

纪潇潇, 刘昌波, 潘婕, 等. 2015. PRECIS 模拟系统对中国地面气温变化的 QUMP 集成预估 [J]. 气候与环境研究, 20 (5): 500–510. Ji Xiaoxiao, Liu Changbo, Pan Jie, et al. 2015. Surface air temperature change over China based on the PRECIS_QUMP ensemble simulation [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 20 (5): 500–510, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2015.14185.

PRECIS 模拟系统对中国地面气温变化的 QUMP 集成预估

纪潇潇¹ 刘昌波^{1,2} 潘婕¹ 梁驹³ 佟金鹤¹ 冯强⁴ 许吟隆¹

1 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081

2 中国人民解放军 95762 部队, 重庆 405200

3 Department of Meteorology, University of Reading, Earley Gate, PO Box 243, Reading, RG6 6BB, UK

4 中国科学院对地观测与数字地球科学中心, 北京 100094

摘要 利用英国 Hadley 中心 QUMP 模式 (Quantifying Uncertainties in Model Projections) 集合的 5 组敏感性试验产生的全球气候背景场驱动区域气候模拟系统 PRECIS (Providing Regional Climates for Impacts Studies) 产生的降尺度数据, 分析 PRECIS 对中国地面气温变化的模拟能力, 同时对 SRES A1B 温室气体排放情景下 21 世纪中期 (2021~2050 年) 中国区域的温度做出预估。模拟能力分析结果显示: PRECIS 在 5 组背景场驱动下都可以较好地模拟出气候基准时段 (1961~1900 年) 中国区域气温的年变化和时空分布特征, 但存在暖偏差, 高敏感度模拟实验的暖偏差幅度要大于中低敏感度。预估结果显示: 5 组敏感性试验降尺度模拟的温度均呈增加趋势, 其中最低温度的变暖幅度高于平均温度和最高温度。高敏感度试验 Q10 模拟的升温幅度介于低敏感度模拟和中敏感度模拟之间, 其他敏感性试验表现出高敏感度模拟的升温幅度高于中敏感度模拟, 而中敏感度模拟高于低敏感度模拟。从模拟的升温空间分布上看, 西北地区升温幅度最显著, 可达 2.08~2.61 °C, 华南地区升温幅度相对较小, 为 1.33~1.84 °C, 但不同敏感度模拟的升温幅度具有一定的区域差异。

关键词 QUMP 集合 PRECIS 系统 SRES A1B 情景 地面气温 不确定性分析

文章编号 1006-9585 (2015) 05-0500-11

中图分类号 P467

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.14185

Surface Air Temperature Change over China Based on the PRECIS_QUMP Ensemble Simulation

Ji Xiaoxiao¹, Liu Changbo^{1,2}, Pan Jie¹, Liang Ju³, Tong Jinhe², Feng Qiang⁴, and Xu Yinlong¹

1 Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081

2 Unit 95762 of People's Liberation Army, Chongqing 405200

3 Department of Meteorology, University of Reading, Earley Gate, PO Box 243, Reading, RG6 6BB, UK

4 Center for Earth Observation and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094

Abstract Using the PRECIS (Providing Regional Climates for Impacts Studies) regional climate modeling system driven by five members of QUMP (Quantifying Uncertainties in Model Projections) model ensembles developed by the Hadley Center/Met Office, this study analyzes the simulations of the surface air temperature and predicts the temperature during 2021–2050 under the IPCC SRES A1B emissions scenario over China. The result shows reasonable capabilities of PRECIS-downscaled QUMP members in simulating the baseline (1961–1990) climatology of surface temperature over China, though general overestimations of temperature values compared with observation were found over several regions.

收稿日期 2014-09-03; 网络预出版日期 2015-05-13

资助项目 国家“十二五”科技支撑计划课题 2013BAC09B04、2012BAC19B10, 农业部“引进国际先进农业科学技术计划”重点项目 2011-G9

作者简介 纪潇潇, 1990 年出生, 女, 硕士研究生, 主要从事区域气候变化研究。E-mail: jx9198@126.com

通讯作者 许吟隆, E-mail: xuyi@ami.ac.cn

The projection shows increases in surface temperature simulated by all of the ensemble members, but differences of the warming tendency were also found among these members. The simulated annual mean daily minimum temperature showed the most significant warming compared with the annual mean daily mean temperature and the daily maximum temperature. Besides sensitivity test Q10, the warming simulated by each member corresponded with the climate sensitivity of the driven GCM. Overall, the most significant projected warming was shown over Northwest China with a range of 2.08–2.61 °C, while the lowest range (1.33–1.84 °C) was located over South China. However, differences of projected regional-scale warming were also shown among each member.

Keywords QUMP ensemble, PRECIS modeling system, SRES A1B scenario, Surface air temperature, Uncertainty analysis

1 引言

全球正经历着以变暖为主要特征的气候变化,这一变暖趋势已对全球的自然生态系统和人类社会产生了重大影响,未来气候变化的预估对应对气候变化的决策非常重要。全球气候模式(GCM)是进行气候变化模拟和预估的重要工具。科学家们在分析 GCM 对全球气候模拟能力的基础上,进行了未来气候的情景预估(Zhou and Yu, 2006; 李振朝等, 2013; Xin et al., 2013)。在中国,众多学者对 GCM 对中国气候的模拟能力进行了验证(许崇海等, 2007; 刘敏和江志红, 2009; 顾问等, 2010; Xu and Xu, 2012),并基于不断更新和发展的温室气体排放情景,利用单一 GCM 及多模式集合对中国未来气候的变化进行情景预估。许吟隆(2005)利用 HadCM2 和 ECHAM4 模式比较分析了 IS92a 情景下中国地区 21 世纪地面气温和降水量的变化趋势;多位学者利用耦合模式比较计划第 3 阶段(CMIP3)的模式预估结果,分析 SRES 情景(Nakicenovic et al., 2000)下中国未来气候的变暖趋势(姜大膀等, 2004; 江志红等, 2008, 李博和周天军, 2010; 李秀萍等, 2012; 崔妍等, 2013)。目前中国学者正在进行 CMIP5 模拟的 RCPs 情景(Moss et al., 2008)下中国气候变化的情景分析(Xu and Xu, 2012; Chen, 2013; 张莉等, 2013; Liu et al., 2014)。

但由于 GCM 的水平分辨率有限[约 2.5°(纬度)×2.5°(经度)],GCM 的模拟值难以反映区域性的气候分布特征和高频气候变率(陈威霖和江志红, 2012)。基于区域气候模式(RCM)的动力降尺度法为解决 GCM 分辨率不足提供了有效途径。徐璇等(2011)对 GCM 和 RCM 模拟中国东部夏季降水季节演变做了比较,结果表明在模拟雨带范围、降水中心、东亚高空急流等方面,RCM 比

GCM 能更好地反映区域特征。高学杰等(2012)利用 RegCM3 模式单向嵌套日本 CCSR/NIES/FRCGC 的 MIROC3.2_hires 全球模式输出结果,对中国及东亚地区进行了水平分辨率为 25 km 的连续气候变化模拟试验,结果表明模式可较好地再现中国地区地面气温和降水的空间分布及数值。许吟隆等(2006)利用 Hadley 气候中心 50 km 分辨率的区域气候模拟系统 PRECIS (Providing REgional Climates for Impacts Studies) (Jones et al., 2004) 单项嵌套该中心全球海—气耦合气候模式 HadCM3 高分辨率大气框架 HadAM3P,结果显示 PRECIS 能够很好地模拟中国区域地面气温和降水的局地分布特征。基于这些区域气候模式的情景预估工作能更加合理地预估区域未来的气候状况(张勇等, 2006; 石英等, 2010; 杨红龙等, 2010; 吴佳等, 2012)。但这些基于 RCM 的情景分析多为基于单一 GCM 降尺度模拟分析,RCM 集合降尺度模拟结果的分析无疑可以丰富我们对模拟不确定性的科学认识。

QUMP 模式集合为同一 GCM 不同参数化方案形成的多模式集合,在同一温室气体排放假设条件下模拟生成不同的气候情景数据集。本研究采用英国气象局 Hadley 中心 QUMP 模式集合中的 5 组敏感性试验结果驱动区域气候模拟系统 PRECIS,在评估不同的敏感性试验驱动 PRECIS 对中国区域气候模拟能力的基础上,对未来中国区域气温做出预估,从而量化分析 PRECIS 模拟结果的不确定性。

2 模式与数据介绍

PRECIS 区域气候模拟系统是由英国气象局研发的 HadCM3 发展而来,时间积分步长为 5 min,水平输出分辨率在旋转坐标下为 0.44°(纬度)×0.44°(经度),在中纬度地区水平格点间隔约为 50 km。

PRECIS 的参数化过程和驱动方式等详细信息见 Jones et al. (2004)。PRECIS 已经成功地在世界各地进行了区域气候情景的模拟试验(许吟隆等, 2013)。

模式预估不确定性量化(Quantifying Uncertainties in Model Projections, QUMP) 是英国气象局 Hadley 中心通过调整全球气候模式 HadCM3 中重要的物理、动力过程参数形成的一组敏感性试验集合。当前基于全球不同研究机构和组织的 GCM 集合预估(如 CMIP3/5 等)由于参数化过程标准不一致, 很难分析不同参数化过程与预估不确定性的关联。因此, QUMP 基于 HadCM3 对温室气体排放情景下的全球气候进行多参数集合模拟, 一方面能为多模式集合预估提供一种替代方案, 同时可以对不同模式参数产生的预估不确定性进行分析(Murphy et al., 2007; Gosling et al., 2012)。

平衡气候敏感度指平衡全球平均温度对大气中浓度相对于工业化前加倍的响应(王绍武等, 2012), 即 CO₂ 加倍的条件下, 全球平均地表温度年平均值的平衡变化(IPCC, 2014)。QUMP 集合通过调节 HadCM3 的参数化过程并进行 CO₂ 加倍试验, 形成了一组不同敏感度的集合成员, 总共包括了 HadCM3 Q0-Q16 共 17 个成员, Q1-Q16 代表不同气候敏感度。其中 Q1 气候敏感度最低, Q16 气候敏感度最高。Q0 是标准参数化模型, 它的敏感度介于 Q6、Q7 之间。

通过分析各敏感性试验对中国和各区域的模拟能力, 并且分析其在 2080s 时段的预估结果之后, 针对中国选取了具有代表性的敏感性试验, 分别为: Q0(控制试验)、Q1(低敏感度试验)、Q7(中敏感度试验)、Q13(高敏感度试验)、Q10(高敏感度试验但显示出不同于 Q13 的区域特征)。这 5 个敏感性试验组成了适用于中国区域的 QUMP 模式集合成员, 利用其对 PRECIS 进行驱动, 来产生高分辨率的中国区域气候情景数据。

本研究设置利用全球模式 HadCM3 不同参数化方案产生的 QUMP 模式集合向 PRECIS 提供初始和侧边界条件来驱动 PRECIS, 从而产生 SRES A1B 气候情景下 1951~2050 年的气候情景数据, 数据范围包括了东亚和西北太平洋, 经向和纬向格点数分别为 219 和 183。本文所用的对比观测数据为 Xu et al. (2009) 通过对 1961~2005 年中国大陆区域的 751 个气象观测站逐日温度资料进行插值得到的水平分辨率为 0.5°(纬度)×0.5°(经度)的

格点化数据, 包括日平均温度、日最高温度和日最低温度, 因其分辨率与模式数据的格点距相近, 便于它们之间的比较。

3 模拟能力分析

3.1 对温度空间分布的模拟

为了分析 QUMP 5 组敏感性试验对中国区域年平均温度的空间变化特征的模拟能力, 图 1 给出了 1961~1990 年观测和模拟的年平均温度空间分布。总体来看, 5 组敏感性试验都能够模拟出中国地区年平均温度的空间分布特征, 其中在西北地区存在暖偏差, 青藏高原地区存在冷偏差。除此之外, 高敏感度试验 Q10 和 Q13 在长江中下游一带的暖偏差也比较明显。

为了进一步检验 5 组敏感性试验的模拟能力, 计算观测场和模拟场的相关系数(表 1), 并绘制了偏差分布图(图 2)。主要做法为利用临近点插值, 将观测值插值到模式值的格点上, 同时对模式值和观测值由于海拔差距引起的误差利用温度直减率 $-0.65\text{ }^{\circ}\text{C}\text{ (100 m)}^{-1}$ 进行了订正, 求得模式值与观测值的空间相关系数 r , 其计算公式为

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (1)$$

其中, n 为模式值在中国区域格点数, \bar{x} 、 \bar{y} 分别为模拟场和观测场的平均值, x_i 、 y_i 分别为模拟场和观测场每个格点的数值。偏差分布由模拟场减去观测场求得。从表 2 可以看出, 各敏感性试验模拟值与观测值的空间相关系数都在 0.977 以上, 可以较好地模拟出年平均温度的空间分布状况。分析偏差图(图 2)来看, 5 组敏感性试验模拟值比观测值偏暖, 特别是高敏感度试验 Q10 与 Q13。对于低、

表 1 1961~1990 年模拟年平均温度与观测空间相关系数
Table 1 Spatial correlation coefficients between the observed and simulated annual mean temperatures during 1961-1990

敏感性试验	相关系数
Q0	0.9778
Q1	0.9772
Q7	0.9784
Q10	0.9779
Q13	0.9776

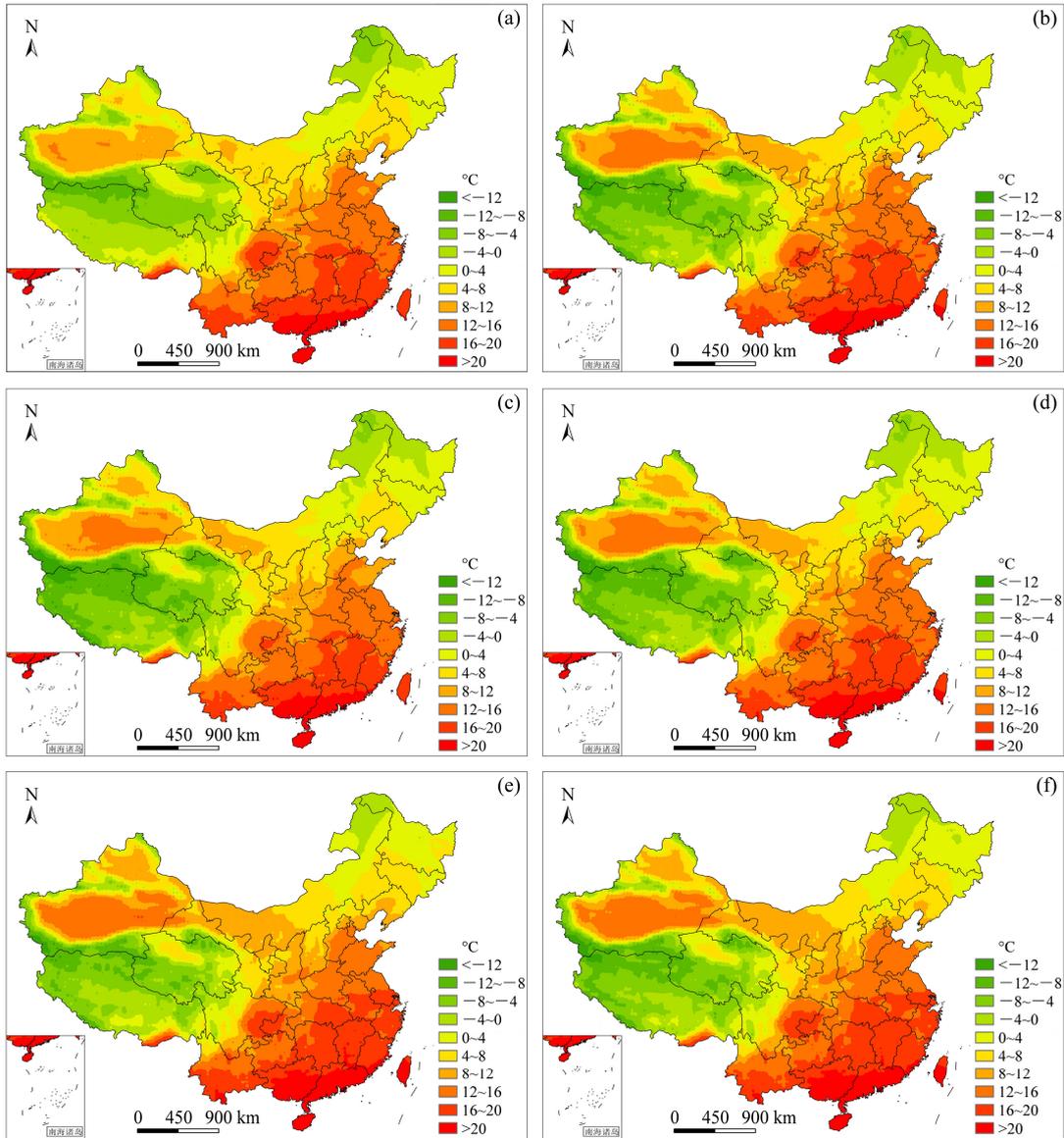


图1 1961~1990年(a)观测和(b)Q0、(c)Q1、(d)Q7、(e)Q10、(f)Q13敏感性试验模拟的年平均温度空间分布

Fig. 1 Annual average temperature (a) observed and simulated in (b) Q0, (c) Q1, (d) Q7, (e) Q10, and (f) Q13 sensitivity tests during 1961–1990

中敏感度试验 Q0、Q1、Q7，模拟偏暖主要集中在西北和内蒙古地区，偏暖幅度约为 2~3 °C，部分地区偏暖达 3 °C 以上。华南、华中地区的暖偏差相对较小，约为 1~2 °C。青藏高原外围和西南地区的模拟值则存在较为明显的冷偏差，偏冷约 2~3 °C。东北、华北和华东地区模式模拟的偏差较小，比观测值偏高偏低的幅度小于 1 °C。对于高敏感度试验 Q10 和 Q13，除青藏高原外围模拟偏冷约 2~3 °C，全国大部分地区存在明显的暖偏差，大约偏暖 3 °C 及以上。从总体上看，高敏感度模拟的暖偏差幅度要高于低、中敏感度。

表 2 2021~2050 年相对于气候基准时段（1961~1990 年）平均温度、最高温度、最低温度的变化值

Table 2 Changes of mean temperature, maximum temperature, and minimum temperature during 2021–2050 relative to baseline period (1961–1990) °C

敏感性试验	变化值		
	平均温度	最高温度	最低温度
Q0	2.33	2.17	2.5
Q1	1.81	1.72	1.94
Q7	2.16	1.98	2.38
Q10	2.05	1.92	2.22
Q13	2.38	2.22	2.57

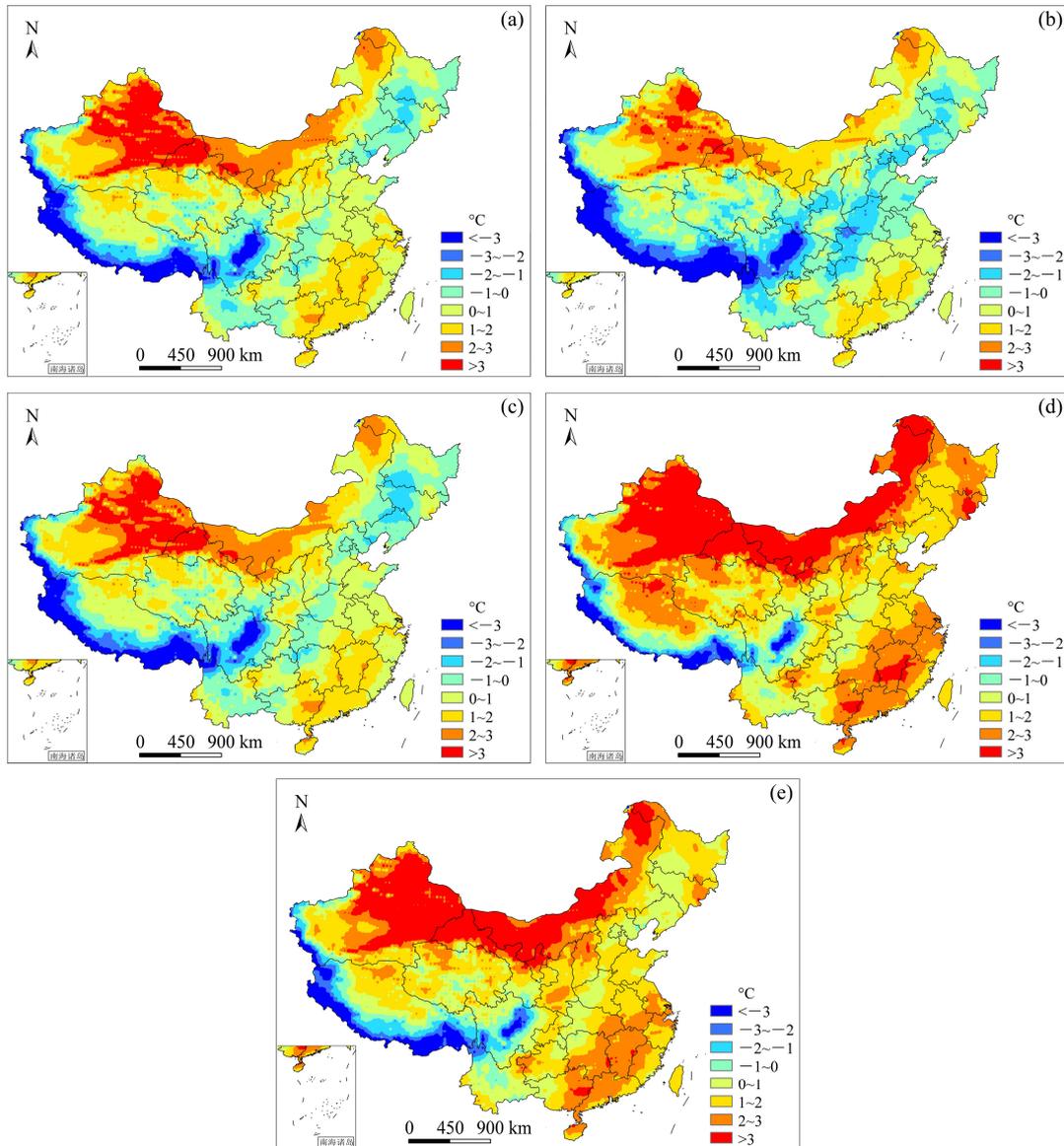


图2 1961~1990年各敏感性试验 (a) Q0、(b) Q1、(c) Q7、(d) Q10、(e) Q13 模拟年平均温度的偏差分布

Fig. 2 Annual average temperature bias from (a) Q0, (b) Q1, (c) Q7, (d) Q10, and (e) Q13 sensitivity tests relative to observations during 1961-1990

3.2 对温度逐月变化的模拟

从对中国地区日平均气温逐月变化的模拟能力上看,所有敏感性试验数据均可以较好地再现平均气温的年变化(图 3a),但是仍然存在一定的误差(图 3b)。分季节对偏差进行计算,其中高敏感度试验 Q10 和 Q13 模拟的四季温度都比观测值偏高。对于低、中敏感度试验 Q0、Q1 和 Q7,秋季和冬季模拟偏冷,夏季模拟偏暖。对于春季,Q0 试验模拟总体偏暖,Q1 和 Q7 试验则总体偏冷。除 Q1 试验以外,夏季模拟误差相对较大,其中 Q10 和 Q13 试验模拟偏暖约 1.8 °C,Q0 试验偏暖约

1.2 °C,Q7 试验偏暖约 0.75 °C。Q1 试验的冬季模拟误差相对较大,偏冷约 1.4 °C。

3.3 对气候倾向率的模拟

图 4a 给出 1961~2000 年中国区域观测和模拟的年平均温度的变化趋势,从总体上看各组模拟历史日均温均呈现变暖趋势,1991~2000 年观测值较气候基准时段(1961~1990 年)平均升温幅度为 0.63 °C。5 组敏感性试验中低敏感度试验 Q1 模拟值比观测值偏高约 0.1 °C,高敏感度试验 Q13 与观测值相近,仅偏低 0.02 °C,中敏感度试验 Q0 和 Q7 比观测值约低 0.1 °C,而高敏感度的非典型代表

试验 Q10 与观测值差距最大, 偏低约 0.3 °C。

从 1961~2000 年平均温度随时间的线性变化趋势值(图 4b)可以看出, 高敏感度非典型试验 Q10 模拟的升温趋势为 $0.136\text{ °C (10 a)}^{-1}$, 相对于观测的 $0.262\text{ °C (10 a)}^{-1}$ 明显偏小, 而其余各组模拟的升温趋势均与观测相近。

4 未来中国区域气温变化情景预估

4.1 对中国区域气温未来变化预估

从 2021~2050 年相对于气候基准时段(1961~1990 年)的温度变化值(表 2)可以看出, 2021~2050 年的温度较气候基准时段都呈增加的趋势, 升温的幅度都大于 1.7 °C, 平均温度和最低温度的升温幅度(除 Q1 试验外)都大于 2 °C。从表 2 还可以看出, 所有模式成员模拟的最低温度的升温幅度大于平均温度和最高温度, 但各组模拟值之间存在差异。低敏感度试验 Q1 升温幅度最低, 高敏感度试验 Q13 升温幅度最高, 中敏感度 Q0 和 Q7 升温幅度居中, Q10 作为高敏感度中的非典型代表, 升温幅度大于低敏感度而小于中敏感度。平均温度的升温范围为 1.81~2.38 °C, 最高温度的升温范围为 1.72~2.22 °C, 最低温度的升温范围为 1.94~2.57 °C。

4.2 对气候倾向率的预估

图 5a 给出未来 2021~2050 年中国区域模拟的年平均温度的变化趋势。总体上可以看出各组模拟的年平均温度从 2021 年开始都表现出明显的上升趋势, 2031 年后上升趋势更加显著。到 2050 年, 高敏感度试验 Q13 可升高 3.53 °C, 控制试验 Q0 升温幅度次之, 约升高 3.17 °C, 低敏感度试验 Q1 最低, 约升高 2.7 °C。

从 2021~2050 年平均温度随时间的线性变化趋势值(图 5b)可以看出, 变化趋势最大的是高敏感度试验 Q13 为 $0.729\text{ °C (10 a)}^{-1}$, 其次为控制试验 Q0 为 $0.644\text{ °C (10 a)}^{-1}$, 低敏感度试验 Q1 变化趋势最小, 为 $0.489\text{ °C (10 a)}^{-1}$ 。2021~2050 年温度的线性趋势变化值基本呈现出高敏感度大于中敏感度, 中敏感度大于低敏感度。

4.3 对温度空间变化的预估

从年平均温度变化值的空间分布(图 6)可以看出: 5 组敏感性试验模拟年平均温度变化在中国大部分地区呈增加趋势, 其中北方地区升温幅度大于南方地区。从总体上看高敏感度模拟的升温要显

著于低敏感度, 但在北方大部分地区控制实验 Q0 模拟的升温要显著于高敏感度。高敏感度试验 Q13 模拟的西北和东北地区升温可达 2.8 °C 以上, 青藏高原地区约为 2.2~2.4 °C。同属高敏感度试验的 Q10 在升温的空间分布上表现出与 Q13 不同的特征, 其升温高值区主要集中在西北地区和青藏高原北部, 升温幅度约为 2.2~2.4 °C。对于中敏感度试验(Q0、Q7), 升温高值区集中在西北和东北地区, 升温幅度约为 2.2~2.8 °C, 部分地区可达 2.8 °C 以上, Q0 试验在内蒙古地区比 Q7 试验升温幅度偏高。低敏感度试验 Q1 模拟的整体升温幅度最小, 升温高值区位于新疆地区, 升温幅度约为 2.2~2.4 °C, 其他大部分地区升温幅度约为 1.2~1.4 °C。

由于年平均温度升温变化具有较大的区域性, 因此需要综合考虑 QUMP 集合成员选择时的中国分区、中国地理和气象区划, 以更加详细了解各区域的温度变化。因此在区域升温分析中将中国分为 8 个区域来进行分析。划分的 8 个区域包括: 西北、东北、华北、华东、华中、华南、西南和西藏地区。

从总体上看, 在区域尺度下不同敏感度在同一温室气体排放情景下的模拟得到不同的表面温度响应(表 3), 其中西北地区升温最高, 升温幅度为 2.08~2.61 °C, 其次为东北(1.82~2.63 °C)和华北地区(1.78~2.21 °C), 升温最低的是华南地区, 升温幅度为 1.33~1.84 °C。其他地区的升温幅度分别为华东地区(1.49~1.91 °C), 华中地区(1.69~2.02 °C), 西藏地区(1.69~2.33 °C), 西南地区(1.46~2.10 °C)。高敏感度模拟的区域升温虽普遍

表 3 敏感性试验 (a) Q0、(b) Q1、(c) Q7、(d) Q10、(e) Q13 模拟的中国各分区 2021~2050 年相对于气候基准时段(1961~1990 年)的年平均温度变化

Table 3 Regional changes of the simulated annual mean temperatures from (a) Q0, (b) Q1, (c) Q7, (d) Q10, (e) Q13 sensitivity tests during 2021–2050 relative to baseline period (1961–1990) °C

	各试验模拟的年平均温度变化				
	Q0	Q1	Q7	Q10	Q13
东北	2.63	1.82	2.53	1.85	2.61
华北	2.21	1.78	2.06	1.92	2.20
华东	1.87	1.49	1.91	1.82	1.90
华南	1.75	1.33	1.72	1.60	1.84
华中	1.99	1.69	2.02	1.87	2.00
西藏	2.05	1.69	1.89	2.10	2.33
西北	2.61	2.08	2.32	2.33	2.61
西南	1.98	1.46	1.91	1.84	2.10

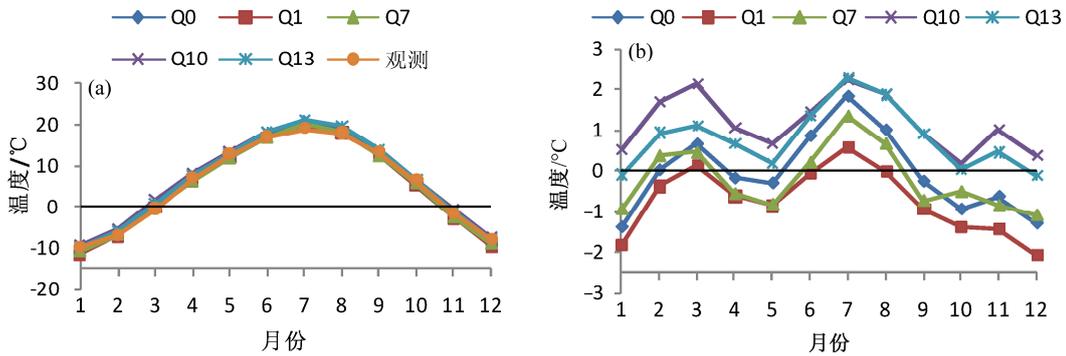


图3 1961~1990年模拟与观测的 (a) 月平均温度变化及其 (b) 偏差
Fig. 3 (a) Monthly variations of the mean temperature from simulations and observations and (b) their biases during 1961-1990

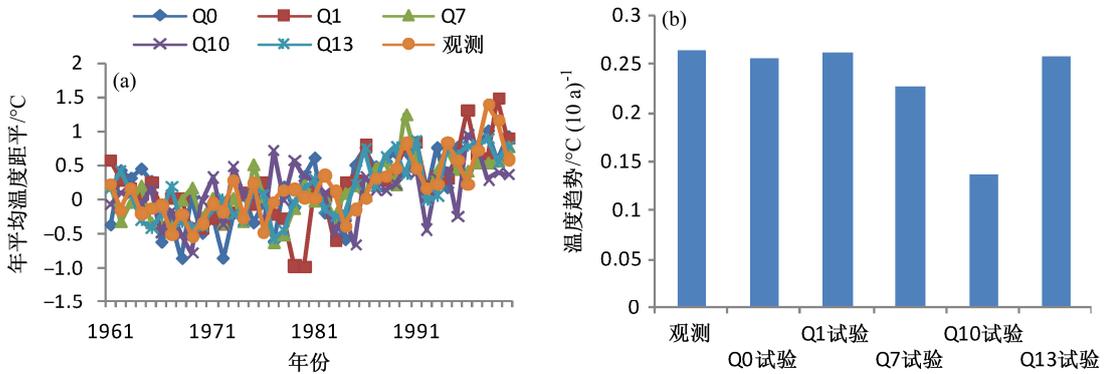


图4 1961~2000年平均温度距平 (a) 变化趋势和 (b) 线性趋势
Fig. 4 (a) Time series and (b) linear trends of the simulated annual mean temperature anomalies during 1961-2000

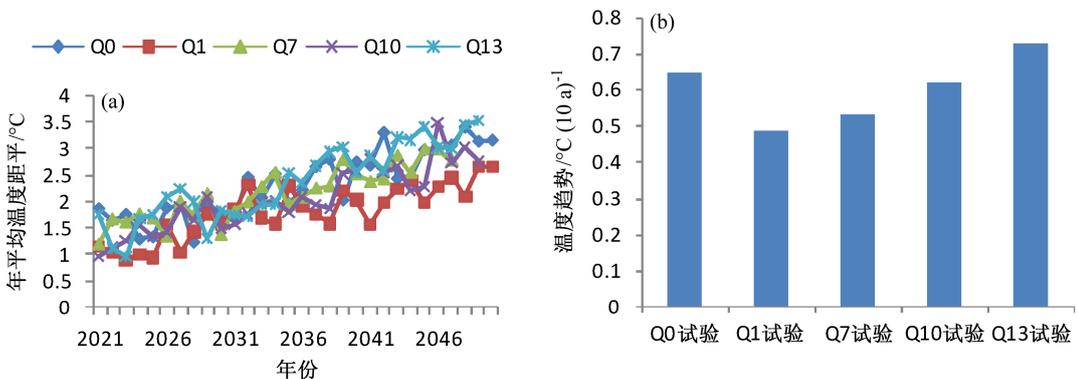


图5 2021~2050年模拟的年平均温度距平 (a) 变化趋势和 (b) 线性趋势
Fig. 5 (a) Time series and (b) linear trends of the simulated annual mean temperature anomalies during 2021-2050

高于低中敏感度,但并不绝对,各敏感度模拟得出的各区域未来最高增温幅度亦存在差别。华南、西藏和西南地区,高敏感度 Q13 增温最高,在东北、华北地区, Q0 增温最高,华东和华中地区 Q7 增温最高,西北地区 Q0 和 Q13 同属最高。高敏感度 Q10 模拟的各区域增温幅度则介于低敏感度和中敏感度之间,低敏感度 Q1 模拟的各区域增温幅度最小。

5 结果与讨论

利用 QUMP 集合的 5 组敏感性试验产生的全球气候背景场驱动 PRECIS 产生高分辨率的中国区域气候情景数据,对中国地区气候基准时段 (1961~1990 年) 的温度变化进行了模拟分析,并且预估了

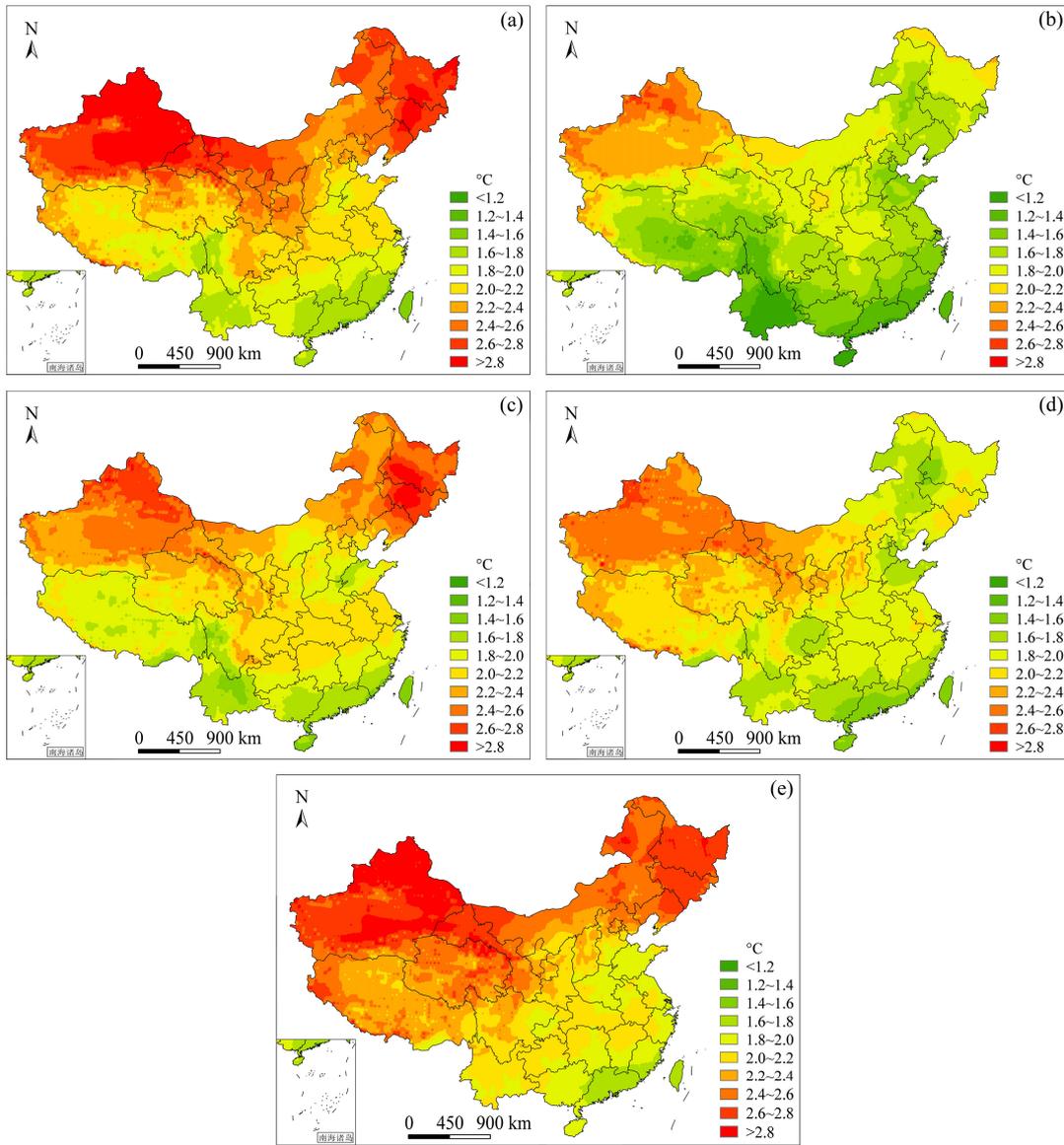


图 6 敏感性试验 (a) Q0、(b) Q1、(c) Q7、(d) Q10、(e) Q13 模拟 2021~2050 年相对于气候基准时段 (1961~1990 年) 年平均温度变化值空间分布

Fig. 6 Spatial period changes of the simulated annual mean temperature from (a) Q0, (b) Q1, (c) Q7, (d) Q10, and (e) Q13 sensitivity tests during 2021–2050 relative to baseline period (1961–1990)

SRES A1B 温室气体排放情景下 21 世纪中期的温度变化, 得到如下结论:

(1) QUMP 集合的 5 组敏感性试验均能够模拟出中国区域年平均温度的空间分布特征, 但模式值在大部分地区较观测值偏暖, 高敏感度模拟实验的暖偏差幅度要大于中低敏感度, 冷偏差主要位于青藏高原地区。各敏感性试验均能够再现平均温度的逐年变化趋势, 其中夏季模拟偏差较其他季节相对较大。

(2) 从模式模拟的 2021~2050 年温度变化来

看, 最低温度的变暖幅度显著于平均温度和最高温度, 平均温度的增温范围为 1.81~2.38 °C。通过对各敏感度成员之间的比较分析, 得出高敏感度 Q13 升温幅度最高, 中敏感度 Q0 和 Q7 升温幅度次之, 低敏感度 Q1 升温幅度最低。而高敏感度中非典型代表 Q10 的升温幅度介于低敏感度与中敏感度之间。

(3) 从各敏感度试验对年平均温度变化的空间预估可以看出, 北方地区的增温幅度普遍高于南方, 高中低敏感度预估结果的区域差别较大; 西北

地区是所有区域中升温最高的, 增温幅度为 2.08~2.61 °C, 其次是东北和中部地区; 华南地区的增温最不显著。各模拟成员模拟的区域增温具有差异性。

关于对 21 世纪中期温度的预估, 许多学者进行了研究。胡伯彦等 (2012) 利用 MM5V3 区域气候模式对中国地区实际温室气体浓度下当代气候 (1981~2000 年) 及 SRES A1B 情景下 21 世纪中期气候 (2041~2060 年) 分别进行了水平分辨率为 50 km 的模拟试验。对 21 世纪中期气候变化模拟结果显示: 各季节地面温度在全国范围内都将比当代升高 1.2~3.9 °C, 且升温幅度具有北方大于南方、冬季大于夏季的时空分布特征。王树舟和于恩涛 (2014) 开展了基于全球模式 MIROC 嵌套区域气候模式 WRF 的动力降尺度模拟试验, 预估了 SRES A1B 情景下中国 21 世纪中期 (2041~2060 年) 和末期 (2081~2100 年) 的气候变化。21 世纪中期预估结果表现出: 全国大部分区域年平均地表气温上升 2~4 °C, 升温幅度较大的是在北方地区和青藏高原。闫冠华等 (2011) 采用 20 多个全球气候模式, 在 SRES B1、A1B 和 A2 3 种排放情景下进行数值集合分析, 3 种排放情景在不同时间段的增温幅度分别为: 2011~2030 年, 增温 0.88~0.92 °C; 2046~2065 年, 增温 1.76~2.25 °C。本文预估 A1B 情景下 21 世纪中期 (2021~2050 年) 年平均温度的增温幅度在 1.81~2.38 °C, 增温幅度跟其他模式基本一致, 且同样存在北方地区增温幅度高于南方地区, 但本研究中增温幅度最高的区域位于西北地区。各区域模式存在差别的原因可能由于模式本身的固有偏差, 也可能由于所选取的对比时段及预估时段存在差别, 所以出现气温变化幅度的不同。

本文分析结果为 2021~2050 年间的线性升温趋势范围为 0.489~0.729 °C (10 a)⁻¹, 预估的升温趋势相较现阶段明显增大。目前关于全国升温趋势的研究多集中在 21 世纪初到 21 世纪末的时间阶段, 如江志红等 (2008) 利用 13 个气候模式模拟出 2000~2099 年在 SRES A1B 排放情景下, 年平均气温线性趋势平均达 4.2 °C (10 a)⁻¹, 变化范围 2.7~5.6 °C (10 a)⁻¹。高学杰等 (2012) 应用 RegCM3 区域气候模式模拟的 SRES A1B 情景下 2021~2100 年的年平均气温的线性趋势为 0.53 °C (10 a)⁻¹。本文中年平均气温的线性趋势之所以比较大, 与 A1B 情景中温室气体排放路径有关, 其表现为先升高后

趋于平缓的趋势, 因此预估的 21 世纪中期比末期增温趋势大。且胡伯彦等 (2012) 利用区域气候模式 MM5V3 预估出 2041~2060 年中国各子区域地面温度升高速率在 0.7~0.9 °C (10 a)⁻¹ 之间, 由于所选时段的差异, 比本研究预估趋势还要略大。

单个模式均存在或多或少的不足, 而气候变化预估不可避免的存在不确定性, 因此多模式集合是改进模式预估结果不可或缺的手段。耦合模式比较计划 (CMIP) 的目的是对全球气候模式模拟能力的不确定性进行表述, 避免片面性。本文利用的 QUMP 集合的 5 个成员驱动 PRECIS 形成一组模式集合, 是区域模式集合的一种方式。但同样的, 任何模式集合都不能涵盖未来预估的所有可能, 本研究仅对同一 GCM 的 5 种参数化方案进行降尺度处理, 定量给出中国未来气温的预估范围, 还需要与 CMIP3/CMIP5 的结果进行对比整合, 进行更多模式预估不确定性的分析, 为气候变化的影响评估工作提供科学依据。

致谢 感谢英国气象局 Hadley 气候中心提供 PRECIS 区域气候模拟系统, 同时感谢 Hadley 中心王长桂研究员在本论文完成过程中给予的帮助。

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.
- 陈威霖, 江志红. 2012. 全球海气耦合模式对中国区域年代际气候变化预测能力的评估 [J]. *气候与环境研究*, 17 (1): 81-91. Chen Weilin, Jiang Zhihong. 2012. Evaluation of the decadal prediction skill over China based on four global atmosphere-ocean coupled climate models [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 17 (1): 81-91.
- 崔妍, 李倩, 周晓宇, 等. 2013. 5 个全球气候模式对中国东北地区地面温度的模拟与预估 [J]. *气象与环境学报*, 29 (4): 37-46. Cui Yan, Li Qian, Zhou Xiaoyu, et al. 2013. Simulation and projection of the surface temperature based on five global climate models over northeast China [J]. *Journal of Meteorology and Environment (in Chinese)*, 29 (4): 37-46.
- 高学杰, 石英, 张冬峰, 等. 2012. RegCM3 对 21 世纪中国区域气候变化的高分辨率模拟 [J]. *科学通报*, 57 (5): 374-381. Gao Xuejie, Shi Ying, Zhang Dongfeng, et al. 2012. Climate change in China in the 21st century as simulated by a high resolution regional climate model [J]. *China Science Bulletin*, 57 (10): 1188-1195.
- Gosling S N, McGregor G R, Lowe J A. 2012. The benefits of quantifying climate model uncertainty in climate change impacts assessment: An example with heat-related mortality change estimates [J]. *Climatic Change*, 112 (2): 217-231.
- 顾问, 陈葆德, 杨玉华, 等. 2010. IPCC-AR4 全球气候模式在华东区域气候变化的预估能力评价与不确定性分析 [J]. *地理科学进展*, 29 (7):

- 818–826. Gu Wen, Chen Baode, Yang Yuhua, et al. 2010. Simulation evaluation and uncertainty analysis for climate change projections in East China made by IPCC-AR4 models [J]. *Progress in Geography (in Chinese)*, 29 (7): 818–826.
- 胡伯彦, 汤剑平, 王淑瑜. 2012. 中国地区 IPCC A1B 情景下 21 世纪中期气候变化的数值模拟试验 [J]. *气象科学*, 32 (2): 127–136. Hu Boyan, Tang Jianping, Wang Shuyu. 2012. A numerical simulation for mid-21st century climate change over China under IPCC A1B scenario [J]. *Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese)*, 32 (2): 127–136.
- IPCC. 2014. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis* [M]. United Kingdom: Cambridge University Press, 1535.
- 姜大膀, 王会军, 郎咸梅. 2004. SRES A2 情景下中国气候未来变化的多模式集合预测结果 [J]. *地球物理学报*, 47 (5): 776–784. Jiang Dabang, Wang Huijun, Lang Xianmei. 2004. Multimodel ensemble prediction for climate change trend of China under SRES A2 scenario [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 47 (5): 776–784.
- 江志红, 张霞, 王冀. 2008. IPCC-AR4 模式对中国 21 世纪气候变化的情景预估 [J]. *地理研究*, 27 (4): 787–799. Jiang Zhihong, Zhang Xia, Wang Ji. 2008. Projection of climate change in China in the 21st century by IPCC-AR4 models [J]. *Geographical Research (in Chinese)*, 27 (4): 787–799.
- Jones R G, Noguer M, Hassell D, et al. 2004. *Generating High Resolution Climate Change Scenarios Using PRECIS* [M]. UK: Meteorological Office Hadley Centre, 40.
- 李博, 周天军. 2010. 基于 IPCC A1B 情景的中国未来气候变化预估: 多模式集合结果及其不确定性 [J]. *气候变化研究进展*, 6 (4): 270–276. Li Bo, Zhou Tianjun. 2010. Projected climate change over China under SRES A1B scenario: Multi-model ensemble and uncertainties [J]. *Advances in Climate Change Research (in Chinese)*, 6 (4): 270–276.
- 李秀萍, 徐宗学, 程华琼. 2012. 多模式集合预估 21 世纪淮河流域气候变化情景 [J]. *高原气象*, 31 (6): 1622–1635. Li Xiuping, Xu Zongxue, Cheng Huaqiong. 2012. Projection of climate change with various emission scenarios over Huaihe River basin in the 21st century [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 31 (6): 1622–1635.
- 李振朝, 韦志刚, 吕世华, 等. 2013. CMIP5 部分模式气温和降水模拟结果在北半球及青藏高原的检验 [J]. *高原气象*, 32 (4): 921–928. Li Zhenchao, Wei Zhigang, Lü Shihua, et al. 2013. Verifications of surface air temperature and precipitation from CMIP5 model in Northern Hemisphere and Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 32 (4): 921–928.
- 刘敏, 江志红. 2009. 13 个 IPCC AR4 模式对中国区域近 40a 气候模拟能力的评估 [J]. *南京气象学院学报*, 32 (2): 256–268. Liu Min, Jiang Zhihong. 2009. Simulation ability evaluation of surface temperature and precipitation by thirteen IPCC AR4 coupled climate models in China during 1961–2000 [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 32 (2): 256–268.
- Liu Y H, Feng J M, Ma Z G. 2014. An analysis of historical and future temperature fluctuations over China based on CMIP5 simulations [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 31 (2): 457–467.
- Moss R H, Nakicenovic N, O'Neill B C. 2008. *Towards new scenarios for analysis of emissions, climate change, impacts, and response strategies* [R]. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 25.
- Murphy J M, Booth B B, Collins M, et al. 2007. A methodology for probabilistic predictions of regional climate change from perturbed physics ensembles [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 365 (1857): 1993–2028.
- Nakicenovic N, Alcamo J, Davis G, et al. 2000. *Special report on emissions scenarios: A special report of working group III of the intergovernmental panel on climate change* [M]. New York: Cambridge University Press, 1–599.
- 石英, 高学杰, 吴佳, 等. 2010. 华北地区未来气候变化的高分辨率数值模拟 [J]. *应用气象学报*, 21 (5): 580–589. Shi Ying, Gao Xuejie, Wu Jia, et al. 2010. Simulating Future climate changes over North China with a high resolution regional climate model [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 21 (5): 580–589.
- 王绍武, 罗勇, 赵宗慈, 等. 2012. 平衡气候敏感度 [J]. *气候变化研究进展*, 8 (3): 232–234. Wang Shaowu, Luo Yong, Zhao Zongci, et al. 2012. Equilibrium climate sensitivity [J]. *Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis (in Chinese)*, 8 (3): 232–234.
- 王树舟, 于恩涛. 2014. 基于 MIROC/WRF 嵌套模式的中国气候变化预估 [J]. *气候与环境研究*, 19 (1): 11–22. Wang Shuzhou, Yu Entao. 2014. Projected climate changes over China based on the nested MIROC/WRF model [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 19 (1): 11–22.
- 吴佳, 高学杰, 石英. 2012. 中国 20 年一遇气温和降水极值变化的高分辨率模拟 [J]. *气候变化研究进展*, 8 (4): 243–249. Wu Jia, Gao Xuejie, Shi Ying. 2012. Changes of 20-year return temperature and precipitation extremes over China simulated by RegCM3 [J]. *Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis (in Chinese)*, 8 (4): 243–249.
- Xin X G, Cheng Y J, Wang F, et al. 2013. Asymmetry of surface climate change under RCP2.6 projections from the CMIP5 models [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 30 (3): 796–805.
- 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.
- 许崇海, 沈新勇, 徐影. 2007. IPCC AR4 模式对东亚地区气候模拟能力的分析 [J]. *气候变化研究进展*, 3 (5): 287–292. Xu Chonghai, Shen Xinyong, Xu Ying. 2007. An analysis of climate change in East Asia by using the IPCC AR4 simulations [J]. *Advances in Climate Change Research (in Chinese)*, 3 (5): 287–292.
- 徐璇, 陆日宇, 石英. 2011. 全球和区域气候模式对中国东部夏季降水季节演变模拟的比较 [J]. *大气科学*, 35 (6): 1177–1186. Xu Xuan, Lu Riyu, Shi Ying. 2011. Comparison between the results on seasonal evolution of summer precipitation over eastern China simulated by a regional climate model and the driving GCM [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 35 (6): 1177–1186.
- Xu Y, Xu C H. 2012. Preliminary assessment of simulations of climate changes over China by CMIP5 multi-models [J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 5 (6): 489–494.
- Xu Y, Gao X J, Shen Y, et al. 2009. A daily temperature dataset over China and its application in validating a RCM simulation [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 26 (4): 763–772.
- 许吟隆. 2005. 中国 21 世纪气候变化的情景模拟分析 [J]. *南京气象学*

- 院学报, 28 (3): 323–329. Xu Yinlong. 2005. Analyses on scenario simulations of the 21st century climate change in China [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 28 (3): 323–329.
- 许吟隆, 张勇, 林一骅, 等. 2006. 利用 PRECIS 分析 SRES B2 情景下中国区域的气候变化响应 [J]. *科学通报*, 51 (17): 2068–2074. Xu Yinlong, Zhang Yong, Lin Yihua, et al. 2006. Analysis on the responses to climate change over China by PRECIS under the SERS B2 scenario [J]. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, 51 (17): 2068–2074.
- 许吟隆, 吴绍洪, 吴建国, 等. 2013. 气候变化对中国生态和人体健康的影响与适应 [M]. 北京: 科学出版社, 137pp. Xu Yinlong, Wu Shaohong, Wu Jianguo, et al. 2013. *Climate change impacts and adaptation in China: Ecological and human health [M] (in Chinese)*. Beijing: Science Press, 137pp.
- 闫冠华, 李巧萍, 邢超. 2011. 不同温室气体排放情景下未来中国地面气温变化特征 [J]. *南京信息工程大学学报 (自然科学版)*, 3 (1): 36–46. Yan Guanhua, Li Qiaoping, Xing Chao. 2011. Future surface air temperature changes in China under different greenhouse gas emission scenarios [J]. *Journal of Nanjing University of Information Science and Technology: Natural Science Edition (in Chinese)*, 3 (1): 36–46.
- 杨红龙, 许吟隆, 张镭, 等. 2010. SRES A2 情景下中国区域 21 世纪末平均和极端气候变化的模拟 [J]. *气候变化研究进展*, 6 (3): 157–163. Yang Honglong, Xu Yinlong, Zhang Lei, et al. 2010. Projected change in mean and extreme climate over China in the late 21st century from PRECIS under SRES A2 scenario [J]. *Advances in Climate Change Research (in Chinese)*, 6 (3): 157–163.
- 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 Li, Ding Yihui, Wu Tongwen, 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.
- 张勇, 许吟隆, 董文杰, 等. 2006. 中国未来极端降水事件的变化——基于气候变化预估结果的分析 [J]. *自然灾害学报*, 15 (6): 228–234. Zhang Yong, Xu Yinlong, Dong Wenjie, et al. 2006. Change of extreme precipitation events in China in future: An analysis based on prediction of climate change [J]. *Journal of Natural Disasters (in Chinese)*, 15 (6): 228–234.
- 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.