

气候互动：C-ROADS 气候模型

John Sterman, Thomas Fiddaman, Travis Franck, Andrew Jones, Stephanie McCauley, Philip Rice, Elizabeth Sawin and Lori Siegel

气候政策挑战

1992 年，世界各国创造了联合国气候变化框架公约（UNFCCC），谈判具有约束力的协定，面临气候变化的风险。世界里差不多每个国家承诺限制温室气体排放，防止“气候系统的人为干扰。”这通常被理解，把平均全球地表温度的增加限制到工业化以前的水平，只增加 2 摄氏度。但这种想法在 2009 哥本哈根气候大会被淘汰了，当国家元首的面对面谈判倒塌了。个个国家被鼓励作出承诺自愿减少排放。这些承诺现在远远不到需要的程度，同时温室气体排放的程度提高到创纪录的水平，就是 2008 年的经济衰退也没有防止。

谈判失败了，即使气候变化的科学认识及风险认识从来没超过现代的理解。2007 年气候变化政府间组会（IPCC）在第四评估报告总结，“气候系统暖化是很明确的，”及“大部分地世界平均温度增加从 20 世纪中起，是很可能应认为温室气体排放的增加”（IPCC, 2007, AR4 Summary for Policymakers, 2, 5; 重视原创）。

全球谈判失败的原因是，关于气候变化危机的强大共识与政策制定者，媒体和公众普遍的困惑，自满，和拒绝的差距（Sterman, 2011）。即使政策制定者了解气候变化的风险和进程—很多政策家不了解—在民主国，国际协定的批准及限制排放的立法需要草根政治支持。

从历史角度看，气候变化风险和进程的信息依靠先进的环流模式（像 IPCC 使用的）与报告通道政策制定者，谈判者，与公众。这些模式对发展可靠的气候变化科学知识很重要。但是，这些模式又不透明，又很昂贵，不让非专业人员使用或了解。创建和运行情况的周期也太长了，不让实时互动。于是，政策制定者，教育家，工业公民领导，媒体家，与公众经常靠直觉来判断排放减少有可能的影响。问题是，直觉，就是说专家的直觉，对排放减少对未来的温室气体浓度，地球温度，海平面，等等，的影响问题来说，是不可靠的。

研究显示，普通的心智模式在与人们对气候动态评估导致系统性和严重的错误

（Sterman and Both Sweeney, 2002, 2007; Sterman, 2008, 2011; Moxnes and Saisel, 2009). 这些错误不是差的科学培训或气候的复杂性导致的；受过高教育，有科学，技术，工程，和数学培训的人们常常犯错误，简单地说就是，普遍的系统像浴缸，宁杭账户，和复利（Booth Sweeney and Sterman, 2000, 2007; Cronin *et al.*, 2009; Brunstein *et al.*, 2010); 他们有问了解积累过程，反馈，时间延迟和非线性过程（Sterman, 1994). 应为这些错误不是不熟悉气候科学造成的，它们不能被更多的气候知识解决。互动的学习方式可以让人们用仿真模型（像管理飞行模拟器）来自己发

现复杂系统的行为，对改善心智模式的现象是个必须（Corell et al., 2009; Sterman, 2000, 2011; Morecroft and Sterman, 1994).

对复杂系统差的了解不只是影响公众，而也影响谈判者。2008年，Christina Figueres, 在那时哥斯达黎加的首席谈判者，在2010被UNFCCC选成执行秘书，说：

“现在，在UNFCCC的谈判过程里，不同立场的具体环境影响对大家不明确。。。我们对短期长期影响的了解有危险的真空。。。不愿意为各方行动”（个人通行，九月2008）。

C-ROADS (Climate Rapid Overview and Decision Support) 模型是为了这些问题而设计的，用最新获的科学建立气候动力的共识。C-ROADS也缺党派性，想对非专业者，从政策制定者到公众，有了解帮助。C-ROADS:

- * 是依靠最好的同行评审的科学，及最现代的气候模型；
- * 踪迹温室气体,包括 CO₂, CH₄, N₂O, SF₆, 卤代烃 (halocarbons), 气溶胶, 和黑碳 (black carbon);
- * 分别化石燃料的排放和林业土地利用的排放;
- * 让使用者选择不同照常营业状态, 或者确定自己的状态;
- * 让使用者捕捉每个国家的排放减少状态;
- * 报到温室气体浓度, 世界平均温度变化, 海平面升高, 海洋的 pH 值, 人均和累积排放;
- * 让使用者评估渺茫对重要气候过程的影响
- * 用的很简单; 在笔记本电脑上几秒钟就运行了——使用者马上可以看到测试状态的结果
- * 是个独立和中立的过程, 可以让每个当事人参观不同的假定与状态
- * 在网上可以免费参观: climateinteractive.org.

模型结构与用户界面

这里, 我们给个简要概述。Sterman et al (2012) 具体解释模型结构; 完整的文档在 climateinteractive.org。C-ROADS 是个连续时间房室模型 (continuous time compartment model), 有明确的碳循环, 温室气体的积分, 径向迫使 (radial forcing), 世界平均表面温度, 海平面上升, 和海洋面的 pH 值 (图 1)。¹ 碳循环和气候的模型部分 (图 2²) 是从 FREE (Feedback-Rich Energy-Economy) 模型演变的 (Fiddaman 1997, 2002, 2007)。C-ROADS 明示地模效 CO₂ 和另外地温室气体, 包

¹ (图 1)。C-ROADS 概述. 使用者选的状态, 温室气体排放会影响气体浓度; 这也会连着影响海平面和海洋 pH 值。这模型包括气候与碳循环的反馈。

² (图 2)。C-ROADS 碳循环。化石燃料内的碳积分不是独特地 ([Translator's note: here the translation of "explicitly" is "not modeled individually or independently"](#)) 模型。滥伐 / 造林造成的 CH₄ 流动, 大气积分, 和 C 流动和积分是独特模型, 可是在这简化图里被汇总。

括甲烷 (CH₄) , 笑气 (N₂O) , SF₆, 和另外氟化气体 (PFCs 与 HFCs), 每个有特殊的排放流动, 大气积分, 和辈代。

C-ROADS 包括很多气候—碳循环的反馈, 也包括世界平均温度, 净初级生产力 (Net primary production) ,和海洋二氧化碳吸收能力的反馈。我们也包括正反馈循环涉及冻土融化产生的 CH₄,可是在基本状态下我们让这些循环造成的 CH₄ 上升等于零, 数据为限 (translation here: data is limited). 我们也假设格陵兰和南极洲的冰泄没有加速, 而在目前观察到的速度融化。由于这些原因, C-ROADS 可能低估未来的变暖和海平面上升。使用者可以尝试这些反馈, 用任何他们想用的数量。我们边增加对气候—碳循环反馈和冰盖流动的知识, 也会边修正模型。

C-ROADS 模拟是 1850 年开始的. 这模型使用历史上的 CO₂ 和温室气体排放, 也包括火山和另外强迫的影响。图 3³和表 1 相比 C-ROADS 与到 2010 的数据。模型和数据很相近。图 4⁴相比 C-ROADS 与 IPCC AR4 报告的温度预估, 用不同的排放状态。2100 的平均错误少于 0.1C。完整的文档相比 C-ROADS 和历史的另外温室气体和径向迫使 (radial forcing), 也跟另外的预估和模型相比。

模型的用户界面启用很快速, 用不同政策和参量的实验。在主要平面上, 使用者可以看到说明, 视频教程, 互动模型结构图和文档, 也可以选排放的区域聚集, 包括全球总量, 或 3, 6, 或 15 不同国家和区域组织 (表 2)。如果使用者想研究没有独立代表的国家的排放影响, 他们可以开发一个说明这些国家排放预估的电子表格; C-ROADS 可以直接读这些文档。使用者然后可以选一个照常营业的状态, 可选 IPCC 或能源建模论坛(Energy Modelling Forum)的状态, 或选自己的。使用者也可以加载之前的模拟, 进行蒙特卡洛敏感度分析来评估不确定性, 及分析任何国家的建议, 其成果贡献全球。

下一步, 使用者解释不同排放状态, 从现在到 2100, 关于人造的 CO₂ 排放, 从化石燃料, 土地用途, 和另外温室气体来看起。使用者给每个国家和区域解释 (图 5)。使用者有三个办法键入每个国家或地区的排放预估: 用数字, 用图形, 和用 Excel 电子表格。使用者选择排放的设置方法不同, 包括:

- 1) 跟使用者选的基准年相比 (例如, 2020 的排放会比 2005 的排放低于 17%)
- 2) 跟照常营业相比 (例如, 2020 的排放会比那年的照常营业状态低于 30%)
- 3) 跟个国或地区经济的碳强度相比 (例如, 2020 的排放跟 2005 年的碳强度比, 代表 45%的减少)
- 4) 跟个国或地区的人均排放相比 (例如, 2050 的排放跟 2005 在个国或地区的人均排放程度相比, 代表 10%的增长。
- 5) 另外的选择, 在文档里

³ C-ROADS 跟历史数据的拟合。顺时针, 从上左, 大气 CO₂, CH₄, 温度异常, 和海平面

⁴ 2100 的温度预估, 与可能的范围, 显示 IPCC AR4 跟 C-ROADS 的相比

每目标年的输入模式，基准年，目标年和排放量可以根据每国家地区变。

模型的输出会马上更新。使用者可以选图与表从个国，地区，或全球的角度来显示人口，国内生产总值，CO₂和另外温室气体的排放，人均排放，经济排放强度，CO₂和CO_{2e}的浓度，CO₂从大气中的除去，全球地表平均温度，海平面上升，海洋的pH值，和另外的指标。

C-ROADS也有互动敏感性分析.使用者可以单独或组合改变关键参数的数值，也会马上看到结果。

用途

谈判者，政策制定者，科学家，工业领导和教育家都使用过C-ROADS.美国政府的高级成员，包括立法者和行政部门的成员，都用过C-ROADS.美国国务院气候变化特使在UNFCCC以及双方多边谈判部署中开发了内部使用C-ROADS的技术。Jonathan Pershing博士,副特使，说：

[C-ROADS]的结果对美国国务院队有很大的帮助。模型又快又准确地计算大气中的二氧化碳含量和温度，对我们来说是个很大的资产。我在内部讨论和国际谈判里都用过模型的结果（个人通信）。

前职员 Benjamin Zaitchik,博士，阐述：

政策制定者和谈判者须要一个合理的感觉，一个行动或政策跟另外行动或政策，对全球气候的影响。以前，我们在会另外做计算。我们从可靠的模拟源下载排放预估，把它们输入Excel电子表格，为各种政策选择调整，然后把每个提议的全球排放路径输入进想MAGICC的模型，估计气候响应。这个方式又费时间，又不透明；最后，我们可以把一些静态图带进会议，可是我们不能自发地做迅速调整。用C-ROADS,我们可以用直观的界面，实时地调整政策假设。这样，我们可以更加容易地评估拟议减排目标的环境完整性，也可以更加容易地讨论互补的排放指标(个人通信)。

C-ROADS也在中国清华大学用过。在清华，C-ROADS被分列成省程度的CO₂排放成因，用不同总能耗和燃料比的假定。

C-ROADS分析也被联合国环境规划署的“排放差距”评估报告（UNEP, 2010, 2011)利用。这报告说：

我们在2020预期一个差距，在2C限制一致的排放程度和哥本哈根协定保证真正会导致的排放程度之间。如果我们的目标是，有大可能性（大于

66%) 带在 2C 限制之内, 这个差距的范围是 5-9GtCO₂e, 也要看保证是怎么实施的。

联合国环境规划署评估这差距一直到 2020, 可是是 2020 以后的排放对气候有更大的影响。如果我们想把预期的温度增加限制在 2C 的目标之内, 排放必须在 2050 以前减到 2005 少于 70% 的程度。C-ROADS “气候记分牌” 分析 (图 6⁵) 发觉, 一直到 2100, 在达到 2C 限制的排放程度和现在保证的排放程度之间有个不仅大, 而递加的差距。就是乐观的“潜能建议” 状态不会达到目标。完整的分析可以在互动“气候记分牌” 玩意里找到 (<http://climatescoreboard.org>)。当有新或有改变的约言时, 或如果模型有更新, “气候记分牌” 也会被更新。

C-ROADS 对教育有帮助。在网上有个免费的版本, C-LEARN, 在教室里常常使用。C-ROADS 和 C-LEARN 也在互动的基于角色模拟“世界气候”, 是模拟世界气候谈判 (Sternan et al., 2011)。参与者当不同的角色, 边模拟不同国家在谈判减少排放的建议, 边使用 C-ROADS 参观这些建议的气候影响。参与者可以靠最好同行评议的科学, 学到气候的流动和不同政策建议的影响, 可是这学习的方法不规定参与者必须决定什么。“世界气候” 被很多群体成功地使用过, 不同的群体包括学生, 企业高官, 和政治领袖。使用“世界气候” 的说明和材料都免费提供 <http://climateinteractive.org>。

C-ROADS 也是“气候合作实验室” 的核心模型 (Malone et al. 2011)。气候合作实验室想“驾驭世界各地贡献者的集体智慧, 面临气候变化” (<http://climatecolab.org>)。任何人只要有互联网接入就能说出他们的建议, 面临气候变化的危机。他们也可以用 C-ROADS 和另外的模型来模拟他们建议的影响, 在能辩论每项建议的优点。

限制和扩展

C-ROADS 可以让制定者, 教育家, 媒体, 和公众学到气候流动, 也可以让他们快速地评估不同国内, 区内, 国际排放状态的气候影响。

C-ROADS 想每个模型, 不适合每个作用。为了让这模型在普通的笔记本电脑上一秒钟左右能运行, 碳循环和气候部门是全球合计的。所以, C-ROADS 不能分析地区或更小的规模的气候影响。

C-ROADS 考虑输入的参数: 未来的人口, 经济发展, 温室气体排放, 可是忽略政策选择和气候破坏的费用。很多使用者——特别是谈判者——重视可以外源地输

⁵ C-ROADS 分析不同哥本哈根协定的约言, 12 月 2011. 显示的效果是照常营业, 确定的建议, 可能的建议, 和可能的建议 (假设排放在约言时间以后也会继续降落)。“低排放道” 预估 2100 到达 2C 的温度增加。 <http://climatescoreboard.org> 有更新和记录。

入建议和约言的能力。可是，温室气体排放是从很复杂的互动导出的：能源需求，生产，价格，技术，教育规模经济(learning and scale economies), 法规与政策。为了面对这些问题，我们开发了新的模型，En-ROADS，内生地产于能耗，燃料比，和温室气体排放。有几个积分 (stocks, like integrals or accumulated amounts), 代表能源生产资金和能源消耗资本, 会决定每个燃料的能源生产和消费. 这模型包括建设和规划延误, 让新能源地发展, 也让设备改造和存在股本提前退休。每个能源的消费是内源性，包括能增加消费的原因—资源枯竭和供给约束—和能降低消费的原因——研究和开发, 学习曲线和另外的反馈。使用者可以试验不同的政策；碳价，法规约束和某些技术的补贴。使用者也可以改变关键参数——资源可用性，技术突破, 降低成本，建造时间，新工厂的寿命，以提高效率和改造的潜力等等。像 C-ROADS, En-ROADS 也是在普通的电脑上几秒钟就能运行。

用这些互动，透明，和有记录的模拟，政策家和公众可以探索气候变化的动性和危机。这样，我们可以建立共识，用最好的科学方法来了解我们的选择。我们欢迎这些社区成员，特别是研究家和教育家来探索使用和改进这些工具。