

Frontier issues on climate change science for supporting Future Earth

[周天军, 陈晓龙](#) and [吴波](#)

Citation: [科学通报](#) **63**, 1 (2018); doi: 10.1360/N972018-00818

View online: <http://engine.scichina.com/doi/10.1360/N972018-00818>

View Table of Contents: <http://engine.scichina.com/publisher/scp/journal/CSB/63/1>

Published by the [《中国科学》杂志社](#)

Articles you may be interested in

[Issues and prospects of belowground ecology with special reference to global climate change](#)

Chinese Science Bulletin **49**, 1891 (2004);

[Effects of future land use change on the regional climate in China](#)

SCIENCE CHINA Earth Sciences **58**, 1840 (2015);

[Response of forest distribution to past climate change : An insight into future predictions](#)

Chinese Science Bulletin **58**, 4426 (2013);

[Vulnerability assessment of areas affected by Chinese cryospheric changes in future climate change scenarios](#)

Chinese Science Bulletin **57**, 4784 (2012);

[Simulation of the future change of East Asian monsoon climate using the IPCC SRES A2 and B2 scenarios](#)

Chinese Science Bulletin **48**, 1024 (2003);



支撑“未来地球”计划的气候变化科学前沿问题

周天军^{1,2*}, 陈晓龙¹, 吴波¹

1. 中国科学院大气物理研究所, 大气科学与地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029;

2. 中国科学院大学, 北京 100049

* 联系人, E-mail: zhoutj@lasg.iap.ac.cn

1 “未来地球”计划与世界气候研究计划

工业革命以来, 自然和社会环境正在发生快速而剧烈的变化: 全球温度不断升高、珊瑚礁和热带雨林大面积消亡、发展中国家和地区环境质量恶化、社会发展的不均衡和不平等日益加剧。如何向可持续发展转型是当今人类社会共同面临的一个巨大而复杂的挑战性问题。为应对上述挑战, 加强着眼于全球变化的科学研究至关重要。

自 19 世纪 20 年代法国数学家、物理学家傅里叶 (Joseph Fourier) 发现温室效应后的一个半世纪里, 人们通过不同手段确认并估算了 CO₂ 的温室效应^[1-3], 并通过观测证实了人类大量使用化石燃料造成大气 CO₂ 浓度稳步上升的事实^[4], 加之全球温度自 20 世纪 70 年代开始快速升高, 气候变暖的影响也逐步凸显, 这促使科学界酝酿发起全球变化研究。1980 年, 世界气象组织 (World Meteorological Organization, WMO) 和国际科学理事会 (International Council for Science, ICSU) 联合设立了“世界气候研究计划” (World Climate Research Programme, WCRP), 旨在回答气候是否在变化、气候变化能否被预测, 以及人类是否在其中负有一定程度的责任等关键科学问题。随着研究工作的不断深入, 人们愈发意识到气候变化只是全球变化这一更大问题的组成部分。1987 年, 科学界倡议设立研究全球变化的国际研究计划, 这一计划便是“国际地圈-生物圈计划” (International Geosphere-Biosphere Programme, IGBP), 它总共包含 8 个子计划来研究地球系统不同部分以及它们之间的相互作用。此后, 随着 1991 年国际生物多样性计划 (DIVERSITAS) 和 1996 年国际全球环境变化人文因素计划 (International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change, IHDP) 的相继设立, 全球变化的研究范畴逐渐推广到生态和人文领域。这些国际计划组于 2001 年组成地球系统科学联盟 (Earth System Science Partnership, ESSP), 涵盖了与全球变化相关的各个学科领域 (图 1)。上述科学计划及相应联盟的设立在推动全球变化研究及其国际协作方面发挥了重要作用。与此同时, 人们也深感这种以学科为单元设立国际计划的方式不利于多学科协作, 而当前各个学科领域各自为政的研究现状也难



周天军 中国科学院大气物理研究所研究员, 主要从事气候动力学和气候模拟研究。曾担任第一届未来地球计划中国委员会秘书长。

以对人类面临的可持续发展问题给出整体解决方案; 或即便能提出解决思路, 但实际实施起来也困难重重。

为了积极应对挑战, 实现全球的可持续发展, 在 2012 年 6 月召开的“里约+20 峰会”上, “未来地球”计划应运而生。“未来地球”计划致力于建立跨越自然科学、社会科学、人文科学和工程领域的全球研究网络, 旨在打破各领域的知识壁垒, 重塑知识结构, 在协同创新中产生“整体大于部分之和”的效应, 以此催生和促进更多的能够满足社会需求的研究活动, 并将科学知识真正转变为服务于全球各地区的可持续发展方案^[5]。

“未来地球”计划是一个全球性的合作平台, 整合了现有的全球环境变化 (Global Environment Change, GEC) 框架下各大科学研究计划, 包括原先 ESSP 框架下的四大计划, 即 WCRP, IGBP, IHDP 和 DIVERSITAS (图 1)。尽管因经费资助方的不同, 目前 WCRP 仅是以观察员的身份参加“未来地球”计划, 但它在气候变化研究领域所处的核心与领导地位, 决定了它对“未来地球”科学计划实施能够起到重要的支撑作用。

WCRP 的两个根本目标是确定气候的可预报性和确定人类活动对气候的影响。这与“未来地球”计划的三大研究主题之一“动力地球”的研究宗旨非常吻合。“动力地球”旨在观测、认识、理解和预测、预估自然和社会系统的演变趋势、驱动因素和相互作用, 预判全球变化的临界点和风险。认识气候系统的变化趋势和机理、研究气候变化和人类社会的相互作用, 离不开 WCRP 框架下的地球系统观测和地球模拟数据的支撑。

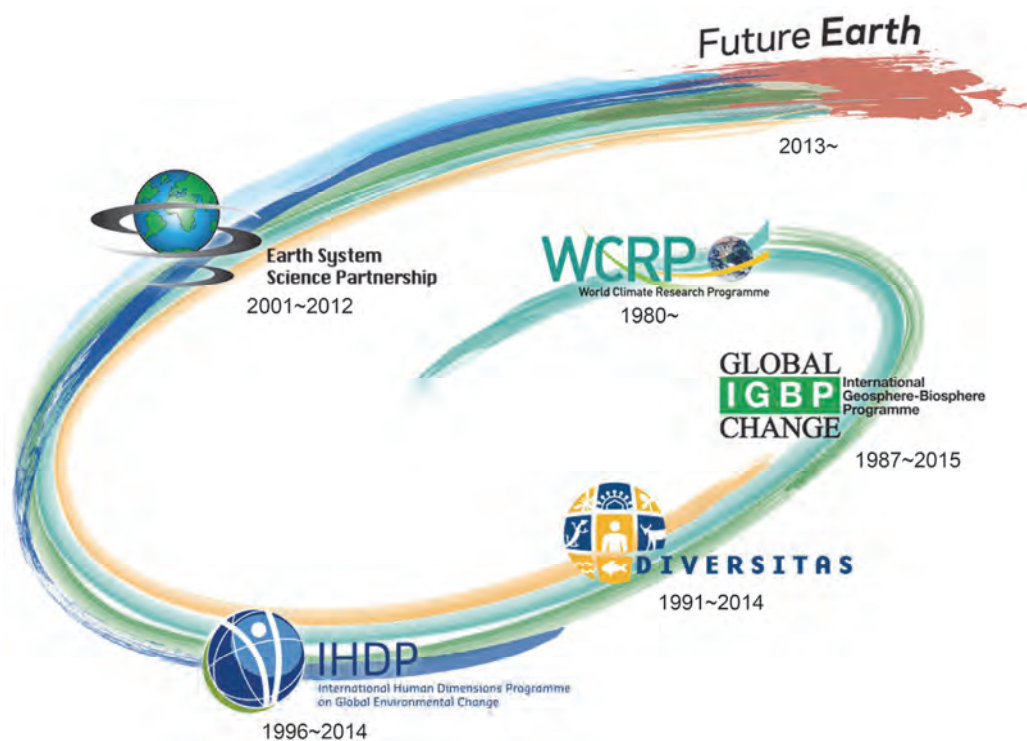


图1 未来地球计划与全球环境变化各科学计划的关系示意图. 来源: 国际未来地球计划秘书处宣传材料

Figure 1 Schematic relationship between the Future Earth and scientific research programmes in Global Environment Change framework. Source: Promotional material of Future Earth secretariat

WCRP 在地球气候系统模拟和预估研究上, 发挥了不可替代的作用. WCRP 通过其“耦合模拟工作组”(WGCM) 组织实施的国际“耦合模式比较计划”(Couple Model Inter-comparison Project, CMIP)是迄今为止最为成功的国际科学计划之一, 目前已完成了5次^[6], 正在进行第6次耦合模式比较计划(CMIP6). 使用 CMIP 的气候模拟结果发表的科学论文, 为政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)编写气候变化评估报告提供了重要依据, 这些论文被广泛引用, 从科学上直接支撑着各国的气候变化科学评估和国际应对气候变化谈判(图2).

WCRP 的研究任务偏重于人类活动的气候影响, 而“未来地球”计划更加强调人类社会如何科学应对自然环境的变化. 作为“未来地球”计划的合作伙伴, 为了促进自然科学与社会科学和工程领域的结合, 更好地服务于可持续发展目标, 2018年在第39次WCRP联合科学委员会会议上, WCRP 动议将当前以科学问题为导向的四大科学计划(即气候和冰冻圈(climate and cryosphere, CliC)、气候和海洋变率、可预报性和变化(climate and ocean variability, predictability and change, CLIVAR)、全球能量和水分交换(global energy and water exchanges, GEWEX), 平流层-对流层过程及其气候效应(stratosphere-troposphere processes and their role in climate, SPARC)), 未来重整为以社会需求

为导向的七大科学计划, 即冰冻圈(冰川融化)、大气化学和动力学(空气污染)、海洋-气候和动力学(气候年际-年代际预测)、生物地球化学循环(海水酸化、珊瑚礁消亡)、能量和水问题(水资源和农业)、地球系统模拟(复杂系统预测预估工具)、区域气候模拟(极端事件、气候变化减缓与适应). 2018年10月初在日本京都召开的 SPARC 科学大会也专门设立圆桌会议, 讨论 SPARC 如何适应 WCRP 的战略调整问题. 尽管基于上述动议对 WCRP 四大科学计划进行正式的调整尚需广泛的论证, 但组织思路上的转变, 反映了 WCRP 正在经历着从关注纯粹的科学到强调需求引导、做“有用科学”目标的理念转换.

2 气候变化前沿问题: 大挑战科学计划

为了解决人类社会面临的可持续发展问题, WCRP 的联合科学委员会提出了急需投入研究力量来应对的七大科学挑战(grand challenges), 具体包括: 冰冻圈消融及其全球影响, 云、环流和气候敏感度, 气候系统的碳反馈, 天气和气候极端事件, 粮食生产用水, 区域海平面上升及其对沿海地区的影响, 近期气候预测. 上述挑战都是受到社会高度关注的、非常具体的热点话题, 阻碍着气候科学关键领域的进步, 是迫切亟待解决的科学前沿问题. WCRP 针对七大科学挑战专门成立了各自的科学委员会, 负责大

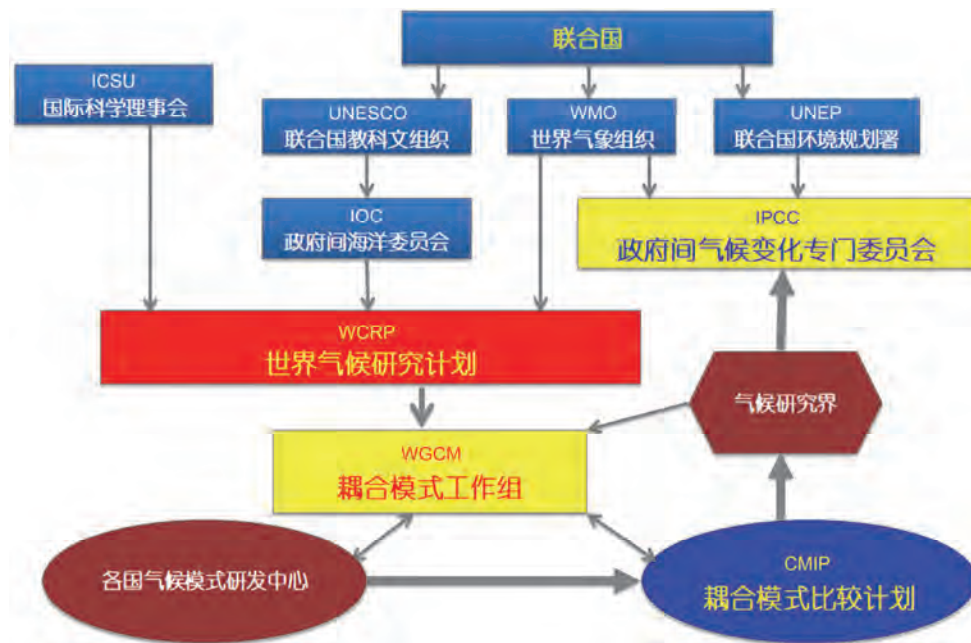


图2 世界气候研究计划 WCRP 的资助机构及其与 IPCC 的关系. 根据文献[7]绘制
Figure 2 Relationship between sponsors of WCRP and IPCC. Based on Ref. [7]

挑战科学计划的组织实施。

大挑战科学计划的成功实施需要全球相关领域顶尖研究人才的合作攻关, 所提出的科学问题与社会可持续发展需求密切相关, 解决这些问题是实现可持续发展的重要基础. 下面对 7 个大挑战计划的核心科学目标做扼要介绍.

2.1 冰冻圈消融及其全球影响

冰冻圈是地球气候系统的重要组成部分, 主要包括冰川、冰盖、冻土(季节冻土和多年冻土)、积雪、海冰和冰架. 在气候变暖的大背景下, 冰冻圈的加速消融不可避免, 这些现象已经发生并将持续下去, 其影响范围可达全球尺度. 冰冻圈消融的主要影响包括: 多年冻土的融化会将其固定的 CO_2 和甲烷释放进入大气, 从而加剧全球变暖; 山地冰川的退缩和冰盖的融化会导致海平面上升, 同时, 还会威胁到高度依赖冰川融水地区的水资源供给; 海冰和积雪覆盖面积的减少会进一步加剧极地的增暖, 并通过改变西风环流影响中低纬度地区气候; 同时, 北极地区陆上和海上交通线的开发使得人类活动范围进一步扩大, 可能影响全球的政治和经济格局. 要定量评估冰冻圈的未来变化、科学应对其影响, 必须更好地理解上述影响背后的物理过程, 提高地球系统模式对这些过程的模拟和预测预估能力.

2.2 云、环流和气候敏感度

气候敏感度是度量温室气体增加和全球升温幅度之间关系的重要指标, 当前气候模拟和气候预估中的很多不确定性问题, 都直接和气候敏感度有关. 气候敏感度是指

当 CO_2 浓度相对于工业革命前加倍后, 气候系统完全响应达到新的平衡态时, 全球平均表面气温相对于工业革命前的平衡态温度变化, 又被称为“平衡态气候敏感度”(简称为 ECS). 气候敏感度的高低既决定着同等温室气体强迫下预估气候增暖幅度的大小, 更决定着全球温升阈值目标下温室气体的减排空间估算问题(图 3)^[8,9], 从而直接影响到温室气体减排政策的制订和气候变化国际谈判.

从 IPCC 第三次科学评估报告 TAR 到第五次科学评估报告 AR5, 使用古气候代用资料、历史器测资料以及多模式多样本模拟, 均未能缩小 ECS 的不确定性范围, 目前认为 ECS 的可能范围为 $1.5\sim 4.5^\circ\text{C}$ 、不可能低于 1.0°C 和高于 6.0°C ^[10]. 对于气候模式来说, 目前对云认识的局限性是造成气候敏感度不确定性的重要来源, 同时也是环流系统的模拟偏差的来源之一. 目前亟待回答的关键科学问题包括: 当前气候下的云和环流是如何耦合的? 云和环流对全球变暖和其他强迫因子是如何响应的? 云和环流如何通过影响地球辐射收支而产生反馈作用的?

总体而言, 有三方面的因素阻碍了我们对气候敏感度和未来降水变化的估计: 一是尚不能有效约束云对气候敏感度的作用; 二是缺乏对区域、特别是陆上大气环流和降水变化规律的认识; 三是当前的气候模式在描述云过程和大尺度动力场相互耦合方面的可信度较低. 这些问题的解决需要观测、理论和数值模拟研究的密切配合.

2.3 气候系统的碳反馈

人类活动使得大量远古时期累积的碳从化石燃料中

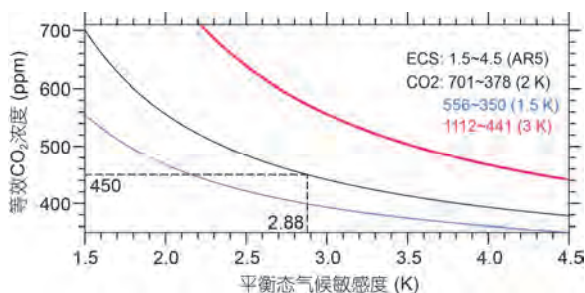


图3 不同升温阈值下等效大气 CO₂ 浓度(单位为 ppm)和气候敏感度 ECS 的关系(单位为 K)。ECS 取 IPCC AR5 估计的可能范围 1.5~4.5°C。给出了“1.5°C 阈值”(蓝色实线)、“2°C 阈值”(黑色实线)和“3°C 阈值”(品红色实线)下等效 CO₂ 浓度随 ECS 的变化。在“2°C 阈值”下, 当 ECS 为估计的中间值(约 3 K)时, 对应的等效 CO₂ 浓度为 450 ppm, 但若敏感度为 4.5°C 则对应的等效 CO₂ 浓度为 380 ppm, 若敏感度为 1.5°C 则对应的等效 CO₂ 浓度为 700 ppm^[8]

Figure 3 Relation between equivalent atmospheric CO₂ concentration (ppm) and equilibrium climate sensitivity (ECS, K) under different warming target. Range of ECS, 1.5–4.5°C, is from IPCC AR5. Three cases of warming target are shown, that is 1.5°C (blue), 2°C (black) and 3°C (magenta). Under 2°C warming target, an estimated median ECS (~3 K) corresponds to 450 ppm equivalent atmospheric CO₂ concentration, whereas 4.5°C ECS to 380 ppm and 1.5°C ECS to 700 ppm^[8]

释放, 进入现代的地气系统中, 干扰了自然状态下的碳循环, 对气候造成显著影响。尽管目前我们可以准确观测大气中的 CO₂ 浓度, 但植被、土壤和多年冻土的含碳量至少是大气的 5 倍, 海洋含碳量至少是大气的 50 倍。据估计, 自 1870 年以来化石燃料释放了约 400 GtC (10 亿吨碳); 同时, 土地利用变化主要是毁林开荒也增加了 145 GtC 的排放量。其中一半以上的人为碳排放被陆地和海洋系统吸收。若没有这些碳汇, 大气中的 CO₂ 浓度将会达到工业革命前的 2 倍多, 全球温度也会上升 2°C 以上。因此, 了解这些碳库如何变化、以及碳在各个碳库之间的转移规律至关重要。这其中涉及的关键问题包括: 哪些生物和非生物过程驱动和控制着陆地-海洋碳汇? 21 世纪中气候和碳的反馈过程是否会放大气候变化的程度? 陆地和海洋中脆弱的碳库对全球变暖将如何响应? 对极端气候事件如何响应? 对气候突变又如何响应?

2.4 极端天气和气候事件

极端天气和气候事件本身是气候系统的内在特征, 但越来越多的观测证据显示, 极端事件正在随着气候的变化而变化^[11,12]。由于极端事件能够影响社会的方方面面, 其破坏性往往高于气候平均态变化的影响。因此, 决策者和利益攸关者对预测极端事件的需求愈发强烈, 涵盖从未来几天到季节、再到年际、年代际、乃至百年等各种时间尺度。

为了满足社会需求, 回答极端事件发生和变化背后的科学问题、提高极端事件的监测和预报水平自然成为世界气候研究领域的一大挑战。极端事件种类繁多, 包括干

旱、洪涝、强降水事件、热浪、热带和温带风暴、沿海风暴潮等, 它们发生的地点、强度、频率都需要观测数据的支撑。这些信息在短期(1 年以下)可以减缓社会和生态系统面临的风险; 在更长期(年代际至百年)可服务于制订有效的适应方案。国际科学界需要回答的问题有: 现有的观测系统是否能够支撑极端事件的监测和变化评估? 大尺度过程、区域过程和局地过程以及它们之间的相互作用对极端事件形成的相对贡献如何? 气候模式模拟的极端事件及其变化有多大可信度, 如何评估并改进? 有哪些因素影响我们对极端事件的精准检测, 从而影响对其频率和强度变化的研究?

2.5 粮食生产用水

民以食为天, 粮食生产离不开淡水供给。人口增长和经济发展对水资源的需求越来越大, 而城市化和工农业活动产生的污染物常常对可用的水资源造成威胁, 气候变化也会导致水资源保有量的变化和重新分配。这些因素的叠加给 21 世纪可持续的水资源管理带来前所未有的严重挑战。因此, 需要进一步增进科学认识、发展新的模拟和预测工具来应对全球水资源管理的迫切需求。

可用的水资源大部分来源于降水, 并通过径流进行远距离输送。所以, 首要的任务是掌握降水的自然变率及其对气候变化的敏感性, 这依赖于观测和模拟手段的进一步提升。针对水资源问题这一挑战, 需要回答的问题包括: 不同的观测系统测量的降水准确性如何? 哪些测量缺陷造成了不同时空尺度上降水观测的不确定性? 气候变化如何影响降水特征(包括空间分布、总量、强度、频率、持续时间和类型等), 特别是对极端干旱和洪涝事件有何影响? 在全球和区域降水的预测和预估中, 气候模式的可信度有多少? 如何提高模式的性能? 过去陆表和水文特征的改变如何影响了用水安全、未来又将产生何种影响? 气候变化如何影响陆地生态系统、水文过程、水资源和水体质量? 如何利用新的观测手段和更好的模式来提高水资源管理的水平?

2.6 区域海平面上升及其对沿海地区的影响

沿海岸平面上升是人为气候变化造成的最严重的后果之一。全球平均海平面将会在数个世纪内继续上升, 其上升速率和最终上升的高度, 很大程度上取决于未来温室气体的排放。而未来的几十年内, 区域海平面的变化和变率将远大于全球平均水平, 从而造成更大的社会影响, 这包括海岸的侵蚀、沿岸基础设施的破坏、自然资源和生物多样性的丧失, 以及最严重的情况——大量环境难民不得不迁徙或移民。

在全球地势较低的沿岸地区, 海平面上升的后果已经开始显现, 但各地海平面的具体变化和受影响的程度由海洋、大气、陆面和冰冻圈等诸多过程控制, 还与一些非气

候类的人为因素有关,如过度抽取地下水所造成的地表沉降等.应对区域海平面上升这一挑战,需要了解自然和人为因素影响局地海平面变化的机制,推进海平面综合观测系统的建设,促进海平面预测和预估技术的发展.具体措施包括:一是建立一套综合的方法估计历史(涵盖古气候尺度)海平面的变化;二是定量估计近期陆地冰雪融化对海平面上升的贡献;三是理解当前区域海平面变率和变化的特征和机制;四是研究区域海平面的可预报性,在此基础上,解决一系列跨学科问题,服务于沿岸地区的管理.

2.7 近期气候预测

这里的“近期”(near term)指的是未来 10~20 年.这一时段的气候受自然变率和人为气候变化的共同影响,其中自然变率可能足够大以至于能够加速或抵消人为气候变化趋势^[13-16].不同于未来百年的远期气候预估,近期气候预测以真实的气候状态为初始条件,可以针对区域尺度提供未来几年至十几年的气候变化信息.决策者和很多领域的利益攸关者(如农业、城市规划、医疗健康、民用航空业领域等)迫切需要这些信息来规划近期的行动方案.近期气候预测能够填补季节到年际预测和多年代际到长期气候预估之间的空隙,为“无缝隙”的气候服务做出重要贡献.为了应对这一挑战,实现上述目标,需要解决一系列的科学问题和数值模式技术问题,具体包括:年代际气候变率可预报性的来源有哪些?如何评估和提高全球模式对年代际变率的模拟能力?如何利用观测数据结合数据同化方案准备预测所需初始化条件,优化输入的各种外强迫因子,减少初始冲击、模式漂移和模式偏差,减少预测结果的不确定性?如何量化预报技巧?如何针对特定区域进行降尺度和偏差校正?如何理解和解释多模式回报和预报结果及其不确定性,提供满足用户需求的近期气候预测产品?

最后需要指出的是,WCRP 提出的以上 7 个重大科学挑战都需要进行跨领域和跨学科的联合研究,有必要融入“未来地球”计划所构建的知识行动网络(knowledge-action networks, KAN)之中,通过整合参与资源,建立从研究到应用的开放合作体系,以科学应对可持续发展所面临的环境挑战.

3 跨学科协作举例:升温阈值和碳减排目标

由于近百年来人类活动导致的全球变暖、冰川冰盖消融和海平面上升,减少碳排放、缓解未来气候变化迫在眉睫.但如何减排才能取得环境保护和经济发展之间的平衡是一个巨大的难题,需要科学界、决策者、产业领域的利益攸关者相互沟通、通力协作、共同行动才能实现(图4).

首先,科学界需要明晰大气 CO₂ 浓度或碳排放与全球平均温度变化的关系,准确估算在某个升温阈值下达到升温目标所允许的碳排放空间.进一步,根据这一碳排放空

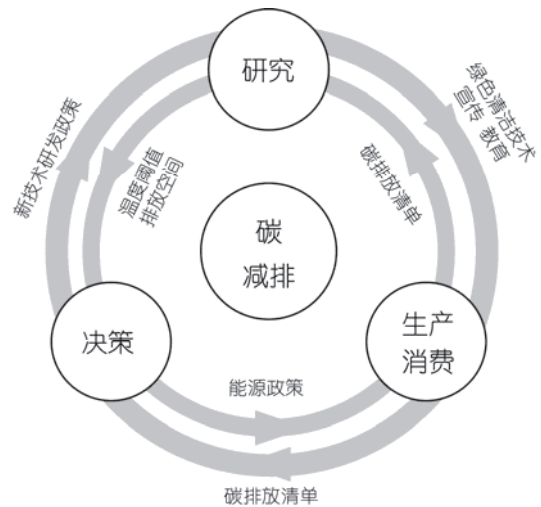


图4 围绕碳减排问题,科学研究、决策与产业(生产消费)领域的协作关系

Figure 4 Cooperative relationship between research, decision-making and industrial sector (production and consumption) surrounding the carbon reduction issue

间,结合由产业领域提供的碳排放清单,利用社会经济模型设计多种减排路径,并将减排任务细化,定量分配给各种能源生产和消费部门,提供给决策者参考.决策者据此出台相关的能源政策,指导和帮扶产业界进行能源转型;同时出台新能源研发政策,鼓励和促进工程领域科研力量开发绿色清洁技术,提供给能源生产消费部门,加快能源转型.产业部门提供碳排放清单给决策部门,以评估政策的效果.此外,气候领域学者需要积极借助媒体、互联网以及教育部门,面向公众和产业界普及气候变化的科学知识、能源政策背后的科学依据,形成良好的社会氛围和舆论环境,保证能源转型政策的顺利实施,从而达到碳减排和控制温升的根本目标.

2℃温升已被 2015 年达成的《巴黎协定》确定为 21 世纪温控目标的上限,这一温控目标的选择正是自然科学和人文社会领域综合考虑风险、成本、收益、权衡利弊,共同讨论的结果.鉴于历史数据显示目前大约 1℃的温升已经对部分脆弱性较高的地区造成显著的影响(如珊瑚礁等生态栖息地的破坏以及极端事件的增多),1.5℃温升成为目前需要努力实现的首要目标.然而,研究显示,由于气候敏感度存在较大的不确定性,这既使得基于不同模式预估的未来气候存在不确定性^[9,17],又使得据此估算的在某一升温目标下的碳排放空间的不确定性也很大^[8].例如,IPCC 给出平衡态气候敏感度的可能范围在 1.5~4.5℃^[10],若真实的平衡态气候敏感度为 4.5℃,则 2℃温升目标下要求 CO₂ 浓度不超过 380 ppm(图 3),而当前的大气 CO₂ 浓度已经超过 400 ppm,这样,在没有负排放措施的情况下(例如地球工程措施)温升目标可能很难实现;但若平衡态气候敏感度

为估计的中间值(约 3°C), 那么 2°C 温升目标允许的 CO₂ 浓度为 450 ppm 左右(图 3), 未来我们尚有一定的排放空间。

累积碳排放与温升存在较好的线性关系, 而且受排放情景的影响较小, 以此为基础研究某一温升目标下的碳排放空间更加方便。IPCC 的评估结果指出累积排放 1000 GtC 时升温范围大约在 0.8~2.5°C, 这一敏感度指标被称为“累积碳排放的瞬态气候响应”(TCRE)。TCRE 也存在较大的不确定性, 直接影响到温升目标的制定和碳减排空间的估算准确性。因此, WCRP 指出减小气候敏感度的不确定性是我们当前面临的重大挑战之一。据估计, 要实现 2°C 温升控制目标, 21 世纪末人类活动的总碳排放应控制在 790 GtC 以内, 而目前已排放了约 550 GtC, 仅有不到 240 GtC 的排放空间, 因此需要世界各国在《巴黎协定》框架下迅速有效地开展减排行动。

4 结语

人为导致的全球气候变化影响深远, 不分国别。在变暖的背景下, 我国遭受的极端天气气候事件越来越多^[18-23]。与此同时, 经济的快速发展又对环境资源造成极大的压力, 迫切需要采取行动, 优先解决事关未来发展的关键科学问题。在这方面, 国际“未来地球”计划组织实施中的许多理念、思路和措施对于我国具有重要参考价值。

特别地, “未来地球”计划为应对环境恶化、促使社会向可持续发展转型, 对科学研究活动做出了顶层设计, 强调以解决问题为导向的跨学科、跨领域协作。我国政府高度重视未来地球计划的组织实施, 于 2014 年 3 月 21 日专门成立了未来地球计划中国委员会(CNC-FE)负责相关工作的组织协调, 近年来取得显著进展^[24,25]。CNC-FE 确立了 12 个优先研究领域, 并设立了相应的工作组, 涉及环境污染、城镇化、粮食安全、能源供给、生态保护、产业转型、灾害预警、文化影响等诸多方面。CNC-FE 还组织召开了一系列国际国内会议, 并翻译出版了包括《未来地球计划初步设计》等多部专著^[5], 让国内学者更好地了解“未来地球计划”的科学理念和工作机制, 促进未来地球计划在中国的有效组织和实施。

气候变化科学作为“未来地球”计划中的重要一环, 是提升跨领域协作的基石。WCRP 提出的七大科学挑战清晰地指出了以社会发展需求为目标的研究方向, 代表着当今气候变化领域的国际学科热点和前沿。我国的气候变化科学研究工作只有面向国家需求、把握国际科学前沿, 积极应对上述挑战, 才能提升自身的跨学科、跨领域合作研究能力和水平, 既在全球协作中扮演重要角色、为人类社会的可持续发展提供“中国方案”, 又能够更好地服务于我国经济社会可持续发展的国家需求。

致谢 中国科学院重点部署项目(ZDRW-ZS-2017-4)和国家自然科学基金(41330423, 41605057)资助。

推荐阅读文献

- 1 Arrhenius S. On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. *Philos Mag*, 1896, 41: 237-276
- 2 Manabe S, Wetherald R T. Thermal equilibrium of the atmosphere with a given distribution of relative humidity. *J Atmos Sci*, 1967, 24: 241-259
- 3 Charney J, Arakawa A, Baker D J, et al. Carbon dioxide and climate: A scientific assessment. Report of an Ad Hoc Study Group on Carbon Dioxide and Climate. Washington DC: National Academy of Sciences Press, 1979
- 4 Keeling C D, Whorf T P, Wahlen M, et al. Interannual extremes in the rate of rise of atmospheric carbon dioxide since 1980. *Nature*, 1995, 375: 666-670
- 5 The Transition Team for Future Earth. Qu J S, Zeng J J, Wang L W, et al., trans. Future Earth Initial Design (in Chinese). Beijing: Science Press, 2015. 1-157 [未来地球计划过渡小组, 著. 曲建升, 曾静静, 王立伟, 等, 译. 未来地球计划初步设计. 北京: 科学出版社, 2015. 1-157]
- 6 Zhou T J, Zou L W, Wu B, et al. Development of Earth/climate system models in China: A review from the Coupled Model Intercomparison Project perspective (in Chinese). *Acta Meteorol Sin*, 2014, 72: 892-907 [周天军, 邹立维, 吴波, 等. 我国地球气候系统模式研究进展: CMIP 计划实施 20 年回顾. *气象学报*, 2014, 72: 892-907]
- 7 Taylor K E, Stouffer R J, Meehl G A. An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bull Am Meteorol Soc*, 2012, 93: 485-498
- 8 Zhou T J, Chen X L. Uncertainty in the 2°C warming threshold related to climate sensitivity and climate feedback. *J Meteorol Res*, 2015, 9: 884-895 [周天军, 陈晓龙. 气候敏感度、气候反馈过程与 2°C 增温阈值的不确定性问题. *气象学报*, 2015, 73: 624-634]
- 9 Chen X L, Zhou T J. Uncertainty in crossing time of 2°C warming threshold over China. *Sci Bull*, 2016, 61: 1451-1459
- 10 Flato G, Marotzke J, Abiodun B, et al. Evaluation of climate models. 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 Changes*. Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press, 2013
- 11 Sun Y, Zhang X B, Zwiers F W, et al. Rapid increase in the risk of extreme summer heat in Eastern China. *Nat Clim Change*, 2014, 4: 1082-1085

- 12 Stott P A, Christidis N, Otto F E L, et al. Attribution of extreme weather and climate-related events. *WIREs Clim Change*, 2016, 7: 23–41
- 13 Wu B, Zhou T J. Prediction of decadal variability of sea surface temperature by a coupled global climate model FGOALS_g1 developed in LASG/IAP (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2012, 57: 1168–1175 [吴波, 周天军. IAP/LASG 气候系统模式 FGOALS_g1 预测的海表面温度年代际尺度的演变. *科学通报*, 2012, 57: 1168–1175]
- 14 Wang B, Liu M, Yu Y, et al. Preliminary evaluations of FGOALS-g2 for decadal predictions. *Adv Atmos Sci*, 2013, 30: 674–683
- 15 Wu B, Chen X L, Song F F, et al. Initialized decadal predictions by LASG/IAP climate system model FGOALS-s2: Evaluations of strengths and weaknesses. *Adv Meteorol*, 2015, 2015: 904826
- 16 Zhou T J, Wu B. Decadal climate prediction: Scientific frontier and challenge (in Chinese). *Adv Earth Sci*, 2017, 32: 331–341 [周天军, 吴波. 年代际气候预测问题: 科学前沿与挑战. *地球科学进展*, 2017, 32: 331–341]
- 17 Chen X L, Zhou T J. Distinct effects of global mean warming and regional sea surface warming pattern on projected uncertainty in the South Asian summer monsoon. *Geophys Res Lett*, 2015, 42: 9433–9439
- 18 Wen H Q, Zhang X, Xu Y, et al. Detecting human influence on extreme temperatures in China. *Geophys Res Lett*, 2013, 40: 1171–1176
- 19 Zhou T J, Ma S M, Zou L W. Understanding a hot summer in central eastern China: Summer 2013 in context of multi-model trend analysis. *Bull Am Meteorol Soc*, 2014, 95: S54–S57
- 20 Song L, Sun Y, Dong S, et al. Role of anthropogenic forcing in 2014 hot spring in northern China. *Bull Am Meteorol Soc*, 2015, 96: S111–S114
- 21 Ma S M, Zhou T J, Stone D, et al. Detectable anthropogenic shift toward heavy precipitation over eastern China. *J Clim*, 2017, 30: 1381–1396
- 22 Ma S M, Zhou T J, Stone D, et al. Attribution of the July–August 2013 heat event in central and eastern China to anthropogenic greenhouse gas emissions. *Environ Res Lett*, 2017, 12: 054020
- 23 Ma S M, Zhou T J, Angelil O, et al. Increased chances of drought in southeastern periphery of the Tibetan Plateau induced by anthropogenic warming. *J Clim*, 2017, 30: 6543–6560
- 24 Zhou T. Implementation of the Future Earth programme in China: Chinese scientists at the forefront. *Adv Clim Change Res*, 2015, 6: 81–83
- 25 Wang C, Zhou T, Lin Z, et al. Future Earth activities in China: Toward a national sustainable development. *Adv Clim Change Res*, 2015, 6: 84–91

Summary for “支撑‘未来地球’计划的气候变化科学前沿问题”

Frontier issues on climate change science for supporting Future Earth

Tianjun Zhou^{1,2*}, Xiaolong Chen¹ & Bo Wu¹

¹ State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

² University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

* Corresponding author, E-mail: zhoutj@lasg.iap.ac.cn

To confront the rapid climatic and environmental changes since the Industrial Revolution and to promote the sustainable development of human society, the international science community launched a new research programme called “Future Earth” in Rio de Janeiro, Brazil in June 2012. The programme integrates the following existing international programmes from the realms of natural science, social science, the humanities and engineering: the International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP), the International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change (IHDP), and DIVERSITAS (biodiversity-science programme). The World Climate Research Programme (WCRP), which has been guiding climate-change research globally in the recent three decades, is one of the most important cooperative partners with the Future Earth. The WCRP Joint Scientific Committee has developed seven Grand Challenges identifying the critical climate-change issues for human society that should be high-priorities for the research community in the coming decades. The seven Grand Challenges are: “Melting Ice and Global Consequences”, “Clouds, Circulation and Climate Sensitivity”, “Carbon Feedbacks in the Climate System”, “Weather and Climate Extremes”, “Water for the Food Baskets of the World”, “Regional Sea-Level Change and Coastal Impacts”, and “Near-term Climate Prediction”. Consistent with the aims of Future Earth, the Grand Challenges call for transdisciplinary and interdisciplinary cooperation to produce “actionable information” for decision makers. Addressing these scientific frontier issues brings the best minds to the table, to overcome barriers to progress in climate science and support actions to mitigate climate change. After concisely introducing the Grand Challenges of WCRP, we shed light on feasibility of transdisciplinary cooperation by taking global warming and carbon reduction targets as an example. Based on a specific warming target and carbon emission inventory collected from industrial sector, the climate-change community provides carbon-reduction lists for different energy departments to decision makers in government. Policies are then made to encourage the industrial sector to reduce its consumption of fossil fuels and invest in the development of clean energy. Climate scientists and policy makers can also modify the suggested carbon-reduction lists and corresponding policies based on updated carbon emission inventories from the industrial sector. Meanwhile, the scientific community should communicate the facts and impacts of climate change and the scientific basis of energy policies to the public via media and schools, which is critical to the implementation of carbon reduction in practice. Based on current research, to achieve a 2°C warming target by the end of 21st century, atmospheric CO₂ concentrations should be controlled to below 450 ppm if considering a 3 K equilibrium climate sensitivity, which means only 240 GtC emission space left. Therefore, promoting transdisciplinary cooperation within the Future Earth framework to realize sustainable development goals is an urgent task. Climate research in China should take active measures to implement the Future Earth goals through effective cooperation with relevant communities. Aiming at the seven Grand Challenges, by focusing on the solution of the frontier issues of climate change, will promote sustainable socio-economic development.

Future Earth, World Climate Research Programme, seven grand challenges, transdisciplinary cooperation, sustainable development

doi: 10.1360/N972018-00818