

基林和基林曲线：人类定量认识自身与自然关系的先行者和风向标

■ 贾朋群 郑秋红

现在世界上越来越多的人认识到人类正在改变地球气候。但是，这样一个重要结论的获得，科学家必须拿出确凿的观测事实作为依据。在这些观测事实中，最具有说服力的，就是半个世纪以来地球大气中二氧化碳

(CO₂)含量的变化情况，其中查里斯·大卫·基林(Charles David Keeling)在位于美国夏威夷岛名为莫纳罗亚山的活火山上开展的大气二氧化碳含量观测，提供了最为关键和令人信服的证据。今年，这位受到全球学者爱戴的严谨的美国科学家已经离开我们10年，然而，被称为现代气候变化科学先驱的基林开拓的观测和分析还在延续，而且还因为IPCC主导的气候变化评估等工作，基林开创的大气CO₂含量观测的结果，即基林曲线所代表的人类活动“干预”自然界的科学证据，获得了更多、更广泛的深刻认知和反省。基林和基林曲线所代表的科学家和揭示的科学事实，在人类如何应对气候变化的过程中，快速融入社会生活之中，成为人类认识自身与自然关系的思考者和重要事实依据的样本。

1 基林曲线的孕育

查里斯·大卫·基林(图1)

1928年4月20日出生于美国的宾夕法尼亚，1948年他在伊利诺斯大学获得化学和同位素地球化学专业学士学位，1954年在美国西北大学获得博士学位后，来到加州技术研究所做博士后，开展地球化学方面的研究并开始对观测大气中CO₂的含量问题感兴趣。19世纪末，有科学家提出温室气体可能会影响大气温度，但是大气中CO₂增加的可能性，却因为过度相信海洋会吸收大部分增加的CO₂而没有受到关注。那时科学界普遍认为，理论上大气中CO₂的含量会因为煤等化石燃料的燃烧出现全球尺度的变化，但因为人类活动造成的CO₂增量到底是累积在地球大气中还是被海洋和陆地植被所吸收则没有任何认识。

地球大气层包含多种气体，其中的一些气体，例



图1 查里斯·大卫·基林
(Charles David Keeling,
1928—2005)



基林和基林曲线所代表的科学家和揭示的科学事实，在人类如何应对气候变化的过程中，快速融入社会生活之中，成为人类认识自身与自然关系的思考者和重要事实依据的样本。

如，二氧化碳和甲烷等，具有的一个共同点是能够吸收红外线。以可见光为主的太阳辐射，穿越地球大气层后，可以加热地表，后者被加热后发射红外线。正是由于CO₂等气体的存在，地表发射的红外线无法穿过地球大气层使得热量在外层空间释放，这些气体也因为将热量保留在地球大气层内而被称为“温室气体”。正是因为CO₂等温室气体的存在，使得地球大气具有了温室效应，这一机制是地球成为适宜人类居住的家园的重要原因之一。

然而，因火山喷发等过程逐渐在地球大气层中存储和通过自然循环过程保持基本稳定的地球大气CO₂含量，因人类活动，尤其是人类对能源的消耗而形成新的人为来源而发生了改变。这种改变，或者说是急剧增加(图2)，伴随工业化革命以来人类开发化石燃料从而向自然索取更多能源的出现，逐步引起科学家们的关注。

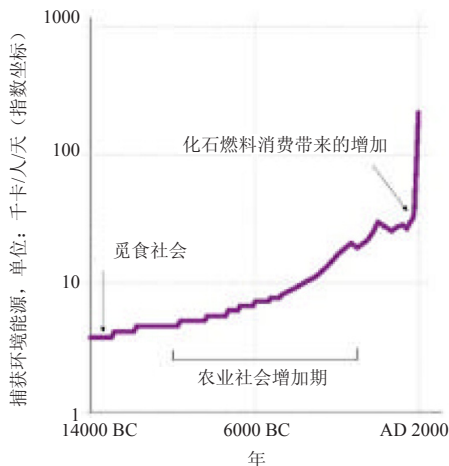


图2 人类在“抢劫”环境。人类从诞生之日起就靠从自然环境获得能量而生存，但是，我们的祖先在公元1.4万年前开始的觅食社会，以狩猎为生的人群从环境中“榨取”的能量很有限。之后进入漫长的农业社会，获取的能量也只是缓慢增加。而这一切，被工业化时代带来的化石燃料消费所改变。一个美国人今天从环境中获得的能源，已经是先民的46倍，对环境来说，已经无异于抢劫者

(来源: New Scientist, 18 April 2015)

20世纪50年代，加州大学斯克里普斯海洋研究所的2位科学家罗格·雷维尔（Roger Revelle，1950—1964年任海洋所所长）和汉斯·聚斯（Hans Suess）最早认识到，海洋作为CO₂汇的能力是有限的，因为海洋的表层水与深层水的混合是一个缓慢的过程。于是观测大气中CO₂含量成为紧迫的科学课题。雷维尔于是在1956年将基林招入海洋所，执着的基林从此就没有离开海洋所，将自己的事业定格在现代气候变化之观测和全球碳循环的研究上。

基林开始找寻新的方法，来替代存在疑问的确定CO₂变化的方法，他最终决定利用红外分析仪。但由于这是一个相对量的观测，因此需要设计更为精确的校准系统，使观测更为精确和不同测站长时间的观测记录之间具有可比性。在1957—1958年国际地球物理年期间，美国在莫纳罗亚山和南极分别建立了大气成分观测系统，同时在实验室对南极冰芯中的空气样品进行常规采样和对样品进行测量。在南极的观测显然避开了各种局地CO₂源的干扰，更能够代表全球背景大气成分变化的情况。

仅仅两年以后，基林就发表了关于全球大气CO₂变化的经典论文，指出南极的CO₂含量和化石燃料释放与海洋吸收在同步增加。他还发现，在莫纳罗亚站大气CO₂含量呈现季节变化的特征。利用同时对CO₂进行的¹³C/¹²C同位素比率观测，基林还论证了这种季节变化可能是由北半球温带植被的年循环所驱动。基林用当时全球3个测站的连续观测结果，以及一些飞机观测和实验室数据，初步描绘了大气CO₂的年变化属性。这张可以被称为“0版本”的基林曲线（图3），除了让后来趋于完整的基林曲线找到了观测开始点，最大的科学意义在于，在很大程度上证实了CO₂相对稳定的季节变化规律，从而改变了以前学界认为的，CO₂不同于氧气、氮气等大气成分，其变化基本上是无常的概念。

然而，基林和合作者近乎完美的工作结果，却很快就遇到了极大的困难。也许前后仅几年的零散观测，还无法揭示出大气CO₂的长期变化趋势，政府部门面对几条简单的温室气体浓度变化曲线，提出继续进行CO₂的观测已经没有必要，相应的研究资助也几乎中断。面对困境，基林似乎应该顺理成章地转入其他领域的研究。然而，他敏感地意识到对大气CO₂长期变化进行观测的无法替代的科学意义，所以他近似严酷和更加执着地继续着观测。

基林在很固执地继续CO₂观测，同时他把目光转向了人为大气CO₂来源，即化石燃料燃烧的研究。为了更好地评估大气CO₂的改变，他试图量化估计

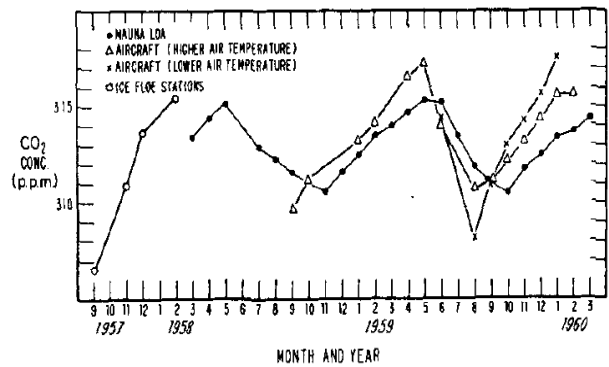


图3 基林给出的包括莫纳罗亚站在内的最早的CO₂观测结果。其中，莫纳罗亚站的观测值（始于1958年初，图中为实点线）构成了后来的基林曲线的开始部分

每年进入大气层的CO₂。1970年，他梳理了从1800年到1969年全球因燃煤等排放的CO₂，并给出了到1970年CO₂累积增加可以表为：

$$1.12 \pm 0.14 \times 10^{17} \text{g} \quad (4.1 \pm 0.5 \times 10^{17} \text{g CO}_2)$$

这一量化估计表明，增加的CO₂相当于19世纪后期地球大气层含量的18%。基林用他的研究成果告诫人们，化石燃料正在改变着人类生活，但同时也改变着地球大气中温室气体的含量，而且这种改变的趋势，已经达到了应该引起关注的量级。

2 基林曲线的诞生

1976年，基林在论文中再次给出大气CO₂含量的观测结果。经过近20年的思考和研究，更有信心的基林这次集中讨论莫纳罗亚山的记录，从而提示同行，大气CO₂含量长达15年的增加趋势（图4），不是以往所谓多变性能够解释的，最好的解释应该来自人类活动本身，即罪魁祸首是人类对化石燃料的消耗。基林指出，1959—1971年，年均CO₂浓度增加了3.4%。

实际上，截止到1971年的观测结果，早在当年就出现在出版物中（图5），而且这时的曲线，还给出了变化趋势。但是，仔细观察可以发现，这条早期的基林曲线，在1964年出现明显的中断期，真实地反映了对这一后来被证明是至关重要的大气观测，政府的资金支持却是不连续的。

正是基林不折不扣的追求，大约半个世纪以后我们得到了大气CO₂高度精确的记录：从20世纪50年代末的315ppmv（痕量气体单位，占体积的百万分之一）到20世纪初基林辞世前后的375ppmv。基林的同事们说，是他的坚韧、顽强和不懈让我们得到了这样严酷却真实、准确的关键数据。基林曲线

这张可以被称为“0版本”的基林曲线，除了让后来趋于完整的基林曲线找到了观测开始点，最大的科学意义在于，在很大程度上证实了CO₂相对稳定的季节变化规律，从而改变了以前学界认为的，CO₂不同于氧气、氮气等大气成分，其变化基本上是无常的概念。

随着更长时间观测数据的加入，其影响也如曲线本身代表的趋势一样，在科学界得到巨大反响，乃至扩展到全球政治、社会和经济生活中（图6）。如果说这组简单的数据是目前气候研究和气候预测中最为权威和得到最广泛认可的量化判据，成为人类正视气候变暖问题的基石；那么基林的辛勤工作无疑使他成为雕塑这块基石的第一人。

基林和他率领的小组以详实的事实描述了发生在莫纳罗亚山和南极大气中CO₂的变化情况，他们的工作很快得到了来自世界各地类似观测的呼应，从而得到了全球CO₂分布和变化的图像。基林认识到这些数据可以应用于大气传输模式，决定温室气体区域源和汇的分布。他从20世纪60年代开始，与国际合作伙伴一起将观测与模式模拟结合起来，这就不仅能够揭示大气成分变化的事实，还从多方面对这一事实给出合理的解释，从而使现代气候变化科学一步步走向成熟。

2002年，基林成为当年美国国家科学奖的获得者。在他的获奖辞里提到，基林在莫纳罗亚山站得到的CO₂变化曲线被称作“基林曲线”，成为了20世纪气候变化的标志图。

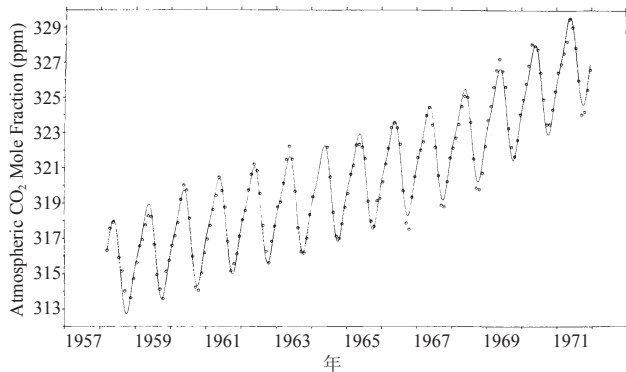


图4 1976年，基林给出的莫纳罗亚山站CO₂观测结果，基林曲线开始浮现

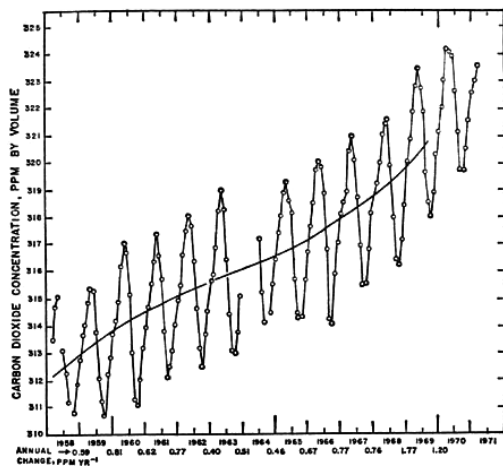


图5 基林观测结果出现在1971年MIT出版的《人类对气候的影响》报告中，并开始被称为“基林曲线”

3 基林曲线的影响

基林曲线的研究，始于1957—1958年国际地球物理年，研究的进展是渐进式的，其影响也随着观测数据的累积，特别是增加的数据对大气CO₂浓度持续增加的不断确认在国际科学界逐步提高。根据Web of Science科学文献数据库，可以检索到基林进入斯克里普斯海洋研究所之后，以第一作者身份发表的27篇与大气和海洋碳观测、碳循环和气候变化密切相关的文章。这27篇文章总被引频次达3545次，篇均131.3次，h指数为21，施引文献达2903篇次，这完全是热门领域一位出色科学家的数字。可贵的是，基林是并非热门的大气科学领域里，将碳循环与人类影响“带热”的学者，这一点可以从施引文献来自多达119个学科领域得到证明，而遍布全球90个国家和地区的施引作者，也清晰地勾画出基林曲线影响的广泛性。

在IPCC第一次评估报告（FAR，1990）和第五次评估报告（AR5，2013）中，分别引用了3篇和6篇基林研究成果。在IPCC最早和最近一次的评估报告中，莫纳罗亚和南极站的CO₂观测数据，都被视为迄今为止大气

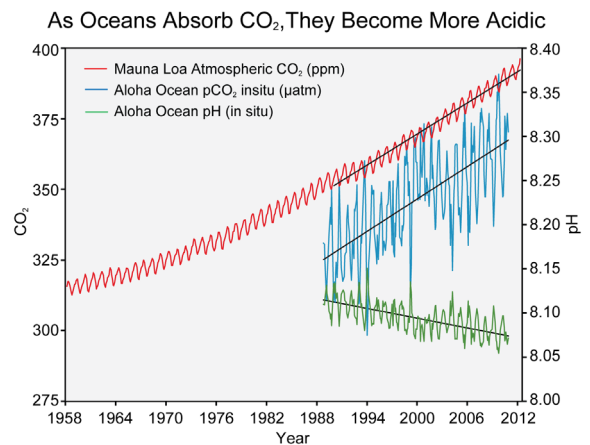
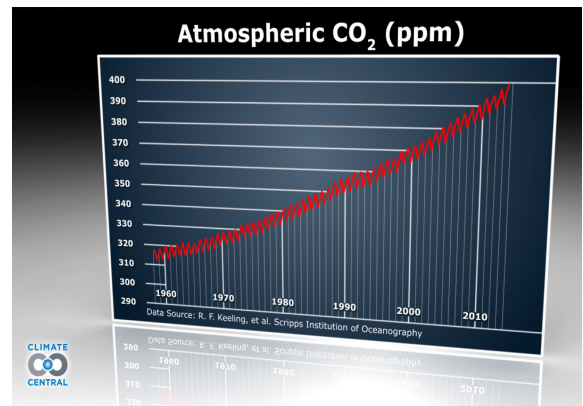


图6 当今不断更新中的基林曲线（上：<http://www.climatecentral.org>；下：美国气候变化第三次国家评估报告，20世纪80年代后期和基林曲线同时出现的，是代表海洋被酸化的指标）

CO₂测量手段和观测结果的最有说服力的证据，多次在报告的图表中出现，作为支持主要结论的研究结果。例如，在FAR中引用了莫纳罗亚站CO₂观测数据图，并主要基于该观测，得到了“当前大气CO₂水平已达353ppmv，平均增长率达18ppmv/a。”的重要结论。在AR5中，更是描述了莫纳罗亚站CO₂观测数据呈现出的“北半球大陆上空大气CO₂含量随着季节呈‘锯齿形’周期变化”，特别是，将该站和南极站对CO₂的测量手段和观测结果作为标准例证，指出“在莫纳罗亚和南极精准系统的大气CO₂观测，由斯克里普斯海洋研究所的基林于1950年代后期开始开展。”

4 基林曲线的荣誉及其对全人类的警示

在斯克里普斯海洋研究所的CO₂项目主页上，基林被称为“开启高精度连续观测大气CO₂的第一人”。美国化学学会在2015年基林逝世10周年之际，举办多项纪念活动，并确定将“基林曲线”作为“国家历史化学里程碑(National Historic Chemical Landmark)”。在介绍这些活动的小册子上，主办方认为“基林是建立全球大气CO₂观测的权威，由基林开始的连续几十年的精准观测，为人类提供了化石燃料消费和全球气候变化之间联系的最为重要的证据。基林的宝贵遗产中，首先是一个延续到今天的观测项目，它提供了权威的大气CO₂浓度记录，是现代气候变化科学的基石。‘基林曲线’即是展示这些数据的经典图，也是人类影响环境以及化石燃料燃烧对全球气候变化产生影响的有力标志。”美国化学学会盛赞“基林提高了人类对自身给地球造成影响的认识”。

为了纪念基林具有里程碑意义的工作和基林曲线

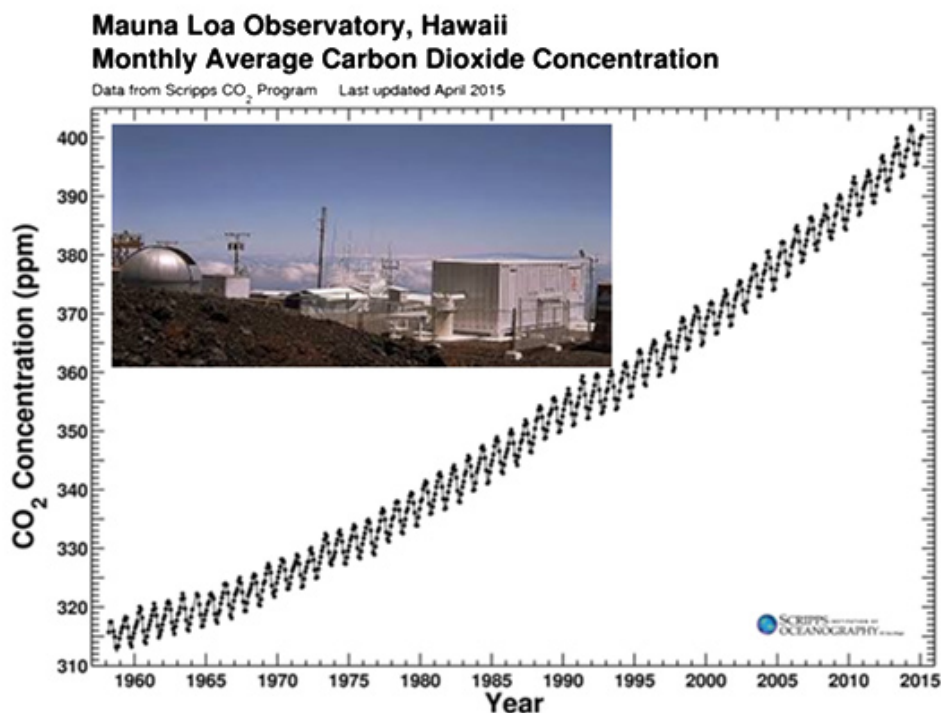
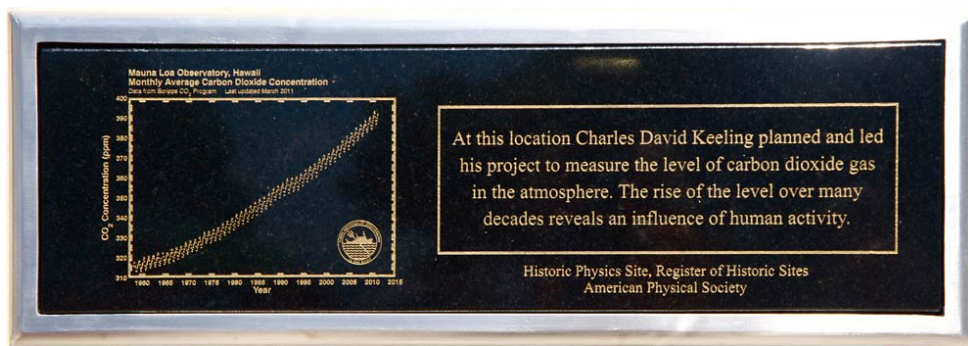


图7 上：美国物理学会在莫纳罗亚山基林观测地设立的基林曲线纪念匾；下：2015年4月更新的基林曲线，图中照片为莫纳罗亚山观测站

在人类应对气候变化的科学研究和决策中不可替代的意义，美国物理学会在基林观测点设立了纪念匾(图7)。

基林离开我们10年了，虽然基林曲线还将被继续延续下去，但是这条真实反映着人类对自然不断膨胀需求的，依然不断上升的曲线，绝不是基林的本意。这样的曲线如何画下去，是值得越来越多的地球人不断思考的问题。原海洋研究所所长查尔斯·F·肯内尔甚至认为，科学上有三次科学观测使科学本身发生了重大改变：行星位置的精确观测导致牛顿重力理论的发现；光速的观测让爱因斯坦创造了相对论；而基林对大气中CO₂的观测搭建了当今对气候变化问题的深刻反省的平台。

(下转80页)

第80页评刊

来信截至 2015年6月10日

@笑点滴哭点滴

通过第2期的“晨昏轨道卫星的气象应用需求分析”一文，了解到晨昏卫星能够有效弥补上午卫星和下午卫星间的“数据空白”，对卫星观测具有重要意义，文中也指出我国下一步将要发射晨昏卫星。那么其他国家，是否有已经发射的晨昏卫星或正在研发的晨昏卫星计划？

回复 (from作者)

目前晨昏轨道气象卫星主要是美国国防气象卫星DMSP，是目前世界上唯一的专用军事气象卫星，隶属于美国国防部。卫星资料主要为军队所用，但是也向民用开放。卫星上装载了光学成像仪器和微波探测仪器，其中微波辐射计SSM/I也是目前唯一可以在上午6:00左右提供大气温度和湿度信息观测的对地遥感仪器，所以对全球数值预报有较大的作用。

我国目前也有发展军事气象卫星的计划，轨道也选择了晨昏轨道，但是主要是光学和微波成像观测，缺少全球数值天气预报同化需要的大气温度和湿度探测信息。2013年4月，中国气象局和世界气象组织(WMO)空间天气司在北京专门邀请国际专家召开了“晨昏轨道卫星应用效益评估会”，撰写了“Assessment of the benefits of a satellite mission in an early morning orbit”评估报告。韩国在了解到了相关信息后，也在制定晨昏卫星的发展计划，预计2022年前后发射。

(上接79页)

深入阅读

- Keeling C D, Whorf T P. 2005. Atmospheric CO₂ records from sites in the SIO air sampling network. Trends: a compendium of data on global change, 16-26.
- Keeling C D, Piper S C, Bacastow R B, et al. 2005. Atmospheric CO₂ and ¹³CO₂ exchange with the terrestrial biosphere and oceans from 1978 to 2000: observations and carbon cycle implications. A History of Atmospheric CO₂ and Its Effects on Plants, Animals, and Ecosystems, J. R. Ehleringer, T. E. Cerling, and M. D. Dearing, Eds, Springer Verlag, 83-113.
- Keeling C D, Brix H, Gruber N. 2004. Seasonal and long-term dynamics of the upper ocean carbon cycle at Station ALOHA near Hawaii. Global Biogeochemical Cycles, 18, GB4006.
- Keeling C D, Whorf T P, Wahlen M, et al. 1995. Interannual extremes in the rate of rise of atmospheric carbon dioxide since 1980. Nature, 375(6533): 666-670.
- Keeling C D, Chin J F S, Whorf T P. 1996. Increased activity of northern vegetation inferred from atmospheric CO₂ measurements. Nature, 382(6587): 146-149.
- Keeling C D, Bacastow R B, Carter A F, et al. 1989. A three - dimensional model of atmospheric CO₂ transport based on observed winds: 1. Analysis of observational data. Aspects of climate variability in the Pacific and the Western Americas, 165-236.
- Keeling C D, Piper S C, Heimann M. 1989. A three dimensional model of atmospheric CO₂ transport based on observed winds: 4. Mean annual gradients and interannual variations, in: Aspects of climate variability in the Pacific and the Western Americas, D.H Peterson (ed.), Geophysical Monograph, 55, AGU, Washington (USA), 305-363.
- Keeling C D, Heimann M. 1986. Meridional eddy diffusion model of the transport of atmospheric carbon dioxide. 2. Mean annual carbon cycle. Geophys Res, 91: 7782-7798.
- Keeling C D, Bacastow R B, Bainbridge A E, et al. 1976. Atmospheric carbon dioxide variations at Mauna Loa observatory, Hawaii. Tellus, 28(6): 538-551.
- Keeling C D, Adams J A, Ek Dahl C A. 1976. Atmospheric carbon-dioxide variations at the South Pole. Tellus, 28: 553-564.
- Keeling C D. 1961. The concentration and isotopic abundances of carbon dioxide in rural and marine air. Geochimica et Cosmochimica Acta, 24(3): 277-298.
- Keeling C D. 1960. The concentration and isotopic abundances of carbon dioxide in the atmosphere. Tellus, 12(2): 200-203.
- Keeling C D, Mook W G, Tans P P. 1979. Recent trends in the ¹³C/¹²C ratio of atmospheric carbon dioxide. Nature, 121-123.
- Keeling C D. 1973. Industrial production of carbon dioxide from fossil fuels and limestone. Tellus, 25(2): 174-198.
- Keeling C D. 1961. The concentration and isotopic abundances of carbon dioxide in rural and marine air. Geochimica et Cosmochimica Acta, 24(3): 277-298.
- Keeling C D. 1960. The concentration and isotopic abundances of carbon dioxide in the atmosphere. Tellus, 12(2): 200-203.
- Keeling C D, Bacastow R B, Whorf T P. 1982. Measurements of the concentration of carbon dioxide at Mauna Loa Observatory, Hawaii. Carbon dioxide review, 110: 377-385.
- Keeling C D. 1968. Carbon dioxide in surface ocean waters: 4. Global distribution. Journal of Geophysical Research, 73(14): 4543-4553.
- Pales J C, Keeling C D. 1965. The concentration of atmospheric carbon dioxide in Hawaii. J Geophys Res, 70: 6053-6076.

(作者单位: 中国气象局气象干部培训学院)