

长年代气候观测资料构建研究进展

司鹏¹, 徐文慧², 王敏³

1. 天津市气象信息中心, 天津 300074

2. 国家气象信息中心, 北京 100081

3. 广东省韶关市气象局, 广东 512028

摘要 归纳了近年来国内外在全球、区域和局地尺度长年代气候观测资料构建研究中所取得的重要成果, 分析了全球表面温度及降水等气候数据集产品及其为气候变化科学方面所呈现的重要价值, 讨论了长年代序列构建过程中需要改进的技术方法以及亟待解决的关键科技问题。分析表明, 长年代气候资料的构建技术在支撑气候变化业务发展方面取得了一定进展, 但立足新形势下数据供给能力建设的迫切需要, 丰富要素种类、恢复历史资料完整性、提高数据产品质量、细化研究对象空间尺度及研究要素时间尺度仍是今后需要解决的关键问题。

关键词 长年代; 观测资料; 数据均一化; 数据插补

气象站的观测记录作为第一手资料, 与其他数据相比, 具有代表性和准确性的优点^[1], 是气象业务发展的基础保障, 也是气象服务中高质量气象信息的有效供给, 在气象防灾减灾救灾、应对气候变化、气象灾害风险普查、农业安全生产、气象信息化建设、国土空间规划及气候可行性论证等多个服务领域发挥着重要的基础支撑作用。长年代连续的气候观测资料是研究气候变化特征及其归因检测的重要基础^[1-5], 也是气候模式订正、评估及其背景场输入的观测基础^[6-7]。特别是百年及以上时间尺度

完整且连续的逐日气候观测资料, 对于揭示全球、区域和局地极端气候事件对生态系统的影响机理及其相互作用提供了重要基础支撑^[8-10]。近年来, 全球变暖已然成为科学界的共识, 特别是 20 世纪 50 年代以来全球、半球和区域尺度范围的气候变化研究结论得到了气候学界的广泛认同。但由于站点覆盖度、资料完整性、观测序列非均一性等数据处理技术问题, 使得 19 世纪到 20 世纪中叶以来长达百年尺度的气候变化特征仍然存在着许多不确定性^[11-14]。这对于深入系统地研究区域或局地

收稿日期: 2022-08-23; 修回日期: 2023-02-23

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(41905132)

作者简介: 司鹏, 高级工程师, 研究方向为气象数据分析处理及气候变化, 电子信箱: spsbox@163.com

引用格式: 司鹏, 徐文慧, 王敏. 长年代气候观测资料构建研究进展[J]. 科技导报, 2023, 41(21): 31-48; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.

气候变化特点和预测未来的气候变化趋势是缺乏可靠观测依据的。

对于我国来说,能够收集到最早的仪器观测资料始于19世纪40年代,20世纪40年代又由于历史原因使得部分站点观测中断、资料缺失,导致1950年以前的气候变化研究结论无法得到很好的诠释。与此同时,在实际观测中由于观测站点迁移、仪器变更、观测时次改变等不可避免地造成长期观测资料存在非均一性问题,使其无法真实地代表气候变化特征与规律,一定程度上影响了气候变化分析结果的客观真实性^[15]。均一化是解决气候资料非均一性的重要手段,通过剔除数据中的系统偏差,保留真实的气候变化特征^[16-26]。然而,我国1950年以前的站点数量稀少,元数据信息普遍严重缺失,给长年代气候资料的均一化分析带来很大困难。因此,如何建立完整可靠的长时间观测序列一直是气候变化研究中首先需要解决的关键问题。

本文总结目前国内外长年代气候观测资料构建研究的发展现状,分析所取得的重要研究成果及存在的不足,进而结合业务应用需求,展望长年代气候观测数据产品建设的科学研究方向。

1 长年代气候观测资料的建立及其应用

1.1 月和年尺度数据产品

目前国际上最具代表性的长年代观测气候数据集主要有美国国家气候资料中心(NCDC)研发的全球历史气候数据集(global historical climatology network-monthly, GHCN)^[27-32],英国东英格利亚大学(University of East Anglia)气候研究中心(Climatic Research Unit, CRU)研发的全球月平均地表气候要素数据集^[33-37],以及美国国家宇航局哥达德航天研究所(GISS)研发的全球地表温度数据集(The GISS Surface Temperature Analysis, GISTEMP)等^[38-41](表1)。这些数据集均是基于全球各大洲的气象台站观测资料,通过对不同站点数据源的整合、时间和空间均匀性的质量控制以及气候异常值的分析等进行的建立。在各个数据集不断更新的过程中,也逐步进行了均一性检验和订正,以此提高数据产品的质量,为政府间气候变化专门委员会(IPCC)评估报告提供了重要的数据支撑^[42-43]。并且随着对这些数据集历史时期温度缺测数据插补技术的改

表1 国际上具有代表性的长年代观测温度数据集产品

数据集	要素	月值	日值	网格	站点	时间段	是否质控	是否均一化订正
CRUTS4.03	平均					1901.1—2018.12		
	最高	√	×	√	√	1901.1—2018.12	√	√
	最低					1901.1—2018.12		
BE-monthly	平均					1819.7—2019.12		
	最高	√	×	√	√	1872.12—2019.12		
	最低					1872.12—2019.12	√	×
BE-daily	平均					1930.1—2017.12		
	最高	×	√	√	×	1880.1—2018.12		
	最低					1903.1—2018.12		
GHCNV3	平均					1891.1—2017.12		
	最高	√	×	√	√	1904.1—1990.12	√	√
	最低					1904.1—1990.12		
GISS	平均	√	×	√	√	1891.1—2020.3	√	√

注:表中时间段分别对应平均气温、最高气温和最低气温。

进和观测站点数据量的增加,全球地表温度变化的趋势估计在 IPCC AR6^[43]中相对以往的评估结果更为准确。另外,Rohde 等^[44]将伯克利陆表温度月数据(Berkeley Earth-monthly)与哈得莱海表温度空间插值数据(HadSST3)相结合,整合得到了伯克利全球表面温度数据集,为 1850 年以来全球气候和极端气候变化检验、瞬时气候反应评估以及气候模型验证等提供了一个空间更完整、更均匀的温度场。

Smith 等^[45]基于美国的 GHCN 降水站点观测数据,结合从现代卫星取样期发展而来的统计数据对 1900 年以来全球陆地-海洋月降水序列进行了重建。Ren 等^[46]则利用该降水数据结合耦合模式模拟数据(CMIP3 和 CMIP5)对全球 1900—2005 年观测到的降水趋势变化进行了评估,确定了 20 世纪全球平均降水量存在显著上升趋势的研究结论。Wang 等^[5]利用 CRUTEM4 站点资料^[37]对 1880 年以来全球陆地平均气温进行了一次新的分析,该分析较以往的分布具有更大的覆盖范围和较低的不确定性。闻新宇等^[47]和马柱国等^[48]分别利用英国 CRU 1901 年以来的全球 0.5°×0.5°月降水和气温资料对我国及我国北方近百年的气候变化进行分析,得到的研究结果很大程度上减少了以往因利用代用资料评估所带来的不确定性,特别是 20 世纪前半叶。

我国学者针对长年代气候序列的构建开展了多方面的研究工作。Cao 等^[49-50]收集整编不同来源的百年尺度器测气温资料,挑取其中 1951 年之前资料序列超过 30 年且质量较好的 18 个气象站资料,建立了中国中东部地区 19 世纪末以来均一化的月平均气温数据集,并对我国 1901—2015 年期间的气候变暖进行了再评估。战云健等^[10]基于多来源的 1901—1950 年原始观测报表数字化逐日降水资料,补充先前未录入的“无降水”和缺测数据,并有针对性地研发质量控制方案开展质量控制,补充录入检测出的缺失和错误数据并再次进行质控,结合 1951 年以来的现代降水日值资料,建立了中国大陆 60 个城市站 1901—2019 年降水日值数据集,为我国百年尺度极端降水气候变化分析提供了重要的研究基础。

近年,为弥补 GHCN^[27-32]、CRU^[33-37]和 GISTEMP^[38-41]等全球气候数据集站点覆盖有限等不足,我国气象学者在现有数据集的基础上进一步完善和更新了全球陆面气温(CMA Global Land Surface Air Temperature, CMA-LSAT)和降水(CMA Global Precipitation V1.0, CGP)月值历史数据集,相比其他全球数据集,其最大进展是台站覆盖范围得到了改善,特别是在亚洲地区,中国及东北亚等邻近区域的数据覆盖有了显著提高^[51-53]。与此同时,对于多源整合后的数据均最大程度地进行了均一化处理,很大程度上提升了全球站点观测数据的数量、质量和应用价值。中山大学研发团队^[54]对 CMA-LSAT 进行了更新,合并扩展重建的海表温度数据集(ERSSTv5)^[55-56]得到整合的全球表面温度数据集(CMST),该数据集增加了全球陆地和海洋观测数据的数量和覆盖面积。同时,为进一步提高全球表面温度数据的覆盖率,基于 Li 等^[57-58]最新更新的全球 5°×5°陆表温度数据集(C-LSAT 2.0),Sun 等^[59]利用高低频分量重建法,结合观测约束掩蔽,对 C-LSAT 2.0 进行了重建,并与 ERSSTv5 合并更新得到 5°×5°全球温度数据集(CMST-Interim),该数据集 1950 年以前的数据覆盖率从 CMST 的 78%~81% 增加到 81%~89%,1955 年以后的总覆盖率约达到 93%。这些数据集为中国和全球长时间尺度气候变化评估提供了有价值的数据库^[60]。另外,由此得到的全球地表温度观测序列^[54,59]在 IPCC AR6^[43]中首次得到应用。

Xu 等^[53]利用研发的 CMA-LSAT 数据对全球和区域气温变化进行了再评估,结果表明,该数据对全球温度变化的描述能力与国际上现有产品(GHCNV3, CRUTEM4)相似,但在描述区域温度变化时存在一定的差异,这很可能与台站数据的收集及处理这些数据的统计方法的差异有关,这也在 Li 等^[57]的研究结论中得到了印证。Sun 等^[14]同样基于 CMA-LSAT 数据对全球 1901—2014 年、1979—2014 年和 1998—2014 年 3 个阶段的年平均陆面温度进行了再分析,得到分析结果与 IPCC 以往评估报告所述一致,总体上证实了 2 个较长时期(1901 和 1979 年以来)全球变暖的空间差异。但不同的

是,最近的“增暖停滞期”的特点是两个半球的低至中纬地区变暖较慢,甚至出现了降温趋势,与 Xu 等^[53]分析结论一致。杨溯等^[52]对 CGP 评估中得到该数据集对区域性百年尺度降水变化的检测精度有一定的提高,特别是对全球近百年降水量长期变化趋势检测表明,1900—2014 年全球年降水量呈显著的增长趋势,这个结果与 GHCN 一致^[27-32]。

1.2 日尺度数据产品

由于日时间序列通常比月或年序列包含更多的观测信息,基于日值的分析具有更高的精度,所以,它们在气候变化研究中更具有应用价值,尤其是对于极端气候变化的研究分析^[61-66],并且通常情况下极端气候在气候变化中对社会经济的影响最为严重^[67-72]。然而,由于在全球收集和接收每日数据的困难以及一些非气候因素的影响(例如,观测时间的变化,加拿大主要观测站点的温度观测时间被更改为在世界时 00:00 至 06:00 读取^[61]),在百年尺度上很难形成一个连续的全球每日数据产品。这也使得研究过去 100 年,尤其是 1950 年以前的全球和区域极端事件变得更为困难。与此同时,相对全球大尺度数据产品的建立,区域和局地尺度长年代日值序列的构建更有难度,因为需要掌握更多的元数据信息来对其进行处理分析。

为满足气候分析和气候监测研究需要,美国国家海洋和大气管理局(NOAA)国家环境信息中心(NCEI)建立了日尺度的全球历史气候数据集(global historical climatology network-Daily, GHCN-Daily)^[73],包括气温、降水、降雪及雪深等要素,但在包含的 8000 多个站点记录中有 2/3 仅能收集到降水资料,并且在建立过程中尽管对整个数据集进行了质量控制,但并没有得到进一步的均一化处理。另外,同样为满足全球气候分析需要,美国伯克利地球研发中心收集并整合了全球 14 个月和日尺度仪器观测的温度数据集,建立了伯克利地球表面温度数据集(Berkeley Earth),研制过程中经过了统计误差和空间误差评估以及均一性检验,但是对检验出的序列断点未做订正^[74-75]。尽管如此,伯克利地球表面温度数据集仍是一套有价值的基础数据,因为它是独立的、非政府的和开源的,并且包含了全球尽可能长时

间尺度相对可靠且连续的日值观测数据,同时在估计全球陆地平均和典型局部误差的能力方面,相比 NASA GISS^[38-41]和 Hadley CRU^[33-37],伯克利地球平均方法(Berkeley Earth 数据集的制作方法)在重现全球和局部温度场细节方面都显示出更高的准确性^[76]。

对我国一些地区来说,仪器观测的日值序列可以延续到 19 世纪。Png 等^[77]整理了 1912—1951 年期间中国 319 个气象站的 463530 次每日气温、降水和日照的仪器观测数据,这些数据主要来自南京气象研究所、日本占领的满洲和华北日军观测站的月报。由于这些是日值观测数据,它们对于分析中尺度和亚季节气候变化非常有用。虽然中国最早的仪器观测始于 19 世纪 40 年代,但在 20 世纪 40 年代日本发动侵华战争后,一些地面站点的观测被中断,许多记录可能已经丢失。所以,对中国尽可能长时间尺度完整且连续的逐日站点数据的抢救、处理和构建的研究并不多见。但由于我国租借地的历史原因,1950 年以前一些地区单个站点往往有多个观测源。例如,青岛 1899—2014 年期间的月地面气温序列是基于德国国家气象局 1899—1913 年数字化和均一化的观测数据构建的^[78]。同样,北京、天津、上海、保定等地区也是我国保留着百年以上观测记录的典型观测站,1950 年以前拥有多个观测源,并且具有我国大城市气候的典型特征^[79-82]。所以,这些观测站长年代地面逐日气候观测资料对于揭示因自然因素和/或人类活动影响的气候变化是非常重要的。Yan 等^[79]基于台站沿革信息,针对气温序列中每段一致时期的数据进行分析,修正了北京(1915—1997 年)和上海(1873—1997 年)百年来日气温序列中的非均一性,并评估了这种非均一性对长年代气候变化趋势的影响程度。研究成果对中国百年尺度逐日气温序列均一化研究起到了先驱性作用。

然而,随着近年来我国对长序列原始观测资料的不断收集整理、国内外新的全球陆表长时间尺度观测气候数据集的研制及其构建方法的改进,继续完善和提高我国数据量有限的珍贵的百年观测资料的质量是必须要做的,以此更好地满足近年来极端气候变化研究领域对可靠长年代基础观测数据的迫切需求。Liang 等^[9]在 Yan 等^[79]的研究基础上,

采用 RHtest 软件包提供的均一化分析方法^[83-85],对上海徐家汇气象站日气温资料进行了重新订正,建立了上海 1873—2019 年均一化的月和日气温观测序列(图 1^[9]),并基于新建观测序列重新评估了上海百年以来平均气温和极端温度事件的气候变化特征及城市化的增暖影响,得出新订正后的气温序列相比之前的序列能够更好地反映上海百年尺度的气候增暖特点。司鹏等^[86-88]在已有研究基础上^[81-82],收集整理了尽可能详尽的台站元数据信息(图 2^[86]),同时为避免因观测时制、观测时次和均值统计方法差异造成的气候序列非均一性影响^[27,31-32,37,41,80],选取天津、北京、保定气象站日最高和最低气温观测数据为研究要素,尝试利用 Berkeley Earth、CRUTS4.03 和 GHCNV3 陆表温度数据来做百年逐日气温基础序列建立的参考系。其中,在数据插补过程中,没有较好且适用的观测序列时尝试采用 Berkeley Earth 1°×1°格点日数据反插到站点的数据作为 1951 年以前资料缺测和中断的插补源。在均一化分析中同时采用多种资料加权平均建立的年和月尺度的参考序列来构建京津冀区域新的百年尺度均一化逐日气温序列(图 3^[86]、图 4^[87]和图 5^[88])。该成果为解决长年代日值气候序列构建过程中资料完整性和可靠性问题提供科学借鉴,同时也为百年尺度极端气候变化研究领域提供了新的长年代完整且可靠的基础序列。

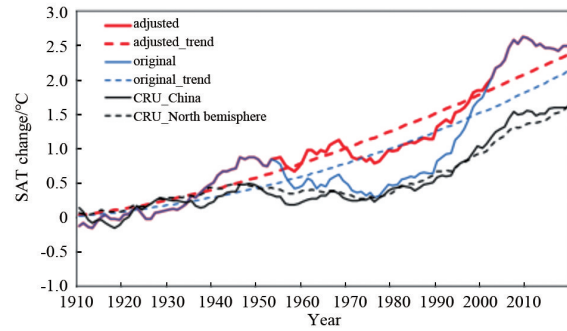


图 1 基于 1873—1900 年气候值的新建上海徐家汇站气温的 10 年滑动平均距平序列



(a)和(b)天津英租界工部署的最高和最低气温记录,(c)华北水利委员会的气温记录,(d)天津自由路 22 号气象观测站
照片均由天津市气象局天津气象档案馆提供
图 2 1950 年以前的天津人工手写观测记录

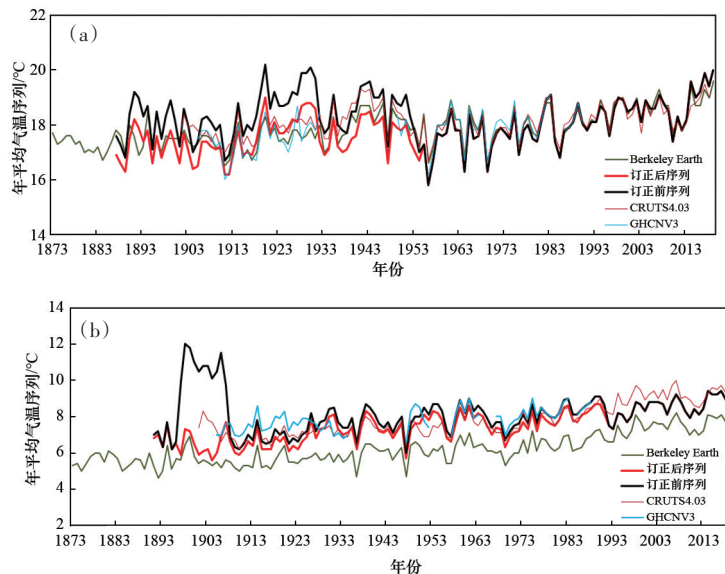


图 3 天津气象观测站 1887—2019 年均一性订正前、后的年平均最高(a)和最低(b)气温序列及其对应 Berkeley Earth、CRUTS4.03 和 GHCNV3 天津站点气温序列

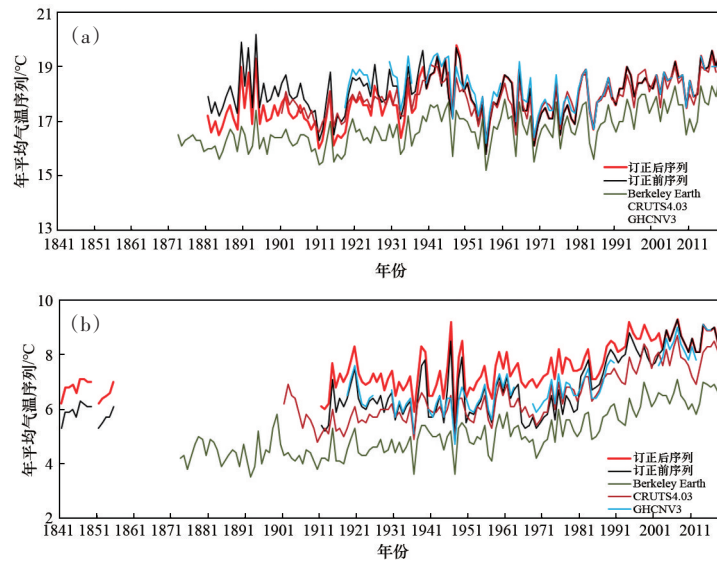


图4 北京气象观测站1841—2019年均一性订正前、后的年平均最高(a)和最低(b)气温序列及其对应 Berkeley Earth、CRUTS4.03和GHCNV3北京站点气温序列

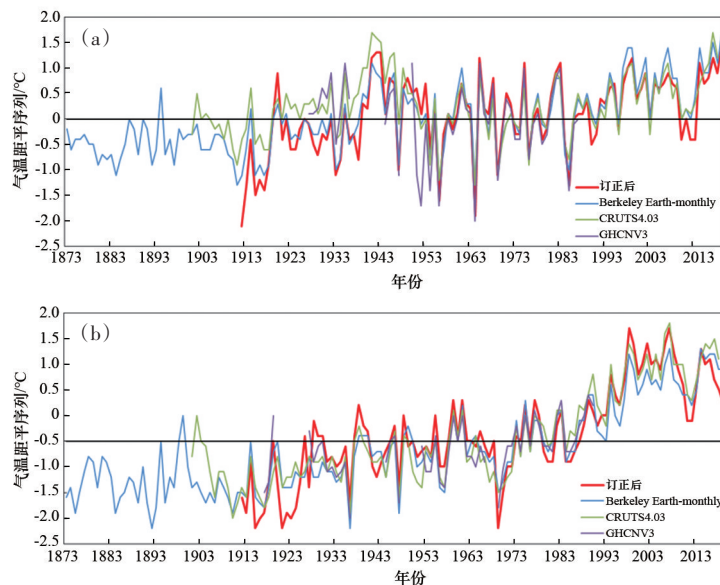


图5 保定气象观测站1912—2019年均一性订正前、后的年平均最高(a)和最低(b)气温距平序列及其对应 Berkeley Earth、CRUTS4.03和GHCNV3保定站点气温距平序列

2 历史气候资料的均一化研究

Easterling 等^[89-90]研究发现,均一性订正过程中,由于很大程度上的正负订正值被相互抵消,所以较大空间尺度(半球到全球范围)陆表温度的趋势变化受资料的均一化影响程度较小。但是对于单站和局地气候尺度来说,均一化对其温度趋势变化影响是较为显著的,如表2^[86]给出的天津百年尺

度均一化订正前后的年平均气温的趋势变化,很明显订正后的气温趋势变化幅度更趋近于同一时间和空间尺度 Berkeley Earth 和 CRU 所呈现的天津地区百年以来的温度增暖趋势变化。因而,对组成较大空间尺度的单站进行均一化分析是非常必要的,图6^[91]给出了因仪器变更导致的最高最低气温序列产生突变的个例。Yan 等^[66]对中国1900年以来的气温升高进行了重新评估,其强调指出观测资料的

表2 天津百年尺度年平均气温趋势变化

(单位: °C/10a)

参数	订正后	订正前	Berkeley Earth	CRUTS4.03
	1887(1891)—2019	(1891—2019)	(1873—2019)	(1901—2018)
最高气温	0.119±0.015	0.021±0.019	0.099±0.010	0.062±0.015
最低气温	0.194±0.013	0.042±0.027	0.156±0.010	0.217±0.015
平均气温	0.154±0.013	0.026±0.018	0.128±0.009	0.140±0.013

注: 95% 不确定性水平估计

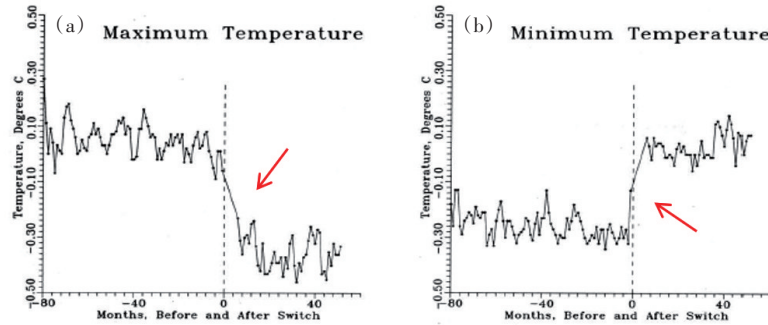


图6 仪器变更造成最高和最低气温序列非均一的个例

均一化是气候变化研究的关键基础,并提出建立一个均一的长年代逐日观测序列(甚至更高分辨率,如逐时)不仅有助于提高对极端气候事件分析的可靠性,而且还将巩固与全球其他区域进行气候比较分析的基础。严中伟等^[21-22]和唐国利等^[92]在对我国百年温度变化进行分析时,为了避免观测时次改变对平均气温带来的非均一性影响,均采用了中值法(即最高、最低气温的平均值)来计算日或月平均气温值。因此,无论从已有研究结论或是从均一化后的气候资料能够更好地提高研究结论可靠性的观点来看,气候序列的均一化过程仍然是必不可少的,即使序列订正没有明显改变区域气候的趋势变化^[14,93-95]。

早在20世纪80年代初,国外学者已经把气候资料的均一化作为一项重要数据处理分析技术开展大量研究^[96-99],并强调指出在气候变化研究中,采用去除显著断点的时间序列能够更为准确并且更容易进行气候要素分析^[100-101]。21世纪初,我国气象部门、科研院所及高校的不少专家学者也开始重视和开展我国气候资料的均一化研究,但几乎都是从全国大范围角度来进行的分析工作。主要针对气温、降水、风速、太阳辐射、相对湿度、气压等地面观测要素及历史探空资料展开尝试性研

究^[102-115],特别是对气温和降水数据已经取得较好的研究成果。通过订正迁站、仪器变更、观测时次改变、人工转自动等非气候因素造成的序列突变,建立了中国均一化历史气温和降水数据集^[110,116-118],为我国近百年来气候检测和趋势变化研究提供了相对可靠的数据基础。Xu等^[11]利用该气温数据结合数字高程模式数据(DEMSRE3)对我国1900—1950年期间1 km网格的月平均气温进行插值,为长年代气候变化研究提供了基础网格历史数据。Hu等^[119]在研究中亚高寒草原温度和降水极端事件的气候变化时,同样采用了该均一化气温和降水数据。但是在这些已有的数据均一化研究分析中,参考序列的建立方法相对局限,需要有足够台站资料的前提下才能做到。同时,由于是中国区域大范围的数据处理,所以在做断点检验分析时,对于每个具体台站实际的历史沿革情况可能有所疏忽,一定程度上造成了许多不必要的断点订正^[120]。

天津市气象局气象信息中心通过改进均一化研究技术在省级的实际应用,系统完整地研制了具有局地特点的天津地面基础气象要素均一化数据集,形成2项天津市地方标准(DB12T 1051—2021)

《地面风速观测数据均一化处理技术规程》和《地面气温和相对湿度观测数据均一化处理技术规程》(DB12/T 1051—2022),出版专著《省级地面气象观测资料均一化处理技术与应用》^[121]等,为省级气象部门数据均一化业务开展提供科学借鉴和技术支撑。在这项研究工作中,结合每个台站的历史沿革信息,着重解决了如何建立相对均一的参考序列的关键技术难点,研制得到天津1951年至今的逐日气温、降水、平均风速、相对湿度及气压要素的均一化数据产品^[120-125]。另外,在研究过程中,尽管采用的基础数据源和均一化分析的统计方法均与中国气象局发布数据产品一致,但有3个方面是不同的,分别是原始资料的预处理、参考序列的建立方法以及序列订正断点的确定,正是这3个方面的不同体现出了从局地角度,根据观测台站实际情况,因地制宜地改进数据处理技术进行气候观测资料均一化分析的重要意义。

这些数据产品相对以往数据质量有很大提高,大大改善区域历史观测资料的应用价值^[126],已经逐步在京津冀气象部门、行业相关部门及天津市委市政府相关部门等展开推广应用,能够真实可靠地评估天津区域气候特征及预测未来的趋势变化,很大程度地提升基础数据服务水平,社会效益显著。该产品为《天津市城乡规划数据手册》和《天津概览》的编制及更新提供了可靠的基础数据。为当前京津冀协同发展,建设美丽天津,更好地服务于天津国民经济和社会发展,提高规划决策水平提供基础保障和科学依据。该数据产品还为《华北区域气候变化评估报告》和《气候变化绿皮书应对气候变化报告》相关内容的撰写及个例分析提供数据支撑,评估结果更为真实可靠。另外,在指挥天津港口与航运作业中,为疏导港口压港船和及时恢复作业的决策工作提供了科学依据,减轻了大风等重大天气过程带来的严重影响。在天津市环保局开展的环境空气污染物质量浓度历史数据回溯工作中,提供了可靠基础数据,确保了天津市各点位监测数据回溯的科学性和准确性,保证空气质量评价、排名、考核的一致性及可比性。

3 历史气候资料的插补研究

数据插补是恢复长年代气候序列完整性的关键步骤,能够为减少气候变化监测检测和未来预估的不确定性提供基础保障^[127-128]。国外对于长年代气候资料的恢复已有很多研究,但主要基于不同的代用资料或者历史文献资料,而气候信息只能从代用资料中受气候影响的参数来间接获取^[129-139],如描述天气现象的湖泊结冰,描述气候对社会影响的饥荒、历史收获日期及物候记录等,另外还有来自自然资源的树木年轮、珊瑚、洞穴沉积物、冰芯及海洋和湖泊沉积物,其生长主要由温度和/或降水决定。采用的统计方法主要基于协方差的气候场重建(climate field reconstruction, CFR)技术获取有效的时空信息^[140-142],包括高斯分布数据的期望最大化算法(expectation maximization, EM)^[143-144],最优插值法(optimal interpolation, OI)^[145],典型相关分析(canonical correlation analysis, CCA)^[146],逐点回归(point-by-point regression)^[147]和高斯图形模型(gaussian graphical models)^[148]等。Mann等^[142],Graham等^[149],Goosse等^[150]和Phipps等^[151]采用了将代用资料和气候建模相结合的方式,以此获取更多关于气候变化驱动因素的信息,因为代用资料可以约束和评估模型模拟,而气候模型可以探索驱动过去气候变化的机理。Küttel等^[152]基于来自欧洲殖民国家大量数字化的船舶航行日志数据,包括陆地、仪器观测气压序列和海上风信息重建了1750—2002年期间北大西洋、欧洲和地中海地区5°×5°季节大尺度大气环流场,该数据集相对以往代用资料的构建序列能够提供更充分更直接的北大西洋海平面变化信息。

对于我国来说,20世纪90年代,王绍武^[153-156]依据现代气温观测记录及史料,恢复了我国百年历史温度序列,该项工作为全面深入认识我国历史时期的气温变化奠定了基础。王绍武等^[157]基于气温观测记录,利用冰芯、树木年轮资料及有关史料建立了我国10个区域1880—1996年的年平均气温序列,通过加权平均得到代表中国的气温序列,并

系统分析了我国气温增暖情况。王绍武等^[158]根据降水量观测记录及史料,建立了我国 110°E 以东 35 个站 1880—1998 年完整的四季及年降水量序列,为我国旱涝研究打下良好基础。在对我国西部、华中及华南地区历史长年代气温序列的恢复和重建过程中,许多研究也主要使用树木年轮、冰芯、历史文献信息等代用资料^[159-161],其成果对揭示我国气候周期性及多尺度变化特征具有重要意义。Shi 等^[162]利用树木年轮和历史文献纪录重建了 544 年亚洲夏季降水数据集,该数据集很好地捕捉了 20 世纪亚洲季风、干旱的中亚和整个亚洲的年平均降雨量变化。于革等^[163]利用花粉资料,对加拿大过去 1 千年的温度进行了历史重建,该项技术为中国千年尺度的气候重建提供了重要参考依据。

近年来,王海军等^[164]采用以最小绝对误差为目标函数求取模型参数的最小二乘法与标准化序列法插补结果平均的综合插补法,对湖北蔡甸气象站 1961—2006 年逐日气温资料进行了插补试验,得到较理想的插补结果。余予等^[165]利用标准化序列法对我国 1971—2000 年 2000 多个国家级地面站逐日平均气温缺测数据进行了插补,为 Cao 等^[49]建立我国中东部百年均一化气温月值序列奠定了基础。Wang 等^[166]利用嵌套复合尺度(nested composite plus scale, CPS)方法,基于 12 个温度敏感的树木年轮宽度年代表(包括 946 个单独的树木年轮宽度序列),对青藏高原东部公元 1000—2005 年期间 6~8 月的温度变化进行了重新构建,揭示出发生在 16、19 和 20 世纪大部分时间的增暖事件,以及发生在 11、17 和 18 世纪大部分时间的寒冷事件,该研究进一步印证了增强长年代气候序列重建的必要性和重要性。司鹏等^[81-82]基于多来源观测的气温和降水月值资料,在数据整合和质量控制基础上,分别采用标准化序列法和多元线性回归法对保定气象站 1913—2014 年月平均气温、最高和最低气温及降水量的缺测资料进行了插补,并利用惩罚最大 F 检验(PMF)及分位数匹配(QM)法对插补后序列进行了均一性检验和订正,建立了保定站百年气温和降水月值序列,研究成果为我国京津冀区域百年尺度气候观测资料的构建提供了重要借鉴。

4 结论与展望

4.1 结论

目前,国内外对于长年代气候观测资料的研究,为全球和区域气候变化研究领域提供了相对可靠的观测基础,并且随着气候资料处理技术的逐步完善及研究证据的不断增加,20 世纪中叶以来全球尺度和大多数陆地区域尺度极端温度事件的归因在信度上有大幅度提高,对气候变化研究领域的科学发展产生了深远影响。但与此同时,IPCC AR6 最新研究结论显示^[43],全球气候增暖已是毋庸置疑的事实,随之带来的极端气候事件强度的增强以及频率的增多已达到高信度水平,即使是全球小幅度变暖也会加剧极端事件频次和强度的变化,在大多数陆地区域,极端温度事件强度的变化与全球增暖幅度成正比。极端热事件频次变化随全球增暖幅度呈非线性增长,越极端的事件,其发生频率的增长百分比越大。因此,这些既定的事实不得不让我们重新审视尽可能长时间尺度完整且可靠的气候观测资料的重要性。

国际知名的几套全球陆表温度数据集 GHCN^[27-32]、CRU^[33-37]、GISTEMP^[38-41] 和 Berkeley Earth^[44,74-76]等,主要是通过统计方法将来源于全球各个国家正式或非正式交换的不同数据源(包括全球站点观测资料、观象台年报、月报或日报、天气报告、气候数据等)整合为一套完整的全球陆面站点和格点基础观测数据,并且均经过严格的质量控制和不同程度的均一化处理。这些数据集之间不是独立的,因为它们使用了几乎相同的站点观测资料作为输入数据。但它们采用了不同的统计方法来处理数据问题,如不完整的时空覆盖、观测站环境的非气候影响等,因此,其仍为气候变化研究领域提供了有价值的基础数据^[41]。

近年来,中国气象局^[49-53]和中山大学^[54,57-59]等研发团队通过丰富全球和区域站点覆盖面积、改进数据处理技术为中国乃至全球气候变化研究领域提供了新的气候信息,很大程度上提升了气候变化监测预测及服务保障能力。随着我国社会经济的大力发展以及城市结构的大规模改造,很多城市区域

的平均气候态和极端气候变化特征有了新的改变,其中最为明显的就是城市化对乡村平均气温和极端温度带来的增暖影响相对城市更为突出^[68, 126]。中国气象局^[10]、中国科学院大气物理研究所^[9, 79]以及天津市气象局^[81-82, 86-88]等研发团队,通过多源气候资料整合、质量控制、缺测数据插补及均一化处理分析等,为极端气候变化研究领域提供了新的百年逐日观测气候数据集,为解决百年尺度逐日气候观测序列构建过程中存在的资料完整性和可靠性等关键科技问题提供了重要借鉴和新的认识,对推动我国不同区域气候背景条件下长年代可靠日值序列的构建具有重要科学意义。同时,基于新建百年逐日气候观测资料,客观揭示了我国典型区域和局地百年以来特别是20世纪50年代以前的气候和极端气候事件的变化规律,从而为制定科学的对策,有效减缓和适应极端气候变化带来的不利影响提供科学依据。

4.2 展望

长年代气候观测资料的构建研究任重而道远,需要不断结合天气、气候和气候变化、预报预测、气象决策及数据服务等业务和科研中的应用需求,在实践中不断进行研究探索,不断改进处理分析方法和技术手段,最终得到尽可能相对完整且可靠的数据产品,以此提升气候观测数据在监测、预报、服务中的基础支撑能力和水平,显著增强气象服务供给力,充分实现我国数量有限的珍贵的长年代气候观测资料的重要科学价值。

4.2.1 数据业务技术研发团队建设

在当前气象人才发展规划的指导下,积极推进“人才+团队+基金”的发展模式,强化高层次气象数据科技人才队伍建设,加快培养造就一批勇于创新发展的科技领军人才和青年科技人才。充分发挥国家级气象数据研发环境优势,以国家重点研发计划等科研项目为牵引,聚焦气象数据产品研发领域“卡脖子”技术,统筹推进国家级与各省级气象部门及高校的交流与合作,综合各自优势,厘清合作任务边界,避免交叉重复,建设具有鲜明需求导向、问题导向和目标导向的高水平有影响力的数据研发团队,通过解决数据技术研发与产品制作背后的

核心科学问题,进一步提升气象信息和科技服务在社会经济发展中的重要支撑作用。

4.2.2 亟待解决的关键技术问题

尽管长年代气候资料的构建技术在支撑气候变化业务发展方面取得了一定进展,但是立足新形势下数据供给能力建设,数据业务技术发展中仍有几点不足。

1) 在以往长年代气候序列的建立中,研究较多的是气温和降水要素,并且缺测数据的插补通常采用代用资料,要素单一和资料完整性问题使得近百年或更长时间尺度以来极端气候变化的定量检测存在很大困难。目前,尽管一些新的研究中,在数据插补过程中没有较好且适用的观测序列时尝试采用 Berkeley Earth $1^\circ \times 1^\circ$ 格点日数据反插到站点作为1951年以前资料缺测和中断的插补源,但这其中的插补误差和 Berkeley Earth 数据研制过程中存在的非独立性问题可能会对重建的气候观测序列质量造成一定影响^[86-88]。所以,丰富要素种类和恢复资料完整性技术仍是今后长年代气候观测数据构建中需要解决的关键问题。

2) 对建立的气候序列气候代表性或质量未进行深入考量,尤其是均一化处理技术的应用不够。首先台站元数据记录的不一致和严重匮乏,使得均一化检验过程中,无法从客观上正确判断合理的序列断点,进而影响最终订正断点的确定。所以,在当前的研究中,调整后的时间序列可能仍会存在一些系统偏差(可能遗漏了一些潜在的断点)。同时,均一化的检验方法存在单一性,参考序列的建立方法缺乏普遍适用性。另外,在订正技术上,目前较为常见的分位数匹配法(QM),其订正过程中一定程度上依赖于台站元数据信息,所以在没有详尽元数据以及订正中受较多主观因素影响的情况下,订正后的气候序列可能还会存在非均一性问题,这对区域或局地极端天气、气候变化研究结果和结论也会造成一定的影响。因此,在今后的均一化研究分析中,首先尽可能收集详尽的台站元数据信息,同时,广泛采取同时利用多种序列均一化检验和订正统计方法,对每一类方法的检验和订正结果进行综合判断,以此进一步提高长年代气候数据产品的质量。

3) 在数据处理分析过程中,由于研究对象较多为空间大尺度范围,对每个组成站点具体沿革背景了解不够深入,造成部分站点资料的断点订正不合理。所以,要进一步加大和加强对局地站点长年代气候数据的研究和分析,从局地到区域,从区域到国家,从国家到全球,形成一套更加完整、连续且可靠的长年代气候数据产品,增强长年代气候序列在我国社会经济健康发展中所发挥的科学价值。另外,由于日值序列自身变率较大,均一化检测存在困难,导致长年代可靠日值资料研究甚少,严重阻碍了百年或长时间尺度以来极端气候变化的深入研究。因此,加强细化研究对象的空间尺度和研究要素的时间尺度也是今后长年代气候观测资料构建中需要努力解决的关键问题。

4.2.3 数据业务技术标准体系建设与应用

数据业务技术标准化是提高长年代气候观测数据对全行业数据供给能力的重要前提,也是实现全行业数据资源共享和业务技术规范统一的重要基础保障。以“十四五”气象标准体系框架及重点气象标准项目为重要抓手,有针对性地增强长年代、多要素、多尺度气候观测数据分析处理技术标准的制定和修订,统筹推进国家级和具有地方特色的省级数据业务规范规定及科技创新成果向技术标准的转化,填补长序列气候数据分析处理关键技术标准的缺失,但同时避免标准制定的交叉和重复。另外,将制定数据产品业务技术标准的编制计划和实施计划常态化运行,加强对业务有重要技术支撑和保障的高质量标准的研制及业务化应用,强化标准对气象服务业务的技术指导和业务约束。以标准促进气候观测数据关键核心技术研究的业务化和规范化,提升长年代气候数据科技成果在天气机理、气候规律、气候变化、气象灾害等核心攻关领域的整体质量效能。

参考文献(References)

- [1] Xu C D, Wang J F, Li Q X, et al. A new method for temperature spatial interpolation based on sparse historical stations[J]. *Journal of Climate*, 2018, 31(5): 1757-1770.
- [2] Rayner N A, Parker D E, Horton E B, et al. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, 108(D14): 4407.
- [3] Li R, Arkin P, Smith T M, et al. Global precipitation trends in 1900-2005 from a reconstruction and coupled model simulations[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(4): 1679-1689.
- [4] Saha S, Chakraborty D, Paul R K, et al. Disparity in rainfall trend and patterns among different regions: Analysis of 158 years' time series of rainfall dataset across India [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2018, 134(1/2): 381-395.
- [5] Wang J F, Xu C D, Hu M G, et al. Global land surface air temperature dynamics since 1880[J]. *International Journal of Climatology*, 2018, 38(S1): e466-e474.
- [6] Gehne M, Hamill T M, Kiladis G N, et al. Comparison of global precipitation estimates across a range of temporal and spatial scales[J]. *Journal of Climate*, 2016, 29(21): 7773-7795.
- [7] Kamizawa N, Takahashi H G. Projected trends in interannual variation in summer seasonal precipitation and its extremes over the tropical Asian monsoon regions in CMIP5 [J]. *Journal of Climate*, 2018, 31(20): 8421-8439.
- [8] Shu F, Mao K F, Xia X Q, et al. Dataset of daily near-surface air temperature in China from 1979 to 2018[J]. *Earth System Science Data*, 2022, 14(3): 1413-1432.
- [9] Liang P, Yan Z W, Li Z. Climatic warming in Shanghai during 1873-2019 based on homogenised temperature records[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2022, 13(4): 496-507.
- [10] 战云健, 陈东辉, 廖捷, 等. 中国 60 城市站 1901-2019 年日降水数据集的构建[J]. *气候变化研究进展*, 2022, 18(6): 670-682.
- [11] Brohan P, Kennedy J J, Harris I, et al. Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: A new data set from 1850[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111: D12106.
- [12] 李庆祥, 董文杰, 李伟, 等. 近百年中国气温变化中的不确定性估计[J]. *科学通报*, 2010, 55(16): 1544-1554.
- [13] Thomas S, Qin Dahe, Gian-Kasper P, et al. *Climate Change 2013: The physical science basis, Technical Summary*[R]. IPCC WGI Fifth Assessment Report, Cam-

- bridge: Cambridge University Press, 2013.
- [14] Sun X B, Ren G Y, Xu W H, et al. Global land-surface air temperature change based on the new CMA GLSAT dataset[J]. *Science Bulletin*, 2017, 62(4): 236-238.
- [15] Aguilar E, Auer I, Brunet M, et al. Guidance on metadata and homogenization[A]. WMO-TD No. 1186, WCD-MP No. 53. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2003, 55.
- [16] Alexandersson H. A homogeneity test applied to precipitation data[J]. *Journal of Climate*, 1986, 6(6): 661-675.
- [17] Yan Z W, Yang C, Jones P. Influence of inhomogeneity on the estimation of mean and extreme temperature trends in Beijing and Shanghai[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2001, 18(3): 309-322.
- [18] Alexander L V, Zhang X B, Peterson T C, et al. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111: D05109.
- [19] Yan Z W, Jones P. Detecting inhomogeneity in daily climate series using wavelet analysis[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2008, 25(2): 157-163.
- [20] Li Q X, Zhang H Z, Chen J, et al. A mainland China Homogenized historical temperature dataset of 1951-2004 [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2009, 90(8): 1062-1065.
- [21] 严中伟, 王君, 李珍, 等. 基于均一化观测序列评估城市化的气候效应[J]. *气象科技进展*, 2014, 4(3): 41-48.
- [22] 严中伟, 李珍, 夏江江. 气候序列的均一化——定量评估气候变化的基础[J]. *中国科学: 地球科学*, 2014, 44(10): 2101-2111.
- [23] Li Q X, Zhang L, Xu W H, et al. Comparisons of time series of annual mean surface air temperature for China since the 1900s: Observation, model simulation and extended reanalysis[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2017, 98(4): 699-711.
- [24] Dumitrescu A, Cheval S, Guijarro J A. Homogenization of a combined hourly air temperature dataset over Romania[J]. *International Journal of Climatology*, 2020, 40(5): 2599-2608.
- [25] King J C, Turner J, Colwell S, et al. Inhomogeneity of the surface air temperature record from Halley, Antarctica[J]. *Journal of Climate*, 2021, 34(12): 4771-4783.
- [26] Kessabi R, Mohamed H, Guijarro J A, et al. Homogenization and trends analysis of monthly precipitation series in the Fez-Meknes Region, Morocco[J]. *Climate*, 2022, 10(64): 2-17.
- [27] Peterson T C, Vose R S. An overview of the global historical climatology network temperature database[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1997, 78(12): 2837-2850.
- [28] Peterson T C, Easterling D, Karl T R, et al. Homogeneity adjustments of in situ atmospheric climate data: A review[J]. *International Journal of Climatology*, 1998, 18(13): 1493-1517.
- [29] Peterson T C, Karl T R, Jamason P F, et al. First difference method: Maximizing station density for the calculation of long-term global temperature change[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1998, 103(D20): 25967-25974.
- [30] Peterson T C, Vose R S, Schmoyer R, et al. Global historical climatology network (GHCN) quality control of monthly temperature data[J]. *International Journal of Climatology*, 1998, 18(11): 1169-1179.
- [31] Lawrimore J H, Menne M J, Gleason B E, et al. An overview of the global historical climatology network monthly mean temperature dataset, Version 3[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2011, 116: D19121.
- [32] Menne M J, Williams C N, Gleason B E. The global historical climatology network monthly temperature dataset, Version 4[J]. *Journal of Climate*, 2018, 31(24): 9835-9854.
- [33] Jones P D. Hemispheric surface air temperature variations: A reanalysis and an update to 1993[J]. *Journal of Climate*, 1994, 7(11): 1794-1802.
- [34] Jones P D, New M, Parker D, et al. Surface air temperature and its variations over the last 150 years[J]. *Reviews of Geophysics*, 1999, 37(2): 173-199.
- [35] Jones P D, Moberg A. Hemispheric and large scale surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2001[J]. *Journal of Climate*, 2003, 16(2): 206-223.
- [36] Mitchell T D, Jones P D. An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids[J]. *International Journal of Climatology*, 2005, 25(6): 693-712.

- [37] Jones P D, Lister D H, Osborn T J, et al. Hemispheric and large-scale land-surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2010[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117(D5): D05127.
- [38] Hansen J, Lebedeff S. Global trends of measured surface air temperature[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1987, 92(D11): 13345-13372.
- [39] Hansen J, Ruedy R, Glascoe J, et al. GISS analysis of surface temperature change[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104(D24): 30997-31022.
- [40] Hansen J, Ruedy R, Sato M, et al. A closer look at United States and global surface temperature change[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(D20): 23947-23963.
- [41] Hansen J, Ruedy R, Sato M, et al. Global surface temperature change[J]. *Reviews of Geophysics*, 2010, 48(4): 1-29.
- [42] IPCC. Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [43] IPCC. Climate Change 2021: The physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [44] Rohde R A, Hausfather Z. The Berkeley earth land/ocean temperature record[J]. *Earth System Science Data*, 2020, 12(4): 3469-3479.
- [45] Smith T M, Arkin P A, Ren Li, et al. Improved reconstruction of global precipitation since 1900[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2012, 29(10): 1505-1517.
- [46] Ren Li, Arkin P A, Smith T M, et al. Global precipitation trends in 1900-2005 from a reconstruction and coupled model simulations[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2013, 118(4): 1679-1689.
- [47] 闻新宇, 王绍武, 朱锦红, 等. 英国 CRU 高分辨率格点资料揭示的 20 世纪中国气候变化[J]. *大气科学*, 2006, 30(5): 894-904.
- [48] 马柱国, 邵丽娟. 中国北方近百年干湿变化与太平洋年代际振荡的关系[J]. *大气科学*, 2006, 30(3): 464-474.
- [49] Cao L J, Zhao P, Yan Z W, et al. Instrumental temperature series in eastern and central China back to the nineteenth century[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2013, 118: 8197-8207.
- [50] Cao L J, Yan Z W, Zhao P, et al. Climatic warming in China during 1901-2015 based on an extended dataset of instrumental temperature records[J]. *Environmental Research Letters*, 2017, 12: 064005.
- [51] Xu W H, Li Q X, Yang S, et al. Overview of global monthly surface temperature data in the past century and preliminary integration[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2014, 3(5): 111-117.
- [52] 杨溯, 徐文慧, 许艳, 等. 全球地面降水月值历史数据集研制[J]. *气象学报*, 2016, 74(2): 259-270.
- [53] Xu W H, Li Q X, Jones P, et al. A new integrated and homogenized global monthly land surface air temperature dataset for the period since 1900[J]. *Climate Dynamics*, 2018, 50(15): 2513-2536.
- [54] Yun X, Huang B Y, Cheng J Y, et al. A new merge of global surface temperature datasets since the start of the 20th century[J]. *Earth System Science Data*, 2019, 11(4): 1629-1643.
- [55] Huang B, Thorne P W, Banzon V F, et al. Extended reconstructed sea surface temperature, version 5 (ERSSTv5): Upgrades, validations, and intercomparisons [J]. *Journal of Climate*, 2017, 30(20): 8179-8205.
- [56] Huang B, Angel W, Boyer T, et al. Evaluating SST analyses with independent ocean profile observations[J]. *Journal of Climate*, 2018, 31(13): 5015-5030.
- [57] Li Q X, Sun W B, Huang B Y, et al. Consistency of global warming trends strengthened since 1880s[J]. *Science Bulletin*, 2020, 65(20): 1709-1712.
- [58] Li Q X, Sun W B, Yun X, et al. An updated evaluation of the global mean land surface air temperature and surface temperature trends based on CLSAT and CMST[J]. *Climate Dynamics*, 2021, 56(1): 635-650.
- [59] Sun W B, Li Q X, Huang B Y, et al. The assessment of global surface temperature change from 1850s: The C-LSAT2.0 ensemble and the CMST-Interim datasets [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2021, 38(5): 875-888.
- [60] Li Q X, Dong W J, Jones P. Continental scale surface air temperature variations: Experience derived from the

- Chinese region[J]. *Earth Science Reviews*, 2020, 200: 102998.
- [61] Vincent L A, Zhang X, Bonsal B R, et al. Homogenization of daily temperatures over Canada[J]. *Journal of Climate*, 2002, 15(11): 1322–1334.
- [62] Della-Marta P M, Wanner H. A method of homogenizing the extremes and mean of daily temperature measurements[J]. *Journal of Climate*, 2006, 19(17): 4179–4197.
- [63] Vincent L A, Wang X L, Milewska E J, et al. A second generation of homogenized Canadian monthly surface air temperature for climate trend analysis[J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2012, 117(D18): D18110.
- [64] Trewin B. A daily homogenized temperature dataset for Australia[J]. *International Journal of Climatology*, 2013, 33: 1510–1529.
- [65] Hewarachchi A P, Li Y G, Lund R, et al. Homogenization of daily temperature data[J]. *Journal of Climate*, 2017, 30(3): 985–999.
- [66] Yan Z W, Ding Y H, Zhai Panmao, et al. Re-assessing climatic warming in China since 1900[J]. *Journal of Meteorological Research*, 2020, 34(2): 243–251.
- [67] Bonsal B R, Zhang X, Vincent L A, et al. Characteristics of daily and extreme temperatures over Canada[J]. *Journal of Climate*, 2001, 14(9): 1959–1976.
- [68] Si P, Zheng Z F, Ren Y, et al. Effects of urbanization on daily temperature extremes in North China[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2014, 24(2): 349–362.
- [69] Zhang W X, Zhou T J, Zou L W, et al. Reduced exposure to extreme precipitation from 0.5°C less warming in global land monsoon regions[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 3153.
- [70] Nayak S, Dairaku K, Takayabu I, et al. Extreme precipitation linked to temperature over Japan: Current evaluation and projected changes with multi-model ensemble downscaling[J]. *Climate Dynamics*, 2018, 51(11): 4385–4401.
- [71] Li L C, Yao N, Li Y, et al. Future projections of extreme temperature events in different sub-regions of China[J]. *Atmospheric Research*, 2019, 217: 150–164.
- [72] Yu L J, Zhong S Y, Qiu Y B, et al. Trend in short-duration extreme precipitation in Hong Kong[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2020, 8: 581536.
- [73] Menne M J, Durre I, Vose R S, et al. An overview of the global historical climatology network-daily database[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2012, 29(7): 897–910.
- [74] Rohde R, Muller R A, Jacobsen R, et al. A new estimate of the average earth surface land temperature spanning 1753 to 2011[J]. *Geoinformatics & Geostatistics*, 2013, 1: 1.
- [75] Rohde R, Muller R, Jacobsen R, et al. Berkeley earth temperature averaging process[J]. *Geoinformatics & Geostatistics*, 2013, 1: 2.
- [76] Rohde R, Lead S, Berkeley earth surface temperature. Comparison of Berkeley earth, NASA GISS, and Hadley CRU averaging techniques on ideal synthetic data[R]. 2013.
- [77] Png I P L, Chen Y, Chu J H, et al. Temperature, precipitation and sunshine across China, 1912–1951: A new daily instrumental dataset[J]. *Geoscience Data Journal*, 2020, 7(2): 90–101.
- [78] Li Y, Tinz B, von Storch H, et al. Construction of a surface air temperature series for Qingdao in China for the period 1899 to 2014[J]. *Earth System Science Data*, 2018, 10(1): 643–652.
- [79] Yan Z W, Yang C, Jones P. Influence of inhomogeneity on the estimation of mean and extreme temperature trends in Beijing and Shanghai[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2001, 18(3): 309–322.
- [80] 唐国利, 任国玉. 近百年中国地表气温变化趋势的再分析[J]. *气候与环境研究*, 2005, 10(4): 791–798.
- [81] 司鹏, 郝立生, 罗传军, 等. 河北保定气象站长序列气温资料缺测记录插补和非均一性订正[J]. *气候变化研究进展*, 2017, 13(1): 41–51.
- [82] 司鹏, 郝立生, 罗传军, 等. 华北平原保定气象站百年降水序列的建立[J]. *气候变化研究快报*, 2017, 6(3): 177–185.
- [83] Wang X L, Wen Q H, Wu Y H. Penalized maximal t test for detecting undocumented mean change in climate data series[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2007, 46(6): 916–931.
- [84] Wang X L. Penalized maximal F test for detecting undocumented meanshift without trend change[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2008, 25(3): 368–384.
- [85] Wang X L, Chen H F, Wu Y H, et al. New techniques

- for the detection and adjustment of shifts in daily precipitation data series[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2010, 49(12): 2416–2436.
- [86] Si P, Li Q X, Jones P. Construction of homogenized daily surface air temperature for the city of Tianjin during 1887–2019[J]. *Earth System Science Data*, 2021, 13(5): 2211–2226.
- [87] 司鹏, 郭军, 赵煜飞, 等. 北京1841年以来均一化最高和最低气温日值序列的构建[J]. *气象学报*, 2022, 80(1): 136–152.
- [88] 司鹏, 郝立生, 傅宁, 等. 河北保定百年均一化逐日气温序列的建立及其气候变化特征[J]. *大气科学学报*, 2023, 46(2): 297–309.
- [89] Easterling D R, Peterson T C. The effect of artificial discontinuities on recent trends in minimum and maximum temperatures[J]. *Atmospheric Research*, 1995, 37(1–3): 19–26.
- [90] Easterling D R, Peterson T C. A new method for detecting undocumented discontinuities in climatological time series[J]. *International Journal of Climatology*, 1995, 15(4): 369–377.
- [91] Quayle R, Easterling D, Karl T, et al. Effects of recent thermometer changes in the cooperative station network [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1991, 72(11): 1718–1723.
- [92] 唐国利, 丁一汇, 王绍武, 等. 近百年温度曲线的对比分析[J]. *气候变化研究进展*, 2009, 5(2): 71–78.
- [93] Caussinus H, Mestre O. Detection and correction of artificial shifts in climate series[J]. *Journal of the Royal Statistical Society*, 2004, 53(3): 405–425.
- [94] Jones P D, Lister D H, Li Q X. Urbanization effects in large-scale temperature records, with an emphasis on China[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113(D16): D16122.
- [95] Menne M J, Williams Jr C N. Homogenization of temperature series via pairwise comparisons[J]. *Journal of Climate*, 2009, 22(7): 1700–1717.
- [96] Chenoweth M. A possible discontinuity in the U.S. historical temperature record[J]. *Journal of Climate*, 1992, 5(10): 1172–1179.
- [97] Della-Marta P, Wanner H. A method of homogenizing the extremes and mean of daily temperature measurements[J]. *Journal of Climate*, 2006, 19(17): 4179–4197.
- [98] Haimberger L, Tavalato C, Sperka S. Homogenization of the global radiosonde temperature dataset through combined comparison with reanalysis background series and neighboring stations[J]. *Journal of Climate*, 2012, 25(23): 8108–8131.
- [99] Rahimzadeh F, Zavareh M N. Effects of adjustment for non-climatic discontinuities on determination of temperature trends and variability over Iran[J]. *International Journal of Climatology*, 2014, 34(6): 2079–2096.
- [100] Winkler J A, Skaggs R H, Baker D G. Effect of temperature adjustments on the Minneapolis–St. Paul urban heat island[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1981, 20(11): 1295–1300.
- [101] Alexandersson H. A homogeneity test applied to precipitation data[J]. *Journal of Climatology*, 1986, 6(6): 661–675.
- [102] 翟盘茂. 中国历史探空资料中的一些过失误差及偏差问题[J]. *气象学报*, 1997, 55(5): 563–572.
- [103] 刘小宁. 我国40年年平均风速的均一性检验[J]. *应用气象学报*, 2000, 11(1): 27–34.
- [104] Li Q X, Liu X N, Zhang H Z, et al. Detecting and adjusting temporal inhomogeneity in Chinese mean surface air temperature data [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2004, 21(2): 260–268.
- [105] 鞠晓慧, 屠其璞, 李庆祥. 我国太阳总辐射月总量资料的均一性检验及订正[J]. *南京气象学院学报*, 2006, 29(3): 336–341.
- [106] 吴必文, 温华洋, 惠军. 基于 Γ 分布的气压序列非均一性检验方法初探[J]. *应用气象学报*, 2008, 19(4): 496–501.
- [107] 郭艳君, 丁一汇. 近50年我国探空温度序列均一化及变化趋势[J]. *应用气象学报*, 2008, 19(6): 646–654.
- [108] 曹丽娟, 鞠晓慧, 刘小宁. PMFT方法对我国年平均风速的均一性检验[J]. *气象*, 2010, 36(10): 52–56.
- [109] 王秋香, 李庆祥, 周浩楠, 等. 中国降水序列均一性研究及对比分析[J]. *气象*, 2012, 38(11): 1390–1398.
- [110] 李庆祥, 彭嘉栋, 沈艳. 1900–2009年中国均一化逐月降水数据集研制[J]. *地理学报*, 2012, 67(3): 301–311.
- [111] Li Z, Yan Z W, Cao L J, et al. Adjusting inhomogeneous daily temperature variability using wavelet analysis[J]. *International Journal of Climatology*, 2014, 34(4): 1196–1207.

- [112] Li Z, Yan Z W, Wu H. Updated homogenized Chinese temperature series with physical consistency[J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2015, 8(1): 17–22.
- [113] 朱亚妮, 曹丽娟, 唐国利, 等. 中国地面相对湿度非均一性检验及订正[J]. *气候变化研究进展*, 2015, 11(6): 379–386.
- [114] 远芳, 曹丽娟, 唐国利, 等. 中国 825 个基准、基本站地面气压系统误差的检验与订正[J]. *气候变化研究进展*, 2015, 11(5): 331–336.
- [115] Li Z, Yan Z W, Cao L J, et al. Further-adjusted long-term temperature series in China based on MASH[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2018, 35(8): 909–917.
- [116] Li Q X, Zhang H Z, Liu X N, et al. A mainland China homogenized historical temperature dataset of 1951–2004[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2009, 90(8): 1062–1065.
- [117] Xu W H, Li Q X, Wang X L, et al. Homogenization of Chinese daily surface air temperatures and analysis of trends in the extreme temperature indices[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2013, 118(17): 9708–9720.
- [118] 杨溯, 李庆祥. 中国降水量序列均一性分析及数据集更新完善[J]. *气候变化研究进展*, 2014, 10(4): 276–281.
- [119] Hu Z Y, Li Q X, Chen X, et al. Climate changes in temperature and precipitation extremes in an alpine grassland of Central Asia[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2016, 126: 519–531.
- [120] 司鹏, 徐文慧. 利用 RHtestsV4 软件包对天津 1951–2012 年逐日气温序列的均一性分析[J]. *气候与环境研究*, 2015, 20(6): 663–674.
- [121] 司鹏, 王冀, 李慧君, 等. 省级地面气象观测资料均一化处理技术与应用[M]. 北京: 气象出版社, 2020.
- [122] 司鹏, 解以扬. 天津太阳总辐射资料的均一性分析[J]. *气候与环境研究*, 2015, 20(3): 269–276.
- [123] Si P, Luo C J, Liang D P. Homogenization of Tianjin monthly near-surface wind speed using RHtestsV4 1951–2014[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2018, 132(3/4): 1303–1320.
- [124] 司鹏, 罗传军, 姜罕盛, 等. 天津地面相对湿度资料的非均一性检验及订正[J]. *气象*, 2018, 44(10): 1332–1341.
- [125] Si P, Luo C J, Wang M. Homogenization of Surface Pressure Data in Tianjin, China[J]. *Journal of Meteorological Research*, 2019, 33(6): 1131–1142.
- [126] 司鹏, 梁冬坡, 陈凯华, 等. 城市化对天津近 60 年平均温度和极端温度事件的增暖影响[J]. *气候与环境研究*, 2021, 26(2): 142–154.
- [127] Braconnot P S, Harrison P, Kageyama M, et al. Evaluation of climate models using palaeo-climatic data[J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2: 417–424.
- [128] Schmidt G A, Annan J D, Bartlein P J, et al. Using palaeo-climate comparisons to constrain future projections in CMIP5[J]. *Climate of the Past*, 2014, 10: 221–250.
- [129] Brazdil R, Pfister C, Wanner H, et al. Historical climatology in Europe—the state of the art[J]. *Climate Change*, 2005, 70: 363–430.
- [130] Ammann C M, Wahl E R. The importance of the geophysical context in statistical evaluations of climate reconstruction procedures[J]. *Climate Change*, 2007, 85: 71–88.
- [131] Küttel M, Luterbacher J, Zorita E, et al. Testing a European winter surface temperature reconstruction in a surrogate climate[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(7): L07710.
- [132] Mann M E, Rutherford S, Wahl E, et al. Robustness of proxy-based climate field reconstruction methods[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112: D12109.
- [133] Riedwyl N, Küttel M, Luterbacher J, et al. Comparison of climate field reconstruction techniques: Application to Europe. *Climate Dynamics*, 2009, 32: 381–395.
- [134] Hans V S, Eduardo Z, Fidel G R. Assessment of three temperature reconstruction methods in the virtual reality of a climate simulation[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2009, 98: 67–82.
- [135] Schmith T, Thejll P. A surrogate ensemble study of climate reconstruction methods: Stochasticity and robustness[J]. *Journal of Climate*, 2009, 22(4): 951–976.
- [136] Smerdon J E. Climate models as a test bed for climate reconstruction methods: Pseudoproxy experiments[J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2012, 3(1): 63–77.
- [137] Tingley M P, Craigmile P F, Haran M, et al. Piecing together the past: Statistical insights into paleoclimatic reconstructions[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2012,

- 35: 1–22.
- [138] Emile-Geay J, Cobb K M, Mann M E, et al. Estimating central equatorial Pacific SST variability over the past millennium Part II: Re-constructions and implications [J]. *Journal of Climate*, 2013, 26(7): 2329–2352.
- [139] Hakim G J, Emile-Geay J, Steig E J, et al. The last millennium climate reanalysis project: Framework and first results[J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2016, 121: 6745–6764.
- [140] Mann M E, Bradley R S, Hughes M K. Global-scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries[J]. *Nature*, 1998, 392: 779–787.
- [141] Adams J B, Mann M E, Ammann C M. Proxy evidence for an El Niño-like response to volcanic forcing[J]. *Nature*, 2003, 426: 274–278.
- [142] Mann M E, Zhang Z, Rutherford S, et al. Global signatures and dynamical origins of the little ice age and medieval climate anomaly[J]. *Science*, 2009, 326: 1256–1260.
- [143] Schneider T. Analysis of incomplete climate data: Estimation of mean values and covariance matrices and imputation of missing values[J]. *Journal of Climate*, 2001, 14(5): 853–871.
- [144] Vaccaro A, Julien E, Dominque G, et al. Climate field completion via markov random fields: Application to the HadCRUT4.6 temperature dataset[J]. *Journal of Climate*, 2021, 34(10): 4169–4188.
- [145] Evans M N, Kaplan A, Cane M A. Pacific sea surface temperature field reconstruction from coral $\delta^{18}\text{O}$ data using reduced space objective analysis[J]. 2002, *Paleoceanography*, 17(1): 7–1–7–13.
- [146] Smerdon J E, Kaplan A, Chang D, et al. A pseudo-proxy evaluation of the CCA and RegEM methods for reconstructing climate fields of the last millennium[J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(18): 4856–4880.
- [147] Anchukaitis K J, Wilson R, Briffa K R, et al. Last millennium Northern Hemisphere summer temperatures from tree rings: Part II, spatially resolved reconstructions[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2017, 163: 1–22.
- [148] Guillot D, Rajaratnam B, Emile-Geay J. Statistical paleoclimate reconstructions via Markov random fields[J]. *The Annals of Applied Statistics*, 2015, 9(1): 324–352.
- [149] Graham N E, Ammann C M, Fleitmann D, et al. Support for global climate reorganization during the "Medieval Climate Anomaly"[J]. *Climate Dynamics*, 2011, 37: 1217–1245.
- [150] Goosse H E, Crespin S, Dubinkina M F, et al. The role of forcing and internal dynamics in explaining the "Medieval Climate Anomaly"[J]. *Climate Dynamics*, 2012, 39: 2847–2866.
- [151] Phipps S J, Mcgregor H V, Gergis J, et al. Paleoclimate data-model comparison and the role of climate forcings over the Past 1500 years[J]. *Journal of Climate*, 2013, 26: 6915–6936.
- [152] Küttel M, Xoplaki E, Gallego D, et al. The importance of ship log data: Reconstructing North Atlantic, European and Mediterranean sea level pressure fields back to 1750[J]. *Climate Dynamics*, 2010, 34: 1115–1128.
- [153] 王绍武. 公元1380年以来我国华北气温序列的重建[J]. *中国科学: B辑*, 1990, 5: 553–560.
- [154] 王绍武. 近百年我国及全球气温变化趋势[J]. *气象*, 1990, 16(2): 11–15.
- [155] 王绍武. 根据史料恢复历史温度序列[J]. *气象*, 1990, 16(4): 19–23.
- [156] 王绍武, 王日昇. 1470年以来我国华东四季与年平均气温变化的研究[J]. *气象学报*, 1990, 48(1): 26–35.
- [157] 王绍武, 叶瑾琳, 龚道溢, 等. 近百年中国年气温序列的建立[J]. *应用气象学报*, 1998, 9(4): 392–401.
- [158] 王绍武, 龚道溢, 叶瑾琳, 等. 1880年以来中国东部四季降水量序列及其变率[J]. *地理学报*, 2000, 35(3): 281–293.
- [159] 郑景云, 葛全胜, 郝志新, 等. 1736—1999年西安与汉中地区年冬季平均气温序列重建[J]. *地理研究*, 2003, 22(3): 343–348.
- [160] 郝志新, 郑景云, 葛全胜. 1736年以来西安气候变化与农业收成相关分析[J]. *地理学报*, 2003, 58(5): 735–742.
- [161] 郑景云, 刘洋, 葛全胜, 等. 华中地区历史物候记录与1850–2008年的气温变化重建[J]. *地理学报*, 2015, 70(5): 696–704.
- [162] Shi H, Wang B, Cook Edward R, et al. Asian summer precipitation over the past 544 years reconstructed by merging tree rings and historical documentary records [J]. *Journal of Climate*, 2018, 31(19): 7845–7861.

- [163] 于革, Xiankun K E. 利用花粉资料重建加拿大1Ka来气温变化序列[J]. 科学通报, 2002, 47(13): 1018-1021.
- [164] 王海军, 涂诗玉, 陈正洪. 日气温数据缺测的插补方法试验与误差分析[J]. 气象, 2008, 34(7): 83-91.
- [165] 余予, 李俊, 任芝花, 等. 标准序列法在日平均气温缺测数据插补中的应用[J]. 气象, 2012, 38(9): 1135-1139.
- [166] Wang J L, Yang B. A millennial summer temperature reconstruction for the Eastern Tibetan Plateau from tree-ring width[J]. Journal of Climate, 2015, 28: 5289-5304.

Review of climate observation series construction over long-time scale

SI Peng¹, XU Wenhui², WANG Min³

1. Tianjin Meteorological Information Center, Tianjin 300074, China
2. National Meteorological Information Centre, Beijing 100081, China
3. Shaoguan Meteorological Service, Shaoguan 512028, China

Abstract The numbers of extreme weather and climate events in many parts of the world are increasing due to climate change, and this phenomenon will become more frequent and severe. A complete and reliable climate observation series over long-time scale is an important basis for interpreting climate change and evaluating model simulation performance. It is also a reliable observation basis for deeply and systematically detecting the characteristics of global, regional or local extreme climate change and predicting the future trend of climate change. In this paper, some important research achievements are summarized, which have been recently made in construction of long-term climate observation series on global, regional and local scales at home and abroad. Several global surface temperature and precipitation climate datasets and their important values for the science of climate change are analyzed. Moreover, technologies and key scientific problems in constructing climate observation series over long-time scale that need to be improved and solved urgently are also discussed. Results indicate that some progress has been made in construction technology of climate observation series over long-time scale for supporting the development of climate change operations. However, there are still some main problems that need to be solved in view of the urgent need of data supply capacity under new situation, i.e., enriching the types of the observed elements, restoring the integrity of historical data, improving the quality of data products, and refining the spatial scale of the object and the temporal scale of the elements. Therefore, a scientific basis can be provided for further enhancing the application value of precious long-term climate observations in meteorological service guarantee and scientific and technological innovation in China.

Keywords long-time series; climate observations; homogenization; interpolation ●



(责任编辑 祝叶华)