

近百年中国气候变暖趋势之再评估*

严中伟^{1,2} 丁一汇³ 翟盘茂⁴ 宋连春³ 曹丽娟⁵ 李 珍¹

YAN Zhongwei^{1,2} DING Yihui³ ZHAI Panmao⁴ SONG Lianchun³ CAO Lijuan⁵ LI Zhen¹

1. 中国科学院大气物理研究所, 东亚区域气候-环境重点实验室, 北京, 100029
2. 中国科学院大学, 北京, 100049
3. 国家气候中心, 北京, 100081
4. 中国气象科学研究院, 北京, 100081
5. 国家气象信息中心, 北京, 100081

1. *Key Laboratory of Regional Climate-Environment for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*
3. *National Climate Center, Beijing 100081, China*
4. *Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China*
5. *National Meteorological Information Center, Beijing 100081, China*

2019-08-23 收稿, 2020-01-09 改回.

严中伟, 丁一汇, 翟盘茂, 宋连春, 曹丽娟, 李珍. 2020. 近百年中国气候变暖趋势之再评估. 气象学报, 78(3): 370-378

Yan Zhongwei, Ding Yihui, Zhai Panmao, Song Lianchun, Cao Lijuan, Li Zhen. 2020. Re-assessing climatic warming in China since the last century. *Acta Meteorologica Sinica*, 78(3):370-378

Abstract The regional mean surface air temperature (SAT) in China has risen by 1.3–1.7°C/(100 a) since 1900, according to recently developed homogenized observations. This estimate is larger than earlier ones (0.5–0.8°C/(100 a)) adopted in the early National Reports of Climate Change in China. The present study reviews the studies of the long-term SAT series of China, highlighting the homogenization of station observations as a key progress. The SAT series of China in early studies showed a prominent warm peak in the 1940s, mainly due to inhomogeneous records associated with site moves of a number of stations from urban to outskirts in the early 1950s, which resulted in underestimates of the centennial warming trend. Parts of China were relatively warm around the 1940s but with different-phase interdecadal variations, while some parts were even relatively cold. This fact was supported by proxy data and could partly be explained by interdecadal changes in large-scale circulation. The effect of urbanization should have a minor contribution to the observed warming in China, although the estimates of such contributions for urban stations remain controversial. Further studies relevant to the present topic are discussed.

Key words Global warming, Regional variability, Centennial trend, Inter-decadal variations, Effect of urbanization

摘 要 基于均一化的气温观测序列集, 1900 年以来中国气温升高趋势 1.3—1.7°C/(100 a)。这个已用于新近的中国国家气候变化评估报告的结果, 远高于早期的评估结果(0.5—0.8°C/(100 a))。回顾了始于 20 世纪 80 年代的中国百年气温序列的研究, 指出其中关键进展在于近年来研发了均一化的长期站点气温观测序列集。早年构建的中国气温序列中, 20 世纪 40 年代前异常偏高, 除了战乱期间观测缺失严重及记录代表性问题外, 主要是 50 年代前后很多台站迁址导致早期气温观测值系统性偏高所致, 从而低估长期变暖趋势。40 年代前后部分区域确实偏暖, 但由于不同区域气温波动位相不一致, 因而大范围平均序列中并不明

* 资助课题: 国家重点研发计划“政府间国际科技创新合作/港澳台科技创新合作”重点专项项目(2017YFE0133600)、中国科学院先导专项(XDA19030402)、中国科学院国际合作专项(134111KYSB20160010)。

作者简介: 严中伟, 主要从事气候变化、气候极值、序列均一化、城市化效应、年代际变率等方面研究。E-mail: yzw@tea.ac.cn

显。这一事实可与近年发展的“北极暖-大陆冷”等气候变化动力学理论以及一些区域气温代用资料相印证。近几十年城市化对中国气温变化趋势之贡献大小尚存争议,但远非主导因素。

关键词 全球变暖, 区域变率, 百年趋势, 年代际波动, 城市化效应

中图法分类号 P46

1 近百年全球气候变暖, 中国是否变暖更甚?

政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第5次评估报告(Fifth Assessment Report, AR5)指出, 工业革命以来全球气候显著变暖(Hartmann, et al, 2013)。根据最新的全球表面温度观测数据集(Xu, et al, 2018; Yun, et al, 2019)估计, 1900—2017年全球陆地平均气温升高趋势为 $1.00 \pm 0.06 \text{ }^\circ\text{C}/(100 \text{ a})$; 全球平均表面温度升高趋势为 $0.86 \pm 0.06 \text{ }^\circ\text{C}/(100 \text{ a})$ 。全球变暖更稳定地体现在海洋(Cheng, et al, 2019): 1958—2018年全球海洋上层2000 m热含量显著增长, 并于20世纪90年代后加速。同期很多区域如中国旱涝和热浪等极端天气趋频(宋连春等, 2019); 全球冰川、积雪和海冰总体减少, 春夏物候普遍提前, 多角度反映了近代全球气候变暖的事实(WMO, 2019)。

各地变暖速率不尽相同。一般说来, 大陆变暖甚于海洋, 中高纬度陆地区域变暖甚于低纬度地区。如西伯利亚到蒙古一带的北亚大陆就是近百年变暖最剧烈的区域之一, 升温超 $2 \text{ }^\circ\text{C}/(100 \text{ a})$ (Zhao, et al, 2014; Wang, et al, 2018; Yan, et al, 2019)。不同区域生态系统对于气候变暖的响应敏感性有所不同, 因而区域气候变化的大小、快慢会影响当地的应对决策。定量评估区域气候变化是有益且必要的。

中国地处欧亚大陆东端, 主要呈大陆性气候特征。特别是该区域气温年际变率大, 主要受控于来自上游的北亚大陆冬季风之强弱变化。诚如前述, 近百年北亚大陆变暖剧烈, 无疑会极大地影响中国气候变暖趋势。然而, 在早期的中国国家气候变化评估报告(《气候变化国家评估报告》编写委员会, 2007; 《第二次气候变化国家评估报告》编写委员会, 2011)中, 近百年中国气温升高仅为 $0.5\text{—}0.8 \text{ }^\circ\text{C}/(100 \text{ a})$ (延伸至近年也仅 $0.85 \text{ }^\circ\text{C}/(100 \text{ a})$)。该量值甚至小于以海洋表面温度变化为主的全球平均变暖速率。近年来, 随着更多观测资料分析特别是

气候序列均一化方面的进展, 越来越多研究发现, 近百年中国气候变暖趋势远高于全球平均水平。

2 早期的中国百年气温序列

构建中国范围百年尺度气温观测序列的研究, 可回溯至20世纪80年代(张先恭等, 1982; 王绍武, 1994)。构建百年序列的困难主要来自50年代以前观测资料的缺乏。不同研究者对于早年资料包括代用资料的运用和处理各有不同。作为早期研究的代表性工作, 张先恭等(1982)把气温观测资料分7个区处理并转化为气温等级序列。分区域等级化处理的做法, 缓解了早期观测资料匮乏的困难。然而, 等级处理带有主观性, 对于评估百年气候变暖趋势而言, 定量化程度有限。更重要的是, 如果某个时段个别站点气温记录存在偏差, 特别是战乱期间很多资料缺失严重的情况下, 区域等级化处理有可能放大该时段的区域序列偏差。

王绍武等(1998)进一步综合利用多种资料进行分区分时段处理。把中国分为10个区, 分别构建区域气温距平序列, 再通过区域面积加权获得中国序列。各区域根据观测资料情况在不同时期用到气温等级资料以及冰芯、树木年轮和历史记载等代用资料。这种分区分时段处理的方法, 有利于更充分地利用近期器测资料的定量化优势。然而, 对于百年气候变暖的趋势估计而言, 不确定性主要源于早期气温等级和代用资料的运用。为避免代用资料的不确定性, 有必要主要采用观测气温数据来构建中国气温序列(林学椿等, 1995)。

21世纪初期以来, 随着气候观测数据插值技术的发展, 涌现出越来越多的格点化气候数据集。唐国利等(2005, 2009)把站点气温观测转化为 $5^\circ \times 5^\circ$ 经纬度格点气温距平序列, 进而通过格点面积加权平均, 形成中国气温序列。相比区域化, 格点化也在一定程度上缓解了早年观测站点稀疏的缺陷; 但在大范围缺乏观测的地区, 相应格点也是缺测的。由于气温的长期变化一般而言具有较大空间尺度, 因而部分地区缺测对中国平均气温变化的长期趋

势估计影响不大(Jones, et al, 2008)。从技术层面而言, 格点化方法更客观, 更易于检验改进。然而, 如果站点记录存在偏差(特别是早年站点稀少的情况下), 格点化同样可能放大其影响。

上述早期研制的多个中国百年气温序列, 尽管研究者的具体资料及其处理方法不同导致结果在细节上有所差异, 但其长期趋势和波动特征却十分相近。特别是20世纪40年代前后各序列都明显偏暖。这一早期偏暖期的存在, 导致了对近百年序列的长期趋势估计较小。尽管有研究述评(丁一汇等, 2016; Ren, et al, 2017; Li Q X, et al, 2019)指出了其中的不确定性, 早期的中国国家气候变化评估报告还是基于这些研究结果认为, 中国近百年气温上升趋势为 $0.5\text{--}0.8\text{ }^{\circ}\text{C}/(100\text{ a})$ 。

3 基于均一化观测的中国百年气温序列

长期气象观测序列不可避免地受到迁址、仪器更新、观测规则变化(如每日 n 次观测平均)等非自然因素的影响, 导致相关时段的子序列之间存在系统性的偏差, 即非均一性(严中伟等, 2014)。20世纪80年代后, 学术界开始广泛重视其可能严重影响近代气候变化趋势之评估。20世纪90年代欧盟耗资数百万欧元支持的项目研制了西欧十几个长期(回溯至18世纪)气象站的均一化逐日气温序列集, 为后续研究提供了一套难以替代的资料基础(Camuffo, et al, 2002; Yan, et al, 2002, 2014)。

针对中国早期观测问题, 20世纪90年代初中国科学院曾与美国能源部合作, 筛选整编了一套中国60站长期气候观测序列集(Tao, et al, 1991)。这套资料包括台站观测历史变迁记录, 目的是校订观测序列中的非均一性。但由于种种原因, 该项合作并未产生一套均一化的长期气温序列集。Yan等(2001)运用这套资料, 对北京、上海两站的长期逐日气温序列进行了均一化校订。两站原始序列的近百年以及近几十年趋势都有明显差异, 校订后则趋于一致, 这表明在几十年到百年尺度上位于中国东部的这两地气候趋势十分相似。两站的均一化校订是以各自周边站记录为参考的, 两站的参考资料没有交集。这说明均一化消除的是原序列中的局地偏差, 其结果则更好地反映了大尺度的气候变化。

气候变化一般而言总是大尺度的, 因而当某观测站某段子序列与周边站记录显著不一致时, 就可

认为该段子序列由于局地观测系统的问题而具有系统性偏差或非均一性。均一化就是要检测和校订这类偏差。学术界已发展很多均一化方法, 其中最成熟且广为应用的方法软件包括气候序列多元分析和相对均一性检验。Wang(2008)发展的RHtest根据时间序列的自回归统计特征及其与周边参考站的对比来检测和校订非均一性; 该方法不仅校订子序列的均值还可校订其分布特征, 这对于逐日观测序列的均一化尤其有意义。Szentimrey(1999)发展的MASH方法则是通过迭代实现区域内所有气候序列的相互比较, 同时确定所有序列中可能存在的断点, 而不必要求其中任一序列是均一的; 这就解决了大部分方法逐一校订各序列偏差时所面临的“校订顺序不同可能导致结果也不同”的困境。不同方法各有优劣, 其结果也有所不同, 但相比与原始资料的差异来说是少量。均一化资料相比原始资料, 总是更好地反映了大尺度气候变化格局(Li, et al, 2016; Squintu, et al, 2019)。

近年来, 随着更多对中国早期气象观测资料的收集和整编, Cao等(2013, 2017)发展了一套均一化的中国长期气温序列集, 充分利用迄今最完善的台站历史资料, 并运用国际通用的RHtest软件实现了对各站气温序列的均一化校订。考虑到软件应用中一些人为规则可能导致部分站点序列的非均一性得不到充分校订, Li等(2018)运用了更偏重于客观统计检验的MASH方法, 对上述序列集进行了进一步校订。虽然不同方法的校订结果有差异(图1), 但基于均一化的气温序列集所估计的中国长期气温趋势却相当一致($1.3\text{--}1.7\text{ }^{\circ}\text{C}/(100\text{ a})$)。

为了解中国气温序列可能存在的不确定性, 根据Cao等(2017)的数据, 采用Wang等(2018)的方法计算了32站平均的中国气温序列(图1中T-Cao)的90%置信区间(主要反映站点稀少所致区域均值的不确定性)。由图1可见, 早期由于站点资料较少, 序列的不确定范围较大, 后期则很小; 其他作者所得的序列除了早期个别年份外也都被此不确定范围覆盖。根据Cao等(2017), 1951年以来用32站和2419站计算的中国气温序列相关系数达0.99, 只是前者的部分年际变率略大。这说明由数十站均一化气温序列计算的中国百年气温序列具有相当好的代表性。在上述90%置信区间随机选取1000个序列, 计算的长期趋势范围为 1.51--

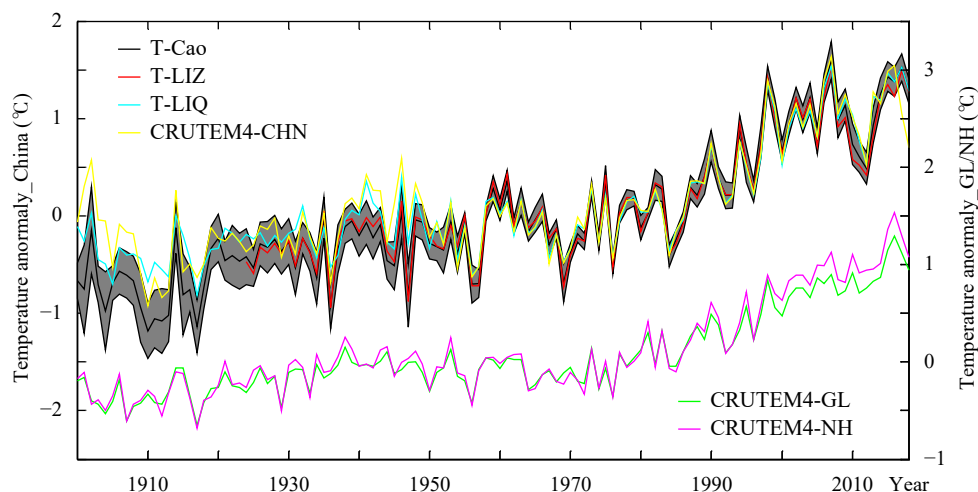


图1 基于均一化观测资料计算的中国、全球和北半球陆地气温序列对比(中国序列数据来源:T-Cao (Cao, et al, 2017), T-LIZ (Li, et al, 2018), T-LIQ (Li, et al, 2017), CRUTEM4-CHN (Jones, et al, 2012); 全球(CRUTEM4-GL)及北半球(CRUTEM4-NH)序列来源: MetOffice CRUTEM.4.6.0.0.anomalies; 阴影是T-Cao序列的90%置信区间)

Fig. 1 Annual mean surface air temperature anomaly series for China during 1910–2018 based on homogenized datasets, compared with the global (GL) and Northern Hemisphere (NH) land surface air temperature series (The sources of China series are: T-Cao (Cao, et al, 2017), T-LIZ (Li, et al, 2018), T-LIQ (Li, et al, 2017), CRUTEM4-CHN (Jones, et al, 2012); The source of CRUTEM4-GL and CRUTEM4-NH is MetOffice CRUTEM.4.6.0.0.anomalies. All series have been updated to 2018. The shadow is the 90% confidence interval of the T-Cao series)

1.73°C/(100 a)(中值 1.57°C/(100 a)),可作为该序列趋势的90%置信区间。该序列结果也可借鉴判断其他序列包含的不确定性。长期气温序列的不确定性值得进一步研究。

最近发布的IPCC气候变化与土地特别报告(Special Report on Climate Change and Land, SRCCL)指出,2006—2015年全球陆地气温比1850—1900年偏高约1.53°C(1.38—1.68°C),接近上述中国区域的百年变暖幅度估计范围。由图1可见,近百年来中国气温变化与全球或北半球陆地平均气温变化相当一致,即总体呈上升趋势,但中国趋势较大;20世纪40年代前后有一个微弱偏高的波动。然而,早期研究的中国气温序列则有一个共同的醒目特点,即40年代气温明显偏高。正是这一早期的异常“偏暖”,导致以往的百年气温趋势估计值偏小。

4 20世纪40年代前后中国并不普遍“偏暖”

近年来越来越多研究表明,20世纪40年代前后,中国区域并不普遍偏暖。相关论据可概括为如

下3个方面。

气温观测序列的非均一性——在新中国成立伊始各地的城乡发展进程中,很多气象站从市区迁至郊区。基于城市热岛原理可推测,迁址前观测到的气温相对于后期而言,应该系统地偏高(Cao, et al, 2017)。气象站迁址可能还伴有观测仪器更新和观测规则变更等多种变化,这些变化可加剧或抵消上述城乡差异导致的观测偏差。在Cao等(2017)分析的32个长期观测站中,有13个站有上述迁址效应。考虑周边参考站记录运用RHtest方法进行均一化校订后,这些站的早期气温记录大都有所降低。因而,基于均一化资料的中国区域百年气温序列中也就不再呈现一个突出的“20世纪40年代偏高期”。

最近,朱亚妮等^①(2020,私人通信)运用早年研究的长期气温观测数据,还原了部分早年所得的中国百年气温序列,发现20世纪40年代的“高温”依然存在。将原始观测序列代之以均一化序列后,仿照早年方法重建的百年气温序列,就不再呈现明显的40年代偏高。这也说明多年来认为的“20世纪

① 朱亚妮,赵平,曹丽娟等,2020,早期资料偏差对中国20世纪40年代“偏暖”的影响

40年代偏高”，主要源自部分台站气温观测序列中的非均一性。

代用资料印证——20世纪40年代中国部分地区某些季节可能确实偏暖。比如曾昭美等(2003)在分析近百年两次年代际变暖过程时指出：20世纪早期中国东部气候变暖主要体现在夏季，其依据包括早年北京和上海等地的气温观测。童宣等(2018)则发现，20世纪40年代前后冬季中国东南部到西北气候偏暖，但东北到华北部分区域却处于一个多年代际波动的偏冷期。

鉴于早期气象观测记录稀少，参考一些基于代用资料的相关研究是有益的。Zheng等(2015)把中国大陆分为9个区，分别利用历史记载、树轮、冰芯等代用资料构建了过去150 a的气温距平序列。结果表明，很多区域20世纪40年代前后确实存在年代际的相对偏暖波动，但也有一些区域(如华南)甚至是偏冷的；即使是那些区域偏暖波动，其位相也并不一致。因而，大范围平均的中国气温序列不可能呈现一个突出的40年代偏高波动。

区域气候变化机制——运用独立于气温观测的其他气候要素分析，有助于更好地理解区域气温变化的合理性。童宣等(2018)利用全球格点化的海平面气压场，计算了中国及周边区域的地转风场，并结合格点化的气温观测资料计算了冬季温度平流格局。结果表明，20世纪40年代前后，从中国东南部到西北大部分区域以偏暖平流为主，但从蒙古到中国东北一带则以偏冷平流为主。这有助于理解同期东北到华北部分区域偏冷的气温分析结果。

近年来发展的“北极暖大陆冷”的理论(Cohen, et al, 2014)，旨在诠释1998年以来北极持续变暖而中纬度一些大陆区域“变暖停滞”的现象。北极偏暖时常对应绕极西风环流经向度增强，也即北极涛动(AO)偏弱，从而极地冷空气活动更易于波及某些大陆区域，导致这些区域偏冷。梁苏洁等(2014, 2019)指出：北极涛动偏弱的冬季中国东北更易于遭遇寒潮而偏冷。事实上1998年以来中国东北一带冬季确实存在降温趋势(Li, et al, 2015)。20世纪早期至40年代北极附近区域变暖较明显，或致北极涛动减弱(Zeng, et al, 2001; 龚道溢等, 2003)，由此亦可理解前述中国部分地区并未同步变暖的事实。

值得注意，20世纪40年代前后全球气候呈现

相对偏暖波动，大西洋多年代际涛动(AMO)和太平洋年代际涛动(PDO)也处于正位相，表明大洋涛动可能是40年代偏暖的直接原因(丁一汇等, 2016)。Gao等(2015)对比分析了观测的和海表温度强迫大气模式模拟的大陆气温变化，发现大西洋多年代际涛动和太平洋年代际涛动正好对应大陆气温变化的两个主分量；有趣的是，大西洋多年代际涛动正位相期间欧亚大陆包括中国大部分地区偏暖，但太平洋年代际涛动正位相期间中国很多区域偏冷。20世纪40年代前后大西洋多年代际涛动和太平洋年代际涛动都处于正位相，这或许是当时中国并非到处偏暖的又一个背景因素。关于40年代偏暖的区域性特征及其形成机理值得进一步研究。

5 城市化加剧局部增暖但对中国平均趋势的影响较小

近几十年来中国经历了快速的城市化发展。尤其是21世纪初以来的十多年内，中国土地利用变化方式以建设用地扩张为主，面积增加 $2.46 \times 10^4 \text{ km}^2$ (刘纪远等, 2018)。显然，相对于国家尺度而言，城市化占比很小。因而，如果气象站观测受到城市化影响，就需要定量判断这类局地信号，才能确切评估大尺度气候变化。一般说来，城市化伴随城市热岛增强，反映到局地站点气温序列里，相当于在大尺度气候变化背景上叠加一个额外的变暖趋势。城市化对观测的气温变化趋势的贡献究竟有多大？迄今已有很多研究，但结论却有很大差异。从一些综述性讨论(Yan, et al, 2016; Wang, et al, 2016)可见，由于不同研究的地点、时段、方法、资料都各有不同，导致很多结果难以直接比较。

就中国百年变暖趋势而言，Zhao等(2014)利用统计分析发现主要原因是大尺度气候变化包括周边地区大气环流的演变所致，贡献在80%以上。他们根据人口规模划分不同城市化程度的站点，对比分析其长期气温序列后认为，城市化效应对中国东部观测到的变暖贡献平均应在20%以下。一些研究通过对比近几十年城乡站点观测序列，认为在部分城市站观测到的变暖趋势中城市化效应的贡献可超过20%(Ren, et al, 2007, 2015; Wang, et al, 2015)；但Wang等(2015)考虑城市站代表的范围很小，进而分析指出中国区域平均的变暖趋势中城市化效应的贡献不足1%。

有关争议的焦点问题之一在于如何区分大尺度气候变化信号和局地城市化信号。很多研究把所谓的“乡村站”作为大尺度气候变化的背景代表站,由此估算的城市化变暖效应往往都较大(因为有的“乡村站”近几十年几乎没有变暖趋势)。然而,这些“乡村站”能否代表大尺度气候变化值得质疑。部分这类站点气温序列由于非均一性而存在变冷的趋势偏差(Peterson, 2003; Yan, et al, 2014)。国际学术界曾提出“观测减再分析(observation minus reanalysis, OMR)”的办法来提取大尺度气候变化背景(Kalnay, et al, 2003)。Wang等(2017a)利用该方法消除各站的大尺度气候趋势场,然后再利用残差气温记录,结合遥感观测的站点周边城市覆盖度进行回归分析,结果表明,近几十年来城市扩张对中国东部观测的日最低气温趋势的贡献约为9%;而对日最高气温趋势则几乎没影响。最近, Li Y Z等(2019)分区域建立了多种城市化指标,分析其与不同类站点观测气温序列的关联后认为,城市化的影响有正有负,总体而言对中国区域观测的气温变化趋势影响不明显。

由于中国城市化进程伴随有突出的区域性气溶胶污染增长(从而具有降温效应),城市化对观测的变暖趋势的贡献,无论从观测事实分析还是物理机制理解上都还存在不确定性。Jones等(2008)曾通过对比多套站点观测资料以及附近海域温度变化判断,城市化效应相对于近代中国气候变暖而言,远非主导因素。综合考虑上述近年研究结果,该结论值得肯定。

城市化效应或许在一些极端气温指标的变化中更明显。观测分析表明,城市化可能加剧了近几十年城市群区域的高温热浪(Li, et al, 2014; Ren, et al, 2014; Luo, et al, 2017; Yang, et al, 2017),一些模拟研究则为此提供了机理认识。如Sun等(2014, 2016)利用全球气候模拟进行的归因分析表明,城市化对中国极端高温事件增多有一定贡献; Wang等(2017b)利用高分辨区域模式模拟2013年华东超级热浪时发现,城市热岛与热浪天气之间存在正反馈。热浪天气往往有利于气溶胶消散,因而能更直接反映城市下垫面效应。

6 结论和展望

主要结论如下:中国百年观测气温序列的研制

历程始于20世纪80年代。一个关键进展是近年来研发了一系列均一化的长期气温观测序列集,由此估算的近百年来中国气温上升趋势大致为 $1.3-1.7^{\circ}\text{C}/(100\text{ a})$ 。由于50年代前后很多气象站迁址等观测系统的变化,导致部分站点此前的观测气温偏高,早期研究未能校订这一非均一性,所得的中国序列都存在一个夸张的“20世纪40年代偏暖”,从而低估了百年变暖趋势。一些其他相关要素以及代用资料分析表明,40年代中国并不普遍偏暖,从而大范围平均不可能呈现一个突出的偏暖期。近年来发展的“极地暖大陆冷”等区域气候变化理论和多年代际大洋涛动及其影响方面的研究,则有助于理解相关事实。

值得加强的进一步研究如下:

(1)就观测的气候变化分析而言,可靠的长期观测序列无疑是最重要的基础。如上述20世纪40年代资料严重缺失或由于迁址等因素不能直接和后期自身及同期周边观测相比,一些基于原始资料的分析就值得质疑(Li Q X, et al, 2019)。近年来针对中国早期观测资料问题而开展的气温序列均一化取得了重要进展。未来还有必要发展更多分辨率更高的均一化的长期气候要素观测序列集。这不仅有助于完善区域气候变化包括极端事件变化的事实分析,也是深入理解区域气候变化机制及其全球联系的基础。

(2)诚如前述增暖变缓(hiatus)问题所反映的,气候系统内部变率特别是区域年代际变率,对于认识工业革命以来的气候变化趋势有重要影响。虽然Karl等(2015)指出校订了部分海洋观测资料的非均一性后全球尺度几乎不存在增暖变缓,但不可否认存在很强的区域气候年代际变率。如20世纪40年代偏暖波动的分布规律及其与大洋涛动的联系机制,是有助于理解近百年气候变化的。不同区域具有不同位相的年代际变率,也是涉及区域气候波动和全球变化联系的一个焦点问题。

(3)城市化效应或是中国气候变化研究中的一个特别话题。如何校订城市化造成的气候观测序列中的局地性趋势偏差?现有研究尚存争议。重要的是,探索城市化效应需要同时考虑大尺度气候变化。不少研究从单向思维出发从不完整的观测资料里挖掘“信号”,客观上易于导致结果有失偏颇。把城市化的气候效应与全球气候变化的归因研究

相结合,或有助于取得突破性进展。

参考文献

- 《第二次气候变化国家评估报告》编写委员会. 2011. 第二次气候变化国家评估报告. 北京: 科学出版社, 710pp. Writing Committee of the Second National Assessment Report on Climate Change. 2011. The Second National Assessment Report on Climate Change. Beijing: Science Press, 710pp (in Chinese)
- 丁一汇, 王会军. 2016. 近百年中国气候变化科学问题的新认识. *科学通报*, 61(10): 1027-1041. Ding Y H, Wang H J. 2016. Newly acquired knowledge on the scientific issues related to climate change over the recent 100 years in China. *Chinese Sci Bull*, 61(10): 1027-1041 (in Chinese)
- 龚道溢, 王绍武. 2003. 近百年北极涛动对中国冬季气候的影响. *地理学报*, 58(4): 559-568. Gong D Y, Wang S W. 2003. Influence of Arctic oscillation on winter climate over China. *Acta Geogr Sinica*, 58(4): 559-568 (in Chinese)
- 梁苏洁, 丁一汇, 赵南等. 2014. 近 50 年中国大陆冬季气温和区域环流的年代际变化研究. *大气科学*, 38(5): 974-992. Liang S J, Ding Y H, Zhao N, et al. 2014. Analysis of the interdecadal changes of the wintertime surface air temperature over mainland China and regional atmospheric circulation characteristics during 1960-2013. *Chinese J Atmos Sci*, 38(5): 974-992 (in Chinese)
- 梁苏洁, 赵南, 丁一汇. 2019. 北极涛动主模态下北极冷空气的优势路径和影响地区的研究. *地球物理学报*, 62(1): 19-31. Liang S J, Zhao N, Ding Y H. 2019. Dominant trajectories and influenced regions of the near-surface cold air in the Arctic during positive and negative AO/NAM events. *Chinese J Geophys*, 62(1): 19-31 (in Chinese)
- 林学椿, 于淑秋, 唐国利. 1995. 中国近百年温度序列. *大气科学*, 19(5): 525-534. Lin X C, Yu S Q, Tang G L. 1995. Series of average air temperature over China for the last 100-year period. *Sci Atmos Sinica*, 19(5): 525-534 (in Chinese)
- 刘纪远, 宁佳, 匡文慧等. 2018. 2010-2015 年中国土地利用变化的时空格局与新特征. *地理学报*, 73(5): 789-802. Liu J Y, Ning J, Kuang W H, et al. 2018. Spatio-temporal patterns and characteristics of land-use change in China during 2010-2015. *Acta Geogr Sinica*, 73(5): 789-802 (in Chinese)
- 《气候变化国家评估报告》编写委员会. 2007. 气候变化国家评估报告. 北京: 科学出版社, 422pp. Writing Committee of National Assessment Report on Climate Change. 2007. National Assessment Report on Climate Change. Beijing: Science Press, 422pp (in Chinese)
- 唐国利, 任国玉. 2005. 近百年中国地表气温变化趋势的再分析. *气候与环境研究*, 10(4): 791-798. Tang G L, Ren G Y. 2005. Reanalysis of surface air temperature change of the last 100 years over China. *Climatic Environ Res*, 10(4): 791-798 (in Chinese)
- 唐国利, 丁一汇, 王绍武等. 2009. 中国近百年温度曲线的对比分析. *气候变化研究进展*, 5(2): 71-78. Tang G L, Ding Y H, Wang S W, et al. 2009. Comparative analysis of the time series of surface air temperature over China for the last 100 years. *Adv Climate Change Res*, 5(2): 71-78 (in Chinese)
- 童宣, 严中伟, 李珍等. 2018. 近百年中国两次年代际气候变暖中的冷、暖平流背景. *气象学报*, 76(4): 554-565. Tong X, Yan Z W, Li Z, et al. 2018. The background of cold/warm advection for two interdecadal warming processes during the last century in China. *Acta Meteor Sinica*, 76(4): 554-565 (in Chinese)
- 王绍武. 1994. 近百年气候变化与变率的诊断研究. *气象学报*, 52(3): 261-273. Wang S W. 1994. Diagnostic studies on the climate change and variability for the period of 1880-1990. *Acta Meteor Sinica*, 52(3): 261-273 (in Chinese)
- 王绍武, 叶瑾琳, 龚道溢等. 1998. 近百年中国年气温序列的建立. *应用气象学报*, 9(4): 392-401. Wang S W, Ye J L, Gong D Y, et al. 1998. Construction of mean annual temperature series for the last one hundred years in China. *Quart J Appl Meteor*, 9(4): 392-401 (in Chinese)
- 严中伟, 李珍, 夏江江. 2014. 气候序列的均一化: 定量评估气候变化的基础. *中国科学: 地球科学*, 44(10): 2101-2111. Yan Z W, Li Z, Xia J J. 2014. Homogenization of climate series: The basis for assessing climate changes. *Sci China Earth Sci*, 57(12): 2891-2900
- 曾昭美, 严中伟, 叶笃正. 2003. 20 世纪两次全球增暖事件的比较. *气候与环境研究*, 8(3): 319-330. Zeng Z M, Yan Z W, Ye D Z. 2003. Two global warming events in the 20th century. *Climatic Environ Res*, 8(3): 319-330 (in Chinese)
- 张先恭, 李小泉. 1982. 本世纪我国气温变化的某些特征. *气象学报*, 40(2): 198-208. Zhang X G, Li X Q. 1982. Some characteristics of temperature variation in China in the present century. *Acta Meteor Sinica*, 40(2): 198-208 (in Chinese)
- 宋连春, 巢清尘, 朱晓金等. 2019. 2019 年中国气候变化蓝皮书. 北京: 中国气象局气候变化中心. Song L C, Chao Q C, Zhu X J, et al. 2019. Blue paper on climate change in China in 2019. Beijing: Climate Change Center of China Meteorological Administration (in Chinese)
- Camuffo D, Jones P. 2002. Improved understanding of past climatic variability from early daily European instrumental sources. *Climatic Change*, 53: 1-4
- Cao L J, Zhao P, Yan Z W, et al. 2013. Instrumental temperature series in eastern and central China back to the nineteenth century. *J Geophys Res Atmos*, 118(15): 8197-8207
- Cao L J, Yan Z W, Zhao P, et al. 2017. Climatic warming in China during 1901-2015 based on an extended dataset of instrumental temperature records. *Environ Res Lett*, 12(6): 064005
- Cheng L J, Abraham J, Hausfather Z, et al. 2019. How fast are the oceans warming?. *Science*, 363(6423): 128-129
- Cohen J, Screen J A, Furtado J C, et al. 2014. Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather. *Nat Geosci*, 7(9): 627-637
- Gao L H, Yan Z W, Quan X W. 2015. Observed and SST-forced multidecadal variability in global land surface air temperature. *Climate Dyn*, 44(1): 359-369

- Hartmann D L, Tank A M G K, Rusticucci M, et al. 2013. Observations: Atmosphere and surface//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
- Jones P D, Lister D H, Li Q. 2008. Urbanization effects in large-scale temperature records, with an emphasis on China. *J Geophys Res Atmos*, 113(D16): D16122
- Jones P D, Lister D H, Osborn T J, et al. 2012. Hemispheric and large-scale land-surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2010. *J Geophys Res Atmos*, 117(D5): D05127
- Kalnay E, Cai M. 2003. Impact of urbanization and land-use change on climate. *Nature*, 423(6939): 528-531
- Karl T R, Arguez A, Huang B Y, et al. 2015. Possible artifacts of data biases in the recent global surface warming hiatus. *Science*, 348(6242): 1469-1472
- Li Q X, Huang J Y, Jiang Z H, et al. 2014. Detection of urbanization signals in extreme winter minimum temperature changes over northern China. *Climatic Change*, 122(4): 595-608
- Li Q X, Yang S, Xu W H, et al. 2015. China experiencing the recent warming hiatus. *Geophys Res Lett*, 42(3): 889-898
- Li Q X, Zhang L, Xu W H, et al. 2017. Comparisons of time series of annual mean surface air temperature for China since the 1900s: Observations, model simulations, and extended reanalysis. *Bull Amer Meteor Soc*, 98(4): 699-711
- Li Y Z, Wang L, Zhou H X, et al. 2019. Urbanization effects on changes in the observed air temperatures during 1977-2014 in China. *Int J Climatol*, 39(1): 251-265
- Li Q X, Yang Y J. 2019. Comments on "Comparing the current and early 20th century warm periods in China" by Soon W, Connolly R, Connolly M, et al. *Earth Sci Rev*, 198: 102886
- Li Z, Cao L J, Zhu Y N, et al. 2016. Comparison of two homogenized datasets of daily maximum/mean/minimum temperature in China during 1960-2013. *J Meteor Res*, 30(1): 53-66
- Li Z, Yan Z W, Cao L J, et al. 2018. Further-adjusted long-term temperature series in china based on MASH. *Adv Atmos Sci*, 35(8): 909-917
- Luo M, Lau N C. 2017. Heat waves in southern China: Synoptic behavior, long-term change, and urbanization effects. *J Climate*, 30(2): 703-720
- Peterson T C. 2003. Assessment of urban versus rural in situ surface temperatures in the contiguous United States: No difference found. *J Climate*, 16(18): 2941-2959
- Ren G Y, Chu Z Y, Chen Z H, et al. 2007. Implications of temporal change in urban heat island intensity observed at Beijing and Wuhan stations. *Geophys Res Lett*, 34(5): L05711
- Ren G Y, Zhou Y Q. 2014. Urbanization effect on trends of extreme temperature indices of national stations over mainland China, 1961-2008. *J Climate*, 27(6): 2340-2360
- Ren G Y, Li J, Ren Y Y, et al. 2015. An integrated procedure to determine a reference station network for evaluating and adjusting urban bias in surface air temperature data. *J Appl Meteor Climatol*, 54(6): 1248-1266
- Ren G Y, Ding Y H, Tang G L. 2017. An overview of mainland China temperature change research. *J Meteor Res*, 31(1): 3-16
- Squintu A A, Van Der Schrier G, Brugnara Y, et al. 2019. Homogenization of daily temperature series in the European Climate Assessment & Dataset. *Int J Climatol*, 39(3): 1243-1261
- Sun Y, Zhang X B, Zwiers F W, et al. 2014. Rapid increase in the risk of extreme summer heat in Eastern China. *Nat Climate Change*, 4(12): 1082-1085
- Sun Y, Zhang X B, Ren G Y, et al. 2016. Contribution of urbanization to warming in China. *Nat Climate Change*, 6(7): 706-709
- Szentimrey T. 1999. Multiple analysis of series for homogenization (MASH)//Proceedings of the Second Seminar for Homogenization of Surface Climatological Data, WCDMP-No. 41. Geneva: WMO, 27-46
- Tao S Y, Fu C B, Zeng Z M, et al. 1991. Two long-term instrumental climatic data bases of the People's Republic of China. Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory, 204pp
- Wang F, Ge Q S, Wang S W, et al. 2015. A new estimation of urbanization's contribution to the warming trend in China. *J Climate*, 28(22): 8923-8938
- Wang J, Yan Z W. 2016. Urbanization-related warming in local temperature records: A review. *Atmos Oceanic Sci Lett*, 9(2): 129-138
- Wang J, Tett S F B, Yan Z. 2017a. Correcting urban bias in large-scale temperature records in China, 1980-2009. *Geophys Res Lett*, 44(1): 401-408
- Wang J, Yan Z W, Quan X W, et al. 2017b. Urban warming in the 2013 summer heat wave in eastern China. *Climate Dyn*, 48(9): 3015-3033
- Wang J F, Xu C D, Hu M G, et al. 2018. Global land surface air temperature dynamics since 1880. *Int J Climatol*, 38(S1): e466-e474
- Wang X L. 2008. Accounting for autocorrelation in detecting mean shifts in climate data series using the penalized maximal t or F test. *J Appl Meteorol Climatol*, 47(9): 2423-2444
- World Meteorological Organization (WMO). 2019. WMO Statement on the state of the global climate in 2018. WMO-No. 1233, Chairperson, Publications Board, https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=20799#.XkpFLMF7mhd
- Xu W H, Li Q X, Jones P, et al. 2018. A new integrated and homogenized global monthly land surface air temperature dataset for the period since 1900. *Climate Dyn*, 50(7-8): 2513-2536
- Yan Z, Jones P D, Davies T D, et al. 2002. Trends of extreme temperatures in Europe and China based on daily observations. *Climatic Change*, 53(1-3): 355-392
- Yan Z W, Yang C, Jones P. 2001. Influence of inhomogeneity on the estimation of mean and extreme temperature trends in Beijing and Shanghai. *Adv Atmos Sci*, 18(3): 309-322

- Yan Z W, Li Z, Xia J J. 2014. Homogenization of climate series: The basis for assessing climate changes. *Sci China Earth Sci*, 57(12): 2891-2900
- Yan Z W, Wang J, Xia J J, et al. 2016. Review of recent studies of the climatic effects of urbanization in China. *Adv Climate Change Res*, 7(3): 154-168
- Yan Z W, Qian C, Luo Y, et al. 2019. Climate characteristics and trends//Liu W D. Joint Construction of Green Silk Roads. Beijing: The Commercial Press, 334-407
- Yang X C, Leung L R, Zhao N Z, et al. 2017. Contribution of urbanization to the increase of extreme heat events in an urban agglomeration in east China. *Geophys Res Lett*, 44(13): 6940-6950
- Yun X, Huang B Y, Cheng J Y, et al. 2019. A new merge of global surface temperature datasets since the start of 20th century. *Earth Syst Sci Data*, 11: 1629-1643
- Zeng Z M, Yan Z W, Ye D Z. 2001. The regions with the most significant temperature trends during the last century. *Adv Atmos Sci*, 18(4): 481-496
- Zhao P, Jones P, Cao L J, et al. 2014. Trend of surface air temperature in eastern China and associated large-scale climate variability over the last 100 years. *J Climate*, 27(12): 4693-4703
- Zheng J, Hua Z, Liu Y, et al. 2015. Temperature changes derived from phenological and natural evidence in South Central China from 1850 to 2008. *Climate Past*, 11(11): 1553-1561