影响全球平均表面温度的主要过程

李心月¹, 陈显尧^{1,2*}

1. 中国海洋大学物理海洋教育部重点实验室, 青岛 266100;

2. 中国海洋大学深海圈层与地球系统前沿中心, 青岛 266100

* 联系人, E-mail: chenxy@ouc.edu.cn

2021-01-05 收稿, 2021-05-08 修回, 2021-05-10 接受, 2021-05-19 网络版发表

国家自然科学基金(41825012, 41776032)和中央高校基础科研业务费专项(202071001)资助

摘要 全球平均表面温度(GMST)的变化反映了气候系统对外部辐射强迫与内部自然变率共同作用的综合响应, 是深入了解人类活动影响全球气候变化的关键指标之一。前期工作基本确定了厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)、太平洋年代际变异(PDO)和北大西洋年代际变异(AMO)等全球海洋与大气的主要物理模态对GMST的贡献。在此基础上, 利用观测数据, 进一步分析了1910~2018年间火山爆发、变暖“减缓”、海洋观测设备转型等人为因素等物理过程对GMST变化的影响作用。估计1950年后5次较大的火山爆发事件约累积导致ERSST v3b和HadISST v1.1数据的GMST下降0.32~0.47和0.45~0.67°C; 20世纪40年代中期, 海表面温度观测方式变化引入的观测系统误差对100多年来GMST的变暖趋势产生约0.21~0.22°C的影响。研究发现, 在移除ENSO、PDO和AMO等3个主要气候模态之后, GMST仍然存在1998~2012年间的上升速度减缓现象, 说明这些主要气候模态的变化对GMST的影响并不能完全解释全球气候变暖“减缓”的现象, 强调了从气候系统能量收支平衡的角度理解导致全球气候变暖“减缓”关键物理过程的必要性。

关键词 全球平均表面温度, 主要气候模态, 火山爆发, 气溶胶, 变暖减缓

工业革命以来, 温室气体排放引起的温室效应导致地球表面的净辐射通量增加, 全球气候持续变暖, 其中一个主要表现是全球平均表面温度(GMST; 包括全球平均海表面温度GMSST)持续上升^[1,2]。但是GMST的上升过程并非单调, 而是呈现为叠加在长期变暖趋势上的年际、年代际和多年代际等多时间尺度的振荡。导致这些不同时间尺度变异的物理过程既包括厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)、太平洋年代际变异(PDO)和北大西洋年代际振荡(AMO)等全球海洋与大气主要物理模态的影响^[3], 也包括火山爆发、中深层海洋热量输送、观测系统变化等各种因素的贡献。明确影响GMST变化的各个物理过程的作用是深入理解气候系统自然变率和人类活动对气候变化影响的

关键。

利用气候模式的集合平均可以给出气候系统对于外部强迫作用的响应, 其中主要的假设是气候模式内部变率的位相具有随机性, 会在大样本集合平均中互相抵消, 而余量就是所有气候模式对外部强迫的共同响应。在移除外部强迫作用的基础上, 可以进一步分析气候系统的内部变率。其中较为常用的方法是利用已有的物理模态的时间序列, 通过统计分析方法分离出该模态对GMST的贡献, 即在全球平均温度中确定该物理模态的“指纹”^[4]。利用这种方法分析给出的ENSO在4~6年的时间尺度上对全球平均表面气温的贡献约为30%^[5], 而AMO贡献了33%~45%的方差^[6]。

引用格式: 李心月, 陈显尧. 影响全球平均表面温度的主要过程. 科学通报, 2021, 66: 4017–4027

Li X Y, Chen X Y. Main processes affecting global average surface temperature (in Chinese). Chin Sci Bull, 2021, 66: 4017–4027, doi: [10.1360/TB-2021-0020](https://doi.org/10.1360/TB-2021-0020)

这种基于气候模式分析气候系统对外部强迫的响应与内部变率贡献的方法容易受到模式物理过程与参数化等因素的影响. 仅从观测数据出发, 利用集合经验模分解(EEMD)方法分解GMST的时间序列, 可以发现AMO与北半球表面温度的年代变化高度相关, 其方差贡献超过60%. 而年际和年代际时间尺度上物理过程变异的贡献相对较小^[7], 与利用模态“指纹”方法确定的ENSO在年际时间尺度上对GMST的贡献有较大区别. 基于经验正交函数分析(EOF)方法可以确定影响全球表面温度变化的主要物理模态随时间的变化及其空间结构特征. 通过计算每一个EOF的空间平均值, 可以直接确定这些物理模态对GMST的贡献^[3]. 通过这一方法可以确定影响GMST的主要物理过程中, 在年代际时间尺度上主要是AMO的贡献, 大约为24%, 而在年际时间尺度上主要是ENSO的贡献, 大约为10%. 这一结果与基于EEMD分解方法给出的ENSO和AMO等物理模态的作用基本一致.

影响GMST变化的物理过程中, 除了ENSO、PDO和AMO等主要的海洋与大气的耦合模态以外, 还包括一些具有随机性的事件^[8], 例如火山爆发^[9,10]、观测数据系统误差^[11-13]等过程. 这些事件主要表现为跃变性质, 即发生之前没有任何征兆、发生之后影响作用持续一段时间后就基本消失. 这种跃变过程类似于 δ 函数, 具有白谱特征, 即在所有谱段上具有相同的能量分布. 基于时间尺度分解的EEMD方法会把这种跃变过程人为地分散到从高频到低频的全部分量上, 对理解其影响作用的大小和机制形成干扰. 例如, 直接利用EEMD方法分解GMST时, 火山爆发事件的影响会被拆分到多个模态中, 特别是与ENSO、PDO和AMO等物理模态的作用混淆.

但是, 这种随机事件不会对基于协方差分析的EOF方法产生影响. 这是因为随机性事件的协方差要远小于规律性事件的协方差, 因此与随机过程相关的EOF模态基本都是高阶模态(即协方差矩阵的特征值相对较小), 对主模态的影响很弱. 在基于EOF方法给出的GMST分解结果可以看出, 火山爆发、观测数据的系统误差等随机跃变事件的影响与ENSO、PDO和AMO等物理模态变率基本没有混淆在一起. 这也意味着能够进一步根据观测数据确定这些随机跃变过程的影响作用及其相对应的空间结构.

本研究即在此基础上进一步定量分析火山爆发、观测数据的系统误差等物理过程的影响作用.

1 数据和方法

1.1 数据来源

本研究主要分析全球逐月的海面温度数据(ERSST、HadISST v1.1)和HadCRUT.4.6.0.0地表温度数据. ERSST使用原位(*in situ*)SST数据和改进的统计分析方法, 这些方法可以应用稀疏的数据点对缺失的数据点进行稳定的重建. 该逐月分析数据从1854年1月开始一直持续至今. ERSST适用于长期的全球范围的研究, 由于早期的数据稀疏, 1880年之前的信号较弱, 而1880年之后的信号强度随着时间的推移会与观测点的结果更一致. 因此在本研究的分析中, 选用1910年以后的ERSST数据的逐月海表面温度数据进行全球范围的GSST分析, 数据的网格精度均为 $2^\circ \times 2^\circ$ ^[14]. 近年来, ERSST数据经历了比较大的改变. 在v3b版本之后, 引入了对船舶和浮标的SST偏差等多个校准调整, 形成了最新的v4^[15]和v5^[16]等版本. 但是, 与v3b相比, 新版本在20世纪40年代观测系统误差的校准、ENSO的空间结构、1998~2012年间全球表面温度上升速度减缓等多个热点问题上存在较大的偏差^[17]. 因此, 本研究主要采用ERSST v3b数据.

为了增强海洋观测数据结果的可信度, 本研究使用HadISST v1.1数据与ERSST的结果进行对比. HadISST观测数据资料包括船舶、浮标以及卫星资料, 利用降尺度最优插值法在空间上对全场的稀疏观测地区进行覆盖, 其海温数据被广泛地应用于海气相互作用和气候变化领域, 数据的网格精度均为 $1^\circ \times 1^\circ$ ^[18]. 除了海温数据外, 本研究也使用了海陆的气温数据HadCRUT.4.6.0.0的100组数据样本, HadCRUT是相对于1961~1990年为参考的全球历史地表温度异常的网格化数据. 自1850年1月以来逐月数据的网格精度是 $5^\circ \times 5^\circ$ ^[19]. 本研究选用与ERSST和HadISST数据相同的时间段进行对比.

1.2 方法

1.2.1 EOF分解

EOF是用于研究时空场变化的统计分析方法, 主要是借助时空场协方差矩阵的特征值和特征向量将时空场分解为数学上正交(独立)的多个空间和时间模态, 按照特征值从大到小的排列次序, 最大特征值所对应的模态解释了原时空场的最大方差变化. 而第二个模态解释剩余方差中最大的部分, 同时与第一个模态保

持正交, 依此类推^[20].

由于受到正交性的约束, 传统EOF分解会出现模态混叠现象^[21]. 在全球海洋表面温度(SST)变化的EOF分解中, 最为明显的是ENSO与全球变暖空间模态的混叠, 对于认识ENSO变异及其与全球变暖的联系有较大影响^[22]. 已有工作基于低频SST的EOF分解, 来分离趋势模态中的ENSO信号^[23], 但是这种方法会同时弱化离散事件的信号, 如火山爆发引起的气候短期变化等. 一些研究发展了SST的成对旋转EOF方法, 能够既保留变暖趋势项中的离散事件对SST的贡献, 同时也能够从变暖模态中分离出ENSO信号^[24]. 本研究将主要采用这种成对旋转EOF方法.

1.2.2 EMD分解及其误差分析

EMD分解方法是一种自适应的时间序列分析方法, 适用于分析非平稳和非线性过程. 通过EMD分解, 可以将一个时间序列分解为多个具有不同时间尺度特征的本征模态函数(IMF), 分别对应于物理过程在不同时间尺度上的变化特征. EMD方法已用于大气、海洋、地质和地球物理等领域的数据分析, 具体方法请参见文献^[25]. 本次研究应用EEMD分解方法将由PC1乘以EOF1的平均值得到的表面温度的变暖趋势项(TR)分解为高频信号、低频信号和趋势信号.

EMD分解方法本身存在不确定性, 目前已有一些

研究利用EMD、EEMD方法所得到的每个分量的统计显著性及其误差范围^[26~29]. 统计显著性分析依赖于所采用的数据背景噪音的假定^[26], 给出了基于白噪音假定(即所观测数据的背景噪音为白噪音)的分析方法^[29], 可以比较统一地确定所有类型时间序列的EEMD分量的统计显著性和误差范围. 但是, 对于气候数据, 由于气候变化存在显著的滞后相关性, 背景噪音明显不是白噪音, 因此需要采用红噪音假定. 相关研究发展了分析背景噪音为红噪音假定时EEMD分量的统计显著性的分析方法, 但仍无法给出每个分量的不确定性范围^[29]. 为了给出时间序列分解结果的误差估计, 基于观测数据的不确定性, 利用HadCRUT.4.6提供的100组数据样本, 逐一利用本研究所提方法进行分析, 得到每个样本TR的高频、低频和趋势项, 而后计算所有样本的集合平均, 并估算其对应的误差分布范围.

2 研究结果

2.1 GMST和GMSST的组成

利用成对旋转EOF方法, 可以将全球海洋表面温度ERSST分解为全球变暖趋势(TR)、ENSO、PDO、AMO等主要物理模态^[3]. 为了本研究的完整性, 图1给出了这4个主要模态的EOF和PC, 并与HadISST的结果

图 1 GMSST的主要模态构成. ERSST v3b海洋表面温度的EOF1(a)、EOF2(b)、EOF3(c)、EOF4(d); HadISST v1.1海洋表面温度的EOF1(e)、EOF2(f)、EOF3(g)、EOF4(h); GMSST(蓝色)及其主要时间序列组成(i), 包括TR(红色)、ENSO(青色)、PDO(黄色)和AMO(紫色). 每组颜色一致的时间序列中, 上下的线条分别为ERSST v3b和HadISST v1.1的结果. 填色图和线图纵坐标的单位均为°C

Figure 1 The main mode composition of GMSST. EOF1 (a), EOF2 (b), EOF3 (c), and EOF4 (d) of ocean surface temperature of ERSST v3b; EOF1 (e), EOF2 (f), EOF3 (g), and EOF4 (h) of HadISST v1.1 ocean surface temperature; GMSST (blue) and its main time series composition (i), including TR (red), ENSO (cyan), PDO (yellow), and AMO (purple). In each set of time series with the same color, the upper and lower lines are the result of ERSST v3b and HadISST v1.1, respectively. The ordinates of the fill and line plots are in °C

进行对比. 如果以4个EOF的空间平均值作为对应PC时间序列的权重, 计算这4个PC的加权求和, 可以重建GMSST(由TR、ENSO、PDO和AMO组成), 与直接利用SST计算得到的GMSST的方差在ERSST和HadISST中分别相差1.3%和1.5%, 相差部分主要是EOF分解的高阶模态的贡献. 如果将全球表面温度HadCRUT.4.6投影至ERSST表面温度的4个主要PC时间序列上, 得到其对应的空间场(图1), 并同样用这些空间场的平均值作为权重计算这4个PC的加权求和, 可以重建GMST, 与直接利用HadCRUT.4.6计算得到的GMST的方差仅相差2.2%(这里偏差百分比的计算由GMST的方差减去重建的GMST的方差后, 除以GMST的方差得到).

已有很多关于ENSO、PDO和AMO这3个主要物理模态的分析, 这里不再赘述. 本研究重点是分析第一个PC, 即长期变暖的趋势分量TR. 在人为CO₂强迫的作用下, GMST和GMSST都呈现升温趋势. 但是, TR中除了整体变暖的信号之外, 仍存在其他高频时间尺度(包括季节、年际和年代际时间尺度)上的振荡, 这些振荡过程非常明显. 这说明除了ENSO、PDO和AMO等主要模态外, 依旧存在一些其他的振荡过程对GMST有显著影响. 为了确定这些过程的特征与贡献, 首先利用EEMD方法分解时间序列TR.

本研究所采用的EEMD方法的核心是时间序列的最大值、最小值包络线. 这不仅依赖于边界条件, 同时

还依赖于包络线的算法本身. 不同的包络线算法也会对最后数据结果产生影响, 因此分解结果形式上并不唯一^[27]. 但是, 这种不唯一性是在误差允许范围内的, 并不影响不同时间尺度上每个分量的统计信息, 特别是时间序列中每个极值点的位置在上述分解过程中是不会改变(这是EMD方法的优势之一), 因此可以利用这一特征获得本研究的分析结果, 并在误差允许范围内可以给出一些物理过程变化范围的估计.

需要指出, 利用EEMD方法可以将每个时间序列分解为多个不同时间尺度上的分量, 但并不是每一个分量都对应于一个特定的物理过程, 首先需要对所得到的分量进行统计显著性检验. 本研究利用专门针对EMD方法所发展的重采样噪音显著性检验方法^[26]对GMST的各个IMF进行显著性检验, 结果表明GMST的前3个IMF不能显著地区别于噪音过程. 因此, 本次研究将这3个IMF重新组合, 形成TR的高频分量. 其次, 为了体现跃变过程的影响, 研究将除了长期趋势之外的其他所有低频分量组合形成TR的低频分量. 这样, TR被分解为3个分量(图2). 下面将分别分析这3个分量所对应的物理过程(本研究中噪音也被视为一种物理过程)及其影响作用.

2.2 TR的主要影响因子

图2对比了基于ERSST和HadISST数据的TR的整

图2 ERSST v3b、HadISST v1.1和HadCRUT.4.6的100个样本中, TR及其EMD分解. EMD分解得到TR的高频信号(T_h)、低频信号(T_l)和趋势. 其中, HadCRUT.4.6的100个样本用灰色线表示, 样本平均值用黑线表示

Figure 2 TR and its EMD decomposition in ERSST v3b, HadISST v1.1 and HadCRUT.4.6 100 samples. EMD decomposition results in TR high frequency signal (T_h), low frequency signal (T_l), and trend. 100 data samples from HadCRUT.4.6 are represented by gray lines and the average sample is represented by black lines

体趋势、高频和低频信号。两者的长期线性趋势基本一致,分别为每10年增长0.072和0.066°C。在高频和低频时间尺度上,基于HadISST的数据振幅要比基于ERSST的强一些,但位相变化基本一致。HadISST v1.1的水平分辨率为 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$,高于ERSST的水平分辨率($2^{\circ}\times 2^{\circ}$),这可能是HadISST数据的振幅相对较大的主要原因。例如,基于HadISST可以分辨出西边界流区域的变暖趋势,但是利用ERSST就难以分辨这一现象。下文将基于TR的高频、低频和趋势分量的时间序列及其空间投影进行具体分析。

2.2.1 高频分量

虽然显著性检验结果指出TR的第一个分量 T_h 不能显著地区别于红噪音^[26],但是 T_h 仍具有某种物理意义。如果利用线性回归方法将ENSO、PDO和AMO等3个分量的影响从全球SST数据中线性地移除,而后将SST余量投影到 T_h ,可以看到TR高频分量的空间结构几乎在全球都显著为正(图3)。这反映了SST观测数据噪音与SST变化之间的正相关关系:在温度距平相对较高时,数据噪音也相对偏大。ERSST v3b和HadISST v1.1数据的 T_h 的平均振幅分别是 0.032 ± 0.019 和 $0.046\pm 0.026^{\circ}\text{C}$,与ENSO和PDO对GMST的贡献接近。但是,

图3 TR高频信号的空间结构。(a) ERSST v3b海洋投影; (b) HadISST v1.1海洋投影; (c) HadCRUT.4.6海陆投影

Figure 3 Spatial structure of TR high frequency signals. (a) Ocean projection of ERSST v3b; (b) ocean projection of HadISST v1.1; (c) land and ocean projection of HadCRUT.4.6

图1中给出的ERSST v3b中,ENSO和PDO等模态的空间结构的标准差约为0.13和0.16°C(HadISST v1.1均为0.16°C),而ERSST v3b的 T_h 空间结构的标准偏差仅为0.03°C(HadISST v1.1为0.04°C)。这说明ENSO和PDO等模态虽然对全球平均表面温度的总贡献很小,但是对于局部区域的影响很大,只是不同区域之间的位相关系相反,才使得其对GMST的总贡献相互抵消。ENSO和PDO对全球气候的综合影响与SST观测数据的噪音是完全不同的物理过程,而利用上述分析方法可以区分这两种过程对GMST的影响作用。

2.2.2 低频分量

TR的第二个分量 T_L 体现了不同于ENSO、PDO和AMO的年际和年代际变化,但并不具有周期性或准周期性的振荡。本研究可以利用已知的一些物理过程来解释 T_L 的主要变化。

首先是火山爆发的影响。大型火山爆发导致火山气溶胶进入平流层,通过吸收和散射太阳辐射引起全球气温下降^[30]。一次火山爆发事件可能导致地球表面平均温度在1~3年内下降0.5°C左右。但在过去百年时间尺度上,火山爆发对全球气候变暖趋势的影响作用仍需进一步明确^[31]。

对比 T_h 和 T_L ,可以看出火山爆发对GMST的影响主要出现在 T_L 的变化中,而 T_h 的贡献很小(表1)。研究选取了1950年后5次较大的火山爆发事件(图4(c)中的黑色三角),包括1963年的Agung、1974年的Merapi、1980年的St. Helens、1991年的Pinatubo和2011年的Nabro火山爆发事件。这5次火山爆发事件引起了GMST在火山爆发后的1~2年内的温度大幅下降。按照从火山爆发时间到GMST到达之后1~3年内局部的最小值时间计算,火山爆发导致的全球降温幅度约为0.04~0.08°C/a,远高于全球长期变暖速度(约为0.07°C/10 a)。

火山爆发产生的气溶胶可以在平流层中驻留一段时间^[30],减小达到地面的短波辐射,影响全球平均表面温度。定量分析火山爆发对全球平均温度的影响作用有助于加强对外部自然过程强迫影响气候变化作用的认识。本研究利用时间序列分解方法,通过移除主要物理过程影响的方式提取出了与重大火山爆发事件相关的GMSST和GMST的变化,明确了TR(有火山)和TR(无火山)的差异,如图5所示。结果表明火山爆发后GMST短期快速降温的时间长度约为1~1.5 a。1950年后5次重大火山爆发事件之后1~1.5 a造成的降温累积效应在ERSST和HadISST中分别为0.32~0.47和0.45~0.67°C(由

表 1 ERSST v3b和HadISST v1.1中1950年后5次火山爆发事件在TR高频部分、中低频部分和趋势项中一年的温度贡献(°C)

Table 1 Temperature contribution of the five volcanic eruption events after 1950 in the TR high frequency, medium and low frequency segments, and trend items for one year in ERSST v3b and HadISST v1.1 (°C)

对GMSST的贡献	Agung 1963	Merapi 1974	St. Helens 1980	Pinatubo 1991	Nabro 2011
TR高频部分ERSST v3b	-0.024	0.010	0.002	-0.004	-0.011
TR中低频部分ERSST v3b	-0.080	-0.045	-0.041	-0.068	-0.055
TR趋势项ERSST v3b	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
TR高频部分HadISST v1.1	-0.032	0.013	-0.001	-0.034	-0.013
TR中低频部分HadISST v1.1	-0.139	-0.041	-0.041	-0.123	-0.038
TR趋势项HadISST v1.1	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006

图 4 ERSST v3b、HadISST v1.1和HadCRUT.4.6数据TR的高低频信号、低频信号上火山爆发事件的出现与消亡及火山爆发次数时间序列. 高低频(a)和低频(b)信号上1950年后5次重大火山爆发事件以及1945年数据故障的出现. (c) 火山爆发事件次数的年际变化. 黑色实心三角表示1950年后的5次重大火山爆发事件

Figure 4 TR high and low frequency signals, low frequency signals on volcanic eruption events and extinction, and volcanic eruption frequency time series of ERSST v3b, HadISST v1.1 and HadCRUT.4.6 data. Five major volcanic eruptions since 1950 as well as data errors in 1945 on high and low frequency (a) and low frequency (b) signals. (c) Annual change of the number of volcanic eruptions. The black solid triangle represents five major volcanic eruptions since 1950

表1中火山爆发的降温效应累加得到, 为5次重大火山爆发之后持续1~1.5 a的累加降温效应). 这意味着1950年后所有火山爆发的综合影响可能会超过0.47°C(0.67°C, 基于HadISST). 但是, 小火山爆发事件产生的影响作用

可能相对较小、时间尺度相对较短, 难以显著地区别于数据背景噪音.

其次是观测系统误差的影响. 影响 T_L 变化的第二个因素是观测方式变化产生的系统误差. 1945年前后,

图5 TR和去除1950年后火山爆发影响的TR。蓝线和红线分别代表有火山和无火山的TR时间序列；从上到下3组结果分别来自于ERSST v3b、HadISST v1.1和HadCRUT.4.6

Figure 5 TR and TR with the effects of post-1950 volcanic eruptions removed. The blue and red lines represent the TR time series with and without volcanoes, respectively. The three groups of results from top to bottom come from ERSST v3b, HadISST v1.1 and HadCRUT.4.6, respectively

全球平均SST发生显著降温。已有研究发现利用已知的主要气候变异和外部辐射强迫作用变化都难以解释这一降温过程^[11]。而在此期间，SST的观测方式发生了比较显著的变化。20世纪40年代，美国船只主要通过从机舱进气口测量海水温度，而英国船只主要利用采水器把海水打到甲板上测量^[14]。后者的观测方式受到蒸发降温的影响，观测的海水温度值偏低。1942年1月~1945年8月期间，80%的SST观测结果来自美国，而1945年末~1949年间只有30%的结果来自美国，而50%的结果来自英国^[11]。因此形成了1945年后全球平均SST观测偏低的系统偏差^[15]。

这种短期的观测系统偏差导致SST的变化具有阶梯跃变特性，并且在空间上具有一定的随机性，不影响SST在整个时间段上的协方差矩阵，因此利用EOF方法得到的物理模态中不包含这种阶梯跃变过程(图1)。根

据这一特性，参照已有研究的观测系统误差时间段的选择，通过分析 T_L 分量在1945年8月后大约6个月时间内的变化(图4虚线表示1945年数据故障的开始时间)，估计海洋观测系统误差对GMST的影响作用在ERSST和HadISST中大致为0.21和0.22°C。如果假设在随后的观测中再没有出现由这种观测方法形成的非常明显的系统误差，则可以估算1945年前后观测方式变化对过去100多年间GMST变化趋势的影响作用大约为20%。而对于海陆的HadCRUT.4.6数据，1945年的数据故障不显著，这可能是源于数据故障主要来自海洋，或源于HadCRUT.4.6数据本身对数据故障问题的调整。

最后是全球变暖“减缓”的效应。图4显示，1910年以来，GMST出现了多次超过10年变冷或者变暖“停滞”(1920~1930、1945~1962、1998~2012年)。如果叠加上全球变暖的长期趋势，则表现为显著的全球变暖“减

缓”(Hiatus). 关于1998~2012年间全球变暖“减缓”的形成机制, 相对一致的观点是气候系统的内部变率导致GMST出现年代际时间尺度上的上升速度减缓, 但是对于哪些具体的内部变率导致全球变暖“减缓”, 仍有很多不同观点, 主要包括对流层水汽作用^[32]、气溶胶变化^[33]、上层海洋变暖^[34]、赤道东太平洋ENSO变异^[35]、观测数据偏差^[36]、海洋受热的不均匀分布^[37]和未考虑北极快速变暖^[38]等. 本研究发现, 即使去除ENSO、PDO和AMO变化对全球平均表面温度的贡献之后(图4灰色阴影部分), GMST和GMSST在1998~2012年间上升速度减缓的现象仍然存在, 也就是说这3个主要的物理模态对表面温度的影响作用不能完全解释全球变暖“减缓”.

2.2.3 GSST的非线性变暖趋势

TR的变暖趋势项 T_{TR} 呈非线性增长特征, 主要表现为在20世纪初期缓慢增长, 而1950年后加速变暖(图1), 与以往的研究结果一致. 这反映了人为温室气体排放的逐渐累加导致全球气候在百年时间尺度上加速变暖的基本特征. 这里主要分析全球长期变暖趋势的空间结构. 与图6的空间结构相比, 去除TR的高频和低频分量没有显著改变全球变暖的整体空间结构. 值得注意的是, 去除AMO对GMST的贡献之后, 全球长期变暖趋

图6 HadCRUT.4.6(a)、ERSST v3b(b)、HadISST v1.1(c)数据中, TR变暖趋势项的表面温度投影

Figure 6 Surface temperature projections for TR warming trend items in HadCRUT.4.6 (a), ERSST v3b (b) and HadISST v1.1 (c) data

势的空间结构中仍然存在北大西洋北部亚极地区域的冷斑现象. 我们将在今后的工作中继续深入研究冷斑的形成机制.

3 总结与讨论

影响全球平均表面温度变化的主要物理过程包括: (1) 人为温室气体排放导致的全球变暖; (2) 自然与人为活动形成的气溶胶导致的降温作用; (3) 气候系统内部变率; (4) 观测系统变化引起的系统误差; (5) 数据噪音以及其他一些尚未明确的因素. 分析确定观测数据中每个部分对全球平均表面温度变化的影响与贡献, 是评估和改进气候模式、提升气候模式预测能力、明确人类活动和自然变异对全球气候变化影响作用的关键基础.

以往研究基于EOF分析方法有效地提取了ENSO、PDO和AMO等3个主要气候模态对全球平均表面温度的贡献^[3]. 本研究是这一工作的延续, 基于多组表面温度观测数据, 分析了除上述3个主要物理模态以外, 其他影响和调制气候长期变暖趋势的关键过程. 本研究有两个主要贡献.

一是量化了火山爆发影响全球平均表面温度的时间尺度和强度. 本研究估算1950年后5次较大的火山爆发事件的累积效果在ERSST和HadISST中导致全球变暖速度减缓分别约为0.32~0.47和0.45~0.67°C, 每次火山爆发导致全球平均表面温度减少分别约为0.06~0.09和0.09~0.13°C, TR低频分量显示单次火山爆发引起的短期温度下降平均时间尺度大约为1~1.5 a. 这个估算低于早期火山爆发影响作用估值区间的最小值0.1°C^[39], 但量级基本一致.

二是发现GMSST和GMST在去除ENSO、PDO和AMO等3个主要气候模态时, 趋势项TR中1998~2012年间上升速度减缓的现象仍然存在. 也就是说, 仅用地表物理过程变异的主要模态(包括物理模态本身及其对全球表面温度的影响作用)不能完全解释全球变暖“减缓”, 同时这意味着存在另外一些不同于上述3个物理模态的过程, 会显著影响TR趋势变化, 进而导致全球变暖“减缓”. 在人为辐射强迫持续增强的条件下, 全球气候系统所吸收的热量(气候系统的能量收支平衡)持续增加. 此时表面温度在年代际时间尺度上的上升速度减缓, 说明用于加热海洋和陆地表面温度的能量有所减少, 而这部分“减少”的热量仍然存在气候系统中. 已有研究表明在海洋环流变异的作用下, 这部分“减

少”的热量被输送至次表层或中深层海洋,因此从地表看来,虽然人为辐射强迫作用仍然持续,但是表面温度整体上没有上升。而本研究分析结果表明这种输送过程也没有体现在海表面温度的变化中。这一结果从侧面强调了通过气候系统的能量收支平衡理解导致全球气候变暖“减缓”关键物理过程的必要性。

基于数据分析方法将整体效应(全球平均表面温度变化)分解为多个不同的物理过程需要依赖一些对物理过程的假设。本研究的分析主要基于如下两个假设。

(1) 自然变率、火山爆发事件或者观测设备的系统误差等因素的影响没有长期的变化趋势。以往研究指出,如果自然变率不存在百年时间尺度上的长期变化趋势,则可以利用EOF分析方法,将ENSO、PDO和AMO等物理模态从GMSST中分离出来,得到与这些物理过程相互正交的长期变化趋势 $TR^{[40,41]}$ 。本研究利用EEMD方法将TR分解为长期变化趋势以及叠加在长期趋势上的振荡过程,可以认为这些振荡过程是其他一些物理过程(包括内部变率和外部强迫)对表面温度变化的影响。

(2) 单一、不连续事件不会影响主要物理模态的遥相关结构。基于EOF分析方法将ENSO、PDO和AMO等物理模态从GMSST中分离出来主要是利用了ENSO、PDO和AMO等模态的遥相关空间结构。计算遥相关结构主要是基于表面温度的协方差矩阵。单一、不连续事件的影响主要表现为阶梯函数,因此可以假设在整个时间尺度上对协方差矩阵的影响较小。本研究主要基于这一假设将TR的低频分量归因为观测系统的变化和火山爆发事件的影响。但是需要注意,火山爆发事件对SST的影响具有全球性,因此SST的协方差矩阵可能会包含一部分这种全球性影响的相关性。目前的分析方法仍难以完全“干净”地分离这一影响作用。

这些假设的适用性还需要在进一步的研究中加以检验。例如,采用相同的方法分析气候模式的表面温度模拟结果,确定气候模式中影响全球平均表面温度的关键过程及其作用,通过对比分析确定这些假设的合理性与局限性,同时也将有助于进一步认识气候模式的模拟和预测能力。

参考文献

- Xu Y, Ramanathan V, Victor D G. Global warming will happen faster than we think. *Nature*, 2018, 564: 30–32
- Church J A, White N J, Konikow L F, et al. Revisiting the Earth's sea-level and energy budgets from 1961 to 2008. *Geophys Res Lett*, 2011, 38: L18601
- Chen X, Tung K K. Global-mean surface temperature variability: Space-time perspective from rotated EOFs. *Clim Dyn*, 2018, 51: 1719–1732
- Thompson D W J, Wallace J M, Jones P D, et al. Identifying signatures of natural climate variability in time series of global-mean surface temperature: Methodology and insights. *J Clim*, 2009, 22: 6120–6141
- Privalsky V E, Jensen D T. Assessment of the influence of ENSO on annual global air temperatures. *Dyn Atmos Oceans*, 1995, 22: 161–178
- Frankignoul C, Gastineau G, Kwon Y O. Estimation of the SST response to anthropogenic and external forcing and its impact on the Atlantic multidecadal oscillation and the Pacific decadal oscillation. *J Clim*, 2017, 30: 9871–9895
- Wu Z, Huang N E, Wallace J M, et al. On the time-varying trend in global-mean surface temperature. *Clim Dyn*, 2011, 37: 759–773
- Hansen J, Sato M, Kharecha P, et al. Earth's energy imbalance and implications. *Atmos Chem Phys*, 2011, 11: 421–449
- Gupta M, Marshall J. The climate response to multiple volcanic eruptions mediated by ocean heat uptake: Damping processes and accumulation potential. *J Clim*, 2018, 31: 8669–8687
- Robock A. The volcanic contribution to climate change of the past 100 years. *Dev Atmos Sci*, 1991, 19: 429–443
- Thompson D W J, Kennedy J J, Wallace J M, et al. A large discontinuity in the mid-twentieth century in observed global-mean surface temperature. *Nature*, 2008, 453: 646–649
- Smith T M, Reynolds R W. Bias corrections for historical sea surface temperatures based on marine air temperatures. *J Clim*, 2002, 15: 73–87
- Kent E C, Taylor P K. Toward estimating climatic trends in SST. Part I: Methods of measurement. *J Atmos Ocean Technol*, 2006, 23: 464–475
- Xue Y, Smith T M, Reynolds R W. Interdecadal changes of 30-Yr SST normals during 1871–2000. *J Clim*, 2003, 16: 1601–1612
- Huang B, Banzon V F, Freeman E, et al. Extended Reconstructed Sea Surface Temperature Version 4 (ERSST.v4). Part I: Upgrades and intercomparisons. *J Clim*, 2014, 28: 911–930
- Huang B, Angel W, Boyer T, et al. Evaluating SST analyses with independent ocean profile observations. *J Clim*, 2018, 31: 5015–5030
- Wang J, Chen X. Intercomparison of the Extended Reconstructed Sea Surface Temperature v4 and v3b datasets. *J Ocean Univ China*, 2018, 17: 209–218

- 18 Deser C, Phillips A S, Alexander M A. Twentieth century tropical sea surface temperature trends revisited. *Geophys Res Lett*, 2010, 37: L10701
- 19 Morice C P, Kennedy J J, Rayner N A, et al. Quantifying uncertainties in global and regional temperature change using an ensemble of observational estimates: The HadCRUT4 data set. *J Geophys Res*, 2012, 117: D08101
- 20 Zhang Z H, Moore J C. Empirical orthogonal functions. In: *Mathematical and Physical Fundamentals of Climate Change*. Amsterdam: Elsevier, 2015. 161–197
- 21 von Storch H, Zwiers F W. *Statistical Analysis in Climate Research*. Cambridge: Cambridge University Press, 1999
- 22 Lawrence D J, Maurice S, Feldman W C. Gamma-ray measurements from Lunar Prospector: Time series data reduction for the gamma-ray spectrometer. *J Geophys Res*, 2004, 109: C08017
- 23 Barbosa S M, Andersen O B. Trend patterns in global sea surface temperature. *Int J Climatol*, 2009, 29: 2049–2055
- 24 Tung K K, Chen X Y, Zhou J S, et al. Interdecadal variability in pan-Pacific and global SST, revisited. *Clim Dyn*, 2018, 52: 1–13
- 25 Zeiler A, Faltermeier R, Keck I R, et al. Empirical mode decomposition—An introduction. In: *Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks*, 2010. 1–8
- 26 Chen X, Wang M, Zhang Y, et al. Detecting signals from data with noise: Theory and applications. *J Atmos Sci*, 2013, 70: 1489–1504
- 27 Huang N E, Wu M L C, Long S R, et al. A confidence limit for the empirical mode decomposition and Hilbert spectral analysis. *Proc R Soc A-Math Phys Eng Sci*, 2003, 459: 2317–2345
- 28 Ji F, Wu Z, Huang J, et al. Evolution of land surface air temperature trend. *Nat Clim Chang*, 2014, 4: 462–466
- 29 Wu Z H, Huang N E. A study of the characteristics of white noise using the empirical mode decomposition method. *Proc R Soc Lond A*, 2004, 460: 1597–1611
- 30 Rampino M R, Self S. Sulphur-rich volcanic eruptions and stratospheric aerosols. *Nature*, 1984, 310: 677–679
- 31 Guevara-Murua A, Hendy E J, Rust A C, et al. Consistent decrease in North Atlantic Tropical Cyclone frequency following major volcanic eruptions in the last three centuries. *Geophys Res Lett*, 2015, 42: 9425–9432
- 32 Solomon S, Rosenlof K H, Portmann R W, et al. Contributions of stratospheric water vapor to decadal changes in the rate of global warming. *Science*, 2010, 327: 1219–1223
- 33 Kaufmann R K, Kauppi H, Mann M L, et al. Reconciling anthropogenic climate change with observed temperature 1998–2008. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2011, 108: 11790–11793
- 34 Meehl G A, Arblaster J M, Fasullo J T, et al. Model-based evidence of deep-ocean heat uptake during surface-temperature hiatus periods. *Nat Clim Chang*, 2011, 1: 360–364
- 35 Kosaka Y, Xie S P. Recent global-warming hiatus tied to equatorial Pacific surface cooling. *Nature*, 2013, 501: 403–407
- 36 Karl T R, Arguez A, Huang B, et al. Possible artifacts of data biases in the recent global surface warming hiatus. *Science*, 2015, 348: 1469–1472
- 37 Yao S L, Luo J J, Huang G, et al. Distinct global warming rates tied to multiple ocean surface temperature changes. *Nat Clim Chang*, 2017, 7: 486–491
- 38 Huang X T, Diao Y N, Luo D H. Amplified winter Arctic tropospheric warming and its link to atmospheric circulation changes. *Atmos Ocean Sci Lett*, 2017, 10: 435–445
- 39 Robock A, Mao J. The volcanic signal in surface temperature observations. *J Clim*, 1994, 8: 1086–1103
- 40 Chen X, Tung K K. Varying planetary heat sink led to global-warming slowdown and acceleration. *Science*, 2014, 345: 897–903
- 41 Chen X, Wallace J M, Tung K K. Pairwise-rotated EOFs of global SST. *J Clim*, 2017, 30: 5473–5489

Summary for “影响全球平均表面温度的主要过程”

Main processes affecting global average surface temperature

Xinyue Li¹ & Xian Yao Chen^{1,2*}

¹ Key Laboratory of Physical Oceanography, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

² Deep Sea Circle Layer and Earth System Frontier Center, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

* Corresponding author, E-mail: chenxy@ouc.edu.cn

Since the industrial revolution, the greenhouse effect caused by greenhouse gas emissions has led to an increase in the net radiative forcing on the Earth's surface, and the global mean surface temperature (GMST) has continued to rise, accompanied by multi-time scale oscillations including inter-annual decadal and multi-decadal oscillations. Changes in GMST, which reflect the integrated response of the climate system to the combination of external radiation forcing and internal natural variables, are one of the key indicators for understanding the impact of human activities on global climate change.

Previous studies have basically determined the contribution of major physical modes of the global surface temperature, such as the El Niño-Southern Oscillation (ENSO), the Pacific Decadal Oscillation (PDO) and the Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) based on Empirical Orthogonal Function (EOF) method. In addition to the above climate modes, the physical processes affecting GMST changes also include volcanic eruptions, observation data system errors and so on. Based on the above research progress and these two basic assumptions (there is no long-term changing trend due to factors such as natural variabilities, volcanic eruption events, or system error of observation equipment; a single event does not affect the remotely related structure of the main physical mode), EOF decomposition is applied to the surface temperature of ERSST v3b and HadISST v1.1 ocean observation data in this paper, so as to obtain the TR warming trend item with ENSO, PDO and AMO removed, and thus, by using Ensemble Empirical Mode Decomposition (EEMD) method, to break down each TR time series into components on multiple different time scales and summarize them into low frequencies, high frequency and trend items. The land and ocean data (HadCRUT.4.6) are used to compare ocean data (ERSST v3b and HadISST v1.1) results and conduct a statistical analysis on the errors introduced by EMD methods.

This study found that the main physical processes affecting changes in the GMST include global warming caused by the anthropogenic greenhouse gas emissions, the cooling effects caused by aerosols, the internal variables in the global climate system, the system errors caused by changes in the observing system, data noise, and other factors that have not yet been identified. Based on ERSST V3b and HadISST v1.1 observational data, this study also analyzed and determined the impact and contribution of each factor to GMST changes. This could be a key step to identify the effects of human activities and natural variability on global climate change. There are two main conclusive contributions in this paper. One contribution was to quantify the time scale and intensity of the impact of volcanic eruptions on GMST. We estimated the impact of five major volcanic eruptions since 1950 (Agung, 1963; Merapi, 1974; St. Helens, 1980; Pinatubo, 1991; Nabro, 2011). The cumulative effects of these five major volcano events in ERSST and HadISST approximately caused global warming to slow down by 0.32–0.47 and 0.45–0.67°C, respectively. Another major contribution is to find that the TR item of GMST still has a recent global warming mitigation phenomenon after the removal of the three major climate models, that is, there are some processes in the Earth's climate system that are different from the above three physical models, which could significantly affect the TR changes. Therefore, global warming tends to slow down (warming hiatus). In modern climate conditions, anthropogenic radiative forcing continues to increase, and the heat absorbed by the global climate system continues to increase during global warming hiatus period. That is, even if the amount of heat energy used to heat up the surface of the global surface reduced, this “reduced” amount of heat still remains in the climate system, such as the mid-deep ocean. The results further underscore the necessity for understanding the critical physical processes that lead to global warming from the perspective of the energy balance of the climate system.

global mean surface temperature (GMST), main climate mode, volcanic eruption, aerosol, hiatus

doi: [10.1360/TB-2021-0020](https://doi.org/10.1360/TB-2021-0020)