



器测时期全球增暖趋势及其不确定性估计——基于 IPCC 科学评估的回顾与展望

李庆祥^{1,2,3}

1. 中山大学大气科学学院, 热带大气海洋系统科学教育部重点实验室, 广州 510275;

2. 中国科学院中亚生态与环境研究中心, 乌鲁木齐 830011;

3. 广东省南方海洋科学与工程实验室(珠海), 珠海 519082

E-mail: liqingx5@mail.sysu.edu.cn; liqingxiang@ms.xjb.ac.cn

2023-10-26 收稿, 2023-11-24 修回, 2023-12-26 接受, 2024-01-15 网络版发表

国家自然科学基金(42375022, 41975105)和国家重点研发计划(2023YFC3008002)资助

摘要 《巴黎协定》提出的温控目标未来还有多少升温空间? 这是各国政府、科学家和公众所共同关心的问题。要准确回答这一问题, 需要更高质量的基准气候观测数据集作为变暖事实检测的核心基础。针对近年来全球表面温度(global surface temperature, GST)偏差引起的讨论, 政府间气候变化委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第6次科学评估报告(AR6)在遴选用以评估工业化以来地球增暖幅度的器测时期全球基准温度数据集时, 在数据集的时间覆盖范围和空间抽样方面采用了更为严格的标准。所收录的5个全球基准数据集中: Had-CRUT5(英国气象局和东安吉利尔大学)、NOAAGlobalT-Interim(美国大气海洋局/国家环境信息中心)、BE(美国 Berkeley Earth 团队)被完全采纳; GISS(美国美国航天局/戈达德航天科学研究中心)只采纳了1880年以来的数据, 最新发布的China-MST-Interim(中国中山大学)则只采纳了其全球陆地气温(global land surface air temperature, GLSAT)分量China-LSAT; 此外, AR6还参考了几个基于新方法(统计插补、数据融合和人工智能)对HadCRUT4重建数据集的评估结果。基于上述数据集, AR6报告给出了迄今最优的工业化以来(用1850~1900年平均值表示)的增暖估计, 即最近10年(2011~2020年)全球平均增暖了1.09°C(0.95~1.20°C)。但毋庸置疑, 要彻底厘清这个问题的确切答案, 未来还有许多工作要做。

关键词 全球变暖, 器测时期, 基准数据, 增暖趋势, 不确定性

全球变暖物理基础的建立可以追溯至两个世纪之前, 傅里叶提出地球大气具有温室效应^[1], 直至20世纪80年代后期(1988年), 詹姆斯·汉森(James Hassen)在美国国会听证会上提出了“全球变暖99%可能与二氧化碳有关”的论断, 全球气候变暖才得到了世界各国政府、科学家和广大公众的广泛关注, 并已成为国际社会和各国政府所关心的重要政治问题之一^[2,3]。

大气与气候科学是一门以观测为基础的学科, 其

学术思想和研究水平的提高离不开观测数据的长期积累^[4,5]。然而, 由于早期缺乏全球大规模历史观测, 观测数据的质量也参差不齐, 缺乏非常可靠的验证证据线, 一直是制约大气和地球物理科学发展的瓶颈, 尤其是制约气候系统变化监测和预测能力的提高。基于不断完善的观测研究成果, 人们渐渐认识到, 最近100多年来全球温度出现了明显的上升, 即全球变暖, 并由此引起了地球气候系统其他圈层要素的明显变化^[6~8]。但

引用格式: 李庆祥. 器测时期全球增暖趋势及其不确定性估计——基于IPCC科学评估的回顾与展望. 科学通报, 2024, 69: 3970–3983

Li Q X. Global warming trends and their uncertainty estimation during the instrumental observation period: A review and outlook based on IPCC scientific assessments (in Chinese). Chin Sci Bull, 2024, 69: 3970–3983, doi: 10.1360/TB-2023-1104

这个过程经历了许多次迂回曲折的讨论与争论。

全球表面温度(global surface temperature, GST)无疑是全球(也包括区域和局地)尺度地表物理过程中最关键的因子之一,也是研究地表和大气之间物质和能量交换的最为重要的参数(https://www.wmo.int/pages/prog/gcos/Publications/gcos-82_2AR.pdf)。科学家通过一个多世纪的艰苦努力,在20世纪80年代后期首次给出了全球变暖的确凿证据——英国气候学家Jones等人^[9]建立的全球尺度陆地平均气温变化序列为代表性成果。但随着时间的推移,新的气候变化现象不断被揭示,科学研究和社会服务对更准确的全球温度变化事实评估的要求和期望与日俱增。因此,在历次的政府间气候变化委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)科学评估报告中,均将工业化以来全球增暖的幅度评估作为整个报告的重要基础和出发点^[6-8]。

《巴黎协定》提出的长期目标是将全球平均气温较前工业化时期上升幅度控制在2°C以内,并努力将温度上升幅度限制在1.5°C以内。各缔约方国于2021年达成了《巴黎协定》的实施细则等一揽子决议^[10]。但关于“全球地表温度自工业化以来到底变暖了多少”这个问题,历来为全球气候学家所高度关注。援引多年来科学家的成果,IPCC历次评估报告都给出了当时认为最优的估计^[6-8]。但显然,随着气候变化观测的发展,数据收集的完整性提高及处理技术的不断完善,这个问题的答案也越来越清晰和准确。特别是2009年以来的“气候门”事件和近期的全球“增暖停滞”大讨论以来,包括气候与其他相关领域的科学家做了大量的针对性研究,这些成果集中展现于2021年出版的IPCC AR6科学评估报告中,将器测时期以来全球增暖幅度的估计精度推向了一个新的高度^[8]。

1 IPCC/AR6之前主要成果的简要回顾

1.1 陆地气温数据集与平均气温序列

基于器测数据的GLSAT变化的研究,最早可以追溯到1881年,直至20世纪80年代后期从陆地表面气温观测数据系统揭示出全球变暖现象^[9,11]。目前认为最早研究这一问题的是德裔气象学家、地理学家和植物学家Köppen^[12],他率先建立了全球温度序列(1841~1875年)。此后,较完整的关于温度记录和全球气候趋势的回顾可以参看文献^[13](<https://www.osti.gov/servlets/purl/6264945>)。IPCC AR4科学报告^[6]进一步回顾了全球

温度变化研究历史(图1),并给出了当时的全球温度变化估计,它所采用的4个陆地气温序列——CRUTEM3^[14]、NCDC^[15]、GISS^[16]和Lugina(<http://cdiac.ornl.gov/trends/temp/lugina/lugina.html>)分别给出1901~2005年陆地气温变化趋势为 $0.068 \pm 0.024^\circ\text{C}/10\text{a}$ (基于GHCN(Global Historic Climate Network))至 $0.084 \pm 0.021^\circ\text{C}/10\text{a}$ (基于CRUTEM(Climatic Research Unit Temperature)),这些差异被认为是缺失数据处理、台站数目和气候观测序列均一化调整方法所致^[13]。

过去的20多年,若干GLSAT数据集在数据收集和处理技术上得到不断改进^[8,17]。其中CRUTEM^[17-19]、GHCN^[20-22]、GISTEMP^[23]等被IPCC应用于历次评估报告中。日本气象厅(Japanese Meteorological Agency, JMA)近20多年来也在其官方网站上定期发布全球气温数据集并监测全球气候(http://ds.data.jma.go.jp/tcc/tcc/products/gwp/temp/ann_wld.html),但2000年之前完全使用了NOAA/NCDC(现NOAA/NCEI)的GHCN数据,因此近年未在国际期刊上发表数据集的质量控制和研发论文。从21世纪前10年起,由于受到“气候门”事件的影响而使科学界和公众对全球温度数据集/温度变化的信心有所动摇,一些新的研究小组也纷纷加入到全球温度数据集的研发和讨论中。最初是2010年,在世界气象组织(World Meteorological Organization, WMO)框架下,美国NOAA和英国UKMO联合组织了一个旨在发展更精确的全球温度数据集的国际表面温度计划项目(International Surface Temperature Initiative, ISTI),并提出发展全球陆地综合气象观测数据库(Comprehensive

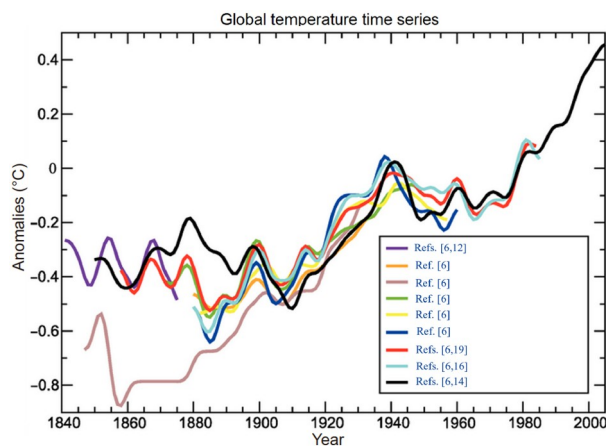


图1 1881年以来部分全球温度变化序列^[6]

Figure 1 Some global surface temperature series since 1881^[6]

Land-based International Meteorological Observation Databank, CLIMOD)的路线图^[24]; Berkeley Earth陆地气温数据集(BEST)是以数学家和物理学家为主,采用的是更为复杂的地理统计方法——Block Kriging方法进行空间分析^[25],它在北极冰面覆盖地区分别采用冰面气温和海表温度(sea surface temperature, SST, 一般以常数 -1.8°C 代替)两种数据^[26]。China-LSAT是近年来以中国科学家为首的国际合作小组发展的,它在对气候资料系统质量保障时采用了一个新的框架,即直接整合了部分国家(中国、美国、加拿大和澳大利亚)和地区(欧洲)的均一化数据集,以兼顾考虑全球和区域气候变化的精确性^[27,28],其早期版本也用于GLSAT及日较差变化的研究^[29]。

1.2 海洋表面温度数据集及全球平均表面温度序列

相对于陆地分量,海洋表面温度的非均一性问题主要由于其观测手段的变化:桶和发动机取水(也包括铁桶、木桶和帆布桶的差异)、船舶和浮标观测,以及观测手段和数据的匹配问题(特别是20世纪70年代之前),导致SST数据存在更大的不确定性问题^[30,31]。但海洋基础数据档案(International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set, ICOADS)的收集是较为完备和统一的^[32,33]。在此基础上,开发了几个全球海表温度(global sea surface temperature, GSST)数据集:第一类主要使用现场观测,典型的如美国NOAA/NCDC(现NOAA/NCEI)扩展重建(ERSST)^[34~37]、英国哈德利中心的HadSST^[38,39];另一类则还融合使用了其他数据源(卫星遥感等),如JMA基于百年观测的SST估计(COBE-SST)^[40,41]。最新的ERSST版本(ERSSTv5)和HadSSTv4均使用了新发布的ICOADS 3.0^[33],这提高了SST的空间和时间变异性以及绝对数值^[36,37]。其中, HadSST被作为海温分量用于HadCRUT和Berkeley Earth(BE),而ERSSTv5则被用于NOAA GlobalTempv5^[42]、GISS^[43]及CMST^[28]。值得一提的是,因COBE-SST通过三维变分手段使用了不完全独立的卫星遥感数据进行了客观分析,故目前只有JMA使用其监测全球温度。IPCC的AR5^[7]指出,当对AR4中使用的所有3个全球平均地表温度(global mean surface temperature, GMST)数据集^[44,45]更新后,它们之间的一致性有所提高。但随后,科学家发现,由于观测数据集处理数据稀疏区域(如极地)的方式不同,可能会带来地表气温采样“偏差”,从而出现在特定时期(一般指1998~2012年)存在所谓的

“增暖停滞”现象^[46~49]。

在上述China-LSAT数据集的基础上,中国全球融合表面温度(China-MST或CMST)通过将China-LSAT(或C-LAST)^[27,28,50]作为陆地分量,将ERSSTv5^[37]作为海洋分量融合而成一个新的GST基准数据集^[27,28,51,52]。从基于其得到的1880年以来的GMST趋势和不确定性水平来看,与其他全球数据集大体一致^[53~55]。

1.3 再分析数据集在温度监测评估中的应用

再分析数据集一定程度上也可用于提高我们对全球变暖趋势、地表温度变化及极端情况的理解^[49,56~59],它通过同化不同观测数据提供了比观测时空分辨率更为完整覆盖的产品。当前再分析数据可分为两类:第一类尽可能同化了所有类型的可用观测。例如,最早的国家环境预测中心/国家大气研究中心(NCAR/NCEP)再分析(R1)^[60]、NCEP/DOE再分析2(NCEP/DOE R2)^[61]、ERA-interim版本^[62]和NCEP气候预测系统再分析(CFSR)^[63],尤其是自1979年以来卫星数据得以被同化,包括ECMWF 40年再分析(ERA-40)^[64]、日本气象厅55年再分析(JRA-55)^[65]、ERAS^[66]甚至还同化了1972/1973年以来的VTPR卫星数据。另一类是所有时段只同化地面现场观测(如地表气压和海洋风),代表性的有20CRv^[67]和CERA-20C^[68]。对比起来,第一类由于同化了更多观测而具有更高的空间精度,但也因为所同化数据种类和数量在时间上不一致,导致在某些重要节点(如引入卫星同化的20世纪70年代)可能存在不连续性^[69];第二类则对这种时间上的非均一性问题不太敏感,但由于同化数据的数量少,其空间精度可能显著低于第一类。当然,随着模型和同化技术的改进,后一类再分析的精确性也在不断提高,有的甚至已经接近第一类再分析^[59,67,70]。

2 IPCC/AR6关于全球变暖的新认知及相应的温度数据集更新

IPCC AR6新的核心认知之一就是基于更丰富、更可靠的观测资料和证据,采用更科学的分析方法,给出了更准确的全球升温估算^[8]。新结论的得出主要归功于几个基准温度数据集及其科学附加衍生产品对北极或高海拔地区温度数据的处理。这些结论说明:(1)随着气候变化观测技术的发展,科学家越来越准确地估算出工业化以来全球变暖的幅度;(2)《巴黎协定》提出的21世纪末 $1.5/2.0^{\circ}\text{C}$ 温控目标的升温空间已经大大

压缩,全球应对气候变暖的紧迫性大大提升.

2.1 数据插补与增暖趋势的变化

基于GLSAT和GSST融合得到的GMST、IPCC (2007)和IPCC(2013)^[6,7]均指出气候系统的变暖是明确的.但由于数据覆盖和短期趋势估计的差异,在气候学界引发了一场关于1997/1998年强厄尔尼诺事件后15年变暖“停滞”的辩论^[8,46-50,71-74].

极地地区是高气候敏感度区域,过去几十年来,北极增温幅度达到全球平均增温的2倍以上,这种现象被称为“北极放大”^[75,76].因此,容易推断,北极地区数据覆盖不足会使得全球变暖趋势估计存在冷偏差^[77],故观测数据对20世纪末超强El Niño事件以来增暖趋势的低估与北极数据缺失密切相关^[78].2014年,Cowtan和Way^[46]开发了GST混合数据集(CW2014):使用卫星数据重建了HadCRUT4数据未覆盖区域(约占全球面积的16%,包括极地地区以及非洲和南美洲的部分地区)的气温序列,导致1997~2012年期间的温度趋势从 $0.046^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ (增暖不显著)增加到 $0.119^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ (增暖显著).Huang等人^[48]对国际北极浮标观测站(International Arctic Buoy Observation, IABO)的数据进行了插补,发现1998~2012年期间的变暖趋势为 $0.112^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ (增暖显著),高于未插补数据的 $0.050^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ (增暖不显著).此外,Zhang等人^[42]表明,数据的更新使得增暖趋势更快:1880~2018年增暖趋势从NOAAGlobalTemp v4的 $0.070^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 到NOAAGlobalTemp v5的 $0.073^{\circ}\text{C}/10\text{a}$.Simmons等人^[49]研究表明,插补填充的观测数据集与ERA Interim和JRA-55再分析的增暖趋势更一致,尤其是在1998~2012年间的变暖趋势达 0.140 和 $0.090^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ (增暖显著),大于AR5使用的任何观测数据集的结果(增暖不显著)^[7].

2.2 全球基准温度数据集的重建与完善

自IPCC AR5发表以来,海洋和陆地上的观测数据都有了实质性的改善,ICOADS 3.0^[33]增加了数据稀少期和稀疏地区的覆盖率(如两次世界大战期间和高纬度、极地海洋地区),两个SST数据集ERSST和HadSST都使用了这一成果进行了更新.ISTI也发布了新的月平均GLSAT观测数据集,这个数据集包含超过30000个单独的站点数据,而且其中一些站点的时间覆盖超过了100年^[78].基础数据的改进提高了全球表面基准温度数据的覆盖率,一定程度上降低了变暖估计的不确定性.

但显然,上述“融合”数据仍然存在由于观测覆盖不足造成的不确定性,特别是高海拔地区和极地地区^[79],导致目前估算的GMST增暖趋势仍然出现一定程度上的负偏差.

解决高纬度和高海拔地区观测覆盖不足带来的偏差,优化全球温度变暖观测事实结论是AR6首先必须解决的问题.自IPCC AR5以后,上述所有数据集(HadCRUT, NOAAGlobalTemp, GISS和BE)都已经对高纬度冰面覆盖区域默认海温数据(以 -1.8°C 代替)进行了更新和重建.其中,BE使用基于Block Kriging方法对冰面气温数据进行了空间插值来填充冰面默认数据^[25,26],GISS在高纬度增加了1200 km扫描半径的观测数据外插^[16],NOAAGlobalTemp采用了Huang等人^[37]的重建海温数据等.显然,对北半球高纬度区域的插值和重建降低了GMST趋势估计中的偏差,上述数据集在高纬度的处理使其在所谓“增暖停滞”时期的增温趋势均达到了95%信度下的显著水平,与最新研发完成的CMST一致^[50].这表明1998~2012年的“增暖停滞”是观测数据的质量问题或空间抽样问题所导致的.

基于上述结果,AR6 WG1对GST基准数据集提出了3个遴选标准:(1)数据集在1850~1900年51年内90%的年份应有数据;(2)数据集在1960年之后每年至少应有90%的格点有观测(重建)数据;(3)数据的主要论文必须在2021年1月份之前被国际期刊接受.在此要求下,美国NOAA/NCEI采用空间平滑和经验正交遥相关(empirical orthogonal teleconnections, EOTs)结合的方式,将北极地区(65°N 以北)全部作为冰面进行了气温重建,分别生成了100个成员的GHCN集合数据和100个成员的ERSST集合数据,两者合并成为GST数据集NOAAGlobalTemp-Interim^[80].英国Hadley中心基于最新完善的CRUTEM5,利用高斯法,根据HadSST3海温数据中海冰区域用陆地气温数据外插重建,构建了新的HadCRUT5^[81].BE和GISS保持了该处理方法.考虑到高、低频重建方法在理论上清晰合理,CMST团队^[52]也采用与NOAA的ERSSTv5类似的重建方法对陆地气温进行了重建,同时将ERSSTv5数据集的起始点从1854年向前延伸到了1850年,发展成为CMST-Interim.因此,AR6认为:HadCRUT5、NOAAGlobalTemp-Interim和BE无论是GLSAT分量,还是GSST分量,均满足全部要求;GISS则均只能提供1880年以来的数据,不满足条件(1);而CMST-Interim对陆地气温分量(China global land surface air temperature, CLSAT)的高纬度地

区进行了集合重建^[51], 完全符合AR6对基准数据集的遴选标准, 但由于GSST分量直接采纳了未经重建的ERSSTv5, 故CMST-Interim暂时并不满足条件(2), 因而也高估了1850~1880年的温度距平。尽管如此, AR6中全球温度变化序列的建立均使用了上述5个GLSAT或GST基准数据集^[8]。稍后, CMST团队将CMST-interim更新升级为CMST 2.0^[52]。CMST2.0包含3种不同版本: CMST2.0-Nrec(无重建)、CMST2.0-Imax和CMST2.0-Imin(根据其重建的北极地区海冰表面空气温度区域的范围大小区分), 供专业用户根据其研究需要选用, 公众用户建议采用CMST2.0-Imax^[52,82]。重建更新后的CMST2.0数据集显著提高了其数据覆盖率, 特别是CMST2.0-Imax在北半球1960年以后的覆盖率提高到了95%以上, 从而进一步提高了1850年以来全球、半球和区域范围内的长期趋势。目前, CMST2.0已经可在研发团队自行建立的气候变化观测与模拟数据平台(<http://www.gwpu.net>)上免费公开获取, 基于该数据集的一些应用也已陆续发表和报道(<https://xhnewsapi.xinhua.com/share/news>, <https://www.eurekalert.org/news-releases/1001711>)^[82,83]。

图2对比了基于CMST2.0-Imax和CMST2.0-Imin两种版本与其他AR6采用的数据集建立的1850~2022年GMST序列。显然, 6条序列在1880年以后的差异较小, 而在此之前, CMST2.0-Imin估计的全球温度距平仍为最高(北极冰面面积始终保持历史最小范围), 而BE为最低。评估结果表明: 与AR5中1850~1900年至1986~2005年间的增暖 0.61°C ($0.55\sim 0.67^{\circ}\text{C}$)相比, AR6中基于重建数据集估计的GMST在这两个时段间的变暖为 0.69°C ($0.54\sim 0.79^{\circ}\text{C}$), 增加了 0.08°C ($-0.01\sim 0.12^{\circ}\text{C}$);

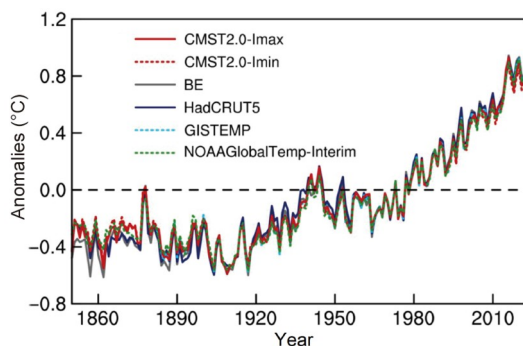


图2 AR6使用的几条全球平均温度序列和China-MST2.0序列的对比(相对于1961~1990年气候平均值)
Figure 2 Comparison of the China-MST2.0 and the GMST series used by AR6 (relative to 1961–1990 averages)

而相对于AR6的最近10年(2012~2021年)比工业化以前(用1850~1900年平均值代表)的增暖(1.09°C)比AR5中最近10年(2003~2012年)相对于工业化以前的增暖(0.78°C)则更是高出了约 0.31°C (IPCC, 2021年)。但这里面大约有 0.2°C 是由于实际的增暖加速, 另外 0.1°C 来自上述重建导致的抽样误差的进一步降低^[8]。

2.3 基于基准温度数据集的其他重建或插补

除此之外, Rayner等人^[84]分析了联系卫星反演地表温度与近地面气温观测的可行性, 量化了卫星反演的地表温度和观测的近地面气温的关系, 构建并评估了全覆盖的数据集; 更早, CW2014(其牵头人是英国约克大学的一名蛋白质晶体学教授)使用基于卫星高空气温的估计值作为近地表温度变化的替代指标, 他们使用Block Kriging方法和混合方法来填充HadCRUT4数据的空白区域, 将数据扩展到极地地区^[46]。但随着HadCRUT4更新为HadCRUT5, 这些问题已不存在了, 该数据集也已经于2021年宣布停止更新。此外, 近年来风靡一时的人工智能(artificial intelligence, AI)技术在GST基准数据集的重建中也发挥了较好的效果。Kadow等人^[85]使用部分卷积神经网络(convolutional neural networks, CNN)结合气候模式输出(CMIP6)或者气候再分析数据(20CRv3)来填补HadCRUT4中的观测空白(但AR6显示, 其陆地气温分量由CRUTEM4更新为新的CRUTEM5, 海洋分量由HadSST3更新为HadSST4)。另一个新数据集也是基于HadCRUT4的重建版本^[86], 研究者开发了一种新的插补算法——图形期望最大化(GraphEM), 该方法利用高斯马尔可夫随机场(也称为高斯图形模型)来更好地估计气候场内的协方差关系, 检测陆海对比、地形、洋流和波浪传播路径等各向异性特征。其结果显示, “增暖停滞”也已不复存在, 它在重现1877~1878年超强El Niño事件时也比BE数据集采用的Block Kriging方法表现得更加优秀。值得一提的是, 上述3个衍生数据集无一例外都是基于老牌HadCRUT4数据集的再处理产品, 说明这个经典的全球温度基准数据集产品(HadCRUT)具有广泛的影响力。

3 全球增暖趋势估计及其不确定性评估

3.1 影响全球增暖趋势估计精度的因素

科学家在长期的探索中认识到, 全球变暖幅度(速度)很难完全准确量化, 即这种估计始终包含一定程度

的不确定性^[16,87]。导致这种不确定性存在的原因有很多,主要包括:实地观测(抽样不完整、观测不精确、长期序列的不连续性等)和使用方法(QC(Quality Control)、均一化订正、时空分析、区域平均方法、对高纬度高海拔地区的处理、对城市化或土地利用变化的处理)等的差异^[88-90]。

Brohan等人^[14]率先估计了GST变化中的不确定性范围, Li等人^[87]采用同样的方法评估了中国区域平均气温变化的不确定性水平。研究者将不确定来源主要锁定在3个误差来源: 台站误差、抽样误差和偏差误差。

3.1.1 台站误差

假定台站月平均气温 T_{actral} :

$$T_{\text{actral}} = T_{\text{ob}} + \varepsilon_{\text{ob}} + C_{\text{H}} + \varepsilon_{\text{H}} + \varepsilon_{\text{RC}} \quad (1)$$

式中, T_{ob} 为实际报告气温, ε_{ob} 为观测误差, C_{H} 为均一性订正值, ε_{H} 为该订正带来的不确定性, ε_{RC} 为由于计算不准确或缺报导致的不确定性, T_{actral} 距平值为

$$A_{\text{actral}} = T_{\text{ob}} + T_{\text{N}} + \varepsilon_{\text{ob}} + C_{\text{H}} + \varepsilon_{\text{H}} + \varepsilon_{\text{RC}} \quad (2)$$

式中, T_{N} 为站点标准值(气候值)。

根据Folland等人^[89]研究, 气温观测的随机误差约为 0.2°C , 月平均气温观测误差带来的不确定性最大为 $0.2 / \sqrt{60} = 0.03^{\circ}\text{C}$ 。

均一性订正误差是由于对台站序列进行均一性订正时产生的订正值和真实值的差异。Brohan等人^[14]和Xu等人^[91]研究显示, 气温资料均一性订正的概率分布为双峰值分布, 取 0.4°C 作为单站均一性订正误差的估计值, N 个站点的均一性误差为 $0.4 / \sqrt{N}$ 。

每个月标准值由30年或较少年份(至少15年)计算, 其不确定性估计分别为 $\sigma_j / \sqrt{30}$ 、 $\sigma_j / \sqrt{N}$, 故标准值误差不确定性估计值约为 $0.3\sigma_j$ 。在排除了一些非常大的奇异值后, 由于其随机性, 计算和报告不确定性的误差在大范围区域平均时一般可以忽略不计。以上合并得到总的台站误差导致的不确定性水平估计。

3.1.2 抽样误差

网格内站点距平值的抽样误差依赖于网格内台站的个数、台站的位置和网格内真实的气候变化。根据Kagan^[92]和Yevjevich^[93], 区域内(n 个台站抽样)平均序列的标准差($\bar{S}$):

$$\bar{S}^2 = \bar{s}_i^2 \left[\frac{1 + (n-1)r}{n} \right], \quad n \geq 1, \quad (3)$$

式中, s_i 为单个台站序列的标准差, r 为区域内平均站点

间的相关系数。真正的区域平均标准差(S)即为无数个抽样点标准差的平均。

当 $n \rightarrow \infty$ 时, 式(3)变为

$$S^2 = \bar{s}_i^2 \bar{r}. \quad (4)$$

研究发现, 区域平均序列的抽样误差 SE 与它的标准差 S 有关^[92-95]:

$$SE^2 = S^2 \left[\frac{1-r}{1+(n-1)r} \right], \quad (5)$$

即

$$SE^2 = \frac{s_i^2 r (1-r)}{1+(n-1)r}. \quad (6)$$

对网格温度序列的抽样误差进行估计, 需要对站点方差 $\bar{s}_i^2$ 、 $\bar{r}$ 和 n 进行估计, 对于陆面区域, n 为台站数。 $\bar{s}_i^2$ 是参考气候期内所有台站温度序列方差的平均, 由于台站数并不是一个常量, 只是参考气候期内的平均值, 比较可取的方法是用格点温度序列的方差 $\bar{S}^2$ 来估计网格内站点方差的平均值 $\bar{s}_i^2$, 这样就忽略了站点密度和位置随时间变化产生的误差。

对于有多个站点的网格, $\bar{r}$ 通过站点数据估算; 站点较少或者分布不均匀时, $\bar{r}$ 值并不可信, 可利用温度相关性衰减长度理论^[96]来估计 $\bar{r}$ 。

$$r = e^{-x/x_0}, \quad (7)$$

式中, r 为相邻格点的相关系数, x 为网格中心点之间的距离, x_0 为相关性衰减长度特征量, 对式(7)逐步迭代直至均方根误差最小, 计算出 x_0 值。

X 为一个网格两个相对角之间的距离, 利用式(7)对距离 X 求积分就可以估计逐个网格的 $\bar{r}$:

$$\bar{r} = \frac{x_0}{X} (1 - e^{-X/x_0}). \quad (8)$$

3.1.3 偏差误差

偏差误差包括两个方面: 城市化影响和温度计暴露度。城市化对于大范围气候变化的贡献所占比重较小^[6-8,95-99]。以中国区域研究为例, Yan等人^[100]和Yang等人^[101]认为, 在更小尺度上, 城市化会给中国区域性增暖带来一定的偏差, 但随着空间尺度的加大, 这种城市化带来的偏差对于区域平均气温的变化影响越来越小^[101]。更多的研究也认为, 中国城市化影响仅仅限于局地, 在大范围气温变化序列构建时可以忽略^[90,96,102-105]。Li等人^[88]进一步指出, 中国部分地区快

速增暖的主要贡献表现为年代际尺度上的突然变暖,城市化的影响明显不具有该特点。对于美国区域的研究结果也类似, Karl等人^[106]根据完整的USHCN数据,得出1900~1984年期间,平均气温额外的城市偏差约为0.06°C。NASA团队^[23]调整了USHCN中的城市化偏差,使得全球平均温度趋势降低了0.15°C/100a,是前者的两倍多^[58]。Peterson^[107]指出,仪器和其他可能模糊城市信号的观测实践(如元数据信息)导致城市化对美国气温趋势影响存在较大的不确定性;Hausfather等人^[108]进一步指出,尽管基于原始观测数据的分析,美国变暖可能存在一定的城市化信号,但数据的均一化消除了大部分这种偏差,使之自1895年以来降至5%以下,而自1960年以来偏差为0~2%。至于另一种偏差误差——温度计暴露度,20世纪50年代以来,温度计均放置于百页箱内,因此不存在这个问题,1900~1950年的偏差难以被考证^[14]。

3.2 增暖趋势不确定性估计方法

上述的不确定性水平评估框架给出了数据集对全球/区域气候变化估计的不确定性范围,但在实际的长期气候变化趋势估计中仍很难给出具体的影响程度。此外, Brohan等人^[14]和Li等人^[87]也充分证明,无论在全球尺度,还是在区域尺度上,由于观测抽样不足导致的不确定性程度远高于上述三类不确定性的总和。因而,对这种缺测数据进行重建可能是降低不确定性的主要途径。然而,采用统计方法和确定的参数相结合的手段对数据集进行重建实际上具有一定的风险,因为这种单一的重建并不完全代表真实的观测情况。因此,最近完成的气候重建数据集都陆续采用了更为先进的理念,即包含了不同参数的集合重建,同时也与模式输出等对比评估了其相对于“完美”数据情况下的重建不确定性范围^[35,36,38,50,51,79,80],这给全球变暖趋势不确定性范围估计提供了很好的基础。Karl等人^[47]和Li等人^[50]则采用了另一种估计框架(图3),并在“增暖停滞”的讨论中加以量化。在他们的评估方法中,计算了全球平均温度(海温)变化的所谓“增暖停滞”时期(1998~2012年)的变化趋势及其不确定性范围。他们将温度变化趋势不确定性分解为两个部分:(1) 拟合不确定性,即由于温度序列本身的自相关特征导致用通常意义上符合高斯分布的线性拟合方式而带来的不确定性水平;(2) 数据不确定性。由于数据不确定性对气候变化趋势难以量化,因此构建了类似于模式模拟不同参数集合的评估

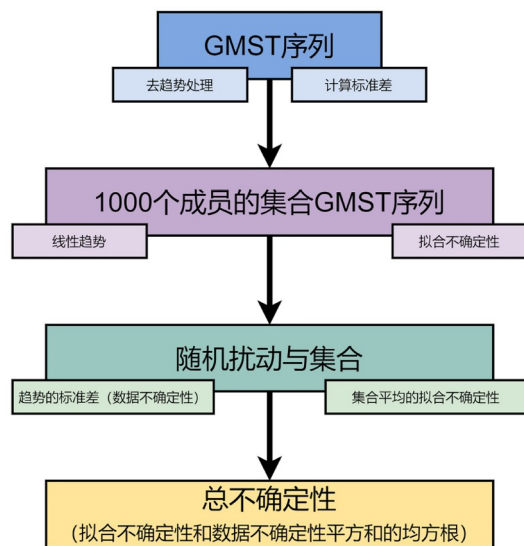


图3 包括数据和拟合不确定性的全球变暖不确定性的估算。修改自文献^[50]

Figure 3 Estimation method for global warming uncertainty, including data and fitting uncertainties. Redrawn from Ref. ^[50]

方式。这使得数据不确定性又包括了两个部分: 第一, 参数不确定性, 即数据集的研发者在进行质量保障、数据重建和其他相关处理时由于采用不同的参数而导致的不确定性范围; 第二, 重建不确定性, 即采用存在“不完美”抽样的观测数据集和其他“完美”抽样的数据集(一般采用CMIP模式输出或者全球长期再分析数据集代替)计算得出的全球(区域)平均温度变化趋势导致的不确定性水平。后一种不确定性评估方式对于长期气候变化趋势的影响非常之小, 而对于如1998~2012年这种短期的气候变化趋势评估, 其影响较为明显^[50]。

3.3 不同数据集重建方法导致的不确定性

为了考察上述多个数据集中因为重建方法导致的不确定性, 本文以China-MST 2.0数据集^[52]为基础, 分别采用不同的方法来构建全球温度序列并进行比较。China-MST 2.0三个版本数据集中, 其中CMST2.0-Nrec是没有重建的版本, 其基本融合方法见文献^[28], 陆面气温分量直接采用了China-LSAT2.0观测数据集, SST分量则直接采用了美国NOAA/NCEI的ERSSTv5; CMST2.0-Imax和CMST2.0-Imin则是分别基于北极地区理论最大和最小海冰覆盖范围的温度重建^[51,82]。因此, 3个版本数据集建立的GMST序列的升温趋势存在一定的差异: 从小到大分别是CMST2.0-Imax最大, CMST2.0-Imin次之, CMST2.0-Nrec最小。前两者是理

论上的最大和最小值(并不是真实的全球温度变化趋势),而后者则明显低估了全球变暖的趋势和速度,因此都存在一定的不足。

本文采用类似于Kadow等人^[85]的思路对CMST2.0-Nrec进行了重建,基于部分卷积神经网络(CNN)方法,以两种“完美”再分析数据集的集合(20CRv3和CERA)作为训练数据集来训练AI模型,分别迭代100万次,得到两种AI重建数据集(即20CR-AI和CERA-AI)(图4),并与CMST2.0进行了对比(图5)。结果发现:(1) CMST-Nrec序列无论在哪个时间段的全球温度趋势都是最小的,这也说明,未经重建的数据集对GST存在着一程

度上(约0.1~0.15°C)的低估;(2) AI重建温度距平时间序列基本反映了真实的1850~2020年期间全球平均温度的长期变化特征;(3) 两种北极冰面参数重建(CMST2.0-I_{max}和CMST2.0-I_{min})^[52]和两种AI重建(20CR-AI-I和CERA-AI-I)均一致表明:提高GST数据的覆盖度(从而降低抽样误差)均有助于提高全球表面增暖趋势;(4) 两种冰面参数重建的CMST2.0-I_{max}和CMST2.0-I_{min}序列与两种AI重建结果非常类似,两种AI重建模型重建序列之间的差别也非常之小;(5) 1979~2020期间,两种冰面面积参数重建趋势均略大于AI重建,这说明AI重建对短期的全球温度趋势仍然有

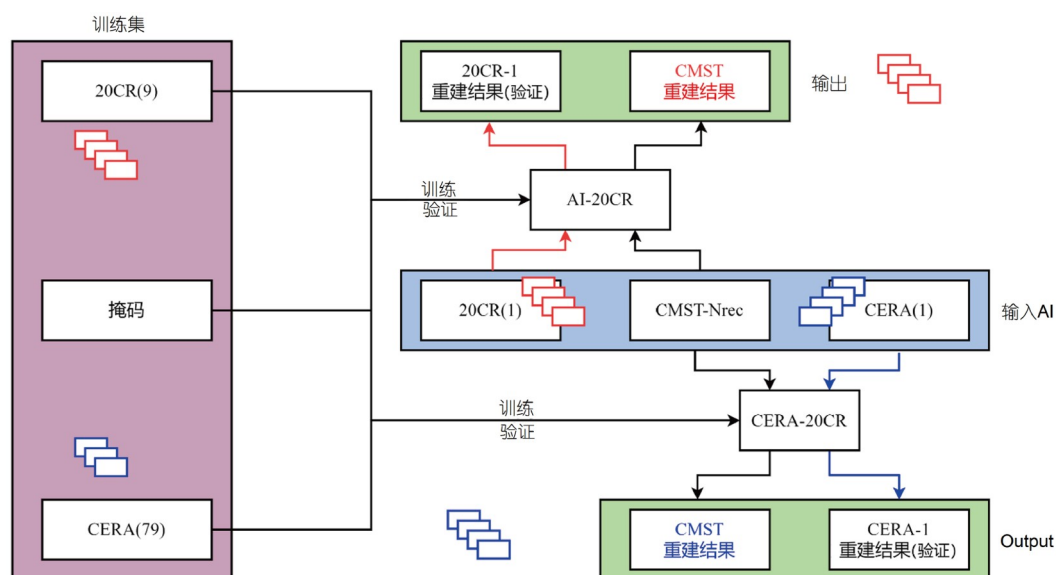


图 4 基于CNN的AI模型训练和CMST重建过程

Figure 4 CNN based AI model training and CMST reconstruction process

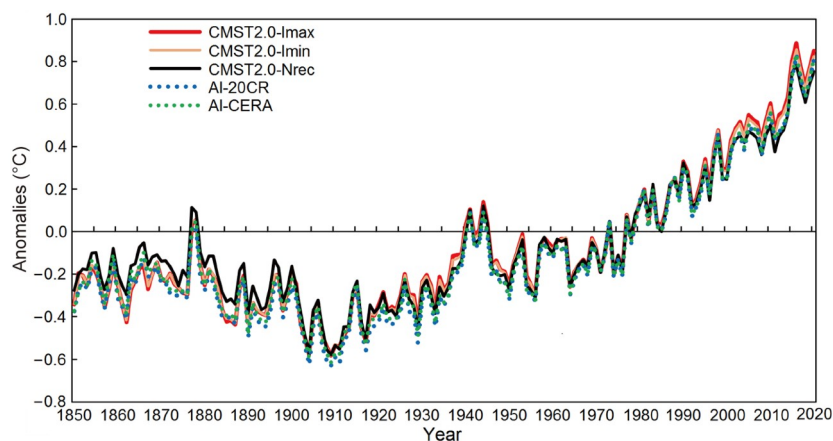


图 5 基于不同版本CMST2.0数据集及AI重建数据集的1850~2020年GMST序列(相对于1961~1990年气候平均值)

Figure 5 GMST series from 1850 to 2020 based on different versions of the CMST2.0 and AI reconstructed (relative to 1961–1990 averages)

所低估(基于CMST2.0-Imin应该代表理论上最低增暖趋势的假定).

总的来说, AI重建方法有效地复现了GMST的长期变化特征, 其修复效果也很好, 重建结果也与CMST2.0采用传统的统计方法重建的数据集得到的增暖幅度相差并不显著(均没有超过95%显著性水平)(图5). 这也说明, 时至今日, 采用各种不同的GST数据重建方法得到的全球温度变化速率已经基本一致.

4 讨论与展望

我们也应该看到, 尽管还存在上述问题和不足, 但GST观测数据的精度目前已经达到了较高的水平, 可以说它是“最为准确”的基本气候变量. 但是, 无论是采用上述哪种技术思路, 导致全球和区域温度距平序列中最突出的不确定性水平仍然是观测抽样覆盖的不足^[8,14,46~51,85~88]. 然而, 现阶段对大规模增加早期观测资料的几率基本上已不存在; 对于陆地气温序列, 各个小组成果的一致性较好. 而对于海洋表面温度来说, 两个基准数据集(HadSST4和ERSSTv5)的差别较为显著. 鉴于当前学术界一般采用1850~1900年这一段时期的平均温度代表全球工业化之前的温度水平, 因此, 这一段时期的数据准确与否, 直接关系到人类对地球温度监测结果的准确性^[109]. 而事实上, 这一时期, 观测站点相对稀少, 因此, 各个全球温度序列的差别也均集中体现在这期间^[53].

观测数据的质量问题也是制约GST数据集和全球增暖估计的另一个重要因素. 为了获得尽可能完整的观测数据, 目前AR6使用的5个GLSAT数据集(美国NOAA的GHCN、GISTEMP和BEST, 英国东安吉利尔大学气候研究中心的CRUTEM, 中国中山大学的China-LSAT)无一例外采用了平均最高气温和平均最低气温的平均值作为平均温度. 近年来, 一些研究也指出, 这种做法和真正意义上日平均温度比较起来, 仍然存在一定的差异, 特别是在区域尺度上; 为了得到“气候质量”的基准数据集, 必须将气温站点序列进行均一化,

但由于各个国家观测系统的调整、变化不尽相同, 而相关数据集研发团队均缺乏系统的元数据信息, 给数据集的整体质量将带来一定的影响, 特别是在局地乃至区域尺度上^[27,110]. 特别是因为缺乏相应的参考数据, 早期数据的质量控制和均一化存在相当难度; 时至今日, 仍有部分观测覆盖不足(特别在南极、南美和非洲)或者相对欠发达地区陆地气温观测的收集和管理上存在相当的不足, 甚至还很难做到实时上传世界气象组织的信息系统(WMO WIS), 这给相关数据集的及时准确更新带来了许多困难. 同时, 由于缺乏足够的长期观测数据, 使得许多新建站点无法纳入数据集的更新当中, 这些都是亟须解决的问题.

考虑到根据给定样本推断总体的误差受到总体性质、样本条件和统计量控制, 即需遵循所谓的总体-样本-统计量三位一体空间统计框架(spatial statistics trinity). 近年来, 一些研究表明, 当总体为(近似)独立分布时, 样本推断总体的误差对于不同的推断模型不敏感; 当总体存在空间分层异质性(spatial stratified heterogeneity), 并且有些层没有或只有极少样本, 这时样本有偏于总体. 而地表温度的空间分布同时表现为空间自相关性和异质性. 如果借助于辅助变量, 通过BSHADE模型可以对样本的总计估计进行纠偏^[111~113]. 另一方面, 随着近几十年人们对人类活动贡献归因研究的不断深入^[113~115], 科学家对于外强迫影响气候变暖的物理机制基本厘清. 基于这些开创性工作, 科学家对于影响GMST的各种外强迫因子的认识日益清晰准确; 同时, 随着数值模式模拟水平和数据同化精度的不断提高, 科学家对于过去气候的再现能力也不断提升^[59,67,68]. 基于上述, 近年来的研究越来越对全球温度变化进行了更为准确的外强迫分量和内部变率分量的分解^[116~120]. 这也为我们更为准确地认识早年全球气候事实提供了一些新的约束思路: 如果我们能够建立具有更清晰的物理意义的数学/统计模型, 可望通过直接分解气候序列中人类活动(外强迫)对全球及区域增暖的贡献, 对早期气候序列进行最准确的“精算”重建.

参考文献

- 1 Fourier J. Memoires del'Academie Royale des sciences, London: Natural History Museum Library, 1827, 7: 569
- 2 Zhou T J, Zhang W X, Chen D L, et al. Understanding and building upon pioneering work of Nobel Prize in Physics 2021 laureates Syukuro Manabe and Klaus Hasselmann: From greenhouse effect to Earth system science and beyond. *Sci China Earth Sci*, 2022, 65: 589–600 [周天军, 张文霞, 陈德亮, 等. 2021年诺贝尔物理学奖解读: 从温室效应到地球系统科学. *中国科学: 地球科学*, 2022, 52: 579–594]
- 3 Hu Y Y. The physics and history of global warming (in Chinese). *Physics*, 2012, 41: 495–504 [胡永云. 全球变暖的物理基础和科学简史. *物理*,

2012, 41: 495–504]

- 4 Overpeck J T, Meehl G A, Bony S, et al. Climate data challenges in the 21st century. [Science](#), 2011, 331: 700–702
- 5 Wu G X, Lin H, Zou X L, et al. Research on global climate change and scientific data (in Chinese). *Adv Earth Sci*, 2014, 29: 15–22 [吴国雄, 林海, 邹晓蕾, 等. 全球气候变化研究与科学数据. *地球科学进展*, 2014, 29: 15–22]
- 6 IPCC. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. New York: Cambridge University Press, 2007
- 7 Hartmann D L, Klein Tank A M G, Rusticucci M, et al. Observations: Atmosphere and surface. In: *Climate Change 2013 the Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 159–254
- 8 Gulev S K, Thorne P W, Ahn J, et al. Changing state of the climate system. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2021
- 9 Jones P D, Wigley T M L, Wright P B. Global temperature variations between 1861 and 1984. *Nature*, 1986, 322: 430–434
- 10 Chao Q C, Zhang Y X, Gao X, et al. Paris Agreement: A new start for global governance on climate (in Chinese). *Adv Clim Change Res*, 2016, 12: 61–67 [巢清尘, 张永香, 高翔, 等. 巴黎协定——全球气候治理的新起点. *气候变化研究进展*, 2016, 12: 61–67]
- 11 Hansen J, Lebedeff S. Global trends of measured surface air temperature. [J Geophys Res](#), 1987, 92: 13345–13372
- 12 Köppen W. Über mehrjährige Perioden der Witterung—III. Mehrjährige Änderungen der Temperatur 1841 bis 1875 in den Tropen der nördlichen und südlichen gemässigten Zone, an den Jahresmitteln. untersucht. *Zeitschrift der Österreichischen Gesellschaft für Meteorologie*, 1881, Bd XVI: 141–150
- 13 Ellsaesser H W, MacCracken M C, Walton J J, et al. Global climatic trends as revealed by the recorded data. [Rev Geophys](#), 1986, 24: 745–792
- 14 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 Geophys Res](#), 2006, 111: D12106
- 15 Smith T M, Reynolds R W. A global merged land-air-sea surface temperature reconstruction based on historical observations (1880–1997). [J Clim](#), 2005, 18: 2021–2036
- 16 Hansen J, Sato M, Ruedy R, et al. Global temperature change. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2006, 103, 14: 288–293
- 17 Jones P D, Wigley T M L. Estimation of global temperature trends: What’s important and what isn’t. [Clim Change](#), 2010, 100: 59–69
- 18 Hawkins E, Jones P D. On increasing global temperatures: 75 Years after Callendar. [Q J R Meteorol Soc](#), 2013, 139: 1961–1963
- 19 Jones P D, David L, Osborn T J, et al. Hemispheric and large-scale land-surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2010. *J Geophys Res Atmos*, 2012, 117: D05127
- 20 Peterson T C, Vose R S. An overview of the global historical climatology network temperature database. [Bull Amer Meteorol Soc](#), 1997, 78: 2837–2849
- 21 Lawrimore J H, Menne M J, Gleason B E, et al. An overview of the Global Historical Climatology Network monthly mean temperature data set, version 3. [J Geophys Res](#), 2011, 116: D19121
- 22 Menne M J, Williams C N, Gleason B E, et al. The Global Historical Climatology Network Monthly Temperature Dataset, Version 4. [J Clim](#), 2018, 31: 9835–9854
- 23 Lenssen N J L, Schmidt G A, Hansen J E, et al. Improvements in the GISTEMP Uncertainty Model. [J Geophys Res-Atmos](#), 2019, 124: 6307–6326
- 24 Thorne P W, Allan R J, Ashcroft L, et al. Toward an integrated set of surface meteorological observations for climate science and applications. [Bull Amer Meteorol Soc](#), 2017, 98: 2689–2702
- 25 Muller R A, Curry J, Groom D, et al. Decadal variations in the global atmospheric land temperatures. [J Geophys Res-Atmos](#), 2013, 118: 5280–5286
- 26 Rohde R A, Hausfather Z. The Berkeley Earth Land/Ocean Temperature Record. [Earth Syst Sci Data](#), 2020, 12: 3469–3479
- 27 Xu W, Li Q, Jones P D, et al. A new integrated and homogenized global monthly land surface air temperature dataset for the period since 1900. *Clim Dyn*, 2018, 50: 2513–2536
- 28 Yun X, Huang B, Cheng J, et al. A new merge of global surface temperature datasets since the start of the 20th century. [Earth Syst Sci Data](#), 2019, 11: 1629–1643
- 29 Sun X, Ren G, Xu W, et al. Global land-surface air temperature change based on the new CMA GLSAT data set. [Sci Bull](#), 2017, 62: 236–238
- 30 Kaplan A, Cane M A, Kushnir Y, et al. Analyses of global sea surface temperature 1856–1991. [J Geophys Res](#), 1998, 103: 18567–18589
- 31 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
- 32 Woodruff S D, Slutz R J, Jenne R L, et al. A comprehensive ocean-atmosphere data set. [Bull Amer Meteorol Soc](#), 1987, 68: 1239–1250
- 33 Freeman E, Woodruff S D, Worley S J, et al. ICOADS Release 3.0: A major update to the historical marine climate record. [Intl J Climatol](#), 2017, 37: 2211–2232

- 34 Smith T M, Reynolds R W, Livezey R E, et al. Reconstruction of historical sea surface temperatures using empirical orthogonal functions. *J Clim*, 1996, 9: 1403–1420
- 35 Smith T M, Reynolds R W, Peterson T C, et al. Improvements to NOAA’s historical merged land-ocean surface temperature analysis (1880–2006). *J Clim*, 2008, 21: 2283–2296
- 36 Huang B, Thorne P W, Smith T M, et al. Further exploring and quantifying uncertainties for Extended Reconstructed Sea Surface Temperature (ERSST) Version 4 (v4). *J Clim*, 2016, 29: 3119–3142
- 37 Huang B, Thorne P W, Banzon V F, et al. Extended Reconstructed Sea Surface Temperature, Version 5 (ERSSTv5): Upgrades, validations, and intercomparisons. *J Clim*, 2017, 30: 8179–8205
- 38 Kennedy J J, Rayner N A, Smith R O, et al. Reassessing biases and other uncertainties in sea surface temperature observations measured *in situ* since 1850: 2. Biases and homogenization. *J Geophys Res*, 2011, 116: D14104
- 39 Kennedy J J, Rayner N A, Atkinson C P, et al. An ensemble data set of sea surface temperature change from 1850: The Met Office Hadley Centre HadSST.4.0.0.0 Data Set. *J Geophys Res-Atmos*, 2019, 124: 7719–7763
- 40 Ishii M, Shouji A, Sugimoto S, et al. Objective analyses of sea-surface temperature and marine meteorological variables for the 20th century using ICOADS and the Kobe Collection. *Intl J Climatol*, 2005, 25: 865–879
- 41 Hirahara S, Ishii M, Fukuda Y. Centennial-scale sea surface temperature analysis and its uncertainty. *J Clim*, 2014, 27: 57–75
- 42 Zhang H M, Lawrimore J, Huang B, et al. Updated temperature data give a sharper view of climate trends. *Eos*, 2019, 100: 1961–2018
- 43 Hansen J, Ruedy R, Sato M, et al. Global surface temperature change. *Rev Geophys*, 2010, 48: RG404
- 44 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
- 45 Vose R S, Arndt D, Banzon V F, et al. NOAA’s merged land-ocean surface temperature analysis. *Bull Amer Meteorol Soc*, 2012, 93: 1677–1685
- 46 Cowtan K, Way R G. Coverage bias in the HadCRUT4 temperature series and its impact on recent temperature trends. *Q J R Meteorol Soc*, 2014, 140: 1935–1944
- 47 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
- 48 Huang J, Zhang X, Zhang Q, et al. Recently amplified arctic warming has contributed to a continual global warming trend. *Nat Clim Chang*, 2017, 7: 875–879
- 49 Simmons A J, Berrisford P, Dee D P, et al. A reassessment of temperature variations and trends from global reanalyses and monthly surface climatological datasets. *Q J R Meteorol Soc*, 2017, 143: 101–119
- 50 Li Q, Sun W, Yun X, et al. An updated evaluation of the global mean land surface air temperature and surface temperature trends based on CLSAT and CMST. *Clim Dyn*, 2021, 56: 635–650
- 51 Sun W, Li Q, Huang B, et al. The assessment of global surface temperature change from 1850s: The C-LSAT2.0 Ensemble and the CMST-Interim Datasets. *Adv Atmos Sci*, 2021, 38: 875–888
- 52 Sun W, Yang Y, Chao L, et al. Description of the China global Merged Surface Temperature version 2.0. *Earth Syst Sci Data*, 2022, 14: 1677–1693
- 53 Li Q, Sun W, Huang B, et al. Consistency of global warming trends strengthened since 1880s. *Sci Bull*, 2020, 65: 1709–1712
- 54 Qin D H, Ding Y J. Climate and Ecology Environment Evolution in China: 2021 (in Chinese). Beijing: Science Press, 2022 [秦大河, 丁永建. 中国气候与生态环境演变: 2021. 北京: 科学出版社, 2022]
- 55 Compilation Committee of the Fourth National Assessment Report on Climate Change. Fourth National Assessment Report on Climate Change (in Chinese). Beijing: Science Press, 2022 [《第四次气候变化国家评估报告》编写委员会. 第四次气候变化国家评估报告. 北京: 科学出版社, 2022]
- 56 Ma L, Zhang T, Li Q, et al. Evaluation of ERA-40, NCEP-1, and NCEP-2 reanalysis air temperatures with ground-based measurements in China. *J Geophys Res*, 2008, 113: D15115
- 57 Mao J, Shi X, Ma L, et al. Assessment of reanalysis daily extreme temperatures with China’s Homogenized Historical Dataset during 1979–2001 using probability density functions. *J Clim*, 2010, 23: 6605–6623
- 58 Li Q, Zhang L, Xu W, et al. Comparisons of time series of annual mean surface air temperature for China since the 1900s: Observation, model simulation and extended reanalysis. *Bull Amer Meteorol Soc*, 2017, 98: 699–711
- 59 Yang Y, Li Q, Song Z, et al. A comparison of global surface temperature variability, extremes and warming trend using reanalysis datasets and CMST-Interim. *Intl J Climatol*, 2022, 42: 5609–5628
- 60 Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bull Amer Meteorol Soc*, 1996, 77: 437–471
- 61 Kanamitsu M, Ebisuzaki W, Woollen J, et al. NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). *Bull Amer Meteorol Soc*, 2002, 83: 1631–1644
- 62 Dee D P, Uppala S M, Simmons A J, et al. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Q J R Meteorol Soc*, 2011, 137: 553–597

- 63 Saha S, Moorthi S, Pan H L, et al. The NCEP climate forecast system reanalysis. *Bull Amer Meteorol Soc*, 2010, 91: 1015–1058
- 64 Uppala S M, Kållberg P W, Simmons A J, et al. The ERA-40 re-analysis. *Q J R Meteorol Soc*, 2005, 131: 2961–3012
- 65 Kobayashi S, Ota Y, Harada Y, et al. The JRA-55 Reanalysis: General specifications and basic characteristics. *J Meteorol Soc Jpn*, 2015, 93: 5–48
- 66 Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. The ERA5 global reanalysis. *Q J R Meteorol Soc*, 2020, 146: 1999–2049
- 67 Slivinski L C, Compo G P, Whitaker J S, et al. Towards a more reliable historical reanalysis: Improvements for version 3 of the Twentieth Century Reanalysis system. *Q J R Meteorol Soc*, 2019, 145: 2876–2908
- 68 Laloyaux P, de Boisseson E, Balmaseda M, et al. CERA-20C: A coupled reanalysis of the twentieth century. *J Adv Model Earth Syst*, 2018, 10: 1172–1195
- 69 Sturaro G. A closer look at the climatological discontinuities present in the NCEP/NCAR reanalysis temperature due to the introduction of satellite data. *Clim Dyn*, 2003, 21: 309–316
- 70 Poli P, Hersbach H, Dee D P, et al. ERA-20C: An atmospheric reanalysis of the twentieth century. *J Clim*, 2016, 29: 4083–4097
- 71 Cahill N, Rahmstorf S, Parnell A. Change points of global temperature. *Environ Res Lett*, 2015, 10: 084002
- 72 Fyfe J C, Meehl G A, England M H, et al. Making sense of the early-2000s warming slowdown. *Nat Clim Chang*, 2016, 6: 224–228
- 73 Medhaug I, Stolpe M B, Fischer E M, et al. Reconciling controversies about the ‘global warming hiatus’. *Nature*, 2017, 545: 41–47
- 74 Risbey J S, Lewandowsky S, Cowtan K, et al. A fluctuation in surface temperature in historical context: Reassessment and retrospective on the evidence. *Environ Res Lett*, 2018, 13: 123008
- 75 Screen J A, Simmonds I. The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification. *Nature*, 2010, 464: 1334–1337
- 76 Serreze M C, Barrett A P, Stroeve J C, et al. The emergence of surface-based Arctic amplification. *Cryosphere*, 2009, 3: 11–19
- 77 Folland C K, Colman A W, Smith D M, et al. High predictive skill of global surface temperature a year ahead. *Geophys Res Lett*, 2013, 40: 761–767
- 78 Rennie J J, Lawrimore J H, Gleason B E, et al. The international surface temperature initiative global land surface databank: Monthly temperature data release description and methods. *Geosci Data J*, 2014, 1: 75–102
- 79 Wang J, Xu C, Hu M, et al. Global land surface air temperature dynamics since 1880. *Int J Climatol*, 2018, 38: e466–e474
- 80 Vose R S, Huang B, Yin X, et al. Implementing full spatial coverage in NOAA’s global temperature analysis. *Geophys Res Lett*, 2021, 48: e2020GL090873
- 81 Morice C P, Kennedy J J, Rayner N A, et al. An updated assessment of near-surface temperature change from 1850: The HadCRUT5 data set. *J Geophys Res-Atmos*, 2021, 126: e2019JD032361
- 82 Li Z C, Sun W B, Liang C X, et al. Arctic warming trends and their uncertainties based on surface temperature reconstruction under different sea ice extent scenarios. *Adv Clim Change Res*, 2023, 14: 335–346
- 83 Li Z, Li Q, Chen T. Record-breaking high-temperature outlook for 2023: An assessment based on the China Global Merged Temperature (CMST) Dataset. *Adv Atmos Sci*, 2024, 41: 369–376
- 84 Rayner N A, Auchmann R, Bessembinder J, et al. The EUSTACE Project: Delivering global, daily information on surface air temperature. *Bull Amer Meteorol Soc*, 2020, 101: E1924–E1947
- 85 Kadow C, Hall D M, Ulbrich U. Artificial intelligence reconstructs missing climate information. *Nat Geosci*, 2020, 13: 408–413
- 86 Vaccaro A, Emile-Geay J, Guillot D, et al. Climate field completion via Markov random fields: Application to the HadCRUT4.6 temperature dataset. *J Clim*, 2021, 34: 4169–4188
- 87 Li Q X, Dong W J, Li W, et al. Assessment of the uncertainties in temperature change in China during the last century. *Chin Sci Bull*, 2010, 55: 1974–1982
- 88 Li Q, Dong W, Jones P. Continental scale surface air temperature variations: Experience derived from the Chinese region. *Earth-Sci Rev*, 2020, 200: 102998
- 89 Folland C K, Rayner N A, Brown S J, et al. Global temperature change and its uncertainties since 1861. *Geophys Res Lett*, 2001, 28: 2621–2624
- 90 Jones P D, Lister D H, Li Q. Urbanization effects in large-scale temperature records, with an emphasis on China. *J Geophys Res*, 2008, 113: D16122
- 91 Xu W, Li Q, Wang X L, et al. Homogenization of Chinese daily surface air temperatures and analysis of trends in the extreme temperature indices. *J Geophys Res-Atmos*, 2013, 118: 9708–9720
- 92 Kagan R L. An Evaluation of the Representativeness of Precipitation Data (in Russian). Leningrad: Gidrometeoizdat, 1966. 191
- 93 Yevjevich V. Probability and Statistics in Hydrology. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1972. 302
- 94 Wigley T M L, Briffa K R, Jones P D. On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *J Clim Appl Meteorol*, 1984, 23: 201–213
- 95 Jones P D, Briffa K R. What can the instrumental record tell us about longer timescale paleoclimatic reconstructions? In: Jones P D, Bradley R S, Jouzel J, eds. *Climatic Variations and Forcing Mechanisms of the Last 2000 Years*. Heidelberg: Springer, 1996. 625–644

- 96 Briffa K R, Jones P D. Global surface air temperature variations during the twentieth century: Part 2, implications for large-scale high-frequency palaeoclimatic studies. [Holocene](#), 1993, 3: 77–88
- 97 Jones P D, Groisman P Y, Coughlan M, et al. Assessment of urbanization effects in time series of surface air temperature over land. [Nature](#), 1990, 347: 169–172
- 98 Parker D E. Large-scale climate warming is not urban. [Nature](#), 2004, 432: 290
- 99 Hansen J E, Sato M, Lacis A, et al. Climate forcings in the Industrial era. [Proc Natl Acad Sci USA](#), 1998, 95: 12753–12758
- 100 Yan Z, Li Z, Li Q, et al. Effects of site change and urbanisation in the Beijing temperature series 1977–2006. [Intl J Climatol](#), 2010, 30: 1226–1234
- 101 Yang X, Hou Y, Chen B. Observed surface warming induced by urbanization in east China. [J Geophys Res](#), 2011, 116: D14113
- 102 Chao L, Huang B, Yang Y, et al. A new evaluation of the role of urbanization to warming at various spatial scales: Evidence from the Guangdong-Hong Kong-Macau region, China. [Geophys Res Lett](#), 2020, 47: e2020GL089152
- 103 Ren G, Chu Z, Chen Z, et al. Implications of temporal change in urban heat island intensity observed at Beijing and Wuhan stations. [Geophys Res Lett](#), 2007, 34: L05711
- 104 Li Q, Zhang H, Liu X, et al. Urban heat island effect on annual mean temperature during the last 50 years in China. [Theor Appl Climatol](#), 2004, 79: 165–174
- 105 Wang F, Ge Q, Wang S, et al. A new estimation of urbanization's contribution to the warming trend in China. [J Clim](#), 2015, 28: 8923–8938
- 106 Karl T R, Diaz H F, Kukla G. Urbanization: Its detection and effect in the United States climate record. [J Clim](#), 1988, 1: 1099–1123
- 107 Peterson T C. Assessment of urban versus rural *in situ* surface temperatures in the contiguous United States: No difference found. [J Clim](#), 2003, 16: 2941–2959
- 108 Hausfather Z, Menne M J, Williams C N, et al. Quantifying the effect of urbanization on U.S. Historical Climatology Network temperature records. [J Geophys Res-Atmos](#), 2013, 118: 481–494
- 109 Hawkins E, Ortega P, Suckling E, et al. Estimating changes in global temperature since the preindustrial period. [Bull Amer Meteorol Soc](#), 2017, 98: 1841–1856
- 110 Jones P. The reliability of global and hemispheric surface temperature records. [Adv Atmos Sci](#), 2016, 33: 269–282
- 111 Wang J, Xu C, Hu M, et al. A new estimate of the China temperature anomaly series and uncertainty assessment in 1900–2006. [J Geophys Res-Atmos](#), 2014, 119: 1–9
- 112 Xu C, Wang J, Li Q. A new method for temperature spatial interpolation based on sparse historical stations. [J Clim](#), 2018, 31: 1757–1770
- 113 Hegerl G C, Hasselmann K, Cubasch U, et al. Multi-fingerprint detection and attribution analysis of greenhouse gas, greenhouse gas-plus-aerosol and solar forced climate change. [Clim Dyn](#), 1997, 13: 613–634
- 114 Allen M R, Tett S F B. Checking for model consistency in optimal fingerprinting. [Clim Dyn](#), 1999, 15: 419–434
- 115 Zhang X, Zwiers F W, Hegerl G C, et al. Detection of human influence on twentieth-century precipitation trends. [Nature](#), 2007, 448: 461–465
- 116 Dai A, Fyfe J C, Xie S P, et al. Decadal modulation of global surface temperature by internal climate variability. [Nat Clim Chang](#), 2015, 5: 555–559
- 117 Kent E C, Kennedy J J, Smith T M, et al. A call for new approaches to quantifying biases in observations of sea surface temperature. [Bull Amer Meteorol Soc](#), 2017, 98: 1601–1616
- 118 Folland C K, Boucher O, Colman A, et al. Causes of irregularities in trends of global mean surface temperature since the late 19th century. [Sci Adv](#), 2018, 4: eaao5297
- 119 Li Q, Sheng B, Huang J, et al. Different climate response persistence causes warming trend unevenness at continental scales. [Nat Clim Chang](#), 2022, 12: 343–349
- 120 Qian G, Li Q, Li C, et al. A novel statistical decomposition of the historical change in global mean surface temperature. [Environ Res Lett](#), 2021, 16: 054057

Global warming trends and their uncertainty estimation during the instrumental observation period: A review and outlook based on IPCC scientific assessments

Qingxiang Li^{1,2,3}

¹ Key Laboratory of Tropical Atmosphere-Ocean System, Ministry of Education, School of Atmospheric Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

² Research Center for Ecology and Environment of Central Asia, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China;

³ Southern Laboratory of Ocean Science and Engineering (Zhuhai), Zhuhai 519082, China

E-mail: liqingx5@mail.sysu.edu.cn; liqingxiang@ms.xjb.ac.cn

Accurately understanding the past is essential for better predicting the future. Since the 19th century, people have been studying the key scientific question, “How much has the Earth warmed since the pre-industrial era?” Although the land surface air temperature/surface temperature can be considered one of the most precise “key climate variables”, the long-standing insufficient sampling of observations and data accuracy issues have prevented a perfect answer to this question. However, to accurately address this issue, a higher-quality global temperature baseline observational dataset is needed as the core foundation for detecting the fact of warming. The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) has consistently used global surface temperature warming as the basis for its scientific assessment reports. Scientists from Western countries such as the UK and the USA have conducted pioneering or in-depth research in the development of global land surface temperature datasets, deepening our understanding of the above-mentioned issue. Since the beginning of this century, with the fermentation of the “climate gate” event and the widespread discussion of the “global warming hiatus” by scientists around the world, the discussion of biases in global land surface air temperature/global surface temperature has once again gained attention from all sectors of society. In response to these discussions, the IPCC’s Sixth Assessment Report (AR6) has adopted more stringent standards in the selection of global baseline surface temperature datasets for assessing the extent of global warming since the industrial era in terms of the dataset’s temporal coverage and spatial sampling. In the end, five of the currently active global baseline datasets have been included in the final report of AR6: HadCRUT5 (UK Met Office and East Anglia University), NOAA GlobalT-Interim (US National Oceanic and Atmospheric Administration/National Center for Environmental Information), and BE (US Berkeley Earth team) were fully adopted. GISS (US National Aeronautics and Space Administration/Goddard Institute for Space Studies) only adopted data from 1880 onwards. The newly released China-MST-Interim (Sun Yat-sen University, China) only adopted its global land surface air temperature component, China-LSAT. In addition, AR6 also referenced the assessment results of several datasets based on new methods (statistical interpolation, data fusion, and artificial intelligence) for reconstructing HadCRUT4. Based on the above datasets, the AR6 report provides the most optimal estimate of warming since the industrial era (represented by the average value from 1850 to 1900), indicating that the global average temperature has increased by 1.09°C (0.95 to 1.20°C) over the past decade (2011–2020). However, we also need to recognize that there are still many areas for improvement in the current baseline dataset. Firstly, the number of observation stations in the 19th century was very limited, leading to significant differences in the global average temperature among the five datasets during this period. Secondly, despite the sea surface area covering 71% of the world, there are still noticeable differences between the two global sea surface temperature datasets from NOAA and the UK Met Office. Thirdly, observations in the Arctic, Antarctic, and high-altitude areas are still not comprehensive enough, resulting in high uncertainty in temperature changes in these regions. Finally, there are still deficiencies in data resources, data processing techniques, and the estimation framework for uncertainty among different datasets, resulting in a certain level of structural uncertainty that has not been fully evaluated. Therefore, there is still a lot of work to be done to satisfactorily address these issues. Additionally, strengthening constructive communication between the scientific community and the public is also an issue that we need to seriously consider at present.

global warming, instrument observation period, benchmark data, warming trend, uncertainty

doi: [10.1360/TB-2023-1104](https://doi.org/10.1360/TB-2023-1104)