CMIP5气候模式模拟的1850~2014年全球温度变化的集合经验模态分解

魏萌^{①②③}, 乔方利^{①②③*}

① 国家海洋局第一海洋研究所, 青岛 266061;

② 青岛海洋科学与技术国家实验室区域海洋动力学与数值模拟功能实验室, 青岛 266237;

③ 海洋环境科学和数值模拟国家海洋局重点实验室, 青岛 266061

* 通讯作者, E-mail: qiaofl@fio.org.cn

收稿日期: 2016-05-12; 接受日期: 2016-08-10; 网络版发表日期: 2016-10-25

国家自然科学基金委员会-山东省人民政府联合资助海洋科学研究中心项目(批准号: U1406404)资助

摘要 第五次耦合模式比较计划(CMIP5)集合了全球众多高水平气候模式, 代表了目前气候模拟和预测的最高水平, 然而这些模式均未能正确模拟出近期的全球增暖减缓现象, 所模拟的温度严重偏高. 基于HadCRUT4观测资料和CMIP5气候模式数据, 使用集合经验模态分解(EEMD)方法, 分析了1850~2014年全球温度的低频演变特征, 评价了33个模式对其模拟结果, 并探讨了模式对近年来全球增暖减缓模拟失败的原因. 结果显示, 受长期增暖趋势和年代际振荡的主导, 1850~2014年全球平均表面温度(GMST)的长期变化呈现出冷暖相间、波动增暖的特点. 长期增暖趋势自20世纪以来一直较为稳定, 近50年的平均增暖速度为 $0.0883^{\circ}\text{C}/\text{decade}$; 年代际振荡的平均周期为65年, 在1850~2014年出现了2.5个波动, 随时间推移, 波动有加深变陡的趋势. 20世纪后期的增暖加速现象是稳定的长期增暖趋势与年代际振荡的暖位相相叠加的结果, 二者各贡献了1975~1998年全球温度增加的1/3. 近期年代际振荡逐渐接近第3个波的峰值, 增暖速度迅速减慢, 受其影响全球温度的增暖步调也明显放缓, 出现增暖减缓现象. 在1850~2005年的历史试验期间, CMIP5气候模式对GMST的模拟结果与HadCRUT4观测较为接近, 对20世纪后期的全球增暖加速现象模拟的尤为出色. 但在RCP4.5情景下对2006~2014年的温度均值和线性趋势的预估严重偏高. 这是由于CMIP5模式未能正确区分全球温度演变过程中的长期趋势和年代际变化, 所模拟的长期趋势偏高、偏快, 年代际信号位相混乱且振幅偏小. 这说明大气 CO_2 对气候的增暖效应可能被高估, 而气候系统的年代际自然变化则被低估, 这些偏差与目前对气候系统关键动力过程的认识不足密切相关. 这一发现将为新一代长期气候变化预测模式的发展提出新的检验标准: 气候模式应该有能力模拟全球温度变化的长期增暖趋势和周期约为65年的年代际振荡.

关键词 全球增暖减缓, 长期增暖趋势, 年代际振荡, CMIP5气候模式, EEMD方法

中文引用格式: 魏萌, 乔方利. 2016. CMIP5气候模式模拟的1850~2014年全球温度变化的集合经验模态分解. 中国科学: 地球科学, 46: 1675~1688, doi: 10.1360/N072015-00465

英文引用格式: Wei M, Qiao F L. 2016. Attribution analysis for the failure of CMIP5 climate models to simulate the recent global warming hiatus. Science China Earth Sciences, doi: 10.1007/s11430-015-5465-y

1 引言

全球增暖已成为21世纪人类面临的最严峻的环境问题之一. 根据IPCC第5次评估报告(2013), 1880~2012年, 全球平均表面温度升高了0.85℃. 全球增暖不仅会引起海平面上升、物种灭绝等长期缓慢的变化, 还会导致洪涝干旱、极端高温及热带气旋等短时强极端天气事件频发, 直接威胁人类的生命财产安全. 因此, 全球增暖已超出气候科学的范畴, 引起了各国政府和普通大众的广泛关注. IPCC AR5(2013)明确指出, 人类排放CO₂所引起的温室气体增加“极有可能”(可能性为95~100%)是导致20世纪中期以来全球平均温度迅速上升的最主要的原因, 并预测: 温室气体的继续排放将会造成进一步的增暖. 然而, 20世纪末至今, 虽然大气中温室气体浓度持续升高, 其中, 大气CO₂浓度由1998年的~366ppm升至2015年的~400ppm(http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html#global_data), 但是全球温度却并没有如预期般随温室气体浓度的快速增加而迅速升高, 反而进入一个平台期, 出现了增暖减缓现象. Easterling和Wehner(2009)首先注意到此现象, 他们指出虽然1998~2008年的温度高于长期平均值, 但温度序列却没有表现出明显的增暖趋势; 随后, Knight等(2009)计算得出全球平均表面温度序列在1999~2008年的线性趋势为(0.07±0.07)℃/decade, 这远低于1979~2005年的0.18℃/decade和IPCC AR4(2007)预估的0.2℃/decade, 从而确认了全球增暖减速的存在性. 之后几年, 该现象迅速成为全球气候学家们的关注焦点. 2011年, Meehl等首次提出了“Hiatus”这个词, 他们计算了全球平均温度时间序列10年滑动线性趋势, 定义趋势绝对值很小的10年为“增暖停滞期”. 此后“Hiatus”超出了Meehl等(2011)的定义, 用来泛指全球增暖减缓(或停滞)现象. 2013年, IPCC AR5承认了Hiatus现象的存在, 进一步提升了该现象的研究热度.

与全球表面温度近期的变化趋势相对应, 一些关键气候变量也表现出Hiatus现象: 上层海洋热含量打破了以往的长期增暖趋势, 在2003~2010年间几乎没有增加(Levitus等, 2009; Katsman和van Oldenborgh, 2011); 全球平均海平面高度的上升速度在2003~2011年比20世纪90年代降低了30%(Cazenave等, 2014); 热带对流层上层气温在1997~2011年增暖明显减速(Kamae等, 2015); 南极海冰的面积近年来也有所增加(Cavalieri和

Parkinson, 2008; Parkinson和Cavalieri, 2012). 这些现象的出现挑战了现有的对全球温度变化的解释机制, 使人们开始怀疑“人类活动引起全球增暖”的真实性, 引起了气候学家们的高度关注和热烈讨论, 他们提出了各种过程来解释这种出人意料的现象. 按进入气候系统的能量是否减少, 主要可分为以下两类: 一类观点认为进入气候系统的能量近期有所减少, 并直接导致了全球增暖减缓(Hansen等, 2011). 太阳活动减弱(Lean和Rind, 2009; Stauning, 2014)、平流层水汽浓度减小(Solomon等, 2010)、平流层“背景”气溶胶浓度增加(Solomon等, 2011)、火山爆发引起平流层气溶胶浓度增加(Hansen等, 2011; Haywood等, 2014; Neely等, 2013; Santer等, 2014)和人为硫排放导致对流层气溶胶浓度增加(Kaufmann等, 2011)等因素都可引起负辐射强迫, 减少进入气候系统的能量, 使地球系统增暖减缓. 另一类观点则认为进入气候系统的能量并没有明显减少, 只是在气候系统内部进行了再分配. 在全球增暖减缓时期, 海洋热含量依然在持续增加, 只是有更多能量从上层海洋转移到了深海, 导致上层海洋和大气增暖减缓(Katsman和van Oldenborgh, 2011; Meehl等, 2011, 2013; Loeb等, 2012; Balmaseda等, 2013; Guemas等, 2013). 这种能量再分配过程通常需要借助海洋垂直环流或垂直混合的变化来实现, 这些变化又往往伴随着气候系统的自然变异, 如厄尔尼诺-南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)(Loeb等, 2012; Kosaka和Xie, 2013; Banholzer和Donner, 2014)、太平洋海温年代际振荡(Pacific Decadal Oscillation, PDO)(Meehl等, 2011, 2013; Trenberth和Fasullo, 2013; Brown等, 2014; England等, 2014)、北大西洋年代际振荡(Atlantic Multi-decadal Oscillation, AMO)(Zhang和Delworth, 2007; Wu等, 2011; Meehl等, 2013; Tung和Zhou, 2013; Chen和Tung, 2014; McGregor等, 2014)、深海环流变化(Latif等, 2013)及其他海洋动力过程等(Watanabe等, 2013; Lee等, 2015; Roemmich等, 2015). 以上机制都可能引起全球表面温度增速减缓, 但至今无一得到广泛认同.

近期, 部分学者将增暖减缓现象与气候系统多年代际变化联系起来. Wu等(2007)指出全球温度变化的长期趋势(secular trend)为单调增暖, 而短期的局地趋势(local trend)却表现出多年代际变化, 周期在50~80年, 均值稍长于65年, 这与Schlesinger和Ramankutty(1994)利用奇异谱分析识别出的65~70年的周期一致. Ting等

(2009)指出20世纪北大西洋海表面温度的长期变化受到人类强迫的增暖趋势与年代际自然振荡的共同影响. Wu等(2011)进一步分析了全球温度演变的长期趋势和年代际振荡的时间变化与空间格局, 指出长期增暖趋势是温室气体排放的结果, 1980年至今的增暖速度稳定在 $0.08^{\circ}\text{C}/\text{decade}$ 左右; 而年代际振荡则与北大西洋热盐环流的低频变化有关, 20世纪后期的增暖加速有1/3源于自然变化. Tung和Zhou(2013)分析了英国中部长达353年的气温数据——这是目前人类器测气温的最长时间序列, 得到了类似的结果: 长期趋势自1910年起一直稳定在 $0.07\sim 0.08^{\circ}\text{C}/\text{decade}$; 年代际振荡是一种与AMO有关的气候系统的内部变化, 全球温度演变过程中反复出现的冷暖交替现象(包括20世纪后期的增暖加速现象和近年来出现的增暖减缓现象)只是其外在表现, 在观测到的近50年的增暖中年代际变化的贡献达40%. 上述研究表明, 温度的年代际振荡很可能是具有可预报性的气候系统内部的周期性变化, 对气候系统的长期变化具有较好的指示意义. 然而前人通常将代表年代际振荡不同位相的冷暖交替现象看作非周期性的独立事件, 忽视了气候系统内部变化在全球温度演变过程中所扮演的重要角色. 这种对全球温度变化机制理解的不完善, 反映到气候模式中, 可能会影响模式的模拟和预测能力.

气候模式是研究气候变化机制、预测未来气候变化的核心工具. 第五次耦合模式比较计划(Coupled Model Inter-comparison Project Phase 5, CMIP5)集合了当今国际上最先进的模式, 但这些模式对AMO、PDO等周期为几十年的年代际自然振荡的模拟依然有不尽人意之处. Kim等(2012)评估了7个CMIP5耦合模式年代预测试验的结果, 指出大部分模式都高估了1960~2010年的全球平均表面温度的增暖趋势, 且对PDO指数的预报效果较差. Kumar等(2013)评估了22个CMIP5模式长期试验对北美“暖化缺口”或“暖化空洞”(warming hole)的模拟能力, 指出大多数CMIP5模式模拟的AMO都偏弱, 影响了对北美暖化缺口的模拟能力. Kavvada等(2013)、Ruiz-Barradas等(2013)和Sheffield等(2013)注意到, CMIP5气候模式的历史试验

低估了AMO的周期和振幅, 对AMO的位相演变及其对周边区域气候的影响的模拟结果也不理想. 然而, 气候模式不能很好地模拟年代际变化这个问题并没有引起足够的重视. 近期Hawkins (2012)¹⁾首先指出CMIP5模式对全球温度的预估严重偏离观测. 随后, Fyfe等(2013)、Scafetta(2013)和Schmidt等(2014)也注意到CMIP5气候模式高估了近期全球平均温度的增暖速度. 本文针对该现象, 对比分析了观测和模式中全球温度的低频演变特征, 讨论了模式未能模拟出近期全增暖减缓现象的原因.

2 数据与方法

观测资料为来自英国气象局哈德莱中心(<http://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadcrut4/>)的HadCRUT4全球表面温度数据集, 该数据集由CRUTEM4陆表面气温数据和HadSST3海表面温度数据整合而成(Morice等, 2012). 本文使用了HadCRUT.4.4.0.0版本的全球平均表面温度(Global-Mean Surface Temperature Anomaly, *GMST*)距平(*GMST* Anomalies, *GMSTA*)时间序列, 温度距平的参考值为1961~1990年的气候态平均值. 资料时间范围为1850~2014年(共165年), 资料的时间分辨率为1年.

模式数据来源于CMIP5(<http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/>). 按照CMIP5数值模拟和预估的统一要求(Taylor等, 2012), CMIP5计划分为长期试验(百年尺度)和短期试验(10~30年, 也称为年代预测试验). 为了与长达165年的观测资料进行对比, 本文选用长期试验结果. 长期试验分为历史气候模拟试验和未来情景预估试验(future projections). 历史试验的积分时段为1850~2005年, 之后开展4种不同典型浓度路径(Representative Concentration Pathways, RCPs)的未来情景试验, 即RCP8.5、RCP6.0、RCP4.5和RCP2.6. 2020年之前, 4种情景预估的全球表面温度极为相似(IPCC, 2013), 本文选择了比较接近实际排放情况的RCP4.5情景. 在参与CMIP5的所有气候模式中选出包含变量“近表面气温”且覆盖观测时段(1850~2014年)

1) Ed Hawkins. 2013. 04. 10. On comparing models and observations. (<http://www.climate-lab-book.ac.uk/2012/on-comparing-models-and-observations/>)

的候模式, 符合条件的共有33个, 其基本信息见表1. 本文主要关注模式间的差异, 因此每个模式统一选用了成员r1i1p1. 选取的时间范围为1850年1月至2050年12月. 33个模式的时间分辨率都为1个月, 水平分辨率各有不同. 为与观测资料一致, 以1961~1990年为参考

时段, 计算模式数据的温度距平值, 并取全球平均和年平均, 得到1850~2050年模拟的年平均GMSTA序列. 本文所有的温度值都是指相对于1960~1990年气候态平均的距平值.

要认识和预测长期温度变化, 关键是要正确区分

表1 33个CMIP5气候模式的基本信息

模式序号	模式名称	水平网格数	研发机构和国家
01	ACCESS1-0	145×192	CSIRO, BOM, 澳大利亚
02	ACCESS1-3	145×192	CSIRO, BOM, 澳大利亚
03	BCC-CSM1-1-m	160×320	BCC, 中国
04	BCC-CSM1-1	64×128	BCC, 中国
05	BNU-ESM	64×128	BNU, 中国
06	CanESM2	64×128	CCCMA, 加拿大
07	CCSM4	192×288	NCAR, 美国
08	CESM1-BGC	192×288	NSF, DOE, NCAR, 美国
09	CESM1-CAM5	192×288	NSF, DOE, NCAR, 美国
10	CMCC-CM	240×480	CMCC, 意大利
11	CMCC-CMS	96×192	CMCC, 意大利
12	CNRM-CM5	128×256	CNRM, CERFACS, 法国
13	CSIRO-Mk3-6-0	96×192	CSIRO, QCCCE, 澳大利亚
14	EC-EARTH	160×320	ICHEC, 爱尔兰
15	FGOALS-g2	60×128	IAP, THU, 中国
16	FGOALS-s2	108×128	IAP, 中国
17	FIO-ESM	64×128	FIO, 中国
18	GISS-E2-H-CC	90×144	NASA/GISS, 美国
19	GISS-E2-H	90×144	NASA/GISS, 美国
20	GISS-E2-R-CC	90×144	NASA/GISS, 美国
21	GISS-E2-R	90×144	NASA/GISS, 美国
22	INM-CM4	120×180	INM, 俄罗斯
23	IPSL-CM5A-LR	96×96	IPSL, 法国
24	IPSL-CM5A-MR	143×144	IPSL, 法国
25	IPSL-CM5B-LR	96×96	IPSL, 法国
26	MIROC-ESM-CHEM	64×128	JAMSTEC, AORI, NIES, 日本
27	MIROC-ESM	64×128	JAMSTEC, AORI, NIES, 日本
28	MIROC5	128×256	AORI, NIES, JAMSTEC, 日本
29	MPI-ESM-LR	96×192	MPI-M, 德国
30	MPI-ESM-MR	96×192	MPI-M, 德国
31	MRI-CGCM3	160×320	MRI, 日本
32	NorESM1-M	96×144	NCC, 挪威
33	NorESM1-ME	96×144	NCC, 挪威

气人类活动和自然过程对全球温度变化的贡献,这就需要合理提取温度演化过程中的长期趋势和自然变率.但由于气候系统是一个复杂的、非线性的耦合系统,相关变量的时间序列一般都是非线性、非平稳的,不满足传统时间序列分析方法对数据线性和平稳性的要求,因此使用传统分析方法很难得到具有明确物理意义的结果. Huang等(1998)提出了经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)方法,该方法可将复杂的时间序列分解为少数几个窄谱波动加一个趋势项.得到的窄谱波动是一组具有不同特征尺度的时间序列,称为本征模函数(Intrinsic Mode Function, IMF);得到的趋势项是一个单调函数或仅有一个极值的函数.与Fourier变换和小波分析等传统数据分析方法相比,EMD方法从数据本身特征出发,不依赖于任何外部函数和参数,具有自适应性和局地性,可直接对非线性和非平稳的数据使用,结果直观且高效.如今EMD方法已在许多科学和工程领域得到了广泛应用.

然而,由于某些信号具有间歇性,分解时常常出现模态混合现象,即,单独一个IMF分量包含着不同尺度的信号或一种尺度的信号分布在不同的IMF分量中,导致分解出的IMF分量缺乏物理意义.为克服这个问题, Wu和Huang(2009)发展了集合经验模态分解(Ensemble Empirical Mode Decomposition, EEMD)方法.他们在目标数据序列上加入不同的白噪声时间序列,以构造一个“增噪信号”时间序列的集合.然后将集合中的每个成员序列进行EMD分解,得到各IMF分量的集合,最后求各IMF分量的集合平均值,作为各IMF分量的最终真值.增加白噪声可以使集合穷尽所有可能解,并使尺度相似的信号集中分布在同一个IMF分量中.若集合成员足够多,在取集合平均后,增加的白噪声会相互抵消,分解结果中只包含真实且具有物理意义的IMF分量.通过上述噪声辅助数据分析技术,他们有效解决了EMD的混频现象,提高了分解结果的稳定性.

本文首先分析1850~2014年HadCRUT4观测资料中全球温度的变化特点,评价CMIP5气候模式的历史试验对1850~2005年温度演化特征的模拟效果和RCP4.5情景下对2006~2014年温度变化的预估效果.然后对观测和模拟的年平均GMSTA序列分别进行EEMD分解,以提取观测和模式中的长期趋势和多年代际变化信号,并进行对比分析.最后讨论导致气候模式对近

期全球增暖减缓现象预估失败的可能原因.

3 1850~2014年HadCRUT4全球温度的变化特征及CMIP5气候模式的模拟结果

从HadCRUT4 GMSTA序列可以看出(图1),全球温度具有明显的增暖趋势,1850~2014年的线性增暖趋势为 $0.0479^{\circ}\text{C}/\text{decade}$.但全球温度的演变过程并不是持续的、均匀的单调增暖,而是呈现出冷暖相间、波动上升的特点.从温度变化曲线中可明显辨识出3次增暖过程和2次变冷过程,3暖2冷交替出现,组成了2.5个低频波动,其中前2个波动是完整的,既有升温过程(暖位相)又有降温过程(冷位相),最后1个波动目前仅出现了暖位相.根据GMSTA 10年滑动平均序列的最大值和最小值的位置可大致确定这2.5个低频波动冷、暖位相的时间范围(图1).这种低频波动的周期在40~70年,3个暖位相的时间范围分别为1860~1879年、1907~1941年和1972~1998年,线性增暖速度分别为 $0.0847^{\circ}\text{C}/\text{decade}$ 、 $0.1321^{\circ}\text{C}/\text{decade}$ 和 $0.1682^{\circ}\text{C}/\text{decade}$,2个冷位相的时间范围为1879~1907年和1941~1972年,对应的线性趋势为 $-0.0543^{\circ}\text{C}/\text{decade}$ 和 $-0.0251^{\circ}\text{C}/\text{decade}$.其中,第3个暖位相中包含了举世瞩目的20世纪后期全球增暖加速现象.3个暖位相的增暖速度依次增大,而2个冷位

图1 观测和模拟的年平均GMSTA时间序列($^{\circ}\text{C}$)

黑色实线为HadCRUT4观测值.灰色细竖线表示2005年的位置.1850~2005年为CMIP5的历史试验时期,这期间多模式均值、50%和90%置信区间分别用灰色点线、深灰色和浅灰色填充区域表示.2006年起众模式在RCP4.5情景下对未来温度进行预估,其多模式均值、50%和90%置信区间分别用红色点线、深红色和浅红色填充区域表示.橙色和蓝色柱状填充区域分别代表GMSTA 10年滑动平均序列的增暖和冷却阶段.大部分研究者认同近期的全球增暖减缓现象始于1998年,至今已经持续了17年,黄色柱状填充区域标出了这17年(1998~2014)的位置.

相的冷却速度则有所减小,表现出增暖加快、冷却减慢的趋势。表2给出了近165年、近100年、近50年、近25年和近10年的温度变化的线性趋势。近50年和近25年的增暖速度最快,线性趋势在 $0.15^{\circ}\text{C}/\text{decade}$ 左右,反映出20世纪末的急剧增暖;近10年的温度变化趋势非常小,反映出近期的增暖减缓。虽然HadCRUT4数据显示2005~2014年是1850年以来最暖的10年(平均温度距平为 0.4960°C),但全球温度却并没有如预期般随大气 CO_2 浓度增加而迅速升高,反而进入了一个平台期,这应该预示着第3个波动的波峰即将到来。需要注意的是,由于资料长度的限制,目前还无法确定第3个波动波峰和冷位相的准确位置,因此还不能断言全球增暖已经停止。

对于CMIP5模式数据,先分别计算出33个模式各自的GMST序列,得到一个包含着33段时间序列的集合,再求此集合的均值(Multi-Model Mean, MMM)并计算均值的90%(5~95%)和50%(25~75%)置信区间。图1中CMIP5气候模式的模拟结果显示各模式成员模拟的温度时间序列都呈波动上升态势,CMIP5 MMM给出的1850~2014年的线性趋势为 $0.0593^{\circ}\text{C}/\text{decade}$,比观测高23.80%,这是因为模式明显低估了1850~1900年的温度,又高估了20世纪90年代以来的温度。表2中,CMIP5 MMM模拟的GMST在近25年和近10年增暖最快,给出的近165年、近100年、近50年、近25年和近10年的线性趋势分别比观测高23.80%、25.17%、34.38%、91.43%和1878.57%,越来越偏离观测。

在1850~2005年的“历史试验”期间CMIP5模式的模拟结果较1850~2014年的总体结果好。从图1可见,在此期间, HadCRUT4观测序列大部分时间都包含在模式集90%置信区间以内, CMIP5 MMM给出的GMST的线性增暖速度为 $0.0504^{\circ}\text{C}/\text{decade}$,相应的观测值为 $0.0425^{\circ}\text{C}/\text{decade}$,模拟结果仅比观测值偏高18.56%。尤其在1975~1998年期间, CMIP5 MMM序列与HadCRUT4观测值基本重合,而且此时众模式间的差异也较小,可见CMIP5气候模式对20世纪末的全球增暖加速现象模拟的非常出色。但虽然模拟的GMST

序列也呈波动上升的特点,波动的位相却时常偏离观测,波动的振幅也明显比观测小,特别在波峰波谷附近差别很大。图2更为直观地呈现了各模式的模拟效果。图2a中众模式结果分布集中,说明他们的模拟结果很相似,所有模式与观测的相关系数都通过了置信度99%的显著性检验(0.2050), CMIP5 MMM与观测的相关系数高达0.8997,较CMIP3 MMM略好(Zhou和Yu, 2006);除16号以外的其他32个模式所模拟的温度标准差都在观测附近,其中30个模式的标准差都在观测值 ± 0.5 个标准差以内;除16号以外的其他32个模式的RMSE都小于1个标准差。图2b和2c显示,各模式模拟的1850~2005年期间的温度均值和线性趋势也都与观测相近:有22个模式模拟的均值与观测值的差小于 0.1°C ,有25个模式模拟的线性趋势与观测值的差小于 $0.02^{\circ}\text{C}/\text{decade}$ 。因此,总的来说, CMIP5气候模式在历史试验期间的模拟结果非常一致且都与观测接近,绝大多数模式都能成功模拟出1850~2005年的平均温度和线性趋势,只是对温度低频波动的模拟有所欠缺。

观测到的2006~2014年的温度变化可用来检验CMIP5气候模式的预估效果。图1显示,在2006~2014年模式预估的温度明显呈上升趋势,而观测温度则较为平稳。图3更为全面地呈现了众模式的预估效果。图3a中各模式结果分布稀疏,说明各模式结果差别很大,只有7个模式与HadCRUT4观测序列的相关系数通过了置信度90%的显著性检验(0.5494),有10个模式的预估结果甚至与观测呈负相关;24个模式给出的标准差大于观测值的1.5倍;31个模式的RMSE大于1倍标准差。此外,从图3b和c可看出,绝大多数模式预估的近9年温度的均值和线性趋势都过高:只有4个模式(13、25、15和32号)预估的均值与观测值的差小于 0.1°C ,只有2个模式(20号和4号)预估的趋势值与观测值的差在 $0.02^{\circ}\text{C}/\text{decade}$ 以下,而且预估均值较好的4个模式和预估线性趋势较好的2个模式不重合。再考虑到各模式预估序列与观测的相关性、标准差及RMSE,可认为所有CMIP5模式成员均未能正确预估出近年来的全球增暖减缓现象。CMIP5 MMM在这期间的平均温度

表2 HadCRUT4观测和CMIP5 MMM模拟的GMST时间序列不同时段线性趋势

线性趋势($^{\circ}\text{C}/\text{decade}$)	1850~2014	1915~2014	1965~2014	1990~2014	2005~2014
HadCRUT4	0.0479	0.0739	0.1530	0.1459	0.0112
CMIP5 MMM	0.0593	0.0925	0.2056	0.2793	0.2216

距平为 0.7175°C , 而观测距平值仅为 0.4907°C , 预估比观测高46.22%, CMIP5 MMM给出的近9年线性趋势为 $0.2424^{\circ}\text{C/decade}$, 这意味着2006~2014年全球温度将继续以20世纪末的增温速度快速上升; 而相应的观测值却仅为 $0.0553^{\circ}\text{C/decade}$, 说明实际上2006~2014年全球温度上升非常缓慢, 可见多模式均值的预估效果也不佳. 为与历史试验的结果(图2)保持一致, 图3中仍使用了年平均数据, 但考虑到只有9个数据的序列可能

不具有代表性, 我们使用了2006年1月至2014年12月的月平均数据(共108个月)来检验图3的结果. 月平均数据给出的温度均值和线性趋势与年平均结果基本相同. 月平均Taylor图与年平均Taylor图(图3a)相比, 众模式的结果更接近一些, 标准差在1~2.1, 相关系数在 $-0.3\sim 0.4$, RMSE在1~2, 总体预估效果较年平均略好, 但依然没有一个模式能够给出既与观测相关性较高、又与观测的均值和线性趋势相近的预报结果.

图2 CMIP5气候模式历史实验对1850~2005年GMST的模拟效果

(a) Taylor图, 极坐标中某个点的半径代表观测或模拟的温度序列的标准差(黑色虚线), 方位角代表与观测温度序列的相关系数(灰色实线), 距HadCRUT4观测点的距离代表模式的均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE, 灰色点线), 其中, 标准差和RMSE都经过了标准化, 单位为1个观测标准差; (b) 1850~2005年观测和模拟的平均温度, 两条灰色虚线分别代表观测值 $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ 的位置; (c) 1850~2005年观测和模拟的线性趋势, 两条灰色虚线分别代表观测值 $\pm 0.02^{\circ}\text{C/decade}$ 的位置.

图3 CMIP5模式在RCP4.5情景下对2006~2014年GMST的预估效果

(a) Taylor图; (b) 2006~2014年的平均温度; (c) 2006~2014年的线性趋势

4 CMIP5气候模式对近期全球增暖减缓预估失败归因分析

考虑到在历史试验阶段,众模式均成功模拟出了全球温度的增暖趋势和20世纪末的增暖加速现象,却未能模拟好2.5个低频波动,特别在波峰波谷前后与观测差别很大.而从观测数据来看,近年来的增暖减缓现象正位于第3个波动的波峰附近.结合前述CMIP5对PDO和AMO等年代际气候变化模拟效果的不理想,我们猜想CMIP5气候模式对近期全球增暖减缓预估失败很可能与对这种低频波动的模拟能力不佳有关.为提取观测资料中的低频波动并研究其演化特点,将HadCRUT4 *GMSTA*序列进行EEMD分解,得到4个IMF分量和1个长期趋势项(图4a).对4个IMF分量做置信度99%的显著性检验(图4b),只有IMF4是统计显著的. IMF4即为所寻找的低频波动——年代际振荡项(Multi-Decadal Variability, MDV),其平均周期为65年.为探讨长期趋势和年代际振荡在全球平均温度演化过程中的作用,图5比较了原始*GMSTA*观测序列、长

期趋势项、年代际振荡项及长期趋势与年代际振荡的叠加序列.

年代际振荡项前2个波动的峰谷值分别为: 0.0695、-0.0915、0.1039和-0.1251 $^{\circ}\text{C}$,峰谷值之间平均温度变化速度分别为: 0.0392、-0.0501、0.0574、-0.0693和0.0619 $^{\circ}\text{C}/\text{decade}$.可见随时间推移,波动振幅有增大趋势,温度变化速度有加快趋势,使年代际波动加深变陡.上文分析显示,原始序列的年代际变化呈现出增暖加快、变冷减慢的趋势,这与此处年代际振荡加深变陡的特征并不矛盾.因为原始序列的年代际变化包含了长期增暖趋势,加快了年代际振荡的增暖速度,减慢了年代际振荡的冷却速度.图5中的长期趋势(蓝色曲线)是本征的、随时间变化的(Wu等, 2007).从趋势项中可以看出,19世纪中期到20世纪初全球温度增长较慢甚至略有变冷,进入20世纪以后,全球温度增速加快,且基本呈线性上升,增暖速度在0.05~0.1 $^{\circ}\text{C}/\text{decade}$.近50年(1965~2014年)全球温度增长的平均值为0.0883 $^{\circ}\text{C}/\text{decade}$,与Wu等(2011)和Tung和Zhou(2013)的结果一致.图5中年代际振荡

图4 观测和模拟的年平均*GMSTA*序列的EEMD分解结果和显著性检验.

(a)和(b) HadCRUT4 *GMSTA*序列的分解结果与显著性检验; (c)和(d) CMIP5 MMM *GMSTA*序列的分解结果和显著性检验

图5 HadCRUT4观测序列的多年代际振荡项(MDV)、趋势项、多年代际振荡与趋势项的叠加序列以及原始GMSTA序列

项与长期趋势项的叠加序列(紫色曲线)表现出了原始GMSTA序列最主要的低频演变特征. 叠加序列的方差占原始GMSTA序列方差的87.40%, 这说明叠加序列包含了原始序列中绝大部分信息, 长期增暖趋势和多年代际振荡在全球温度的长期演变过程中起到了主导作用. 长期趋势给出了多年代际振荡的平衡位置, 多年代际振荡的加入使温度序列出现冷暖位相, 二者共同作用使全球温度变化呈现出波动增暖的特点, 长期增暖趋势和多年代际变化分别对应“增暖”和“波动”.

20世纪后期, 全球温度出现了前所未有的上升, 1998年的温度比1975年升高了 0.6820°C . 1975~1998年, 长期趋势的增暖速度较为稳定, 平均值为 $0.0906^{\circ}\text{C/decade}$, 多年代际振荡正处于暖位相, 增暖速度持续加快, 从 $0.0115^{\circ}\text{C/decade}$ 增加到 $0.0858^{\circ}\text{C/decade}$, 平均值为 $0.0774^{\circ}\text{C/decade}$. 在此期间, 长期趋势的增量为 0.2097°C (占观测增量的30.75%), 多年代际振荡的增量为 0.1847°C (占观测增量的27.08%), 可见二者贡献相当, 全球平均温度的迅速上升是稳定的长期增暖趋势与多年代际振荡的暖位相相叠加的结果. Wu等(2011)指出全球温度的长期增暖趋势是人类排放温室气体的结果, 而多年代际振荡是一种自然变化. 结合上述分析, 我们认为人类排放温室气体对全球增暖加速的贡献与多年代际自然变化相当, 它们各自贡献了1975~1998年温度增长的1/3, 这与前述的IPCC的观点不同. 以其为代表的许多研究都认为人类排放温室气体浓度的增加是导致20世纪中期以来全球平

均温度迅速上升的最主要的原因, 全球温度会随温室气体浓度的增加而加速或维持. 然而, 在接下来的1998~2014年间, 全球温度仅上升了 0.0310°C , 出现了增暖减缓现象. 在这期间, 长期增暖趋势依然非常稳定, 平均增暖速度为 $0.0982^{\circ}\text{C/decade}$, 17年的增量为 0.1571°C . 而多年代际振荡逐渐接近峰值, 增暖速度从 $0.0858^{\circ}\text{C/decade}$ 迅速放慢到了 $0.0172^{\circ}\text{C/decade}$, 平均值为 $0.0454^{\circ}\text{C/decade}$, 17年的增量仅为 0.0686°C , 明显与增暖加速时期不同. 显然, 增暖减缓现象主要受到多年代际振荡的影响. 此外, 周期为20年的年代际振荡(即图4a中的IMF3)对近十几年的温度变化也起到一定的作用(Wei等, 2015).

基于以上分析, 全球温度的低频演变受长期增暖趋势和多年代际振荡的主导. 20世纪末的增暖加速现象实为稳定的长期增暖趋势与多年代际振荡暖位相叠加的结果, 二者各贡献了1975~1998年间GMST增暖的三分之一, 而近期的增暖减缓现象则主要受多年代际变化的影响.

同样地, 对CMIP5中33个模式在1850~2014年的GMSTA序列进行EEMD分解, 每个模拟的GMSTA序列也都可以分解为4个IMF分量和1个趋势项. 图4给出了CMIP5 MMM的分解结果和置信度为99%的显著性检验. 与HadCRUT4观测不同, IMF2、IMF3和IMF4都通过了信度检验. 由前面对观测资料的分析可知, 全球温度的低频演化过程可简化为长期增暖趋势下的多年代际变化, 因此, 以下将着重对比分析模拟和观测的长期趋势项与多年代际振荡项.

图6a给出了HadCRUT4和众模式GMSTA序列EEMD分解得到的长期趋势项. 可以看出, 众模式给出的长期趋势较一致, 就CMIP5 MMM来说, 在20世纪以前模拟结果较观测值偏低, 20世纪初至70年代中期与观测基本重合, 之后模拟的趋势开始高于观测值, 进入21世纪后越发偏离观测. 这是因为观测的趋势接近于线性变化, 从20世纪初期至今一直稳定在 $0.05\sim 0.10^{\circ}\text{C/decade}$, 而模拟的趋势是持续加速的, 20世纪70年代末就超过了 $0.1^{\circ}\text{C/decade}$, 进入21世纪后已超过 $0.15^{\circ}\text{C/decade}$, 近50年(1965~2014年)的平均值达 $0.1212^{\circ}\text{C/decade}$, 较观测高37.26%, 并在继续加速.

图6b中, 各模式给出的多年代际振荡差别很大, 周期位相各异, 振幅也不尽相同. CMIP5 MMM模拟的前

图6 观测和模拟的长期趋势及多年代际振荡序列

(a) 长期趋势; (b) 多年代际振荡; (c) 各模式模拟的多年代际振荡序列与观测的多年代际振荡序列的70年滑动相关系数; (d) 多年代际振荡的振幅, 两条灰色虚线分别代表观测值 $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ 的位置

2个波动的周期差别很大, 周期不规则, 振幅也比观测小。图6c给出了各模式模拟的多年代际变化序列和观测的多年代际变化序列的70年滑动相关系数(例如, 2014年的值指1945~2014年模拟与观测的多年代际变化序列的相关系数)。CMIP5 MMM和大部分模式与观测的相关性先随时间推移而升高, 近十几年有所降低。结合图6b可看出, 19世纪后期到20世纪中期, 模拟的多年代际振荡位相明显偏离观测, 有时甚至呈反位相, 观测的前2个峰值和第2个谷值都超出了模式集90%置信区间。从20世纪中期到20世纪末与观测较为一致, 但进入21世纪以后就开始偏离观测, 如今观测已低于模式集50%置信区间下边界。此时, 观测的多年代际振荡逐步接近第3个波动的波峰, 开始由暖位相向冷位相过渡, 增暖速度明显减慢, 而模式中并无此波峰出现, 多年代际振荡依然处于暖位相, 并迅速超过观测。图6d给出了众模式多年代际振荡项的振幅。结合图6b可知, 大部分模式的振幅都小于观测, CMIP5 MMM的振幅仅为观测的一半(49.63%)。振幅与观测差别较小(小于观测振幅1/10, $\sim 0.01^{\circ}\text{C}$)的5个模式(4号、6号、9号、23号和28号)中, 6号、23号和28号的位相都明显偏离观测, 4号和9号虽然前2个波动偏离观测的情况

相对较轻, 但近期的暖位相却远高于观测。因此没有一个模式能够成功模拟出多年代际振荡。

图7中比较了CMIP5 MMM和HadCRUT4的原始GMSTA序列、趋势项及趋势项与多年代际振荡的叠加序列。图7中, 模式的叠加序列给出了模拟的GMSTA序列“增暖波动”的演变特征, 叠加序列方差占原始序

图7 HadCRUT4观测和CMIP5 MMM模拟的趋势项、趋势项与多年代际振荡的叠加序列及原始GMSTA序列

列方差的92.70%, 这说明, 模式中长期增暖趋势和年代际振荡在全球平均温度演变过程中也起到了主导作用, 二者也分别对应着“增暖”和“波动”. 但根据上文的分析及图7中观测和模拟叠加序列的比较, 可以看出模式中存在“增暖”太快、“波动”周期不规则、位相混乱和振幅偏小等问题.

比较图7中模式与观测的叠加序列(红色和紫色曲线)可看出, 从20世纪70年代中期到20世纪末, 两条曲线非常接近, 只是模式中增暖加速出现的比观测早, 增暖幅度小于观测. 在1975~1998年期间, CMIP5模拟的长期趋势的增量为 0.2909°C , 比观测高38.72%, 模拟的长期趋势的平均增暖速度为 $0.1253^{\circ}\text{C/decade}$, 大于观测值($0.0906^{\circ}\text{C/decade}$); 模拟的年代际振荡的增量为 0.1324°C , 仅为观测的71.68%, 模拟的年代际振荡的平均增暖速度为 $0.0571^{\circ}\text{C/decade}$, 小于观测值($0.0774^{\circ}\text{C/decade}$). 观测中这个时段年代际振荡的贡献与长期趋势相当, 而模式中长期趋势的贡献大于年代际振荡的2倍. 结合图6可以看出, 因为CMIP5 MMM的长期趋势持续加速, 自70年代中期起超过观测, 并越发偏高, 这就高估了长期趋势的贡献; 而其年代际振荡在20世纪后期的波谷出现于1969年, 超前于观测(1974年), 且较观测浅, 导致在增暖加速阶段年代际振荡暖位相的贡献被低估. 高估的趋势和低估的年代际变化误差相抵, 使模式对1975~1998年期间的增暖加速现象的模拟非常出色.

在1998~2014年的增暖减缓阶段, 模拟的温度完全偏离观测. CMIP5 MMM *GMSTA*升高了 0.4012°C , 其中长期趋势贡献了 0.2421°C , 年代际振荡贡献了 0.1600°C . 二者在1998~2014年的平均增暖速度分别为 $0.1510^{\circ}\text{C/decade}$ 和 $0.1007^{\circ}\text{C/decade}$, 都远高于观测值, 且高于二者在增暖加速阶段的值. 我们在上文讨论中认为观测的增暖减缓现象主要受年代际振荡影响, 而由于模拟的年代际振荡近期仍维持暖位相, 非但没有减缓增暖, 反而进一步加快了增暖, 使本就严重偏高的趋势项更加迅速地偏离观测.

基于以上分析, CMIP5模式对近期全球增暖减缓预估失败, 主要因为未能正确模拟长期趋势和年代际振荡分量. 首先, CMIP5气候模式模拟的长期趋势是持续加速的, 自20世纪70年代末期起超过观测, 从而引入了一个虚高的趋势, 该趋势在1998~2014年的全球增暖减缓阶段进一步加快增暖, 直接导致近年来模

式严重偏离观测. 其次, 模式对年代际振荡的模拟能力较差, 模拟的年代际振荡周期不规则、位相混乱、振幅偏小. 在增暖加速阶段低估了年代际振荡, 将其贡献错误地归于长期趋势; 在增暖减缓阶段又没能给出应有的波峰, 导致本就偏高的长期趋势叠加了错误的暖位相后越发严重地偏离观测. 可见对年代际信号的准确模拟和预测是气候模式预测的关键.

5 讨论与结论

应用HadCRUT4观测资料分析了1850~2014年全球平均温度的低频演变特征, 评价了33个CMIP5气候模式的历史试验对1850~2005年温度变化特点的模拟效果和RCP4.5情景下对2006~2014年温度变化的预估效果, 讨论了模式对近期全球增暖减缓预估失败的原因, 得到以下主要结论.

基于对观测资料的分析, 全球温度的长期演变主要受长期增暖趋势和年代际振荡的主导, 长期趋势给出了年代际振荡的平衡位置, 年代际振荡的加入使温度变化出现冷暖位相, 二者共同作用使全球温度变化呈现出冷暖相间、波动上升的特点. 长期趋势自20世纪以来较为稳定, 近50年的平均增暖速度为 $0.0883^{\circ}\text{C/decade}$; 年代际振荡平均周期为65年, 自1850年以来出现了2.5个波动, 随时间推移, 波动有加深变陡的趋势. 20世纪后期, 年代际振荡第3个波动的暖位相与稳定的长期增暖趋势相叠加导致全球增暖加速, 二者各贡献了1975~1998年全球温度增加的三分之一; 近年来年代际振荡逐渐接近第3个波的峰值, 增暖速度迅速减慢, 受其影响全球温度的增暖步调也明显放缓.

在1850~2005年的历史试验期间, 33个CMIP5气候模式的模拟结果非常一致且都与观测较为接近, 绝大多数模式都能成功模拟出1850~2005年的温度均值和线性趋势, 对20世纪末全球增暖加速现象模拟的尤为出色. 然而, 虽然模拟的温度序列也都呈低频波动上升趋势, 但波动幅度却偏小, 位相也常偏离观测, 在波峰波谷附近与观测差别很大. CMIP5模式在RCP4.5情景下对2006~2014年温度变化的预估结果严重偏离观测, 33个模式均不能正确预估出近年来的全球增暖减缓现象, 预估的平均温度和线性趋势严重偏高.

CMIP5模式对近期全球增暖减缓预估失败, 主要因为未能正确模拟长期趋势与年代际振荡分量. 首

先, 模式将20世纪后期增暖加速事件的出现主要归为长期趋势的贡献, 从而引入了一个虚高且增速过快的趋势, 并在增暖减缓阶段进一步加快, 直接导致预估结果严重偏高. 其次, 模拟的多年代际振荡周期不规则、位相混乱、振幅偏小. 导致在增暖加速阶段低估了其贡献, 在增暖减缓阶段又给出了错误的暖位相, 使本就偏高的模拟结果更加迅速地偏离观测.

CMIP5模式对近期全球增暖减缓的预估失败, 反映出目前对长期趋势和多年代际变化等过程了解不足. 这提醒我们过去可能高估了温度变化对大气CO₂浓度的敏感性, 夸大了人类活动对全球气候的影响, 却忽视了气候系统自然变化过程的贡献. 对于百年尺度气候预测而言, 不能正确模拟和预测多年代际变化, 则不能得到较为准确的长期气候预测结果. 未来的30~40年, 多年代际振荡将处于冷位相(Fu等, 2011; Wei等, 2015), 若不考虑全球温度的多年代际变化, 未来预报很可能还会出现明显的高估. 因此, 需要正确分离全球温度演变过程中的内部变化和长期趋势, 进一步探索多年代际振荡等气候系统内部变化的规律. 更重要的是, 如何在模式的初始化和参数化中给予多年代际振荡等气候系统内部变化以充分考虑, 以提高气候预报的准确性. 对上述问题的研究将为构建新一代气候模式奠定科学基础.

但需要指出的是, 本文评价模式的参考观测仅选用了HadCRUT4, 没有考虑各观测数据本身的不确定性, 结果也没有得到其他观测数据的验证, 具有一定的偶然性. 另外, 由于篇幅所限, 我们仅分析了CMIP5长期试验的结果, 未评价年代预报效果. 因此, 在以后的工作中, 我们将在本文的基础上就以下3个问题作进一步的研究, 以期能够更全面的了解CMIP5气候模式对全球温度变化的模拟能力: (1) 利用多种全球温度观测数据, 验证本文结果; (2) 评价CMIP5年代预测试验结果, 并与Wei等(2015)的统计预报结果相比较; (3) 比较CMIP5与CMIP3模式对百年尺度和近期全球温度变化的模拟能力.

参考文献

Balmaseda M A, Trenberth K E, Källén E. 2013. Distinctive climate signals in reanalysis of global ocean heat content. *Geophys Res Lett*, 40: 1754–1759

- Banholzer S, Donner S. 2014. The influence of different El Niño types on global average temperature. *Geophys Res Lett*, 41: 2093–2099
- Brown P T, Li W, Li L, Ming Y. 2014. Top-of-atmosphere radiative contribution to unforced decadal global temperature variability in climate models. *Geophys Res Lett*, 41: 5175–5183
- Cavalieri D J, Parkinson C L. 2008. Antarctic sea ice variability and trends, 1979–2006. *J Geophys Res*, 113: C07004
- Cazenave A, Dieng H B, Meyssignac B, von Schuckmann K, Decharme B, Berthier E. 2014. The rate of sea-level rise. *Nat Clim Change*, 4: 358–361
- Chen X, Tung K K. 2014. Varying planetary heat sink led to global-warming slowdown and acceleration. *Science*, 345: 897–903
- Easterling D R, Wehner M F. 2009. Is the climate warming or cooling? *Geophys Res Lett*, 36: L08706
- England M H, McGregor S, Spence P, Meehl G A, Timmermann A, Cai W, Gupta A S, McPhaden M J, Purich A, Santos A. 2014. Recent intensification of wind-driven circulation in the Pacific and the ongoing warming hiatus. *Nat Clim Change*, 4: 222–227
- Fu C B, Qian C, Wu Z H. 2011. Projection of global mean surface air temperature changes in next 40 years: Uncertainties of climate models and an alternative approach. *Sci China Earth Sci*, 54: 1400–1406
- Fyfe J C, Gillett N P, Zwiers F W. 2013. Overestimated global warming over the past 20 years. *Nat Clim Change*, 3: 767–769
- Guemas V, Doblas-Reyes F J, Andreu-Burillo I, Asif M. 2013. Retrospective prediction of the global warming slowdown in the past decade. *Nat Clim Change*, 3: 649–653
- Hansen J, Sato M, Kharecha P, von Schuckmann K. 2011. Earth's energy imbalance and implications. *Atmos Chem Phys*, 11: 13421–13449
- Haywood J M, Jones A, Jones G S. 2014. The impact of volcanic eruptions in the period 2000–2013 on global mean temperature trends evaluated in the HadGEM2-ES climate model. *Atmos Sci Lett*, 15: 92–96
- Huang N E, Shen Z, Long S R, Wu M C, Shih H H, Zheng Q, Yen N C, Tung C C, Liu H H. 1998. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proc R Soc A-Math Phys Eng Sci*, 454: 903–995
- IPCC. 2007. Climate change 2007. In: Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt K B, Tignor M, Miller H L, eds. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press. 996
- IPCC. 2013. Climate change 2013. In: Stocker T F, Qin D, Plattner G K, Tignor M, Allen S K, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley P M, eds. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press. 1535

- Kamae Y, Shiogama H, Watanabe M, Ishii M, Ueda H, Kimoto M. 2015. Recent slowdown of tropical upper tropospheric warming associated with Pacific climate variability. *Geophys Res Lett*, 42: 2995–3003
- Katsman C A, van Oldenborgh G J. 2011. Tracing the upper ocean's "missing heat". *Geophys Res Lett*, 38: L14610
- Kaufmann R K, Kauppi H, Mann M L, Stock J H. 2011. Reconciling anthropogenic climate change with observed temperature 1998–2008. *Proc Natl Acad Sci USA*, 108: 11790–11793
- Kavvada A, Ruiz-Barradas A, Nigam S. 2013. AMO's structure and climate footprint in observations and IPCC AR5 climate simulations. *Clim Dyn*, 41: 1345–1364
- Kim H M, Webster P J, Curry J A. 2012. Evaluation of short-term climate change prediction in multi-model CMIP5 decadal hindcasts. *Geophys Res Lett*, 39: L10701
- Knight J R, Kennedy J J, Folland C, Harris G, Jones G S, Palmer M, Parker D, Scaife A, Stott P. 2009. Do global temperature trends over the last decade falsify climate predictions? *Bull Amer Meteorol Soc*, 90: 22–23
- Kosaka Y, Xie S P. 2013. Recent global-warming hiatus tied to equatorial Pacific surface cooling. *Nature*, 501: 403–407
- Kumar S, Kinter J, Dirmeyer P A, Pan Z, Adams J. 2013. Multi-decadal climate variability and the "Warming Hole" in North America-results from CMIP5 20th and 21st Century climate simulations. *J Clim*, 26: 3511–3527
- Latif M, Martin T, Park W. 2013. Southern ocean sector centennial climate variability and recent decadal trends. *J Clim*, 26: 7767–7782
- Lean J L, Rind D H. 2009. How will Earth's surface temperature change in future decades? *Geophys Res Lett*, 36: L15708
- Lee S K, Park W, Baringer M O, Gordon A L, Huber B, Liu Y. 2015. Pacific origin of the abrupt increase in Indian Ocean heat content during the warming hiatus. *Nat Geosci*, 8: 445–449
- Levitus S, Antonov J I, Boyer T P, Locarnini R A, Garcia H E, Mishonov A V. 2009. Global ocean heat content 1955–2008 in light of recently revealed instrumentation problems. *Geophys Res Lett*, 36: L07608
- Loeb N G, Lyman J M, Johnson G C, Allan R P, Doelling D R, Wong T, Soden B J, Stephens G L. 2012. Observed changes in top-of-the-atmosphere radiation and upper-ocean heating consistent within uncertainty. *Nat Geosci*, 5: 110–113
- McGregor S, Timmermann A, Stuecker M F, England M H, Merrifield M, Jin F F, Chikamoto Y. 2014. Recent Walker circulation strengthening and Pacific cooling amplified by Atlantic warming. *Nat Clim Change*, 4: 888–892
- Meehl G A, Arblaster J M, Fasullo J T, Hu A, Trenberth K E. 2011. Model-based evidence of deep-ocean heat uptake during surface-temperature hiatus periods. *Nat Clim Change*, 1: 360–364
- Meehl G A, Hu A, Arblaster J M, Fasullo J, Trenberth K E. 2013. Externally forced and internally generated decadal climate variability associated with the Interdecadal Pacific oscillation. *J Clim*, 26: 7298–7310
- Morice C P, Kennedy J J, Rayner N A, Jones P D. 2012. Quantifying uncertainties in global and regional temperature change using an ensemble of observational estimates: The HadCRUT4 data set. *J Geophys Res*, 117: D08101
- Neely R R, Toon O B, Solomon S, Vernier J P, Alvarez C, English J M, Rosenlof K H, Mills M J, Bardeen C G, Daniel J S, Thayer J P. 2013. Recent anthropogenic increases in SO₂ from Asia have minimal impact on stratospheric aerosol. *Geophys Res Lett*, 40: 999–1004
- Parkinson C L, Cavalieri D J. 2012. Antarctic sea ice variability and trends, 1979–2010. *Cryosphere Discuss*, 6: 931–956
- Roemmich D, Church J, Gilson J, Monselesan D, Sutton P, Wijffels S. 2015. Unabated planetary warming and its ocean structure since 2006. *Nat Clim Change*, 5: 240–245
- Ruiz-Barradas A, Nigam S, Kavvada A. 2013. The Atlantic Multi-decadal Oscillation in twentieth century climate simulations: Uneven progress from CMIP3 to CMIP5. *Clim Dyn*, 41: 3301–3315
- Santer B D, Bonfils C, Painter J F, Zelinka M D, Mears C, Solomon S, Schmidt G A, Fyfe J C, Cole J N S, Nazarenko L, Taylor K E, Wentz F J. 2014. Volcanic contribution to decadal changes in tropospheric temperature. *Nat Geosci*, 7: 185–189
- Scafetta N. 2013. Discussion on climate oscillations: CMIP5 general circulation models versus a semi-empirical harmonic model based on astronomical cycles. *Earth-Sci Rev*, 126: 321–357
- Schlesinger M E, Ramankutty N. 1994. An oscillation in the global climate system of period 65–70 years. *Nature*, 367: 723–726
- Schmidt G A, Shindell D T, Tsigaridis K. 2014. Reconciling warming trends. *Nat Geosci*, 7: 158–160
- Sheffield J, Camargo S J, Fu R, Hu Q, Jiang X, Johnson N, Karauskas K B, Kinter J, Kumar S, Langenbrunner B, Maloney E, Mariotti A, Meyerson J E, Neelin J D, Pan Z, Ruiz-Barradas A, Seager R, Serrano Y L, Sun D, Wang C, Xie S, Yu J, Zhang T, Zhao M. 2013. North American climate in CMIP5 experiments. Part II: Evaluation of 20th Century intra-seasonal to decadal variability. *J Clim*, 23: 9247–9290
- Solomon S, Daniel J S, Neely R R, Vernier J P, Dutton E G, Thomason L W. 2011. The persistently variable "Background" stratospheric aerosol layer and global climate change. *Science*, 333: 866–870
- Solomon S, Rosenlof K H, Portmann R W, Daniel J S, Davis S M, Sanford T J, Plattner G K. 2010. Contributions of stratospheric water vapor to decadal changes in the rate of global warming. *Science*, 327: 1219–1223
- Stauning P. 2014. Reduced solar activity disguises global temperature rise. *Atmos Clim Sci*, 04: 60–63
- Taylor K E, Stouffer R J, Meehl G A. 2012. An overview of CMIP5 and

- the experiment design. *Bull Amer Meteorol Soc*, 93: 485–498
- Ting M, Kushnir Y, Seager R, Li C. 2009. Forced and internal Twentieth-Century SST Trends in the North Atlantic. *J Clim*, 22: 1469–1481
- Trenberth K E, Fasullo J T. 2013. An apparent hiatus in global warming? *Earth's Future*, 1: 19–32
- Tung K K, Zhou J. 2013. Using data to attribute episodes of warming and cooling in instrumental records. *Proc Natl Acad Sci USA*, 110: 2058–2063
- Watanabe M, Kamae Y, Yoshimori M, Oka A, Sato M, Ishii M, Mochizuki T, Kimoto M. 2013. Strengthening of ocean heat uptake efficiency associated with the recent climate hiatus. *Geophys Res Lett*, 40: 3175–3179
- Wei M, Qiao F, Deng J. 2015. A quantitative definition of global warming hiatus and 50-year prediction of global-mean surface temperature. *J Atmos Sci*, 72: 3281–3289
- Wu Z, Huang N E. 2009. Ensemble empirical mode decomposition: A noise-assisted data analysis method. *Adv Adapt Data Anal*, 1: 1–41
- Wu Z, Huang N E, Long S R, Peng C K. 2007. On the trend, detrending, and variability of nonlinear and nonstationary time series. *Proc Natl Acad Sci USA*, 104: 14889–14894
- Wu Z, Huang N E, Wallace J M, Smoliak B V, Chen X. 2011. On the time-varying trend in global-mean surface temperature. *Clim Dyn*, 37: 759–773
- Zhang R, Delworth T L. 2007. Anticorrelated multidecadal variations between surface and subsurface tropical North Atlantic. *Geophys Res Lett*, 34: L12713
- Zhou T, Yu R. 2006. Twentieth-Century surface air temperature over China and the globe simulated by coupled climate models. *J Clim*, 19: 5843–5858