arXiv:2602.03009v2 [econ.TH] 26 Feb 2026

# 运用 OPTiMEM 和热量猜想估算温室气体未来社会成本

Brian Hanley[1*]、Pieter Tans[2], Edward A.G. Schuur[3], Geoffrey Gardiner[4], Steve Keen[5], Adam Smith[6]1*Butterfly Sciences，美国爱达荷州波斯特福尔斯。[2]北极与高山研究所、科罗拉多大学，美国科罗拉多州博尔德。[3]生态系统科学与社会中心、北亚利桑那大学，美国亚利桑那州弗拉格斯塔夫。[4]特许治理学会会士，英国伦敦。[5]战略、韧性与安全研究所、伦敦大学学院，英国。[6]Climate Central，美国新泽西州普林斯顿。

*通讯作者。电子邮箱：brian.hanley@bf-sci.com；

**摘要**

摘要：我们提出了一种基于全新物理学的方法，用于估算碳的社会成本（SCC）。为此，我们开发了海洋热含量物理与时间宏观经济模型（OPTiMEM），用于估算未来热含量（另文发表）。热量猜想假设，天气损害曲线与海洋热量增加随机成比例。我们对碳燃烧进行建模，并依据温室气体（GHG）、温度和海洋热含量（OHC）数据集进行验证。我们表明，4 种温室气体——$CO_2$,$CH_4$, $N_2O$ 和卤代烃——的社会成本不能用单一数值表示，而必须以某种经济相空间来表征。

我们提出发行超长期碳债券，以实现实际贴现。这一做法避开了描述主义与规范主义贴现分歧这一无法解决的戈耳狄俄斯之结。实施这些债券将引入一种新的监测指标：实际美元支出和债券贴现率，并将其与随贴现尺度变化的温室气体社会成本进行比较；此处的贴现与纯时间偏好率（PRTP）无关。

这一热量推测基于 OPTiMEM。OPTiMEM 从化石燃料消耗函数出发，生成 $CO_2$, ，并采用 18 种情景来

提供不确定性范围。我们提供 1 $N$ 1 10, 1 100, : 年度损失风险模型（: : : ），政府、工程师和精算师应该会觉得有用。 1 1000

一项采用DICE系列模型的碳排放和增长假设的情景显示， +18°C将在公元2210年被突破， +110°C将在公元2300年被突破——这两种结果显然都与DICE模型相当乐观的结论不相容。

有人担心，如果各国等待太久，可能没有足够的低成本化石燃料可用于转化为能量投资回报率（EROEI）最高的电力；同时，由于货币价值取决于能源，人们也对低能源投资回报率的电力提出了质疑。

**关键词：** 碳的社会成本、温室气体社会成本、温室气体的社会成本、综合评估模型（IAM）的替代方案、综合评估模型（IAM）、气候风险

# 1 引言

我们提出了一种估算碳的社会成本（SCC）的新方法。在本文中，我们将其作为温室气体的社会成本（SC-GHG）来处理。这是综合评估模型（IAMs）的一种替代方案，由多方合作开发，因为需要此类替代方法来帮助“弥合自然科学家与经济学家之间的鸿沟” [1]。因此，我们开发了OHC 物理与时间宏观经济模型（OPTiMEM）系统，该系统采用基于热量猜想的温室气体社会成本（SC-GHG）方法（另文发表）。*OPTiMEM*并不是对全球各地 局地天气损害的枚举式求和模型。我们展示了各个阶段对数据的拟合结果（配套论文（CMP）： 图31、32、33、34、35、36、41）。然而，熟悉标准社会成本建模方法的经济学家可能会按照局地求和模型的思路进行理解，即采用类似综合评估模型（IAM）的方式，将损害视为局部发生的，并以由微观到宏观的方式将其汇总起来，从而获得每一年的估算值。

实施微观到宏观模型将是一项规模庞大的项目，需要对极高分辨率的全球气候模型（GCM）进行改造，以估算损害。这类工作与 CIRA 和世界天气归因组织的方法类似（CMP： §8.7.1）。我们未采用后一种方法；该方法需要使用贝叶斯方法或类似方法来估算风险。运行高分辨率 GCM 需要超级计算资源，而目前贝叶斯方法尚不可行。我们认为，像 MAGICC + MESMER [2] 这样的系统无法实现具备详细天气模拟能力的地球系统全球气候模型的同等功能，因为最高分辨率的 GCM 模拟局地尺度天气的能力尚存疑问 [3]。准确估算天气损害需要进行局地尺度天气模拟。

除了新的估算方法和对政策的新见解之外，我们还试图让气候科学家和气候经济学家了解彼此如何看待气候。这些观点大不相同，需要变得一致。我们建议阅读配套文章（CMP：），以帮助全面理解我们的 OPTiMEM 系统。

## 1.1 OPTiMEM 气候损害热量猜想社会成本温室气体模型

OPTiMEM 采用单格全球气候模型（GCM）方法，重点关注海洋热量（CMP： §6），并结合 NOAA 天气损害总额，估算四种温室气体（GHG）的社会成本（SC），即 $CO_2$,$CH_4$,$N_2O$ 和卤代烃（含氟气体）（CMP： §8）。*NOAA* 提供了一个专门版本的美国国家海洋和大气管理局十亿美元灾害 [4]，其中包含所有记录在案的天气损害的完整成本数据（CMP： §4）。这预先回应了 Pielke 对该数据集可能提出的已发表批评 [5]。这一 NOAA 天气损害总数据集涵盖 42 年，其中包括降水、风暴活动、海平面、野火和高温事件的变化（CMP： §4.2、§4.7）。因此，气候变化的这些方面及其相关方差都存在于这些数据中。在受多种因素广泛影响的经济数据中寻找相关因素的方法已有悠久历史，也是常见做法 [6–9]。OPTiMEM 的温室气体社会成本估算结果是每个排放年份对应的三维相图，而不是单一数值，因为它们取决于：18 个主要情景的不确定性（图 1）、计算社会成本的时间跨度，以及多年来的实际美元折现率；我们在实际环境中使用超长期债券实施贴现，而债券的回报率会发生变化（CMP： §2）。

我们考察了气候贴现方面的文献，包括用于 DICE 的 Stern 参考[10]资料 [11]，发现相关观点显然并不一致（CMP：§2）。因此，我们设计了一种现实世界的机制，以消除这场争议——一种仿照国库券建立的长期碳债券模型（CMP：§3）。这种债券机制更难引起争议，也有助于明确前进的最佳路径。为考虑贴现率的波动，我们建立了一个 $\pm\ 2\sigma$ 范围，其中标准差（$\sigma$）取自20年期和30年期国库券的历史数据。我们选择了 $2\sigma$，以便从1.57%的平均贴现率出发，达到DICE模型最高达5.1%的贴现率范围（CMP：§3.4）。

情景树（图1）给出了不确定性的范围，共包含18个主要情景（CMP：§6）。这些情景的范围构成了不确定性的边界，如图5所示。风险通过对美国国家海洋和大气管理局天气损害数据集总量中统计方差的投影来处理（图6）。

为完成这项温室气体社会成本估算，我们开发了 OPTiMEM，这是一种基于海洋热含量（OHC）的单网格全球气候模型。该简化模型采用了我们对以下过程的最佳估算：碳消耗产生 $CO_2$ 以及 $CO_2$的消耗；$CH_4$，以及北极永久冻土的释放及其半衰期；$N_2O$ 及其半衰期；含氟气体及其半衰期。以下各阶段：碳转化为 $CO_2$ + 及其他温室气体；温室气体转化为地球能量不平衡（EEI），EEI 转化为温度，温度转化为海洋热含量，均经过经验数据验证（CMP：图 23、31 和 36）。

尽管如此，OPTiMEM OHC气候模型仍包含相当大的复杂性，并采用大气科学的前沿成果以及（在可得情况下）高分辨率全球气候模型的一系列结果，以生成最终转化为温度和热含量的能源失衡值。该模型本身以Maple™ [12]实现，可供使用。模型的各个阶段会生成标准Excel 电子表格文件。Maple™ 的标准数学记法与电子表格输出阶段相结合，使其更便于非程序员使用。

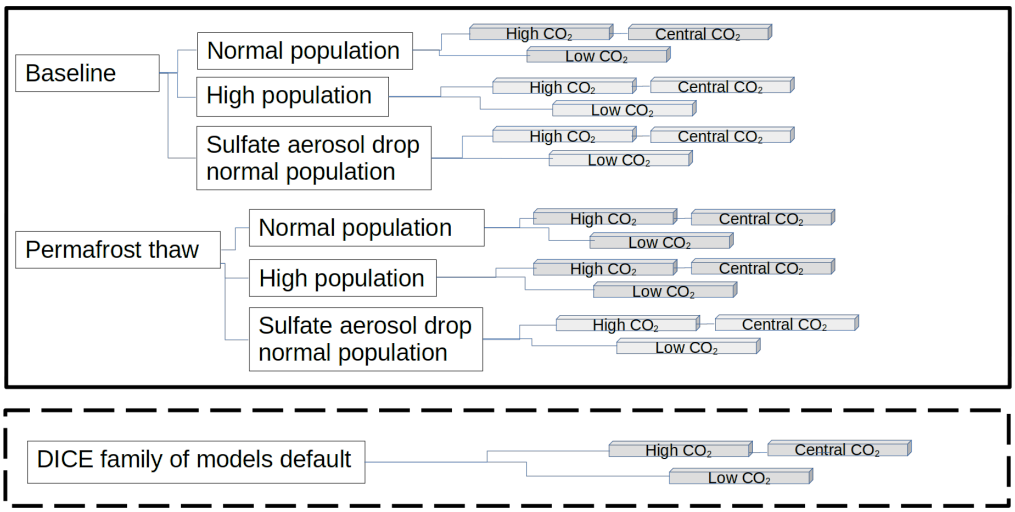


**图 1 情景树，设定了不确定性的范围**。上方实线框显示本研究的 18 个主要情景。（CMP：§6）。下方虚线框显示用于检验 DICE 隐含假设的 DICE系列模型的 3 个情景。

热量猜想的核心在于，将海洋热含量曲线的振幅拟合到全部NOAA天气损害数据集，从而得到有限损害曲线（CMP：§7）。通过检视即可看出这一拟合（CMP：图30、31、32和36）。该方法进而使我们能够根据全部NOAA天气损害数据的方差来计算风险（CMP：§7.3）。这种风险计算是一种基于经验数据的宏观经济统计方法。

为计算损害，我们对热量曲线进行缩放，以通过二分搜索 $R^2$使最小值拟合到一个指数方程；该方程拟合于我们的美国国家海洋和大气管理局天气损害总量数据集（图5）（CMP：§7、§11.2）。这些缩放后的热量曲线用于向前推算至多 1500 年。

一项主要任务是为 $CO_2$ 生产 [13–15](CMP：§6.2.1，方程 11 和图 17）。除了DICE模型情景外，我们采用基于物理的 $CO_2$ 生成情景，以现实的碳燃烧驱动海洋热含量的热方程算法。我们的热猜想 SC-GHG 模型中的 DICE 情景采用这样的假设：经济将以现代历史增长率增长，能源结构与当今相同，主要依靠碳，并假定碳排放持续增长，由经济增长驱动，最长可达 300 年——我们表明这是不可能的（CMP：§6.26 和图 16、21）。为实现这一情景，我们假定有取之不尽的碳来支撑这种增长，因此其碳输入与任何合理的现实世界碳情景都不相联系——这是一种“戴西世界”[16]类型的模型。我们所有其他情景变体（图1）的每一步都以经验现实主义为基础。

我们提供了 Stern [17] 提出的一项需求：据我们所知，气候经济学建模中尚未涉及对风险而非不确定性的估计。在气候和天气的驱动下，损害会随机波动，而平滑的“平均值”曲线无法呈现峰值事件概率。我们认为，提供逐年风险

很重要，这样经济学家、工程师和精算师在制定未来计划时才能获得一定的指导。为此，我们结合现有方法，生成通过直观检视看来合理的风险曲线 §2.3 (CMP: §7.3-7.4 图35、36；§11.9-11.13 )

我们在已有研究的基础上，采用 DICE模型的基本参数，例如贴现率组成部分和 300 年期限，并根据我们的分析进行了修订。我们不试图表达非市场损害，也不涵盖美国国家海洋和大气管理局数据集以外的其他损害。美国国家海洋和大气管理局数据集记录了财产损害，包括已投保和未投保的财产（CMP: §4）。

在每种情景下，我们最多展示 1500 年的成本总额，并分别计算 300 年、500 年和 1500 年跨度的表格（CMP: §13）。300 年是 DICE 的时间跨度。500 年已超过曲线的海洋热含量过渡阶段（CMP: §6.5）。1500 年是我们的最大值。对于每种情景，我们计算 $CO_2$ 消耗的 3 种不同速率。对于每一种 $CO_2$ 消耗速率，我们在表格中采用四种不同的贴现率。表格以 .xlsx 文件形式输出，可作为补充材料获取，也以表格形式呈现（CMP: §13 ）。全部结果范围见等值面图（图 8 ）。

我们并不试图对净零 $CO_2$ 进行建模。我们认为，各国在政治上不可能因能源匮乏而使本国经济崩溃。除化石燃料耗尽（其信号将是价格高企）之外，我们并未看到全球将走向碳净零排放的证据。若无替代，这种下降很可能引发战争。

我们的 OPTiMEM 热猜想 SC-GHG 模型并不完美，气候与经济学中的所有模型皆然——我们只能在既定数据与所选方法的条件下力求做到最好，并尽可能提高其透明度。然而，在 OPTiMEM 热猜想 SC-GHG 体系中，我们回应了下文所总结的对综合评估模型的大部分批评（§1.4）。

## 1.2 社会碳成本的比较史

迄今政府在计算社会碳成本时所接受的峰值为每吨 51 美元[18, p.6]。Nordhaus 在诺贝尔纪念经济学奖演讲中给出的 2050 年数值范围为每吨 105 至 749 美元，前提是 2.5°C 限值 [19, 表1 p. 2005]。其中大多数数字的时间跨度为 100 年和 200 年。我们并不认为这些较短的时间跨度必然有效，其较短期限建立在使用高于我们认为可支持水平的贴现率之上。因此，我们采用更为稳健的碳债券机制，避开贴现率之争。让我们考察文献中所能找到的尽可能完整的时间跨度与方法范围。

碳成本所涵盖的最长时间跨度是 Archer 等人提出的碳的终极成本（UCC），其时间尺度为 10,000-200,000 年。Archer 的 UCC 以 2020年美元表示，范围为 10,000 至 750,000 美元，平均值为 $\approx$100,000美元/吨 $CO_2$（$tCO_2^{-1}$） [20]。Archer 的 UCC 与综合评估模型系列的社会碳成本主要有以下区别：A. UCC 基于物理学；B. UCC 采用零增长、零折现经济。

综合评估模型（IAM）包括 DICE、iGEM、MIND、JAM、ICAM、PAGE、FUND、FaIR 及其相关模型。在 36 个综合评估模型的 578 个社会碳成本（SCC）估值中，Wang 发现了一组有限的相似方程 [21, 表格 1] ，社会碳成本范围为每吨 $CO_2^{-1}$ -13.36 美元至每吨 $CO_2^{-1}$ 2386.91 美元，平均值为 200.57 美元，且 $\sigma = 514.82$。DICE系列模型的社会碳成本

具有实证数据或物理学基础薄弱或缺失的特点。气候科学家才刚刚开始意识到后者可能确实如此。OPTiMEM 的独特之处在于，它以物理学、气候经验数据和实证天气损害为基础。我们的最低范围起点更高，在较长社会碳成本期限下高于 Wang 的估值；当时间跨度超过 150–500 年且贴现率为零或负值时，我们的估值达到或超过 Archer 的数据（见图 8）。我们与 Archer 等人一样，认为我们的模型并非综合评估模型，而是用于估算碳价格；此外，我们也估算其他温室气体的价格。

多种因素将使人们难以甚至无法继续以支持全球文明所需的指数增长速度使用化石燃料。我们认为，OPTi-MEM 的碳消耗曲线主要受供应限制和开采成本上升驱动 [22, 23]。（CMP：§6.2.1）

## 1.3 概念、尺度与历史

气候概念常常被经济学界和公众误解。一种常见的根本性误解是，全球平均气温上升只是一个简单的标量。这种误解体现在一些气候经济学研究中：它们只是将平均气温升幅加到当前天气上 [24, 25]。这些经济学研究的结果汇编于政府间气候变化专门委员会报告 [26, B4.6，第 2009], [27, 页 73]。这种标量观念深刻影响了人们对气候变化影响和风险的误解。更好的理解方式是将其视为一种指数效应，不过这也存在问题，因为：A. 自然界中的指数增长现象都是暂时的；B. 天气系统以及气候基础驱动因素——地球能量不平衡（EEI）会引发随机波动。例如，不宜居温度时段 [28], ，或干旱和洪水影响，都是趋势中的重要随机波动。C. 一种近似最优的温度概念是逻辑斯蒂方程，其具有正、负方差的范围。

### 1.3.1 地球能量不平衡（EEI）

地球能量不平衡是净能量强迫：每平方米瓦特（$m^{-2}$）进入或离开地球。（能源单位是焦耳，瓦特是每秒一焦耳。）随着温室气体上升，地球能量不平衡上升，加速变暖速率。就我们的目的而言，地球能量不平衡是地球一年内每平方米吸收的净能源量。配套文章中的图表显示，热量将增加至大约公元2400年及以后（CMP: §6.5）。此后1500至2000年的热量损失速率取决于温室气体的细节，包括$N_2O$。（CMP: §1.3和§6）。

目前，要将地球能量不平衡恢复平衡 [29]，需要将$CO_2$ 当量温室气体降至358 ppm（1993年水平）。我们强烈反对$CO_2$当量这一概念 [30], ，此处仅将其用作不准确的简写。没有证据表明$CO_2$ 及其他温室气体会在未来3000年内降至这一大致当量。目前，$CO_2$, 、$N_2O$或$CH_4$ 均未出现显著减排，短期内也看不到减排前景，但不切实际的预测是 [31]。卤代气体（含氟气体）的减排仍存疑问。

### 1.3.2 气候与天气的能量

当温室气体汇集更多能源时，我们谈论的是多少能源？1°C的全球大气温度升幅代表着 $\approx 5 \times 10^{21}$ 焦耳的能源。海洋热容量要高得多。在相对较近的时期内，上层海洋可能吸收 $\approx 5 \times 10^{23}$ 焦耳，而海洋总热容量为 $\approx 5 \times 10^{24}$ 焦耳/摄氏度。深海在数千年的时间尺度上缓慢变暖[32, 33]。

这些数字很大，但 $10^{23}$ 焦耳究竟有多少能量？我们将对此进行探讨，以说明温室气体吸收并主要储存在海洋中的能量究竟有多少。平均而言，每年海洋热量中大致相同比例会以天气的形式释放出来，因此，随着海洋热含量能量增加，释放部分的绝对值也会增加。

一枚一百万吨级核弹头的能量为 $\approx 4.18 \times 10^{15}$ 焦耳 [34]。因此，使大气温度升高1°C所需的能量，相当于119万百万吨TNT（MtT）。使上层海洋温度升高1°C所需的能量是其100倍，即 ≈119.6百万百万吨TNT。按每枚核弹头平均 ≈0.250百万吨TNT、共3750枚核弹头计算，大气温度升高1°C所需的能量约为美国核武库总能量的1000倍，而上层海洋所需的能量则是美国核武库的100,000倍。在前面提到的极长时间尺度上，深海的热容量每升高1°C所对应的能量约为美国核武库总能量的100万倍。

思考地球气候涉及的能源时，请记住，在我们的情景中，讨论的变暖幅度范围是从 +2.5°C 到 +5°C（假定古新世—始新世极热事件的上限为 +15°C）。驱动天气的是热能，热量沿温度梯度流动时便会产生天气。在这个尺度上，总热能中极其微小的一部分也极为巨大。因此，我们会看到飓风／台风，而极微小的能量差异也可能造成显著影响。

### 1.3.3 地质气候史——来自地球遥远过去的经验基准目标

考察气候影响的另一种主要方法，是以地质气候史为背景进行比较，因为历史为温室气体排放可能造成的影响提供了叙事性的衡量尺度。正是在地球遥远的历史中，我们发现了与气候变化相关、且与当今时代存在相似之处的灭绝事件类比。

时间上最接近的时期是古新世—始新世极热事件（PETM）（峰值温度升幅为 $\approx +13 \pm 1.5$°C，5500万年前）和上新世（峰值温度 $\approx +5$°C，500万年前）（图2）。如今，始新世$CO_2$的低端（≈500 ppm）还差 $< 100$ ppm，而且我们已稳稳处于上新世中部的$CO_2$ [35][36,图 5] 范围内，当时海平面高出24米，而始新世海平面高出27至60米[37, 38][1]。然而，始新世$CO_2$ 远不足以造成PETM变暖。这表明存在一种未知机制——这应当为我们在损害极端一侧的不确定性提供参考。

[1]Hallam 和 Haq 在 5400万年前的观点出现分歧；Haq 的维尔曲线依据埃克森的地震和生物地层数据，数据采集深度为 60米。

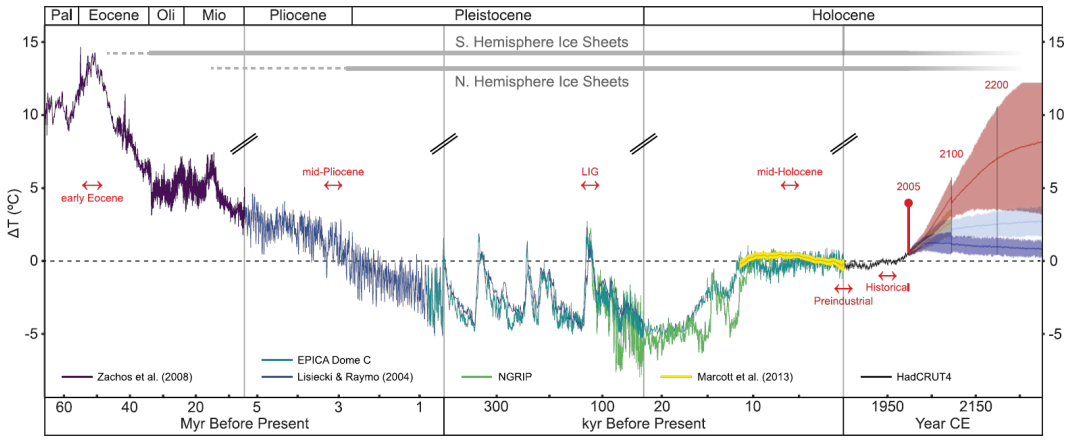


**图2 Burke 等人的图1 2018 [35] 经许可全文连同图注转载** 过去6500万年的温度趋势以及未来气候的潜在地质历史类比。气候系统的六种地质历史状态（红色箭头）被分析为未来气候的潜在类比。为提供背景，它们被置于过去6500万年全球年平均气温的多时间尺度时间序列旁。主要格局包括长期降温趋势，以及由地球轨道变化驱动、周期为 $10^4$ – $10^5$ 年的周期性波动，以及近期和预测的变暖趋势。温度异常相对于1961–1990年全球平均值，并由五项基于代用指标的重建、现代观测以及四条排放路径的未来温度预测合成。Pal，古新世；Mio，中新世；Oli，渐新世。

更久远的时期有早三叠世的两次灭绝事件。第一次发生在二叠纪—三叠纪界线之后的早三叠世格里斯巴赫阶—迪纳尔阶界线，时间尺度较短，约为1000年 [39]。二叠纪末期与早三叠世的这些事件合计导致90%的海洋生物和75%的陆地生物灭绝 [40, 41]。史密斯阶的海洋表面温度处于38°至40°C范围，估计的$CO_2$ 释放速率为 0.953 $GtCO_2$ $yr^{-1}$ [42]。将史密斯阶的$CO_2$ 释放速率与2021年36.3 $GtCO_2$ $yr^{-1}$的排放量相比较。2021年，全球工业文明排放$CO_2$ 的速率达到估计的史密斯阶—三叠纪速率的38倍 [43]，从而导致“全球变暖的显著加速” [44, 45]。

## 1.4 综合评估模型的批判性综述

尽管正确确定碳的社会成本（SCC）的重要性毋庸置疑，且当前方法——包括下文简要概述的 DICE系列综合评估模型（IAMs）——备受批评，但这些模型仍是气候经济学领域有影响力的出版物所依据的唯一基础 [46]，也是目前计算 SCC 唯一公认的方法[2]。综合评估模型的主要问题在于，损害函数是任意选定的，缺乏实证依据，并且依据虚构数据进行校准 [47]，；此外，贴现率争议由以下不同阵营构成：

[2]关于保护公众健康与环境并恢复科学以应对气候危机的行政命令：第5节。检索日期：2022年1月10日

贴现率从 0% 到 [48, 百分点 10],[10, 49] 5.1% [11, 24, 50]（CMP：§2）。

美国国家海洋和大气管理局报告称，经消费者价格指数（CPI）调整后的气象灾害损失为 2017 [4], 3400亿美元，相当于2017年18.3万亿美元国内生产总值的1.86%，当时变暖程度为0.8°C。然而，气候经济学家直到2021年仍在发表估算，认为在变暖幅度最高达3°C的情况下，气候损害仅为国内生产总值的0.2%至2%。 [46, 51, 52]这些估算被纳入政府间气候变化专门委员会的气候报告 [27, 第 73]页。这一事实说明，依赖单一气候经济学建模方法存在问题。

一些经济学家认为，鉴于人们已经使用FaIR [53]和MAGICC [2] （这令人鼓舞），对综合评估模型的批评已是老生常谈，但气候经济学领域建立在综合评估模型的微观到宏观方法之上。尽管MAGICC和FaIR采用了不同的方法，最初且未经修订的DICE仍在使用（参见Nordhaus 2017 [11] Dietz 2021 [46]）。此外，FaIR和MAGICC都没有经过气候经济学这一僵化领域之外的充分检验。DICE本身的修订并未表明其显著偏离1991年调查中的偏见，也没有显示出摆脱其他任何已受批评之处的迹象。将FaIR作为DICE内部使用的模块，可能是积极的做法。MAGICC或许可以与MESMER结合使用，从而提供更好的数据。

综合评估模型（IAM）包括 DICE、iGEM、MIND、JAM、ICAM、PAGE、FUND 及相关模型。Dietz 等人 2021 [46] 延续了忽视几乎所有针对综合评估模型批评的传统，只是表示他们选择不调整“推测性”参数 [54, 第 44], 页，尽管承认他们的估算很可能是下限，这一点我们可以认同。

因此，我们概述有关综合评估模型的批判性文献中的要点。这些模型旨在确定温室气体（GHG）的影响。

1994年，Donella Meadows 在致 William Nordhaus 的一封私人信件中问道：”为什么你的调查样本会如此离谱地偏向经济学家？为什么只有一位生态学家，而生态系统的完整性和适应性才是连接气候与经济的核心纽带？” [55] （见参考文献 [56]）。Keen 呼应了 Meadows 的批评 [25,第 8] ”八位经济学家来自‘经济学的其他分支学科（其主要关注点不在环境经济学）’。这本身就足以说明，他们一开始就不该参与这项专家调查。” Meadows 的信表明，Nordhaus 在 1994 年已充分知晓其调查存在偏差。DICE 将 MERGE 作为基础性引文，其中包括支付意愿（WTP）取国内生产总值的 2% 这一数值；然而，用其作者的话来说，MERGE“高度主观”，并且包含大量警告和限定说明，其中包括摘要 [57, 58,第 17–18、25、28–29]:

Manne 等人1995年的MERGE论文并非基于经验数据。论文采用的估算经过作者谨慎限定，反复提醒读者保持谨慎，并拒绝认可任何结果。（即：”.....气候影响评估仍处于初级阶段。研究人员很快强调了其研究结果的初步性质.....本分析并未试图缩小损害方面的不确定性范围，也不认可任何一组特定的估算值。”接着写道：”考虑到这些警示.....”[58,第 29]页。Manne在1995年的论文中也对Nordhaus的观点作了限定， [59] 称：”如果损害随温度呈二次函数变化.....”[58,第 29]页。

Dietz等人引用的MERGE版本 [46] (Manne和Richels 2005 [57])本质上是Manne的MERGE模型手册[58], , 其中指出该模型没有经验基础 [57, 第 177]页。具体来说，”对于市场损害，我们试图通过假设来概括相关文献：气温上升*2.5°C*会导致高收入国家的国内生产总值损失*0.25%*，低收入国家的损失则为*0.50%*。当温度高于或低于*2.5°C*时，我们方便地假设，市场损失与全球平均气温相对于*2000*年水平的变化成正比。对于非市场损害，*MERGE*基于这样的推测：预期损失会随着气温上升呈二次函数增长。……诚然，这一损失函数的参数具有很大的推测性。”

Stanton等人指出“我们对文献的回顾未发现任何采用二次函数形式的损害函数的经验或理论依据——尽管这种做法在综合评估模型中十分普遍”[3] [61] Stanton进一步解释说，方程中的参数是任意设定的，方程被毫无根据地设为连续函数，而且忽略了对资本存量的损害；损害只作用于生产系统的产出，因而对生产系统从灾害中恢复能力的估计并不现实。Stanton还指出，模型有意忽略世界各地区之间以及不同时期之间的公平问题，尽管气候影响将持续数百年甚至数千年。这些模型还采用了在数学上便于处理、但并不现实的内生技术变革简化假设（即假设不存在旨在推动变革加速的政府政策）。

Weitzman在2010年和2012年也严厉批评了在综合评估模型中使用二次函数。Weitzman提出了这样的问题，”……当我们采用传统的二次损害函数和/或极端气温的薄尾概率分布时，我们对气候变化的经济评估可能会在多大程度上误导我们，”并得出结论：”限制温室气体水平的首要原因，是防范高温导致的灾难性气候风险”[62, 63]。

或许，Pindyck 是综合评估模型最勤勉、最细致的批评者。他延续了 Stanton 和 Weitzman 的观点，但措辞更为强烈，称综合评估模型”……存在如此严重的缺陷，以至于几乎无法作为政策分析工具使用。更糟的是，使用这些模型会让人误以为我们掌握了某种知识并具有某种精确度，而这不过是一种幻象”，并且这些模型”……完全是临时拼凑出来的，没有任何理论或经验基础……” [64]。Pindyck 在 2017 年重申了这一观点：”问题不仅在于这些模型存在“关键缺陷”：基于综合评估模型的气候分析……可能会让政策制定者误以为这些预测……具有某种科学依据” [65]。

2017年，美国国家科学院发布了一份由31名成员组成的委员会撰写的报告，回应上述批评，题为《气候损害估值：更新二氧化碳社会成本估算》 [60]。基于综合评估模型得出的结论，其合理性存在问题。

最近，Keen 等人指出，声称变暖 6°C 会使全球消费减少 1.4%，毫无可信依据；而上述受到批评的二次函数，其唯一校准点（变暖 2.5°C、损害 2%）则抄自 Manne 等人 [47]。2% 的损害比例源自 1995年环境预算所占的百分比，这

[3]二次函数形式的损害函数仍是综合评估模型的基石；2021年（即美国国家科学院报告发布5年后）引用的模型中依然如此[60]”。

混淆了对环境造成的实际损害与美国在1995年愿意支付的金额 [58]。只需将二次函数校准为经过 1995年的 0.5°C 变暖水平和 1995年 2% 的损害率，就会得出变暖 3.5-4°C 时损害达到 100% 的结果；然而，这一缺乏依据的二次函数得出的结果同样存在可信度问题。

然而，我们也认识到 DICE 系列模型年代久远，而且最优方程/算法可能并非一两次，甚至三次尝试就能找到。更为严重的问题包括：为非市场损害所用的单一校准点编造数据、基于很少甚至没有经验数据而任意设定经济损害曲线，以及未能改进这些根本问题。为展示这一问题，我们使用经典 DICE模型的参数运行了 OPTiMEM。我们将预测延伸至 2300年，并假设当前能源结构不变，且经济持续增长，从而推动碳消费。这要求解除 OPTiMEM 对碳供应的限制。这条曲线（CMP： §6.2.6，图 21）由于 DICE 参数的隐含影响，呈现出二次函数形态。

Stern 在 2021年评估了更“现代”的综合评估模型：“……这对综合评估模型的政策相关性有着深远影响：它们没有提供如何解决有关风险和不确定性的关键判断分歧的指导，因为它们只是将这些分歧一概置之不理。”Stern 还认为综合评估模型“缺乏稳健性”：“……问题仍然在于，假设稍有变化，就可能导致估算的社会碳成本出现巨大变化。” [17]。近期有一些努力尝试针对这项批评所指出的问题进行改进，尽管这些尝试建立在 DICE系列社会碳成本模型同样令人担忧的基础之上 [53, 66, 67]。这些基础需要得到全面审视并予以替换。FaIR [68], 或 MAGICC[69] 以及 MESMER [70] 都可用于改进现状，但尚未经过圈外人士的审查。然而，即使在一个更理想的世界里，工具拥有出色的数据和算法，我们仍然需要寻找其他方法进行交叉核验，而且不应指望这些方法来自综合评估模型的设计。

# 2 方法与结果

## 2.1 计算物理学与架构

图 3 展示了 OPTiMEM 的架构，该架构详见CMP： §6，并使用 Maple 编写™ [12]。

我们使用以下数据集来推导部分经济气候损害的经验估计：美国国家海洋和大气管理局完整损害数据，包括所有损失成本 [4] （CMP： §4）、$CO_2$ [71, 72], $N_2O$、$CH_4$, 及痕量气体 [73], 海洋热含量 [74], 通货膨胀 [75],美联储贴现率 [76], 美国 GDP [77], 全球总产值（GWP） [78],美国联邦支出 [79], 美国国防开支 [80], 量化宽松 [81], 以及类似数据。我们采用高于所需精度的数值，以尽量减少多次迭代过程中累积的潜在数值误差：第一阶段采用20位数字，第二阶段采用12位数字。我们对海洋/生物圈/地质吸收$CO_2$ 的估计较为细致；根据Archer对8个气候模型的评估，采用高、调和平均数和低三种吸收量 [82] （图 4 ），从而得到三条$CO_2$排放后留在大气中的长期曲线（剩余曲线）：低值、中心值和高值（CMP： §6.2.2及公式12–14）。

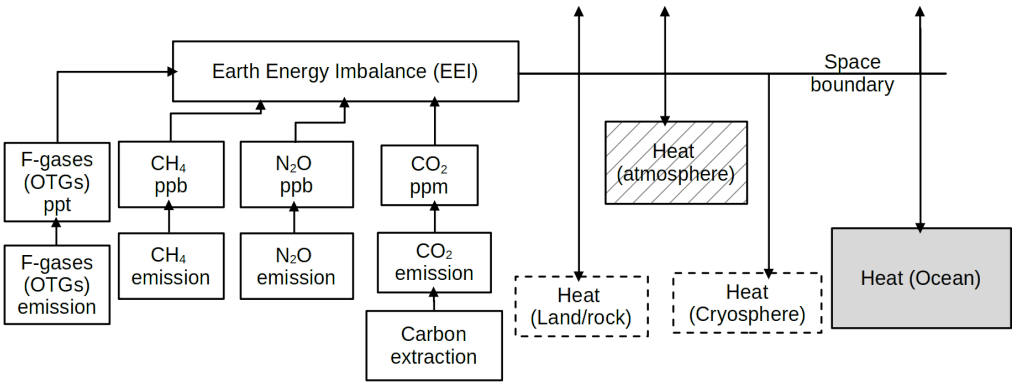


**图 3 OPTiMEM 大气物理示意图**。此图说明了本研究所用的气候模型。阴影标示的海洋热量方框表示 OPTiMEM 中热量的储存位置。该海洋热含量经 von Shuckmann 和美国国家航空航天局的数据集验证，代表与气候/天气相关的行星热能的 88.0%。交叉阴影标示的大气热量方框被建模为与海洋接触的伪表面，不储存占比 0.9% 的大气热量。虚线方框表示陆地和冰冻圈未纳入模型。陆地和冰冻圈的建模难度要大得多，因此本研究未尝试对其进行建模。（CMP：§10.2-10.3，图 44）我们从碳开采限额入手，由此产生 $CO_2$ 排放，并转化为 $CO_2$ 百万分率。OPTiMEM 中氮氧化物并非气候强迫因素。$N_2O$ 由人口和全球总产值（GWP）驱动。甲烷排放采用 $CO_2$ 的历史比例，并加上永久冻土排放（CMP：§6.2.5）。甲烷根据其化学寿命 e 折时间转化为 $CO_2$（CMP：§6.3.2、§11.3 和公式 18）。含氟气体也会参与改变热通量（地球能量不平衡），进而加热陆地、冰、大气和海洋。海洋是迄今最大的热库，也是唯一拥有可用于验证的数据集的热库。因此，我们选用海洋热含量（OHC）作为热量曲线。

所有情景的中心值和低值均落在第六阶段耦合模式比较计划的SSP245温度中心范围内 [83, 84]（CMP： 图24–29的B面板）。高范围情景可能处于SSP585的较低端，超过 +4°C并达到 +5°C（CMP： 图25、26、28、29的B面板）。另请参阅Burke（图 2），其中给出了其对第六阶段耦合模式比较计划推演至公元2300年的预测。随着时间推移，耦合模式比较计划的预测一直略低于经验数据 [85]。这表明我们的建模是合理的。

我们提供基于概率/风险的损害估算方法（在可行的情况下，见第 §2.3节），原因有二：一是政策制定者需要能够判断自己愿意接受多大程度的风险；二是精算师、工程师和城市规划师也需要此类方法。

## 2.2 热量猜想

热量猜想的本质（CMP： §7）是利用一条建立在物理学基础上、直接驱动气候和天气事件的曲线，为气候变化造成的损害提供一条合理曲线。其逻辑在于，在任何给定年份，上层海洋中应有相同比例的热量可用于产生天气——但会受到随机方差的影响。因此，这一比例所代表的海洋热含量规模平均而言应与海洋热含量同步上升。由此，将海洋热含量缩放至符合现有数据，应能像其他可用方法一样，为未来预测提供良好的衡量指标。

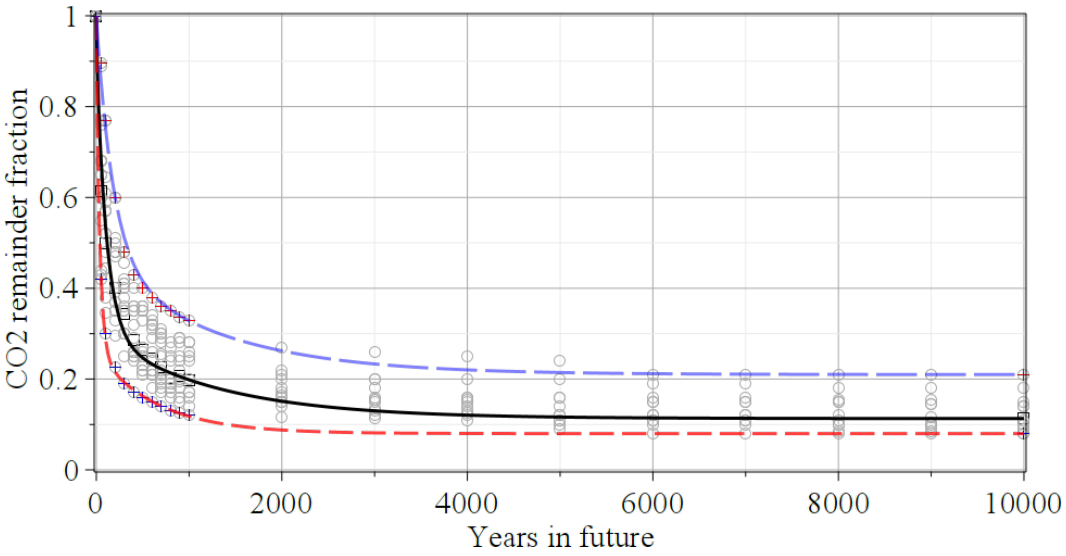


**图 4 按年份拟合至 Archer 的剩余 $CO_2$** [82, 图 1b]。上方蓝色长虚线曲线拟合于 Archer 结果中最高的 $C_{RH}$。中间黑色实线曲线为所有数据 C 的调和平均数$_{RC}$。下方红色短虚线曲线拟合于最低的剩余点 $C_{RL}$。灰色圆点表示按时间间隔从 Archer 数据中采样得到的密度图。上方和下方的叉号分别是上下曲线拟合的校准点。中间方框是为调和平均数计算得到的校准点。这三个 $CO_2$ 剩余方程给出了未来各年的比例。（CMP： §6.21

我们曾考虑过温度曲线，但海洋热含量是天气的主要驱动因素／调节因素 [86–88], ，而且应当继续如此。温度曲线在尚未达到系统平衡时，其升降速度比全球热含量快数世纪。（CMP： §6.5，图24—29；比较 ΔT B 面板与海洋热含量（Q）C 面板，以及 ΔQ 海洋热含量热流 D 面板。另见图45。）因此，使用温度曲线（ΔT）应会高估总体气候变化的迅速程度。更令人担忧的是，依赖 ΔT 曲线将严重低估气候的持续性。同样，温室气体也会在达到平衡之前很久就出现升降。这是因为海洋的热容量极其巨大（§1(c)1.3.2））。还值得注意的是，即使所有温室气体都得到遏制，气候损害也应会经历一段平静期，随后当海洋开始在数世纪内每年释放出巨量能源时，损害便会逐步加剧（CMP： 图15 D 面板及图45）。

因此，海洋热含量结果的曲线范围拟合于美国国家海洋和大气管理局数据的区域，并按图 5 所示进行相应缩放。这些由此得到的天气损害曲线为 OPTiMEM 的热量猜想 SC-温室气体模型的未来预测提供了基础。

### 2.2.1 关于海洋热含量（OHC）的不确定性

在地球能量不平衡条件不变的情况下，OPTiMEM 中海洋热含量的不确定性，严格来说取决于每种温室气体的排放量，以及驱动温室气体排放的各种依存关系。其他一切都是物理学。因此，可以计算不同

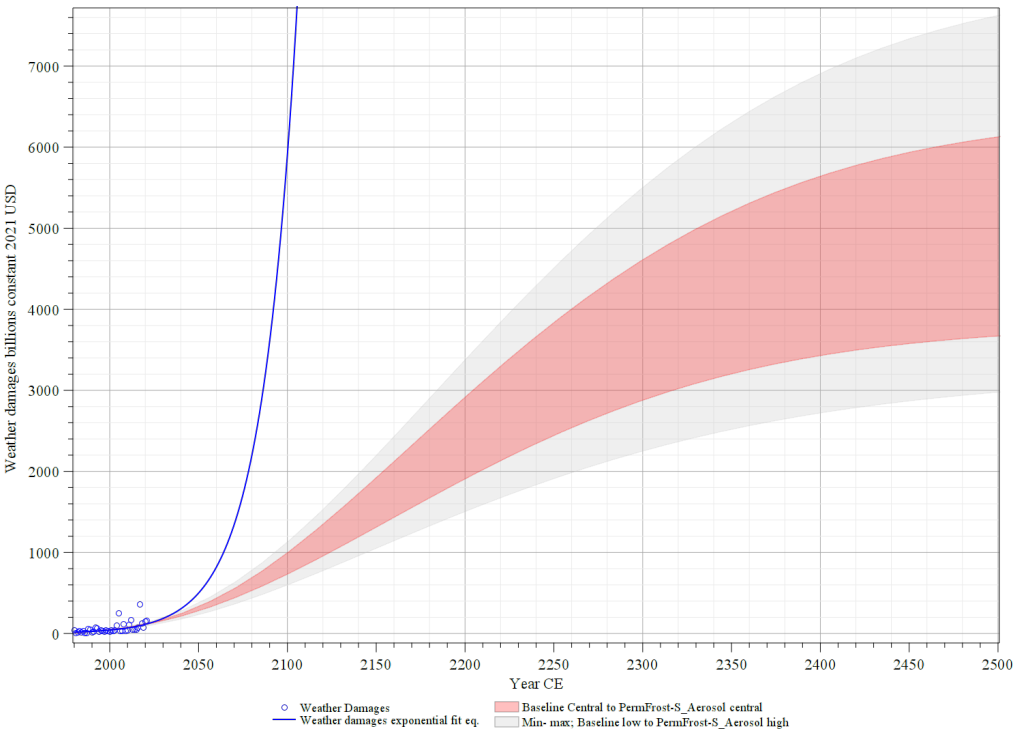


**图5 热量猜想天气损害曲线对不确定性的估计。** 本图是沿表A穿过图7的切片，延伸约475年。蓝色数据点，NOAA天气损害。蓝色曲线是 $WDe(y)$ (CMP: §11.11)对美国国家海洋和大气管理局数据的指数拟合方程的轨迹，用以显示其对缩放后的海洋热含量曲线的拟合。阴影曲线区域为天气损害曲线。浅灰色区域显示从最低到最高情景的外部界限。内部桃色区域显示高、低中心情景。

情景，而唯一存在不确定性的只有气体排放。（我们不考虑大规模火山活动和小行星撞击等黑天鹅事件。）在配套文章中，我们介绍了 OPTiMEM 如何依据现有最佳文献中用于描述每种气体排放的方程来推算排放量（CMP：§6）。

碳建模（CMP：§6.2.1）介绍了根据历史记录拟合的方程，这些方程采用用于预测油井和矿井碳产量的方程形式。这些方程决定了 $CO_2$ 排放。本文定义了三个新方程，用于建模 $CO_2$独特气体行为的不确定性（CMP：§6.2.2、§6.3.1）。本节还介绍了包括永久冻土融化在内的 $CH_4$ 建模（CMP：§6.2.5）。冰融化领域仍在不断变化，建模尚未跟上观测结果（CMP：§9.5）。OPTiMEM 的热量猜想 SC-GHG 模型在氮建模方面显著优于现有模型（CMP：§6.1）。本文采用了考虑氮的最新科学成果[89]。

## 2.3 单年天气损害超过常态的风险

用于 OPTiMEM 热猜想方法的 NOAA 天气损害总数据（$fWD_m(y)$）方程（CMP: §11.2））因年份而异。我们根据与拟合规范曲线的偏差量化风险（CMP: §7.3 和 §11.9）。这些风险曲线用于估算损害达到或超过图表所示水平的异常年份的概率。精算师也可能用这些曲线来估算需要承保的异常年份损失的发生几率。

与基础天气损害的处理方式相同，为生成风险曲线，我们对正标准差点拟合指数曲线。随后，通过二分搜索 $R^2$ 极小值算法对美国国家海洋和大气管理局天气损害范围进行热量曲线拟合，生成的 y 轴标量为 0.3626，且 $R^2 = 0$为 .9563。为求得风险，我们应用切比雪夫定理（CMP: §11.10）得到一个乘数，并将所得曲线加到天气损害上，如图6所示。

图6 展示了单个年份的三个风险等级（$r$）：A. $r = 10\%$ 1:10；B. $r = 1\%$ 1:100；以及 C. $r = 0.1\%$ 1:1000。计算（$k \cdot \sigma$）（CMP: §11.10）可得出 $\sigma$ 每个风险等级对应的乘数（$r$），用于计算未来年份极端天气造成的美元风险。它们分别为：

$(2.236 \times E\sigma(y)) + fWD_m(y)$ 的 $r = 10\%$（1:10）$(7.07 \times E\sigma(y)) + fWD_m(y)$ 的 $r = 1\%$（1:100）$(22.36 \times E\sigma(y)) + fWD_m(y)$ 的 $r = 0.1\%$（1:1000）$Where:\ r = risk\quad r$ 项是切比雪夫方程（CMP：§11.10）的 $k$ 结果$E\sigma(y)$ =方程（CMP：§11.9）$fWD(y)$ =方程（CMP：§11.2）

(1)

我们在图 6 中看到，单年发生 0.1% 风险（千分之一，虚线曲线组 C）似乎非常接近 2025年国内生产总值区域 $\approx 2200 - 2350$ 公元。图 7 中低于 0% 等值线的切片风险未予显示——显然，这些风险可能蔓延至全球经济无法承受的程度。

### 2.3.1 不同时间跨度的风险

图 6 中的风险曲线 A、B 和 C 显示，在任意单个年中，该年的天气损害将达到 $\geq$ 指定曲线的概率。若要将单年风险转换为某一时间跨度内的风险，我们使用下方的公式 2。通常，在考虑风险时，政策制定者或精算师希望了解在某个时间段内（例如 30、50 或 100 年，较少情况下为 1000 年）发生风险的概率。要计算这一概率，请使用公式 2。结果以百分比形式显示在表 1 中，并四舍五入至小数点后两位；这清楚表明，即使是每 1000 个天气年中才发生一次的情况，在按 100 年时间跨度考察时，也具有不可忽视的概率。

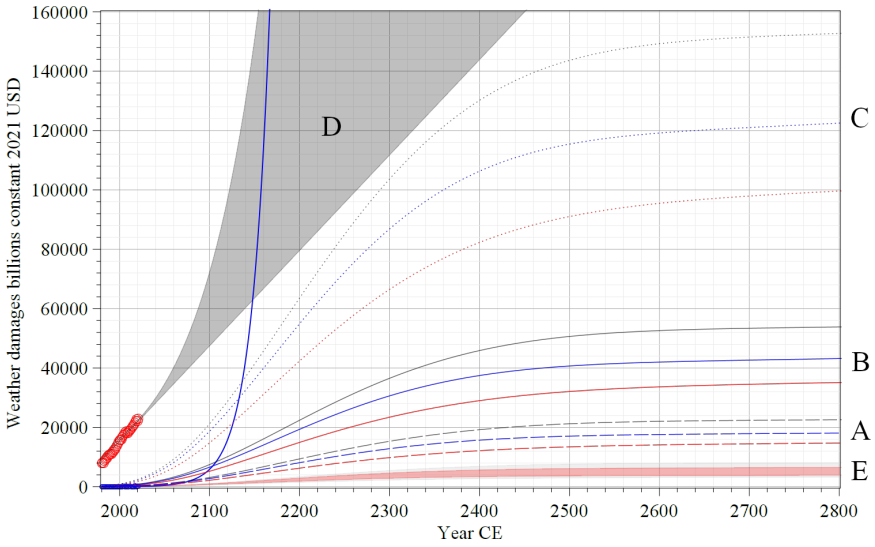


图 **6** $\sigma$ 基于图5不确定性范围的风险曲线。这是穿过表A、横跨图7的一个切片。这些曲线显示任意单一年份异常天气损害相对于预测GDP增长的风险。这些是使用热猜想曲线并加入 $\sigma$ 风险、基于NOAA 数据集得出的预测（式1）。未应用贴现率，也未进行跨年的成本求和。虚线曲线A（最低组）为低、中、高$CO_2$下的1:10年（10%）风险。实线曲线B（中间组）为：低、中、高$CO_2$下的1:100年（1%）风险。点线曲线C（上组）为：低、中、高$CO_2$下的1:1000年（0.1%）风险。灰色阴影区域D显示美国GDP，从较低的线性预测到每年1.48%的较高增长。阴影区域E是图5（以及CMP：§7.2）中详细展示的平均损害预测。红色圆圈是美国GDP的数据点。蓝色实心圆是NOAA天气损害，粗实蓝色指数曲线是最小二乘曲线拟合 $WDe(y)$ 式（CMP：§11.11）（另见图5）。这条蓝色实线被预测到远超其有效区域，该区域最远不超过公元2080年。请注意，较低贴现率的风险曲线可能会触及或越过区域D的上限（未显示）。

**表1** 10年至1500年时间跨度内的罕见天气年份风险：$R_S$。结合图 6中的幅度。第一列为按1年计算的风险。顶部风险右侧显示的是风险计算的时间跨度。

| | 风险计算的年份跨度 | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $r$ | 10 | 30 | 50 | 100 | 300 | 500 | 1000 | 1500 |
| 10.0% | 65.13% | 95.76% | 99.48% | 100.00% | 100.00% | 100.00% | 100.00% | 100.00% |
| 1.0% | 9.56% | 26.03% | 39.50% | 63.40% | 95.10% | 99.34% | 100.00% | 100.00% |
| 0.1% | 1.00% | 2.96% | 4.88% | 9.52% | 25.93% | 39.36% | 63.23% | 77.70% |

$R_S = (1 - (1 - r)^S)$其中：$R_S$ =在年份跨度内发生一个或多个极端年份的概率$r$ = 切比雪夫定理中使用的风险，以及 $0 \leq r \leq 1$ (CMP：§11.9-11.10)$S$ = 年份跨度

(2)

Example: $r = 1\%$, $S = 100$

$$R_S = 1 - (1 - 0.01)^{100}$$
$$R_S = 0.6339 \quad \text{or} \quad 63.4\%$$

## 2.4 未来损失的现值

在计算未来损失时，我们使用碳债券来实施货币时间价值折现率。其概念是，每排放一吨温室气体，就从财政部购买一份债券，期限为监管机构选定的温室气体社会成本期限；或者，直接将相应资金拨给政府，用于减排或能源投资回报率高的零碳能源。我们假设实际应用中的温室气体社会成本最短期限为 300 年，并展示期限从 10 年到 1500 年的图形结果（图 7 、 8 、公式 16 ）。

### 2.4.1 证明损失指数上的风险调整符号必为负（与收益的风险调整相反）

我们从一个项目开始，该项目具有一条**预期**正收入流 $E(t)$，以及一条**实际**正收入流 $A(t)$ [90]。在任意值 $t$ 处（其中 $t$ =时间，$E(t)$ 与 $A(t)$ 相比较）。我们假设 $E(t)$ 和 $A(t)$ 均从相同的初始收入值 $I$ 开始，并分别以不同的速率呈指数增长： $g_E$ （预期增长）和 $g_A$ （实际增长）。预期回报和实际回报为：

$$E(t) = I \cdot e^{(g_E) \cdot t} \qquad A(t) = I \cdot e^{(g_A) \cdot t} \qquad \text{Where: } g_E \text{ and } g_A > 0 \tag{3}$$

这些现金流的折现值会从两个指数中减去一个正值项，即**货币时间价值**， $d_{tvm}$，以反映未来收入的现值低于当期收入的现值。因此，我们有**预期** $E_{tvm}$ 和**实际** $A_{tvm}$ 货币时间价值。

$$E_{tvm}(t) = I \cdot e^{(g_E - d_{tvm}) \cdot t} \quad A_{tvm}(t) = I \cdot e^{(g_A - d_{tvm}) \cdot t} \quad \text{Where: } E_{tvm}(t) > A_{tvm}(t) > 0 \tag{4}$$

接下来，我们来考虑普通现值情形中相关的风险：实际回报低于预期回报。一个未来收入流为正的项目，按货币时间价值计算，其净现值可能为正；但经过风险调整后，净现值可能较低，甚至为负。因此，会对 $E_{tvm}(t)$应用**风险调整率**$d_{rar}$，以涵盖回报低于预期的情况，从而得到 $E_{rar}$。无需对实际回报应用 $d_{rar}$ ，因为实际回报是确定 $d_{rar}$ 正确拟合值的依据。

$$E_{rar}(t) = I \cdot e^{(g_E - d_{tvm} - d_{rar}) \cdot t} \qquad A_{rar}(t) = A_{tvm}(t) = I \cdot e^{(g_A - d_{tvm}) \cdot t} \tag{5}$$

$d_{rar}$ （无法预先知道）的正确拟合值，是使预期流量等于实际流量的值。将其称为 $d_{rarF}$。要计算它，我们只需关注

方程中的增长项5。因此：

$$g_E - d_{tvm} - d_{rarF} = g_A - d_{tvm} \qquad \text{where: } 0 < g_A < g_E \tag{6}$$
$$g_E - d_{rarF} = g_A \tag{7}$$
$$d_{rarF} = g_E - g_A > 0 \tag{8}$$

因此，由于我们是针对 $g_A$ 低于 $g_E$进行风险调整， $d_{rarF}$ 为正，符合预期，也符合标准做法。

现在，让我们考虑一场灾难，它具有一条**预期**负损害流 $D_E$和一条**实际**负损害流 $D_A$。**损失流**（$L$）从相同的初始值 $L < 0$开始。这些损害随时间以速率 $g_E$ 和 $g_A$增长。和之前一样，对两条损失流都应用**货币时间价值**贴现 $d_{tvm}$ ，得到 $D_{E_{tvm}}$ 和 $D_{A_{tvm}}$，因为未来某一日期的损失不如当前的损失令人关切。

$$D_E(t) = L \cdot e^{(g_E)\cdot t} \qquad D_A(t) = L \cdot e^{(g_A)\cdot t} \tag{9}$$
$$D_{E_{tvm}}(t) = L \cdot e^{(g_E - d_{tvm})\cdot t} \qquad D_{A_{tvm}}(t) = L \cdot e^{(g_A - d_{tvm})\cdot t} \tag{10}$$

就未来损失而言，风险在于这些损失将大于预期。因此，我们试图求出一个**风险调整率**的值 $d_{rar}$ ，以计入幅度大于预期损失的真实损失，从而得到 $D_{E_{rar}}$。和之前一样，$d_{rar}$ 仅应用于预期损失，因为 $D_{A_{tvm}}$（$t$）是我们试图匹配的基准：

$$D_{E_{rar}}(t) = L \cdot e^{(g_E - d_{tvm} - d_{rar})\cdot t} \qquad D_{A_{rar}}(t) = D_{A_{tvm}}(t) = L \cdot e^{(g_A - d_{tvm})\cdot t}$$
$$\text{Where: } 0 > D_E(t) > D_A(t) \tag{11}$$

与正收入流的情况一样，我们只关注式11中的增长项。我们再次希望找出 $d_{rar}$（**风险调整率拟合**），即 $d_{rarF}$。

$$g_E - d_{tvm} - d_{rarF} = g_A - d_{tvm} \qquad \text{Where: } g_A < g_E < 0 \tag{12}$$
$$g_E - d_{rarF} = g_A \tag{13}$$
$$d_{rarF} = g_E - g_A < 0 \tag{14}$$

因此，由于**实际**损害的增长率 $g_A$ 高于**预期**损害的增长率 $g_E$，那么 $d_{rarF}$ 将是一个负值。由于这一项是从指数中减去的，因此将风险纳入考量后，总贴现率会降低，而非升高。因此，Stern [10] 和 Dasgupta [91] 主张应采用较低贴现率，看来是正确的；这也支持了 Dasgupta 关于贴现率可能为负的证明 [49, p. 282]。我们还注意到，严重损害可能会降低国内生产总值，而国内生产总值降低是贴现率变为负值的一种机制。这一证明最初以预印本形式发表 [90]。

### 2.4.2 未来损失现值的实现（$PV_{FL}$）

在气候／天气损害的语境下，现值（PV）的概念与通常用于评估未来利润的现值概念有显著区别，后者正是现值最初建立时所要建模的对象。因此，我们将称之为未来损失的现值（$\mathbf{PV_{FL}}$），以强调这一点。这里我们假设，DICE 名义最大贴现率 5.1% [50] 应理解为基准贴现率的风险倍数。我们假设这一基准贴现率为 $d_{MT30yr}$，这是我们能够论证的最高基准贴现率。基于这些假设，我们得出一个风险因子（$r_{DF}$），并用它来构建经修正、以 DICE 为基础的风险调整贴现率 $d_{r_{DICE}}$。由于风险的符号为负（即损害会增大而非减小），因此我们不能乘以 $r_{DF}$该因子，而必须将 $d_{MT30yr}$ 除以 $r_{DF}$。

$$d_{MT30yr} = 1.57\%\ d_{DICE} = 5.1\%\ d_{MFed} = 1.427\% \qquad r_{DF} = \frac{d_{DICE}}{d_{MT30yr}} = 3.2484$$

$$d_{r_{DICE}} = \frac{d_{MT30yr}}{r_{DF}} = 0.4833\%$$ 其中：$d_{MT30yr}$ = 30年期债券经通货膨胀调整后的平均平价实际收益率$d_{DICE}$ = DICE 2016R 名义贴现率$d_{MFed}$ = 经通货膨胀调整后的美联储平均贴现率。$r_{DF}$ = 修正后的 DICE 2016R 风险因子。假设 DICE 贴现率（5.1%）是基准贴现率的风险倍数。$d_{r_{DICE}}$ = 修正后的 DICE 2016R 风险调整贴现率

(15)

在图 7 中，可以看到 $d_{DICE}$ 与修正后的贴现 $d_{rDICE}$ （标签B）对贴现率刻度的影响。$d_{DICE}$ 4% 至 5.1% 的范围位于 $\approx 2$ 高于 1.57% 基准贴现率的标准差范围内（深灰色等值面）。

### 2.4.3 $\mathbf{PV_{FL}}$ 2025年公元天气损害等值面图

本节的重要性体现在两个方面。首先，可以看到温室气体成本的三维相空间。本节也探讨了将碳及其他温室气体的影响计价并纳入经济体系的可行性。这同样适用于碳债券或简单的庇古税[4]。此处我们展示了将碳纳入经济体系进行定价的图示估算，尽管范围仅限于美国。为此，图7等值面图 $PV_{FL}$展示了天气损害造成的影响，并显示贴现率和时间跨度如何影响碳成本总额（相对于2025年国内生产总值）。这些估算涵盖 $PV_{FL}$从公元2025年开始的 $\pm 2\sigma$ 以$\mathbf{d_{MT30yr}}$为中心的贴现率

[4]对从事会给社会造成负面外部效应的活动的私人个人或企业征收庇古税。负面外部效应是指未计入产品市场价格的成本。 [92]

1.57%的贴现率。此前的气候经济分析（例如Dietz的研究） [46], 采用了较高端的4%至5.1%贴现率，以及较短的年份跨度。

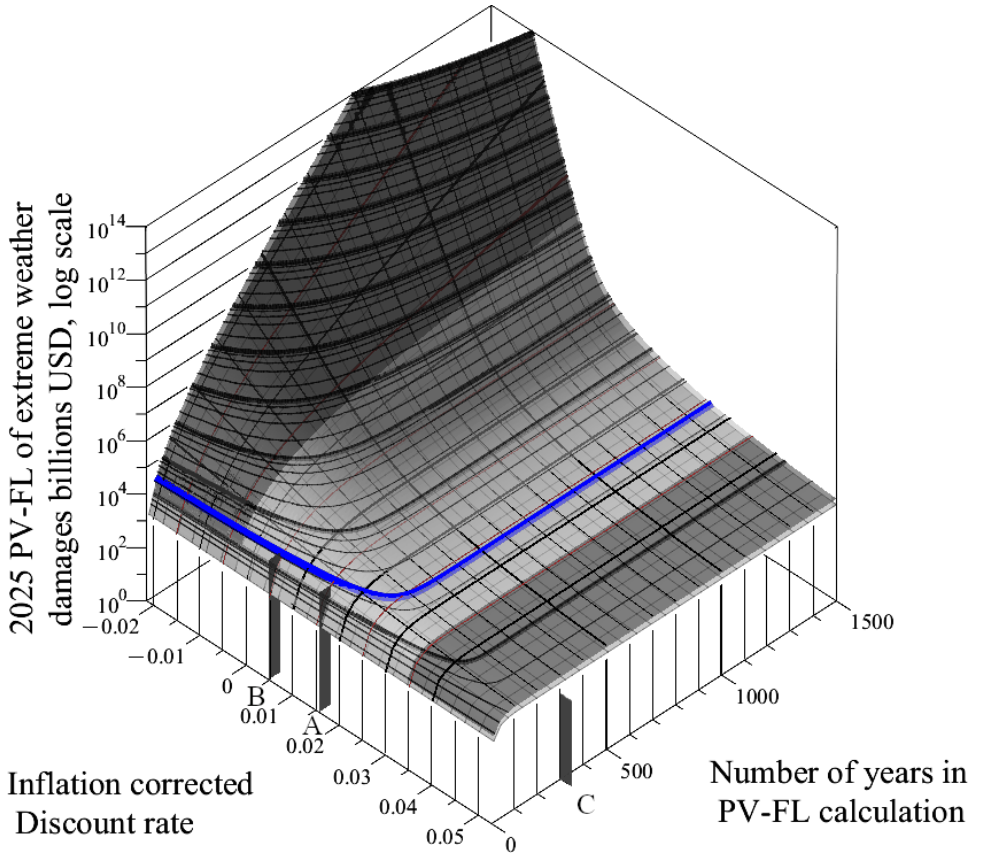


图7 等值面图： $\pm 2\sigma$ 自2025年起天气损害的 $PV_{FL}$ 贴现率映射。表示2025年美国所有温室气体合计的损害总额。x轴刻度改变贴现率。y轴刻度是$\mathrm{PV_{FL}}$ 计算所包含的年数。损失由相关函数（CMP：§11.2）自2025年起向前推算，并按公式16除以贴现率。位于$\mathrm{d^{MT30yr}}$ 1.57%处的垂直标记A是展示 $\sigma$ 波动的中心利率。位于$\mathrm{d^{r_{DICE}}}$ 0.483%贴现处的标签B显示经校正的DICE最大值，并可能是最准确的净值。 $\sigma$ 源自美国30年期国库券实际利率历史（CMP：§3.4）。深灰色标记C是DICE的300 年期限。以表A 1.57%贴现$\mathrm{d^{MT30yr}}$ 为中心的浅灰色区域是 $\pm 1\sigma$的中心。深灰色区域延伸至 $\pm 2\sigma$，并涵盖 +5.1%最大值DICE 2016R模型利率（公式15）以及-2.2%利率。这些外侧 $\pm$ $2\sigma$ 深灰色等值面区段或许难以令人相信，但鉴于能源贫困（§44.1）或财政紧缩与节俭悖论 [93–96]可能在长达数百年的时间里形成，此类利率并非不可想象；而且，如果我们承认5.1%的实际贴现率有可能存在，就应同样接受-2.2%的贴现。后一数值预计会出现在紧缩政策或能源贫困时期，其可能的根本原因是能源可获得性偏低。能源可获得性低的影响很可能是社会崩溃，因为未来损害的增速将超过修复与重建的能力。粗蓝色等高线：2025年估计国内生产总值为24.7万亿美元。次要Z对数刻度等值线分别为前一条主要等值线的2、4、6和8倍。

$$
\begin{aligned}
PV_{FL}(fWD_m, d, k, n) &= \sum_{i=k}^{k+n} \frac{fWD_m(i)}{(1+d)^{i-k}} \cdot G_y \\
\text{Where: } fWD_m &= \text{scenario function (CMP: §11.2)} \\
d &= \text{discount rate} \\
k &= \text{starting year} \\
n &= \text{number of years to sum} \\
G_y &= \text{tonnes of GHG emitted in year } i
\end{aligned}
\tag{16}
$$

图7 是使用上述公式16 针对2025年的$\mathbf{PV_{FL}}$ 并改变年数和贴现率生成的。本图将损害成本与温室气体总量合计。我们从最小年数$\mathbf{PV_{FL}}$ 期限10年开始，对应于$\mathbf{PV_{FL}}$ 成本求和终止年份公元2035年。沿$\mathbf{C}$ 的等值线数值显示300年成本求和，即近似的DICE时段 [19, 24, 46]。最大成本求和时段为自2025年起1500年（公元3525年）。情景函数对未来每一年由全部温室气体活动剩余量修正后的成本进行求和。

等值面的中央浅灰色区域以$\mathbf{d_{MT30yr}}$ 1.57%为中心（CMP:§3.4.），并向标准差（$\pm 1\sigma$）的上下两侧延伸。紧邻中央 $1\sigma$的两侧各有一个深灰色区域，各延伸 $\pm 2\sigma$ 。此处， $\sigma$ 是用作 $d_{MT30yr}$经验基础的美国30年期国库券的标准差。（CMP:§2.4.）

图7 展示了相同的物理世界输入可能导致多么广泛的现实世界成本。在现实世界中，经济状况会有所不同。实际美元贴现率不会保持不变。在大多数情况下，这意味着现实世界的路径会像是在该曲面附近随机游走。高成本区域对应着能源贫困（§44.1）和／或紧缩政策等经济状况，以及紧缩政策带来的节俭悖论 [93–96]。

## 2.5 美国的支付意愿（WTP）

为回应 Pindyck 对综合评估模型属于临时拼凑的批评，以及上文第 §11.4节讨论的 Manne 提出的保留意见，我们从下而上地探讨支付意愿这一概念，取代 Manne 等人 [57, 58] 采用的做法。Manne 等人将 1995年国内生产总值的 2% 作为支付意愿值，DICE 采用了这一数值。1995年，这一占国内生产总值 2% 的数值就是美国的环境支出预算，而 Manne 在其论文中提出了严重的保留意见。这个支付意愿值隐含地声称，对于可能使人类文明脱轨的气候危机，真正的支付意愿应该仅为国内生产总值的 2%。（CMP: §8.8）我们认为这一假设并不合理。

我们得出的结论是，关键在于政府已展现出的支付意愿，即愿意为威胁国家稳定与延续的危机付出代价。如果所需支付金额超出任何支付能力，情况就确实十分严峻。因此，我们选择了相关记录

作为更合适的依据，这些记录反映了美国联邦政府在严重国家紧急状态下的支付意愿。

### 2.5.1 我们的方法：根据历史政府危机支出估算支付意愿

我们通过考察美国政府为应对重大危机拨出的资金，将其视为真实的支付意愿，并据此修正支付意愿。我们采用第二次世界大战期间（1941—1945年）的国防支出增幅[97],朝鲜战争期间（1950—1953年）[80, 1950-1953], 以及伊拉克战争/阿富汗战争期间（2003—2011年）的国防支出增幅[80, 2003-2011]。我们还参考了2008年全球金融危机期间的量化宽松（QE）[81, 2008-2011], 以及COVID-19大流行期间的量化宽松 [81,（2020年）2021],，以及2020年大流行期间的联邦支出 [79]。这些数据为判断从历史角度来看哪些做法切实可行提供了依据。需要注意的是，能源是进行真实货币估值的基础[98, 99], 。结论是，采用我们版本的支付意愿，只要政府将其列为高度优先事项，就应当能获得足够的必要资金。

量化宽松对货币供应量的影响取决于购买的对象。中央银行（CB）从银行购买债券，几乎是净额为零的操作，只会带来少量利润。银行使用中央银行贴现窗口提供的资金从中央银行购买债券，则会扩大货币供应量 [100–102]。中央银行从机构购买不良资产，如果支付的价格高于公允价值，就会扩大（或者可以说维持）货币供应量 [103]。因此，中央银行可以充当事实上的最后贷款人，正如2008年银行业危机期间，为挽救银行体系免于因AIG倒闭而崩溃所采取的做法 [104, 第14-19]页。

**表2** 支付意愿：第二次世界大战后美国应对危机的货币政策规模

| 事件 | 事件 变化百分比 相对于基线 | 事件 占国内生产总值的百分比 |
|---|---|---|
| WW2 | 2914.46% | 29.95% |
| 朝鲜战争 | 240.40% | 35.54% |
| 伊拉克战争/阿富汗战争 | 165.84% | 8.28% |
| 量化宽松银行危机（2008—2011年） | 267.19% | 9.98% |
| 2020年疫情量化宽松 | 192.41% | 17.81% |
| 2020年疫情支出 | 143.61% | 10.25% |
| Mean | | 18.64% |
| 中位数 | | 14.03% |
| 最大值 | | 35.54% |
| 最小值 | | 8.28% |
| $\sigma$ | | 11.55% |

我们认为，为应对表格2 所示挑战而进行的支出，更能合理反映应对气候变化这类危机的能力限制。这种经济支持包括支出、对金融部门的支持以及不良债务核销。这些经济支持形式协同发挥作用，从而提供总额大得多的资金。

用于应对气候变化的联邦支出包括退税、税收扣除、合-同和直接购买商品。退税和扣除会延迟一年

或更久才会发生，从而降低成本。返利和扣除支出都会按照该计划支持的私营部门货币创造总量占比而放大，通常会扩大3至4倍，货币流通速度的提高也会产生放大作用。（不过，现代货币的流通速度相当低 [105, 106]。）政府合同可能持续5至10年或更久，款项通常会在合同期内按里程碑支付。签有合同的公司可以立即获得信贷额度，而政府支出要等到一年或更久之后开始支付进度款时才会发生。只有直接购买商品会立即产生支出。

中央银行可以按指示提供贷款担保，或事实上注销银行的坏账（量化宽松）。正如表格所示 2，量化宽松是一种强大的工具，而且无需政府直接支出。

表格 2 的平均值是 Dietz 等人所示 5.1% 最大值的 3.65 倍 [54,第 44] 页。表格显示的范围为 Dietz 最大值的 1.62 倍至 6.97 倍。Dietz 和大多数气候经济学研究一样，似乎采用了描述主义边际假设（参见 Stern 2007 [10,第 41-54]页）。

### 2.6 温室气体社会成本是每年的多维相空间。

在这个热量猜想模型中，我们计算了每吨排放温室气体的不完全成本，并以实证为基础（图 8）。因此，我们的“社会碳成本”是一组温室气体社会成本，体现了更为复杂的观点。每种温室气体社会成本至少是一个三维相空间，分别对应：SC-$CO_2$,SC-$CH_4$, SC-$N_2O$ 和含氟气体社会成本。

为了计算温室气体社会成本基准，我们根据情景和时间跨度，按照方程（CMP: §11.1-11.8）计算每吨温室气体的成本。这些结果是我们尽最大努力得出的，并通过拟合现有气候数据进行了验证，但未纳入大多数潜在临界点和其他意外因素（CMP: §5）。图8 中的曲面既未包含随机方差风险，也未涵盖所有已知的气候风险。

较大、分辨率更高的单独等值面图见 CMP: §12。温室气体汇总表见 CMP: §13，完整表格则收录于补充资料库中。

## 3 讨论

图8 的一个重要结论与以美国为中心的图7相同。（后者表示2025年所有温室气体排放的实际美元总成本；前者表示2025年排放的每吨温室气体的社会成本。）碳债券的实际美元贴现率对我们应对气候变化所需采取措施的可负担性有重大影响。若实际贴现率为0%（无债券）或为负值，后果可能是灾难性的。标签B中0%贴现率曲线低端的峰值意味着，如果这种情况持续下去，我们所熟知的文明将会崩溃。这意味着社会无力应对不断加剧的损害。

贴现争议无法解决（CMP: §2）。我们的分析必须承认，规定主义观点是正确的 [10, 第41页54], ，其将无风险贴现率设为0%。然而，从基于债券的贴现率视角来看，规定主义与描述主义之争并不重要。我们可以借助债券机制进行贴现，从而斩断戈耳狄俄斯之结。看来，债券机制所实现的贴现率

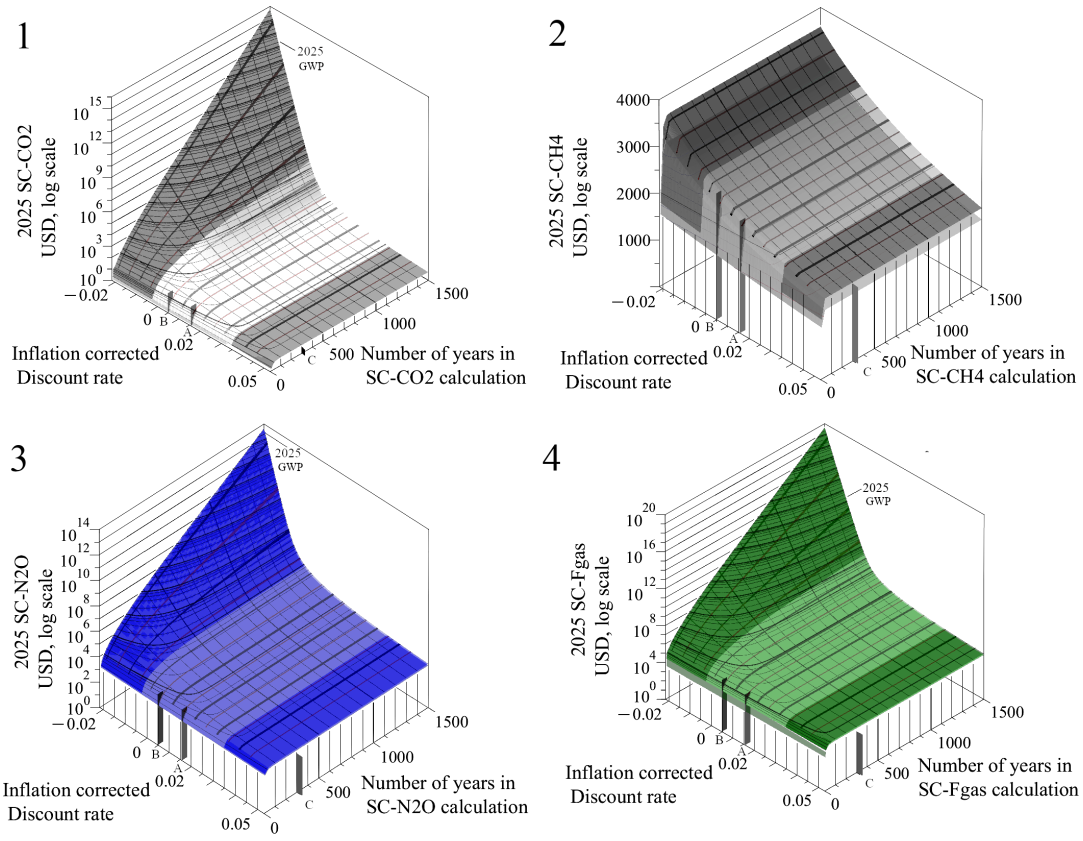


图 8 2025年排放 1 吨各类温室气体的社会成本（SC）。x 轴和 y 轴分别表示实际美元贴现率和纳入计算的年数。贴现率：下方和上方均比表A低/高-$2\sigma$ 至 $+2\sigma$ 。基线低情景与 S-气溶胶高 $CO_2$永久冻土融化情景共同决定等值面的厚度。从左上方开始，图 1 为 SC-$CO_2$, ，图 2 为甲烷社会成本，图 3 为 SC-$N_2O$，图 4 为含氟气体社会成本（卤代气体，主要是氟氯烃）。在此比例下，除图 2 的 SC-CH4 外，等值面的厚度几乎不可见。适用时还列出预测的 2025年全球总产值（GWP）以供参考。贴现尺度标记：表A为碳债券平均贴现率 $d_{MT30yr} = 1.57\%$；表B为贴现率 $d_{rDICE} = 0.483\%$。贴现率范围以表A的 $d_{MT30yr}$ 贴现率为中心，范围为 $\pm 2\sigma$ ；标准差根据对 20 年和 30 年期国库券利率的分析得出。（CMP：§3.4）选择这一 $2\sigma$ 范围，是为了涵盖 DICE模型 5.1% 的标准贴现率范围。假定贴现率固定不变不太现实，因此现实世界相对于该等值面应会沿着一条变动轨迹前进——同时要记住，每一年都有类似这样的相空间图。贴现率以实际美元计。表C为碳债券票据的 300 年名义期限，也是原始 DICE模型的大致时间跨度。Z 轴上的次要对数刻度等值线分别是前一条主要等值线的 2、4、6 和 8 倍。CMP：§12 提供了各类温室气体对应的单独大图。

.

可能是影响最大的因素之一，而且它无疑是我们能够掌控的因素之一。

## 3.1 不确定性包括年份跨度和贴现率

温室气体排放的不确定性在图 5中最为明显，该图是对 1.57% 贴现率的单一切片。在社会成本图表（图 8 & CMP:§12）中则较难看出。图 8 显示了最低和最高预测值之间的范围。然而，只有在图 8-2 (SC-$CH_4$) 中，这一范围才清晰可见，因为 $CH_4$ 的影响非常有限。温室气体排放的不确定性在很大程度上被另外两个因素所掩盖：年份跨度和贴现率。

对温室气体排放当年之后的残余效应进行求和时所涵盖的年份跨度，会对该年的社会成本产生重大影响（图 8），但这取决于贴现率。最大的潜在不确定性在于贴现率。我们将贴现率范围的中心设为经通胀调整的国库券折现率平均值（图 8[表A]），即 1.57%。在表A的两侧，阴影显示 $1\sigma$ （浅色）和 $2\sigma$ 相对于债券均值的偏差（深色）（CMP: §3.4-§3.5）。人类理应能够在很大程度上控制这个最重要的因素——贴现率。

对于OPTiMEM的热猜想温室气体社会成本估算，长期碳债券支付的实际利率越高，对人类的影响就越低。然而，正如图8 所清楚表明的，在表A处1.57%的平均实际美元折现率之上，更高的贴现率会出现回报递减。从积极方面看，这表明债券可以切实可行。另一方面，在标签B的0%贴现以下的负贴现区域，情况会很快变得难以忍受。这应对应于处于能源贫困的国家（§44.1），或带有潜在节俭悖论的紧缩政策[93–96]。这些可能导致各国无法跟上损害，并造成高于理想水平的通货膨胀。

## 3.2 所排放的温室气体并不存在单一的每吨成本

由于OPTiMEM的热猜想 SC-GHG 模型运用经验现实主义从当前时代进行推算，并以18种情景来模拟不确定性，且该不确定性又因年份跨度的选择与实际美元净折现率的相互作用而进一步加剧，我们无法得出单一的碳成本，也必须质疑任何温室气体存在单一社会成本这一概念。

逐年上升的温室气体社会成本数值必然出现，因为全球热含量呈逐年上升趋势，而热量提供了驱动损害的能源。在此基础上，成本还可能因贴现率波动和年份跨度而增加。我们认为，真正的年份跨度可能确实非常漫长 [20]。

## 3.3 $CO_2$ 当量概念存在危险的缺陷

最初，这项建模工作尝试在 OPTi- MEM 中使用 $CO_2$ 当量。但很快就发现这根本行不通，因为 $CO_2$ 具有独特的化学性质。它会溶解到海洋中，而当浓度下降时，海洋又会释放出 $CO_2$ 。$CO_2$ 会被岩石吸收，也会由岩石释放。$CO_2$ 在短期和长期时间尺度上的行为都很独特（图 4 [20]。$CH_4$ 转化为 $CO_2$ 倍的半衰期为 $_2$。其他气体则符合半衰期/$e$倍方程（CMP: §6.3）。鉴于气候问题的长期性，以 $CO_2$ 当量为基础的指标往往会夸大其他温室气体的气候影响，导致人们过度强调 $CH_4$

[30]。很难想象还有哪种气体比 $CO_2$更不适合作为衡量气候损害的当量指标。

因此，我们强烈反对 $CO_2$ 当量这一概念；这里只是因为其他资料也使用它，才将其作为一种不准确的简写。话虽如此，图8 提供了一定的合理比较依据。不过，鉴于成本效益权衡以及各因素对总体问题的相对贡献（CMP： 图 37），即便是这方面也应以更精细的方式加以考察。在当前以及未来一个世纪里，$CO_2$ 都是亟待解决的问题。我们可以持续关注其他温室气体。

例如，$N_2O$ 的每吨社会成本很高。立即优先对工业排放的 $N_2O$ 进行减排显然很有道理，因为这很容易实施，而且确实能为遥远的未来带来相当大的收益。但考虑到氮对农业至关重要，农业减排应谨慎进行。在通过工业减排取得显著成效的同时，我们有充足时间研究 $N_2O$，并弄清应如何应对；或许可以将其与机器人农业和多茬种植的发展结合起来。应针对 $N_2O$ [107, 108]开展安德森海洋卤素臭氧效应的建模研究。

### 3.4 从另一种角度看贴现率对温室气体社会成本的影响

观察图8 时，我们可以提出这样一个问题：“如果没有发行碳债券，会怎样？”从这个角度来看，x 轴上的贴现率可以被理解为展示可能结果的范围。债券是金融领域熟悉的一种机制。不过，国库券会定期发行，所得款项用于满足政府需求，其他中央银行也会这样做。因此，世界各国政府为应对气候变化所进行的投资，可以建模为与我们的碳债券等同。需要注意的是，我们的碳债券期限是国库券最大期限的 10 倍。

从这个角度来看，图7 和8 可以作为指南，帮助判断政府应在真正有效的能源转换上投入多少。关于能源贫困（§4.1）和紧缩政策的观察仍然成立；后者会引发节俭悖论 [93–96]，二者都可能使各国走向 0% 以下的峰值。

## 4 结论

气候经济学与气候科学保持一致至关重要。这两个领域都必须努力相互理解，不能接受彼此无法做到这一点的情况。气候科学不了解气候经济学的方法、指标和目标，而这一点必须改变。气候经济学领域的一些人意识到存在问题，但不确定该如何应对。气候经济学领域不了解气候科学，例如在温度与损害之间并不存在其所假定的直接关系时，仍继续将温度作为标量增加来应用，这一错误绝不能继续下去。我们的建模工作旨在为这两个领域之间搭建一座桥梁，

这两个几乎完全相互割裂的领域。我们希望这座桥梁能够开启迫切需要的教育进程。

气候经济学需要理解碳燃烧、温室气体增加、 ΔT（温度变化）、 ΔQ（海洋热量变化）以及海洋热含量总量（CMP：§6.5 和图 45–46A）。每条曲线都比前一条滞后数十年或数百年。这开启了理解气候损害可能如何出现的过程。这些曲线还显示了净零排放发生后应出现的情况（CMP：图 15 和 45）。理解天气动力学的基本原理，例如降水与风之间的能源比率（CMP：图 41），以及该比率在数量级上明显偏向降雨，有助于直观理解蒸发量的增加。

OPTiMEM 提供了一种计算 $CO_2$,$CH_4$,$N_2O$ 和卤代烃气体社会成本的基础性替代方法。因此，它可以被加入用于此类计算的方法体系中。我们用于估算任何频率下恶劣天气年份风险的方法，也使这一模型同样对精算师和工程师具有价值。总的来说，OPTiMEM 热猜想温室气体社会成本模型更有可能预测较低值，而不是较高值（CMP：§9、§5）。这与科学固有的保守性是一致的 [109–111]。更有可能预测较低值而非较高值，也应源于我们的模型只考虑直接损害这一事实（CMP：§4.4）。

## 4.1 能源是货币估值的基础

气候变化政策应当考虑到，货币价值在很大程度上源于能源。当然，通货膨胀有多种来源，从油价 [112]（这通常支持能源论点）到政治 [113]。然而，剔除通货膨胀之后会发生什么？Jarvis表明能源与经济之间存在密切关系[98]。能源与货币之间的密切关系在直觉上是说得通的。在物理学中，功被定义为力 × 距离（$W = f \times d$），这类似于人力与机器劳动。Jarvis的发现支持将柯布-道格拉斯生产函数（CDPF）修订为基于能源的CDPF（EBCDPF） [99, 第44-45页，公式1。22]。这一EBCDPF可以概括为：资本和劳动利用能源来完成工作，并通过将能源用于生产性用途加以杠杆化。最终产物是国内生产总值，它为国家创造繁荣。

Jarvis 研究发现的含义是：认为我们可以削减 10%、50% 或 90% 的能源使用量（倡导者提到的所有数字），同时简化我们的文明并维持可行经济的想法行不通。这一发现意味着，能源贫困 ⇒ 货币／经济贫困。追求效率和一定程度的节俭几乎没有什么理由不去做——然而，节俭悖论来了 [93–96]。

这一观察对应对气候问题、维持我们熟知的文明有着深远影响。这意味着，能源投资回报率是最关键的指标 [98]。

## 4.2 创建实际美元有效贴现率可能是一项强有力的工具

我们的碳债券为气候贴现建立了一种稳健的现实世界机制。这使人们清楚地看到，这种现实世界贴现对我们应对气候变化的能力究竟有多大影响（图8）。当然，只有当筹集到的资金被用于应对

气候变化时，这种机制才会发挥作用——资金支出必须真正减缓对后代的影响。减缓工作的最大部分，是留下足够稳健的能源生产能力，使人类能够适应将会出现的气候变化的严重影响。气候列车已经驶离车站。

我们的建模结果表明，金融工具（例如我们的碳债券）对于应对气候变化应当至关重要。要求排放者购买碳债券抵消额，可能起到类似碳税的作用。对碳债券采取这种庇古式实施方式，可将未来成本纳入核算，旨在推动自由市场作出改变。当价格远在支付能力范围之内、时间跨度较长且市场稳定时，以这种方式使用碳债券是合理的。然而，随着气候变化加剧，时间跨度会缩短，市场稳定性也可能受到质疑。能源短缺时，支付能力可能成为问题。世界正处于这样一个时间紧迫的时期——要实现 [26, SPM-21] 基准目标，期限仅到2025年公元（或者更现实地说，是2035至2045年，但这意味着要接受重大灾难）。

政策制定者应当认识到，当气候损害变得严重、能源价格高企时，实际美元国内生产总值会因此下降，净贴现率也应为负 [49]，从而大幅提高温室气体社会成本估算（图8）。同样，试图直接在经济体系中为碳定价，本身也会显著拖累实际国内生产总值；不过，如果将相当于这部分拖累的资金用于有效替代化石燃料，或许足以抵消这一影响。

实行紧缩政策或陷入能源贫困会加剧经济衰退，甚至引发衰退。紧缩政策可能通过节俭悖论造成这种后果 [93–96]。能源贫困则会动摇国内生产总值的根基，因为生产以能源为基础（CMP： §1.5.7 & §3.4）。这两种做法都可能迫使净负碳债券利率上升，从而推高温室气体社会成本（图 8），形成自我强化的反馈循环。反过来，这一循环又会反馈至社会，强化可能阻碍减排努力的社会政治因素 [114]。要避免基于物理规律的衰退循环，就必须同步提升能源容量，并提供足够资金，至少跟上损害的增长，确保人口有工作，并能维持生活水平。如此才能为商品和服务实体经济的增长奠定基础 [98, 99]，，安定社会。

## 4.3 碳债券应当用于低成本核能

我们建议，碳债券应为以能源投资回报率最高的能源生产形式取代化石燃料提供资金，而采用核电技术显然能够做到这一点[115, 116]。如果拥有可靠的高能源投资回报率基础，能够提供廉价、充足的能源，那么或许可以维持一个百分之百的合成烃循环（CMP： §6.1.2）。我们并非要暗示不应推进电气化，但合成烃的能量密度难以匹敌，在许多工业场景中也难以替代。

政策制定者可以开始追踪用于气候减缓的资金数额、为此发行的债券所对应的净实际美元贴现率，以及这笔支出在减缓温室气体方面的能源投资回报率和整个供应链的有效性。随后，可以将这些数据与每年应分配用于支付各类温室气体排放成本的债券金额进行比较。还应追踪支持

国内生产总值的能源容量。这些数据合在一起，可为衡量气候减缓措施的有效性提供一项指标。

## 4.4 一些低能源方案所隐含的长期安全隐忧

目前提出的低能源未来方案令人担忧，[117, 118], 因为它们会严重削弱采纳这些方案的国家，使不走低能源道路的国家得以主导未来——道德劝说无法主导现实政治。美国的情况尤其如此，美元在国际贸易结算中的近乎垄断地位正在削弱 [119, 120]。因此，坚决避免使用昂贵的低能量投资回报率能源，以免加重这一负担，是恰当的。

## 4.5 是否有足够的低成本化石燃料能源，可用于所需的大规模发电设施建设?

在为基准情景估算化石燃料生产极限的过程中，我们发现一种真实的可能性：美国乃至整个世界可能没有足够的低成本能源 [23] 来建设所需的高能量投资回报率发电设施，同时维持生活水平。化石燃料的能源投资回报率已经在下降，这正限制着其利用 [121, 图 5, 6], ，而世界可能已接近这一极限，足以对化石燃料 [122] 施加硬性限制。与此同时，我们在全球经济直接能源需求的基础上，又增加了开发低能量投资回报率能源的负担，而世界需要的是高能量投资回报率能源的替代能源。因此，转向核能显然别无选择。

制定有效政策的紧迫性远高于普遍认知。我们基本同意 Yang 等人 [67] 关于减缓可能要求的判断，但需要指出的是，实际要求很可能更高，而且必要的材料可能无法获得 [123]。各国需要尽可能迅速地切实面对替代化石燃料的问题——迄今为止，国际社会的应对就像波将金村一样虚有其表。补充下面这段引文，还可以指出，无论是否出于无心，为“较不光鲜的一面”提供支持，都可能成为一份收入丰厚的学术事业。

> “国家协调这枚硬币有两面：一面是讨论、会议、声明和承诺；另一面则是不那么光鲜的一面——背信弃义、欺骗以及狡猾的投机取巧。”——Lane 2015 [124]

## 4.6 乐观的理由

我们有理由保持乐观。最关键的是，美国政府应对这一挑战的能力，进而说，发达国家的能力，似乎都相当充足，前提是政治意愿能在低能源经济状况出现之前显现出来——能源成本高昂正是这种状况的信号。其次，只要化石燃料成本保持在合理范围内，建设所需的核能转换设施的成本应该是可以承受的 [125]。成功转型需要达到战时水平的支出，并消除官僚障碍。世界将

变得越来越难以居住。然而我们认为，只要采取正确的行动，文明就能够存续并繁荣发展。

**补充信息**。 本文有一篇配套文章（CMP:）可在 Arxiv 上查阅。情景输出可在 Figshare 上获取 https://doi.org/110.6084/m9.figshare.31072156 代码和数据集可按需索取。

**致谢**。 我们谨此感谢 Darrel Duffie 建议使用债券来实现贴现；感谢 Tim Garrett、Martin Mlynczak、Philip Klotzbach 和 James W. B. Rae 提供数据集、天气参考资料和指导；感谢 David Archer 提供碳模型方面的指导；感谢 Gail Tverberg 就精算极限进行讨论；感谢 J. Paul Kelleher 和 Partha Dasgupta 就 PRTP 提供意见；并感谢参与调查的受访者。

## 声明

- 资助 本研究未获得外部资助。
- 竞争利益 作者声明不存在竞争利益。
- 伦理批准和参与同意 不适用
- 发表同意 不适用
- 数据可用性
- 材料可用性 不适用
- 代码可用性
- 作者贡献 Brian P. Hanley 在一份先前手稿相关工作的启发下提出了这一方法，并担任第一作者。Pieter Tans 共同撰写了本文，并为气候模型和手稿提供了宝贵的指导、反馈和编辑意见。Edward Schuur 为热猜想 SC-GHG 模型中的永久冻土融化部分提供了宝贵的指导、反馈和编辑意见。Geoffrey Gardiner 为 300年期债券概念在现实世界中的运作奠定了基础。Steve Keen 提供了风险符号的数学证明，并提出了批评意见。Adam Smith 参与了全文撰写，指导了天气损害数据集的使用，并协助改进供本手稿使用的 NOAA 数据集。

## 参考文献

[1]Lenton, T., Ciscar, J.-C.：《将临界点整合进气候影响评估》。《气候变化》**117**(3), 585–597（2013年）https://doi.org/10.1007/s10584-012-0572-8[2] Beusch, L., Nicholls, Z., Gudmundsson, L., Hauser, M., Meinshausen, M., Seneviratne, S.I.：《从排放情景到空间分辨投影：通过计算高效模拟器链实现（MAGICC v7.5.1 与 MESMER v0.8.3 的耦合）》。《地球科学模型开发》**15**(5), 2085–2103（2022年）https://doi.org/10.5194/gmd-15-2085-2022

[3]Bjarke, N.R., Livneh, B., Barsugli, J.J., Pendergrass, A.G., Small, E.E.：《评估高分辨率全球气候模式及观测中美国西部本土地区的大风暴主导性》。Earth's Future12(6),2023–004289（2024年）
https://doi.org/10.1029/2023EF004289https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2023EF004289.e2023EF004289
2023EF004289

[4]美国国家环境信息中心：美国十亿美元级天气与气候灾害（2021年）。美国国家海洋和大气管理局国家环境信息中心（美国国家环境信息中心）（2018年）https://doi. org/10.25921/stkw-7w73 。美国国家海洋和大气管理局提供了一个包含全部天气损害的特殊版本。这并非公开可得的十亿美元级粒度数据集。[5] Pielke, R.：科学诚信与美国"十亿美元级灾害"。npj Natural Hazards 1(12)（2024年）https://doi.org/10.1038/s44304-024-00011-0[6]Lee, M.R.：人口增长、经济不平等与凶杀。Deviant Behavior 22(6)，491–516（2001年）https://doi.org/10.1080/016396201753227709 https://doi.org/10.1080/016396201753227709[7] Burke, M.B.、Miguel, E.、Satyanath, S.、Dykema, J.A.、Lobell, D.B.：变暖增加非洲内战的风险。美国国家科学院院刊 106(49)，20670–20674（2009年）https://doi.org/10.1073/pnas.0907998106 https://www.pnas.org/doi/pdf/10.1073/pnas.0907998106[8] Burke, M.、Hsiang, S.M.、Miguel, E.：温度对经济产出的全球非线性效应。Nature 527(7577)，235–239（2015年）https://doi.org/10. 1038/nature15725[9] Mirza, M.U.、Xu, C.、Bavel, B.、Nes, E.H.、Scheffer, M.：遥感观测到的全球不平等。美国国家科学院院刊 118(18)，1919913118（2021年）https://doi.org/10.1073/pnas.1919913118 https://www.pnas.org/doi/pdf/10.1073/pnas.1919913118[10] N. Stern：气候变化经济学：斯特恩报告 / Nicholas Stern。剑桥：剑桥大学出版社，英国剑桥（2007年）[11]Nordhaus, W.D.：重新审视碳的社会成本。美国国家科学院院刊 114(7)，1518–1523（2017年）https://doi.org/10.1073/pnas.1609244114 https://www.pnas.org/doi/pdf/10.1073/pnas.1609244114[12]Maplesoft：Maple 2022，安大略省滑铁卢。https://www.maplesoft.com/（2022年）[13] Tans, P.：对观测到的海洋与大气$CO_2$ 增加的核算以及对未来的展望。海洋学 22(4)，26–35（2009年）https:

//doi.org/10.5670/oceanog.2009.94

[14]Garrett，T.J.：全球经济的长期演化：1. 物理基础。Earth's Future2（3），127–151（2014年）
https://doi.org/10.1002/2013EF000171https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/2013EF000171

[15] Malanichev，A.：美国页岩油生产的技术效率的限度。Foresightand STI Governance **12(4)**，78–89（2018年）

[16]Watson，A.J.，Lovelock，J.E.：全球环境的生物稳态：戴西世界寓言。TellusB：化学与物理气象学 **35(4)**，284–289（1983）
https://doi.org/10.3402/tellusb.v35i4.14616https://doi.org/10.3402/tellusb.v35i4.14616

[17] N. Stern，Stiglitz，J.E.，Taylor，C.：巨大风险、紧急行动与激进变革的经济学：迈向气候变化经济学的新方法。美国国家经济研究局**工作论文28472**（2021年）

[18]美国政府-拜登政府：技术支持文件：碳、甲烷和一氧化二氮的社会成本。技术报告，白宫–机构间工作组（2021年2月）。
h
t
tps://
www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2021/02/TechnicalSupportDocument_
SocialCostofCarbonMethaneNitrousOxide.pdf[19] Nordhaus，W.：气候变化：经济学的终极挑战。《美国经济评论》 **109**（6），1991–2014（2019年）
https://doi.org/10.1257/aer.109.6.1991[20] Archer, D.，Kite，E.，Lusk，G.：碳的终极成本。《气候变化》**162**（4）（2020年）
https://doi.org/10.1007/s10584-020-02785-4[21] Wang，P.，Deng，X.，Zhou，H.，Yu，S.：碳的社会成本估算：基于荟萃分析的综述。《清洁生产杂志》 **209**，1494–1507（2019年） https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.058[22] Tverberg，G.：私人通信。关于全球化石燃料时限为10–25年的私人通信。2021-09-19。（2021年）[23] Tverberg，G.：我们的化石燃料能源困境，包括正确说法为何鲜少被讲述。《我们的有限世界》，10（2021年）。
https://ourfiniteworld.com/2021/11/10/our-fossil-fuel-energy-predicament-including-why-the-correct-story-is-rarely-told[24] Nordhaus，W.，Sztorc，P.：DICE 2016R Excel模型。 https://www.econ.yale.edu/~nordhaus/homepage/homepage/DICE2016R-090916ap-v2.xlsm，访问日期2022-03-23（2016年）

[25] Keen, S.：气候变化的新古典经济学糟糕得令人震惊。《全球化》，1–29（2020年）https://doi.org/10.1080/14747731.2020.1807856[26] Abdulla, A., A.A. Khourdajie，Babiker, M.，Bai, Q.等：气候变化2022。技术报告，政府间气候变化专门委员会（政府间气候变化专门委员会），瑞士日内瓦（2022年4月）。https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/（访问日期：2022-05-01）。https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/[27]Pachauri, R.K.，Meyer, L.（编）：《2014年气候变化综合报告》，第151页。政府间气候变化专门委员会，瑞士日内瓦（2015年）。https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-PartA_FINAL.pdf[28] T.M. Lenton，Xu, C.，Abrams, J.F.，Ghadiali, A.，Loriani, S.，Sakschewski, B.，Zimm, C.，Ebi, K.L.，Dunn, R.R.，Svenning, J.-C.，Scheffer, M.：量化全球变暖的人类代价。Nature Sustainability（2023年）https://doi.org/10. 1038/s41893-023-01132-6[29] Schuckmann, K.，Cheng, L.，Palmer, M.D.，Hansen, J.，Tassone, C.等：地球系统储存的热量：这些能源去向何处？《地球系统科学数据》12（3），2013–2041（2020年）https://doi.org/10.5194/essd-12-2013-2020[30] Tans, P.：回顾大气$co_2$中 $^{14}c$与 $^{13}c$的使用与滥用。Radiocarbon 64（4），747–760（2022年）https://doi.org/10.1017/RDC.2022.7[31] Deprez, A.，Leadley, P.，Dooley, K.，Williamson, P.，Cramer, W.，Gattuso, J.-P.，Rankovic, A.，Carlson, E.L.，Creutzig, F.：$co_2$清除所需的可持续性限度。《科学》383（6682），484–486（2024年）https://doi.org/10.1126/science. adj6171 https://www.science.org/doi/pdf/10.1126/science.adj6171[32]Valdes, P.J.，Scotese, C.R.，Lunt, D.J.：随时间变化的深海温度。Climate of the Past 17（4），1483–1506（2021年）https://doi.org/10.5194/ cp-17-1483-2021[33] Agterhuis, T.，Ziegler, M.，Winter, N.J.，Lourens, L.J.：基于团簇同位素测温法得出的始新世热极期2期间温暖的深海温度。Communications Earth & Environment 3（1），1–9（2022年）https://doi.org/10. 1038/s43247-022-00350-8 https://doi.org/10.1038/s43247-022-00350-8[34] Atomic Archive：核武器释放的能源。AJ Software & Multimedia。https://www.atomicarchive.com/science/effects/energy.html，发布于1998-2020，访问日期2022-07-17（2020年）[35]Burke, K.D.，Williams, J.W.，Chandler, M.A.，Haywood, A.M.，Lunt, D.J.，Otto-Bliesner, B.L.：上新世和始新世为近期未来气候提供了最佳类比。《美国国家科学院院刊》115（52），13288–13293（2018年）https://doi.org/ 10.1073/pnas.1809600115

[36] Rae, J.W.B., Zhang, Y.G., Liu, X., Foster, G.L., Stoll, H.M., Whiteford, R.D.M.：海洋档案中的过去6600万年大气二氧化碳。《地球与行星科学年度评论》49(1), 609–641（2021年）https://doi.org/10.1146/annurev-earth-082420-063026[37] Hallam, A.：第四纪前海平面变化。《地球与行星科学年度评论》12, 205–243（1984）https://doi.org/10.1146/annurev.ea.12.050184.001225[38] Haq, B.U., Hardenboland, J., Vail, P.R.：三叠纪以来海平面波动年表。《科学》235(4793), 1156–1167（1987）https://doi.org/10.1126/ science.235.4793.1156[39] Hochuli, P.A., Sanson-Barrera, A., Schneebeli-Hermann, E., Bucher, H.：被忽视的最严重危机——陆地环境最严重的扰乱发生在二叠纪—三叠纪大灭绝之后。《科学报告》6(1), 28372（2016年）https://doi.org/10.1038/srep28372[40] Li, M., Grasby, S.E., Wang, S.-J., Zhang, X., Wasylenki, L.E., Xu, Y., Sun, M., Beauchamp, B., Hu, D., Shen, Y.：镍同位素将西伯利亚暗色岩气溶胶颗粒与二叠纪末大灭绝联系起来。《自然·通讯》12(1), 2024（2021年）https://doi.org/10.1038/s41467-021-22066-7[41] Li, G., Liao, W., Li, S., Wang, Y., Lai, Z.：二叠纪—三叠纪界线两次大灭绝脉冲的不同触发因素。《科学报告》11(1), 6686（2021年）https://doi.org/10.1038/s41598-021-86111-7[42] Du, Y., Song, H., Algeo, T.J., Song, H., Tian, L., Chu, D., Shi, W., Li, C., Tong, J.：一次大规模岩浆脱气事件引发了晚史密斯亚期热峰和史密斯亚期—斯帕斯亚期界线大灭绝。《全球与行星变化》215, 103878（2022年）https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2022.103878[43]国际能源署：《全球能源回顾：2021年二氧化碳排放》。国际能源署（IEA）（2022年）[44]Loeb, N.G., J ohnson, G.C., Thorsen, T.J., Lyman, J.M., Rose, F.G., Kato, S.：卫星与海洋数据揭示地球升温速率显著加快。Geophysical Research Letters 48(13), 2021–093047（2021年）https://doi.org/10.1029/2021GL093047 https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2021GL093047. e2021GL093047 2021GL093047[45] Minière, A., Schuckmann, K., Sallée, J.-B., Vogt, L.：观测到过去六十年地球系统升温显著加速。《科学报告》13(1)（2021年）https://doi.org/10.1038/s41598-023-49353-1[46] Dietz, S., Rising, J., Stoerk, T., Wagner, G.：气候系统临界点的经济影响。美国国家科学院院刊118(34),

2103081118（2021年）https://doi.org/10.1073/pnas.2103081118

[47] Keen, S., Lenton, T.M., Garrett，T.J., J.W.B. Rae, B.P. Hanley, M. Grasselli：临界点造成的经济和环境损害估算与科学文献无法相互印证。美国国家科学院院刊 **119**(21), 2117308119（2022年）https://doi.org/10.1073/pnas.2117308119 https://www.pnas.org/doi/pdf/10.1073/pnas.2117308119

[48]Dietz, S.、C. Hepburn、N. Stern：经济学、伦理与气候变化。载于：K. Basu、R. Kanbur（编）《建设更美好世界的论辩：纪念阿马蒂亚·森文集》（第2卷：社会、制度与发展）。牛津大学出版社，牛津，英国（2008）。https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199239979.001.0001

[49]P. Dasgupta：第10章：跨世代的福祉。载于：最终报告——《生物多样性经济学：Dasgupta综述》。英国财政部，威斯敏斯特，伦敦，英国（2021年）。https://assets.publishing.service.gov.uk/media/602e92b2e90e07660f807b47/The_Economics_of_Biodiversity_The_Dasgupta_Review_Full_Report.pdf

[50]Nordhaus, W.D.：全球变暖经济学建模的演变：DICE模型的变化。《气候变化》**148**(4), 623–640（2018年）https://doi.org/10.1257/aer.89.4.1046https://cowles.yale.edu/sites/default/files/files/pub/d20/d2084.pdf

[51]S. Hsiang、R. Kopp、A. Jina、J. Rising，等：估算气候变化对美国造成的经济损害。《科学》**356**(6345)，1362–1369（2017年）https://doi.org/10.1126/science.aal4369https://www.science.org/doi/pdf/10.1126/science.aal4369

[52] R. Warren、C. Hope、D.E.H.J. Gernaat、D.P. Van Vuuren、K. Jenkins：全球变暖幅度高于工业化前水平1.5至4 °c所造成的全球及区域总体损害。《气候变化》**168**(3)，24（2021年）https://doi.org/10.1007/s10584-021-03198-7[53]C.J. Smith、A.A. Khourdajie、Yang, P.、D. Folini：气候不确定性对最优减缓路径及碳的社会成本的影响。《环境研究快报》**18**(9)，094024（2023年）https://doi.org/10.1088/1748-9326/acedc6[54] Dietz, S.、J. Rising、Stoerk, T.、G. Wagner：气候系统临界点的经济影响：补充信息。《美国国家科学院院刊》**118**(34)，2103081118（2021年）https://doi.org/10.1073/pnas.2103081118[55]D. Meadows：致 William Nordhaus 的信。https://archive.org/details/limitstogrowthr00mead，访问于2022年6月10日（1994年）

[56]Nordhaus, W.D.：气候变化专家意见。《美国科学家》**82(1)**，45–51（1994年）。访问日期：2022年6月15日

[57] Manne, A.S., Richels, R.G.：MERGE：全球气候变化综合评估模型。载于：Loulou, R., Waaub, J.-P., Zaccour, G.（编）《能源与环境》，第175–189页。施普林格，波士顿，马萨诸塞州（2005年）。https://doi.org/10. 1007/0-387-25352-1_7 。
https://doi.org/10.1007/0-387-25352-1_7

[58]Manne, A., Mendelsohn, R., Richels, R.G.：MERGE：用于评估温室气体减排政策的区域和全球影响的模型。《能源政策》**23(1)**，17–34（1995年）
https://doi.org/10.1016/0301-4215(95)90763-W

[59] Nordhaus, W.D.：减缓还是不减缓：温室效应的经济学。《经济学杂志》**101(407)**，920–937（1991年）https://doi.org/10.2307/2233864

[60] Cropper, M.L., Newell,R.G., Heimberg, J., Allen, M., 等：气候损害估值：更新二氧化碳社会成本估算。美国国家科学院出版社，华盛顿哥伦比亚特区（2017）。https://doi.org/10.17226/ 24651 .
https://www.nap.edu/catalog/24651/valuing-climate-damages-updating-estimation-of-the-social-cost-of

[61]Stanton, E.A., Ackerman, F., Kartha, S.：综合评估模型内部：气候经济学中的四个问题。《气候与发展》**1**(2),166–184(2009)
https://doi.org/10.3763/cdev.2009.0015https://doi.org/10.3763/cdev.2009.0015

[62]Weitzman, M.L.：全球变暖的"损害函数"是什么——它可能有何不同？《气候变化经济学》**01**(01),57–69 (2010)
https://doi.org/10.1142/S2010007810000042https://doi.org/10.1142/S2010007810000042

[63]Weitzman, M.L.: 作为防范灾难性气候损害之保险的温室气体目标。《公共经济理论杂志》 **14(2)**，221–244（2012年）
h
t
t
p
s://
doi.org/10.1111/j.1467-9779.2011.01539.xhttps://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1467-9779.2011.01539.x
[64] Pindyck, R.S.: 气候变化政策：模型告诉我们什么？《经济文献杂志》 **51(3)**，860–72（2013年）
https://doi.org/10.1257/jel.51.3.860[65] Pindyck, R.S.: 气候政策模型的使用与误用。《环境经济学与政策评论》 **11(1)**，100–114（2017年） https://doi.org/10.1093/reep/rew012 https://doi.org/10.1093/reep/rew012[66] Yang, P., Yao, Y.-F., Mi, Z., Cao, Y.-F., Liao, H., Yu, B.-Y., Liang, Q.-M., Coffman, D., Wei, Y.-M.: 共享社会经济路径下的碳的社会成本。《全球环境变化》 **53**，225–232（2018年） https://doi.org/

10.001

[67] Yang, P.,Mi, Z.,Yao, Y.-F., Cao, Y.-F., Coffman, D., Liu, L.-C.: 单纯的经济减缓战略表明应上调国家自主贡献。One Earth 4(8)，1150–1162（2021年）https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.07.005

[68]FaIR：FaIR 简介。 https://docs.fairmodel.net/en/latest/intro.html，访问于2025年-07-22

[69] MAGICC：简述气候系统。 http://wiki.magicc.org/index.php?title=模型_描述，访问于2025年-07-22

[70] Nath, S., Lejeune, Q., Beusch,L., Seneviratne, S.I., Schleussner, C.-F.: Mesmer-m：一种用于空间分辨月度温度的地球系统模型模拟器。Earth System Dynamics 13(2), 851–877（2022年）https://doi.org/10.5194/esd-13-851-2022

[71]Bereiter, B., Eggleston, S., Schmitt, J., Nehrbass-Ahles, C., Stocker, T.F., Fischer, H., Kipfstuhl, S., Chappellaz, J.：对EPICA Dome C二氧化碳记录的修订，涵盖距今80万至60万年。Geophysical Research Letters 42(2),542–549（2015年）
https://doi.org/10.1002/2014GL061957https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/2014GL061957

[72]Tans, P., Keeling, R.：碳循环温室气体：莫纳罗亚二氧化碳浓度（ppm）。美国国家海洋和大气管理局地球系统研究实验室全球监测实验室。
https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/data.html，发表于2022年，访问于2022-02-01（2020年）

[73] 美国国家海洋和大气管理局：AGGI气候强迫表。
https://gml.noaa.gov/ccgg/ghgpower/climforcingtable1800.txt 访问于2022年7月（2022年）

[74]Schuckmann, K., Cheng, L., Palmer, M.D., Hansen, J., Tassone, C., Aich, V., Adusumilli, S., Beltrami, H., Boyer, T., Cuesta-Valero, F.J., Desbruyères, D., Domingues, C., García-García, A., Gentine, P., Gilson, J., Gorfer, M., Haimberger, L., Ishii, M., Johnson, G.C., Killick, R., King, B.A., Kirchen- gast, G., Kolodziejczyk, N., Lyman, J., Marzeion, B., Mayer,M., Monier, M., Monselesan, D.P., Purkey, S., Roemmich, D., Schweiger, A., Seneviratne, S.I., Shepherd, A., Slater, D.A., Steiner, A.K., Straneo, F., Timmermanns, M.-L., Wijffels, S.E.：地球系统储存的热量：能源去了哪里？第2版—数据。DKRZ世界气候数据中心（WDCC）（2020年）。
https://doi.org/10.26050/WDCC/GCOS_EHI_EXP_v2。
https://doi.org/10.26050/WDCC/GCOS_EHI_EXP_v2

[75]明尼阿波利斯联邦储备银行（FRBM）：消费者价格指数，1913年—现代美国消费者价格指数（CPI）时代的历史数据。
https://www.minneapolisfed.org/about-us/monetary-policy/

通货膨胀-计算器/消费者 -价格-指数-1913-，访问于2022年-03-10（2021年）
[76] FRED，圣路易斯联邦储备银行：美国贴现率（INTD-SRUSM193N）。https://fred.stlouisfed.org/series/INTDSRUSM193N，访问于2022年3月19日。（2022年）[77]FRED，圣路易斯联邦储备银行：国内生产总值，单位为十亿美元，季度数据，季节调整年率（GDP）。https://fred.stlouisfed.org/series/FGEXPND，访问于2022年3月11日。（2021年）[78] FRED，圣路易斯联邦储备银行：世界国内生产总值（NYGDPMKTPCD-WLD）。https://fred.stlouisfed.org/series/NYGDPMKTPCDWLD，访问于2023年5月30日。（2021年）[79] FRED，圣路易斯联邦储备银行：联邦政府：当前支出（FGEXPND）。https://fred.stlouisfed.org/series/FGEXPND，访问于2022年3月11日。（2020年）[80]FRED，圣路易斯联邦储备银行：联邦政府：国防消费支出和总投资，单位为十亿美元，季度数据，季节调整年率（FDEFX）。https://fred.stlouisfed.org/series/FDEFX，访问于2022年3月11日。（2021年）[81] FRED，圣路易斯联邦储备银行：资产：总资产：总资产（扣除合并抵销项）：周三水平（WALCL）]。https://fred.stlouisfed.org/series/ WALCL，访问于2022年3月11日。（2022年）[82]Archer, D., Eby, M., Brovkin, V., Ridgwell, A. 等：化石燃料二氧化碳在大气中的停留时间。《地球与行星科学年度评论》37(1)，117–134（2009年）https://doi.org/10.1146/annurev.earth.031208. 100206 https://doi.org/10.1146/annurev.earth.031208.100206[83] 哥白尼气候变化服务，气候数据存储库：第六阶段耦合模式比较计划气候预测。哥白尼气候变化服务（C3S）气候数据存储库（CDS）（2023年）。https://doi.org/10.24381/cds.c866074c . https://doi.org/10.24381/cds.c866074c[84] 欧洲中期天气预报中心（ECMWF）：哥白尼气候变化服务（C3S）数据教程。哥白尼气候变化服务（C3S）。https://ecmwf-projects.github.io/copernicus-training-c3s/projections-cmip6.html，访问于2024年8月12日。（2022年）[85] Carvalho, D., Rafael, S., Monteiro, A., Rodrigues, V., Lopes, M., Rocha, A.：cmip3、cmip5和cmip6未来气候预测对近期观测到的变暖的刻画有多准确。《科学报告》12(1)，11983（2022年）https: //doi.org/10.1038/s41598-022-16264-6[86] Raghuraman, S.P., Soden, B., Clement, A., Vecchi, G., Menemenlis, S., Yang,

W.：2023年全球变暖骤升由厄尔尼诺—南方涛动驱动。《大气化学与物理学》24(19)，11275–11283（2024年）https: //doi.org/10.5194/acp-24-11275-2024
[87] Watson-Parris, D., Wilcox, L.J., Stjern, C.W., Allen, R.J., Persad, G., Bollasina, M.A., Ekman, A.M.L., Iles, C.E., Joshi, M., Lund, M.T., McCoy, D., Westervelt, D., Williams, A., Samset, B.H.：近期航运排放削减对地表温度的影响较弱，但其量化受到内部变率的干扰$_2$ 。EGUsphere 2024，1–30（2024年）https://doi.org/10.5194/ egusphere-2024-1946[88] Samset, B.H., Lund, M.T., Fuglestvedt, J.S., Wilcox, L.J.：2023年的温度反映了持续的全球变暖和海表温度内部变率。Communications Earth & Environment 5(1)，460（2024年）https://doi.org/10. 1038/s43247-024-01637-8[89] Tian, H., Xu, R., Canadell, J.G. 等：全球一氧化二氮源汇的全面量化。Nature 586(7828)，248–256（2020年）https://doi. org/10.1038/s41586-020-2780-0[90] Hanley, B.P.,Keen,S.：未来损失现值风险的符号。arXiv:q-fin.GN，2209–06654（2022年）https://doi.org/10.48550/arXiv.2209.06654[91] P. Dasgupta：第11章——未来消费贴现。载于：《人类福祉与自然环境》。牛津大学出版社，英国牛津（2004年）[92]Kagan, J., Berry-Johnson：庇古税：定义、目的、计算方法和示例。https://www.investopedia.com/terms/p/pigoviantax.asp，访问于2023年4月27日。（2023年）[93] Corden, W.M.：全球失衡与节俭悖论。《牛津经济政策评论》28(3)，431–443（2012年）https://doi.org/10.1093/oxrep/grs027 https://academic.oup.com/oxrep/article-pdf/28/3/431/1098453/grs027.pdf[94] Vermann, E.K.：等等，储蓄究竟是好是坏？节俭悖论。载于：FRED出版物。圣路易斯联邦储备银行研究部，密苏里州圣路易斯（2012年）。https://research.stlouisfed.org/publications/page1-econ/2012/05/01/wait-is-saving-good-or-bad-the-paradox-of-thrift/[95]Kitromilides, Y.：赤字削减、紧缩时代与无力偿债悖论。《后凯恩斯主义经济学杂志》33(3)，517–536（2011年）https://doi.org/10.2753/PKE0160-3477330306 https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.2753/PKE0160-3477330306[96]Das, S., Husseiny, I.A.E.：紧缩悖论：多国

证据。《新兴市场金融与贸易》55(8)，1681–1693（2019年）https://doi.org/10.1080/1540496X.2018.1530652 https://doi.org/10.1080/1540496X.2018.1530652[97]Tassava, C.J.：第二次世界大战期间的美国经济：战时行政管理。载于：Whaples, R.（编）EH.Net百科全书。经济史协会，芬兰赫尔辛基（2008年）。https://eh.net/encyclopedia/the-american-economy-during-world-war-ii/，访问日期：2022年9月20日[98] Jarvis, A.：能源回报与全球工业社会的长期增长。《生态经济学》146，722–729（2018年）https://doi.org/10.1016/j.ecolecon. 2017.11.005[99]Keen, S.、Ayres, R.U.、Standish, R.：关于能源在生产中作用的札记。《生态经济学》157，40–46（2019年）https://doi.org/10.1016/j. ecolecon.2018.11.002[100] Jefferson, P.N.：演讲：美联储贴现窗口的历史：1913年–2000年。联邦储备系统理事会，26（2024年）。可获取：https: // www.federalreserve.gov/newsevents/speech/files/jefferson20241008a.pdf，访问日期：2024年10月17日[101]Ihrig, J.E.、Wolla, S.A.：美联储的新货币政策工具。《经济学第一页》，8（2020年）。可获取：https://www.stlouisfed.org/publications/page-one-economics/2020/08/03/the-feds-new-monetary-policy-tools，访问日期：2024年10月17日[102] 联邦储备系统理事会：美国联邦储备系统是否在印钞以购买财政部证券？向公众介绍美国联邦储备系统，1（2016年）。可获取：https://www.federalreserve.gov/faqs/money_12853.htm，访问日期：2024年10月17日[103] Delgado, M.、Gravelle, T.编：CGFS论文第68号：为应对新冠肺炎危机的中央银行资产购买。国际清算银行，ISBN：978-92-9259-642-2，Centralbahnplatz 2，4051 瑞士巴塞尔（2023年）[104] B.P. Hanley：释放海怪：一个新颖的货币乘数方程在21世纪银行业的首次亮相。经济学6(1)，20120003（2012年）https://doi.org/10. 5018/economics-ejournal.ja.2012-3[105] FRED，圣路易斯联邦储备银行：M1货币存量流通速度（M1V）。https://fred.stlouisfed.org/series/M1V，访问日期：2024年1月20日。（2023年）[106] FRED，圣路易斯联邦储备银行：M2货币存量流通速度（M2V）。https://fred.stlouisfed.org/series/M2V，访问日期：2024年1月20日。（2023年）[107]Anderson, J.G.、Weisenstein, D.K.、Bowman, K.P.、Homeyer, C.R.等：夏季美国上空的平流层臭氧相关联

与经由氯和溴催化作用对对流和温度的观测。《美国国家科学院院刊》**114**（25），4905–4913（2017年） https://doi.org/10.1073/pnas.1619318114https://www.pnas.org/doi/pdf/10.1073/pnas.1619318114

[108] Anderson, J.G., Clapp, C.E.：自由基催化、气候变化与人类健康的耦合。Phys.Chem. Chem. Phys. **20**, 10569–10587 (2018年) https://doi.org/10.1039/C7CP08331A

[109]Herrando-Pérez, S., Bradshaw, C.J.A., Lewandowsky, S., Vieites, D.R.：统计语言支持气候变化评估中的保守主义。BioScience 69(3), 209–219 (2019年) https://doi.org/ 10.1093/biosci/biz004 https://academic.oup.com/bioscience/article-pdf/69/3/209/28087082/biz004.pdf[110] Brysse, K., Oreskes, N., O'Reilly, J., Oppenheimer, M.：气候变化预测：是否偏向于最不戏剧化的一侧？《全球环境变化》23(1), 327–337 (2013年) https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2012.10.008 [111]Hansen, J.E., Sato, M., Simons, L., Nazarenko, L.S., Sangha, I., Kharecha, P., Zachos, J.C., Schuckmann, K., Loeb, N.G., Osman, M.B., Jin, Q., Tse- lioudis, G., Jeong, E., Lacis, A., Ruedy, R., Russell, G., Cao, J., Li, J.：酝酿中的全球变暖。Oxford Open Climate Change 3(1), 008 (2023年) https: // doi.org/10.1093/oxfclm/kgad008 https://academic.oup.com/oocc/article-pdf/3/1/kgad008/52763128/kgad008.pdf[112] Ha, J., Kose, M.A., Ohnsorge, F., Yilmazkuday, H.：理解通胀的全球驱动因素：油价有多重要？能源经济学 127, 107096 (2023年) https://doi.org/10.1016/j.eneco.2023.107096[113] WHITEHEAD, L.：通胀的政治成因。《政治研究》27(4), 564–577 (1979年) https://doi.org/10.1111/j.1467-9248.1979.tb01224.x https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1467-9248.1979.tb01224.x [114] Millward-Hopkins, J.：为何气候变化的影响可能使我们更不可能减少排放。全球可持续性 5, 21 (2022年) https://doi.org/ 10.1017/sus.2022.20[115] Lang, P. A.：核能学习与部署速率；中断与放弃的全球效益。Energies 10(12) (2017年) https://doi.org/10.3390/en10122169[116] Lovering, J.R.：面向离网与微电网应用的微型反应堆技术经济评估。可持续城市与社会 95, 104620 (2023年) https: // doi.org/10.1016/j.scs.2023.104620[117]Moriarty, P., Honnery, D.：100%全球可再生能源系统的可行性。Energies 13(21) (2020年) https://doi.org/10.3390/en13215543

[118] Weißbach, D., Ruprecht, G., Huke, A., Czerski, K., Gottlieb, S., Hussein, A.：发电厂的能源强度、能源投资回报率（投入所回报的能源）与能源回收期。《能源》 **52**, 210–221 (2013年) https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.01.029[119] Liu, Z.Z., Papa, M.：金砖国家能否使全球金融体系去美元化？新兴市场经济学要素。剑桥大学出版社，英国剑桥 (2022年)。 https://doi.org/10.1017/9781009029544[120] Papa, M., Han, Z., O'Donnell, F.：非正式制度与反霸权的动态：引入金砖国家趋同指数。《欧洲国际关系杂志》 **29**(4), 960–989 (2023年) https://doi.org/10.1177/13540661231183352 https://doi.org/10.1177/13540661231183352[121]Perissi, I., Lavacchi, A., Bardi, U.：能量投资回报（能源投资回报率）在复杂适应系统中的作用。Energies **14**(24) (2021年) https://doi.org/10.3390/en14248411[122] Brockway, P.E., Owen, A., Brand-Correa, L.I., Hardt, L.：化石燃料全球最终阶段能源投资回报的估算及其与可再生能源的比较。《自然·能源》 **4**(7), 612–621 (2019年) https://doi.org/10.1038/s41560-019-0425-z https://www.nature.com/articles/s41560-019-0425-z[123] Michaux, S.：在完整系统替代中淘汰化石燃料所需金属数量的估算，并与矿产资源进行比较。技术报告，第416期公报特别版，芬兰地质调查局（2024年8月）。 https://doi.org/10.30440/bt416 . https://doi.org/10.30440/bt416[124] Lane, J.-E.：温室气体排放："波将金村庄"与全球韧性。《社会学心智》 **5**(4), 292–303 (2015年) https://doi.org/10.4236/sm.2015.54026[125] Lovering, J.R., Yip, A., Nordhaus, T.：全球核反应堆的历史建设成本。《能源政策》 **91**, 371–382 (2016年) https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.01.011