

陈晓晨, 徐影, 姚遥. 2015. 不同升温阈值下中国地区极端气候事件变化预估 [J]. 大气科学, 39 (6): 1123–1135. Chen Xiaochen, Xu Ying, Yao Yao. 2015. Changes in climate extremes over China in a 2°C, 3°C, and 4°C warmer world [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (6): 1123–1135, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1502.14224.

不同升温阈值下中国地区极端气候事件变化预估

陈晓晨¹ 徐影^{2,3} 姚遥⁴

1 湖南省气候中心, 长沙 410118

2 中国气象局国家气候中心, 北京 100081

3 中国气象局气候研究开放实验室, 北京 100081

4 清华大学地球系统科学研究中心, 北京 100084

摘 要 本文基于耦合模式比较计划第五阶段 (CMIP5) 的 18 个全球气候模式的模拟结果, 预估了全球平均气温在不同典型浓度路径 (RCPs) 下达到 2°C、3°C 和 4°C 阈值时, 中国地区气温和降水的变化, 并采用了具有稳定统计意义的 27 个极端气候指标定量评估了全球平均气温达到不同阈值时, 中国地区极端气候事件的可能变化。结果表明, 未来我国平均气温增幅将高于全球平均增暖, 极端暖事件 (如暖夜、暖昼、热带夜) 明显增多, 达到 4°C 阈值时, 暖夜指数相比参考时段增加约 49.9%。极端冷事件 (如冷夜、冷昼、霜冻) 减少。随全球气温升高, 中国北方平均降水增多。在不同升温阈值下, 中国地区降水的极端性都体现出增强的趋势, 强降水事件发生频率 (如中雨日数、大雨日数) 和强度 (如五日最大降水量、极端强降水量) 都明显增加。随升温阈值的升高, 这些变化幅度更大, 在 RCP8.5 情景下全球升温 3°C 和 4°C 时, 中国平均五日最大降水分别增加 12.5 mm 和 17.0 mm。我国西南地区极端降水强度的增幅高于其他地区。

关键词 阈值 极端气候 预估

文章编号 1006-9895(2015)06-1123-13

中图分类号 P467

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1502.14224

Changes in Climate Extremes over China in a 2°C, 3°C, and 4°C Warmer World

CHEN Xiaochen¹, XU Ying^{2,3}, and YAO Yao⁴

1 Hunan Climate Center, Changsha 410118

2 National Climate Center, Beijing 100081

3 Laboratory for Climate Studies, China Meteorological Administration, Beijing 100081

4 Center for Earth System Science, Tsinghua University, Beijing 100084

Abstract Due to human-induced global warming, global Average Surface Air Temperature (ASAT) will reach certain thresholds with reference to the pre-industrial period. Quantitative assessments of climate extremes across China when reaching these thresholds are important indicators in disaster risk management and policymaking. In this study, based on outputs of 18 General Circulation Models (GCMs) from the Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5), 27 climate-extreme indices computed with a consistent methodology are used to quantify the changes in the mean and extreme climate across China when the 2°C, 3°C, and 4°C thresholds under different Representative Concentration

收稿日期 2014-07-09; **网络预出版日期** 2015-02-05

资助项目 公益性行业 (气象) 科研专项 GYHY201306019, 国家科技支撑项目 2014BAJ01B01, 中国气象局气候变化专项 CCSF201525, 中国瑞士合作项目 ACCCII

作者简介 陈晓晨, 女, 1989 年出生, 硕士, 主要从事气候变化研究。E-mail: chenxiaochen_ams@hotmail.com

通讯作者 徐影, E-mail: xuying@cma.gov.cn

Pathways (RCP) scenarios are exceeded. In general, the ASAT warms faster over China than the global mean in the 21st century. Extreme warm events (e.g., warm nights, warm days, and tropical nights) increase greatly, while extreme cold events (e.g., cold nights, cold days, and frost days) decrease. When the 4°C threshold is exceeded, warm nights index (spatially averaged over China) are projected to show an increase of about 49.9% relative to the reference period. Accompanied by the increase in global mean temperature, the northern part of China will see more precipitation when the 2°C threshold is exceeded. Extreme precipitation shows obvious intensification in both frequency and magnitude when different temperature thresholds are exceeded. China is dominated by lengthening heavy and very heavy precipitation days and increasing maximum consecutive 5-day precipitation and extremely wet days. Under the RCP8.5 scenario, the maximum consecutive 5-day precipitation amount increases by 12.5 mm and 17.0 mm when the global ASAT becomes 3°C and 4°C warmer, respectively. The changes are found to be more pronounced under higher temperature thresholds. Southwest China, however, exhibits larger changes in the magnitude of extreme precipitation than other regions.

Keywords Threshold, Climate extremes, Projection

1 引言

为有效减缓和应对气候变化、控制温室气体排放,包括欧盟成员国在内的一百多个国家和众多国际组织已经将避免 2°C 全球变暖(相对于工业化前)作为温室气体减排的目标(Meinshausen et al., 2009)。一旦全球平均气温(ASAT)达到 2°C 升温阈值,将会对包括极端天气和气候事件、冰川、海平面、人体健康等在内的多个方面产生深刻的影响(Schneider et al., 2007),故 2°C 阈值被认为是一个气候变化影响的危险水平阈值(Joshi et al., 2011)。但从 IPCC 第五次评估报告(AR5)(IPCC, 2013)的评估结果来看,到 21 世纪末,全球平均的 ASAT 在高排放情景(RCP8.5)下可能升温 4°C(相对于工业化前),这样的温度升幅将大大超过了被认为保障全球气候变化安全的 2°C 阈值。The World Bank(2012)的最新报告指出:如果全球达到 4°C 升温阈值,在很多地区将会出现破纪录的高温热浪事件和极端干旱、洪涝事件,并将对生态系统构成严峻的威胁,因此世界各国必须尽一切努力避免出现 4°C 增温以防止带来灾难性的后果。而以往的研究表明,中国的温升幅度要显著大于全球平均(Zhou and Yu, 2006),是世界上受气候变化影响最为严重的地区之一(Zeng et al., 2008)。因此,深入分析全球较高升温阈值下中国的气候变化情况,特别是对极端气候事件变化的认识显得尤为现实而紧迫。

全球气候模式作为预估未来气候变化的重要工具,被广泛应用在相关的研究工作中。基于耦合模式比较计划第三阶段(CMIP3)全球气候模式的模拟数据,发现在 2°C 全球变暖背景下,中国气候变暖的幅度比全球平均更大,在模式集合平均(MME)结果中,三种排放情景下中国地区的 ASAT

上升 2.7°C~2.9°C,降水增加 3.4%~4.4%,各季节内也均为增加趋势(姜大膀和富元海, 2012)。随着 IPCC AR5 的发布,一些学者基于耦合模式比较计划第五阶段(CMIP5)全球气候模式的模拟数据得到了诸多有意义的结论:如胡琴等(2014)的评估结果表明,CMIP5 模式对青藏高原地区年均地表气温低估了约 2.3°C,对年均降水模拟偏多约 1.3 mm d⁻¹;金晨曦和周天军(2014)的评估结果表明,参加 CMIP5 的四个中国模式可以合理再现东亚夏季风的高低层环流系统;周秀华和肖子牛(2014)基于 CMIP5 模式的结果预估了云南地区 21 世纪前半叶的气候变化。Zhang(2012)基于 17 个 CMIP5 模式的结果分析了全球和中国地区在 RCP4.5 排放情景下到达 2°C 的时间及空间分布特征。张莉等(2013)利用 29 个 CMIP5 模式的结果分析了在三种典型浓度路径(RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5)下 21 世纪全球与中国地区平均的 ASAT 变化特征和不同幅度增温出现的时间,并进一步分析了预估结果的不确定性。

除了上述学者关注的气候平均态的变化,极端气候事件变化的影响更为关键(Lang and Sui, 2013),极端气候事件对气候变暖的响应相对平均气候更加敏感(Yao et al., 2013)。基于最新的 CMIP5 模式数据的预估结果:21 世纪中国地区极暖日数和热浪事件显著地增多,而极冷日数和寒潮事件则呈减少的趋势(Yao et al., 2012);降水的极端性增强,其中全国范围内毛毛雨频次明显减少,中雨、大雨和暴雨的发生频次显著增加(Chen, 2013)。上述极端事件变化的强度很大程度上依赖于未来辐射强迫的变化,在较高典型浓度排放路径(RCP8.5)情景下,极端事件的变化更加显著(Li et al., 2013)。21 世纪极端气候事件的显著变化,增加了未来中国地区与天气气候相关灾害发生的风险。

未来不同升温阈值下中国地区极端气候事件的定量化分析对管理灾害风险及政策制定有重要的指示意义，然而，这方面的研究目前仍很少见。此外，中国地区的未来气候变化呈现明显的区域化差异（Sui et al., 2014）。对应全球 2°C 变暖，中国地区变暖从南向北加强，在青藏高原地区存在一个升温大值区；年平均降水在华南大部分地区减少，而在其余地区增加（姜大膀和富元海，2012）；东部沿海地区将更可能遭受与高温相关的疾病和死亡，华南地区面临洪涝和干旱等灾害的风险将更高（Li et al., 2013）。因此，本文利用 18 个 CMIP5 全球气候模式的结果，将中国地区合理划分为 8 个子区域，深入认识在全球不同升温阈值下中国各个区域的气候变化情况，特别是极端气候事件的变化，为更好地适应和应对气候变化和参与国际气候变化谈判提供科学依据。

2 数据和方法

对于极端气候事件的研究需要使用逐日分辨率以及同时具备历史和未来三种情景下的模拟数据，因此，从多个 CMIP5 全球气候模式中（Taylor et al., 2012），综合考虑选取了 18 个全球气候模式的历史和未来的数值模拟结果，模式资料的详细信息见表 1，更多细节可参阅 [http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/\[2015-06-11\]](http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/[2015-06-11])。

表 1 18 个 CMIP5 全球气候模式基本信息

Table 1 Information on the 18 CMIP5 (the Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) GCMs

模式名称	单位(ID)及所属国家	水平分辨率
BCC-CSM1.1	BCC, 中国	128×64
BNU-ESM	GCESS, 中国	128×64
CanESM2	CCCMA, 加拿大	128×64
CCSM4	NCAR, 美国	288×192
CNRM-CM5	CNRM-CERFACS, 法国	256×128
CSIRO-Mk3-6-0	CSIRO-QCCCE, 澳大利亚	192×96
GFDL-ESM2G	NOAA GFDL, 美国	144×90
GFDL-ESM2M	NOAA GFDL, 美国	144×90
HadGEM2-ES	MOHC, 英国	192×145
IPSL-CM5A-LR	IPSL, 法国	96×96
IPSL-CM5A-MR	IPSL, 法国	144×143
MIROC5	MIROC, 日本	256×128
MIROC-ESM	MIROC, 日本	128×64
MIROC-ESM-CHEM	MIROC, 日本	128×64
MPI-ESM-LR	MPI-M, 德国	192×96
MPI-ESM-MR	MPI-M, 德国	192×96
MRI-CGCM3	MRI, 日本	320×160
NorESM1-M	NCC, 挪威	144×96

21 世纪不同升温阈值是相对于工业化前的气候而言，兼顾考虑各模式历史气候模拟的起始时间不同，本文统一选取 1861~1900 年平均作为 21 世纪不同升温阈值的参考时段。而在分析不同升温阈值下未来中国地区极端气候事件变化时，参考 IPCC AR5（2013）的定义，选取 1986~2005 年作为当前气候参考时段。为便于分析，使用双线性插值方法将所有模式结果统一插值到 1°×1°的格点上。MME 的计算采用国际上广泛使用的等权重平均方法。

本文分析时选取了 27 个国际上常用的极端气候指数，用来描述中国地区的极端气候事件。这些极端气候指数的详细信息见表 2，指数的定义采用气候变化检测和指标专家组（ETCCDI）的标准（Zhang et al., 2011）。

此外，由于气候变化对各区域的影响有所不同，具有明显的区域特征，本文参考第二次气候变化国家评估报告（2011），将中国地区分为华北（NC）、东北（NEC）、华东（EC）、华中（CC）、华南（SC）、西南（SWC2）、西北（NWC）、青藏高原（SWC1）8 个区域（图 1），更直观地呈现不同区域对气候变化的响应。

3 结果分析

3.1 不同升温阈值发生时间

图 2 所示为模式模拟的全球平均 ASAT 在过去及未来三种不同 RCP 排放情景下的变化曲线。由于全球平均 ASAT 具有明显的年际变率特征，在某一年到达某升温阈值并不能表示全球气候系统的平

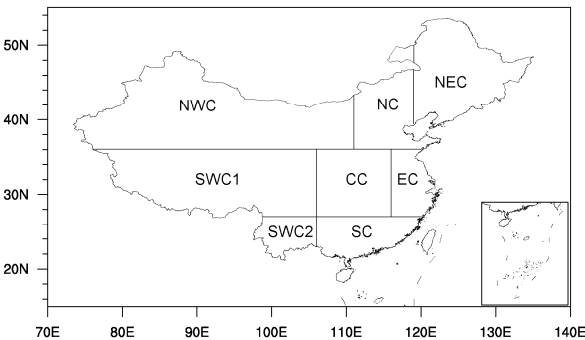


图 1 中国 8 个分区分布示意图

Fig. 1 Distribution of eight sub-regions in China. NWC, NC, NEC, SWC1, CC, EC, SWC2, and SC represent Northwest China, North China, Northeast China, Tibetan Plateau, Central China, East China, Southwest China, and South China, respectively

表 2 27 个极端气候事件指数定义 (ETCCDI)

Table 2 Definition of the 27 extreme climate indices defined by the joint Commission for Climatology, Climate and Ocean: Variability, Predictability and Change, and Joint Technical Commission for Oceanography and Marine Meteorology (CCl/CLIVAR/JCOMM) Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI)

名称	英文缩写	定义	单位
日最高气温最大值	TXx	每年日最高气温的最大值	°C
日最低气温最大值	TNx	每年日最低气温的最大值	°C
日最高气温最小值	TXn	每年日最高气温的最小值	°C
日最低气温最小值	TNn	每年日最低气温的最小值	°C
冷夜指数	TN10p	每年日最低气温小于基准期内 10%分位值的天数百分率	%
暖夜指数	TN90p	每年日最低气温大于基准期内 90%分位值的天数百分率	%
冷昼指数	TX10p	每年日最高气温小于基准期内 10%分位值的天数百分率	%
暖昼指数	TX90p	每年日最高气温大于基准期内 90%分位值的天数百分率	%
温度日较差	DTR	每年日最高气温与最低气温的差的平均值	°C
生长季长度	GSL	每年第一次连续六天以上日平均气温大于 5°C 至第一次连续六天日平均气温小于 5°C 的天数	d
霜冻指数	FD	每年日最低气温小于 0°C 的全部天数	d
冰冻日数	ID	每年日最高气温小于 0°C 的全部天数	d
夏季日数	SU	每年日最高气温大于 25°C 的全部天数	d
热带夜数	TR	每年日最低气温大于 20°C 的全部天数	d
持续暖期指数	WSDI	每年至少连续六天最高气温大于基准期内 90%分位值的天数	d
持续冷期指数	CSDI	每年至少连续六天最低气温小于基准期内 10%分位值的天数	d
日最大降水量	RX1day	每年最大的日降水量	mm
五日最大降水量	RX5day	每年最大的连续五天降水量	mm
降水强度	SDII	年降水量与降水日数 (日降水量≥1 mm) 比值	mm d ⁻¹
降水日数	R1mm	每年日降水量大于等于 1 mm 的天数	d
中雨日数	R10mm	每年日降水量大于等于 10 mm 的天数	d
大雨日数	R20mm	每年日降水量大于等于 20 mm 的天数	d
连续干日	CDD	每年最长连续无降水日数 (日降水量<1 mm)	d
连续湿日	CWD	每年最长连续降水日数 (日降水量≥1 mm)	d
强降水量	R95p	每年大于基准期内 95%分位点的日降水量的总和	mm
极端强降水量	R99p	每年大于基准期内 99%分位点的日降水量的总和	mm
湿日总降水量	PRCPTOT	每年大于等于 1 mm 的日降水量的总和	mm

均状态已到达该阈值,故图中的温度距平序列均已做了 9 点滑动平均处理,以此来表征全球平均的 ASAT 相对稳定的演变趋势。如无特殊说明,下文的结果均做了类似的 9 点平滑处理。图中蓝色实线为 MME 变化曲线,彩色虚线为不同模式的变化曲线。结果表明,虽然在 RCP2.6 排放情景下 MME 并未在 21 世纪达到 2°C 升温幅度,但仍有 7 个模式在 21 世纪上半叶(2050 年之前)超过了 2°C 的升温阈值。MME 在 RCP4.5 和 RCP8.5 排放情景下均超过 2°C,发生时间分别是 2046 年和 2038 年,在 RCP8.5 排放情景下达到 3°C 升温阈值的时间是 2060 年,而在 2080 年升温幅度超过了 4°C,这与前人的研究结果基本一致(Zhang, 2012; 张莉等, 2013)。从单个模式的模拟结果看,RCP4.5 排放情景下只有 GFDL-ESM2G、GFDL-ESM2M 未达到 2°C 升温,RCP8.5 排放情景下所有模式在 21 世纪

上半叶都超过 2°C。在 RCP8.5 排放情景下,所有模式都达到了 3°C 的增温幅度,但有 3 个模式并未在 21 世纪超过 4°C。

据上述分析,将全球平均的 ASAT 在 21 世纪达到不同升温阈值的情形分为四种:在 RCP4.5 排放情景下达到 2°C 增温(以下简称 RCP4.5-2°C)、在 RCP8.5 排放情景下达到 2°C、3°C、4°C 增温(以下分别简称 RCP8.5-2°C、RCP8.5-3°C、RCP8.5-4°C)。在这四种不同升温阈值情形下(RCP4.5-2°C、RCP8.5-2°C、RCP8.5-3°C 和 RCP8.5-4°C) MME 预估全球平均降水分别增加 2.9%、2.8%、4.3%和 6.1%,即随升温阈值升高全球平均降水增加。这也与过去研究认为的全球平均降水随温度变化关系为 1%~3%/°C 的结论相一致(Mitchell et al., 1987; Held and Soden, 2006),未来降水的这种变化主要受大气能量平衡变化及与环流、湿度和温度的相互作

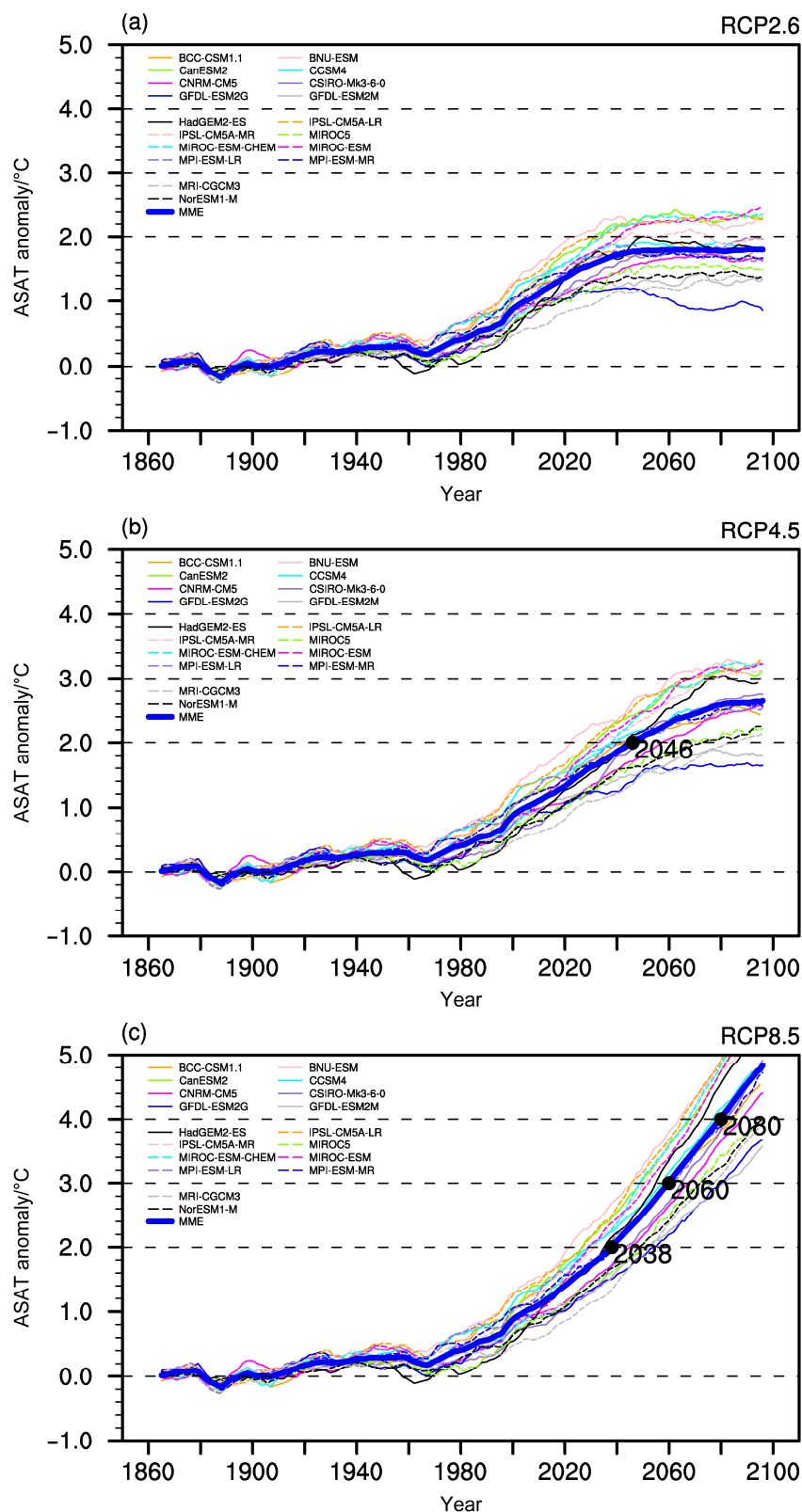


图2 (a) RCP2.6、(b) RCP4.5 和 (c) RCP8.5 排放情景下全球平均的 ASAT 距平序列 (单位: °C) (相对于 1861~1900 年基准期)

Fig. 2 Time series of global annual average surface air temperature (ASAT) anomalies (units: °C) under scenarios (a) RCP2.6 (Representative Concentration Pathways), (b) RCP4.5, and (c) RCP8.5, with reference to the baseline climatology during 1861–1900. MME represents the results of multi-model ensemble mean value

用所影响 (Previdi, 2010; O’Gorman et al., 2012)。

3.2 不同升温阈值下中国地区气候平均态的变化

图 3 给出全球平均 ASAT 达到不同升温阈值时中国及 8 个分区温度和降水的相应变化。结果表明, 在四种不同升温阈值情况下, 中国地区平均的 ASAT 相对工业化前的增温幅度分别达到 2.6°C、2.5°C、4.0°C、5.2°C, 均超过相应的全球升温阈值。东北、西北、华北以及青藏高原地区在四种不同升温阈值情况下变暖幅度高于中国其他地区, 这与前人研究的结论相一致 (Jiang et al., 2009; Chen and Frauenfeld, 2014)。这四个地区在 RCP4.5-2°C 和 RCP8.5-2°C 情况下增幅均超过 2.6°C; 西北地区增幅最大, 在 RCP8.5-4°C 情形下可达 5.7°C。而华东、华南、华中和西南地区在四种不同升温阈值情况下变暖幅度相对较小。华南和西南地区在 RCP8.5-2°C 情形下增暖均为 1.9°C, 均低于全球平均增暖。综合来看, 中国 8 个分区表现为一致性增暖, 高纬度和高海拔地区对全球变暖的响应强于中低纬地区; 全球升温阈值越高, 中国各地区增暖幅度越大。

从图 3b 可见, 未来全球增暖背景下, 中国地区平均降水表现为增多的趋势, 在 RCP4.5-2°C、

RCP8.5-2°C、RCP8.5-3°C 和 RCP8.5-4°C 情形下, 中国地区平均降水相对工业化前分别增加 3.5%、2.0%、5.5%、8.9%, 除了 RCP8.5-2°C 外, 中国平均降水在其他情形略大于同期全球平均降水的变化。区别于平均气温的变化, 不同升温阈值下中国地区平均降水的变化呈现出明显的区域特征。当全球平均 ASAT 在 RCP4.5 排放情景下升高 2°C 时, MME 预估我国东北、华北、西北和青藏地区的降水增多, 华南降水减少, 华东、华中和西南地区降水无明显变化, 即从整体上我国将表现为南涝北旱格局减轻的趋势, 其中西北地区变化幅度最大, 在 RCP8.5-4°C 情形下增幅约为 18.0%。随升温阈值的升高, 我国北方和高原地区的降水增幅呈增大趋势, Chen and Sun (2009) 利用 CMIP3 模式数据也得出了类似的预估结果。需要指出的是, 全球气候模式预估未来降水的局地变化时存在较大的不确定性, 在南方大部分地区, 模式预估结果间的一倍标准差 (图 3b 中竖线范围) 高于模式集合平均预估的变化幅度, 这主要是由于中国各区域的降水本身具有较强的年代际振荡 (Xu and Xu, 2012), 对于降水变化幅度相对较小的地区, 每个模式只使用

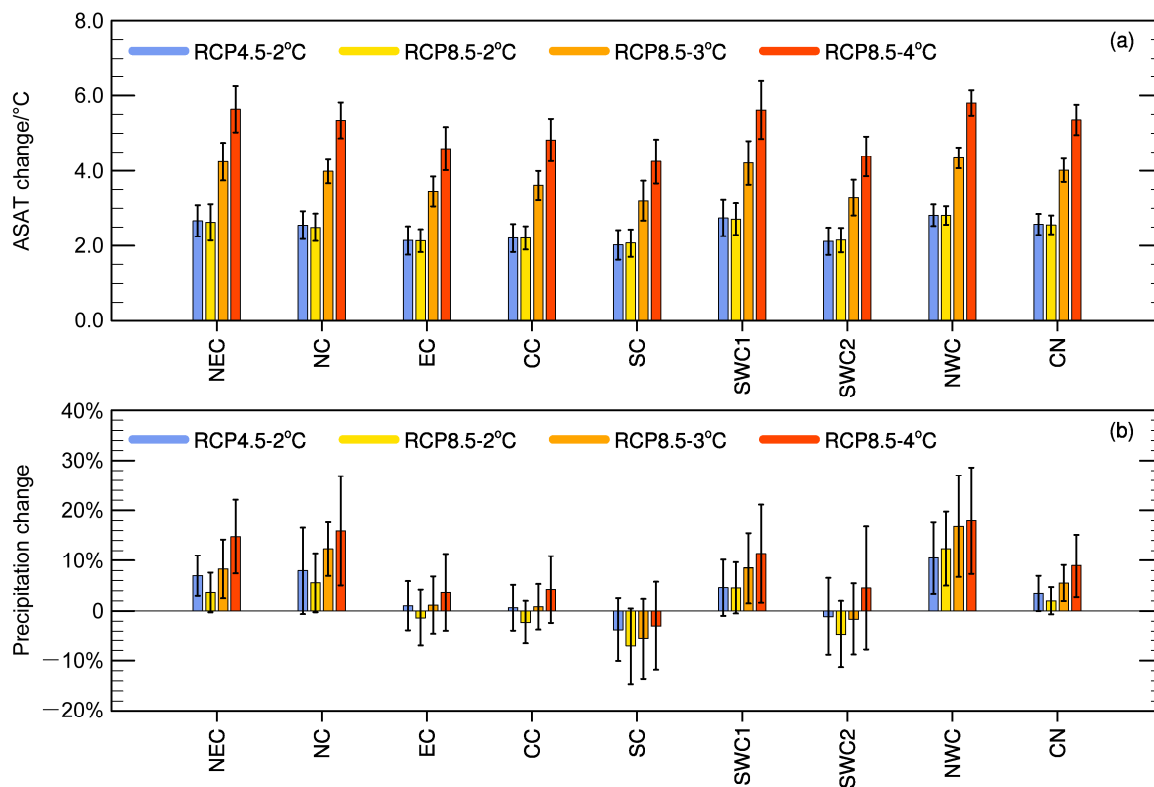


图 3 中国 8 个地区在不同升温阈值下年平均 (a) 气温的变化 (单位: °C) 和 (b) 降水的变化 (单位: %) (相对于 1861~1900 年基准期)

Fig. 3 Changes in annual (a) ASAT (units: °C) and (b) average precipitation (units: %) over eight sub-regions in China under different temperature thresholds, with reference to the baseline climatology during 1861–1900

一个集合成员时, 内部变率会对结果产生相对较大的影响 (Deser et al., 2012)。

3.3 不同升温阈值下中国地区极端温度事件的变化

在全球变暖背景下, 一些地区的极端气候事件的变化可能比气候平均态的变化更加显著, 从而对自然环境和人类生活造成深远影响。因此, 有必要深入分析不同升温阈值下中国地区极端气候事件的变化。本文选取了 27 个极端气候指数来全面地综合考察极端气候事件的变化特征, 其中有 16 个指数用于衡量极端气温事件, 为便于分析, 根据这些指数的定义将这 16 个指数分为三大类。

第一类表征极端气温的指数包括日最高气温最大值 (TXx)、日最高气温最小值 (TXn)、日最低气温最大值 (TNx)、日最低气温最小值 (TNn) 和温度日较差 (DTR)。这类指数主要用来表现极端气温的强度特征以及最高、低温之间的相对变化。图 4 给出了多模式预估的这一类指数在全球不同升温阈值下中国地区的变化情况。为了反映模式预估结果的不确定性, 用盒须图表示 18 个模式模拟的差异范围, 盒须图的上、下虚线分别表示模式最高、最低预估范围, 箱体的上、下边界分别表示多模式结果的上、下四分位, 即箱体的范围反映了多模式预估结果的 50% 可能性区间。

在不同升温阈值情形下, 中国及各个区域平均的 TXx、TXn、TNx、TNn 均呈现增加的特征, 且随着阈值的增加, 这些指数的增加幅度更大, 但各个指数的表现不同, 同一指数也表现出区域性差异。这些指数中, TNn 的增幅最大, TNx 的增幅最小, 在 RCP8.5 排放情景下全球平均 ASAT 相对工业化前升高 4°C 时, MME 预估中国地区平均 TNn 相对参考时段 (1986~2005 年) 将升高 5.3°C, TNx 的增幅为 4.3°C, 相比 TNn 的增暖约小 1.0°C, TXx 和 TXn 的变化则介于这两者之间, 分别为 4.4°C 和 4.6°C。从各分区的变化情况来看, TXn 和 TNn 的区域性差异高于 TXx 和 TNx, 且在较高升温阈值情形下, 差异更大, 如 RCP8.5-4°C 情景下, MME 预估东北地区的 TNn 相对参考时段的增暖为 6.5°C, 而对华南地区为 3.3°C, 二者相差近一倍。由于 TXn 和 TNn 一般发生在冬季, 这一变化特征也同未来冬季北半球高纬度地区增暖高于中低纬度地区这一预估结论相一致 (Knutti and Sedláček, 2013)。

DTR 是每日最高气温与最低气温的年平均值, 反映了昼夜温差的平均状态。在未来不同升温阈值

情形下, 中国地区平均的 DTR 略有减少, 但不显著, 当全球平均的 ASAT 升高 4°C 时, MME 预估中国地区平均 DTR 将减少 0.1°C。MME 对中国各分区在未来不同升温阈值情形下的预估尽管变化情况不一, 但均不显著, 最多不超过 0.3°C。我国北方 (NEC、NC 和 NWC) 和青藏高原地区由于最低气温的增暖幅度略大于最高气温, 故 DTR 略有减少, 减少幅度的不确定性随升温阈值的升高而增大。

第二类表征极端气温的指数分别为冷夜指数 (TN10p)、暖夜指数 (TN90p)、冷昼指数 (TX10p) 和暖昼指数 (TX90p)。这类指数以气候基准期的百分位数作为表示温度极端性的阈值, 在该定义下, 通过统计极端事件发生的频率特征, 从而可以反映出温度在概率分布左右两端特征的变化情况。从图 5 可以看出, 在未来不同升温阈值情景下, TN90p、TX90p 表现为显著地增多, 即表明将会发生更多的暖夜和暖昼, 且随着阈值的升高而显著地增多; TN10p、TX10p 则表现为一定程度地减小, 即冷夜和冷昼的发生频率将有所减少, 且随着阈值的升高减少幅度越大。在这四个指数中, TN90p 的变化最为明显, 当全球平均的 ASAT 升高 4°C 时, MME 预估中国区域平均的 TN90p 将增加 49.9%。当前的气候模式对极端气候的模拟存在较大的不确定性, 各单个模式间的结果差异较大, 且随升温阈值的升高, 模式之间的差异越大。这四个指数中, TX90p 的不确定性范围最大, TX10p 相对较小。

第三类表征极端气温的指数分别为生长季节长度 (GSL)、霜冻指数 (FD)、夏季日数 (SU)、热带夜数 (TR)、持续冷期指数 (CSDI)、持续暖期指数 (WSDI) 和冰冻日数 (ID)。这类指数以某一具体的温度值为衡量极端事件的阈值, 这些阈值 (如 0°C、25°C 等) 对作物生长, 人类生活等都具有重要的指示意义, 通过统计超过这些固定阈值的事件的频率, 可以反映一部分极端气温事件的持续性特征。从图 6 可以明显看出, 中国地区平均的 GSL、SU、TR、WSDI 表现为显著增加的变化特征, 增幅随着阈值的升高而增加, 而 FD、ID 则表现为显著减少的变化特征, 随着阈值的升高而减少幅度越大。中国地区平均的 CSDI 为减少趋势, 但并不显著, 不同升温阈值间的差异也不明显。

在不同升温阈值情形下, 除华南地区 GSL 增加较小外, 中国其他分区的 GSL 都有明显增多, 其中

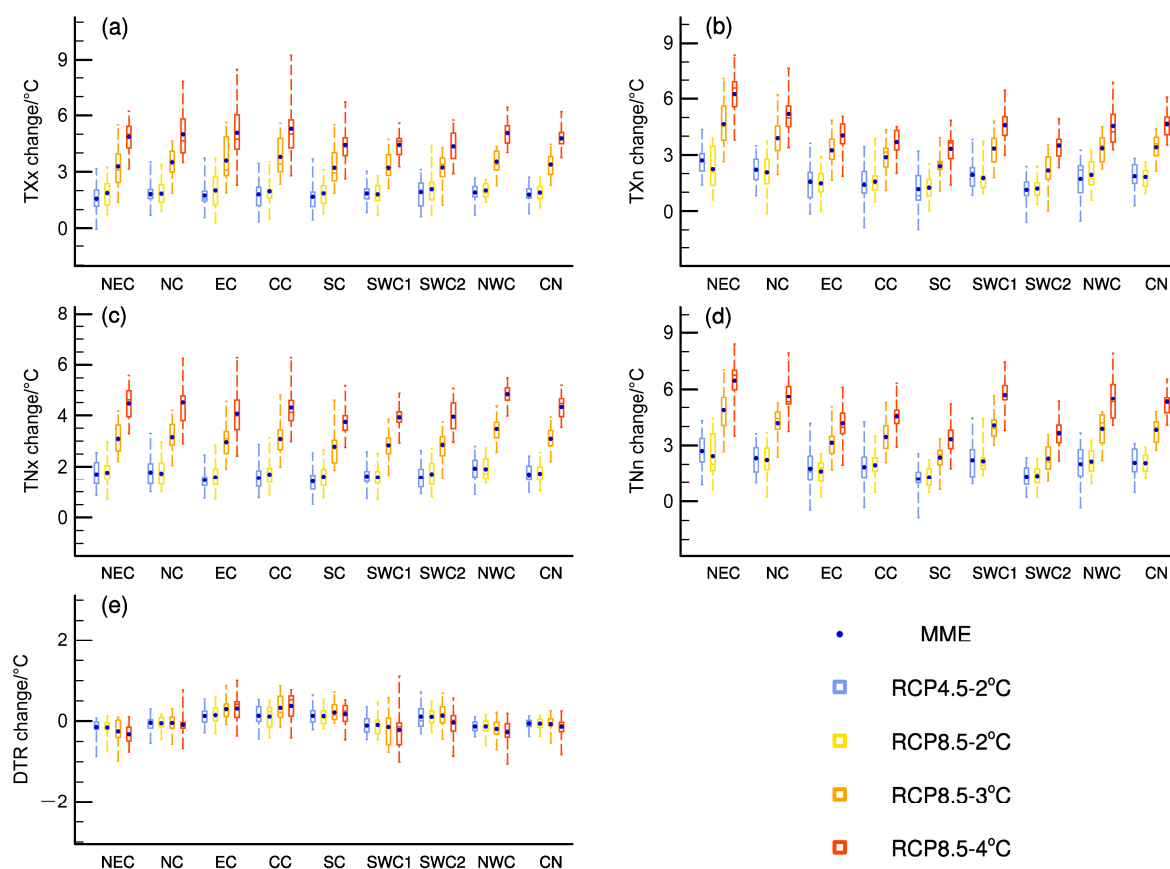


图4 中国8个分区在不同升温阈值下 (a) TXx、(b) TXn、(c) TNx、(d) TNn 和 (e) DTR 的变化盒须图。单位: $^{\circ}\text{C}$

Fig. 4 Boxplots of changes in (a) TXx (maximum value of daily max temperature), (b) TXn (minimum value of daily max temperature), (c) TNx (maximum value of daily min temperature), (d) TNn (minimum value of daily min temperature), and (e) DTR (diurnal temperature range) over eight regions in China under different temperature thresholds. Units: $^{\circ}\text{C}$

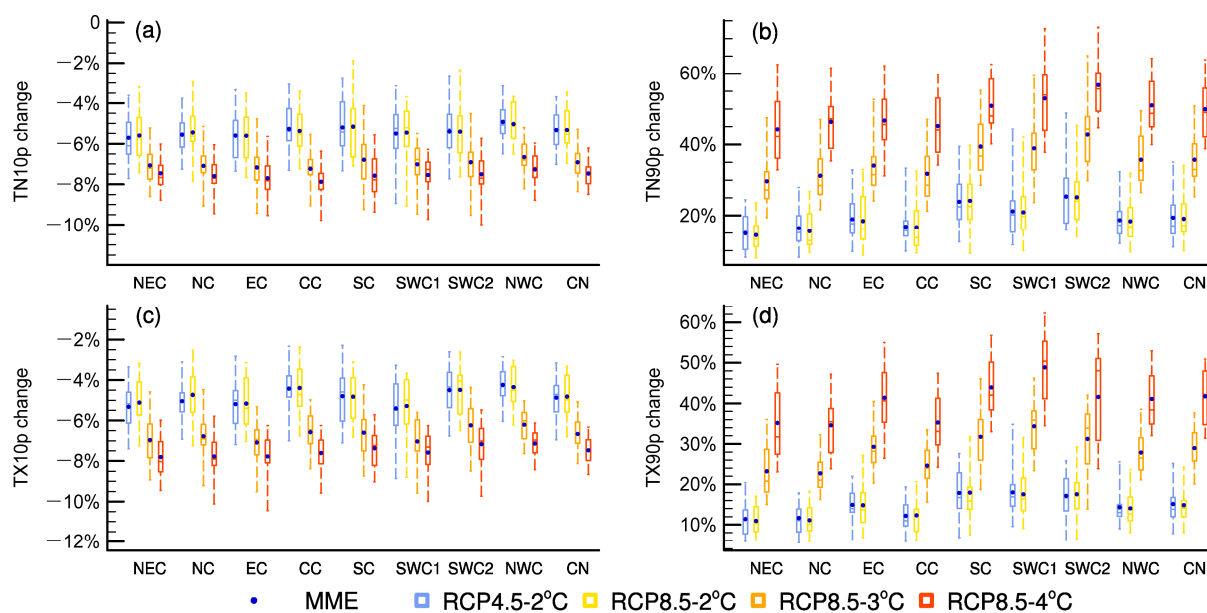


图5 同图4, 但为 (a) TN10p、(b) TN90p、(c) TX10p 和 (d) TX90p。单位: %

Fig. 5 As Fig. 4, but for (a) TN10p (cool nights), (b) TN90p (warm nights), (c) TX10p (cool days), and (d) TX90p (warm days). Units: %

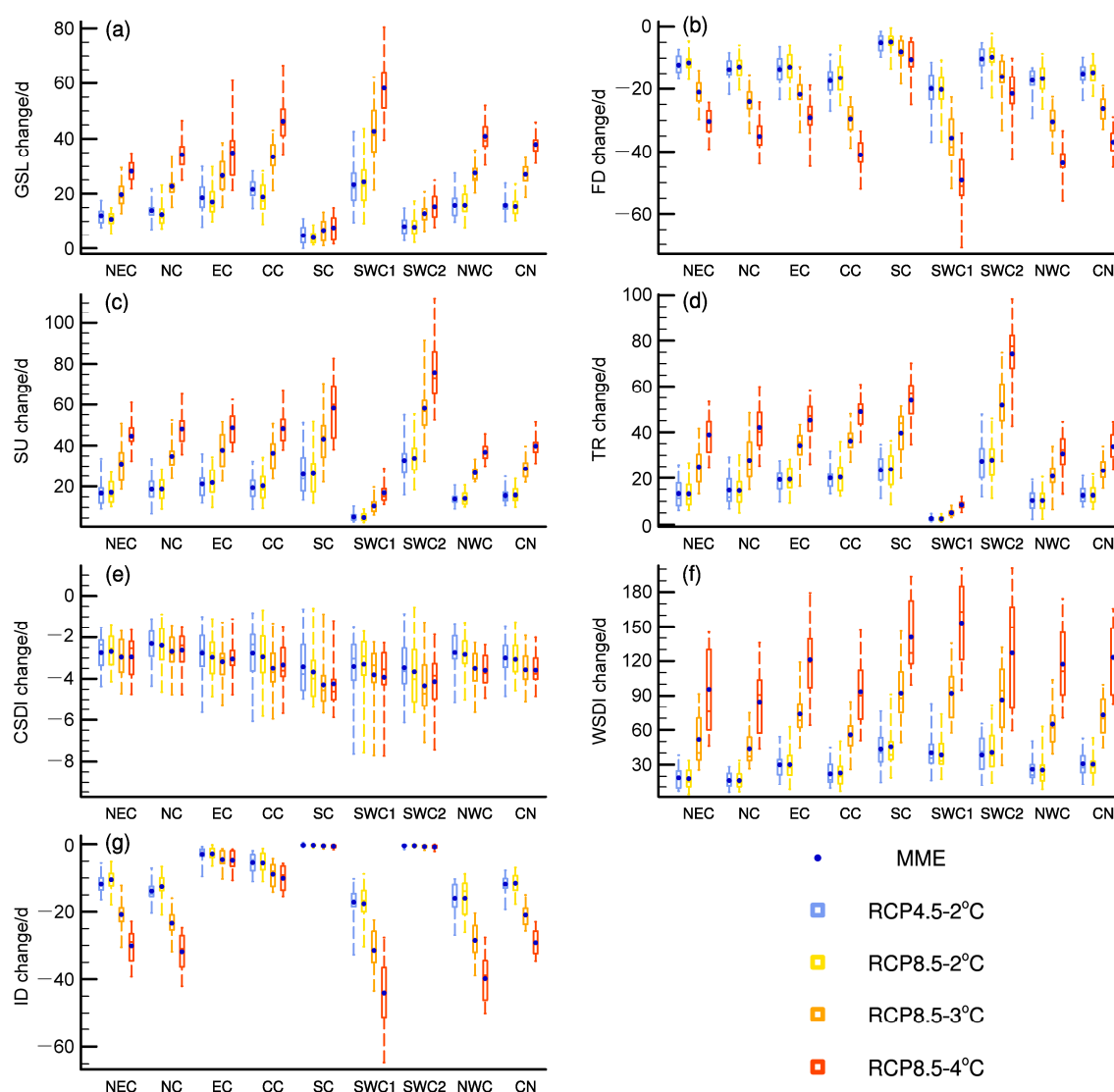


图6 同图4, 但为 (a) GSL、(b) FD、(c) SU、(d) TR、(e) CSDI、(f) WSDI 和 (g) ID。单位: d

Fig. 6 As Fig. 4, but for (a) GSL (growing season length), (b) FD (frost days), (c) SU (summer days), (d) TR (tropical nights), (e) CSDI (cold spell duration indicator), (f) WSDI (warm spell duration indicator), and (g) ID (ice days). Units: d

青藏高原地区增加幅度最大。在 RCP8.5 排放情景下, 全球平均气温升高 2°C、3°C、4°C 时, MME 预估青藏高原地区的 GSL 将分别增多 24.3 天、42.7 天和 58.2 天。同时, 青藏高原地区 GSL 变化的预估不确定性也要高于其他地区, 相同的升温阈值情形下, 其最高和最低的预估之差可达 38 天。相比其它地区, 青藏高原地区也是 FD、SU、ID 变化最明显的地区; 但是, 由于青藏高原高原的高海拔特征, 平均气温相对较低, 因而即使在全球平均的 ASAT 升高 4°C 时, SU 和 TR 只有相对较小的增加。与之相反, 我国华南和西南地区平均气温较高, ID 已几乎为 0, 因而在全球增暖的背景下, ID 不再出

现明显的变化。

3.4 不同升温阈值下中国地区极端降水事件的变化

类似地, 根据定义将 11 个用于衡量极端降水事件的指数分为两大类。第一类指数为降水日数 (R1mm)、中雨日数 (R10mm)、大雨日数 (R20mm)、连续干日 (CDD)、连续湿日 (CWD)。这些指数反映了极端降水发生的频率以及干湿状况的最长持续时间。从图 7 可以看出, 这几个指数表现出中国地区平均变化较小, 而区域性变化差异较大的特点。如从中国地区平均来看, R1 无明显变化 (RCP8.5-4°C 情景下变化为 0.9 天), 而在华南地区为减少, 西北地区为增多趋势, 但多模式之间

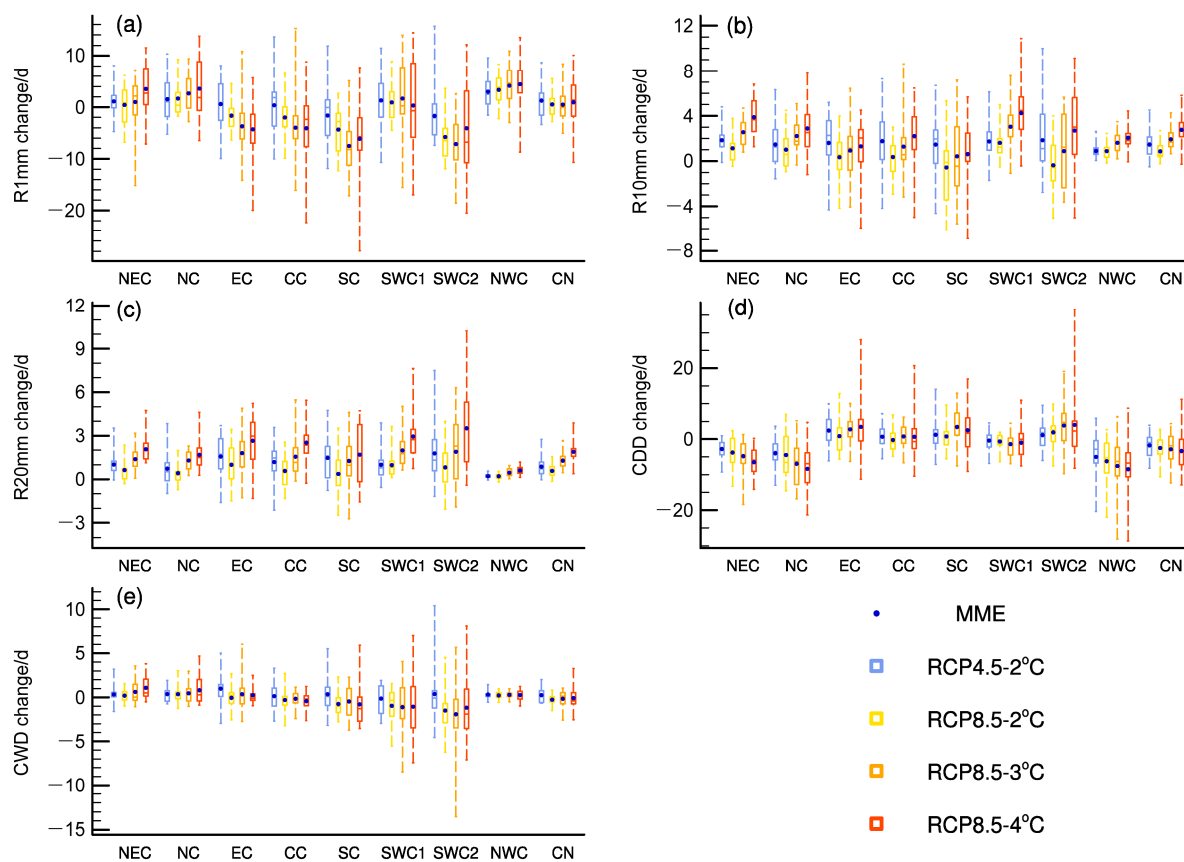


图7 同图4, 但为 (a) R1mm、(b) R10mm、(c) R20mm、(d) CDD 和 (e) CWD。单位: d

Fig. 7 As Fig. 4, but for (a) R1mm (number of precipitation days), (b) R10mm (number of heavy precipitation days), (c) R20mm (number of very heavy precipitation days), (d) CDD (consecutive dry days), and (e) CWD (consecutive wet days). Units: d

的预估存在较大的不确定性, 使这种变化的趋势并不显著。模式预估中国及各地区平均的 R10 mm 和 R20 mm 都有一定的增加, 其中西南地区增幅最大, 西北地区增幅最小, 模式间的不确定性在西南地区最大, 如 RCP8.5-4°C 情景下西南地区 R10 mm 的最高和最低预估相差超过 12 天。

在未来不同升温阈值下, 我国东北、华北和西北地区的 CDD 均有所减少, 其中西北地区减少幅度最大, MME 预估 RCP8.5-4°C 情景下其 CDD 可能减少 8.5 天, 幅度大于中国区域平均的 3.3 天。模式对未来四种不同升温阈值情景下 CDD 变化的预估存在较大的不确定性, 尤其是在 RCP8.5-4°C 情景下, 最高和最低预估间差异在西南地区可达 40 天以上。在未来各升温阈值下, 中国及各分区平均的 CWD 均无明显变化, 各情景间的不确定范围也无明显差别, 不确定性较高的地区主要是青藏高原地区和西南地区。

第二类指数为日最大降水量 (RX1day)、五日

最大降水量 (RX5day)、强降水量 (R95p)、极端强降水量 (R99p)、降水强度 (SDII)、湿日总降水量 (PRCPTOPT), 这类指数从量级上反映了极端降水的强度特征 (图 8)。从中国地区平均来看, 在全球平均气温达到 2°C、3°C、4°C 升温阈值下, 这些指标均呈现增加趋势, 即表现为未来中国地区的降水极端性在增强, 不仅单次降水过程的量级 (SDII) 将增大, 极端降水过程的量级 (RX1day、RX5day) 也有所增加, 同时, 极端降水事件所产生的总降水量 (R95p 和 R99p) 也将增多。随着升温阈值的升高, 这几个指数所描述的极端降水的强度都随之不断增强。当全球平均的 ASAT 升高 3°C 时, MME 结果表明中国平均的 RX5day 相比参考时段增加 12.5 mm, 在 4°C 情形下这一增幅为 17.0 mm。在不同排放路径不同时刻达到相同升温阈值时, 中国地区平均极端降水的强度无显著差异。如全球平均温度分别在 RCP4.5 和 RCP8.5 排放情景下达到 2°C 阈值时, MME 预估中国地区平均 R99p 相比参考时段

的增幅分别为 21.2 mm 和 21.9 mm。从中国各分区的结果来看, 极端降水强度在中国 8 个分区均为增加趋势, 且增幅随升温阈值的升高而增大。从这个五个指数综合来看, 西南地区降水强度的极端性增幅最大, 西北地区增幅最小。当全球平均的 ASAT 增加 4°C 时, 西南地区 R99p 相对参考时段增加 116.5 mm, 这一结果高出中国平均增幅近两倍, 高出西北地区增幅近六倍。对比中国各分区平均降水在不同升温阈值下的变化情况可以发现, 尽管华东、华中、华南和西南地区的平均降水在未来不同升温阈值下多表现为减少的趋势, 但极端降水强度的变化则为一致地增加, 表明降水的极端性在增强, 这一变化特征也与 CMIP5 模式预估的全球大部分地区极端降水变化相一致 (Sillmann et al., 2013)。

从这六个极端降水指标的盒须图可见 (图 8), 当前的气候模式预估未来不同升温阈值下极端降

水强度的变化具有较大的不确定性, 且这种不确定性随升温阈值的升高而增大。在不同排放路径下达到相同升温阈值时, 极端降水强度的预估结果不确定性无明显差异。当全球平均气温升高 4°C 时, 多模式预估中国区域平均日最大降水量相对参考时段的 50% 变化范围为 7.4 mm 至 12.8 mm 之间, 多模式预估可能发生的最高增幅是最低增幅的近三倍, 分别为 18.7 mm 和 6.0 mm。对比中国 8 个分区的预估结果可以发现, 六种极端降水强度指标总体表现为在增幅较大地区不确定性也较大。同样的升温阈值下, MME 预估西南地区的降水极端性增幅高于其他地区, 其不确定范围也高于其他地区; 西北地区由于降水量级较小, 其极端降水变化的信号也相对较弱, 多模式对其预估的不一致性也相对较小。在 RCP8.5-3°C 升温阈值下, 多模式预估西南地区的强降水量变化 50% 的可能性为 22.9 mm 至 124.1 mm 之间; 而在西北地区, 这一范围为 17.6 mm

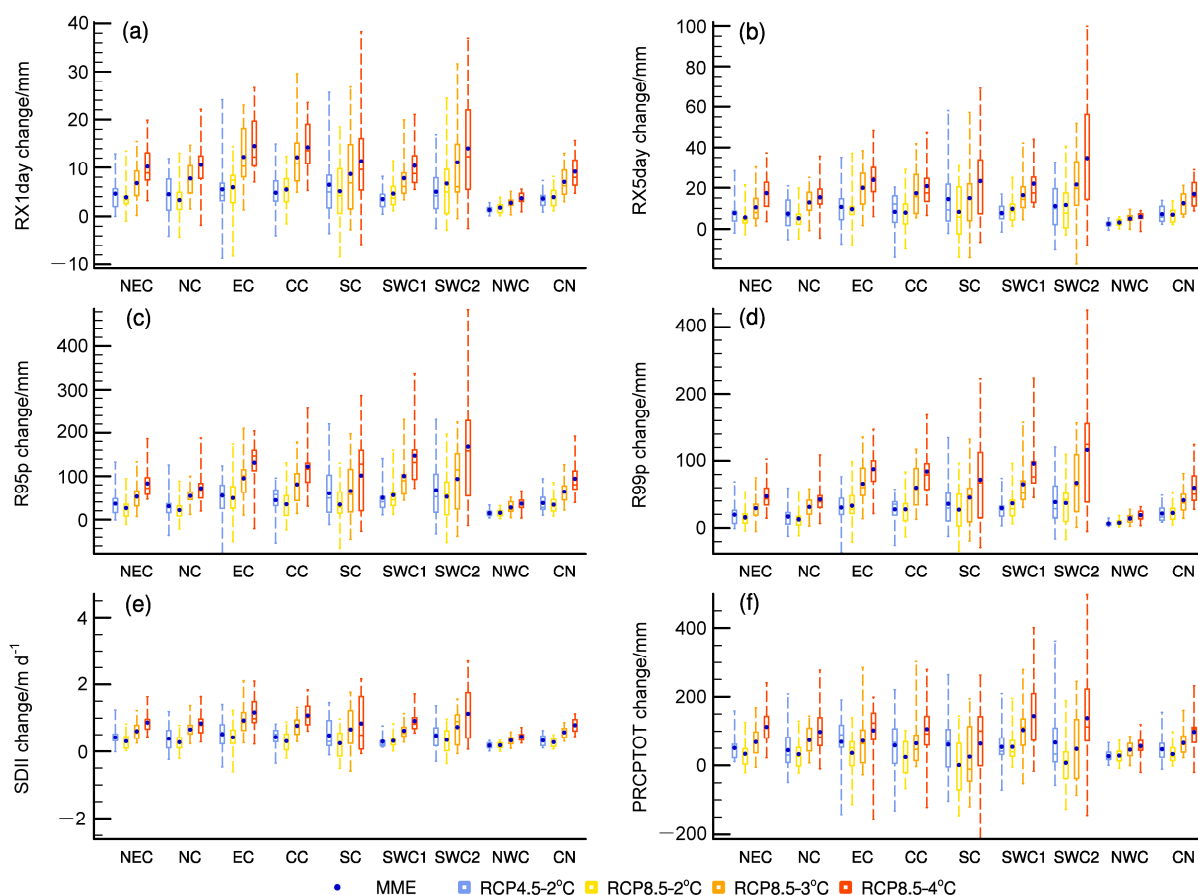


图 8 同图 4, 但为 (a) RX1day (单位: mm)、(b) RX5day (单位: mm)、(c) R95p (单位: mm)、(d) R99p (单位: mm)、(e) SDII (单位: mm d⁻¹) 和 (f) PRCPTOT (单位: mm)

Fig. 8 As Fig. 4, but for (a) RX1day (max 1-day precipitation amount; units: mm), (b) RX5day (max 5-day precipitation amount; units: mm), (c) R95p (very wet days; units: mm), (d) R99p (extremely wet days; units: mm), (e) SDII (simple daily intensity index; units: mm d⁻¹), and (f) PRCPTOT (annual total wet-day precipitation; units: mm)

至 31.6 mm。需要指出的是, 尽管多模式对未来不同升温阈值下极端降水强度特征变化的定量预估存在较大的不确定性, 但多数模式对中国几乎所有分区的预估结果均显示出一致的变化趋势, 即中国地区极端降水的强度在未来以增加为主要变化特征。

4 结论

本文利用了 18 个 CMIP5 全球气候模式的结果, 评估了全球平均的 ASAT 在 21 世纪到达 2°C、3°C、4°C 升温阈值时, 中国地区温度、降水平均气候态以及极端气候事件的相应变化, 主要结论如下:

(1) 多数模式集合结果表明, RCP2.6 排放情景下, 全球平均 ASAT 没有达到 2°C 阈值, RCP4.5 和 RCP8.5 排放情景下, 预估全球平均的 ASAT 相对工业化前升温 2°C 的时间分别可能为 2046 年和 2038 年。在 RCP8.5 排放情景下, 多数模式预估全球平均气温将在 2080 年超过 4°C 阈值。

(2) 当全球平均的 ASAT 升高 2°C、3°C、4°C 时, MME 预估中国地区平均的 ASAT 变化约为 2.6°C、4.0°C、5.2°C, 我国北方和青藏高原地区的增暖强于其他地区。在各升温阈值下, 我国降水表现为北方降水增多, 南方降水减少或不变的趋势, 即表现为我国南涝北旱可能得以缓解。我国北方地区降水的增幅随阈值的升高而增大, 其中西北地区增幅最大, 在 RCP8.5-4°C 情形下增加约 18.0%。

(3) 在全球平均的 ASAT 升高 2°C、3°C、4°C 时, 中国地区极端暖事件 (如 TN90p、TX90p、TR) 明显增多, 极端冷事件 (如 FD、TN10p、TX10p) 减少, 随阈值的升高, 这些变化幅度增大。在 RCP8.5-4°C 情景下 TNn 相对参考时段约增暖 5.3°C, 高于 TXx、TXn 和 TNx 的增幅。DTR 在各升温阈值下均无明显变化趋势, CSDI 在不同升温阈值下的变化差异相对较小。

(4) 在不同升温阈值下, 中国地区降水的极端性也体现出增强的趋势, 强降水事件发生的频率 (如 R10mm、R20mm) 将会升高, 极端降水事件的强度 (如 RX5day、R99p) 也明显地增加。随升温阈值的升高, 极端降水也有增强的趋势, 在 RCP8.5-3°C 和 RCP8.5-4°C 情形下, 中国地区平均的 RX5day 变化分别约为 12.5 mm 和 17.0 mm。从整体看来, 我国西南地区极端降水强度的增幅高于

其他地区, 在 RCP8.5-4°C 情形下, R99p 的增幅为中国地区平均的近两倍, 为西北地区约六倍。

需要指出的是, 上述结论主要依据全球气候模式的模拟结果, 由于气候系统的复杂性, 当前对其相关反馈过程和机制的理解仍存在很大不足, 气候模式也难以对其复杂的物理过程进行细致的描述 (Gleck et al., 2010)。因此, 对未来不同升温阈值下气候变化评估的完善也依赖于对气候系统进一步的认识及气候模式的发展。

致谢 感谢各模式组提供 CMIP5 模拟结果。

参考文献 (References)

- Chen H P. 2013. Projected change in extreme rainfall events in China by the end of the 21st century using CMIP5 models [J]. *Chinese Science Bulletin*, 58 (12): 1462–1472.
- Chen H P, Sun J Q. 2009. How the “best” models project the future precipitation change in China [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 26 (4): 773–782.
- Chen L, Frauenfeld O W. 2014. Surface air temperature changes over the twentieth and twenty-first centuries in China simulated by 20 CMIP5 models [J]. *J. Climate*, 27 (11): 3920–3937.
- Gleck P H, Adams R M, Amasino R M, et al. 2010. Climate change and the integrity of science [J]. *Science*, 328 (5979): 689–690.
- Deser C, Phillips A, Bourdette V, et al. 2012. Uncertainty in climate change projections: The role of internal variability [J]. *Climate Dyn.*, 38 (3–4): 527–546.
- Held I M, Soden B J. 2006. Robust responses of the hydrological cycle to global warming [J]. *J. Climate*, 19 (21): 5686–5699.
- 胡岑, 姜大膀, 范广洲. 2014. CMIP5 全球气候模式对青藏高原地区气候模拟能力评估 [J]. *大气科学*, 38 (5): 924–938, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13197.
- Hu Q, Jiang D B, Fan G Z. 2014. Evaluation of CMIP5 models over the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 38 (5): 924–938, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13197.
- IPCC. 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis [M]*// Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 89pp.
- 姜大膀, 富元海. 2012. 2°C 全球变暖背景下中国未来气候变化预估 [J]. *大气科学*, 36 (2): 234–246.
- Jiang D B, Fu Y H. 2012. Climate change over China with a 2°C global warming [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 36 (2): 234–246.
- Jiang D B, Zhang Y, Sun J Q. 2009. Ensemble projection of 1–3°C warming in China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 54 (18): 3326–3334.
- 金晨曦, 周天军. 2014. 参加 CMIP5 的四个中国气候模式模拟的东亚冬季风年际变率 [J]. *大气科学*, 38 (3): 453–468, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13180.
- Jin C X, Zhou T J. 2014. Analysis of the interannual variations of the East Asian winter monsoon simulation by four CMIP5 GCMs [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in*

- Chinese), 38 (3): 453–468, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13180.
- Joshi M, Sutton R, Lowe J, et al. 2011. Projections of when temperature change will exceed 2°C above pre-industrial levels [J]. *Nature Climate Change*, 1 (8): 407–412.
- Knutti R, Sedláček J. 2013. Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections [J]. *Nature Climate Change*, 3 (4): 369–373.
- Lang X M, Sui Y. 2013. Changes in mean and extreme climates over China with a 2°C global warming [J]. *Chinese Science Bulletin*, 58 (12): 1453–1461.
- Li J F, Zhang Q, Chen Y D, et al. 2013. GCMs-based spatiotemporal evolution of climate extremes during the 21st century in China [J]. *J. Geophys. Res.*, 118 (19): 11017–11035.
- Meinshausen M, Meinshausen N, Hare W, et al. 2009. Greenhouse-gas emission targets for limiting global warming to 2°C [J]. *Nature*, 458 (7242): 1158–1162.
- Mitchell J F B, Wilson C A, Cunningham W M. 1987. On CO₂ climate sensitivity and model dependence of results [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 113 (475): 293–322.
- Previdi M. 2010. Radiative feedbacks on global precipitation [J]. *Environ. Res. Lett.*, 5: 025211.
- O’Gorman P, Allan R, Byrne M, et al. 2012. Energetic constraints on precipitation under climate change [J]. *Surv. Geophys.*, 33 (3–4): 585–608.
- Schneider S H, Semenov S, Patwardhan A, et al. 2007. Assessing key vulnerabilities and the risk from climate change [M]// Parry M L, Canziani O F, Palutikof J P, et al. *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, UK: Cambridge University Press, 976pp.
- 《第二次气候变化国家评估报告》编写委员会. 2011. 第二次气候变化国家评估报告 [M]. 北京: 科学出版社, 710pp. “Second National Assessment Report on Climate Change” Writing Committee. 2011. *Second National Assessment Report on Climate Change (in Chinese)* [M]. Beijing: Science Press, 710pp.
- Sillmann J, Kharin V V, Zwiers F W, et al. 2013. Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble. Part 2. Future climate projections [J]. *J. Geophys. Res.*, 118 (6): 2473–2493.
- Sui Y, Lang X M, Jiang D B. 2014. Time of emergence of climate signals over China under the RCP4.5 scenario [J]. *Climatic Change*, 125 (2): 265–276.
- Taylor K E, Stouffer R J, Meehl G A. 2012. An overview of CMIP5 and the experiment design [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 93 (4): 485–498.
- The World Bank. 2012. Turn down the heat: Why a 4°C warmer world must be avoided [R]. Washington DC: The World Bank, 84pp.
- Xu C H, Xu Y. 2012. The projection of temperature and precipitation over China under RCP scenarios using a CMIP5 multi-model ensemble [J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 5 (6): 527–533.
- Yao Y, Luo Y, Huang J B. 2012. Evaluation and projection of temperature extremes over China based on CMIP5 model [J]. *Adv. Climate Change Res.*, 3 (4): 179–185.
- Yao Y, Luo Y, Huang J B, et al. 2013. Comparison of monthly temperature extremes simulated by CMIP3 and CMIP5 models [J]. *J. Climate*, 26 (19): 7692–7707.
- Zeng N, Ding Y H, Pan J H, et al. 2008. Climate change—The Chinese challenge [J]. *Science*, 319 (5864): 730–731.
- 张莉, 丁一汇, 吴统文, 等. 2013. CMIP5 模式对 21 世纪全球和中国年平均地表气温变化和 2°C 升温阈值的预估 [J]. *气象学报*, 71 (6): 1047–1060. Zhang L, Din Y H, Wu T W, et al. 2013. 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 [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 71 (6): 1047–1060.
- Zhang Y. 2012. Projections of 2.0°C warming over the globe and China under RCP4.5 [J]. *Atmos. Oceanic Sci. Lett.*, 5: 514–520.
- Zhang X B, Alexander L, Hegerl G C, et al. 2011. Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data [J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2 (6): 851–870.
- Zhou T J, Yu R C. 2006. Twentieth-century surface air temperature over China and the globe simulated by coupled climate models [J]. *J. Climate*, 19 (22): 5843–5858.
- 周秀华, 肖子牛. 2014. 基于 CMIP5 资料的云南及周边地区未来 50 年气候预估 [J]. *气候与环境研究*, 19 (5): 601–613, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.13080. Zhou X H, Xiao Z N. 2014. Climate projection over Yunnan Province and the surrounding regions based on CMIP5 data [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 19 (5): 601–613, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.13080.