



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng



Research
Climate Change—Article

CMIP5 模式对大尺度年平均地面气温异常的多年代际趋势的模拟评估和未来预估

邢楠^{a,b}, 李建平^{a,c,*}, 王兰宁^{a,c}

^a State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

^b Beijing Municipal Weather Forecast Center, Beijing 100089, China

^c Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China

ARTICLE INFO

Article history:

Received 1 February 2016

Revised 12 May 2016

Accepted 25 August 2016

Available online 29 November 2016

关键词

地面气温异常

多年代际趋势

第五次耦合模式比较计划 (CMIP5)

预估

摘要

基于观测和第五次耦合模式比较计划 (CMIP5) 模式的模拟结果, 本文对全球、半球、半球陆地及海洋尺度的年平均地面气温异常在过去一百多年及两个代表性浓度路径 (RCPs) 情景下的多年代际变化及趋势进行了评估分析。根据模式对全球平均地面气温异常的时间变率、长期趋势、多年代际变化及趋势的模拟能力, 筛选出 15 个模式进行分析。观测结果表明, 北半球陆地、北半球海洋和南半球海洋平均地面气温异常与全球平均地面气温异常具有相似的多年代际变化特征: 在 1900—1944 年及 1971—2000 年呈现增暖趋势, 并在 1945—1970 年和 2001—2013 年呈现增暖停滞甚至变冷趋势。模式能够基本再现以上观测特征。然而, 与以上变化不同的是, 南半球陆地的平均地面气温在 1945—1970 年呈现增暖趋势, 并且模式不能很好模拟该特征。对于近期的增暖停滞阶段 (2001—2013 年), BCC-CSM1-1-m 模式、CMCC-CM 模式、GFDL-ESM2M 模式及 NorESM1-ME 模式在 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下预估的全球及半球尺度的地面气温异常趋势值最接近观测值, 表明它们具有较好的预估能力。由于这四个模式在地面气温异常的多年代际趋势上具有较好的模拟及预估性能, 故选择它们来预估 2006—2099 年的地面气温异常在全球及半球尺度上的变化特征。结果显示在 RCP4.5(RCP8.5) 情景下, 所选四个模式集合平均的全球、北半球及南半球年平均地面气温异常趋势值分别为 0.17(0.29)、0.22(0.36) 及 0.11(0.23) °C·decade⁻¹, 其趋势值明显小于未经过模式筛选的 CMIP5 模式集合的结果。

© 2017 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of the Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

全球气候系统模式在气候变率及其归因分析和未来气候变化预估的研究中扮演着重要的角色。为了在统一的框架上开展多模式的比较, 世界气候研究计划已经组织了多次耦合模式比较计划 (CMIP)[1,2]。基于 CMIP 试验和观测结果, 两者间的比较分析能够使得我们更加深

入认识模式对实际气候特征模拟的优势和不足, 这有助于改进和提高模式对未来气候变化预估的准确性。

自 20 世纪以来, 全球地面气温异常呈现以增暖为主要趋势但包含多年代际变化的特征。前人的研究表明, 全球平均地面气温异常的多年代际变化分为两个增暖阶段 (1900s—1940s 和 1970s—1990s) 和两个增暖停滞阶段 (1940s—1970s 和 2000s—2014 年)[3,4]。而南、北半球平

* Corresponding author.

E-mail address: ljp@bnu.edu.cn

均地面气温异常的多年代际增暖强度在某些阶段并非完全一致,如1979—2010年期间的增暖趋势[5],这表明了地面气温异常的多年代际变化在半球尺度上的不均一性特征。此外,地面气温异常在半球尺度上的多年代际变化对农业、生态系统及经济有着不同的影响[6]。因此,地面气温异常的多年代际变化的模拟及预测显得尤为重要。

很多模式能基本再现全球及半球尺度的地面气温异常的长期增暖趋势及时间变率[7-9]。陆地(北半球)比海洋(南半球)升温幅度更高的特征也能基本上被模式模拟出来[10,11]。此外,模式也能够大体再现全球及半球尺度1901—1950年和1951—2010年的多年代际增暖趋势[11]。然而,前人对于地面气温异常在增暖停滞阶段(1940s—1970s和2000s—2014年)的评估工作相对较少,并且较少有研究致力于评估地面气温异常在全球、陆地和海洋的半球尺度上的多年代际趋势的差异及其未来预估。因此,很有必要进一步评估CMIP5模式对全球及半球尺度的地面气温异常的多年代际趋势的模拟能力及其未来情景预估。此外,多模式集合评估通常基于所有可用的模式,然而这样的集合平均并没有验证模式的保真度,这就可能会影响情景预估的可靠性[12]。如何筛选模式以获得更可靠的未来情景预估是非常重要的。

本文重点讨论CMIP5模式对全球及半球尺度年平均地面气温异常的多年代际趋势的模拟能力及其预估。本文的其余部分结构如下:在第2节,我们简单介绍本文

使用的CMIP5模式、再分析资料及方法;第3节是本文的结果和讨论;第4节为小结。

2. 资料及方法

2.1. 资料

本文所使用的耦合气候模式的输出结果来自于CMIP5多模式数据库(<http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/index.html>)。本文主要关注20世纪以来的历史模拟资料[13]以及代表性浓度路径(RCPs)RCP4.5和RCP8.5情景(分别对应中低排放情景和高排放情景)下的预估资料[14],计算地面气温异常所用的基准时期为1961—1990年。RCP4.5和RCP8.5情景分别规定,到2100年辐射强迫稳定在 $4.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $8.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。我们选取了15个模式在r1i1p1初始条件下模拟的月平均资料(表1)。这些模式的筛选是基于模式的可用性、多样性以及它们对全球平均地面气温异常的时间变率、长期趋势和多年代际变化及趋势的模拟性能(图略)。

为了评估模式的模拟能力,我们选取了英国气象局哈德利中心和东英吉利大学气候研究中心的第四版本的月平均地面气温再分析资料(HadCRUT4)[5],水平分辨率为 $5^\circ \times 5^\circ$,时间长度为1900—2013年。

2.2. 方法

为了避免数据缺失或者奇异点对线性趋势造成的影

表1 CMIP5模式基本信息概况

模式	机构	分辨率 (纬度×经度)	数据时段	
			历史+ RCP4.5	历史+ RCP8.5
BCC-CSM1-1-m	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration	$1.125^\circ \times 1.125^\circ$	1900—2099	1900—2099
BNU-ESM	Beijing Normal University	$2.8^\circ \times 2.8^\circ$	1900—2099	1900—2099
CanESM2	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis	$2.8^\circ \times 2.8^\circ$	1900—2099	1900—2099
CESM1-CAM5	National Center for Atmospheric Research	$0.94^\circ \times 1.25^\circ$	1900—2099	1900—2099
CMCC-CM	Euro-Mediterranean Center on Climate Change	$0.75^\circ \times 0.75^\circ$	1900—2099	1900—2099
CNRM-CM5	National Center for Meteorological Research	$1.4^\circ \times 1.4^\circ$	1900—2099	1900—2099
GFDL-ESM2M	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	$2.0^\circ \times 2.5^\circ$	1900—2099	1900—2099
GISS-E2-H	NASA Goddard Institute for Space Studies	$2.0^\circ \times 2.5^\circ$	1900—2099	1900—2099
HadCM3	Met Office Hadley Centre	$3.8^\circ \times 2.5^\circ$	1900—2005	1900—2005
IPSL-CM5A-MR	Institute Pierre Simon Laplace	$1.27^\circ \times 2.5^\circ$	1900—2099	1900—2099
MIROC-ESM-CHEM	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), and National Institute for Environmental Studies	$2.8^\circ \times 2.8^\circ$	1900—2099	1900—2099
MPI-ESM-P	Max Planck Institute for Meteorology	$1.865^\circ \times 1.875^\circ$	1900—2005	1900—2005
MRI-ESM1	Meteorological Research Institute	$1.121^\circ \times 1.125^\circ$	1900—2005	1900—2005
NorESM1-ME, NorESM1-M	Norwegian Climate Centre	$1.89^\circ \times 2.5^\circ$	1900—2099	1900—2099

响, 我们采用稳健性趋势分析方法——Sen斜率估计法计算地面气温的多年代际变化趋势值及相应置信区间[15]。此外, 我们采用非参数Mann Kendall统计来检验变化趋势的显著性[16]。

3. 结果和讨论

3.1. 观测的年平均地面气温异常的多年代际变化及趋势

图1给出了1900—2013年全球、北半球、南半球和南、北半球陆地及海洋的年平均地面气温异常的时间序列和趋势值。全球及半球尺度的年平均地面气温异常均表现为长期增暖并伴有多年代际变化的特征, 同时半球尺度的年平均地面气温异常相对于全球尺度的年平均地面气温异常来说具有较大的年际变率。近些年来, 全球平均地面气温增暖速率低于北半球而高于南半球, 并且陆地上高于海洋[11]。此外, 北半球陆地(海洋)地面气温长期增暖趋势值大于南半球陆地(海洋)。基于全球年平均地面气温异常的多年代际突变年份为1944年、1970年及2000年, 地面气温异常可分为两个增暖阶段(1900—1944年和1971—2000年)和两个增暖停滞阶段

(1945—1970年和2001—2013年), 其中, 增暖阶段的趋势显著而增暖停滞阶段的趋势不显著[图1(g)]。与全球平均地面气温异常相比, 北半球陆地及南、北半球海洋的平均地面气温异常有类似的多年代际变化特征, 但各阶段趋势大小不同。然而, 南半球陆地的平均地面气温异常在1945—1970年期间呈现为增暖趋势($0.06\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{decade}^{-1}$), 该现象不同于全球及其他半球平均的趋势值(表2)。在北半球陆地及南、北半球海洋中, 北半球陆地的趋势值在这四个阶段变化最大。北半球陆地平均的趋势值在1971—2000年期间为 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{decade}^{-1}$, 随后在2001—2013年期间减少为 $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{decade}^{-1}$, 这也表明了北半球陆地在2001—2013年期间出现增暖停滞特征。

3.2. 模式模拟的地面气温异常的多年代际变化和趋势及其未来情景预估

图2给出了15个CMIP5模式及其集合平均的全球及半球尺度年平均地面气温异常的时间序列。由图可见, 模式间的模拟结果差异较大, 但集合平均的全球及半球尺度年平均地面气温的多年代际分布型与观测值相对一致。但相对于观测值来说, 集合平均具有较小的年际变

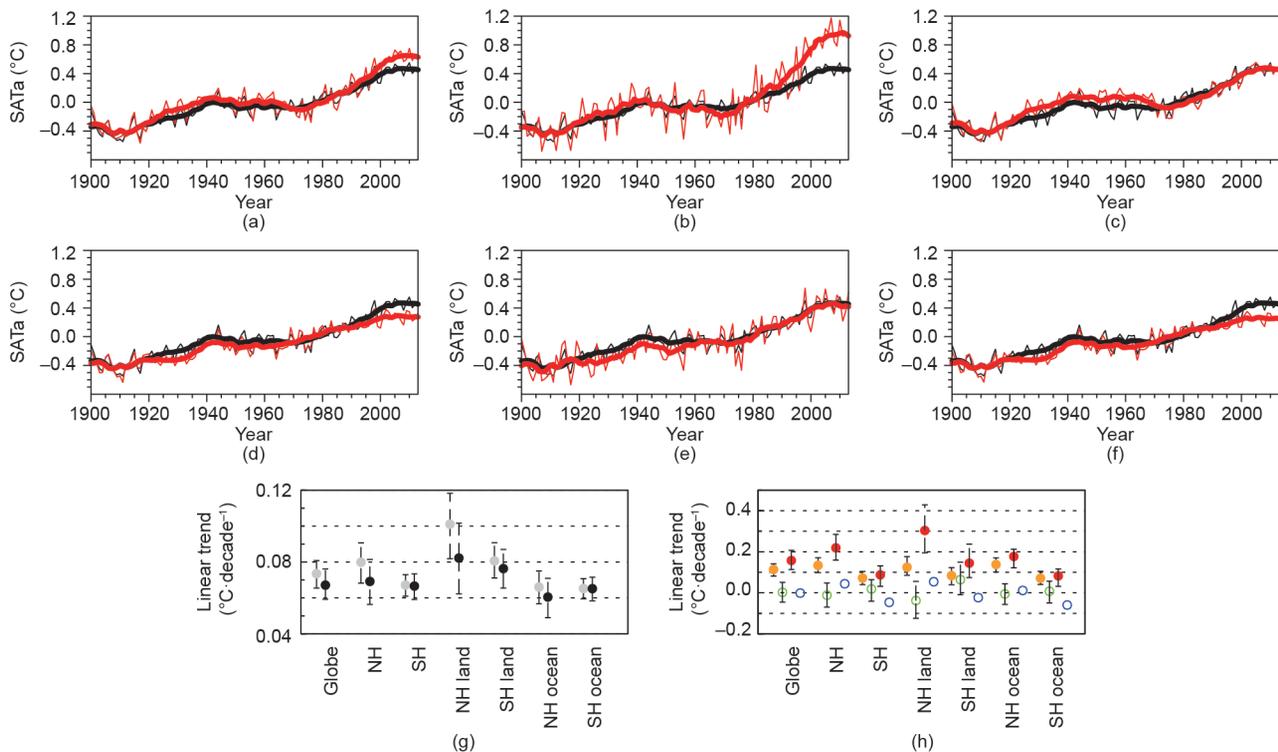


图1. 观测的全球、南半球、北半球和南、北半球陆地及海洋的加权年平均地面温度异常的(a~f)时间序列和(g, h)趋势值(单位: $^{\circ}\text{C}\cdot\text{decade}^{-1}$)。 (a)~(f)分别为北半球、北半球陆地、北半球海洋、南半球、南半球陆地和南半球海洋。(a)~(f)中黑色和红色的实线分别代表全球和半球尺度, 细线和粗线分别代表原始及11年滑动平均序列。(g)中的灰色和黑色圆分别代表1900—2005年和1900—2013年。(h)中的橘色、绿色、红色和蓝色圆分别代表1900—1944年、1945—1970年、1971—2000年和2001—2013年。(g)和(h)中实心 and 空心圆分别代表趋势值通过和没通过95%的置信度水平。误差线代表95%的置信区间, 虚线为刻度标记线。

表2 观测的全球、南半球、北半球和南、北半球陆地及海洋在不同阶段的地面气温异常的趋势值(单位: $^{\circ}\text{C}\cdot\text{decade}^{-1}$)

	趋势值 ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{decade}^{-1}$)					
	1900–2013	1900–2005	1900–1944	1945–1970	1971–2000	2001–2013
全球	0.074 (0.07, 0.08)	0.067 (0.06, 0.08)	0.11 (0.08, 0.14)	0 (-0.05, 0.05)	0.16 (0.11, 0.21)	0 (-0.02, 0.02)
北半球	0.080 (0.07, 0.09)	0.070 (0.06, 0.08)	0.13 (0.10, 0.17)	-0.01 (-0.07, 0.05)	0.22 (0.16, 0.28)	0.04 (0, 0.80)
南半球	0.067 (0.06, 0.07)	0.067 (0.06, 0.07)	0.07 (0.04, 0.10)	0.02 (-0.04, 0.06)	0.09 (0.03, 0.13)	-0.05 (-0.09, -0.01)
北半球陆地	0.100 (0.08, 0.12)	0.080 (0.06, 0.1)	0.12 (0.08, 0.18)	-0.04 (-0.12, 0.06)	0.30 (0.19, 0.43)	0.05 (0.02, 0.09)
南半球陆地	0.080 (0.07, 0.09)	0.080 (0.07, 0.09)	0.08 (0.04, 0.12)	0.06 (-0.01, 0.15)	0.14 (0.07, 0.24)	-0.02 (-0.17, 0.07)
北半球海洋	0.066 (0.06, 0.08)	0.060 (0.05, 0.07)	0.14 (0.10, 0.17)	-0.01 (-0.06, 0.04)	0.18 (0.12, 0.21)	0.01 (-0.02, 0.05)
南半球海洋	0.065 (0.06, 0.07)	0.065 (0.06, 0.07)	0.07 (0.04, 0.10)	0.01 (-0.05, 0.06)	0.08 (0.03, 0.12)	-0.06 (-0.08, -0.01)

黑体代表趋势值通过95%的置信度水平, 括号内的范围代表趋势值的95%置信区间。

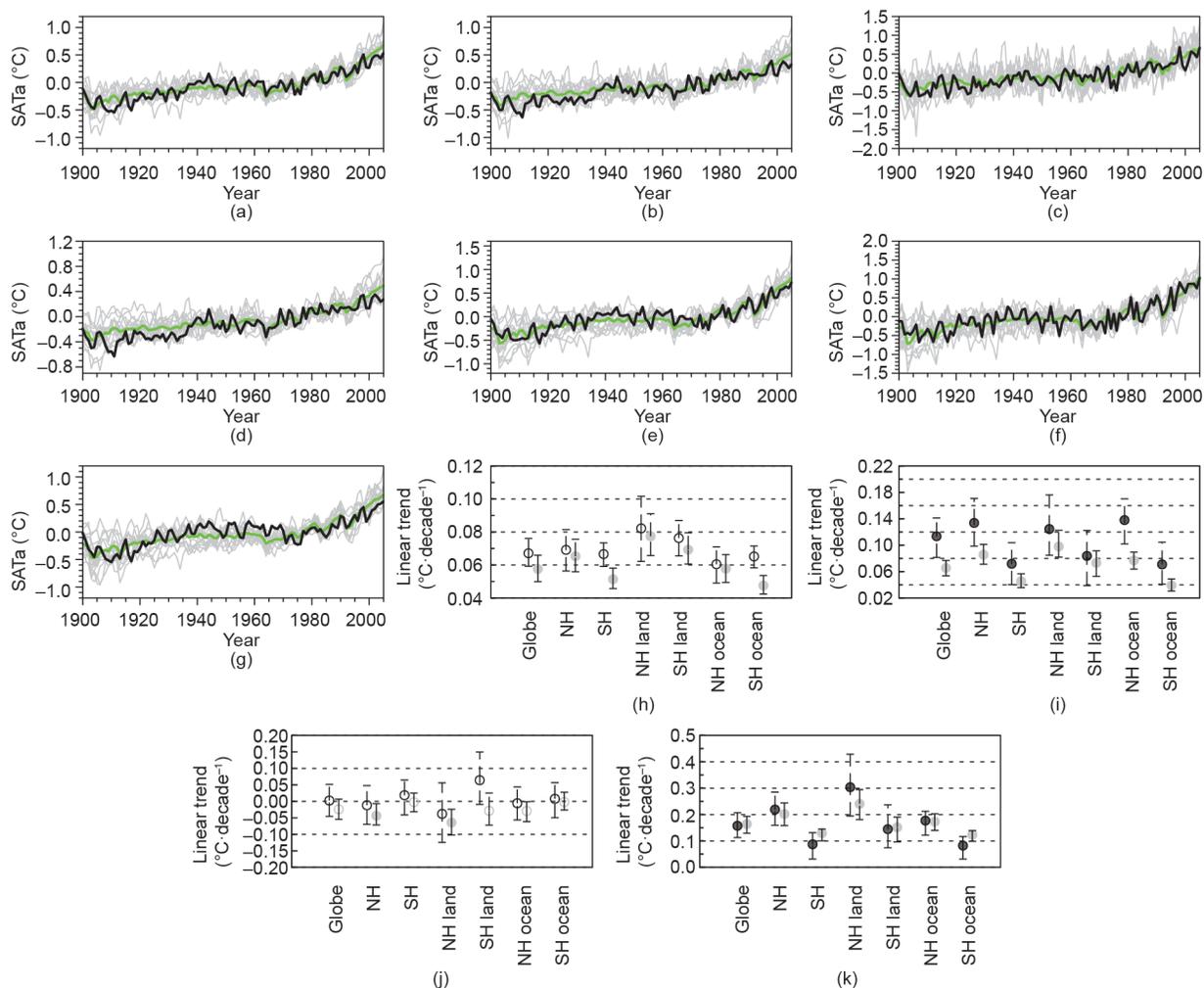


图2. 模式(灰线)、集合平均(绿线)及观测(黑线)的(a)全球、(b)南半球、(c)南半球陆地、(d)南半球海洋、(e)北半球、(f)北半球陆地和(g)北半球海洋在1900—2005年的加权年平均地面气温异常的时间序列, 以及15个模式集合平均和观测的加权年平均地面气温异常在(h)1900—2005年、(i)1900—1944年、(j)1945—1970年和(k)1971—2000年期间的线性趋势值。空心圆、实心圆、误差线以及虚线的含义与图1相同。

率[图2(a)~(g)]。在前三阶段,集合平均的全球平均地面气温异常的多年代际趋势值进一步表明模式能基本再现全球平均的时间分布型[图2(h)~(k)],该结果与前人的研究一致[11]。对于半球尺度来说,除了南半球陆地外,模式基本能够再现其他半球尺度地面气温的多年代际变化特征,南半球陆地1945—1970年的增暖趋势没能够被模式模拟出来[图2(j)]。此外,除了南、北半球海洋外,模式模拟的其他半球尺度趋势值在两个增暖阶段都在观测值的95%置信区间[图2(i)、(k)]。而模式模拟的1900—1944年南、北半球海洋的趋势值小于观测值,导致模式低估了北半球及全球平均的长期趋势值[图2(h)]。Jones等[11]指出许多模式能够抓住全球平均地面气温异常的多年代际的变化特征,并进一步评估了全球地面气温异常在1901—2010年、1901—1950年、1951—2010年及1979—2010年期间的趋势值。通过比较我们发现,模式低估了北太平洋和大西洋在1900—1944年期间的趋势值,同时高估了1971—2000年期间南半球热带太平洋和

南大洋的增暖趋势。除了增暖阶段,我们在增暖停滞阶段(1945—1970年)发现了一个有趣的现象,即南半球陆地呈现出增暖趋势,并且模式不能很好地模拟出该特征。

基于以上对模式模拟的大尺度年平均地面气温异常的多年代际趋势的评估,我们发现模式基本能够再现1900—2005年地面气温异常的多年代际变化特征。自21世纪以来,全球平均地面气温异常呈现增暖停滞的特征[3,4],那么模式对于这个阶段的全球及半球尺度地面气温异常的预估能力如何?为了回答这个问题,我们将评估中低排放情景RCP4.5和高排放情景RCP8.5下的地面气温异常的模拟情况。HadCM3模式预估数据的长度是2006—2035年,同时MPI-ESM-P模式和MRI-ESM1模式的情景预估数据不可用(表1),故在接下来的RCP分析中将不包括这三组模式。

图3给出了模式在RCP4.5和RCP8.5情景下预估的2001—2013年的年平均地面气温异常的趋势值。由图可

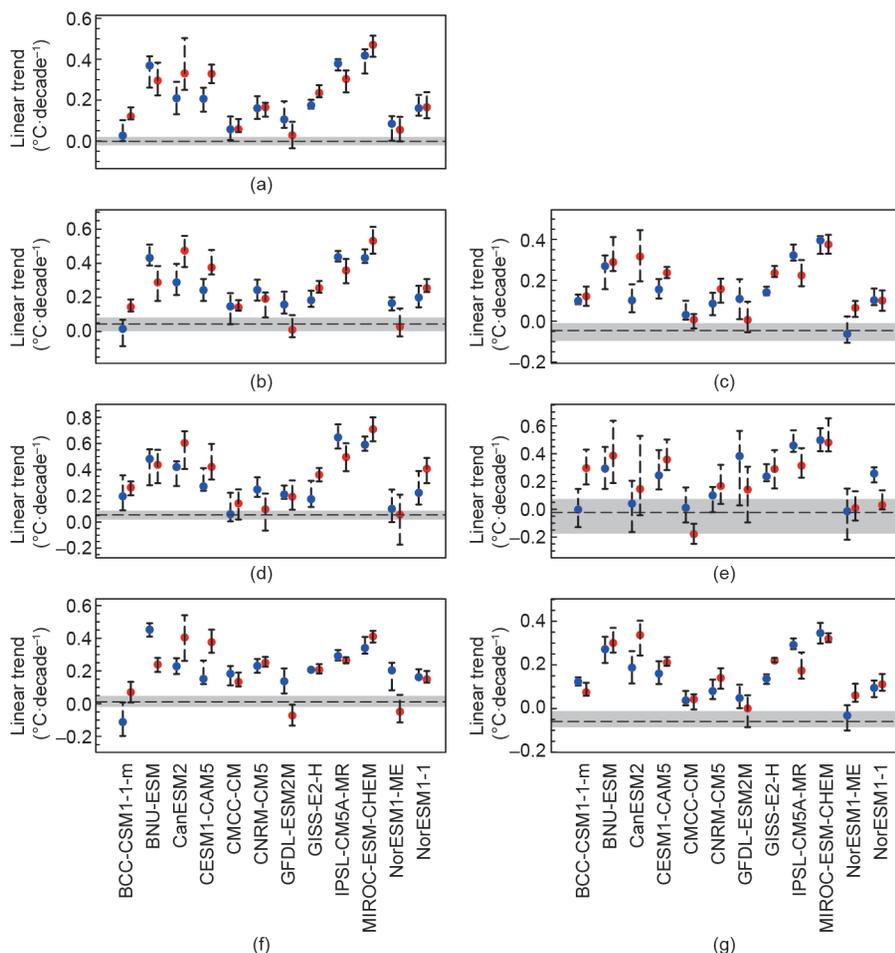


图3. 模式在RCP4.5(蓝色)和RCP8.5(红色)情景下预估的2001—2013年的(a)全球、(b)北半球、(c)南半球、(d)北半球陆地、(e)南半球陆地、(f)北半球海洋及(g)南半球海洋的加权年平均地面气温异常的趋势值(单位: $^{\circ}\text{C}\cdot\text{decade}^{-1}$)。图中的虚线为HadCRUT4再分析资料中的趋势值, 阴影区为观测趋势值的50%的置信区间。误差线为每个模式趋势值的50%的置信区间。

见,各模式预估的全球及半球尺度平均的趋势值差别很大,大部分模式高估了全球及半球尺度的趋势值,这与前人在全球尺度上的结果类似[6]。相比之下,BCC-CSM1-1-m模式、CMCC-CM模式、GFDL-ESM2M模式和NorESM1-ME模式预估的趋势值更接近观测值。前人的工作表明全球地面气温异常的变化是由人类活动引起的温室气体的增加、气候内部变率等因素共同导致的[2]。对人类活动引起的外强迫源的过高预估、模式对外强迫源不同的敏感程度以及模式对气候内部变率不同的模拟技巧可能是各模式模拟的2001—2013年的趋势值相差较大并偏高的原因[2,7,18]。这个问题将在未来作进一步的探究。

图3中的结果表明BCC-CSM1-1-m模式、CMCC-CM模式、GFDL-ESM2M模式及NorESM1-ME模式对2001—2013年的地面气温异常趋势有较好的预估能力。为进一步评估模式的模拟能力,表3给出了这四个模式的全球及半球尺度的平均地面气温异常的多年代际趋势值。由表3可见,这四个模式对半球尺度的地面气温异常特征的模拟性能各不相同。对比观测结果(表2),这四个模式对全球平均地面气温异常的多年代际变化特征模拟效果最好,并且这四个模式模拟的1945—1970年和1971—2000年的全球及半球尺度的平均地面气温异常的趋势值更接近观测。这四个模式的模拟结果类似于模式的集合平均结果[图2(g)],几乎都低估了1900—1944年全球及半球尺度的平均地面气温异常的趋势值。总的来说,这四个模式能较好地模拟及预估1900—2013年的地面气温异常的多年代际趋势特征,因此我们选取这四个模式预估的2006—2009年

的地面气温异常进行分析。

图4给出了BCC-CSM1-1-m、CMCC-CM、GFDL-ESM2M及NorESM1-ME这四个模式在RCP4.5和RCP8.5情景下集合平均的2006—2009年全球及半球尺度年平均地面气温异常变化。在这两个情景下,全球及半球尺度地面气温均呈现出整体增暖的趋势,北半球(陆地及海洋)的地面气温的增暖速率大于南半球(陆地及海洋),并且高排放情景RCP8.5下的增暖速率高于中低排放情景RCP4.5下的结果。另外,在RCP8.5情景下,全球及半球尺度地面气温异常自2006年一直呈现为线性增暖,且从2020年开始将超过RCP4.5情景下的增暖速率。在RCP4.5情景下,地面气温增暖速率在2080年左右到达峰值,随后不再增加。两个情景下的地面气温异常的变化分别类似于这两个情景下预估的由人类活动引起的外强迫源排放量的变化[14]。这两个情景中外强迫源排放量的差异可能是预估的地面气温异常在2060年之前差别不大而之后有显著差异的原因。

这四个模式在RCP4.5情景下预估的全球、北半球、南半球、北半球陆地、南半球陆地、北半球海洋及南半球海洋的年平均地面气温异常的趋势值分别为0.17、0.22、0.11、0.26、0.16、0.19和0.10 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{decade}^{-1}$,显著低于RCP8.5情景下的趋势值(0.29、0.36、0.23、0.43、0.33、0.31和0.21 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{decade}^{-1}$)(图略)。此外,在RCP4.5(RCP8.5)情景下,表1中除了HadCM3模式、MPI-ESM-P模式和MRI-ESM1模式外其他12个模式集合平均的全球、北半球、南半球、北半球陆地、南半球陆地、北半球海洋及南半球海洋的年平均地面气温异常的趋势值分别为0.2(0.41)、0.24(0.49)、0.15(0.33)、0.29(0.58)、0.21(0.45)、

表3 模式模拟的全球、南半球、北半球和南、北半球陆地及海洋在不同阶段的加权年平均地面气温异常的趋势值

时段	模式	趋势值($^{\circ}\text{C}\cdot\text{decade}^{-1}$)						
		全球	北半球	南半球	北半球陆地	南半球陆地	北半球海洋	南半球海洋
1900—2005	BCC-CSM1-1-m	0.07	0.11	0.04	0.14	0.07	0.10	0.04
	CMCC-CM	0.05	0.05	0.06	0.07	0.09	0.03	0.06
	GFDL-ESM2M	0.05	0.07	0.02	0.09	0.03	0.07	0.02
	NorESM1-ME	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.05	0.04
1900—1944	BCC-CSM1-1-m	0.02	0.12	-0.07	0.16	-0.03	0.09	-0.07
	CMCC-CM	0.01	-0.02	0.04	-0.01	0.04	-0.02	0.03
	GFDL-ESM2M	0.02	0.07	-0.02	0.08	-0.02	0.07	-0.02
	NorESM1-ME	0.08	0.08	0.07	0.12	0.08	0.07	0.07
1945—1970	BCC-CSM1-1-m	0.02	-0.04	0.06	-0.08	0.04	0	0.07
	CMCC-CM	0.01	0.02	-0.01	0.02	0.12	0.01	-0.03
	GFDL-ESM2M	-0.08	-0.10	-0.06	-0.12	-0.16	-0.07	-0.04
	NorESM1-ME	-0.01	0.05	-0.09	0.07	-0.12	0.05	-0.08
1971—2000	BCC-CSM1-1-m	0.20	0.21	0.21	0.24	0.21	0.17	0.21
	CMCC-CM	0.18	0.24	0.10	0.32	0.11	0.21	0.10
	GFDL-ESM2M	0.15	0.21	0.11	0.26	0.11	0.17	0.11
	NorESM1-ME	0.10	0.07	0.14	0.06	0.15	0.08	0.14

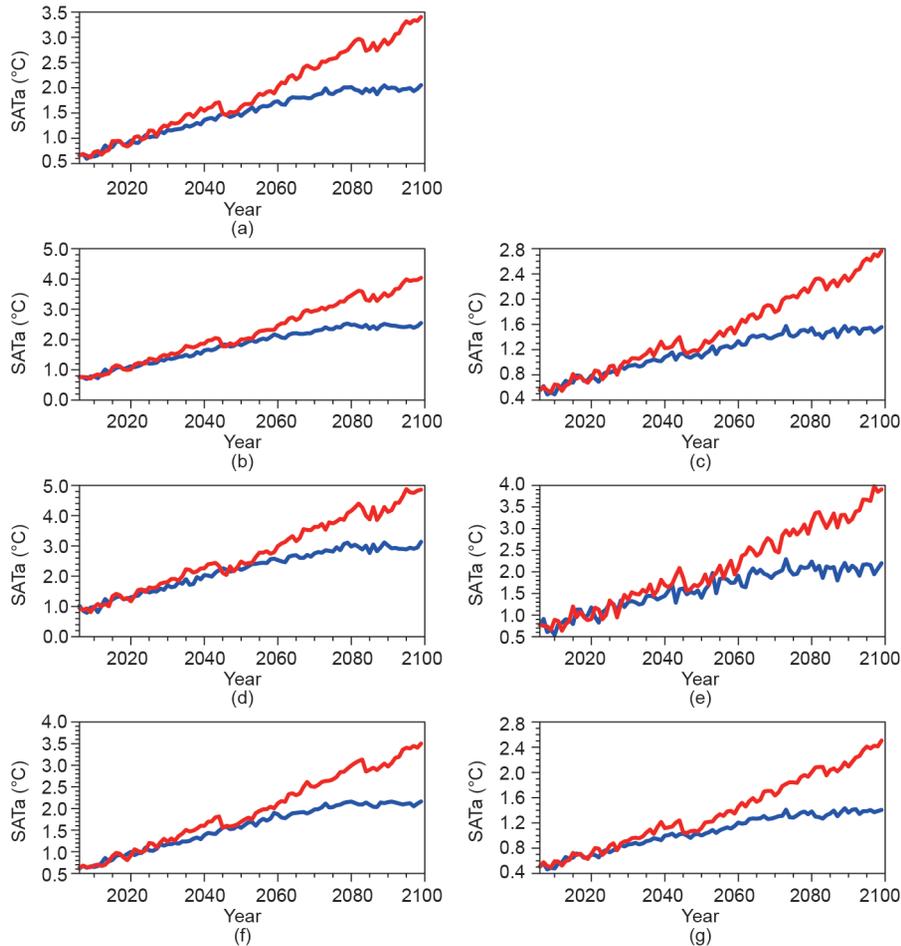


图4. RCP4.5(蓝线)和RCP8.5(红线)情景下BCC-CSM1-1-m、CMCC-CM、GFDL-ESM2M及NorESM1-ME这四个模式集合平均的2006—2099年的全球及半球尺度的加权年平均地面气温异常的时间序列。(a)~(g)分别代表全球、北半球、南半球、北半球陆地、南半球陆地、北半球海洋和南半球海洋。

0.21(0.42)和 $0.14(0.30)^\circ\text{C}\cdot\text{decade}^{-1}$ (图略)。在这两个情景下,这四个模式预估的全球及半球尺度年平均地面气温异常的趋势值明显小于其他12个模式以及前人未经模式筛选的集合平均结果[19]。另外,这两个情景下四个模式集合平均的全球平均地面气温到达 2°C 升温阈值的时间为2063年和2053年,该时间晚于未经过模式筛选的结果(分别为2047年和2038年)[19]。半球尺度的结果与全球尺度类似。

3.3. 讨论

CMIP5模式可以较好地模拟地面气温异常的长期趋势[2],但在地面气温异常多年代际的变化特征的模拟中,模式的模拟性能又各不相同。从图5中可以看到,FGOALS-g2模式、FIO-ESM模式、GFDL-CM2p1模式、GISS-E2-R-CC模式、INMCM4模式以及MPI-ESM-LR模式无法较好地再现地面气温异常的多年代际的变化特

征[图5(a)~(g)]。这些模式模拟的1945—1970年的增暖趋势值较同期全球和半球的实际均值要高,意味着这些模式高估了该阶段的增暖趋势。此外,在1900—1944年和1945—1970年间,各半球年平均地面气温异常的趋势值相差不大(约 $0.06^\circ\text{C}\cdot\text{decade}^{-1}$),并且很接近全球长期平均值,该结果表明地面气温的线性增加可能是源于模式对由人类活动引起的温室气体增加的线性响应,这也进一步暗示了这些模式可能不足以很好地模拟出对地面气温多年代际变化有重要调节作用的气候内部变率[4,20—22]。这个结果表明这些模式对气候内部变率的模拟能力尚待提高。

4. 小结

本文基于CMIP5模式对全球平均地面气温异常的时间变率、长期趋势、多年代际变化及趋势的模拟能力,

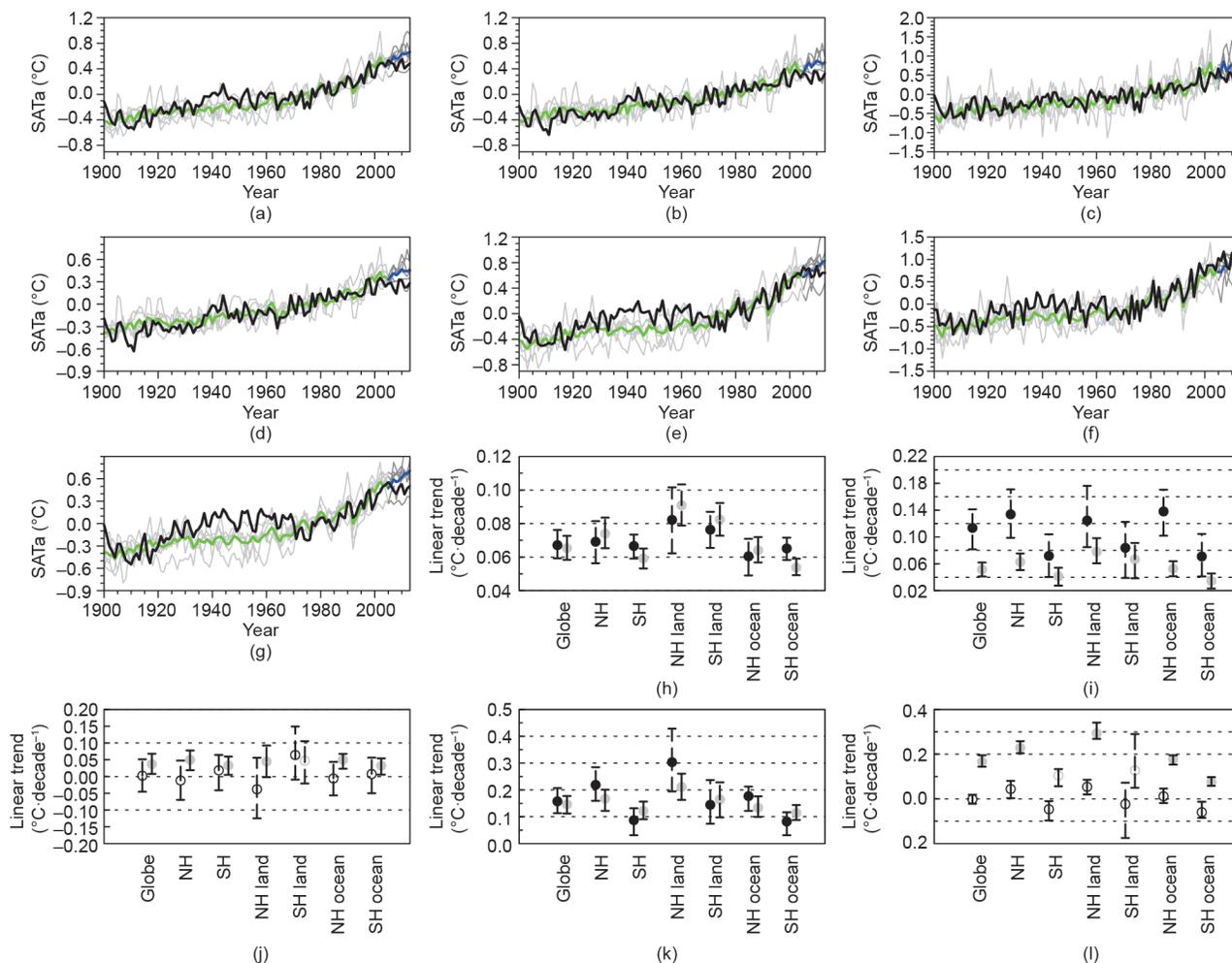


图5. 与图2类似, 但为FGOALS-g2模式、FIO-ESM模式、GFDL-CM2p1模式、GISS-E2-R-CC模式、INMCM4模式以及MPI-ESM-LR模式1900—2013年的模拟结果。图中的灰色和蓝色实线分别代表RCP4.5情景下这6个模式和它们的集合平均结果。(a)~(g)分别代表全球、北半球、南半球、北半球陆地、南半球陆地、北半球海洋和南半球海洋; (h)~(l)分别为1900—2005年、1900—1944年、1945—1970年、1971—2000年及2001—2013年。

尝试筛选了15个模拟性能相对较好的模式, 并根据这些模式进一步评估分析了全球及半球尺度年平均地面气温异常的多年代际趋势及其未来情景预估。

观测结果表明, 北半球陆地、北半球海洋和南半球海洋的地面气温异常与全球平均具有相似的多年代际变化特征, 而南半球陆地则不同, 其地面气温在1945—1970年期间呈现增暖特征。在历史模拟阶段, 这些模式不仅对半球尺度的多年代际增暖趋势有一定的模拟能力[11], 并能够较好地再现北半球陆地、北半球海洋及南半球海洋在1945—1970年期间地面气温的增暖停滞特征。但是对于1945—1970年间南半球陆地的增暖趋势, 模式未能很好地模拟。此外, 尽管这些模式能够模拟出1900—1944年南、北半球海洋的增暖趋势, 但却低估了趋势值, 并最终低估了对南半球、北半球及全球平均的长期增暖趋势值。

在RCP4.5和RCP8.5情景下, 地面气温异常在最近

一次增暖停滞阶段(2001—2013年)的趋势值被用来进一步评估模式的预估能力。BCC-CSM1-1-m模式、CMCC-CM模式、GFDL-ESM2M模式及NorESM1-ME模式预估的该阶段全球及半球尺度的地面气温异常趋势值最接近观测值, 表明了它们较好的预估能力。基于模式对地面气温异常的多年代际趋势值(尤其是近期的增暖停滞阶段)的模拟性能, 我们选择了这四个模式在RCP4.5和RCP8.5情景下的模拟结果用来预估2006—2099年的地面气温异常变化特征。在这两个情景中, 预估全球及半球尺度的未来地面气温都呈现出增暖的特征, 但RCP8.5情景下预估的增暖速率较RCP4.5更大。这四个模式集合平均的趋势值明显小于未经过模式筛选的CMIP5模式集合的结果, 并且2°C升温阈值出现时间也较晚[19]。

此外, 我们发现有一些模式只能模拟出20世纪以来全球及半球尺度地面气温的线性增暖趋势, 而不能再现其多年代际变化的特征, 这意味着这些模式对于调制地

面气温多年代际变化的气候内部变率方面的模拟能力尚需改进和提高。

致谢

本研究由科技部国家重点研发计划项目(2016YFA0601801)、国家自然科学基金(41530424)、国家海洋局全球变化与海气相互作用专项(GASI-IPOV-AI-03)和国家自然科学基金(41305121)共同资助。我们诚挚感谢两位匿名审稿人对本文建设性的建议和意见。

Compliance with ethics guidelines

Nan Xing, Jianping Li, and Lanning Wang declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

References

- [1] Alley RB, Berntsen T, Bindoff NL, Chen Z, Chidthaisong A, Friedlingstein P, et al. Summary for policymakers. In: Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, et al., editors *Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. New York: Cambridge University Press; 2007. p. 1–18.
- [2] Stocker TF, Qin D, Plattner GK, Tignor MMB, Allen SK, Boschung J, et al., editors. *Climate change 2013: the physical science basis. Working Group I contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. New York: Cambridge University Press; 2013.
- [3] Knight J, Kennedy J, Folland C, Harris G, Jones GS, Palmer M, et al. Do global temperature trends over the last decade falsify climate predictions? *B Am Meteorol Soc* 2009;90(8):S22–3.
- [4] Li J, Sun C, Jin FF. NAO implicated as a predictor of Northern Hemisphere mean temperature multidecadal variability. *Geophys Res Lett* 2013;40(20):5497–502.
- [5] Morice CP, Kennedy JJ, Rayner NA, Jones PD. Quantifying uncertainties in global and regional temperature change using an ensemble of observational estimates: the HadCRUT4 data set. *J Geophys Res* 2012;117(D8):D08101.
- [6] Dai A. Increasing drought under global warming in observations and models. *Nat Clim Chang* 2013;3(1):52–8.
- [7] Ding Y, Ren G, Zhao Z, Xu Y, Luo Y, Li Q, et al. Detection, causes and projection of climate change over China: an overview of recent progress. *Adv Atmos Sci* 2007;24(6):954–71.
- [8] Zhou T, Yu R. Twentieth-century surface air temperature over China and the globe simulated by coupled climate models. *J Climate* 2006;19(22):5843–58.
- [9] Stott PA, Tett SF, Jones GS, Allen MR, Mitchell JF, Jenkins GJ. External control of 20th century temperature by natural and anthropogenic forcings. *Science* 2000;290(5499):2133–7.
- [10] Knutson TR, Zeng F, Wittenberg AT. Multimodel assessment of regional surface temperature trends: CMIP3 and CMIP5 twentieth-century simulations. *J Climate* 2013;26(22):8709–43.
- [11] Jones GS, Stott PA, Christidis N. Attribution of observed historical near-surface temperature variations to anthropogenic and natural causes using CMIP5 simulations. *J Geophys Res* 2013;118(10):4001–24.
- [12] Shukla J, DeSole T, Fennessy M, Kinter J, Paolino D. Climate model fidelity and projections of climate change. *Geophys Res Lett* 2006;33(7):L07702.
- [13] Taylor KE, Stouffer RJ, Meehl GA. An overview of CMIP5 and the experiment design. *B Am Meteorol Soc* 2012;93(4):485–98.
- [14] Meinshausen M, Smith SJ, Calvin K, Daniel JS, Kainuma MLT, Lamarque JF, et al. The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climatic Change* 2011;109(1–2):213–41.
- [15] Sen PK. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *J Am Stat Assoc* 1968;63(324):1379–89.
- [16] Mann ME. On smoothing potentially non-stationary climate time series. *Geophys Res Lett* 2004;31(7):L07214.
- [17] Vial J, Dufresne JL, Bony S. On the interpretation of inter-model spread in CMIP5 climate sensitivity estimates. *Clim Dynam* 2013;41(11–12):3339–62.
- [18] Kosaka Y, Xie SP. Recent global-warming hiatus tied to equatorial Pacific surface cooling. *Nature* 2013;501(7467):403–7.
- [19] Zhang L, Ding Y, Wu T, Xin X, Zhang Y, Xu Y. 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. *Acta Meteorol Sin* 2013;71(6):1047–60. Chinese.
- [20] Mochizuki T, Ishii M, Kimoto M, Chikamoto Y, Watanabe M, Nozawa T, et al. Pacific decadal oscillation hindcasts relevant to near-term climate prediction. *Proc Natl Acad Sci USA* 2010;107(5):1833–7.
- [21] Meehl GA, Arblaster JM, Fasullo JT, Hu A, Trenberth KE. Model-based evidence of deep-ocean heat uptake during surface-temperature hiatus periods. *Nat Clim Chang* 2011;1(7):360–4.
- [22] Sun C, Li J, Jin FF. A delayed oscillator model for the quasi-periodic multidecadal variability of the NAO. *Clim Dynam* 2015;45(7–8):2083–99.