大气科学
CHINESE JOURNAL OF ATMOSPHERIC SCIENCES

中国百年（1900～2022年）均一化降水量日值和月值数据集研制

杨溯

Development of An In-Situ Homogenized Daily and Monthly Precipitation Dataset for China over 120 Years (1900–2022)

YANG Su

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2304.22227

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

近百年及未来百年PDO位相年代际转变检测及其早期预警信号研究

Detection of Decadal Phase Transition and Early Warning Signals of PDO in Recent and Next 100 Years

大气科学. 2022, 46(2): 225 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2108.20127

1991～2020年中国地面气候值数据集研制

Development of China Ground Climate Normal Value Dataset from 1991 to 2020

大气科学. 2024, 48(2): 555 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2204.22010

1991～2020年中国地面气象辐射气候值数据集研制

Dataset Development of China Surface Meteorological Radiation Climate Normals for the Period of 19912020

大气科学. 2024, 48(5): 2080 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2310.23069

中国夏季月际—季节平均降水动力和统计结合实时预测模型

Hybrid Downscaling Models for Real-Time Predictions of Summer Precipitation in China on a MonthlySeasonal Scale

大气科学. 2024, 48(1): 359 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2308.23312

中国近30年短时极端降水特征分析

Analysis of the Characteristics of Short-Term Extreme Precipitation in China in the Last 30 Years

大气科学. 2024, 48(3): 1144 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2212.22118

世纪前期中国降水预估及其订正

Projection of China Precipitation and Its Bias Correction for the Early 21st Century

大气科学. 2019, 43(6): 1385 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1902.18221

关注微信公众号，获得更多资讯信息

第 49 卷第 1 期
Vol. 49 No. 1
Jan. 2025
大气科学
Chinese Journal of Atmospheric Sciences

杨溯. 2025. 中国百年（1900～2022 年）均一化降水量日值和月值数据集研制 [J]. 大气科学, 49(1): 13−22. YANG Su. 2025. Development of An In-Situ Homogenized Daily and Monthly Precipitation Dataset for China over 120 Years (1900–2022) [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 49(1): 13−22. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2304.22227

中国百年（1900～2022 年）均一化降水量日值和月值数据集研制

杨溯

国家气象信息中心, 北京 100081

摘　要　本项工作以中国气象局发布的我国 60 个重点城市早期（1950 年前）降水观测记录以及 1950 年后我国 2419 个国家级气象观测台站逐日和逐月降水观测数据为数据源，应用 PMF（Penalized Maximal F test）和 PMT（Penalized Maximal T test）方法检测历史降水中的非均一断点以及 QM（Quantile Match）方法开展偏差订正，消除了数据衔接、观测站迁址、设备更换等引起的降水历史数据系统偏差，研制完成一套时间长度达到百年（1900～2022 年）的中国均一化降水量日值和月值数据集。数据集收录了共计 2446 条中国降水序列，起始时间早于 1945 年、1930 年、1915 年的序列数量分别为 321 条、126 条、60 条。通过非均一性检验，在 107 个观测站的降水数据中发现了 113 个非均一断点，它们不仅会导致降水数据均值偏离区域降水事实，也会引起降水数据标准差突变，干扰降水变率的研判。均一化校正能够较好地消除这些非气候变化引起的偏差，不再出现显著偏离局地降水均值和标准差的情况。最终建立起一套能够客观地描述我国过去百年降水气候变化事实，为气候变化研究提供支撑的中国百年降水数据产品。基于均一化的降水数据评估中国降水百年变化趋势，结果表明在过去近 120 年中国的降水并未呈现显著的变化趋势，1900～2022 年中国降水距平百分率的变化速率为 0.35%±0.21% (10 a)$^{-1}$。

关键词　中国　早期气象记录　百年降水序列　均一化　降水百年变化速率

文章编号　1006-9895(2025)01-0013-10　　**中图分类号**　P413　　**文献标识码**　A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2304.22227

Development of An In-Situ Homogenized Daily and Monthly Precipitation Dataset for China over 120 Years (1900–2022)

YANG Su

National Meteorological Information Centre, *Beijing* 100081

Abstract　This study establishes a precipitation dataset for China over the last 120 years. Pre-1950 precipitation records from 60 sites rescued by the China Meteorological Administration (CMA) and post-1950 in-situ measurements from 2419 national observatories are merged to obtain long time series since the 1900s. A total of 2446 daily and monthly precipitation time series are included in this dataset, including 321, 126, and 60 sequences with records before 1945, 1930, and 1915, respectively. The breaks caused by inhomogeneity issues in historical data are checked and removed via the PMF (Penalized Maximal F test)/PMT (Penalized Maximal T test), and QM (Quantile Match) methods, respectively. A total of 113 breakpoints from 107 stations are identified, which notably deviate the precipitation and seasonal variability

收稿日期　2022-11-14；**网络预出版日期**　2023-05-15

作者简介　杨溯，男，博士、正高级工程师，从事气候变化评估与气候数据产品研制工作。E-mail: yangsu@cma.gov.cn

资助项目　国家自然科学基金项目 42475152，中国气象局气象能力提升联合研究专项 24NLTSZ005

Funded by　National Natural Science Foundation of China (Grant 42475152), Joint Research Project for Meteorological Capacity Improvement of China Meteorological Administration (Grant 24NLTSZ005)

from the regional climate state. Homogenizing adjustments eliminate these surges and slumps in historical data induced by means of nonclimatic factors. The homogenized data exhibit considerably higher spatial and temporal consistencies with neighboring measurements. Based on the homogenized data, the precipitation amounts over China exhibit slight changes over the last 120 years and the rate of change of the precipitation anomalies (in percentage) from 1900 to 2022 is approximately (0.35%±0.21)% (10 a)$^{-1}$.

Keywords China, Historic meteorological records, 100 years' time series of precipitation, Homogenization, Change rate of precipitation in last 100 years

1 引言

长期、连续的降水量观测是气候变化和水资源研究的数据基础（IPCC, 2021）。新中国成立以来，我国不断发展降水观测技术、优化全国降水观测站网，已经形成了科学、合理的降水观测体系（中国气象局, 2003, 2020）。与此同时，我国在早期气象观测数据拯救、纸质气象资料数字化方面也取得了长足进展。目前中国气象局已经形成了较为成熟的中国早期数字化气象数据归档和整理，能够为我国长期降水变化研究提供宝贵的科学数据（范邵华等, 2018）。需要指出，气象观测的历史中，站址迁移、仪器换型、观测场周边环境变化等情况不可避免，尤其对于新中国建立前，气象观测的方式、精度与当前现代化的观测体系差异较大，降水数据在不同历史时期的代表性并不一致，即历史数据的非均一问题（吴增祥, 2005; 李庆祥, 2011; 曹丽娟和严中伟, 2011; Yan et al., 2014; Li et al., 2020; 唐国利, 2020; 司鹏等, 2020）。

国外学者很早就注意到降水资料中的非均一问题可能导致长期降水变化研究误判，并开展了大量降水数据均一化工作。Alexandersson（1986）最早将标准正态检验（Standard Normal Homogeneity Test, SNHT）应用于降水资料均一性研究中，并提出采用比值方法校正非均一的降水序列。Groisman et al.（1991）的研究表明，过去 100 年北半球中高纬度的大量观测站都经历了降水观测系统变更，这些观测端的改变可能引起降水量 4%～40% 的系统偏差。Dai et al.（1997）分析了 1900～1988 年全球站点降水资料的均一性情况，结果表明观测设备变更是引起中高纬度降水数据非均一问题的主要原因。

近年来我国气象数据工作者已经在降水资料方面开展了大量探索性工作。刘小宁和孙安健（1995）对中国 400 余站 1951～1990 年年降水序列进行了均一性检验，结果表明台站迁址以及雨量器换型是引起非均一的主要原因。李庆祥等（2008）采用 SNHT 方法对我国长江三角洲地区降水资料开展均一性检验，考虑了所选地区站点密度问题，采用一种不依赖参考台站的思路对检验结果进行确认。江志红等（2008）基于上述思路和方法对我国 681 个台站近 50 年降水资料进行均一性检验和订正，发现约有 4% 的台站存在非均一性。李庆祥等（2012）通过 SNHT 方法对中国 340 个长序列降水观测站数据开展均一性检验与订正，并由此建立了一套中国百年均一化月值降水格点数据集。杨溯和李庆祥（2014）评估了反距离权重和一阶差分两种参考序列构建算法对降水站网密度的适配性，并依据降水序列起止时间、完整性、所在观测网站分布等情况择优选择参考序列构建算法开展 1951～2012 年中国 2419 站降水序列均一化工作。

本研究以中国气象局发布的我国早期（1950 年前）数字化降水观测数据以及 1950 年后我国 2419 个国家级气象观测台站降水观测数据为基础数据，以档案号、观测位置经纬度和所在城市作为观测点标识，实现历史档案与现代观测数据合理衔接，并通过择优整合的方法实现最大化地发挥气象历史档案价值。在此基础上，分别采用一阶差分和反距离权重方法构建参考序列，减少因邻近序列起止时间差异较大或早期数据完整性较低对参考序列信度造成的干扰；采用惩罚最大 F 检验（PMF）（Wang, 2008）和惩罚最大 T 检验（Penalized Maximal T test, PMT）（Wang et al., 2007）交叉验证的方法提升断点检验信度；采用 Quantile Match（QM）方法（Wang et al., 2010, 2014）开展非均一降水序列校正，其在校正均值偏差的同时能够兼顾观测数值的概率分布，并且较比值订正法（李庆祥等, 2012; 杨溯和李庆祥, 2014）更加适用于极端强降水的校正；采用断点前、后待检站与邻近站的均值和方差比较的方法更加直观地评估均一化校正效果。最终构建起一套时间长度达到百年能够客观描述中

国降水气候变化的中国降水数据产品，并初步评估了中国近百年降水气候变化趋势。

2　数据和方法

2.1　数据来源

本研究应用的数据均来源于中国气象局国家气象信息中心（https://data.cma.cn/ [2023-01-17]），其中新中国建立后我国 2419 个国家级气象站地面降水基础数据源自《中国国家级地面气象站基本气象要素日值数据集（V3.0）》，新中国建立前降水基础数据源自《全国 60 个重点城市长时间序列降水数据集》。国家气象信息中心于 2013 年发布的《气象台站元数据数据集（V1.0）》应用于非均一性断点成因分析。

2.2　方法

2.2.1　降水历史序列衔接

新中国建立前的气象观测站尚未具备统一的站点编号系统，故在《全国 60 个重点城市长时间序列降水数据集》恢复并收录的早期降水量日值和月值资料中，以档案号、观测位置经纬度和所在城市作为观测点标识。为充分发挥这些宝贵的历史资料价值，获取尽可能完整、来源稳定的降水长序列，本研究通过以下步骤将现代降水观测数据与早期降水观测记录客观地衔接起来：

（1）依据数字化档案记录的城市名、经纬度等信息，匹配数字化降水序列所关联的国家级气象站。

（2）对同一国家级气象站匹配得到多项早期数字化档案的情况，选取序列最长的数字化降水序列作为基础序列，其他数字化序列向其补充，并记录序列衔接日期作为待检非均一性断点。

（3）针对早期数字化的降水量月值数据缺测而当月内降水日值相对完整的情况（日降水量缺测少于 5 d），通过降水量日值累加获得当月降水量月总量并填补缺测月值。

2.2.2　非均一性检验与订正

采用 PMF（Wang, 2008）和 PMT 方法（Wang et al., 2007）开展非均一断点检验。PMF 和 PMT 方法是对传统的二相回归等统计方法的优化，通过引入惩罚因子，经验性地考虑了序列的滞后一阶自相关导致的统计量检验偏差，并嵌入了多元线性回归方法。两种方法分别适用独立检验和对比参考序列检验，他们已广泛应用与气象数据的均一化工作（Cao et al., 2013; Xu et al., 2018; Yang et al., 2018, 2019）。

在开展非均一性检验前，对降水数据开展近似正态化的预处理（取立方根）以获得更好的统计检验效果。参考序列借鉴了已有研究的构建方案（杨溯和李庆祥, 2014），依据序列起止时间、所处观测站网密度分别采用一阶差分和反距离权重方法形成参考序列。

依据非均一性问题突发的特性以及发生后持续时间较长的特性（如迁址、设备更换），月值序列检验和元数据印证能够很好地检测出这些非气候变化信号。但对于持续时间较短的观测端问题，如设备故障导致的持续数值偏低或偏高问题，月值序列检验会有遗漏。为此，每个待检站同时开展降水日值和月值序列非均一性检验。由于降水时空分布高度不连续，故仅为月值序列构建参考序列，并应用于月值序列非均一性检验（PMT 方法），日值序列采用单站检验（PMF 方法）。检验结果以月值序列检验结果为主，日值序列检验结果作为相邻时间较短的非均一性问题的判据。日值与月值序列的非均一性检验结果将与台站元数据相互印证，如测站迁移、人工自动观测、观测设备调整等记录，逐站、逐点核实断点。采用 QM 方法对已核实的非均一日值序列开展校正（Wang et al., 2010, 2014）。该方法优点在于校正过程能够兼顾均值与日值概率分布两个方面，避免对强降水过度校正。由均一化校正后的日值序列累加得到月值序列，并实现日值与月值序列闭合。

3　结果与讨论

由于降水时空不连续的特点，相较于较日值序列，月值序列能够更加清晰地体现历史数据中的非均一性问题以及均一化的校正效果。故下文基于月值序列采用断点前、后待检站与邻近站的均值和标准差比较的方法展示非均一性检验与校正的效果。

3.1　中国百年月值均一化降水数据概况

图 1 为整合了数字化的早期降水资料和新中国建立后气象观测站网降水量记录的中国百年均一化降水数据集降水序列空间分布（共 2446 站）。图 1 中共有 325 条降水月值序列起始时间早于 1950 年，其中序列起始时间早于 1945 年 321 条，早于 1930 年的 126 条，早于 1915 年的 60 条。图 1 中彩色圆点（序列起始早于 1950 年）主要集中于我国中、

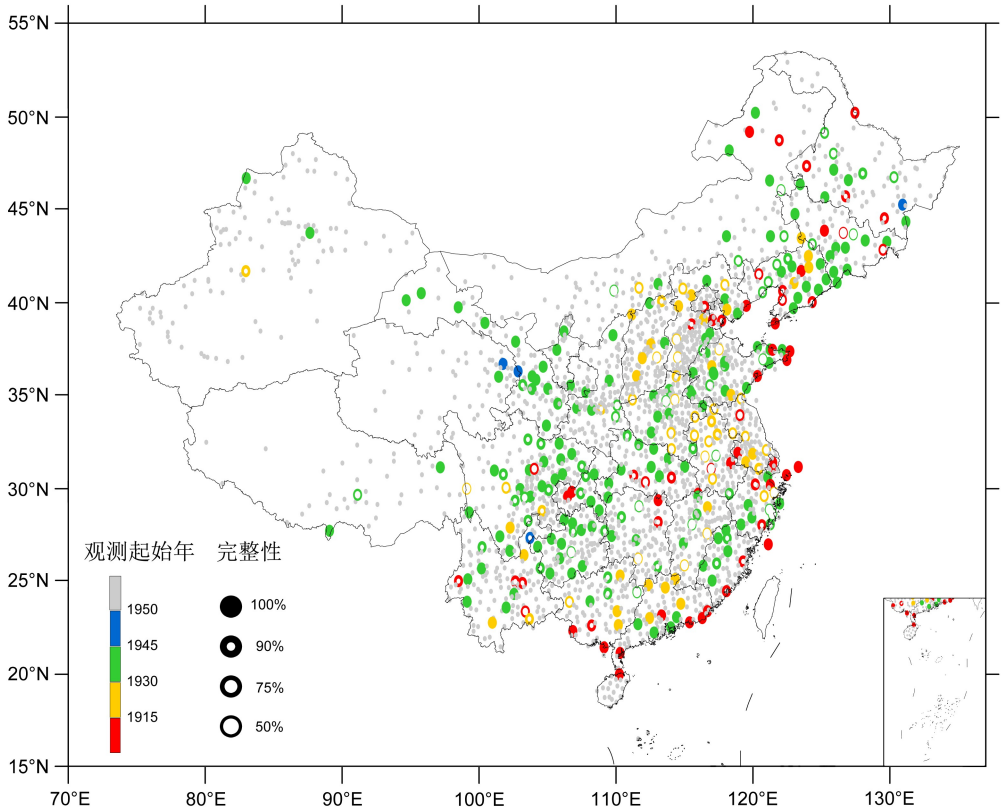

图 1 中国百年（1900～2022 年）均一化降水数据集的降水量序列空间分布（2446 站）。圆点颜色代表数据序列的起始时间，圆点涂色的面积比重代表数据在早期（1950 年前）的完整性。

Fig. 1 The spatial distribution of precipitation series obtained from the homogenized in-situ precipitation (2446 sites) over China during 1900–2022. The dot color represents the beginning year of the data, the hollow coverage of dot represents data integrity in the early period (before 1950).

东部，在新疆、西藏、青海、内蒙等地分布较少，且没有早于 1915 年的降水月值序列。

图 1 中共有 207 条月值降水序列在早期（1950 年前）的完整性达到 90%，占总序列数量的 63%。对于不同起始时间降水月值序列，其完整性达到 90% 的数量分别为 27 条（1915 年前）、36 条（1915～1930 年）、141 条（1930～1945 年）和 3 条（1945～1950 年）。时间长度接近百年的（1930 年前）降水月值序列有 108 条（黄色和红色圆点），主要分布在东北、华北、华东、华南和西南地区，其中完整性较好的有 63 条，占比约 58%。

3.2 均一化降水月值序列个例

由图 2a 可见，在 1982 年前后马鬃山站逐月降水量正负距平的比重发生显著改变。取 1961～2020 年为参考期，1982 年前正（红色柱）负（蓝色柱）距平近似平均分布，之后负距平数量明显多于正距平（图 2b）。使用 PMF 统计检验结果也表明，马鬃山站的月降水量于 1982 年 1 月出现显著突变（置信水平为 99%）。同时对比了邻近的酒泉站同期月降水量（图 3），没有发现正（负）距平比重显著改变的现象，即在马鬃山站发生的 1982 年降水量正负距平比重显著变化的现象并没在其邻近站发生。在马鬃山站的台站历史沿革中发现，该站于 1982 年 1 月由肃北县野马街迁址至肃北县马鬃山镇，观测站水平位置变动约 27 km，海拔高度下降约 200 m。由此判定迁址引起了马鬃山站降水数据显著的非均一问题。

由图 4a 可以看到均一化后的降水序列在 1982 年前后不再存在突变，序列的时间分布均一。图 4b 是马鬃山站在 1972～1981 年和 1982～1991 年均一化的月降水量正负距平比重对比（取 1961～2020 年为参考期）。由图 4b 可以看到，马鬃山站在 1982 年前后的距平分布稳定，不再出现正负距平显著变化，与邻近站（酒泉）的气候变化趋势相似。

3.3　中国降水数据均一化效果评估

经非均一性检验和台站历史沿革核查，发现 107 个观测站的降水历史数据存在非均一性问题，合计识别出 113 个非均一断点。其中由观测站迁址、不同来源数据拼接、仪器换型仪器的断点比例分别为 20%，10% 和 32%。另有 38% 的断点未在台站历史沿革中发现明确的观测端变更记录，但均通过 99% 置信水平的 PMF 或 PMT 检验。

图 5 为 107 个气象观测站降水月值序列在非均一断点发生前、后 5 年的年降水量均值比较。从图 5a 可以看到，灰色圆点（邻近序列）高度集中于 1∶1 线分布，而浅蓝色圆点（非均一序列）分布非常离散。灰色圆点在断点发生前后的 5 年平均降水量变化幅度（图 5a 中圆点对应的横坐标与纵坐标比值的变化幅度）在−31%～51% 之间，平均绝对变化幅度约为 13%，而非均一站点的变化幅度达到了−70%～179%，平均绝对变化幅度约为 28%，是邻近站的 2.1 倍。这表明，非均一问题导致观测站记录的降水量出现巨大的均值偏差（蓝色圆点）。经均一化订正后的降水数据（图 5b 深蓝色圆点）高度集中于 1∶1 线，在断点发生前后的 5 年平均降水量变化幅度在−47%～45% 之间，平均绝对变化幅度约为 13%，与邻近站（灰色圆点）的情况非常接近，即均一化校正消除了非气候变化因素引起的降水量均值突变。

图 6 与图 5 相似，但为非均一断点前、后 5 年

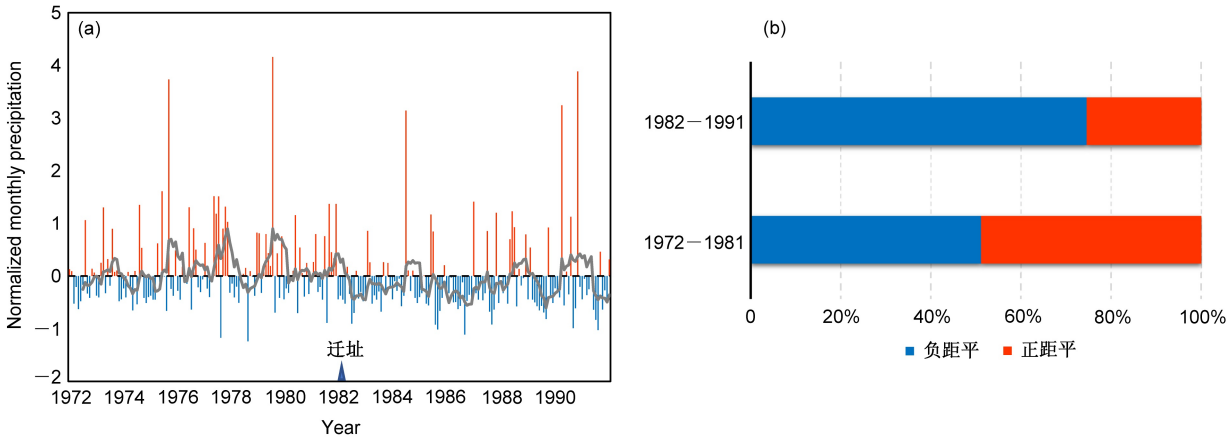

图 2　1972～1991 年甘肃省酒泉市马鬃山站（a）标准化的月降水量序列和（b）两个时段月降水量正负距平比重。图 a 中灰色曲线为 7 点平滑曲线，下同。

Fig. 2　(a) The time series of normalized monthly precipitation, (b) the ratio of positive (red bars) and negative (blue bars) values in two periods in Mazongshan site in Jiuquan City of Gansu Province during 1972–1991. In Fig. a, the grey curve is a 7-point smooth curve, the same below.

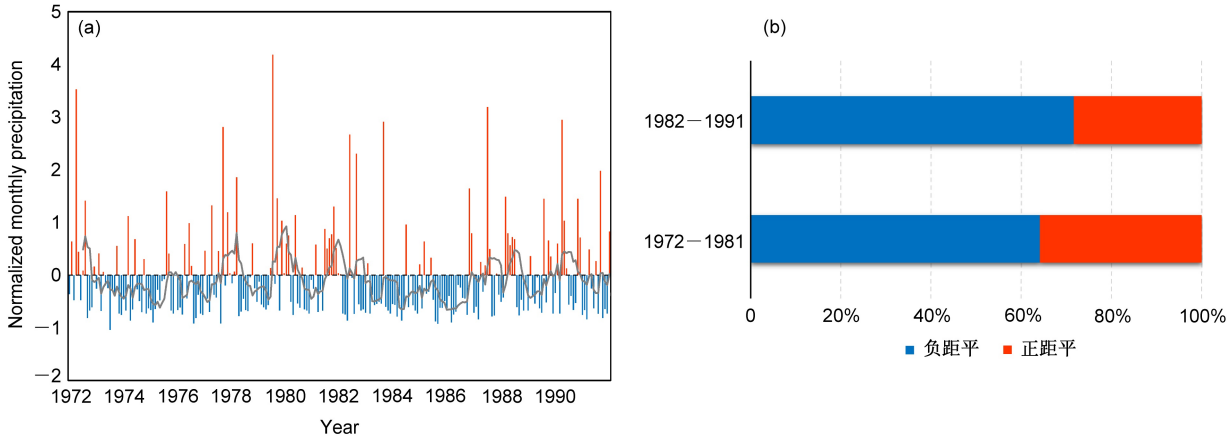

图 3　同图 2，但为酒泉站的结果。

Fig. 3　As in Fig. 2, but for the result for Jiuquan site.

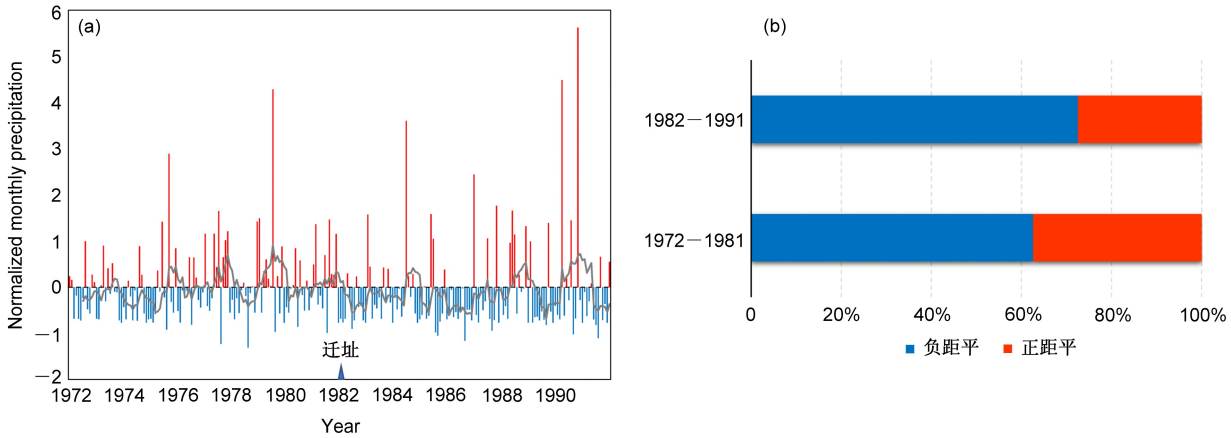

图 4 同图 2，但为均一化后的结果。

Fig. 4 As in Fig. 2, but for the homogenized result.

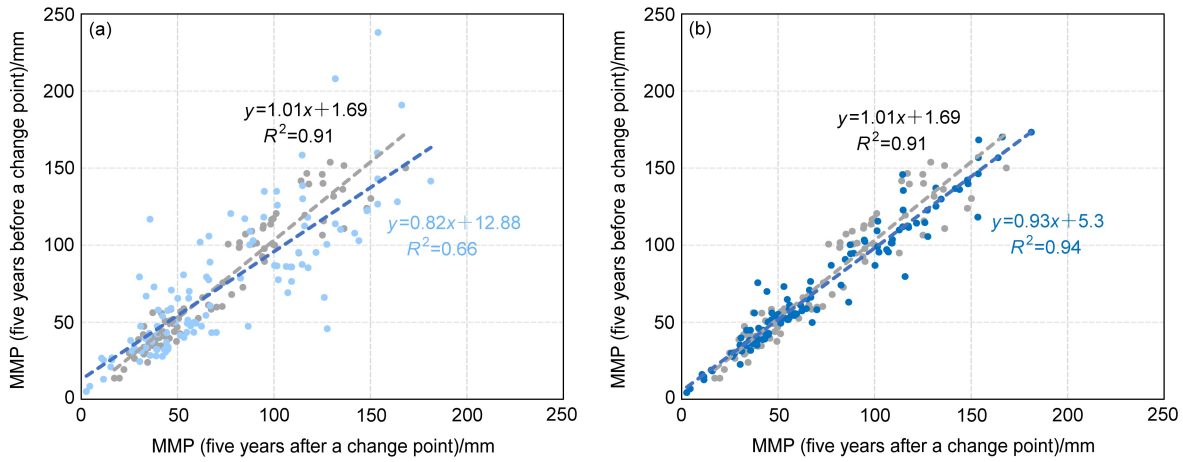

图 5 中国 107 个气象观测站在非均一断点发生前、后 5 年（a）订正前（浅蓝色点）、（b）订正后（深蓝色点）的月降水量均值散点图。灰色点表示非均一测站周围 3 个邻近站（无非均一性问题、距离 250 km 以内）的平均结果，下同。

Fig. 5 The scatter plots of monthly mean precipitation (MMP) (a) before (light blue dot) and (b) after (dark blue dot) correction obtained from 107 meteorological stations in China five years before and five years after the occurrence of non-uniform breakpoints. The grey point represents the average result of the three adjacent stations (no non-uniformity problem, within 250 km) around the non-uniform station, the same below.

的月降水量标准差散点图。从图 6a 可以看到，灰色圆点（邻近序列）集中于 1∶1 线分布，而浅绿色圆点（非均一序列）分布非常离散。在断点发生的前后 5 年间，非均一降水量月值序列的标准差变化幅度在−66%～76% 之间（图 6a 中圆点对应的横坐标与纵坐标比值的变化幅度），平均绝对变化幅度约为 24%；而邻近均一的降水序列标准差变化幅度在−27%～51% 之间，平均绝对变化幅度约为 12%，仅为非均一序列标准差变化幅度的一半。可见非均一问题可以显著地改变逐月降水量的变化幅度。经均一化订正后的降水数据（图 6b 深绿色圆点）高度集中于 1∶1 线，在断点发生的前后 5 年间，降水量月值序列的标准差变化幅度在−39%～70% 之间，平均绝对变化幅度约为 11%，更加接近邻近站（灰色圆点）表现。图 6 与图 5 的结果表明，经过均一化的中国降水数据不仅消除了非气候因素引起的降水均值偏差，同时也较好地校正了标准差偏差。

3.4 中国降水百年变化速率估算

图 7a 是基于观测起始时间早于 1945 年且完整性达到 90% 的 248 条序列（图 1 中红色、黄色和绿色实心圆点）计算得到的中国百年（1900～2022）降水距平百分率序列。计算采用 CAM 方法（Jones, 1994），以 1981～2010 年作为距平参考期。图 7b

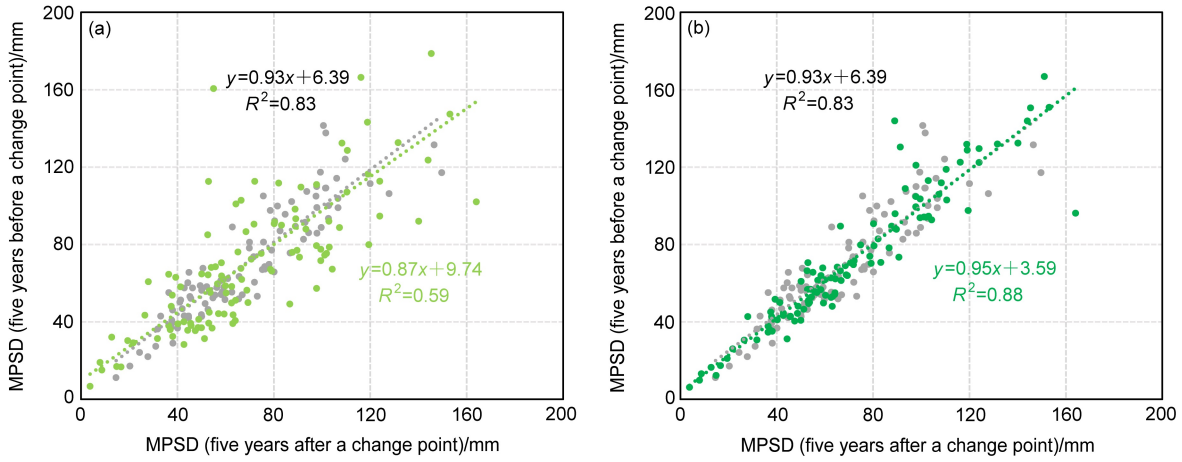

图 6　中国 107 个气象观测站在非均一断点发生前、后 5 年（a）订正前（浅绿色点）、（b）订正后（深绿色点）的月降水量标准差散点图。

Fig. 6　The scatter plots of the standard deviation of monthly precipitation (MPSD) (a) before (light blue dot) and (b) after (dark blue dot) correction for obtained from 107 meteorological stations in China five years before and five years after the occurrence of non-uniform breakpoints.

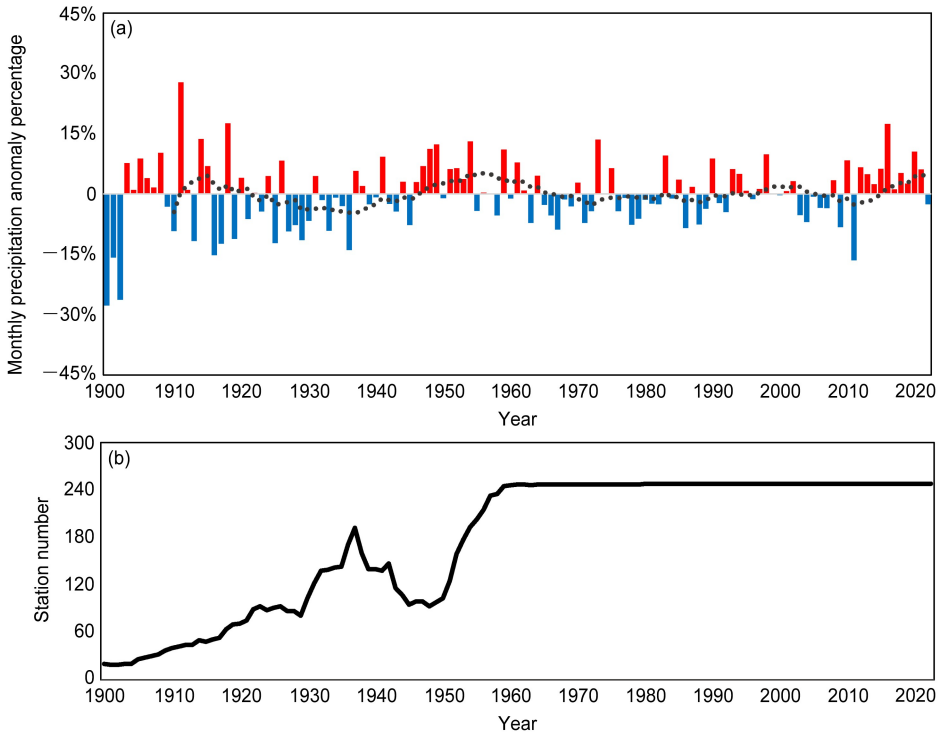

图 7　（a）中国区域平均的百年（1900～2022 年）月降水量距平百分率，距平参考期为 1981～2010 年，（b）参与距平计算的观测站数量。数据源为图 1 中红色、黄色和绿色（共计 248 个）站点序列。图 a 中，黑色虚线为 11 点平滑距平值。

Fig. 7　(a) The percentage of monthly precipitation anomaly averaged in China for the period 1900–2022, the reference period of anomaly is 1981–2010, (b) the observation station number involved in anomaly calculation. The data source is the red, yellow, and blue sites (248 sites) in Fig. 1. In Fig. a, the black dotted line represents 11-point smoothing anomalies.

展示了参与距平值计算的站点数量逐年变化。从图 7a 中可以看到在过去一百年中，中国的降水量没有显著的变化趋势，1900～2022 年降水量距平百分率的变化速率为 0.35%±0.21% (10 a)$^{-1}$。

值得注意的是，1915 年前具备降水观测的站点较少，且空间分布不均，西北地区几乎不具备观测记录（图 1），可能导致这一时期中国区域降水序列的空间代表性偏差。为此同时使用起始时间早

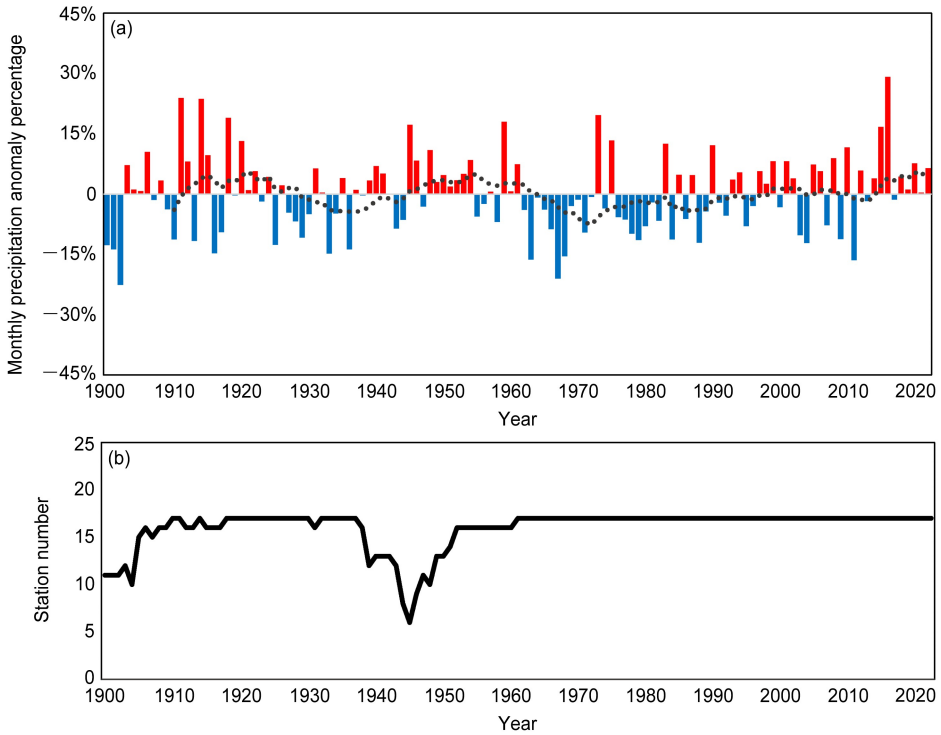

图 8 同图 7，但数据源为图 1 中红色站点（共计 17 个）序列。

Fig. 8 As in Fig. 7, but for the data source is the red sites (17 sites) in Fig. 1.

于 1915 年完整性达到 90% 的 35 条序列（图 1 中红色实心圆点）计算区域平均距平序列（图 8），通过两种采样得到的序列对比，评估采样差异对中国降水序列的影响。可以看到，图 8 亦显示在过去近一百年中国的降水量没有显著的变化趋势，1900～2022 年中国区域平均降水距平百分率的变化速率为 0.30%±0.23% (10 a)$^{-1}$，图 8a 与图 7a 中距平百分率序列的相关系数为 0.85。在站点数量差异较大的 1950～2022 年（图 7b 和图 8b 中分别为 35 个和 248 个站点），两者的相关系数为 0.90，变化速率分别为 0.21%±0.35% (10 a)$^{-1}$（图 7a）和 0.82%±0.5% (10 a)$^{-1}$（图 8a），均未表现出显著的变化趋势。上述结果表明采样方式未改变中国近百年降水无显著变化趋势的判断。

4 结论

中国气象局在我国早期历史数据恢复和拯救方面开展了大量工作。由于历史早期的降水观测方式、技术以及测站位置与当今现代化的观测体系差异较大，两者记录的降水数据间可能存在系统性偏差，导致历史数据（1950 年前的降水数据）数字化的工作成果始终难以直接应用于气象业务和研究工作，也制约了相关领域工作的开展。本研究通过客观地衔接历史早期与当今降水序列，并采用均一化方法消除了历史数据中潜在的系统性偏差，形成了一套适用于气象业务和研究工作的中国百年降水数据，可以为我国长期降水气候变化、水资源变迁提供科学数据支撑。通过访问国家气象科学数据中心能够申请获取本项数据产品（https://data.cma.cn/ [2023-01-17]）。

本项工作的主要研究结论有：

（1）依据数字化档案记录的城市名、经纬度等信息，匹配数字化降水序列所关联的国家级气象站，构建起一套时间长度达到百年的中国降水量日值和月值数据产品，其中起始时间早于 1945 年、1930 年、1915 年的降水序列分别有 321 条、126 条、60 条。

（2）通过非均一性检验，在 107 个观测站的降水历史数据中发现了 113 个非均一断点。观测站迁址、不同来源数据拼接、仪器换型是引起历史数据非均一问题的主要原因，它们占所有非均一断点的比重分别为 20%、10%、32%。另有 38% 的断点未在台站历史沿革中有明确的观测端变更记录，但均通过 99% 置信水平的 PMF 或 PMT 检验。

（3）非均一问题不仅会导致降水数据均值偏离区域降水事实，同时也会改变数据所反映的降水季节变率。均一化校正能够消除这些系统性的偏差，均一化后的降水数据所反馈的站点雨量年际变率更加契合局地气候特征。

（4）基于均一化后的降水数据评估中国降水变化趋势，结果表明在过去近 120 年和 70 年间中国的降水并未呈现显著的变化趋势，1900～2022 年和 1951～2022 年中国降水距平百分率的变化速率分别为 0.35%±0.21 $(10\ a)^{-1}$ 和 0.21%±0.35% $(10\ a)^{-1}$。

相对于气温等时空变化较为一致的气象要素，降水本身变率很大，非均一性的影响更容易掩盖在自然变率中，适用于降水数据的非气候变化信号检验与校正方法亟待发展与优化。除了观测站迁址、仪器换型等观测端变更的因素外，大风引起固态降水捕获率下降是高纬度地区冬季降水系统偏差的重要因素。这种偏差可能一直伴随着整个观测时段，且未以突变的形式表现出来。本文所选用的突变检验和订正方法难以有效识别。因此，在未来的工作中需要重点关注高纬度地区冬季固态降水数据质量，量化风速引起的降水量偏差并实现校正。

参考文献（References）

Alexandersson H. 1986. A homogeneity test applied to precipitation data [J]. J. Climatol., 6(6): 661−675. doi:10.1002/JOC.3370060607

曹丽娟, 严中伟. 2011. 地面气候资料均一性研究进展 [J]. 气候变化研究进展, 7(2): 129−135. Cao Lijuan, Yan Zhongwei. 2011. Progresses in research of homogenization of climate data [J]. Adv. Climate Change Res. (in Chinese), 7(2): 129−135. doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2011.02.009

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]. J. Geophys. Res. Atmos., 118(15): 8197−8207. doi:10.1002/jgrd.50615

Dai A G, Fung I Y, Del Genio A D. 1997. Surface observed global land precipitation variations during 1900–88 [J]. J. Climate, 10(11): 2943−2962. doi:10.1175/1520-0442(1997)010<2943:SOGLPV>2.0.CO;2

范邵华, 余予, 鞠晓慧, 等. 2018. 气象资料数字化进展及应用 [J]. 气象科技进展, 8(1): 64−70,78. Fan Shaohua, Yu Yu, Ju Xiaohui, et al. 2018. A review for the progresses and applications of historical meteorological data rescuing and digitizing over China [J]. Adv. Meteor. Sci. Technol. (in Chinese), 8(1): 64−70,78. doi:10.3969/j.issn.2095-1973.2018.01.007

Groisman P Y, Koknaeva V V, Belokrylova T A, et al. 1991. Overcoming biases of precipitation measurement: A history of the USSR experience [J]. Bull. Am. Meteor. Soc., 72(11): 1725−1733. doi:10.1175/1520-0477(1991)072<1725:OBOPMA>2.0.CO;2

IPCC. 2021. Climate change 2021: The physical science basis: Working Group I to the Sixth Assessment report of the intergovernmental panel on climate change [R]. Cambridge, New York: Cambridge University Press.

江志红, 黄群, 李庆祥. 2008. 近 50 年中国降水序列均一性检验与订正研究 [J]. 气候与环境研究, 13(1): 67−74. Jiang Zhihong, Huang Qun, Li Qingxiang. 2008. Study of precipitation series homogeneous adjustment and their correction over China in the last 50 years [J]. Climatic Environ. Res. (in Chinese), 13(1): 67−74. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2008.01.09

Jones P D. 1994. Hemispheric surface air temperature variations—A reanalysis and an update to 1993 [J]. J. Climate, 7(11): 1794−1802. doi:10.1175/1520-0442(1994)007<1794:HSATVA>2.0.CO;2

李庆祥. 2011. 气候资料均一性研究导论 [M]. 北京: 气象出版社. Li Qingxiang. 2011. Introduction to the Study of Climatic Data Homogeneity (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press.

李庆祥, 江志红, 黄群, 等. 2008. 长江三角洲地区降水资料的均一性检验与订正试验 [J]. 应用气象学报, 19(2): 219−226. Li Qingxiang, Jiang Zhihong, Huang Qun, et al. 2008. The experimental detecting and adjusting of the precipitation data homogeneity in the Yangtze Delta [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 19(2): 219−226. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2008.02.012

李庆祥, 彭嘉栋, 沈艳. 2012. 1900～2009 年中国均一化逐月降水数据集研制 [J]. 地理学报, 67(3): 301−311. Li Qingxiang, Peng Jiadong, Sheng Yan. 2012. Development of homogenized monthly precipitation dataset in China during 1900–2009 [J]. Acta Geogr. Sinica (in Chinese), 67(3): 301−311. doi:10.11821/xb201203002

Li Z, Yan Z W, Zhu Y N, et al. 2020. Homogenized daily relative humidity series in China during 1960–2017 [J]. Adv. Atmos. Sci., 37(4): 318−327. doi:10.1007/s00376-020-9180-0

刘小宁, 孙安健. 1995. 年降水量序列非均一性检验方法探讨 [J]. 气象, 21(8): 3−6. Liu Xiaoning, Sun Anjian. 1995. An inhomogeheity test study of annual precipitation series [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 21(8): 3−6. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.1995.8.001

司鹏, 王冀, 李慧君, 等. 2020. 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. Si Peng, Wang Ji, Li Huijun, et al. 2020. Homogenizing Methods and Application for Land Meteorological Data in Provinces (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press.

唐国利. 2020. 气候序列均一化研究与应用 [M]. 北京: 气象出版社. Tang Guoli. 2020. Research and Application of Homogenizing Methods for Climatic Data (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press.

Wang X L. 2008. Penalized maximal *F* test for detecting undocumented mean shift without trend change [J]. J. Atmos. Ocean. Technol., 25(3): 368−384. doi:10.1175/2007JTECHA982.1

Wang X L, Wen Q H, Wu Y H. 2007. Penalized maximal *t* test for detecting undocumented mean change in climate data series [J]. J. Appl. Meteor. Climatol., 46(6): 916−931. doi:10.1175/JAM2504.1

Wang X L, Chen H F, Wu Y H, et al. 2010. New techniques for the detection and adjustment of shifts in daily precipitation data series

[J]. J. Appl. Meteor. Climatol., 49(12): 2416−2436. doi:10.1175/2010JAMC2376.1

Wang X L, Feng Y, Vincent L A. 2014. Observed changes in one-in-20 year extremes of Canadian surface air temperatures [J]. Atmos. Ocean, 52(3): 222−231. doi:10.1080/07055900.2013.818526

吴增祥. 2005. 气象台站历史沿革信息及其对观测资料序列均一性影响的初步分析 [J]. 应用气象学报, 16(4): 461−467. Wu Zengxiang. 2005. Preliminary analyses of the information on meteorological station historical evolution and its impacts on homogeneity of observational records [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 16(4): 461−467. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2005.04.006

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 [J]. Climate Dyn., 50(7−8): 2513−2536. doi:10.1007/S00382-017-3755-1

Yan Z W, Li Z, Xia J J. 2014. Homogenization of climate series: The basis for assessing climate changes [J]. Sci. China Earth Sci., 57(12): 2891−2900. doi:10.1007/s11430-014-4945-x

杨溯, 李庆祥. 2014. 中国降水量序列均一性分析方法及数据集更新完善 [J]. 气候变化研究进展, 10(4): 276−281. Yang Su, Li Qingxiang. 2014. Improvement in homogeneity analysis method and update of China precipitation data [J]. Climate Change Res. (in Chinese), 10(4): 276−281. doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2014.04.008

Yang S, Wang X L, Wild M. 2018. Homogenization and trend analysis of the 1958–2016 in situ surface solar radiation records in China [J]. J. Climate, 31(11): 4529−4541. doi:10.1175/JCLI-D-17-0891.1

Yang S, Wang X L, Wild M. 2019. Causes of dimming and brightening in China inferred from homogenized daily clear-sky and all-sky in situ surface solar radiation records (1958–2016) [J]. J. Climate, 32(18): 5901−5913. doi:10.1175/JCLI-D-18-0666.1

中国气象局. 2003. 地面气象观测规范 [M]. 北京: 气象出版社. China Meteorological Administration. 2003. Manual of Meteorological Observation (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press.

中国气象局. 2020. 地面气象自动观测规范 [M]. 北京: 气象出版社. China Meteorological Administration. 2020. Manual of Meteorological Automatic Observation (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press.