

国际气候变化科学评估中所反映的气候变化科学的重要进展

王倩^{1, 2} 翟盘茂¹

(1 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081; 2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 政府间气候变化委员会 (IPCC) 历次评估报告的进展表明: 1) 人类对于气候系统变化的科学认知在不断加深, 全球变暖是毋庸置疑的; 工业化时代以来, 人类活动可能已经引起了1 °C的增暖。2) 气候系统观测不断完善, 观测资料和再分析资料的空间覆盖范围以及时间尺度均明显提高; 气候系统模式分辨率不断提高, 以及更为复杂的生物地球化学过程的加入, 使得模式发展经历了从气候系统模式到地球系统模式的进步。3) 与以往的评估报告相比, 在第六次评估报告 (AR6) 的规划中, 以解决问题为导向, 加强了对于水循环变化、区域气候变化信息以及极端天气气候事件检测归因的评估内容。

关键词: IPCC, 气候变化, 科学认知, 发展

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.03.013

Reviewing Progress in Climate Change Science from Perspective of IPCC Assessments

Wang Qian^{1,2} Zhai Panmao^{1*}

(1 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: The progress of the previous IPCC assessment reports indicate that human's scientific cognition of climate system changes is constantly deepening, and global warming is unequivocal. Since the industrial age, human activities may have caused approximately 1 °C. With the continuous improvement of climate system observations, the spatial coverage and time scale of observation data and reanalysis data have increased significantly. In terms of climate system models, the increase in resolution and the addition of more complex biogeochemical processes, making the model development has experienced progress from climate system model to earth system model. Compared with previous assessment reports, the sixth assessment report (AR6) will focus on problem-solving-oriented thinking, and strengthen the assessment content of water cycle changes, regional climate change and the detection and attribution of extreme weather and climate events.

Keywords: IPCC, climate change, scientific cognition, development

0 引言

自1988年成立以来, IPCC已经编写了五轮全面的气候变化评估报告和14篇特别报告。每一份报告都向国际社会提供了对人为气候变化的最新认知, 为国际气候谈判、气候决策提供了权威、综合的科学依据, 极大地促进了气候变化自然科学的发展, 并为适应和减缓气候变化奠定了坚实的科学基础^[1]。1990年, IPCC第一次评估报告 (FAR) 强调了气候变化的

全球影响, 提出了需要开展国际合作加以应对^[2]。此次报告后, 联合国决定建立“联合国气候变化框架公约 (UNFCCC)”, 作为减少全球变暖和应对气候变化的关键性国际条约。IPCC第二次评估报告 (SAR) 于1995年发布, 为各国政府在1997年通过“京都议定书”之前提供了重要科学支撑^[3]。IPCC第三次评估报告 (TAR) 关注到了气候变化的影响和适应^[4]。2007年发布的IPCC第四次评估报告 (AR4) 奠定了后京都时代的基础工作, 重点关注到了温升控制在2 °C的科学问题^[5]。IPCC第五次评估报告 (AR5) 于2013—2014年完成, 它从多视角进一步证实和支持了AR4第一工作组有关人类活动影响的结论, 认为过去一百多年人类活动导致全球气候变暖毋庸置疑^[6]。同时, 它首次给出了2 °C条件下的CO₂的累计排放。AR5

收稿日期: 2020年12月22日; 修回日期: 2021年5月19日

第一作者: 王倩 (1994年—), Email: wangqian20180307@163.com

通信作者: 翟盘茂 (1962年—), Email: pmzhai@cma.gov.cn

资助信息: 国家重点研发计划项目 (2018YFC1507700);

中国气象局气候变化专项 (CCSF202106)

为签署《巴黎协定》提供了科学基础。正在进行中的IPCC第六次评估报告（AR6）将于2022年完成，AR6将为2023年的第33次全体缔约方大会围绕全球盘点行动提供科学支撑。

目前，IPCC正处于第六个评估周期，在该评估周期内，委员会将完成3个工作组报告、综合报告、3份特别报告以及1份国家清单方法学报告。特别报告是基于AR5以来正在发生的变化，且在AR5中被列

为重要不确定性方面、知识缺陷，或者是新出现的知识领域来编写。如图1所示，目前，3份特别报告以及国家清单方法学报告均已经完成。第六次评估报告（AR6）三个工作组的报告将于2021年完成，AR6综合报告将于2022年编写完成。IPCC AR6将以AR5和以往IPCC评估报告为基础，重点关注全球和区域尺度的解决方案，并通过3份特别报告提供支持性证据。

本文首先回顾IPCC自成立以来所发布的每次评估

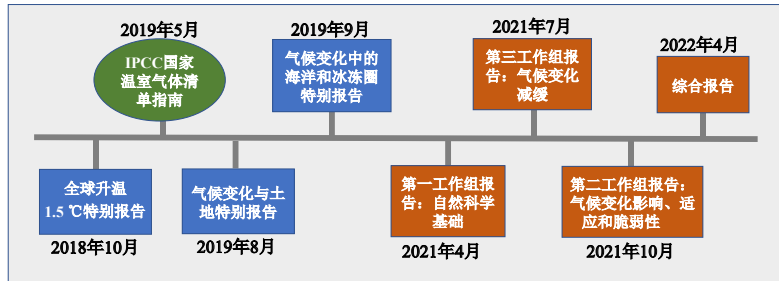


图1 IPCC第六次评估周期内相关报告时间表（根据COVIN-19爆发情况三个工作组报告和综合报告发布时间将有所推后）
Fig. 1 The relevant report timetable during the sixth IPCC assessment cycle (According to the COVIN-19 outbreak, the release time of the reports of the three working groups and the comprehensive reports will be postponed)

报告的进展情况，重点讨论每次评估报告中对于气候系统的科学认知、气候观测系统以及气候系统模式的发展和进步。并且针对AR6启动以来已经取得的重要进展，重点从AR6第一工作组报告的设计思路、观测系统的改善和地球系统模式的发展方面，分析AR6第一工作组报告的重要突破与转变。

1 IPCC历次评估报告的演变

1.1 科学认知的发展

随着观测能力的不断提升、气候系统研究方法的逐步成熟，以及气候模式的不断发展，人类对于气候系统及气候变化的科学认知不断加深。这在IPCC历次评估报告中得到充分体现，无论是从每次评估报告的框架，还是从人类活动对气候变化影响的确信程度上，都体现出人类对于气候系统和气候变化的科学认知在不断深化。

FAR中，人类对于气候变化的认知较为粗浅，主要局限于大气圈的变化。评估观测到的、以及预估未来的气候变化也主要局限于温度、降水以及海平面的变化。SAR中，首次引进了气候系统的概念，在SAR第一工作组报告的第一章中综合评估了气候系统各个圈层的变化情况。这体现了人类对于气候的认知从经典气候学向全球气候系统概念的发展^[7]。此次报告中的另一个重要突破是首次提出了气候变化归因的概念，并且开始量化气溶胶在全球气候变化中的作用，为未来气候变化模拟提供可能。在TAR中，增加了对

碳循环和大气化学相关内容的评估，对全球气候系统五大圈层之间的相互作用过程有了进一步的认识。本次评估报告中，首次将区域气候信息的评估和预估单列成章，体现出人类对于气候变化的认知从全球向复杂的区域过程转变。AR4中，对于全球气候系统各圈层的认识进一步加深，考虑了复杂的生物地球化学过程，首次将海洋气候变化，和与冰冻圈相关的积雪、冰川和冻土的变化，以及古气候的内容单列成章。与之前的评估报告相比，AR5中包括了一个关于近期气候预估的新章节。评估中对于云过程以及云-气溶胶相互作用的过程也有了进一步的认识。以往的IPCC报告中对于极端天气气候事件已经有了相关描述，但在第五次评估周期中针对极端事件可引发的各种灾害风险，IPCC第一、第二工作组联合编写了《管理极端事件和灾害风险、推进气候变化适应》特别报告。该特别报告综合了第一工作组、第二工作组和灾害风险管理界所涉及的各种技能和视角，突出了适应和灾害风险管理^[8]。正在进行的AR6中，3份特别报告已经发布。《全球升温1.5℃特别报告》（SR1.5），是世界各国政府根据《巴黎协定》提出的。该特别报告主要从以下四个方面展开：对1.5℃全球温升的认识、预估的气候变化、可能的影响及其对应的风险，与1.5℃全球变暖相一致排放途径和经济转型，可持续发展及消除贫困行动背景下加强全球响应^[9]。《气候变化与土地特别报告》（SRCCL）反映了关于荒漠化、土地退化、可持续土地管理、粮食

安全和陆地生态系统碳通量方面的最新科学认知,并探讨了如何进行更加可持续性的土地利用和管理以应对与土地相关的气候变化问题^[10]。另外,除了将在第一工作组报告中评估海洋、冰冻圈的变化,IPCC还针对海洋和冰冻圈发布了《气候变化中的海洋和冰冻圈特别报告》(SROCC)。该报告评估了海洋和冰冻圈有关的最新科学认识,讨论了气候变化下海洋、沿海、极地和高山地区生态系统和人类群落的影响、脆弱性和适应能力,并提供了实现气候恢复型发展途径的不同方案^[11]。SROCC是IPCC首次以高山地区与极区冰冻圈和海洋为主题的评估报告^[12],这也是AR6的重要进展之一。

历次IPCC报告对于全球变暖程度以及人类活动对全球变暖的影响程度的认识也在逐步加强。如表1所示,IPCC历次评估报告中平均温度的变化结果一致表明全球变暖已经成为毋庸置疑的事实,并且全球变暖的速率在不断加快。同时,也有越来越多的证据证实了人类活动对全球变暖的影响。FAR指出很少的观测证据可检测到人类活动对气候变化的影响^[2]。6年之后的SAR的结论表明,平衡各种证据,人类对20世纪全

球气候有可辨别的影响^[3]。TAR的结论是:有新的和更强的证据表明,过去50年观测到的增暖的大部分可归结于人类活动,这一结论是可能的(66%~90%的概率)^[4]。自TAR以来,评估人类对最近气候变化的贡献的信度有很大提高,部分原因是从更长时间的记录获得的更强的信号,以及扩充的和改进的一系列观测资料,以便结合气候系统的其他变化更全面地研究变暖的归因。AR4的结论表明,观测到的20世纪中叶以来大部分的全球平均温度的升高,很可能(>90%的概率)是由于观测到人为温室气体浓度增加所导致的^[5]。AR5中,人类活动影响的信号更加清晰,在整个气候系统中都已经检测到人类活动的影响,人类活动的影响极有可能(95%~100%的概率)是20世纪中叶以来观测到变暖的主要原因^[6]。SR1.5的最新结果显示,人类活动估计可能造成了全球升温高于工业化前水平约1℃^[9]。这说明在全球变暖中,人类活动的影响逐渐可以被量化。此外,人类活动的证据在区域尺度上也在不断进步。AR4表明,人为强迫可能对20世纪中叶以来除南极洲之外的所有大陆表面温度升高起到了重要作用^[5]。

表1 历次IPCC报告对人类活动引起的气候变化的重要科学认知

Table 1 Important scientific understanding of climate change caused by human activities in previous IPCC reports

历次IPCC报告	观测时段(基准时段)	平均地表温度变化/℃	人类活动信号
FAR(1990)	1861—1989(1951—1980)	0.45(0.3~0.6)	很少的观测证据可检测到人类活动对气候的影响
SAR(1995)	1861—1994(1961—1990)	0.45(0.3~0.6)	各种证据表明人类活动对全球气候产生可辨别的影响
TAR(2001)	1861—2000(1961—1990)	0.60(0.4~0.8)	有新的和更强的证据表明,过去50年观测到的增暖的大部分可归结于人类活动
AR4(2007)	1906—2005(1961—1990)	0.74(0.56~0.92)	观测到的20世纪中叶以来大部分的全球平均温度的升高,很可能是由于观测到人为温室气体浓度增加所导致的
AR5(2013/2014)	1880—2012(1961—1990)	0.85(0.65~1.06)	在整个气候系统中都已经检测到人类活动的影响,人类活动的影响极有可能是20世纪中叶以来观测到变暖的主要原因
AR6:SR1.5(2018)	1850—2015(1850—1900)	1.0(0.8~1.2)	人类活动估计可能造成了全球升温高于工业化前水平约1℃

1.2 观测系统和气候模式的发展

气候系统的长时间观测是气候变化研究的重要资料基础和气候模式发展的必要支撑。随着全球观测系统的不断完善,全球观测站点的空间分布密度明显增加,观测资料时间尺度不断扩展,大气和陆面以外的海洋和冰雪区的观测数据也不断完善。近几十年,随着观测工具和观测手段的多样化,气象卫星和其他类型的卫星提供了辐射收支、植被覆盖变化、土地利用以及海面温度等信息,为解决海洋、沙漠和高山等资料稀缺区的气候变化问题提供了新的途径^[13]。除此之外,利用资料同化技术再分析过去的气象观测资料,重建高时空分辨率的格点气候数据集也取得了显著进展。再分析资料的发展主要体现在数据覆盖范围的扩大、空间分辨率的提高、时间尺度的延长,以及全球再分析数据集的增多。目前,全球大气资料再

分析计划主要有:美国国家环境预测中心和大气研究中心(NCEP/NCAR)全球大气再分析资料计划,美国国家航空航天局资料同化部(NASA/DAO)的全球大气再分析资料计划,欧洲中期数值预报中心(ECMWF)的全球大气再分析资料计划,日本气象厅(JMA)和电力中央研究所(CRIEPI)的全球大气再分析资料计划。

全球变暖的检测和归因以及气候变化预估等研究都离不开气候模式。国际耦合模式比较计划(CMIP)以大气模式比较计划(AMIP)为基础,由世界气候研究计划耦合模拟工作组(WGCM)于1995年发起和组织。迄今为止,WGCM已经组织了6次模式比较计划^[14]。CMIP计划关于气候模式性能的评估、对当前气候变化的模拟以及未来气候变化的情景预估结果,为IPCC气候变化评估报告的撰写提

供了重要支撑。例如，CMIP1的结果被IPCC SAR所引用，CMIP2、CMIP3和CMIP5的结果分别被TAR、AR4和AR5所引用。最新的CMIP6的模式评估结果将用于正在进行当中的AR6。在已经完成的5次评估报告当中，气候系统模式的复杂程度及模拟能力都得到了显著发展，主要体现在不断耦合入新的分量、模式中考虑的地球生物化学过程不断丰富，参与评估的模式数量不断增加，模式分辨率逐渐提高。如图2所示，在FAR中，参与评估的模式主要有大气模式、陆面模式和海洋模式，模式数量以及模式的性能均较为薄弱。随着全球观测系统的不断完善，人类对于气候系统和气候变化的认知能力的逐步加强，以及高性能计算机的飞速发展，一些复杂的过程如气溶胶、碳循环、动态植被、大气化学、陆冰等被逐渐加入到模式中。AR5已经是包含了5个圈层分量模式的地球系统模式，模式分辨率的提高以及更为复杂的生物地球化学过程的加入，使得模式的发展更加接近真实的地球气候系统。

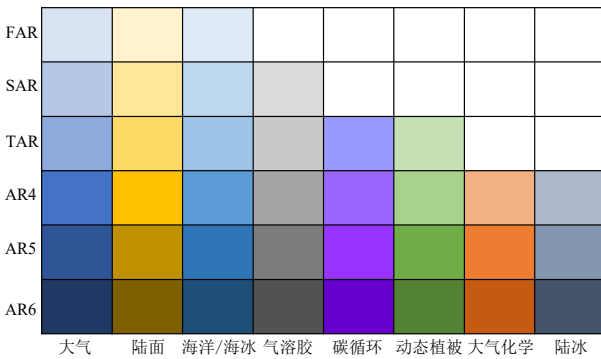


图2 历次IPCC评估报告中模式发展示意图（改绘自IPCC WGI AR5^[6]）

Fig. 2 Schematic diagram of model development in IPCC assessment reports

2 IPCC AR6第一工作组报告规划思路和重要突破

2.1 规划思路

IPCC第一工作组致力于通过严格、透明、全面和可靠的评估知识状态来评估气候变化的物理科学基础，为第二和第三工作组开展风险管理、适应和减缓措施方面的研究提供关键的科学信息。同时，将在未来的社会经济情景、温室气体排放途径、辐射强迫以及全球气候预估方面与第三工作组紧密的合作。

IPCC AR6第一工作组报告聚焦以解决问题为导向的编写思路，在内容和框架上均较AR5进行了较大改善。AR5是从观测、物理过程、模式和综合分析的思路来进行陈述，而AR6首先用第一章的内容来给出

整个报告的结构框架，然后从大尺度的气候变化、气候过程、以及区域信息的思路来编写。气候过程部分将一些内容和第三工作组相关联，而区域信息方面将与第二工作组相关联，这样充分地加强了AR6之间的衔接和一致性。IPCC AR6第一工作组的报告需要考虑AR5以来气候变化的观点、AR5显示的关键不确定性和差距以及新兴知识，并且要协调好与3份特别报告以及与第二工作组和第三工作组报告的衔接与交叉问题。这既是AR6取得的突破，同时也是其面临的挑战。AR5以来，随着人类对于气候系统中水循环变化和极端天气气候事件检测归因的认知进步。在AR6的内容规划中，首次将水循环的变化以及极端天气气候事件的检测归因以单独的章节呈现。另外，与以往的IPCC报告相比，AR6中有关区域气候变化信息的内容更加丰富，并且增加了区域气候变化风险评估有关的内容，这充分加强了AR6三个工作组之间的衔接和一致性。

2.2 气候观测的发展

气候科学的进步依赖于地面仪器观测、飞机和其他高层大气观测、卫星观测、海洋观测以及古气候记录等观测结果的质量和数量。自IPCC AR5以来，观测能力大幅提升，包括现有数据集性能的提升、新兴数据集的发展、以及大量气候数据集数据长度的扩展，为气候变化评估提供了很好的条件。卫星观测的发展在大气观测能力的提升中发挥了重要作用。AR5以来，CO₂的观测已经扩展到包括通过NASA轨道碳观测卫星进行检索，这种方式可以改进对大气和地表间CO₂通量的量化^[15]。目前，已经形成了用于确定温室气体通量^[16]和大气浓度^[17]源汇的均一化卫星观测网络。同时，通过扩展现有的地面观测网络并通过诸如飞机观测的手段，进一步改善了对大气成分（如气溶胶、云和痕量气体）的观测^[18-19]。AR5强调了气溶胶-云相互作用的巨大不确定性，随着大气观测系统能力的改善和提升，在AR6中该不确定性将会得到改善。

自AR5以来，对海洋的观测已经大大扩展，包括对海洋温度、盐度观测、海洋生物地球化学观测、以及卫星获取的各种基本海洋变量的全球覆盖范围均已扩大^[20]。对于冰冻圈而言，AR5以来，通过存档和解密航拍照片、卫星资料以及高分辨率的数字高程模型扩大了全球陆地冰川观测网络^[21]。多年冻土参数的监测^[22]以及南北极冰盖变化的测量^[23]方面均取得较大进步。

陆地观测系统中，利用卫星和雷达等先进观测技术，使得估计全球陆地生物量变化的能力有所提高^[24]

^{25]}。这可以改善碳储量的量化以及由于森林砍伐而导致的人为变化。目前,土壤湿度的观测资料可以通过卫星检索获得,填补了观测陆地水文趋势和变率的空白。

此外,自AR5以来,用于发展再分析资料的方法也取得了新的进展,这对于气候变化的研究具有重要意义。再分析资料的最新进展主要包括覆盖范围的扩大、空间分辨率的提高、时间尺度的延长,以及最大程度地减少观测网络时空变化的影响。耦合的再分析资料也正在不断开发,以使得海洋、大气、陆地和冰冻圈保持更好的一致性。

2.3 地球系统模式的发展

在AR6的未来气候变化预估模块中,主要的突破体现在地球系统模式的发展。地球系统模式是理解气候系统的变化规律、再现其过去演变过程、预测和预估其未来变化的重要工具。第六期耦合模式比较计划(CMIP6)中最新的全球气候模式的比较结果将用于IPCC AR6中。当前正在进行的CMIP6计划,参与模式研发团队达到33个,而注册参加CMIP6的模式版本也创纪录地达到了112个。这是CMIP计划实施20多年来参与的模式数量最多、设计的数值试验最丰富、所提供的模拟数据最为庞大的一次。我国有9家机构报名参加CMIP6,注册的地球(气候)系统模式版本有13个。我国参与CMIP6的模式水平分辨率较之CMIP5有一定提高,大气模式分辨率多在100 km左右,海洋模式分辨率在100 km与50 km之间各占一半。

较之CMIP5中的模式,参与CMIP6的模式有2个特点:一是考虑的过程更为复杂,以包含碳氮循环过程的地球系统模式为主,许多模式实现了大气化学过程的双向耦合,包含了与冰盖和多年冻土的耦合作用;二是大气和海洋模式的分辨率明显提高,大气模式的最高水平分辨率达到了全球25 km^[14]。AR5中强调模拟水循环的趋势和变率仍然存在挑战,而目前具有更细水平网格的全球模式更好地描述了大气和海洋的大规模环流,为全球水循环的模拟带来了重大改善^[26]。全球大气、海洋模式垂直分辨率的提高,有效增强了模式对于平流层过程以及海洋混合层上层的模拟^[27]。与CMIP5相比,CMIP6模式的一些参数化方案和参数均有所更新,目的是为了能够更好地描述物理过程并使模式气候更接近最新的观测数据集,有利于加强对气溶胶-云微物理过程的理解,进一步增进对气溶胶和短寿命气体对气候影响的了解。这将填补AR5中对于气溶胶和云过程评估的不足。同时,AR5以来,海洋、冰冻圈模式发展也取得了显著进展。基于模式分

辨率的提升,海洋涡流的精确再现是CMIP6海洋模式组中取得的主要进展^[28]。海冰以及冰盖模式的发展对于南北极海冰变化趋势的分析^[29-30],以及相关物理过程的理解^[31]均发挥重要作用。

IPCC AR5指出温度以外变量的观测不确定性、气溶胶强迫的不确定性以及模式的不确定性对水循环变化、区域气候变化以及极端事件的检测和归因带来诸多限制。AR5以来,由于对数据集的新观测和分析,包括再分析,以及模式的发展,全球气候模式分辨率的提高。在AR6中,对于水循环变化、区域气候变化以及极端事件的归因能力均有所增强。

3 结论

本文回顾了IPCC历次评估报告中人类对于气候系统变化科学认知的进步,全球变暖和人类活动影响的变化,以及气候系统观测和气候系统模式的发展。并进一步介绍了AR6评估周期内已经发布的3份特别报告和第一工作组报告在规划思路和内容安排上的创新和突破,以及AR5以来气候观测系统和气候系统模式的发展。主要结论如下:

1) IPCC历次评估报告的结果显示,人类对于气候系统和气候变化的认知在逐渐加深。对气候变化的认识经历了从最初的大气圈到气候系统多圈层的转变,这在IPCC历次评估报告的内容安排上得到了充分体现。从对全球变暖的认识来看,IPCC历次评估报告中平均温度的变化结果一致表明,全球气候变暖已经成为毋庸置疑的事实。对于人类活动影响的认识,也经历了从最初的很少的证据表明,到AR5中气候系统各圈层均能检测到人类活动的影响,再到SR1.5中已经可以量化出人类活动对全球变暖的影响这一过程。

2) 随着全球观测系统的不断完善,站点观测资料不断积累,气候观测的覆盖范围、空间分辨率以及时间尺度均明显增大。模式的发展也经历了从简单的气候模式到气候系统模式和地球系统模式的进步。从FAR到AR6,模式中新分量的不断加入、模式分辨率的不断提高,更为复杂的生物地球化学过程的加入,使得模式的发展更加接近真实的地球气候系统。

3) IPCC AR6第一工作组报告聚焦以解决问题为导向的编写思路,在内容和框架上均较AR5进行了较大改善。AR6首先用第一章的内容来给出整个报告的结构框架,用综合反映气候系统变化的方式,从大尺度的气候变化、气候变化过程、以及区域气候变化信息的思路来开展评估。首次将水循环的变化以及极端天气气候事件的检测归因以单独的章节呈现。另外,AR6中有关区域气候变化信息的内容更加丰富,并且

增加了区域气候变化风险评估有关的内容，这充分加强了IPCC三个工作组之间的衔接和一致性。

参考文献

- [1] 巢清尘, 周波涛, 孙颖, 等. IPCC气候变化自然科学认知的发展. 气候变化研究进展, 2014, 10(001): 7-13.
- [2] Houghton J T, Jenkins G J, Ephraums J J. Climate change: the IPCC Scientific Assessment. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
- [3] Houghton J, Meira Filho L, Callander B, et al. Climate change 1995: the Science of Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.
- [4] Houghton J, Ding Y H, Griggs J, et al. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [5] Solomon S, Qin D, Manning M, et al. 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, 2007, 18(2): 95-123.
- [6] Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of IPCC the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014, 18(2): 95-123.
- [7] 赵宗慈, 罗勇, 黄建斌, 回顾 IPCC 30 年 (1988—2018 年). 气候变化研究进展, 2018, 14 (5): 540-546.
- [8] Switzerland S, Argentina V B, Canada I B, et al. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
- [9] IPCC. Summary for policymakers. In: Masson-Delmotte V, Zhai P, Pörtner H O, et al. Global Warming of 1.5 °C. Geneva: WMO, 2018.
- [10] IPCC. Climate Change and Land. Geneva: WMO, 2019.
- [11] IPCC. IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Geneva: WMO, 2019.
- [12] 王朋岭, 黄磊, 巢清尘, 等. IPCC SROCC 的主要结论和启示. 气候变化研究进展, 2020, 16 (2): 133-142.
- [13] 秦大河, 等. 气候变化科学概论. 北京: 科学出版社, 2018.
- [14] 周天军, 邹立维, 陈晓龙. 第六次国际耦合模式比较计划 (CMIP6) 评述. 气候变化研究进展, 2019, 15 (5): 445-456.
- [15] Joiner J, Yoshida Y, Vasilkov A P, et al. First observations of global and seasonal terrestrial chlorophyll fluorescence from space. Biogeosciences, 2011, 8, 637-651.
- [16] Rebmann C, Aubinet M, Schmid H, et al. ICOS eddy covariance flux-station site setup: a review. International Agrophysics, 2018, 32: 471-494.
- [17] Colomb A, Conil S, Delmotte M, et al. ICOS Atmospheric Greenhouse Gas Mole Fractions of CO₂, CH₄, CO, 14CO₂ and Meteorological Observations 2016–2018, final quality controlled Level 2 data. ICOS ERIC, 2018.
- [18] Pandolfi M, Alados-Arboledas L, Alastuey A, et al. A European aerosol phenomenology- 6: scattering properties of atmospheric aerosol particles from 28 ACTRIS sites. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018, 18: 7877-7911.
- [19] Petzold A, Thouret V, Gerbig C, et al. Global-scale atmosphere monitoring by in-service aircraft- current achievements and future prospects of the European Research Infrastructure IAGOS. Tellus B, 2015, 67: 28452.
- [20] Speich S, Lee T, Muller-Karger F, et al. Editorial: OceanObs19: an Ocean of Opportunity. Frontiers in Marine Science, 2019, 6: 570.
- [21] Braun M H, Malz P, Sommer C, et al. Constraining glacier elevation and mass changes in South America. Nature Climate Change, 2019, 9: 130-136.
- [22] Biskaborn B K, Lanckman J P, Lantuit H, et al. The new database of the Global Terrestrial Network for Permafrost (GTN-P). Earth System Science, 2015, 7: 245-259.
- [23] Bamber J L, Westaway R M, Marzeion B, et al. The land ice contribution to sea level during the satellite era. Environmental Research Letters, 2018, 13, 063008.
- [24] Baccini A, Walker W, Carvalho L, et al. Tropical forests are a net carbon source based on aboveground measurements of gain and loss. Science, 2017, 358: 230-234.
- [25] Liu Y Y, Van Dijk A I J M, De Jeu R A M, et al. Recent reversal in loss of global terrestrial biomass. Nature Climate Change, 2015, 5(5): 470-474.
- [26] Roberts M J, Vidale P L, Senior C, et al. The benefits of global high-resolution for climate simulation: process-understanding and the enabling of stakeholder decisions at the regional scale. Bulletin of the American Meteorological Society, 2018, 99(11): 2341-2359.
- [27] Kawatani Y, Hamilton K, Gray L J, et al. The effects of a well-resolved stratosphere on the simulated boreal winter circulation in a climate model. Journal of the Atmospheric Sciences, 2019, 0, JAS-D-18-0206. 1.
- [28] Hewitt H T, Bell M J, Chassignet E P, et al. Will high-resolution global ocean models benefit coupled predictions on short-range to climate timescales? Ocean Modelling, 2017, 120: 120-136.
- [29] Rosenblum E, Eisenman I. Sea ice trends in climate models only accurate in runs with biased global warming. Journal of Climate, 2017, 30: 6265-6278.
- [30] Notz D, Stroeve J. The trajectory towards a seasonally ice-free Arctic Ocean. Springer Open Choice, 2018, 4: 407-416.
- [31] Marianne H, Sergienko O V. The effect of buttressing on grounding line dynamics. Journal of Glaciology, 2018, 64(245): 417-431.