全球 1.5 和 2℃ 温升时的气温和降水变化预估

胡婷¹, 孙颖^{1*}, 张学斌²

1. 中国气象局国家气候中心, 气候研究开放实验室, 北京 100812;

2. Climate Research Division, Environment and Climate Change Canada, Toronto M3H5T4, Canada

* 联系人, E-mail: sunying@cma.gov.cn

2017-02-24 收稿, 2017-05-17 修回, 2017-05-17 接受, 2017-08-15 网络版发表

国家自然科学基金(41675074)、气候变化专项(CCSF201704)和公益性行业(气象)专项(GYHY201406020)资助

摘要 基于新一代全球气候模式比较计划(CMIP5)的结果, 评估了全球近地面气温和降水在不同温升时, 主要包括1.5和2℃温升时的响应特征. 多模式集合平均结果显示, RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0和RCP8.5情景下, 全球平均气温相对于工业化前升温1.5℃的时间出现在2036, 2028, 2033和2025年, 升温2℃的时间在后3个情景为2049, 2056和2039年, 而RCP2.6情景在2100年前没有达到2℃温升(尽管有些单个的模式试验可以达到). 全球平均气温到达不同温升的时间主要与不同排放路径上达到的辐射强迫和排放浓度有关. 不同情景达到1.5℃(2℃)温升时的辐射强迫和CO₂当量浓度值相近, 分别为2.9~3.0 W/m²(3.7~3.9 W/m²)以及450.6~454.1 ppm(523.0~539.1 ppm). 因此, 基于不同组合的排放路径选择决定了温升阈值出现的时间, 1.5℃温升目标的实现可能需要开发更低的排放路径组合. 利用气候敏感度为指标对不同模式间差异的分析表明, 一般而言, 瞬态气候响应高(偏暖)的模式到达1.5和2℃温升的时间早, 瞬态气候响应低(偏冷)的模式到达的时间晚, 但其他因子也可能影响到达某个特定温升的时间. 进一步对多模式集合的空间分布的研究显示, 在达到同一温升值时, 不同情景驱动下的全球气温和降水变化的分布基本不存在差异, 说明在全球和区域尺度上, 气温和降水的响应特征和高低排放情景的定义(基于2100年的辐射强迫)基本无关. 由此对RCP8.5情景下每升温0.5℃的模式结果分析表明, 随着排放和辐射强迫的增加, 全球气温和降水基本呈现出高纬温度增幅大于低纬、陆地增温大于海洋、湿润的地方降水增多、干旱的地方降水减少等未来气候变暖的普遍特征. 气温每增加0.5℃的区域响应特征基本不存在差异. 这说明, 在全球和区域尺度上, 这些变化基本都是线性的.

关键词 1.5℃, 2℃, 温升, 气温, 降水, 全球气候模式比较计划(CMIP5), 预估

全球气候变化已经对自然生态系统和人类社会经济系统产生重大影响, 预估显示未来气候将继续变暖, 一些极端事件增加, 影响也将更加显著^[1]. 为应对气候变化, 联合国气候变化框架公约(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)“将大气温室气体的浓度稳定在防止气候系统受到危险的人为干扰的水平之下”定为其最终目标. 危险水平的界定成为重要的科学问题. 21世纪初,

以欧盟为首的一些科学家综述了目前有关气候变化对生态系统、社会经济系统等的研究结果, 提出比工业化前变暖2℃是温室气体减排的重要目标^[2], 一旦全球平均升温达到2℃, 将会对人类社会的许多方面产生危险的影响^[3].

随着国际气候变化谈判的逐渐深入, 近几年来, 避免全球气温比工业化前升高2℃逐渐成为全球共识, 相对于工业革命前全球升温超过2℃被认为是存

引用格式: 胡婷, 孙颖, 张学斌. 全球 1.5 和 2℃ 温升时的气温和降水变化预估. 科学通报, 2017, 62: 3098–3111

Hu T, Sun Y, Zhang X B. Temperature and precipitation projection at 1.5 and 2℃ increase in global mean temperature (in Chinese). Chin Sci Bull, 2017, 62: 3098–3111, doi: 10.1360/N972016-01234

在“危险的人为干扰”的标志^[4]。2015年在UNFCCC第21次缔约方会议上, 2℃温升目标首次被正式纳入具备法律约束力的国际条约《巴黎协定》, 其中除要求“将全球平均气温控制在较工业化前升高2℃以内”, 也提出要“力争把温升限制在较工业化前上升1.5℃以内”^[5]。同时, UNFCCC提请政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)编写关于1.5℃温升的特别报告, 1.5℃温升问题成为新的研究热点。

虽然针对1.5℃的研究仍然有限, 但是针对2℃问题已经有很多研究结论, 包括达到这一温升的时间以及气候变化特征、影响和政策选择等多个研究领域^[2,3,6-10]。IPCC第五次评估报告(Fifth Assessment Report, AR5)^[1]指出, 未来21世纪末全球地表气温变化可能超过1.5℃, 其中RCP6.0和RCP8.5下升温有可能超过2℃, 在RCP4.5下多半可能超过2℃, 但在RCP2.6下不太可能超过2℃。AR5还将升温与温室气体浓度相联系, 估算将2100年CO₂当量浓度保持在约450 ppm(1 ppm=1 μL/L, 余同)或以下的排放情景可能将未来升温相对于工业化前水平保持在2℃以下, 高于530 ppm不能实现2℃目标。关于2℃温升背景下中国区域的气候变化研究也获得了很多有意义的结论, 基于不同排放情景以及全球和区域模式的研究发现, 尽管不同研究采用的模式、排放情景或参考时段存在一定差异, 但都得到了一些共性的结论, 即全球温升2℃时, 中国区域的升温 and 降水变化都将高于全球平均, 增温由南向北增加, 其中华北及青藏高原地区升温最显著; 全国平均降水呈增加趋势, 但空间上存在不同的变化特征, 中国北方降水明显增加^[11-18]。最近随着1.5℃温升问题的提出, 有一些研究开始针对该问题作出分析^[19,20], 包括对达到1.5℃时中国区域极端事件的变化等^[21,22]。

从目前的研究来看, 全球温升的研究主要集中在2℃的研究, 而针对1.5℃温升的研究相对较少。研究多是基于多模式集合结果来进行的, 且侧重于分析多模式集合响应的结果, 而对模式结果的不确定性^[23]、情景间差异和排放路径对气候变化的影响研究较少, 这在一定程度上反映出模式研发与模式资料分析两个领域间的交流仍然有待加强。实际上, 当前耦合模式比较计划第五阶段(Coupled Model Inter-comparison Project Phase 5, CMIP5)模式预估的2℃, 不管其出现时间还是对应的气候异常, 模式间的差

异都很大^[23]。同时, 也少有研究讨论主要的气候变量在不同温升时的差异, 尤其是在区域尺度的差异, 而这—问题是回答温升多少对不同地区的政策制定是危险水平的重要科学依据。因此, 本文将利用参与CMIP5的新一代气候模式结果, 对下列科学问题进行研究: (1) 全球年平均地表气温相对于工业革命前上升1.5, 2℃的发生时间; (2) 不同模式达到这些温升时间的差异及可能的原因; (3) 高低排放情景的定义对气温和降水变化分布的影响; (4) 不同温升时全球和区域尺度气温和降水的变化分布特征与存在的差异。为进一步开展全球温升不同背景下不同区域的气候变化特征及未来的减排研究提供基础。

1 资料和方法

1.1 资料

本文使用CMIP5模式资料进行计算。根据资料的可用性和完整性, 选取了25个气候模式的全球气温和降水逐月资料进行分析。选取规则为: (1) 模式结果包含历史气候模拟(historical)以及对应的典型浓度路径(Representative Concentration Pathways, RCP)下的未来情景预估; (2) 每个模式至少有3个不同初始条件模拟的历史气候模拟结果, 模拟时段是1861年1月~2005年12月; (3) 每个模式至少有一个RCP情景的预估结果, 模拟时段是2006年1月~2100年12月。25个模式及其数值模拟试验的基本信息见表1, 关于CMIP5模式以及RCP情景的详细信息可参考文献[24,25]。

文中也使用了RCP Database (Version 2.0.5)提供的1850~2100年全球年平均辐射强迫和各种温室气体浓度数据, 详细信息请参阅<http://tntcat.iiasa.ac.at:8787/RcpDb/>。根据IPCC的定义, 辐射强迫为全球年平均的辐射平衡值相对于1750年的变化, 其中不包括矿物粉尘和土地反照率的影响。

1.2 温升的定义和到达时间

根据UNFCCC的定义, 温升年份指的是全球年均气温相对于工业化前升高达到某一温升的年份。而在具体的温升定义上则有很多的讨论^[26], 包括稳定化(stablization)以后的温度、峰值温度、瞬态(transient)的温度等。同时, 相对于工业化前的升温值的计算, 由于AR5气候模式组在计算相对于1986~

表 1 文中使用的CMIP5 模式以及对应的平衡气候敏感度(ECS)和瞬时气候响应(TCR)值^{a)}

Table 1 Description of CMIP5 models and their equilibrium climate sensitivity (ECS) and transient climate response (TCR) used in this study

模式名	Historical的Run个数	RCPs	ECS(°C)	TCR(°C)
ACCESS1-3	3	RCP4.5, RCP8.5		1.7
BCC-CSM1-1	3	RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5	2.8	1.7
BCC-CSM1-1-m	3	RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5	2.9	2.1
CanESM2	5	RCP4.5, RCP8.5	3.7	2.4
CCSM4	6	RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5	2.9	1.8
CESM1-CAM5	3	RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5		2.3
CESM1-CAM5-1-FV2*	4	RCP4.5		
CNRM-CM5	6	RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5	3.3	2.1
CSIRO-Mk3-6-0	6	RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5	4.1	1.8
EC-EARTH	6(tas)/5(pr)	RCP4.5, RCP8.5		
FGOALS-g2*	4	RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5		1.4
FIO-ESM	3	RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5		
GFDL-CM3	5	RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5	4	2
GFDL-ESM2G*	3	RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5	2.4	1.1
GISS-E2-H	6	RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5	2.3	1.7
GISS-E2-R	6	RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5	2.1	1.5
HadGEM2-ES	4	RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5	4.6	2.5
IPSL-CM5A-LR	6	RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5	4.1	2
IPSL-CM5A-MR	3	RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5		2
MIROC5	5	RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5	4.7	2.2
MIROC-ESM	3	RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5	2.7	1.5
MPI-ESM-LR	3	RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5	3.6	2
MPI-ESM-MR	3	RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5		2
MRI-CGCM3	3	RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5	2.6	1.6
NorESM1-M	3	RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5	2.8	1.4

a) *表示模式仅有气温数据, 没有降水数据. ECR, TCR数据均来自IPCC AR5表9.5

2005年升温的时候, 并没有考虑到现代气候相对于工业化前的气温变化, 所以在其第一和第三工作组报告中均采用了未来相对于1986~2005年模式的变化之外, 再叠加上基于HadCRUT4观测资料得到的现代气候相对于工业化前的0.61 °C 升温^[27]. 这一计算方案的优点是现代气候相对于工业化前的变化都是一样的, 而且当前也有很多关于1.5 °C 的研究采用了这一方案, 具有较高的可比性. 但是, 该方案也存在缺点, 即在实际应用模式结果进行计算时, 每个模式的现代气候相对于工业化前的升温 and 观测并不一样, 而且在工业化早期缺乏大量的观测资料. 所以在本文中, 考虑到未来情景的变化, 我们采用每个模式本身相对于工业化前的气温变化来定义升温, 同时考虑到基于多年平均气候态的气温变化, 这也一致于

IPCC AR5第三工作组关于温升的定义^[26]. 具体而言, 本文关于1.5和2 °C 温升采用如下计算方案: 考虑到大部分模式历史试验模拟的起始年为1861年, 以每个模式1861~1900年共40年作为工业化前时段, 同时以之后每31年的平均值作为该时段中心年(即该时段第16年)的气候期, 以此计算得到每个模式相对于工业化前的升温范围, 再进行多模式集合平均. 因此, 达到1.5 °C 温升指的是某年为中心的31年全球近地面气温均值相比于1861~1900年升温1.5 °C, 并以该中心年(即31年中的第16年)作为1.5 °C 温升年. 升温1.5 °C 指模式中首次出现1.5 °C 的时间, 对现有的大部分情景和模式而言, 此后升温也不会再低于1.5 °C. 同时, 考虑到未来气候变化也需要和当前气候进行比较, 这样更具实用性, 因此以1975~2005年的31年平均作

为现代气候期,同时讨论未来气候相对于当前气候的变化情况.由于每个模式分辨率存在差异,我们将所有的模式资料统一插值到 $5^{\circ}\times 5^{\circ}$ 的网格上,再进行区域平均、温升年份以及气候数据相对于基准气候变化等的计算.在计算全球和中国区域平均时考虑了纬度效应,中国区域选取了国界内的 $5^{\circ}\times 5^{\circ}$ 格点数据进行平均.

2 温升时间以及对应的全球平均气候变化

2.1 多模式集合的结果

图1给出了多模式集合的全球(图1(a))和中国区域(图1(b))平均气温相对于工业化前(1861~1900年)的变化.多模式集合平均结果表明,在RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0和RCP8.5情景下,全球平均气温相对于工业化前升温 1.5°C 的时间分别出现在2036, 2028, 2033和2025年(图1(a)).而对于 2°C 温升, RCP2.6情景下多模式集合值不会超过 2°C ,其余3种情景则分别在2049, 2056和2039年达到并超过 2°C .可以看到,由于不同RCP情景的排放路径存在差别,到达 1.5 和 2°C 的年份并不是按照高排放情景(RCP8.5)到低排放情景(RCP2.6)的定义依次排列, RCP4.5情景的预估结果比

RCP6.0更早达到 1.5 和 2°C 温升.同时,如图中阴影所示,不同模式达到某一温升的时间存在差别,我们将在后文中对此专门进行讨论.

从图1(b)可以看到,中国区域的变化较全球明显.当全球平均气温相对于工业化前升温 1.5°C 时,不同情景下的多模式集合平均值表明,中国区域平均气温相对于工业化前增加约 1.8°C ,此时全球和中国相对于1975~2005年平均的当前气候增温分别约为 0.9 和 1.3°C .全球升温达到 2°C 时,中国区域平均相对于工业化前和现代气候分别增加约 2.4 和 1.9°C .这说明,中国区域的响应要高于全球平均,主要是因为中国区域主要反映了陆地地区的变暖特征.同时也说明,当全球平均达到 1.5 和 2°C 时,中国大部分地区的温升明显更高,需要考虑更高温度的适应计划.这一结论与之前的研究结果一致^[11~15,18].

图2为多模式集合的全球(图2(a))和中国区域(图2(b))平均降水相对于工业化前(1861~1900年)的变化(实线).当全球平均气温相对于工业化前升温 1.5°C 时,在不同的排放情景下,多模式集合平均的全球降水相对于现代气候基准期(1975~2005年)的变化约为 $1.7\%\sim 1.9\%$,中国区域降水变化约为 $2.1\%\sim 2.9\%$;达到温升 2°C 时,相对于现代气候,全球降水增加约

图1 CMIP5 模式集合平均得到的 1861~2100 年地表气温的年均变化(以该年为中心的 31 年均值相对于 1861~1900 年的变化), 1861~2005 年为historical结果(黑实线), 2006~2100 年为RCP2.6(深蓝实线)、RCP4.5(浅蓝实线)、RCP6.0(褐色实线)和RCP8.5(红色实线)情景下的预估结果. (a) 全球; (b) 中国. 阴影表示该结果所有模式的 5%~95% 区间, 图中标出了不同RCP情景下模式集合平均相对于工业化前到达 1.5°C (黑方块)和 2°C (黑星号)的年份. (a) 中括号外给出了到达温升的年份, 括号内为相对于现代气候(1975~2005 年)的变化; (b) 中括号内外分别为到达全球温升时中国区域气温相对于现代气候(1975~2005 年)以及工业化前(1861~1900 年)的变化, 单位为 $^{\circ}\text{C}$

Figure 1 Time series of 31-year-mean annual near-surface air temperature anomalies (relative to 1861~1900) from CMIP5 models averaged over (a) the globe and (b) China. Solid lines denote the CMIP5 multi-model mean for 1861~2005 (black) under historical forcing, and 2006~2100 under RCP2.6 (dark blue), RCP4.5 (light blue), RCP6.0 (brown) and RCP8.5 (red) scenarios. Shadings show the 5%~95% ranges across the distribution of individual model simulations under historical forcing (grey), RCP2.6 (violet), RCP4.5 (sky blue), RCP6.0 (yellow) and RCP8.5 (pink) scenarios, respectively. Black squares and stars show years when global anomalies reach 1.5°C and 2°C under the RCP scenarios, respectively, while values outside (inside) brackets are (a) the years when global anomalies reach 1.5°C and 2°C (the anomalies relative to 1975~2005); and (b) values outside (inside) brackets are anomalies relative to 1861~1900 (1975~2005) over China

图2 CMIP5模式集合平均得到的1861~2100年降水距平百分率的年均变化(以该年为中心的31年均值相对于1861~1900年气候值的变化). 括号内外分别给出了到达全球温升时, 降水相对于现代气候(1975~2005年)以及工业化前(1861~1900年)的变化, 其他符号和图例同图1

Figure 2 Time series of 31-year-mean annual precipitation percentage (relative to 1861–1900) from CMIP5 models averaged over (a) the globe and (b) China. Black squares and stars show years when global anomalies reach 1.5 and 2°C under the RCP scenarios, respectively, while values outside (inside) brackets are precipitation percentage relative to 1861–1900 (1975–2005) over (a) the globe and (b) China. Others are the same as Figure 1

2.5%~2.7%, 中国区域平均降水增加了3.2%~5.3%。这说明, 中国区域的气温和降水变化都高于全球平均的变化, 降水的变化在区域尺度具有更大的不确定性。

2.2 模式间差异对达到温升时间的影响

一般而言, 多模式集合的结果提高了信噪比, 突出了模式对外强迫的响应, 因而可靠程度要远远大于单个模式的结果。但在做气候变化影响等研究时, 由于模式分辨率、所需要的输出的物理量等限制, 符合条件的模式很少, 只能选择较少的模式进行分析和集合, 从而导致了明显的模式间差异的影响, 因此, 我们需要进一步讨论模式间差异对达到温升时间的影响。

气候敏感度是指在给定全球平均辐射强迫条件下, 通常取大气中 CO_2 浓度达到2倍时的辐射强迫所产生的全球平均温度变化^[28]。因此, 气候敏感度的值是衡量模式间差异的重要指标, 不同的气候敏感度, 是导致相同辐射强迫变化时模式响应不同的主要原因^[23,29]。有不同的标准来定义气候敏感度, 包括平衡气候敏感度、有效气候敏感度和瞬时气候响应^[30]。考虑到我们的讨论是基于未来排放随着时间增加的情况, 出现时间在模式中主要是一种瞬变态的变化, 这里取瞬时气候响应(transient climate response, TCR)作为气候敏感度的度量标准, 这也和IPCC AR5讨论变化时的用法相似^[26]。图3给出了各模式达到1.5°C温升的年份和对应模式TCR值之间的关系。可以看到, 综合考虑不同的情景, TCR值与温

升年份之间呈现明显的负相关(相关系数-0.57, 达到95%置信水平), TCR越高, 到达年份越早, 模式的区域响应也更为显著。在2°C温升时, TCR和模式到达温升的年份之间也存在上述相似的联系(图略)。这说明, 各模式达到温升时间的早晚和模式本身的气候敏感度有密切关系, 暖的模式到达的时间早, 冷的模式到达的时间晚。TCR相差1.5°C的模式(如GFDL-ESM2G和CanESM2), 同一情景下达到1.5°C温升的时间可相差30~40年。但是, 由于这里大部分模式在未来的RCP情景下仅仅有1个试验的结果, 气候变率也可能对结果产生明显影响。同时注意到, 在TCR相近的情况下, 模式达到同一温升的时间也存在差别, 如TCR均为2°C的模式, 出现1.5°C温升的时间也可能差别较大。这一方面是由于模式试验个数太少, 内部变率有较大影响, 另一方面也说明可能有其他因子, 包括不同模式的碳循环等对结果产生的影响。这提示我们, 在对温升进行分析时, 要选取尽可能多的模式进行集合, 以消除模式本身误差的影响。此外, 需要注意的是, IPCC报告中估算TCR的模式与最终提交CMIP5预估结果的模式可能存在版本不完全一致的情况, 也会影响TCR值与温升时间的对应关系。

3 不同温升下辐射强迫和温室气体浓度的变化

研究不同温升时辐射强迫和温室气体浓度的变化可以了解排放路径和研究未来排放空间的情况。

图3 RCP情景下22个CMIP5模式的特征, X轴为相对于工业化前(1861~1900年)温升1.5℃的年份, Y轴为瞬时气候响应(TCR)的值, TCR数据来自IPCC AR5表9.5. 不同符号代表不同模式, 蓝色、橙色、绿色和红色分别代表RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0和RCP8.5情景的预估结果

Figure 3 Transient climate response (TCR) versus year when the global surface air temperature anomalies above 1.5 °C relative to 1861–1900 for 22 CMIP5 models under RCP2.6 (blue), RCP4.5 (orange), RCP6.0 (green) and RCP8.5 (red) scenarios, respectively. TCR data are from Table 9.5 of IPCC AR5

大量研究指出, 全球辐射强迫和平均气温变化之间存在很好的关系^[30]. 从图4可以看出, 辐射强迫的演变(实线)和全球平均气温的变化(图1(a))基本一致. 在达到相同温升时, 各RCP情景的辐射强迫值相近, 达到1.5和2℃全球温升时的辐射强迫分别为2.9~3.0和3.7~3.9 W/m². 这清楚地说明, 达到同一个温升时的辐射强迫是基本独立于情景定义(即以达到2100年的辐射强迫来定义高低排放情景)的, 在温升一致的情况下, 辐射强迫的值相近, 也就是说温升时间取决于辐射强迫值. 未来30~50年将采取什么样的排放路径决定了在何种路径的某个时间点达到对应的辐射强迫, 温升时间与RCP8.5和RCP4.5等高低排放情景的定义无关.

进一步分析了包括所有驱动因子的CO₂当量浓度特征(图4中虚线). 达到1.5℃温升时, CO₂当量浓度在不同排放情景下为450.6~454.1 ppm, 达到2℃温升时的CO₂当量浓度范围为523.0~539.1 ppm. 这进一步说明, 这里的温升达到的时间与情景无关, 主要取决

于未来的浓度路径. 在不同的排放组合情况下, 只要CO₂当量浓度相似, 辐射强迫和温升值也相似. 这里要注意到, 我们给出的浓度值是由IPCC资料中心提供. 用来驱动CMIP5模式的情景所应用的浓度路径都是单一的, 模式也没有运行大量的情景试验来对达到1.5℃或者2℃温升的概率进行计算. 但是, 如果考虑排放浓度和温升的关系, 依然可以看到, 未来需要考虑各种低排放情景的排放路径组合, 否则未来在2100年前把温升控制在1.5℃或者2℃以内的可能性会很小. 对多模式结果的进一步分析表明(图5), 在RCP2.6情景家族(430~480 ppm)的代表浓度驱动下, 17个模式仅有6个到2100年可以控制在1.5℃以内, 而有13个模式不会超过2℃. 但是在其他情景下, 所有的模式在2100年前都会超过1.5℃温升, 仅在RCP4.5情景下的25个模式中有4个可以控制在2℃以内. 这一方面从多模式的角度支持了IPCC AR5的结论, 即将2100年CO₂当量浓度保持在约450 ppm或以下的排放情景可能将21世纪的温升相对于工业化前

图4 1850~2100年全球辐射强迫和二氧化碳当量浓度的变化。实线为相对于1750年的全球辐射强迫值变化；虚线为包括全强迫的二氧化碳当量浓度。括号内外分别给出了到达全球温升时，二氧化碳当量浓度和全球辐射强迫的数值。黑色实线和虚线表示历史时期的变化，RCP2.6(深蓝色)，RCP4.5(浅蓝色)，RCP6.0(黄色)和RCP8.5(红色)

Figure 4 Changes in global radiative forcing relative to 1750 (solid lines) and CO₂-equivalent concentration of all forcing agents (dotted lines), respectively. Values outside (inside) brackets are radiative forcing (CO₂-equivalent concentration) in years when the global surface air temperature anomalies above 1.5 and 2°C relative to 1861–1900. Changes under historical forcing, and RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 and RCP8.5 scenarios are shown in black, dark blue, light blue, brown and red colors

水平保持在2℃以下。但是也可以看到，如果要把温升控制在1.5℃，即使是低排放情景的RCP2.6，实现1.5℃的可能性也不大，需要在未来的研究中仔细考虑不同的排放路径组合，提出针对1.5℃的低排放路径组合，制定可能的减排目标。

图5同时也给出了能够实现低于1.5和2℃目标的模式相对应的TCR值，可以看出除了IPCC AR5未提供TCR值的FIO-ESM外，能够实现控制温升目标的模式具有较低的TCR值，即RCP2.6情景下温升不超过1.5℃，RCP4.5情景下温升不超过2℃目标的模式(FGOALS-g2, GFDL-ESM2G, GISS-E2-R)对应的TCR值都不大于1.5℃。这进一步说明了到达温升的时间主要受到了模式自身特征以及排放浓度的影响，现有的4种代表性排放路径实现1.5℃的目标很困难，迫切需要提出更低排放路径的组合。

4 不同温升时全球气温和降水的分布特征

4.1 不同排放情景下的分布特征

未来气温和降水变化的全球地理分布给出了不

图5 模式平衡气候敏感度(ECS)和瞬态气候响应(TCR)值。蓝色五角星和方块分别代表RCP2.6情景下能够实现1.5和2℃控制目标的模式，红色三角代表RCP4.5情景下能够实现2℃控制目标的模式，圆形表示这些模式在RCP2.6情景下没有数据

Figure 5 Individual models and their equilibrium climate sensitivity (ECS) and transient climate response (TCR). Blue stars (squares) represent simulated temperature are not above 1.5°C (2°C) relative to 1861–1990 under RCP2.6 scenario. Red triangles represent simulated temperature is not above 2°C relative to 1861–1990 under RCP4.5 scenario. Circles indicate no simulations under RCP2.6 scenario

同温升时的区域响应特征. 对不同情景下的结果分析表明, 达到相同温升时, 多模式集合平均响应非常相似. 因此, 这里我们给出了具有代表性的RCP4.5和RCP8.5情景下的多模式集合平均的气温和降水距平分布(图6和7). 这两个情景下可以得到的模式个数最多(分别为24个和20个气候模式), 同时也代表了差异最大的低排放和高排放情景. 可以清楚地看到, 在达到同样温升的情况下, 无论是1.5℃(图6(a)和(b))还是2℃(图6(d)和(e)), 不同情景驱动下的全球气温变化分布基本一致, 表现出主要的变暖区在高纬、陆地的变暖大于海洋等和原来研究一致^[1]的未来变暖特征. 中国区域的气温变化显示, 在达到1.5和2℃温升时, 采用相同模式集合平均的两种情景间也具有相似的空间分布特征, 即中国温升大于全球且温升幅度从东南向西北递增, 青藏高原西部存在明显的升温区域. 具体而言, 1.5℃温升时, 青藏高原及其北部以及东北北部升温达到2℃以上; 当全球温升达到2℃时, 青藏高原西部、西北北部出现了中心强度约为3℃的大值中心. 从差异图(图6(c)和(f))上可以看到, 在集合模式的个数足够多的情况下, 不同情景间的变化在全球分布图上仅仅存在很小的差异, 最大的差异中心的值在0.2℃左右, 且绝大多数区域不存在显著差异, 仅2℃温升时非洲北部小范围区域的差异达到95%的置信水平. 这说明, 即使在每个模式只有一个试验的情况下, 多模式集合的结果也表明, 在达到同样的温升时, 不论是全球平均的响应, 还是区域尺度上的响应特征, 都是基本一致的. 也就是说, 区域的温度响应和全球平均一样, 是独立于情景的, 而主要与排放路径有关, 即与某个时段的辐射强迫值有关.

图7显示了降水距平的变化情况. 和气温类似, 降水在不同情景驱动下的变化在达到相同温升时的分布基本一致. 温升1.5℃时的响应主要表现为一些湿润地区(如热带和东亚)降水增加, 以及一些干旱地区降水减少(如副热带和非洲)的特征. 温升2℃时的变化要更明显, 在原本降水多和降水少的地区的变化更为显著, 相似于以前研究^[1]的分布特征. 在1.5和2℃温升背景下, 中国区域内大部分地区降水增加, 东部30°N以南地区降水减少, 且随全球气温升高, 中国区域降水整体增加, 但不同区域响应幅度不同. 有意思的是, 我们同样看到, 不同的情景驱动下, 即使对于降水这样自然变率较大的变量而言, 温升幅

度相同时, 无论是全球平均、还是区域尺度的降水响应特征都非常相似, 不同情景的区域分布差异很小, 均未能通过5%信度的显著性检验. 这进一步提示我们, 在未来的温升影响研究中, 对降水而言, 也一样主要需要关注各种排放路径下的降水变化情况及其产生的影响.

4.2 温升的变化对全球气温和降水分布的影响

前述分析表明, 无论在全球还是在区域尺度, RCP情景的选取对未来达到某一个全球温升时的气温和降水变化基本没有影响, 因此我们选取高排放情景RCP8.5下(22个模式集合)达到以0.5℃为间隔的不同温升的气候响应情况. RCP8.5情景的预估结果可以达到温升3℃以上, 而且该情景下可以获得的模式个数也相对较多.

模式集合结果表明, 每增温0.5℃, 全球气温和降水的区域响应基本一致. 图8给出了1.5~2℃和2.5~3℃时的增温结果作为代表, 其他每增温0.5℃的变化类似(图略). 可以看到, 每增温0.5℃的全球气温变化具有基本一致的地理分布特征, 主要表现为北半球中高纬的增温幅度最大, 陆地大于海洋. 随气温上升, 北半球中高纬变得越来越暖, 陆地区域的增温基本都大于全球平均, 增温幅度从大到小依次为北极地区、北半球中高纬、陆地区域和海洋, 体现了极地的增暖放大现象. 气温每升高0.5℃的降水变化也基本一致, 基本上呈现“干者愈干、湿者愈湿”的特征, 主要是副热带地区降水减少, 热带和其他区域降水增加. 亚洲季风区虽然在副热带, 但也表现出降水增加的情况. 因此, 有意思的是, 温度每增加0.5℃, 气温和降水变化的全球分布都基本是一致的, 是一种近乎线性的变化. 这说明, 在未来考虑温升的影响时, 利用某种情景下的升温 and 尽可能多的模式集合基本可以讨论未来不同区域的变化情况.

5 结论

本文利用25个CMIP5气候模式的历史气候模拟和4种典型浓度路径情景预估结果, 采用多模式集合平均方法分析了全球气温和降水对1.5和2℃温升的响应特征. 得出以下结论.

(1) 在RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0和RCP8.5情景下, 多模式集合平均全球气温变化值分别在2036, 2028, 2033和2025年比工业化前(1861~1900年)升温1.5℃;

图 6 由RCP4.5和RCP8.5下相同模式得到的全球1.5℃((a), (b), 24个模式)和2℃((d), (e), 20个模式)时全球年均气温(以某一年为中心的31年平均值)相对于1861~1990年的变化, 以及两种情景下同一温升时的差异((c), (f)). (f)中交叉网格区域表示该区域的情景差异达到95%置信水平的 t 检验

Figure 6 Distributions of temperature change in years when global temperature above (a) 1.5°C, (d) 2°C relative to 1861–1990 for 24 (20) models ensemble means under RCP4.5 scenario. (b), (e) The same as (a) and (d), but for RCP8.5. (c) The differences between (a) and (b); (f) the differences between (d) and (e). Cross line area in (f) indicates differences exceeding the 5% significance level under t -test

图7 由RCP4.5和RCP8.5下相同的模式得到的全球升温1.5°C((a), (b), 22个模式)和2°C((d), (e), 20个模式)时全球年均降水(以某一年为中心的31年均值)相对于1861~1900年的变化, 以及两种情景下达到同一升温时的差异((c), (f)), 这些差异值均没有达到95%置信水平的 t -检验

Figure 7 The same as Figure 6, but for precipitation anomalies (relative to 1861–1900) in years when global temperature above 1.5°C and 2°C relative to 1861–1900 for 22 (20) models ensemble means. No region has differences exceeding the 5% significance level under t -test

图8 RCP8.5情景下CMIP5模式预估的全球升温2和1.5℃的温度和降水变化差异((a), (c))以及升温3和2.5℃的温度和降水变化的差异((b), (d)). 黑点区域表示多模式集合平均超过了模式间的标准偏差. (a), (b) 温度; (c), (d) 降水

Figure 8 Distributions of global temperature ((a), (b)) and precipitation ((c), (d)) difference when projected global warming from 1.5 to 2°C and from 2.5 to 3°C under the RCP 8.5 scenario. Stippling denotes areas where the magnitude of the multi-model ensemble mean exceeds the inter-model standard deviation

2100年前RCP2.6情景下全球温升没有达到2℃, 其余3种情景则分别在2049, 2056和2039年达到2℃温升. 在1.5℃温升背景下, 中国区域平均气温相对于工业化前增加约1.8℃, 全球降水相对于当前气候(1975~2005年)增加约1.7%~1.9%, 而中国区域降水变化为2.1%~2.9%. 从1.5℃到2℃温升, 中国平均气温升高了0.6℃, 全球和中国区域平均的降水分别增加了0.8%和1.7%. 中国区域的气温和降水变化都较全球更加显著.

(2) 辐射强迫和排放浓度决定了模式达到温升时间的早晚. 同一温升背景下, 各RCP情景对应的辐射强迫值相近, CO₂当量浓度值也比较一致, 达到1.5和2℃全球温升时, 各RCP情景对应的辐射强迫分别为2.9~3.0和3.7~3.9 W/m², CO₂当量浓度分别为450.6~454.1和523.0~539.1 ppm.

(3) 模式达到温升时间的早晚与模式的气候敏感度密切相关. 不同模式在同一情景下达到温升的时间差异较大, 但一般来说, 各模式的瞬时气候响应(TCR)值与温升出现年份之间呈现明显的负相关,

TCR值越高(较暖的模式), 到达年份越早, 模式的区域响应也更为显著, 而TCR值较低(较冷的模式)达到的年份较晚. 不同情景下预估结果显示, 仅RCP2.6情景下有6个模式(17个模式结果)能够保持相对于工业化前升温控制在1.5℃, 其他情景均无法实现1.5℃温升目标. 这提出了开发更低排放情景和路径组合的需求.

(4) 同一温升背景下, 不同情景驱动得到的气温和降水多模式集合平均具有非常相似的空间分布特征, 且量值基本一致. 中国区域气候变化较全球更加显著. 在1.5和2℃温升背景下, 气温呈现全国一致升温的趋势, 且升温幅度由从东南向西北递增, 降水变化较为复杂, 全国大部分地区降水增加, 而在30°N以南的中国东部地区降水减少.

(5) 在全球和区域尺度, CMIP5模式预估得到的气温和降水变化对全球升温的响应基本独立于所采用的情景. 据此, 以RCP8.5情景驱动的22个模式分析全球气温每升高0.5℃时的气温和降水变化表明, 全球气温基本呈现出高纬升温大于低纬, 陆地增温

大于海洋的特征,而降水主要表现为湿润地区增加而干旱地区减少的普遍特征。温度每增加0.5℃的区域响应特征在空间分布和量值上均基本一致,气温和降水基本呈现随全球平均温度线性变化的特征。

致谢 感谢审稿专家提出的建设性意见。感谢气候模式诊断和对比计划以及世界气候研究计划耦合模式工作组提供的CMIP5多模式数据集。

参考文献

- 1 Core Writing Team, Pachauri R K, Meyer L A. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC, 2014. 151
- 2 Meinshausen M, Meinshausen N, Hare W, et al. Greenhouse-gas emission targets for limiting global warming to 2°C. *Nature*, 2009, 458: 1158–1162
- 3 Schneider S H, Semenov S, Patwardhan A, et al. Assessing key vulnerabilities and the risk from climate change. In: Parry M L, Canziani O F, Palutikof J P, et al, eds. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press, 2007. 779–810
- 4 Mann M E. Defining dangerous anthropogenic interference. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2009, 106: 4065–4066
- 5 United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). Adoption of The Paris Agreement, Decision 1/CP.21. 2015
- 6 Joshi M, Hawkins E, Sutton R, et al. Projections of when temperature change will exceed 2°C above pre-industrial levels. *Nat Clim Change*, 2011, 1: 407–412
- 7 Peters G P, Andrew R M, Boden T, et al. The challenge to keep global warming below 2°C. *Nat Clim Change*, 2013, 3: 4–6
- 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, 29: 884–895
- 9 Jaeger C, Jaeger J. Three views of two degrees. *Clim Change Econ*, 2010, 1: 145–166
- 10 Randalls S. History of the 2°C climate target. *Wires Clim Change*, 2010, 1: 598–605
- 11 Jiang D B, Fu Y H. Climate change over China with a 2°C global warming (in Chinese). *Chin J Atmos Sci*, 2012, 36: 234–246 [姜大膀, 富元海. 2°C全球变暖背景下中国未来气候变化预估. *大气科学*, 2012, 36: 234–246]
- 12 Jiang D B, Zhang Y, Sun J Q. Ensemble projection of 1–3°C warming in China (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2009, 54: 3326–3334 [姜大膀, 张颖, 孙建奇. 中国地区 1~3°C变暖的集合预估分析. *科学通报*, 2009, 54: 3870–3877]
- 13 Lang X M, Sui Y. Changes in mean and extreme climates over China with a 2°C global warming. *Chin Sci Bull*, 2013, 58: 1453–1461
- 14 Zhang Y. Projections of 2.0°C warming over the globe and China under RCP4.5. *Atmos Oceanic Sci Lett*, 2012, 5: 514–520
- 15 Zhang L, Ding Y H, Wu T W, et al. The 21st century annual mean surface air temperature change and the 2°C warming threshold over the globe and China as projected by the CMIP5 models (in Chinese). *Acta Meteorol Sin*, 2013, 71: 1047–1060 [张莉, 丁一汇, 吴统文, 等. CMIP5 模式对 21 世纪全球和中国年平均地表气温变化和 2°C 升温的预估. *气象学报*, 2013, 71: 1047–1060]
- 16 Chen H P. Projected change in extreme rainfall events in China by the end of the 21st century using CMIP5 models. *Chin Sci Bull*, 2013, 58: 1462–1472
- 17 Chen X C, Xu Y, Yao Y. Changes in climate extremes over China in a 2°C, 3°C, and 4°C warmer world (in Chinese). *Chin J Atmos Sci*, 2015, 39: 1123–1135 [陈晓晨, 徐影, 姚遥. 不同升温下中国地区极端气候事件变化预估. *大气科学*, 2015, 39: 1123–1135]
- 18 Sui Y, Lang X M, Jiang D B. Temperature and precipitation signals over China with a 2°C global warming. *Clim Res*, 2015, 64: 227–242
- 19 Schleussner C F, Lissner T K, Fischer E M, et al. Differential climate impacts for policy-relevant limits to global warming: The case of 1.5°C and 2°C. *Earth Syst Dyn*, 2016, 7: 327–351
- 20 Schaeffer M, Hare W. Long-term sea-level rise implied by 1.5°C and 2°C warming levels. *Nat Clim Change*, 2012, 2: 1–4
- 21 Guo X J, Huang J B, Luo Y, et al. Projection of heat waves over China for eight different global warming targets using 12 CMIP5 models. *Theor Appl Climatol*, 2017, 128: 507–522
- 22 Guo X J, Huang J B, Luo Y, et al. Projection of precipitation extremes for eight global warming targets by 17 CMIP5 models. *Nat Hazards*, 2016, 84: 2299–2319
- 23 Chen X L, Zhou T J. Uncertainty in crossing time of 2°C warming threshold over China. *Sci Bull*, 2016, 61: 1451–1459
- 24 Taylor K E, Stouffer B J, Meehl G A. An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bull Amer Meteorol Soc*, 2012, 93: 485–498
- 25 van Vuuren D P, Edmonds J A, Kainuma M, et al. The representative concentration pathways: An overview. *Clim Change*, 2011, 109: 5–31

- 26 Clarke L, Jiang K, Akimoto K, et al. Assessing Transformation Pathways. In: Edenhofer O, Pichs-Madruga R, Sokona Y, et al, eds. Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. 413–510
- 27 Hartmann D L, Klein Tank A M G, Rusticucci M, et al. Observations: Atmosphere and surface. In: Stocker T F, Qin D H, 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 Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 159–254
- 28 Bolin B, Houghton J T, Meira-Filho G, et al. Climate Change 1995: IPCC Second Assessment Report: A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. 73
- 29 Collins M, Knutti R, Arblaster J, et al. Long-term climate change: Projections, commitments and irreversibility. In: Stocke T F, Qin D H, 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 Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 1029–1136
- 30 Core Writing Team, Pachauri R K, Reisinger A. Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 104

Summary for “全球 1.5 和 2°C 温升时的气温和降水变化预估”

Temperature and precipitation projection at 1.5 and 2°C increase in global mean temperature

HU Ting¹, SUN Ying^{1*} & ZHANG XueBin²

¹ *Laboratory for Climate Studies, National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100812, China;*

² *Climate Research Division, Environment and Climate Change Canada, Toronto M3H5T4, Canada*

* Corresponding author, E-mail: sunying@cma.gov.cn

Based on climate model outputs from Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5), we investigated the global temperature and precipitation changes when global mean temperature rises by 1.5 and 2°C relative to the pre-industrial period (1861–1900). Multi-model ensemble mean (MME) shows that for the scenarios RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 and RCP8.5, global mean near-surface temperature (GMST) may reach 1.5°C warming relative to the pre-industrial level (1861–1900) around the year 2036, 2028, 2033 and 2025, respectively; and reach 2°C warming in 2049 (RCP4.5), 2056 (RCP6.0) and 2039 (RCP8.5). For RCP2.6 scenario, the 2°C warming could not be seen in the multi-model ensemble mean before 2100, but can be reached in different years in single model simulations including GFDL-CM3, IPSL-CM5A-LR, IPSL-CM5A-MR and MIROC-ESM. The timing when the GMST reaches a specific warming threshold is primarily related to radiative forcing and CO₂-equivalent concentrations, which show similar value when the GMST rises by the same value. Projections under all RCPs from 25 CMIP5 models show that only 6 models under RCP2.6 scenario can project a warming lower than 1.5°C relative to the pre-industrial era before 2100, while the temperature increase under other three scenarios will be more than 1.5°C. It is therefore necessary to develop a set of lower emission scenarios to limit the global warming below 1.5°C. The investigations on inter-model differences show that the model with large transient climate response (TCR), also known as warm models, may reach the 1.5 and 2°C temperature increase earlier than those with low TCR (cold models), though other factors can also affect the model to reach 1.5 or 2°C temperature increase. For the future changes of temperature and precipitation at global scale, the MME results show little distinction among different scenarios when GMST rises by the same value, indicating that the global and regional response characteristics of temperature and precipitation are independent of the RCP scenarios definition (defined by the radiative forcing by 2100). Therefore, it is possible to investigate the changes in temperature increase 0.5 under RCP8.5 scenarios. The results show that regional responses are almost the same when GMST rises by each additional 0.5°C, indicating that the temperature and precipitation will essentially change linearly. These changes are characterized by more temperature increase in higher latitudes than in low latitudes, more temperature rise in land than in ocean, and increased precipitation in wet areas and decreased precipitation in dry areas, as was commonly detected in multiple studies. This suggests that the global warming impacts could be evaluated based on the multi-model ensemble projections under any RCP scenario with as much as a collection of models. This study also shows that in China, the regional mean temperature and precipitation changes are larger than the global mean when the GMST rises by 1.5 and 2°C. The temperature may increase across all China, with the warming increases from southeast to northwest. The precipitation will increase in most areas but it may decrease in the eastern part south of 30°N, based on the MME results.

1.5°C, 2°C, global warming, temperature, precipitation, Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5), projection

doi: 10.1360/N972016-01234