

Assessment and Projection of Winter Temperatures in China by CMIP5 Climate System Models

Sujie Liang

Tianjin Climate Center, Tianjin
Email: liangsujie_zsu@163.com

Received: Nov. 6th, 2017; accepted: Nov. 22nd, 2017; published: Nov. 28th, 2017

Abstract

The simulated capability of 6 global system modes released by Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) is tested for the wintertime surface air temperature (SAT) over China. The 6 models can reasonably reproduce the evolution of wintertime SAT over China during the 1960-2005 in capturing the long term trend of warming especially in the North China. The models of BCC-CSM 1.1 can detect the regime shift in the EOF1 corresponding normalized time coefficient of the wintertime SAT over China. 6 model scenario projections of future climate change during 2006-2035 indicate that the wintertime SAT over China would continue to rise, while the intensities are scenario-dependent. The results indicate that the winter temperature shows an interdecadal variability superimposed on the long-term warming trend, with the hiatus period ending around 2010-2025. After that the wintertime SAT over China will increase warming.

Keywords

Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5), Winter Surface Air Temperature

CIMP5气候系统模式对中国冬季气温变化模拟评估及未来情景预估

梁苏洁

天津市气候中心, 天津
Email: liangsujie_zsu@163.com

收稿日期: 2017年11月6日; 录用日期: 2017年11月22日; 发布日期: 2017年11月28日

摘要

本文评估和预估了CMIP5气候系统模式对中国冬季气温变化的模拟结果。6个模式模拟的历史资料大多可以反映中国区域冬季气温一致增暖的变化趋势,并且北方的增暖更强。在冷暖期的突变时间点上,BCC-CSM-1.1模式模拟的历史资料的EOF1标准化时间系数的突变时间点与中国冷暖期的划分时间完全吻合。三种情景下的模式结果表明未来中国区域的冬季气温仍呈现上升趋势,并叠加有年代际变化,其中停滞期大致在2010~2025年期间结束,之后中国冬季气温继续加速上升。

关键词

耦合模式比较计划, 中国冬季气温

Copyright © 2017 by author and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

耦合模式比较计划(Coupled Model Intercomparison Project, CMIP)经历了前期的四个阶段,已经提供了迄今为止时间最长、内容最为广泛的气候变化模式资料库,为预估未来的气候变化提供了不可替代的科学基础依据。目前,第五次耦合模式比较计划(CMIP5)增加了高分辨率耦合模式年代际时间尺度预测试验,且其模式输出结果在各个方面均展现出卓越的优越性,提高了对未来气候变化的预估能力,因而受到更加广泛的关注[1] [2]。

IPCC 第五次评估报告指出,全球平均气温自 1998 年以来并没有呈现显著上升(基本趋平),即进入所谓全球变暖趋缓或停顿时期,并且这种变化还有可能持续一段时间。在这一环流背景下,评估 CMIP5 各个模式对中国冬季气温的模拟情况,并更进一步预估未来中国冬季气温的变化是有必要的。同时,对近期 10~30 年时间尺度的年代际预测也是 CMIP5 研究的重要目标之一。

本文利用 CMIP5 模式来研究最新的气候系统模式对中国冬季气温历史变化的再现能力,进一步在此基础上,对预设情景下未来中国冬季气温变化进行预估。

2. 资料

CMIP5 提供了历史模拟和未来预估试验结果,模式数据以及相关详细信息参见 PCMDI 网站(<http://pcmdi9.llnl.gov/>)。历史模拟试验的积分时段为 1850~2005 年,是利用实际的外强迫驱动耦合模式,模拟历史气候的演变过程,其外强迫包括了温室气体和硫酸盐气溶胶、土地利用等人为因素以及火山气溶胶、海盐气溶胶、臭氧和太阳辐射等自然因素。

此外,CMIP5 对气候变化的预估试验采用的是温室气体排放新情景——典型浓度路径(Representative Concentration Pathways, RCPs)预设的排放情景(如表 1)。RCPs 是在假设政策行为达到一定的排放目标情况下有节制的未来情景,四种 RCPs 是通过对未来人口增长、技术进步和社会响应的预估而计算得到。其中 RCP4.5 类似于 CMIP3 的 SRES A1B,被誉为“中间路线”(middle-of-the-road)情景[1]。

CMIP5 模式提供的未来预测资料包括未来两个时间尺度,短期(2006 年 1 月~2035 年 12 月)和长期(到 2100 年或者更长)。本章挑选的 6 种 CMIP5 模式具有完整的历史模式(如表 2),选用了中等排放情景 RCP4.5 下未来气温预估的积分结果,并选用短期预测结果。以下将简单介绍这 6 个模式。

Table 1. Representative concentration pathways**表 1.** 典型浓度路径特征

名称	路径形式	辐射强迫	相当浓度
RCP8.5	持续上涨	2100 年的 $8.5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$	$\approx 1370 \text{ CO}_2\text{-eq}$
RCP6.0	没有超过目标水平达到稳定	2100 年的 $6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$	$\approx 860 \text{ CO}_2\text{-eq}$
RCP4.5	没有超过目标水平达到稳定	2100 年的 $4.5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$	$\approx 650 \text{ CO}_2\text{-eq}$
RCP3-PD	先升后降达到稳定	2100 年的 $< 3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$	$\approx 490 \text{ CO}_2\text{-eq}$

Table 2. The climate coupled models of CMIP5 adopted by this paper**表 2.** 本文所采用的 CMIP5 气候系统模式的介绍

模式组	国家	模式名称	大气模式水平分辨率
Beijing Climate Center, China Meteorological (BCC)	China	BCC-CSM-1.1	128×64
Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis (CCCMA)	Canada	CanESM2	128×64
National Center for Atmospheric Research (NCAR)	USA	CCSM4	288×192
Max Planck Institute for Meteorology (MPI)	Germany	MPI-ESM-LR	192 x 96
Met Office Hadley Centre (MOHC)	UK	HadCM3	96×73
Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), and National Institute for Environmental Studies (MIROC)	Japan	MIROC-ESM	128×64

中国国家气候中心于 2005~2008 年建立了海-陆-气-冰多圈层耦合的气候系统模式 BCC_CSM1.0 版本。该版本对 20 世纪气候具有一定的模拟再现能力，对 21 世纪的预估与 IPCC AR4 其他耦合模式的性能相当，可以用于第二代短期气候预测模式业务化。

CanESM2 是加拿大气候模拟分析中心开发的新一代的地球系统模式，耦合了大气-海洋模式 (CanCM4)，陆地植物模式，陆地和海洋相互作用的碳循环模式(基于加拿大陆地生态系统模式 CTEM)。

MPI-ESM-LR 为马普气象研究所的地球系统模式，该模式由大气环流模式、海洋模式、海洋生物地球化学模式和陆地生物圈模式组成，因此 MPI-ESM-LR 地球系统模式包括了完整的耦合的碳循环。其中的大气模式为建立在 ECHAM5 [3]上的 ECHAM6。

HadCM3 是由英国哈德来中心发展的第三代耦合气候模式，同样作为 CMIP3 的模式之一参加了 IPCC 第四次评估报告。研究表明，相比之前的版本，HadCM3 的模拟能力有明显的改进，对于气候平均态的模拟能力较好，与观测更为吻合，对于全球气候及年际变率有较稳定的模拟，相比 HadCM2，与观测更为接近。

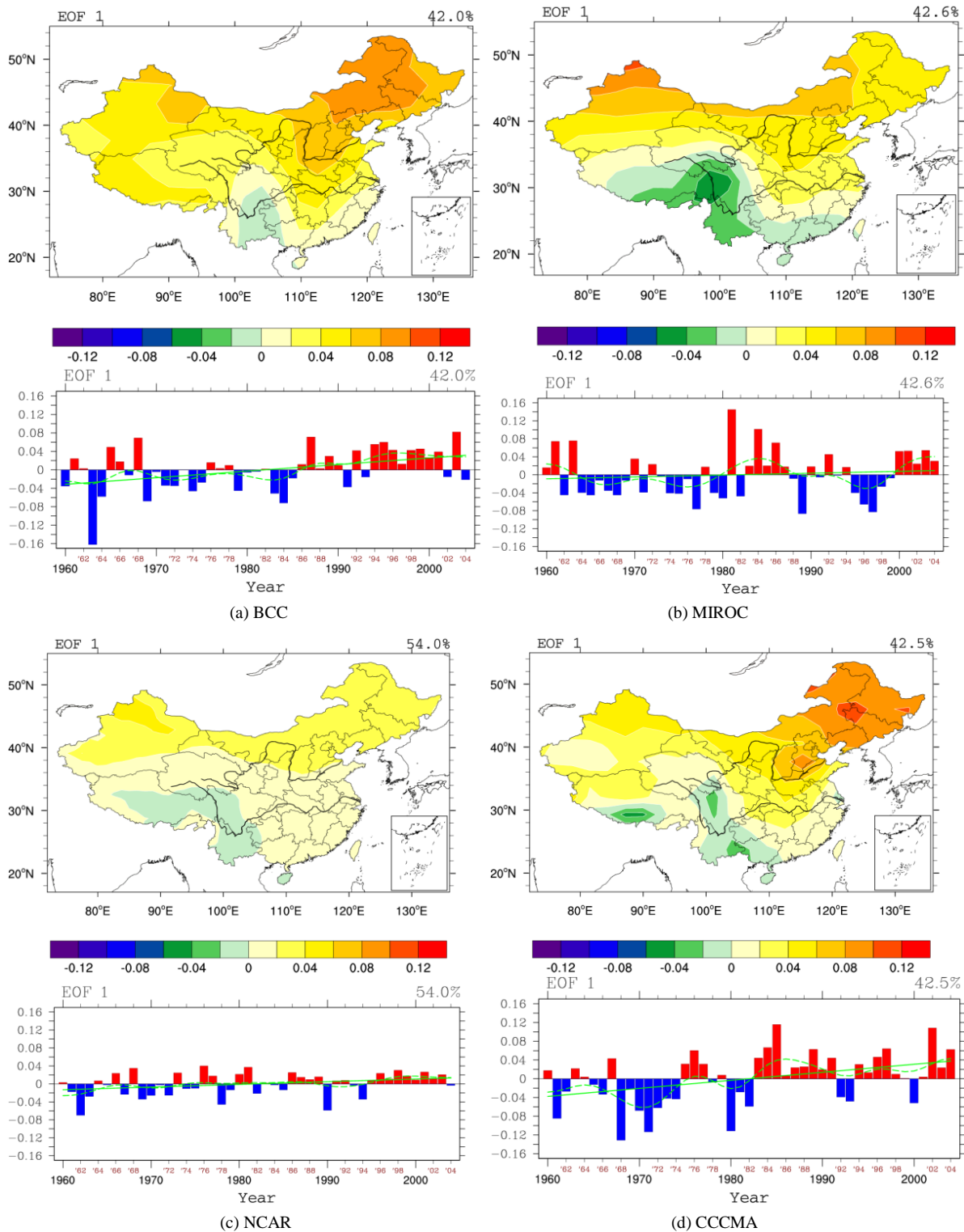
MIROC-ESM 为日本海洋地球科技机构、大气和海洋研究所(东京大学)和国家环境研究所共同开发的耦合气候模式。该模式的大气环流模式、海洋模式、海洋生物地球化学模式和陆地生物圈模式均具有较好的模拟能力，同时也可以模拟各模式间的相互作用。MIROC-ESM 的大气化学耦合的模式版本可以合理地再现历史期间近地面气温的变化。

气候系统模式对历史的再现能力是其对未来预估的基础，因而在研究 CMIP5 模式预估中国冬季气温变化的未来情景之前，我们首先评估 CMIP5 模式的模拟再现能力。本文主要对比了模式在 1960~2004 年期间的气候态与同期的中国冬季站点气温资料的结果。

3. 气候系统模式对中国冬季气温变化的模拟结果评估

首先分析了各个模式的历史模拟试验结果。对 6 个模式自 1960 年~2005 年共 45 个冬季(12 月至次年

2月平均的中国区域气温做 EOF 分析,得到 EOF 第一个模态及其标准化时间系数如图 1。从图 1 的 EOF1 空间分布可以看出,历史模拟资料的中国区域冬季平均气温变化的 EOF1 模态最主要表现为全国气温一致的变化趋势,最大值中心大多位于 40°以北的地区,但是华南和青藏高原的局部地区与全国其他地区的



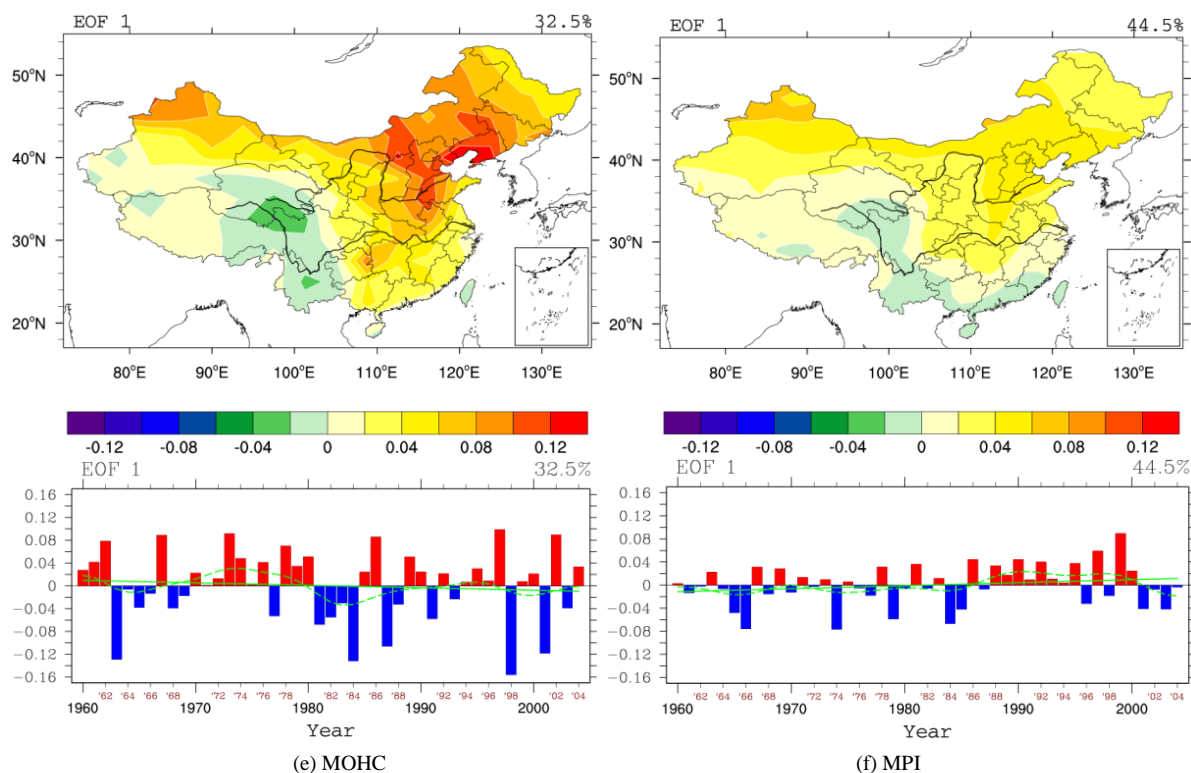


Figure 1. Spatial patterns and corresponding normalized time coefficients of the first leading EOF mode of the winter mean 2-m air temperature in China from 1960-2005 by CMIP5 models. Colored bar: standardized anomaly, green solid line: linear trend, green dashed line: Gauss low-pass filtering curve. (a) BCC-CSM-1.1; (b) MIROC-ESM; (c) NCAR; (d) CanESM2; (e) HadCM3; (f) MPI-ESM-LR

图 1. CMIP5 气候系统模式模拟的中国冬季气温 EOF 第一模态的空间分布型和标准化时间系数(柱状图: 标准化时间系数, 绿色实线: 线性趋势曲线, 绿色虚线: 高斯低频滤波曲线); (a) BCC 的 BCC-CSM-1.1 模式; (b) MIROC 的 MIROC-ESM 模式; (c) NCAR 的 CCSM4 模式; (d) CCCMA 的 CanESM2 模式; (e) MOHC 的 HadCM3 模式; (f) MPI 的 MPI-ESM-LR 模式

变化趋势呈反向变化。EOF1 解释了总方差的 32.5%~54.0%，说明这种模态的信号很强。除 MOHC 的 HadCM3 模拟历史资料的 EOF1 的标准化时间系数有较弱的降温趋势，其余五个模式的模拟历史资料的 EOF1 的标准化时间系数都呈现增暖趋势。图 1 中绿色虚线为高斯低频滤波得到十年以上的年代际变化，可以发现 EOF1 的标准化时间系数有明显的年代际变化。在冷暖期的突变时间点上，BCC 的 BCC-CSM-1.1 模式和 CCCMA 的 CanESM2 模式模拟的历史资料的 EOF1 标准化时间系数较好地反映了中国冬季气温的冷暖期划分，MPI 的 MPI-ESM-LR 模式模拟的结果也可以反映出冷暖期的变化。总体看这六个模式结果，BCC-CSM-1.1 模式模拟的历史资料的 EOF1 标准化时间系数的突变时间点与中国冷暖期的划分时间完全吻合。但是 EOF1 的标准化时间系数的线性变化趋势均小于实际情况。

图 2 为各个模式模拟的历史资料中 1960~2005 年 45 个冬季气温的变化趋势系数分布。从图 2 可见，BCC 的 MIROC-ESM 模式模拟结果中，中国冬季气温呈现一致变暖的变化趋势，其中北方地区的增暖更为显著。CCCMA 的 CanESM2 模式与此相似，但是在青藏高原南部地区略有降温。不同的是，MIROC 的 MIROC-ESM 模式和 NCAR 的 CCSM4 模式模拟的历史资料的趋势系数分布中青藏高原为升温变化，同时北方地区，尤其是西北地区的增暖幅度更大，但是华南和华东部分地区有降温趋势。MPI 的 MPI-ESM-LR 模式模拟的历史资料的趋势系数分布中西北地区 and 内蒙东北部分地区有降温变化，青藏和云贵高原有较强的升温。MOHC 的 HadCM3 模式模拟的趋势变化为降温，这与实际情况截然相反。

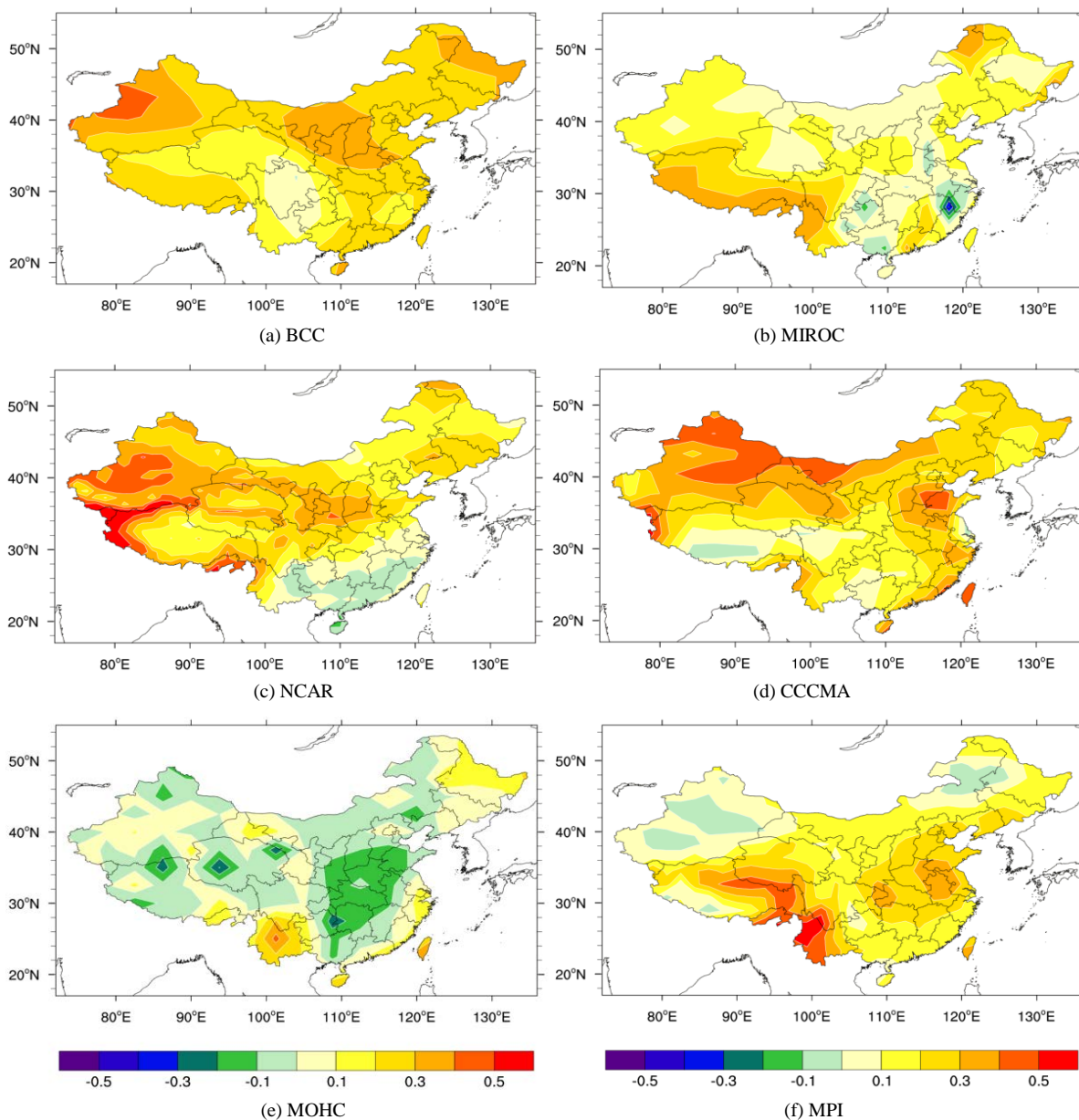


Figure 2. The trends of the winter mean 2-m air temperature in China by CMIP5 models. (a) BCC-CSM-1.1; (b) MIROC-ESM; (c) NCAR; (d) CanESM2; (e) HadCM3; (f) MPI-ESM-LR

图 2. CMIP5 气候系统模式模拟的中国冬季气温变化趋势; (a) BCC 的 BCC-CSM-1.1 模式; (b) MIROC 的 MIROC-ESM 模式; (c) NCAR 的 CCSM4 模式; (d) CCCMA 的 CanESM2 模式; (e) MOHC 的 HadCM3 模式; (f) MPI 的 MPI-ESM-LR 模式

BCC 的 MIROC-ESM 模式模拟结果与实际情况最为切合，较好地反映了中国冬季气温的变化趋势。

各个模式模拟的历史资料时间段为 1850 年 1 月~2005 年 12 月，而模拟未来的短期时间段为 2006 年 1 月~2035 年 12 月。本文将模式模拟的三个时期冷期、暖期和变暖停滞期(以下简称停滞期)做以下定义，如表 3。冷期定义为 1960/61 年冬季至 1985/86 年冬季。由于模拟的历史资料截至时间段为 2005 年 12 月，因此本文将暖期定义为 1986/87 年冬季至 2004/05 年冬季。考虑到 CMIP5 模式短期预测资料截止在 2035 年 12 月，因此本章暂时将停滞期定义为 2005/06 年冬季至 2034/35 年冬季。

如图 3(a)所示，BCC 的 BCC-CSM-1.1 模式模拟资料的暖冷期差值分布中，整个中国区域内暖期气温

Table 3. The definition of the cold period, the warm period and the hiatus period by CMIP5 model data

表 3. 模式模拟资料定义的冷期、暖期和停滞期

冷期	1960/61 年冬季	至	1985/86 年冬季
暖期	1986/87 年冬季	至	2004/05 年冬季
变暖停滞期	2005/06 年冬季	至	2034/35 年冬季

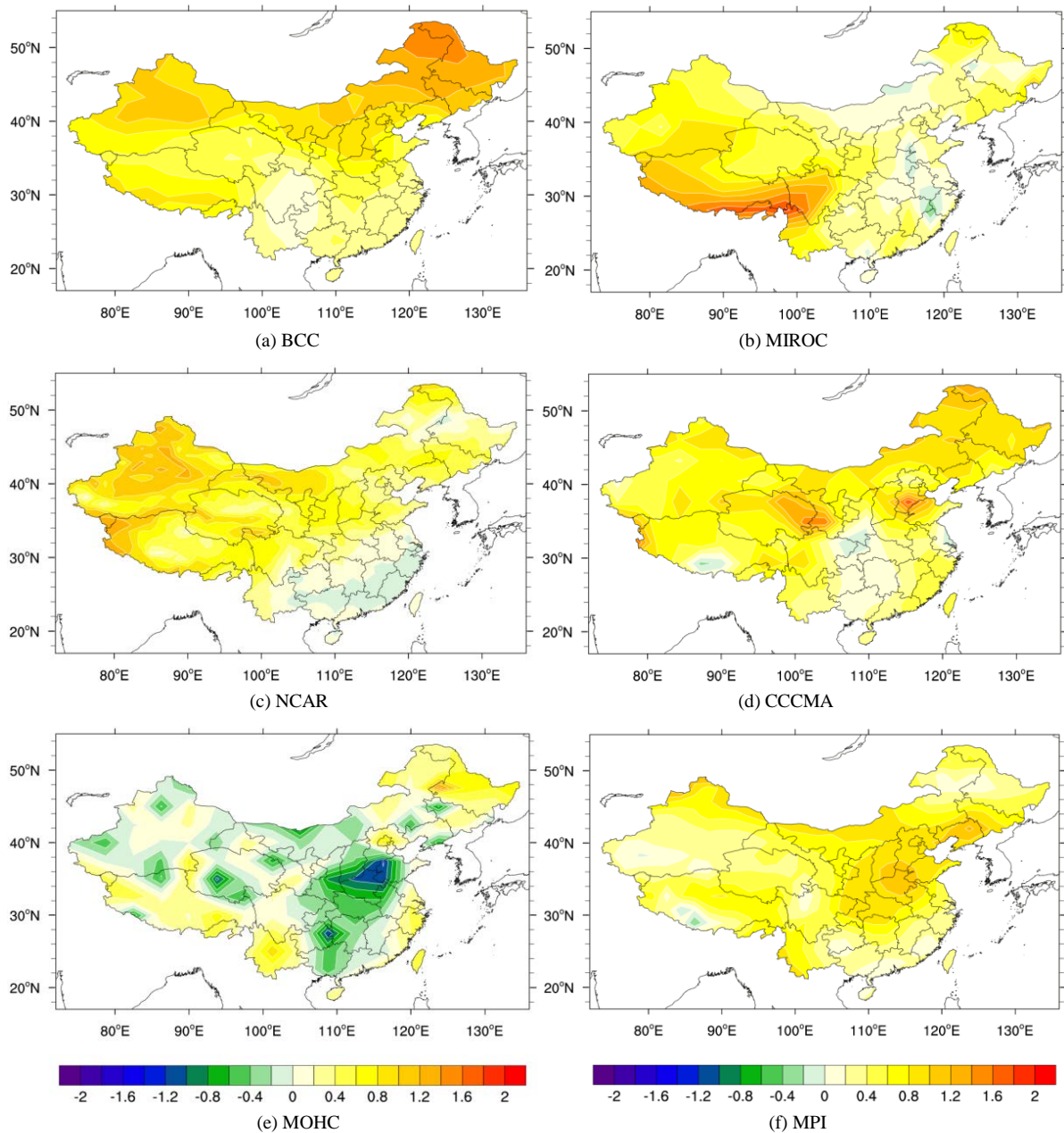


Figure 3. Differences of winter mean 2-m air temperature (warm period minus cold period) in China by CMIP5 models. (a) BCC-CSM-1.1; (b) MIROC-ESM; (c) NCAR; (d) CanESM2; (e) HadCM3; (f) MPI-ESM-LR

图 3. CMIP5 气候系统模式模拟的暖期减去冷期的气温差值分布; (a) BCC 的 BCC-CSM-1.1 模式; (b) MIROC 的 MIROC-ESM 模式; (c) NCAR 的 CCSM4 模式; (d) CCCMA 的 CanESM2 模式; (e) MOHC 的 HadCM3 模式; (f) MPI 的 MPI-ESM-LR 模式

皆高于冷期，其中东北地区和西北地区的增暖幅度较大，而四川、广西和云南地区的增暖幅度较小，这与实际情况的分布是一致的，但是模拟的增暖幅度略小于实际情况。MIROC 的 MIROC-ESM 模式模拟的冷暖期差值分布上，东北和内蒙地区的增暖幅度偏小，而青藏高原地区的增暖偏高，此外，华北和华东地区的差值为负值这与实际情况是不符的。NCAR 的 CCSM4 模式模拟的冷暖期差值中东北地区增暖偏弱，而华南地区呈现降温分布。CCCMA 的 CanESM2 模式模拟的情况与实际情况大体一致，但是弱降温区域偏东，同时全国尤其是北方地区增暖偏弱。MOHC 的 HadCM3 模式模拟结果偏差与实际情况最大。MPI 的 MPI-ESM-LR 模式模拟的结果表明全国基本呈现增暖的分布，但是高值中心位于华北和东北南部地区，这与实际情况有偏差。整体来看，BCC 的 BCC-CSM-1.1 模式模拟资料的暖冷期差值分布与实际情况最为形似，但是增暖幅度偏小。

从图 4 可以看到，6 种模式模拟的历史资料中的冷期气温减去实际冷期气温的差值场分布上，在西

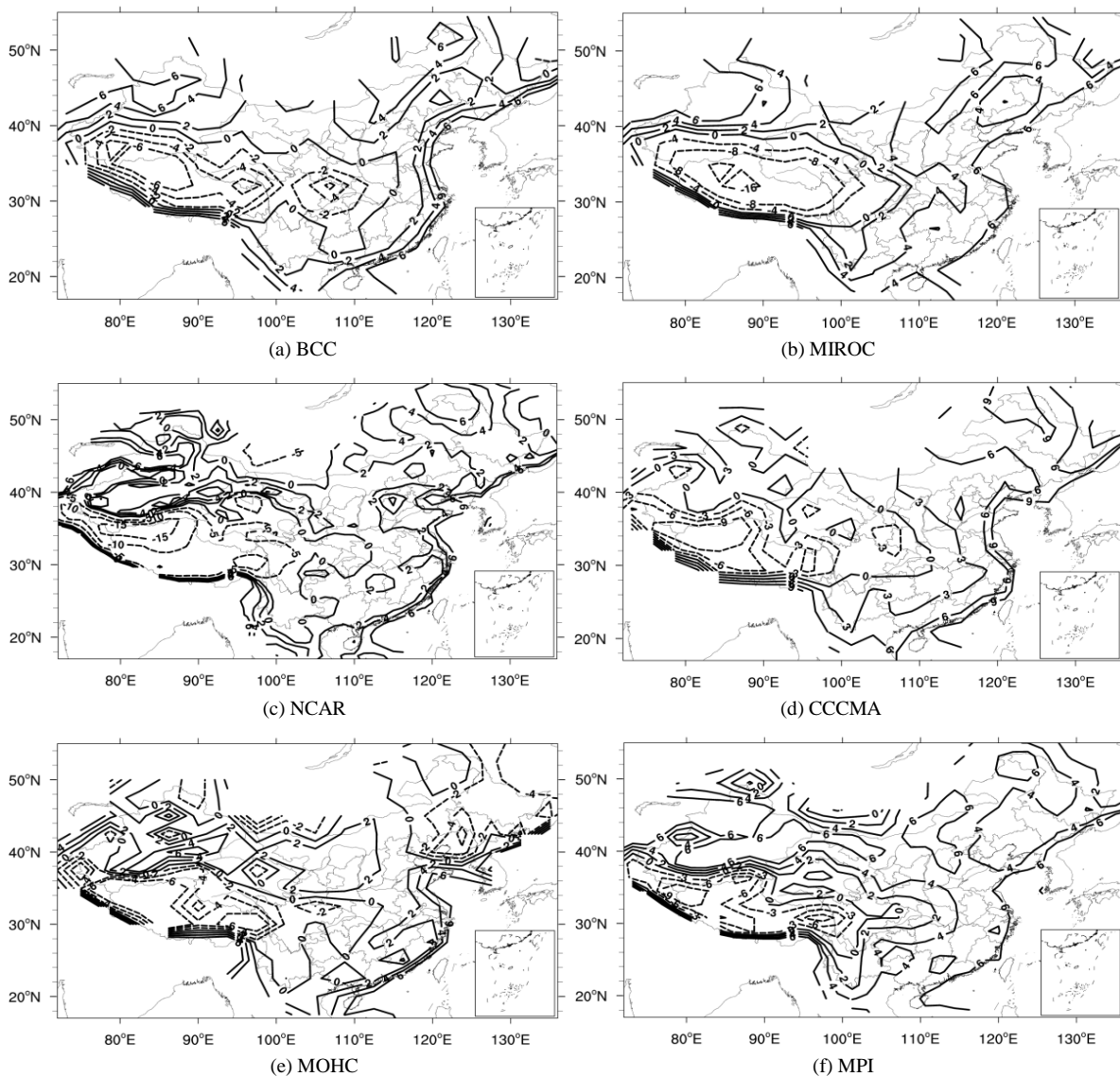


Figure 4. Differences of winter mean 2-m air temperature (cold period by CMIP5 models minus cold period by meteorological station) in China. (a) BCC-CSM-1.1; (b) MIROC-ESM; (c) NCAR; (d) CanESM2; (e) HadCM3; (f) MPI-ESM-LR

图 4. CMIP5 气候系统模式模拟的冷期减去站点资料格点化的冷期的气温差值分布；(a) BCC 的 BCC-CSM-1.1 模式；(b) MIROC 的 MIROC-ESM 模式；(c) NCAR 的 CCSM4 模式；(d) CCCMA 的 CanESM2 模式；(e) MOHC 的 HadCM3 模式；(f) MPI 的 MPI-ESM-LR 模式

北、东北及中东部地区为正距平，最大值中心可达 6°C ，表明较实际冷期偏高，而在青藏高原和四川盆地等地区则较实际气温偏低，负距平中心值的绝对值普遍较大，其中 NCAR 的 CCSM4 模式模拟的历史资料与实际冷期气温的偏差可达 -15°C 。总体来看，BCC 的 BCC-CSM-1.1 模式和 MPI 的 MPI-ESM-LR 模式模拟的历史资料与实际情况偏差在 6 种模式结果中较小。

从图 5 可以看到，6 种模式模拟的历史资料中的暖期气温减去实际暖期气温的差值场分布上与图 4 的分布较为相似。BCC 的 BCC-CSM-1.1 模式模拟的历史资料与实际情况偏差在 6 种模式结果中较小，比较接近实际的暖期气温分布情况。

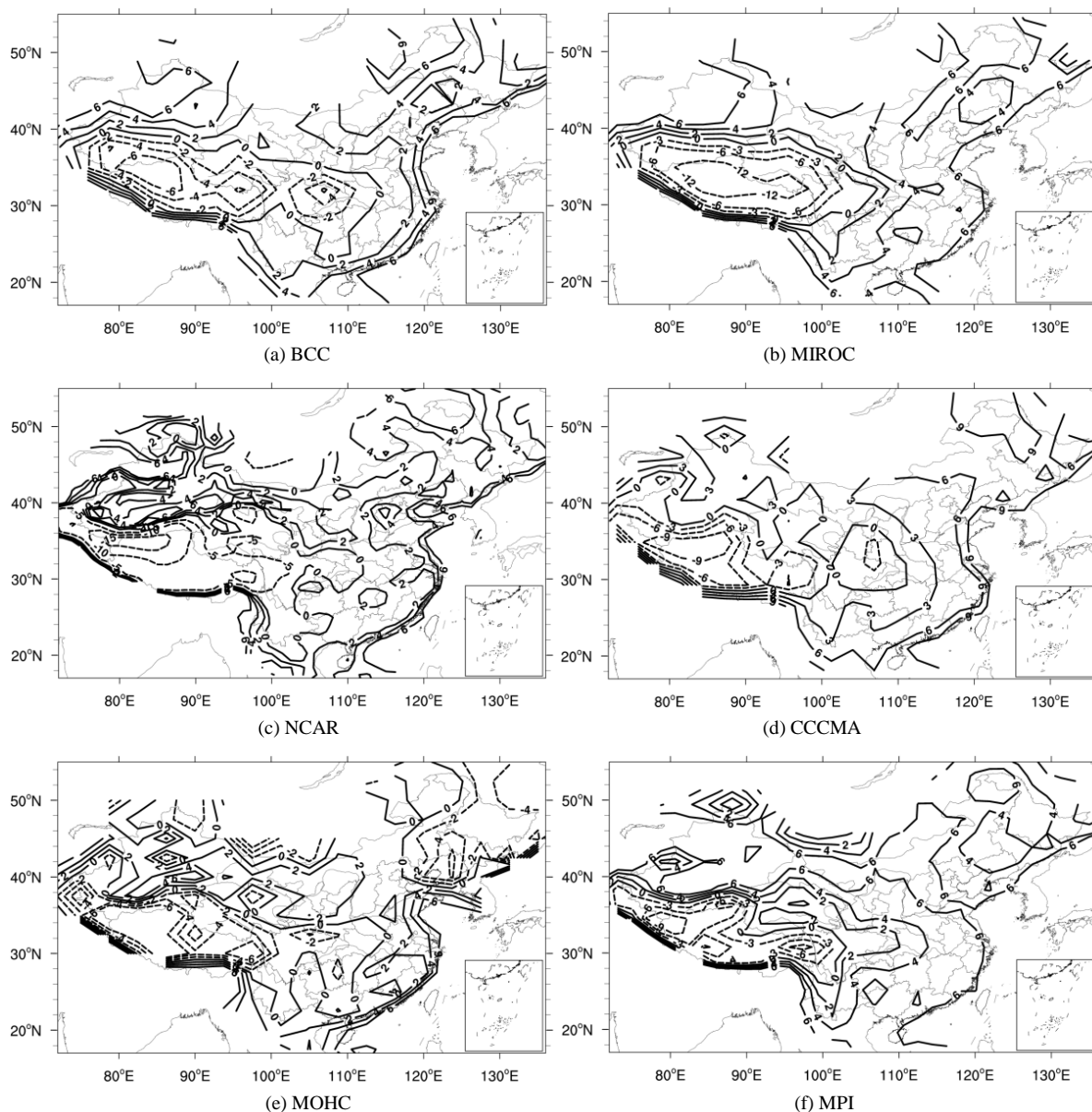
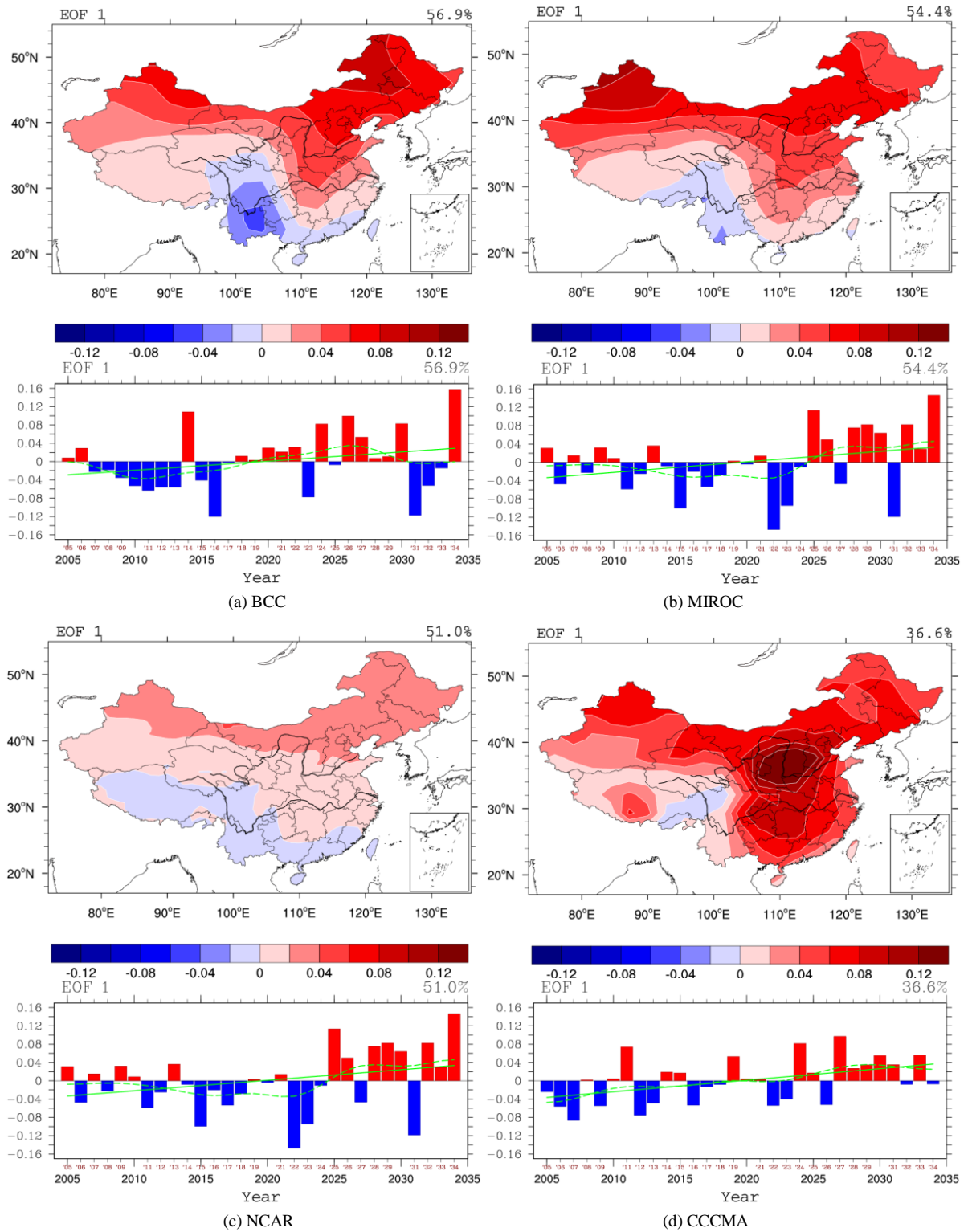


Figure 5. Differences of winter mean 2-m air temperature (warm period by CMIP5 models minus warm period by meteorological station) in China. (a) BCC-CSM-1.1; (b) MIROC-ESM; (c) NCAR; (d) CanESM2; (e) HadCM3; (f) MPI-ESM-LR

图 5. CMIP5 气候系统模式模拟的暖期减去站点资料格点化的暖期的气温差值分布；(a) BCC 的 BCC-CSM-1.1 模式；(b) MIROC 的 MIROC-ESM 模式；(c) NCAR 的 CCSM4 模式；(d) CCCMA 的 CanESM2 模式；(e) MOHC 的 HadCM3 模式；(f) MPI 的 MPI-ESM-LR 模式

4. RCP4.5 情景下气候系统模式对中国冬季气温未来变化的预估

首先对 6 个模式模拟的未来 2005~2035 年冬季中国区域气温资料进行 EOF 分析, 结果如图 6。总的来说, EOF1 的空间分布为中国大部分地区呈现一致增暖的变化趋势, 其中北方地区的增暖幅度更大, 但



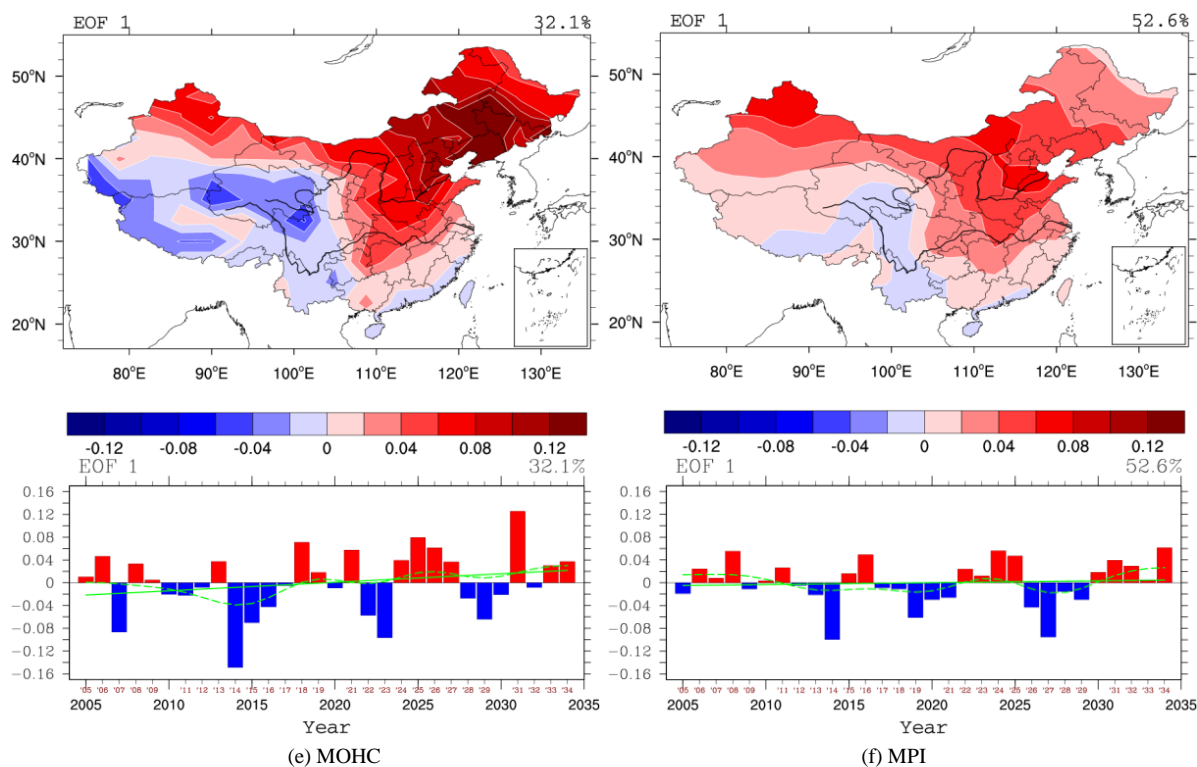


Figure 6. Spatial patterns and corresponding normalized time coefficients of the first leading EOF mode of the winter mean 2-m air temperature in China from 2006-2035 by CMIP5 models. Colored bar: standardized anomaly, green solid line: linear trend, green dashed line: Gauss low-pass filtering curve. (a) BCC-CSM-1.1; (b) MIROC-ESM; (c) NCAR; (d) CanESM2; (e) HadCM3; (f) MPI-ESM-LR

图 6. CMIP5 气候系统模式模拟的未来中国冬季气温 EOF 第一模态的空间分布型和标准化时间系数(柱状图: 标准化时间系数, 绿色实线: 线性趋势曲线, 绿色虚线: 高斯低频滤波曲线); (a) BCC 的 BCC-CSM-1.1 模式; (b) MIROC 的 MIROC-ESM 模式; (c) NCAR 的 CCSM4 模式; (d) CCCMA 的 CanESM2 模式; (e) MOHC 的 HadCM3 模式; (f) MPI 的 MPI-ESM-LR 模式

是青藏高原、云贵高原和华南南部地区与其他地区的变化相反, 呈降温变化。EOF1 解释的总方差为 32.1%~56.9%, 说明这种模态的信号很强。尽管 EOF1 的标准化时间系数有很强的增暖趋势, 但在这一总体趋势上叠加有较强的年代际变化。BCC 的 BCC-CSM-1.1 模式模拟的未来短期中国区域冬季气温 EOF1 的标准化时间系数在 2018~2019 年冬季前基本为负位相, 表明这段时间中国区域冬季气温偏低, 而自此之后, 冬季气温偏暖, 这表明停滞期大体在 2018 年前后截止, 而后中国冬季再次进入增暖时段。MOHC 的 HadCM3 模式的结果与此相似, 但是停滞期后的增暖较 BCC 的模式结果偏弱。MIROC 的 MIROC-ESM 模式、NCAR 的 CCSM4 模式和 CCCMA 的 CanESM2 模式的结果与此类似, 但是停滞期结束的时间偏晚, 大致在 2025 年左右结束, 此后中国冬季气温显著增暖。MPI 的 MPI-ESM-LR 模式的结果增暖趋势是 6 个模式结果中最弱的一个, 并且对停滞期的截止时间点变化表示的并不清晰。

图 7 中可见, BCC 的 BCC-CSM-1.1 模式模拟的短期未来中国区域气温变化趋势基本以升温为主, 大值区位于内蒙中部、华北东部、山东半岛和长江下游地区, 而云贵高原为负值, 表明气温将下降。与之相反的是 MIROC 的 MIROC-ESM 模式模拟的结果表明青藏高原、云贵高原和华南南部地区未来将显著升温, 北方地区只有东北北部地区有较强的升温。NCAR 的 CCSM4 模式模拟的结果中中国地区未来将以降温变化为主, 降温幅度最大的地区为西北、中部和华北地区。CCCMA 的 CanESM2 模式模拟的结果中青藏高原与其他地区温度变化相反, 有较强的降温趋势, 而升温较大的地区位于新疆北部和中华

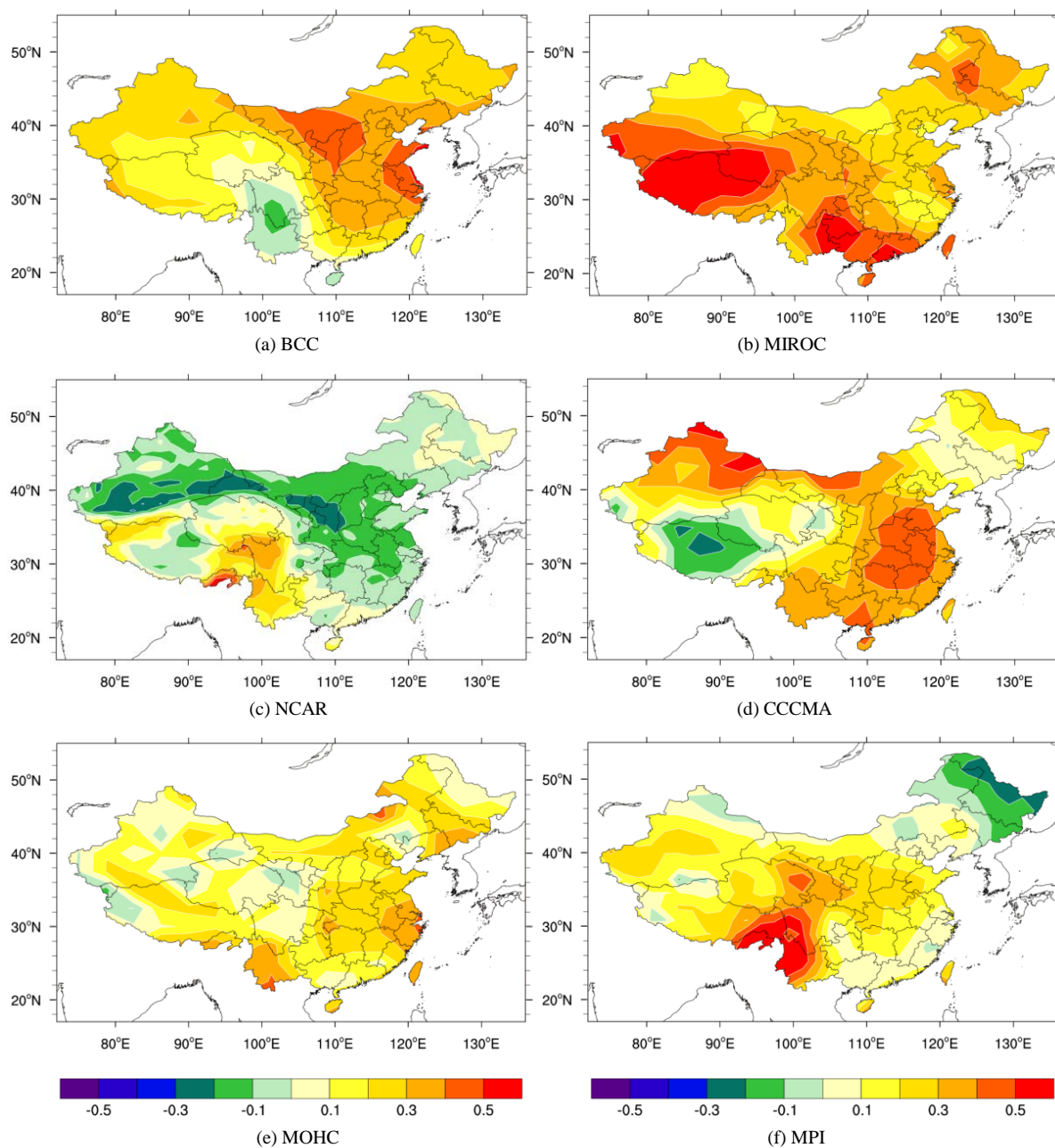


Figure 7. The trends of the winter mean 2-m air temperature in China from 2006-2035 by CMIP5 models. (a) BCC-CSM-1.1; (b) MIROC-ESM; (c) NCAR; (d) CanESM2; (e) HadCM3; (f) MPI-ESM-LR

图 7. CMIP5 气候系统模式模拟的未来中国冬季气温变化趋势; (a) BCC 的 BCC-CSM-1.1 模式; (b) MIROC 的 MIROC-ESM 模式; (c) NCAR 的 CCSM4 模式; (d) CCCMA 的 CanESM2 模式; (e) MOHC 的 HadCM3 模式; (f) MPI 的 MPI-ESM-LR 模式

东地区。MOHC 的 HadCM3 模式模拟的结果表明未来中国区域以升温变化为主要特征,只有极少的地区为弱降温。MPI 的 MPI-ESM-LR 模式模拟的结果表明未来东北北部地区降温,相反,云贵地区的升温较为显著。6 个模式模拟的未来短期中国区域的冬季气温以升温为主要变化特征,但是大值中心各不相同。

6 个模式模拟的未来短期中国区域冬季气温减去历史资料的冷期差值场都为正距平,表明未来气温将比冷期时明显偏暖,且北方地区的增暖幅度更大(如图 8)。MIROC 的 MIROC-ESM 模式结果中的变暖

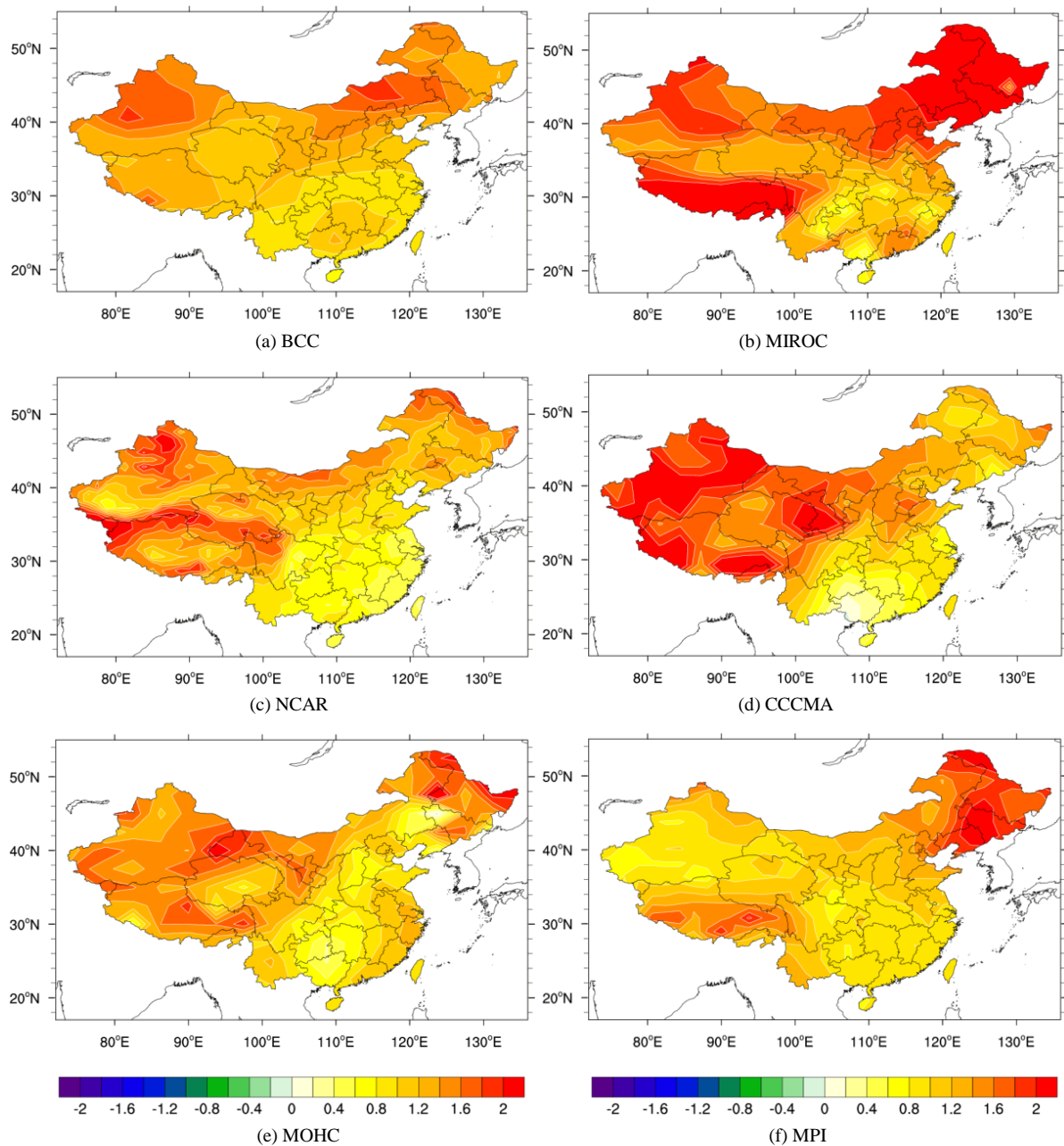


Figure 8. Differences of the winter mean 2-m air temperature (hiatus period minus cold period) in China by CMIP5 models. (a) BCC-CSM-1.1; (b) MIROC-ESM; (c) NCAR; (d) CanESM2; (e) HadCM3; (f) MPI-ESM-LR

图 8. CMIP5 气候系统模式模拟的停滞期减去冷期的气温差值分布; (a) BCC 的 BCC-CSM-1.1 模式; (b) MIROC 的 MIROC-ESM 模式; (c) NCAR 的 CCSM4 模式; (d) CCCMA 的 CanESM2 模式; (e) MOHC 的 HadCM3 模式; (f) MPI 的 MPI-ESM-LR 模式

幅度为 6 个模式中最大的, 而 MPI 的 MPI-ESM-LR 模式的结果中距平值普遍较其他模式偏低。

6 个模式模拟的未来短期中国区域冬季气温减去历史资料的暖期差值场大体以正距平为主(如图 9)。BCC 的 BCC-CSM-1.1 模式与 MIROC 的 MIROC-ESM 模式模拟的结果在东北地区的变化相反, BCC 的模式表明未来短期东北北部为降温, 而 MIROC 的模式结果在东北地区则为强的正距平中心。6 个模式模拟的结果中, MOHC 的 HadCM3 模式模拟显示未来短期的中国区域较历史资料的暖期增暖幅度最大。

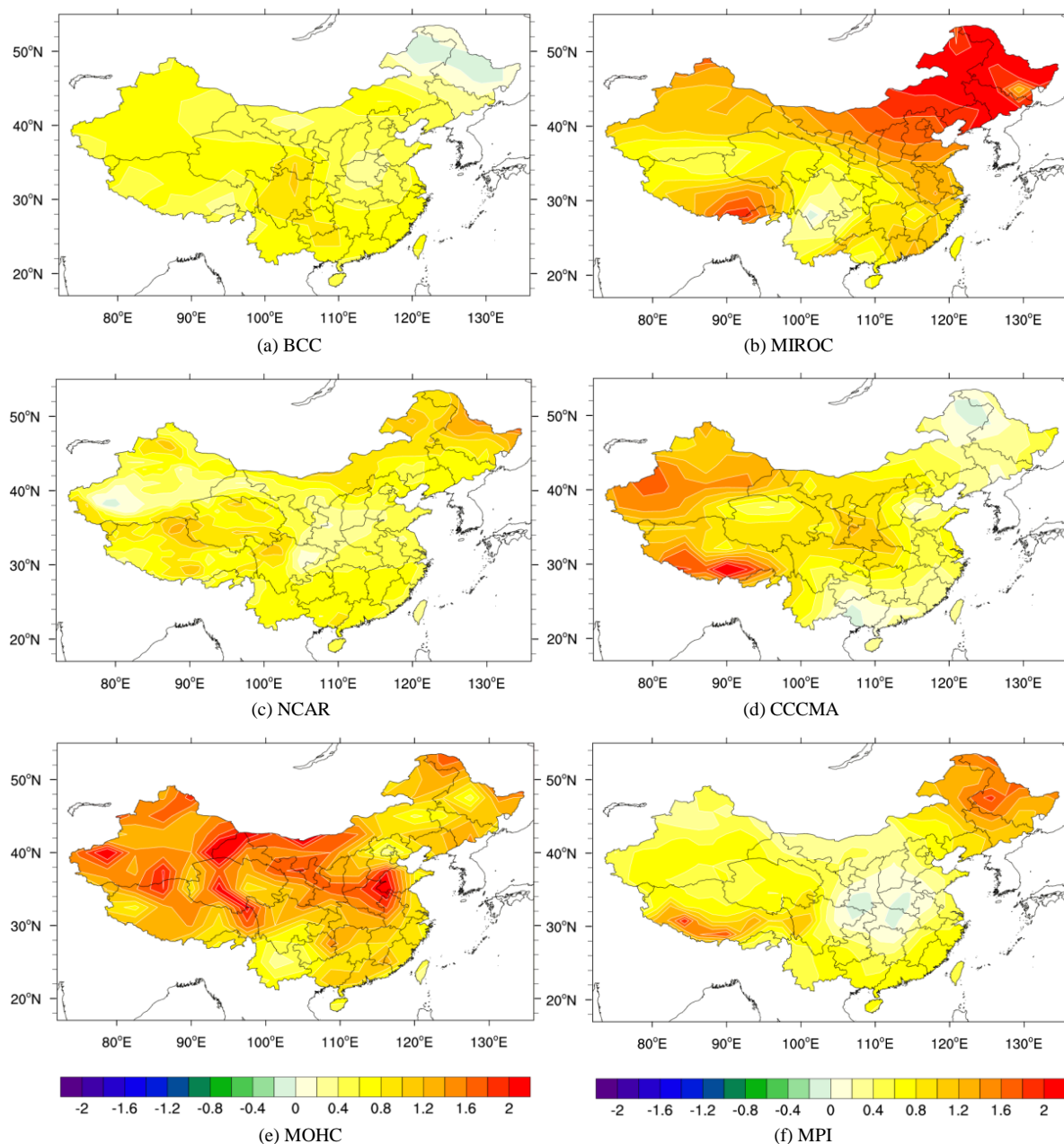


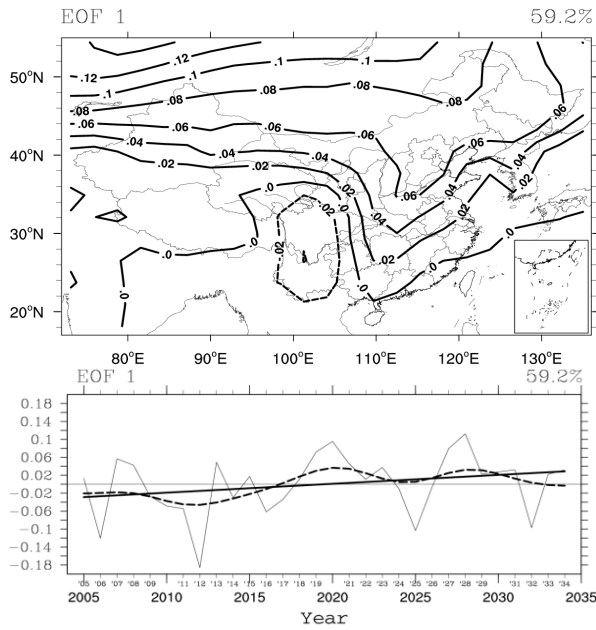
Figure 9. Differences of the winter mean 2-m air temperature (hiatus period minus warm period) in China by CMIP5 models. (a) BCC-CSM-1.1; (b) MIROC-ESM; (c) NCAR; (d) CanESM2; (e) HadCM3; (f) MPI-ESM-LR

图 9. CMIP5 气候系统模式模拟的停滞期减去暖期的气温差值分布; (a) BCC 的 BCC-CSM-1.1 模式; (b) MIROC 的 MIROC-ESM 模式; (c) NCAR 的 CCSM4 模式; (d) CCCMA 的 CanESM2 模式; (e) MOHC 的 HadCM3 模式; (f) MPI 的 MPI-ESM-LR 模式

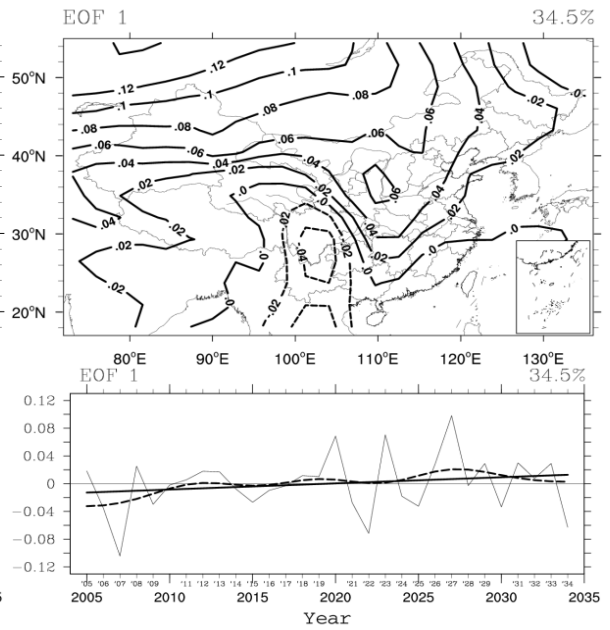
5. 对比 RCP2.6 和 RCP8.5 情景下气候系统模式对中国冬季气温未来变化的预估

由于 MOHC 的 HadCM3 模式只提供了 RCP4.5 情景下未来短期的气温变化资料, 而 RCP2.6 和 RCP8.5 分别是最和最高排放的两种情形, 对比分析这两种结果有助于我们判断未来冬季气温的变化幅度。以下我们将对比分析 5 种气候系统模式的 RCP2.6 和 RCP8.5 两种情景下中国冬季气温的变化。

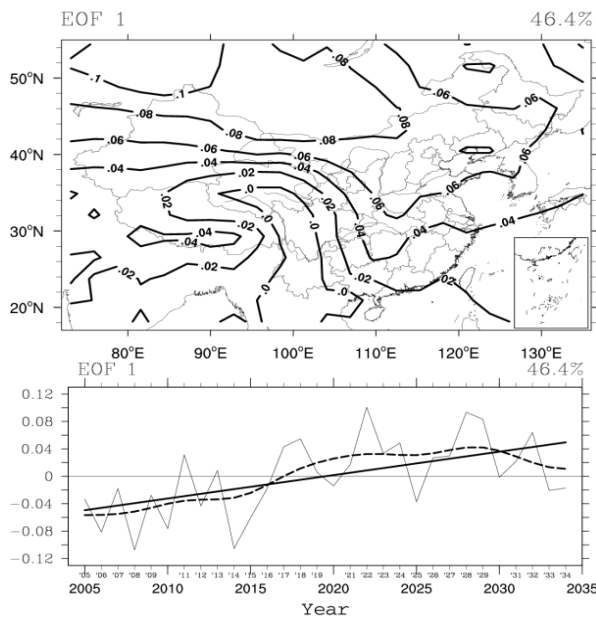
如图 10, BCC 的 BCC-CSM-1.1 模式在 RCP2.6 情景下的未来短期中国冬季气温的 EOF1 空间分布与



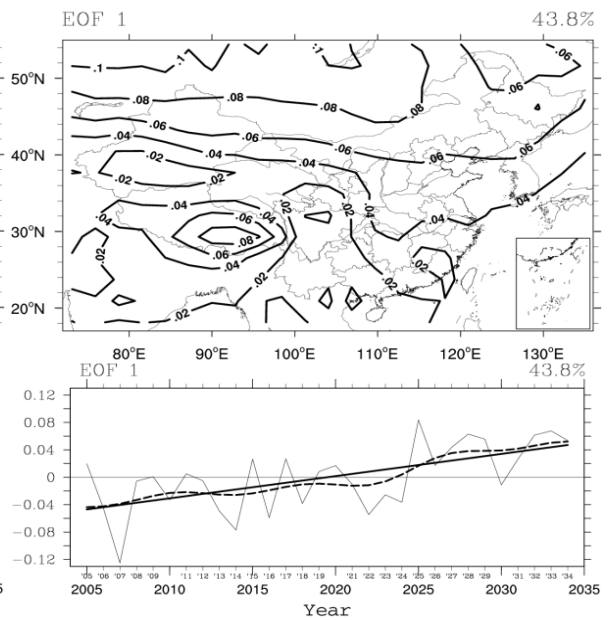
(a) BCC-RCP2.6



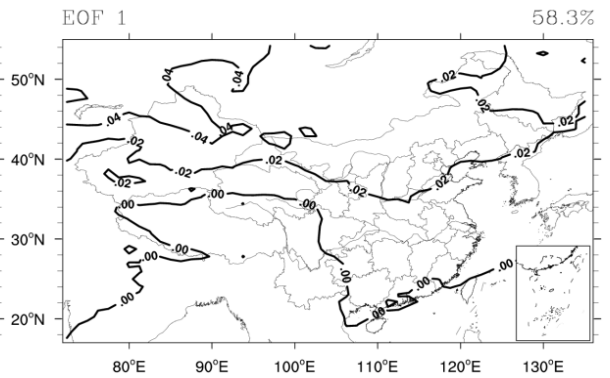
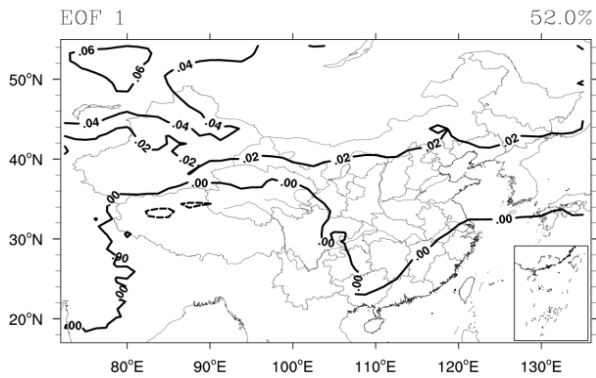
(b) BCC-RCP8.5

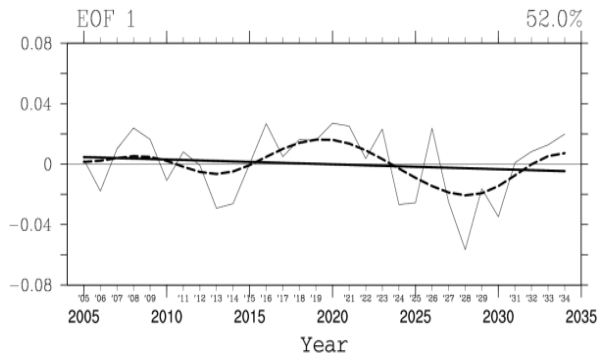


(c) MIROC-RCP2.6

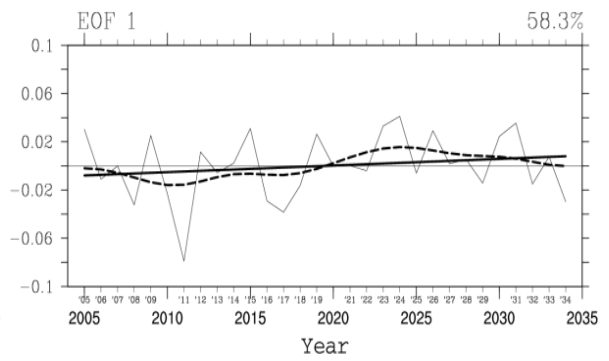


(d) MIROC-RCP8.5

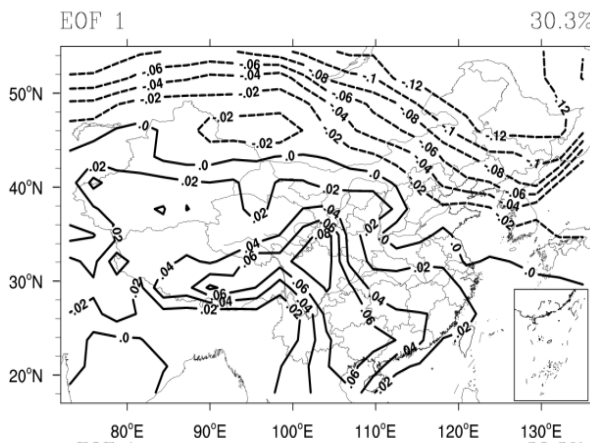




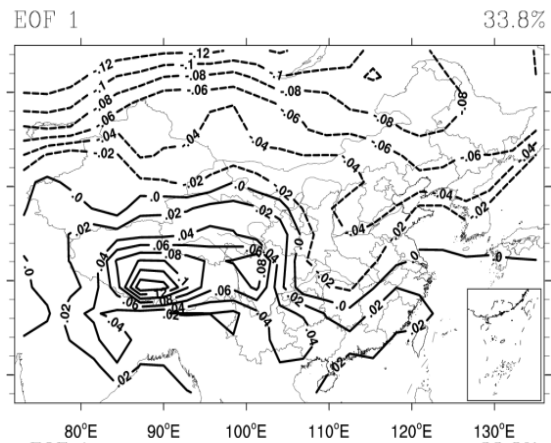
(e) NCAR-RCP2.6



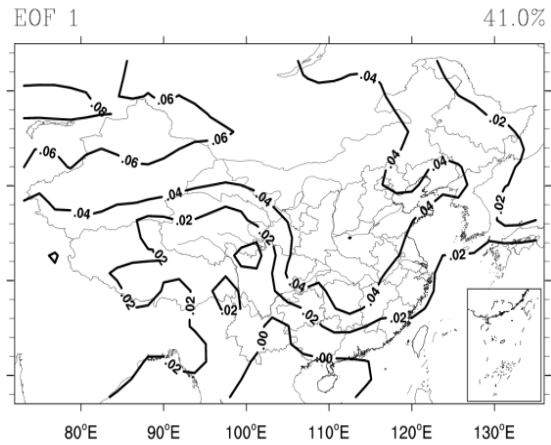
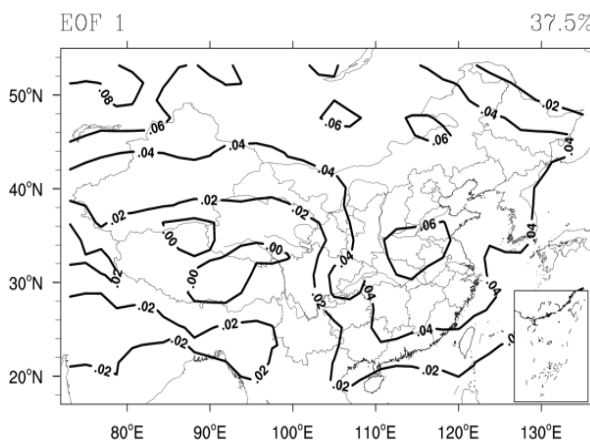
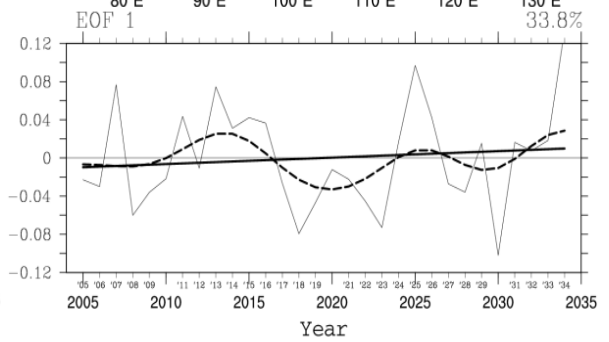
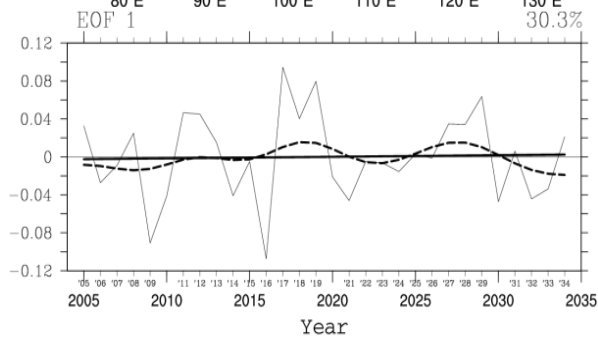
(f) NCAR-RCP8.5



(g) CCCMA-RCP2.6



(h) CCCMA-RCP8.5



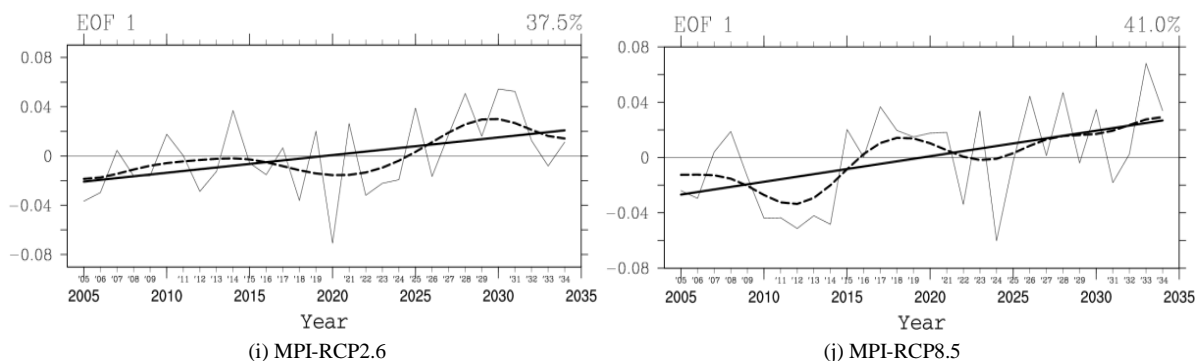


Figure 10. Spatial patterns and corresponding normalized time coefficients of the first leading EOF mode of the winter mean 2-m air temperature in China from 2006-2035 by CMIP5 models. Black solid line: linear trend, black dashed line: Gauss low-pass filtering curve. (a) RCP2.6 of BCC-CSM-1.1; (b) RCP8.5 of BCC-CSM-1.1; (c) RCP2.6 of MIROC-ESM; (d) RCP8.5 of MIROC-ESM; (e) RCP2.6 of NCAR; (f) RCP8.5 of NCAR; (g) RCP2.6 of CanESM2; (h) RCP8.5 of CanESM2; (i) RCP2.6 of MPI-ESM-LR; (j) RCP8.5 of MPI-ESM-LR

图 10. CMIP5 气候系统模式模拟的中国冬季气温 EOF 第一模态的空间分布型和标准化时间系数(细实线:标准化时间系数, 黑色实线:线性趋势曲线, 黑色虚线:高斯低频滤波曲线); (a) BCC 的 BCC-CSM-1.1 模式在 RCP2.6 的情景下; (b) BCC 的 BCC-CSM-1.1 模式在 RCP8.5 的情景下; (c) MIROC 的 MIROC-ESM 模式在 RCP2.6 的情景下; (d) MIROC 的 MIROC-ESM 模式在 RCP8.5 的情景下; (e) NCAR 的 CCSM4 模式在 RCP2.6 的情景下; (f) NCAR 的 CCSM4 模式在 RCP8.5 的情景下; (g) CCCMA 的 CanESM2 模式在 RCP2.6 的情景下; (h) CCCMA 的 CanESM2 模式在 RCP2.6 的情景下; (i) MPI 的 MPI-ESM-LR 模式在 RCP2.6 的情景下; (j) MPI 的 MPI-ESM-LR 模式在 RCP8.5 的情景下

RCP4.5 的情景下结果基本一致, 大致在 2010s 后期结束停滞期, 再次加速变暖。而 RCP8.5 的情景与其他两种情景的差异主要是东北地区的变暖增幅减小。MIROC 的 MIROC-ESM 模式在 RCP2.6 情景下, 云贵高原和青藏高原东侧增温幅度较小, 而在 RCP8.5 的情景下, 该地区与之相反, 呈现显著增暖。且在 RCP2.6 情景下, 停滞期截止时间大致在 2010s 中期, 而 RCP8.5 情景与 RCP4.5 的停滞期都大概在 2020s 中期结束。NCAR 的 CCSM4 模式在 RCP2.6、4.5 和 8.5 情境下的 EOF1 空间分布基本一致, 但是在 RCP2.6 情景下, 未来中国区域气温略有下降, 而其余两种情景气温为上升变化。CCCMA 的 CanESM2 模式在 RCP2.6 的情景下, 东北地区为降温的趋势, 在 RCP8.5 的情景下, 降温区域进一步扩大, 新疆北部地区, 华北和华东地区也为降温变化。MPI 的 MPI-ESM-LR 模式在三种情景下的 EOF1 空间分布大体一致, RCP2.6 的增暖幅度最小, RCP8.5 的增暖幅度最大, 且不同于 RCP4.5 情景下的 EOF1 时间系数以年际变化为主, 而 RCP2.6 和 RCP8.5 的 EOF1 时间系数表明停滞期将在 2010s 的中后期结束。

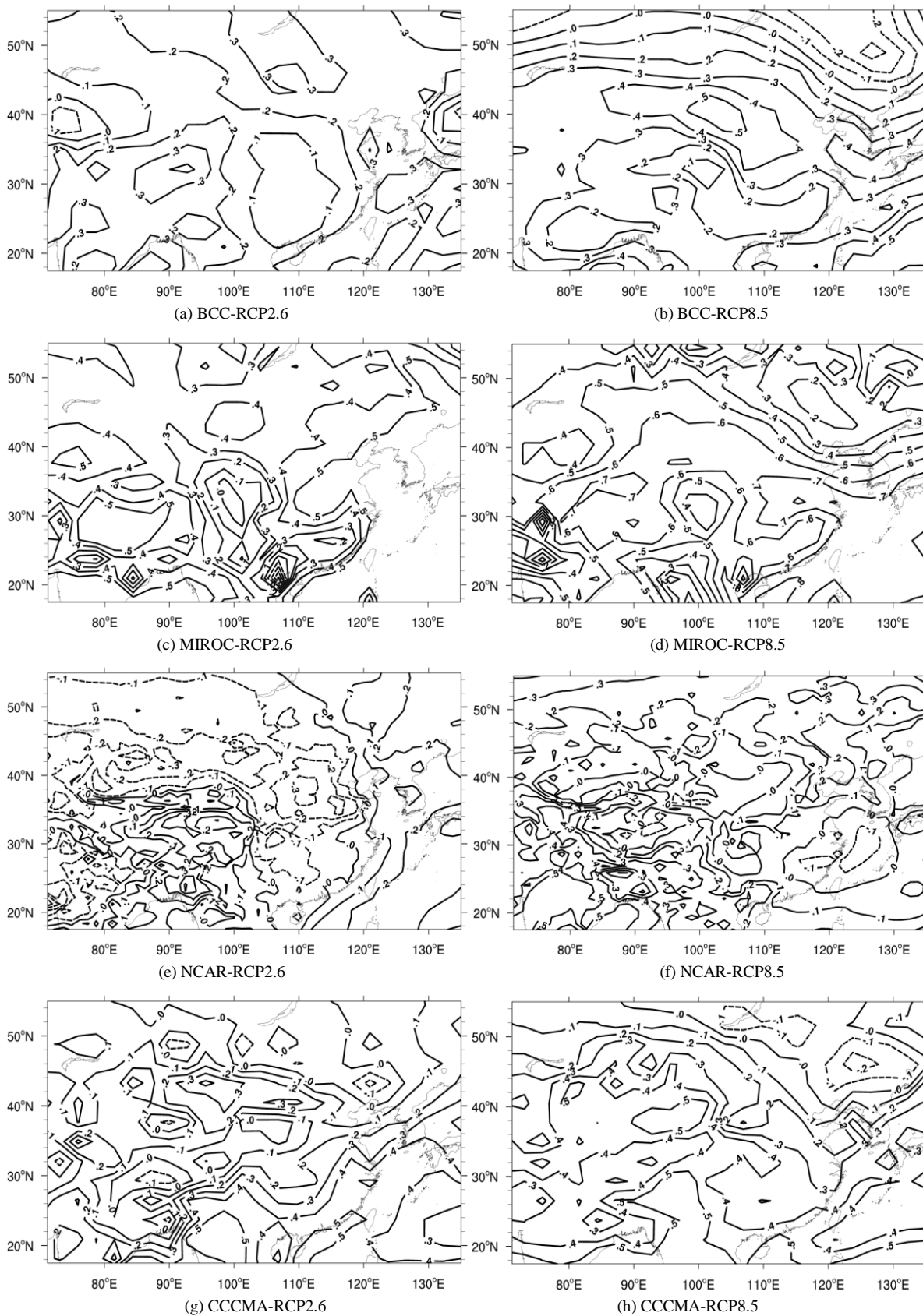
总的来看(如图 11), 5 模式中的未来冬季气温变化趋势系数分布上, RCP2.6 情景下的趋势系数多小于 RCP8.5 的情景结果。与 EOF1 的分析结果一致, NCAR 的 CCSM4 模式在 RCP2.6 的情景下, 中国区域大多数地区出现降温。BCC 的 BCC-CSM-1.1 模式和 CCCMA 的 CanESM2 模式在 RCP8.5 的情景中, 东北北部地区出现降温。

从图 12 中可见, RCP2.6 情景下未来短期中国冬季气温较冷期时的升温幅度在三种情景中是最小的, 升温的高值中心主要位于东北、西北和青藏高原地区。华东和华南地区的升温较弱。

而图 13 中表明, RCP2.6 情景下未来短期中国冬季气温较暖期时的升温幅度在三种情景中是最小的, 北方及青藏高原地区的升温幅度普遍强于南方。

6. 结论与讨论

CMIP5 提供的模式模拟资料有助于对未来气候的预估, 而对近期 10~30 年时间尺度的年代际预测是 CMIP5 研究的重要目标之一。本文利用 6 种 CMIP5 模式来研究最新的气候系统模式对中国冬季气温历史变化的再现能力, 进一步在此基础上, 对预设情景下未来中国冬季气温变化进行预估。



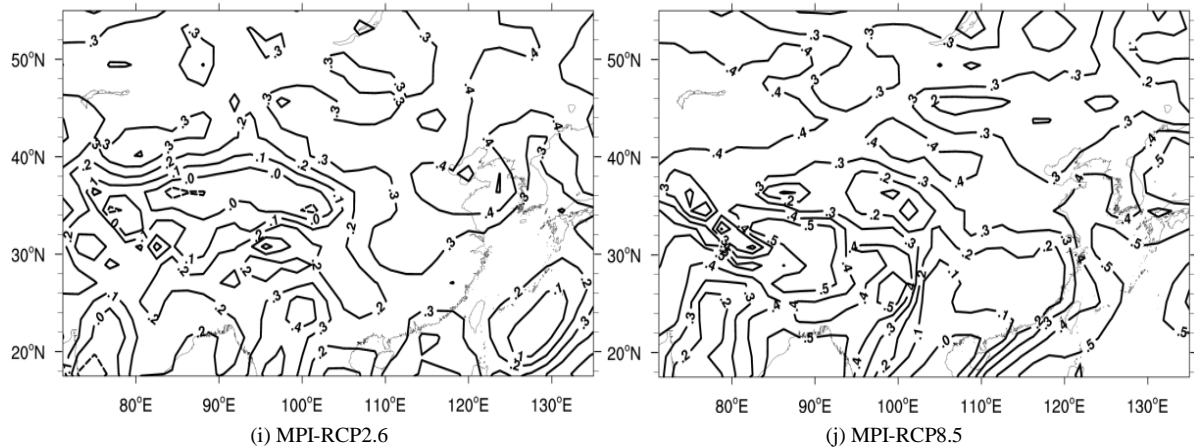
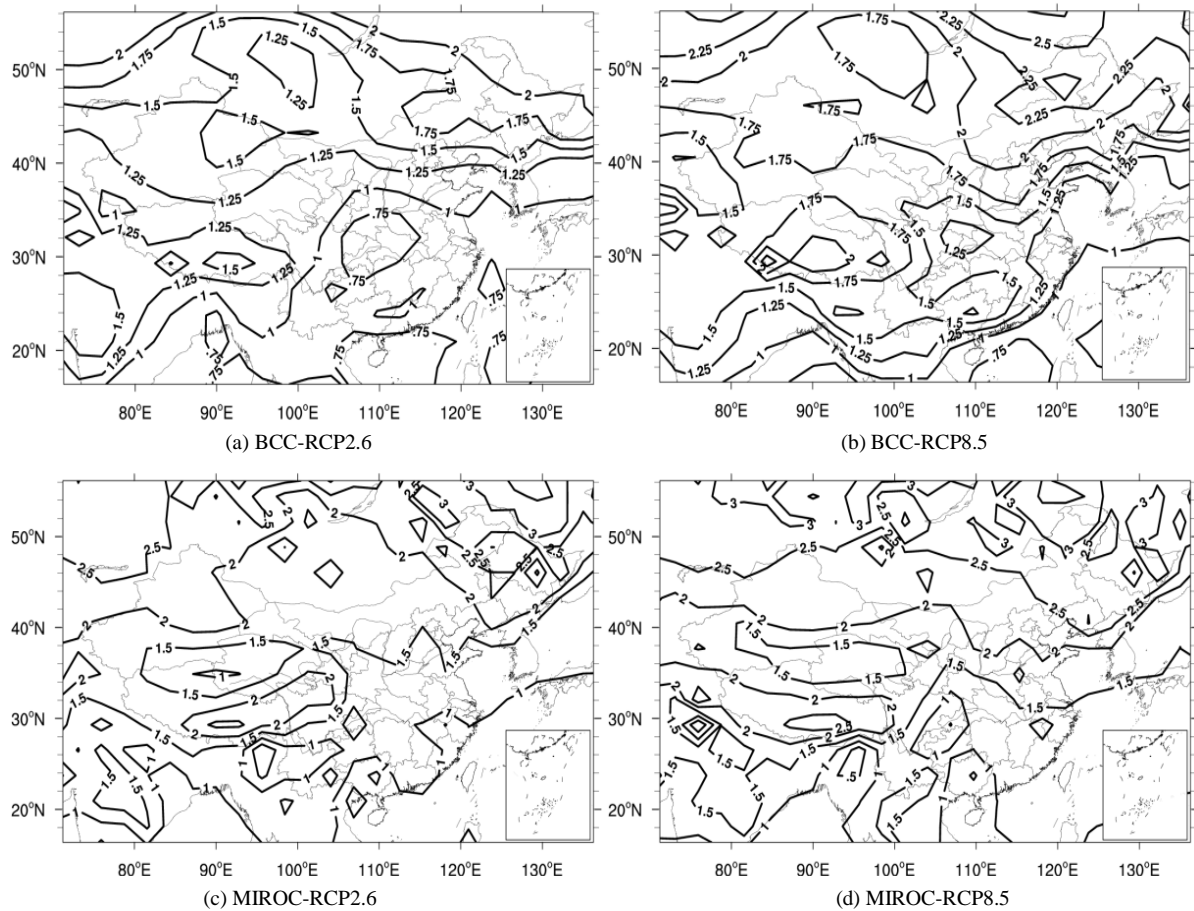


Figure 11. The trends of the winter mean 2-m air temperature in China by CMIP5 models from 2006-2035. (a) RCP2.6 of BCC-CSM-1.1; (b) RCP8.5 of BCC-CSM-1.1; (c) RCP2.6 of MIROC-ESM; (d) RCP8.5 of MIROC-ESM; (e) RCP2.6 of NCAR; (f) RCP8.5 of NCAR; (g) RCP2.6 of CanESM2; (h) RCP8.5 of CanESM2; (i) RCP2.6 of MPI-ESM-LR; (j) RCP8.5 of MPI-ESM-LR

图 11. CMIP5 气候系统模式模拟的未来中国冬季气温变化趋势; (a) BCC 的 BCC-CSM-1.1 模式在 RCP2.6 的情景下; (b) BCC 的 BCC-CSM-1.1 模式在 RCP8.5 的情景下; (c) MIROC 的 MIROC-ESM 模式在 RCP2.6 的情景下; (d) MIROC 的 MIROC-ESM 模式在 RCP8.5 的情景下; (e) NCAR 的 CCSM4 模式在 RCP2.6 的情景下; (f) NCAR 的 CCSM4 模式在 RCP8.5 的情景下; (g) CCCMA 的 CanESM2 模式在 RCP2.6 的情景下; (h) CCCMA 的 CanESM2 模式在 RCP2.6 的情景下; (i) MPI 的 MPI-ESM-LR 模式在 RCP2.6 的情景下; (j) MPI 的 MPI-ESM-LR 模式在 RCP8.5 的情景下



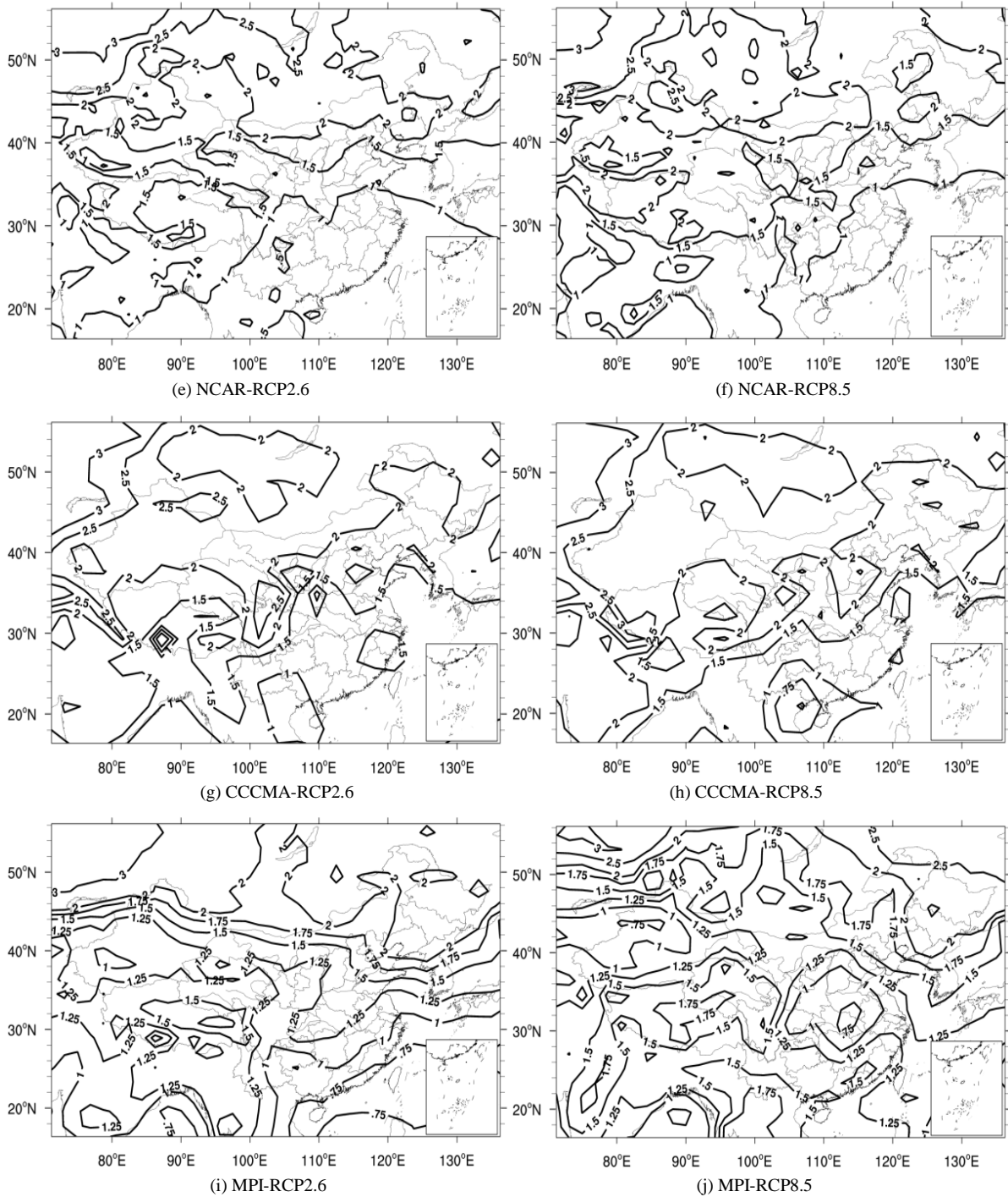
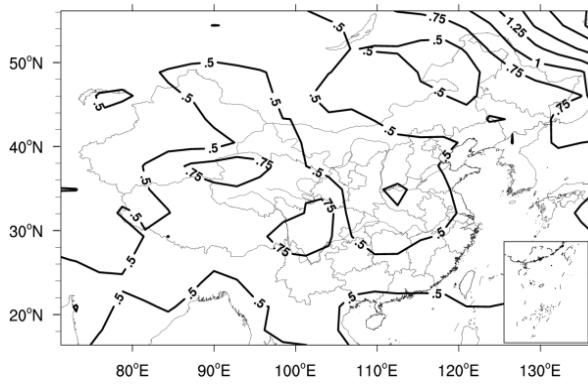
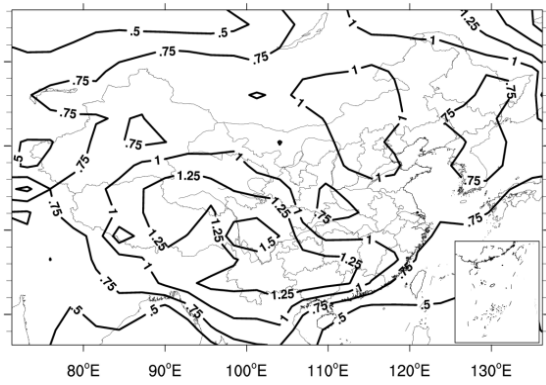


Figure 12. Differences of winter mean 2-m air temperature (hiatus period by CMIP5 models minus cold period by meteorological station) in China. (a) RCP2.6 of BCC-CSM-1.1; (b) RCP8.5 of BCC-CSM-1.1; (c) RCP2.6 of MIROC-ESM; (d) RCP8.5 of MIROC-ESM; (e) RCP2.6 of NCAR; (f) RCP8.5 of NCAR; (g) RCP2.6 of CanESM2; (h) RCP8.5 of CanESM2; (i) RCP2.6 of MPI-ESM-LR; (j) RCP8.5 of MPI-ESM-LR

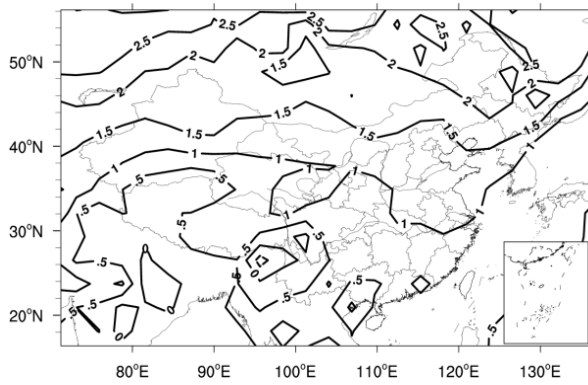
图 12. CMIP5 气候系统模式模拟的停滞期减去冷期的气温差值分布; (a) BCC 的 BCC-CSM-1.1 模式在 RCP2.6 的情景下; (b) BCC 的 BCC-CSM-1.1 模式在 RCP8.5 的情景下; (c) MIROC 的 MIROC-ESM 模式在 RCP2.6 的情景下; (d) MIROC 的 MIROC-ESM 模式在 RCP8.5 的情景下; (e) NCAR 的 CCSM4 模式在 RCP2.6 的情景下; (f) NCAR 的 CCSM4 模式在 RCP8.5 的情景下; (g) CCCMA 的 CanESM2 模式在 RCP2.6 的情景下; (h) CCCMA 的 CanESM2 模式在 RCP2.6 的情景下; (i) MPI 的 MPI-ESM-LR 模式在 RCP2.6 的情景下; (j) MPI 的 MPI-ESM-LR 模式在 RCP8.5 的情景下



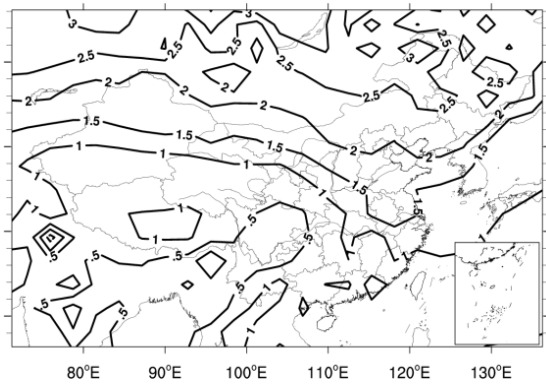
(a) BCC-RCP2.6



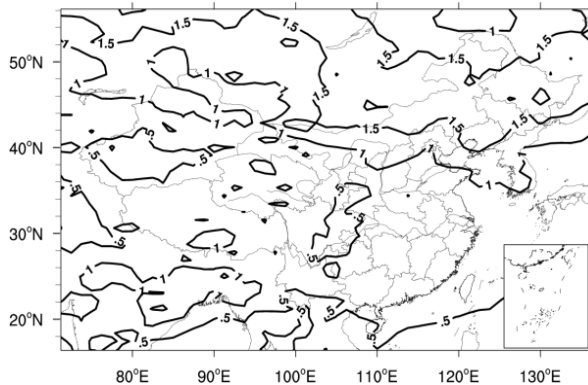
(b) BCC-RCP8.5



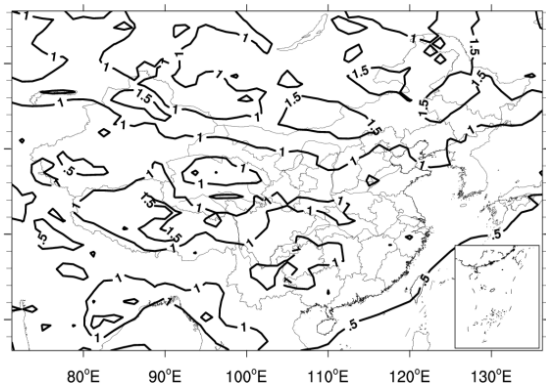
(c) MIROC-RCP2.6



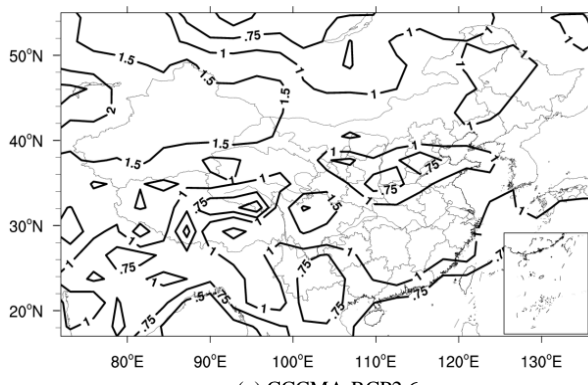
(d) MIROC-RCP8.5



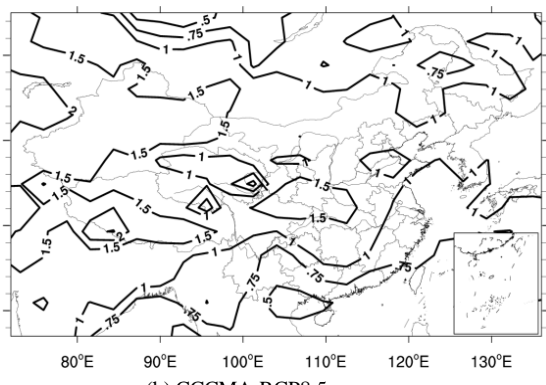
(e) NCAR-RCP2.6



(f) NCAR-RCP8.5



(g) CCCMA-RCP2.6



(h) CCCMA-RCP8.5

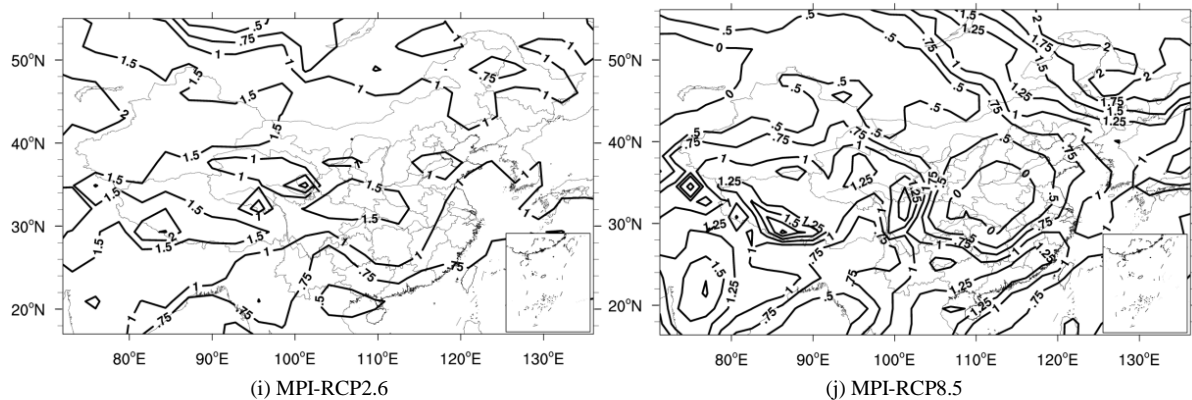


Figure 13. Differences of winter mean 2-m air temperature (hiatus period by CMIP5 models minus warm period by meteorological station) in China. (a) RCP2.6 of BCC-CSM-1.1; (b) RCP8.5 of BCC-CSM-1.1; (c) RCP2.6 of MIROC-ESM; (d) RCP8.5 of MIROC-ESM; (e) RCP2.6 of NCAR; (f) RCP8.5 of NCAR; (g) RCP2.6 of CanESM2; (h) RCP8.5 of CanESM2; (i) RCP2.6 of MPI-ESM-LR; (j) RCP8.5 of MPI-ESM-LR

图 13. CMIP5 气候系统模式模拟的停滞期减去暖期的气温差值分布(a) BCC 的 BCC-CSM-1.1 模式在 RCP2.6 的情景下; (b) BCC 的 BCC-CSM-1.1 模式在 RCP8.5 的情景下; (c) MIROC 的 MIROC-ESM 模式在 RCP2.6 的情景下; (d) MIROC 的 MIROC-ESM 模式在 RCP8.5 的情景下; (e) NCAR 的 CCSM4 模式在 RCP2.6 的情景下; (f) NCAR 的 CCSM4 模式在 RCP8.5 的情景下; (g) CCCMA 的 CanESM2 模式在 RCP2.6 的情景下; (h) CCCMA 的 CanESM2 模式在 RCP2.6 的情景下; (i) MPI 的 MPI-ESM-LR 模式在 RCP2.6 的情景下; (j) MPI 的 MPI-ESM-LR 模式在 RCP8.5 的情景下

(1) 首先分析了各个模式的历史模拟试验结果。6 个模式历史模拟资料的中国区域冬季平均气温变化的 EOF1 模态最主要表现为全国气温一致的变化趋势，大值中心位于北方，华南和青藏高原的局部地区与其他地区呈反向变化。除 MOHC 的 HadCM3 外，其余五个模式的模拟历史资料的 EOF1 的标准化时间系数都呈现增暖趋势。在冷暖期的突变时间点上，BCC-CSM-1.1 模式模拟的历史资料的 EOF1 标准化时间系数的突变时间点与中国冷暖期的划分时间完全吻合。

6 个模式模拟的历史资料基本体现冬季气温的变化趋势特点，即全国呈现一致变暖的变化趋势，其中北方地区的增暖更为显著，但是在青藏高原地区各个模式的结果有差异。BCC 的 MIROC-ESM 模式模拟结果与实际最为切合，较好地反映了中国冬季气温的变化趋势。

模式模拟资料的暖冷期差值分布中，MOHC 的 HadCM3 模式模拟结果偏差与实际最大，其余模式的结果大多很好地描述了整个中国区域内暖期气温皆高于冷期的特点，但是模拟的增暖幅度略小于实际情况。BCC 的 BCC-CSM-1.1 模式模拟效果最佳。

6 种模式模拟的历史资料中的冷暖期气温减去实际冷暖期气温的差值场分布上，北方、华东和华南地区为正距平中心，表明较实际偏高，而在青藏高原和四川盆地等地区则较实际气温偏低，负距平中心值的绝对值普遍较大。总体来看，BCC 的 BCC-CSM-1.1 模式和 MPI 的 MPI-ESM-LR 模式模拟的历史资料与实际偏差在 6 种模式结果中较小。

(2) 6 个模式模拟的未来 2005~2035 年冬季中国区域气温资料表明中国大部分地区呈现一致增暖的变化趋势，其中北方地区的增暖幅度更大，但是青藏高原、云贵高原和华南南部地区呈降温变化。模式模拟的未来短期中国区域冬季气温在 2020 年前后结束停滞期后再次加速增暖。6 个模式模拟的未来短期中国区域的冬季气温以升温为主要变化特征，但是大值中心各不相同。并且 6 个模式模拟的未来短期中国区域冬季气温减去历史资料的冷暖期差值场都为正距平，表明未来气温将比冷暖期时偏暖，且北方地区的增暖幅度更大。

(3) 对比 RCP2.6 和 RCP8.5 情景下的未来短期中国冬季气温的 EOF1 空间分布可以发现，RCP2.6 情景下中国区域的增暖幅度小于 RCP8.5 的情景，其中 NCAR 的 CCSM4 模式在 RCP2.6 情景下，未来中国

区域气温略有下降。但是在增暖的大值区上，各个模式间的结果区别较大。从 EOF1 的时间系数判断，模式结果表明停滞期大致在 2010~2025 年期间结束，之后中国冬季气温进一步上升。从气温线性变化趋势系数的分布上，RCP2.6 情景下的升温弱于 RCP8.5 情景的结果。模式模拟的未来短期中国冬季气温较冷暖期气温都有升高，北方及青藏高原地区的增暖强于南方地区。

参考文献 (References)

- [1] Taylor, K.E., Stouffer, R.J. and Meehl, G.A. (2012) An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *BAMS*, 485-498.
- [2] 赵宗慈, 罗勇, 黄建斌. 对地球系统模式评估方法的回顾[J]. 气候变化研究进展, 2013, 9 (1): 001-008.
- [3] Roeckner, E., Brokopf, R., Esch, M., *et al.* (2006) Sensitivity Simulated Climate to Horizontal and Vertical Resolution in the ECHAM5 Atmosphere Model. *Journal of Climate*, **19**, 3771-3791.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2168-5711, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ccrl@hanspub.org