



台站迁移对湖北省气温序列非均一性影响的评估和订正

何菊 高兰 闫荞荞

Assessing and correcting the impact of station relocation on temperature inhomogeneity in Hubei Province

HE Ju, GAO Lan, YAN Qiaoqiao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12406/byzh.2025-084>

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

防辐射罩区域自动气象站气温观测偏差分析及其订正方法

Analysis and correction method of temperature observation deviation in the radiation shield of regional automatic meteorological stations

暴雨灾害. 2025, 44(1): 112–122 <https://doi.org/10.12406/byzh.2024-061>

偏差订正技术在冬奥会崇礼赛区复杂地形风速预报中的应用

Application of deviation correction technology in wind speed forecasting of complex terrain in Chongli competition area of Winter Olympics

暴雨灾害. 2025, 44(4): 543–553 <https://doi.org/10.12406/byzh.2025-003>

广东暴雨洪涝灾害损失定量评估

Quantitative assessment of disaster loss caused by rainstorms and floods in Guangdong

暴雨灾害. 2021, 40(1): 87–93 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.01.011>

频率匹配技术在暴雨预报中的应用及改进分析

On the application and improvement of the frequency matching method to rainstorm forecasts

暴雨灾害. 2021, 40(4): 352–361 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.04.003>

ECMWF模式强降水预报偏差订正方法研究及应用

Research and application of bias correction method for heavy rainfall forecast of ECMWF model

暴雨灾害. 2021, 40(4): 430–436 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.04.011>

三峡地基遥感垂直观测系统温湿廓线的误差分析与订正方法探讨

Error analysis and correction method of temperature and humidity profiles in the Three Gorges ground-based remote sensing vertical observation system

暴雨灾害. 2024, 43(5): 587–597 <https://doi.org/10.12406/byzh.2023-199>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

何菊,高兰,闫莽莽.2026.台站迁移对湖北省气温序列非均一性影响的评估和订正[J].暴雨灾害,45(3):417–425. HE Ju, GAO Lan, YAN Qiaoqiao. 2026. Assessing and correcting the impact of station relocation on temperature inhomogeneity in Hubei Province [J]. *Torrential Rain and Disasters*,45(3):417–425 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2025–084

台站迁移对湖北省气温序列非均一性影响的 评估和订正

何菊,高兰,闫莽莽

(湖北省气象信息与技术保障中心, 武汉 430074)

摘要: 长时间序列的气温资料是气候变化研究的基础,台站迁移是影响气温序列均一性的主要原因之一,快速城市化背景下气象观测台站(以下简称台站)迁移不断增多,因此定量评估台站迁移对气温序列非均一性影响并进行订正对提高资料应用质量至关重要。基于湖北省 78 个国家级气象观测站 1960—2024 年气温观测数据和历史沿革信息,综合利用标准正态均一性检验、多元线性回归、惩罚最大 T 检验方法及跳变量分析,将台站迁移对气温序列非均一性影响的程度划分为无影响、一般影响和较大影响三个等级,从年代际变化、海拔高度变化及水平位移等维度,定量评估台站迁移对湖北省气温序列非均一性的影响,并对武汉、五峰等代表性台站开展了气温均一性订正研究。结果表明:(1)台站迁移对气温序列非均一性影响呈年代际增大特征,1990 年代后平均气温非均一性比例显著增加(1990 年代后为 1990 年代前的 1.9 倍)、影响程度明显增大,“较大影响”比例从 11% 升至 63%,最低气温对台站迁移的敏感性更为明显。(2)台站迁移的海拔高度变化对气温序列的非均一性影响大于水平位移,海拔高度变幅增大对最高气温序列非均一性影响更为显著。(3)经分位数匹配法订正后,迁移台站与参考站气温区域一致性显著提升,气温年际趋势与中国区域地表气温趋势更为接近。

关键词: 台站迁移; 气温序列; 均一性检验; 定量评估; 偏差订正

中图分类号: P423.3

文献标志码: A

DOI: 10.12406/byzh.2025–084

Assessing and correcting the impact of station relocation on temperature inhomogeneity in Hubei Province

HE Ju, GAO Lan, YAN Qiaoqiao

(Hubei Meteorological Information and Technology Support Center, Wuhan 430074)

Abstract: Under rapid urbanization, the increasing frequency of meteorological station relocation necessitates quantitative evaluation of temperature series inhomogeneity. This study systematically analyzes 137 relocation records from 78 national meteorological observation stations in Hubei Province from 1960 to 2024. An integrated methodology is used, combining the Standard Normal Homogeneity Test (SNHT), Multiple Linear Regression (MLR), Penalized Maximum T Test (PMT), and jump-variable analysis. The results are as follows. (1) The intensity of inhomogeneity caused by relocations exhibits decadal amplification, with post-1990 events showing a 1.9-fold increase in the proportion of inhomogeneity compared to earlier periods. The occurrence of large-impact cases rose from 11% to 63%, with minimum temperature demonstrating greater sensitivity to relocations. (2) Altitude differences exerted stronger influences on temperature series than horizontal displacements, with larger elevation variations increasingly affecting the maximum temperature series. (3) After adjustment using the Quantile Mapping (QM) method, the regional consistency between relocated stations (Wuhan and Wufeng) and neighboring reference stations significantly improved, and interannual trends aligned more closely with temperature variation patterns of China.

Key words: station relocation; temperature series; homogeneity test; quantitative assessment; bias correction

收稿日期: 2025–05–06; 定稿日期: 2025–09–07

资助项目: 湖北省自然科学基金联合项目 (2022CFD018); 中国气象局气象软件重点开放实验室 (KLMS-OG-202510)

第一作者: 何菊, 主要从事气象资料质控方法研究。E-mail: he_ju88@qq.com

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY–NC–ND 4.0

引 言

现代气象观测为刻画气候状态提供了重要数据基础。观测序列时间跨度越长,精度越高,气候模型的预测结果就越准确(Vincent, 1998; Sun et al., 2021)。然而,气象观测台站(以下简称台站)迁移、仪器换型(王星宇等, 2025)、观测时制变更或台站环境改变等因素均会导致特定时段气候资料序列产生系统性偏差,从而影响对气候变化的客观评估(Ducré-Robitaille and Vincent, 2003; Reeves, 2007)。这种不同时期的系统性偏差,使得气候资料序列在时间上缺乏可比性,即为气候资料序列的非均一性(严中伟等, 2014)。为准确反映气候变化规律,必须对气候资料序列均一性进行评估和订正,以提高气候资料的可靠性。

针对气候资料序列均一性的检验方法,国内外许多学者开展了大量研究,如标准正态均一性检验(Standard Normal Homogeneity Test, SNHT)、Pettitt 检验、二项回归检验(Two-Phase Regression, TPR)、多元线性回归检验(Multiple Linear Regression, MLR)、惩罚最大 T 检验(Penalized Maximum T Test, PMT)、惩罚最大 F 检验(Penalized Maximum F Test, PMFT)等方法。然而,李庆祥等(2005)、刘佳等(2012)等对多种均一性检验方法研究对比后,认为单一检验方法可能存在局限性。如 SNHT 方法主要针对单一突变点进行检测,且对数据分布要求较高,不适用于季节性差异明显的数据(Shen et al., 2018); MLR 方法对参考站的密度和质量要求较高,当参考站气候资料趋同或差异较大时,所计算的线性回归系数不稳定(Costa and Soares, 2008); PMT 计算复杂度高,且惩罚阈值的预设严重依赖于先验知识(陈哲等, 2014)。为发挥不同均一性检验方法的优势,提高均一性评估的准确性,科研工作者发展了多方法相结合的气候资料均一性检验技术。赵美艳等(2018)利用 RHtest 和 MASH 对重庆地区 1951—2015 年的平均气温序列进行了均一性分析,指出多方法结合的气候资料均一性检验技术能够降低单一方法误检率。

气温资料是最重要的气候资料序列之一,为城市热岛效应、厄尔尼诺事件以及极端天气识别与机理研究提供了数据基础。已有研究表明,受多重因素影响,我国气温资料存在非均一性站点的比例接近 40%,而台站迁移是导致气温序列突变的最主要原因之一(韩海涛等, 2021)。湖北位于南北气候过渡带,地处长江中游,地形复杂多样(曾琦和任国玉, 2020)。近年来受城市化进程加快等因素影响,多数

气象台站相继发生迁移。台站历史沿革显示,湖北观测序列超过 30 a 的 78 个国家级气象观测站(以下简称国家站)中,1964—2020 年间因城乡建设、探测环境影响等原因发生搬迁的站点达 68 个,累计 137 次(如鄂州站迁移 5 次)。因此开展湖北省台站迁移对气温序列的非均一性影响评估和订正方法研究非常必要。

台站历史沿革记录了台站站址或周围环境、仪器更换、观测规范及统计方法等变更信息,是气候资料均一性检验方法的重要数据基础(韩海涛等, 2021)。中国观测站数量众多,然而长期且完整的台站元数据资料不多(周建平, 2013),目前利用台站元数据进行气候资料均一性的研究也较为少见。2012 年起中国气象局要求申请迁移的台站要进行资料均一性影响分析,但仅针对单个台站单次迁移,缺乏系统性评估。

本文基于 78 个国家站 1960—2024 年气温观测数据和历史沿革信息,构建月检测序列,最大限度控制其他影响因子干扰,建立适用于湖北省台站迁移对气温序列非均一性影响评估和订正方法。首先,综合运用 SNHT、MLR、PMT 方法和跳变量分析,构建非均一性评估指标,定量评估台站迁移对气温序列非均一性的影响程度,为多因素干扰下气温序列的均一性分析提供更全面的技术路径。其次,从年代际变化、海拔高度变化及水平位移等方面,定量评估台站迁移对气温序列非均一性影响的差异,为气象台站选址和湖北省站网布局优化提供科学依据。最后,利用分位数匹配法(Quantile Mapping, QM)(Wang et al., 2010)开展代表性台站气温序列均一性检验和订正试验,为建立全省气候资料均一化数据集提供技术支撑。

1 资料与方法

1.1 资料说明

本文使用资料来源于湖北省气象档案馆的湖北省 78 个国家站 1960—2024 年气温和历史沿革数据,气温数据包括月平均气温、月平均最高气温、月平均最低气温、年平均气温、年平均最高气温、年平均最低气温。这些资料均已经过气象要素界限值、气候极值、内部一致性、时间一致性及空间一致性等质量控制方法的检验。

1.2 研究方法

气候序列均一性检验按照使用方法可分为直接检验法和间接检验法,直接检验法是根据台站历史沿革信息进行 t 检验,间接检验法是通过数学统计方

法检测是否存在不连续点(何冬燕等, 2012)。本文采用的是混合检测法, 即先采用统计方法检测气温序列是否存在不连续点(断点), 再利用台站历史沿革信息判断断点是否由迁移造成。该方法将统计检验与元数据验证相结合, 能有效降低单一方法的误判率, 并准确识别断点的非气候成因。其关键步骤包括检测序列构建、断点检测、非均一性影响评估和非均一性订正。

1.2.1 检测序列构建

检测序列构建是气候资料均一性检验的关键, 而参考站选取是检测序列构建的基础。刘小宁(2000)在对我国年平均风速做均一性检验时, 从邻近 30 个站中选取 5 个相关系数最高的站作为参考站。王凯等(2015)分析气温资料时是选取同一气候区 200 km 范围内海拔高度差小于 100 m 的台站作为参考站。

综合考虑湖北省站网密度及地形差异影响, 本文参考站选取需同时满足以下条件: (1) 与待检测站(以下简称待检站)在同一气候区且距离半径小于 120 km; (2) 观测资料序列平行年代长; (3) 多年来探测环境和海拔高度变幅相对较小; (4) 与待检站月平均气温相关系数最大(0.8 以上)的 5 个站。

由于本文探讨的是台站迁移对气温序列的影响, 如采用年值作为基本资料, 时间跨度较大, 可能有多个非气候原因导致序列产生断点。经反复试验, 选择台站迁移前后 5 a 的连续月值作为基本资料, 其检测结果与台站沿革信息有较好的对应关系。检测序列构建方法如下

$$R_i = y_i - \sum_{j=1}^N w_j x_{ij} / N \times \sum_{j=1}^N w_j \quad (1)$$

$$w_j = r_j^2 / \sum_{k=1}^N r_k^2 \quad (2)$$

式中, x 为参考站气温序列, y 为待检站气温序列, R_i 为检测序列, x_{ij} 为第 j 个参考站第 i 年资料, k 为参考站数。 w_j 为权重系数, 与待检站和参考站气温序列的相关系数有关。 r_j 为待检站与第 j 个参考站的相关系数。

1.2.2 断点检验方法

采用 SNHT、MLR、PMT 三种方法进行断点检测。SNHT 方法是一种基于最大似然原理的统计检验方法, 通过计算时间序列的均值和标准差, 并利用标准化处理来检测序列中是否存在突变点, 尤其适合处理气候数据中非自然因素引起的间断点(刘佳等, 2012)。MLR 方法利用多个自变量建立线性模

型, 通过拟合待检站与参考站的关系, 识别序列中的趋势和突变点(Vincent, 1998), 该方法敏感性较高, 能准确检测出阶跃变化(Ducré-Robitaille et al., 2003)。PMT 方法基于标准正态检验, 通过引入惩罚因子来减少样本量不一致对检测结果的影响, 从而有效克服传统方法在检测多断点时可能出现的过拟合问题(Wang et al., 2010), 该方法检验结果的稳定性较高(司鹏等, 2022)。

综合考虑湖北省地形多样性及检验方法的互补性, 本文同时选取上述 3 种方法作为气温序列均一性综合检验方法(以 95% 置信水平判断气温序列均一性检验结果的统计显著性)。经试验分析, 三种方法均适用于台站迁移这种突变型非均一性检测, 配合使用可减少单一检验方法的误判。

1.2.3 台站迁移均一性影响评价

台站迁移导致气温序列发生非均一性, 一般都是跳变, 而非缓慢趋势变化。基于该特点, 本文参考魏娜等(2012)对台站迁移影响的量化方法, 设计跳变量(step, 记为 S , 单位: $^{\circ}\text{C}$) 作为表征变化幅度的指标, 计算公式如下

$$S = 1/5 \left(\sum_{i=j+1}^{j+5} x_i - \sum_{i=j-1}^{j-5} x_i \right) \quad (3)$$

式中, j 为台站迁移年份, x_i 为检测序列, i 为台站序号。

|step| 越大, 台站迁移对气候序列的均一性影响越大, 因此本文将 step 作为评估台站迁移导致气温序列非均一性的重要指标。

为准确刻画台站迁移对气温序列的非均一性影响程度, 将其划分为无影响、一般影响及较大影响 3 类, 具体评估标准见表 1。

表 1 台站迁移对湖北省气温序列非均一性影响程度评估标准

Table 1 Evaluation criteria and impact categories for the impact of station relocation on temperature series inhomogeneity in Hubei Province

影响程度	评估标准
无影响	SNHT、MLR 及 PMT 3 种方法有 2 种或以上方法未检验出间断点
一般影响	SNHT、MLR 及 PMT 3 种方法有 2 种或以上方法检验出间断点
较大影响	$ \text{step} \geq \sigma$ (检测阈值) 且 SNHT、MLR 及 PMT 3 种方法有 2 种或以上方法检验出间断点

综合《中国气候蓝皮书 2024》公布的变暖速率 ($0.3^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$)、地面观测精度 (0.1°C) 及湖北省迁移站点 step 分布特征 (step > 0.2°C 事件比例约 30%), 本文设定 $\sigma = 0.2^{\circ}\text{C}$ 。

1.2.4 台站迁移均一性订正

在众多气候资料均一性订正方法中, QM 法简单直观, 在全球数据集研制及部分偏远台站气候序列的订正中得到广泛应用 (张高杰等, 2013; 崔妍等, 2019; 张瑶等, 2023)。QM 法的基本思想是基于待检和参考序列的百分位数分布构建传递函数对序列进行订正, 首先根据待订正序列趋势和突变点所在位置建立累计分布函数, 然后利用待订正序列每段每个值所对应的累计分布函数值和对应的拟合曲线值来确定相应的订正量 (Wang et al., 2010)。本文根据均一性检验结果, 以参考序列为基准, 利用 RHtest V4 软件的 QM 法对气温序列月值断点进行订正, 并形成均一化年值订正产品。

2 台站迁移对气温序列非均一性影响分析

鉴于 1990 年后湖北省城镇化进程显著加快 (城镇化率从 1990 年的 28.5% 升至 2022 年的 60.3%), 且导致迁站的主因多为城镇化引起探测环境恶化或城市规划变化, 为直观反映不同年代际台站迁移的影响差异, 本文以 1990 年为分界, 将 1960—1990 年称为“1990 年代前”, 1991—2024 年称为“1990 年代后”。利用前述方法分析湖北省台站迁移对气温序列非均一性的影响, 经统计 1990 年代前和 1990 年代后的迁移次数分别为 80 次和 57 次。

2.1 台站迁移导致的气温序列非均一性影响分析

表 2 给出了 1990 年代前、后湖北省台站迁移对气温序列非均一性不同程度影响的比例, 可见 1990 年代后迁移导致三个气温要素非均一性比例显著升高, 如平均气温“有影响”比例从 1990 年代前的 34% 提升到 1990 年代后 65%, 达 1.9 倍, 其中“较大影响”比例从 11% 提高到 63%, 尤为突出。从不同要素看, 两个时期最低气温非均一性比例均高于平均和最高气温, 如 1990 年代后最低、平均、最高气温非均一性比例分别为 81%、65%、54%。

表 2 1990 年代前后湖北省气温序列非均一性影响程度比例 (单位: %) 比较

Table 2 Comparison of proportions (unit: %) of temperature series inhomogeneity in Hubei Province before and after the 1990s

气温序列	无影响		一般影响		较大影响	
	1990 年代前	1990 年代后	1990 年代前	1990 年代后	1990 年代前	1990 年代后
平均气温	66	35	23	2	11	63
最高气温	58	46	31	2	11	52
最低气温	34	19	35	6	31	75

2.2 台站迁移水平位移的非均一性影响分析

表 3、表 4 分别统计了不同迁站水平位移下气温序列 step 平均值和非均一性影响的比例, 统计表明 1990 年代前迁移水平位移对气温要素影响较小, step 和非均一性比例均处于较低水平; 但 1990 年代后随着迁移水平位移增加, 各气温要素非均一性比例及 step 均呈上升趋势。从不同气温要素看, 最低气温受迁移水平位移变化的影响最大, 而平均和最高气温则不明显。进一步计算平均、最高、最低气温序列非均一性比例与迁移水平位移的相关系数 (分别为 0.43, 0.11, 0.63), 表明迁移水平位移对最低气温的非均一性影响最大。

表 3 1990 年代前后湖北省气温序列 step 平均值 (单位: °C) 随迁站水平位移的变化比较

Table 3 Comparison of mean step values (unit: °C) of temperature series with horizontal displacement of station relocation before and after the 1990s in Hubei Province

迁移水平位移/m	平均气温		最高气温		最低气温	
	1990 年代前	1990 年代后	1990 年代前	1990 年代后	1990 年代前	1990 年代后
<1 000	0.18	0.24	0.12	0.18	0.22	0.31
1 000~3 000	0.20	0.28	0.31	0.25	0.24	0.41
≥3 000	0.15	0.49	0.15	0.45	0.21	0.65

表 4 不同迁站水平位移下湖北省气温序列非均一性比例 (单位: %) 比较

Table 4 Comparison of proportions (unit: %) of temperature series inhomogeneity under different horizontal displacements of station relocation in Hubei Province

迁移水平位移/m	平均气温			最高气温			最低气温		
	无影响	一般影响	较大影响	无影响	一般影响	较大影响	无影响	一般影响	较大影响
<1 000	66.7	17.8	15.5	60.0	33.3	6.7	35.6	26.7	37.7
1 000~3 000	50.0	30.0	20.0	65.0	15.0	20.0	30.0	40.0	30.0
≥3 000	58.3	16.7	25.0	44.4	36.1	19.5	27.8	36.1	36.1

2.3 迁移台站海拔高度变化的非均一性影响

表 5 给出了各气温要素 step 平均值随台站迁移海拔高度变化幅度的变化, 从中可知, 当迁移后台站海拔高度变化幅度<10 m 和 10~50 m 时, 各气温要素 step 平均值在 1990 年代后明显高于 1990 年代前, 其中最低气温尤为明显, 分别从 1990 年代前的 0.19 °C、0.26 °C 升至 0.52 °C、0.61 °C (达 2 倍以上), 且相同海拔高度变化幅度下, 1990 年代后的气温跳变也更明显。各气温要素 step 平均值随海拔高度变幅增大而增大, 这与气温垂直递减率随高度的变化密切相关。此外, 不同气温要素受台站迁移影响随海拔高

度变化也存在差异,海拔高度变化幅度小于 50 m 时,最低气温受到的影响远高于最高气温,且变化幅度越小,最低气温 step 大于最高气温的特征越明显;而海拔高度变化幅度大于 50 m 时,最高气温 step 逐渐超过平均和最低气温。次旺扎西等 (2025) 研究青藏高原地区也表明,不同气温要素的增温速率随海拔高度变化而存在差异,这一规律与本文的结论基本相符。计算平均、最高、最低气温 step 与海拔高度变化的相关系数 (分别为-0.73, -0.68, -0.64),表明气温 step 与迁移海拔高度变化的相关性明显高于迁移位移。

表 5 1990 年代前后不同迁站海拔高度变幅下湖北省气温 step 平均值 (单位:℃) 比较

Table 5 Comparison of mean step values (unit: ℃) of temperature under different elevation ranges of station relocation before and after the 1990s

海拔高度 变幅/m	平均气温		最高气温		最低气温	
	1990 年代前	1990 年代后	1990 年代前	1990 年代后	1990 年代前	1990 年代后
≤10	0.12	0.28	0.15	0.25	0.19	0.52
10~50	0.23	0.39	0.19	0.33	0.26	0.61
50~100	0.46	0.41	0.39	0.46	0.54	0.43
>100	-	1.30	-	1.67	-	1.16

注:“-”表示没有出现对应情况

综上,台站迁移对气温序列非均一性影响呈以下特征:(1) 时间上,1990 年代后影响比例和程度大于 1990 年代前,这可能与城市化有关,伍红雨等 (2019) 研究粤港澳大湾区气候变化也指出快速城市化显著影响区域气候;要素上,最低气温的非均一性比例高于平均气温和最高气温,这与其夜间边界层稳定、局地微气象影响明显有关 (李庆祥等, 2005)。(2) 空间上,台站迁移海拔高度变化对气温要素的影响大于水平位移变化,这与气温垂直递减率固有特性相关;而水平位移的影响更多取决于局地环境差异。张天峰等 (2014) 指出,迁移前后地理环境差异显著且海拔高度变幅过大是引起气温序列非均一性的主要原因。

3 代表性台站迁移对气温序列均一性影响及订正

台站迁移导致的气温序列非均一性主要由迁移位移、海拔高度变幅和环境变化引起。本节分别选取武汉、五峰作为代表性站点,探讨台站迁移对气温序列非均一性影响评估及订正方法适用性。武汉站位于江汉平原,作为大城市受城市热岛效应影响相对较大,建站以来共迁移 7 次,历次迁移海拔高度变化较小,变化幅度 10 m 以内。五峰站位于湖北西部

山区,与周边海拔高度差异大,受城市热岛效应影响相对较小,建站以来迁移两次,分别是 1994 年 1 月和 2018 年 1 月,两次迁移海拔高度变化分别为-288.5 m 和-376.7 m,为湖北省台站迁移海拔高度变化最大的站。

3.1 迁移对武汉站气温序列均一性的影响及订正

3.1.1 气温序列均一性影响

根据参考站选取规则,选取蔡甸、汉川、孝感、江夏、黄陂 5 站作为参考站,分析武汉站 1960 年以来历次迁移对气温序列的影响,其结果见表 6。从中可知,1994 年武汉站迁移后,平均气温、最高气温、最低气温 step 均为正值;而 2010 年迁移后,三者 step 均转为负值,且对最低气温的影响尤为显著,step 达-2.01 ℃。

表 6 1994、2010 年武汉站迁移后气温要素 step

Table 6 Step values for temperature elements after the station relocation at Wuhan station in 1994 and 2010

迁站 时间/ (年-月)	迁移 水平 位移/m	迁移 海拔高度 高度差/m	平均 气温 step/℃	最高 气温 step/℃	最低 气温 step/℃
1994-04	81	0.3	0.305	0.11	0.48
2010-01	8 900	0.8	-1.22	-0.45	-2.01

分析武汉站 1990 年代后两次迁移前后 5 a 气温检测序列情况 (图 1a、b),可见虽然两次迁移海拔高度变化仅在 1 m 以内,但气温均出现跳变,最低气温受影响最大,平均气温次之,而最高气温受影响最小,这与第 2.1 节分析结论一致。

两次迁移水平位移和探测环境的不同,导致了气温变化趋势的不一致 (1994 年气温升高,2010 年气温降低),和最高气温序列均一性受影响程度的不同 (1994 年保持均一,2010 年出现非均一)。1994 年武汉站迁移水平位移较小,局地微气候对最高气温影响小于其他两种温度,因此台站迁移对最高气温均一性的影响较小。但武汉站两次迁移的探测环境变化都较为明显,其中 1994 年迁移至离周边高楼更近的环境,导致气温检测序列明显升高,而 2010 年从城区迁移到郊外,城郊探测环境的热力差异致使气温序列明显降低。

3.1.2 气温序列订正

对武汉站 1994 年、2010 年平均气温利用 QM 法进行订正 (图 2),订正量分别为-0.39 ℃ 和-1.07 ℃ (参考站同前),可见订正前存在明显跳变,订正后武汉月平均气温检测序列在迁移前后趋势一致性明显改善,与周边参考站相关系数从 0.82 提升到 0.96,区域一致性提升明显。且订正后武汉站 1960—2023 年

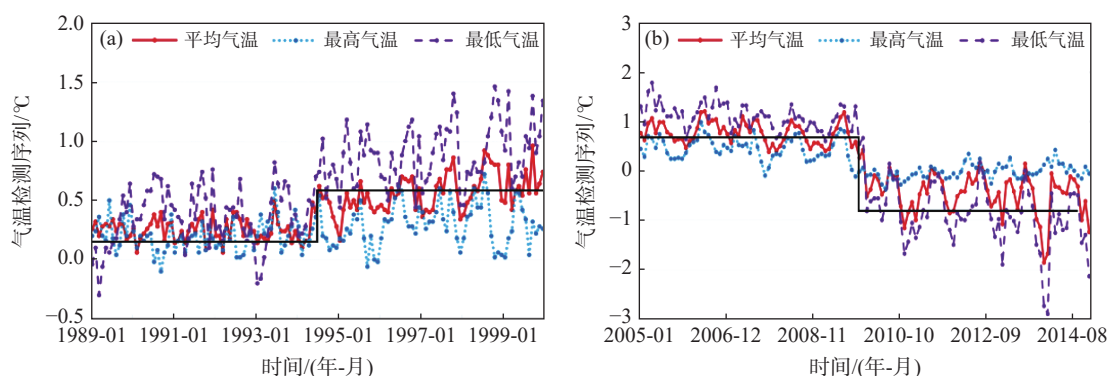


图 1 1994 年 (a) 和 2010 年 (b) 武汉站迁移前后 5 a 不同气温检测序列 (图中黑色直线代表气温趋势, 下同)

Fig. 1 Test series of temperature of Wuhan station for the five years before and after the relocation in (a) 1994 and (b) 2010 (the black vertical lines indicate the temperature trend, similarly hereinafter)

年平均气温曲线趋势系数为 $0.28\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$, 与中国气象局发布的《中国气候变化蓝皮书 (2024)》中“1961—2023 年, 中国地表年平均气温呈显著上升趋势, 平均每 10 a 升高 $0.30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ”更为接近, 并通过了置信水平为 0.95 的 t 检验。

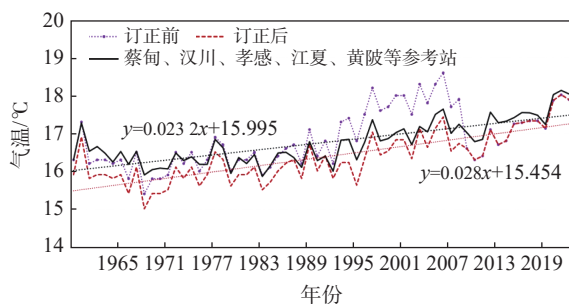


图 2 订正前、后武汉站年平均气温曲线与参考站的对比

Fig. 2 Comparison of annual mean temperature series of Wuhan station before and after adjustment with those of the reference stations

3.2 迁移对五峰站气温序列均一性的影响及订正

3.2.1 气温序列均一性影响

根据参考站选取规则, 选取长阳、宜都、三峡、枝江、秭归等 5 个邻近站作为参考站, 分析 1994 年、2018 年两次迁移对气温序列的影响情况 (表 7),

可见两次迁移的海拔高度变幅很大, 均超过 200 m, 对 3 个气温要素序列的非均一性影响都较大, 迁移后气温明显升高, 其中最高、最低气温 step 最大达 $2.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $1.68\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

表 7 1994、2018 年五峰站台站迁移后气温要素 step

Table 7 Step values for temperature elements after the station relocation at Wufeng station in 1994 and 2018

迁站时间/ 年-月	迁移 距离/m	迁移海拔高度 高度差/m	平均气温 step/ $^{\circ}\text{C}$	最高气温 step/ $^{\circ}\text{C}$	最低气温 step/ $^{\circ}\text{C}$
1994-01	2.8	-288.1	1.43	2.30	1.37
2018-01	39.4	-376.7	1.29	0.64	1.68

进一步分析五峰站两次迁移前后 5 a 月平均气温检测序列 (图 3a、b), 可见虽然迁移后 3 个气温要素均呈上升趋势, 但最高气温受影响有差异, 1994 年迁移后最高气温上升显著 (step 达 $2.3\text{ }^{\circ}\text{C}$), 而 2018 年迁移后仅略有上升, 未检测到非均一性跳变。

五峰站迁移前后海拔高度变幅及地形条件的不同, 导致了最高气温受影响的差异。第 2.3 节提到, 当迁移海拔高度变幅大于 50 m 时, 最高气温受影响程度通常大于平均和最低气温, 但五峰站 2018 年迁移对最高气温的影响实际却小于平均和最低气温,

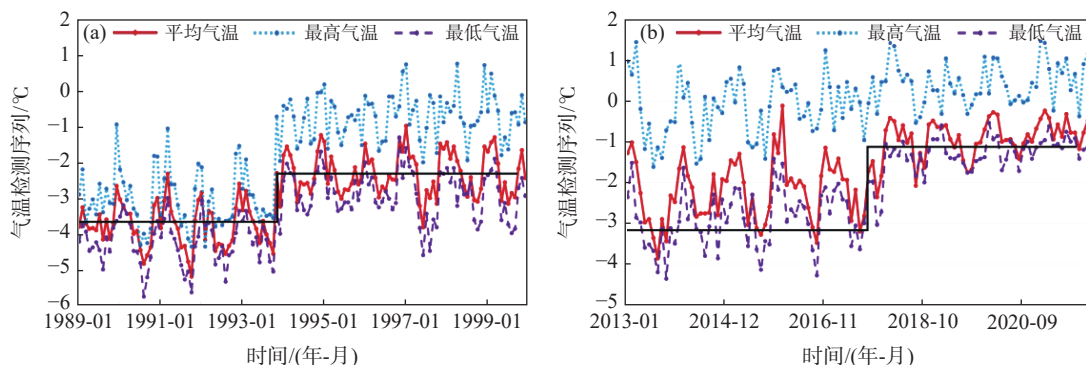


图 3 1994 年 (a) 和 2018 年 (b) 五峰站迁移前后 5 a 不同气温要素检测序列

Fig. 3 Test series of temperature of Wufeng station for the five years before and after the relocation in (a) 1994 and (b) 2018

其原因可能与五峰站特殊地形有关。根据中国气象局发布的《气象探测环境报告书》,五峰站 1994 年迁移至半山腰,周边山体遮挡严重,日出日落方位山体遮挡最大达 52° ,受遮挡影响日照时数偏低,导致最低气温和平均气温明显偏低;相比之下, $100^\circ\sim 188^\circ$ 方向遮挡相对较小,正午前日照影响不大,因此最高气温影响较小。而五峰站 2018 年再次迁移后,探测环境改善,气温观测受遮挡影响较小,因此五峰站 2018 年迁移对最高气温的影响小于最低和平均气温。

3.2.2 气温序列订正

利用 QM 法对五峰站 1994 年、2018 年两次迁移的年平均气温序列进行订正(图 4),订正量分别为 2.74°C 、 1.43°C 。可见订正前平均气温存在突变且与周边参考站差异大,而订正后平均气温趋势与周边参考站更为一致,两者的相关系数从 0.86 提升到 0.94,气温区域一致性提升明显。而且,五峰站年平均气温曲线趋势从 $0.57^\circ\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 订正为 $0.15^\circ\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ (周边参考站为 $0.16^\circ\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$),订正后与中国地表年平均气温变化趋势($0.3^\circ\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$)更为接近(增长趋势低于武汉站,符合五峰作为山区县城受城市热岛效应影响小于武汉的实际情况),并通过了置信水平为 0.95 的 t 检验。

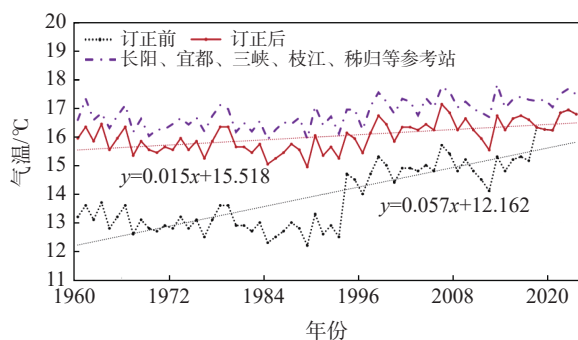


图 4 订正前、后五峰站年平均气温曲线与参考站的对比

Fig. 4 Comparison of annual mean temperature series of Wufeng station before and after adjustment with those of the reference stations

通过对武汉和五峰两个代表性台站对比分析,可以揭示台站迁移对不同地理环境下气温序列影响的差异:(1)不同地理环境下台站迁移对气温影响存在差异。武汉站为平原城市站,迁移主要表现为水平距离改变和探测环境变化,导致最低气温跳变显著(step 值达 -2.01°C),而最高气温受影响较小。五峰站为山区站,迁移海拔高度变幅较大,导致平均气温和最低气温显著升高(step 值均超 1.3°C),而对最高气温的影响则因地形遮挡的不同而存在差异(1994 年、2018 年两次迁移 step 分别为 2.3°C 、 0.64°C),印证了海拔高度与地形对气温要素的共同影响(曾

琦和任国玉, 2020; 次旺扎西等, 2025)。(2)经订正,武汉、五峰站与其周边参考站的平均气温相关系数分别提升至 0.96、0.94,区域一致性显著改善。该结果与张高健(2024)对西安站订正结论(即订正能有效提升气温序列的区域一致性并使其趋势更接近中国平均变暖趋势)相吻合,且订正后的气温增速与中国地表平均气温变化趋势更为接近,表明 QM 法对平原和山区站均具有较好的适用性。此外,武汉站订正后的趋势系数高于五峰站,反映了城市化程度对气温变化趋势的影响。

综上,台站迁移对气温序列的影响机制因地理环境而异。平原地区最低气温对台站迁移最敏感;山区站最高气温在较大海拔高度变幅下受影响较其他要素显著,但地形遮挡可影响其敏感性。QM 法订正能有效提升两类台站与区域参考站的一致性。

4 结论与讨论

本文基于 1960—2024 年湖北省 78 个国家站气温观测数据和历史沿革信息,综合应用标准正态均一性检验、多元线性回归、惩罚最大 T 检验方法及 step 分析,从年代际变化、海拔高度变化及水平位移等维度,定量评估了台站迁移对气温序列的非均一性影响,并采用分位数匹配法对代表性台站进行了订正研究。得到以下主要结论:

(1)台站迁移对气温序列的非均一性影响在 1990 年代前后存在差异。1990 年代后的气温非均一性比例及其影响强度均显著高于 1990 年代前,平均气温“有影响”比例从 34% 提升到 65%，“较大影响”比例从 11% 升至 63%;最低气温的非均一性发生比例(81%)显著高于平均气温(65%)和最高气温(54%)。1990 年后气温序列非均一性比例激增。最低气温对台站迁移的敏感性尤为突出。

(2)台站迁移海拔高度及水平位移变化对气温非均一性影响存在差异。台站迁移伴随的海拔高度变化比迁移水平位移更容易导致气温序列出现非均一性;此外,海拔高度变幅对气温要素的影响存在差异,海拔高度变幅不大时,最低气温受影响程度一般大于最高气温和平均气温,海拔高度变幅超过 50 m 时,最高气温受影响程度一般大于最低气温和平均气温。

(3)在湖北省复杂地形条件下,QM 法对因台站迁移导致的气温序列均一性订正方面表现出良好适用性。武汉/五峰台站迁移导致的气温序列跳变在订正后得到改善,平均气温与区域参考站的相关系数分别从 0.82/0.86 提升至 0.96/0.94,订正后的气温年

际变化趋势与中国地表气温变化趋势更为接近。

本文采用的湖北省气温序列均一性评估和订正方法,能够改善资料区域一致性,减少热岛效应和地形特征对气温数据的显著影响。基于上述结论,提出以下选址与订正建议:为提升气象台站选址科学性,应尽量避免选取海拔高度变幅大于 50 m、位于山谷或陡坡等地形遮挡较大的站址;在评估迁站影响时,需综合考虑海拔高度变幅、水平位移,并引入城市热岛效应、地形遮挡等参数,利用 QM 等方法预评估新址气温订正量及区域一致性。

研究成果可为湖北省均一化气温数据集构建提供技术支撑。需要指出的是,气温序列的非均一性影响因素众多,往往还伴随仪器更换、探测环境改变等交叉影响,未来需结合更多元数据进行更精细化的均一性检验和订正。此外,湖北省西南部山区站点偏少、海拔高度差异大,可用参考站不多,未来可融合 PMFT 无参考序列技术及地形订正参数,进一步提升气温序列均一性检测和订正能力。

参考文献 (References):

- 陈哲,李庆祥,任芝花,等.2014.3种方法对中国探空温度资料均一性检验对比分析[J].*气象与环境学报*,30(6):141–146. Chen Z, Li Q X, Ren Z H, et al. 2014. Comparative analysis of three homogeneity testing methods for Chinese radiosonde temperature data [J]. *Journal of Meteorology and Environment*,30(6):141–146 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1673–503X.2014.06.019
- 次旺扎西,旦增伦珠,次央,等.2025.青藏高原地区不同海拔高度气温的变化特征[J].*高原山地气象研究*,45(1):32–38. Ci W Z X, Dan Z L Z, Ci Y, et al. 2025. Variation characteristics of temperature at different altitudes in the Tibetan Plateau region [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research*,45(1):32–38 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674–2184.2025.01.005
- 崔妍,徐文慧,李庆祥,等.2019.东北地区月气温序列的均一性检验和订正[J].*气象*,45(2):240–250. Cui Y, Xu W H, Li Q X, et al. 2019. Homogeneity testing and adjustment of monthly temperature series in northeast China [J]. *Meteorological Monthly*,45(2):240–250 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000–0526.2019.02.009
- 韩海涛,王雅萍,张瑾.2021.中国西北地区台站迁移对气候资料均一性影响的研究进展[J].*高原气象*,40(2):448–454. Han H T, Wang Y P, Zhang J. 2021. Research progress on the effect of station relocation on climate data homogeneity in Northwest China [J]. *Plateau Meteorology*,40(2):448–454 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000–0534.2020.00056
- 何冬燕,田红,邓伟涛.2012.多种方法在年平均风速均一性检验中的效果对比[J].*大气科学学报*,35(3):342–349. He D Y, Tian H, Deng W T. 2012. Comparative analysis of the effects of different methods in homogeneity test on annual mean wind speed [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*,35(3):342–349 (in Chinese). doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.2012.03.009
- 李庆祥, Menne M J, Williams C N. 2005. 利用多模式对中国气温序列中不连续点的检测[J].*气候与环境研究*,10(4):736–742. Li Q X, Menne M J, Williams C N. 2005. Detection of discontinuities in Chinese temperature series using multiple methods [J]. *Climatic and Environmental Research*,10(4):736–742 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006–9585.2005.04.04
- 刘佳,王盘兴,李丽平,等.2012.多种均一性检验方法比较研究[J].*气象*,38(9):1121–1128. Liu J, Wang P X, Li L P, et al. 2012. Comparative study of multiple homogeneity testing methods [J]. *Meteorological Monthly*,38(9):1121–1128 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000–0526.2012.09.011
- 刘小宁.2000.我国 40 年年平均风速的均一性检验[J].*应用气象学报*,11(1):27–34. Liu X N. 2000. Homogeneity testing of 40-year annual average wind speed in China [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*,11(1):27–34 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1001–7313.2000.01.004
- 司鹏,李庆祥,陈亮,等.2022.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*,80(1):136–152. Si P, Li Q X, Chen L, et al. 2022. Construction of homogenized daily maximum and minimum temperature series in Beijing since 1841 [J]. *Acta Meteorologica Sinica*,80(1):136–152 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2022.008
- 王凯,周月华,高媛.2015.湖北省冬季平均气温序列订正及其气候评价应用[J].*气象科技*,43(4):697–703. Wang K, Zhou Y H, Gao Y. 2015. Adjustment of winter average temperature series in Hubei Province and its application in climate assessment [J]. *Meteorological Science and Technology*,43(4):697–703 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1671–6345.2015.04.023
- 王星宇,严婧,刘莹,等.2025.防辐射罩区域自动气象站气温观测偏差分析及其订正方法[J].*暴雨灾害*,44(1):115–125. Wang X Y, Yan J, Liu Y, et al. 2025. Analysis of temperature observation bias and correction method for radiation shield in regional automatic weather stations [J]. *Torrential Rain and Disasters*,44(1):115–125 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024–035
- 魏娜,孙娟,姜创业,等.2012.台站迁移对陕西省气温资料均一性的影响及其偏差订正[J].*气象*,38(12):1532–1537. Wei N, Sun X, Jiang C Y, et al. 2012. Impact of station relocation on homogeneity of temperature data in Shaanxi Province and its bias adjustment [J]. *Meteorological Monthly*,38(12):1532–1537 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000–0526.2012.12.011
- 伍红雨,翟志宏,张羽.2019.1961—2018 年粤港澳大湾区气候变化分析[J].*暴雨灾害*,38(4):10–17. Wu H Y, Zhai Z H, Zhang Y. 2019. Analysis of climate change in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area during 1961–2018 [J]. *Torrential Rain and Disasters*,38(4):10–17 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045.2019.04.002
- 严中伟,李建平,周天军,等.2014.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*,44(10):2101–2111. Yan Z W, Li J P, Zhou T J, et al. 2014. Quantitative assessment of climate series homogenization as the basis for climate change studies [J]. *Science China: Earth Sciences*,44(10):2101–2111 (in Chinese). doi:10.1360/zd-2014-44-10-2101
- 曾琦,任国玉.2020.湖北省主要山系高影响天气指标空间特征分析与建模[J].*暴雨灾害*,39(2):87–95. Zeng Q, Ren G Y. 2020. Spatial characteristic analysis and modeling of high-impact weather indices in major mountain ranges of Hubei Province [J]. *Torrential Rain and Disasters*,39(2):87–95 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045.

2020.02.001

- 张高健,高山,惠英,等.2024.西安观测站长序列气温资料缺测记录插补和非均一性检验[J].*沙漠与绿洲气象*,18(1):149–155. Zhang G J, Gao S, Hui Y, et al. 2024. Interpolation of missing data and inhomogeneity testing for long-term temperature series at Xi'an meteorological station [J]. *Desert and Oasis Meteorology*,18(1):149–155 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2024.01.019
- 张高杰,曹丽娟,李亚丽.2013.均一性对西北五省气温变化特征影响分析[J].*农业灾害研究*,3(2-3):27–32. Zhang G J, Cao L J, Li Y L. 2013. Impact of homogeneity on temperature variation characteristics in five Northwestern Provinces [J]. *Journal of Agricultural Catastrophology*,3(2-3):27–32 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.2095-3305.2013.2-3.007
- 张天峰,王劲松,王有恒,等.2014.台站迁移对甘肃省气温记录均一性影响的检验[J].*成都信息工程大学学报*,29(1):1–10. Zhang T F, Wang J S, Wang Y H, et al. 2014. Impact of station relocation on homogeneity of temperature records in Gansu Province [J]. *Journal of Chengdu University of Information Technology*,29(1):1–10 (in Chinese). doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2014.01.001
- 张瑶,曹丽娟,朱亚妮.2023.黑龙江气温资料均一性订正及长期趋势分析[J].*气候与环境研究*,28(5):461–470. Zhang Y, Cao L J, Zhu Y N. 2023. Homogenization adjustment and long-term trend analysis of temperature data in Heilongjiang [J]. *Climatic and Environmental Research*,28(5):461–470 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2023.22031
- 赵美艳,李庆祥,任芝花,等.2018.重庆地区气温序列均一性检验及订正[J].*气象与环境学报*,34(6):148–155. Zhao M Y, Li Q X, Ren Z H, et al. 2018. Homogeneity testing and adjustment of temperature series in Chongqing [J]. *Journal of Meteorology and Environment*,34(6):148–155 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1673-503X.2018.06.018
- 周建平,孙照渤,倪东鸿,等.2013.中国气象台站迁移对年平均气温均一性的影响[J].*大气科学学报*,36(2):139–146. Zhou J P, Sun Z B, Ni D H, et al. 2013. Impact of meteorological station relocation on homogeneity of annual mean temperature in China [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*,36(2):139–146 (in Chinese). doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.2013.02.002
- Costa A C, Soares A. 2008. Homogenization of climate data: Review and new perspectives using geostatistics [J]. *Mathematical Geosciences*,41(3):291–305. doi:10.1007/s11004-008-9203-3
- Ducré-Robitaille J F, Vincent L A, Boulet G. 2003. Comparison of techniques for detection of discontinuities in temperature series [J]. *International Journal of Climatology*,23(9):1087–1101. doi:10.1002/joc.924
- Reeves J, Chen J, Wang X L, et al. 2007. A review and comparison of changepoint detection techniques for climate data [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*,46(6):900–915. doi:10.1175/JAM2493.1
- Sun W B, Li Q X, Huang B Y, et al. 2021. The assessment of global surface temperature change from 1850s: The C-LSAT2.0 ensemble and the CMST-interim datasets [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*,38(5):875–888. doi:10.1007/s00376-021-0360-3
- Shen L, Zhang Y, Chen Z, et al. 2018. Homogeneity test and correction of daily temperature and precipitation data (1978–2015) in North China [J]. *Advances in Meteorology*,2018:1–17. doi:10.1155/2018/2752730
- Vincent L A. 1998. A technique for the identification of inhomogeneities in Canadian temperature series [J]. *Journal of Climate*,11(5):1094–1104. doi:10.1175/1520-0442(1998)011<1094:ATFTIO>2.0.CO;2
- Wang X L, Chen H, Wu Y, et al. 2010. New techniques for the detection and adjustment of shifts in daily precipitation data series [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*,49(12):2416–2436. doi:10.1175/2010JAMC2376.1

(责任编辑 唐国瑛)