How hot will the greenhouse world be?

温室效应会使地球温度上升多高? ——关于平衡气候敏感度

姜大膀^{①②*}, 刘叶一^{①③}

① 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029;

② 中国科学院气候变化研究中心, 北京 100029;

③ 中国科学院大学, 北京 100049

* 联系人, E-mail: jiangdb@mail.iap.ac.cn

2015-12-01 收稿, 2015-12-25 修回, 2015-12-29 接受, 2016-02-01 网络版发表
国家自然科学基金(41421004)资助

摘要 工业化革命以来, 人为温室气体排放所导致的全球气候变暖越来越受到重视. 21世纪地球温升水平是当下各界关注的焦点, 而其中的一个核心科学问题是平衡气候敏感度——即大气二氧化碳浓度加倍引起的辐射强迫所产生的全球平均温度变化——究竟是多少? 2005年Science杂志在创刊125周年纪念专刊中对平衡气候敏感度进行了专门评述, 本文对其进行解读, 以期加深公众和科学界的理解.

关键词 全球变暖, 平衡气候敏感度, 模式

地球温度(地表2 m气温)决定于地表能量收支, 地气系统通过接收太阳短波辐射和向外太空射出长波辐射来维持自身的能量平衡. 其中, 大气中的某些微量气体, 例如二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)、氧化亚氮(N₂O)和水汽(H₂O), 对太阳短波辐射几乎透明, 但却能吸收地面发出的长波辐射, 这使得地表向上发射的大量长波辐射被截留在地气系统中, 从而对地球起保温作用, 即温室效应, 这些气体被称为温室气体.

除温室效应外, 太阳辐射、云和气溶胶、火山爆发、地表覆盖率等因素都影响地气系统的能量平衡. 在过去几千年, 全球平均温度变化总体很小, 地气系统处于准辐射平衡状态; 但从最近100年的观测来看, 气候系统变暖毋庸置疑. 根据政府间气候变化专门委员会(IPCC)第五次评估报告^[1], 人类活动导致1950~2010年一半以上的全球气候变暖(概率大于95%). 由于人类活动过程中的化石燃料使用, 大气

中CO₂浓度已经从1750年的278 ppm(1 ppm=1 μL/L, 下同)增长到2014年的398 ppm; 冰芯记录中当下的大气CO₂, CH₄和N₂O浓度是过去80万年以来最高的, 过去百年温室气体浓度增速达到了过去2.2万年以来前所未有的水平. 这些人为增加的温室气体引起了正辐射强迫, 导致气候系统正在不断地、加速地偏离当下CO₂条件下的气候平衡态. 根据观测, 1880~2012年全球平均温度升高了0.85(0.65~1.06)℃; 在北半球, 1983~2012年可能是过去1400年来最暖的30年^[1]; 2014年全球温度再创新高, 成为有仪器记录以来最暖的一年. 人们不禁要问, 未来几十至几百年人类活动影响下的气候将如何变化, 特别是地球温度会升高多少? 这个问题取决于气候系统——包括大气、海洋、冰雪、陆地和生态系统——对我们排放到大气中的温室气体的敏感程度. 这个程度一般用“平衡气候敏感度”, 简称“气候敏感度”来度量, 具体是指在双

引用格式: 姜大膀, 刘叶一. 温室效应会使地球温度上升多高? ——关于平衡气候敏感度. 科学通报, 2016, 61: 691–694

Jiang D B, Liu Y Y. How hot will the greenhouse world be? —A brief review of equilibrium climate sensitivity (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 691–694, doi: 10.1360/N972015-01333

倍于工业革命前 CO_2 浓度下(这一情况预计会在21世纪内发生),气候系统充分响应之后达到新的平衡态时,地表升温的幅度.2005年*Science*杂志在创刊125周年纪念专刊中对平衡气候敏感度进行了专门评述^[2],下文将对其进行解读.

在过去几十年里,学者们对气候敏感度的认识一直比较模糊.一方面认为气候系统可能非常敏感,对一些诸如温室气体、火山爆发和太阳辐射变化等强迫因子的响应相当大;另一方面又认为气候系统可能是相对迟钝的,即便驱动全球变暖的因素很强,也只能造成温度很小幅度的上升.气候敏感度问题的关键难点在于我们无法针对真实的自然界来设计科学实验,进而客观评估它对气候强迫因子的响应.

半个世纪以前,大气原始方程组被用于建立数值模式,模拟了大气运动及其演化^[3],标志着对气候系统进行仿真试验的开始.1979年,大气环流模式与混合层海洋模式相耦合,模拟得到在大气 CO_2 浓度加倍后,全球平均温度上升 $1.5\sim 4.5^\circ\text{C}$ ^[4].之后的数值试验采用了更加复杂的模式,比如考虑云变化、给定海洋热输送、提高分辨率等,但依然使用混合层海洋模式,得到的气候敏感度仍在上述范围之内.混合层海洋模式的优点在于达到平衡态的时间短,一般只需积分20~30年,计算代价小;然而,它的局限在于不能反映海洋热输送变化和大西洋经向翻转环流对升温的影响,因此不适用于长期的气候变化研究.20世纪90年代末开始使用完全耦合的大气-海洋环流模式进行数值试验,但它需要积分成千上万年才能达到平衡,计算代价太大,因此没有得到推广,这使得长期以来各项重大气候变化评估工作一直引用 $1.5\sim 4.5^\circ\text{C}$ 这个相对模糊的气候敏感度范围.

21世纪,高性能计算机得到快速发展,国际耦合模式比较计划第五阶段(CMIP5)的最新模式包含了大气、海洋、陆面、海冰、气溶胶、碳循环等多个子模块,动态植被和大气化学过程也被耦合其中^[5],早期的大气环流模式发展成了当下的气候系统模式和地球系统模式.科研人员试图使用这些更复杂、更逼真的模式来确定气候敏感度,至少期望从一端上缩小它的界限.然而模拟数值各有不同.大多数模式落在 $1.5\sim 4.5^\circ\text{C}$ 内,一些模式则超过了这个范围的上界,多模式的平均值为 3.2°C ^[1].现在的问题是,因为每个模式在模拟真实气候的过程中都进行了大量简化并采用了不同的参数化方案,所以相应的敏感度不

可避免地有自己的不确定性,一些模式的升温大大超过 4.5°C ,这就需要对各个模式的模拟能力进行系统评估才能有效计算敏感度的权重平均值.先前,也有学者采用单个模式,通过变换模式中诸如云和气溶胶的有关参数来开展敏感性试验,得到 $2.4\sim 5.4^\circ\text{C}$ 的增温范围,最可能值为 3.2°C ,但是这个模式依然要面对可信度这一问题.另一方面,云的反馈依然是模式不确定性的最大来源.云与气候的相互作用非常复杂,云量、云高、云粒子大小和云相态的改变都影响大气层顶的辐射通量.一种云属性的改变可能同时存在正负两种反馈效应.比如云量减少,一方面会导致射出长波辐射增多,减小大气层顶的辐射强迫,造成负反馈;另一方面会增加入射短波辐射,辐射强迫增大,造成正反馈.不同云高度的辐射特性也不同,低云以反射太阳短波辐射为主,造成负反馈;而高云因为云顶的极低温度使得射出长波辐射少,造成正反馈;正负两种反馈相消,净反馈的大小很难确定.缺乏对云过程的深入认识和统一的参数化方案也使得模式之间、模式与观测之间存在很大差异.更何况还可能还有其他未知的影响气候系统的关键因素仍未被发现并包含在模式之中.

正如前面提到的,无论是早期的大气环流模式还是最新的地球系统模式,都是对真实世界这个非线性复杂系统的简化式程序性表达,各个气候要素、各种尺度的气候系统和各圈层内部及其之间复杂的相互作用、反馈机制是模式难以完全准确表述和计算的.简言之,建立在物理、化学和生物等学科基本规律和定律基础之上的模式有其内在的科学合理性,但现阶段科学认知的水平决定了它还存在着一定的不确定性.古气候学者试图从地质历史时期的气候变化着手,分析过去的气候是如何对温室气体和火山活动等影响强迫因子进行响应的.当然,过去气候中不曾出现过我们如今面对的如此之高的温室气体浓度和快速全球变暖的场景;而且,估算末次冰期遗留下来的记录在冰川深处的 CO_2 含量,或者估算菲律宾皮纳图博火山喷发出的火山灰遮挡了多少太阳辐射,也难免会有误差.根据过去气候变化的综合研究,平衡气候敏感度也在 $1.5\sim 4.5^\circ\text{C}$ 这个范围内,最可能的值也在 3°C 附近.

现有研究表明,无论是古气候代用资料、历史仪器测量数据还是多模式多样本模拟,都无法缩小平衡气候敏感度的不确定性范围.有学者称,这个区间

的下限不会低于1.5℃是相对可以肯定的,但对上限的说法则存有争议,因为气候敏感度越大,不确定性可能越大^[6]。根据20世纪观测到的数据,并估算自然和人为造成的气候强迫,平衡气候敏感度有30%的可能性会超过4.5℃,在扰动参数的敏感性试验中最极端的情况高达9℃^[2]。需要指出的是,气候模式至今还无法合理模拟出极端地质暖期气候,这意味着有关键的要素或环节被遗漏了。最近,IPCC第五次评估报告建议的平衡气候敏感度是1.5~4.5℃,认为极不可能(概率为0~5%)低于1℃,非常不可能(概率为0~10%)大于6℃,上述区间与1979年简单模式所得的数值相同,可见几十年的科学研究并未缩小它的值域范围。

气候学者还有许多工作亟待开展。一方面他们需要在模式中实现更精确的云和气溶胶过程,因为这两部分是模式不确定性的最大来源。20~25年前,研究人员说这要花10~15年的时间,可至今仍没

有迹象显示这个问题可以在不久的将来得到解决。大量增加气候系统中的其他模块及其物理过程,研发地球系统模式确实拓展了模式的用途,但这种复杂化并没有使它比早期简单的大气环流模式更好地量化气候敏感度,反而进一步增加了不确定性的来源途径^[7]。模式发展的重心应该放在如何更好地刻画那些基本的、关键的物理过程(比如云和气溶胶、水汽与大气环流的耦合)和减少它们带来的不确定性和误差上^[7]。随着计算机能力的进一步提高,实现模式的精确性是具有现实意义的。另一方面,科研人员也需要获取更多和更好的古气候记录,开展古气候模拟研究来共同解析自然气候演化的事实与驱动机制,特别是气候与CO₂之间是如何耦合演化的。最后要说明的是,除非人类社会快速地摒弃或者极大地缩减化石燃料使用,否则未来大气CO₂浓度加倍乃至更高是不可避免的,现有的1.5~4.5℃平衡气候敏感度范围有待进一步研究。

致谢 感谢评审专家提出的修改建议。

参考文献

- 1 Alexander L V, Allen S K, Bindoff N L, et al. IPCC, 2013: Summary for Policymakers. In: Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al., eds. 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, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013
- 2 Kerr R A. How hot will the greenhouse world be? Science, 2005, 309: 100
- 3 Smagorinsky J. General circulation experiments with the primitive equations: I. The basic experiment. Mon Weather Rev, 1963, 91: 99-164
- 4 Charney J, Arakawa A, Baker D, et al. Carbon Dioxide and Climate: A Scientific Assessment. Washington, DC: National Academy of Sciences Press, 1979
- 5 Taylor K, Stouffer R, Meehl G. An overview of CMIP5 and the experiment design. Bull Amer Meteorol Soc, 2012, 93: 485-498
- 6 Roe G, Baker M. Why is climate sensitivity so unpredictable? Science, 2007, 318: 629-632
- 7 Stevens B, Bony S. What are climate models missing? Science, 2013, 340: 1053-1054

How hot will the greenhouse world be? —A brief review of equilibrium climate sensitivity

JIANG DaBang^{1,2} & LIU YeYi^{1,3}

¹ Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

² Climate Change Research Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

³ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Global mean surface air temperature has risen since pre-industrial times and is expected to increase further in the future due to anthropogenic emissions of greenhouse gases. Global warming and associated changes in climate and environment at global and regional scales have been received increasing attention in recent decades. The extent of global mean temperature increase in the 21st century is of great scientific and socio-economic interest. A central issue for scientific research is the value of equilibrium climate sensitivity—the equilibrium change in global mean 2-m air temperature that would result from a sustained doubling of the atmospheric carbon dioxide concentration. Following the discussion of equilibrium climate sensitivity published in the anniversary issue of *Science* in 2005, here we interpret this indicator with new insights from the scientific literature. In brief, the equilibrium climate sensitivity was suggested as being 1.5–4.5°C, on the basis of the earliest generation of atmosphere-slab ocean general circulation models in the late 1970s. These values were confirmed by a hierarchy of climate models ranging from atmosphere-slab ocean to atmosphere–ocean general circulation models in the 1990s and the early 2000s and were used in the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) First to Third Assessment Reports. That range was reduced to 2.0–4.5°C by the IPCC Fourth Assessment Report in 2007, but was estimated at 1.5–4.5°C again by state of the art climate and Earth system models in the IPCC Fifth Assessment Report in 2013. Much effort is needed to improve our understanding of clouds and aerosols—the biggest sources of uncertainty—in the real world and then in climate and Earth system models. Due to limitations concerning instrument records prior to the last century, attention should also be given to changes in climate during the distant past, either through the use of reconstructions or simulations, in order to reduce uncertainties in equilibrium climate sensitivity.

global warming, equilibrium climate sensitivity, model

doi: 10.1360/N972015-01333

姜大勝

1974 年生于吉林省梨树县；中国科学院大气物理研究所博士、研究员、博士生导师，中国科学院大学岗位教授，主要从事气候变化和气候动力学研究工作；近年主持的科研项目有“973”课题 1 项、国家自然科学基金青年和面上基金以及优秀青年科学基金 6 项；曾获中国科学院首届卢嘉锡青年人才奖、刘东生青年地球科学家奖、国家自然科学基金二等奖(第四完成人)等荣誉；已发表学术论文 90 余篇，其中 SCI 论文 50 余篇。