



中国21世纪气候变化的RegCM4多模拟集合预估

张冬峰¹, 高学杰^{2,3*}

1. 山西省气候中心, 太原 030006;

2. 中国科学院大气物理研究所气候变化研究中心, 北京 100029;

3. 中国科学院大学, 北京 100049

* 联系人, E-mail: gaoxuejie@mail.iap.ac.cn

2020-03-06 收稿, 2020-04-17 修回, 2020-04-18 接受, 2020-05-27 网络版发表

国家重点研发计划(2016YFA0600704)和国家自然科学基金(41675103)资助

摘要 基于一套RegCM4区域气候模式动力降尺度试验结果, 进行了中国及不同分区在21世纪不同时期, RCP(典型浓度路径)4.5和8.5两种排放路径下的气候变化集合预估。试验中RegCM4在5个不同的CMIP5(耦合模式比较计划第五阶段)全球气候模式分别驱动下运行, 水平分辨率为25 km×25 km。分析表明: 未来中国范围内平均地面气温将普遍升高, 其中冬季(12~2月)的青藏高原和夏季(6~8月)的西北干旱区升温幅度最大; 相应的气温极端气候事件指数TXx(日最高气温最大值)和TNn(日最低气温最小值)升高。中国大部分地区冬季降水将增加, 西北干旱区增加幅度最大, 仅在云贵高原部分地区出现一定减少, 模拟间一致性在中国北方较好; 夏季降水在中国西部大部分地区、东北北部和黄淮增加, 其他地区变化较小或略微减少; 集合预估的日最大降水量(RX1day)在全国将普遍增加; 连续无降水日数(CDD)在中国北方以一致缩短为主, 南方则有所延长。相对于当代参照时段(1986~2005年), 21世纪中期RCP4.5和8.5下全国年平均气温分别上升1.6和2.2℃, 降水分别增加4%和5%。各要素变化均随时间推移而增大, 21世纪末期两种排放情景下全国年平均气温分别上升2.4和4.6℃, 降水分别增加5%和12%。

关键词 气候变化, 区域气候模式, 集合预估, 中国不同分区

对未来气候变化的预估一般使用全球气候模式进行, 经过几十年的努力, 目前全球模式对大尺度的气候异常和变化有较好的模拟能力。国际耦合模式比较计划第五阶段(CMIP5)模式^[1]能够再现观测到的大陆尺度地表气温分布及多年代际趋势, 对大陆尺度降水分布的模拟也较以往有所改进, 并能较好地再现季风、厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)、Hadley环流长期变化趋势、亚洲-太平洋涛动(APO)以及西太平洋副热带高压的变化等重要气候现象^[2~6]。但受计算资源的限制, 目前的全球模式分辨率仍较低, 对区域以及更小尺度气候模拟存在较大不足, 而基于区域气候模式的动力降尺度方法, 做为获取更可靠小尺度气候和气候变化信息

的重要途径之一, 在国内外研究中得到了广泛应用^[7]。

中国地处东亚季风区, 地形复杂、气候多样, 各地社会 and 经济发展差异明显, 气候变化对不同地区的影响及各自的适应能力也有较大不同。科学预估不同地区未来气候变化, 为气候变化影响和对策研究提供更可靠的高分辨率基础预估数据, 是亟需开展的重要工作。近年来在中国区域使用动力降尺度方法进行的相关研究已有很多, 加深了对这一问题的认识^[8~20], 但目前所进行的大部分模拟或是在单一全球模式驱动单一区域模式下进行, 或所使用的温室气体排放情景种类及模式分辨率等方面存在不足, 尚难满足更深入了解中国区域未来气候变化及其不确定性的需求。

引用格式: 张冬峰, 高学杰. 中国21世纪气候变化的RegCM4多模拟集合预估. 科学通报, 2020, 65: 2516~2526

Zhang D F, Gao X J. Climate change of the 21st century over China from the ensemble of RegCM4 simulations (in Chinese). Chin Sci Bull, 2020, 65: 2516~2526, doi: [10.1360/TB-2020-0231](https://doi.org/10.1360/TB-2020-0231)

针对这一问题,本研究利用一套多全球模式驱动下,一个区域模式在东亚区域 RCP4.5和RCP8.5两种排放路径下所进行的21世纪气候变化集合模拟试验数据,对中国及不同分区的未来气候变化情景开展分析。

1 模式、资料和方法

研究使用的区域气候模式为由国际理论物理中心(ICTP)所发展的RegCM4^[21]。RegCM系列模式在中国气候和气候变化研究等方面有广泛的应用,并取得大量成果^[22]。本研究中RegCM4模拟范围为联合区域气候降尺度试验(CORDEX)东亚第二阶段推荐区域^[23],覆盖整个中国及周边地区,水平分辨率为25 km×25 km。通过对原版模式不同方案组合的测试和试验, Gao等人^[24,25]报告了RegCM4在中国区域取得“最好”模拟效果应该使用的模式物理过程及参数设置(CLM陆面过程方案和Emanuel对流参数化方案等的组合),并根据韩振宇等人^[26]的研究更新了中国土地覆盖数据,以更好地描述下垫面植被状况,提高模拟效果,本研究所使用的即为此调试后的模式版本。

RegCM4运行所需的初始和侧边界条件由CMIP5模式CSIRO-Mk3-6-0^[27]、EC-EARTH^[28]、HadGEM2-ES^[29]、MPI-ESM-MR^[30]和NorESM1-M^[31]的历史试验、RCP4.5和RCP8.5情景21世纪气候变化预估试验结果提供。上述5个全球模式为CMIP5比较计划中分辨率较高的模式,能够满足水平分辨率25 km动力降尺度试验所需。同时分析表明,它们对中国区域气候具有较好的模拟能力^[32]。这也是迄今为止国内所报告的最大规

模的一套区域动力降尺度模拟。

以往研究表明, RegCM4对中国气候有较强的模拟能力^[22], 本系列模拟同样也可以较好地再现中国区域当代气温和降水^[14,15,20], 为简明起见本研究略去模式检验部分。分析中以1986~2005年作为当代(参照时段), 以2021~2040、2041~2060和2081~2098年作为21世纪初期、中期和末期, 给出中国及不同地区在21世纪各时期地面气温和降水的年、冬季(12~2月)和夏季(6~8月)变化的集合预估结果(采用等权重平均, 下文简称为ensR), 同时使用日最高气温最大值(TXx)、日最低气温最小值(TNn)、日最大降水量(RX1day)和日降水量<1 mm最长连续日数(CDD)4个气温和降水相关极端指数^[33], 分析了未来极端事件的变化。与降水相关的变量在文中同时给出了模拟间的一致性, 以了解其不确定性; 与气温相关各变量模拟间有很好的 consistency, 因此不再给出。

上述各要素变化空间分布分析以21世纪中期为主, 不同分区在不同时期的平均变化则在表1~3中给出。各分区的划分综合考虑了经济发展、生态脆弱性和气候变化敏感性等多种因素, 包括东北、京津冀、长三角、长江中下游、粤港澳大湾区、海峡两岸、西北干旱区、黄土高原、青藏高原和云贵高原等共10个(图1, 注意部分分区在边界处有所重叠)。

2 未来气候变化

2.1 气温

图2给出21世纪中期在RCP4.5和RCP8.5两种排放

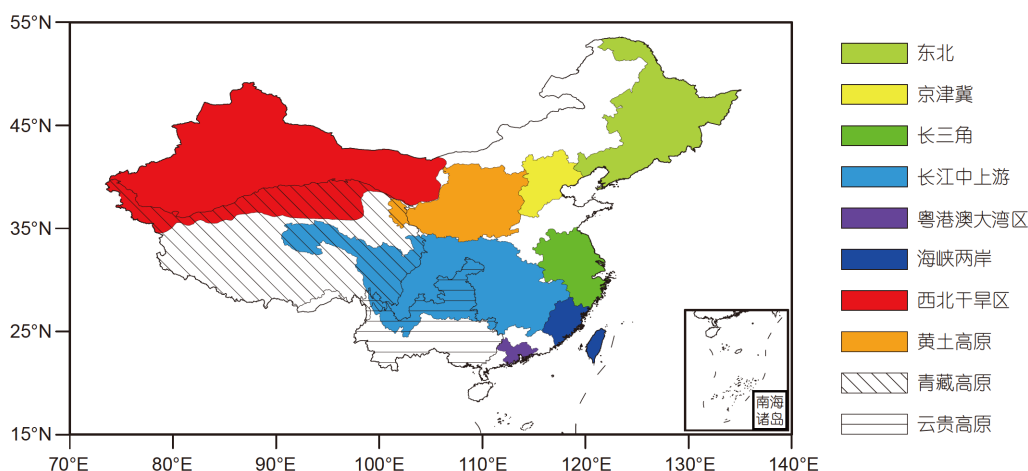


图1 中国区域分区
Figure 1 Sub-regions over China

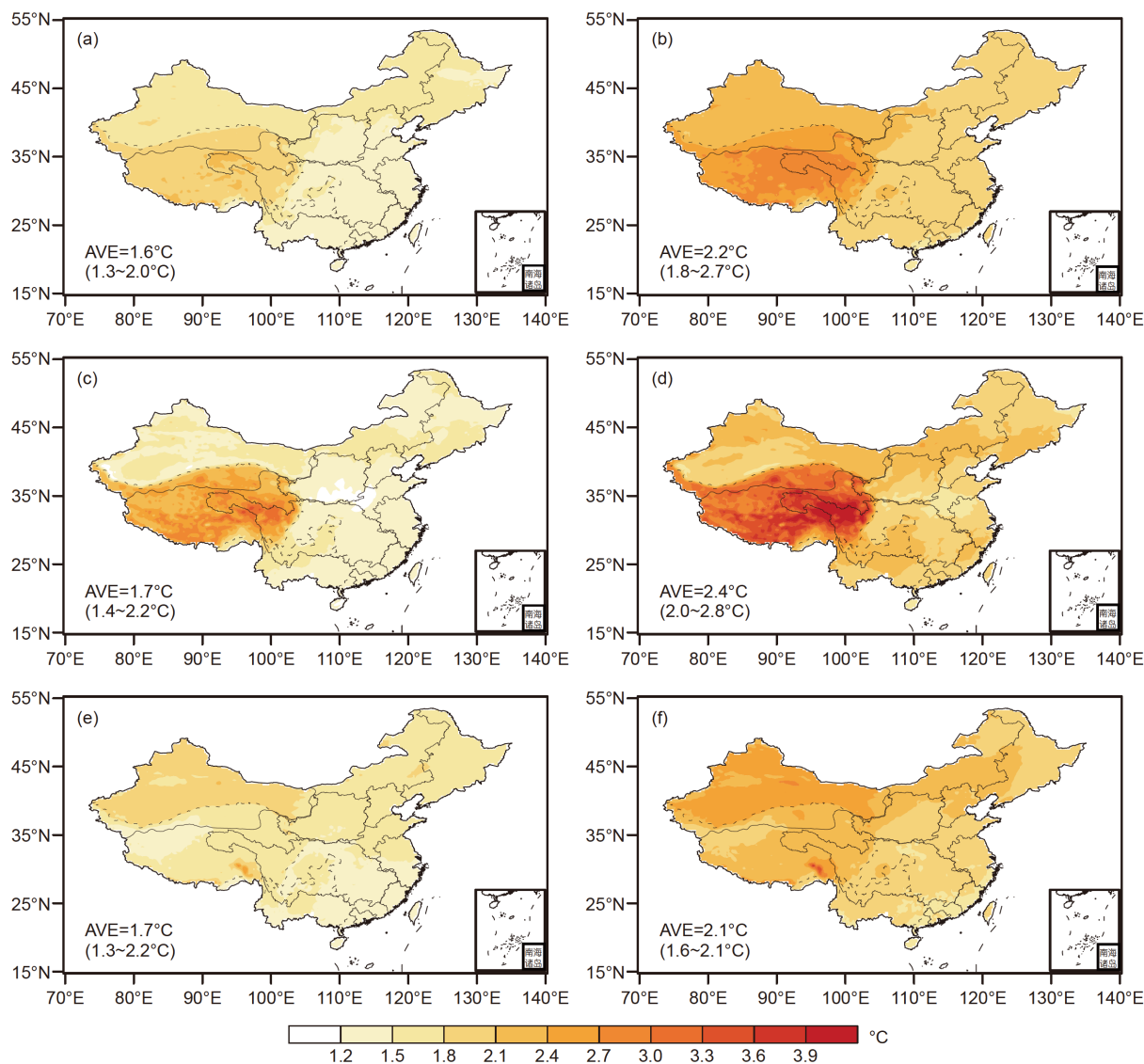


图2 ensR预估的21世纪中期地面气温变化。(a) RCP4.5年平均;(b) RCP8.5年平均;(c) RCP4.5冬季;(d) RCP8.5冬季;(e) RCP4.5夏季;(f) RCP8.5。区域平均值和各模拟变化范围(最大~最小值)同时在各图幅左下角给出(下文同)

Figure 2 Temperature change in the mid-21st century from ensR. (a) Annual mean under RCP4.5; (b) annual mean under RCP8.5; (c) December-January-February (DJF) under RCP4.5; (d) DJF under RCP8.5; (e) June-July-August (JJA) under RCP4.5; (f) JJA under RCP8.5. Regional mean values and ranges of future changes among inter-simulations (maximum and minimum) over the whole of China are provided in lower-left corners in the panels (same as below)

情景下,年、冬季和夏季平均地面气温相对于当代的集合变化分布。在RCP4.5下年平均气温在中国范围一致升高,其中青藏高原升温最为明显,幅度在1.8~2.1°C之间,东部升温幅度相对较小,大部分地区低于1.5°C(图2(a))。冬季青藏高原升温数值最大,中心值超过3°C,中国东部大部分地区升温小于1.5°C(图2(c))。夏季西北干旱区升温最明显,范围在1.8~2.1°C之间,南方升温一般在1.5°C以下(图2(e))。RCP8.5排放情景下,升温空间分布和RCP4.5相似,但幅度增大,如中国区域年平均气

温升高由1.6°C(1.3~2.0°C,各模拟中的最大最小值,下同)上升到2.2°C(1.8~2.7°C),冬季青藏高原升温中心值超过3.9°C(图2(d)),夏季西北干旱区升温超过2.4°C(图2(f))。

全国及各不同分区21世纪各时期气温变化由表1给出。两种排放情景下,全国以及各分区的年、冬季和夏季区域平均地面气温一致升高,且升温幅度随时间增大,RCP8.5情景下升温幅度更大。年平均气温在RCP4.5和RCP8.5情景下,中国区域在21世纪初期/中

表 1 ensR预估的中国和各分区21世纪初期/中期/末期气温变化(°C)**Table 1** Future change of temperature over China and the sub-regions for early/mid/end of the 21st century from ensR (°C)

	年		冬季		夏季	
	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
东北	0.9/1.5/2.2	1.1/2.0/4.4	0.8/1.5/2.2	1.1/2.0/4.5	1.1/1.6/2.3	1.2/2.0/4.3
京津冀	0.9/1.5/2.2	1.1/2.0/4.2	0.9/1.4/2.4	1.2/2.0/4.0	1.1/1.7/2.7	1.3/2.1/4.5
长三角	0.9/1.4/2.0	1.1/1.9/4.0	0.9/1.3/2.1	1.1/1.9/3.9	1.0/1.5/2.2	1.1/1.9/4.0
长江中上游	1.0/1.6/2.3	1.2/2.2/4.4	1.2/1.7/2.6	1.3/2.5/4.9	1.0/1.5/2.2	1.1/2.0/4.2
粤港澳大湾区	0.8/1.3/1.8	1.0/1.8/3.6	0.9/1.3/1.8	1.1/1.9/3.7	0.8/1.4/1.9	0.9/1.8/3.6
海峡两岸	0.9/1.4/1.9	1.1/1.9/3.7	0.9/1.4/2.1	1.2/2.0/3.8	0.9/1.4/2.0	0.9/1.8/3.7
西北干旱区	1.2/1.7/2.5	1.4/2.3/4.9	1.1/1.7/2.8	1.2/2.3/4.9	1.4/1.8/2.6	1.4/2.4/5.2
黄土高原	1.0/1.5/2.3	1.2/2.1/4.3	0.9/1.4/2.4	1.2/2.1/4.2	1.1/1.6/2.5	1.3/2.1/4.5
青藏高原	1.2/2.0/2.7	1.5/2.7/5.3	1.5/2.5/3.5	1.6/3.3/6.6	1.1/1.6/2.3	1.3/2.2/4.5
云贵高原	0.9/1.4/2.0	1.1/2.0/3.9	0.9/1.5/2.1	1.2/2.2/4.2	0.9/1.5/2.1	1.0/1.9/3.9
中国	1.1/1.6/2.4	1.2/2.2/4.6	1.1/1.7/2.6	1.2/2.4/4.9	1.1/1.7/2.4	1.2/2.1/4.5

期/末期分别升温1.1/1.6/2.4和1.2/2.2/4.6°C, 各分区中青藏高原升温最大, 粤港澳大湾区升温最小. 冬季升温数值的地区差异较年平均的明显, 如升温最大的青藏高原和升温最小粤港澳大湾区, RCP4.5下不同时期分别升温1.5/2.5/3.5和0.9/1.3/1.8°C, RCP8.5下为1.6/3.3/6.6和1.1/1.9/3.7°C, 地区升温差异分别达到0.6/1.2/1.7和0.5/1.4/2.9°C. 夏季升温的地区差异小于冬季, 升温最大的西北干旱区和升温最小的粤港澳大湾区, 在RCP4.5和RCP8.5下的差异分别为0.6/0.4/0.7和0.5/0.6/1.6°C.

2.2 降水

在21世纪中期RCP4.5情景下, ensR预估的年平均降水在中国西部和东北北部以增加为主, 其中西北干旱区增加10%~25%, 其余大部分地区的变化幅度在±5%以内(图3(a)). RCP8.5下降水增加范围扩大、幅度上升, 如北方大部分地区以增加为主, 西北干旱区部分地区增加幅度在25%~50%之间, 中国区域年平均降水增加由4%(2%~5%)上升到5%(2%~8%)(图3(b)).

冬季RCP4.5下, 北方大部分地区降水普遍增加, 数值在10%以上, 其中西北地区增加明显, 最大值出现在塔里木盆地(超过50%); 南方大部分地区降水变化幅度不大, 在云贵高原南部个别地方出现5%~10%的减少(图3(c)). RCP8.5下中国大部分地区降水增加, 北方降水增加幅度更大, 西北干旱区降水增加中心数值超过75%, 另外云贵高原降水减少较RCP4.5更加明显(图3(d)).

夏季RCP4.5下降水增加的地区集中在西北干旱区东部、青藏高原东部三江源地区、东北北部和黄淮等地, 其他地区变化幅度在±5%间(图3(e)). RCP8.5下的变化空间分布和RCP4.5类似, 但增加范围和幅度更大, 如中国东部黄淮地区降水增加幅度超过10%的地区明显扩大(图3(f)). 注意到上述各种情况下降水增加的结果, 在ensR各模拟间有很好的一致性, 相对而言是较强的变化信号, 依此衡量的预估不确定性较小.

表2给出中国及各分区21世纪不同时期的区域平均降水变化. 21世纪初期/中期/末期, 中国以及多数分区的年、冬季和夏季降水, 均随时间推移而逐步增加, RCP8.5情景下增加幅度更大. 其中年平均降水在两种排放情景下均在西北干旱区增加最大, 各时期分别增加5%/9%/12%和4%/11%/30%; 云贵高原降水变化最小, 数值在0~3%之间.

冬季为降水增加最为明显的季节, RCP4.5下中国区域降水增加幅度不同时期分别为6%/8%/13%, 除了21世纪中期云贵高原降水略有减少外, 其余各分区不同时段均为增加, 21世纪末期多数分区增加值超过10%, 西北干旱区降水增加28%. RCP8.5下中国地区降水增加9%/12%/25%, 末期西北干旱区、京津冀和黄土高原降水增加均超过40%, 其中西北干旱区增加达到64%.

夏季RCP4.5下全国平均降水变化在21世纪各时期的变化值不大, 均为增加3%左右; 各分区平均降水也以小幅度增加为主, 西北干旱区增加幅度相对明显, 21

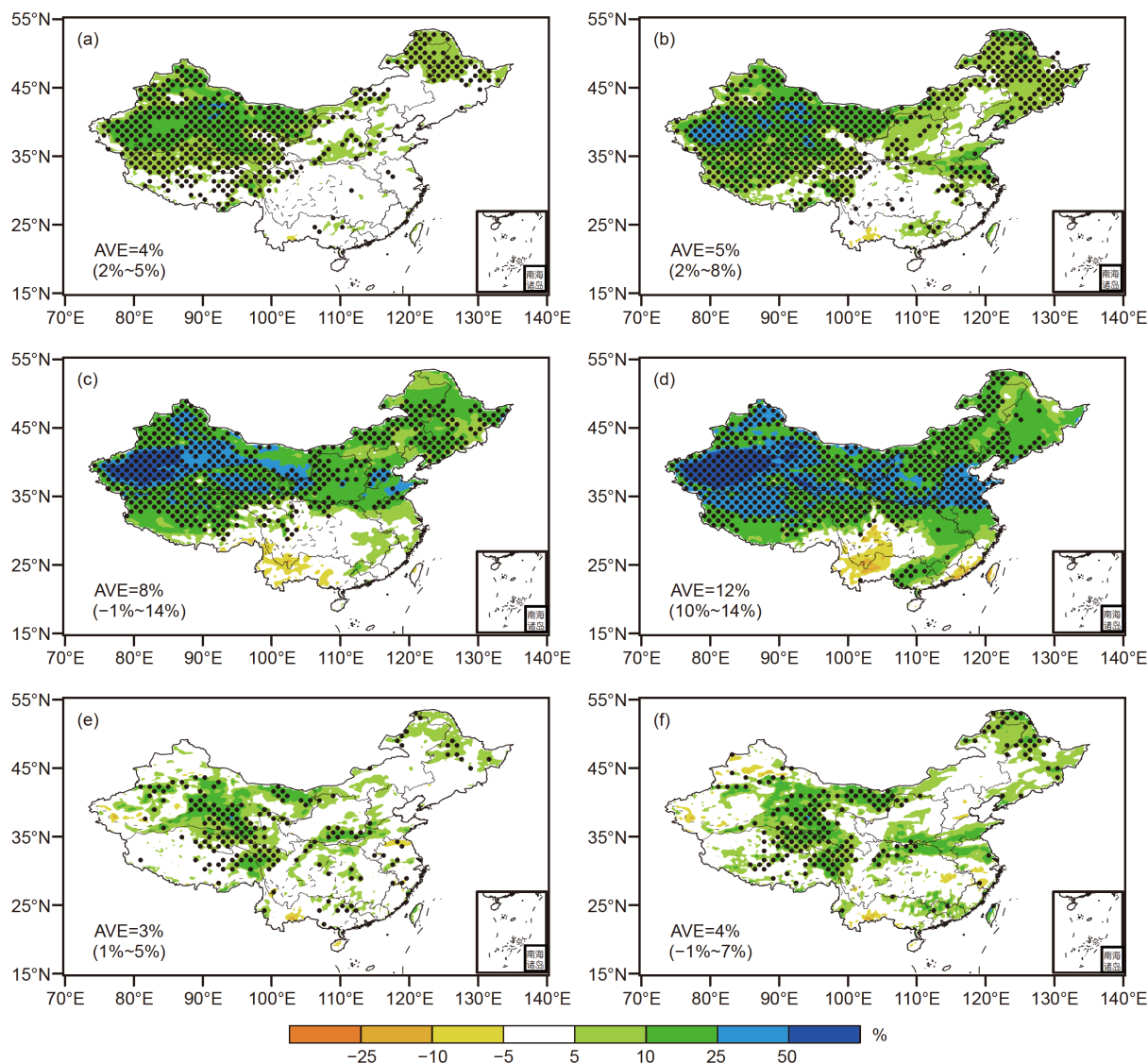


图3 ensR预估的21世纪中期地面降水变化。(a) RCP4.5年平均;(b) RCP8.5年平均;(c) RCP4.5冬季;(d) RCP8.5冬季;(e) RCP4.5夏季;(f) RCP8.5夏季。黑色圆点表示5个模拟结果变化同符号(下文同)

Figure 3 Precipitation change in the mid-21st century from ensR. (a) Annual mean under RCP4.5; (b) annual mean under RCP8.5; (c) DJF under RCP4.5; (d) DJF under RCP8.5; (e) JJA under RCP4.5; (f) JJA under RCP8.5. The black dots indicate the five simulations agree on the sign of change (same as below)

世纪中期和末期达到6%。RCP8.5下中国平均降水在不同时期分别增加3%/4%/8%，同样各分区增加幅度大于RCP4.5，至21世纪末期近半数分区降水增加幅度超过10%，西北干旱区达到16%。

2.3 极端气温(TX_x、TN_n)和降水(RX1day、CDD)指数

21世纪中期RCP4.5下，ensR预估TX_x在中国普遍升高，幅度一般在1.5°C以上(图4(a))，RCP8.5下TX_x进

一步升高，新疆北部、东北部分地区和青藏高原南部升高超过2.4°C(图4(b))。RCP4.5下TN_n在大部分地区升高1.2°C以上，其中青藏高原南部升高幅度最明显，中心高于3.3°C(图4(c))；RCP8.5下北方大部分地区升高幅度超过3°C，青藏高原南部中心高于3.9°C(图4(d))。注意到TX_x和TN_n的增加值都大于平均气温的升高值，同时TN_n的升高更大，反映未来中国高温热浪事件增加的同时，低温事件将减少，同时低温事件的减少可能会更明显。

表 2 ensR预估的中国和各分区21世纪初期/中期/末期降水变化(%)**Table 2** Future change of precipitation over China and the sub-regions for early/mid/end of the 21st century from ensR (%)

	年		冬季		夏季	
	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
东北	4/4/7	5/8/14	7/12/15	8/15/35	4/3/7	4/6/10
京津冀	3/4/2	3/4/12	11/15/18	11/24/50	2/3/-1	1/-1/3
长三角	4/2/5	7/5/5	7/7/10	12/17/21	3/0/2	6/2/3
长江中上游	2/2/3	3/2/6	3/3/7	8/6/10	3/3/4	3/3/6
粤港澳大湾区	3/3/9	5/4/8	6/3/23	14/6/14	1/3/8	3/5/14
海峡两岸	3/2/3	4/2/3	3/3/14	9/-1/10	1/2/2	2/4/7
西北干旱区	5/9/12	4/11/30	10/23/28	9/27/64	4/6/6	4/6/16
黄土高原	4/5/4	3/6/15	11/16/18	13/23/49	3/5/1	2/4/7
青藏高原	4/5/7	4/7/16	7/9/14	9/15/28	3/4/4	3/5/11
云贵高原	2/0/1	1/0/3	0/-3/2	3/-2/1	2/1/2	2/1/4
中国	3/4/5	4/5/12	6/8/13	9/12/25	3/3/4	3/4/8

未来在两种排放情景下RX1day在中国区域均增加明显(图4(e), (f)), 其空间分布差异不大, 在RCP4.5和RCP8.5情景下一般分别在5%~10%和10%以上, 表明中国未来极端降水强度将增大. CDD在中国北方以普遍减少、南方普遍增加为主(图4(g), (h)), 在RCP8.5下的变化更明显, 北方一般减少(缩短)1~5 d, 西北地区降水稀少的塔里木盆地和柴达木盆地达到10 d以上, 南方的减少值一般在5 d以内. 在RX1day和CDD变化明显的地区, ensR各模拟间一致性较好, 变化信号的可靠性相对较大. 中国区域平均RCP4.5和8.5的RX1day增加分别为9%(7%~10%)和12%(7%~16%); CDD减少均为2 d, 但最大最小值范围有所不同, 分别为1~2和2~3 d. 注意到中国南方大部分地区, 预估的RX1day和CDD会同时增加, 表明这些地区未来会出现极端降水事件和干旱事件同时增加的情况.

表3给出中国以及各分区ensR预估TXx、TNn、RX1day和CDD的年变化. 与平均地面气温类似, 21世纪不同时期, 中国及不同分区的TXx和TNn均将升高, 幅度随时间增大, RCP8.5下更大, 且TNn的升高值普遍大于TXx, 截至21世纪末期RCP8.5情景下TXx和TNn分别达到4.7和5.5°C.

RX1day在不同地区也均为增加, RCP4.5下全国平均不同时期的增加值分别为7%/9%/12%, RCP8.5下增加幅度进一步加大, 如21世纪末期, 除云贵高原外, 各分区增加幅度均超过20%(表3). CDD在大部分地区以减小为主, 其中西北干旱区最为明显, RCP4.5和

RCP8.5下, 分别减少3/5/5和1/6/10 d. 21世纪不同时期在RCP4.5下, 区域平均的长三角、长江中上游、粤港澳大湾区、海峡两岸和云贵高原等地CDD的变化不大, 但在高排放的RCP8.5下, 在21世纪后期将有所增加.

3 结论和讨论

本研究使用一套RegCM4区域模式多模拟集合的动力降尺度试验数据, 进行了中国及其不同分区在RCP4.5和RCP8.5两种排放情景下, 21世纪不同时期气候变化的预估. 要素包括地面气温、降水和极端指数TXx、TNn、RX1day和CDD, 以21世纪中期为例分析了各要素变化的空间分布和模拟间变化的一致性, 并给出了不同时期中国及各分区上述要素的变化, 主要结论包括:

(1) 未来中国区域年平均和冬、夏季地面气温均将一致升高, 空间分布上冬季以青藏高原、夏季以西北干旱区升温最大. 相应的TXx和TNn在中国区域升高, 未来变暖背景下极端高温事件将增加, 极端低温事件将减少. 21世纪中后期及RCP8.5情景下各要素的变化更大. 京津冀、长三角、长江中下游、粤港澳大湾区、海峡两岸等城市集中、人口密集的地区, 未来夏半年发生高温热浪的频率和强度可能会明显增加, 对人体健康和室外工作产生不良影响; 青藏高原气温升高, 可能导致多年冻土区退化和冰川的消融, 引起相关地质灾害风险增加. 此外, 气温升高引起的蒸发增大,

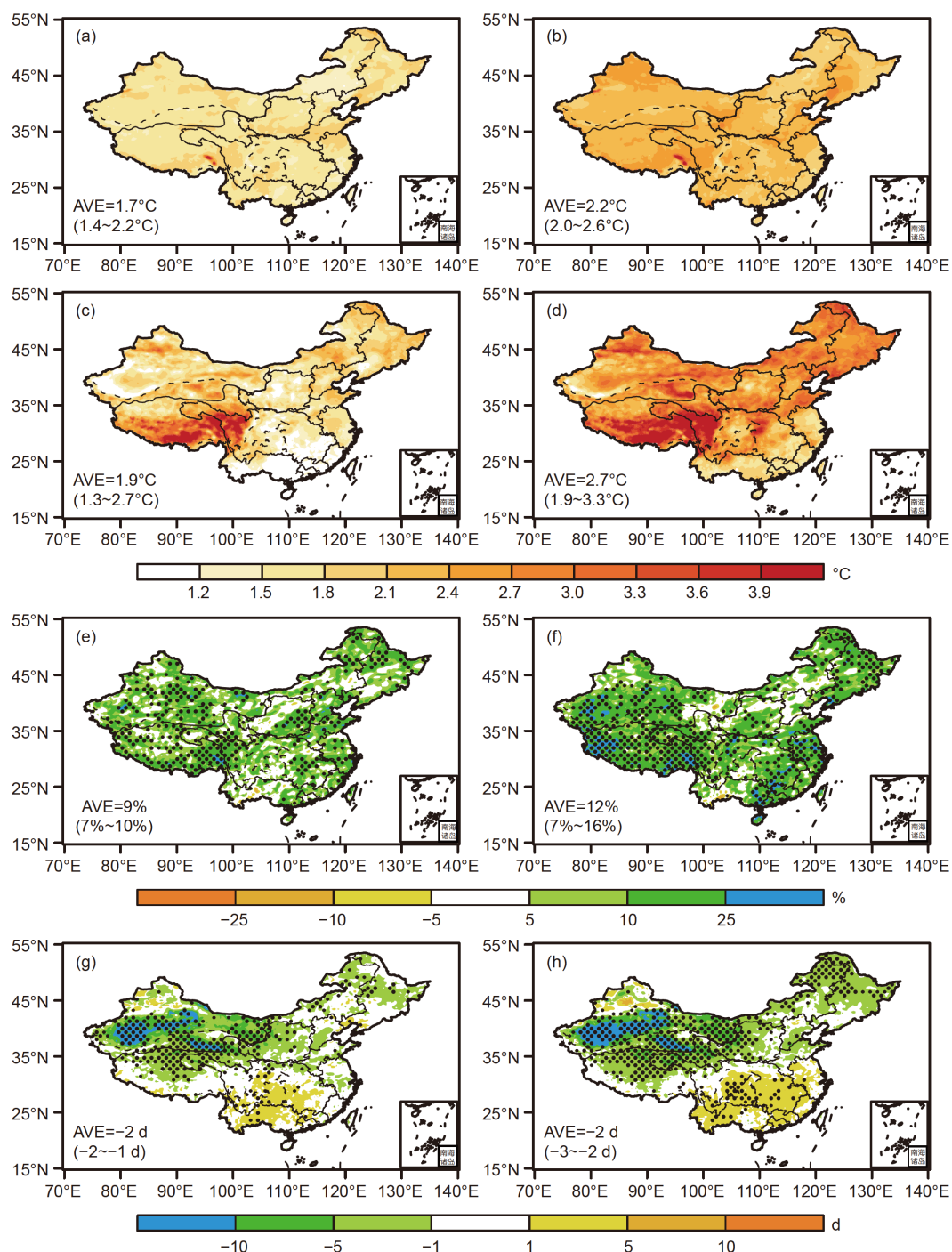


图4 ensR预估的21世纪中期TXx、TNn、RX1day和CDD变化。(a) RCP4.5下TXx；(b) RCP8.5下TXx；(c) RCP4.5下TNn；(d) RCP8.5下TNn；(e) RCP4.5下RX1day；(f) RCP8.5下RX1day；(g) RCP4.5下CDD；(h) RCP8.5下CDD

Figure 4 Future changes of TXx, TNn, RX1day and CDD in the mid-21st century from ensR. (a) TXx under RCP4.5; (b) TXx under RCP8.5; (c) TNn under RCP4.5; (d) TNn under RCP8.5; (e) RX1day under RCP4.5; (f) RX1day under RCP8.5; (g) CDD under RCP4.5; (h) CDD under RCP8.5

将可能在很大程度上，抵消水资源条件脆弱的西北干旱区、黄土高原等地降水增加的作用，加剧水资源缺乏的现状。

(2) 在气温升高的同时，降水总体呈增加趋势。年平均降水变化的分布，以在西部一致增加为主要特征；冬季北方大部分地区降水增加，以西北干旱区增加率

表 3 ensR预估的中国和各分区21世纪初期/中期/末期TXx、TNn、RX1day和CDD变化

Table 3 Future change of TXx, TNn, RX1day and CDD over China and the sub-regions for early/mid/end of the 21st century from ensR

	TXx(°C)		TNn(°C)		RX1day(%)		CDD(d)	
	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
东北	1.1/1.8/2.5	1.1/2.2/4.8	1.4/2.0/3.3	1.3/2.9/6.2	9/9/13	8/13/24	-1/-1/-1	-1/-2/-2
京津冀	1.2/1.6/2.6	1.2/2.2/4.9	1.5/1.9/3.7	1.4/2.6/5.5	6/11/9	6/5/20	-1/-1/-2	-1/-1/-4
长三角	1.1/1.7/2.5	1.1/2.1/4.6	1.1/1.6/2.5	1.4/2.1/4.1	7/10/19	13/17/27	-1/-1/0	-1/1/1
长江中上游	1.1/1.7/2.4	1.1/2.2/4.6	1.4/1.9/3.0	1.4/2.8/5.2	6/8/11	8/12/24	0/0/0	-1/1/1
粤港澳大湾区	1.0/1.5/2.1	1.1/2.0/4.1	0.8/1.1/1.7	1.0/1.8/3.5	13/9/20	17/17/30	0/0/0	0/2/2
海峡两岸	0.9/1.5/2.0	1.1/1.9/4.1	0.8/1.2/1.9	1.1/1.8/3.6	6/10/10	11/11/24	-1/0/0	-1/1/1
西北干旱区	1.3/1.7/2.5	1.2/2.3/4.9	1.3/1.8/3.6	1.7/2.6/5.4	5/9/12	5/11/29	-3/-5/-5	-1/-6/-10
黄土高原	1.2/1.7/2.6	1.3/2.2/4.8	1.2/1.5/3.1	1.3/2.6/5.1	4/8/8	6/9/22	-1/-2/-2	-1/-2/-5
青藏高原	1.1/1.7/2.6	1.3/2.3/4.6	1.5/2.6/3.6	1.6/3.2/6.5	7/10/14	9/14/31	-1/-2/-2	-1/-3/-4
云贵高原	1.0/1.7/2.4	1.2/2.2/4.5	1.1/1.4/2.4	1.1/2.3/4.1	5/4/6	5/7/17	0/1/1	0/2/2
中国	1.1/1.7/2.5	1.2/2.2/4.7	1.3/1.9/3.2	1.4/2.7/5.5	7/9/12	8/12/25	-1/-2/-2	-1/-2/-4

最大; 夏季降水变化分布型较为复杂, 正负相间, 但各分区和中国区域平均仍以增加为主, 幅度小于冬季。未来极端降水指数RX1day以增加为主, CDD在中国北方减少、南方增加。降水相关的各变量在变化幅度相对较大的地区模拟间一致性较好, 同样变化幅度随时间推移而增加, 并以RCP8.5下幅度更大。中国南方地区将出现极端降水事件和干旱时间同时增加的现象。生态环境脆弱的西北干旱区、黄土高原以及青藏高原地区, 未来极端降水事件增加可能会导致滑坡、泥石流等发生频率的增加, 此外这些地区降水量的增加可能很大程度上源于强降水事件增加, 这种情况下对能够有效利用的水资源的影响也有待开展进一步的分析研究。在京津冀、长三角、长江中下游、粤港澳大湾区、海峡两岸等经济发展重点地区, 需要注意应对极端降水

事件频率与强度变化引发的洪水及城市内涝灾害风险的加剧。

最后需要指出的是, 区域尺度的气候变化预估是一个很复杂的问题, 具体在中国区域, 未来气温升高、极端高温事件增加、低温事件减少、强降水事件增加等是预估的普遍结论, 但具体在变化的分布型及幅度方面, 当不同全球模式模拟结果存在不同时, 不同全球模式驱动下即使同一个区域模式, 所得到的结果也可能存在差异^[20,34~40]。未来需要使用和选择更多具有代表性的全球模式, 驱动多个区域模式, 开展动力降尺度试验^[23], 并对结果进行物理机制方面的深入分析, 以得到更为可靠的区域气候变化预估结果, 更好地服务于各行业和领域的影响、风险和脆弱性评估及适应对策研究^[41~46]。

致谢 文中涉及的中国地图经自然资源部地图技术审查中心审查, 审图号为GS(2020)1834号。

参考文献

- 1 Taylor K E, Stouffer R J, Meehl G A. An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bull Amer Meteor Soc*, 2012, 93: 485–498
- 2 Flato G, Marotzke J, Abiodun B, et al. Evaluation of climate models. In: Stocker T F, Qin D, 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. 741–866
- 3 Zhou B T. The Asian-Pacific oscillation pattern in CMIP5 simulations of historical and future climate. *Int J Climatol*, 2016, 36: 4778–4789
- 4 Ren Y, Zhou B, Song L, et al. Interannual variability of western North Pacific subtropical high, East Asian jet and East Asian summer precipitation: CMIP5 simulation and projection. *Quat Int*, 2017, 440: 64–70
- 5 Xia Y, Sun X G, Yan Y, et al. Change of ENSO characteristics in response to global warming (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2017, 62: 1738–1751 [夏杨, 孙旭光, 闫燕, 等. 全球变暖背景下ENSO特征的变化. 科学通报, 2017, 62: 1738–1751]

- 6 Sun Y, Zhou T J, Wu B. Simulation of long-term trends in hadley circulation during boreal winter using an ocean data assimilation scheme with the coupled general circulation model FGOALS-s2 (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2018, 63: 452–460 [孙咏, 周天军, 吴波. 耦合气候系统模式 FGOALS-s2海洋数据同化试验模拟的冬季Hadley环流长期变化趋势. 科学通报, 2018, 63: 452–460]
- 7 Giorgi F. Thirty years of regional climate modeling: Where are we and where are we going next? *J Geophys Res Atmos*, 2019, 124: 5696–5723
- 8 Zhang D F, Gao X J, Luo Y, et al. Downscaling a 20th century climate change of a global model for China from RegCM4.0: Attributable contributions of greenhouse gas emissions and natural climate variability (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2015, 60: 1631–1642 [张冬峰, 高学杰, 罗勇, 等. RegCM4.0对一个全球模式20世纪气候变化试验的中国区域降尺度: 温室气体和自然变率的贡献. 科学通报, 2015, 60: 1631–1642]
- 9 Qin P, Xie Z. Detecting changes in future precipitation extremes over eight river basins in China using RegCM4 downscaling. *J Geophys Res Atmos*, 2016, 121: 6802–6821
- 10 Yang H, Jiang Z, Li L. Biases and improvements in three dynamical downscaling climate simulations over China. *Clim Dyn*, 2016, 47: 3235–3251
- 11 Jing C, Tao H, Wang Y J, et al. Projection of extreme precipitation events in China based on regional climate model CCLM (in Chinese). *J Nat Resour*, 2017, 32: 266–277 [景丞, 陶辉, 王艳君, 等. 基于区域气候模式CCLM的中国极端降水事件预估. 自然资源学报, 2017, 32: 266–277]
- 12 Gao X J, Wu J, Shi Y, et al. Future changes in thermal comfort conditions over China based on multi-RegCM4 simulations. *Atmos Ocean Sci Lett*, 2018, 11: 291–299
- 13 Ji Z M. Advances and prospects of research on simulating transboundary black carbon and their climatic effects over the Tibetan Plateau (in Chinese). *Progr Geogr*, 2018, 37: 465–475 [吉振明. 青藏高原黑碳气溶胶外源传输及气候效应模拟研究进展与展望. 地理科学进展, 2018, 37: 465–475]
- 14 Shi Y, Wang G, Gao X. Role of resolution in regional climate change projections over China. *Clim Dyn*, 2018, 51: 2375–2396
- 15 Wu J, Gao X J, Xu Y. Climate change projection over Xiong'an District and its adjacent areas: An ensemble of RegCM4 simulations (in Chinese). *Chin J Atmos Sci*, 2018, 42: 696–705 [吴婕, 高学杰, 徐影. RegCM4模式对雄安及周边区域气候变化的集合预估. 大气科学, 2018, 42: 696–705]
- 16 Yao J C, Zhou T J, Zou L W. Dynamical downscaling of tropical cyclone and associated rainfall simulations of FGOALS-g2 (in Chinese). *Chin J Atmos Sci*, 2018, 42: 150–163 [姚隽琛, 周天军, 邹立维. 基于气候系统模式FGOALS-g2的热带气旋活动及其影响的动力降尺度模拟. 大气科学, 2018, 42: 150–163]
- 17 Han Z, Shi Y, Wu J, et al. Combined dynamical and statistical downscaling for high-resolution projections of multiple climate variables in the Beijing-Tianjin-Hebei region of China. *J Appl Meteorol Climatol*, 2019, 58: 2387–2403
- 18 Xu Z F, Han Y, Yang Z L. Dynamical downscaling of regional climate: A review of methods and limitations. *Sci China Earth Sci*, 2019, 62: 365–375 [徐忠峰, 韩瑛, 杨宗良. 区域气候动力降尺度方法研究综述. 中国科学: 地球科学, 2019, 49: 487–498]
- 19 Zhou B, Wu J, Xu Y, et al. Projected changes in autumn rainfall over West China: Results from an ensemble of dynamical downscaling simulations. *Int J Climatol*, 2019, 39: 4869–4882
- 20 Wu J, Gao X. Present day bias and future change signal of temperature over China in a series of multi-GCM driven RCM simulations. *Clim Dyn*, 2020, 54: 1113–1130
- 21 Giorgi F, Coppola E, Solmon F, et al. RegCM4: Model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains. *Clim Res*, 2012, 52: 7–29
- 22 Gao X, Giorgi F. Use of the RegCM system over East Asia: Review and perspectives. *Engineering*, 2017, 3: 766–772
- 23 Giorgi F, Jones C, Asrar G R. Addressing climate information needs at the regional level: The CORDEX framework. *WMO Bull*, 2009, 58: 175–183
- 24 Gao X J, Shi Y, Giorgi F. Comparison of convective parameterizations in RegCM4 experiments over China with CLM as the land surface model. *Atmos Ocean Sci Lett*, 2016, 9: 246–254
- 25 Gao X, Shi Y, Han Z, et al. Performance of RegCM4 over major river basins in China. *Adv Atmos Sci*, 2017, 34: 441–455
- 26 Han Z Y, Gao X J, Shi Y, et al. Development of Chinese high resolution land cover data for the RegCM4/CLM and its impact on regional climate simulation (in Chinese). *J Glaciol Geocryol*, 2015, 37: 857–866 [韩振宇, 高学杰, 石英, 等. 中国高精度土地覆盖数据在RegCM4 /CLM模式中的引入及其对区域气候模拟影响的分析. 冰川冻土, 2015, 37: 857–866]
- 27 Gordon H B, O'Farrell S P, Collier M A, et al. The CSIRO Mk3.5 Climate Model. CAWCR Technical Report, 2010, 21: 1–74
- 28 Hazeleger W, Severijns C, Semmler T, et al. EC-Earth: A seamless earth-system prediction approach in action. *Bull Amer Meteor Soc*, 2010, 91: 1357–1364
- 29 Collins W J, Bellouin N, Doutriaux-Boucher M, et al. Development and evaluation of an Earth-system model—HadGEM2. *Geosci Model Dev*, 2011, 4: 1051–1075
- 30 Stevens B, Giorgetta M, Esch M, et al. atmospheric component of the MPI-M Earth System Model: ECHAM6. *J Adv Model Earth Syst*, 2013, 5: 146–172
- 31 Bentsen M, Bethke I, Debernard J B, et al. The Norwegian Earth System Model, NorESM1-M—Part 1: Description and basic evaluation of the

- physical climate. *Geosci Model Dev*, 2013, 6: 687–720
- 32 Jiang D, Tian Z, Lang X. Reliability of climate models for China through the IPCC third to fifth assessment reports. *Int J Climatol*, 2016, 36: 1114–1133
- 33 Zhang X, Alexander L, Hegerl G C, et al. Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. *Wiley Interdiscip Rev-Clim Chang*, 2011, 2: 851–870
- 34 Xu Y, Gao X, Giorgi F. Upgrades to the reliability ensemble averaging method for producing probabilistic climate-change projections. *Clim Res*, 2010, 41: 61–81
- 35 Gao X J, Shi Y, Zhang D F, et al. Climate change in China in the 21st century as simulated by a high resolution regional climate model. *Chin Sci Bull*, 2012, 57: 1188–1195 [高学杰, 石英, 张冬峰, 等. RegCM3对21世纪中国区域气候变化的高分辨率模拟. 科学通报, 2012, 57: 374–381]
- 36 Xu C H, Xu Y. The projection of temperature and precipitation over China under RCP scenarios using a CMIP5 multi-model ensemble. *Atmos Ocean Sci Lett*, 2012, 5: 527–533
- 37 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
- 38 Tian D, Guo Y, Dong W. Future changes and uncertainties in temperature and precipitation over China based on CMIP5 models. *Adv Atmos Sci*, 2015, 32: 487–496
- 39 Chan D, Wu Q, Jiang G, et al. Projected shifts in Köppen climate zones over China and their temporal evolution in CMIP5 multi-model simulations. *Adv Atmos Sci*, 2016, 33: 283–293
- 40 Hui P, Tang J, Wang S, et al. Climate change projections over China using regional climate models forced by two CMIP5 global models. Part II: Projections of future climate. *Int J Climatol*, 2018, 38: e78–e94
- 41 Dong W, Chou J, Feng G. A new economic assessment index for the impact of climate change on grain yield. *Adv Atmos Sci*, 2007, 24: 336–342
- 42 Huang Y. Response of grain crop yields to climate warming (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2017, 62: 4220–4227 [黄耀. 粮食作物产量对气候变暖的响应. 科学通报, 2017, 62: 4220–4227]
- 43 Zhu Z C, Liu Y W, Liu Z, et al. Projection of changes in terrestrial ecosystem net primary productivity under future global warming scenarios based on CMIP5 models (in Chinese). *Clim Change Res*, 2018, 14: 31–39 [朱再春, 刘永稳, 刘祯, 等. CMIP5模式对未来升温情景下全球陆地生态系统净初级生产力变化的预估. 气候变化研究进展, 2018, 14: 31–39]
- 44 Tang Q H, Lan C, Su F G, et al. Streamflow change on the Qinghai-Tibet Plateau and its impacts (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2019, 64: 2807–2821 [汤秋鸿, 兰措, 苏凤阁, 等. 青藏高原河川径流变化及其影响研究进展. 科学通报, 2019, 64: 2807–2821]
- 45 Wang S J, Xiao C D. Global cryospheric disaster at high risk areas: Impacts and trend (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2019, 64: 891–901 [王世金, 效存德. 全球冰冻圈灾害高风险区: 影响与态势. 科学通报, 2019, 64: 891–901]
- 46 Cai R S, Tan H J. Impacts and risks of accelerating sea level rise on low lying islands, coasts and communities (in Chinese). *Clim Change Res*, 2020, 16: 163–171 [蔡榕硕, 谭红建. 海平面加速上升对低海拔岛屿、沿海地区及社会的影响和风险. 气候变化研究进展, 2020, 16: 163–171]

Summary for “中国21世纪气候变化的RegCM4多模拟集合预估”

Climate change of the 21st century over China from the ensemble of RegCM4 simulations

Dongfeng Zhang¹ & Xuejie Gao^{2,3*}¹ Shanxi Climate Center, Taiyuan 030006, China;² Climate Change Research Center, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;³ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China* Corresponding author, E-mail: gaoxuejie@mail.iap.ac.cn

Climate change in the 21st century over China and its different sub-regions is investigated in the study, based on the ensemble of a set of dynamical downscaling experiments over East Asia. The model employed in the experiments is the International Center for Theoretical Physics' Regional Climate Model, version 4 (RegCM4), at 25-km grid spacing, driven by five different CMIP5 (phase 5 of the Coupled Model Intercomparison Project) global models under the Representative Concentration Pathways RCP4.5 and RCP8.5. The model version used was customized for better performance over the region. Ten sub-regions of China were defined, with consideration paid to local economic and societal developments, vulnerability of ecosystems, and sensitivity to future climate changes.

A substantial warming in the future in China is projected, and this warming is more pronounced over the Tibetan Plateau during DJF (December-January-February) and Northwest China (where dry climate prevails) during JJA (June-July-August). A broad increase in temperature extreme indices—Namely, TXx (annual maximum daily maximum surface air temperature) and TNn (annual minimum daily minimum surface air temperature)—is reported, along with increased mean temperature. The results suggest more frequent and intense heat waves in the warm seasons, and thus more risks in terms of human health and mortality, over the sub-regions of Beijing-Tianjin-Hebei, the Yangtze Delta, the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, and the Cross-Taiwan Strait Coasts, with their dense cities and populations. Meanwhile, the warming over the Tibetan Plateau may lead to degradation of frozen soil and glacial melt, and thus a greater frequency of related geological hazards, while increased evapotranspiration following the warming over the Arid and Semi-arid Northwest and Losses Plateau sub-regions may worsen the situation with respect to water resource shortages.

Precipitation change in DJF shows a prevailing increase in northern China, with good agreement among the ensemble members. The increase is largest in the Northwest China sub-region. In southern China, small changes with a slight decrease in the southern part of the Yunnan-Guizhou Plateau are found. In JJA, precipitation increases over western China, the northern part of Northeast China, and the Yellow-Huai River basins, and shows small changes over other areas. A general increase in the precipitation extreme index (RX1day, the annual maximum 1-day precipitation) is found over the whole country, indicating more extreme precipitation events in the future. For the CDD index (the largest number of consecutive days when the daily precipitation amount is less than 1 mm), a general increase in the north and a decrease in the south are found. Regarding the increases of heavy precipitation events, the Arid and Semi-arid Northwest and Losses and Tibetan Plateau sub-regions, with their fragile ecosystems, may experience relatively more landslide and debris flow events; while over the more populated sub-regions, special concern is needed with respect to the likely greater frequency and more intense nature of flooding and urban-flooding events.

Quantitatively, the increases in annual mean temperature, TXx, and TNn in the mid-21st (2041–2060) century relative to the present day (1986–2005) over the whole of China under RCP4.5/RCP8.5 are 1.6/2.2°C, 1.7/2.2°C, and 1.9/2.7°C, respectively. For precipitation, RX1day, and CDD, the values of change are 4%/5%, 9%/12%, and both around –2 d, respectively. The changes become more pronounced with time. By the end of the 21st century (2081–2098), under the higher scenario of RCP8.5, the changes in annual mean temperature, TXx, TNn, precipitation, RX1day and CDD are 4.6, 4.7, 5.5°C, 12%, 25%, and –4 d, respectively. Finally, the deficiencies and uncertainties that remain in projecting the future climate over the region are also outlined and discussed in the paper.

climate change, regional climate model, ensemble projection, China and its different sub-regionsdoi: [10.1360/TB-2020-0231](https://doi.org/10.1360/TB-2020-0231)