

何金海, 詹丰兴, 祁莉, 等. 2016. 全球变暖减缓期陆地地表气温变化特征和 CMIP5 多模式的未来情景预估 [J]. 大气科学, 40 (1): 33–45. He Jinhai, Zhan Fengxing, Qi Li, et al. 2016. Evolution of surface temperature during global warming hiatus based on observations and CMIP5 simulations [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (1): 33–45, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1409.14217.

全球变暖减缓期陆地地表气温变化特征和 CMIP5 多模式的未来情景预估

何金海¹ 詹丰兴^{1,2} 祁莉¹ 王迪³

¹ 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心/气象灾害教育部重点实验室, 南京 210044

² 江西省气象局, 南昌 330046

³ 辽宁省气象服务中心, 沈阳 110001

摘 要 2000 年后全球气温的增温率显著下降, 全球进入变暖减缓期。本文基于 CRU (Climatic Research Unit) 观测资料, 分析讨论了 2000 年后全球及欧亚中高纬度地区全球变暖的减缓特征, 评估了 CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) 试验多模式对全球变暖减缓的模拟及未来气温变化预估。结果表明, 2000 年后全球陆地平均地面气温的增温率大幅下降至 $0.14^{\circ}\text{C} (10\text{ a})^{-1}$, 仅为 1976~1999 年加速期增温率的一半。全球陆地 13 个区域中有 9 个地区的增温率小于 2000 年前, 4 个地区甚至出现了降温。其中以欧亚中高纬地区最为特殊。加速期 (1976~1999 年) 增温率达到 $0.50^{\circ}\text{C} (10\text{ a})^{-1}$, 为全球陆地最大, 2000 年后陡降至 $-0.17^{\circ}\text{C} (10\text{ a})^{-1}$, 为全球最强降温区, 为全球变暖的减缓贡献了 49.13%。并且具有显著的季节依赖, 减缓期冬季增温率下降了一 $2.68^{\circ}\text{C} (10\text{ a})^{-1}$, 而秋季升高了 $0.86^{\circ}\text{C} (10\text{ a})^{-1}$, 呈现反位相变化特征。CMIP5 多模式计划中仅 BCC-CSM1.1 在 RCP2.6 情景下和 MRI-ESM1 模式在 RCP8.5 下的模拟较好地预估了全球及欧亚中高纬度地区在 2000 年后增温率的下降以及欧亚中高纬秋、冬温度的反位相变化特征。BCC-CSM1.1 在 RCP2.6 情景下预估欧亚中高纬地区 2012 年后温度距平保持在 1.2°C 左右, 2020 年后跃至 2°C 附近振荡。而 MRI-ESM1 在 RCP8.5 情景下预估的欧亚中高纬度温度在 2030 年前一直维持几乎为零的增温率, 之后迅速升高。

关键词 全球变暖减缓 欧亚中高纬 CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5)

文章编号 1006-9895(2016)01-0033-13

中图分类号 P467

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1409.14217

Evolution of Surface Temperature during Global Warming Hiatus Based on Observations and CMIP5 Simulations

HE Jinhai¹, ZHAN Fengxing^{1,2}, QI Li¹, and WANG Di³

¹ Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters/Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

² Jiangxi Meteorology Bureau, Nanchang 330046

³ Liaoning Meteorological Service Centre, Shenyang 110001

收稿日期 2014-06-30; 网络预出版日期 2014-09-20

作者简介 何金海, 男, 1941 年出生, 博士生导师, 教授, 主要从事季风、全球变化研究。E-mail: hejhnew@nuist.edu.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41475086, 国家自然科学基金重大研究计划项目 91337216, 长江学者和创新团队发展计划项目 (PCSIRT), 江苏高校优势学科建设工程资助项目 (PAPD), 江苏省高校青蓝工程

Founded by Natural Science Foundation of China (Grants 41475086, 91337216), Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University (PCSIRT), A Project Funded by the Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions (PAPD), Qinglan Project of Jiangsu Province

Abstract The rise in global surface temperature has significantly declined after 2000. In this study, the evolution of the surface temperature of the global land-mean and Eurasia middle-high latitudes during the global warming hiatus was analyzed based on CRU observations. Simulations and projections were also evaluated using the Coupled Model Intercomparison Project 5 (CMIP5). The results indicate that, in the global warming hiatus period, the trend of the global land-mean surface temperature is only $0.14^{\circ}\text{C} (10 \text{ a})^{-1}$, which is half that during 1976–1999. The trend is less than that before 2000 in nine of the 13 global land regions, and four of them show a decreasing trend. The Eurasia middle-high latitude region is the most interesting among all the regions. For 1976–1999, the Eurasia middle-high latitude region shows the largest warming among all the land regions and reaches $0.50^{\circ}\text{C} (10 \text{ a})^{-1}$. After 2000, the trend significantly declines to $-0.17^{\circ}\text{C} (10 \text{ a})^{-1}$, the greatest cooling trend over land, globally, contributing 49.13% of the remarkable change in global land surface temperatures before and after 2000. Furthermore, the surface temperature of the Eurasia middle-high latitude region shows an opposite change in autumn and winter after 2000; the temperature of the former rises by $0.86^{\circ}\text{C} (10 \text{ a})^{-1}$, while the that of the latter decreases by $2.68^{\circ}\text{C} (10 \text{ a})^{-1}$. In CMIP5, only the simulation and projects in BCC-CSM1.1 under the RCP2.6 scenario and MRI-ESM1 under the RCP8.5 scenario reproduce the evolution of the global land-mean and Eurasia middle-high latitude surface temperature, as well as the opposite change between autumn and winter of the Eurasia middle-high latitude region, during the global warming hiatus. The temperature projection of the BCC-CSM1.1 under the RCP2.6 scenario for the Eurasia middle-high latitude remains flat, near 1.2°C , after 2012, and jumps to 2°C after 2020. The change in the MRI-ESM1's projected temperature under the RCP8.5 scenario is close to zero before 2030; the temperature then rises remarkably, to $^{\circ}\text{C} (10 \text{ a})^{-1}$.

Keywords Global warming hiatus, Eurasian middle-high latitudes, CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5)

1 引言

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 第五次报告指出, 十九世纪末期以来的全球变暖是毋庸置疑的 (Stocker et al., 2013)。由于温室气体的迅速增加, 全球年平均地表温度有明显的上升趋势 (Solomon et al., 2007)。2013 年 5 月夏威夷监测站的 CO_2 浓度突破了 $400.03 \text{ ppm} (\times 10^{-6})$ (Kosaka and Xie, 2013)。然而, 如图 1 所示, 2000 年以来全球平均温度升温不明显, 甚至出现了降温 (Easterling and Michael, 2009)。尽管 1999~2008 年全球年平均温度高于多年平均值, 但是并没有明显的线性增暖趋势 (Kaufmann et al., 2011)。1998~2012 年全球变暖的增温率为 $0.04^{\circ}\text{C} (10 \text{ a})^{-1}$, 与 1951~2012 年的 $0.11^{\circ}\text{C} (10 \text{ a})^{-1}$ 相比, 变暖速率显著减缓 (Stocker et al., 2013), 我们称之为全球变暖减缓, 国外学者称之为 Global warming hiatus (Kosaka and Xie, 2013)。Cohen et al. (2009) 发现与此同时北半球热带外大陆冬季的地表温度趋势存在着由增暖转变为近十年几近中性甚至变冷的系统性减弱现象。与此相伴随的是近年来北半球中高纬度地区冬季频繁发生的异常低温现象。2004~2005 年, 中国大部分地区冬季平均温度低于历史平均值 (丁一汇和马晓青, 2007)。2007~2008 年的

冬天, 中国冬季平均温度与多年平均温度相比呈现显著的负异常 (Zhang et al., 2009; Wen et al., 2009; Hong and Li, 2009; Wu et al., 2010)。2009~2010 年欧亚大陆和美国大部分地区出现了冬季持续性低温和暴风雪事件, 冬季平均温度显著低于气候平均值 (Cattiaux et al., 2010; Seager et al., 2010)。相应的大气环流场也发生了变化, 全球变暖减缓期冬季西伯利亚高压增强, 东亚大槽加深, 经向环流加强 (王迪等, 2014), 这势必对我国春季、夏季环流和雨型分布造成影响。对于全球变暖减缓的原因, 有的学者认为可能与外强迫有关, 例如平流层水汽导致的太阳辐射减弱 (Solomon et al., 2010), 对流层和平流层气溶胶的增多 (Solomon et al., 2011)。也有学者认为这可能是气候系统自身的自然变率, 特别是赤道东太平洋海温的 La Niña 型变冷, 大部分热量可能被存储在深海之中 (Meehl et al., 2011; Kosaka and Xie, 2013; Tollefson, 2014)。

2008 年耦合模式比较计划 (Coupled Model Intercomparison Project Phase, 简称 CMIP) 通过了一组新的试验方案, 开始了第 5 次耦合模式比较计划 (CMIP5)。不同于 IPCC Fourth Assessment Report (AR4) 中使用的 SRES A2、A1B 和 B1, 新的排放情景以 21 世纪末达到的辐射强迫大小命名, 称

为典型浓度路径 (Representative concentration pathway, 简称 RCP) (Van Vuuren et al., 2011), 根据辐射强迫由低到高分别为 RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0 和 RCP8.5 共四种情景, 其在 21 世纪末达到的辐射强迫值分别为 2.6、4.5、6.0 和 8.5 W m^{-2} 。已有部分研究利用 CMIP5 模拟结果分析了不同排放情景下地表气温的未来变化特征 (Xu and Xu, 2012; Zhang, 2012; Xin et al., 2013)。郭彦等 (2013) 评估了 25 个 CMIP5 模式对 1906~2005 年中国年平均气温变化的模拟能力, 指出在中国平均气温变化趋势、气温气候态空间分布和气温变化趋势空间分布三方面 CMIP5 模式都较 CMIP3 模式有所提高。张莉等 (2013) 分析了 CMIP5 计划单个模式和多模式集合平均在 3 种典型浓度路径下的 21 世纪全球与中国年平均地表气温变化特征及 2°C 升温阈值的出现时间。Fyfe et al. (2013) 指出 CMIP5 计划中 37 个模式的 117 次模拟实验中模拟的过去 20 年全球变暖强度偏强于观测。Kosaka and Xie (2013) 使用早期版本的气候模式发现如果模式中赤道东太平洋的海表温度用观测值代替模式模拟值, 模拟效果有效提高。但较少有研究评估 CMIP5 模式对全球陆地各区域变暖减缓的模拟效果。那么, CMIP5 计划中多模式对 2000 年后全球陆地各区域地表气温升温趋势的减缓模拟效果如何? 预估的未来温度又如何变化? 因此, 本文首先根据 CRU 观测地表气温分析全球变暖减缓期全球陆地及各区域的温度变化特征和季节依赖性, 并基于 CMIP5 计划中 33 个气候系统模式的历史气候模拟和 RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0 和 RCP8.5 情景下的气候预估, 评估多模式对全球变暖减缓的模拟效果。

2 资料和方法

本文使用的观测资料为英国 East Anglia 大学提供的 CRU TS 3.21 全球地表月平均温度 (http://adc.nerc.ac.uk/view/badc.nerc.ac.uk_ATOM_dataent_1256223773328276 [2014-07-21]), 空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 。研究时段为 1901~2012 年。春季为当年 3~5 月, 夏季为 6~8 月, 秋季为 9~11 月, 冬季为当年 12 月至次年 2 月。

本文使用了参加 CMIP5 计划的 33 个模式的两类试验输出的逐月地表气温资料, 第一类为历史气候模拟, 从 1901 年至 2005 年 12 月; 第二类为

不同排放情景下的未来情景模拟, 分别为 RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0 和 RCP8.5, 从 2006 年 1 月至 2050 年 12 月, 以评估模式对全球变暖减缓的模拟能力, 所用模式的介绍如表 1 所示。

表 1 文中采用的 CMIP5 模式和资料概况

Table 1 Information of CMIP5 climate models

模式名称	研发机构	分辨率
ACCESS1.0	CSIRO-BOM, Australia	192×145
BCC-CSM1.1	BCC, CMA, China	128×64
BNU-ESM	GCESS, BNU, China	128×64
CCSM4	NCAR, USA	288×192
CESM1(BGC)	NSF-DOE-NCAR, USA	288×192
CESM1(CAM5)	NSF-DOE-NCAR, USA	288×192
CESM1(FASTCHEM)	NSF-DOE-NCAR, USA	288×192
CESM1(WACCM)	NSF-DOE-NCAR, USA	144×96
CMCC-CESM	CMCC, Italy	96×48
CMCC-CM	CMCC, Italy	480×240
CMCC-CMS	CMCC, Italy	192×96
CNRM-CM5	CNRM-CERFACS, France	256×128
CNRM-CM5-2	CNRM-CERFACS, France	256×128
CSIRO-Mk3.6.0	CSIRO-QCCCE, Australia	192×96
FGOALS-g2	IAP, CAS, China	128×60
GFDL-CM3	NOAA GFDL, USA	144×90
GFDL-ESM2G	NOAA GFDL, USA	144×90
GFDL-ESM2M	NOAA GFDL, USA	144×90
GISS-E2-H	NASA GISS, USA	144×90
GISS-E2-R	NASA GISS, USA	144×90
IPSL-CM5A-LR	IPSL, France	96×96
IPSL-CM5A-MR	IPSL, France	144×143
IPSL-CM5B-LR	IPSL, France	96×96
MIROC5	AORI, NIES, JAMSTEC, Japan	256×128
MIROC-ESM	AORI, NIES, JAMSTEC, Japan	128×64
MIROC-ESM-CHEM	AORI, NIES, JAMSTEC, Japan	128×64
MPI-ESM-LR	MPI-M, Germany	192×96
MPI-ESM-MR	MPI-M, Germany	192×96
MPI-ESM-P	MPI-M, Germany	192×96
MRI-CGCM3	MRI, Japan	320×160
MRI-ESM1	MRI, Japan	320×160
NorESM1-M	NCC, Norway	144×96
NorESM1-ME	NCC, Norway	144×96

全球变暖具有显著的季节和区域不均匀性 (Cohen et al., 2012)。因此, 本文依据季明霞 (2009) 对全球陆地分区的方法, 即根据 20 世纪全球陆地各个地区不同的增暖速率, 将全球陆地 (南极除外) 分成 13 个区域, 如图 2 所示, 图中各数值为该区域陆地面积占全球陆地面积的百分比 $S(i)$ 。采用气候序列变化趋势的诊断方法计算不同地区的增暖速率, 并计算了各区域相对于全球陆地年平均温度增温速率的贡献率 $X(i)$, 具体

公式为

$$X(i)=\frac{A(i)\times S(i)}{G},\tag{1}$$

其中, $A(i)$ 为该区域的增温速率, G 为全球陆地平均的增温速率 $G=\sum_{i=1}^{13}(A(i)\times S(i))$, $i=1,2,\dots,13$, 表示全球陆地 13 个区域。

因此, 不同区域对全球陆地年平均温度增温率变化的贡献 $Y(i)$ 为

$$Y(i)=\frac{(A_2(i)-A_1(i))\times S(i)}{G_2-G_1},\tag{2}$$

其中, $A_1(i)$ 、 $A_2(i)$ 分别为两个不同时段该区域的温度线性趋势系数, G_2 和 G_1 分别为两个时段相应的全球陆地平均的增温率。

不同季节对于某区域年平均气温增温速率变化的贡献 $Z(i)$ 为

$$Z(i)=\frac{B_2(i)-B_1(i)}{A_2(i)-A_1(i)}\times 100\%,\tag{3}$$

其中, $B_1(i)$ 、 $B_2(i)$ 分别为该区域在两个不同时段内某季节的温度线性趋势系数。

3 全球变暖减缓期温度特征

图 1 为 CRU 资料表征的全球陆地年平均温度距平 (相对于 1961~1990 年平均) 的演变。图中曲线清晰地表明了全球陆地平均地表温度的升高和变暖过程, 19 世纪初全球陆地平均的温度距平约为 -0.3°C , 至 20 世纪温度已升高至 0.7°C , 增温率高达 $0.89^{\circ}\text{C} (100\text{ a})^{-1}$ (1901~2012 年)。值得注意的是, 全球陆地平均温度并不是简单的线性增长,

它存在显著的年代际尺度波动。19 世纪 10 年代至 40 年代温度缓慢升高, 增温率为 $0.16^{\circ}\text{C} (10\text{ a})^{-1}$ (表 2)。随后, 温度出现了下降 [$-0.15^{\circ}\text{C} (10\text{ a})^{-1}$], 全球陆地进入一个相对冷期。之后全球陆地温度变化平缓。从 1970 年代后期开始, 全球陆地温度突然开始加速升温, 增温率高达 $0.30^{\circ}\text{C} (10\text{ a})^{-1}$, 约为 1911~1940 年增温率的两倍。加速升温期持续了 20 余年后, 至 2000 年后全球陆地气温的变率减缓, 降为 $0.14^{\circ}\text{C} (10\text{ a})^{-1}$, 进入全球变暖减缓期 (Global Warming hiatus)。因此, 依据全球陆地平均温度增温率的变化, 可以定义四个典型的温度变化期, 如表 2 所示, 分别为升温期 (1911~1940 年)、降温期 (1941~1958 年)、加速期 (1976~1999 年) 和减缓期 (2000~2012 年)。本文重点关注 2000 年前后加速期和减缓期温度增温率的变化。

表 2 全球陆地年平均地面温度的四个典型时段
Table 2 Four typical periods for global land surface mean temperature variation

名称	时段	增温率/ $^{\circ}\text{C} (100\text{ a})^{-1}$
升温期 (P I)	1911~1940 年	0.16
降温期 (P II)	1941~1958 年	-0.15
加速期 (P III)	1976~1999 年	0.30
减缓期 (P IV)	2000~2012 年	0.14

依据季明霞 (2009) 对全球陆地分区的方法 (图 2), 全球陆地 13 个区域在 1901~2012 年及四个典型时段的温度增温率及其对全球陆地温度变化的贡献率如表 3 所示。对于百年尺度 (1901~2012 年), 增温率名列前三名的地区均为 40°N 以北的中高纬度地区, 分别为欧亚中高纬 [$1.45^{\circ}\text{C} (100\text{ a})^{-1}$]、北

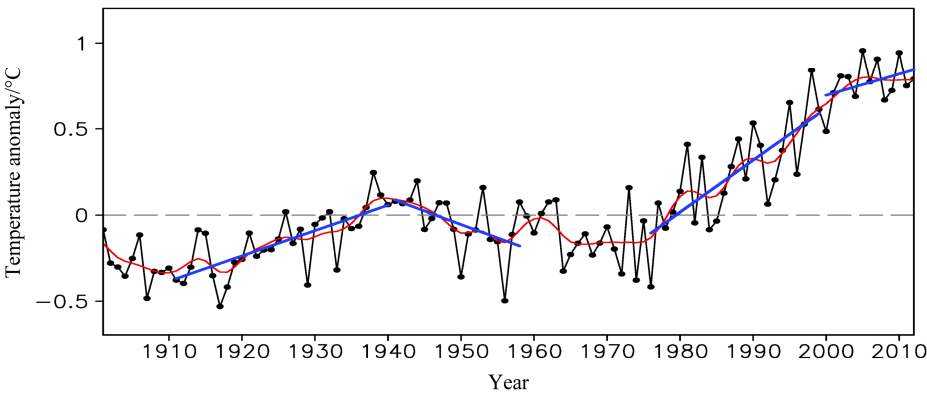


图 1 CRU (Climatic Research Unit) 观测资料表征的 1901~2012 年全球陆地年平均地面温度距平 (气候态为 1961~1990 年, 单位: $^{\circ}\text{C}$) 序列, 红色为 9 年滑动平均曲线, 蓝色为四个典型时段趋势线
Fig. 1 Anomaly of global land surface mean annual air temperature form CRU (Climatic Research Unit) observations (climatology is defined as 1961~1990, units: $^{\circ}\text{C}$), the red line shows nine-year running mean, while the blue lines are the trend lines during four typical periods

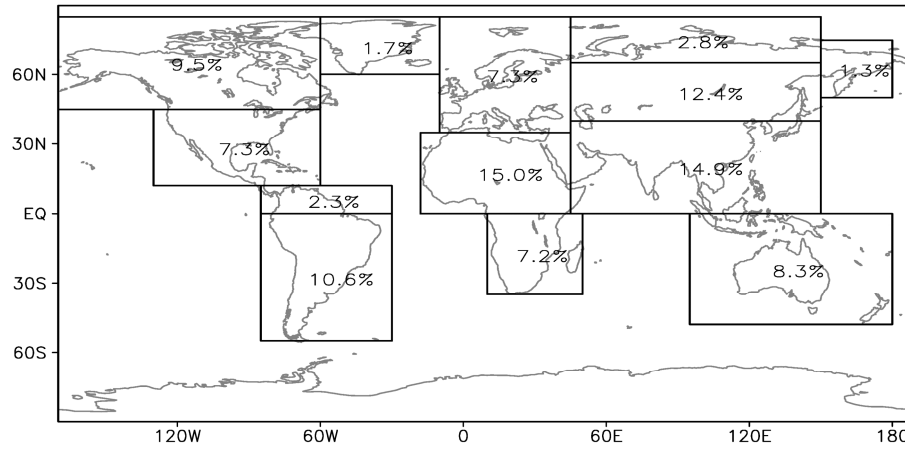


图2 全球 13 个区域的划分及各区域相对于全球陆地平均的面积百分比

Fig. 2 Definition of thirteen regions over global land and their area fractions relative to global land surface

表 3 CRU 观测得到全球陆地平均及 13 个区域 1901~2012 年、P I (1911~1940 年)、P II (1941~1958 年)、P III (1976~1999 年) 和 P IV (2000~2012 年) 年平均温度的增温率及各区域相对于全球陆地平均的贡献率。此外表中还给出了 P II 与 P I 之间、P III 与 P II 之间和 P IV 与 P III 之间增温率的变化 [单位: $^{\circ}\text{C} (10 \text{ a})^{-1}$] 以及各区域相对于全球陆地平均增温率变化的贡献率

Table 3 The trend of annual mean air temperature derived from CRU observations for global land mean and thirteen regions during four typical periods, and their contribution to global land surface mean variation. The table also shows the change [units: $^{\circ}\text{C} (10 \text{ a})^{-1}$] of the trend between P II and P I, P III and P II, P IV and P III, respectively, as well as their contribution to the change of the trend of global land surface mean temperature

		全球陆 地平均	欧亚中 高纬	俄罗斯 北方	西欧	北非	中 南亚	俄罗斯 东部	北美中 高纬	格陵 兰岛	北美 南部	南美 北部	南美 南部	南非	澳洲
1901~ 2012 年	增温率/ $^{\circ}\text{C}$ (100 a) $^{-1}$	0.94	1.45	1.21	1.05	0.79	1.14	1.14	1.27	0.65	1.04	0.43	0.45	0.58	0.47
	贡献率		19.13%	3.60%	8.15%	12.6%	18.0%	1.58%	12.8%	1.18%	8.08%	1.05%	5.07%	4.44%	4.15%
P I	增温率/ $^{\circ}\text{C}$ (10 a) $^{-1}$	0.16	0.12	0.47	0.20	0.21	0.08	0.50	0.22	0.49	0.41	-0.02	0.06	0.03	-0.01
	贡献率		9.36%	8.28%	9.19%	19.8%	7.50%	4.09%	13.2%	5.24%	18.8%	-0.29%	4.00%	1.36%	-0.52%
P II	增温率/ $^{\circ}\text{C}$ (10 a) $^{-1}$	-0.15	-0.19	-0.78	0.15	-0.20	-0.18	-0.25	-0.21	-0.23	0.14	-0.14	-0.25	-0.24	0.06
	贡献率		15.69%	14.54%	-7.29%	19.9%	17.9%	2.16%	13.3%	2.60%	-6.81%	2.14%	17.7%	11.5%	-3.32%
P III	增温率/ $^{\circ}\text{C}$ (10 a) $^{-1}$	0.30	0.50	0.44	0.47	0.26	0.27	0.26	0.26	0.17	0.32	0.15	0.21	0.29	0.19
	贡献率		20.36%	4.05%	11.27%	12.81%	13.21%	1.11%	8.11%	0.95%	7.67%	1.13%	7.31%	6.86%	5.18%
P IV	增温率/ $^{\circ}\text{C}$ (10 a) $^{-1}$	0.14	-0.17	1.69	0.07	0.32	-0.05	0.37	0.20	-0.14	0.34	0.08	0.20	0.07	-0.13
	贡献率		-15.6%	34.94%	3.77%	35.44%	-5.50%	3.55%	14.03%	-1.76%	18.33%	1.36%	15.65%	3.72%	-7.97%
P II 与 P I	变率/ $^{\circ}\text{C}$ (10 a) $^{-1}$	-0.31	-0.31	-1.25	-0.05	-0.42	-0.26	-0.76	-0.44	-0.72	-0.27	-0.12	-0.31	-0.27	0.08
	贡献率		12.36%	11.26%	1.17%	20.3%	12.5%	3.18%	13.5%	3.94%	6.34%	0.89%	10.6%	6.25%	-2.14%
P III 与 P II	变率/ $^{\circ}\text{C}$ (10 a) $^{-1}$	0.45	0.69	1.22	0.32	0.46	0.45	0.51	0.47	0.40	0.18	0.29	0.46	0.53	0.13
	贡献率		18.82%	7.51%	5.14%	15.2%	14.7%	1.46%	9.82%	1.50%	2.89%	1.47%	10.7%	8.39%	2.37%
P IV 与 P III	变率/ $^{\circ}\text{C}$ (10 a) $^{-1}$	-0.17	-0.67	1.25	-0.40	0.06	-0.32	0.11	-0.06	-0.31	0.02	-0.07	-0.01	-0.22	-0.32
	贡献率		49.13%	-20.70%	17.3%	-5.32%	28.2%	-0.85%	3.37%	3.12%	-0.86%	0.95%	0.63%	9.37%	15.7%

美中高纬 [$1.27^{\circ}\text{C} (100 \text{ a})^{-1}$] 和俄罗斯北方地区 [$1.21^{\circ}\text{C} (100 \text{ a})^{-1}$], 由此可见中高纬地区对于全球陆地温度变化的重要性。这其中又以欧亚中高纬升温最快, 占全球陆地平均的 19.13%。

在降温期 (1941~1958 年), 全球陆地 13 个区域中有 10 个区域的温度增温率为负值, 即全球 77% 以上的陆地一致表现为降温。在加速期 (1976~1999 年), 9 个区域的增温率显著高于升温期 (1911~1940 年), 这其中有 7 个区域的增温率达到了升温期的 2 倍以上。2000 年后的减缓期, 同样有 9 个区域的温度变率小于加速期 (1976~1999), 全球变暖的步伐减缓, 全球 39% 以上的陆地出现了负值的增温率, 呈现降温趋势。可见, 大多数区域温度演变特征与全球陆地平均的特征一致, 然而, 也存在显著的区域性特征和季节依赖性。

其中, 以欧亚中高纬度地区最为特殊、最为重要。在本文最为关注的加速期和减缓期, 其在加速期 (1976~1999 年) 的增温率高达 $0.50^{\circ}\text{C} (10 \text{ a})^{-1}$, 比全球陆地平均偏高 60% 以上, 贡献率也为 13 个区域中最高 (20.36%)。2000 年后, 它的增温率陡降至 $-0.17^{\circ}\text{C} (10 \text{ a})^{-1}$, 是全球陆地最强的降温区。与加速期相比, 增温率下降了一 $0.67^{\circ}\text{C} (10 \text{ a})^{-1}$, 为全球陆地全球变暖的减缓贡献了 49.13%。由表 3 我们也不难发现, 从升温期至减缓期, 在四个典型时段两两之间的转折中欧亚中高纬的贡献率依次为 12.36%、18.82% 和 49.13%, 贡献率逐步升高, 这表明欧亚中高纬的重要性日益增大。

欧亚中高纬地区不同的季节在加速期和减缓期的表现特征也不同。表 4 列出了欧亚中高纬四个季节在加速期和减缓期的温度变率。在加速期, 四个季节一致表现为升温, 其中冬季的升温趋势最为显著, 高达 $1.0^{\circ}\text{C} (10 \text{ a})^{-1}$ 。而 2000 年后的减缓期, 春、夏和冬季的增温率都显著下降, 春季和冬季甚至出现了降温趋势, 冬季的降温趋势最强, 达到一 $1.68^{\circ}\text{C} (10 \text{ a})^{-1}$, 因此从加速期至减缓期温度的增温率下降了一 $2.68^{\circ}\text{C} (10 \text{ a})^{-1}$, 为欧亚中高纬年平均温度增温率的减缓贡献了 103.88%。而与冬季紧邻的秋季是四季中唯一表现为增温率升高的季节, 在减缓期其增温率为 $1.09^{\circ}\text{C} (10 \text{ a})^{-1}$, 升高了 $0.86^{\circ}\text{C} (10 \text{ a})^{-1}$ 。可见, 在欧亚中高纬地区秋季和冬季在减缓期中呈现出反位相变化的趋势, 是什么原因造成了欧亚中高纬地区秋、冬季在减缓期的反位相变化? 这一现象值得将来的进一步研究。

表 4 欧亚中高纬地区各季节温度变率及其对该区域年平均温度变率的贡献

Table 4 The trend of seasonal temperature over Eurasian middle-high latitudes region during P III and P IV, and their contribution to the variation of annual mean temperature variation

	P III/ $^{\circ}\text{C} (10 \text{ a})^{-1}$	P IV/ $^{\circ}\text{C} (10 \text{ a})^{-1}$	P IV-P III/ $^{\circ}\text{C} (10 \text{ a})^{-1}$	贡献率
春季	0.43	-0.17	-0.60	23.26%
夏季	0.31	0.15	-0.16	6.20%
秋季	0.23	1.09	0.86	-33.33%
冬季	1.00	-1.68	-2.68	103.88%

4 CMIP5 多模式预估

上文讨论了全球陆地及欧亚中高纬地区在加速期和减缓期的温度变化特征。那么, 这些特征在 CMIP5 多模式评估计划中是否得到很好呈现? 在未来情景下温度又将如何变化? 本文选取 CMIP5 计划下 33 个模式的历史气候模拟和不同排放情景下的未来情景模拟进行评估。

4.1 历史气候试验

图 3 给出了本文使用的 33 个模式历史气候试验模拟的全球陆地年平均地面温度随时间的演变。历史气候试验时段截止为 2005 年, 因此本节讨论的时段为 1901~2005 年。各模式都存在一定的系统偏差, 平均而言与 CRU 观测的偏差约为 -2°C 至 1°C 之间 (图 3a)。去除气候态 (1961~1990 年) 后, 33 个模式历史试验模拟的温度距平与 CRU 十分接近, 尤其是 70 年代之后与 CRU 观测的偏差仅为 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 内 (图 3b)。33 个模式与 CRU 观测的相关系数均在 0.5 以上, 国家气候中心研发的 BCC-CSM1.1 模式最高, 为 0.85 (表 5)。

为了评估 33 个模式对全球陆地温度演变特征的模拟效果, 并从中挑选模拟效果较好的模式, 我们计算了各模式在 1901~2005 年世纪尺度以及前 3 个典型时段的增温速率, 如表 5 所示。我们将其与 CRU 观测进行比较, 如其位于观测值的 $1 \pm 20\%$ 区间内, 则认为其较好地模拟了该时段的温度变率。同时, 我们也对比了前 3 个典型时段相邻两个时段之间增温率的变化, 如模式值位于观测值 $1 \pm 40\%$ 区间内, 则认为其较好地刻画了这两个时段增温率的变化, 在表 5 中加 “*” 表示。虽然各模式温度的演变曲线与观测的偏差仅为 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 内 (图 3b), 但 33 个模式中仅有 42% 的模式较好地刻画了

1901~2005 年世纪尺度温度的增温率。3 个典型时段中各有 10、2 和 13 个模式的模拟效果较好。虽然 33 个模式中仅有 2 个模式较好地刻画了降温期的增温率，但分别有 7 个模式抓住了升温期至降温期增温率的下降，8 个模式模拟出了从降温期到加速期增温率的显著升高。在所有 6 组评估中若有 4 组或以上的模拟效果较好，我们认定该模式模拟效果较佳。由此，我们得到了四个效果较好的模式，它们分别是 BCC-CSM1.1、IPSL-CM5A-MR、MRI-ESM1 及 CESM1-WACCM 模式。4 个模式模

拟的全球陆地平均温度演变如图 4 所示，BCC-CSM1.1 和 IPSL-CM5A-MR 模式的表现尤为突出，系统偏差小，始终与 CRU 观测温度较为接近。

4.2 未来情景预估

在历史气候试验中对全球陆地平均温度模拟效果较好的四个模式，对于减缓期温度增温率的突然下降模拟效果如何？因历史气候试验仅到 2005 年，因此在本节对减缓期模拟能力的评估中，各模式资料中 2000~2005 年为历史气候试验结果，

表 5 CRU 观测与 CMIP5 多模式的全球陆地平均气温的相关系数及其在 1901~2005 年、P I、P II 和 P III 的增温率，P II—P I 和 P III—P II 时段间的增温率变化

Table 5 Correlation coefficients of global land surface mean temperature from CRU observations and those from historical simulations of CMIP5 models. The table also gives the trends during 1901–2005, P I, P II, and P III, as well as the changes of trend between P II and P I, P II and P III.

模式名称	相关系数	1901~2005 年增 温速率/ $^{\circ}\text{C} (10 \text{ a})^{-1}$	P I 增温速率/ $^{\circ}\text{C} (10 \text{ a})^{-1}$	P II 增温速率/ $^{\circ}\text{C} (10 \text{ a})^{-1}$	P III 增温速率/ $^{\circ}\text{C} (10 \text{ a})^{-1}$	P II—P I 增温变化/ $^{\circ}\text{C} (10 \text{ a})^{-1}$	P III—P II 增温变化/ $^{\circ}\text{C} (10 \text{ a})^{-1}$
CRU (观测)		0.74	0.15	-0.16	0.30	-0.30	0.46
BCC-CSM1.1	0.85	1.21	0.18*	-0.10	0.31*	-0.28*	0.41*
MPI-ESM-MR	0.81	1.24	0.14*	0.11	0.30*	-0.03	0.19
IPSL-CM5A-LR	0.79	1.14	0.05	0.01	0.36*	-0.04	0.35*
BNU-ESM	0.79	1.45	0.08	0.05	0.25*	-0.03	0.20
NorESM1-M	0.77	0.69*	0.12*	-0.04	0.22	-0.16	0.26
IPSL-CM5A-MR	0.77	0.96	0.14*	-0.10	0.25*	-0.24*	0.35*
GISS-E2-R	0.77	0.79*	0.09	0.07	0.11	-0.02	0.05
CMCC-CM	0.76	0.80*	0.09	0.17	0.27*	0.08	0.11
CESM1(FASTCHEM)	0.76	1.39	0.10	0.12	0.27*	0.02	0.15
FGOALS-g2	0.76	0.90	0.06	0.14	0.18	0.07	0.04
CCSM4	0.76	1.18	0.16*	0.14	0.15	-0.02	0.01
GISS-E2-H	0.75	0.92	0.11	-0.03	0.17	-0.14	0.20
CESM1(BGC)	0.75	1.18	0.09	-0.09	0.24*	-0.19*	0.33*
MRI-ESM1	0.75	0.83*	0.16*	-0.15*	0.15	-0.31*	0.31*
MIROC-ESM-CHEM	0.75	0.59	0.16*	-0.10	0.13	-0.26*	0.22
MIROC-ESM	0.74	0.72*	0.19	0.02	0.21	-0.18*	0.20
MPI-ESM-P	0.74	1.24	0.14*	0.17	0.16	0.03	-0.01
CESM1(WACCM)	0.74	1.20	0.10	-0.13*	0.26*	-0.23*	0.39*
MPI-ESM-LR	0.73	1.26	-0.03	-0.03	0.14	0.00	0.17
IPSL-CM5B-LR	0.73	0.84*	0.04	0.14	0.16	0.09	0.02
CNRM-CM5-2	0.73	0.72*	0.09	0.09	0.16	0.00	0.07
GFDL-ESM2M	0.73	0.79*	0.13*	0.09	0.23	-0.04	0.14
CNRM-CM5	0.72	0.60*	0.10	-0.04	0.28*	-0.13	0.32*
GFDL-ESM2G	0.72	0.55	0.09	0.00	0.29*	-0.10	0.29*
CESM1(CAM5)	0.71	0.68*	0.11	0.03	0.06	-0.08	0.03
NorESM1-ME	0.71	0.66*	0.11	0.00	-0.05	-0.11	-0.05
ACCESS1-0	0.71	0.67*	-0.01	0.10	0.22	0.11	0.12
MRI-CGCM3	0.66	0.68*	0.05	0.07	-0.01	0.02	-0.08
CMCC-CMS	0.64	0.77*	-0.02	0.04	0.34*	0.06	0.30*
CMCC-CESM	0.59	0.57	0.01	0.23	0.20	0.22	-0.03
MIROC5	0.57	0.49	0.12*	0.16	0.31*	0.04	0.16
GFDL-CM3	0.57	0.31	0.24	0.10	0.14	-0.14	0.05
CSIRO-Mk3.6.0	0.55	0.34	0.06	-0.01	0.14	-0.07	0.15

注：表中加“*”数字表示模式模拟的增温率位于 CRU 观测的 ($1 \pm 20\%$) 区间内，模式的增温变化位于 CRU 观测的 ($1 \pm 40\%$) 区间内。

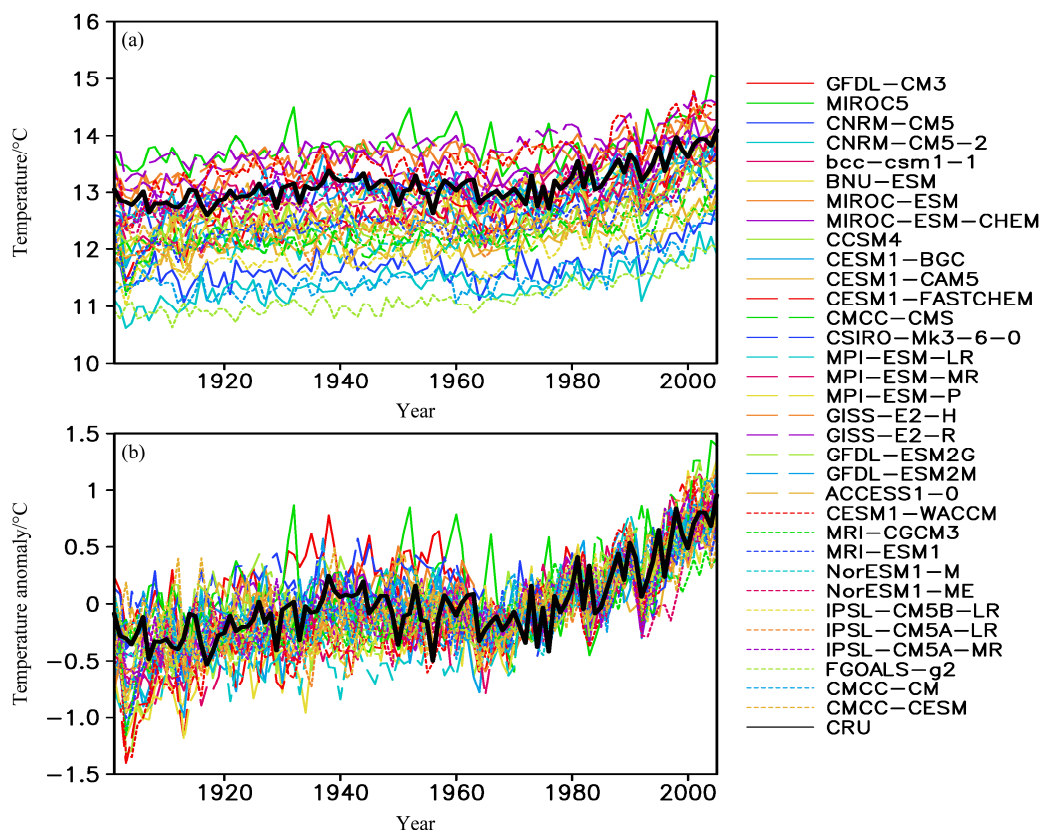


图3 1901~2005年CRU观测资料与33个模式历史气候试验资料的全球陆地平均地表(a)温度序列及其(b)温度距平(气候态1961~1990年)序列。单位: °C

Fig. 3 (a) Global land surface mean air temperature during 1901–2005 and (b) its anomaly relative to 1961–1990 from CRU observations and historical results of 33 climate models. Units: °C

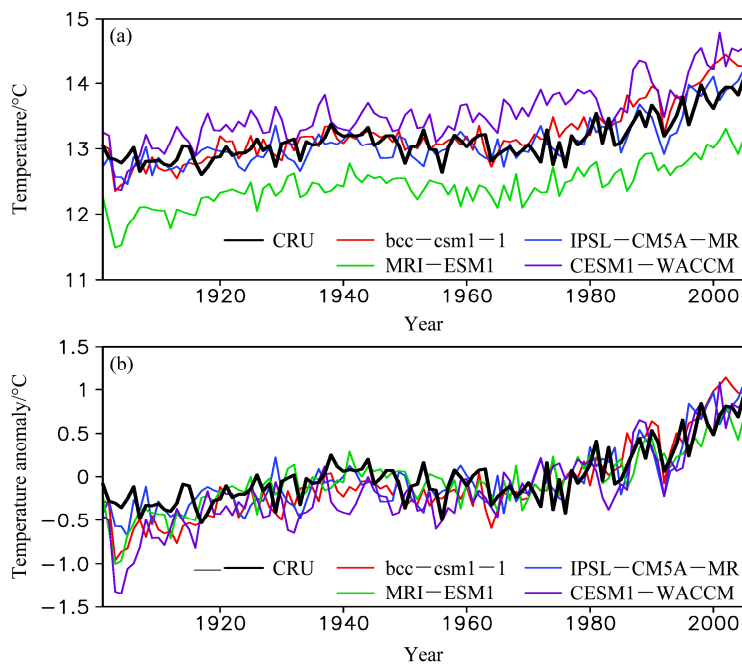


图4 1901~2005年CRU观测与4个模式CMIP5历史气候试验的全球陆地年平均地表(a)温度序列和(b)温度距平序列(气候态为1961~1990年)。单位: °C

Fig. 4 Global land surface (a) mean temperature during 1901–2005 and (b) its anomaly relative to 1961–1990 from CRU observations and historical results of four climate models. Units: °C

2006~2012 年为各模式在不同排放情景下 (RCP2.6, RCP4.5 和 RCP8.5) 的未来情景预估, 其中 MRI-ESM1 模式仅有 RCP8.5 情景下的预估。

图 5 给出了全球陆地及欧亚中高纬地区在 1976~1999 年、2000~2012 年的增温率以及两时段的差值。对于全球陆地平均 (图 5a), CRU 表征的观测中 1976~1999 年的增温率高达 $0.3^{\circ}\text{C} (10 \text{ a})^{-1}$, 2000 年后降至 $0.13^{\circ}\text{C} (10 \text{ a})^{-1}$, 全球变暖减缓了 50% 以上 (图 5c)。欧亚中高纬地区的减缓幅度更大, 2000~2012 年甚至转为降温趋势 (图 5b, 5c)。对此, IPSL-CM5A-MR 模式虽然它对全球陆地平均气温在 2005 年前的演变模拟效果较好, 但在三种排放情景下得到的全球陆地平均 2000~2012 年的增温率均高于 1976~1999 年加速期的温度变率; 它模拟的 2000 年后欧亚中高纬温度变率在 RCP8.5 情景下略低于 2000 年前, 但总体而言 IPSL-CM5A-MR 模式对全球变暖减缓的模拟是不

理想的。CESM1-WACCM 模式也同样效果欠佳, 在 RCP2.6 情景下模拟的增温率虽然在全球陆地及欧亚中高纬地区都出现了下降, 但 2000 年后增温率偏高, 使得模拟的全球变暖减缓偏弱, 全球陆地平均的增温率仅降低了一 $0.02^{\circ}\text{C} (10 \text{ a})^{-1}$, 欧亚中高纬地区的减缓程度仅为观测的 1/5。对于全球变暖减缓模拟较为出色的是 BCC-CSM1.1 模式在 RCP2.6 情景下的模拟及 MRI-ESM1 模式在 RCP8.5 情景下的模拟。他们模拟的全球变暖减缓在全球陆地为 $-0.19^{\circ}\text{C} / 10\text{a}$ (BCC-CSM1.1) 和 $-0.27^{\circ}\text{C} (10 \text{ a})^{-1}$ (MRI-ESM1), 在欧亚中高纬地区分别为 $-0.56^{\circ}\text{C} (10 \text{ a})^{-1}$ (BCC-CSM1.1) 和 $-0.64^{\circ}\text{C} (10 \text{ a})^{-1}$ (MRI-ESM1), 与 CRU 观测的全球陆地 $-0.17^{\circ}\text{C} (10 \text{ a})^{-1}$ 和欧亚中高纬 $-0.67^{\circ}\text{C} (10 \text{ a})^{-1}$ 十分接近。两者间, 又以 BCC-CSM1.1 在 RCP2.6 情景下的模拟更优, MRI-ESM1 模式在 RCP8.5 下的模拟的 2000 年后温度变率偏低, 它模拟的全球陆地温度在 2000

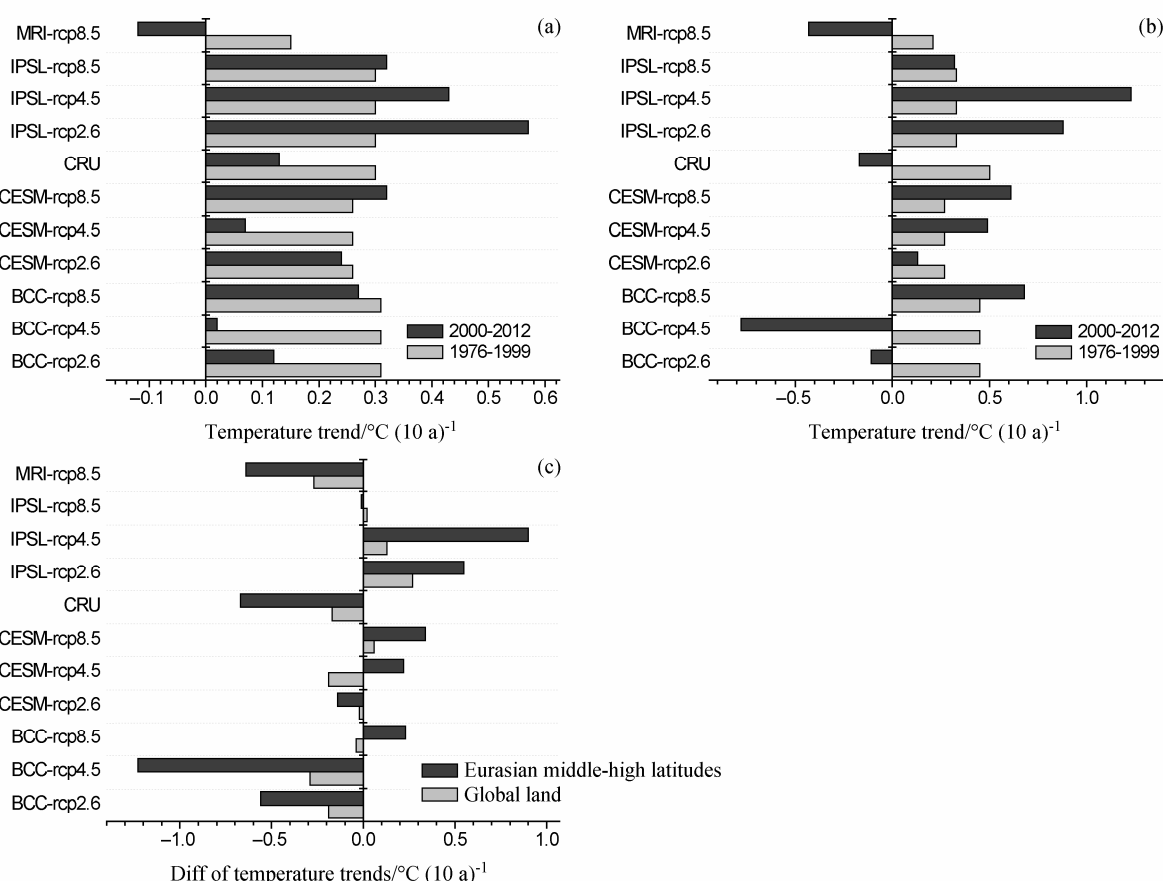


图 5 CRU 及各模式在不同排放情景下 (a) 全球陆地和 (b) 欧亚中高纬年平均陆地气温在 P III (1976~1999 年) 加速期和 P IV (2000~2012 年) 减缓期的增温率 [单位: $^{\circ}\text{C} (10 \text{ a})^{-1}$], 以及 (c) 两时段的增温率的差 [单位: $^{\circ}\text{C} (10 \text{ a})^{-1}$]

Fig. 5 The trend of land surface air temperature from CRU observations and CMIP5 models under different RCPs over (a) global land and (b) Eurasian middle-high latitudes during P III (1976–1999) and P IV (2000–2012), as well as (c) the change of the trend between them. Units: $^{\circ}\text{C} (10 \text{ a})^{-1}$

年后为显著的降温。

对于欧亚中高纬四季温度在加速期和减缓期的演变特征(图6),也以BCC-CSM1.1在RCP2.6情景下和MRI-ESM1模式在RCP8.5下的模拟较好。与CRU观测一致,它们模拟的秋季温度在2000后温度变率加大,表现为秋季地面温度的加剧升高。

其余三个季节均为变暖减缓,其中以冬季减缓幅度最大,BCC-CSM1.1模式预估的增温率减缓了 $-1.13^{\circ}\text{C} (10\text{ a})^{-1}$;MRI-ESM1模式为 $-1.62^{\circ}\text{C} (10\text{ a})^{-1}$ 。因此,BCC-CSM1.1模式和MRI-ESM1模式较好地刻画了2000年前后欧亚大陆温度秋冬季节反位相变化的特征。其余模式及BCC-CSM1.1模式

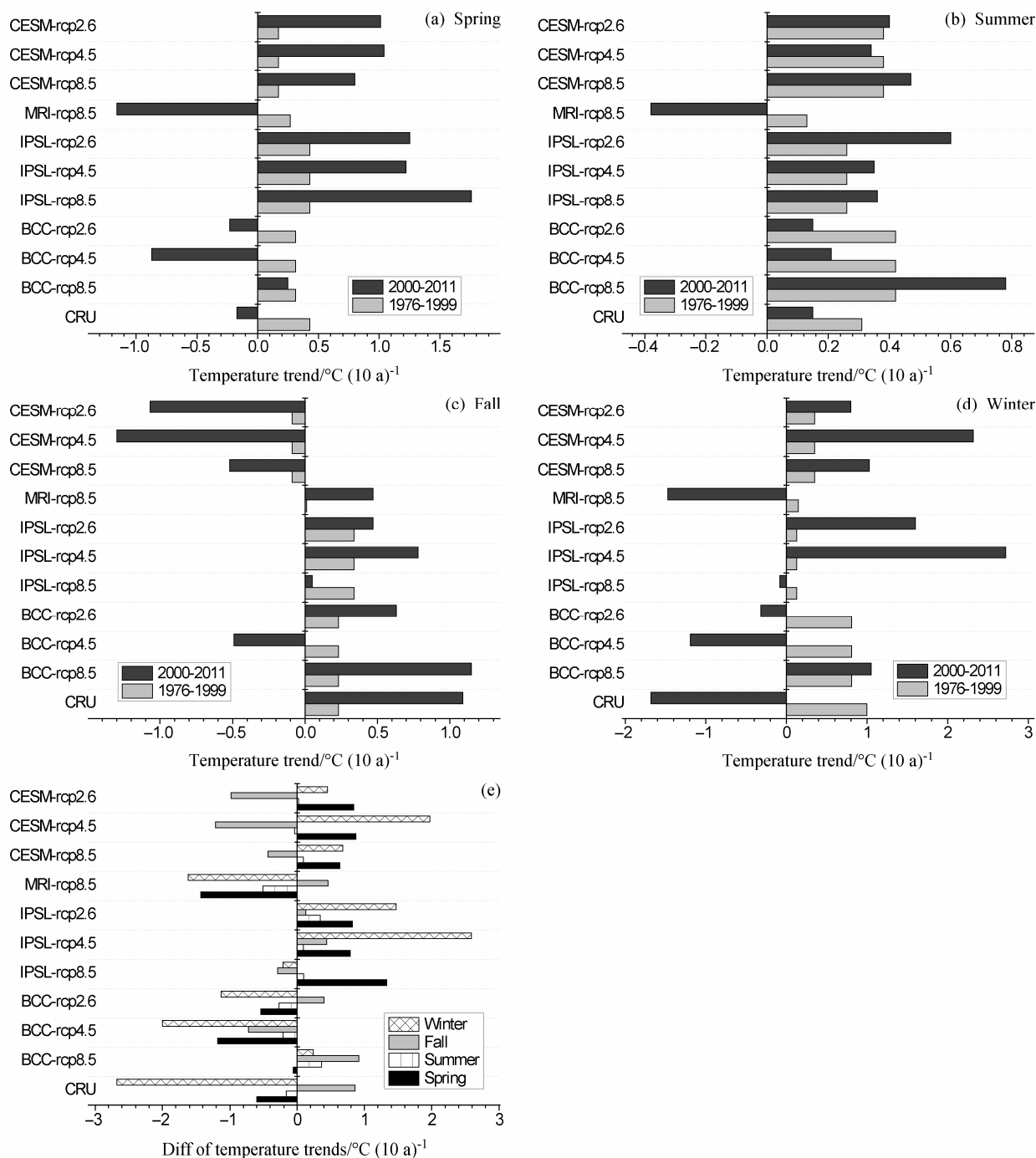


图6 CRU及各模式在不同排放情景下欧亚中高纬度(a-d)四个季节陆地气温在P III(1976~1999年)、P IV(2000~2012年)减缓期的增温率[单位: $^{\circ}\text{C} (10\text{ a})^{-1}$],及(e)两个时段增温率的差[单位: $^{\circ}\text{C} (10\text{ a})^{-1}$]

Fig. 6 (a-d) The trends of seasonal land surface temperature from CRU observations and CMIP5 models under different RCPs over Eurasian middle-high latitudes during P III and P IV, and (e) their difference. [Units: $^{\circ}\text{C} (10\text{ a})^{-1}$]

在另两个排放情景下均未抓住这一特征。CESM1-WACCM 在三种排放情景下的模拟均为冬季温度增温率加大而秋季减小, 与观测恰恰相反。IPSL-CM5A-MR 在 RCP2.6 和 RCP4.5 情景下四季均表现为变暖的加剧。BCC-CSM1.1 模式在 RCP4.5 情景下模拟的四季温度均在 2000 年后增温率减小, 没有预估出秋季的加剧升温。

Tollefson (2013) 预估全球变暖减缓可能于 2018 年结束。通过上文的分析可见, 对于全球及欧亚中高纬地区全球变暖减缓特征模拟较好的是 BCC-CSM1.1 在 RCP2.6 情景下模拟和 MRI-ESM1 模式在 RCP8.5 下的模拟。图 7 给出了两个模式对未来温度的预估。对于全球陆地平均地面气温, BCC-CSM1.1 模式在 RCP2.6 情景下预估的温度在 2012 年后恢复上升, 增温率为 $0.29^{\circ}\text{C} (10 \text{ a})^{-1}$; MRI-ESM1 在 RCP8.5 情景下预估的全球温度低于 BCC-CSM1.1, 2030 年前全球温度以 $0.21^{\circ}\text{C} (10 \text{ a})^{-1}$

的增温率缓慢升高, 之后温度加速升高 [增温率为 $0.49^{\circ}\text{C} (10 \text{ a})^{-1}$], 使得其预估的温度与 BCC-CSM1.1 模式的预估相当。对于欧亚中高纬度的温度, BCC-CSM1.1 模式在 RCP2.6 情景下预估的温度在 2012 年后仍处于减缓阶段, 其温度距平维持在 1.2°C 左右; 但 2020 年后温度发生突变, 跃至 2°C 附近振荡。而 MRI-ESM1 在 RCP8.5 情景下预估的欧亚中高纬度温度在 2030 年前一直维持几乎为零的增温率, 2030 年后迅速升高, 增温率高达 $0.51^{\circ}\text{C} (10 \text{ a})^{-1}$ 。

5 总结和讨论

本文基于 CRU 观测资料, 分析讨论了 2000 年后全球及欧亚中高纬度地区全球变暖的减缓特征, 评估了 CMIP5 试验多模式对全球变暖减缓的模拟, 并对未来气温变化进行预估。得出以下结论:

(1) 2000 年后全球陆地平均地面气温的增温率

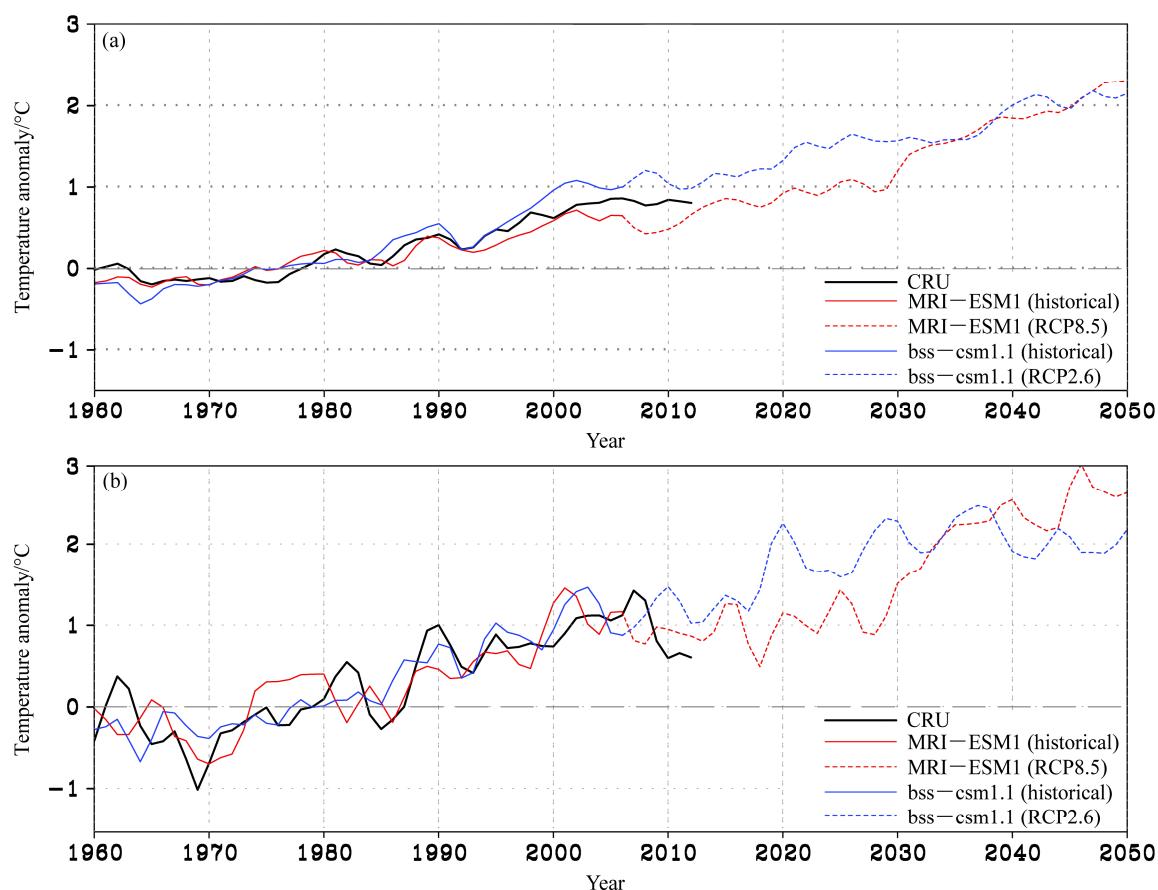


图 7 1960~2050 年 (a) 全球及 (b) 欧亚中高纬度温度距平 (单位: $^{\circ}\text{C}$) 的演变 (5 年滑动平均, 气候态是 1961~1990 年)。图中黑色实线为观测 CRU, 红色为 MRI-ESM1 模式, 蓝色为 BCC-CSM1.1 模式

Fig. 7 Projected annual mean land surface air temperature anomalies (five-year running mean, relative to 1961–1990 climatological mean, units: $^{\circ}\text{C}$) during 1960 to 2050 over (a) global land and (b) Eurasian mid-high latitudes. The black, red, and blue lines mark the CRU observations, model results of MRI-ESM1 and BCC-CSM1.1, respectively

大幅下降, 呈现全球变暖减缓特征。全球陆地平均气温的增温率仅为 $0.14^{\circ}\text{C} (10 \text{ a})^{-1}$, 为 1976~1999 年加速期增温率的一半。全球变暖减缓为全球性特征, 全球陆地 13 个区域中有 9 个地区的增温率小于加速期, 其中 4 个地区甚至出现了降温。

(2) 全球陆地 13 个区域中以欧亚中高纬地区最为特殊。加速期增温率达到 $0.50^{\circ}\text{C} (10 \text{ a})^{-1}$, 为全球陆地最大; 2000 年后温度增温率陡降至 $-0.17^{\circ}\text{C} (10 \text{ a})^{-1}$, 为全球最强降温区, 为全球变暖的减缓贡献了 49.13%。而且, 欧亚中高纬地区秋、冬季温度在 2000 年前后出现了反位相变化特征。与加速期相比, 冬季温度的增温率在减缓期下降了一 $2.68^{\circ}\text{C} (10 \text{ a})^{-1}$, 与此同时秋季温度的增温率升高了 $0.86^{\circ}\text{C} (10 \text{ a})^{-1}$, 为四季中唯一表现为变暖加剧的季节。

(3) CMIP5 多模式计划中仅 BCC-CSM1.1 在 RCP2.6 情景下和 MRI-ESM1 模式在 RCP8.5 下的模拟较好地预估了全球及欧亚中高纬地区在 2000 年后增温率的下降、以及欧亚中高纬秋冬温度的反位相变化特征。BCC-CSM1.1 在 RCP2.6 情景下预估欧亚中高纬地区 2012 年后温度距平保持在 1.2°C 左右, 2020 年后温度发生突变, 跃至 2°C 附近振荡。而 MRI-ESM1 在 RCP8.5 情景下预估的欧亚中高纬地区温度在 2030 年前一直维持几乎为零的增温率,

但 2030 年后迅速升高 [增温率 $0.51^{\circ}\text{C} (10 \text{ a})^{-1}$]。

本文根据 CRU 观测发现, 在全球陆地平均地面温度的变化中欧亚中高纬地区占较大的贡献。其贡献率在四个时段中逐步升高, 表明它的重要性日益增大。我们计算了 CMIP5 计划 33 个模式在不同排放情景下预估的全球陆地及欧亚中高纬在减缓期 (2000~2012 年) 的增温率, 如图 8 所示。88 组模式试验预估的全球陆地气温增温率与欧亚中高纬温度增温率存在较为显著的线性相关, 相关系数达到 0.638。这表明欧亚中高纬温度变化在全球陆地中所占的较大贡献, 欧亚中高纬的温度变率在在一定程度上可以表征全球陆地平均的温度变率, 欧亚中高纬温度增温率偏高, 则全球陆地平均气温也可能偏高。欧亚中高纬地区已成为全球陆地气温变化的高敏感区。

通过本文的分析, 我们也可以看到 BCC-CSM1.1 模式对全球变暖减缓的模拟效果较好, 它对 1901~2005 年全球陆地平均温度的模拟效果也最好, 与 CRU 观测的相关系数高达 0.85。BCC-CSM1.1 是我国国家气候中心研发的气候系统模式, 是一个全球海洋—陆地—海冰—大气多圈层耦合的全球气候—碳循环耦合模式。BCC-CSM1.1 模式针对全球变暖减缓模拟的良好表现表明了我国

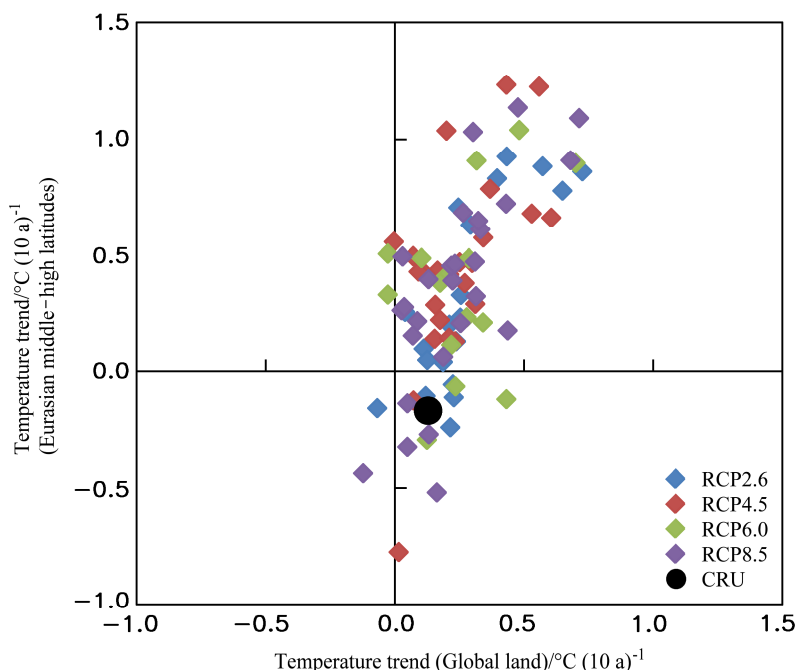


图 8 CMIP5 多模式在不同排放情景下 PIV (2000~2012 年) 全球陆地平均年平均地面气温的增温率 [单位: $^{\circ}\text{C} (10 \text{ a})^{-1}$] 与欧亚中高纬地区地面气温增温率 [单位: $(10 \text{ a})^{-1}$] 的散点图。图中黑色圆点为 CRU 观测

Fig. 8 The scatter diagram of the trends of annual mean air temperature from CMIP5 climate models during PIV period over global land surface with those over Eurasian middle-high latitudes. The black dot shows CRU observations. Units: $^{\circ}\text{C} (10 \text{ a})^{-1}$

研发模式能力的不断提高, 这为我国气候变化的业务能力提供了有力支撑。

参考文献 (References)

- Cattiaux J, Vautard R, Cassou C, et al. 2010. Winter 2010 in Europe: A cold extreme in a warming climate [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 37 (20): L20704, doi: 10.1029/2010GL044613.
- Cohen J, Barlow M, Saito K. 2009. Decadal fluctuations in planetary wave forcing modulate global warming in late boreal winter [J]. *J. Climate*, 22 (16): 4418–4426, doi: 10.1175/2009JCLI2931.1.
- Cohen J, Furtado J C, Barlow M, et al. 2012. Asymmetric seasonal temperature trends [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 39 (4): L04705, doi: 10.1029/2011GL050582.
- 丁一汇, 马晓青. 2007. 2004/2005 年冬季强寒潮事件的等熵位涡分析 [J]. *气象学报*, 65 (5): 695–707. Ding Yihui, Ma Xiaqing. 2007. Analysis of isentropic potential vorticity for a strong cold wave in 2004/2005 winter [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 65 (5): 695–707, doi: 10.11676/qxxb2007.065.
- Easterling D R, Michael M F. 2009. Is the climate warming or cooling? [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 36(8): L08706, doi: 10.1029/2009GL037810.
- Fyfe J C, Gillett N P, Zwiers F W. 2013. Overestimated global warming over the past 20 years [J]. *Nature Climate Change*, 3 (9): 767–769, doi: 10.1038/nclimate1972.
- 郭彦, 董文杰, 任福民, 等. 2013. CMIP5 模式对中国年平均气温模拟及其与 CMIP3 模式的比较 [J]. *气候变化研究进展*, 9 (3): 181–186.
- Guo Yan, Dong Wenjie, Ren Fumin, et al. 2013. Assessment of CMIP5 simulations for China annual average surface temperature and its comparison with CMIP3 simulations [J]. *Progressus Inquisitiones De Mutatione Climatis* (in Chinese), 9 (3): 181–186, doi: 10.3969/j.issn.1673-1719.2013.03.004.
- Hong C C, Li T. 2009. The extreme cold anomaly over southeast Asia in February 2008: Roles of ISO and ENSO [J]. *J. Climate*, 22 (13): 3786–3801, doi: 10.1175/2009JCLI2864.1.
- 季明霞. 2009. 欧亚大气环流与地表气温之间的反馈和相互作用 [D]. 兰州大学博士学位论文. Ji Mingxia. 2009. Response and interact between atmospheric circulation and temperature of Eurasian [D]. Ph. D dissertation (in Chinese), Lanzhou Univserstiy.
- Kaufmann R K, Kauppi H, Mann M L, et al. 2011. Reconciling anthropogenic climate change with observed temperature 1998–2008 [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108 (29): 11790–11793, doi: 10.1073/pnas.1102467108.
- Kosaka Y, Xie S P. 2013. Recent global-warming hiatus tied to equatorial Pacific surface cooling [J]. *Nature*, 501 (7467): 403–407, doi: 10.1038/nature12534.
- Meehl G A, Arblaster J M, Fasullo J T, et al. 2011. Model-based evidence of deep-ocean heat uptake during surface-temperature hiatus periods [J]. *Nature Climate Change*, 1 (7): 360–364, doi: 10.1038/nclimate1229.
- Seager R, Kushnir Y, Nakamura J, et al. 2010. Northern Hemisphere winter snow anomalies: ENSO, NAO and the winter of 2009/10 [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 37 (14): L14703, doi: 10.1029/2010GL043830.
- Solomon S, Qin D, Manning M, et al. 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [M]. Cambridge: Cambridge University Press.
- Solomon S, Rosenlof K H, Portmann R W, et al. 2010. Contributions of stratospheric water vapor to decadal changes in the rate of global warming [J]. *Science*, 327 (5970): 1219–1223, doi: 10.1126/science.1182488.
- Solomon S, Daniel J S, Neely III R R, et al. 2011. The persistently variable “background” stratospheric aerosol layer and global climate change [J]. *Science*, 333 (6044): 866–870, doi: 10.1126/science.1206027.
- Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al. 2013. *IPCC Climate Change 2013: The Physical Science Basis* [M]. Cambridge: Cambridge University Press.
- Tollefson J. 2014. Climate change: The case of the missing heat [J]. *Nature*, 505 (7483): 276–278, doi: 10.1038/505276a.
- Tollefson J. 2013. Climate change: The forecast for 2018 is cloudy with record heat [J]. *Nature*, 499 (7457): 139–141, doi: 10.1038/499139a.
- Van Vuuren D P, Edmonds J A, Kainuma M, et al. 2011. A special issue on the RCPs [J]. *Climatic Change*, 109 (1–2): 1–4, doi: 10.1007/s10584-011-0157-y.
- 王迪, 何金海, 祁莉, 等. 2015. 全球变暖减缓背景下欧亚中高纬度秋冬温度变化特征及其可能原因 [J]. *气象科学*. Wang Di, He Jinhai, Qi Li, et al. 2015. Air temperature variation characters in autumn and winter over Eurasian mid and high latitude under global warming and its possible reasons [J]. *Journal of the Meteorological Science* (in Chinese), doi: 10.3969/2014jms.0023.
- Wen M, Yang S, Kumar A, et al. 2009. An analysis of the large-scale climate anomalies associated with the snowstorms affecting China in January 2008 [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 137 (3): 1111–1131, doi: 10.1175/2008MWR2638.1.
- Wu Z W, Li J P, Jiang Z H, et al. 2010. Predictable climate dynamics of abnormal East Asian winter monsoon: Once-in-a-century snowstorms in 2007/2008 winter [J]. *Climate Dyn.*, 37 (7–8): 1661–1669, doi: 10.1007/s00382-010-0938-4.
- 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]. *Adv. Atmos. Sci.*, 30 (3): 796–805, doi: 10.1007/s00376-012-2151-3.
- Xu C H, Xu Y. 2012. The projection of temperature and precipitation over China under RCP scenarios using a CMIP5 multi-model ensemble [J]. *Atmos. Oceanic. Sci. Lett.*, 5 (6): 527–533.
- 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, doi: 10.11676/qxxb2013.087.
- Zhang Y. 2012. Projection of 2.0°C warming over the globe and China under RCP4.5 [J]. *Atmos. Oceanic. Sci. Lett.*, 5 (6): 514–520.
- Zhang Z Y, Gong D Y, Hu M, et al. 2009. Anomalous winter temperature and precipitation events in southern China [J]. *J. Geophys. Sci.*, 19 (4): 471–488, doi: 10.1007/s11442-009-0471-8.