

徐一丹, 李建平, 汪秋云, 等. 全球变暖停滞的研究进展回顾[J]. 地球科学进展, 2019, 34(2): 175-190. DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2019.02.0175. [Xu Yidan, Li Jianping, Wang Qiuyun, et al. Review of the research progress in global warming hiatus[J]. Advances in Earth Science, 2019, 34(2): 175-190. DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2019.02.0175.]

全球变暖停滞的研究进展回顾*

徐一丹¹, 李建平^{1*}, 汪秋云¹, 林霄沛²

(1. 北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院, 北京 100875; 2. 中国海洋大学物理海洋教育部重点实验室, 青岛海洋科学与技术国家实验室, 山东 青岛 266100)

摘要:1998—2012年, 全球平均地面增温速率较之前明显趋缓, 出现全球变暖停滞现象, 该现象的成因与机制是当前气候变化研究的一个热点领域。主要从外部强迫和内部变率2个角度回顾全球变暖停滞产生机制的研究进展。从气候系统外部强迫影响来说, 全球变暖停滞主要受到太阳活动、火山爆发、气溶胶以及平流层水汽等的影响。从气候系统内部调控作用来看, 全球增温速率减缓主要受到太平洋、大西洋、印度洋和南大洋自然变率以及相应的热量再分配过程的影响。全球变暖停滞期间气候系统内部能量并没有减少, 其中一部分能量被转移并储存在了海洋中深层, 从而对全球增温减缓产生影响。同时, 重点回顾了针对部分耦合强迫作用的“起搏器”试验, 该类试验是研究全球变暖停滞的特征、成因及机制的有力手段。此外, 也总结了全球变暖停滞现象对气候系统能量收支平衡、资料、模拟以及相关政策制定等方面带来的挑战, 展望了未来的研究重点。

关键词:全球变暖停滞; 外部强迫; 内部变率; 能量; “起搏器”试验

中图分类号: P43

文献标志码: A

文章编号: 1001-8166(2019)02-0175-16

1 引言

自工业革命以来, 全球温室气体浓度持续加速升高, 气候系统能量收支不平衡, 全球变暖不断加剧。全球变暖与人类生活、社会发展息息相关, 一直受到世界各国的高度关注, 其伴随的海平面升高、极地海冰消退、海洋增温以及极端天气气候事件爆发频率增加等问题在气候变化研究中更是极为重要。自19世纪以来, 全球平均地面气温大约增加了1℃, 20世纪全球平均地面气温大约增加0.75℃, 20世纪后半叶, 温室气体造成平均每10年增温约0.13℃^[1]。20世纪以来全球温度的整体变化特征呈现出同温

室气体增加类似的增长趋势, 然而20世纪90年代末至21世纪初, 全球平均地面气温增温速率趋于0(甚至为负)(图1^[2]), 与CO₂浓度持续增长不一致, 全球CO₂不能解释这一时期的温度变化特征。过去100年还曾发生过2次类似增温停滞现象, 降温的时间尺度约为30年。Smith等^[3]最先报导自1998年之后全球地面气温的增温趋势不明显, 之后很多媒体和资料分析指出自1998年后全球气温不再升温, 甚至出现“变冷”^[4]。Easterling等^[5]通过一系列20世纪和21世纪未来情景预测的模拟试验及观测对比分析, 指出21世纪初的10~20年全球平均地面气温表现为无趋势甚至稍微变冷的趋势。Knight等^[6]

收稿日期: 2018-09-14; 修回日期: 2018-12-07.

* 基金项目: 国家重点研发计划项目“外部强迫和内部变率在全球变暖停滞中的作用”(编号: 2016YFA0601801); 海洋局国际合作项目“太平洋—印度洋与亚洲季风的相互影响”(GASI-IPOVAI-03)资助。

作者简介: 徐一丹(1992-), 女, 河南宝丰人, 博士研究生, 主要从事动力气象学研究. E-mail: 201731490004@mail.bnu.edu.cn

* 通信作者: 李建平(1969-), 男, 山西山阴人, 教授, 主要从事气候动力学与可预报性、季风、环流模及其影响等研究。

E-mail: ljp@bnu.edu.cn

的分析指出,自 20 世纪 90 年代末以来全球增温趋势为每 10 年增温($+0.07 \pm 0.07$) $^{\circ}\text{C}$,远小于 1979—2005 年的每 10 年升温 0.18 $^{\circ}\text{C}$ 的趋势。Kerr^[7]在 *Science* 上报道了这些研究,之后上述现象被称为全球变暖停滞(又称全球变暖趋缓/减缓/减速、全球变暖暂停等, global warming hiatus/slow down/pause)。Medhaug 等^[8]2017 年指出,全球变暖停滞主要指 1998—2012 年全球平均地面气温呈现较弱的增温或者变冷的趋势。联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第五次评估报告(Fifth Assessment Report, AR5)^[1]中指出,1998—2012 年全球变暖速率为每 10 年 0.05 $^{\circ}\text{C}$ ($-0.05 \sim 0.15$ $^{\circ}\text{C}$),而在 1951—2012 年,全球变暖速率则为每 10 年 0.12 $^{\circ}\text{C}$ ($0.08 \sim 0.14$ $^{\circ}\text{C}$)^[9],全球变暖停滞现象是确实存在的气候变化事实。前人研究表明,从 1910 年开始,全球增温速率分为 4 个阶段,分别是 1910—1940 年和 1976—1998 年的全球加速增温阶段,以及 1940—1975 年和 1998—2012 的全球变暖停滞阶段^[2,8~12],全球地面气温呈现出明显的多年代际变化特征^[10,13~15]。

全球变暖停滞现象的出现,与之前普遍认为的全球平均温室气体浓度迅速增加、全球迅速增温这一气候变化“新常态”相悖,立即引起气候变化领域的高度重视和广泛研究讨论。2011—2014 年 *Nature* 关于全球变暖停滞的文章多达 30 篇,2014 年 *Nature* 将全球变暖停滞列为年度十大科学研究前沿之一^[16],研究全球变暖停滞的重要性和必要性不言而喻。全球增温速率的变化关系到粮食产量、极端天气、气候变化和自然灾害等诸多方面,深入透彻地研究全球变暖停滞的驱动因子及影响,对于理解和掌握气候系统长期温度变化趋势特征及其原因具有十分重要的意义,同时也是预测未来气候变化的关键之一。前人已经对造成全球变暖停滞现象原因的一系列相关研究进行了相应的回顾^[17,18],然而对于外部强迫及内部变率的回顾上,仍需要进一步对已有研究进行深入归类及有机结合。本文通过对全球变暖停滞相关的研究进展以及模式气候系统模拟试验的回顾,对全球变暖停滞现象的研究现状、存在的问题进行回顾总结并对下一步研究工作进行展望。

前人对全球变暖停滞进行了一系列研究及归因分析,总体来说,关于全球变暖停滞的动力学解释主要归因为 2 个方面:外部强迫和内部变率。

2 外部强迫的影响

外部强迫对全球变暖停滞是有重要影响的,其

中对最近一次全球变暖停滞现象可能有影响的外部强迫因子包括太阳活动、气溶胶、火山活动和平流层水汽等。

2.1 太阳活动

太阳辐射变化是影响全球地面气温变化的重要因子。当太阳辐射增加时全球地面气温升高^[19],反之太阳活动的减弱使全球增温趋缓^[20,21]。Kaufmann 等^[22]指出,2002—2007 年太阳 11 年活动周期处于弱相位,与 1997—2002 年相比,太阳辐射量减少 0.18 W/m^2 ,造成 1999—2008 年全球增温速率趋缓^[22,23]。

然而,Zhou 等^[24~26]研究认为太阳周期性变化对全球变暖停滞的贡献较小。他们在研究全球温度对太阳周期的响应时指出,假设长期太阳强迫和周期性太阳强迫具有同样的空间型,太阳强迫响应的多年代际趋势对过去 150 年全球海表面温度(Sea Surface Temperature, SST)增温的贡献不足 1/4。IPCC 指出,与 1750 年相比,总太阳辐射的变化只对 2011 年的总辐射强迫做出了约 2% 的贡献^[27]。以上研究表明,太阳活动对全球变暖停滞的作用还有待进一步的认识。

2.2 气溶胶和火山活动

气溶胶是影响全球地面气温变化的另一个重要因子。从直接效应来看,气溶胶能够散射和吸收入射的太阳光,减少到达地面的短波辐射。从间接效应来看,气溶胶通过与云的微物理作用,使云凝结核增多,云层变厚,云生命周期增长,通过反射和折射作用减少到达地面的短波辐射,从而影响区域甚至全球的辐射效应,影响海洋及陆地深对流云潜热释放的生命周期以及垂直分布,进而在一定程度上缓解全球增温速率^[28~30]。

火山爆发^[31]后的若干年内,平流层火山气溶胶的强迫作用对气候有很大影响^[1,32]。1981 年墨西哥厄·奇冲(El Chichón)火山和 1991 年菲律宾皮纳图博(Pinatubo)火山爆发后,平流层液相硫酸盐气溶胶含量增多,导致平流层温度升高而对流层则产生降温效应^[33~36]。火山爆发后的 1~2 年平流层温度恢复正常,而由于海洋热惯性较大,对流层的降温效应通常持续 8~10 年^[37~39],火山爆发对抑制对流层年代际增温有着重要作用。Santer 等^[38]指出,耦合模式第五次比较计划(Coupled Model Intercomparison Project Phase 5, CMIP5)中的模式未能模拟出同观测一致的全球变暖停滞现象,原因是没有考虑 1999 年后小火山爆发的影响。实际大气中,2000—2009 年 17 个小火山爆发事件使平流层气溶胶光学厚度

增加了4%~7%,这对全球增温速率的影响不容忽视。2008—2011年小火山爆发产生的辐射强迫为 -0.11 W/m^2 ($-0.15 \sim -0.08 \text{ W/m}^2$),强度大约是1999—2002年火山气溶胶辐射强迫的2倍^[1]。2000年以来,由于平流层气溶胶含量的变化所引起的辐射强迫变化为 -0.1 W/m^2 。热带地区火山爆发产生的气相硫化物(以 SO_2 为主)穿过对流层顶到达平流层,通过进一步氧化使得平流层颗粒物含量在短时间内增加,进而气溶胶光学厚度增加,入射的太阳短波辐射反射回太空,产生辐射冷却效应^[40-42]。

人类活动(以燃煤为主)产生的硫化物排放增加使得2002年以后的绝对增温速率变为 0.06 W/m^2 ,而1990—2002年硫排放偏低时,全球增温速率为 0.19 W/m^2 ,硫排放造成的冷效应能够抵消温室气体产生的增温效应,造成增温趋缓^[22, 43, 44]。

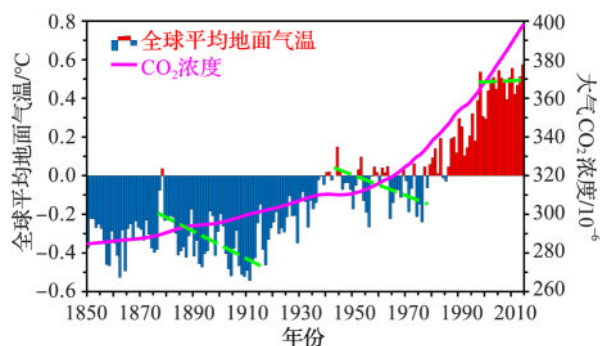


图1 1850—2014年全球平均温度变化与全球大气 CO_2 浓度曲线^[2]

Fig. 1 The global mean temperature and global atmospheric CO_2 concentration from 1850 to 2014^[2]

绿色虚线分别表示3个气温停滞阶段(1877—1913年, 1944—1976年以及1998—2014年的线性趋势)

The green dashed lines show three linear trends for the periods of 1877-1913, 1944-1976 and 1998-2014, respectively

2.3 平流层水汽

平流层水汽是对地球温室效应有重要影响的主要气体之一,其变化对全球平均地面气温有重要调控作用,平流层水汽增加造成平流层温度降低,对流层温度升高,反之亦然。研究表明,2000—2009年平流层水汽含量较之前降低了10%,全球增温速率相较之前只考虑 CO_2 和其他温室气体作用时降低了约25%,1980—2000年平流层水汽增加,全球年代际增温速率增加了约30%,平流层水汽含量的降低对全球变暖速率的年代际变化起着重要的调控作用,是全球变暖停滞出现的原因之一^[45]。

3 内部变率的影响

与外部强迫相比,20世纪90年代末以来的全球变暖停滞受气候系统内部变率复杂的动力热力过程影响可能更大。海洋占地球表面积的71%,具有较大的热容量,以及比大气更为缓慢的动力过程,对全球温度变化以及气候系统能量的转化与储存有着极为重要的作用。对内部变率的研究主要包括热带太平洋对全球温度变率的影响、大西洋对北半球温度的驱动、能量在全球变暖停滞期间的循环与再分配。

为了探究气候系统内部变率与全球温度变化空间型之间的关系究竟如何,Dai等^[14]对1920—2013年气候系统内部变率进行经验正交函数(Empirical Orthogonal Function, EOF)分析时指出,EOF第一模态(EOF1)与太平洋十年振荡(Pacific Decadal Oscillation, PDO; Interdecadal Pacific Oscillation, IPO)^[46-51]的时间序列以及空间型较为一致,二者的相关性达0.77以上,EOF第四主模态(EOF4)则与大西洋多年代际振荡(Atlantic Multidecadal Oscillation, AMO)相似,EOF1与EOF4能够解释88%的全球平均温度年代际变化,IPO是全球温度变率的主导模态,AMO也对全球温度变率有着显著贡献。EOF的第二模态(EOF2)和第三模态(EOF3)主要解释了区域变率,对全球平均温度变化的贡献较小。

3.1 太平洋对全球温度变率的作用

太平洋地区有着复杂的年际及年代际信号,其表面风场、气压场等气象要素对区域乃至全球的温度变化、能量循环有着重要的影响。探究太平洋海气相互作用、环流变化等对于理解过去区域及全球温度变化趋势,预测未来温度变化特征十分重要。

3.1.1 太平洋气象要素的作用与机制

赤道中东太平洋海温是影响全球变暖停滞的重要因素之一,Kosaka等^[52]通过在耦合模式中重建观测的赤道东太平洋SST进行太平洋—全球大气—历史试验(POGA-H),模拟出与观测一致的印度洋、南大西洋和太平洋温度重建区外的温度趋势空间型,重现了20世纪90年代末以来的变暖停滞以及1970年以来全球温度的年代际趋势(图2),他们指出,占地球表面积约8.2%的赤道东太平洋与1970—2012年全球年平均温度变化之间的相关系数达到0.97,赤道东太平洋海表气温每变化 1°C ,全球地面气温就随之改变 0.29°C ,2002—2012年由热带太平洋引起全球气温变化与20世纪90年代相比降低了 0.15°C 。

热带太平洋海温冷却减缓了全球的增温趋势,更对类 La Niña 年代际趋势变化的产生有着重要作用。热带太平洋对全球温度变化的影响表明,全球变暖停滞是气候系统内部变率的一部分^[52]。

IPO 作为年代际太平洋海温场的主导模态,与(多)年代际全球增温趋势的变化关系十分紧密,20 世纪中期以及 21 世纪初以来的 2 次变暖停滞都与 IPO 的负位相时期相对应^[11,15,53-55]。IPO 表现为类 El Niño 的低频气候变率模态,其冷相位时期,赤道太平洋冷却,信风增强。1992—2011 年,全球温度变化趋势由加速增温过渡到变暖停滞,期间太平洋信风明显增强, Hadley 环流和 Walker 环流同时增强,中纬度地区海平面气压 (Sea Level Pressure, SLP) 异常偏高^[15]。England 等^[11]指出,太平洋风应

力增强使海面高度趋势以及海洋环流发生变化:赤道潜流加速,信风增强驱动埃克曼(Ekman)流向两极输送增强,进而产生的上升流造成热带东太平洋冷水上翻冷却表层海水;在中西太平洋地区,赤道密度跃层质量及能量辐合增强,相应的赤道潜流加速^[15,56,57];赤道密度跃层的辐合增强进一步驱使中西太平洋内部获得净热增量,而增强的上升流则造成东太平洋表面冷却^[11]。太平洋 SST 也因此发生改变,随着信风增强,赤道上升流以及副热带涡旋增强,西太平洋暖池增温,太平洋西边界增温,中东赤道太平洋地区冷却同时向极延伸至北美西海岸沿岸,南北赤道洋流增强,同时北太平洋副热带涡旋增强^[11](图 3)。SST 的变化趋势进而影响全球地面气温变化趋势。

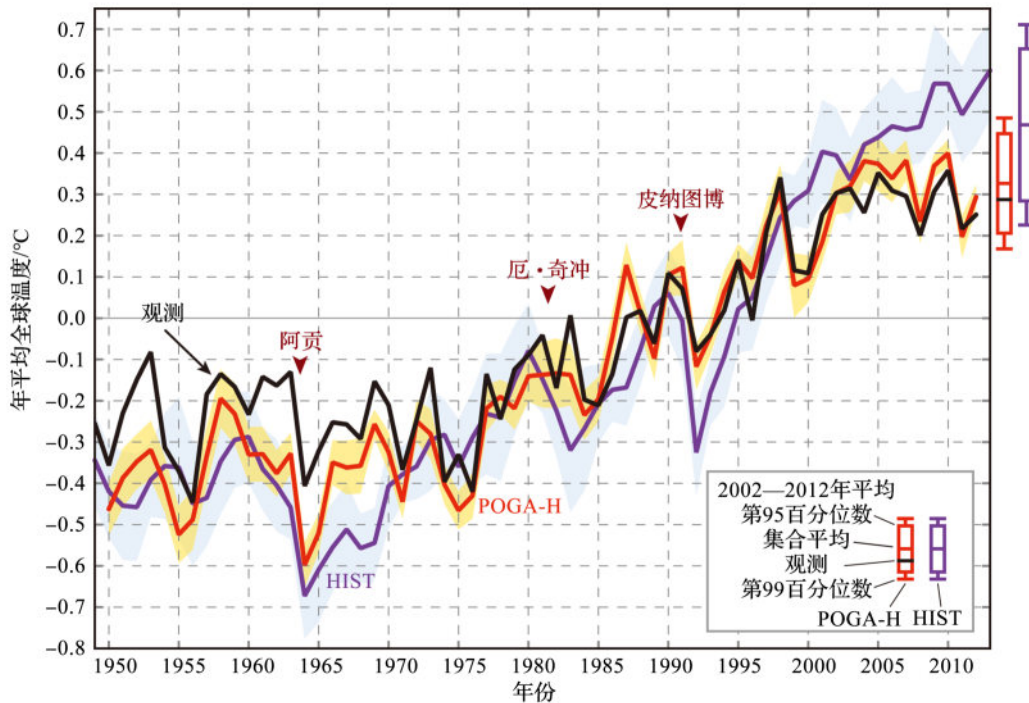


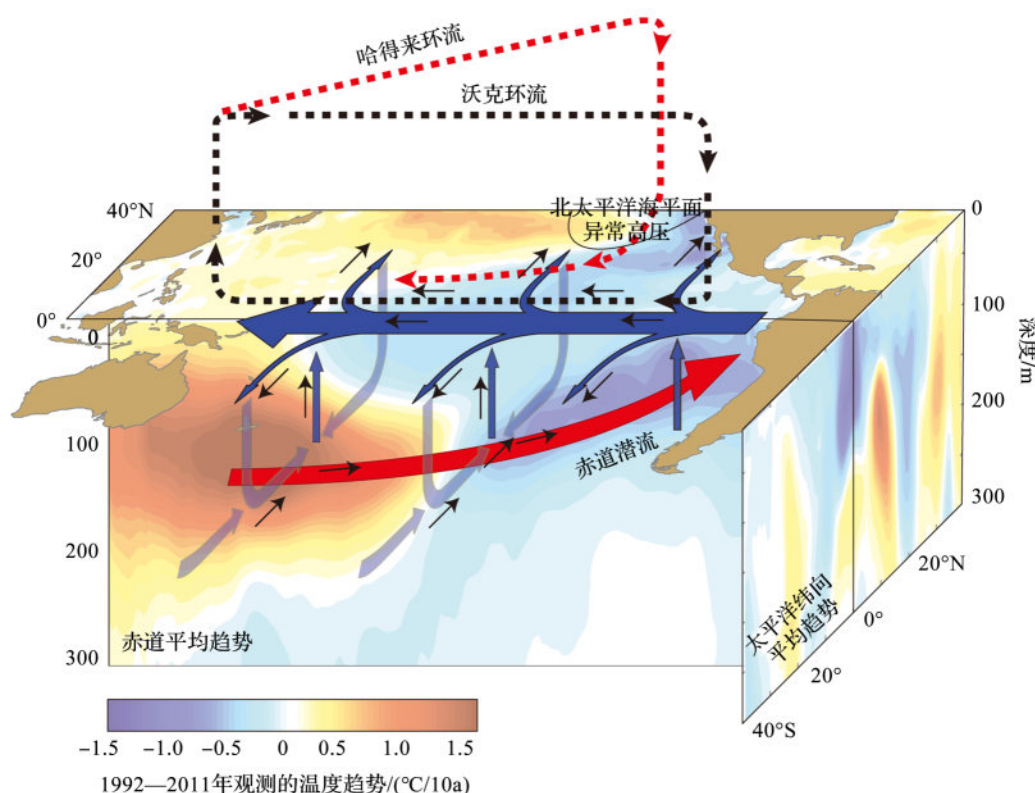
图 2 基于观测、历史试验(HIST)以及太平洋—全球大气—历史试验(POGA-H)的年平均全球温度变化趋势^[52]

Fig. 2 Annual mean global temperature trends based on observations and simulated (HIST and POGA-H)^[52]

此外,赤道中东太平洋 SST 的变化与该地区的冷舌模态长期变冷也有关。冷舌模态的持续变冷对太平洋海温场发挥着重要作用^[58-60]。在全球变暖背景下,假设均一增暖,由于海表温度先变暖而海洋次表层温度还未变化,因此会导致垂直海温异常梯度增强,在气候态的上翻流的作用下产生冷平流,从而导致冷舌区相较其他区域变冷。冷舌区变冷后,使得向极海温异常梯度增强,在气候态径向海流的作用下,会导致径向冷平流的产生,进一步

使得冷舌区变冷。而冷舌区变冷使得温跃层抬升,产生向西的异常半地转流,伴随着纬向的气候态海温梯度,产生纬向的冷平流,更进一步导致冷舌区变冷。与此同时,大气对冷舌区变冷的响应,会产生风场的辐散,辐散的风场导致 Ekman 流的辐散,使得总的海流辐散,从而导致上翻流异常增强,伴随气候态的垂直向温差,产生垂直向冷平流,再进一步导致冷舌区变冷。

全球温度变化与 ENSO (El Niño-Southern

图3 1992—2011年太平洋温度趋势及海气环流的原理图^[11]Fig. 3 Schematic of the trends in temperature and ocean-atmosphere circulation in the Pacific over 1992-2011^[11]

Oscillation)^[61~63]信号同样有关,但相关性主要表现在年际尺度上,且热带和热带外地区的响应并不一致。Knight等^[6]分析指出,当考虑ENSO作用时1999—2008年全球温度变化幅度是每10年增温($+0.08 \pm 0.07$)°C,而去除ENSO信号后温度变化趋势为每10年(0.00 ± 0.05)°C。Wang等^[64]研究指出,全球平均地面气温与热带太平洋SST变率在年际尺度上的相关性较高,而在年代际尺度上的相关性则较弱,地面气温对热带太平洋变率的响应在热带地区较强,而在热带外地区的响应较弱。

3.1.2 其他海区对太平洋气象要素的影响

1992—2011赤道太平洋纬向风趋势变化与太平洋SST驱动机制并不一致,受其他海区及气象要素的影响较大。McGregor等^[65]指出,20世纪90年代大西洋迅速增温,使太平洋和大西洋SLP呈现跷跷板型分布特征,从而引起太平洋Walker环流增强,赤道信风异常增强,进而造成东太平洋变冷,PDO由正位相变为负位相,北美地区降水趋势发生变化,热带西太平洋(Western Tropical Pacific, WTP)海平面升高^[65~68]。太平洋对20世纪90年代北大西洋增温的气候响应部分抵消了全球增温效应,全球变暖停滞是太平洋与大西洋共同作用的结果^[65,69,70]。

自20世纪90年代初以来,年代际及多年代际WTP海平面变率显著增强,而IPO的强度并未相应增加,因此IPO无法解释WTP海平面迅速上升这一现象^[71]。也有研究认为,大西洋通过复杂的海气相互作用及大气遥相关对西太平洋SST产生影响,进而影响全球温度变化。Sun等^[72]在研究中指出,AMO使海表面异常增温,从而在北大西洋上空出现异常上升气流及高层辐散,北大西洋高空辐散气流进而向北太平洋地区辐合,造成北太平洋异常高压并伴随补偿下沉,使阿留申低压以及北太平洋热带外(Subtropical North Pacific, SNP)西风减弱(图4a)。西风减弱进一步通过风—蒸发—海温(Wind-Evaporation-SST, WES)机制使得SNP地区海表面增温,这一增温使表层风由热带向SNP海表面暖中心汇聚,并导致WTP低压及异常气旋性环流生成。由于SST—SLP—云—长波辐射的正反馈作用,AMO对WTP异常低压的遥相关作用进一步使西太平洋SST发展形成暖异常(图4b)^[72,73]。

印度洋通过信风作用以及Walker环流的变化对太平洋年代际产生跨洋盆影响,当印度洋SST趋势年代际作用较强时,与海洋大陆强辐合相关的表

层纬向东风,使赤道温跃层加深^[74,75]。与此同时,WTP的纬向西风通过使东太平洋海洋温跃层变浅,进而抑制赤道东太平洋 SST 的增温趋势^[76]。影响赤道 SST 和表层纬向风趋势的跨洋盆作用,能够解释印度洋 SST 的年代际变化。Nieves 等^[77]研究指出,印度洋与太平洋上层海水(0~300 m)的相互作用对过去 20 年全球温度变化有重要作用,也是最近一次全球变暖停滞现象出现的原因之一,2003—2013 年,太平洋海域 100 m 层的降温与印度洋和太平洋海域 100~300 m 层的变暖有关。不同洋盆的相互作用同样决定了全球变暖停滞的季节不一致性,从季节尺度来看,全球变暖停滞主要集中于北

半球冬季,而北半球夏季由于受辐射效应的影响,增温趋势较明显^[15,52,78,79]。

前人通过一系列数值模拟试验指出,全球温度对热带太平洋 SST 的响应是实际温度变化的 3~4 倍,热带太平洋 SST 变化引起的遥相关,使整个热带在变暖停滞时期增温趋缓,而热带印度洋以及热带大西洋则通过与热带太平洋相反的作用抵消这一冷效应^[80]。与此同时,1999 年以来 IPO 处于负位相,其引起的冷效应又反过来抵消了 50% 的外部强迫引起的印度洋增温,减缓了印度洋 SST 的增温趋势,从而印度洋 SST 冷却贡献了全球变暖停滞的 10%^[81]。

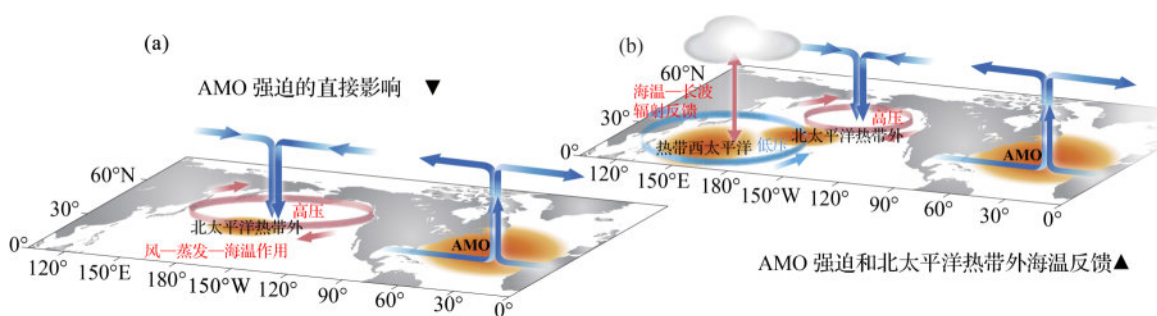


图 4 大西洋多年代际振荡远程调控西太平洋年代际变化的物理机制图^[72]

Fig. 4 Schematic diagram for the teleconnection between AMO and western tropical Pacific decadal variability^[72]

3.2 大西洋主要模态对北半球温度的作用

大西洋是全球年代际和多年代际变化的重要源地。在强调内部变率对全球变暖停滞的贡献时,来自北大西洋的作用不可忽视。Dai 等^[14]指出,EOF4 能够解释全球平均温度年代际变化,EOF4 主要反映了北半球的气温特征,包括北大西洋地区、AMO 部分时空分布以及与西太平洋涛动相关的地表气温空间型。Li 等^[10]研究指出,北大西洋海温对北半球气温有重要调控作用,在多年代际尺度上,北大西洋涛动(North Atlantic Oscillation, NAO)很可能是多年代际变率的一个重要驱动因子。NAO 作为北大西洋大气的主导模态,超前趋势的北半球平均温度(Detrended Northern Hemisphere mean surface Temperature, DNHT)及 AMO 大约 16 年(图 5)。但是由于目前观测资料长度相对有限,这个关系还需要进一步的模式和观测资料来验证。也有研究通过 CMIP5 中的 14 个模式验证了 NAO 和北半球温度之间存在的超前关系^[82]。海洋热惯性是北半球平均温度在年代际尺度上滞后 NAO 的主要原因,而 AMO 在 NAO 影响北半球平均温度这一过程中起到桥梁作用。基于 NAO 的线性模型对 1971

—2011 年北半球平均温度变化特征的后报结果与观测一致,因而他们指出由于近年来 NAO 的年代际减弱,于短时间内抵消了人类活动造成的增温,2012—2027 年北半球温度变化将呈现出增温趋缓的趋势^[10,73]。Keenlyside 等^[83]同样指出,北大西洋经向翻转流(Atlantic Meridional Overturning Circulation, AMOC)的减弱,引起全球变暖速率的趋缓,未来 10 年由于北大西洋及热带太平洋对人类活动造成增温的抵消作用,全球地面气温将继续呈现增温趋缓趋势。

NAO 通过驱动 AMOC 引起 AMO 的变化,AMO 再通过影响北大西洋三极子海温(North Atlantic Tripole, NAT)对 NAO 产生滞后的负反馈。基于这一机制,Sun 等^[73]建立了延迟振子模型:

$$\frac{d\text{NAO}(t)}{dt} = -\frac{\alpha}{C} \text{NAO}(t - \tau) - \frac{\text{NAO}(t)}{\beta C}, \quad (1)$$

式中: t 是时间, C 是气候系统有效热容的估算值, β 是阻尼系数, α 是 NAO 对 AMO 的强迫量级, τ 是 AMO 负反馈的延时。该延迟振子模型很好地解释了 NAO 准 60 年多年代际变率,它是帮助理解 NAO 多年代际变率物理机制的重要工具。

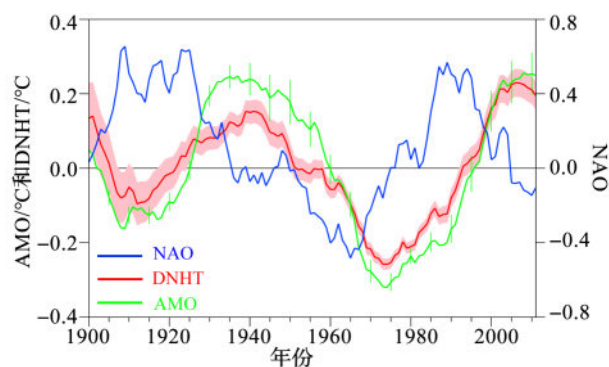


图5 1900—2011年北半球平均温度(DNHT)、北大西洋涛动(NAO)以及北大西洋多年代际振荡(AMO)指数^[10]

Fig. 5 DNHT, NAO, and AMO indices from 1900 to 2011^[10]

红线代表11年滑动平均的去趋势北半球平均温度,蓝线代表北大西洋涛动,绿线代表北大西洋多年代际振荡,粉色阴影表示使用100个实现估计北半球温度序列的2标准差不确定范围HadCRUT4,绿色垂线表示HadSST3数据集中AMO序列的2标准差不确定范围。The red line, blue line and green line shows the eleven year running means of DNHT, NAO and AMO indices, respectively. The pink shaded areas show the 2-sigma uncertainty ranges of the NHT series for the HadCRUT4 data set estimated using the 100 realizations. The vertical green line shows the 2-sigma uncertainty ranges of the AMO series for the HadSST3 data set

4 全球变暖停滞期间能量的储存与再分配

1998—2012年的变暖停滞期间,虽然地面气温变化增温趋势不明显,但气候系统的净辐射收入却明显增加,因此有必要分析气候系统中能量的储存和再分配过程。能量在气候系统中的储存与再分配既受到内部变率的作用,又受到外部强迫的影响。对于内部变率而言,目前研究主要关注的是能量在太平洋、大西洋、印度洋以及南大洋的转移和储存。研究表明,1999年PDO的相位变化引起太平洋海表风应力发生变化的同时,太平洋表面出现大量热亏损^[84],而全球海洋700 m以下热量明显增加,全球超过30%的热量储存在海洋700 m以下^[15,85]。热量转移并储存到了海洋的中深层,海洋整体变暖^[56,86]。

通过CCSM4未来情景预估试验,Meehl等^[85]研究了全球变暖停滞期间气候系统能量的转移,指出与非变暖停滞阶段相比,21世纪全球变暖停滞阶段热含量在海洋0~300 m减少60%,在海洋中层300~750 m增加18%,在750 m以下的深层海洋增加19%。2000—2009年气候系统 1 W/m^2 的净辐射输入^[87,88],

转移并主要储存在了海洋的中深层(图6)^[84,85]。从不同海区来看,热量主要在大西洋和南大洋的深层发生混合,而太平洋和印度洋300~750 m以及750 m以下都有明显的热沉降^[89]。Meehl等^[85]指出,全球变暖停滞期间气候系统能量循环的重要表现是海洋温跃层热吸收增强和深海热耗损减少。

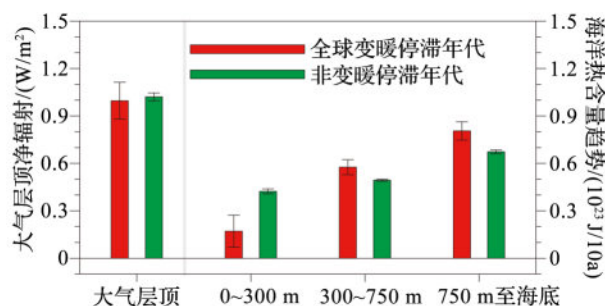


图6 大气层顶净辐射与海洋热含量^[85]

Fig. 6 Top-of-Atmosphere (TOA) net radiation and global ocean Heat-Content (HC)^[85]

图左:全球变暖停滞时期(红色)与非停滞时期(绿色)大气层顶净辐射变化趋势(正值表示进入气候系统的净辐射);图右:0~300 m, 300~750 m以及750 m至海底海洋热含量的年代际趋势
Left: Global linear trends for hiatus decades (red bars) and all other decades (green bars) for TOA net radiation (positive values denote net energy entering the system); Right: global ocean heat-content decadal trends for surface to 300 m, 300~750 m and 750 m-bottom ocean layers

Chen等^[90]在研究大西洋和南大洋深层海洋能量储存及传输时指出,20世纪末全球加速变暖时期,能量大部分储存在近地面,21世纪地面增温趋缓,能量更多转移到了海洋的中深层,其中,全球能量存储变化主要发生在大西洋300~1500 m和南大洋深层,与此同时,太平洋中海洋热含量(Ocean Heat Content, OHC)变化的主要特征是上层海洋(0~300 m层)呈现类La Niña型分布,且OHC主要在东西方向传播,全球变暖停滞与大西洋和南大洋海洋中深层OHC的年代际变化密切相关。他们指出,北大西洋副极地地区的盐度变化能够影响深水形成,最终引起海洋环流的变化以及热量向海洋中深层传输^[90]。21世纪初以及20世纪中期全球变暖停滞期间,北大西洋副极地地区盐度转变为正异常,同时迅速沿垂向输送至1~500 m,而在全球迅速增温时期,盐度表现为负异常,并与OHC的相位变换一致^[90]。盐度通过影响OHC的变化,进而影响全球地面增温趋势,并呈现周期振荡的特征,这与AMOC的演变有关:全球迅速增温时期,热带表层

水由于过度蒸发盐度变高,之后增强的 AMOC 将高盐水送往高纬度北大西洋副极地地区,高盐水向寒冷大气释放部分热量之后下沉,放出的热量使冰融化,造成副极地表层海水密度减小。经过几年时间,低密度水使 AMOC 过程减缓,减弱的 AMOC 继续将少量的热带高盐水向北传输,AMOC 随之进入反位相阶段^[90]。20 世纪 90 年代中期至 21 世纪初,AMOC 位于加速时期,全球一半的净辐射增加并在 AMOC 作用下储存至海洋深层^[91]。

上述研究均表明,不同大洋对不同深度 OHC 的变化有着重要影响,实际上也有研究指出,太平洋和大西洋 SST 的年代际主导模态对海洋 0~300 m 热含量变化的影响较为一致。Hu 等^[92]研究表明,IPO 和 AMO 可能对全球能量变化都有贡献,当 IPO 处于正位相时,0~100 m 层 OHC 以及全球平均地面气温增加,海洋次表层(100~300 m)热含量减少,当 IPO 位于负位相时期时则正好相反。AMO 对全球平均地面气温、0~300 m OHC 重新分配的贡献大小与 IPO 较为一致。此外,全球变暖停滞期间,跨洋盆作用在能量循环的过程中同样十分重要,热量在南北半球的分布也存在差异。WTP 次表层的异常暖水通过年代际印度尼西亚贯穿流的作用传输至印度洋^[93],对印度洋 100~300 m 深度 OHC 的增加有着重要影响^[77]。在 21 世纪全球变暖停滞期间,0~2 000 m OHC 异常具有明显的半球不对称性,75%~99% 的热量集中在赤道以南 30°~50°S^[94]。此外,也有研究指出潜热通量能够通过影响海洋热吸收进而影响全球温度变化。云增加导致进入气候系统的太阳辐射减少,进而海洋到大气传输的潜热增加,到达地面总的辐射通量减少,从而引起海洋热吸收减少,全球地面增温减缓^[95]。

从上述相关研究回顾可以看出,全球变暖停滞期间,学界关于海洋热吸收的观点尚不一致,不同大洋所起作用也不相同,大洋对能量的吸收与再分配的不同作用及不同大洋间的相互作用还有待进一步研究。此外,能量的变化很可能也与外部强迫有关^[86,96],前人在这方面主要分析了平流层臭氧、人类活动增温以及太阳辐射等方面的影响。前人指出,平流层臭氧损耗能够引起 50°S 附近风驱 Ekman 下降流增强,促使该区域的表层能量传输至海洋中深层^[86,97]。1955 年以来,全球海洋 3 000 m 以上 OHC 明显增加,模拟结果显示人类活动引起的增温能够导致与观测较为一致的 OHC 变化,然而太阳辐射的变化则对 OHC 的影响较小^[98]。目前关于外部

强迫对海洋热量吸收和再分配影响的研究还相对较少,为了增强对气候系统能量循环的深入理解,未来需要加强这方面的研究。

5 “起搏器”(Pacemaker)试验

大气环流模式(Atmospheric General Circulation Model, AGCM)与海洋—大气环流耦合模式(Coupled ocean-atmosphere General Circulation Model, CGCM)是模拟历史气候演变特征并预测未来气候变化的有效工具,在气候变化研究中发挥着重要作用^[99~102]。当前耦合模式模拟能力的提高,为我们验证理论假设提供了有力手段,然而,在模拟年代际全球变暖停滞时,CGCM 模拟的停滞发生时间与观测结果并不十分吻合^[54,85]。同时,对于研究全球变暖停滞来说,了解局部强迫因子的作用及其机制十分重要。然而耦合模式在研究局部强迫因子的贡献时存在较大局限性,因此,在对数值模拟方法进行不断改进与完善的过程中,学术界开展了局部耦合的“起搏器”(Pacemaker)试验^[11,52,69],用于局部强迫因子的贡献研究。这类试验以预设的风应力强迫、海温场以及热通量变化等局地大气—海洋反馈作用作为部分输入预设强迫,模式中的其他部分则实现海气的完全耦合,来考察局部强迫的作用。传统的 AGCM 模拟以指定的 SST 作为大气的边界条件,无法模拟实际气候系统中,潜热通量与 SST、降水与 SST 以及超前滞后相关等局地海气耦合过程,同样无法模拟季节尺度上的大尺度海气协变性(如 ENSO 与季风),因此“起搏器”试验的设计动机在于改进传统 AGCM 模拟的不足,凸显区域耦合的作用,可对研究现象变化及成因进行局部强迫因子的归因分析。“起搏器”的试验能够帮助我们得到与观测一致的海气能量平衡,以及气候驱动事件(如 ENSO)的时间顺序,同时,能够很好地模拟出热带东太平洋与热带及热带外的遥相关,帮助我们更准确地模拟局地海气耦合过程。与传统的 CGCM 相比,“起搏器”试验在耦合模拟的基础上进一步减小了模拟与观测之间的误差,能够更加准确地反映出局部驱动因子在气候系统中的作用。对于年代际气候变率的研究来说,“起搏器”试验能够帮助我们提高对观测机制、模式以及模式偏差的理解,从而提高对年代际气候变化的预测能力。结合对观测数据的诊断分析,“起搏器”试验有助于我们更好地理解影响全球温度变化的复杂机制。

在 CGCM 中设计“起搏器”试验的方法主要包

括:在 SST 驱动大气的区域指定 SST,并在其他区域进行平板或动态海洋模拟;允许指定 SST 外的区域进行耦合反馈;从而检验热力与动力耦合的相对重要性。前人在研究全球变暖停滞的过程中,已经开展了一系列“起搏器”试验。Kosaka 等^[52]通过 GFDL-CM2.1 耦合模式开展了历史试验(HIST),POGA-H 和太平洋—全球大气—控制试验(POGA-C),模拟 1970—2012 年全球地面气温变化。POGA 试验中,热带东太平洋 SST 重建为模式气候态叠加地表感热通量的历史辐射异常:

$$F = (1 - \alpha)F_* + \alpha(cD/\tau)(T' - T_*'), \quad (2)$$

式中: F 代表地表感热通量, α 代表缓冲系数, c 代表比热, D 代表混合层深度, τ 代表重建时间尺度,上角标(')代表异常,下角标(*)代表模式诊断值, T 代表 SST, T' 代表参考温度异常。

与全耦合的 HIST 试验相比,重建热带东太平洋 SST 的“起搏器”试验中得到了与全球平均地面气温较为一致的年代际趋势。POGA-H 试验模拟出了 1970 年以来全球平均地面气温的变化趋势,同时,在历史辐射和热带太平洋 SST 的共同强迫作用下,重现了 1998—2012 年的全球变暖停滞。England 等^[11]利用海洋模式和海气耦合气候模式进行的“起搏器”试验中,分别以月平均气候态风场以及 1992—2011 年观测的太平洋信风异常作为驱动因子,验证风驱环流增强与全球变暖停滞的关系。此外,赤道东(西)太平洋与热带及热带外地区的遥相关作用也在“起搏器”试验中得到充分体现^[65,72]。McGregor 等^[65]利用 1992—2011 年大西洋的 SST 作为强迫因子,进行 AGCM 和“起搏器”2 类试验,通过耦合太平洋平板海洋模型(Slab Ocean Model, SOM)的试验,在印度洋叠加海温气候态,验证逐年变化的大西洋 SST 在大气遥相关作用下对太平洋海温的影响。“起搏器”试验是帮助理解局部外部强迫以及气候系统内部变率对气候变化及全球变暖停滞作用的重要分析手段。

6 挑 战

全球变暖停滞现象的出现,使人们对全球变化有了更深入的探究与认识,同时提出了诸多新的挑战,下面简要介绍 4 个相关方面。

6.1 能量不平衡

Allan 等^[103]的分析指出,从大气层顶向下的净辐射通量来看,2001—2008 年的净辐射通量为 $(0.62 \pm 0.43) \text{ W/m}^2$,与之前 1986—2000 年的 $(0.34 \pm$

$0.67) \text{ W/m}^2$ 相比,大气获得的净辐射明显增多,而地面气温却没有增加,这一问题的出现,给全球变暖停滞现象的研究带来一定的质疑与争议。同时,大气层顶向下的辐射通量不平衡随着 El Niño 事件的发生而减少,随着 La Niña 的出现而增加^[104,105],气候系统的能量收支与赤道太平洋(多)年代际变率的关系与相互作用究竟如何也为能量学的讨论带来了新的挑战。人类活动产生的温室气体排放增加是气候变暖的主要原因,其造成的气溶胶排放增加又对全球变暖停滞产生重要影响,与温室气体产生的响应相比,大气层顶的辐射和全球地面气温两者与年代际尺度上的自然变率耦合度较小^[106],人类活动和自然变率之间存在非线性气候效应的反馈,但二者之间具体的反馈原理与机制尚不清楚。如何定量二者对全球能量循环的作用是气候变化研究领域亟待解决的又一个科学问题。

6.2 对观测和再分析资料的挑战

不同资料在校正过程中,由于量化标准及校正方法不同,造成太阳辐照度、大气层顶向下的净辐射通量等变化特征不一致,甚至差别很大,因此在使用不同资料探究全球温度变化趋势时,其分析结果存在较大的偏差,对分析和模拟全球变暖停滞带来困难^[87]。Karl 等^[107]在研究中指出,由于观测数据存在一定偏差,全球温度实际趋势变化明显高于 IPCC 报道所言,21 世纪以来的增温速率至少与 20 世纪后半叶的增温速率一样高。Cowtan 等^[108]也指出,之前在全球平均表面温度计算中没有考虑北极地区的温度变化。因此,资料本身的不确定性对全球变暖停滞问题的研究带来了挑战。

6.3 对数值模拟的挑战

根据 CMIP3 和 CMIP5 的模拟结果可知,大多数模式对全球变暖停滞现象的模拟能力十分有限。模式在重建气候变化时依赖于对各种过程的敏感性,而模式在对研究气候敏感性时仍然具有较大的不确定性,是模式模拟全球温度变化趋势与观测呈现不一致性的原因之一^[1],再加上全球变化的预测对温室气体和气溶胶排放情景的依赖较大,这些都对模式定量全球变暖停滞现象的驱动因子、物理机制及其预测预估提出了挑战。

6.4 对政策制定的挑战

IPCC 第 5 次评估报告对未来气候的预估显示,与 1850—1900 年相比,21 世纪末,在所有排放情景下(除 RCP2.6 以外),全球地面气温变化可能超过 1.5°C ^[1]。报告同时指出,尽管 1998—2012 年地面增

温趋势出现了这种趋缓,但气候系统很可能自 1998 年以来继续积累了热量,海平面也继续出现了上升^[1]。IPCC 报告指出,与 21 世纪初全球变暖停滞时期相反,2020 年内部气候变化将会造成比预期更高的增温,尽管辐射强迫仅造成 1.2 或 1.3 °C 的增温,全球温度变化仍将超过 1.5 °C,全球增温全球变暖停滞对《巴黎协定》1.5 °C 的影响可能较小^[109]。目前关于全球变暖停滞对全球 1.5 °C 气温变化的影响还没有更加深入系统的研究,未来需要加强相关的研究工作。全球温度变化具有年际到年代际的变化特征,同时也有区域特征,然而模式中的不同排放情景并不能完全准确地反映出实际气温在时间及区域尺度上的变化特征,受模型自身水平的限制,对制定政策的可信度带来挑战。

7 结论和讨论

全球变暖停滞是由外部强迫和气候系统内部变率共同作用所致。太阳活动的减弱、火山爆发、对流层平流层气溶胶排放的变化以及平流层水汽含量降低会对全球温度变化趋势产生不同程度的影响。从全球温度变化的时间变率及空间特征来看,外部强迫并非全球变暖停滞的主导因子,其对全球变暖停滞的直接贡献远远小于气候系统内部变率。全球变暖停滞更属于气候系统内部变率的一部分^[15],与赤道东太平洋的年代际冷却,信风增强、环流变化以及冷舌模态等的异常变化密切相关。同时,大西洋、印度洋通过海气相互作用对太平洋海洋变率产生影响。就北半球而言,来自大西洋的内部变率因子 NAO 超前北半球平均温度及 AMO 大约 16 年,对地面气温的年代际、多年代际变化有重要调控作用,气候系统的能量储存与再分配也是造成全球变暖停滞出现的重要因子。从能量角度来看,全球变暖停滞期间,气候系统的能量输入并未减少,大部分净辐射收入储存在太平洋次表层以及大西洋及南大洋的海洋中深层。此外,本文重点回顾了局部耦合强迫的“起搏器”试验,该类试验通过指定特征因子,对重建全球历史温度变化、预测未来增温趋势提供了有力手段。

此外,气候系统内部变率对全球温度的调制也会受到外部强迫的影响^[110~114]。人类活动和火山爆发产生的气溶胶能够解释 1860—2005 年 76% 的大西洋 SST 的多年代际变率^[110]。平流层火山气溶胶的区域变化以及对流层矿物、沙尘气溶胶对热带北大西洋的地面气温有着重要影响^[111,112]。1979—

2008 年,全球变暖以及 20 世纪 90 年代 AMO 的相位变化能够分别造成 0.33 和 0.09 °C 的增温,共同减弱了赤道东太平洋 -0.57 °C 的冷效应^[115,116]。从年代际和更长时间尺度来看,太平洋 SST 年代际及多年代际变率是由内部变率和温室气体、气溶胶等外部强迫共同作用所致,温室气体引起向下长波辐射增加,引起赤道太平洋地区显著增温,由于云—气溶胶相互作用,向下的短波辐射减少,人类活动产生的气溶胶强迫引起北太平洋显著降温,抵消了温室气体造成的增温,两者结合的外部强迫作用促进太平洋年代际变率的正位相发展,调制太平洋年代际变率的趋势及大小^[115]。外部强迫对全球温度的调控作用在一定程度上可能也受到内部变率的影响,但目前这方面研究还较少,值得未来加强相关研究。

当前,在气候系统能量变化的相关研究中,对于深海热量吸收与再分配的研究相对欠缺,为了进一步研究全球变暖停滞,未来需要加强对深海热量的观测及研究。已有研究指出,20 世纪 90 年代至 2000 年,海洋上层 700 m 热吸收为 $0.64(\pm 0.11) \text{ W/m}^2$,同时,南极底层水对全球海洋热量收支的贡献为 0.10 W/m^2 ,因此,2 000 m 以下深海对全球热量收支平衡以及 OHC 变化的贡献十分重要,若考虑深海的热收支状况,1990—2000 年代海洋整体热吸收将增加 16%^[117]。尽管 90% 的 OHC 分布在海洋 0~4 000 m,但从年代际尺度来看,4 000 m 以下的深海也有热量的重新分配,因此实施深海阿尔戈(Deep Argo)计划对于追踪 OHC 变化是十分重要和必要的^[54,118,119]。

全球变暖停滞期间,除地面气温趋缓以外,对流层同样存在增温趋缓的现象,这一期间大气热传输变化与表面潜热通量变化的耦合主要发生在对流层低层(800 hPa 以下),大气动力过程引起对流层低层温度变化,而对流层高层(600 hPa 以上)主要受大气热传输和云辐射反馈相互作用的影响^[82,120]。热带太平洋对对流层温度的影响主要在热带及副热带地区^[64]。然而,目前对对流层温度变化的研究相对较少,因此未来需要加强相关研究。

近年来,全球温度变化又出现明显回升。而这种迅速回升可能是多种因素共同造成的结果,也是目前研究的一个焦点问题,既与人类活动产生的 CO₂ 迅速增加有关,也与自然变率有关。2014 年以来的全球迅速增温与赤道太平洋地区的持续升温同时发生^[121]。2015 年的厄尔尼诺事件能够引起全球 0.02 °C 的增温,同时,热带太平洋通过调控大气

热量释放引起全球迅速增温^[121]。Su等^[122]研究表明,全球迅速增温与PDO位于正位相有关。然而,目前关于全球增温回升的机制还没有研究清楚,相关研究与探索还需加强,以便为气候变化的研究提供更具指导意义的科学基础。

当前,对全球变暖停滞的研究依然面临着诸多挑战,如能量的不平衡、观测和再分析资料、数值模拟能力、相关政策制定等,同时,这些挑战对气候科学研究来说也是重大机遇。未来研究的重点除了上述挑战所带来的相关科学问题外,还有很多重要科学问题亟待解决。例如,定量研究全球变暖停滞时期辐射强迫的作用以及海洋热吸收(海洋热量的再分配)和能量转移的物理过程与机制;如何客观辨识全球变暖停滞现象及其区域特征?如何合理定量估计外部强迫和内部变率对全球变暖停滞现象的相对贡献并分析其中驱动的物理过程与机制?如何科学地揭示与变暖停滞现象相关的年代际—多年代际变化的物理机制?此外,开展结合AGCM以及“起搏器”局部耦合试验的数值模拟对研究全球变暖停滞的成因与机制十分重要。

参考文献(References):

- [1] IPCC. 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, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013:533. DOI: 10.1017/CBO9781107415324.
- [2] Li Jianping, Sun Cheng, Ding Ruiqiang. Decadal coupled ocean-atmosphere interaction in North Atlantic and global warming hiatus [M]// Special Publications of the International Union of Geodesy and Geophysics. United Kingdom: Cambridge University Press, 2018.
- [3] Smith T M, Peterson T C, Lawrimore J H, et al. New surface temperature analyses for climate monitoring [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32: L14712. DOI: 10.1029/2005gl023402.
- [4] Investor's Business Daily. Alarmists still heated even as world cools [EB/OL]. 2008.[2018-05-04]. <http://www.ibdeditorials.com/IBDArticles.aspx?id=310695037962525>.
- [5] Easterling D R, Wehner M F. Is the climate warming or cooling [J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36: L08706. DOI: 10.1029/2009GL037810.
- [6] Knight J, Kennedy J J, Folland C, et al. Do global temperature trends over the last decade falsify climate predictions [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2009, 90 (8): S22-S46.
- [7] Kerr R A. What happen to global warming? Scientists say just wait a bit [J]. *Science*, 2009, 326(5 949): 28-29. DOI: 10.1126/science.326_28a.
- [8] Medhaug I, Stolpe M B, Fischer E M, et al. Reconciling controversies about the 'global warming hiatus' [J]. *Nature*, 2017, 545(7 652): 41-47. DOI: 10.1038/nature22315.
- [9] Xing Nan, Li Jianping, Wang Lanning. Multidecadal trends in large-scale annual mean SATa based on CMIP5 historical simulations and future projections [J]. *Engineering*, 2017, 3 (3): 136-143. DOI: 10.1016/J.ENG.2016.04.011.
- [10] Li Jianping, Sun Cheng, Jin Feifei. NAO implicated as a predictor of Northern Hemisphere mean temperature multidecadal variability [J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(20): 5 497-5 502. DOI: 10.1002/2013gl057877.
- [11] England M H, McGregor S, Spence P, et al. Recent intensification of wind-driven circulation in the Pacific and the ongoing warming hiatus [J]. *Nature Climate Change*, 2014, 4(3): 222-227. DOI: 10.1038/nclimate2106.
- [12] Brohan P, Kennedy J J, Harris I, et al. Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: A new data set from 1850 [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2006, 111: D12106. DOI:10.1029/2005JD006548.
- [13] Brönnimann S. Climate science: Pacemakers of warming [J]. *Nature Geoscience*, 2014, 8(2): 87-89. DOI: 10.1038/ngeo2330.
- [14] Dai Aiguo, Fyfe J C, Xie Shangping, et al. Decadal modulation of global surface temperature by internal climate variability [J]. *Nature Climate Change*, 2015, 5(6): 555-559. DOI: 10.1038/nclimate2605.
- [15] Trenberth K E, Fasullo J T. An apparent hiatus in global warming? [J]. *Earth's Future*, 2013, 1(1): 19-32. DOI: 10.1002/2013ef000165.
- [16] Lauren Morello A A, Declan Butler, Ewen Callaway, et al. 365 days: 2014 in science [J]. *Nature*, 2014, 516(7 531): 300-303.
- [17] Xie Shangping, Kosaka Y. What caused the global surface warming hiatus of 1998—2013? [J]. *Current Climate Change Reports*, 2017, 3 (2): 128-140. DOI: 10.1007/s40641-017-0063-0.
- [18] Lin Xiaopei, Xu Lixiao, Li Jianping, et al. Research on the global warming hiatus [J]. *Advances in Earth Science*, 2016, 31(10): 995-1 000.[林霄沛,许丽晓,李建平,等.全球变暖“停滞”现象辨识与机理研究[J].地球科学进展,2016,31(10): 995-1 000.]
- [19] Trenberth K E, Fasullo J T. Global warming due to increasing absorbed solar radiation [J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36: L07706. DOI: 10.1029/2009gl037527.
- [20] Gray L J, Beer J, Geller M, et al. Solar influences on climate [J]. *Reviews of Geophysics*, 2010, 48 (4). DOI: 10.1029/2009rg000282.
- [21] Lean J L, Rind D H. How will Earth's surface temperature change in future decades? [J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36: L15708. DOI: 10.1029/2009gl038932.
- [22] Kaufmann R K, Kauppi H, Mann M L, et al. Reconciling anthropogenic climate change with observed temperature 1998-2008 [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2011, 108 (29): 11 790-11 793. DOI: 10.1073 / pnas.1102467108/-/DCSupplemental.

- [23] Hansen J, Sato M, Kharecha P, *et al.* Earth's energy imbalance and implications [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, 11(24): 13 421-1 3449. DOI: 10.5194/acp-11-13421-2011.
- [24] Zhou Jiansong, Tung K K. Solar cycles in 150 years of global sea surface temperature data [J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(12): 3 234-3 248. DOI: 10.1175/2010JCLI3232.1.
- [25] Zhou Jiansong, Tung K K. Deducing multidecadal anthropogenic global warming trends using multiple regression analysis [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2013, 70(1): 3-8. DOI: 10.1175/Jas-D-12-0208.1.
- [26] Zhou Jiansong, Tung K K. Observed tropospheric temperature response to 11-yr solar cycle and what it reveals about mechanisms [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2013, 70(1): 9-14. DOI: 10.1175/Jas-D-12-0214.1.
- [27] Pachauri R K, Allen M R, Barros V R, *et al.* Climate change 2014: Synthesis report[M]// Pachauri R, Meyer L, eds. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland: IPCC, 2014.
- [28] Rosenfeld D. Aerosol-Cloud Interactions Control of Earth Radiation and Latent Heat Release Budgets [M]. New York, NY: Springer, 2006.
- [29] Rosenfeld D. Atmosphere-aerosols, clouds, and climate [J]. *Science*, 2006, 312(5 778): 1 323-1 324. DOI: 10.1126/science.1128972.
- [30] Rosenfeld D, Sherwood S, Wood R, *et al.* Climate effects of aerosol-cloud interactions [J]. *Science*, 2014, 343(6 169): 379-380. DOI: 10.1126/science.1247490.
- [31] Newhall C G, Self S. The volcanic explosivity index (VeI)—An estimate of explosive magnitude for historical volcanism [J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 1982, 87(Nc2): 1 231-1 238. DOI: 10.1029/Jc087ic02p01231.
- [32] Kremser S, Thomason L W, von Hobe M, *et al.* Stratospheric aerosol-observations, processes, and impact on climate [J]. *Reviews of Geophysics*, 2016, 54(2): 278-335. DOI: 10.1002/2015RG000511.
- [33] Jonsson H H, Wilson J C, Brock C A, *et al.* Evolution of the stratospheric aerosol in the northern hemisphere following the June 1991 volcanic eruption of Mount Pinatubo: Role of tropospheric-stratospheric exchange and transport [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1996, 101(D1): 1 553-1 570. DOI: 10.1029/95jd02932.
- [34] Sato M, Hansen J E, McCormick M P, *et al.* Stratospheric aerosol optical depths, 1850-1990 [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1993, 98(D12): 22 987-22 994. DOI: 10.1029/93jd02553.
- [35] Robock A. Volcanic eruptions and climate [J]. *Reviews of Geophysics*, 2000, 38(2): 191-219. DOI: 10.1029/1998rg000054.
- [36] Ramaswamy V, Schwarzkopf M D, Randel W J, *et al.* Anthropogenic and natural influences in the evolution of lower stratospheric cooling [J]. *Science*, 2006, 311(5 764): 1 138-1 141. DOI: 10.1126/science.1122587.
- [37] Santer B D, Wigley T M L, Doutriaux C, *et al.* Accounting for the effects of volcanoes and ENSO in comparisons of modeled and observed temperature trends [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2001, 106(D22): 28 033-28 059. DOI: 10.1029/2000jd000189.
- [38] Santer B D, Bonfils C, Painter J F, *et al.* Volcanic contribution to decadal changes in tropospheric temperature [J]. *Nature Geoscience*, 2014, 7(3): 185-189. DOI: 10.1038/ngeo2098.
- [39] Wigley T M L, Ammann C M, Santer B D, *et al.* Effect of climate sensitivity on the response to volcanic forcing [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2005, 110(D9). DOI: 10.1029/2004jd005557.
- [40] Brock C A, Hudson P K, Lovejoy E R, *et al.* Particle characteristics following cloud-modified transport from Asia to North America [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2004, 109(D23). DOI: 10.1029/2003jd004198.
- [41] Solomon S, Daniel J S, III R R N, *et al.* The persistently variable 'background' stratospheric aerosol layer and global climate change [J]. *Science*, 2011, 333(6 044): 866-870.
- [42] Vernier J P, Thomason L W, Pommereau J P, *et al.* Major influence of tropical volcanic eruptions on the stratospheric aerosol layer during the last decade [J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38: L12807. DOI: 10.1029/2011gl047563.
- [43] Kvalevåg M M, Myhre G. Human impact on direct and diffuse solar radiation during the industrial era [J]. *Journal of Climate*, 2007, 20(19): 4 874-4 883. DOI: 10.1175/JCLI4277.1.
- [44] Myhre G, Berglen T F, Myhre C E L, *et al.* The radiative effect of the anthropogenic influence on the stratospheric sulfate aerosol layer [J]. *Tellus Series B: Chemical And Physical Meteorology*, 2004, 56(3): 294-299. DOI: 10.1111/j.1600-0889.2004.00106.x.
- [45] Solomon S, Rosenlof K H, Portmann R W, *et al.* Contributions of stratospheric water vapor to decadal changes in the rate of global warming [J]. *Science*, 2010, 327(5 970): 1 219-1 223.
- [46] Zhang Yuan, Wallace J M, Battisti D S. ENSO-like interdecadal variability: 1900-93 [J]. *Journal of Climate*, 1997, 10(5): 1 004-1 020. DOI: 10.1175/1520-0442(1997)010<1004: Eliv>2.0.Co;2.
- [47] Mantua N J, Hare S R, Wallace J M, *et al.* A pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1997, 78(6): 1 069-1 079. DOI: 10.1175/1520-0477(1997)078<1069: APICOW>2.0.CO;2.
- [48] Minobe S, Mantua N. Interdecadal modulation of interannual atmospheric and oceanic variability over the North Pacific [J]. *Progress in Oceanography*, 1999, 43(2/4): 163-192. DOI: 10.1016/S0079-6611(99)00008-7.
- [49] Power S, Casey T, Folland C, *et al.* Inter-decadal modulation of the impact of ENSO on Australia [J]. *Climate Dynamics*, 1999, 15(5): 319-324. DOI: 10.1007/s003820050284.
- [50] Deser C, Phillips A S, Hurrell J W. Pacific interdecadal climate variability: Linkages between the tropics and the North Pacific

- during boreal winter since 1900 [J]. *Journal of Climate*, 2004, 17(16): 3 109-3 124.
- [51] Folland C K, Renwick J A, Salinger M J, *et al.* Relative influences of the interdecadal Pacific oscillation and ENSO on the South Pacific convergence zone [J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(13): 1 643. DOI: 10.1029/2001gl014201.
- [52] Kosaka Y, Xie Shangping. Recent global-warming hiatus tied to equatorial Pacific surface cooling [J]. *Nature*, 2013, 501(7 467): 403-407. DOI: 10.1038/nature12534.
- [53] Chen Xian Yao, Wallace J M. ENSO-Like variability: 1900-2013 [J]. *Journal of Climate*, 2015, 28(24): 9 623-9 641. DOI: 10.1175/Jcli-D-15-0322.1.
- [54] Meehl G A, Hu Aixue, Arblaster J M, *et al.* Externally forced and internally generated decadal climate variability associated with the interdecadal Pacific oscillation [J]. *Journal of Climate*, 2013, 26(18): 7 298-7 310. DOI: 10.1175/jcli-d-12-00548.1.
- [55] Maher N, Sen Gupta A, England M H. Drivers of decadal hiatus periods in the 20th and 21st centuries [J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(16): 5 978-5 986. DOI: 10.1002/2014GL060527.
- [56] McGregor S, Sen Gupta A, England M H. Constraining wind stress products with sea surface height observations and implications for Pacific Ocean sea level trend attribution [J]. *Journal of Climate*, 2012, 25(23): 8 164-8 176. DOI: 10.1175/Jcli-D-12-00105.1.
- [57] Merrifield M A, Maltrud M E. Regional sea level trends due to a Pacific trade wind intensification [J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38: L21605. DOI: 10.1029/2011gl049576.
- [58] Zhang Wenjun, Li Jianping, Zhao Xia. Sea surface temperature cooling mode in the Pacific cold tongue [J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2010, 115: C12042. DOI: 10.1029/2010JC006501.
- [59] Li Yang, Li Jianping, Zhang Wenjun, *et al.* Ocean dynamical processes associated with the tropical Pacific cold tongue mode [J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2015, 120(9): 6 419-6 435.
- [60] Li Yang, Li Jianping, Zhang Wenjun, *et al.* Impacts of the tropical Pacific cold tongue mode on ENSO diversity under global warming [J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2017, 122(11): 8 524-8 542.
- [61] Lau N C, Nath M J. The role of the 'atmospheric bridge' in linking tropical Pacific ENSO events to extratropical SST anomalies [J]. *Journal of Climate*, 1996, 9(9): 2 036-2 057. DOI: 10.1175/1520-0442(1996)009<2036:Trotbi>2.0.Co;2.
- [62] Alexander M A, Blade I, Newman M, *et al.* The atmospheric bridge: The influence of ENSO teleconnections on air-sea interaction over the global oceans [J]. *Journal of Climate*, 2002, 15(16): 2 205-2 231. DOI: 10.1175/1520-0442(2002)015<2205:Tabtio>2.0.Co;2.
- [63] Neelin J D, Battisti D S, Hirst A C, *et al.* ENSO theory [J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 1998, 103(C7): 14 261-14 290. DOI: 10.1029/97jc03424.
- [64] Wang Chuanyang, Xie Shangping, Kosaka Y, *et al.* Global influence of tropical Pacific variability with implications for global warming slowdown [J]. *Journal of Climate*, 2017, 30(7): 2 679-2 695.
- [65] McGregor S, Timmermann A, Stuecker M F, *et al.* Recent walker circulation strengthening and Pacific cooling amplified by Atlantic warming [J]. *Nature Climate Change*, 2014, 4(10): 888-892. DOI: 10.1038/nclimate2330.
- [66] Chikamoto Y, Mochizuki T, Timmermann A, *et al.* Potential tropical Atlantic impacts on Pacific decadal climate trends [J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(13): 7 143-7 151. DOI: 10.1002/2016GL069544.
- [67] Kucharski F, Kang I S, Farneti R, *et al.* Tropical Pacific response to 20th century Atlantic warming [J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38: L03702. DOI: 10.1029/2010gl046248.
- [68] Kucharski F, Ikram F, Molteni F, *et al.* Atlantic forcing of Pacific decadal variability [J]. *Climate Dynamics*, 2016, 46(7/8): 2 337-2 351. DOI: 10.1007/s00382-015-2705-z.
- [69] Li Xichen, Xie Shangping, Gille S T, *et al.* Atlantic-induced pan-tropical climate change over the past three decades [J]. *Nature Climate Change*, 2015, 6(3): 275-279. DOI: 10.1038/nclimate2840.
- [70] Yao Shuailei, Luo Jingjia, Huang Gang, *et al.* Distinct global warming rates tied to multiple ocean surface temperature changes [J]. *Nature Climate Change*, 2017, 7(7): 486-491. DOI: 10.1038/nclimate3304.
- [71] Han Weiqing, Meehl G A, Hu Aixue, *et al.* Intensification of decadal and multi-decadal sea level variability in the western tropical Pacific during recent decades [J]. *Climate Dynamics*, 2014, 43(5/6): 1 357-1 379.
- [72] Sun Cheng, Kucharski F, Li Jianping, *et al.* Western tropical Pacific multidecadal variability forced by the Atlantic multidecadal oscillation [J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 15 998. DOI: 10.1038/ncomms15998.
- [73] Sun Cheng, Li Jianping, Jin Feifei. A delayed oscillator model for the quasi-periodic multidecadal variability of the NAO [J]. *Climate Dynamics*, 2015, 45(7/8): 2 083-2 099. DOI: 10.1007/s00382-014-2459-z.
- [74] Mochizuki T, Kimoto M, Watanabe M, *et al.* Interbasin effects of the Indian Ocean on Pacific decadal climate change [J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(13): 7 168-7 175. DOI: 10.1002/2016GL069940.
- [75] Timmermann A, McGregor S, Jin Feifei. Wind effects on past and future regional sea level trends in the southern Indo-Pacific [J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(16): 4 429-4 437. DOI: 10.1175/2010JCLI3519.1.
- [76] Nidheesh A G, Lengaigne M, Vialard J, *et al.* Decadal and long-term sea level variability in the tropical Indo-Pacific Ocean [J]. *Climate Dynamics*, 2013, 41(2): 381-402. DOI: 10.1007/s00382-012-1463-4.
- [77] Nieves V, Willis J K, Patzert W C. Recent hiatus caused by decadal shift in Indo-Pacific heating [J]. *Science*, 2015, 349(6 247): 532-535. DOI: 10.1126/science.aaa4521.

- [78] Cohen J L, Furtado J C, Barlow M, *et al.* Asymmetric seasonal temperature trends [J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39: L04705. DOI: 10.1029/2011gl050582.
- [79] Cohen J L, Furtado J C, Barlow M A, *et al.* Arctic warming, increasing snow cover and widespread boreal winter cooling [J]. *Environmental Research Letters*, 2012, 7(1). DOI: 10.1088/1748-9326/7/1/014007.
- [80] Kosaka Y, Xie Shangping. The tropical Pacific as a key pace-maker of the variable rates of global warming [J]. *Nature Geoscience*, 2016, 9(9): 669-673. DOI: 10.1038/ngeo2770.
- [81] Dong Lu, Zhou Tianjun, Dai Aiguo, *et al.* The footprint of the inter-decadal Pacific oscillation in Indian Ocean sea surface temperatures [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 21 251.
- [82] Wang Xiaofan, Li Jianping, Sun Cheng, *et al.* NAO and its relationship with the Northern Hemisphere mean surface temperature in CMIP5 simulations [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2017, 122(8): 4 202-4 227.
- [83] Keenlyside N S, Latif M, Jungclaus J, *et al.* Advancing decadal-scale climate prediction in the North Atlantic sector [J]. *Nature*, 2008, 453(7 191): 84-88. DOI: 10.1038/nature06921.
- [84] Balmaseda M A, Trenberth K E, Källén E. Distinctive climate signals in reanalysis of global ocean heat content [J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(9): 1 754-1 759. DOI: 10.1002/grl.50382.
- [85] Meehl G A, Arblaster J M, Fasullo J T, *et al.* Model-based evidence of deep-ocean heat uptake during surface-temperature hiatus periods [J]. *Nature Climate Change*, 2011, 1(7): 360-364. DOI: 10.1038/nclimate1229.
- [86] Watanabe M, Kamae Y, Yoshimori M, *et al.* Strengthening of ocean heat uptake efficiency associated with the recent climate hiatus [J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(12): 3 175-3 179. DOI: 10.1002/grl.50541.
- [87] Trenberth K E, Fasullo J T, Balmaseda M A. Earth's energy imbalance [J]. *Journal of Climate*, 2014, 27(9): 3 129-3 144. DOI: 10.1175/jcli-d-13-00294.1.
- [88] Hansen J, Nazarenko L, Ruedy R, *et al.* Earth's energy imbalance: Confirmation and implications [J]. *Science*, 2005, 308(5 727): 1 431-1 435. DOI: 10.1126/science.1110252.
- [89] Meehl G A, Hu Aixue, Santer B D. The mid-1970s climate shift in the Pacific and the relative roles of forced versus inherent decadal variability [J]. *Journal of Climate*, 2009, 22(3): 780-792. DOI: 10.1175/2008JCLI2552.1.
- [90] Chen Xian Yao, Tung K K. Varying planetary heat sink led to global-warming slowdown and acceleration [J]. *Science*, 2014, 345(6 199): 897-903. DOI: 10.1126/science.1254937.
- [91] Chen Xian Yao, Tung K K. Global surface warming enhanced by weak Atlantic overturning circulation [J]. *Nature*, 2018, 559(7 714): 387-391. DOI: 10.1038/s41586-018-0320-y.
- [92] Hu Zeyuan, Hu Aixue, Hu Yongyun. Contributions of inter-decadal Pacific oscillation and Atlantic multidecadal oscillation to global ocean heat content distribution [J]. *Journal of Climate*, 2018, 31(3): 1 227-1 244.
- [93] Lee S K, Park W S, Baringer M O, *et al.* Pacific origin of the abrupt increase in Indian Ocean heat content during the warming hiatus [J]. *Nature Geoscience*, 2015, 8(6): U445-U441. DOI: 10.1038/NGEO2438.
- [94] Wijffels S, Roemmich D, Monselesan D, *et al.* Ocean temperatures chronicle the ongoing warming of Earth [J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(2): 116-118. DOI: 10.1038/Nclimate2924.
- [95] Hu Xiaoming, Sejas S A, Cai Ming, *et al.* Decadal evolution of the surface energy budget during the fast warming and global warming hiatus periods in the ERA-interim [J]. *Climate Dynamics*, 2018. DOI: 10.1007/s00382-018-4232-1.
- [96] Crowley T J, Baum S K, Kim K Y, *et al.* Modeling ocean heat content changes during the last millennium [J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(18): 1 932. DOI: 10.1029/2003GL017801.
- [97] Thompson D W J, Solomon S. Interpretation of recent Southern Hemisphere climate change [J]. *Science*, 2002, 296(5 569): 895-899. DOI: 10.1126/science.1069270.
- [98] Barnett T, Zwiers F, Hegerl G, *et al.* Detecting and attributing external influences on the climate system: A review of recent advances [J]. *Journal of Climate*, 2005, 18(9): 1 291-1 314.
- [99] Henley B J, Meehl G, Power S B, *et al.* Spatial and temporal agreement in climate model simulations of the Interdecadal Pacific Oscillation [J]. *Environmental Research Letters*, 2017, 12(4). DOI: 10.1088/1748-9326/Aa5cc8.
- [100] Okumura Y M. Origins of tropical Pacific decadal variability: Role of stochastic atmospheric forcing from the south Pacific [J]. *Journal of Climate*, 2013, 26(24): 9 791-9 796. DOI: 10.1175/Jcli-D-13-00448.1.
- [101] Wang Bin, Zhou Tianjun, Yu Yongqiang. A perspective on earth system model development [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2008, 66(6): 857-869. DOI: 10.11676/qxxb2008.078.[王斌, 周天军, 俞永强. 地球系统模式发展展望 [J]. 气象学报, 2008, 66(6): 857-869. DOI: 10.11676/qxxb2008.078.]
- [102] Screen J A, Simmonds I, Deser C, *et al.* The atmospheric response to three decades of observed Arctic sea ice loss [J]. *Journal of Climate*, 2013, 26(4): 1 230-1 248. DOI: 10.1175/Jcli-D-12-00063.1.
- [103] Allan R P, Liu Chunlei, Loeb N G, *et al.* Changes in global net radiative imbalance 1985-2012 [J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(15): 5 588-5 597. DOI: 10.1002/2014GL060962.
- [104] Trenberth K E, Fasullo J T. Tracking Earth's energy: From El Niño to global warming [J]. *Surveys in Geophysics*, 2012, 33(3/4): 413-426. DOI: 10.1007/s10712-011-9150-2.
- [105] Trenberth K E, Fasullo J T, Kiehl J. Earth's global energy budget [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2009, 90(3): 311-323. DOI: 10.1175/2008BAMS2634.1.
- [106] Xie Shangping, Kosaka Y, Okumura Y M. Distinct energy budgets for anthropogenic and natural changes during global warming hiatus [J]. *Nature Geoscience*, 2015, 9(1): 29-33. DOI: 10.1038/ngeo2581.
- [107] Karl T R, Arguez A, Huang B, *et al.* Possible artifacts of data biases in the recent global surface warming hiatus [J]. *Science*, 2015, 348(6 242): 1 469-1 473.

- [108] Cowtan K, Way R G. Coverage bias in the HadCRUT4 temperature series and its impact on recent temperature trends [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2014, 140(683): 1 935-1 944. DOI: 10.1002/qj.2297.
- [109] Seneviratne S I, Rogelj J, Seferian R, *et al.* The many possible climates from the Paris Agreement's aim of 1.5 degrees C warming [J]. *Nature*, 2018, 558(7 708): 41-49.
- [110] Booth B B, Dunstone N J, Halloran P R, *et al.* Aerosols implicated as a prime driver of twentieth-century North Atlantic climate variability [J]. *Nature*, 2012, 484(7 393): 228-232. DOI: 10.1038/nature10946.
- [111] Evan A T, Vimont D J, Heidinger A K, *et al.* The role of aerosols in the evolution of tropical North Atlantic Ocean temperature anomalies [J]. *Science*, 2009, 324(5 928): 778-781. DOI: 10.1126/science.1167404.
- [112] Otterå O H, Bentsen M, Drange H, *et al.* External forcing as a metronome for Atlantic multidecadal variability [J]. *Nature Geoscience*, 2010, 3(10): 688-694. DOI: 10.1038/ngeo955.
- [113] Vecchi G A, Soden B J, Wittenberg A T, *et al.* Weakening of tropical Pacific atmospheric circulation due to anthropogenic forcing [J]. *Nature*, 2006, 441(7 089): 73-76. DOI: 10.1038/nature04744.
- [114] Mehta S K, Fujiwara M, Tsuda T, *et al.* Effect of recent minor volcanic eruptions on temperatures in the upper troposphere and lower stratosphere [J]. *Journal of Atmospheric and Solar—Terrestrial Physics*, 2015, 129: 99-110. DOI: 10.1016/j.jastp.2015.04.009.
- [115] Dong Lu, Zhou Tianjun, Chen Xiaolong. Changes of Pacific decadal variability in the twentieth century driven by internal variability, greenhouse gases, and aerosols [J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(23): 8 570-8 577. DOI: 10.1002/2014GL062269.
- [116] Dong Lu, Zhou Tianjun. 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]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2014, 119(19): 11 272-11 287.
- [117] Purkey S G, Johnson G C. Warming of global abyssal and deep Southern Ocean waters between the 1990s and 2000s: Contributions to global heat and sea level rise budgets [J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(23): 6 336-6 351.
- [118] Palmer M D, McNeall D J, Dunstone N J. Importance of the deep ocean for estimating decadal changes in Earth's radiation balance [J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(13): L13707. DOI: 10.1029/2011GL047835.
- [119] Yan Xiaohai, Boyer T, Trenberth K, *et al.* The global warming hiatus: Slowdown or redistribution? [J]. *Earths Future*, 2016, 4(11): 472-482. DOI: 10.1002/2016EF000417.
- [120] Liu Bo, Zhou Tianjun. Atmospheric footprint of the recent warming slowdown [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 40 947. DOI: 10.1038/srep40947.
- [121] Hu Shineng, Fedorov A V. The extreme El Niño of 2015-2016 and the end of global warming hiatus [J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(8): 3 816-3 824.
- [122] Su Jingzhi, Zhang Renhe, Wang Huijun. Consecutive record-breaking high temperatures marked the handover from hiatus to accelerated warming [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 43 735. DOI: 10.1038/Srep43735.

Review of the Research Progress in Global Warming Hiatus*

Xu Yidan¹, Li Jianping^{1*}, Wang Qiuyun¹, Lin Xiaopei²

(1. College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. Physical Oceanography Laboratory / CIMST, Ocean University of China, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266100, China)

Abstract: From 1998 to 2012, the warming rate of global mean surface air temperature showed significantly slower than before, which is referred to as the global warming hiatus. The causes and underlying mechanisms of this phenomenon are currently a hot topic of climatic change research. The research significance of global warming hiatus was discussed and relevant research progress was reviewed from two perspectives of external forcings and internal variabilities. In term of external forcings, global warming hiatus is mainly affected by solar activities, volcanic eruptions, aerosols and stratospheric water vapor. With respect to internal variabilities, the warming rate of global mean surface air temperature slowdown is mainly related to the natural variabilities of the Pacific Ocean, the Atlantic Ocean, the Indian Ocean and the Southern Ocean and influenced by the related heat redistribution processes. During the global warming hiatus period, some energy is transferred and restored in the deep ocean so as to modulate the global warming rate, rather than there is a reduction of global total energy in the climate system. In addition, the partially coupled forcing pacemaker model experiment was also reviewed. The pacemaker experiment is a powerful tool for studying the characteristics, causes and underlying mechanisms of the global warming hiatus. Besides, some challenges resulted from the global warming hiatus, including the global energy imbalance, data, simulation and related policy-making were summarized, and future research directions were also discussed.

Key words: Global warming hiatus; External forcing; Internal variability; Energy; Pacemaker experiment.

* **Foundation item:** Project supported by the National Key R & D Program of China "The roles of external forcing and internal variability in the global warming hiatus" (No. 2016YFA0601801); The State Oceanic Administration (SOA) International Cooperation Program on Global Change and Air-Sea Interactions "Interaction between the Indo-Pacific Ocean and Asian Monsoon" (GASI-IPOVAI-03).

First author: Xu Yidan (1992-), female, Baofeng County, Henan Province, Ph.D student. Research areas include dynamic meteorology. **E-mail:** 201731490004@mail.bnu.edu.cn

* **Corresponding author:** Li Jianping (1969-), male, Shanyin County, Shanxi Province, Professor. Research areas include climate dynamics and predictability, monsoons, and annular modes and their impacts. **E-mail:** ljp@bnu.edu.cn