



巢清尘, 严中伟, 孙颖, 等. 中国气候变化的科学新认知[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(3): 1-9. [CHAO Qingchen, YAN Zhongwei, SUN Ying, et al. A recent scientific understanding of climate change in China[J]. China population, resources and environment, 2020, 30(3): 1-9.]

中国气候变化的科学新认知

巢清尘¹ 严中伟² 孙颖¹ 江志红³ 廖宏³ 贾根锁² 蔡榕硕⁴

(1. 国家气候中心, 北京 100081; 2. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029;

3. 南京信息工程大学, 江苏 南京 210044; 4. 自然资源部第三海洋研究所, 福建 厦门 361005)

摘要 了解和认识百年来中国气候发生的变化、引起其变化的驱动因素以及未来的可能变化, 可以更好地适应和减缓气候变化。本文综合评估了观测到的中国气候变化事实、中国气候变化的驱动力、中国未来气候变化预估三大方面, 分析了气候变暖的趋势、水循环以及降水和冰川变化、极端天气气候事件变化、生物化学循环、海洋和土地覆盖变化及其气候效应以及未来气候变化的特点和趋势等最新科学进展。在中国百年温度趋势、气候系统多气候指标变化特征、极端天气气候事件中的人类活动作用以及气候系统模拟能力等方面的研究有了新的进展。可以看到中国气候变暖趋势持续、大气二氧化碳等长寿命温室气体浓度继续增长、人为强迫影响了多种气候要素在强度和频率的变化, 中国陆地生态系统的固碳量增加。本文最后提出未来中国气候变化研究需要进一步加强的问题, 包括: 中国气候变化中的城市化效应、气候系统内部变率在年代际变化中的作用、气溶胶-云-降雨相互作用的机理、大范围土地利用变化(如大规模生态恢复工程)的气候效应, 以及云辐射反馈、海洋环流对气候变化的响应与反馈、气候-碳循环反馈等过程对气候模拟不确定的影响等。

关键词 气候变化趋势; 气候变化归因; 气候变化预估; 科学新认知

中图分类号 P467 文献标识码 A 文章编号 1002-2104(2020)03-0001-09 DOI:10.12062/cpre.20200303

气候变化问题是当今人类社会面临的巨大挑战之一, 因此, 国际上开展了大量的科学研究。从2008—2017年, 以“气候变化”为主题发表的全球和中国论文数量快速增长, 全球SCI收录论文数量上升了2.7倍多, 中国SCI收录论文数量上升了9.2倍^[1], 大量的科学新认识推动了气候变化科学及其相关学科的发展, 提高了社会公众对气候变化的科学认知。现有的气候变化科学认知中尚存在不确定性, 这主要与气候系统观测能力、数据的不完整、运用不一致的数据集分析, 以及与年际到年代际变率机理认识的局限有关^[2-3]。随着近些年新的观测数据集的应用和分析方法的完善, 特别是再分析资料的运用, 以及基于气候系统物质、能量和水循环过程的理解和模式模拟能力的发展, 在上述一些问题上已经取得了一些新的科学进展。

中国在气候变化科学认知上也取得了长足的进展。2017年国家启动《中国第四次气候变化评估报告》的编制, 从科学上进一步厘清新认识、新进展, 系统总结中国气候变化科研最新成果, 在中国气候变化的速度、强度, 人类

活动对中国气候变化的影响等方面又有了新的进展, 将为国家制定应对气候变化政策、参与气候变化国际谈判提供更好的科学支撑。本文参考其中的一些结论, 围绕中国气候变化的事实、驱动力因素以及未来预估, 试图从全球视角进行综述。

1 观测到的中国气候变化事实

1.1 温度变化

在全球气候变暖背景下, 百年来中国近地面气温也呈显著上升趋势。由于早年观测资料缺失较多, 且因观测系统更迭、测站迁址等因素, 很难直接与近几十年观测序列相比较, 因而严重影响了对近百年变暖的定量评估。近年来学术界取得的重要进展就是发展了一系列均一化的中国长期逐月气温序列集^[4-5], 以及个别台站(如北京、上海)均一化的长期逐日气温序列^[6-7]。运用国际学术界常用的“气候距平面积加权(CAM)”方法, 估算的1900年以来中国平均气温上升趋势为 $1.56 \pm 0.20 \text{ } ^\circ\text{C}/100\text{a}$, 明显大于

收稿日期: 2020-02-17 修回日期: 2020-03-09

作者简介: 巢清尘, 博士, 研究员, 主要研究方向为气候系统相互作用、灾害风险管理与气候政策。E-mail: chaoqc@cma.gov.cn。

基金项目: 国家重点研发计划“气候变化风险的全球治理与国内应对关键问题研究”(批准号: 2018YFC1509000); 科学技术部《第四次气候变化国家评估报告》编制工作专项; 中英气候变化风险研究项目。

全球大陆平均趋势(1.0 °C/100a)。图1显示了1900年以来中国气温升高趋势在1.3~1.7 °C/100a之间,1960年代以来增暖加速达0.27 °C/10a,反映了上世纪初以来中国气候增暖趋势估算结果的不确定性。此值比《第三次气候变化国家评估报告》给出的百年平均增温0.9~1.52 °C要高^[8]。比较各序列可见,主要差异出现于早期,特别是1940s年代的偏暖程度不一。相比早期研究结果,基于均一化的台站气温资料所得到的中国区域20世纪30—40年代的异常偏暖较小^[4]。根据元数据分析,新中国成立后由于城市化发展,许多台站在1950s前后向郊区迁站,导致此前的早期观测气温记录相对偏高。经过均一化校订后的序列中,1940年代的偏暖记录有所减弱。新的中国区域长期气温序列更客观地反映了区域气候变化的特征^[5],但仍需要从机理上做进一步分析。

1998年以来全球变暖不仅没有停滞,反而略有加速,2014—2018年是有完整气象观测记录以来最暖的5年^[9],特别是全球海洋稳定而持续地变暖,2019再次刷新最暖记录^[10]。对于中国区域,20世纪是过去2000年历史最暖百年之一。中国区域北方增温大于南方,冬春季大于夏秋季,日最低气温增暖趋势更加明显。近几十年中国城市化可能导致一些城市局地增暖趋势较大,但对整体气温变化趋势的影响较小。

1.2 水循环以及降水和冰川变化

根据均一化的中国2319站逐月降水观测资料^[11],中国区域平均年降水量的常年值(1981—2010年)为630 mm。1961年以来,中国年降水总体呈增加趋势,约为4.2 mm/10a。年降水量具有较大的年际波动;1998年达历史最高,超过常年值所代表的历史平均水平80 mm;2012年以来各年降水量均大于历史平均水平。但区域差别明显,中国东北、西北、西藏大部和东南部年降水量呈现较强的增加趋势,由于西北地区降水量基数小以及蒸发量增加,西北地区干旱气候的格局未发生根本改变;而自东北

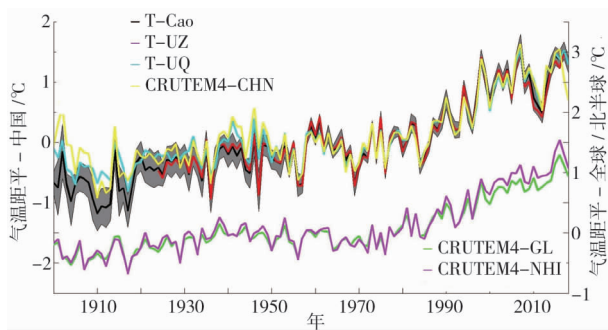


图1 基于均一化的观测资料计算的中国气温序列

注:引自严中伟等^[6]。

南部和华北部分地区到西南一带的年降水量呈现减少趋势。

考虑相对湿度观测的干偏差订正后,发现中国年平均相对湿度自1961年以来没有明显的增减趋势^[12],反映了由于气温升高大气绝对含水量相应增多而相对湿度变化不大的事实。但存在阶段性变化特征:20世纪60年代中期至80年代中期相对湿度偏低,1989—2003年以偏高为主,2004—2014年总体偏低,2015年以来转为偏高^[13]。

1961年以来中国地表水资源量年际变化明显,20世纪90年代中国地表水资源量以偏多为主,2003—2013年总体偏少,2015年以来中国地表水资源量持续偏多。中国十大流域中松花江、长江、珠江、东南诸河和西北内陆河流域地表水资源量总体表现为增加趋势,其中,西北内陆河流域地表水资源量增加的相对速率最大,平均每10年增加3.9%;辽河、海河、黄河、淮河和西南诸河流域则表现为减少趋势,其中西南诸河流域地表水资源量减少的相对速率最大,平均每10年减少3.7%^[14]。

与全球其他参照冰川相比,我国乌鲁木齐河源1号冰川以及境内山地冰川的消融速率相对较小,因为全球参照冰川多为海洋性冰川^[15-16]。近几十年来,中国西部80.8%的冰川呈现退缩状态,其中,玉龙雪山等海洋型冰川的退缩最为显著,其次是大陆型冰川,而极大陆型冰川的退缩相对缓慢^[17]。中国是继俄罗斯、加拿大之后,全球第三大冻土国。20世纪80年代以来,北半球多年冻土面积正快速退缩,总的来说,高海拔多年冻土退化速率快于高纬度多年冻土,青藏高原融化速率最快,其次是阿拉斯加、俄罗斯和加拿大^[18]。

1.3 海洋变化及气候效应

1980年来,中国沿海海平面上升速率为3.3 mm/a,高于同期全球海洋平均水平(见图2)。20世纪90年代末以来,中国近海变暖幅度和速率均高于同期全球海洋平均,东中国海(渤、黄、东海)的升温幅度要高于南中国海^[19-20]。1970s之后,热带太平洋厄尔尼诺信号显著增

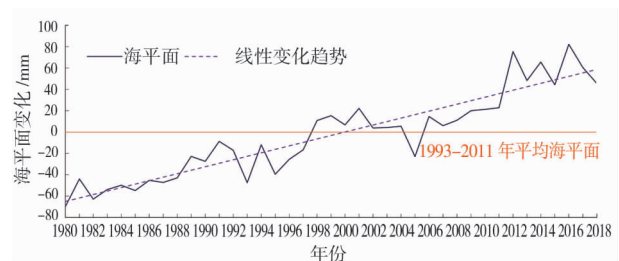


图2 1980—2018年中国沿海海平面变化

注:引自《2018年中国海平面公报》,2019^[19]。

强,且持续时间更持久^[21-24]。1990年之后,中部型厄尔尼诺趋于频发^[25-26],研究表明中部型厄尔尼诺的发展年可能出现夏季长江流域降水偏少、气温偏高,华南降水偏多等气候特点。1970s以来,中国东部及邻近海域出现的超强台风和海洋热浪趋多、趋强^[27-28]。

1.4 极端事件

1961年以来,中国区域极端热天显著增多,热浪频率增大,平均年极端高温升高趋势为 $0.21^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。极端冷天显著减少,冬季寒潮趋于减少,霜冻日数及冰冻日数显著减少,平均年极端低温升高趋势为 $0.51^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ^[29]。中国短历时强降水日数与暴雨日数均呈现出自东南向西北逐渐减少的梯度分布,说明中东部地区大多数暴雨天气过程是包含短历时强降水过程的。短历时强降水极大值区主要位于华南南部、华北南部和黄淮地区,而华南北部至江南地区虽然暴雨频次高,但该区域极端降水强度却小于华南北部和黄淮东部^[30-34]。虽然华北地区的年降水量大多只有江南地区年降水量的1/3左右,出现暴雨事件的频率也低很多,但该区域的极端降水强度却超过江南地区^[35]。极端少雨天气增多,特别是伴随高温热浪而快速发展的“骤旱”事件剧增^[36]。全球变暖可能增加华北平原静稳天气,从而增加冬季强霾天气的频率和持续时间^[37-38]。

2 中国气候变化的驱动力

气候变化的驱动力包括地球气候系统之外的外强迫因子以及气候系统内部因子的相互作用。自然强迫因子包括太阳活动、火山活动和地球轨道参数等。太阳活动的总体影响很小。人为强迫包括两个方面,一是工业化时代人类活动通过化石燃料燃烧等方式增加大气排放温室气体浓度,同时导致大气气溶胶形成,改变自然大气的成分构成,从而影响地球大气辐射收支平衡;二是大范围土地覆盖和土地利用方式变化,会改变下垫面特征,导致地气之间能量、动量和水分传输的变化,进而影响区域尺度气候变化。

2.1 碳和其它生物化学循环

2008—2017年全球化石能源平均每年排放344亿t CO₂,土地利用变化平均每年排放53亿CO₂^[39]。近40年人类活动排放CO₂的30%和25%分别被陆地和海洋生态系统吸收,剩余的45%留在大气中。导致全球大气CO₂等长寿命温室气体浓度仍在持续增长。由于中国自身发展的需要,中国能源消费量与碳排放量快速增长,从1994—2012年中国CO₂排放量增加了约2.5倍^[40]。2018年,全球大气CO₂年平均本底浓度为 407.8 ± 0.1 ppm。中国瓦里关全球本底站大气CO₂年平均本底浓度为 409.4 ± 0.3 ppm,略高于全球平均,与北半球平均值同期观测结果基本一致。全球大气CH₄和NO₂年平均本底浓度也均呈上升趋势,中国瓦里关上述气体均略高于全球平均,与北半球同期观测平均值结果大体相当(见表1)。

中国气溶胶空间分布呈北方浓度大于南方,冬季浓度最高,夏季浓度最低。2012—2013年40个地面观测站的结果显示全国城市地区大气PM_{2.5}主要成分为有机物(26%)、硫酸盐(17.7%)、矿物沙尘(11.8%)、硝酸盐(9.8%)、铵盐(6.6%)、元素碳(6.0%)^[41]。气溶胶对环流、降雨、东亚季风等均有显著影响,但其气候效应还有很大的不确定性。IPCC第五次耦合模式比较计划(CMIP5)模拟显示,东亚地区气溶胶在1985—2005年间的增加导致东亚地区地表温度减少大约 1.05°C ^[42],不同模式、不同气溶胶组分对不同区域的气候影响存在差异。

2013年以来,随着国家《大气污染防治行动计划》的实施,大多数城市的PM_{2.5}年均浓度呈下降趋势,达标城市比例有所提高(见图3)。然而,近年来中国东部地区地表臭氧浓度呈增加趋势,研究发现华北平原地区夏季臭氧增加的重要因素是PM_{2.5}浓度降低减少了气溶胶对HO₂自由基的非均相吸收,进而加剧了臭氧的生成^[43]。模式评估显示,2012—2017年我国气溶胶浓度的降低以及臭氧浓度的上升在中国东部($20 \sim 45^{\circ}\text{N}$, $105 \sim 122.5^{\circ}\text{E}$)对流层

表1 2018年全球和瓦里关站三种主要长寿命气体(CO₂、CH₄、N₂O)的年平均浓度、过去1年的增量和过去10年的年平均增量

	CO ₂		CH ₄		NO ₂	
	全球	瓦里关	全球	瓦里关	全球	瓦里关
2018年年平均浓度	407.8 ± 0.1 ppm	409.4 ± 0.3 ppm	$1\ 869 \pm 2$ ppb	$1\ 923 \pm 2$ ppb	331.1 ± 0.1 ppb	331.4 ± 0.1 ppb
2018年相对1750年的增长率	147%		259%		123%	
2018年相对2017年的绝对增量	2.3 ppm	2.4 ppm	10 ppb	12 ppb	1.2 ppb	1.1 ppb
2018年相对2017年的百分比增量	0.57%	0.59%	0.54%	0.57%	0.36%	0.33%
过去10年的年平均绝对增量	2.26 ppm/a	2.32 ppm/a	7.1 ppb/a	7.7 ppb/a	0.95 ppb/a	0.94 ppb/a

顶产生 1.26 W/m^2 的正辐射强迫,有增暖的影响^[44]。

2.2 土地覆盖变化的气候效应

20世纪80年代以来,中国土地覆盖变化总体上表现为城市建设用地持续扩张,林地面积增加,耕地、草地、荒漠和湿地面积减小。中国陆地生态系统的固碳量呈增加趋势,森林固碳量增加最为显著。中国陆地生态系统总碳储量为 $79.24 \pm 2.42 \text{ PgC}$,其中森林碳储量最大,占总碳储量的 38.9%,草地碳储量占 32.1%,农田碳储量占 20.6%^[45-46]。中国陆地生态系统固碳量的增加得益于气候变化以及中国森林和农业管理措施的共同作用^[47-49]。2000—2010年期间,中国的六大生态恢复工程直接增加了约 74 TgC/a 的固碳量^[48],而采取的农田秸秆还田等措施增加了农田 20 TgC/a 的碳汇^[49]。中国陆地生态系统是显著的碳汇,且呈增加趋势,在全球自然固碳量中起到重要作用。大规模生态恢复工程的实施,对改善生态环境和减缓气候变化带来了许多积极的影响。

2.3 中国气候和极端事件变化的归因

《中国第三次气候变化评估报告》在人类活动对20世纪中国区域变暖的贡献上开展了一些评估,但尚缺乏严谨的研究结论。近年更多研究表明,人为强迫影响了1960s以来中国平均气温变化,对同期以来极端温度强度、频率和持续时间也造成影响。1961—2013年间观测到的中国气温增加了 1.44°C ($1.22 \sim 1.66^\circ\text{C}$),利用CMIP5气候模式对气温变化的归因研究表明,中国变暖的主要贡献因子为温室气体等人类活动,包括 CO_2 等在内的温室气体增加了中国的气温,其贡献为 1.24°C ($0.75 \sim 1.76^\circ\text{C}$),而其他包括气溶胶在内的人为因子主要是冷却作用,降温贡献为 0.43°C ($0.24 \sim 0.63^\circ\text{C}$),城市化因子的贡献为 0.49°C ($0.12 \sim 0.86^\circ\text{C}$)^[50]。其他的研究对不同时段中国气温变化的分析均表明温室气体等人类活动的贡献是最主要的,但是城市化对中国区域气温变化的贡献仍然具有争议,不

同的研究利用不同的资料和方法得到的结论存在差异。在中国西部,人类活动导致中国西北地区温度在1958—2012年间增加了 1.37°C ,其贡献高达 92%^[51]。大气中温室气体浓度的增加是目前观测到的中国极端温度增加的主要原因,土地利用变化也是夏季日最高气温上升的重要驱动因子^[52-53]。在极端事件的影响方面,人类活动很可能增加了中国高温热浪的发生概率,同时可能减少了低温寒潮的发生概率。可能使得夏日日数和热带夜日数明显增加,霜冻日数和冰冻日数显著减少^[54-55]。但1961—2012年中国整体观测降水序列中尚无法检测到人类活动对极端降水趋势的显著影响^[56],人类活动对降水长期变化的归因研究还有较大不确定性,仍需进一步深入探索。

3 中国未来气候变化预估

3.1 气候系统模式评估

气候系统模式或地球系统模式是建立在超级计算机系统上,综合考虑地球系统不同圈层的性状及其相互关系的一个大型软件系统,是理解全球气候变化不可或缺和最主要的工具^[57-58]。我国大陆有四个单位的6个模式参与CMIP5试验比较,有六个单位的10个模式参与了CMIP6试验比较(见表2)^[59-60]。

比较CMIP5和CMIP6多模式集合对中国区域的降水模拟,可以看到都能模拟出中国降水由东南向西北逐渐递减的特征,但都高估了青藏高原及其南侧的降水量,低估了中国东部长江流域的降水量。CMIP6多模式集合在新疆、四川盆地和长江流域的降水模拟偏差比CMIP5多模式集合有所减少,但对青藏高原及其南侧的降水偏差并无改善。CMIP5和CMIP6多模式集合对东亚夏季风气候平均态的模拟有一定能力,但在强度上略有不同。CMIP6多模式集合模拟的孟加拉湾西风气流偏强,而CMIP5则偏弱,二者都低估了南海的西南气流。CMIP6多模式集合模拟的中国西南地区风速略偏强。相对而言,CMIP6多模式集合改进较大的是副热带高压,其位置和强度都比CMIP5多模式集合更加接近观测。

3.2 未来变化预估

利用CMIP5多模式看到,与历史时期(1986—2005年)相比,在RCP8.5温室气体排放情景下,到21世纪前期(2021—2040),中期(2041—2060)和后期(2081—2100),中国年平均气温将分别升温 1.43°C 、 2.59°C 和 5.31°C ^[61],年平均降水将分别增加约 2%、6% 和 12%^[62-63]。

与历史时期(1986—2005年)相比,在RCP4.5和RCP8.5温室气体排放情景下,本世纪初期(2016—2035年)中国区域平均极端最高温度大约增加 1°C ,中期(2046—2065年)增加 $1^\circ\text{C} \sim 2.5^\circ\text{C}$,末期(2081—2100年)

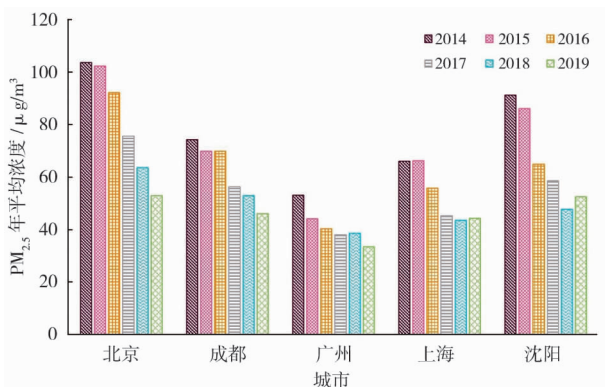


图3 北京、成都、广州、上海和沈阳5个城市PM_{2.5}年均变化趋势



表 2 中国参与 CMIP6 的耦合模式情况

单位	模式名称	分量模式名称	模式分辨率	
			大气模式	海洋模式
国家气候中心	BCC-CSM2-MR	大气:BCC-AGCM3-MR	T106(近 110 km)	1/3° in 30S ~ 30N
		陆面:BCC-AVIM2.0	垂直 46 层	1/3 - 1° in 30 ~ 60 N/S
		海洋:MOM4-L40v2	模式层顶:	1° in 60 ~ 90N/S
	BCC-CSM2-HR	海冰:SISv2	1.459 hPa	垂直 40 层
		大气:BCC-AGCM3-HR	T266(近 45 km)	1/3° in 30S ~ 30N
		陆面:BCC-AVIM2.0	垂直 56 层	1/3 - 1° in 30 ~ 60 N/S
BCC-ESM1	海洋:MOM4-L40v2	模式层顶:	1° in 60 ~ 90N/S	
	海冰:SISv2	0.092 hPa	垂直 40 层	
	大气:BCC-AGCM3-Chem	T42(近 280 km)	1/3° in 30S ~ 30N	
	陆面:BCC-AVIM2.0	垂直 26 层	1/3 - 1° in 30 ~ 60 N/S	
自然资源部 第一海洋研究所	FIO-ESM v2.0	海洋:MOM4-L40v2	模式层顶:	1° in 60 ~ 90N/S
		海冰:SISv2	2.197 hPa	垂直 40 层
		大气:CAM5		
		陆面:CLM4.0	0.9° × 1.25°	1.1° × 0.27° ~ 0.54°
		海洋:POP2	垂直 30 层	垂直 60 层
清华大学	CI-ESM v1.1	海冰:CICE4.0		
		海冰:CICE4.0		
		海冰:CICE4.0		
		耦合器:C-Coupler 2		
中国科学院大气 物理研究所	CAS-ESM	大气:改进的 CAM5		
		陆面:CLM4.0		全球 0.5° 的共形映 射网格,
		海洋:采用新网格的 POP2	ne30,1°	垂直 60 层
		海冰:CICE4.1		
中国科学院大气 物理研究所	CAS-FGOALS-f3	耦合器:C-Coupler 2		
		大气:IAP AGCM4		
		陆面:CoLM	1° × 1°	1° × 1°
		海洋:LICOM2		垂直 30 层
中国科学院大气 物理研究所	CAS-FGOALS-g3	海冰:CICE4.0		
		大气:FAMIL3		
		陆面:CLM4.0	100 km 或 25 km	三极网格: 100 km 或 10 km
		海洋:LICOM3		垂直 30 层或 50 层
南京信息 工程大学	NUIST-ESM3	海冰:CICE4.0		
		大气:GAMIL3		
		陆面:CLM4.0	2° × 2°	三极网格:100 km
		海洋:LICOM3		
中国气象 科学研究院	CAS-ESM1-0	海冰:CICE4.0		
		大气:ECHAM v6.3	T63(近 180 km)	1° × 1° 热带加密
		陆面:JABACH	垂直 47 层	垂直 46 层
		海洋:NEMO v3.4	模式层顶: 0.01 hPa	
中国气象 科学研究院	CAS-ESM1-0	海冰:CICE v4.1		
		大气:ECHAM v5.4	T106(近 110 km)	1/3° in 10S ~ 10N
		陆面:CoLM	垂直 31 层	1/3 - 1° in 10 ~ 30 N/S
		海洋:MOM4	模式层顶: 10 hPa	1° in 30 ~ 90N/S
中国气象 科学研究院	CAS-ESM1-0	海冰:SIS		垂直 50 层

分别增加 $2.6 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 和 $5.8 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$, 其中东部地区增幅最大, 在 RCP8.5 温室气体排放情景下超过 6°C ^[64]。21 世纪初期和中期中国区域平均极端最低温度分别增加 1.2°C 和 2.0°C , 到 21 世纪末期, 增加幅度为 $2.8^{\circ}\text{C} \pm 0.9^{\circ}\text{C}$ 和 $6.3^{\circ}\text{C} \pm 0.9^{\circ}\text{C}$, 其中东北、西北北部和西南的南部增加幅度最大, RCP8.5 下增温超过 7°C 。RCP8.5 温室气体排放情景下, 中国未来每年气温高于 35°C 的天数约多出 25 d, 热浪发生频率约高出 8 倍 (见图 4)。未来平均高温热浪发生频率、热浪持续时间以及热浪天数增加趋势分别为 0.39 次/10a、 1.11 d/10a 和 3.28 d/10a。到 21 世纪末期, 区域平均的持续暖期增加 136 d, 区域平均霜冻日数将减少 43 d, 寒潮日数大概减少 $3 \sim 4$ d^[65]。最新一项研究还

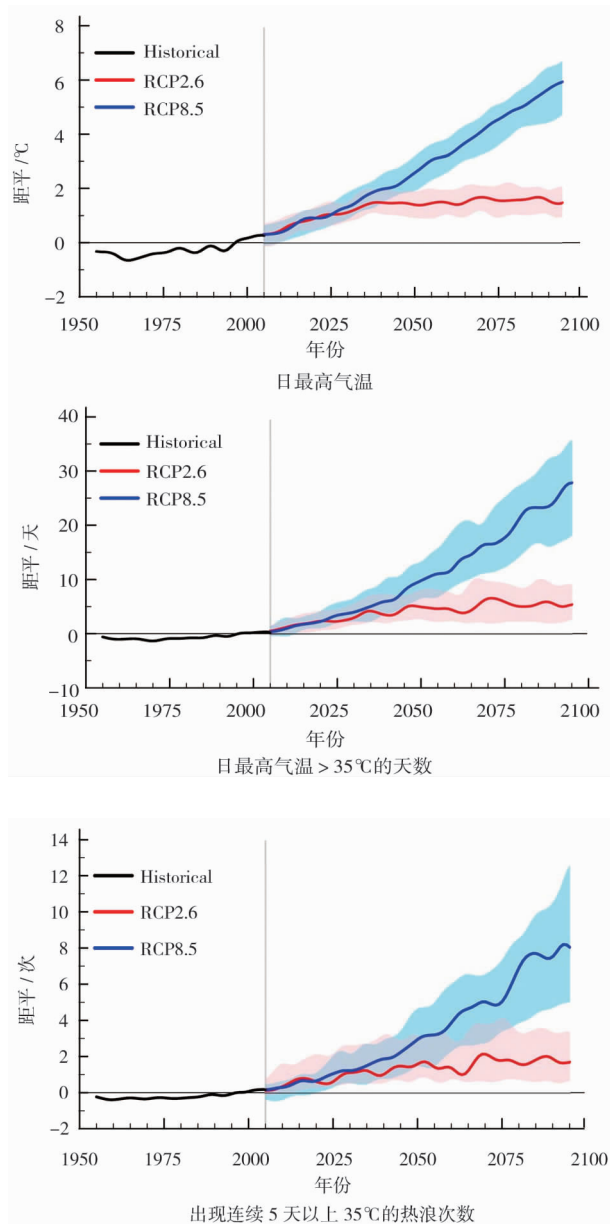


图 4 中国极端热天气变化趋势

注: 所有距平均均为相对于 1986—2005 年平均值。

表明: 复合型热浪 (昼夜都持续出现异常高温的极端天气) 将从 2030 年代开始成为北半球各地最普遍发生的一类极端天气现象, 中国东部尤甚^[66]。夏季风区域的暴雨可能随进一步全球变暖而有所增加^[67]。

基于多组 CMIP5 模式输出的动力海平面和比容海平面数据, 并考虑格陵兰岛和南极冰盖、冰川融化以及陆地水注入等海水质量变化对区域海平面变化的贡献, 结合中国沿海代表性较好的 7 个验潮站资料以及卫星高度计数据, 通过综合检验与评估, 选取置信度达到 95% 的 9 组模式, 结果表明, 21 世纪中国近海海平面将继续上升, 并且具有显著的区域性特征, 同时海平面变化会引起中国沿海风暴潮、潮汐特征和极值水位的明显变化。相对于 1986—2005 年平均海平面, 在 RCP4.5 温室气体排放情景下, 到 2100 年东海海平面上升 $33 \sim 84$ cm、南海海平面上升 $34 \sim 79$ cm; 在 RCP8.5 温室气体排放情景下, 东海海平面上升 $47 \sim 122$ cm、南海海平面上升 $49 \sim 109$ cm^[68] (见图 5)。未来中国近海盐度、环流、强台风和海洋热浪的变化, 尤其是海洋的碳源汇、酸化和溶解氧的观测和相关研究仍需加强。

4 结 论

本文主要是在观测到的中国气候变化事实、气候变化的驱动因素以及气候变化预估三个方面进行了综述, 可以看到中国气候不断趋暖, 人类活动是其变化的主要驱动因素。与五年前相比, 在中国百年温度趋势、气候系统多气候指标变化特征、极端天气气候事件中的人类活动作用以及气候系统模拟能力方面的认识都有了新的进展。但是, 一些研究, 例如, 中国气候变化中的城市化效应、气候系统内部变率在年代际变化中的作用、气溶胶—云—降雨相互作用的机理、大范围土地利用变化 (如大规模生态恢复工程) 的气候效应, 以及云辐射反馈、海洋环流对气候变化的响应与反馈、气候—碳循环反馈等过程对气候模拟不确定

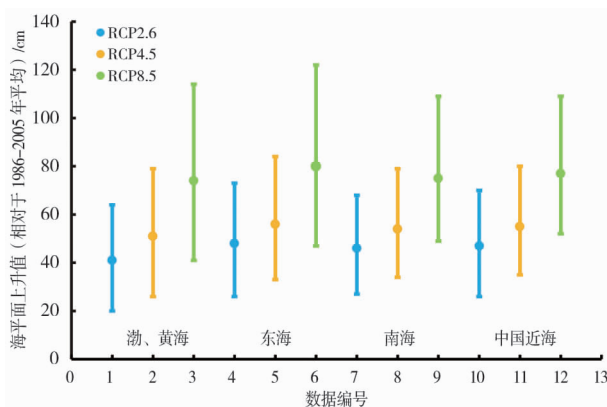


图 5 中国各海区 2100 年海平面变化预估

注: 引自王慧等^[68]。

的影响等方面仍需要进一步加强。气候变化研究涉及多圈层、多尺度、多要素的相互作用,以及全球和区域相互反馈,需要多部门、多领域专家加强合作,在观测、资料、机理、模拟上形成合力,产出更有影响力的研究成果。

(编辑:刘呈庆)

参考文献

- [1] 陈迎,巢清尘,胡国权,等. 十年气候前行路,历经风雨见彩虹 [M]//谢伏瞻,刘雅鸣. 应对气候变化报告(2018)——聚首卡托维兹. 北京:社会科学文献出版社,2018:1-26.
- [2] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis [R]//STOCKER T F, QIN D, PLATTNER G K, et al. Contribution of Working Group I to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013: 1535.
- [3] IPCC. Scoping of the IPCC sixth assessment report (AR6), background, cross cutting issues and the AR6 synthesis [N/OL]. 2017-09-10 [2017-10-04]. http://cache1.nmic.cn/files/52160000072B15C/ipcc_ch/apps/eventmanager/documents/47/040820171122-Doc.%206%20-%20SYR_Scoping.pdf.
- [4] CAO L J, YAN Z W, ZHAO P M, et al. Climatic warming in China during 1901-2015 based on an extended dataset of instrumental temperature records [J]. Environmental research letters, 2017, 5(12):22-27.
- [5] LI Q, ZHANG L, XU W, et al. Comparisons of time series of annual mean surface air temperature for China since the 1900s: observations, model simulations, and extended reanalysis [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2017, 98(4):699-711.
- [6] 严中伟,丁一汇,翟盘茂,等. 近百年中国气候变暖趋势之再评估 [J]. 气象学报,2020. DOI:10.11676/qxb2020.028.
- [7] QIAN C, CAO L J. Linear trends in mean and extreme temperature in Xiongan New Area, China [J]. Atmospheric and oceanic science letters, 2018, 11(3):246-254.
- [8] 《中国第三次气候变化评估报告》编写委员会. 中国第三次气候变化评估报告 [M]. 北京:科学出版社,2015.
- [9] World Meteorological Organization (WMO). WMO statement on the state of the global climate in 2018 [R]. Geneva: WMO, 2018.
- [10] CHENG L, ABRAHAM J, ZHU J. et al. Record-setting ocean warmth continued in 2019 [J]. Advances in atmospheric sciences, 2020, 37(2):137-142.
- [11] 杨朔,李庆祥. 中国降水序列均一性分析方法及数据集更新完善 [J]. 气候变化研究进展,2014,10(4):276-281.
- [12] 朱亚妮,曹丽娟,唐国利,等. 中国地面相对湿度非均一性检验及订正 [J]. 气候变化研究进展,2015,11(6):379-386.
- [13] 中国气象局气候变化中心. 中国气候变化蓝皮书(2019) [R]. 北京:中国气象局气候变化中心,2019.
- [14] 叶柏生,丁永建,焦克勤,等. 我国寒区径流对气候变暖的响应 [J]. 第四纪研究,2012,32(1):103-110.
- [15] YAO T, XUE Y, CHEN D, et al. Recent Third Pole's rapid warming accompanies cryospheric melt and water cycle intensification and interactions between monsoon and environment: multi-disciplinary approach with observation, modeling and analysis [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2018, 100(3):423-444.
- [16] 李忠勤. 山地冰川物质平衡和动力过程模拟 [M]. 北京:科学出版社,2019.
- [17] 姚檀栋,秦大河,沈永平,等. 青藏高原冰冻圈变化及其对区域水循环和生态条件的影响 [J]. 自然杂志,2013,35(3):179-186.
- [18] GUO D, WANG H, WANG A. Sensitivity of historical simulation of the permafrost to different atmospheric forcing datasets from 1979 to 2009 [J]. Journal of geophysical research atmospheres, 2017, 122(22):12269-12284.
- [19] 国家海洋信息中心. 2018年中国海平面公报 [R]. 天津:国家海洋信息中心,2018.
- [20] CAI R, TAN H, KONROYIANNIS H. Robust surface warming in offshore China seas and its relationship to the East Asian monsoon wind field and ocean forcing on inter-decadal time scales [J]. Journal of climate, 2017, 30(22):8987-9004.
- [21] POWER S, DELAGE F, CHUNG C, et al. Robust twenty-first-century projections of El Niño and related precipitation variability [J]. Nature, 2013, 502:541-545.
- [22] CAI W J, BORLACE S, LENGAI GNE M, et al. Increasing frequency of extreme El Niño events due to greenhouse warming [J]. Nature climate change, 2014, 4:111-116.
- [23] HUANG P, YING J. A multimodel ensemble pattern regression method to correct the tropical Pacific SST change patterns under global warming [J]. Journal of climate, 2015, 28:4706-4723.
- [24] LEE T, MCPHADEN M J. Increasing intensity of El Niño in the central-equatorial Pacific [J]. Geophysical research letters, 2010, 37: L14603. DOI:10.1029/2010GL044007.
- [25] PASCOLINI-CAMPBELL M, ZANCHETTIN D, BOTHE O, et al. Toward a record of central Pacific El Niño events since 1880 [J]. Theoretical and applied climatology, 2015, 119(12):379-389.
- [26] XU K, TAM C Y, ZHU C, et al. CMIP5 projections of two types of El Niño and their related tropical precipitation in the 21st century [J]. Journal of climate, 2017, 30:849-864.
- [27] MEI W, XIE S P. Intensification of landfalling typhoons over the northwest Pacific since the late 1970s [J]. Nature geoscience. 2016, 9:753-757. DOI: 10.1038/ngeo2792.
- [28] 李琰,范文静,骆敬新,等. 2017年中国近海海温和气温气候特征分析 [J]. 海洋通报,2018(3):296-302.
- [29] YIN H, SUN Y. Characteristics of extreme temperature and precipitation in China in 2017 based on ETCCDI indices [J]. Advances in climate change research, 2018, 9(4):218-226.
- [30] CHEN J, ZHENG Y G, ZHANG X L, et al. Distribution and

- diurnal variation of warm-season short-duration heavy rainfall in relation to the MCSs in China[J]. *Acta meteorologica sinica*, 2013, 27: 868 - 888.
- [31] 宇如聪, 原韦华, 李建. 降水过程的不对称性[J]. *科学通报*, 2013, 58: 1385 - 1392.
- [32] 李建, 宇如聪, 孙激. 中国大陆地区小时极端降水阈值的计算与分析[J]. *暴雨灾害*, 2013, 32(1): 11 - 16.
- [33] 李建, 宇如聪, 孙激. 从小时尺度考察中国中东部极端降水的持续性和季节特征[J]. *气象学报*, 2013, 71(4): 652 - 659.
- [34] ZHENG Y G, XUE M, LI B, et al. Spatial characteristics of extreme rainfall over China with hourly through 24-hour accumulation periods based on national-level hourly rain gauge data [J]. *Advances in atmospheric sciences*, 2016, 33(11): 1218 - 1232.
- [35] 孙继松. 短时强降水和暴雨的区别和联系[J]. *暴雨灾害*, 2017, 36(6): 498 - 506.
- [36] WANG L, YUAN X, XIE Z, et al. Increasing flash droughts over China during the recent global warming hiatus [J]. *Scientific reports*, 2016, 6: 305 - 371.
- [37] CHEN H P, WANG H J. Haze days in north China and the associated atmospheric circulations based on daily visibility data from 1960 to 2012 [J]. *Geophysical research*, 2015, 20(5): 895 - 909.
- [38] PEI L, YAN Z. Diminishing clear winter skies in Beijing towards a possible future[J]. *Environmental research letters*, 2018. DOI: 10.1088/1748-9326/aaf032.
- [39] LE QUÉRÉ C, ANDREW R M, FRIEDLINGSTEIN P, et al. Global carbon budget 2018[J]. *Earth system science data*, 2018, 10(4): 2141 - 2194.
- [40] 中华人民共和国. 中华人民共和国气候变化第一次两年更新报告[R/OL]. 2018 - 12. <http://www.cchina.org.cn/archiver/ccchinacn/UpFile/Files/Default/20191031141943031420.pdf>.
- [41] LIU Z, GAO W, YU Y et al. Characteristics of PM_{2.5} mass concentrations and chemical species in urban and background areas of China; emerging results from the CARE-China Network [J]. *Atmospheric chemistry and physics*, 2018, 18: 8849 - 8871.
- [42] LIU C, HU H B, ZHANG Y, et al. The direct effects of aerosols and decadal variation of global sea surface temperature on the East Asian summer precipitation in CAM3.0 [J]. *Journal of tropical meteorology*, 2017, 23(2): 217 - 228.
- [43] LI K, JACOB D J, LIAO H, et al. Anthropogenic drivers of 2013 - 2017 trends in summer surface ozone in China [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 116(2): 422 - 427.
- [44] DANG R, LIAO H. Radiative forcing and health impact of aerosols and ozone in China as the consequence of clean air actions over 2012 - 2017 [J]. *Geophysical research letters*, 2019, 46: 12511 - 12519.
- [45] FANG J, YU G, LIU L, et al. Climate change, human impacts, and carbon sequestration in China [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(16): 4015 - 4020.
- [46] TANG X, ZHAO X, BAI Y, et al. Carbon pools in China's terrestrial ecosystems: new estimates based on an intensive field survey [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(16): 4021 - 4026.
- [47] FANG J, GUO Z, HU H, et al. Forest biomass carbon sinks in East Asia, with special reference to the relative contributions of forest expansion and forest growth [J]. *Global change biology*, 2014, 20(6): 2019 - 2030.
- [48] LU F, HU H F, SUN W, et al. Effects of national ecological restoration projects on carbon sequestration in China from 2001 to 2010 [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(16): 4039 - 4044.
- [49] ZHAO Y, WANG M, ZHANG X, et al. Economics- and policy-driven organic carbon input enhancement dominates soil organic carbon accumulation in Chinese croplands [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(16): 4045 - 4050.
- [50] SUN Y, ZHANG X, REN G, et al. Contribution of urbanization to warming in China [J]. *Nature climate change*, 2016, 6: 706 - 709.
- [51] LI C, ZHAO T, YING K. Effects of anthropogenic aerosols on temperature changes in China during the twentieth century based on CMIP5 models [J]. *Theoretical and applied climatology*, 2016, 125: 529 - 540.
- [52] WEN H Q, ZHANG X, XU Y, et al. Detecting human influence on extreme temperatures in China [J]. *Geophysical research letters*, 2013, 40: 1171 - 1176.
- [53] YIN H, SUN Y, WAN H, et al. Detection of anthropogenic influence on the intensity of extreme temperatures in China [J]. *International journal of climatology*, 2016, 37: 1229 - 1237.
- [54] LU C H, SUN Y, ZHANG X B. Multimodel detection and attribution of changes in warm and cold spell durations [J]. *Environmental research letters*, 2018, 13: 074013. DOI: 10.1088/1748-9326/aacb3e.
- [55] WANG J, TETT S F B, YAN Z W, et al. Have human activities changed the frequencies of absolute extreme temperatures in eastern China? [J]. *Environmental research letters*, 2018, 13: 014012. DOI: 10.1088/1748-9326/aa9404.
- [56] LI W, JIANG Z, ZHANG X, et al. On the emergence of anthropogenic signal in extreme precipitation change over China [J]. *Geophysical research letters*, 2018, 45(17): 9179 - 9185.
- [57] 王斌, 周天军, 俞永强, 等. 地球系统模式发展展望 [J]. *气象学报*, 2008, 66(6): 857 - 869.
- [58] 王会军, 朱江, 浦一芬. 地球系统科学模拟有关重大问题 [J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2014(10): 1116 - 1126.
- [59] WU T, LU Y, FANG Y, et al. The Beijing Climate Center Climate System Model (BCC-CSM): the main progress from CMIP5 to

- CMIP6[J]. *Geoscientific model development*, 2019,12(4): 1573 – 1600.
- [60]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[J]. *气候变化研究进展*, 2019,15(5):445 – 456.
- [61]郑俊岭, 江志红, 马婷婷. 基于贝叶斯模型的中国未来气温变化预估及不确定性分析[J]. *气象学报*,2016,74(4):583 – 597.
- [62]JIANG Z, LI W, XU J, et al. Extreme precipitation indices over China in CMIP5 Models. Part I: model evaluation[J]. *Journal of climate*, 2015, 28: 8603 – 8619.
- [63]LI W, JIANG Z, XU J, et al. Extreme precipitation indices over China in CMIP5 models. Part II: probabilistic projection [J]. *Journal of climate*, 2016,29(24):8989 – 9004.
- [64]XU Y, WU J, SHI Y, et al. Change in extreme climate events over China based on CMIP5 [J]. *Atmospheric and oceanic science letters*, 2015,8(4):185 – 192.
- [65]ZHOU B, WEN Q, XU Y, et al. Projected changes in temperature and precipitation extremes in China by the CMIP5 multimodel ensembles[J]. *Journal of climate*, 2014,27: 6591 – 6611.
- [66]WANG J, CHEN Y, TETT S F. B, et al. Anthropogenically-driven increases in the risks of summertime compound hot extremes[J]. *Nature communications*, 2020, 11: 528. DOI: 10.1038/s41467-019-14233-8.
- [67]ZHANG W, ZHOU T, ZOU L, et al. Reduced exposure to extreme precipitation from 0.5 °C less warming in global land monsoon regions[J]. *Nature communications*, 2018,9: 3153. DOI: 10.1038/s41467-018-05633-3.
- [68]王慧,刘秋林,李欢,等. 海平面变化研究进展[J]. *海洋信息*, 2018,33(3):19 – 25.

A recent scientific understanding of climate change in China

CHAO Qing-chen¹ YAN Zhong-wei² SUN Ying¹ JIANG Zhi-hong³
LIAO Hong³ JIA Gen-suo² CAI Rong-shuo

(1. National Climate Center, Beijing 100081, China; 2. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3. Nanjing University of Information Sciences & Technology (NANJING), Nanjing Jiangsu 210044, China; 4. Third Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources(XIAMEN), Xiamen Fujian 361005, China)

Abstract Understanding China's climate change over the past century and the drivers of the change and its future trend, we can better adapt to and mitigate climate change. This paper comprehensively assessed three aspects, namely, the observed climate change in China, its driving forces and future projection. Also analyzed in this study were aspects such as climate warming, water cycle and changes in precipitation patterns and glacial features, changes of extreme climate events, biochemical circulation, sea and land cover changes and their impact on climate effect, as well as future climate change. New advances have been made in the research of the temperature trend in the past 100 years in China, the changing characteristics of multiple climate indicators in the climate system, the role of human activities in extreme weather and climate events, and the simulation capability of the climate system. It can be seen that the trend of climate warming in China continues, the concentration of long-lived greenhouse gases such as carbon dioxide continues to increase, anthropogenic forcings have affected the intensity and frequency of various climate variables, and carbon sequestration in China's terrestrial ecosystems is increasing. Finally, the paper puts forward some suggestions to be further discussed in future research, including China's urbanization climate effect, the role of internal variability in the decadal change, aerosol-cloud-rainfall interaction mechanism, the climate effect of changes in wide-range land use, such as large-scale ecological restoration project, as well as the uncertain impact on climate simulation by cloud radiation feedback, response and feedback of ocean circulation on climate change, and carbon cycle feedback on climate, etc.

Key words climate change trend; detection and attribution; projection; recent understanding