般分享这些对话。让我们谈谈碳捕获!土壤健康?《京都议定书》?没有什么是不可能的,让我们畅所欲言!

本文件旨在全面介绍气候变化谈判中使用的气候科学基础知识,特别是来自政府间气候变化专门委员会并由UNFCCC附属科学技术咨询机构使用的基础知识。我们希望它能有所帮助,请随时联系我们澄清任何事情,或补充意见。我们的邮箱是开放的;我们可能很快就会出版第二版。

Huey Yew Cheong

Tanvi Mishra

Joseph Nguthiru

联络点,科学工作组, 联合国气候变化框架公约青年选区

(P.S.: I hope you enjoy the paintings scattered across the document! They' re all from the MET's collection, open access to the public, and themed around nature.)

P.S.: 请欣赏本散落着文档页面间的的画作。他们来自MET允许公开使用的艺术集,主题是自然。

# 气候科学速成课

联合国气候变化框架公约青年科学工作组

### 亲爱的中文读者:

读者你好,我是肖昀桐(当当),我现在是一个十八岁的高中学生。从我一开始通过邮件请求原作者能否制作这本书的普通话译本到现在已经过了近半年了。希望无论什么年龄的你看了这本书能都对气候变化更感兴趣。我想通过翻译这本书来让更多人都能接触到有意思的气候知识,并且发现这些知识系统背后的美丽和复杂。

气候知识是一直在进步的,也是我们每个人面对未来 必须具备的。希望以后在中国气候变化教育能够接触 到每一个公民,特别是青少年和儿童。

欢迎扫码和我成为微信好友!

#### 第一版,于2024年3月创作

本文档供公众免费使用,不用于商业用途。

作者: Tanvi Mishra, Huey Yew Cheong, Joseph Nguthiru, Anwesa

Dutta, Phoebe Leung, Nick Koenig,

译者: 肖昀桐 (Yuntong Xiao)

如有意见或询问,请联系:

tanvimish002@gmail.com (作者)

18020051201@163.com(译者)



### 目录

- 气候变化的共识
- 国际机构和研究所
  - 。 政府间气候变化专门委员会(IPCC)和他们的成果
  - 。 IPCC的报告
  - 。 联合国气候变化框架公约附属科学技术咨询机构(SBSTA)
- 气候科学
  - 。 联合国气候变化框架公约(UNFCCC)的科学
  - 。 天气, 气候, 和大气层
    - 温室效应
    - "碳" 之间
      - 水循环与碳循环
  - 。 地质学, 古生物学, 与数据
    - 我们是怎么追踪气候数据的?
      - 气候变化有多少是自然的?
    - 我们怎么模拟未来温度?
      - 代表性浓度(RCP)路径
    - 什么是化学燃料?
      - 碳氢化合物公式
  - 。 不止全球变暖
    - ■三重星球危机
    - 大自然在气候变化中的作用
- 气候变化中的科学和技术
  - 。 碳捕捉与碳封存
  - 。 太阳辐射管理(SRM)
  - 。 基于自然的解决方案(NBS)
    - 土壤肥力与农业生态学
- 特别章

### 缩写

- IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change / 政府间气候变化专门 委员会: 负责评估气候变化状况及其影响的国际科学机构。
- SBSTA: Subsidiary Body for Scientific and Technological Advice / 附属 科学技术咨询机构: 联合国气候变化框架公约 (UNFCCC) 的一个分支机构,为 UNFCCC 及其缔约方提供科学和技术咨询。
- UNFCCC: United Nations Framework Convention on Climate Change / **联合国气候变化框架公约:** 是 1992 年几乎所有国家(截至今天为 198 个)通过的一项全球条约,旨在应对气候变化的挑战。
- AR: Assessment Report / 评估报告: IPCC 每隔几年发布一次的气候文献汇编,由其进行荟萃分析;上一版是 2023 年的 AR6。
- WG: Working Group / 工作组:指专注于某一特定主题的封闭小组。
- YOUNGO: UNFCCC Youth Constituency / UNFCCC 青年选区: 联合国气候变化机构中的青少年观察员推选流程。
- GHGs: Greenhouse Gases / 温室气体: 将热量滞留在大气中并导致全球气温升高的气体。
- ECS: Equilibrium Climate Sensitivity / 平衡态气候敏感度: 一个用来描述气候变暖程度的科学概念,指如果大气中的CO2浓度翻倍,地表均温会上升多少度。
- IAMs: Integrated Assessment Models / 综合评估模型:由许多不同模型组成的"元模型",这些模型综合在一起,以更接近真实现象的模拟。

### 气候变化的共识

### The Climate Change Consensus



我们有一个首当其冲需要解决的问题——

当我们说科学家们对气候变化达成了共识,这到底意味着什么?

说科学家们对气候变化有共识,并不是说他们在每一个小细节上都意见一致。科学总是在进步的,在前沿和细节上总会有一些边缘性的争论。然而,关于人类活动导致的气候变化这一核心事实,有着大量证据支持,并且得到了绝大多数积极发表研究成果的气候科学家的认可。

#### 那么,这个共识到底意味着什么呢?

许多研究表明,超过97%的积极发表气候研究的科学家都认同**人类活动**是自20世纪末以来全球变暖的主要原因。这包括像政府间气候变化专门委员会(IPCC)、全球各国的科学院、以及独立的研究机构等领先的科学机构。

这个共识是建立在几十年的研究基础之上的,涵盖了气候学、物理学、化学和地质学等多个科学分支。支持气候变化是由人类导致的证据来自于温度记录、冰芯数据、海平面上升测量、大气分析,甚至是大气中人类造成的温室气体的"指纹痕迹"。我们将在后面的气候数据部分中详细回顾这些方法



"自1950年以来, 大气变暖是自然气候变化的 结果的可能性不到1%。"

77

### 气候变化的共识

### The Climate Change Consensus

气候变化的科学共识并不是谁拍脑袋想出来的,也不是大家凭信念猜的。这是科学家们用严格的研究方法,经过反复验证得出的结论。这些证据铁证如山,否认这些证据违背了科学探索的基本原则。仔细检查数据并审查方法论,相比基于主观信念直接进行否认,是检查气候变化科学依据的更理性有效的方式。

这个共识也*不是一成不变的*。随着科学家们不断地研究,我们对气候变化的理解也越来越深入完善。不过,气候变化受人类活动的影响巨大这一核心事实仍然是不可动摇的。

关于气候变化的科学共识至关重要,因为它是做出明智决策的基础。理解气候变化的原因和潜在后果对于制定有效政策、适应影响和减轻未来风险至关重要。

接受这个共识并不意味着没有辩论的余地或进一步研究的必要。这意味着承认压倒性的证据,并用它来指导我们走向可持续未来的行动。 在后面的内容中,我们还会聊聊科学界对气候变化模型的一些争论。

#### 那么,那3%有异议的科学家是怎么回事?

说只有3%的人不同意,其实有点夸张。实际上,真正公开否认人类活动导致气候变化的科学家,比例大概只有0.5%。





### IPCC和他们的成果

#### Ta们是谁?

IPCC,全称政府间气候变化专门委员会,成立于1988年,由世界气象组织(WMO)和联合国环境规划署(UNEP)共同建立。IPCC是一个科学机构,不是政策制定机构。

他们汇集了来自世界各地的数千名顶尖科学家,这些科学家来自气候学、物理学、化学、经济学和社会科学等不同领域。

#### Ta们做什么?

他们的主要任务是评估与气候变化相关的科学、影响和潜在解决方案。这包括:

- 审阅在不同领域发表的成千上万篇科学论文。
- 将关于气候变化的最新知识总结并综合成易于理解的报告。
- 为政策制定者和公众提供客观、中立的信息。 重要的是要记住, IPCC 并不进行自己的研究。他们只是分析现有的科学文献。这意味着他们没 有自己的观点或实验——他们进行的是元分析。

#### Ta们制作什么样的报告?

IPCC制作各种报告,分为评估报告(ARs)和特别报告(SRs)。

**评估报告:**全面概述当前关于气候变化的知识状态,涵盖物理科学基础、影响和适应、气候变化缓解等主题。每6-7年发布一次,是IPCC的旗舰产品。

**特别报告:** 关注特定主题,如海洋和冰冻圈、可再生能源,或温室气体清单的方法。这些报告根据需要更频繁地发布。

### IPCC和他们的成果

IPCC有三个工作组(WGs),分别关注气候变化的不同方面:

#### WG I: 物理科学基础:

- 关注点:这个小组评估气候变化的物理科学,包括: •观测大气和海洋温度、海平面、冰盖和冰川的变化。
  - 理解这些变化的原因, 主要是人类活动, 如温室气体排放。
  - 在不同的排放路径下建模和预测未来的气候情景

最新报告: WG I为2021年发布的第六次评估报告(AR6)做出了贡献, 强调了人类对气候变化的明确影响,并提供了未来变暖的预测。

> "IPCC第一工作组评估的科学主题包括:大 气中的温室气体和气溶胶; 空气、陆地和海 洋的温度变化;水文循环和变化的降水(雨 和雪)模式;极端天气;冰川和冰盖;海洋 和海平面; 生物地球化学和碳循环; 以及气 候敏感性。

IPCC和他们的成果



#### WI II: 影响、适应和脆弱性:

关注点: 这个小组评估气候变化对自然和人类系统的影响, 包括:

- 生态系统、生物多样性和粮食安全的变化。
- 对水资源、沿海地区和人类健康的影响。
- 不同地区和人群对气候变化影响的脆弱性。 这个工作组考虑了这些自然和人类系统的脆弱性,以及它们适应气候变化的能力和限制,从而减少与气候相关的风险,并通过在所有规模上采取公平和综合的减缓和适应努力,为所有人创造一个可持续的未来。

最新报告: WG II还为AR6做出了贡献,强调了气候变化的广泛和加剧的影响,并强调了迫切需要采取紧急适应策略。



如果你是年轻的科学研究者, 你可以在IPCC网站上申请成为 志愿章节科学家!



### IPCC和他们的成果



#### WG Ⅲ: 气候变化的缓解:

关注点:这个小组评估减少通过温室气体排放来缓解气候变化的各种可能 性、包括:

- 分析不同的缓解路径和技术,如可再生能源、能源效率和碳捕获与储
- 评估不同缓解策略的经济和社会影响。
- 探索实现净零排放和限制全球变暖的方法。

工作组III支持IPCC的解决方案导向方法,但不提倡任何特定的缓解选 项。它既考虑了与政府和私营部门决策者相关的近期视角,也考虑了有助 于确定如何实现高层气候政策目标的长期视角。工作组III涉及缓解的所有 方面,包括技术可行性、成本和允许采取措施的有利环境。WG III是一个 非常跨学科的小组。

最新报告: WG III在2022年4月发布了其AR6报告, 强调了实现净零排放 的可行性和紧迫性,并概述了各个部门的脱碳路径。

> IPCC WG Ⅲ 提倡一套解决方 案、涵盖能源、工业、交通、建 筑、土地利用和林业等各个领 域。他们并不建议采用"一刀 切"的方法来应对气候变化。

#### ARБ综合报告: 2023年气候变化

这是对我们星球当前气候、我们正在经历的影响以及我们面临的未来情景的最全面和权威的全球评估。它综合了IPCC所有三个工作组的第六次评估报告(AR6)的关键发现。

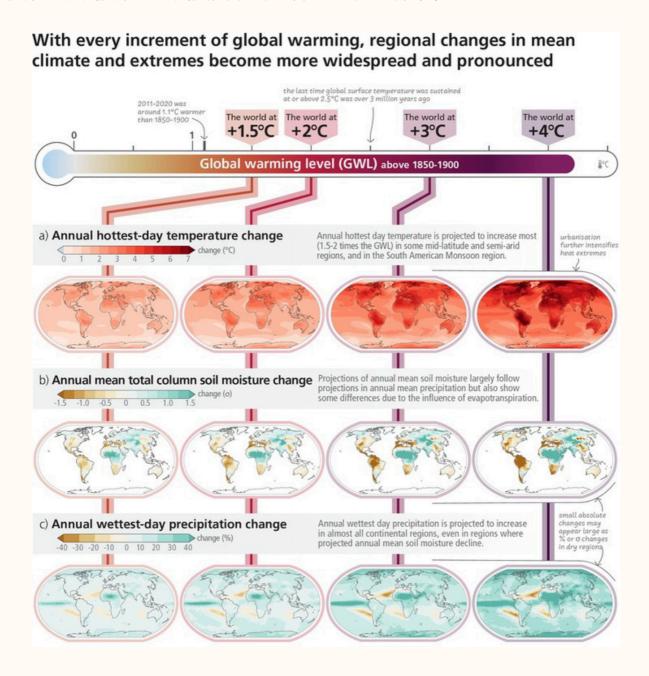
#### 以下是AR6综合报告的一些关键要点:

- **更强的科学证据**:报告以最强烈的科学证据重申,人类活动,主要是温室气体排放,是自20世纪中叶以来观测到的全球变暖的主要原因。
- **加速变暖:** 与工业化前水平相比, 地球平均气温已经上升了大约1摄氏度, 而且变暖速度正在加快。如果当前排放趋势持续下去, 我们将有望超过《巴黎协定》将升温限制在远低于2摄氏度的目标, 可能达到灾难性水平。
- **泛和加剧的影响**:报告强调了已经在全球范围内感受到的气候变化的多样化和令人震惊的影响,包括:
  - 。 更极端的天气事件, 如热浪、干旱、洪水和风暴
  - 。 海平面上升和冰川融化
  - 。 生态系统和生物多样性的变化
  - 。 对粮食安全和人类健康的威胁

**迫切需要采取行动:** AR6综合报告强调了为减少温室气体排放和限制进一步变暖而采取雄心勃勃和立即行动的关键和紧迫性。它概述了不同部门的各种缓解路径和脱碳策略,展示了实现净零排放和建设更可持续未来的可行性。

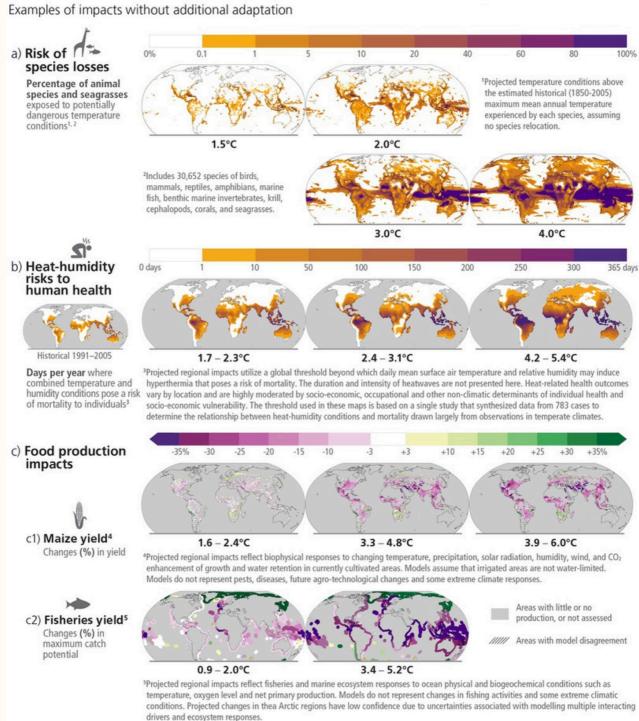
#### AR5综合报告: 2023年气候变化

该报告概述了自19世纪以来全球气温的变化情况,以及1.5摄氏度、2摄氏度、3摄氏度和4摄氏度更暖的世界会是什么样子。



### ARБ综合报告: 2023年气候变化

Future climate change is projected to increase the severity of impacts across natural and human systems and will increase regional differences



附注:全球气温只要上升 2.4 摄氏度,整个东南亚地区将变得无法居住。

资料来源: Intergovernmental Panel on Climate Change. AR6 Synthesis Report. https://www.ipcc.ch/report/sixth- assessment-report-cycle/

#### AR5综合报告: 2023年气候变化

#### 关键要点:

- 全球变暖无疑是人类活动,主要通过温室气体排放,所导致的。2011-2020年全球表面温度比1850-1900年间均温高出1.1摄氏度。全球温室气体排放持续增加,不同地区、国家内部和个人之间不可持续的能源使用、土地利用和土地利用变化、生活方式和消费模式的历史和持续贡献不平等(高度确信)。
- 今天可行有效的适应选项将随着全球变暖的加剧而变得受限和效果降低。随着全球变暖的加剧,损失和损害将增加,更多的人和自然系统将达到适应极限。
- 限制人为造成的全球变暖需要净零CO2排放。
- 这个十年的温室气体排放减少水平在很大程度上决定了是否可以将变暖限制在1.5°C或2°C(高度确信)。现有化石燃料基础设施在没有额外减排的情况下的预计CO2排放将超过1.5°C的剩余碳预算(50%)(高度确信)。
- 如果变暖超过特定水平,如1.5°C,通过实现和维持净负全球CO2排放,它可以逐渐降低。与没有超过的路径相比,这将需要额外部署二氧化碳移除,导致更大的可行性和可持续性问题。



### UNFCCC设立的SBSTA

#### 附属科学技术咨询机构(SBSTA)

SBSTA是联合国气候变化框架公约(UNFCCC)缔约方会议(COP)设立的两个常设附属机构之一。另一个SB是执行附属机构(SBI)。

#### SBSTA的工作内容包含:

提供关于科学技术问题的及时建议:

- 包括评估关于气候变化的最新科学发现,评估减缓和适应的技术解决方案,并考虑这些进展对气候政策的影响。
- 支持COP和其他UNFCCC机构的工作:通过提供专家建议和技术建议,SBSTA帮助通知COP、京都议定书的缔约方会议(CMP)和作为绿色气候基金大会的巴黎协定缔约方会议(CMA)所采取的决定和行动。
- 促进科学技术问题的国际合作: SBSTA促进来自世界各地的科学家、政策制定者和其他利益相关者之间的合作, 促进知识共享和共同努力应对气候变化。

SBSTA在公约、京都议定书和巴黎协定下开展方法学工作,并促进气候系统研究和系统观测领域的合作。

此外,SBSTA作为IPCC等专家来源提供的科学信息与COP的政策需求之间的联系发挥着重要作用。它与IPCC密切合作,有时请求其提供特定信息或报告,并与共享可持续发展共同目标的其他相关国际组织合作。



### 气候科学: UNFCCC的科学



#### 科学在 UNFCCC 中扮演着什么角色?

人类对气候变化原因和影响的认识,是基于地球观测和全球众多组织以及成千上万科学家的科学研究而不断深化和扩展的。所有在UNFCCC下采取的行动都基于目前最优的科学——来自像政府间气候变化专门委员会(IPCC)和世界气象组织(WMO)等组织的最新研究和观测。

以下是将科学统一到UNFCCC中的路径:

- 研究和系统观测 (RSO): 组织专家、缔约方和非缔约方利益相关方的会议,促进对话,讨论最新和最佳可用科学以及如何支持其产生。每年举行两次会议:研究对话 (Research Dialogue) 和地球信息日 (Earth Information Day)。
- <u>定期审查</u>:促进缔约方和专家进行技术评估,以审查长期全球目标 (将全球平均气温升幅限制在远低于工业化前水平2°C以上,最好是 1.5°C以下)的充分性以及实现该目标的进展。
- <u>与IPCC的合作</u>: 与IPCC密切合作,确保缔约方有机会咨询和与IPCC作者互动,协调活动和IPCC报告发布的时机,并以其他必要方式促进IPCC在UNFCCC进程中的参与。

记住:至关重要的是,科学知识通常不是静态的——我们对世界的认识在不断演变,技术和理论的突破都可以从根本上改变我们看待气候变化的方式



想想看,在整个人类历史中我们的能源发生了多大的变化,简直不可思议!

### 天气,气候,与大气层

#### 天气和气候之间的区别

#### 时间尺度:

- 天气:指的是特定时间和地点的短期大气条件。它可以在几分钟、几小时或几天内迅速变化。想想你每天经历的云彩、风和温度的变化。
- 气候:描述一个地区长期的平均天气状况,通常为30年或更长时间。它包括温度、降水、湿度、风和其他大气因素在很长一段时间内的模式。

#### 可预测性:

- 天气:由于气压、湿度和温度等复杂因素的相互作用,以及混沌理论(参见特别部分),天气高度不可预测。虽然我们可以预测短期内的天气模式,但长期预测具有挑战性。
- 气候:由于长期的平均水平效应,气候比天气更可预测。我们可以分析历史气候数据,了解长期趋势和模式。

#### 影响:

- 天气:直接影响我们的日常生活,影响我们的活动、着装选择甚至情绪。极端天气事件如风暴、洪水和干旱可能带来重大的经济和社会成本。
- 气候:影响全球的天气模式,有着深远的影响。由人类活动所驱动的 气候变化正在改变天气模式,导致海平面上升、冰川融化和生态系统 的破坏。

记住: 仅仅因为你经历了一个多雪的冬天,并不意味着气候变化没有发生!



### 天气,气候,与大气层

#### 温室气体效应:

太阳光到达地球并使地表温暖。其中一部分热量以红外辐射(热量)的形式反射回太空。然而,大气中的某些气体,称为**温室气体**(GHGs),会捕获这些热量,阻止其完全逃逸。

这种捕获的热量使地球变暖,类似于温室的玻璃板内部捕获热量。这导致了温室气体效应。

#### 几种关键的温室气体:

- 二**氧化碳**(CO2): 主要贡献者,约占人为变暖的79%。它主要来自燃烧化石燃料(煤、油、天然气)和森林砍伐。
- **甲烷(CH4):** 约占人为变暖的18%。来源包括牲畜、稻田、垃圾填埋场和天然气泄漏。
- **氧化亚氮(N2O)**:约占人为变暖的6%。它主要来自农业(肥料、 粪便)、燃烧生物质和工业过程。
- **臭氧(O3):** 虽然在平流层中有益,但地面臭氧作为一种温室气体,约占人为变暖的6%。它由车辆和工业排放的污染物形成。
- **氟化气体**(**F**-gases):包括各种主要用于制冷、空调和工业过程的合成气体。它们的贡献目前很小



### 天气,气候,与大气层

## 6 **C** 12.011

### "碳"之间:

你或许已经注意到,两种最在大气层里最多,也最能"困住热量"的气体,二氧化碳(CO2)和甲烷(CH4),都是碳基化合物。

为什么?并不是所有的碳化合物都能做到这一点(例如,像丙烷C3H8或乙烷C2H6这样的简单烃类缺乏显著热量捕获所需的复杂性),但CO2、氟碳化合物(FCs)和CH4具有在捕获后发射热量的正确振动模式。请注意,FCs大多已经通过《蒙特利尔议定书》得到了处理。

- 《蒙特利尔议定书》于1987年签署,是一项成功的条约,规范了某些会破坏臭氧层的气体,是全球环境保护领域最成功的国际条约之一
- 臭氧层吸收了大约97%至99%的太阳紫外线辐射,保护地球上的生命免受其伤害。紫外线辐射过多会导致皮肤癌、白内障、免疫系统功能降低,并对农作物和海洋浮游生物造成损害。

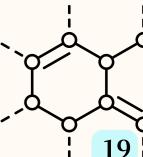
一般来说,碳确实是一个特殊的元素,因为它具有强大的四价性。这意味着它的外层有4个电子,只需要再有2个电子就能达到稳定——所有原子的唯一目标。

这种强大的四价性正是为什么碳能形成巨大的化合物。(包括生物分子; 我们,以及所有碳基生物,都是由碳、氢、氧和氮构成的!)

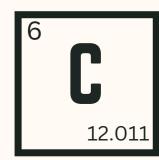
#### 分子振动模式:

二氧化碳 (CO2): CO2的简单线性结构允许完美的"弯曲和拉伸"振动,与地球热量辐射的关键波段共振。就像一个调音精准的叉子,它捕获这些能量并将其重新导向地球,放大温室效应。它的长寿命确保了这些热量随时间累积,使CO2成为长期变暖的主要贡献者。

**甲烷(CH4):** CH4的复杂四面体结构解锁了更广泛的振动模式——这些振动在比CO2<u>更广泛的红外波长范围</u>内捕获热量,使其每个分子都非常有效。尽管它在大气中消失得更快,但CH4更宽的吸收范围和高效率使其成为气候变化的重要贡献者。







#### 碳化合物的分子振动模式:

之前我们提到的振动模式被称为不对称伸缩振动模式。想象一下CO2分子 是三个原子的线性排列:中间是碳原子,两边是氧原子。



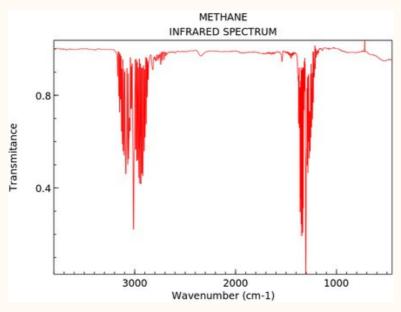
#### asymmetric stretch mode

在不对称伸缩振动模式中,分子通过同时拉伸C-O键来振动:一个键变长,而另一个键变短。

这种振动发生只在特定的频率间,大约在667和2,347 cm^-1的红外光谱范围内。这恰好是地球自然辐射热量的范围。

CO2的振动频率与地球的热量辐射光谱的这种显著巧合,使其成为一种高效的吸热气体。

另一方面, 甲烷可以在更广泛的频率范围内捕获热量。甲烷吸热的有效范围大致在红外光谱的800 cm^-1到3000 cm^-1之间。



然而,需要注意的是,这些频率的吸收效率是不同的。在3000 cm^-1左右的C-H伸缩振动模式和1400-1600 cm^-1左右的H-C-H弯曲振动模式对甲烷的吸热能力贡献最大。



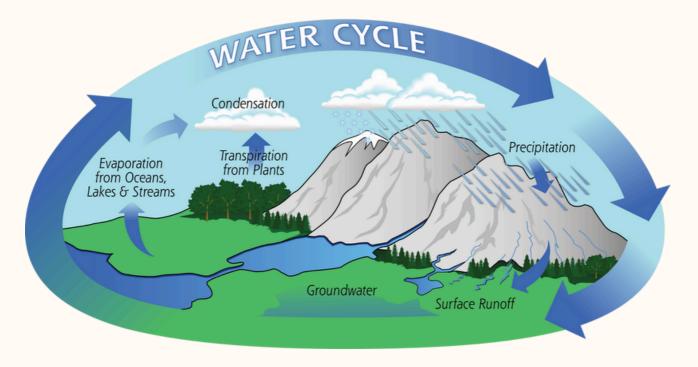
### 天气,气候,与大气层

#### 水循环与碳循环:

你是否知道水蒸气(H2O)是一种比二氧化碳或甲烷更有效的吸热气体?

那么为什么我们在谈论减排时不考虑它呢?

#### 这是水循环:



从蒸发到降水的整个水生命周期估计大约为9天。就这样;只有9天。

在大气中,**水蒸气能够吸收CO2和CH4所有范围的红外辐射!**然而,当它加热时,也会在大气高层遇到较冷的空气,水蒸气冷却成降水——比如雨、雪或冰雹。

这意味着尽管水可以吸收很多热量,但它在大气中的寿命并不长,因此不是气候变化的主要贡献者。

我们稍后将讨论的一个主题将是气候变化在改变水循环的稳定性方面起到的作用。

### 天气,气候,与大气层

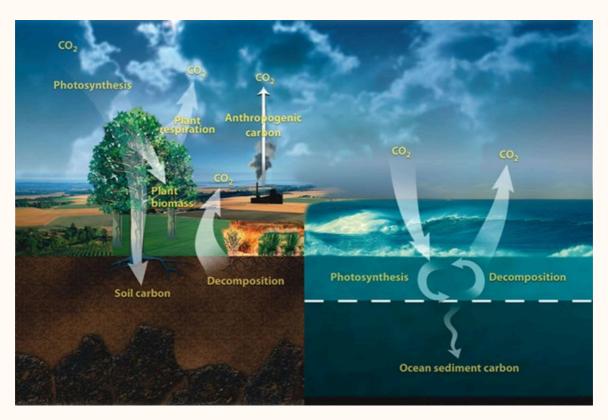
#### 水循环与碳循环:

#### 如果水的寿命是9天,那么碳的寿命是多少呢?

这里需要澄清的是,我们不是在谈论单个碳原子的寿命,而是在讨论大气中二氧化碳(CO2)的存留时间。每个碳原子可以在大气、海洋和陆地等不同的储库中循环,时间跨度非常长,但CO2这种温室气体的存留时间对其气候效应有显著影响。

### CO2在大气中的存留时间复杂且多变,从几十年到几千年不等。以下是详细分解:

- **快循环:** 部分CO2只在大气中停留<u>几年到几十年</u>,参与与陆地植物和上层海洋的快速交换。
- **慢循环:** 其他CO2溶解在深海或被土壤吸收,可以在那里停留<u>数百到</u>数千年。
- 平均存留时间:考虑到快速和缓慢循环,CO2在大气中的平均存留时间估计约为100到200年。



这意味着,当我们燃烧化石燃料或进行其他活动释放CO2时,这些CO2分子在大气中的影响可能会持续很长时间,从而对气候变化产生长期影响。这也是为什么减少CO2排放和增加碳汇(如森林和海洋)对于减缓全球变暖至关重要。

### 天气,气候,与大气层

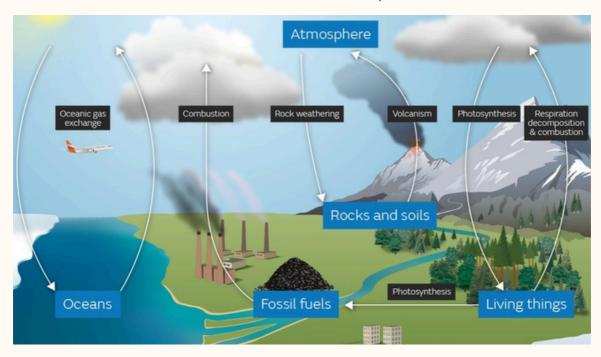
#### 水循环与碳循环:

#### 那么所有的碳呢?不仅仅是二氧化碳?

地球的碳循环是一个复杂的相互作用,涉及有机和无机储库,通过各种路径交换碳原子,并在不同的时间尺度上运作。

#### 碳储库:

- **大气中的CO2**: 由于与生物圈和海洋的交换,是导致气候变化的主要温室气体,存留时间从几十年到几个世纪不等。
- **生物圈:** 植物和动物通过光合作用和呼吸作用积极吸收和释放碳,碳循环速度很快(从天到月)。
- **表层海洋**:溶解的有机物和无机碳酸盐在大气和表层海洋之间循环, 时间尺度为年到十年。
- **深层海洋:** 一个巨大的碳储库,将碳储存数千年,作为来自表层的有机物的长期汇。
- **土壤有机质:** 碳在土壤中积累,以中等速率(几个世纪到几千年)分解和释放CO2。
- 地质构造: 化石燃料和沉积岩是长期碳储, 将碳锁住数百万年。



### 天气,气候,与大气层

#### 水循环与碳循环:

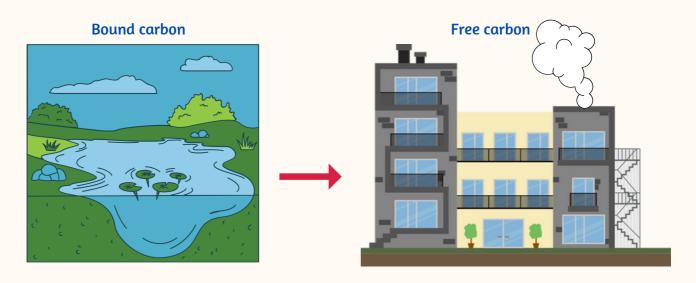
#### 碳循环的路径:

- 光合作用: 植物将大气中的CO2固定成有机物, 为生物圈提供能量。
- 呼吸作用: 动物和分解者将CO2释放回大气中, 完成循环。
- 海洋-大气交换: CO2溶解在海洋中并从中释放,调节大气浓度。
- 沉积和侵蚀: 风化和侵蚀将陆地碳转移到海洋和地质构造中。
- 化石燃料开采和燃烧:人类活动将储存在地质构造中的古老碳释放回大气中。

#### 时间尺度:

- 快速循环: 大气与生物圈和表层海洋的交换(从天到月)。
- 中间循环: 表层海洋-深层海洋交换和土壤有机质周转(年到几十年到几个世纪)。
- 慢速循环: 地质碳储存和化石燃料形成(数百万年)。

人类影响:燃烧化石燃料和砍伐森林破坏了碳循环的自然平衡,加速了碳从长期储存转移到大气的过程,加剧了温室效应,促进了气候变化。



资料来源: Department of Energy USA, https://www.energy.gov%2Fscience%2Fdoe-explainsthe-carbon-cycle

### 地质学, 古生物学, 与数据



#### 我们是怎么追踪气候数据的?

收集气候数据会使用多种方法,从地面仪器到绕地球轨道的卫星。

#### 1: 地面观测:

- 天气站: 这些是气候数据收集的主力军,不断监测温度、降水、风速 和方向、压力等关键变量。一些站点还测量日照时长、湿度和土壤湿 度。
- 人类观察者: 世界各地的志愿者在不同地点进行关键变量(如温度和 降水)的日常或小时读数,提供宝贵的长期数据集。 • 专用仪器:像雷达这样的仪器测量风速和降水,而激光雷达分析云层
- 和气溶胶。大气气球将传感器送上去研究上层空气条件。

#### 2: 遥感

- 卫星: 这些强大的平台绕地球轨道运行,测量气候系统的各个方面。它们可以捕捉全球温度、降水、云层覆盖、洋流等数据。卫星上的不 同类型的传感器提供不同方面的信息,如红外传感器用于测量温度, 微波传感器用于测量水汽。
- 飞行器: 研究飞行器携带专用仪器直接对大气进行采样, 提供有关空 气质量、温室气体浓度和云层特性的详细数据。

#### 3: 间接方法:

- 代理记录: 这些自然档案如树轮、冰芯和湖泊沉积物包含有关过去气 候条件的信息。科学家分析这些记录以重建历史气候变化。
- 海洋浮标: 这些装有传感器的浮动平台监测海洋温度、盐度和波高, 为理解海洋动力学及其对气候的影响提供关键数据。

需要注意的是,没有单一方法能提供气候系统的完整图像。因此,科学 家使用这些多样化的方法组合来收集和分析气候数据, 确保对我们不断 变化的地球有全面的了解。

### 地质学, 古生物学, 与数据

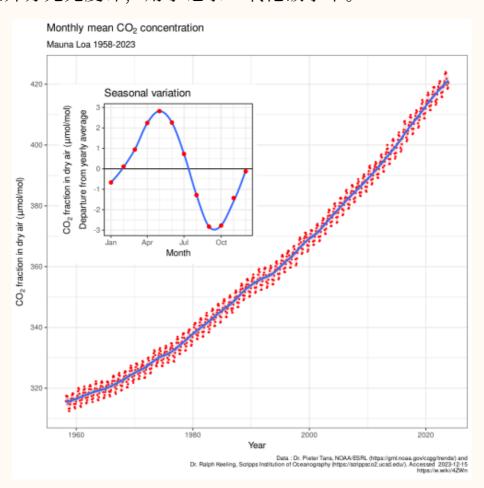


#### 我们是怎么追踪气候数据的?

关于气候数据的一个重要图表是基林曲线(Keeling Curve)。

基林曲线是一张图表,记录了自1958年以来大气中二氧化碳(CO2)浓度的上升。它以查尔斯·大卫·基林(Charles David Keeling)的名字命名,这位科学家在夏威夷的莫纳罗亚观测站开始监测CO2水平,建立了世界上最长的大气CO2连续测量记录。

- 许多科学家认为,基林曲线首次引起了全世界对目前大气中二氧化碳增加的关注。
- 2013年5月9日,莫纳罗亚 (Mauna Loa) 测量的大气中CO2的日均浓度超过了400 ppmv(百万分比浓度)。对过去地质时代的CO2估计表明,自中上新世(mid-Pilocene, 距今2至4百万年前)以来,CO2浓度尚未达到这个水平。
- 这一测量是由**非分散红外传感器(NDIR**)完成的,这是一种特殊的 红外分光光度计,用于记录二氧化碳水平。





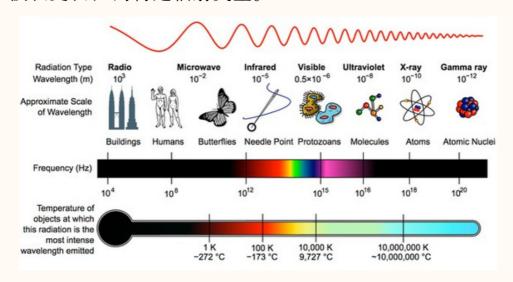
### 地质学, 古生物学, 与数据



#### 我们是怎么追踪气候数据的?

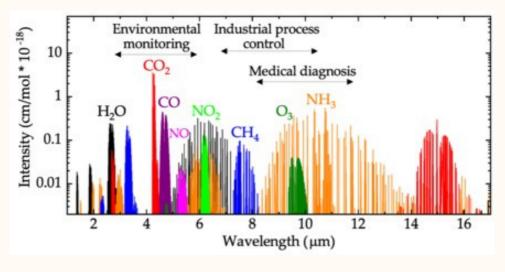
什么是非分散红外传感器(NDIR)?好问题。

红外光是指电磁谱中位于我们肉眼能检测到的可见光范围正下方(*频率 更低,波长更长*)的特定辐射类型。



非分散红外传感器(NDIR),顾名思义,使用这种红外光来分析物质。它通过样本照射这种光,根据在不同波长上吸收的光量,该仪器可以识别样本中存在的化学键和功能基团。对于二氧化碳来说,这些波长分别是4.26 μm、2.7 μm和14-16 μm。

#### 以下是一些气体的波长:



资料来源: NDIR & CO2 Sensors Explained, The Gas Detector Encyclopedia, Edaphic Scientific Knowledge Base,

https://web.archive.org/web/20190307133039/https://www.edaphic.com.au/knowledge-base/articles/gas-articles/ndir-explained/

### 地质学, 古生物学, 与数据



#### 气候变化有多少是自然的?

气候也在发生自然变化,例如:

- 火山爆发:火山爆发将尘埃和气体释放到大气中,暂时冷却地球。
- **太阳辐射变化**: 太阳的输出在几十年到几个世纪的时间里略有波动, 影响地球的温度。然而,在过去的一个世纪里,太阳活动保持相对稳 定,这意味着它不能解释观测到的快速变暖。
- **海洋循环**: 像*厄尔尼诺(El Niño*)和*拉尼娜(La Niña*)这样的自然循环影响地区温度和天气模式。然而,这些循环倾向于围绕一个稳定的基线波动,同样不足以解释持续的变暖趋势。

当我们观察几个世纪以来自然变量的总体波动时,我们可以计算出观测到的气候行为和预测的气候行为之间的差异——这个差异相当于由人类影响造成的气候变化。

政府间气候变化专门委员会(IPCC)以95%的置信度表示,人类活动是自20世纪中叶以来观测到的变暖的主要原因。

这得到了多条证据的支持,包括:

- **大气测量:** 记录显示温室气体浓度明显增加,与全球温度上升同时发生。
- **温度重建**: 像冰芯和树轮这样的代理数据显示过去的变暖趋势, 并揭示当前的变暖速率与自然变化相比是异常的。
- **气候模型**:复杂的计算机模拟结合了人类和自然因素,准确再现了观测到的温度变化。



### 地质学, 古生物学, 与数据

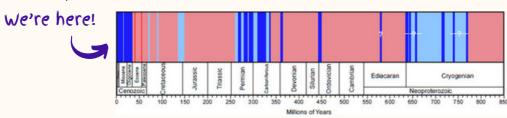




#### 我们不是处于冰河时期吗?

你可能听说地球目前处于一个冰河时期。如果的确是这样,我们该如何解释全球变暖呢?

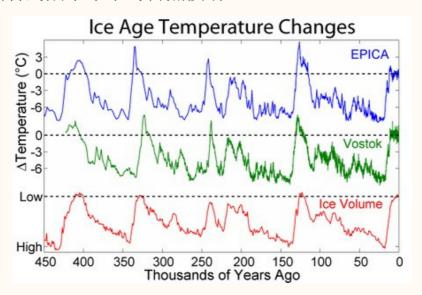
在地球的历史中,它经历了两种主要的气候时期——温室期和冰河期。 每个时期持续数*百万年*。在冰河时期,地球的两极有冰川和冰盖;而在 温室期,地球上**没有**冰川。





是的,截至今天,地球仍然处于约258万年前开始的冰河时期,因为我们有极地冰盖。然而,我们正处于一个**间冰期**,这是地质学上的一个温暖期,全球平均气温较高,持续数千年,它隔开了冰河时期内的连续冰川期。

以下你可以看到数千年来的自然波动:





在数千年的时间里,间冰期可以使地球缓慢升温高达5摄氏度,而过去200年里观测到的地球升温1摄氏度完全是由人类活动造成的。

人类排放到地球海洋和大气中的温室气体量预计将推迟下一个冰川期的到来,否则大约在5万年后开始,现在可能会推迟10万到50万年。

资料来源: Ehlers, Jürgen; Gibbard, Philip (2011). "Quaternary Glaciation". Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers. Encyclopedia of Earth Sciences Series. pp. 873–882. doi:10.1007/978-90-481-2642-2\_423. ISBN 978-90-481-2641-5.

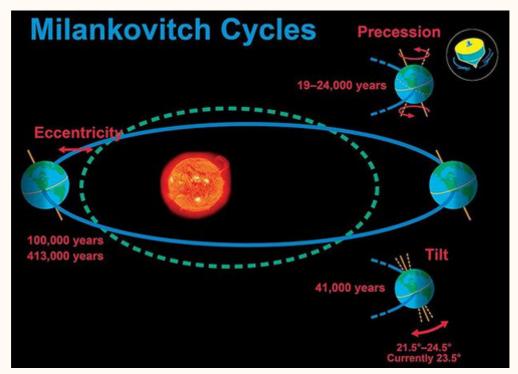
### 地质学, 古生物学, 与数据

#### 自然的气候振荡和米兰科维奇周期

自然气候振荡是地球气候的长期变化,不是由人类活动直接引起的。这些自然波动通常发生在数千到数十万年间,影响温度、降水模式和全球冰量。

米兰科维奇周期描述了地球围绕太阳轨道的变化,这些变化影响了一年中不同纬度接收到的太阳辐射量。三个主要的米兰科维奇周期是:

- 偏心率: 地球轨道的形状从略微椭圆形变为几乎圆形, 周期约为10万年。更椭圆形的轨道意味着太阳辐射的增加和减少。
- 倾角:地球轴向相对于其轨道平面的倾斜度在22.1°到24.5°之间变化,周期约为4.1万年。更高的倾斜度导致高纬度地区太阳辐射的季节性对比更大。
- 岁差:地球轴的摆动,类似于旋转的陀螺,每2.6万年完成一个周期。这改变了椭圆轨道中近日点(最接近太阳的点)和远日点(离太阳最远的点)的时机,进一步影响季节性太阳辐射。



要观看米兰科维奇周期的模拟并了解它为何不是当前气候变化的原因。请访问来源中的链接。

# 打住!



如果我们自然地经历气候变化,我们如何知道极端天气事件中有多少是由人为气候变化造成的?

### 好问题!

首先,不要去看那些有特定计划或者过于简化的二手信息源,比如博客或Instagram。

世界天气归因组织(WWA)为记者提供了一个指南,以准确报道气候变化,并检测天气事件中有多少是由人为气候变化造成的。





English: Reporting extreme weather and climate change A

guide for journalists

中文: 极端天气和气候变化报道

记住在社交媒体上发布气候变化信息时要负责任!一条帖子,无论多么吸引人,也并不意味着它是真实的。

### 地质学, 古生物学, 与数据

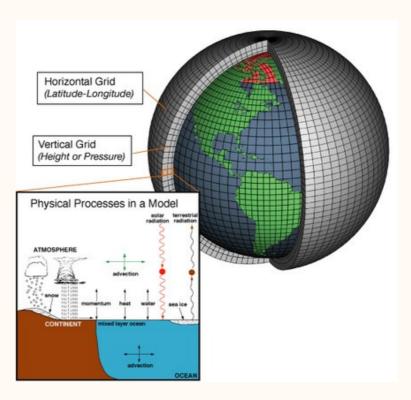


#### 我们如何模拟未来温度?

气候模型是一个虚拟的地球,使用复杂的数学来模拟地球的系统,并预测未来温度、海洋和天气可能如何变化。

气候模型的核心在于数学——一组微分方程,包含了控制地球气候系统的基本原理。这些方程描述了:

- **辐射传递:** 太阳的能量如何通过大气层传播, 与气体和颗粒物相互作用。
- 湍流热交换: 空气分子的不断碰撞, 将热量在大气、陆地和海洋之间传递。
- **大气和海洋环流**:由压力梯度和温度差异驱动的空气和水流动的宏 伟流动。
- **陆面过程**: 植被、土壤和大气之间的相互作用,包括蒸发、光合作用和融雪。
- 生物地球化学循环: 碳、氮和其他元素通过生态系统的奇妙循环。



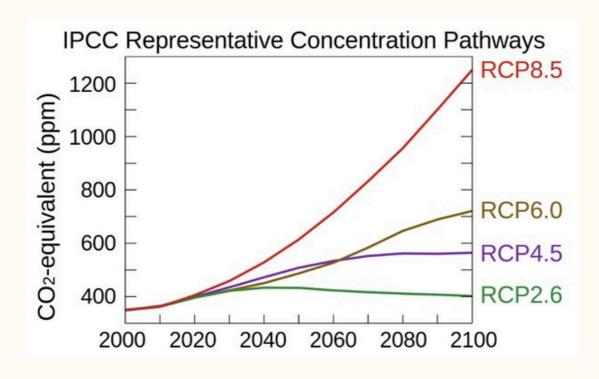
## 地质学, 古生物学, 与数据

#### IPCC的RCP路径是什么?

IPCC的代表性浓度路径(RCP)是由政府间气候变化专门委员会(IPCC)创建的情景,用于探索温室气体排放和相关气候影响的潜在未来轨迹。**这些路径不是预测**,而是基于对社会经济发展、技术进步和政策选择的不同假设的合理未来情景。有四个主要的RCP:

- RCP2.6: 非常严格的路径, 旨在到2100年将全球变暖限制在比工业化前水平高2°C以下。
- RCP4.5: 中等路径, 到2100年辐射强迫稳定在大约4.5 W/m<sup>2</sup>。
- RCP6.0: 另一个中等路径,大约在2080年达到排放峰值,然后下降。
- RCP8.5: 高排放路径,整个21世纪排放持续增长。

这些路径帮助科学家和政策制定者了解不同排放水平的潜在后果,并指导缓解努力以避免最严重的气候影响。选择"正确"的路径不是关于选择最可能的未来,而是理解一系列可能性并为一系列潜在结果做准备。



资料来源: RCP Simulator, IPCC, https://ar5-syr.ipcc.ch/topic\_summary.php

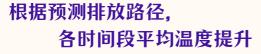
## 地质学, 古生物学, 与数据

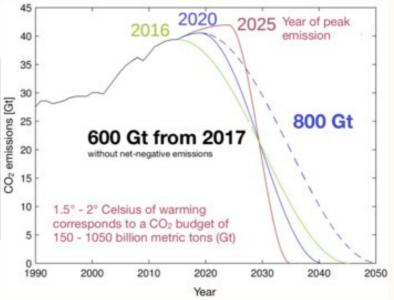
#### IPCC的RCP路径

RCP路径虽然有用, 但也存在一些批评。

- 过于简化:批评者认为四个主要的RCP路径过于简化了未来排放和 气候变化的潜在轨迹。它们可能没有捕捉到所有可能性,例如意外 的技术突破或社会转变。
- 社会经济偏见: RCP主要关注排放的经济和技术驱动因素,可能忽视了社会和文化因素的影响。批评者认为,更全面地理解人类行为和决策将改善这些情景。
- 不确定性:尽管RCP承认并量化了排放轨迹内的不确定性,但批评者认为气候模型的局限性可能导致对未来风险的低估,特别是在21世纪末。
- 误用:一些人担心RCP,特别是高排放的RCP8.5,可能被误解为"一切照旧"的情景,从而淡化了减缓努力的紧迫性。批评者强调RCP不是预测,而是说明性的例子,需要采取行动以避免最严重的后果。

Scenario	2046-2065	2081–2100
	Mean (likely range)	Mean (likely range)
RCP2.6	1.0 (0.4 to 1.6)	1.0 (0.3 to 1.7)
RCP4.5	1.4 (0.9 to 2.0)	1.8 (1.1 to 2.6)
RCP6	1.3 (0.8 to 1.8)	2.2 (1.4 to 3.1)
RCP8.5	2.0 (1.4 to 2.6)	3.7 (2.6 to 4.8)





## 什么是化石燃料?

#### 碳氢化合物公式



化石燃料是含有碳氢化合物的材料,如煤、石油和天然气。碳氢化合物是由碳和氢组成的分子,可以用公式CxHy表示。

碳氢化合物的一个重要特性是它们极易燃烧,即容易进行燃烧。燃烧是一种化学物质与氧气迅速反应并释放热量的化学过程。

要发生燃烧,必须满足三个条件:

- 1. 高温
- 2. 氧气的存在
- 3.燃料的存在,在这种情况下是碳氢化合物。

条件(1)是为了提供反应的活化能,例如,可能以汽车发动机中的电火花形式出现。条件(2)和(3)是必需的,因为氧气和燃料是燃烧方程式的反应物。

这个反应的产物要么是(1)二氧化碳和水,要么是(2)水和固态碳和/或一氧化碳。前者是在充足氧气下发生的完全燃烧的产物,后者是在氧气不足时发生的不完全燃烧的产物。这个反应是放热的,意味着它释放热量。储存在碳氢化合物中的化学势能转化为热能、光能和声能。

任何碳氢化合物燃烧的关键点是, 碳化合物总是最终产物。

$$C_x H_y + \left(x + \frac{y}{4}\right) O_2 \rightarrow x C O_2 + \frac{y}{2} H_2 O$$

### 不止全球变暖

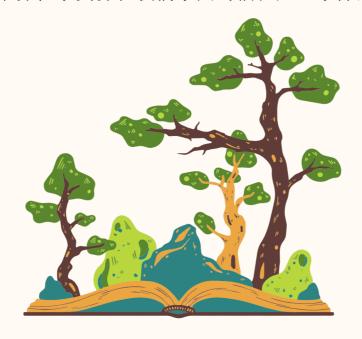
#### 三重星球危机



三重地球危机代表了当今世界三大生态挑战:气候变化、污染和生物多样性的丧失。

气候变化是这些危机中最突出的,因为人类可能生活在紧迫性前所未有的时代。它以长期全球气温和天气模式的变化为标志,主要由人类活动引起。这些活动包括我们的能源使用、工业实践、交通系统、建筑方法和耕作技术,导致向大气中释放危险的温室气体

- 每年有数百万人死于污染,污染对人类健康和环境也有严重影响。 污染的主要原因包括:交通排放、工业排放、野火、火山爆发,以 及住宅使用污染燃料和技术。这导致了不同的环境问题,如海洋酸 化或臭氧层耗竭。
- 第三个紧迫的危机是生物多样性的丧失,指的是包括动物、植物和整个生态系统在内的不同生物种类的显著减少甚至灭绝。这一令人震惊的现象是由过度捕捞、栖息地破坏(如城市扩张造导致的森林砍伐)和气候变化导致的荒漠化等因素引起的。地球的生命多样性是所有生命形式的基础,因为我们都是相互联系的。生物多样性的丧失对食物来源、水资源和我们家园的福祉产生了深远影响。



## 不止全球变暖

# GARDEN

#### 大自然在气候变化中的作用

自然对气候变化的贡献和缓解作用很大。人为碳排放大约有一半被陆地和海洋生态系统所抵消。自然的这一关键双重作用经常被忽视,但它对我们对抗全球变暖至关重要。

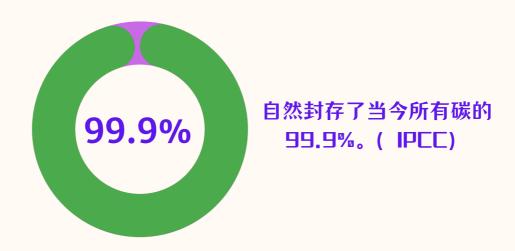
#### 自然作为碳汇

森林、湿地和其他生态系统发挥着碳汇的作用,从大气中移除二氧化碳。这一过程不仅有助于减少大气中的温室气体总量,还有助于保持地球碳循环的平衡。然而,人类活动,如砍伐森林和污染,正在扰乱这些自然碳汇,导致大气中CO2水平增加,从而加剧全球变暖。

#### 自然作为缓冲

自然也可以用作缓解气候变化影响的缓冲。森林和湿地等健康的生态系统能够吸收大量降雨期间的多余雨水,从而最小化洪水的可能性,同时减少土壤侵蚀的可能性。它们还通过调节能力影响局部气候,并为众多物种提供栖息地,从而支持生物多样性。

每年有2.0 - 3.6千兆吨碳(GtC)被自然碳汇吸收。这远远超过了当今任何可行的技术补救措施的潜力,无论是在经济上还是在能源效率上。



## 气候科学: 科学与技术



#### 碳封存与碳捕捉

碳捕获和去除过程旨在减轻温室气体排放的有害影响,特别是二氧化碳(CO2)。在更基本的层面上,这些过程通常涉及从碳密集型工业源(如化石燃料发电厂)捕获CO2,或直接从大气中捕获,然后将其储存在地下或转化为其他工业用途的稳定形式。

在碳密集型工业环境中,CO2是通过选择性吸收CO2的溶剂从流经的烟道气体或废气中捕获的,然后将其分离。

还有一种方法, 膜基分离, 将二氧化碳分子选择性地通过膜, 留下其他气体。

另一种碳捕获技术是直接空气捕获(DAC),它使用各种化学过程,如吸附剂捕获或与碱性材料的化学反应,直接从大气中去除CO2。捕获后,CO2可以储存在地下地质构造中,用于工业过程,或通过矿化或碳利用等过程转化为有用的产品,如合成燃料或建筑材料。

两种方法都旨在降低大气中的CO2水平,但通常需要更高的技术开发成本,但目前正在一些国家部署。

CCS因为它为化石燃料公司继续他们不可持续的商业模式创造了途径,同时减少了真正的、系统性变革的机会而受到批评。

不少于16个成员国要求在IPCC第7次评估报告的议程中增加对碳技术的额外分析——使其成为最受要求的主题。

#### 太阳辐射管理(5RM)



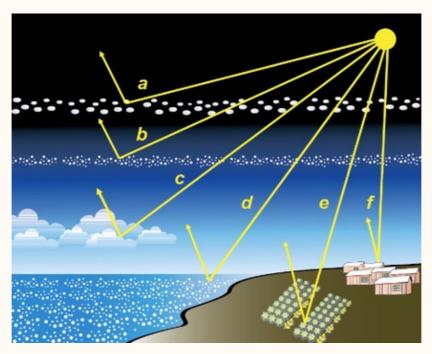
太阳能辐射管理(SRM)是一种地球工程手段,它的目的是通过反射一部分太阳辐射远离地球来缓解气候变化,从而降低全球气温。

有一种提议的方法是在平流层注入反射性气溶胶,比如二氧化硫,来制造一层薄雾,将阳光反射回太空。这类似于火山灰进入平流层时的情况,如果火山喷发足够大,它将降低全球气温。

这些气溶胶作为人造粒子,散射阳光并增加地球的*反照率*(或者说反射能力)。然而,SRM技术存在显著的缺点和风险。

- 首先,它们并没有解决气候变化的根本原因——即高消费国家增加的温室气体浓度——而只是掩盖了其影响。
- 此外, SRM可能对区域气候、降水模式和生态系统产生非常不可预测且可能有害的影响, 这些影响是当前模型无法完全计算的。

尽管像以前观察到的火山喷发一样,SRM通过气溶胶注射可能具有短期冷却效益,但通过气溶胶注射进行SRM仍然是一个高度有争议且非常不确定的气候干预策略。



资料来源: Carbon Brief, https://www.carbonbrief.org/explainer-six-ideas-to-limit-global-warming-with-solar-geoengineering/

## 基于自然的解决方案(NBS)



#### 什么是基于自然的解决方案(NB5)?

认知自然在气候变化中的作用催生了一系列 **基于自然的解决方案** (NBS)。这些措施旨在通过保护、管理和修复自然或改良的生态系统来有效灵活地应对社会的挑战,同时也造福人类,有益于生物多样性。

基于自然的解决方案的例子包括湿地和沿海生态系统的修复、绿色基础设施、再造林和农林复合经营。

#### NBS有三种分类:

- **类型1**:包括对生态系统的无干预或最小干预,目标是维持或改善这些受保护生态系统内外的一系列生态系统服务。例如,包括保护沿海地区的红树林以限制与极端天气条件相关的风险。
- **类型2**:对应于发展可持续和多功能的生态系统和景观(广泛或密集管理)的管理方法。这些类型与更传统的干预相比,改善了选定的生态系统服务的提供。例如,创新规划农业景观以增加其多功能性。
- **类型3**:包括以非常广泛的方式管理生态系统甚至创造新的生态系统 (例如,为减轻城市变暖和净化污染空气而设计的人工生态系统, 包括绿色屋顶和墙面)。类型3与绿色和蓝色基础设施的概念以及恢 复严重退化或污染区域的目标和绿化城市的目标联系在一起。

多个案例研究证明, NB5在经济 上比传统的技术基础设施更具可 行性。NB5能够以更少的成本提 供多种生态服务, 同时带来额外 的环境和社会效益。



## 基于自然的解决方案(NBS)

#### 土壤肥力和农业生态学

土壤是气候变化中一个常被忽视的关键部分。所有陆地生命都依赖于土壤,而土壤从原始物质(如砂岩等岩石)形成需要数千年的时间。现代农业正在以一种无法自然补充的速度消耗土壤质量,尽管土壤在以下方面发挥着重要作用:

- **巨大的碳储存库:** 土壤含有大约1500-2400千兆吨的有机碳, 是大 气中的三倍以上, 是所有植物和树木储存量的两倍。
- 温室气体的来源: 土地利用变化、退化和不可持续的农业实践导致自农业诞生以来土壤中大约损失了133亿吨碳。当这些碳被释放时,它变成了二氧化碳和甲烷,这些都是强效的温室气体。
- 固碳潜力:恢复退化的土壤和采用再生农业实践可以固存大量的二氧化碳,从而缓解气候变化。研究表明,全球每年额外固碳的潜力为0.4-1.2千兆吨。

解决土壤退化的一个方法是采用农业生态实践,包括:

- 土壤碳固存:农业生态实践,如覆盖作物种植、免耕耕作和堆肥,可以增加有机物,固存二氧化碳并改善土壤健康。研究表明,与传统农场相比,农业生态农场每公顷固碳量显著增加。
- 水资源保护:农业生态学增强了土壤的保水能力和渗透性,减少了干旱的脆弱性。研究表明,在干旱条件下,农业生态系统的水资源利用效率和作物产量有所提高。
- 减少对外部投入的依赖: 农业生态学减少了对合成肥料和农药的依赖, 减轻了与它们的生产和运输相关的温室气体排放。
- **生物多样性增强韧性:** 作物多样化、农林复合经营和与畜牧业的整合构建了对害虫、疾病和极端气候的生态韧性。研究表明,在压力时期,多样化的农业生态系统产量更高且更稳定。









## 目录

- 混沌理论, 蝴蝶效应和天气归因
  - 。 为什么确定气候条件比天气预报更容易?
- 搭建精确的气候敏感性模型CSM)
  - 。 CSM是如何创建的, 以及如何确定它们的准确性。
- 复杂动态模型
  - 。 综合评估模型和数据分析的新方法。
- 天体生物学和原子光谱学
  - 。测量碳和识别恒星
- 熵与自由碳
  - 。 热力学第二定律和气候变化
- 联系冻土和甲烷
  - 。全球温度如何释放远古气体
- 辐射强迫
  - 。 地球大气中的能量通量

## 混沌理论:

### 蝴蝶效应与天气

#### 混沌理论的基础知识



混沌理论起源于爱德华·洛伦兹 (Edward Lorenz) 关于大气对流的开创性工作,挑战了复杂系统中决定论的基础。它揭示了一个矛盾的世界,在这个世界中,微小的变化可能引发巨大的分歧,使得长期天气预报变得困难。

这意味着,用于计算天气的初始数据集可以完全决定你将收到的结果;以至于小数点后的微小变化(*例如:使用5.685而不是5.6851*)会导致**截然不同**的预测。这当然违反了线性模型的基本理解。

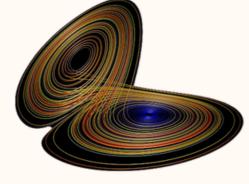
#### 这篇论文也创造了"蝴蝶效应"的概念和术语。

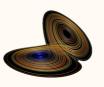


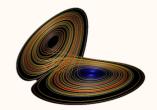
#### 混沌的标志:

- 蝴蝶效应:初始状态的微小偏差可能导致截然不同的结果,蝴蝶效应就是其中的典型。一只蝴蝶在全球某个角落的无辜振翅,理论上可能会影响远处飓风的狂怒——这是混沌系统中固有的相互联系和不可预测性的隐喻。
- **分形几何:** 在看似随机的混沌中, 混沌理论通过在多个尺度上重复出现的复杂自相似模式揭示了秩序, 就像分形一样。它揭示了混沌路径中隐藏的结构语言。
- **分叉点**: 这些临界点标志着系统未来轨迹的重大转变,每个轨迹对最微小的推动都很敏感。它们突显了混沌系统的动态和不可预测性。
- **非线性:** 与某些系统的简单因果关系不同, 混沌在非线性动态中蓬勃发展, 微小的涟漪可以放大成级联后果, 违背了直接预测。









## 混沌理论:

## 蝴蝶效应与天气

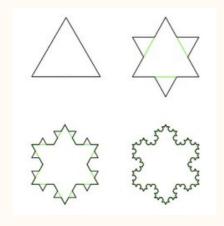
#### 分形几何学

分形几何学是一种描述复杂和无限细节的语言,它提供了一种迷人的视角来观察世界。想象一下,挑战传统维度的形状,跨尺度重复的模式,在复杂性中孕育更多复杂性...这就是分形的本质。

#### 关键特征:

- 自相似性: 这是它们的决定性特征, 其中复杂的模式在越来越小的 尺度上重复, 就像万花筒反射自身一样。想想海岸线、雪花和蕨类 植物的叶子。
- 分数维数:与圆的完美"2"或立方体的"3"不同,分形挑战这些整齐的分类,存在于维度之间的领域。例如,海岸线可能拥有介于1和2之间的维数,捕捉其复杂的锯齿状。
- 无限细节: 放大一个分形, 你会发现新的复杂层次, 这是进入形状核心的永无止境的旅程。

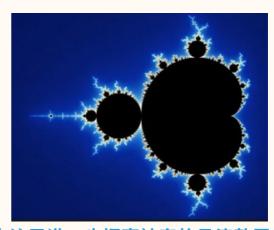
#### Koch Snowflake 科赫雪花



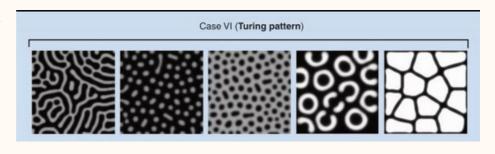
英国科学家 艾伦·图灵 (Alan Turing) 因在二战 期间解码而闻名。

他也在分形几何与自然之间 联系的领域做出了重要贡献。

#### Mandelbrot Set 曼德勃罗集



点击这里进一步探索神奇的曼德勃罗集



## 混沌理论:

## 蝴蝶效应与天气

#### 混沌理论怎么影响天气预报?

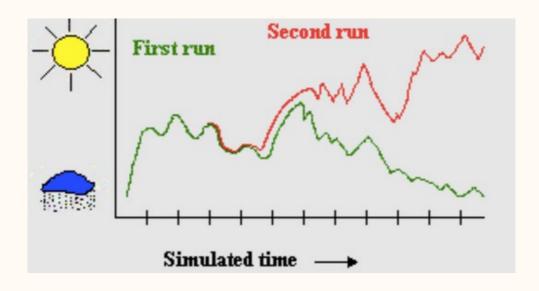


混沌理论给天气预报这个看似决定的领域带来了巨大挑战。混沌注入了 大量不确定性,揭示了一个易扰的世界。在这个世界里,初始条件的微小扰动能引发显著的分歧,使长期预报几乎成为不可能的任务。

- 预报初始条件中的小误差会迅速增长,并影响预测。
- 可预测性受到模型误差的限制,这些误差是由于最先进的数值模型对 大气过程的近似模拟造成的。

这两种不确定性来源以不可预测的方式限制了单一确定性预报的技能, 高质量预报的日子随机地被质量差的预报日所跟随。

现代预报技术试图通过制作一系列天气预报来捕捉可能发生的一系列未 来天气——不是用一组起始条件(现在的天气)进行一次预报,而是进行许多预报,每个预报在同一刻使用的天气条件有微小的差异——以考 虑到所有可能的"蝴蝶"或其他我们无法测量的气候系统的微小细节。 这一系列预报为预报员提供了可能的天气预测范围, 以及最有可能发生 的事情。

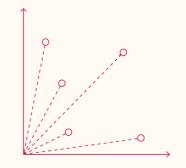


气候与天气不同,它不是混沌的。 记住气候是"平均天气",如果控制气候的大规模因素是已知的——比如 大气的组成、大陆的位置、地球相对于太阳的位置等, 那么就可以预测 气候。

## 气候敏感性模型:

## 建模和精确性

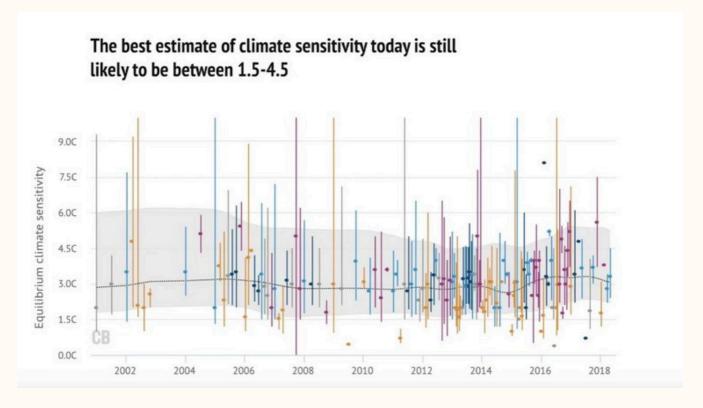
#### 气候敏感性模型是什么?



气候敏感性模型(CSM)是科学家用来理解地球气候如何响应各种因素变化的强大评估模型,主要是温室气体浓度的增加。它们就像虚拟实验室,模拟大气、海洋、陆地和冰层之间复杂的相互作用,以预测未来的气候情景。

#### CSM的关键特点包括:

- 全球规模: 这些模型捕捉整个地球气候系统, 考虑区域变化和相互关 联的过程。
- 数学方程:复杂的方程式代表了影响温度、降水、洋流和其他气候变量的物理、化学和生物过程。
- 参数化:由于计算限制,像云形成这样的小尺度过程是通过称为参数 化的简化算法来表示的。
- 情景:模型在不同的情景下运行,例如变化的温室气体排放率,以预测潜在的未来气候变化。



## 气候敏感性模型:

## 建模和精确性

气候敏感性模型的争议



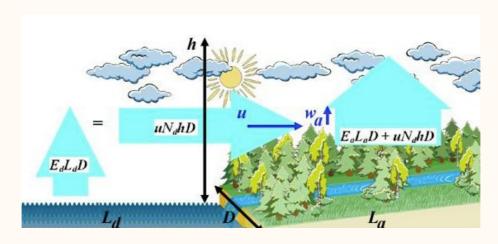
科学家们并不确切知道地球的气候敏感性是多少,但这是一个有用的概念,用来思考我们面临的气候变化风险的范围:如果我们的气候敏感性低,后果会更慢且更易管理;如果气候敏感性高,变化会更快且更严重。根据最新的IPCC报告,我们的气候敏感性很可能在2到5摄氏度(3.6到9华氏度)之间。

确定气候敏感性(CS)之所以困难,是因为有许多因素可以加速或减缓大气温度的上升。主要的因素包括云、海冰和水蒸气。科学家称这些因素为"反馈效应",它们可以使预测地球未来的气候变得更加复杂。

如果没有反馈效应,气候敏感性可能只有1摄氏度。

#### 因此,

- 由于难以准确测量温室气体引起的温度延迟(滞后)增加, CS的准确性并不高。这并不像线性模型那么简单, 尤其是在短期内。
- 量化自然反馈是困难的——因为自然倾向于遵循非线性动态,是"混沌"的,并且对环境敏感。此外,我们并没有完全理解气候行为的所有变量。最近,一项理论提出树木部分负责风的产生,挑战了对气候科学的古典理解。



带有未知变量的建模即便在最好的情况下,即便使用了最复杂的数学和计算,也只是"次优模型"。不知道的东西就是不知道。这就是复杂性科学介入的地方。

资料来源: Climate Sensitivity, MIT, https://climate.mit.edu/explainers/climate-sensitivity Science, https://www.science.org/content/article/controversial-russian-theory-claims-forests-don-t-just-make-rain-they-make-wind

## 复杂性和动态性

## 建模混沌, 建模碳

#### 复杂性科学如何帮助我们了解气候?



复杂性科学没有一个通用的定义。然而,在这个工作的背景下,它指的是复杂性科学的第一学派,定义为:主要是定量的,对高度敏感的变化敏感,表现出非线性和突现行为,并且最好作为一个系统而不仅仅是其部分的总和来理解。

复杂性科学主要用于气候变化科学中的复杂动态模型。

#### 它们的关键特征如下:

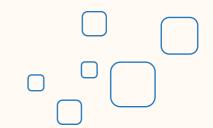
- **非线性:** 与基于线性关系的简单模型不同,复杂动态模型承认系统中的小变化可能有不成比例和不可预测的后果。这使它们对于理解因果关系不直接的系统至关重要。
- **突现行为:**整个系统表现出不能简单地由其各个部分的性质来解释的性质。复杂动态模型旨在捕捉这种由系统内部复杂相互作用产生的突现行为。
- **反馈循环:** 系统中的元素可以相互影响,产生放大或减弱的效果,这可能显著影响系统的行为。这些反馈循环对于理解系统随时间的演变至关重要。
- **高灵敏度:** 复杂系统通常对初始条件和外部影响非常敏感。这意味着 开始时的小变化或来自外部因素的变化可能导致截然不同的结果, 使 得长期预测具有挑战性。

气候复杂动态模型是我们理解地球系统的最佳工具之一, IPCC也使用它们来评估气候风险。IPCC还通过将不同气候复杂动态模型的输出与历史气候数据进行比较来评估它们的性能。这有助于评估模型的可靠性并确定改进领域。



## 复杂性和动态性

## 建模混沌, 建模碳



#### IAM一综合评估模型

什么是综合评估模型(IAMs)?

综合评估模型(IAMs)是一种计算机模型,它结合了社会科学(经济学、人口统计学)和自然科学(气候、地球系统)。

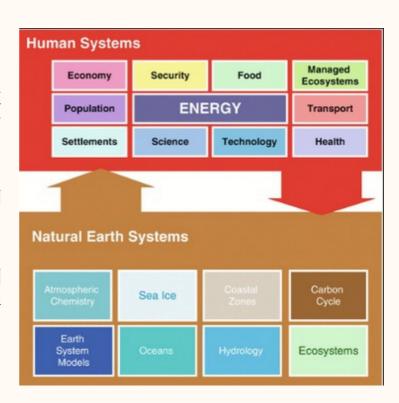
它们探讨人类决策和活动如何影响环境,特别是气候变化。

#### IAMs在气候科学中的应用是什么?

- IAMs帮助评估不同情景对未来气候的影响,考虑不同程度的减缓措施和经济发展水平。
- 它们估计碳的社会成本,即排放一吨二氧化碳的经济成本。
- 政策制定者使用IAM输出来评估潜在的气候政策,并理解经济增长和气候行动之间的权衡。

#### 关于IAMs需要考虑的事情:

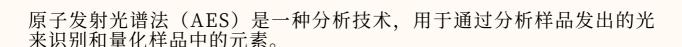
- IAMs依赖于假设,其准确性取决于这些假设在多 大程度上反映了现实。
- 存在不同类型的IAMs, 它们具有不同复杂性和细 节程度。
- IAMs是有价值的工具, 但不是未来的完美预测器,应该承认它们的局限 性。



## 天体生物学和光谱学

## 恒星,碳,以及更多

#### 什么是原子发射光谱?



- 光谱仪将发射的光分离成其组成的波长。
- 每种元素以特定的波长发射光,就像指纹一样。通过识别这些波长,我们可以确定哪些元素存在。
- 在每个波长处光的强度与样品中该元素的量成正比。因此,强度越强,表示元素的浓度越高。

#### AES的一些应用包括:

#### 远程分析天体:

- AES不需要物理收集样品,使其成为研究遥远恒星、行星和星云的理想选择。
- 通过使用配备光谱仪的望远镜分析这些天体发出的光,科学家可以识别存在的元素。

#### 理解恒星演化和宜居性:

- 恒星及其周围环境的元素组成告诉我们它们的形成、演化以及可能容纳具有适宜生命条件的行星的潜力。
- AES有助于识别氢、碳、氧、氮等对生命至关重要的元素。

#### 表征系外行星大气层:

- 当恒星照射在系外行星(太阳系外的行星)上时,部分恒星光会穿过行星的大气层。
- AES可以分析这种透射光中的吸线,揭示系外行星大气层中存在的元素。这有助于评估行星的宜居潜力。



## 天体生物学和光谱学

## 恒星,碳,以及更多

#### 光谱学在气候科学中的应用



光谱学在气候科学中成为一个关键工具可以归于种种原因。以下是光谱 学帮助研究人员理解和监测气候变化的几种方式:

#### 理解温室气体:

- 不同气体在特定波长上吸收和发射光。通过分析大气光谱,科学家可以识别和量化二氧化碳、甲烷和氧化亚氮等温室气体。
- 随着时间的推移监测它们的浓度有助于追踪地球辐射平衡的变化, 以及它们对变暖的贡献。

#### 追踪大气成分:

- 光谱学不仅帮助追踪温室气体,还追踪水蒸气、臭氧和气溶胶等其他大气成分。
- 这些成分通过影响到达地球的太阳辐射量和地球捕获的热量量来影响气候。

#### 遥感:

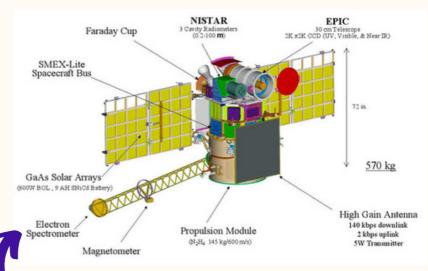
- 光谱仪器可以安装在卫星、飞机或地面站上,用于远程测量大气成分。
- 这允许对大面积区域进行持续监测,为气候模型和全球变化研究提供重要数据。

#### 冰芯分析:

- 古老的冰芯中捕获的空气泡泡包含了冰形成时期的大气气体。
- 对这些泡泡进行光谱分析可以揭示过去的大气成分,为长期气候趋势提供宝贵见解。

#### 理解过去的气候:

- 科学家可以通过分析冰芯或沉积岩中气体的光谱指纹重建过去的大气条件和温度变化。
- 这有助于理解气候的自然变异性,并将其与人类活动引起的变化进行比较。



深空气候观测卫星也会用光谱仪收集关于地球的数据。

## 熵和自由碳

## 速率,尺度,和时间

#### 熵能如何帮助我们了解气候变化?



熵是衡量封闭系统中无序程度的指标。在气候的背景下,熵产生指的是热量从炎热地区向寒冷地区转移。较热的地区失去可用能量,而较冷的地区获得不可用能量。**热力学第二定律规定,封闭系统中的熵永远不会减少**。这意味着地球上的气候系统中的总可用能量总是在减少。

气候变化是由大气中温室气体的增加引起的。这些气体捕获来自太阳的 热量,导致地球变暖。这种变暖扰乱了地球系统的自然能量流动,导致 熵增加。

理解熵的关键在于辐射的波长依赖性:

- 太阳辐射: 高能的短波辐射(可见光和紫外线)在做功方面具有较高的"有序"程度。
- 地球的红外辐射: 低能的长波辐射由于波长较长, 做功的容量较小。

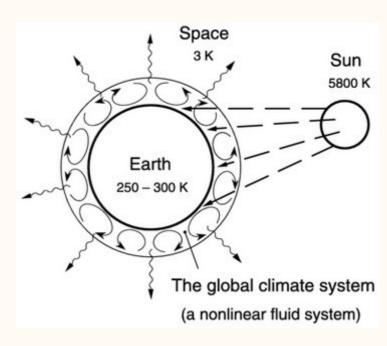
当温室效应捕获部分出射的长 波辐射时,它阻止了这些较不 可用的能量有效逃离地球。这 种捕获的热量导致系统中的 "无序"状态,其中可用能量 (高能入射辐射)并未完全转 化为自由逃逸的低能辐射

#### 附加点:

- 捕获的热量不仅加热了大气, 还加热了海洋。
- 系统中的额外热量进一步扰乱 了自然能量循环模式,如风和 洋流,导致进一步的气候变 化。

• 增加的熵是热力学第二定律的结果,即在封闭系统(如地球)中,熵只能增加或随时间保持不变。

#### 斯特藩-玻尔兹曼定律: $E = \sigma T^4$



## 猛犸象和碳疽

## 联系冻土和甲烷

#### 什么是冻土(Permafrost)?



冻土是土壤、岩石或沉积物在连续两年或更长时间保持在0°C(32°F)以下的一种状态。它主要分布在高纬度地区,如北极和南极,以及高海拔山区。以下是冻土的详细分类:

#### 冻土的类型:

- 连续冻土:这是最广泛的一种类型,冻土层覆盖了全部或大部分地表。它存在于北极最寒冷的地区。
- 不连续冻土:在这种类型中,冻土层只覆盖了部分地表,之间有融化的土地。这存在于比连续冻土区域温度略高的地区。
- 零星冻土: 这种类型有孤立的冻土块散布在景观中, 通常存在于受较温暖夏季温度影响更大的地区。

#### 冻土的形成:

- 冻土形成时, 年平均温度在0°C(32°F)或以下。在这些寒冷条件下, 地面向大气层失去的热量多于从阳光或地热源获得的热量。
- 地面从地表向下冻结, 冻结前沿随着时间的推移不断深入地下。

冻土的深度可以根据以下因素而有很大差异:

- 气温: 更冷的气温会导致更深的冻土。
- 地面覆盖物: 植被和雪的覆盖可以隔热, 减少冻土的深度。
- 土壤类型: 含水量高的土壤倾向于更慢地冻结。

## 猛犸象和碳疽

## 联系冻土和甲烷

气候变暖如何影响冻土?



全球变暖对冻土层构成了主要威胁。随着平均气温的升高, 冻土层从上 至下开始融化。这种融化可能会非常迅速, 尤其是考虑到变暖大气中捕 获的巨大热量。

#### 冻土融化的后果包括:

- 地面沉降: 随着冻土融化, 地面失去了冰冻结构, 可能会发生压实 或下沉。这种沉降可能会损坏建在冻土上的建筑物、道路和其他基 础设施。
- 侵蚀加剧: 融化的冻土削弱了斜坡的稳定性, 导致侵蚀和滑坡加 剧。这可能威胁沿海社区并破坏生态系统。
- 温室气体释放: 冻土层储存了数千年来从植物和动物积累的大量有 机碳。当冻土融化时,微生物分解这些有机物,释放甲烷和二氧化碳等温室气体到大气中。这进一步加速了全球变暖,形成了一个恶 性循环。

由于全球变暖导致的冻土融化,可能会释放休眠的病原体,如炭疽病菌 孢子。

冻土可以通过这些方式封存炭疽病(和其他疾病):

- 炭疽病是由炭疽杆菌引起的一种细菌性疾病。这些细菌可以形成高 度抗性的孢子,能在恶劣环境中休眠数十年甚至数百年。 • 冻土层就像一个天然冰箱,将这些孢子保存在冻结的土壤中很长时

强调炭疽病的原因是,2016年在西伯利亚发生了这样的事件;数千只 驯鹿死于这种疾病,这种疾病在特别温暖的时期导致冻土融化后传播。



资料来源: EPA, https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicatorspermafrost#:~:text=A%20warming%20climate%20has%20brought,many%20locations%20around% 20the%20w orld.

## 猛犸象和碳疽

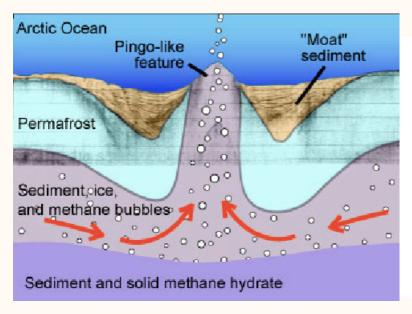
## 联系冻土和甲烷

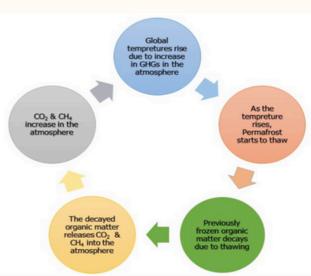


#### 冻土和甲烷之间有什么联系?

冻土-甲烷联系指的是冻土(永久冻结的地面)和甲烷(一种强效温室气体)之间复杂的相互作用。这种关系在气候变化的背景下是一个重大问题,造成了一个加速全球变暖的恶性循环。

- 冻土层充当一个巨大的天然冰箱,储存了数千年来从死亡的植物和动物中积累的大量有机物。在厌氧(无氧)条件下,微生物分解这些有机物,释放甲烷作为副产品。
- 由于全球变暖导致的气温上升正在导致冻土层融化。当这些冻结的 地面融化时,之前冻结的土壤暴露在更温暖的温度和更多的氧气供 应中。
- 温度升高和氧气供应增加的结合为分解有机物的微生物创造了理想的条件。这些微生物以更快的速度产生甲烷,导致从融化的冻土层中甲烷排放显著增加。
- 释放的甲烷作为一种温室气体,捕获大气中的热量,进一步加剧全球变暖。这种变暖反过来又加速了冻土层的融化,创造了一个放大甲烷排放的恶性循环。





资料来源: Earth.org, https://www.nature.com/articles/s41558-022-01512-4

## 辐射强迫:

### 气体之战

#### 什么是辐射强迫?



辐射强迫是气候科学中用来衡量地球大气能量平衡变化的一个概念。它基本上衡量的是,与地球辐射回太空的能量相比,某个因素对地球吸收的太阳辐射量的影响有多大。(可参考熵部分了解辐射强迫对地球整体热力学的影响。)

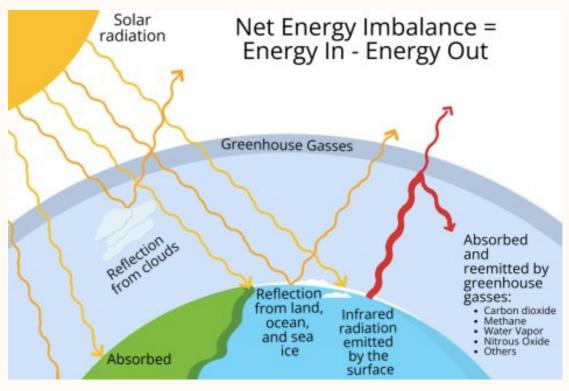
自工业时代以来,温室气体浓度的增加是辐射强迫增加的主要原因,其中二氧化碳(CO2)是最主要的贡献者。此外,甲烷(CH4)、氧化亚氮(N2O)和氯氟烃(CFCs)也有显著贡献。

#### 至于臭氧,

对流层和同温层臭氧的变化对辐射强迫的贡献难以估计,但对流层臭氧的增加可能是自工业时代以来辐射强迫增加的原因之一,而同温层臭氧的减少可能在近年来降低了辐射强迫。

辐射强迫和温室效应的区别在于,无论是通过温室效应导致的变暖,还是通过火山气溶胶导致的冷却,辐射强迫衡量的都是地球经历的能量平衡的总变化(**以每平方米瓦特**[W/ $\mathbf{m}^2$ ]计)。

温室效应是导致正辐射强迫的现象,也就是我们通常所说的"**全球变暖**"。





## YOUNG

SCIENCE WORKING GROUP

## 气候科学速成课

联合国气候变化框架公约青年科学工作组

第一版译制于: 2024年9月