科学通报 2016 年 第 61 卷 第 10 期: 1029 ~ 1041
专题: 解读《第三次气候变化国家评估报告》 评 述
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

近百年中国气候变化科学问题的新认识

丁一汇[①*], 王会军[②]

① 中国气象局国家气候中心, 北京 100081;
② 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029
* 联系人, E-mail: dingyh@cma.gov.cn

2015-06-11 收稿, 2015-08-12 修回, 2015-08-13 接受, 2015-11-25 网络版发表
国家科技支撑计划(2012BAC19B11)资助

摘要 全球和中国的气候变化问题日益受到各国政府、科技界和公众的关注. 其中科学问题作为气候变化影响和对策的科学基础与支撑, 得到了广泛而深入的研究, 无论在国际上还是在中国都取得了重大进展. 本文从全球的视野对与中国气候变化有关的6个方面的重要科学进展和新认知作了概述. 它们包括: (1) 近百年中国区域地表气温和大气平均气温的变化特征; (2) 中国地区的水循环与区域降水变化; (3) 亚洲季风的长期变化与原因; (4) 海洋在近百年中国气候变化中的作用; (5) 中国气候变化的原因; (6) 全球与中国气候变化的预估和检验. 最后, 本文对未来中国气候变化研究需要加强的重点科学问题也提出了研究建议.

关键词 气候变化, 亚洲季风, 气候变化归因, 全球气候变暖趋缓, 气候变化预估

全球气候变化问题日益引起各国政府、科技界和公众的关注. 近几十年来气候变化基本事实和科学成因等方面的研究不断深入和扩展, 并促进了跨学科的地球系统科学的快速发展. 尤其是自1988年以来的20多年间, 政府间气候变化专门委员会(IPCC)组织编写的5次气候变化评估报告在推动气候变化科学本身的深入发展与扩大政府和公众对气候变化的科学认知上做出重大贡献[1]. 5次评估报告的结果表明, 现代气候变化的基本事实和基本认知得到了大量观测事实、理论分析和气候系统模式数值模拟的一致支持, 至少在5个方面取得了相当高度的共识[2], 这包括: (1) 地球系统多种观测数据表明地表和对流层大气的温度明显升高, 近百年全球气候在显著变暖; (2) 全球气候变化是自然因素和人类活动共同作用的结果, 但20世纪后半叶以来, 人类活动是全球变暖的主因; (3) 预计21世纪全球将持续变暖, 气候极端事件的频率、持续时间和范围将增加; (4) 气候变化对自然系统和社会系统都产生了重要影响, 未来的影响利弊共存. 但随着增温量值和速率的明显增加, 负面影响将可能加深加重, 给人类社会的可持续发展和生存环境带来更大的风险, 因而, 2℃阈值问题作为全球进行减排行动的第一个量化约束指标日益受到各国政府和科技界的重视和关注; (5) 气候变化科学是典型的发展中学科, 目前我们对复杂的气候系统的认知水平有限, 一些定量的估算和结论有不确定性, 并且将来还会不断有新的科学问题出现, 近15年时段内全球气候变暖趋缓或停顿现象就是一个新的广受关注的问题.

中国科学家在气候变化领域进行了长期的研究, 并取得了丰硕的研究成果; 也形成了一支较强的科技队伍. 如同IPCC和其他国家一样, 中国也迫切需要一部权威的中国气候变化评估报告, 为制定应对气候变化的国家战略与对策以及指导气候变化的科学研究和技术创新提供科学依据. 为此, 从2002年开始, 由科技部、中国气象局、中国科学院等多个部委共同组织对中国的气候变化问题进行了3次全面地评

引用格式: 丁一汇, 王会军. 近百年中国气候变化科学问题的新认识. 科学通报, 2016, 61: 1029–1041
Ding Y H, Wang H J. Newly acquired knowledge on the scientific issues related to climate change over the recent 100 years in China (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 1029–1041, doi: 10.1360/N972015-00638

© 2015《中国科学》杂志社

估. 前两次报告已分别于2007和2011年出版[3,4]. 2015年11月正式出版的《第三次气候变化国家评估报告》主要结论已在2014年12月的利马COP20气候公约大会上对外宣布. 《第三次气候变化国家评估报告》的科学部分基于最新的观测资料和气候系统模式方面的相关科学研究成果, 全面而深入地评估了中国气候变化的特征、原因和未来变化. 本文将参考其中的一些主要成果并从全球气候变化的视野对下面6个问题进行综述.

1 近百年中国区域地表气温

图1是1873~2012年中国区域器测地表气温(SAT)年平均距平变化序列, 其中WYG序列和TD序列是前两次评估报告[3,4]中给出的两个序列. T13序列是这次评估报告新增加的序列[5]. 《第二次气候变化国家评估报告》中还曾给出LYT, TR和CRU的曲线. 由于计算1950年之前的日平均温度方法不同, 对于过去5条曲线得到的近百年增温趋势有明显的差异(表1)[6], 而对于1951~2007年的56年, 由于所用的台站数据明显增加(由解放前不足100个到这时期的730个), 可信度更高, 所得到的SAT变化趋势为0.23 ℃/10 a增温量为1.40 ℃.

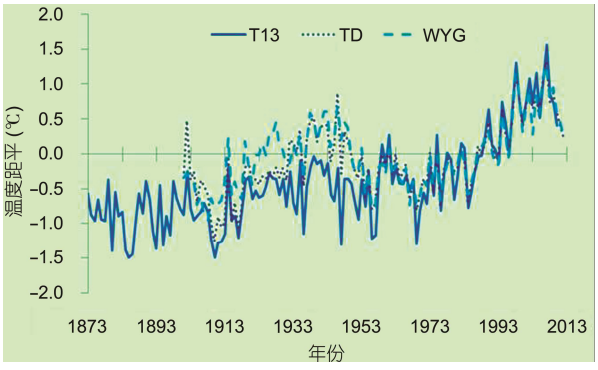


图 1 1873~2012 年中国区域地表气温年平均距平变化(相对于1971~2000 年). 其中 3 个系列为T13 序列[5]、TD序列[3]与WYG序列(1998)[4] (严中伟提供, 2015)

Figure 1 Time series of regional mean surface air temperature anomalies (SAT) in China for 1873–2012, relative to the average of 1971–2000. Three curves (T13, TD, WYG) are based on Cao et al.[5], Tang et al.[3], and WYG[4], respectively (Taken from Yan, 2015)

表 1 过去 100 年地表气温(SAT)趋势(单位: ℃/10 a)

Table 1 Trend of surface air temperature in the last 100 years(Unit: ℃/10 a)

SAT 序列	1906~2005 年	1908~2007 年
WYG	0.053	0.059
LYT	0.034	0.042
TR	0.095	0.111
TD	0.086	0.096
CRU	0.120	0.127

所有SAT时间序列都很一致地显示出近50年中国的地表气温加速上升, 气候变暖十分明显[6]. 由于WYG和TD SAT序列有较高的相关, 但是两个序列所给出的增暖速率却不同(分别为0.53与0.86 ℃/100 a), 《第二次气候变化国家评估报告》认为中国的气候变暖速率可能在0.5~0.8 ℃/100 a. 但这并不排除存在有更高增暖率的可能性, 如TR与CRU曲线已接近或超过1 ℃/100 a. 最近, Cao等人[5]用最高和最低温度代表日平均温度, 并采用经纬度网格面积加权平均与CRU插值的网格化温度资料一定程度上克服了20世纪上半叶因观测时间不同等因素引入的非均一性, 得到了新的近百年SAT时间序列(图1中T13曲线), 如与《第二次气候变化国家评估报告》中采用的方法相一致, 可取WYG和TD序列则可得近百年(1913~2012年)中国区域平均增温的中值为0.9 ℃, 这高于《第二次气候变化国家评估报告》中平均增温0.5~0.8 ℃的结果. 最近50~60年增温趋势为0.23 ℃/10 a. 无论是近百年增温总量和增温趋势皆高于全球平均水平(全球平均分别为: 0.85 ℃/10 a (1880~2012年)与0.12 ℃/10 a(1951~2012年)). 如根据上述Cao等人[5]的最新结果, 中国中东部地区1909~2010年的增温率可达1.52 ℃/100 a, 这主要是由于T13曲线中1920~1940年的增温值明显减小的结果(比较图1中的各曲线). 这个值明显高于全球百年增温值. 兼顾考虑上述3条百年曲线, 可认为中国地表气温近百年变化的下限是0.90 ℃, 1.52 ℃是上限, 取其中值为1.20 ℃. 在这种情况下, 《第三次气候变化国家评估报告》取1.20 ℃为新的中国百年增温率, 其不确定性范围在0.9~1.52 ℃之间.

但目前对这个结果需要从原因和机理上做进一步分析研究. 除了在去除城市化效应所取的增温率不同以外, 一个关键问题是1920~1940年的快速增温期和峰值是否存在? 图2是北极地区(59°N)以北近百年SAT的时间曲线, 可以清楚地看到, 1920~1940年代存在一个显著的暖期. 在WYG和TD曲线上, 可以看到类似的暖期. 这反映了北极的影响[1,7], 而在T13曲线则不存在这个暖期, 因而中国近百年SAT曲线可靠性的一个关键问题是1920~1940年代暖期是否存在, 其量值和机理是什么? 当然, 中国不同区域不同季节的增温速率和增温幅度也是有差别的, 例如: 进入新千年的十几年里中国东部冬季气温基本是下降

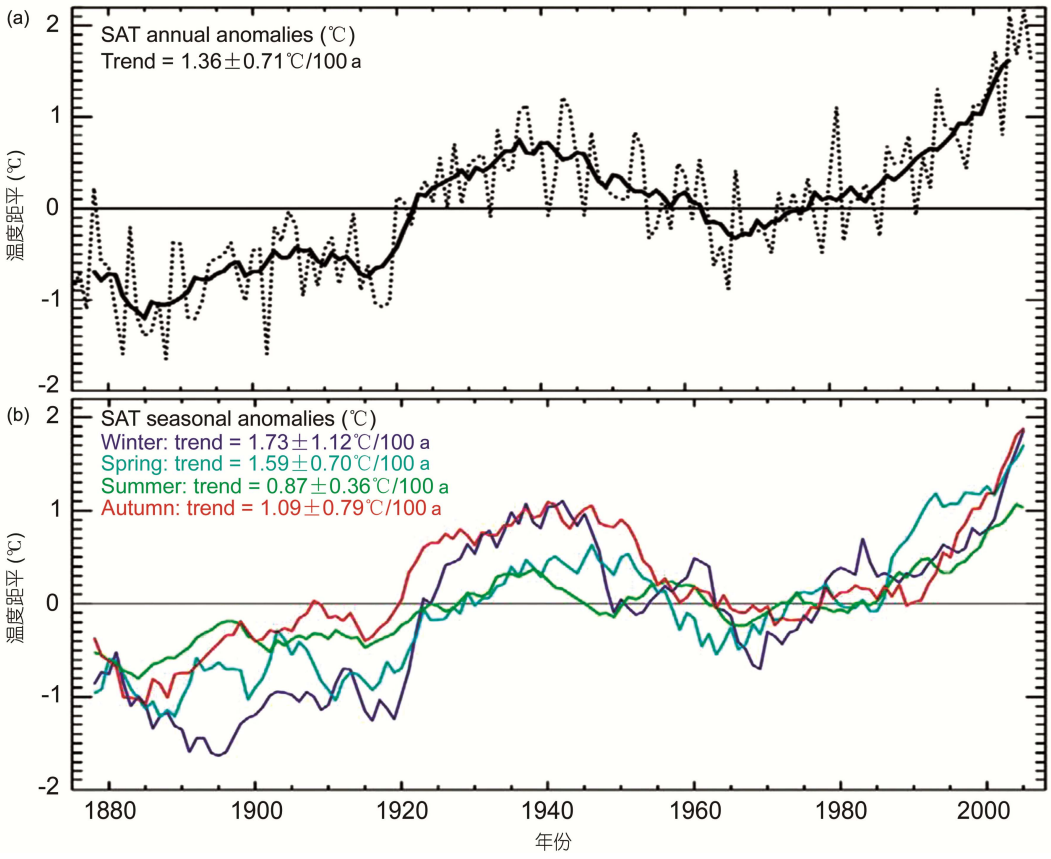


图 2 北极地区(59°N以北)年平均(a)和季节平均(b)地表气温距平综合时间序列. (a) 点线为原始值, 实线是 7 年滑动平均曲线. 图中给出的线性趋势值是指 1900~2008 年间的趋势值[7]

Figure 2 Composite time series of the annual (a) and seasonal (b) surface air temperature anomalies for the region poleward of 59°N. (a) The dotted lines show unsmoothed values; the solid lines are seven year running average. The linear trend listed in the legend are computed using data for the period 1900–2008[7]

的[8]. 另外一个重要问题是气候年代际变化, 由于中国器测观测资料的长度不足150年, 使得气温的年代际检测与预测十分困难.

2 中国地区的水循环与区域降水变化

全球水循环是指自然界的水以其液态、固态和水汽形态在整个气候系统中不断输送与转换, 以及在海洋、冰雪圈、陆面和大气库中的储存状况. 因而全球水循环涉及多圈层相互作用、并具有相变和复杂物理过程. 对于区域水循环, 还必须考虑各种形态的水在区域边界交换的状况. 全球气候变暖可以通过3个方面影响全球水循环: (1) 由于气候变暖后大气可容纳更多的水汽, 实际比湿(q)和饱和比湿(qs)都增加, 所以相对湿度($RH=q/qs$)基本上变化不大; 但如果温度上升十分明显, 而q又增大不多, 则RH减小, 这种情况下, 降水可能性减小, 气候变暖后, 易出现干旱; (2) 大气环流也发生变化, 这导致水汽输送及其辐合/辐散区与降水区发生变化; 在气候变暖影响下, 区域环流型和异常状况在不断改变, 从而在改变着降水区和干旱区的分布型式和强度; (3) 全球辐射强迫的变化改变着地表和大气的加热场; 地表直接影响蒸发和感热加热, 后者又通过垂直输送改变大气的热源和层结稳定度, 从而影响降水. 正是上述原因共同引起了水循环的变化, 尤其是降水特征(降水量、频率和长度)与极端值和极端事件的变化. 由于气溶胶的存在可增强或减弱降水条件, 进一步使降水过程变化复杂化. 大量的研究表明[1], 近百年全球与区域水循环已经并将继续发生显著的变化.

对于中国的区域水循环, 最显著的变化主要表现在4个方面.

(1) 虽然近百年和近60年全国平均降水量均未见显著的趋势性变化, 但20世纪70年代以后降水型

发生了明显的年代际变化. 东部季风区出现“南涝北旱”的降水异常型, 而西部干旱和半干旱地区近30年在变湿, 降水呈持续增加趋势(图3). 东部季风区降水格局的变化与东亚夏季风年代际减弱(40年与60~80年周期)密切有关[9,10], 其直接的后果是使季风向北水汽输送减弱. 对于西部地区的变湿与降水增加的成因目前尚无定论, 也没有确切的证据表明中国这种降水型变化与人类活动密切有关. 所谓“湿者愈湿, 干者愈干”, “暖者愈湿”或“副热带向北扩展”的结果[11,12]都无法合理解释这种区域降水格局长期变化的特征.

(2) 近50年地表年平均比湿从1960年后是增加的, 在20世纪80年代末到21世纪初处于一个高峰期, 并在2000年左右达到50年的峰值. 之后出现迅速减少的趋势[13,14]. 全国范围地表到对流层中上层大气的水汽含量显著上升, 北方上升趋势明显高于南方. 上述大气实际水汽含量近50年总体上增加的趋势与气候变暖影响结果基本是一致的. 但是由于饱和比湿也明显上升, 并且上升速率比实际比湿或大气水汽含量增加的速率更快, 致使全国大部分地区地表相对湿度表现为减小的趋势[13]. 这种情况与中国地区干旱面积的增长有相当密切的关系.

(3) 中国的蒸发皿和潜在蒸发量总体上呈下降趋势, 绝大部分地区水面蒸发减少, 这与大部分地区增加的实际蒸散发不同. 这种所谓蒸发悖论问题国内外已有很多讨论[15,16]. 这两种蒸发趋势的差别主要涉及对实际蒸散发的计算问题. 由于中国蒸散发的实际测量数据(如用称重和边界层铁塔观测)十分有限, 大多数实际蒸散发是根据不同的模型和经验公式计算得到. 由于模式和公式不同, 所得结果不同. 分析表明, 影响实际蒸发量值和时空分布的因子不仅包括温度, 还包括多种气象要素和因子(如日照、风速、相对湿度、降水等), 因而如何根据蒸散发理论构建合理的蒸散发计算模型是解决这一问题

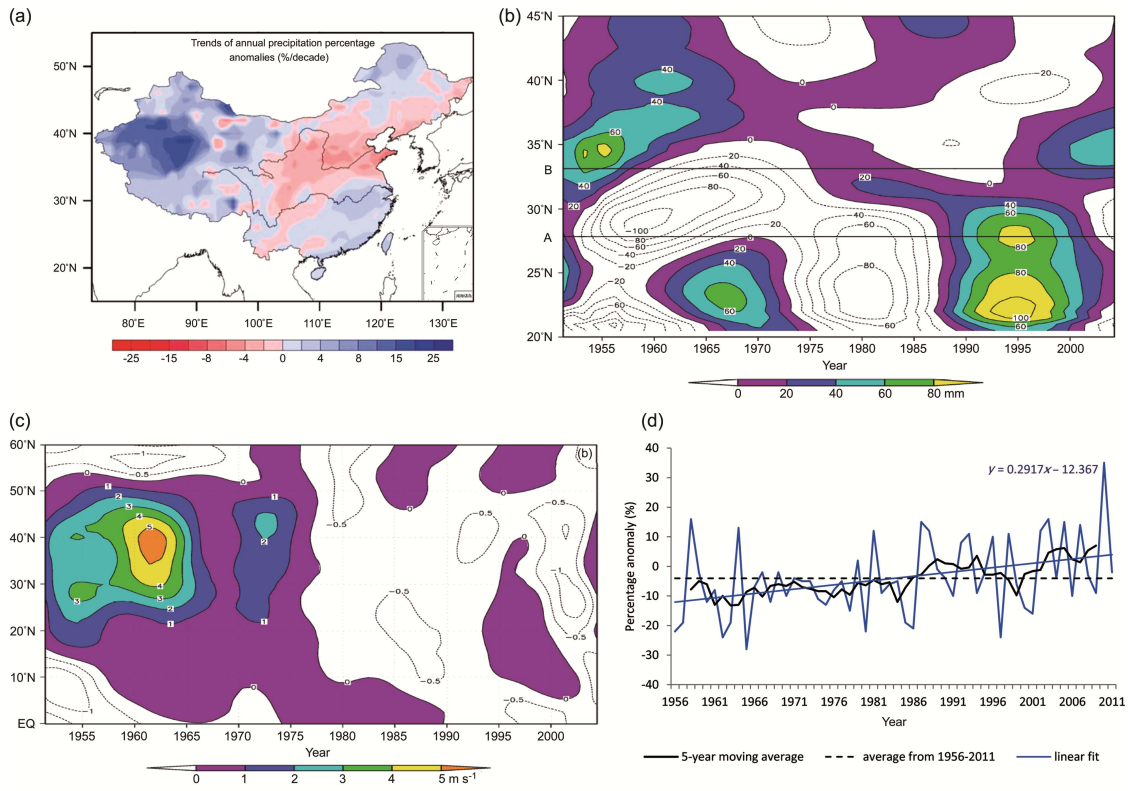


图 3 中国降水变化及相关特征量的时间演变. (a) 1957~2010 年中国夏季降水量距平百分率线性趋势变化图. (b) 1951~2004 年东亚夏季风(6~8月)降水和(c) 850 hPa经向风, 经度-时间剖面图[10]. (d) 西北地区(110°E以西, 33°N以北)1956~2011 年平均降水量距平百分比时间序列(柳艳菊提供, 2014)

Figure 3 Time evolutions of precipitation in China and related elements. (a) Linear trend of summer precipitation anomalies for 1957–2010. (b) Longitude-time cross-sections of East Asian summer precipitation (June–August) for 1951–2004 and (c) 850 hPa meridional wine (v) [10]. (d) Time series of percentage of annual mean precipitation amount anomaly (Taken from Liu, 2014)

的关键.

(4) 径流量表现为东部诸河减少, 西部诸河增加的趋势. 中国水循环的一个关键水文分量是径流. 从全球径流变化研究看, 最近进行的最全面的江河分析表明, 其结果并不支持在IPCC AR4[1]得到的在20世纪径流增加的结论. 全球900条河流百年以上记录的分析表明, 有三分之二河流的入海淡水量呈下降趋势, 只有三分之一河流的入海淡水量是增加的[17], 并未完全反映气候变暖的影响. 中国的十大河流径流变化中, 东南、西南、西北诸河流域有4条表现为增加趋势, 而东部地区的6条河流径流表现为减少趋势. 根据Piao等人[18]的分析, 自20世纪60年代以来, 黄河流域径流呈不断下降的趋势而长江流域径流呈上升趋势. 但近10年来, 后者已呈下降趋势.

由上可见, 径流对气候变化的响应是复杂的, 与实际蒸散发一样也包含多因子的影响. 这一方面主要是由于径流与人类活动以及复杂的自然变化有关, 另一方面, 也由于它与能量循环和大气环流的变化又相互交织在一起. 这也表明, 水循环研究和归因比温度有更大的不确定性和困难.

3 亚洲季风的长期变化与原因

亚洲季风是全球季风系统中的一个主要成员. 一个季风系统的形成、发展和维持是在太阳年变化强迫下多种因子间复杂相互作用的结果. 因而现代季风系统是被看作在太阳辐射年循环驱动与作用下耦合的海-陆-气-冰系统, 而不仅仅是经典理论认为的由海洋与陆地热力差异引起的大型海陆风环流. 季风系统具有多时空尺度的变化, 从短期的天气尺度脉动到几千乃至几百万年的长期变率. 对于几千年以上的季风变率, 其原因与百年尺度以下的变率是不同的. 中国的古季风研究有长期的历史, 其中一个重点是利用多种代用资料(如黄土、年轮、石笋、海洋和湖泊沉积物等)对东亚与亚洲季风, 包括夏季风和冬季风的演变与原因进行了研究, 在国内外取得了很多成果[19~23]. 古气候学家的研究认为, 在万年至十万年时间尺度上, 地球相对于公转轨道平面的倾角, 地球公转轨道的形状与地轴缓慢的摆动或春分点进动的周期性变化, 通过调制和分配入射太阳辐射而驱动全球气候和亚洲季风变化. 据近万年以来古季风的研究, 整个亚非季风具有长期的减弱趋势. 此外, 亚洲季风的强度也受欧亚北部冰盖增长和崩溃以及温室气体的影响.

近百年亚洲季风的研究进一步揭示了人类因子强迫(主要温室气体排放、气溶胶增加和土地利用变化)在影响季风及其变率的重要性[24]. 温室气体排放增加引起的气候变暖导致大气中水汽含量增加与地表蒸发增加, 从而改变季风区水循环. 另一方面, 由于大气顶辐射强迫的变化也改变全球和区域季风区能量收支. 由于海洋和陆地的能量发生变化而影响海洋与陆地的热力差异和季风环流的强度与降水. 大气气溶胶的增加通过减少陆地表面的太阳辐射加热和海陆温差而使季风环流减弱. 在近百年亚洲季风变化中, 最突出的特点是其强度的年代际变化(图4(a), (b)). 无论东亚季风和南亚季风都分别在20世纪60年代末和70年代末经历了减弱过程[10,25,26]. 这种亚洲夏季风的年代际减弱导致了亚洲大范围季风雨区的明显南退, 在中国的华北与印度北方都出现了持续的干旱少雨的条件. 实际上, 这种亚洲季风的大尺度衰减也向西延至西非, 反映了整个亚非季风系统的年代际减弱. 目前还无法确切地把这种减弱的亚洲夏季风归因于人类活动因子的影响. 陈晓龙等人[27]和周鑫等人[28]研究也表明, 人类活动对亚洲季风长期变化趋势的影响可能较小. 但Bollasina等人[26]得到, 近百年南亚季风的减弱可能是由人类排放气溶胶的增加造成的.

季风的年代际变化也是季风重要的特征之一, 它主要受到海洋和陆面(包括积雪、植被等)因子的影响, 其中ENSO是季风年际变率的主要强迫因子. 虽然目前还无法从观测中确切地检测出季风和ENSO遥相关关系的稳定性是否会因气候变暖而改变, 但模式研究表明, 随着气候的变暖, 两者关系仍然不会改变. 为使将来的ENSO预测更为可信, 模式必须能够真实地模拟热带太平洋的平均状态与季风—ENSO遥相关, 但在未来的气候变化预估中, 热带太平洋平均态与ENSO振幅和频率的变化是高度不确定的. 但敏感性模拟实验表明, 正常季风年在气候变暖下将减少, 很弱的和很强的季风发生频率(PDF尾端)概率将增加. 这表明, 季风的异常变化幅度将随气候变暖而增加[29].

4 海洋在近百年中国气候变化中的作用

海洋在全球气候变化中被看作是气候系统的内部变率. 但它与大气的随机性内部变率不完全相同,

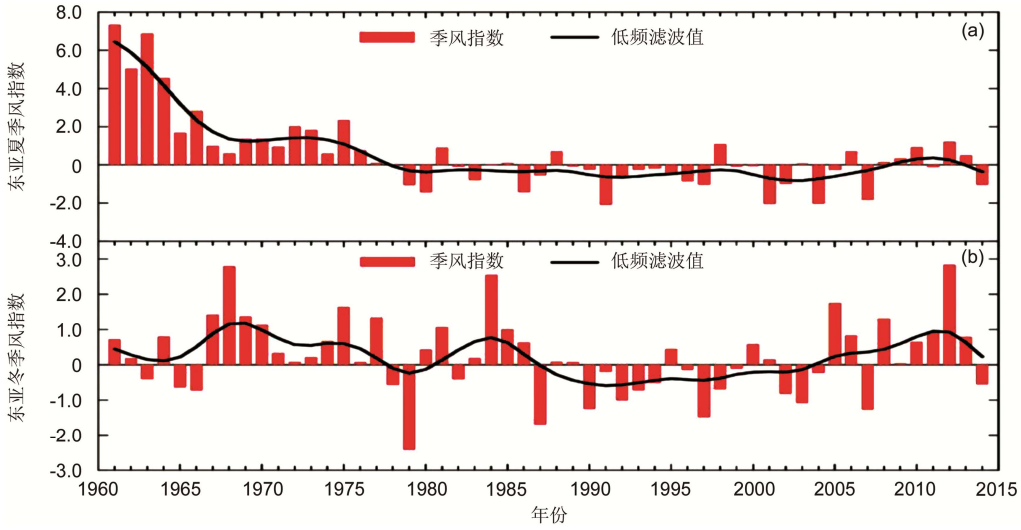


图 4 1961~2014 年东亚夏季(6~8 月)季风(a)和冬季(12~2 月)季风(b)指数变化曲线(国家气候中心, 2015)

Figure 4 Time series of the East Asian summer monsoon (June–August) (a) and winter monsoon (December–February) (b) index of 1961–2014 (National Climate Center, 2015)

海洋可以通过海气相互作用影响大气的变率, 因而海洋与陆地被看作是一种大气外部的耦合强迫, 可以引起时间尺度较长或缓慢的气候自然变率. 其中年际(ENSO)和年代际尺度(太平洋年代际振荡PDO或IPO)最受到关注. 20世纪90年代以来, 赤道中太平洋经常可观测到海表温度异常增暖的现象, 而赤道东太平洋海表温度异常变冷. 这种太平洋中部异常增暖的事件有别于传统的东部型厄尔尼诺, 被称为中部型厄尔尼诺. 由于中部型厄尔尼诺对全球和东亚的天气气候影响不同于东部型厄尔尼诺, 因而引起了相当的关注. 对于ENSO发生频率和振幅的变化对全球变暖的响应问题至今仍有较大的不确定性. 但将来ENSO仍然是影响全球气候的主要自然变率模态, 它可以引起全球许多区域降水和气温异常. 根据CMIP5的模式研究, 由于ENSO的自然变率(包括方差和空间型)非常大, 无法在21世纪的预估中, 确定人类活动所占的相对贡献有多大[30].

PDO是年代际尺度的北太平洋海温变率, 有与ENSO类似的空间结构, 它对北半球年代际气候变化有重要影响. 由图5可见, 近百年全球地表气温的快速增温期与趋缓期(或停顿期)与PDO的位相变化有很明显的相关. PDO正位相对应于快速的全球增暖期(20世纪20~40年代和80, 90年代), 负位相期对应增温停顿期(20世纪50~70年代和1998~2014年)[31], 因而PDO对全球变暖的年代际变化有明显的调节作用.

观测到的近百年地表气温的变化实际上是人类活动造成的变暖趋势与自然的PDO等年代际模态的冷暖期相互迭加或抵消的结果. 另外, 大西洋多年代尺度变率(AMO)也影响全球温度的长期变率[32]. 虽然对于近15年气候变暖趋缓的原因提出了不少解释, 包括太阳活动的减弱、火山爆发、平流层水汽减少, 但北太平洋PDO的冷位相起着更重要的作用[1]. 观测和模式计算都表明, 人类活动引起的气候系统的能量输入继续增加, 但海洋表层的冷却是由于海洋吸收的热量主要向海洋的中、深层输送和储存, 而致使海表热量减少的结果. 因而对近15年全球变暖趋缓期“丢失的能量”的去向目前基本上有了比较清楚的回答.

气候变化对海洋影响的一个重要方面是海平面上升. 全球海平面上升率从19世纪中期开始增加, 高于过去2000年的平均上升率. 在1901~2010年期间, 全球海平面上升高度达0.19 m(0.17~0.21 m), 其上升率为1.7 mm/a, 在1971~2010年期间为2.0 mm/a, 而到1993~2010年期间增加到3.2 mm/a. 验潮站和卫星高度计都测量到这个更高的上升率. 其原因是由于自1970年以后, 由增强的气候变暖使冰川和冰盖冰量损失和海水热膨胀增加, 它们占全球观测到的海平面上升的75%.

20世纪80年代以来, 中国沿海的海平面上升率为2.9 mm/a, 高于全球平均的海平面上升率(图6). 不

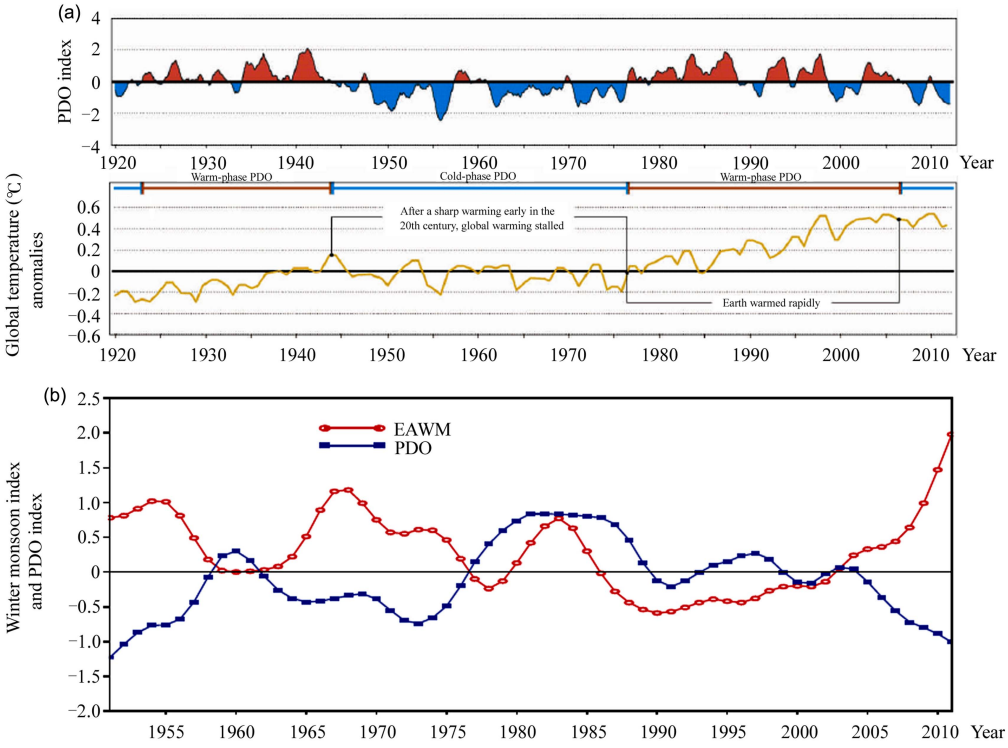


图 5 北太平洋年代际振荡指数(PDO)(a)与全球平均地表气温的关系图(b)(由Tollefson改绘[31])

Figure 5 Relationship between the Pacific Decadal oscillation (PDO) (a) and global mean surface air temperature (b) (Redrawn from Tollefson [31])

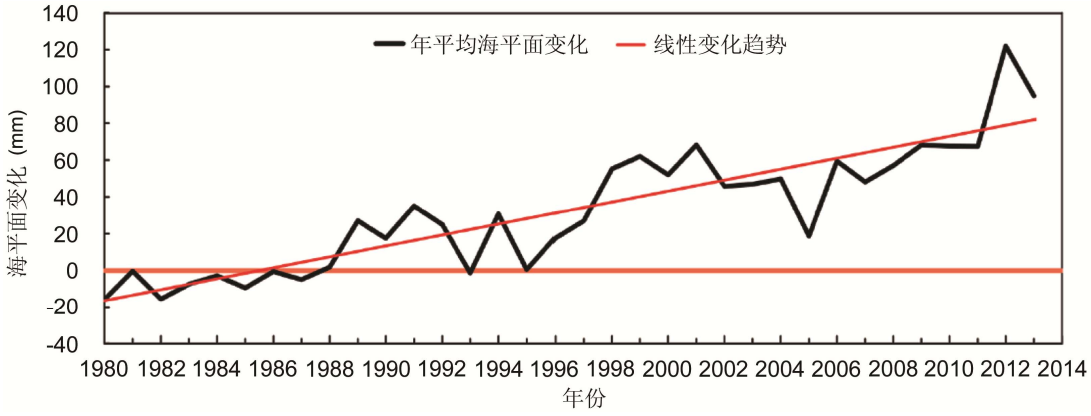


图 6 中国沿海海平面变化(相对于 1975~1993 年平均值)(引自国家海洋局 2013 年中国海平面报告)

Figure 6 Sea-level change along coastal zone in China (relative to average for 1975–1993). (Taken from *Bulletin of Sea Level in China for 2013*, State Oceanic Administration)

少作者得到的上升率比此值还要高. 2012年为1980年以来中国海平面最高位. 中国海平面上升除受全球变暖影响外, 也可能与太平洋年代际振荡(PDO)有关联, 如太平洋赤道偏东信风增强, 可驱动热带西太平洋海平面上升, 导致菲律宾与南海约70%的海平面上升. 从观测上可看到, 这里是西太平洋海平面上升最显著的地区[1]. 国家海洋局对中国沿海海平面未来30年的预测值在60~145 mm之间, 这个值大于全球平均值.

5 中国气候变化的原因

地球的气候总是在不断地演变着, 这种演变可能有多种原因(包括外强迫与气候系统内部变率). 为了确定观测到的变化是由何种主要原因引起, 必须

确认观测到的变化与完全不存在强迫条件下的变化(或称气候系统的内部变化)有什么不同. 对于气候系统而言, 温室气体、太阳活动、火山爆发、土地利用变化(包括城市化)是外强迫, 而大尺度海洋变率如ENSO和PDO是年际、年代尺度与百年尺度的内部气候变率. 因而确定气候变化原因的关键就是寻找和确认不同气候变化原因的“指纹”. 其方法是用气候模式模拟各种强迫因子作用产生的不同气候变化型式, 并把这些模拟的指纹型式与观测的气候变化相比较, 以辨别观测的变化最可能与何种“指纹”型式相似, 从而确认由何种外强迫作用引起, 或由自然的无外部强迫作用下的内部原因引起. 这就是气候变化的归因研究. 通过近20多年的研究, 目前对全球和区域气候变化已能定量地进行归因[1,33]. 对于全球气候变化的原因, 最主要的结论是1951~2010年全球平均地表气温的增加中, 二分之一以上极可能(99%的信度)是人类活动造成的. 在这期间, 温室气体对全球地表气温增加的贡献可能在0.5~1.3 ℃, 其他人类活动(包括气溶胶的冷却作用)可能为–0.6~0.1 ℃, 自然强迫的贡献可能为–0.1~0.1 ℃, 内部变率可能在–0.1~0.1 ℃. 上述4种驱动因子总和与此时期观测到的约0.6 ℃的增温一致.

中国科学家的归因研究表明, 中国区域很多气候指标的变化特征符合IPCC关于人类活动影响的相关认识和结论. 图7是多个全球模式在不同强迫下对中国1961~2005年气候变化的模拟结果[33], 可以看到, 包括人类活动等自然因子影响模拟的中国地表气温平均曲线与观测曲线总体上是一致的. 这表明中国近50年气候变化是由人类活动造成的温度上升趋势与迭加在其上升趋势上的自然因子引起的温度脉动共同造成的. 如果在模式中去掉人类排放的温室气体、气溶胶与土地利用变化的作用, 则地表气温从20世纪80年代初与实际温度开始出现差别, 前者表现为持续升温, 后者表现为温度平稳, 没有任何升温, 甚至有一定时期的降温. 该图还表明, 如果不考虑人类活动的影响, 单纯在自然因子的作用下, 中国的气温应该是没有增暖效应的. 另一方面, 也可由该图得到, 自20世纪80年初以后, 中国的快速变暖与全球一致, 也主要是受到温室气体增加的作用(图7(b)中红线).

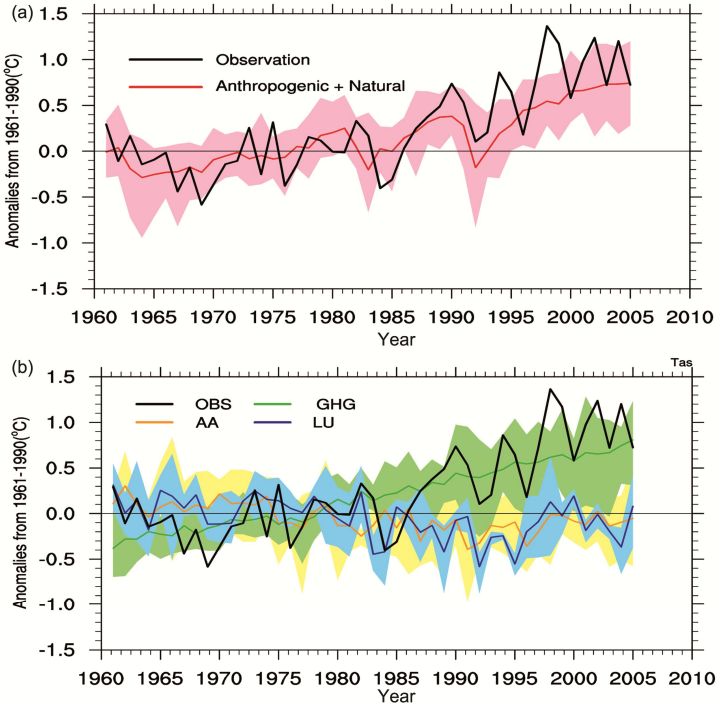


图 7 不同强迫因子对中国地区 1961~2005 年地表气温变化的影响[33]. (a) 自然因素和人为因素及(b) 不同因子对中国近 50 年升温的共同作用; GHG, 温室气体; AA, 气溶胶; LU, 土地利用; OBS, 观测

Figure 7 Influence of different external forcing on regional mean surface air temperature in China for 1961–2005. GHG, greenhouse gases; AA, aerosols; LU, land use change; OBS, observation [33]

对于中国东部夏季(6~8月)温度的归因也证明，人类影响从20世纪80年代中期以后明显增加[34]. 但与全球气候变化的归因相比，自然的气候波动可能对中国地区气候变化的贡献更大一些. 有研究表明，从20世纪70年代到21世纪初中国变暖速率加大，其中快速的城市化对某些局地温度升高有不同程度的贡献，但与由人类温室气体排放引起的气温升高相比仍较小(占增暖的10%~25%).

对于近15年全球增温趋势趋缓的现象，中国的气温也有明显的响应，尤其是北方(东北、内蒙古和新疆北部等)冬季的温度呈现出变暖趋缓或下降趋势. 其主要原因是由于气候系统的内部变率引起(如PDO冷位相、北极融冰加速等)，它们产生的大气冷却在很大程度上抵消了温室气体的增温趋势. 但从近百年看，最近10年仍暖于以往任何一个10年.

对于中国的某些极端天气气候事件变化的归因，中国的研究开始较晚、较少，但近10年中国地区极端天气气候灾害趋于增多，有些频率或强度有一定增加. 由于它们是发生在特定的气候变化背景下，而后者受人类活动的影响明显，因而可推知，中国某些极端天气气候事件变化的原因不能排除人类活动的影响. 最近Sun等人[34]对中国夏季高温热浪的检测和归因研究表明，中国东南地区2013年夏季发生的持续极端高温热浪(7，8月)，人类影响起着关键作用，它使该事件发生的可能性增加60倍以上，为270年一遇的极端高温事件.

6 全球与中国气候变化的预估

气候系统变化预估的重要工具是具有不同复杂程度的气候模式，包括简单模式、中等复杂模式和复杂模式与地球系统模式，并根据一套人类强迫的情景(目前是用RCPs情景，即典型浓度路径)从多方面预测和预估气候的未来变化. 近年来，气候预估被分两个阶段：近期预测(未来20~30年)和长期预估(到2100年或2300年，甚至更长). 一般情况下，对于近期气候变化的空间分布与21世纪的是相似的，但变化的量值要小得多. 这个时期自然的内部变率将继续是一种重要的影响，而人类的影响当然也很重要，但其累计效应尚没有充分地显现出来. 因而，初始资料的同化对近期气候变化预测是十分重要的. 到21世纪中后期，预估的气候变化显著地受排放情景影响，初值的影响已不重要. 在给定的温室气体排放情景下，所有的模式都模拟未来全球气温增加的趋势. 从低排放情景(RCP2.6)到高排放情景(RCP8.5)[35]. 到21世纪末，温度升幅(相对于1986~2005年平均值)可能在1.0~3.7 ℃(图8(a)). 中国区域的增温幅度为1.3~5.0℃，比全球平均的增温幅度高，这主要是由于中国增温仅考虑陆地区域，未包括海洋地区，而陆地与海洋由于热容量不同(后者远比前者大得多)，导致陆地增温的速率和量值均远大于海洋. 预估也表明，未来东亚夏季风将明显增强，到21世纪末，全国降水平均增幅5%~14%. 未来极端事件将增加，高温热浪明显增加(图9)，极端干旱事件增加；海平面将继续上升.

对于气候变化的年代际预测是近年来提出的新问题. 这是由于根据CMIP5模式对于近15年气候变暖趋缓的现象并未模拟出来(趋势为0.05℃/10 a，而1951~2012年平均增温率为0.2℃)，因而有人提出是否存在模式预测过高估计了气候变暖的量值. 对此国际上进行了许多研究[36~38]. 结果表明，CMIP5的近期预测存在两个问题：(1) 这一时期的驱动力中多种冷却因子估计不足，需要重新估算和更新. 这包括太阳活动和平流层气溶胶的冷却作用被低估，温室气体(CO_2, N_2O, CH_4和CFCs等)的辐射效应被高估. 内部变率(如ENSO事件)产生的冷却作用也应调整和更新；(2) 对气候模式的初始场应进行资料同化. 利用新的外强迫资料和调整的与ENSO有关的内部变率，重新利用CMIP5模式进行预测试验，结果表明，几乎可以完全使CMIP5 模式模拟出与观测相一致的全球地表平均温度. 这个结果也充分说明对于近期气候变化的预测，自然因子是十分重要的；观测到的地表气温变化实际上是人类活动造成的增温趋势与自然因子的冷暖周期相互迭加或抵消的结果.

下一个重要的问题是近15年的气候变暖趋势将什么时候结束，或加速的气候变暖什么时候恢复？根据最近的研究表明，温室气体引起的主要长期变暖作用将继续使温度上升；另外，亚洲气溶胶水平将会稳定，也许会减少，冷却作用不会增加，太阳活动仍会持续偏低，但其作用是一个小量，火山爆发不可预测，最重要的海洋内部变率(PDO与ENSO)一般持续15~20年. 过去15年的气候变暖停顿已主要由上述海洋变率冷位相造成. 因而这次15年的气候变暖停顿最长可能延续到2020年[39]. 敏感性试验也表明，如果除去自然因子的影响，近期全球温度可能已接

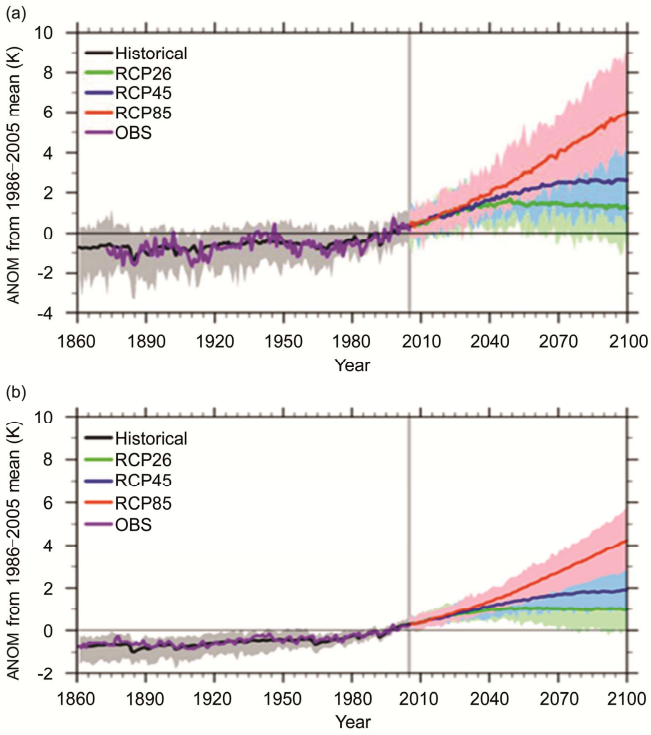


图 8 1861~2100 年中国(a)和全球(b)地区年平均地表气温距平序列(相对于 1986~2005 年), 红、蓝、绿色实线为 29 个模式集合平均结果, 紫色线为观测序列. 全球观测序列资料取自HadCRUT3(Brohan等, 2006); 中国区域资料取自唐国利等(2009)绘制(吴统文, 俞永强提供, 2014)

Figure 8 1861–2100 time series of annual mean surface air temperature anomaly for China(a) and globe(b) (relative to 1986–2005 average). Red, blue and green solid lines represent ensemble mean of 29 CMIP5 models. Purple line denotes observation produced from HadCRUT3 (Brohan et al., 2006). Observed curve in China is based on Tang et al. (2009) (Taken from Wu and Yu, 2014)

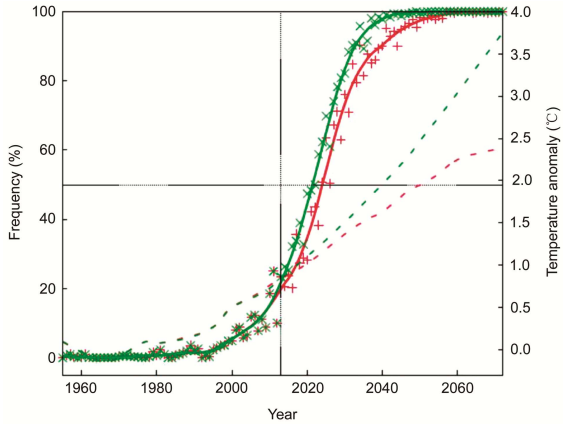


图 9 1955~2072 年极热夏季重现频率的变化, 即夏季温度高于1.1℃距平(相对于 1955~1984 年)频率的时间演变. 红色十字和绿色叉号分别代表RCP4.5 和RCP8.5 排放情景. 虚线代表预估的集合平均温度变化(右边坐标)[34]

Figure 9 Frequency of extreme hot summer recurrence in 1955–2072. Time evolution of the frequency of temperature anomalies above 1.1℃, relative to the 1955–1984 mean, in the observationally constrained projections (2014–2072) under RCP 4.5 (plus)and RCP 8.5 (cross) emission scenarios (left hand scale). Dashed lines represent projected ensemble mean temperature change under RCP 4.5 (red) and RCP 8.5 (green), respectively[34]

近0.25℃/10 a的升温率. 如果这个预测是对的, 未来的5年全球地表气温的变化将处于气候态的转换时期, 之后全球地表气温又会加速上升, 并将可能在21世纪中期超过2℃阈值. 这意味着人类如果希望使全球地表气温不超过2℃阈值, 温室气体的减排努力将面临更严峻的挑战.

气候变化的预测具有不确定性, 它由多方面原因造成. 因而对模式预测的检验和评估对深入认识模式的性能和预测能力是十分重要的. 另外, 由于全球气候模式分辨率较低, 会对中国东亚季风气候的模拟产生偏差, 影响其评估, 需要应用区域气候模式动力降尺度方法进行模拟和预估[40~43]. 对于全球和中国地区的气候变化预测至今已从许多方面进行了检验[1,4], 其结果是相当令人鼓舞. 从IPCC第一次评估报告发表以来的25年中, 全球地表气温的变化是基本位于预测的范围内. CO_2浓度的增加也在预测的范围中. 海平面上升的预测位于预测的中值附近. 总之, 过去25年预测的成功使我们有理由相信, 对未来全球和中国气候变化的预测是有科学依据的, 可信的.

7 结语

全球和中国气候变化的研究需要学科交叉、多部门合作. 本文只是在科学上从6个方面做了简明的评述. 对于有些问题, 尤其是涉及地球生物化学过程和古气候方面并未涉及太多, 这包括气候变化对生态系统的影响、全球和区域碳循环、气溶胶的气候与环境效应以及古气候演变的驱动力与影响等. 中国科学家在这些方面同样做出了重要的贡献. 面临将来计划进行的IPCC第六次评估的要求以及中国应对气候变化和经济社会可持续发展重大而紧迫的需求, 中国气候变化的科学研究具有更广阔的前景. 气候变化研究既是地区国家需求驱动的, 也是人类共同面对的重大科学和技术问题. 全球气候变化问题研究是衡量一个国家在地球系统科学研究水平高低的重要标志. 这包括: (1) 全球和区域气候的观测分析, 尤其是海洋和大气环流模态与极端值及其多尺度变率; (2) 云与气候的相互作用, 气候敏感性和反馈作用; (3) 古气候演变及其与现代气候变化的比较和归因; (4) 全球与区域水循环与碳、氮循环及其影响; (5) 极地海冰、冰盖和冰冻圈变化与海平面上升; (6) 全球季风系统的变化与旱涝灾害; (7) 气候极端事件阈值和气候突变; (8) 改进年代尺度预测, 建立天气-气候一体化模式与多用途的地球系统模式[44,45]. 可以相信, 中国科学家一定会通过自己的艰苦努力攀登上国际气候变化科学研究的新高峰.

参考文献

1 Stocker T. IPCC Climate Change 2013. In: The physical Basis: Contribution of Working Group Ⅰ to the Fifth Assessment Report of the Inter-government Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2014. 1135

2 Research Group of Chinese Academy of Engineerings. Scientific and Technical Research in Response to Climate Change Problems (in Chinese). Beijing: Science Press, 2015. 492 [中国工程院应对气候变化的科学技术问题研究项目组. 应对气候变化的科学技术问题研究. 北京: 科学出版社, 2015. 492]

3 National Assessment Report on Climate Change Editorial Committee. National Assessment Report on Climate Change (in Chinese). Beijing: Science Press, 2007. 422 [《气候变化国家评估报告》编写委员会. 气候变化国家评估报告. 北京: 科学出版社, 2007. 422]

4 The Second National Assessment Report on Climate Change Editorial Committee. The Second National Assessment Report on Climate Change (in Chinese). Beijing: Science Press. 2011. 710 [《第二次气候变化国家评估报告》编写委员会. 第二次气候变化国家评估报告. 北京: 科学出版社, 2011. 710]

5 Cao L J, Zhao P, Yan Z, et al. Instrumental temperature series in eastern and central China back to the nineteenth century. J Geophys Res-Atmos, 2013, 118: 8197–8207

6 Ren G Y, Ding Z, Zhao J, et al. Recent progress in studies of climate change in China. Adv Atmos Sci, 2012, 29: 958–977

7 Serreze M C, Barry R G. Process and impact of Arctic amplification: A research synthesis. Glob Planet Change, 2011, 77: 85–96

8 Li F, Wang H J. Spring surface cooling trend along the East Asian coast after the late 1990s. Chin Sci Bull, 2013, 58: 3847–3851 [李菲, 王会军. 20世纪90年代末之后东亚沿岸春季的降温趋势. 科学通报, 2013, 58: 2840–2844]

9 Ding Y H, Sun Y, Wang Z Y, et al. Inter-decadal variation of the summer precipitation in China and its association with decreasing Asian summer monsoon Part II: Possible causes. Int J Climatol, 2009, 29: 1926–1944

10 Ding Y H, Wang Z Y, Sun Y. Inter-decadal variation of the summer precipitation in East China and its association with decreasing Asian summer monsoon Part Ⅰ: Observed evidence. Int J Climatol, 2008, 28: 1139–1161

11 Held I M, Soden B J. Robust response of the hydrological cycle to global warming. J Clim, 2006, 19: 5686–5699

12 Huang P, Xie S P, Huk M, et al. Patterns of the seasonal response of tropical rainfall to global warming. Nat Geosci, 2013, 6: 357–361

13 Song Y F, Liu Y J, Ding Y H. A study of surface humidity change in China during the recent years. Acta Meteorol Sin, 2012, 26: 541–553

14 Su M F, Wang H J. Decadal co-variability of the summer surface air temperature and soil moisture in China under global warming. Chin Sci Bull, 2007, 52: 1559–1565 [苏明峰, 王会军. 全球变暖背景下中国夏季表面气温与土壤湿度的年代际共变率. 科学通报, 2007, 52: 965–971]

15 Gao X J, Wang M L, Giorgi F. Climate change over China in the 21st century as simulated by BCC_CSM1.1-RegCM4.0. Atmos Ocean Sci Lett, 2013, 6: 381–386

16 Jung M, Reichstein M, Ciais P, et al. Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply. Nature, 2010, 467: 951–954

17 Dai A, Qian T, Trenberth K E, et al. Changes in continental freshwater discharge from 1948 to 2004. J Clim, 2009, 22: 2773–2793

18 Piao S L, Ciais P, Huang Y, et al. The impact of climate change on water resources and agriculture in China. Nature, 2010, 467: 43–51
19 An Z S, Clemens C, Shen J, et al. Glacial-interglacial Indian summer monsoon dynamics. Science, 2011, 333: 719–723
20 Liu Z Y, Wen X Y, Brady E C, et al. Chinese cave records and the East Asia summer monsoon. Quar Sci Rev, 2014, 83: 115–128
21 Ding Z L, Liu D S. A dynamic mechanism conceptual model of the East Asian paleomonsoon change in late Pleistocene (in Chinese). Chin Sci Bull, 1998, 43: 122–132 [丁仲礼, 刘东生. 晚更新世东亚古季风变化动力机制的概念模型. 科学通报, 1998, 43: 122–132]
22 Zhao P, Wang B, Zhou X J. Northern hemisphere summer monsoon and hydro-climate anomalies associated with the Asian-Pacific Oscillation. Clim Dyn, 2012, 39: 1197–1207
23 Jiang D, Lang X, Tian Z, et al. Mid-Holocene East Asian summer monsoon strengthen: Insights from paleoclimate modeling Inter-comparison project (CMIP) simulations. Paleogeogr Paleoclimatol Paleoecol, 2013, 369: 422–469
24 Wang T, Wang H J, Otterå O H, et al. Anthropogenic agent implicated as a prime driver of shift in precipitation in eastern China in the late 1970s. Atmos Chem Phys, 2013, 13: 12433–12450
25 Wang H J. The weakening of the Asian monsoon circulation after the end of 1970's. Adv Atmos Sci, 2001, 18: 376–386
26 Bollasina M A, Ming Y, Ramaswamy V. Anthropogenic aerosols and the weakening of the South Asian summer monsoon. Science, 2011, 334: 502–505
27 Chen X L, Zhou T J, Zou L W. Variation characteristics of the Asian-Pacific Oscillation in boreal summer as simulated by the LASG/IAP climate system model FGOALS_gl (in Chinese). Acta Meteorol Sin, 2013, 71: 23–27 [陈晓龙, 周天军, 邹立维. 夏季亚洲-太平洋涛动的耦合模式模拟. 气象学报, 2013, 71: 23–37]
28 Zhou X, Guo Z T, Qin L. Natural and anthropogenic impacts on the Asian monsoon precipitation during the 20th century. Sci China Earth Sci, 2010, 53: 1683–1688 [周鑫, 郭正堂, 秦利. 近百年来自然和人为因素对亚洲季风降水影响的时间序列分析研究. 中国科学: 地球科学, 2010, 40: 1718–1724]
29 Turner A G, Ammamalai H. Climate change and the South Asian summer monsoon. Nat Clim Change, 2012, 2: 587–595
30 Collins M, An S I, Cai W, et al. The impact of global warming on the tropical Pacific Ocean and El Niño. Nat Geosci, 2010, 3: 391–397
31 Tollefson J. The case of the missing heat. Nature, 2014, 505: 276–278
32 Chen X Y, Tung K K. Varying planetary heat sink led to global-warming slowdown and acceleration. Science, 2014, 345: 897–903
33 Xu Y, Gao X, Shi Y, et al. Detection and attribution analysis of annual mean temperature changes in China. Clim Res, 2015, 63: 61–71
34 Sun Y, Zhang X B, Zweiers F W, et al. Rapid increase in the rise of extreme summer heat in eastern China. Nat Clim Change, 2014, doi: 10.1038/NCLIMATE 2410
35 Xin X G, Wu T W, Zhang J. Introduction of CMIP5 experiments carried out with climate system models. Adv Clim Change Res, 2013, 4: 41–49
36 Meehl G A, Teng H Y, Arblaster J M. Climate model simulations of the observed early-2000s hiatus of global warming. Nat Clim Change, 2014, doi: 10.1038/NCLIMATE 2357
37 Huber M, Knutti R. Natural variability, radiative forcing and climate response in the recent hiatus reconciled. Nat Geosci, 2014, doi:10.1038/NGEO 2228
38 Smith S J, Edmonds J, Hartin C A, et al. Near-term acceleration in the rate of temperature change. Nat Clim Change, 2015, doi: 10.1038/NCLIMATE 2552
39 Roberts C D, Palmer M D, McNeal D, et al. Quantifying the likelihood of a continued hiatus in global warming. Nat Clim Change, 2015, doi: 10.1038/NC LIMATE 2531
40 Gao X J, Xu Y, Zhao Z C, et al. On the role of resolution and topography in the simulation of East Asia precipitation. Theor Appl Climatol, 2006, 86: 173–185
41 Yu E T, Wang H J, Sun J Q. A quick report on a dynamical downscaling simulation over China using the nested model. Atmos Ocean Sci Lett, 2010, 3: 325–329
42 Gao X J, Wang M L, Giorgi F. Climate change over China in the 21st century as simulated by BCC_CSM1.1-RegCM4.0. Atmos Oceanic Sci Lett, 2013, 6: 381–386
43 Gao G, Chan D L, Xu C Y, et al. Trend of estimated actual evapotranspiration over China during 1960–2002. J Geophys Res, 2007, 112: 11–16
44 Ding Y H, Liu Y J, Song Y F, et al. From MONEX to the global monsoon: A review of monsoon research. Adv Atmos Sci, 2015, 32: 10–31
45 WCRP Report. IPCC AR5: Lessons Learnt for Climate Change Research and WRCP. 2015, 5: 1–85

Newly acquired knowledge on the scientific issues related to climate change over the recent 100 years in China

DING YiHui[1] & WANG HuiJun[2]

[1] *National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;*
[2] *Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*

The issue of the global climate change as well as the climate change in China is of increasingly great concern for various governments, scientific and technological communities and public. Among them, the climate change evidence, mechanism and attribution, climate change impact, as well as climate change prediction and projection have been studied intensively in China. The present paper will concisely review and assess contributions and achievement made by Chinese scientists from the international perspective, which include the following six aspects: (1) the characters tics of regional surface air temperature and tropospheric temperature in China have shown significant increasing trends. The warming rate of the surface temperature is about 1.2℃ per hundred year with its uncertainty ranging of 0.9–1.52℃. (2) The researches of water cycle have indicated that regional precipitation change has had no obvious trend at a hundred-year scale. However, the precipitation pattern has changed since 1970s with more precipitation in western China, whereas in eastern China the pattern of "drought in North and flood in South" has been observed. The annual surface humidity has taken on increasing trend. Both the small pan evaporation and potential evaporation have appeared decreasing trends. The annual runoff of most rivers in eastern China has shown decreasing trends, while that in western China has shown increasing trends. (3) It is indicated that the anthropogenic forcing has produced significant effect on the long-term variation of the East Asian monsoon. The intensity of the East Asian summer monsoon will become stronger and the monsoonal rain belt will migrate northward. (4) The sea level has been affected by the global warming. Since 1980, the rising rate of sea level in China is about 2.9 mm/a, being higher than that of the global mean. (5) The attribution of the climate change has suggested that the surface temperature variation for the last 100 years is the result of the superimposition between the global warming and the natural Pacific Decadal Oscillation (PDO) or other oceanic phenomena. The fast warming rate and the intensity as well as the frequency of some extreme events (such as heat waves) in china are consistent with the global counterparts, mainly influenced by the increase of the green-house gases. (6) The model projections have stated that by the end of 21st century, the global surface temperature will possibly increase by 1.0–3.7℃. The increasing amplitude of surface temperature in China will be 1.3–5.0℃. The precipitation will increase by 5%–14% and the extreme events will more frequently occur.

Finally, the suggestion of scientific problems concerning the climate change in China that need to be furthter studied in the future is put forward: (1) global and regional observation analysis, especially the modes of the sea and the atmospheric circulation as well as their multi-scale variability; (2) interaction between cloud and climate, climate sensitivity and feedback; (3) evolution of paleoclimate and its comparison with the modern climate change as well as its attribution; (4) global and regional water cycle, carbon and nitrogen cycle and their impacts; (5) polar sea ice, ice cover and cryosphere as well as sea level rise; (6) global monsoon system and drought flood disaster; (7) the threshold of the extreme events and climate abrupt change; (8) improving weather-climate integration model and multi-role earth system model.

climate change, Asian monsoon, attribution of climate change, global warming hiatus, projection of climate change

doi: 10.1360/N972015-00638