

二氧化碳、温室效应和全球变暖：从Arrhenius和Callendar的开创性工作到今天的地球系统模型

非律·安德森，艾德·霍金斯，汤姆斯·左尼
美国华盛顿自然研究所

摘要：根据最先进的地球系统模型（ESM）的整体平均结果，预计21世纪期间的气候变暖将在1.0到3.7°C之间，具体取决于未来的温室气体排放量。考虑到气候系统的复杂性，这些预测有多可靠？气候研究的早期历史提供了对回答这个问题所需的理解和科学的洞察。我们检查了Svante Arrhenius（1859–1927）和Guy Stewart Callendar（1898–1964）开发的行星能量预算的数学量化，并构建了后者的经验近似值，我们证明它在回顾性预测整个过程中的全球变暖方面是成功的二十世纪的。该近似值随后用于计算21世纪气候变暖对大气温室气体增加的反应，预测温度升高是由一组ESM产生的结果的下限（如政府间专家组的最新评估中所述）气候变化）。这个结果可以解释如下。气候系统在概念上很复杂，但其核心是辐射传输的物理定律。这种基本的或“核心”物理在数学上计算起来相对简单，如Callendar的计算所示，导致基线变暖的定量预测。ESM不仅包括物理核心，还包括气候反馈，这些反馈将不确定性引入预测的幅度，但不包括符号：正（变暖的放大）。因此，ESM对世纪末全球变暖的预测从根本上是值得信赖的：基于众所周知的辐射传输物理学的定量稳健基线变暖，以及由于气候反馈导致的额外变暖。因此，这些预测提供了一个令人信服的案例，即全球气候将继续经历显著变暖，以应对不断向大气排放的二氧化碳和其他温室气体。

关键词：温室效应；全球变暖；地球系统模型

CO₂, the greenhouse effect and global warming: from the pioneering work of Arrhenius and Callendar to today's Earth System Models

Philip R. Anderson^aEd Hawkins, Thomas D. Jones
Institute of Nature Study, Washington, USA

Abstract: Climate warming during the course of the twenty-first century is projected to be between 1.0 and 3.7 °C depending on future greenhouse gas emissions, based on the ensemble-mean results of state-of-the-art Earth System Models (ESMs). Just how reliable are these projections, given the complexity of the climate system? The early history of climate research provides insight into the understanding and science needed to answer this question. We examine the mathematical quantifications of planetary energy budget developed by Svante Arrhenius (1859–1927) and Guy Stewart Callendar (1898–1964) and construct an empirical approximation of the latter, which we show to be successful at retrospectively predicting global warming over the course of the twentieth century. This approximation is then used to calculate warming in response to increasing atmospheric greenhouse gases during the twenty-first century, projecting a temperature increase at the lower bound of results generated by an ensemble of ESMs (as presented in the latest assessment by the Intergovernmental Panel on Climate Change). This result can be interpreted as follows. The climate system is conceptually complex but has at its heart the physical laws of radiative transfer. This basic, or “core” physics is relatively straightforward to compute mathematically, as exemplified by Callendar's calculations, leading to quantitatively robust projections of baseline warming. The ESMs include not only the physical core but also climate feedbacks that introduce uncertainty into the projections in terms of magnitude, but not sign: positive (amplification of warming). As such, the projections of end-of-century global warming by ESMs are fundamentally trustworthy: quantitatively robust baseline warming based on the well-understood physics of radiative transfer, with extra warming due to climate feedbacks. These projections thus provide a compelling case that global climate will continue to undergo significant warming in response to ongoing emissions of CO₂ and other greenhouse gases to the atmosphere.

Keywords: Greenhouse effect, Global warming, Earth System Models

引言:

气候变化是人类面临的重大风险。去年年底在巴黎举行的联合国气候变化大会上, 195个国家就减少二氧化碳和其他温室气体排放的计划达成一致, 旨在将全球气温上升幅度限制在远低于 2°C (相对于工业气候, 这意味着未来的升温不到 1.4°C , 因为到20世纪末温度已经上升了 0.6°C)。通过众所周知的“温室效应”(图1), 二氧化碳与气候变暖之间的联系引起了科学家和政治家以及公众的关注。太阳辐射在很大程度上不受阻碍地穿过大气层, 加热地球表面。反过来, 能量以红外线的形式重新发射, 其中大部分被大气中的二氧化碳和水蒸气吸收, 因此充当了围绕地球的毯子。如果没有这种天然的温室效应, 平均地表温度将骤降到大约 -21°C ,¹比今天经历的 14°C 更不宜人。

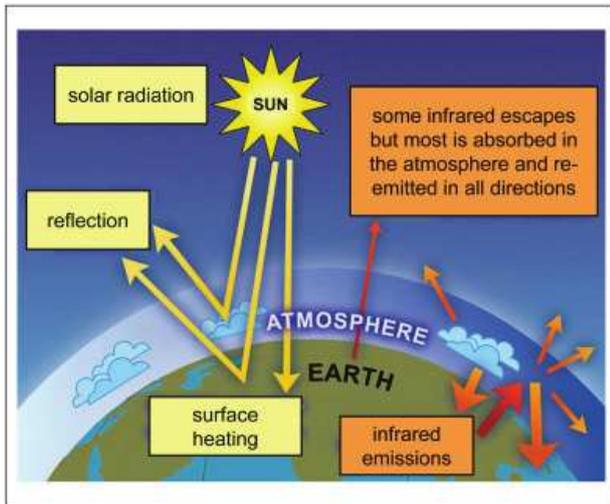


图1. “温室效应”。入射的太阳辐射(黄色箭头)和大气对重新发射的红外辐射的吸收(橙色箭头)之间的辐射平衡驱动表面加热。改编自: IPCC, 2007年气候变化: 物理科学基础。第一工作组对政府间气候变化专门委员会第四次评估报告的贡献(剑桥: 剑桥大学出版社, 2007年), 115。

随着我们燃烧化石燃料, 大气中的二氧化碳浓度逐年增加, 这增强了自然温室效应并使地球变暖。那么, 为了将全球气温上升控制在 2°C 以内, 必须在多大程度上控制二氧化碳排放? 复杂地球系统模型(ESM)的预测为这个问题提供了定量的答案。这些模型在超级计算机上运行, 整合了大气、陆地和海洋中发生的许多过程。根据政府间气候变化专门委员会(IPCC)的数据, 这些模型的最新结果表明, 21世纪期间的温度升高将在 1.0 至 3.7°C 之间, 具体取决于未来温室气体的排放量。²考虑到ESM集合的统计特性和过去观察到的变暖, 对于更

高排放情景, 预计全球温度可能比工业化前时间高 2°C , “可能”定义为概率在66和100%。然而, 在低排放情况下可能会避免这个阈值。我们如何看待这些陈述以及这些预测的可信度如何?

气候系统比上述简单的温室范式复杂得多。系统反馈包括大气和海洋循环的变化(在全球范围内重新分配热量)、冰雪融化(改变反照率: 太阳辐射从地球表面的反射)、植物对二氧化碳的封存、云的数量和类型, 以及改变的大气水蒸气(更温暖的大气含有更多的水)等等。需要包括所有这些过程, 以及相关不确定性的客观量化是有问题的事实,³为错误信息和不和谐提供了一个容易的机会。媒体难以准确地传播气候科学, 在呈现气候变化辩论时往往会强调混乱和不确定性。⁴在某些情况下, 同行评审文献中直接批评了ESM的可信度。例如, Gregor Betz评论说, “甚至不清楚离散模拟是否会产生单独合理或相关的预测。”⁵

在本文中, 我们深入研究了气候科学的历史, 尤其是Svante Arrhenius (1859-1927) 和Guy Stewart Callendar (1898-1964) 的早期行星能量收支“纸笔”模型。⁶Arrhenius主要是对冰河时代的原因感兴趣, 而Callendar因其将变暖与人为燃烧化石燃料(即所谓的“Callendar效应”)联系起来的工作而被人们铭记。⁷这两个模型都说明了辐射的“温室”物理学的作用在没有反馈(水蒸气除外)的情况下, 全球变暖中的转移(大气中辐射通过吸收和散射的通过和衰减)。我们构建了Callendar模型的经验近似值, 并表明它成功地生成了20世纪变暖的回顾性预测。然后使用相同的模型预测到本世纪末的变暖, 并与当今的ESM所做的等效模拟(包括一系列系统反馈)进行比较, 如最新的IPCC评估报告所示。⁸基于此比较, 我们将通过提出ESM对21世纪全球变暖预测的可信度的案例来总结。

一、Arrhenius: 二氧化碳和冰河时代

在18世纪, 早期的地质学家注意到巨大的巨石, 今天被称为“不稳定的”, 散布在欧洲大部分地区, 远远超出了它们起源的阿尔卑斯山脉。他们是怎么到那里的? 诺亚的洪水是一个明显的建议。或者, 也许它们是灾难性火山活动的结果。事实证明, 真正的原因既显著又深刻。Jean de Charpentier是一名采矿工程师, 他在1830年代前往罗纳河谷, 他认为他在那里看到的巨大花岗岩块是由冰川从远方运来的。不久之后, 出生于瑞士的著名博物学家和地质学家路易斯·阿加西斯提出, 在地球历史的前几百万年中, 大冰河时代已经席卷了地球。⁹在欧

洲和北美的大部分地区, 深谷被雕刻在景观中, 南美洲被不断扩大的冰盖和冰川所覆盖, 带着神秘的巨石。毛茸茸的猛犸象、乳齿象和其他野生动物在周边地区游荡, 气温比今天低五度左右。¹⁰

那么, 地球温度变化足以推动冰河时代的原因是什么? 即使在今天, 我们对这个问题也没有一个完整的答案, 这个问题在于了解地球的辐射平衡。故事的一部分是地球轨道的偏差, 即所谓的米兰科维奇循环。¹¹另一个关键因素是大气的成分, 导致了众所周知的“温室”。行星能量收支和温室效应的基本概念由法国科学家约瑟夫·傅立叶在19世纪初首次提出,¹²尽管他在著作中从未提及温室。¹³傅立叶认识到大气对“暗热”(红外辐射)是不透明的, 但他无法确定哪些组件负责。几十年后, 在伦敦工作的爱尔兰物理学家约翰廷德尔根据一系列精心设计的实验室实验, 发现红外线吸收主要是由于二氧化碳和水蒸气造成的。¹⁴大气中CO₂和水蒸气的浓度解释了“地质学家研究揭示的所有气候突变”?¹⁵需要的是定量证明, 将实验工作的结果转化为数学方程。

瑞典人Svante Arrhenius(图2)因其在电解质电导率方面的工作而被人们铭记, 这一研究课题为他赢得了1903年的诺贝尔化学奖。Arrhenius不仅对化学感兴趣, 而且对物理和数学也很感兴趣, 正是这种才能的结合使他获得了也许是他最大的成就: 构建了二氧化碳对行星能量收支影响的定量数学分析, 最终发表了他著名的论文“关于碳酸的影响[空气中的CO₂]与地面温度有关。”¹⁶Arrhenius于1891年在斯德哥尔摩的Högskola接受了物理学讲师的职位, 四年后被任命为物理学教授。他还是斯德哥尔摩物理学会的创始成员, 在他们每两周一次的会议上, 当来自世界各地的科学家们就“宇宙物理学”标题下的一系列主题进行辩论时, 该学会成为了智力活动的环境: 物理学、化学、气象学、地质学、天文学和天体物理学。¹⁷冰河时代及其原因不可避免地成为讨论的热门话题。通过这些会议, Arrhenius与他的同事Arvid Högbom建立了密切的合作关系, Arvid Högbom是一位地质学家, 他对地球的地球化学碳循环感兴趣, 特别是大气中的二氧化碳如何被海洋、陆地上的植被以及形成碳酸盐和硅酸盐通过风化(岩石和矿物通过与环境接触而分解)。¹⁸“在地质时期, [CO₂]供应的增加或减少,” Högbom评论道, “必然导致二氧化碳数量的显著变化。空气中的碳酸。”¹⁹

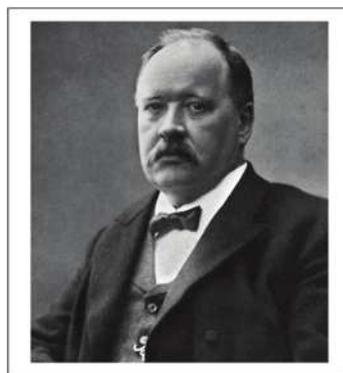


图2. 1909年的Svante Arrhenius。图片来源: Wikimedia Commons。

舞台已经搭建好, Arrhenius继续开发方程式, 以量化大气中二氧化碳的变化幅度, 以使更冷和更暖的气候发生变化, 足以解释冰河时代。计算涉及平衡辐射热收支(从而假设处于平衡状态), 即到达地球表面的太阳辐射(包括来自云层和地球表面的反照率的影响)以及随后由地球吸收重新发射的红外辐射。大气层。计算这种吸收需要在包含CO₂和水蒸气吸收光谱的不同波长上进行积分, 以及在不同天顶角(阳光照射到大气的垂直距离)和与入射和出射相关的相应路径长度进行积分辐射。水蒸气的大气吸收发生在许多波长, 而CO₂的吸收发生在2.7、4.3和15 μm的三个主要波段(图3)。Arrhenius使用美国物理学家Samuel P. Langley在1880年代后期进行的测量来参数化吸收, 取代Tyndall的测量(Langley使用他自己发明的仪器, 辐射热计, 测量满月在不同角度发出的辐射²⁰Arrhenius将地球划分为从70° N到60° S的纬度部分(相隔10度), 并为每个部分分配四个季节的平均表面温度。他为平均云量(0.525)、云反照率(0.55)、雪反照率(0.5-0.78)、海洋反照率(0.075)和表面相对湿度(75-80%)分配了各种参数。这些值是可以接受的, 并且与当今模型中使用的参数化一致。²¹他假设大气中的相对湿度恒定, 从而代表大气在变暖时持有更多水(与红外辐射相关的吸收)的反馈。其他反馈不包括在内。该模型的简单性意味着不可能代表由于大气和海洋循环而导致的热传输变化。云比例保持不变, 陆地、海洋、冰和云对整体反照率的相对贡献也是如此。

Arrhenius研究了六种情景, 其中CO₂分别设定为当时大气水平的0.67、1.0、1.5、2.0、2.5和3.0倍。计算很“乏味”,²²花费了他长达一年的时间。结果: Arrhenius得出结论, 大气中的二氧化碳(现在称为气候敏感性)增加一倍或减半会使地球升温或降温5-6°C。“为了获得冰河时代的温度,”他写道, “空气中的碳酸应该下降到其现

值的0.62 - 0.55 (温度降低4 - 5℃)。”²³事实上,阿伦尼乌斯的对气候敏感性的估计过高,这可能是由于模型中使用了大气吸收光谱。Langley的辐射热计只能在小于3 μm的波长下准确测量,因此在更长的波长上可能会发生过度吸收和相关的表面加热。²⁴尽管如此,Arrhenius成功地提出了大气CO₂变化的原因冰河世纪。

那么,未来的变暖呢?毕竟,阿伦尼乌斯研究了减少和增加二氧化碳对辐射平衡的影响。然而,到目前为止,他和他的同时代人都没有意识到二氧化碳对气候的潜在有害影响。1896年在Högskola演讲时,Arrhenius评论说,根据当时燃烧化石燃料的速度,三千年后二氧化碳将增加一倍。他推测,这将允许“我们的后代……生活在比我们被授予的更温暖的天空和更恶劣的环境中。”²⁵瑞典气象学家Nils Ekholm以类似的方式评论说,如果“目前的坑煤燃烧持续几千年,无疑会引起地球平均温度非常明显的上升。毫无疑问,人类将通过挖掘倾泻出碳酸的深喷泉来增加碳酸的供应……[以及]通过保护硅酸盐的风化层免受空气的影响,并根据植物的生长来控制植物的生长。满足他的需要和目的。因此,人类似乎有可能有效地调节地球未来的气候,从而防止新冰河时代的到来。”²⁶

二、Callendar: 二氧化碳和二十世纪的变暖

工业化的兴起实际上比Arrhenius和Ekholm预期的要快得多。20世纪初,随着铁路将钢铁等原材料运送到现在大部分工作由机器完成的工厂,社会变得城市化,制造业继续快速发展。由于对消费品的需求不断增长,包括电话和汽油动力汽车等新发明,国际贸易正在扩大。然而,直到1930年代盖伊·斯图尔特·卡伦达(图4)出现在现场之前,二氧化碳的故事在很大程度上被遗忘了。Callendar的职业是蒸汽工程师和发明家,是伦敦帝国理工学院杰出物理学教授Hugh Longbourne Callendar的次子。年轻的卡伦达也对气象学产生了浓厚的兴趣,尽管是业余爱好者,但与他的专业同行不相上下。

Callendar凭借他在物理学方面的专业知识,完全熟悉Arrhenius将全球温度变化与大气二氧化碳联系起来计算。基于理论的计算都很好,但卡伦达想要证明。是否有可能从过去几十年的测量中显示变暖和二氧化碳之间的联系?凭借对气象学的兴趣,Callendar着手编制必要的数据库。他从史密森学会出版的大量卷册《世界天气记录》中提取了月平均温度记录。²⁷在调整了数据的不均匀地理分布后,他可以根据全球147个站点估算全球温度。²⁸利用这些信息,Callendar计算出1880年至1930年代后期全球陆地温度升高了约0.3℃。²⁹在此期间的

CO₂测量值并没有达到今天的统一高标准,并且在从内部采集的样本中出现了额外的偏差。城市地区。这些数据分散在许多国家的文献中,卡伦达只选择了那些他认为代表清洁空气的数据,³⁰计算出1880年至1935年间大气中的二氧化碳增加了6%。他说,这种增加与化石的燃烧是一致的。产生约15亿吨二氧化碳的燃料,其中四分之三留在大气中。³¹对冰芯的分析随后证实了卡伦达早期的二氧化碳估计值,³²并且表明他对地球温度的计算结果非常吻合与同一时期的现代估计相吻合。³³

为了正式建立变暖和二氧化碳之间的物理联系,卡伦达试图运用他在物理学方面的专业知识,从第一原理计算地球的热平衡。他着手构建一组类似于Arrhenius的方程,同样基于平衡状态,但有所改进。他使用了Rubens和Aschkinass³⁴的CO₂红外吸收光谱,而不是Langley的测量值。与Arrhenius不同,Callendar的模型将大气划分为多个层,从而代表其与温度、水蒸气和二氧化碳含量有关的垂直结构。水蒸气反馈再次成为唯一代表。与Arrhenius一样,Callendar对大气中不同水平的CO₂进行了计算,并将结果提炼成一张图表(图5a)。根据结果,Callendar认为1880年至1935年的变暖大约有一半是由于二氧化碳的变化。此外,他计算了到20世纪末的温度升高,尽管0.16℃³⁵的结果数字相当低,因为实际变暖约为0.6℃。³⁶然而,差异的原因并不是因为Callendar方程的基本缺陷。相反,他使用了过于保守的大气二氧化碳增加量估计值。此外,他在计算辐射传输时只考虑了二氧化碳和水蒸气,而其他几种温室气体的作用,包括甲烷、一氧化二氮和氯氟烃,现在已经广为人知。化石燃料燃烧过程中释放的气溶胶(微粒)也很重要,因为它们通过阳光的直接反射和云层光学特性的改变而导致冷却。³⁷

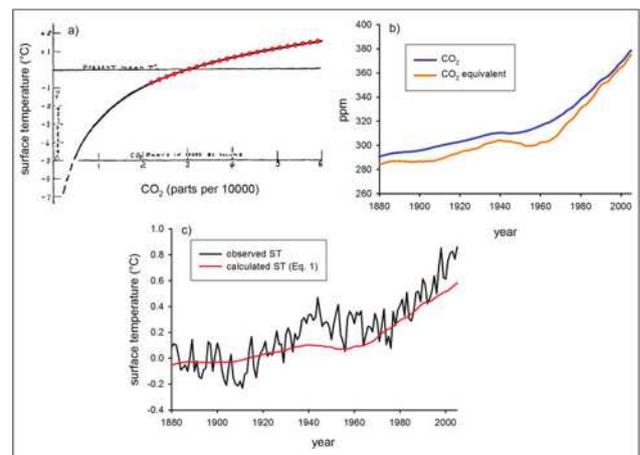


图5.与全球年平均地表气温变化(ΔT)和大气

CO₂相关的Callendar模型及其应用(由我们)用于回顾性预测20世纪的全球变暖:(a) ΔT 与 pCO_2 取自Callendar (1938)的论文, Callendar, “人工生产”(参考文献29)。(要将x轴转换为ppm单位, 请乘以100)。y轴上的零线对应于296 ppm的 pCO_2 (1938年测量)。叠加的是拟合 pCO_2 220 - 600 ppm的非线性回归(红色虚线; 等式(1)); (b) 观测中的全球年平均(去除季节周期) pCO_2 和 pCO_2 当量(“GISS气候模型中的强迫”, 美国国家航空航天局, 26.05.16, <http://data.giss.nasa.gov/modelforce/ghgases>); (c) 在整个20世纪观察到 ΔT 的进展(Colin P. Morice、John J. Kennedy、Nick A. Rayner和Phil D. Jones, “使用观测估计值组合量化全球和区域温度变化的不确定性: The HadCRUT4数据集,” *Journal of Geophysical Research* 117 (2012): D08101, doi: 10.1029/2011JD017187), 基线($\Delta T=0$) 1880 - 1935, 与使用Callendar模型(Eq. (1))强制使用 pCO_2 预测的 ΔT 相比-相等的。由于基线参考期的选择, Callendar模型结果的视觉解释略微复杂。我们选择了1880年到1935年, 就像Callendar一样, 因为这提供了一个简单的视觉演示, 他可能预测了20世纪的气温上升。然而, Callendar的参考期被他的模型中未包括的几次火山爆发冷却, 因此可以选择使用更长的参考期, 例如1900-1999, 这可能更具代表性。E. Hawkins和R. Sutton, “将全球温度变化的气候模型预测与现实世界联系起来”, 美国气象学会公报(印刷中)。

那么, 如果卡伦达尔正确地预测了大气中二氧化碳的增加, 并考虑到其他温室气体和气溶胶, 他会对20世纪的全球气温上升做出什么样的预测呢? 如图5a所示, 可以使用Callendar方程的结果回顾性地进行这种计算。为了做到这一点, 我们得出了对模型的经验拟合(Stephen McIntyre在他的气候审计网站上进行了类似的拟合练习)。³⁸为了预测20世纪的变暖(本节)在21世纪末(下一节), 我们为 $220 \leq pCO_2 \leq 600$ ppm的范围拟合了一个单一指数(包括所有大于工业前值280 ppm的 pCO_2 ; ³⁹ pCO_2 是 CO_2 在空气):

$$\Delta T = 2.28 \ln(pCO_2/100) - 2.50, \quad (1)$$

其中 ΔT 是地球表面温度的变化, 以 $^{\circ}C$ 为单位, 大气 pCO_2 以百万分之几为单位(在Callendar的图表中, 如图5a所示, 以万分之几为单位)。方程式表明, 对于当今大气中的 pCO_2 水平(略高于400 ppm), CO_2 翻倍将导致大约 $1.6^{\circ}C$ 的温度升高(方程式(1); $1.6=2.28 \ln(2)$), 不考虑气候系统中的其他反馈。

温室气体和气溶胶组合对辐射热平衡的影响可以用 CO_2 当量来量化, 这是一个与常见升温潜能值成比例的指标。⁴⁰我们采用了这个指标(图5b), 而不是 pCO_2 (pCO_2 当量是低于 pCO_2 , 因为气溶胶)。使用Callendar模型(方程(1))的经验近似, 预测的20世纪温度升高如图5c所示。请注意, 由于太阳能输出和火山活动导致的供暖自然变化的影响没有被表示出来。二十世纪中叶, 太阳活动略有增加,⁴¹促进了加热, 而火山将气溶胶(微粒)引入平流层导致冷却。⁴²考虑到这些警告, 预计加热的总体增加为 $0.52^{\circ}C$, 即与观察到的 $0.6^{\circ}C$ 的上升(图5c)相比, 有些偏低, 这是Callendar模型(以及我们对它的经验近似)没有考虑放大变暖的气候反馈(水蒸气除外)的结果(见下一节)。尽管如此, 我们得出的结论是, Callendar的模型与现实强迫相结合, 在用于预测20世纪气候变暖时表现得非常好。

和Arrhenius一样, Callendar没有预见到气候变暖的潜在不利影响。相反, 他强调温度升高可能带来的社会效益: 作物产量将增加, 特别是在北纬地区, 另一个致命冰河时代的回归将无限期推迟。⁴³事实上, 直到1950年代中期, 著名漫画家Virgil Partch愉快地描绘了即将到来的“天气革命”和“北方繁荣”(图6)。

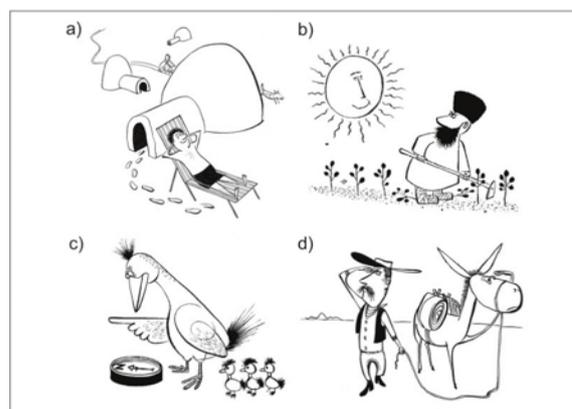


图6.说明气候变暖“好处”的漫画:(a) 北极变暖;(b) 大自然终于对俄罗斯人微笑了;(c) 动物向北迁移;(d) 干旱: 水, 水——但在哪里? 图片来源: William J. Baxter和Virgil Partch今天的天气革命!(纽约: 国际经济研究局, 1953年); William J. Baxter和Virgil Partch, 天气转暖! …北方繁荣(纽约: 国际经济研究局, 1955年)。

三、结论

气候变化的加速速度, 以及人类活动造成的栖息地破碎化, 是构建新地球景观的选择性压力的一部分。

气候变化是温度和降水等参数的持续时间、频率和

强度的多维和同时变化, 会改变地球上的季节和生命。在这种情况下, 适应性可塑性增强的植物物种将能够更好地承受极端天气事件频率的变化。温室气体是推动气候变化的力量之一。然而, CO₂和NO可能有助于维持细胞氧化还原稳态, 调节ROS、GSH、GSNO和SNO的量。

在这份手稿中, 我们总结了支持广谱抗应激分子存在的现有证据, 如植物中的NO, 以应对环境条件的前所未有的变化。未来的研究应侧重于更好地了解温室气体对植物生理的影响。

参考文献:

- [1]Abdelgawad H., Farfan-Vignolo E. R., de Vos D., Asard H. (2015). Elevated CO₂ mitigates drought and temperature-induced oxidative stress differently in grasses and legumes. *Plant Sci.* 231 1 - 10. 10.1016/j.plantsci.2014.11.001
- [2]Apel K., Hirt H. (2004). Reactive oxygen species: metabolism, oxidative stress, and signal transduction. *Annu. Rev. Plant Biol.* 55 373 - 399. 10.1146/annurev.arplant.55.031903.141701
- [3]Asgher M., Per T. S., Anjum S., Khan M., Masood A., Verna S., et al. (2017). "Contribution of glutathione in heavy metal stress tolerance in plants," in *Reactive Oxygen Species and Antioxidant Systems in Plants: Role and Regulation under Abiotic Stress* eds Khan M., Khan N. (Singapore: Springer;) 10.1007/978-981-10-5254-5_12
- [4]Bai X., Yang L., Tian M., Chen J., Shi J., Yang Y., et al. (2011). Nitric oxide enhances desiccation tolerance of recalcitrant *Antiaris toxicaria* seeds via protein S-nitrosylation and carbonylation. *PLoS One* 6:e20714. 10.1371/journal.pone.0020714
- [5]Begara-Morales J. C., Sánchez-Calvo B., Chaki M., Valderrama R., Mata-Pérez C., López-Jaramillo J., et al. (2014). Dual regulation of cytosolic ascorbate peroxidase (APX) by tyrosine nitration and S-nitrosylation. *J. Exp. Bot.* 65 527 - 538. 10.1093/jxb/ert396
- [6]Andrew A. Lacis, Gavin A. Schmidt, David Rind, and Reto A. Ruedy, "Atmospheric CO₂: Principal Control Knob Governing Earth's Temperature," *Science* 330 (2010): 356 - 59.
- [7]IPCC, *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Cambridge: Cambridge University Press, 2013). Warming is specified relative to the reference period, 1986 - 2005, and the figures represent ensemble-mean results of the ESMs.
- [8]D. A. Stainforth, M. R. Allen, E. R. Tredge, and L. A. Smith, "Confidence, Uncertainty and Decision-Support Relevance in Climate Predictions," *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 365 (2007): 2145 - 61.
- [9]Liisa Antilla, "Climate of Scepticism: US Newspaper Coverage of the Science of Climate Change," *Global Environmental Change* 15 (2005): 338 - 52; Maxwell T. Boykoff, "Lost in Translation? United States Television News Coverage of Anthropogenic Climate Change, 1995 - 2004," *Climate Change* 86 (2008): 1 - 11.
- [10]Gregor Betz, "Are Climate Models Credible Worlds? Prospects and Limitations of Possibilistic Climate Prediction," *European Journal for Philosophy of Science* 5 (2015): 191 - 215.