



评述

全球变暖、碳排放及不确定性

方精云^{①②*}, 朱江玲^{①②}, 王少鹏^①, 岳超^①, 沈海花^①^① 北京大学城市与环境学院生态学系, 北京大学地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871;^② 中国科学院学部气候变化北京大学研究中心, 北京 100871

* E-mail: jyfang@urban.pku.edu.cn

收稿日期: 2011-02-25; 接受日期: 2011-06-29

中国科学院学部咨询评议项目、科技部全球变化重大研究计划(编号: 2010CB950600)和国家自然科学基金创新研究群体项目(批准号: 31021001)资助

摘要 近年来人们对全球变化尤其是对气候变暖及其机制的争论达到了前所未有的程度。本文对气候变化研究的最新进展和国内外动态进行了梳理, 得出如下观点和结论: (1) 全球变暖是客观事实, 但由于多种原因, 全球升温多少存在不确定性; (2) 人类活动和自然因素共同影响着气候变化, 但其相对贡献量难以量化; (3) 政府间气候变化专门委员会(IPCC)认为 CO₂ 等温室气体浓度的增加是全球变暖的主要因素, 但学术界对此有异议, 因为作用于温度变化的自然和人为机制并不十分明确, 大气中 CO₂ 的来源也存在不确定性。因此, 在得出准确结论之前, 需要加大力度研究和明确这些不确定性。

关键词
气候变化
碳排放
不确定性

以温暖化为主要特征的全球气候变化问题是 21 世纪人类社会面临的最严峻挑战之一, 关系到人类的生存和发展。化石燃料燃烧和土地利用变化所导致的碳排放被认为是引起全球变暖的最主要原因^[1,2]。由于碳排放与社会经济发展密切相关^[3~5], 因此气候变化问题也从单纯的科学研究领域演变成当今国际政治、经济和外交的热点议题。

为了应对气候变化, 世界气象组织(WMO)和联合国环境规划署(UNEP)于 1988 年成立了政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC), 以全面评估全球气候变化的观测事实、原因、对自然和社会系统的潜在影响, 以及人类可能采取的应对策略。1990 年, IPCC 发布了第一份评估报告, 此后每隔 5~7 年发布一次。至今, IPCC 已发布了 4 次综合评估报告以及多个专业报告。2007 年发

布的第四次评估报告(AR4)由 130 多个国家、450 多位主要作者、800 多位撰稿人编写, 代表着气候变化研究的主流认识, “反映了当前有关气候系统及其演变过程和未来变化预测的知识集成”^[6]。该报告得出以下关键结论: (1) 在过去的 100 年里(1906~2005), 全球平均气温升高 0.74°C(0.56~0.92°C); 北半球高纬度地区温度升幅较大; 陆地变暖的速率比海洋快。(2) 温度的显著升高主要由人为活动(包括化石燃料燃烧及毁林)排放的温室气体浓度增加所导致。(3) 气温升高将导致一系列的负面影响, 如冰雪融化、海平面上升和水文循环改变; CO₂ 浓度增加导致海水酸化。这些变化将直接或间接地威胁陆地和海洋生态系统以及人类生存环境。(4) 基于气候模式的预测结果表明, 未来 20 年全球气温将以每 10 年大约升高 0.2°C 的速率变暖。即使所有温室气体浓度稳定在 2000 年的水

平, 也会以每 10 年大约升高 0.1°C 的速率变暖. 变暖将减少陆地和海洋对大气 CO_2 的吸收, 增加人为排放 CO_2 存留在大气中的比例, 从而引起进一步的反馈效应^[1].

在全球变暖的机制上, IPCC 报告强调人为活动的影响, 强调 CO_2 浓度与增温的关系. 然而, 地球是一个极其复杂的动态系统, 各种因素盘根交结, 因果关系之间存在很大的不确定性^[7]. IPCC-AR4 发布后, 其结论受到了许多科学家的质疑, 如 2007 年成立的非政府间国际气候变化委员会(NIPCC)就曾针对 IPCC 评估报告提出了许多具有争议性和分歧性的问题^[8,9]. 尤其是自 2009 年出现“气候门”和“冰川门”^[10,11]之后, IPCC-AR4 的公信性更是受到了科学界的质疑, IPCC 报告不再是最权威性的总结, 其政治倾向及撰写过程的纰漏成为国际舆论的焦点. 也由于此, 联合国秘书长委托独立的国际学术团体组织——国际科学院理事会(InterAcademy Council, IAC)对 IPCC 的工作程序与评估过程展开独立调查. 调查结果认为, 尽管 IPCC 工作总体上是成功的, 但需要从根本上改革其管理结构、增强其程序的监控, 以便处理数量巨大、内容复杂的气候变化评估, 并得到更有效的公众监督^[12].

对 IPCC-AR4 主要结论的争论焦点集中在以下四个方面: (1) 气候变暖是否在发生; (2) 气候变暖的主要驱动因素是什么(也即: 人类活动和自然过程的贡献有多大); (3) 基于现有气候模式预测未来气候变化趋势的准确性如何; (4) 气候变化的影响程度如何. 其中, 最本质的争论在于气候变化的驱动因素, 即气候变暖是人类活动导致的还是自然过程引起的, 这也是国际社会应对气候变化以及进行以碳减排为核心的气候变化谈判的基石.

因此, 正确认识气候变化问题、厘清其争论的焦点是制定气候变化政策、应对气候变化的基础. 本文主要围绕气候变暖是否在发生, 以及变暖的主要驱动因素展开讨论, 并就人们特别关注的碳排放问题进行分析.

1 气候变暖及其不确定性

1.1 气候变暖的观测事实

关于地球是否在变暖, 在几年前还是有争议的问题^[13,14], 但近几年来这种立场有所改变^[8]. 各地的气温观测数据表明, 近百年来全球平均气温在升

高^[1,15~18]. 这不仅反映在温度的上升, 其证据还包括各地观测到的海平面上升、冰雪消融、春季物候提前和生长季延长等事实.

(1) 温度升高. 在历史的长河里, 全球温度经历了暖期与冰期的交替变化. 末次冰期结束后(大约在 12000 年前), 全球温度开始上升, 持续至约 8000 年前; 之后地球进入低温时期, 此降温过程直到大约 300 年前结束(1700 年前后). 此后, 温度又开始回升, 地球进入温暖期, 尤其是近百年(器测时期)以来, 全球平均气温显著升高, 升温速率也有加快趋势(图 1), 目前地球处于过去千年以来, 除中世纪温暖期外, 温度最高的时期^[1]. 我国在过去的近百年里平均气温也呈增加趋势, 平均每百年上升约 $0.5\sim 0.8^{\circ}\text{C}$, 尤其是自 19 世纪 80 年代以后升温更加显著: 19 世纪 80~90 年代平均上升了约 0.3°C ^[19].

然而, 全球变暖表现出很大的地域差异. 一般而言, 陆地表面比海洋表面增温快, 北半球高纬度地区比低纬度地区增温快、增温幅度大^[1]. 在过去半个世纪里, 我国气候变暖的发生时间及增温幅度也是因地区而异: 增温于 1975 年前后开始于东北地区, 之后出现于东部和南部沿海地区(1980 年前后), 并逐步向内陆地区扩展; 西部内陆地区(西北和青藏高原)最晚出现温暖化(1983 年)^[20]. 增温幅度在东北、西北和华北地区最为明显, 而西南、华南地区增暖幅度较小, 这种变化在近 100, 50 和 30 a 尺度上具有较好的一致性^[21].

(2) 海平面上升. 尽管存在较大的年际波动, 全球平均海平面自 1870 年以来持续上升^[1]. 在 1961~2003 年期间, 全球海平面上升的平均速率为 $(1.8\pm 0.5)\text{ mm a}^{-1}$, 1990 年代以后上升速率有所增加, 约为 $(3.1\pm 0.7)\text{ mm a}^{-1}$ ^[1](表 1). 海平面上升主要是由海洋增温带来的热膨胀效应以及冰川和冰盖融化等因素共同导致. 从表 1 看出, 这两种因素的贡献几乎同等重要.

(3) 冰雪消融. 大量观测数据表明, 过去的一个世纪, 全球多数地区雪盖减少. 1966~2005 年间, 除 11 和 12 月外, 卫星观测的北半球雪盖各月都在减少; 20 世纪 80 年代以后尤为显著, 减小速率高达每年 5%. 在南半球, 过去 40 年的雪盖有所下降或者变化不显著. 在雪盖减少的地区, 气温常起主导作用, 如北半球 4 月份雪盖面积与 $40^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 地区的 4 月份气温高度相关^[1]. 中国的冰雪观测数据表明, 1960~2005 年间, 雪盖面积有所减少, 但全国平均降雪厚

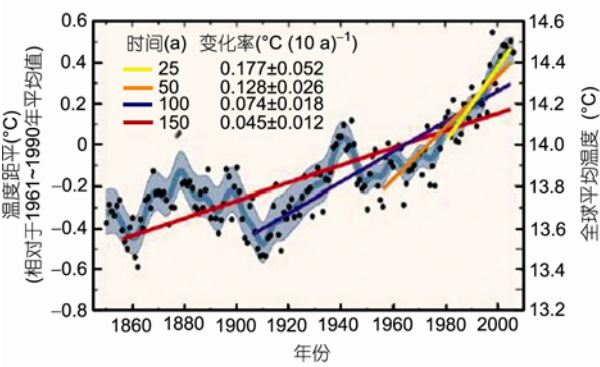


图 1 器测时期(自 1850 年)以来全球平均气温的变化趋势
图中不同颜色的直线斜率代表不同时期气温变率的大小. 1855~2005 年(150 a): 每 10 年升温 0.045℃; 1905~2005 年(100 a): 每 10 年升温 0.074℃; 1955~2005 年(50 a): 每 10 年升温 0.128℃; 1980~2005 年(25 a): 每 10 年升温 0.177℃. 据文献[1]修改

表 1 海平面上升速率及其来源 (mm a⁻¹)^[1]

来源	1961~2003	1993~2003
海洋热膨胀	0.42±0.12	1.6±0.5
冰川和冰盖	0.50±0.18	0.77±0.22
格陵兰冰原(Greenland Ice Sheet)	0.05±0.12	0.21±0.07
南极冰原(Antarctic Ice Sheet)	0.14±0.41	0.21±0.35
海平面上升的单个气候因子的贡献总和	1.1±0.5	2.8±0.7
观测到的海平面上升总量	1.8±0.5	3.1±0.7

度在 20 世纪 80 年代后出现增加趋势. 从空间分布看, 南方地区平均降雪厚度在下降, 而北方降雪厚度在增加. 北方降雪厚度增加主要是由北方冬季降水量增加所致^[22](图 2).

此外, 对海冰和冰川的观测表明, 过去 150 年间全球大部分地区的海冰及冰川都呈现萎缩趋势. 例如, 自 1978 年以来, 北极地区海冰面积以每年(2.7±0.6)%的速度递减, 海冰厚度也有下降趋势^[23]. 南美巴塔哥尼亚、喜马拉雅、阿拉斯加和美国西北部以及加拿大西南部的冰川和冰盖大量减少^[24]^[1]. 但最近也有报道, 南极冰川在扩大^[25]^[2].

(4) 生长季延长. 各地的物候观测表明, 大多数植物和动物的春季物候提前, 秋季物候推迟, 从而导致生长季延长^[26~28]. 我国物候观测结果表明, 各地物候期的年际波动与春季气温的年际波动具有明显的相关性, 东北、华北及长江下游地区春季物候提前最明显^[29]; 北京地区春季物候自 20 世纪 80 年代以来一直呈提前趋势, 尤其在 1990~2000 年间比过去 140 年提前了 8.8 天^[30], 而秋季物候在 1962~2005 年间平均每年推迟 0.32 天^[31]. 基于遥感数据对中国温带植被的物候分析表明, 在 1982~1999 年间, 中国温带春季物候平均每年提前 0.79 天, 生长季年平均延长 1.16 天^[28](图 3). 同样, Zhou 等^[26]利用遥感数据分析

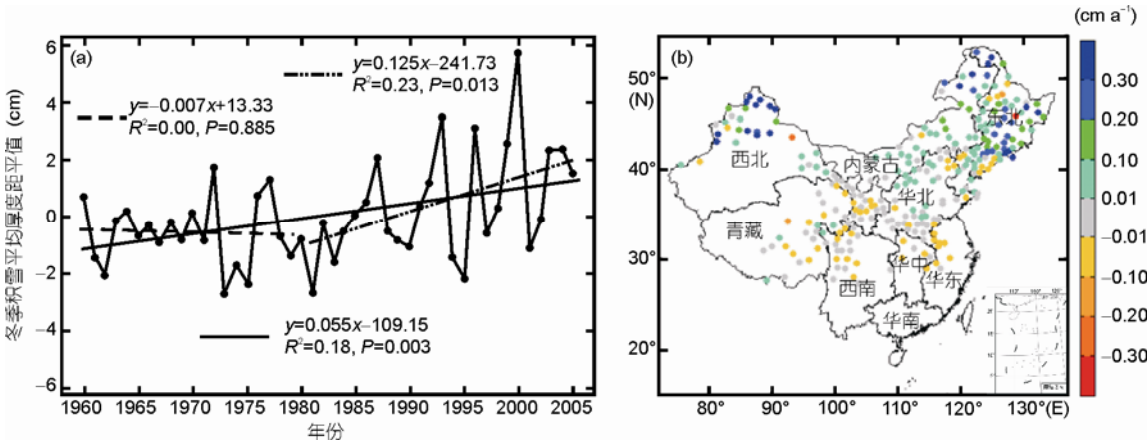


图 2 冬季积雪平均厚度距平值(a)及其空间分布(b)
南方降雪减少, 而北方增加, 据文献[22]

1) <http://www.time.com/time/magazine/article/0,9171,1176980,00.html>; <http://www.guardian.co.uk/environment/2009/jun/04/byers-himalaya-changing-landscapes#zoomed-picture>
2) <http://www.news.com.au/story/0,27574,25348657-401,00.html>

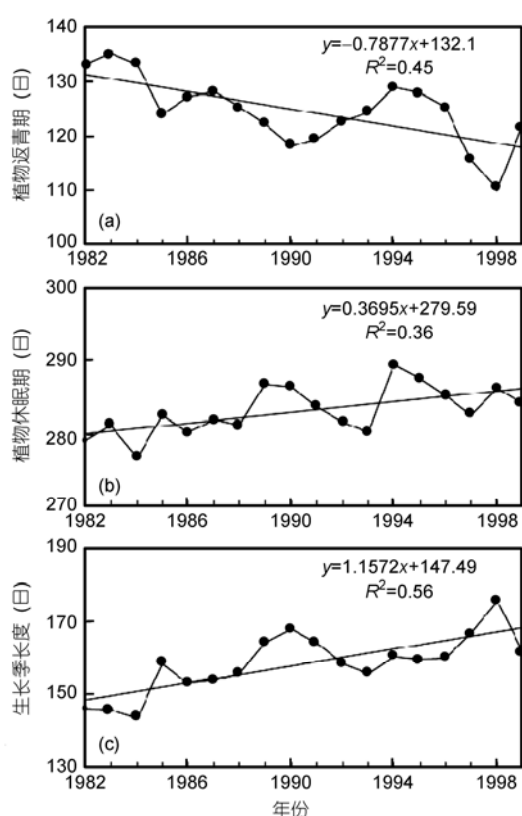


图3 1982~1999年间中国温带植物候期的变化
(a) 植物返青期; (b) 休眠期; (c) 生长季长度^[28]

表明, 1982~1999年间, 40°~70°N 间欧亚大陆植被生长季平均延长了18天, 而北美大陆延长了12天。

1.2 气温变化的不确定性

如上所述, 近代以来地球在变暖是一个基本的观测事实, 但其变暖的幅度却存在很大的不确定性^[15,32,33]。不确定性的主要来源可以概括为以下几个方面:

(1) 地质历史时期温度的推算主要来自冰芯、古孢粉、考古、树轮等代用数据及古文献资料^[34]。由于代用数据在空间分布和时间跨度上都非常有限, 部分数据对气温变化不够敏感等, 使基于这些结果重建的局部或全球的温度趋势存在极大的不确定性^[35]。一种代用资料往往不够全面、代表性不足, 不同代用资料对气温变化的反应不同, 因此选用不同代用资料或不同重建方法, 得出来的结果相差极大。不仅如此, 同一种代用资料, 如树木年轮定年准确、连续性强、分辨率高, 是比较理想的代用资料之一, 但树木

年轮与气候要素的响应关系复杂, 不仅受气温的影响, 还受CO₂浓度、降水量等影响, 且空间位置、树种不同, 响应关系也有所差异, 这些都会造成结果的不确定性。

(2) 在器测时期, 气象站点的数量和分布对全球温度的估算值影响很大: 在早期, 站点少, 且主要分布在北半球中纬度地区, 尤其是欧美国家; 此后站点逐渐增多, 但在一些地区, 尤其在南半球和海洋区域, 站点仍然稀缺, 一些地区甚至空白。观测站点的数量和分布变化显著影响着全球温度及其趋势的估算^[36]。

(3) 气象观测站点大都分布在城市及其邻近地区, 近百年来发生在全球各地的城市化过程对区域和全球温度变化可能产生着深刻的影响。例如, 在我国上海, 在过去的30年间(1975~2004), 无论是年均温, 还是平均最低和最高气温, 城区与郊区的气温差都随着城市化进程和城区面积的扩大而增加, 30年中可达到0.7~1.0℃^[37]。基于遥感和地面观测数据的分析表明, 在我国华南地区城市热岛效应对城市和区域温度有着显著的影响^[38]。在美国, Goodridge^[39]也同样发现城市热岛效应对区域温度的影响: 在大型城市, 温度增加趋势显著; 中等城市较显著, 而在小型城市则几乎不存在增温趋势。

城市热岛效应对区域和全球温度的贡献大小是一个有争议的问题。IPCC^[1]认为城市热岛效应的影响是存在的, 但这种影响具有局地性, 在全球陆地小于0.06℃ (100 a)⁻¹。Trenberth等^[40]的估计更小, 认为自1900年以来城市热岛效应对全球变暖的贡献仅为0.02℃ (100 a)⁻¹。然而, 一个不可忽视的因素是, 地表平均气温是由气象站观测数据计算得到, 而气象站大都分布在城市及其邻近地区, 因而, 基于气象站观测数据的计算结果自然会受到显著影响。如有研究表明, 1951~2004年间, 城市化对中国升温的贡献在40%左右^[41]。

(4) 其他因素, 如温度的插值方法等也会对温度及其趋势产生影响。如, 由于分析方法不同, 三种温度序列(HadCR UT3, GISS和NCDC)对最近几十年的解释就有差异, Knight等^[42]利用HadCR UT3温度序列模拟的结果显示, 在最近的12年里(1998~2009), 全球平均温度没有显著变化, 处于高温平台, 支持此观点的还有Kerr^[43]。然而, 根据GISS和NCDC温度序列的模拟结果表明, 全球近10年温度变化依然呈明显上升趋势^[25,44]。Allison等^[25]认为, HadCR UT3数

据系列未包括北极资料, 而北极地区在近 25 年来气候显著变暖, 因此可能低估了近 10 年的变暖趋势. Wang 等^[45]通过文献资料分析, 1999~2008 年仍是过去 30 年间温度最高的时期, 尽管十年间平均温度没有上升, 但全球变暖仍在持续. 中国在 1999~2008 年间平均温度仍以 $0.4\sim0.5^{\circ}\text{C} (10\text{ a})^{-1}$ 的速度上升, 尤其是中国东北部上升趋势十分明显. 最近 10 年的气温变化到底是停止还是持续仍存在争议, 但讨论气候变化至少需要 25~30 年的观测数据; 利用 10 年的数据来说明未来的气候变化趋势可能有些勉强.

2 气候变化的影响因素及其不确定性

影响气候变化的因素很多, 主要有温室气体、太阳活动、气溶胶、地球轨道变化以及大气和海洋环流等. 主要可归为人为和自然因素两类. 前者指人类活动引起的温室气体和气溶胶排放, 后者主要包括太阳活动、火山爆发等因素^[1]. IPCC 把气候变暖主要归因于温室气体, 特别是 CO_2 浓度的增加^[1]; 而坚持自然因素起主要作用的观点认为, 目前的增温只是气候变化历史长河中的一个阶段^[8,46]. 这两种观点成为目前争论的焦点. 这两类影响因素的相对重要性直接影响着全球气候谈判以及国际社会应对、适应和减缓气候变化的政策走向和行动取向.

2.1 温室气体的作用

温室气体是指大气圈内能吸收红外辐射使大气温度升高的气体. 如果大气层不存在, 地球表面平均温度为 -19°C , 但实际上地球表面的温度能保持在 14°C 前后. 即温室气体的温室效应能使地球表面温度升高 33°C . 法国科学家 Joseph Fourier 于 1824 年最早发现了这一现象, 此后(1896 年)瑞典科学家 Svante Arrhenius 首次定量证明了这一发现, 指出如果大气 CO_2 浓度加倍, 地球表面温度将升高 $5\sim6^{\circ}\text{C}$ ^[47].

大气中的主要温室气体包括水汽(H_2O)、二氧化碳(CO_2)、甲烷(CH_4)、氧化亚氮(N_2O)、对流层臭氧(O_3)、氟利昂类物质(CFCs)等. 温室气体对大气升温的贡献大小取决于其在大气中的浓度(含量)和温室效应强度. 综合这两种特性, 主要大气成分水汽、 CO_2 、 CH_4 及 O_3 对温室效应的贡献大小分别为 36%~72%, 9%~26%, 4%~9%和 3%~7%^[48].

温室气体对维持生物存活的地球温度是至关重

要的. 然而, 过去 150 年来人类活动导致大气中温室气体浓度显著增加, 这是全球变暖的重要因素. 在过去的近 250 年里(1750~2008), 大气中的 CO_2 浓度由 280 ppm 增加到 387 ppm, CH_4 浓度由 700 ppb 增加到 1745 ppb, N_2O 浓度由 270 ppb 增加到 314 ppb, 分别增加了 38%, 149%和 16%^[1]. 这些温室气体浓度增加的主要来源是: CO_2 主要来自化石燃料使用 and 水泥生产, 以及土地利用变化(如热带毁林)所导致的排放; CH_4 主要来自畜牧业、水稻田、湿地等排放; N_2O 主要产生于施肥等农业生产活动; CFCs 则主要来自冰箱、空调等制冷剂的使用. 火山爆发等自然过程排放的 CO_2 所占的比例很小, 只是人为活动排放 CO_2 的 1%^[49].

在所有温室气体中, 水汽对温室效应的贡献最大, 它贡献了全部温室效应的 1/3~2/3. 水汽约占大气成分的 2%, 主要来自于地表和海洋蒸发以及植物蒸腾作用. 由于人们一直认为对流层中水汽含量不存在明显变化, 水汽的增温作用长期被忽略. 但全球变暖使蒸发增强, 从而导致大气水汽含量增加, 而大气的热膨胀可以容纳更多的水汽, 从而对升温产生正反馈作用. 一些区域的观测结果表明, 过去的几十年, 水汽含量显著增加^[50~52](图 4).

2.2 气溶胶的作用

气溶胶是大气中的一种微小颗粒, 主要由火山爆发所产生的火山灰、化石燃料排放所产生的 SO_2 等大气污染物、生物质燃烧所释放的微粒等组成. 气溶胶通过影响大气化学过程、辐射过程和云物理过程的变化而影响近地表辐射平衡和气温. 绝大部分气

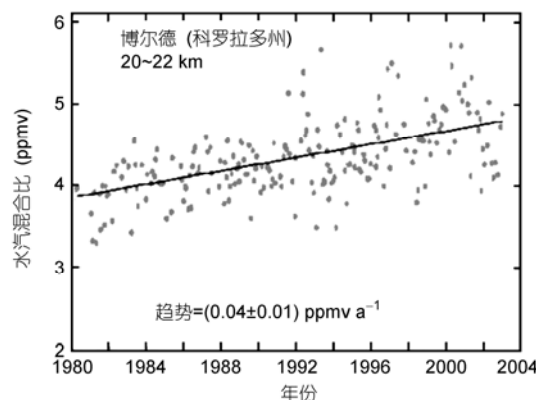


图 4 过去 25 年美国 Colorado 高空 20~22 km 的水汽含量变化^[50]

溶胶,如硫化物、生物质颗粒、化石燃料排放的有机碳、对流层中的气溶胶等因反射太阳辐射而对大气产生降温作用;但也有少量的,如化石燃料排放的黑炭(black carbon)却具有增温效果,而无机粉尘(mineral dust)的增降温机制不清.此外,气溶胶通过影响水云并引起云反照率效应,产生间接的降温作用^[53,54].

与温室气体相比,气溶胶在大气中驻留时间短,从几个小时至数天数月,但大气总能够保持一定量的气溶胶.Lu等^[55]对中国2000~2006年间的SO₂排放趋势的分析表明:SO₂排放量从21.7 Tg增加到33.2 Tg,增加了53%,其中北方和南方各增加了85%和28%.由于气溶胶分布不均一以及复杂的化学反应,气溶胶的影响模拟较为困难^[56],不同气溶胶的降温或增温强度具有很大的不确定性^[7].Ramanathan和Carmichael^[57]指出,黑炭气溶胶可能是造成气候变暖的第二大根源,其作用仅次于CO₂,所产生的直接辐射强迫可达0.9 W m⁻²,是同期CO₂辐射强迫的55%.而多数学者认为,气溶胶对气候变化的总体作用是降温效应^[58~60],但对全球变暖的相对贡献持不同观点.Hansen等^[59]认为气溶胶的降温强度可以抵消过去几十年里人类活动排放的CO₂的增温效果.但最近也有研究认为,气溶胶的冷却效果不强,只是温室气体的10%左右^[60].

2.3 太阳活动的影响

太阳是地球热能的最主要来源,太阳活动与地球温度变化关系密切.但太阳活动变化对地球温度变化的影响到底有多大还很不确定.有学者认为,太阳活动增加导致地球增温^[61~63].例如,观测表明,在长时间尺度,太阳活动强度与北极地区的温度变化吻合很好^[64];太阳黑子的变化与全球温度之间呈良好的对应关系^[65].这说明太阳活动可能是影响长期温度变化的主要因素之一.但大多数研究认为,太阳活动在20世纪60年代以前是地球气候变化的重要影响因素,但最近的气候变暖却很难用太阳活动的变化来解释^[66~68].如图5表明,1880~1960年间太阳总辐射与温度的变化十分吻合,但之后,太阳总辐射有所减少,而温度却在持续上升.此外,也有研究认为太阳活动增强反而促使降温.例如,Haigh等^[69]对2004~2007年间的太阳光谱数据进行分析发现,与2004年相比,2007年太阳活动强度更弱,但抵达地球

对流层的太阳能量净值却比2004年多,说明当太阳活动减弱时,到达地球表面的可见光却增多了,从而促使地球表面温度上升.

火山活动也是重要的自然因素之一,火山喷发产生的火山灰和气体通过影响大气的辐射传输而降低地球平均气温^[70,71].由于火山喷发存在季节、纬度和强度的差异,因此喷发物的空间分布特征不同,对辐射的影响也不同^[72].但目前没有好的方法预测火山活动以及热盐环流的变化,因此无法正确定量火山等自然因素对气候变暖的作用.这也许是在气候变暖中强调人为因素影响的原因之一^[33].

3 CO₂排放与气温变化的关系

在所述的人为源温室气体中,CFCs的排放已受到有效控制,CH₄和N₂O基本属于自然释放,因此,人们对它们的关注度较小.目前人们最关注的是CO₂排放.主要原因是CO₂不仅为最大的人为源温室气体,被认为是影响目前温度上升的最大因素,而且与其他温室气体相比,控制其排放的可能性更大.

实际上,大气CO₂浓度的增加涉及很多非常复杂的因素,如海陆生态系统的自然释放和人为活动排放,但其定量机制和过程尚不十分清楚.为说明这一问题,本文从全球碳循环的角度,来简单分析人为源和自然源CO₂的来源和归宿(图6).

3.1 全球碳循环与大气CO₂浓度增量的来源

图6是本世纪初的全球碳循环模式图.如果陆地生物圈与大气之间的碳交换处于平衡状态,全球陆地生物圈从大气中吸收120~150 Pg C的CO₂(即总初级生产力,GPP;1 Pg C = 10¹⁵ g C)^[75,76],它应该通过植物自身的呼吸(自养呼吸)和生态系统的异养呼吸(土壤微生物和土壤动物等的呼吸)向大气中排放等量的CO₂.

但是,全球碳循环的平衡模式正受到干扰.一方面,近年来人为活动(化石燃料燃烧及土地利用变化)排放的CO₂约为9~10 Pg C^[74],是陆地和海洋生物圈自然释放CO₂的1/22~1/26;另一方面,由于目前的气候系统处于非平衡状态,气温升高也可能导致土壤异养呼吸和海洋碳排放的增加^[77,78].如果这部分增加的CO₂不能被生态系统所吸收,也将导致大气CO₂浓度的增加.即大气CO₂浓度的增加不只来自人类

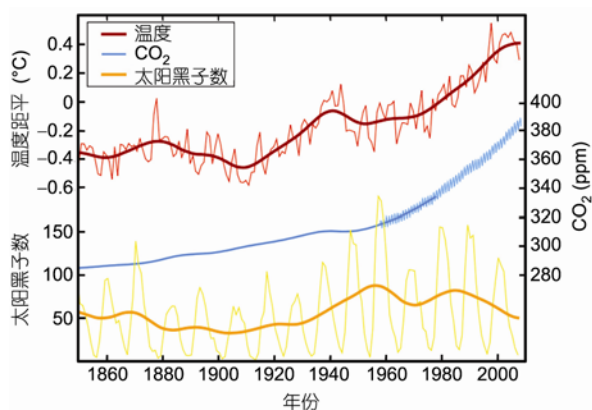


图 5 1880 年以来太阳黑子与温度的年际变化
<http://solar-center.stanford.edu/sun-on-earth/glob-warm.html>

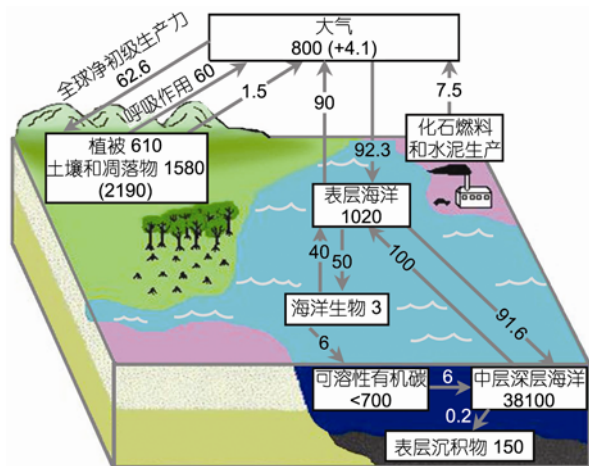


图 6 本世纪初(2000~2007)的全球碳循环模式图
单位: Pg C 或 Pg C a⁻¹. 根据文献[73, 74]修改

活动的碳排放,也可能来自于陆地和海洋生态系统对气温升高的响应. 对地球自然源和人为源 CO₂ 总排放量以及总吸收量进行概算表明,全球自然和人为 CO₂ 排放总量约为 250 Pg C,而全球海陆和大气 CO₂ 总吸收量约为 230 Pg C(表 2),即地球总排放量与吸收量之间收支不平衡,相差约有 20 Pg C,这相当于目前人为活动总排放量的 2 倍. 可见,大气中 CO₂ 增量的来源并不是很清楚的. 换言之,增加的大气 CO₂ 浓度是否都是人为排放的,是一个不确定性的问题.

3.2 碳排放与增温的关系

CO₂ 浓度升高与增温之间的关系是一个有争议的问题.

表 2 全球自然和人为 CO₂ 排放总量和海陆和大气 CO₂ 总吸收量^[1,73,74, 79-84]

排放 (Pg C a ⁻¹)		吸收 (Pg C a ⁻¹)	
自然排放			
陆地生物圈自养呼吸	60~75	陆地生物圈吸收	120~150
陆地生物圈异养呼吸	70~100	海洋生物圈吸收	90~93
海洋表面排放	90	大气储存	4~5
人为排放			
化石燃料燃烧	7~8		
毁林	1.5~2		
总排放量(取中间值)	250	总吸收量(取中间值)	230

IPCC^[1]认为,目前的升温很有可能是由 CO₂ 等温室气体浓度的增加导致的. 该结论依据的物理学基础是: (1) CO₂ 是温室气体,温室气体增加必然导致大气温度的增加; (2) 过去 100 多年来,大气 CO₂ 浓度增加了;增加的 CO₂ 浓度应该会导致大气增温. 而且,气候模式研究结果表明:即使考虑了所有的自然因素和分析误差,也不能解释现在的升温现象;只有把人为排放的 CO₂ 等温室气体考虑进去,才能较好地说明目前的升温现象.

对这一物理过程以及逻辑本身,科学界是达成共识的. 但是人们质疑 IPCC 是否片面地过分强调了人为源 CO₂ 排放的影响,并夸大了温度对 CO₂ 浓度的敏感度. CO₂ 浓度升高与气温变化的关系非常复杂,定量描述气温变化对 CO₂ 浓度升高的敏感度也存在很大的不确定性. 辐射强迫往往用来定量表示温室气体排放对气温变化的作用. IPCC^[1]综合了众多研究结果后指出,自工业化时期以来,大气 CO₂ 浓度增加所产生的辐射强迫为(1.66±0.17) W m⁻²,尤其是在 1995~2005 年间,这种增加导致的辐射强迫增加了 20%. 然而,最近一些研究表明,CO₂ 辐射强迫比 IPCC 给出的值要低^[85-87]. 尽管数据的取舍年份可能会影响其结果,但还是说明 CO₂ 浓度增加对气温升高的作用可能比 IPCC 给出的结果小得多.

如前所述,大气温度的变化除温室气体外,还受其他因素(如自然过程以及气溶胶等)的影响. 然而,自然因素对温度变化的作用机制并不明确,气溶胶的作用更是存在不确定性. 因此,把气候变暖简单归结为温室气体浓度升高可能是片面的. 在器测时期的 100 多年里,若干时期的气温变化与 CO₂ 浓度增加之间方向相反. 在过去的近百年里(1910~2010),气温与 CO₂ 浓度在整体上具有较好的相关性,但在气

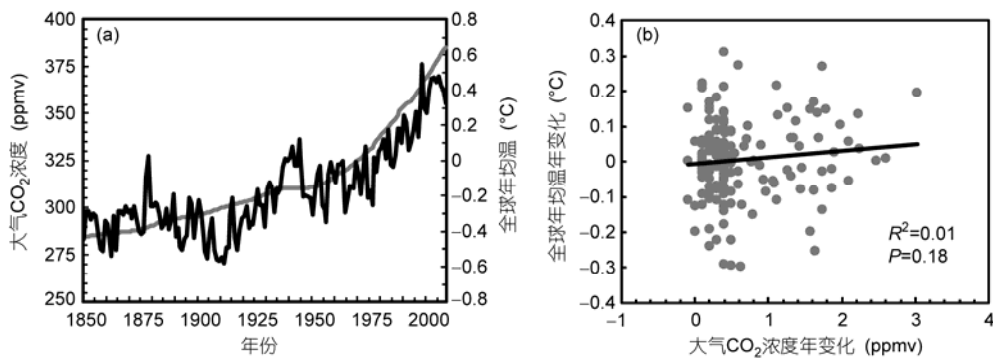


图7 大气 CO₂ 浓度与全球平均温度的关系(a)和 CO₂ 浓度年增量与年均温年变化量的关系(b)

温变化过程中存在 2 个明显的降温期: 1940~1975 和 1998~2009 年, 而在这两个时期, 大气 CO₂ 浓度一直快速升高(图 7(a)). 如果对 1850 年以来大气 CO₂ 浓度与大气温度之间每间隔 30 年进行相关分析, 就可以发现, 在这 158 年中, 三个时期两者显著正相关, 一个时期显著负相关, 两个时期相关性不明显(表 3). 此外, 从大气 CO₂ 浓度的年增量与年均温年变化量看, 二者之间只有很微弱的正相关性($P>0.05$, 图 7(b)). 即使考虑温度变化可能滞后于 CO₂ 浓度变化, 二者关系在统计上仍然是不显著的. 这些结果表明了地球冷暖变化的复杂性, CO₂ 只是影响气温变化的一个方面, 短时期气温变化会更多地受 CO₂ 以外的因素影响, 如 Lean 和 Rind^[88]认为太阳辐射和火山爆发等自然因素在近 10 年积累的降温作用可能抵消了温室气体的部分增温作用.

综上所述, 尽管 IPCC^[1]把目前观测到的气温升高主要归因于 CO₂ 等温室气体浓度的增加, 但对这一问题的不确定性阐述不够, 缺乏足够的科学性并导致争议. 过去 150 多年来温度变化有升有降, 而气候模式预测的未来气温却一直保持增加趋势. 这表明当前气候模型对地球大气系统(尤其对影响气温变

化的自然因素)的刻画是不完备的, 预测结果存在很大的不确定性^[89]. 也由于此, 基于 IPCC 报告给出的 2℃ 阈值(即当 CO₂ 浓度约增加到 450~550 ppmv 时, 可能导致的温度增高值)作为减排的依据是值得怀疑的^[85,90,91]. 一种客观、可以接受的观点是, CO₂ 作为一种主要的温室气体, 其浓度增加对全球气候变暖有贡献, 但贡献多大是一个不确定的问题. 科技界在得出准确结论之前, 需要加强研究, 并明确这些不确定性.

4 主要观点和结论

(1) 气候变暖是客观事实, 但变暖程度存在不确定性: 各地的观测数据表明, 近百年来全球平均气温在升高. 这不仅反映在温度的上升, 其证据还包括海平面上升、冰雪消融、以及物候期变化等观测事实. 但全球到底升温多少存在不确定性.

(2) 人类活动和自然因素共同影响着气候变化, 其相对贡献难以量化: 影响全球气候变化的人为因素主要包括化石燃料使用和毁林等人类活动引起的二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)等温室气体以及气溶胶(如 SO₂)的排放, 自然因素包括太阳活动、火山爆发等. 一般来说, 温室气体导致升温, 而气溶胶使地球变冷. 水汽是最大的温室气体, 但它在大气中的含量变化较小, 而 CO₂ 等温室气体的浓度显著增加, 其相对的增温效应也显著增加. 无论是自然因素, 还是人为因素, 它们对全球温度变化的影响存在不确定性, 尤其是气溶胶.

(3) IPCC 认为 CO₂ 等温室气体浓度的增加是全球变暖的主要因素, 但存在很大的争议: IPCC 报告认为全球变暖主要由 CO₂ 等温室气体浓度的增加导致的, 其依据主要来自温室效应的物理学基础和气

表3 每 30 年间大气 CO₂ 浓度序列与全球年均温序列的相关系数

时间段	原始序列相关系数
1850~1880	0.46 ^{a)}
1881~1910	-0.61 ^{a)}
1911~1940	0.84 ^{a)}
1941~1970	0.02
1971~1997	0.79 ^{a)}
1998~2008	-0.02

a) $P<0.05$

候模式的研究结果. 该结论存在较大争议, 质疑的主要理由是: 1) 影响全球温度变化的主要因素对温度变化的作用机制不清楚, 气溶胶的作用更是存在不确定性; 2) 在过去的百余年里, 若干时期的气温变化与 CO₂ 浓度增加的方向相反, 即尽管大气 CO₂ 浓度

持续升高, 但气温却呈下降趋势或基本稳定; 3) 大气 CO₂ 浓度的年增量与年均温的年变化量之间并不存在显著的相关性; 4) 大气中 CO₂ 的来源存在不确定性, 目前观测到的大气 CO₂ 浓度显著升高并不一定都是人类活动排放导致的.

致谢 本文部分内容在中国科学院第 15 次院士大会上报告过. 在研究及成文过程中, 得到李静海先生的悉心指导, 唐艳鸿、徐嵩龄等先生提出过宝贵意见, 曹效业、刘峰松、王澍、冯霞等先生在研究过程中给予支持. 此外, 两位审稿人在本文修改过程中提出宝贵意见. 特此致谢.

参考文献

- 1 Solomon S, Qin D, Manning M, et al. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. New York: Cambridge University Press, 2007
- 2 Gleick P H, Sdams R M, Amasino R M, et al. Climate change and the integrity of science. *Science*, 2010, 328: 689–690
- 3 丁仲礼, 段晓男, 葛全胜, 等. 2050 年大气 CO₂ 浓度控制: 各国排放权计算. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2009, 39: 1009–1027
- 4 方精云, 王少鹏, 岳超, 等. “八国集团”2009 意大利峰会减排目标下的全球碳排放情景分析. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2009, 39: 1339–1346
- 5 王少鹏, 朱江玲, 岳超, 等. 碳排放与社会经济发展(II), 碳排放与社会发展. *北京大学学报(自然科学版)*, 2010, 46: 505–509
- 6 ICSU (International Council for Science). Statement by ICSU on the Controversy Around the 4th IPCC Assessment. 23 February, 2010
- 7 Lomborg B. *The Skeptical Environmentalist: Measuring the Real State of the World*. New York: Cambridge University Press, 2001. 268
- 8 Singer S F, Anderson W, Goldberg F, et al. Nature, not Human Activity, Rules the Climate: Summary for Policymakers of the Report of the Nongovernmental International Panel on Climate Change (NIPCC). Chicago: The Heartland Institute, 2008. 40
- 9 Idso C, Singer S F. *Climate Change Reconsidered: 2009 Report of the Nongovernmental International Panel on Climate Change (NIPCC)*. Chicago: The Heartland Institute, 2009. 868
- 10 Heffernan O. Climate data spat intensifies. *Nature*, 2009, 460: 787
- 11 Schiermeier Q. IPCC flooded by criticism. *Nature*, 2010, 463: 596–597
- 12 Committee to Review the IPCC (InterAcademy Council). *Climate Change Assessments: Review of the Processes and Procedures of the IPCC. The Report of the InterAcademy Council*, 2010, Amsterdam, The Netherlands
- 13 Singer S F. Human contribution on climate change questionable. *EOS*, 1999, 80: 183
- 14 Singer S F. Science editor bias on climate change? *Science*, 2003, 301: 595–596
- 15 Brohan P, Kennedy J J, Harris I, et al. Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: A new data set from 1850. *J Geophys Res*, 2006, 111: D12106, doi: 10.1029/2005JD006548
- 16 Smith D M, Cusack S, Colman A W, et al. Improved surface temperature prediction for the coming decade from a global climate model. *Science*, 2007, 317: 796–799
- 17 Mann M E, Zhang Z H, Hughes M K, et al. Proxy-based reconstructions of hemispheric and global surface temperature variations over the past two millennia. *Proc R Soc A-Math Phys Eng Sci*, 2008, 105: 13252–13257
- 18 Hansen J, Reudy R, Sato M, et al. Global surface temperature change. *Rev Geophys*, 2010, 48: RG4004, doi: 10.1029/2010RG000345
- 19 气候变化评估报告编写委员会. 气候变化国家评估报告. 北京: 科学出版社, 2007
- 20 王少鹏, 王志恒, 朴世龙, 等. 我国 40 年来增温时间存在显著的区域差异. *科学通报*, 2010, 55: 1538–1543
- 21 李庆祥, 董文杰, 李伟, 等. 近百年中国气温变化中的不确定性估计. *科学通报*, 2010, 55: 1544–1554
- 22 Peng S S, Piao S L, Ciais P, et al. Change in winter snow depth and its impacts on vegetation in China. *Glob Change Biol*, 2010, doi: 10.1111/j.1365-2486.2010.02210x
- 23 Gerland S, Renner A H H, Godtliessen F, et al. Decrease of sea ice thickness at Hopen, Barents Sea, during 1966–2007. *Geophys Res Lett*, 2008, 35: L06501, doi: 10.1029/2007GL032716
- 24 Byers A. Contemporary human impacts on alpine ecosystems in the Sagarmatha (Mt. Everest) National Park, Khumbu, Nepal. *Ann Assoc Am Geogr*, 2005, 95: 112–140
- 25 Allison I, Bindoff N L, Binaschadler R A, et al. *The Copenhagen Dignosis, 2009: Updating the World on the Latest Climate Science*.

- Sydney: The University of New South Wales Climate Change Research Centre (CCRC), 2009. 1–68
- 26 Zhou L, Tucker C J, Kaufmann R K, et al. Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981–1999. *J Geophys Res*, 2001, 106: 20069–20083
- 27 Stockli R, Vidale P L. European plant phenology and climate as seen in a 20-year AVHRR land-surface parameter dataset. *Int J Remote Sens*, 2004, 25: 3303–3330
- 28 Piao S L, Fang J Y, Zhou L M, et al. Variations in satellite-derived phenology in China's temperate vegetation. *Glob Change Biol*, 2006, 12: 672–685
- 29 郑景云, 葛全胜, 郝志新. 气候变暖对我国近 40 年植物物候变化的影响. *科学通报*, 2002, 47: 1582–1587
- 30 张学霞, 葛全胜, 郑景云, 等. 近 150 年北京春季物候对气候变化的响应. *中国农业气象*, 2005, 26: 263–267
- 31 仲舒颖, 郑景云, 葛全胜. 1962–2007 年北京地区木本植物秋季物候动态. *应用生态学报*, 2008, 19: 2352–2356
- 32 任国玉. 气候变暖成因研究的历史、现状和不确定性. *地球科学进展*, 2008, 23: 1084–1091
- 33 王绍武. 全球气候变暖的争议. *科学通报*, 2010, 55: 1529–1531
- 34 葛全胜. 中国历朝气候变化. 北京: 科学出版社, 2011
- 35 Jones P D, Briffa K R, Barnett T P, et al. High-resolution palaeoclimatic records for the last millennium: Interpretation, integration and comparison with general circulation model control-run temperatures. *Holocene*, 1998, 8: 455–471
- 36 王芳, 葛全胜, 陈泮勤. IPCC 评估报告气温变化观测数据的不确定性分析. *地理学报*, 2009, 64: 828–838
- 37 Zhao S Q, Da L J, Tang Z Y, et al. Ecological consequences of rapid urban expansion: Shanghai, China. *Front Ecol Environ*, 2006, 4: 341–346
- 38 Zhou L M, Dickinson R E, Tian Y H, et al. Evidence for a significant urbanization effect on climate in China. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2004, 101: 9540–9544
- 39 Goodridge J D. Urban bias influence on long-term California air temperature trends. *Atmos Environ*, 1992, 26: 1–7
- 40 Trenberth K E, Jones P D, Ambenje P, et al. Observations: Surface and atmospheric climate change. In: Solomon S, Qin D, Manning M, et al, eds. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 235–336
- 41 Jones P D, Lister D H, Li Q. Urbanization effects in large-scale temperature records, with an emphasis on China. *J Geophys Res-Atmos*, 2008, 113: D16122, doi: 10.1029/2008JD009916
- 42 Knight J, Kennedy J J, Folland C, et al. Do global temperature trends over the last decade falsify climate predictions? *Bull Am Meteorol Soc*, 2009, 90: S22–S23
- 43 Kerr R A. What happened to global warming? Scientists say just wait a bit. *Science*, 2009, 326: 28–29
- 44 Schmidt G, Rahmstorf S. Uncertainty, noise and the art of model-data comparison. 2008, <http://www.realclimate.org/index.php/archives/2008/01/uncertainty-noise-and-the-art-of-model-data-comparison>
- 45 Wang S W, Wen X Y, Luo Y, et al. Does the global warming pause in the last decade: 1999–2008? *Adv Clim Change Res*, 2010, 1: 49–54
- 46 Akasofu S. Global warming: What is the scientific truth? (2) Two natural components of the recent climate change. *Energy Resour*, 2009, 30: 70–88
- 47 Weart S R. *The Discovery of Global Warming*. Cambridge: Harvard University Press, 2008
- 48 Kiehl J T, Trenberth K E. Earth's annual global mean energy budget. *Bull Am Meteorol Soc*, 1997, 78: 197–208
- 49 Gerlach T M. Etna's greenhouse pump. *Nature*, 1991, 351: 352–353
- 50 Evans K M. The greenhouse effect and climate change. In: Evans K M, ed. *The Environment: A Revolution in Attitudes*. Detroit: Thomson Gale, 2005
- 51 Santer B D. Identification of human induced changes in atmospheric moisture content. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2007, 104: 15248–15253
- 52 Dessler A E. Water vapor climate feedback inferred from climate fluctuations 2003–2008. *Geophys Res Lett*, 2008, 35: L20704
- 53 Haywood J, Boucher O. Estimates of the direct and indirect radiative forcing due to tropospheric aerosols: A review. *Rev Geophys*, 2000, 38: 513–543
- 54 Ramanathan V, Crutzen P J, Kiehl J T, et al. Aerosols, climate, and the hydrological cycle. *Science*, 2001, 294: 2119–2124
- 55 Lu Z, Streets D G, Zhang Q, et al. Sulfur dioxide emissions in China and sulfur trends in East Asia since 2000. *Atmos Chem Phys*, 2010, 10: 6311–6331
- 56 Broecker W S. 全球变暖: 行动还是等待? *科学通报*, 2006, 51: 1489–1499
- 57 Ramanathan V, Carmichael G. Global and regional climate changes due to black carbon. *Nature Geosci*, 2008, 1: 221–227
- 58 Mitchell J F B, Johns T C, Gregory J M, et al. Climate response to increasing levels of greenhouse gases and sulphate aerosols. *Nature*, 1995, 376: 501–504

- 59 Hansen J, Sato M, Ruedy R, et al. Global warming in the twenty-first century: An alternative scenario. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2000, 97: 9875–9880
- 60 Myhre G. Consistency between satellite-derived and modeled estimates of the direct aerosol effect. *Science*, 2009, 325: 187–190
- 61 Hansen J E. A slippery slope: How much global warming constitutes “dangerous anthropogenic interference”? *Clim Change*, 2005, 68: 269–279
- 62 Scafetta N, West B J. Phenomenological reconstructions of the solar signature in the Northern Hemisphere surface temperature records since 1600. *J Geophys Res*, 2007, 112: D24S03, doi: 10.1029/2007JD008437
- 63 Randel W J, Shine K P, Austin J, et al. An update of observed stratospheric temperature trends. *J Geophys Res-Atmos*, 2009, 114: D02107, doi: 10.1029/2008JD010421
- 64 Soon W W H. Variable solar irradiance as a plausible agent for multidecadal variations in the Arctic-wide surface air temperature record of the past 130 years. *Geophys Res Lett*, 2005, 32: L16712, doi: 10.1029/2005GL023429
- 65 Usoskin I G, Schussler M, Solanki S K, et al. Solar activity, cosmic rays, and Earth’s temperature: A millennium-scale comparison. *J Geophys Res-Space Phys*, 2005, 110: A10102
- 66 Solanki S K, Krivova N A. Can solar variability explain global warming since 1970? *J Geophys Res*, 2003, 108: 120, doi: 10.1029/2002JA009753
- 67 Foukal P C, Frolich C, Spruit F, et al. Variations in solar luminosity and their effect on the Earth’s climate. *Nature*, 2006, 443: 161–164
- 68 Lockwood M, Fröhlich C. Recent oppositely directed trends in solar climate forcings and the global mean surface air temperature. *Proc R Soc A-Math Phys Eng Sci*, 2007, 463: 2447–2460
- 69 Haigh J, Winning A, Toumi R, Harder J. An influence of solar spectral variations on radiative forcing of climate. *Nature*, 2010, 467: 696–699
- 70 Kelly P M, Sear C B. Climatic impact of explosive volcanic eruption. *Nature*, 1984, 311: 740–743
- 71 Minnis P, Harrison E F, Stowe L L, et al. Radiative climate forcing by the mount Pinatubo eruption. *Science*, 1993, 259: 1411–1415
- 72 Robock A. Volcanic eruptions and climate. *Rev Geophys*, 2000, 38: 191–219
- 73 Schimel D S. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle. *Glob Change Biol*, 1995, 1: 77–91
- 74 Canadell J G, Le Quere C, Raupach M, et al. Contributions to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2007, 104: 18866–18870
- 75 Schlesinger W H. *Biogeochemistry: An Analysis of Global Change*. New York: Academic Press, 1997
- 76 Randerson J T, Chapin F S, Harden J W, et al. Net ecosystem production: A comprehensive measure of net carbon accumulation by ecosystems. *Ecol Appl*, 2002, 12: 937–947
- 77 Le Quere C. Saturation of the Southern Ocean CO₂ sink due to the recent climate change. *Science*, 2007, 316: 1735–1738
- 78 Bond-Lamberty B, Thomson A. Temperature-associated increase in the global soil respiration record. *Nature*, 2010, 464: 579–582
- 79 Houghton R A. Balancing the global carbon budget. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2007, 35: 313–347
- 80 Beer C, Reichstein M, Tomelleri E, et al. Terrestrial gross carbon dioxide uptake: Global distribution and covariation with climate. *Science*, 2010, 329: 834–838
- 81 Rustad L E, Huntington T G, Boone R D. Controls on soil respiration: Implications for climate change. *Biogeochemistry*, 2000, 48: 1–6
- 82 Janzen H H. Carbon cycling in earth systems: A soil science perspective. *Agr Ecosys Environ*, 2004, 104: 399–417
- 83 Pacala S, Socolow R. Stabilization wedges: Solving the climate problem for the next 50 years with current technologies. *Science*, 2004, 305: 968–972
- 84 Houghton R A. Aboveground forest biomass and the global carbon balance. *Glob Change Biol*, 2005, 11: 945–958
- 85 Schwartz S E. Reply to comments by G. Foster et al., R. Knutti et al., and N. Scafetta on “Heat capacity, time constant, and sensitivity of Earth’s climate system”. *J Geophys Res*, 2008, 113: D15105, doi: 10.1029/2008JD009872
- 86 Lindzen R S, Choi Y S. On the determination of climate feedbacks from ERBE data. *Geophys Res Lett*, 2009, 36: L16705, doi: 10.1029/2009GL039628
- 87 Trenberth K E, Fasullo J T, O’Dell C, et al. Relationships between tropical sea surface temperature and top-of-atmosphere radiation. *Geophys Res Lett*, 2010, 37: L03702, doi: 10.1029/2009GL042314
- 88 Lean J L, Rind D H. How natural and anthropogenic influences alter global and regional surface temperatures: 1889 to 2006. *Geophys Res Lett*, 2008, 35: L18701, doi: 10.1029/2008GL034864
- 89 钱维宏, 陆波, 祝从文. 全球平均温度在 21 世纪将怎样变化? *科学通报*, 2010, 55: 1532–1537
- 90 Hansen J, Sato M, Ruedy R, et al. Dangerous human-made interference with climate: A GISS modelE study. *Atmos Chem Phys*, 2007, 7: 2287–2312
- 91 丁仲礼, 段晓男, 葛全胜, 等. 国际温室气体减排方案评估及中国长期排放权讨论. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2009, 39: 1659–1671