

苏京志, 温敏, 丁一汇, 等. 2016. 全球变暖趋缓研究进展 [J]. 大气科学, 40 (6): 1143–1153. Su Jingzhi, Wen Min, Ding Yihui, et al. 2016. Hiatus of global warming: A review [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (6): 1143–1153, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1512.15242.

全球变暖趋缓研究进展

苏京志¹ 温敏¹ 丁一汇² 郜永祺^{3,4} 宋亚芳²

¹ 中国气象科学研究院, 北京 100081

² 国家气候中心, 北京 100081

³ 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

⁴ 南森环境与遥感中心, 挪威卑尔根 5006

摘 要 近十几年来, 全球年平均表面温度上升趋势显示出停滞状态, 即全球变暖趋缓, 这引起了国际社会的广泛关注, 同时也引发了对全球变暖的质疑, 各国气候学家正努力就全球变暖趋缓的事实、原因及其可能影响展开研究。本文综述了目前国内外对全球变暖趋缓的研究结果。多数科学家认可近十几年来全球变暖停滞的事实, 并认为太阳活动处于低位相、大气气溶胶 (自然和人为) 增加以及海洋吸收热量是变暖停滞的可能影响因子, 其中海洋 (尤其是 700 米以下的深海) 对热量的储存可能是变暖停滞的关键。国际耦合模式比较计划第 5 阶段中的模式并未精确地描述各种有利降温影响因子的近期位相演变, 因而其模拟的近期增暖趋势较观测偏强。由此推断, 变暖停滞主要是自然因素造成的, 并且预测变暖趋缓将在近几年或几十年内结束 (依赖于太平洋年代际振荡的位相转变), 未来气温仍将主要受到温室气体增加的影响而表现出明显的上升趋势。因此, 目前的全球变暖趋缓不大可能改变到本世纪末全球大幅度变暖带来的风险。本综述展望未来的研究热点包括: 精确估算全球气温和海洋热含量的变率及其不确定性, 海洋年代际信号 (太平洋以及大西洋的年代际振荡) 的转型机制, 存储在深海的热量将在何时返回海洋表面及其对区域气候的潜在影响。

关键词 全球变暖 变暖趋缓 海洋吸收热量 年代际变化

文章编号 1006-9895(2016)06-1143-11

中图分类号 P467

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1512.15242

Hiatus of Global Warming: A Review

SU Jingzhi¹, WEN Min¹, DING Yihui², GAO Yongqi^{3,4}, and SONG Yafang²

¹ Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

² National Climate Center, Beijing 100081

³ Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

⁴ Nansen Environmental and Remote Sensing Center, Bergen 5006, Norway

Abstract The slowdown in the global mean surface temperature (GMST) warming over the past decade or so, referred to as the global warming “hiatus”, has attracted wide attention and also cast public doubt on global warming. Great efforts have been made to verify the global warming hiatus, as well as its causes and influences. This paper reviews and summarizes results of recent researches on the global warming hiatus. It is generally accepted that the GMST warming tendency is slowing down recently. So far, proposed reasons to explain the hiatus include: the prolonged solar minimum, the increase in anthropogenic and natural aerosol emissions, and changes in ocean heat storage/re-distribution. Particularly,

收稿日期 2015-08-06; **网络预出版日期** 2016-01-05

作者简介 苏京志, 男, 1975年出生, 博士, 副研究员, 从事海气相互作用和气候变化研究。E-mail: sujz@cma.cn

资助项目 国家自然科学基金项目41376020, 中国科学院战略性先导科技专项XDA05110203

Funded by National Natural Science Foundation of China (NSFC) (Grant 41376020), “Strategic Priority Research Program” of the Chinese Academy of Sciences (Grant XDA05110203)

the increased ocean heat storage below 700 m has been identified during the global warming hiatus. Most of the models participating the Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 failed to capture the global warming hiatus and therefore overestimated the observed trend in GMST. One general consensus is that natural climate variability instead of the external forcing caused the recent global warming hiatus. It is argued that the global warming hiatus would likely stop within several years or several decades, depending on the transition of the Pacific Decadal Oscillation. If the radiative forcing of the greenhouse gases continues to intensify, an apparent increase in GMST would be expected in future. We suggest that future research related to the global warming hiatus should focus on: (1) more accurate estimation of the GMST and the ocean heat content; (2) better understanding of the transition of decadal and multi-decadal (Pacific and Atlantic) oscillations; (3) uptake of energy stored in deep oceans and its impact on regional climate.

Keywords Global warming, Hiatus, Heat storage in ocean, Decadal oscillation

1 引言

自工业革命以来, 人类活动导致的二氧化碳排放量剧增。当大气中二氧化碳等温室气体含量增加后, 更多的热量被截留在大气层内, 导致地球气温增高。受此影响, 全球平均表面温度自工业革命以来表现出显著的上升趋势。全球变暖会引起冰雪融化、冻土消融、海平面上升、极端天气频发等, 这不仅会破坏全球的自然生态系统, 而且威胁人类的生存。各国政府普遍重视全球变暖这一问题, 并正在努力采取措施协同应对全球变暖。

然而, 在全球变暖被普遍关注和认可的同时, 也存在对全球变暖现象质疑的声音。特别是全球年平均表面温度上升趋势自 1998 年以来显示出停滞状态, 即变暖趋缓 (hiatus) 现象, 引起了国际社会的广泛关注, 同时也加剧了“变暖怀疑论者”对全球变暖的质疑。尽管各国气候学家已经对全球变暖趋缓的事实、原因及其可能影响展开许多研究工作, 国内学者也对此进行相关追踪分析 (王绍武等, 2010, 2013, 2014; 宋斌等, 2015), 但围绕变暖趋缓仍存在不同争议, 特别是变暖趋缓成因方面有着不同的观点。本文针对全球变暖趋缓这一热点问题, 系统介绍国内外相关研究的前沿结果, 分析现有研究的特点并讨论未来研究的发展方向。

2 全球变暖趋缓的事实

2.1 全球变暖趋缓现象的提出

政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 第 5 次评估报告 (Stocker et al., 2014) 指出, 自 19 世纪中期有观测记录以来, 全球年平均气温上升了 0.8°C 左右。然而, 全球气温升温趋势在最近十几年明显减慢。英国气象学家 Knight 等最早于 2009 年提出这个问题, 他们指出相对于 1979~1998 期间, 全

球地表温度增温速率在 1999 之后 10 年间明显偏低 (Knight et al., 2009), 此即全球变暖趋缓 (停滞) 现象。

多种来源的气温观测资料表明 (Fyfe et al., 2013), 全球表面温度上升趋势在 1997~2013 年间为 $0.07 \pm 0.08^{\circ}\text{C} (10\text{a})^{-1}$, 比近 50 年的趋势 $0.16 \pm 0.02^{\circ}\text{C} (10\text{a})^{-1}$ 年要低得多, 更低于 IPCC 第 5 次评估报告对变化趋势的估计 [$0.2^{\circ}\text{C} (10\text{a})^{-1}$]。尽管全球气温增温速率存在一定不确定性, 但从全球平均表面温度的角度看, 全球变暖趋势出现了停滞 (图 1 a, b)。

2.2 多种资料显示全球变暖仍在持续

尽管近十几年来全球表面温度增温速率趋缓, 自 20 世纪 50 年代以来, 观测到的气候系统中许多变化在几十年乃至上千年时间里都是前所未有的。例如, 海冰和积雪仍在融化, 海洋仍在净吸收热量, 全球平均海平面仍在上升 (Met Office, 2013a)。诸多现象表明全球变暖的长期变化趋势没有完全停滞, 最重要的是, 全球表面温度仍然处于高位 (图 1a)。例如, 全球平均表面温度在 2014 年和 2015 年连续两次创下历史新高 (Blunden and Arndt, 2015, 2016)。

英国气象厅报告指出, 观测资料和数值模拟结果都表明, 类似的全球平均表面温度在一段时期内变化趋势接近于零的时期并非个例, 在过去的观测和对未来的预估中都有出现, 大致每个世纪至少出现 2 次 (例如上世纪的 1900 年代和 1960 年代; 图 1b)。因此, 温度变化趋势停滞并非史无前例, 而可能是一个暂时现象 (Met Office, 2013b)。

2.3 全球变暖趋缓时空分布特征

在近 15 年的变暖趋缓期, 地表温度的时空变率在全球分布并不均一 (Cohen et al., 2012; Trenberth et al., 2014), 其中海洋表面温度增温不

明显, 陆地温度仍有上升趋势(图 2)。已有的研究表明, 这是由于海表温度异常的空间特征不是随机分布的, 而呈现出系统性且伴随洋流变化。在年代际时间尺度上, 最为典型的年代际气候振荡是太平洋年代际振荡(PDO; Mantua et al., 1997)以及大西洋年代际振荡(AMO; Knight et al., 2005)。PDO 以及 AMO 对全球气候特别是北半球的气候有着显著的影响(如, Yu et al., 2015; Drinkwater et al., 2014)。

按季节来看, 地表变暖趋缓主要体现在北半球冬季的气温变化上, 特别是近几年欧亚大陆冷冬和极端低温事件的频繁出现, 这可能由热带太平洋海温异常所引起的大气异常波列所导致(Trenberth et al., 2014), 也可能与秋—冬季节北极海冰持续偏少(通过影响北极涛动或者西伯利亚高压等; Wang

et al., 2005; Gao et al., 2015)以及北大西洋海域与 AMO 正位相相对应的海表温度(有利于更加频繁的负位相北大西洋涛动以及阻塞的持续; Peings and Magnusdottir, 2014)有关。冬季东亚地区表面气温在 1990 年代后期也经历了年代际变化, 由北暖—南冷型分布转变成北冷—南暖型分布(康丽华等, 2009)。北半球夏季, 全球大部分地区仍保持着升温趋势(Trenberth et al., 2014)。对应海温异常的空间分布, 海陆热力差异可导致大气环流场变化并进一步加剧陆地增温异常(He et al., 2014)。

就中国区域而言, 全国地表年平均气温自上世纪初至今总体呈上升趋势, 并伴随明显的年代际变化特征, 其中包括两个变暖加速期: 20 世纪 30 年代至 40 年代和 80 年代中后期至 90 年代(图 1c)。1901~2014 年, 中国地表平均气温上升了 1.09°C。

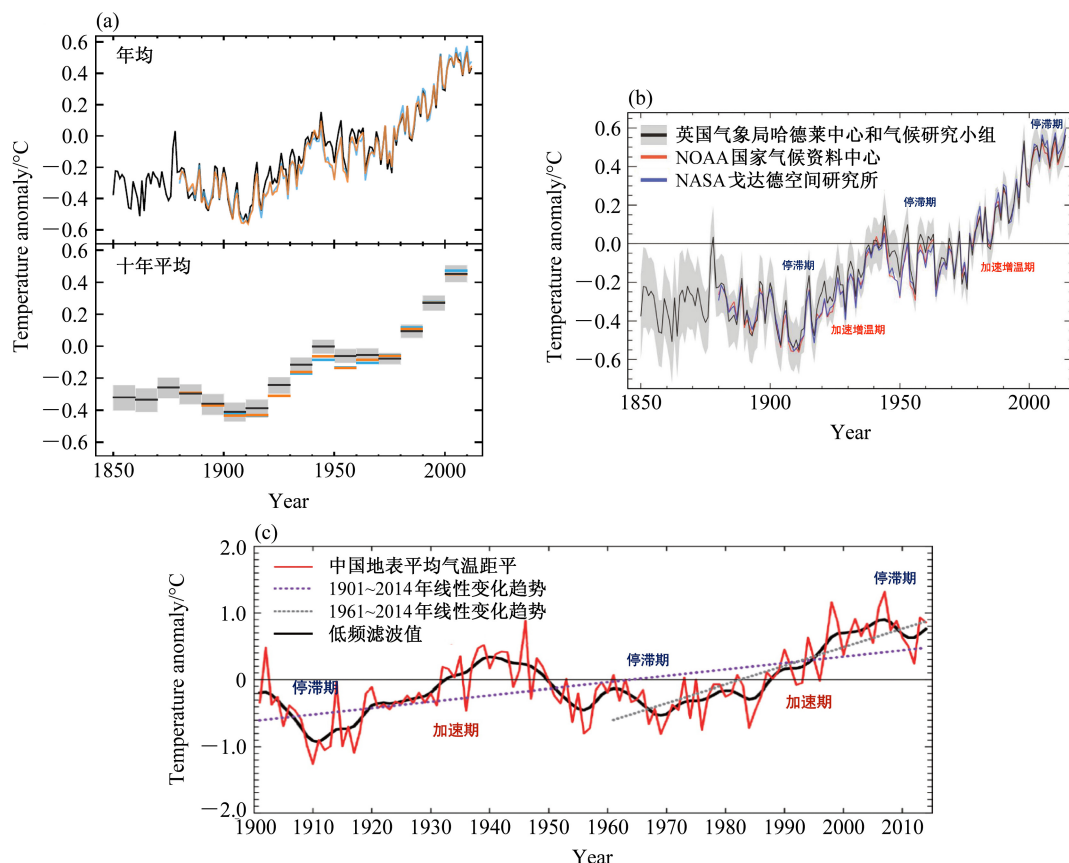


图 1 (a) 观测到的全球平均陆地和海表温度距平(1850~2012 年), 源自三个资料集(上图: 年均值, 下图: 十年均值, 包括一个资料集(黑色)的不确定性估计值。各距平均相对于 1961~1990 年均值)(Stocker et al., 2014)。(b) 1850~2012 年全球地表年平均温度距平变化(相对于 1961~1990 年平均值)(引自世界气象组织发布的 2012 年全球气候状况声明)。(c) 1901~2014 年中国地表年平均气温距平变化(引自国家气候中心 2014 年发布的中国气候变化监测公报)

Fig. 1 (a) Time series of annual mean surface temperature anomalies over global land and ocean surfaces (1850~2012) compared to climatology of 1961~1990 based on three different datasets (The upper panel presents annual mean temperature anomalies; the lower panel depicts decadal mean anomalies and uncertainty estimation) (Stocker et al., 2014). (b) Global annual mean surface temperature anomalies compared to the mean value for the period of 1961~1990 (from 'State of the Climate in 2012' by WMO). (c) Annual mean surface temperature anomalies over China (from 'China Climate Change Monitoring Bulletin in 2014' by National Climate Center)

1961–2014 年, 中国地表平均气温呈显著上升趋势, 平均每 10 年升高 0.28°C 。1997 年以来, 中国年平均气温持续偏高, 但最近 10~15 年升温趋缓, 尤其是冬季 (丁一汇等, 2014), 总体特征与全球状况相一致。2014 年中国地表平均气温为 10.1°C , 比常年值偏高 0.86°C , 位列 1901 年以来的第九最暖年 (中国气候变化监测公报, 2014 年)。

3 全球变暖趋缓的原因分析

3.1 海洋是变暖趋缓的关键

目前, 对全球平均表面温度变化停滞的原因解释主要有两种途径: 第一, 进入气候系统的净能量的变化; 第二, 气候系统中能量的再分配, 特别是上层海洋和深层海洋之间的能量交换, 这个过程可以暂时在表层以下隐藏变暖趋势。

从根本上说, 地球的平均温度是由吸收的太阳辐射和失去的热能之间的平衡决定的。全球变暖主要是由于温室气体浓度的增加使得更多热能留在了地球系统中, 因而使得大气层顶进入地球的净能量平衡由零值变为正值。目前对由于温室气体排放增强而导致截留在地球系统中的能量增加量估计为 0.35 W m^{-2} (IPCC, 2007)。要让全球平均表面温度升高立即停止, 不仅需要抵消当前由于温室气体浓度增加而引起的净能量, 还要抵消已经储存在地球系统中过剩热量的后期释放对全球的加热效应 (其中上层海洋存储的过剩热量所释放的加热效应相当于 0.27 W m^{-2} 的全球加热率), 因此估计该量值约为 -0.6 W m^{-2} (例如, Hansen et al., 2011; Levitus et al., 2012)。

能够引起辐射强迫减弱的因子主要包括火山爆发、平流层水汽含量下降和太阳活动变化等。火山喷发导致的冷却效应通常在 2~3 年内就随着硫酸盐颗粒物的沉降而衰减了。自 1992 年以后没有大的火山喷发, 2008~2012 年由于小型火山喷发造成的全球冷却效应大约在 -0.02° 到 -0.03°C 之间, 在气候变率中不足以被检测出 (Haywood et al., 2014)。平流层水汽含量在最近几年一直呈现下降趋势, 这可引起大约 0.1 W m^{-2} 的冷却效应 (Solomon et al., 2010)。最近几年太阳辐射循环 (周期约为 11 年) 处于低值期, 到达地球的入射辐射减小的最大可能值为 0.2 W m^{-2} (Met Office, 2013b)。此外, 也有科学家 (Tollefson, 2014) 怀疑, 包括中国在内的世界多国工业化产生的气溶胶

也有助于增暖变缓, 但这尚未得到证实。

总的来说, 气候系统净能量收入的减少尚不足以解释全球表面温度上升停滞。即使所有的贡献都计算在内, 也很难超过 0.3 W m^{-2} , 这只是导致变暖停止所需冷却效应的一半左右。地球系统的总热容量必然持续增加且以某种方式储存在地球表面以下。因此, 作为热量的主要吸收载体, 海洋被认为是解释全球变暖趋缓的关键。

观测表明, 自 1971 年以来地球接受热能中约有 94% 存贮在海洋中, 另外 6% 存储在大陆、大气和海冰等中 (IPCC, 2013; Le Page, 2013)。不同科学家对热量分配比例的估计可能不尽相同, 但可以确定的是海洋储存了大部分用于增温的能量。过去十年, 大气层顶净能量收入为 $0.5\sim 1 \text{ W m}^{-2}$, 大部分能量被海洋吸收, 其中 65% 储存在热带太平洋和大西洋, 海冰吸收的热量在 1% 左右 (Guemas et al., 2013)。近期的研究结果表明 (图 2), 海洋吸收的能量越来越多地向海洋中层 (海平面之下 700 到 2000 米) 和深层 (2000 米到海底) 远移, 而海表和海洋上层 (海平面到之下 700 米) 存储的能量在减少。因此能量传输和分配上的变化导致海洋上层存储的能量在减少, 中层和深层存储的能量在增多, 因而海表温度没有明显的增温趋势。

引起海洋表面温度变化的过程除海气热交换以外, 还包括海洋环流的变化, 如太平洋副热带经向翻转流和大西洋经向翻转流等。在变暖趋缓时期, 赤道东太平洋海表温度降低。模式结果表明, 在变暖趋缓阶段, 北大西洋经向翻转流减弱, 南极底层水减少 (Meehl et al., 2013)。在变暖趋缓期, 太平洋深海热含量并无显著上升, 但是大西洋和南大洋的深海热含量上升明显 (Chen and Tung, 2014; Palmer et al., 2015)。另外, 变暖趋缓期间太平洋吸收的热量被传输到了印度洋, 并导致印度洋的热含量增加 (Lee et al., 2015)。值得指出的是, 由于全球海洋观测系统的转变, 不均匀的采样可能造成 2001~2003 年热含量估算值出现突变, 这增加了南大洋估算结果的不确定性 (Cheng and Zhu, 2014; Cheng et al., 2015)。而自 2004 年以来的直接观测资料表明 (2004~2012 年), 大西洋经向翻转流的强度在减弱, 减弱的强度为 $0.5\pm 0.2 \text{ Sv a}^{-1}$ (1 Sv 等于 $10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) (Robson et al., 2014), 他们进一步推测所观测到的大西洋经向翻转流的减弱可能是年代际尺度上减弱的一部分。

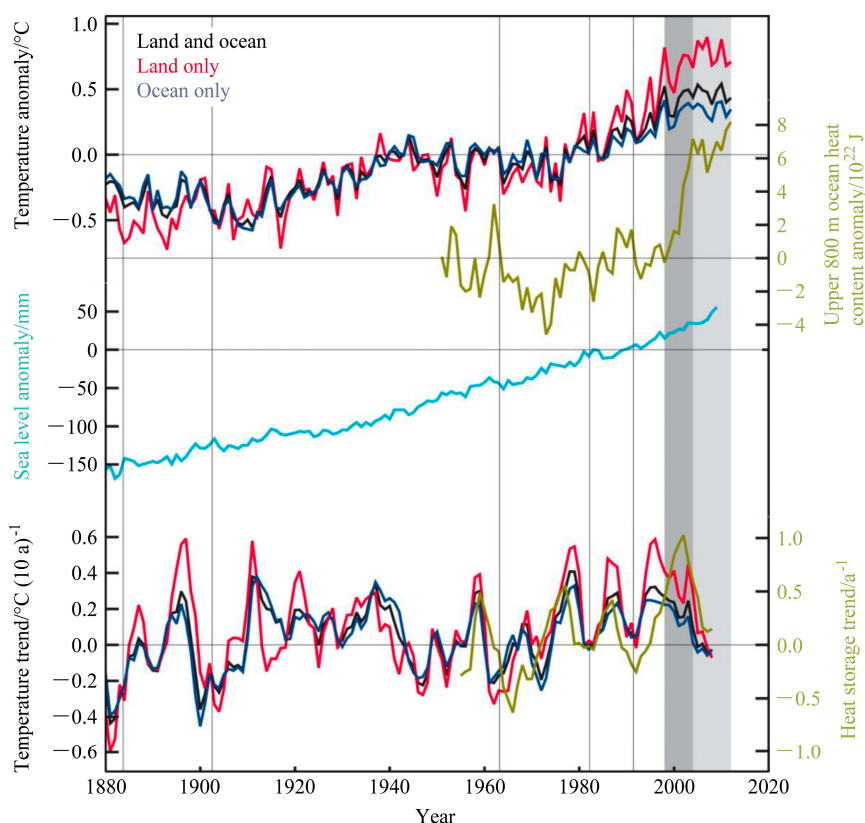


图2 观测资料中的表面温度增温趋缓现象。上图为全球(黑线)、陆地(红色)和海洋(深蓝色)的年平均表面温度异常(相对于1961~1990)时间序列;中图为海洋800 m以上热容量(卡其色,异常相对于1951~2006)和全球平均海平面高度(淡蓝色);下图为表层温度(黑、红、蓝色分别全球、陆地和海洋)和上层海洋热量吸收(卡其色)的9年滑动趋势。阴影区指示近期全球变暖趋缓期,包括激发期(深色)和持续期(浅色)。垂直竖线指示主要的火山爆发事件。(来自 Met Office, 2013b)

Fig. 2 Observed slowdown in global mean surface temperature increase. The upper panel shows temporal evolution of annual mean surface temperature anomalies (relative to the mean value of 1961 to 1990) averaged over entire global surface (black, from HadCRUT4), and over global land (red, from CRUTEM4) and ocean (blue, from HadSST3) surfaces. The middle two panels present ocean heat content (from surface to 800 m depth) anomalies (compared to the mean value over the period of 1951 to 2006) and globally averaged annual sea level observed by tide gauges. The lower panel shows the nine-year running trends in surface warming and upper-layer ocean heat storage. The grey shaded areas highlight the recent slowdown in global warming. The onset of the slowdown is denoted by dark grey area and its continuation is indicated by light grey area. As shown in the figure, the upper-layer ocean heat storage increased during the onset period, but changed little during the continuation period. Vertical lines indicate the times when major volcanic eruptions took place. (from Met Office 2013b)

3.2 海洋年代际振荡以及全球变暖速率

太平洋海温年代际振荡负位相对全球变暖趋缓起到很大贡献(如, Dong and Zhou, 2014; Dong et al., 2014; Maher et al., 2014; Yao et al., 2016)。图3显示,相应于PDO的负位相,全球平均表面温度相对偏低(如1960年代左右),而在PDO正位相期间,全球平均表面温度相对偏高(如1980~1990年代左右)。有研究(Tollefson, 2014)指出在PDO负位相期间,太平洋呈现出类似于拉尼娜的海温形态,伴随赤道附近的深海冷水被抽吸到海洋表面,太平洋变冷削弱了温室气体的增温效应,可导致变暖趋缓。相反,在PDO为正位相期间,太平洋东部和中部海域会持续释放异常热量,太平

洋变暖叠加温室气体增温效应,可导致全球变暖加速(如上世纪70年代末的气候转型)。受PDO负位相影响,在2000~2014年期间,拉尼娜事件偏多,并且厄尔尼诺事件的强度偏弱。每当拉尼娜现象出现,全球大气会发生降温,从而改变、影响了全球变暖的趋势,在随后几年内使温度呈下降趋势,也就是说海洋的温度波动明显对应着全球增温的缓急。类似的,AMO也被认为与北半球年代际气候变化紧密相关(Semenov et al., 2010; Drinkwater et al., 2014)。尽管受到外强迫的影响(Otterå et al., 2010),大多数研究仍认为AMO是一种气候系统的自然变率(Drinkwater et al., 2014),并且AMO对北半球平均温度多年代际变率具有预

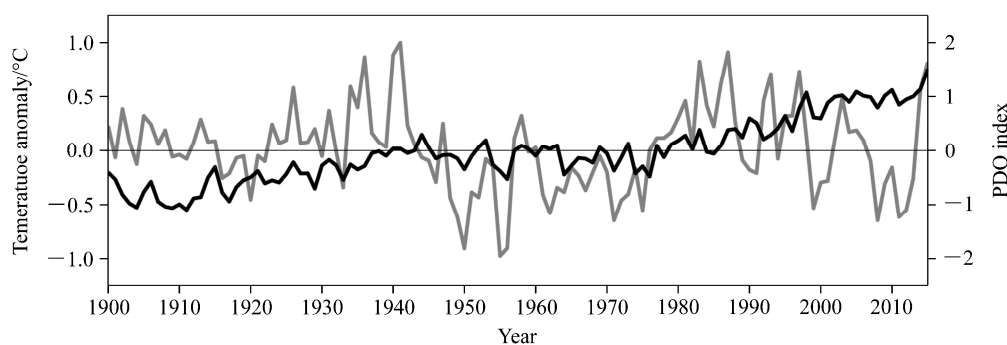


图3 全球地表平均温度异常(黑线; 相对于1961~1990年)和太平洋海温年代际振荡指数(灰色)时间序列。全球平均温度距平数据来自英国气象局 HadCRUT 4 资料。PDO 时间序列来自华盛顿大学大气海洋联合研究中心。

Fig. 3 Time series of global annual mean surface temperature anomalies (black line, compared to the average over 1961–1990) and the Pacific Decadal Oscillation index (PDO, gray line). The global mean surface temperature anomalies are from Met Office Hadley HadCRUT 4. The PDO index is obtained from Joint Institute for the Study of the Atmosphere and Ocean of University of Washington

测意义,一定程度上解释了近期增暖减缓现象(Li et al., 2013)。最近研究表明,AMO 和 PDO 很大程度上能够解释北半球平均温度的自然变率,当前变暖趋缓现象其实是正位相的 AMO 和负位相的 PDO 协同作用的结果(Steinman et al., 2015)。

利用数值试验, Kosaka and Xie (2013) 证实赤道中东太平洋(全球表面积的 8%)的异常低海温对近十几年的全球平均地表温度增温趋缓起到重要作用。该研究结果表明,目前的增暖趋缓现象是气候自然变率的一部分,与太平洋拉尼娜型年代际变冷有关。热带地区拉尼娜型变冷显著地影响了北半球冬季热带外地区的气候变化,阿留申低压减弱,北美地区西北部变冷加剧,导致了全球变冷。

对 CMIP5 模式的历史情景模拟分析显示,年代际全球气温的变化与 PDO 以及大西洋经向翻转环流的变化紧密相关。模式的结果表明,对应着全球变暖的减弱,北太平洋的副热带经向翻转环流增强,而大西洋经向翻转环流减弱(Song et al., 2014)。较为可信的是,太平洋年代际振荡对长时间尺度的海洋状态调整起到主导作用。PDO 周期约为 20~30 年。当前的 PDO 负位相大致始于 1999 年左右(图3),由此可推测 PDO 转为正位相的时间可能在未来 5~10 年,这将终结增暖停滞。许多进入海洋的热量将停留在海洋内部,另一部分将缓慢返回大气,导致表层温度上升。果真如此,那么增暖停滞将持续几年乃至几十年(Le Page, 2013)。然而,太平洋年代际振荡形成机制存在多种解释(如, Wang and Liu, 2000; Wang et al., 2003; 杨修群等, 2004; Yang and Liu, 2005; Wu et al., 2007; Yang et al., 2007; Liu,

2012; Luo et al., 2012), 目前对太平洋年代际振荡确切的转型机制尚存在一定争议,这给精确预测 PDO 何时转为正位相带来一定困难。

气候变化的研究和预测对象中存在三种时间尺度:(1) 全球平均地表气温的短期脉动;(2) 气候变化的长期趋势;(3) 年代际时间尺度。全球地表温度预期发生生长周期的变化,其中一个原因是海气耦合系统的内部变率,它具有混沌的性质;也可能是气候系统对外部影响如火山爆发和太阳循环的响应结果。上两种影响在未来还将继续起作用,并迭加在由增加的大气温室气体浓度引起的任何长期增暖趋势上。对于较短的时期(如最近 15 年期间),自然和外部驱动的脉动原则上能够决定增暖趋势的变化。

总体来说,全球变暖加速与变暖趋缓是气候驱动力相互作用的结果。由于自然变化是周期循环的,其长期平均的效应接近于零。自然因素造成的变冷在很大程度上抵消了气候变暖的趋势,这是导致近 15 年变暖趋缓的关键因素。全球气候变暖趋势是真实的,但在此之上同时迭加了长周期(40~60 年)和短周期(数年)的脉动,即年代际尺度和年际尺度波动。这使得人类造成的气候变暖趋势曲线具有年代际变化的特征。所以,全球变暖是在冷暖波动中不断升温的。

4 全球变暖趋缓的数值模拟及预报

在第五次气候模式比较计划(CMIP5)的历史模拟中,大部分模式模拟的近 15 年全球平均地表温度比观测值偏高,CMIP5 模式的集合平均模拟结果与增暖趋缓现象不符。但是,其中有些模式模拟

的 PDO 位相与观测结果相吻合,进而这些模式的历史模拟结果能够反映出近期的增暖趋缓。利用年代际预测方法对 CMIP5 多模式进行初始化后,21 世纪初期的 PDO 负位相和变暖趋缓特征都能被模拟出来 (Meehl et al., 2014)。在 1998~2012 年期间,气候系统内部变率的贡献 (主要是 ENSO) 可导致 0.06°C 的冷却率,同期的太阳活动和平流层气溶胶强迫可产生 -0.07°C 的降温趋势 (Huber and Knutti, 2014)。基于上述冷却效应的估算,对 CMIP5 模拟结果进行调整,所得结果与变暖趋缓期的实际观测值相一致。因此,尽管 CMIP5 的集合平均结果高估了变暖趋缓期间的全球气温变化,尚不能证明 CMIP5 模拟的气温对二氧化碳增加的响应整体偏高 (Huber and Knutti, 2014)。

CMIP5 模式未能很好地模拟出近期的变暖趋缓现象,近 15 年的增暖趋势处于 CMIP5 模式预测 5%~95% 不确定范围的下边界附近。其原因在于:观测到的各种促使降温的影响因子近乎同位相迭加,进而抵消了变暖的长期趋势,而模式未能很好地描述这些影响因子的位相演变。CMIP5 模式模拟采用的外部强迫限于 2000 年或 2005 年以前的历史估算量值,而未考虑近期由于其他因子 (尤其是自然因子变化) 对这些估算的任何影响或更新。事实上,火山爆发、大气气溶胶与太阳活动的影响在 2000 年代都发生了未曾预期的转折。将火山气溶胶浓度、太阳活动和温室气体浓度重新更新至 2012 年后发现,在 2000 年代多种冷却因子被低估,使得模拟结果比实际气候更暖 (Schmidt et al., 2014)。考虑这些冷却因子,并假使模式所模拟的 ENSO 与观测同位相变化后,修正后的模拟结果与观测值吻合较好 (Schmidt et al., 2014)。然而,也有研究表明,气候模式模拟结果中的年代际变率信号大部分是由气候内部变率造成的,这包括海洋环流的调整和大气环流的响应;相反,太阳活动、火山爆发、气溶胶等自然强迫的变化对气候模式中年代际变率影响整体来说相对较弱 (Marotzke and Forster, 2015)。

气候模式的历史模拟实验与气候预测有着本质不同,因此只能反映气候变率的统计特征。模式预估结果能否捕捉到近期增暖停滞现象,取决于模式中的自然变率是否与观测结果中的年代际变率是否在同期处于同一位相 (Risbey et al., 2014)。倘若摒弃位相锁定这一限定,观测结果中的增暖停滞和增暖加速现象在气候模式中都能很好地体现

出来 (Song et al., 2014)。如果使用观测的热带太平洋海温 (Kosaka and Xie, 2013) 或海表风场 (England et al., 2014) 来修正模式中相应变量时,某些气候模式能够很好地模拟出近期增暖停滞现象。但是, Kosaka and Xie (2013) 并没有阐述赤道中东太平洋的异常低海温是怎么形成的。同样的, England et al. (2014) 的研究也没有阐述海表风场的异常是如何形成的。McGregor et al. (2014) 指出热带太平洋海表风场的异常可能是由于大西洋海表温度的异常导致的。另外,目前对近期气候的年代际预报仍处于发展阶段,需要克服模式初始化和模式向其平衡态漂移的难题,要解决这些困难估计仍须 10 年乃至更长时间 (Tollefson, 2013)。

总之,利用更新的外强迫资料并调整与 ENSO 有关的内部变率,由此得到的 CMIP5 模式所模拟的全球地表平均温度与观测结果几乎完全一致。尽管如此,对于短期气候变化 (如 10~15 年) 的归因仍有问题,因为上述手段只是以回报来发现模式与资料的一致性,这从内在原因看来是不能令人满意的。但应该肯定的是,在 CMIP5 模式中未发现瞬变响应 (年代际到百年时间尺度上气候系统对增加的辐射强迫的响应) 被系统地估计过高,或者模式集合之间的年代尺度变率被系统地估算过低。最后,更重要的是,显著的增温趋势可能恢复,这是因为完全混合的温室气体引起的长期增暖主导作用继续上升,亚洲气溶胶浓度可能稳定或减少, PDO 将最终会变成正位相。太阳活动仍会持续偏低,火山爆发不可预测。因而,多种冷却因子位相同步巧合的现象会终止。这意味着将来很可能是全球进一步变暖。

5 未来全球气候变暖重新加速上升的可能性

基于 CMIP5 模式模拟结果,即使采用最保守的估计,到二十一世纪末全球温度将显著变暖,近十几年的变暖趋缓是无法扭转这一趋势的 (Met Office, 2013a)。目前,温室气体的排放仍在持续增加。全球温室气体平均浓度在 2014 年达到历史最高值,其中二氧化碳浓度达到 397.2 ppm ,比 2013 年增加 1.9 ppm (Blunden and Arndt, 2015)。温室气体继续排放将会造成进一步增暖,并导致气候系统所有组成部分发生重大变化。全球气候变暖加速和趋缓是由气候的内部变率引起,如前所述,气候系统的内部变率可引起全球气候变暖加速或趋缓。海洋是内部

变率的主要影响因子。冷海洋导致变暖趋缓,暖海洋导致变暖加速。这次十几年的气候变暖趋缓现象有可能会延续到 2020 年。但伴随次表层海洋热量的释放和太平洋年代际振荡的位相转折,全球变暖加速的可能性会增大 (Roberts et al., 2015)。

如果以现在温室气体和气溶胶排放趋势持续下去,根据地球系统的温度多年代尺度变率(40 年)预测,全球变暖速率将达近千年间的最高值。根据 24 个 CMIP5 气候模式的集合预报结果表明,到 2020 年,北半球的气温上升速率可达 $0.25^{\circ}\text{C} (10\text{ a})^{-1}$,误差为 $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ 。在 20 世纪之前的 900 年,甚至两千年间,气温变化率极少达到 $0.10^{\circ}\text{C} (10\text{ a})^{-1}$ 。即便在温室气体排放较低的情景下(RCP4.5,辐射强迫为 4.5 W m^{-2}),未来 40 年的气候变化也将加速 (Smith et al., 2015)。

相对于 1850~1900 年,在大多数排放情景下(RCP2.6 情景除外),21 世纪末全球表面温度变化可能超过 1.5°C 。变暖将继续迭加年际到年代际变率,并且不具有区域一致性。随着全球平均温度上升,在日和季节尺度上,大部分陆地区域的极端暖事件将增多,极端冷事件将减少。热浪发生的频率更高、时间更长,当然偶尔也会发生冷冬极端事件。在 21 世纪,全球水循环对变暖的响应不均一。干湿地区之间和干湿季节之间的降水差异将会增大

(Stocker et al., 2014)。

在 21 世纪全球海洋将持续变暖。热量将从海面输送到深海,并影响海洋环流。在 21 世纪随着全球平均表面温度上升,北极海冰覆盖将继续缩小、变薄,北半球春季积雪将减少。全球冰川体积将进一步减少。21 世纪全球平均海平面将持续上升。在所有 RCP 情景下,由于海洋变暖以及冰川和冰盖冰量损失的加速,海平面上升速率很可能超过 1971~2010 年间观测到的速率。气候变暖将通过正反馈过程加剧大气中二氧化碳的增长来影响碳循环过程。海洋对碳的进一步吸收将加剧海洋的酸化,并影响海洋生物 (Stocker et al., 2014)。

同时,自然内部变率仍将是影响气候变化的主要因素之一,21 世纪仍可能出现 2~3 次类似的变暖趋缓期。

6 讨论与展望

尽管全球表面温度的增加在近十几年间出现停滞现象,但全球温度的长期趋势仍主要由温室气体持续增加所决定,显著增温可能在不久的将来得到恢复。围绕全球变暖趋缓,仍存在诸多争议,表 1 对目前几种主要观点进行了比较分析。

(1) 对“变暖趋缓”定义的质疑

观测记录显示,全球表面温度排名前十的最高

表 1 对近期增暖速率的几种不同估算结果的对比

Table 1 Comparison of global warming rates in recent decades based on different studies

文献	资料	计算时段	增暖速率/ $^{\circ}\text{C} (10\text{ a})^{-1}$	主要结论
Knight et al. (2009)	HadCRUT3	1979~2005 年	0.18	首次提出增暖趋缓
		1999~2008 年	0.07 ± 0.07	
Fyfe et al. (2013)	HadCRUT4	1997~2013 年	0.16 ± 0.02	确认增暖趋缓
			0.07 ± 0.08	
IPCC (2013)	HadCRUT4	1951~2012 年	$0.12(0.08 \sim 0.14)$	不同时间段所得增暖速率存在差异,1997/1998 年是强厄尔尼诺年,对增暖速率的估算有影响
		1995~2009 年	$0.13(0.02 \sim 0.24)$	
		1996~2010 年	$0.14(0.03 \sim 0.24)$	
		1997~2011 年	$0.07(-0.02 \sim 0.18)$	
		1998~2012 年	$0.05(-0.05 \sim 0.15)$	
IPCC (2013)	HadCRUT4	1951~2012 年	0.106 ± 0.027	不同资料所得的增暖速率存在差异
	NCDC MLOST	1951~2012 年	0.118 ± 0.021	
	GISS	1951~2012 年	0.124 ± 0.020	
	HadCRUT4	1998~2012 年	0.042 ± 0.093	
	NCDC MLOST	1998~2012 年	0.037 ± 0.085	
	GISS	1998~2012 年	0.069 ± 0.082	
Cowtan and Way (2014)	三套资料平均	1998~2012 年	$0.05[-0.05 \sim +0.15]$	填补缺失区域的数值,可使增暖速率估算量值变大
	HadCRUT4	1997~2012 年	0.046 ± 0.063	
	Kriging 填补缺失区		0.108 ± 0.073	
	Hybrid 填补缺失区		0.119 ± 0.076	
Karl et al. (2015)	订正的 ISTI 和 ERSST	2000~2014 年	0.116	不支持增暖趋缓
		1998~2014 年	0.106	

值有 9 次出现在 2000 年之后,并于 2014 年和 2015 年接连创下历史最高值。这意味着,全球变暖并未停止。全球平均表面气温在 1998 年曾到达近百年极高值。这使得 1998~2013 年变暖趋势看似减弱,然而 1999~2013 年变暖趋势仍然明显。过去几十年中也出现过某一阶段增温趋势接近零值的情况。更有学者认为,评估全球变暖需要几十年(如 30 年)以上的序列,利用十几年的序列来评估全球变暖本身就不科学。

除全球表面温度外的其他要素依然显示全球持续变暖。即使基于表面温度资料,也有科学家认为由于某些区域(如北极和非洲)温度观测缺失也影响到全球平均温度序列,使其不能准确反应全球变化(Cowtan and Way, 2014)。由于全球表面温度的观测手段和观测技术历经多次更新换代,由此可导致全球表面温度的估算值存在一定不确定性。Karl et al. (2015) 通过订正观测原始数据,进而估算 2000 之后的 15 年间的全球变暖速率约为上世纪后半叶的一半,这显著大于 IPCC AR5 的估算结果,由此他们认为所谓的变暖趋缓并不存在。

但是,我们注意到, Karl et al. (2015) 对 2000 年之后的变暖速率估算中包含了 2014 年,而 IPCC AR5 所取时段截止到 2012 年。由于全球表面温度在 2014 年达到历史最高值, Karl et al. (2015) 的估算结果必然高于 IPCC 的估算结果。客观来说,全球变暖速率在 2000 年之后的十几年内确实是偏低,但全球表面温度仍保持为增温趋势。

(2) 全球热量的精确估算

伴随全球变暖,全球增温现象并不限于地球表面温度。近十几年来,海洋深层(700 米以下)的热量含量增加,这是变暖趋缓期间热量的主要汇区。另外,观测结果存在不确定性并且有效观测时段过短,这给全球热量估算带来一定误差。例如,对全球冰川融化等所吸收热量的现有估算存在一定误差,最新研究表明,南极冰川融化速率在近十年内显著增加(Paolo et al., 2015)。应该承认,通过补充新的观测资料可能会修正全球热量的分配比例,但海洋是全球热量吸收的主体,这一事实不会改变。

尽管各种数据的分析表明,全球海洋在过去的 50 多年里吸收了地球系统 90% 多的热量,但值得指出的是,海洋热含量的评估还存在不确定性。因此,全球海洋热含量以及不确定性的评估也将是一个待解决的热点问题。

(3) 海洋年代际转型的不确定性

海洋的年代际变化对变暖趋缓转向变暖加速可能起到关键作用,目前尚不能精确推算出海洋的年代际振荡(PDO, AMO 等)的位相转换时间,也不完全清楚其位相转换的原因,因而全球变暖趋缓的结束时间的估算仍存在较大不确定性。受 2014/2015/2016 年厄尔尼诺事件的影响,北太平洋东部海温近两年持续升温, PDO 目前可能处于从其负位相向正位相的转换期,但尚不能确认 PDO 位相已经完全转变。倘若随后几年北太平洋东部继续升温,那么 PDO 将稳定在正位相,也就意味着全球变暖正在重新进入加速期。其中有诸多关键问题亟待阐明:海洋年代际信号发生转型的原因(大气强迫场主导还是海洋热力动力主导);热量经海洋吸收后在海洋内部的运移路径以及时间尺度;被海洋吸收的热量最终返回海洋表层的时空特征以及强度;返回海洋表层的热异常能否驱动全球表面温度的年代际变化。

纵然全球变暖趋缓引发了诸多不确定性的疑问,但当前全球表面温度仍处于历史高位并显示出增长态势。我国作为温室气体排放量大国之一,应加大对全球变暖方面的研究投入。我国科学家应围绕全球变暖速率存在年代际变化这一客观事实,深入研究影响变暖速率变化的可能机制。其中,进入海洋内部的热量将会在何时何地返回大气,并由此引起的全球气候响应是一个核心问题。

参考文献 (References)

- Blunden J, Arndt D S. 2015. State of the climate in 2014 [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 96(7): ES1-ES32.
- Blunden J, Arndt D S. 2016. State of the climate in 2015 [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 97 (8): S1-S275.
- Chen X Y, Tung K K. 2014. Varying planetary heat sink led to global-warming slowdown and acceleration [J]. Science, 345(6199): 897-903, doi:10.1126/science.1254937.
- Cheng L J, Zhu J. 2014. Artifacts in variations of ocean heat content induced by the observation system changes [J]. Geophys. Res. Lett., 41 (20): 7276-7283, doi:10.1002/2014GL061881.
- Cheng L J, Zhu J, Abraham J. 2015. Global upper ocean heat content estimation: Recent progress and the remaining challenges [J]. Atmos. Oceanic Sci. Lett., 8 (6): 333-338, doi:10.3878/AOSL20150031.
- Cohen J L, Furtado J C, Barlow M, et al. 2012. Asymmetric seasonal temperature trends [J]. Geophys. Res. Lett., 39 (4): L04705, doi:10.1029/2011GL050582.
- Cowtan K, Way R G. 2014. Coverage bias in the HadCRUT4 temperature series and its impact on recent temperature trends [J]. Quart. J. Roy.

- Meteor. Soc., 140 (683): 1935–1944, doi:10.1002/qj.2297.
- 丁一汇, 柳艳菊, 梁苏洁, 等. 2014. 东亚冬季风的年代际变化及其与全球气候变化的可能联系 [J]. 气象学报, 72 (5): 835–852. Ding Yihui, Liu Yanju, Liang Sujie, et al. 2014. Interdecadal variability of the East Asian winter monsoon and its possible links to global climate change [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 72 (5): 835–852, doi:10.11676/qxxb2014.079.
- Dong L, Zhou T J, Chen X L. 2014. Changes of Pacific decadal variability in the twentieth century driven by internal variability, greenhouse gases, and aerosols [J]. Geophys. Res. Lett., 41 (23): 8570–8577, doi:10.1002/2014GL062269.
- Dong L, Zhou T J. 2014. The formation of the recent cooling in the eastern tropical Pacific Ocean and the associated climate impacts: A competition of global warming, IPO, and AMO [J]. J. Geophys. Res. Atmos., 119 (19): 11272–11287, doi:10.1002/2013JD021395.
- Drinkwater K F, Martin M, Medhaug I, et al. 2014. The Atlantic Multidecadal Oscillation: Its manifestations and impacts with special emphasis on the Atlantic region north of 60°N [J]. J. Mar. Syst., 133: 117–130, doi:10.1016/j.jmarsys.2013.11.001.
- England M H, McGregor S, Spence P, et al. 2014. Recent intensification of wind-driven circulation in the Pacific and the ongoing warming hiatus [J]. Nature Climate Change, 4 (3): 222–227, doi:10.1038/nclimate2106.
- 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.
- Gao Y Q, Sun J Q, Li F, et al. 2015. Arctic sea ice and Eurasian climate: A review [J]. Adv. Atmos. Sci., 32 (1): 92–114, doi:10.1007/s00376-014-0009-6.
- Guemas V, Doblas-Reyes F J, Andreu-Burillo I, et al. 2013. Retrospective prediction of the global warming slowdown in the past decade [J]. Nature Climate Change, 3 (7): 649–653, doi:10.1038/nclimate1863.
- Hansen J, Sato M, Karecha P, et al. 2011. Earth's energy imbalance and its implications [J]. Atmos. Chem. Phys., 11 (24): 13421–13449, doi:10.5194/acp-11-13421-2011.
- 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 [J]. Atmos. Sci. Lett., 15 (2): 92–96, doi:10.1002/asl2.471.
- He Y L, Huang J P, Ji M X. 2014. Impact of land–sea thermal contrast on interdecadal variation in circulation and blocking [J]. Climate Dyn., 43 (12): 3267–3279, doi:10.1007/s00382-014-2103-y.
- Huber M, Knutti R. 2014. Natural variability, radiative forcing and climate response in the recent hiatus reconciled [J]. Nature Geosci., 7 (9): 651–656, doi:10.1038/ngeo2228.
- IPCC. 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis [M]. Solomon S, Qin D, Manning M, et al., Eds. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press.
- IPCC. 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 1535 pp.
- 康丽华, 陈文, 王林, 等. 2009. 我国冬季气温的年际变化及其与大气环流和海温异常的关系 [J]. 气候与环境研究, 14 (1): 45–53. Kang Lihua, Chen Wen, Wang Lin, et al. 2009. Interannual variations of winter temperature in China and their relationship with the atmospheric circulation and sea surface temperature [J]. Climatic Environ. Res. (in Chinese), 14 (1): 45–53, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2009.01.05.
- Karl T R, Arguez A, Huang B Y, et al. 2015. Possible artifacts of data biases in the recent global surface warming hiatus [J]. Science, 348 (6242): 1469–1472, doi:10.1126/science.aaa5632.
- Knight J R, Allan R J, Folland C K, et al. 2005. A signature of persistent natural thermohaline circulation cycles in observed climate [J]. Geophys. Res. Lett., 32 (20): L20708, doi:10.1029/2006GL026242.
- Knight J, Kennedy J J, Folland C, et al. 2009. Do global temperature trends over the last decade falsify climate predictions? [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 90 (8): S22–S23.
- 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.
- Lee S K, Park W, Baringer M O, et al. 2015. Pacific origin of the abrupt increase in Indian Ocean heat content during the warming hiatus [J]. Nature Geosci., 8 (6): 445–449, doi:10.1038/ngeo2438.
- Le Page M. 2013. No end to the warming [J]. New Sci., 220 (2946): 34–38, doi:10.1016/S0262-4079(13)62854-7.
- Levitus S, Antonov J I, Boyer T P, et al. 2012. World ocean heat content and thermosteric sea level change (0–2000 m), 1955–2010 [J]. Geophys. Res. Lett., 39 (10): L10603, doi:10.1029/2012GL051106.
- Li J P, Sun C, Jin F F. 2013. NAO implicated as a predictor of Northern Hemisphere mean temperature multidecadal variability [J]. Geophys. Res. Lett., 40 (20): 5497–5502, doi:10.1002/2013GL057877.
- Liu Z Y. 2012. Dynamics of interdecadal climate variability: A historical perspective [J]. J. Climate, 25 (6): 1963–1995, doi:10.1175/2011JCLI3980.1.
- Luo J J, Sasakia W, Masumoto Y. 2012. Indian Ocean warming modulates Pacific climate change [J]. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 109 (46): 18701–18706, doi:10.1073/pnas.1210239109.
- Maher N, Sen Gupta A, England M H. 2014. Drivers of decadal hiatus periods in the 20th and 21st centuries [J]. Geophys. Res. Lett., 41 (16): 5978–5986, doi:10.1002/2014GL060527.
- Mantua N J, Hare S R, Zhang Y, et al. 1997. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 78 (6): 1069–1079, doi:10.1175/1520-0477(1997)078<1069:APICOW>2.0.CO;2.
- Marotzke J, Forster P M. 2015. Forcing, feedback and internal variability in global temperature trends [J]. Nature, 517 (7536): 565–570, doi:10.1038/nature14117.
- McGregor S, Timmermann A, Stuecker M F, et al. 2014. Recent Walker circulation strengthening and Pacific cooling amplified by Atlantic warming [J]. Nature Climate Change, 4 (10): 888–892, doi:10.1038/nclimate2330.
- Meehl G A, Hu A X, Arblaster J M, et al. 2013. Externally forced and internally generated decadal climate variability associated with the Interdecadal Pacific Oscillation [J]. J. Climate, 26 (18): 7298–7310, doi:10.1175/JCLI-D-12-00548.1.
- Meehl G A, Teng H Y, Arblaster J M. 2014. Climate model simulations of the observed early-2000s hiatus of global warming [J]. Nature Climate Change, 4 (10): 898–902, doi:10.1038/nclimate2357.

- Met Office. 2013a. The recent pause in global warming (1): What do observations of the climate system tell us? [R]. IPCC Fifth Assessment Report, 27pp.
- Met Office. 2013b. The recent pause in global warming (2): What are the potential causes? [R]. IPCC Fifth Assessment Report, 22pp.
- Otterå O H, Bentsen M, Drange H, et al. 2010. External forcing as a metronome for Atlantic multidecadal variability [J]. *Nature Geosci.*, 3 (10): 688–694, doi:10.1038/ngeo955.
- Palmer M D, Roberts C D, Balmaseda M, et al. 2015. Ocean heat content variability and change in an ensemble of ocean reanalyses [J]. *Climate Dyn.*, doi:10.1007/s00382-015-2801-0.
- Paolo F S, Fricker H A, Padman L. 2015. Volume loss from Antarctic ice shelves is accelerating [J]. *Science*, 348 (6232): 327–331, doi:10.1126/science.aaa0940.
- Peings Y, Magnusdottir G. 2014. Forcing of the wintertime atmospheric circulation by the multidecadal fluctuations of the North Atlantic Ocean [J]. *Environ. Res. Lett.*, 9 (3): 034018, doi:10.1088/1748-9326/9/3/034018.
- Risbey J S, Lewandowsky S, Langlais C, et al. 2014. Well-estimated global surface warming in climate projections selected for ENSO phase [J]. *Nature Climate Change*, 4 (9): 835–840, doi:10.1038/nclimate2310.
- Roberts C D, Palmer M D, McNeill D, et al. 2015. Quantifying the likelihood of a continued hiatus in global warming [J]. *Nature Climate Change*, 5 (4): 337–342, doi:10.1038/nclimate2531.
- Robson J, Hodson D, Hawkins E, et al. 2014. Atlantic overturning in decline? [J]. *Nature Geosci.*, 7 (1): 2–3, doi:10.1038/ngeo2050.
- Schmidt G A, Shindell D T, Tsigaridis K. 2014. Reconciling warming trends [J]. *Nature Geosci.*, 7 (3): 158–160, doi:10.1038/ngeo2105.
- Semenov V A, Latif M, Dommengat D, et al. 2010. The impact of North Atlantic–Arctic multidecadal variability on Northern Hemisphere surface air temperature [J]. *J. Climate*, 23 (21): 5668–5677, doi:10.1175/2010JCLI3347.1.
- Smith S J, Edmonds J, Hartin C A, et al. 2015. Near-term acceleration in the rate of temperature change [J]. *Nature Climate Change*, 5 (4): 333–336, doi:10.1038/nclimate2552.
- 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.
- 宋斌, 智协飞, 胡耀兴. 2015. 全球变暖停滞的形成机制研究进展 [J]. *大气科学学报*, 38 (2): 145–154. Song Bin, Zhi Xiefei, Hu Yaoping. 2015. A review of recent studies on global warming hiatus [J]. *Trans. Atmos. Sci.* (in Chinese), 38 (2): 145–154, doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20150105002.
- Song Y, Yu Y Q, Lin P F. 2014. The hiatus and accelerated warming decades in CMIP5 simulations [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 31 (6): 1316–1330, doi:10.1007/s00376-014-3265-6.
- Steinman B A, Mann M E, Miller S K. 2015. Atlantic and Pacific multidecadal oscillations and Northern Hemisphere temperatures [J]. *Science*, 347 (6225): 988–991, doi:10.1126/science.1257856.
- Tollefson J. 2013. Climate change: The forecast for 2018 is cloudy with record heat [J]. *Nature*, 499 (7457): 139–141, doi:10.1038/499139a.
- Tollefson J. 2014. Climate change: The case of the missing heat [J]. *Nature*, 505 (7483): 276–278, doi:10.1038/505276a.
- Trenberth K E, Fasullo J T, Branstator G, et al. 2014. Seasonal aspects of the recent pause in surface warming [J]. *Nature Climate Change*, 4 (10): 911–916, doi:10.1038/nclimate2341.
- Wang D X, Liu Z Y. 2000. The Pathway of the interdecadal variability in the Pacific Ocean [J]. *Chinese Science Bulletin*, 45 (17): 1555–1561, doi:10.1007/BF02886211.
- Wang D X, Wang J, Wu L X, et al. 2003. Relative importance of wind and buoyancy forcing for interdecadal regime shifts in the Pacific Ocean [J]. *Sci. China Ser. D*, 46 (5): 417–427, doi:10.1360/03yd9037.
- Wang D X, Wang C Z, Yang X Y, et al. 2005. Winter Northern Hemisphere surface air temperature variability associated with the Arctic Oscillation and North Atlantic Oscillation [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 32 (16): L16706, doi:10.1029/2005GL022952.
- 王绍武, 罗勇, 唐国利, 等. 2010. 近 10 年全球变暖停滞了吗? [J]. *气候变化研究进展*, 6 (2): 95–99. Wang Shaowu, Luo Yong, Tang Guoli, et al. 2001. Does the global warming pause in the last decade: 1999–2008? [J]. *Adv. Climate Change Res.* (in Chinese), 6 (2): 95–99, doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2010.02.004.
- 王绍武, 罗勇, 赵宗慈, 等. 2013. 全球变暖的科学 [M]. 北京: 气象出版社, 18–20. Wang Shaowu, Luo Yong, Zhao Zongci, et al. 2013. *The Sciences of Global Warming* (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 18–20.
- 王绍武, 罗勇, 赵宗慈, 等. 2014. 全球变暖的停滞还能持续多久? [J]. *气候变化研究进展*, 10 (6): 465–468. Wang Shaowu, Luo Yong, Zhao Zongci, et al. 2014. How long will the pause of global warming stay again? [J]. *Adv. Climate Change Res.* (in Chinese), 10 (6): 465–468, doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2014.06.011.
- Wu L X, Liu Z Y, Li C, et al. 2007. Extratropical control of recent tropical Pacific decadal climate variability: A relay teleconnection [J]. *Climate Dyn.*, 28 (1): 99–112, doi:10.1007/s00382-006-0198-5.
- Yang H J, Liu Z Y. 2005. Tropical-extratropical climate interaction as revealed in idealized coupled climate model experiments [J]. *Climate Dyn.*, 24 (7–8): 863–879, doi:10.1007/s00382-005-0021-8.
- 杨修群, 朱益民, 谢倩, 等. 2004. 太平洋年代际振荡的研究进展 [J]. *大气科学*, 28 (6): 979–992. Yang Xiuqun, Zhu Yimin, Xie Qian, et al. 2004. Advances in studies of Pacific decadal oscillation [J]. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 28 (6): 979–992, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2004.06.15.
- Yang X Y, Huang R X, Wang D X. 2007. Decadal changes of wind stress over the southern ocean associated with Antarctic ozone depletion [J]. *J. Climate*, 20 (14): 3395–3410, doi:10.1175/JCLI4195.1.
- Yao S L, Huang G, Wu R G, et al. 2016. The global warming hiatus—A natural product of interactions of a secular warming trend and a multi-decadal oscillation [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 123 (1–2): 349–360, doi:10.1007/s00704-014-1358-x.
- Yu L, Furevik T, Otterå O H, et al. 2015. Modulation of the Pacific decadal oscillation on the summer precipitation over East China: A comparison of observations to 600-years control run of Bergen Climate Model [J]. *Climate Dyn.*, 44(1–2): 475–494, doi:10.1007/s00382-014-2141-5.