

气候变化科学与人类可持续发展^①

秦大河^{1,2}

(1. 中国科学院冰冻圈科学国家重点实验室, 兰州 730000; 2. 中国气象局, 北京 100081)

摘 要:政府间气候变化专门委员会(IPCC)自2007年发布第四次评估报告(AR4)以来,新的观测证据进一步证明,全球气候系统变暖是毋庸置疑的事实。2012年之前的3个连续10年的全球地表平均气温,都比1850年以来任何一个10年更高,且可能是过去1400年来最热的30年。虽然1998-2012年全球地表增温速率趋缓,但还不能反映出气候变化的长期趋势。1970年以来海洋在变暖,海洋上层75 m以上的海水温度每10年升温幅度超过0.11℃;1971-2010年地球气候系统增加的净能量中,93%被海洋吸收。全球平均海平面上升速率加快,1993-2010年间高达3.2 mm/年。全球海洋的人为碳库很可能已增加,导致海洋表层酸化。1971年以来,全球几乎所有冰川、格陵兰冰盖和南极冰盖的冰量都在损失。其中1979年以来北极海冰范围以每10年3.5%~4.1%的速率缩小,同期南极海冰范围以每10年1.2%~1.8%的速率增大。北半球积雪范围在缩小。20世纪80年代初以来,大多数地区的多年冻土温度升高。已在大气和海洋变暖、水循环变化、冰冻圈退缩、海平面上升和极端气候事件的变化中检测到人类活动影响的信号。1750年以来大气CO₂浓度的增加是人为辐射强迫增加的主因,导致20世纪50年代以来50%以上的全球气候变暖,其信度超过95%。采用CMIP5模式和典型浓度路径(RCPs),预估本世纪末全球地表平均气温将继续升高,热浪、强降水等极端事件的发生频率将增加,降水将呈现“干者愈干、湿者愈湿”趋势。海洋上层的温度比1986-2005年间升高0.6~2.0℃,热量将从海表传向深海,并影响大洋环流,2100年海平面将上升0.26~0.82 m。冰冻圈将继续变暖。为控制气候变暖,人类需要减少温室气体排放。如果较工业化之前的温升达到2℃,全球年均经济损失将达到收入的0.2%~2.0%,并造成大范围不可逆的影响,导致死亡、疾病、食品安全、内陆洪涝、农村饮水和灌溉困难等问题,影响人类安全。但如果采取积极行动,2℃的温升目标仍可望达到。为遏制逐渐失控的全球变暖,需全球共同努力减排,以实现人类可持续发展的理想。

关键词:气候变化;全球变暖;影响;适应;脆弱性;减缓;可持续发展

doi: 10.11820/dlkxjz.2014.07.002

中图分类号:P467

文献标识码:A

1 引言

气候变化科学的最新研究结果证明,1750年人类社会工业化以来,大量使用化石燃料排放CO₂等温室气体和其他污染物质,其综合效果导致全球气候系统变暖,20世纪中叶以来进一步加剧,成为制约人类社会可持续发展的重大问题。对此决策者重视,社会公众关注,科学家有责任向社会发布气候变化科学的新进展,以利保护气候,保护环境,保护人类健康,建设生态文明,实现人类社会的可持续发展。

2 IPCC评估报告与气候变化科学

鉴于全球气候变化对人类社会影响巨大,世界气象组织(WMO)和联合国环境规划署(UNEP)于1998年联袂组建了政府间气候变化专门委员会(IPCC),以全球气候系统变化为切入点,以科学文献为依据,以经IPCC全会审核批准的规则和程序为准绳,组织发达国家、发展中国家和经济转型国家的科学家,对全球气候变化的科学基础,影响、适应和脆弱性,以及减缓气候变化等问题进行科学评估,为联合国气候变化框架公约(UNFCCC, 以下简

收稿日期:2014-07; 修订日期:2014-07。

基金项目: 国家重大科学研究计划项目(2013CBA01808); 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2007CB411507); 中国气象局气候变化专项。

作者简介: 秦大河(1947-), 男, 山东泰安人, 中国科学院院士, 主要从事气候变化、冰冻圈与全球变化研究。

E-mail: qdh@cma.gov.cn。

① 此文系根据作者2014年4月25日在“生态大讲堂”所作报告记录整理而成。已经本人校核。

874-883 页

称《公约》的谈判提供科学依据。1990年以来,IPCC先后完成4次评估报告,为国际社会正确认识气候变化,了解其影响,采取共同行动应对气候变化,奠定了科学基础。1990年发布的IPCC第一次评估报告(FAR),指出人类活动排放显著增加了大气温室气体的浓度,推动了1992年《公约》的签署和1994年《公约》的生效;1995年发布的第二次评估报告(SAR),提出人为气候变化是可辨别的,气候变化的社会经济影响被确定为新议题,为实现公约最终目标提供了科学依据,推动了1997年《京都议定书》(KP)的通过;IPCC第三次评估报告(TAR)进一步明确过去50年的大部分变暖现象可能(66%以上)归因于人类活动,促使《公约》谈判确立适应和减缓气候变化两大议题,推动了气候变化国际谈判进程;第四次评估报告(AR4)明确提出过去50年的气候变化很可能(90%以上概率)归因于人类活动,促成《巴厘路线图》的诞生。目前,IPCC第五次评估报告(AR5)的3个工作组评估报告已全部完成,《综合报告》将于2014年10月完成。AR5在前4次的基础上,对2007年以来的研究成果进行评估,以更多观测事实证明全球继续变暖,解析了人类活动和全球变暖之间的因果关系,强调了减缓气候变化、减少温室气体排放的紧迫性,提出了全球温升不超过2℃所需的条件,等等。IPCC AR5系列报告的发布,再次引起了国际社会对气候变化这一重大课题的关注。

IPCC下设三个工作组,第一工作组(WGI)负责评估气候变化的自然科学基础,内容涵盖观测到的气候系统变化,包括大气圈、水圈、岩石圈、冰冻圈和生物圈等组成气候系统五大圈层的观测结果,气候变化的归因、检测,利用气候模式,预估不同浓度路径情景下未来气候系统变化。第二工作组(WGII)负责评估气候变化产生的影响、脆弱性、适应和风险。第三工作组(WGIII)负责评估气候变化的减缓。

中国政府和科学家积极参加IPCC评估报告工作,影响与日俱增。在FAR中,中国作者只有7名,SAR时上升到11名,TAR中有19名,AR4中有28名,而AR5中增加到43名。中国是作者人数最多的发展中国家,也较好地反映了发展中国家的科学诉求。此外,中国科学家在TAR、AR4和AR5连续三届代表发展中国家担任WGI联合主席。在AR5中,中国科学家撰写的论文被引用近千篇,其中

WGI评估报告引用了约450篇(共约9200篇),而TAR仅为33篇,AR4为78篇。中国科学院、高等院校和相关部门科学家的研究成果在IPCC AR5 WGI中表现较好。

连续26年以来,每5~6年由全球近千名在气候系统变化科学一线工作的科学家,对本领域科学研究成果进行评估,摒弃陈旧过时观念,梳理出新进展和亮点,预测发展趋势,撰写科学评估报告,为决策者服务,为可持续发展指路。这种科学有序,实事求是的方法,符合人类认知客观世界的规律。长期的科学积淀,发展成为一门崭新的科学——气候变化科学,而IPCC报告也理所当然地成为国际气候变化科学的权威读本,是决策者谈判的科学依据,也向科研、教育和科普界传达了最新、最前沿和最全面的科学信息(秦大河等,2007,2014),对人类可持续发展、环境保护和建设生态文明都有重要意义(Future Earth, 2013)。

3 人为排放温室气体是近百年全球变暖的主要原因

最新观测事实证明,全球变暖毋庸置疑。1880-2012年,全球平均地表温度升高了0.85℃。1951-2012年,全球平均地表温度的升温速率(0.12℃/10a)几乎是1880年以来升温速率的两倍。过去的3个连续10年比之前自1850年以来的任何一个10年都更暖。全球变暖是气候变化自然变率和人类活动排放温室气体共同作用的结果,升温并不是简单的线性过程(图1)。

AR4以来,海洋科学研究进展迅速,取得了大量成果。从现有研究成果可以基本确定的是,自1970年以来海洋上层(0~700 m)海水已经变暖,其中1971-2010年期间,海洋上层75 m以上深度的海水温度升幅为0.11℃/10年。海洋升温的趋势全球并不一致,存在较明显的区域而异,北半球海洋尤其是北大西洋海域增暖显著。

海洋可以储存气候系统内部因温室效应而额外增加的热量,对地球的意义重大。新发表的资料表明,1971-2010年间,海洋上层的热含量可能增加了 17×10^{22} 焦耳。与1993-2002年相比,2003-2010年间海洋上层的热含量增速变慢。1971-2010年间气候系统增加的净能量中,60%以上储存在海洋上层,约33%储存在中层和深海,即气候系统增加的

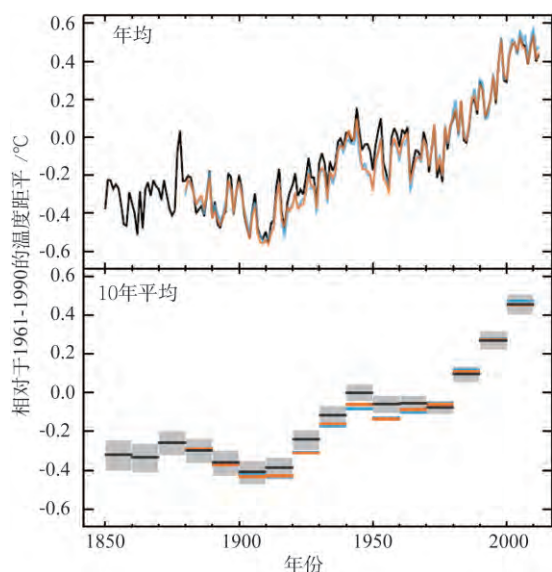


图1 观测到的全球平均陆地和海表温度距平(1850-2012)
(注:源自3个资料集。上图:年均值,下图:10年均值,包括一个资料集(黑色)的不确定性估计值。各距平均相对于1961-1990年均值(IPCC, 2013a))

Fig.1 Observed annual and decadal global mean combined land and ocean surface temperature anomalies from 1850 to 2012
(from three datasets. Top panel: annual mean values. Bottom panel: decadal mean values including the estimate of uncertainty for one dataset (black). Anomalies are relative to the mean temperature of 1961-1990(IPCC, 2013a).)

净能量有93%被海洋吸收,其余的3%被用来加热冰冻圈,3%加热陆地,只有1%用来加热了大气圈(图2)。长期以来,气候变化谈大气圈内的温度变化多,而对吸收能量份额占93%的海洋的温度变化却了解不够。因此,急需加强全球海洋观测和研究,发掘更多的新信息。

新的观测结果证明冰冻圈也在变暖。在过去的20余年中,格陵兰冰盖和南极冰盖的冰量在减少,几乎全球范围内的山地冰川继续退缩,北冰洋海冰和北半球春季积雪范围在继续缩小。冰冻圈的这一变化趋势,对水资源和水循环以及海平面的变化都将产生影响。此外,IPCC AR5对于生物圈、陆地表面和土地利用的一些问题也都作了评估,取得了一些有价值的科学结论。

图1显示,1998-2012年的气温增速趋缓,与之前20年的气温快速升高形成鲜明对比。IPCC气候模型曾预估,此间气温应以 $0.21^{\circ}\text{C}/10$ 年的速度上升,但观测值仅为 $0.04^{\circ}\text{C}/10$ 年。温室气体浓度在上升,但气温却“停滞”不前,科学家将这一现象称为

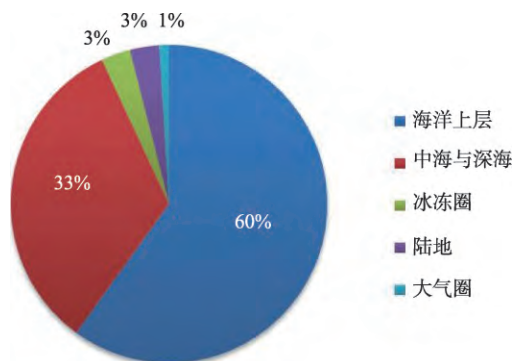


图2 1971-2010年气候系统增加的净能量分配图
(注:海洋上层为0~700 m,中层海与深海在700 m以下
(引自IPCC, 2013a).)

Fig.2 Partitioning of net energy increase within distinct components of the Earth's climate system from 1971 to 2010.

(The upper ocean donates above 700 m. The mid-depth and deep ocean donates below 700 m (from IPCC, 2013a).)

全球变暖“停滞”。研究表明,这一现象与太阳活动、大气气溶胶浓度关系甚微,海洋是揭示这一现象的关键所在(Tokinaga et al, 2012)。

海洋温度存在一种称之为“太平洋年代际涛动”(Pacific Decadal Oscillation, PDO)的波动。PDO的变化周期为15~30年。PDO处于“正相位”(即“暖相位”)时,太平洋气候表现类似于厄尔尼诺现象,使大气升温。此间,太平洋东部和中部海域会持续释放热量,直到几十年之后才逐渐变冷,PDO也即进入“负相位”(即“冷相位”),此时,太平洋出现类似于拉尼娜现象,把赤道附近的深海冷水提升到洋面,使大气圈变冷。如果把PDO输入全球气候模式,结果会出现全球变暖间断,时间可达数十年之久。研究还发现,1998年以后有更多热量进入深海,抑制了大气变暖。如果用数值模型模拟PDO的正相位,气温将在未来几十年中快速上升(Meehl et al, 2011)。后来,美国科学家把近几十年赤道东太平洋海温年代际变化的观测数据输入模型,模拟全球气候变化,发现不仅相当精确地再现了全球变暖停滞现象,还模拟出变暖停滞在季节和空间分布上的不均匀性,有些地区会变得更热,有些地区的冬天会更冷(Kosaka et al, 2013)。把信风与海洋数据引入模型,结果发现热带信风在受到拉尼娜现象的影响时,会驱使温暖海水向西流动,最终把热量送入深海,使赤道东部海域的冷水上涌。在极端的天气条件下,如1998年拉尼娜现象时,热带信风可能会一举把太平洋推入年代际涛动的“冷相位”

(Trenberth et al, 2013)。分析还显示,太平洋年代际涛动的“冷相位”与1945-1975年间的全球气温下降在时间上非常吻合,而“暖相位”则与1976-1998年间全球气温急剧上升相吻合。这说明,全球变暖“停滞”与气溶胶、平流层水气的变化关系不大,主要原因很可能是近十几年赤道东太平洋的海温变冷。科学家们认为,西太平洋不可能一直上涌暖水,到某个时刻,海平面一定会到达最高点,然后开始回落。如果这一预估准确,到那时,“失踪的热量”会重新出现,全球气温将再次快速上升。

IPCC WGI对气候变化的自然原因和人为原因的每个要素都给与定量评估。自然原因包括海洋、陆地、火山活动、太阳活动等自然变率,人为原因包括各类温室气体、气溶胶、土地利用、城市化等。报告通过辐射强迫指标量化驱动因子的强度,正辐射

强迫值导致全球变暖,负辐射强迫值为变冷。

图3给出了1750-2011年主要人为与自然驱动因子的辐射强迫估计值。可以看出,1750-2011年总的人为辐射强迫值为 2.29 W m^{-2} [$1.13 \sim 3.33 \text{ W m}^{-2}$],远远高于自然变率的 0.05 W m^{-2} [$0.00 \sim 0.10 \text{ W m}^{-2}$]。1970年以来,其增速加快。2011年的总人为辐射强迫的最佳估计值比IPCC AR4给出的2005年值(IPCC, 2007)高43%。由此表明,人类活动导致了20世纪50年代以来一半以上的全球气候变暖(概率大于95%)。在海洋变暖、水循环变化、冰冻圈退缩、海平面上升和极端事件变化等诸多方面,也检测到了人类活动影响的信号。为此,IPCC确信,近百年来人类活动对气候变暖发挥着主导作用。

图3所示,1750年人类工业化以来的全球变暖,主要原因是人类排放温室气体和其他物质共同

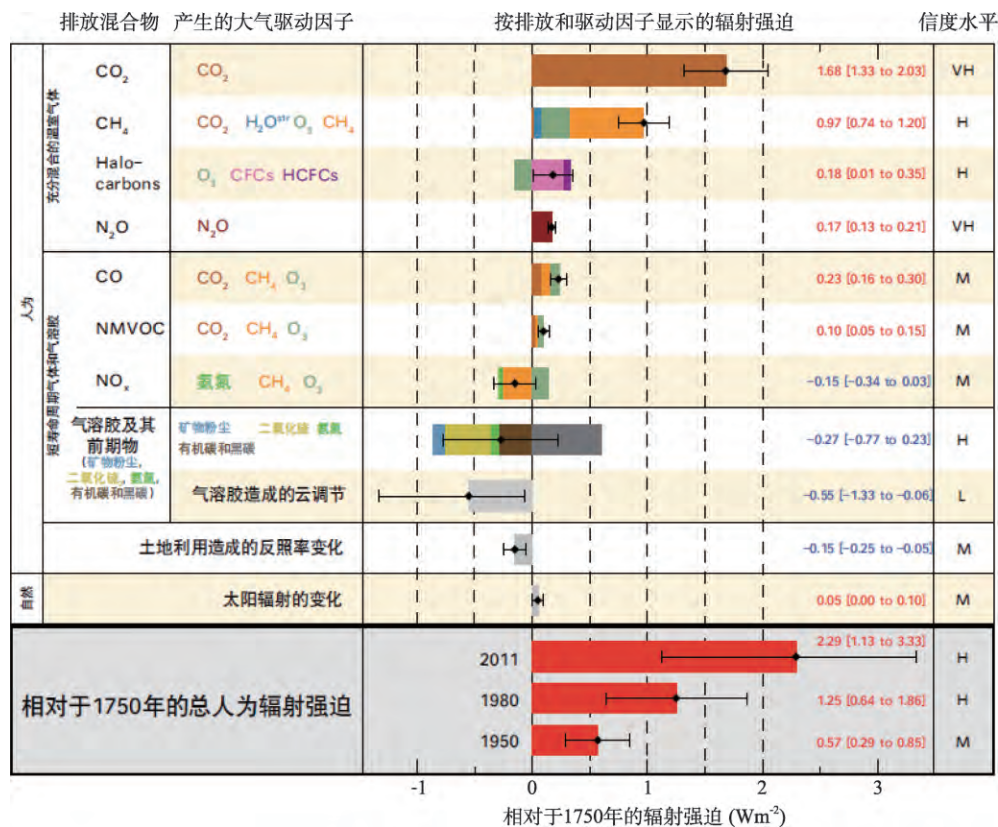


图3 1750-2011年全球气候变化主要驱动因子的辐射强迫值和不确定性(IPCC, 2013a)
(注:图中给出的是全球平均辐射强迫估计值。净辐射强迫的最佳估计值用黑色菱形表示,并给出了相应的不确定性区间;在本图的右侧给出了各数值,包括净辐射强迫的信度水平(VH—很高,H—高,M—中等,L—低,VL—很低。))

Fig.3 Forcing estimate associated with each forcing agent for the 1750-2011 period and uncertainty (IPCC, 2013a)
(Estimates in the figure are the global averaged values of radiation forcing. The net impact of the individual contributions is shown by a diamond symbol and its uncertainty (5% to 95% confidence range) is given by the horizontal error bar. The estimates and their qualitative level of confidence (VH-very high, H-high, M-medium, L-low, VL-very low) are also shown at the right side of the figure.)

作用的结果,对总辐射强迫的最大贡献来自1750年以来的大气CO₂浓度增高导致的温室效应。1750年以来,人类活动排放到大气中的CO₂、CH₄和N₂O等温室气体的浓度,至少已上升到过去80万年以来的最高水平,其中,CO₂浓度已增加了41%。

IPCC AR5对1750-2011年期间的全球碳收支给出了新的评估结论,即在此期间因化石燃料燃烧和水泥生产释放到大气中的CO₂排放量为375 Gt C (10亿吨碳=1 Gt C,相当于3.67 Gt CO₂),因毁林和其他土地利用变化估计已释放了180 Gt C,二者之和为555 Gt C,即为人为活动的CO₂排放累积量。这部分人为排放的CO₂在大气中累积了240 Gt C,被海洋吸收了155 Gt C,被自然陆地生态系统吸收了160 Gt C(图4)。在2002-2011年期间,因化石燃料燃烧和水泥生产造成的CO₂年均排放量为每年8.3 Gt C,其中2011年高达9.5 Gt C,比1990年水平高出54%;因人为土地利用变化产生的CO₂净排放量为每年0.9 Gt C。

海洋吸收了近30%的人为CO₂排放,缓解了气候变化,但却导致了海洋酸化。自1750年以来,海表水的pH值已下降0.1,相当于氢离子浓度增加了26%。如果pH值继续下降,将会影响海洋生态系统。

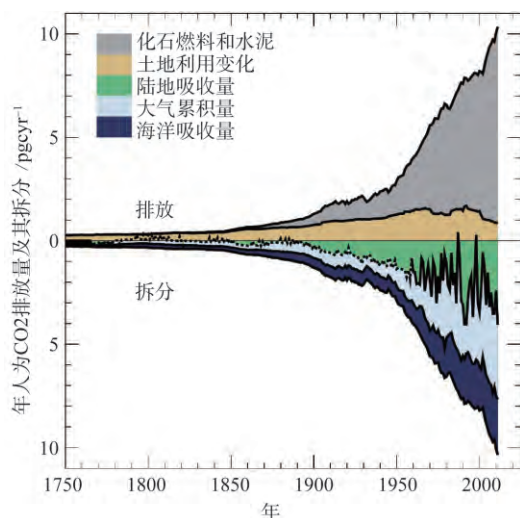


图4 1750-2011年期间的全球人为CO₂排放量(PgC yr⁻¹)及其在大气、陆地和海洋中的拆分(IPCC, 2013b)

Fig.4 Annual anthropogenic CO₂ emissions and their partitioning among the atmosphere, land and ocean (PgC yr⁻¹) from 1750 to 2011 (IPCC, 2013b).

4 模拟气候系统变化和温室气体累积排放

IPCC AR5基于典型浓度路径(RCPs)的排放情景,预估了未来气候系统变化。RCPs是指世界气候研究计划(WCRP)中耦合模式比较计划第五阶段(CMIP5)框架下的一套新的情景。RCPs包括了低排放(RCP2.6)、中低排放(RCP4.5)、中排放(RCP6.0)和高排放(RCP8.5)4种情景,每个情景都提供了一种受社会经济条件、环境、气候影响等的排放路径,并给出2100年相应的辐射强迫值,采用这一模式和情景,首次给出了2℃升温目标下的全球累积排放量。

在这种新排放情景下,CMIP5模拟结果表明,全球地表平均温度将继续上升。相对1986-2005年,2016-2035年期间全球平均地表温度可能升高0.3~0.7℃,2081-2100年可能上升0.3~4.8℃,且冰冻圈将继续“变暖”(图5)(IPCC, 2013a)。

IPCC AR5的一个亮点贡献是,预估了不同代表浓度排放路径下的未来气候变化。21世纪末及之后,全球地表平均变暖的强度主要取决于CO₂累积排放量,即使人类从现在起停止排放CO₂,已经累积在大气中的CO₂还将持续影响气候系统数百年乃至千年以上。利用CMIP5模式对2℃升温目标下的全球累积排放量阈值的模拟分析结果认为,如果要在可能性>33%、>50%和>66%的概率条件下实现将人为CO₂排放单独引起的变暖限制在2℃(相对于1861-1880年)内的目标,需要将1861-1880年以来所有人为CO₂累积排放量分别限制在0~1570 Gt C、0~1210 Gt C和0~1000 Gt C的范围内(IPCC, 2013a)。也就是说,只有将1861-1880年以来的人为CO₂累积排放控制在1000 Gt C(约合3670 Gt CO₂),人类才有>66%的可能性把未来升温幅度控制在2℃(相对1861-1880年)以内;如果把人为CO₂累积排放限额放宽至1570 Gt C(约合5760 Gt CO₂),那么只有>33%的可能性实现气温控制目标;而在高排放情景下,人类就可能无法实现“升温不超过2℃”的目标。到2011年人类已经累积排放了515 Gt C(约合1890 Gt CO₂),未来留给人类的碳排放空间极其有限。因此,未来要实现“升温不超过2℃”的目标,需要全世界共同努力,大幅度减少温室气体排放。

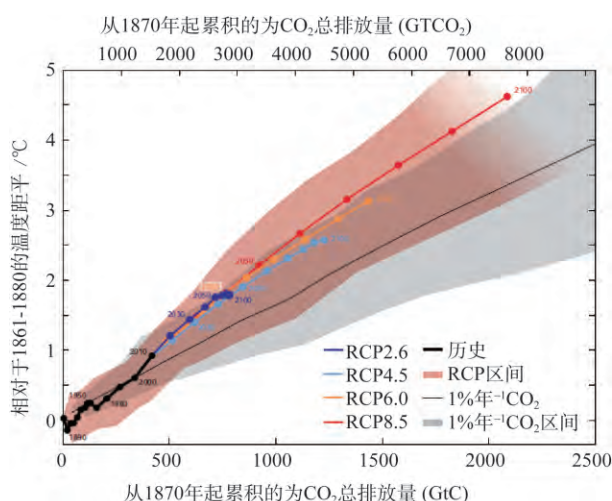


图5 以不同证据源的全球CO₂累积排放总量为函数计算得出的全球平均表面升温图(IPCC, 2013a)

(注:用一系列气候—碳循环模式模拟的、到2100年不同RCP情景下的多模式结果以彩色线条和十年均值(点)表示。为清楚起见,标出了一些十年均值(如2050表示2040-2049年)。粗黑线表示历史时期(1860-2010年)的模式结果;彩色羽状表示4个RCP情景的多模式离散,并随着RCP8.5中可用模式的减少而渐淡;细黑线和灰色区域是用CMIP5模式模拟的、以每年1%的CO₂增量强迫的多模式平均和范围。针对一定量的累积CO₂排放,每年1%的CO₂模拟显示的升温比RCP驱动的升温低,这些RCP中还包括其他非CO₂驱动因子。所有给出的数值均与1861-1880年基线期对比,十年平均值用直线连接。)

Fig.5 Global mean surface temperature increase as a function of cumulative total global CO₂ emissions from various lines of evidence (IPCC, 2013a)

(Multi-model results from a hierarchy of climate-carbon cycle models for each RCP until 2100 are shown with coloured lines and decadal means (dots). Some decadal means are labeled for clarity (e.g., 2050 indicating the decade 2040-2049). Model results over the historical period (1860 to 2010) are indicated in black. The coloured plume illustrates the multi-model spread over the four RCP scenarios and fades with the decreasing number of available models in RCP8.5. The multi-model mean and range simulated by CMIP5 models, forced by a CO₂ increase of 1% per year (1% yr⁻¹ CO₂ simulations), is given by the thin black line and grey area. For a specific amount of cumulative CO₂ emissions, the 1% per year CO₂ simulations exhibit lower warming than those driven by RCPs, which include additional non-CO₂ forcings. Temperature values are given relative to the 1861-1880 base period, emissions relative to 1870. Decadal averages are connected by straight lines.)

5 气候变化的影响、适应和脆弱性以及减缓

气候变化对自然生态系统和社会经济系统均会产生深刻的影响,包括可能导致海平面上升、海洋酸化、冰冻圈退缩、水循环紊乱(水短缺等)、极端事件频发、生物多样性受损、粮食安全受到威胁、人体健康受到损害、灾害加剧,等等(IPCC, 2014a)。IPCC AR5报告又进一步阐述了迄今为止气候变化产生的更多影响,今后可能造成的风险,以及为降低风险而采取有效行动的各种可能和机会。

很多地区的降水变化和冰雪消融正在改变水文系统,并影响到水资源量和水质;许多区域的冰川持续退缩,影响下游的径流和水资源;高纬地区和高海拔山区的多年冻土正在升温 and 退化。对全世界200条大河的径流量观测揭示出,有1/3的河流径流量发生趋势性的变化,并且以径流量减少为主。

部分生物物种的地理分布、季节性活动、迁徙模式和丰度等都发生了改变。1982-2008年期间北半球生长季的开始日期平均提前了5.4天,而结束日期推迟了6.6天;2000-2009年全球陆地生产力较工业化前增加了约5%,相当于每年增加了26±12亿t陆地碳汇。部分区域的陆地物种每10年向极地和高海拔地区平均推移了17 km和11 m。

气候变化对粮食产量的不利影响比有利影响更为显著,其中小麦和玉米受气候变化不利影响相对水稻和大豆更大。气候变化导致的小麦和玉米减产平均约为每10年1.9%和1.2%。

气候变化可能已造成人类健康出现不良状况,但与其他胁迫因子的影响相比,因气候变化引起健康不良的负担相对较小。

近期的极端天气气候事件,如热浪、干旱、洪水、热带气旋和野火等,显示了自然生态系统和人类社会在气候变化面前的脆弱性。气候灾害可能加剧一些地区原有的冲突和压力,影响生计(特别是贫困人口),并使一些地区的暴力冲突加剧,从而进一步降低当地对气候变化不利影响的适应能力。

除自然生态系统的被动适应外,人类社会也正基于观测和预测到的气候变化影响,制定适应计划和政策,采取了一些主动适应的措施,并在发展过程中不断积累经验,提升适应能力。

对于气候变化的可能影响和风险,AR5评估了其在水资源、生态系统等11个领域,和亚洲、欧洲等9大区域(大洲)自然生态系统与人类活动的影响,同时考虑到不同领域和不同区域的适应潜力,预估了采取不同水平的适应措施后还会面临的风险,并提出相应的适应措施。

(1) 水资源。随着温室气体浓度的增加,风险将显著增加,21世纪许多干旱亚热带区域的可再生地表和地下水资源将显著减少,部门间的水资源竞争恶化。升温每增加1℃,全球受水资源减少影响的人口将增加7%。

(2) 生态系统。21世纪将面临区域尺度突变和不可逆变化的高风险,如寒带北极苔原和亚马逊森林;21世纪及以后,叠加其他压力作用,大部分陆地和淡水物种面临更高的灭绝风险。

(3) 粮食生产与粮食安全。如果没有适应,局地温度比20世纪后期升高2℃或更高,预计除个别地区可能会受益外,热带和温带地区主要作物(小麦、玉米和水稻等)的产量将受到不利影响;到21世纪末粮食产量每10年将减少0~2%,而预估的粮食需求到2050年则每10年将增加14%。

(4) 海岸系统和低洼地区。将更多受到海平面上升导致的淹没、海岸洪水和海岸侵蚀等不利影响。由于人口增长、经济发展和城镇化,未来几十年沿岸生态系统的压力将显著增加;到2100年,东亚、东南亚和南亚的数亿人口将受影响。

(5) 人体健康。将通过恶化已有的健康问题来影响人类健康,加剧很多地区尤其是低收入发展中国家的不良健康状况。

(6) 经济部门。对于大多数经济部门而言,升温2℃左右可能导致全球年经济损失占其收入的0.2%~2.0%。

(7) 城市和农村。全球的许多风险将集中出现在城市地区,而农村地区则更多面临水资源短缺、食物安全和农业收入不稳定的风险。

如果气温较工业化之前升高2℃,全球年均经济损失将达到收入的0.2%~2.0%。气温上升给社会经济带来的风险,包括热浪导致死亡和疾病的增加、食品安全、内陆洪灾、农村饮水和灌溉困难等,这些影响可能会导致社会动荡,影响人类安全。

全球变暖很容易造成大范围不可逆转的影响

(IPCC, 2014a)。与20世纪末相比,如果气温升高2℃,会给热带、温带地区的小麦、玉米、水稻生产造成负面影响;如果升温3℃以上,南极冰盖、格陵兰冰盖消融将进一步加剧,导致海平面继续上升,而格陵兰冰盖全部融化将导致海平面上升7 m,尽管这一过程需要1000多年的时间;如果升温超过4℃,有可能对全球粮食安全造成重大影响。气温上升还存在动植物大规模灭绝的风险。

气候变化带来的风险会对自然生态系统和人类社会发展产生影响;而社会经济路径、适应和减缓行动以及相关治理又将影响气候变化带来的风险。人类社会可以采取适应行动缓解风险,同时社会经济发展路径特别是减缓选择又会改变人类对气候系统的影响程度,进而减少气候变化带来的风险。总体而言,气候变化、影响、适应、经济社会过程等不再是一个简单的单向线性关系,需要在一个复合统一的系统框架下予以认识和理解^②。正确应对气候变化,需要针对不断变化的世界可能产生的风险作出判断,特别是世界各地的脆弱人群、脆弱产业和脆弱生态系统,是决策者最要关注的地方。气候变化的风险程度来自于脆弱性(缺乏准备)和暴露度(处于危害状态的人或资产)与各种危害(触发气候事件或趋势)的叠加作用。在为降低风险采取明智行动时,必须将上述3个要素均作为考虑对象,以最大限度地减少风险(IPCC, 2014a)。

我们应当按照地球承受力最小的情况来实施减缓气候变化的措施。如欲将全球平均地表温度的上升控制在2℃以内,就必须迅速减少排放温室气体,并改变能源结构(IPCC, 2014b)。只有控制升温在2℃之内,才能避免森林大火、海平面上升、热浪等日益增加的风险。现在人类的商业生产模式正处于错误的排放路径上,但研究表明,通过积极进取的行动,仍有可能走上正确的轨道。为遏制逐渐失控的全球变暖,我们的减排力度必须达到一定水平,并考虑以下6个问题:

(1) 如果不采取减排行动,全球变暖将会超过4℃。目前,温室气体的排放量已达到历史最高。即便所有国家都能切实履行减排承诺,离21世纪末将全球升温(相比人类工业化之前)控制在2℃之内的目标仍很遥远。事实上,如果不采取进一步行动,全球地表面平均温度将比工业化时代前高出

②郑国光. 2014. 全面落实国家适应气候变化战略. 人民日报, 2014-04-15(12).

3.7~4.8℃,这将引发灾难性后果。例如,温升1℃,世界上就有7%的人口面临缺水超过20%的风险;上升2℃,森林等生态系统将极易引起突发和不可逆转的变化风险,而树木能蓄存大量的CO₂,这一逆转又会导致新一轮的气候变化影响;如果温升超过4℃,会发生大面积珊瑚礁死亡和严重粮食短缺,等等。

(2) 我们已经消耗了50%以上的“碳预算”(即为了使温升不超过2℃,全球可排放的碳总量)。通过采取积极措施,迅速减少排放,从技术层面和实践层面看,将气温上升幅度控制在2℃之内的目标依然有希望,从而避免最恶劣的气候变化影响和后果。

(3) 必须立刻采取行动,未来10年的行动极为关键,2030年前世界必须走上低排放之路。减排行动越晚,实现温升不超过2℃的目标就越困难(IPCC, 2014b)。基础设施建设不当(如建筑和城市的建设方式)将把社会锁定在高排放道路上难以解脱,为此要付出高昂代价。拖延意味着未来减排幅度将更高。例如,如果不减排,则到2030年排放量将高达55 Gt CO₂(IPCC, 2014b),那么,2030-2050年,我们只有平均每年将全球排放减少6%,才能控制温升不超过2℃(2010年CO₂排放总量为49 Gt)。拖延减排的时间越长,实现温升不超过2℃的目标就越复杂、越困难,成本也越高,人们就会越依赖碳捕获与封存的生物能源技术,这些技术存在潜在风险,同时在融资和规模化测试方面也面临诸多问题,都可能导致排放浓度超标。

(4) 长期而言,应彻底消除排放。有模型显示,为将温升控制在2℃以内,到2030年和2050年全球排放应比2010年分别降低39%和72%。最重要的是,在大部分有可能温升不超过2℃的情景下,2100年的温室气体排放都将降为“零甚至为负”(IPCC, 2014b),而这就要求逐步彻底消除温室气体排放。

(5) 全球都应当开展行动。除在国家和地区层面开展减排行动外,国际合作必不可少。气候变化是全世界共同面对的问题,因此,每个个体、每个企业和每个国家都应当参与之中。没有一个固定模式能告诉大家如何达到必须的减排目标,但毋庸置疑的是,我们必须开展国际合作。由于各国在缓解和适应气候变化方面的能力各不相同,因此国际合作可以决定各国气候行动的权利和责任。公平的

协同行动将有助于进一步开展合作和接下来的行动。

(6) 向低排放转型,需要变革。必须大规模地改革能源系统和土地使用。为实现这一变革,要充分利用现有技术和行为模式,例如,到2050年,实现大部分发电装置脱碳;逐步淘汰不使用碳捕获与封存技术的煤电;今后40年,将低碳能源供应(如太阳能、风能、水电、碳捕获与封存)增加4倍;转变消费模式,如减少食物浪费、改变饮食结构;利用现有效率最佳的工业技术,可以使工业领域的能耗强度降低25%。须知工业是全球温室气体排放的主要行业,如能实施减排,将是一项重大成就!

6 走可持续发展道路是人类的唯一选择

为了遏制逐渐失控的全球变暖,人类社会必须迅速减少温室气体排放,走可持续发展道路。这是我们唯一正确的选择。

减排可带来许多重大的协同效应,这也意味着气候变化减缓行动更加重要。低排放路径不仅能减少能源价格波动和供应中断对各国的伤害,同时,还有利于控制大气污染,有利于人类健康,有利于保护生态系统。制定全面的气候政策,投资低碳未来,将大大减少因为现在的不作为而导致未来付出惨重代价的损失。

就中国而言,改变能源结构、提高能源效率、减少排放温室气体,不仅是应对气候变化的迫切需要,更是治理环境污染、保护空气质量、保证人民群众健康需求的迫切需要。目前,中国已是能源消费大国,2013年能源消费约38亿t标准煤,能源消耗和CO₂排放均为世界第一,单位GDP能耗居高不下,人均能耗超过世界平均值,同时污染严重、雾霾天气增多,影响环境质量和人民健康。

中国的环境污染已经到了十分严重的程度,全国范围特别是华北、黄淮等地持续的雾霾天气已经成为民众抱怨、公众和媒体关注的焦点。治理雾霾和应对气候变化是一场持久战,必须科学、技术、社会管理联合,科技界应该为推动全球社会经济向可持续性发展转变提供所需的知识,提出迎接挑战、解决问题的方案。

能源燃烧实际是燃烧氢原子释出能量和分离

碳原子的过程,氧原子助燃氢原子后,与碳原子结合形成 CO_2 ^③,与其他杂质结合形成 SO_2 ,前者是温室气体,后者是污染物,为大气中霾的“源头”之一。中国现在使用的主要燃料包括薪柴、煤炭、石油、天然气等,其中薪柴燃烧产生的污染物最多,天然气最少。因此,从控制温室气体的目标来说,使用清洁能源会减少温室气体排放;而从环境保护来说,使用清洁能源也能够大幅度减少污染物排放。所以可以说,节能减排、改变能源结构既是保护大气环境,也是保护气候系统、缓解气候变化的有效举措,实乃一举两得。

气候变化对全球自然生态系统和社会经济系统产生深刻的影响,甚至制约全人类的可持续发展,因此,为遏制逐渐失控的全球变暖趋势,减缓行动刻不容缓。气候系统变化是一门快速发展的新兴科学,学科理论性强,涉及领域宽泛,交叉性强,应用价值很高,社会影响很大。但是要达到控制温升 2°C 的目标,时间紧、困难大,应按照各自能力原则,全球共同努力,控制温室气体排放。

从中国的环境外交和社会经济可持续发展等方面的需要来看,国家层面应制定全面的气候政策,积极开展国际合作,未雨绸缪,投资低碳未来,发展绿色能源、可再生能源,推行循环经济,坚定不移地走可持续发展之路,造福子孙后代,保护地球环境。

致谢:中国科学院地理科学与资源研究所于贵瑞研究员等帮助整理了文稿,中国气象局王亚伟同志、徐新武同志对全文进行了校对,在此一并致谢!

参考文献(References)

- 秦大河,陈振林,罗勇,等. 2007. 气候变化科学的最新认知. 气候变化研究进展, 3(2): 63-73. [Qin D H, Chen Z L, Luo Y, et al. 2007. Updated understanding of climate change sciences. *Advances in Climate Change Research*, 3(2): 63-73.]
- 秦大河, Thomas Stocker, 等. 2014. IPCC第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论. 气候变化研究进展, 10(1): 1-6. [Qin D H, Stocker T, et al. 2014. Highlights of the IPCC Working Group I fifth assessment report. *Advances*

in *Climate Change Research*, 10(1): 1-6.]

- Future Earth. 2013. Future Earth initial design: report of the transition team. Paris, FRA: International Council for Science (ICSU)[R/OL]. http://www.icsu.org/future-earth/media-centre/relevant_publications.
- IPCC. 2007. Climate Change 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge & New York: Cambridge University Press.
- IPCC. 2013a. Summary for policymakers//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 & New York: Cambridge University Press.
- IPCC. 2013b. 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 & New York: Cambridge University Press.
- IPCC. 2014a. Climate Change 2014: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge & New York: Cambridge University Press.
- IPCC. 2014b. Climate Change 2014: mitigation of climate change. contribution of Working Group III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge & New York: Cambridge University Press.
- Meehl G A, Arblaster J M, Fasullo J T, et al. 2011. Model-based evidence of deep-ocean heat uptake during surface-temperature hiatus periods. *Nature Climate Change*, 1(7): doi:10.1038/nclimate1229.
- Tokenaga H, Xie S P, Deser C, et al. 2012. Slowdown of the walker circulation driven by tropical Indo-Pacific warming. *Nature*, 491(7424): 439-443.
- Trenberth K E, Fasullo J T. 2013. An apparent hiatus in global warming? *Earth's Future*, 1(1): 19-32.
- Kosaka Y, Xie S P. 2013. Recent global-warming hiatus tied to equatorial Pacific surface cooling. *Nature*, 501(7467): 403.

③陈卫东. 2014. 求解中国能源转型的价改难题[J/OL]. 凤凰周刊, (1), 2014-01-06. <http://www.ifengweekly.com/display.php?newsId=7525>.

Climate change science and sustainable development

QIN Dahe^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Cryosphere Science, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2. China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: Since the Fourth Assessment Report (AR4) was released by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) in 2007, new observations have further proved that the warming of the global climate system is unequivocal. Each of the last three successive decades before 2012 has been successively warmer at global mean surface temperature than any preceding decade since 1850. 1983-2012 was likely the warmest 30-year period of the last 1400 years. From 1998 to 2012, the rate of warming of the global land surface slowed down, but it did not reflect the long-term trends in climate change. The ocean has warmed, and the upper 75 m of the ocean warmed by more than 0.11°C per decade since 1970. Over the period of 1971 to 2010, 93% of the net energy increase in the Earth's climate system was stored in the oceans. The rate of global mean sea level rise has accelerated, which was up to 3.2 mm yr⁻¹ between 1993 and 2010. Anthropogenic global ocean carbon stocks were likely to have increased and caused acidification of the ocean surface water. Since 1971, the glaciers and the Greenland and Antarctic ice sheets have been losing mass. Since 1979, the Arctic sea ice extent decreased at 3.5% to 4.1% per decade, and the Antarctic sea ice extent in the same period increased by 1.2% to 1.8% per decade. The extent of the Northern Hemisphere snow cover has decreased. Since the early 1980s, the permafrost temperatures have increased in most regions. Human influence has been detected in the warming of the atmosphere and the ocean, changes in the water cycle, reductions in snow and ice, global mean sea level rise, and changes in climate extremes. The largest contribution to the increase in the anthropogenic radiative forcing was by the increase in the atmospheric concentration of CO₂ since 1750. It led to more than half of global warming since the 1950s (with 95 % confidence). It is predicted using Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) and Representative Concentration Pathways (RCPs) that the global mean surface temperature will continue to rise for the end of this century, the frequency of extreme events such as heat waves and heavy precipitation will increase, and precipitation will present a trend of "the dry becomes drier, the wet becomes wetter". The temperature of the upper ocean will increase by 0.6 to 2.0°C compared to the period of 1986 to 2005, heat will penetrate from the surface to the deep ocean which will affect ocean circulation, and sea level will rise by 0.26 to 0.82 m in 2100. Cryosphere will continue to warm. To control global warming, humans need to reduce the greenhouse gas emissions. If the increase in temperature is higher than 2°C than before industrialization, the mean annual economic losses worldwide will reach 0.2% to 2.0% of income, and cause large-scale irreversible effects, including death, disease, food insecurity, inland flooding and water logging, and rural drinking water and irrigation difficulties that affect human security. If taking prompt actions, however, it is still possible to limit the increase in temperature within 2°C. To curb the gradually out-of-control global warming and achieve the goal of sustainable development of the human society, global efforts to reduce emissions are needed.

Key words: climate change; global warming; impact; adaptation; vulnerability; mitigation; sustainable development