

2008-2023 年天津区域自动气象站小时气温数据的质量控制及均一性分析

司鹏¹ 廖捷^{2*} 李莹³ 姜罕盛¹

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 国家气候中心, 北京 100081

摘 要 为改进长序列区域自动站小时观测数据的质量, 提升其在应对和适应气候变化服务支撑能力中的应用价值, 本文以天津地区为例, 通过数据质量控制和均一性分析处理, 客观剔除了观测时间序列中错误数据的同时, 较好地消除和评估了观测站迁站、观测仪器要素升级、采集器更新等非气候因素对区域自动站观测序列造成的系统偏差影响, 研制得到 2008—2023 年区域自动气象站均一的小时气温数据。首先, 在数据质量控制中, 通过人工核实, 置缺或修正了 3 类气温要素 15 个站 148 条内部一致性疑误信息; 分别置缺小时平均气温、最高和最低气温气候异常值疑误信息 3 个站 19 条、18 个站 21 条、31 个站 66 条; 对应空间一致性分别置缺疑误信息 3 个站 5 条、2 个站 2 条和 1 个站 1 条。其次, 均一化分析中, 利用惩罚最大 F 检验 (PMFT), 结合台站元数据, 剔除了具有统计显著断点且有确切元数据支持的 6 个台站。最后, 通过与对应 11 个行政区国家站观测数据的对比评估, 结果表明研制的区域自动站小时气温数据是相对可靠的。另外, 基于研制的 106 个区域自动站小时观测数据分析表明, 近 10 年来天津地区, 最高气温的增加趋势和变化幅度相对最为明显, 其次是平均气温, 而最低气温相对最小, 特别是秋季, 其最高气温有 100% 的区域站表现出增加趋势, 其中 63.2% 统计显著 ($\alpha = 0.05$), 幅度范围为 1.316—3.760°C/10yr。

收稿日期 2024-10-22; **网络预出版日期**

作者简介 司鹏, 女, 硕士, 正高级工程师, 主要从事区域气候数据产品研发与气候变化分析研究。E-mail: spsbox@163.com

通讯作者 廖捷, 女, 正高级工程师, 主要从事气象观测数据质量控制评估与产品研发。E-mail: liaoj@cma.gov.cn

资助项目 中国气象局青年创新团队 CMA2023QN08, 中国气象局创新发展专项 CXFZ2024Q007, 国家自然科学基金项目 42475182、41905132

Funded by Youth Innovation Team of China Meteorological Administration (Grant CMA2023QN08), China Meteorological Administration Special Foundation for Innovation and Development (Grant CXFZ2024Q007), National Natural Science Foundation of China (NSFC) (Grants 42475182, 41905132)

关键词 区域自动气象站 长年代观测序列 均一性分析 小时气温 气温趋势特征
文章编号

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2503.24113

Quality Control and Homogeneity Analysis of Hourly Surface Air Temperature for Regional Automatic Meteorological Station over 2008-2023 in Tianjin Area

SI Peng¹ LIAO Jie^{2*} LI Ying³ JIANG Hansheng³

¹ Tianjin Meteorological Information Centre, Tianjin 300074

² National Meteorological Information Centre, Beijing 100081

³ National Climate Centre, Beijing 100081

Abstract In order to improve the quality of hourly observations with long-term series at regional automatic observation station, as well as enhance its application value in coping with and adapting to climate change, the homogenous hourly temperature data of regional automatic weather station over 2008-2023 has been developed, taking Tianjin area as an example. This dataset eliminates erroneous values from the observational time series objectively, it has also effectively mitigated and evaluated the systematic bias impact caused by non-climatic factors such as station relocation, upgrade of observational instrument elements, and collector renewal on the time series of regional automatic observation station. Firstly, in the data quality control, 148 errors of 15 stations detected by internal consistency for the three temperatures were set to the missing value or corrected by manual verification. And 19 errors of 3 stations, 21 errors of 18 stations and 66 errors of 31 stations were set to missing values detected by climate outlier, for hourly mean temperature, maximum and minimum temperature, respectively. Correspondingly, for the detecting results from the spatial consistency, 5 errors of 3 stations, 2 errors of 2 stations and 1 error of 1 station were also set to missing values. Secondly, in the homogenization analysis, 6 stations were eliminated by means of the maximum penalty F test (PMFT) combined with station metadata, which had

statistically significant breakpoints supported by accurate metadata. Finally, the developed hourly temperature data of regional automatic observation station was verified relatively reliable by comparing with the corresponding observations of the national stations at 11 administrative regions in Tianjin. In addition, using the hourly data of 106 regional automatic observation stations, it is shown that the increasing trend and the amplitude of the maximum temperature in Tianjin during the recent 10 years is relatively the most significant, followed by the mean temperature, and the minimum temperature is relatively the least, especially in autumn, 100% of its regional automatic observation stations show an increasing trend in the maximum temperature, among which 63.2% are statistically significant ($\alpha = 0.05$), with the amplitude range of 1.316-3.760°C/10yr.

Keywords Regional automatic weather station, Long-term observation series, Homogeneity analysis, Hourly surface air temperature, temperature trend characteristics

1 引言

气象站的观测记录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,特别是长年代连续可靠的高时空分辨率观测数据是揭示区域和局地极端天气气候事件发生发展及其机理的重要基础支撑 (Menne et al., 2018; Rohde and Hausfather, 2020)。近年来,我国气象数据的质量控制技术得到了突破性进展,实现了实时观测数据错误信息的识别和修正 (王海军等, 2014; 任芝花等, 2015; 刘莹等, 2016)。但是,在实际观测中由于台站迁移、仪器变更等不可避免地造成长期观测序列中存在明显的非均一性问题,导致缺乏检测区域或局地气候变化规律及预测未来气候变化趋势的可靠观测依据 (Rahimzadeh and Zavareh, 2014; Hewaarachchi et al., 2017)。另外,随着我国气象业务现代化和精细化发展,区域自动气象站观测系统已步入成熟阶段,相比国家级气象观测站,其具有站点覆盖密、时间分辨率高的优势,能够全面系统地捕捉到区域和局地天气气候变化过程。但目前来看,由于资料的不完整性和时间序列的非均一性等存在突出问题,使得区域自动站观测数据在天气气候和极端气候变化等业务中并没有得到很好地应用 (司鹏等, 2021)。

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的全球地表温度数据集（GISTEMP）（Hansen et al., 2010）、全球历史气候数据集（GHCN-monthly/daily）（Peterson et al., 1997; Lawrimore et al., 2011; Menne et al., 2012; Menne et al., 2018; Applequist et al., 2024）以及伯克利地球表面温度数据集（Berkeley Earth）（Muller et al., 2013; Rohde et al., 2013），英国的全球月平均地表气候要素数据集（CRU）（Jones et al., 2012）等。这些数据集的建立均是基于全球各大洲的国家级气象站日值或月值观测资料，通过对不同站点数据源的整合、时间和空间均匀性质量控制以及气候异常值分析等得到，但对观测序列中存在的非均一性并没有进行进一步处理。我国学者对长年代气候序列的建立也开展了多方面的研究，并且基于质量控制后的观测数据，国内已发布了一系列气温数据产品。Cao et al. (2013) 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。Yun et al. (2019) 对 Xu et al. (2018) 建立的全球陆表温度数据集（CMA-LSAT）进行了更新，得到整合的全球表面逐月温度数据集（CMST）。为进一步提高全球表面温度数据的覆盖率，基于 Li et al. (2021) 最新更新的全球陆表温度数据集（C-LSAT 2.0），Sun et al. (2021) 构建了 $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ 全球温度数据集（CMST-Interim）。这些数据集为全球和中国区域气候变化领域提供了相对可靠的观测基础，但其同样主要基于国家级气象站的观测数据。另外，对于长年代小时观测气候数据的研制，国际上主要通过质量控制或利用不同气候要素之间的偏差校正得到（Cerlini et al., 2019; Smith et al., 2022），而采用的均一化处理较少。近期，Dumitrescu et al. (2020) 在数据质量控制的基础上，利用 R 软件包气候工具（R package climatol: Climate Tools）首次对罗马尼亚 2009-2017 年 354 个气象站小时气温数据进行了均一化处理。同样，Izsák (2023) 使用改进的多分析均一化序列（MASH）和基于地面均一化数据基础的气象插值（MISH）技术，对匈牙利 1961-2020 年 41 个气象站小时相对湿度数据进行了均一化处理，提升了小时观测数据的时空代表性，以此更好地反映自然气候的变化。

综上，尽管目前国内外研制的长年代观测气候数据集，对全球/区域气候和极端气候变化研究的科学发展产生了深远影响（IPCC, 2021）。但是，建立的数据集中不乏缺少了时空分布更精更密的区域自动气象站的数据源。同时，在已建立的气候序列中，均一化处理技术的应用不够，严重阻碍了长年代极端气候事件变

化的深入研究。因此，本文拟以天津区域自动气象观测站为研究对象，在以往仅对区域自动站观测数据错误信息识别和修正的基础上，通过数据均一化分析处理，消除和评估区域自动站长时间观测序列的系统偏差，构建真实可靠的长年代均一化小时气温观测序列，为我国应对极端气候变化服务支撑能力建设提供更新更精密的观测基础。

2 资料与方法

2.1 研究资料

研究中用到的区域自动站气温观测数据源自天津气象大数据云平台（天擎数据库），选取天津地区 325 个站点 2008—2023 年小时平均气温、最高气温和最低气温数据（均为世界时）。同时，根据天津市气象局历年发布的省级气象观测站业务准入元数据表，整理了 325 个区域自动站建站至今历次的迁站时间、要素升级时间、采集器更新时间等元数据信息，作为判断气温时间序列均一性的客观依据。另外，作为参证资料，天津的 11 个行政区国家级气象站 2012—2023 年日平均气温、最高和最低气温数据源自司鹏等（2015）研制的天津 1951 年至今均一化逐日气温数据集，用于评估分析研制的区域气象站小时数据的可靠性。

2.2 数据质量控制

参照司鹏等（2021）和任芝花等（2015）对区域自动站的观测数据质量控制技术思路，结合天津地区实际观测数据特点，研究中依次采用气候界限值检查、内部一致性检查、6—8 月气温值为负值的检查、气候异常值检查以及空间一致性检查对天津 325 个站点 2008—2023 年小时平均气温、最高气温和最低气温数据进行质量控制，对于检查出的每一条疑误信息均进行人工核实，包括通过查阅台站元数据判断疑误信息的真实性，对气温时间序列的逻辑演变进行分析等。

（1）气候界限值检查：超出 -80°C — 60°C 范围的小时气温数据置为缺测；

（2）内部一致性检查：3 类小时气温数据是否符合，最低气温 $\leq$ 平均气温 $\leq$ 最高气温，如果出现逻辑错误，但该气温值在自身的时间序列变化中是合理的，以平均气温值为基准修改最高气温或最低气温值，但经人工核实确为错误数据则置为缺测。其中，以小时平均气温值为基准的修正方法是参照《地面气象自动观测规范（第一版）》（中国气象局，2020）对小时极值缺测数据的处理原则。

(3) 6—8 月气温值为负值的检查：出现该现象的小时气温数据置为缺测；

(4) 气候异常值检查：利用公式 1，分别将 3 类小时气温值与其对应日标准差进行比较，经人工核实确为错误数据置为缺测；

$$\bar{x}_i - n\sigma_i \leq x_{ij} \leq \bar{x}_i + n\sigma_i, \quad (1)$$

x_{ij} 为被检查的小时气温值， $\bar{x}_i$ 为被检查小时气温值所在日平均值， σ_i 为被检查小时气温值所在日标准差， $n=3-5$ ，若该日的小时值缺测 6 次或以上时，日平均值或日标准差的统计值视为缺测（中国气象局，2003），不做统计检查。

(5) 空间一致性检查：利用公式 2，将被检站与邻近站小时气温数据的差值进行比较分析，经人工核实确为错误数据置为缺测；

$$|Z_i - Z_{ij}| > n\sigma_{ij}, \quad (2)$$

Z_i 和 Z_{ij} 分别为被检站和邻近站标准化序列的小时气温值， σ_{ij} 为邻近站标准化序列的日值标准差，其中，日值标准差的统计原则与上述（4）中一致。为得到相对合理的检查结果，研究中拟定标准差倍数 $n=3-5$ ，邻近站则是分别选取距离被检站空间距离较近的 3、5、20 个站点，并通过算术平均进行构建。

2.3 均一化分析

依据数据完整性和时间序列连续性，对上述经过质量控制后的 325 个站点进行有效台站的筛选，选取平均气温、最高气温和最低气温同时满足条件的相同台站进行均一化分析。在均一化检验过程中，为避免小时观测序列的自相关问题，从而得到更为合理的序列非均一性断点，研究中将 3 类小时气温数据统计为日值（日平均气温、日极端最高气温、日极端最低气温）进行均一性检验，并且以日值检验结果为主，与台站元数据相互印证（迁站、要素升级、采集器更新等），以此确定区域自动站观测序列的均一性。这种利用相对较粗时间尺度数据分析确定气候时间序列均一性特征的做法，在已有的研究中有所应用（Si et al., 2021；司鹏等，2022；杨溯，2025）。

采用的检验方法为惩罚最大 F 检验（PMFT）（Wang, 2008），该方法在没有相对可靠参考序列的情况下，对序列非均一性断点的检验效果较好（Cao et al., 2017；Si et al., 2024）。最终，通过剔除检验出具有统计显著（ $\alpha = 0.01$ ）的并且有确切元数据支持的断点站点，形成时间上均一的天津区域自动站小时气温数据

集。

3 研究结果

3.1 质量控制结果

通过质量控制得到 3 类小时气温值主要存在内部一致性、气候异常值以及空间一致性问题。

内部一致性检查结果显示, 325 个站点数据在非缺测的情况下, 共检查出 15 个站点 148 条疑误信息, 其中, 2009—2010 年的疑误信息占 68.2%, 集中出现在 A2364 (宁河区)、A3171 (滨海新区) 和 A3585 (市区) 3 个站; 2012—2013 年占 28.4%, 集中出现在 A2169 (蓟州区) 和 A2565 (静海区) 2 个站。在处理过程中, 对 A2169 和 A3171 站采用的是以平均气温值为基准修改最高或最低气温值; 对 A3585 站出现疑误的小时平均气温值均置为缺测, 对 A2364 和 A2565 站出现疑误的小时最高和最低气温值均置为缺测。表 1 中以其他 10 个站为示例给出了内部一致性检查的修正结果。

表 1 内部一致性疑误数据的修正结果

Table 1 The corrected results for internal consistency error data

站号	疑误要素	出现时间	处理方法	修正值	原始值
A2302	最低气温	2015-02-22-01	置为缺测	999.9	35.8°C
A2468	平均气温	2009-02-05-17	置为缺测	999.9	12.0°C
A2506	最低气温	2010-06-13-17	置为缺测	999.9	-40.3°C
	最高气温		与小时平均值一致	32.7°C	3.2°C
A2566	最低气温	2011-12-07-14	与小时平均值一致	0.6°C	4.6°C
	最低气温	2009-02-12-15	置为缺测	999.9	30.0°C
	最高气温		与小时平均值一致	13.5°C	1.7°C
	最低气温	2009-02-12-16	置为缺测	999.9	10.9°C
A2605	最高气温		与小时平均值一致	10.0°C	1.3°C
	最低气温	2009-02-12-17	置为缺测	999.9	1.3°C
	最高气温		与小时平均值一致	17.1°C	10.1°C
	最低气温	2009-04-19-10	置为缺测	999.9	0.1°C
	最高气温		与小时平均值一致	11.0°C	1.1°C

A2804	最高气温	2010-07-13-09	与小时平均值一致	29.1°C	11.7°C
A3166	最低气温	2022-04-05-08	与小时平均值一致	20.3°C	23.7°C
A3504	最低气温	2011-01-05-04	置为缺测	999.9	10.3°C
	最高气温			999.9	25.6°C
A3561	平均气温	2010-03-15-17	置为缺测	999.9	36.0°C
A3586	最低气温	2011-01-04-13	与小时平均值一致	0.0°C	-1.0°C

气候异常值检查结果显示（表略），325 个站点数据在非缺测的情况下，3 类小时气温值在 5 倍标准差阈值没有检查出疑误数据；3 倍标准差阈值检查出的疑误数据量较大，平均气温、最高和最低气温的疑误信息分别为 9431、8722 和 7334 条，并且经初步人工核实，检查出的大多错误数据是正确数据；而对于 4 倍标准差阈值的检查结果，通过人工核实元数据的迁站和采集器更新时间等信息，以及核查显示错误的小时平均气温、最高气温和最低气温数据，在其气候时间序列变化过程中，是否符合观测序列的时间变化规律或是否出现显著的异常值等，发现 4 倍标准差阈值条件下得到的疑误信息是相对合理的。因此，最终选取的标准差倍数 $n=4$ 。为得到相对可靠的分析结果，研究中分别对 3 类小时气温数据的世界时和气象日界（北京时 20 时为日界）时次数据进行了检查，对比分析得到两种观测时制的疑误数据量和信息基本一致。

通过进一步人工核实表明，出现在一日始末的 2 个时次（如世界时 00 时和 23 时）的疑误信息基本为可信的。因此，以世界时检查结果为基准，对于最高和最低气温，将非 00 时和 23 时出现的疑误小时值均置为缺测（除了 A2169 站 2013 年 1 月 20 日 00 时、A2567 站 2009 年 11 月 5 日 00 时、A3465 站 2011 年 3 月 28 日 00 时最低气温以外），最终置缺的小时最高和最低气温值分别为 18 个站 21 条、31 个站 66 条。而对于平均气温来说，同样在考虑了 00 时和 23 时的疑误信息基本可信之外，对照了气象日界的检查结果，发现 A3364 站在 2011 年 1 月 14 日—19 日期间存在部分数据异常，基本为 35.0°C 以上，甚至达到 50.0°C，但由于相同时次的最高或最低气温缺测的原因，导致内部一致性检查中并未得到合理的疑误信息，因此，这里将此期间的小时平均气温异常值均置为缺测，最终置缺的小时平均气温值为 3 个站 19 条。

对于空间一致性检查，类似气候异常值检查思路，首先比较了 325 个站点数

据在非缺测的情况下，3 类气温数据在 3、4 和 5 倍标准差阈值的检查结果，得到 5 倍标准差的疑误数据量和信息均是相对合理的；进而，比较分析 5 倍标准差下，依据空间距离选取构建邻近站数量 3、5 和 20 个的检查结果，得到拟合 3 个站的疑误数据信息基本包含了 5 个和 20 个站的。因此，最终选取的标准差倍数 $n=5$ ，构建邻近站的数量为 3 个。

通过进一步的人工核实，3 类小时气温数据在 5 倍标准差、3 个站构建邻近站的检查结果中，同样存在一日始末的 2 个时次（如世界时 00 时和 23 时）疑误信息基本可信的问题。因此，最终去掉了 3 类气温数据检查结果中 00 时和 23 时（世界时）的所有疑误信息，以及 $|Z_i - Z_{ij}| < 5.0$ 的疑误信息，对剩余的经人工核实确为错误的疑误数据均置为缺测。平均气温、最高和最低气温置缺的疑误数据分别为 3 个站 5 条、2 个站 2 条、1 个站 1 条（如表 2 所示）。

表 2 空间一致性疑误数据的修正结果
Table 2 The corrected results for spatial consistency error data

疑误要素	站号	出现时间	原始值
平均气温	A2169	2020-12-24-06	-11.1°C
		2010-02-26-05	-32.0°C
	A2567	2010-04-12-08	-23.5°C
		2010-04-27-09	-48.0°C
	A2605	2009-04-19-05	46.4°C
最高气温	A2267	2017-02-16-05	-43.1°C
	A3105	2012-07-22-01	46.6°C
最低气温	A2801	2013-08-19-06	0.0°C

3.2 台站筛选

参照《地面气象观测规范》（中国气象局，2003）对 24 次定时记录平均值统计的原则，即一日中若 24 次小时记录缺测 6 次或以上时，不做日统计；一月中缺测 7 次或以上时，不做月统计；一年中缺测 1 次或以上时，不做年统计，分别对经过质量控制后的 3 类气温要素 2008—2023 年区域自动站的逐年有效站点数进行了统计，如图 1 所示。

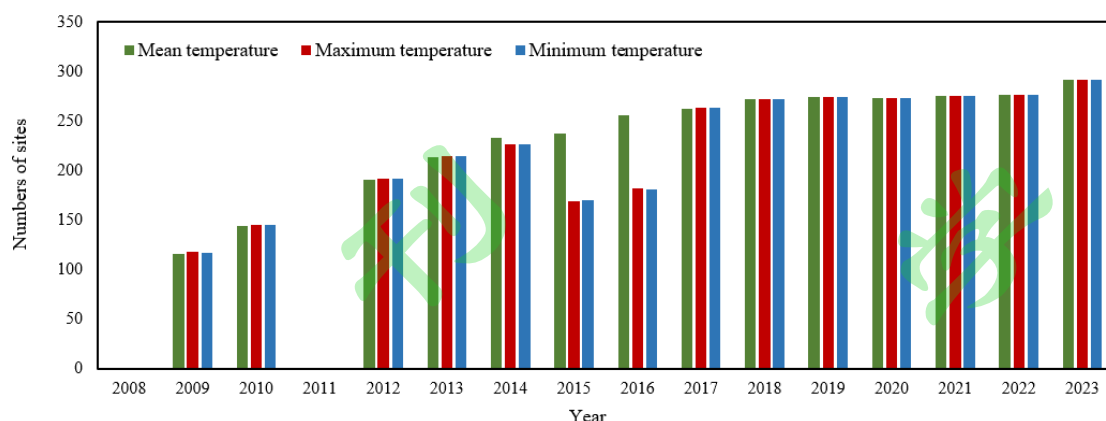


图 1 天津区域自动气象站 2008—2023 年逐年站点数量分布。

Fig. 1 The number of the regional automatic weather station in Tianjin during the period of 2008-2023.

图 1 显示，2008 年和 2011 年没有相对完整的区域自动站观测数据，因此，为保证研究数据的连续性和完整性，研究中依据观测序列长度至少包含 10 年或以上，并且 2012—2023 年连续有观测数据的原则，对质量控制后的 325 个站进行了进一步的筛选，得到符合条件的平均气温有 153 个站，最高气温和最低气温均有 114 个站。进而，筛选出 3 类气温要素共同的站为 112 个站（图 2），作为下一步均一化分析的基础。

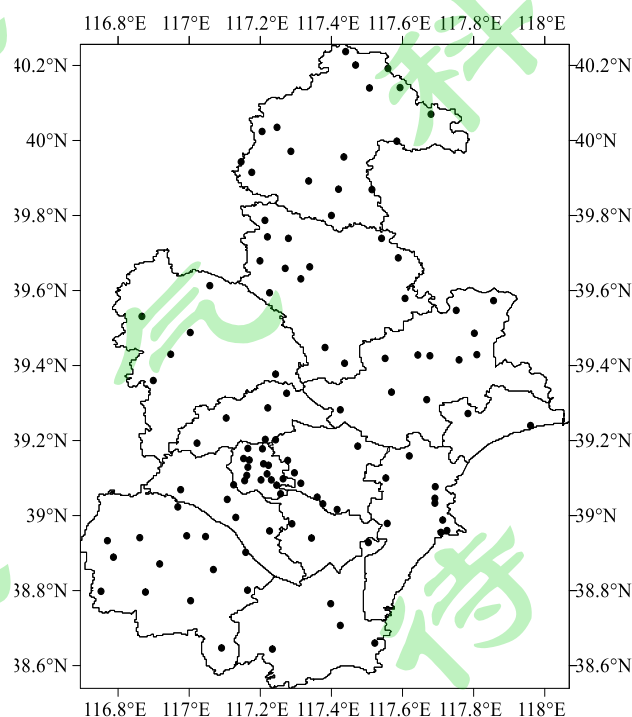


图 2 经过质量控制和筛选后的天津 112 个区域自动气象站站点空间分布。

Fig. 2 Spatial distribution of the 112 regional automatic weather stations in Tianjin after quality

control and screening.

3.3 均一化分析结果

将 112 个区域自动气象站小时观测数据由世界时转换为气象日界(北京时 20 时为日界), 对 2008 年 1 月 1 日—2023 年 12 月 31 日时间段的数据进行均一化分析。检验结果显示, 112 个区域自动站中, 日平均气温、日极端最高和最低气温被检验出的没有确切元数据支持的统计显著断点 ($\alpha = 0.01$) 的站点分别占 13.4%、37.5%、33.0% (表略), 断点均主要出现在 2013 年, 由于研究中采用的是非参考序列法 (PMFT) (Wang, 2008) 进行的均一性检验, 这种共同的断点很大程度上反映的是区域气候的异常变化, 因此, 对于这些站保持原始值不做处理。

表 3 平均气温非均一的区域自动站信息

Table 3 The inhomogeneity information of daily mean temperature for regional automatic weather stations

站号	站名	断点时间	检验统计量 PF_{max} 及 $\alpha = 0.01$ 置信区间	纬度	经度	海拔高度	断点原因
A2702	西青开发区气象观测站	2019-06-25	136.17 (94.03-104.51)	38°57'33"N	117°13'34"E	2.5m	迁站 (由西青大寺镇污水厂迁至西青花漾年华主题公园)
A3102	滨海新区北塘街黄岗水库气象观测站	2019-06-26	192.37 (91.67-101.81)	39°09'33"N	117°37'08"E	5.5m	迁站 (由滨海新区塘沽东江路与忘发街交口迁至滨海新区黄港水库二库)
A3105	滨海新区保税区海河道	2019-06-25	263.82 (94.16-104.68)	38°57'18"N	117°42'29"E	1.5m	迁站 (由滨海新区塘沽中心北路河滨

气象
观测
站

公园迁
至滨海
新区临
港党群
服务中
心)

表 4 最高气温非均一的区域自动站信息

Table 4 The inhomogeneity information of daily maximum temperature for regional automatic weather stations

站号	站名	断点时间	检验统计 量 PF_{max} 及 $\alpha = 0.01$ 置信区间	纬度	经度	海拔 高度	断点 原因
A3102	滨海新区塘沽北塘街黄岗水库气象观测站	2019-06-26	118.47 (64.79- 71.98)	39°09'33"N	117°37'08"E	5.5m	迁站(由滨海新区塘沽东江路与忘发街交口迁至滨海新区黄港水库二库)

表 5 最低气温非均一的区域自动站信息

Table 5 The inhomogeneity information of daily minimum temperature for regional automatic weather stations

站号	站名	断点时间	检验统计 量 PF_{max} 及 $\alpha = 0.01$ 置信区间	纬度	经度	海拔 高度	断点 原因
A2111	蓟州河湾六户气象观测站	2015-11-20	135.63 (55.26- 61.45)	39°59'54"	117°35'01"	30.0m	要素升级(由2要素升级6要素)
A2263	宝坻大钟庄气象观测站	2020-03-26	58.19 (51.22- 56.94)	39°41'43"	117°35'18"	4.2m	迁站(由原址宝坻大钟庄工业园区迁至新址)

							宝坻区 大钟庄 炮站)
A2505	静海 陈官屯 气象观测站	2017-04-28	161.78 (54.93- 61.09)	38°47'47"	116°52'36"	5.1m	要素升 级(由2 要素升 级6要)
A2706	西青 辛口镇 沙窝气 象观测 站	2019-06-21	142.83 (56.87- 63.29)	39°04'09"	116°58'34"	5.0m	迁站(由 原址西 青辛口 镇政府 迁至西 青辛口 沙沃中 心小学)
A3102	滨海新 区塘沽 街黄水 岗水库 气象观 测站	2019-06-26	163.28 (67.80- 75.22)	39°09'33"N	117°37'08"E	5.5m	迁站(由 滨海新 区塘沽 东江路 与忘发 街交口 迁至滨 海新区 黄港水 库二库)
A3105	滨海新 区保税 区河道 气象观 测站	2019-06-25	409.53 (66.87- 74.25)	38°57'18"N	117°42'29"E	1.5m	迁站(由 滨海新 区塘沽 中心北 路河滨 公园迁 至滨海 新区临 港党群 服务中 心)

表 3-5 给出了检验得到的 3 类气温要素具有统计显著断点并且有确切元数据支持的站点信息及其断点的统计显著情况。从表中可以看出，迁站是造成区域自动站气温观测序列非均一性的主要原因，其中，最低气温序列受其影响最为明显，其次是平均气温序列，而最高气温序列受其影响相对最小。这一特点在国家级气

象站气温序列的均一性检验中同样有所体现（司鹏等，2020）。

从各个断点的检验统计量来看，除了 A2263 站（宝坻区）最低气温以外，其他 3 类气温要素 PF_{max} 值均显著超过 $\alpha = 0.01$ 置信区间。所以，尽管 A2263 站的最低气温序列在 2020 年 3 月 26 日的时间点有元数据支持且统计显著，但为再次印证检验结果的合理性和可靠性，研究中重新对 A2263 站 2008—2023 年小时最低气温序列进行了人工核实，通过对小时数据曲线图的分析，发现 2011 年 12 月 7 日 06 时的最低气温值 -46.5°C 为错误数据（但在质量控制过程中并没有被检查出来，主要原因是该日仅有 3 个时次有观测值，其他均为缺测）。因而，将该数值改为缺测，重新对 A2263 站进行均一性检验，得到 2020 年 3 月 26 日的断点从统计意义上（ $\alpha = 0.01$ ）并不显著，因此保留该站不做处理。

最终，为保证研究要素的一致性，这里对 3 类气温要素的 A2111（蓟州区）、A2505（静海区）、A2702（西青区）、A2706（西青区）、A3102（滨海新区）、A3105（滨海新区）6 个站均进行了删除（即 112 个站中，非均一的站点比例仅为 5.4%），形成天津 2008—2023 年相对均一的区域自动站小时平均气温、最高和最低气温序列（共 106 个站点文件）。由此，从该结果可以看出，影响天津区域自动站观测数据质量的因素可能主要是随机误差和错误误差，而不是序列的非均一性。

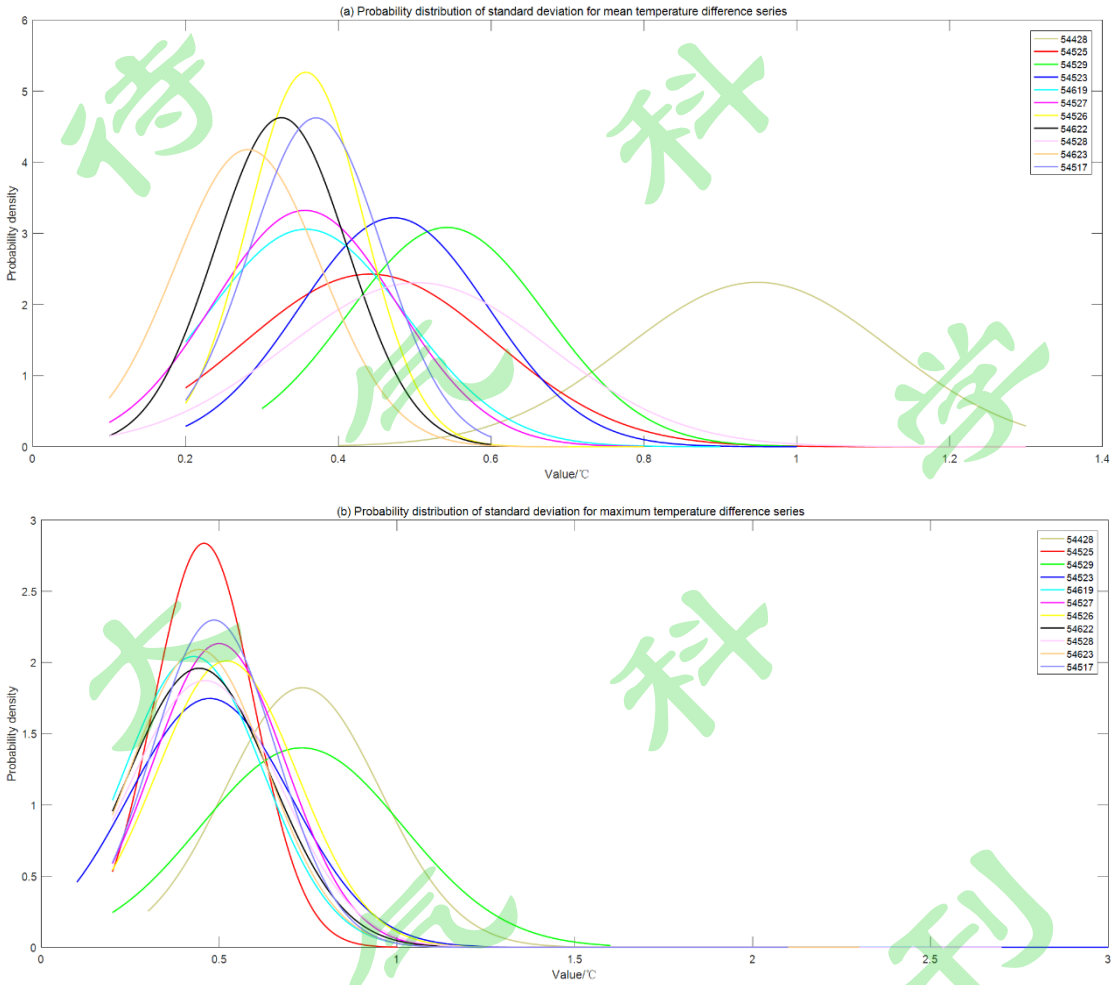
4 结果评估

4.1 差值序列标准差

为便于比较，研究中将 106 个区域自动站小时气温序列由世界时转为气象日界（北京时 20 时为日界）时次，并分别统计为日平均气温、日最高气温和日最低气温，选取其中序列没有间断的完整的时间段 2012—2023 年（图 1）进行分析。同时，考虑到每个行政区的区域站数量有限且气温要素具有较好的气候连续性，研究中利用算术平均来构建每个行政区的区域站平均序列，并且依次以蓟州（54428）、宝坻（54525）、宁河（54529）、武清（54523）、静海（54619）、西青（54527）、东丽（54526）、津南（54622）、北辰（54528）、滨海新区（54623）及市区（54517）11 个行政区的国家级气象站气温观测数据为参证值，分别对区域站平均序列以及逐个区域站的数据质量进行评估，评估指标为区域站与国家站日值差值序列的标准差。

图 3 给出了 11 个行政区的区域站平均序列与对应国家级气象站 3 类气温要

素日值差值标准差的概率分布。从图中可以看出，日平均气温的差值标准差差异相对最小，其次是日最高气温，而日最低气温相对最大。从差异幅度上看，11个行政区日平均气温差值标准差在 0.0—0.8℃ 范围内的均达到 97.3%以上（除 54428 区），日最高气温和日最低气温差值标准差在 0.0—1.5℃ 范围内的分别达到 99.5%、94.0%（除 54428 区）以上。其中，54428 区的日平均气温和日最低气温在 0.0—1.5℃ 和 0.0—2.0℃ 范围内的分别达到 100%、93.2%。



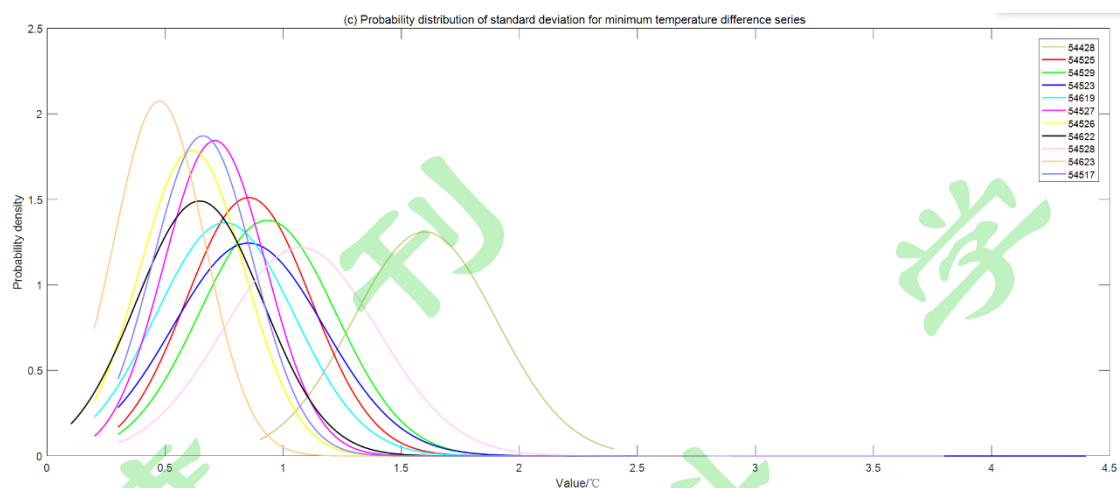
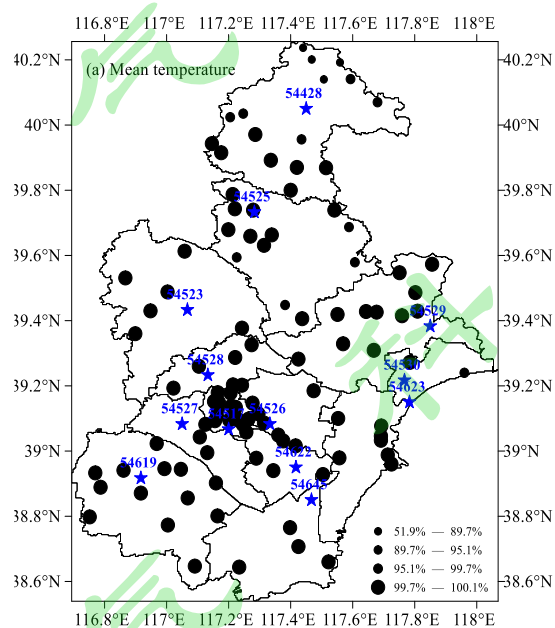


图 3 区域站平均序列与国家级气象站日平均气温 (a)、日最高气温 (b) 和日最低气温 (c) 差值标准差的概率密度分布。

Fig. 3 Probability density function of standard deviation for daily observation difference series between average regional automatic weather station and national weather station (a for mean temperature; b for maximum temperature; c for minimum temperature).



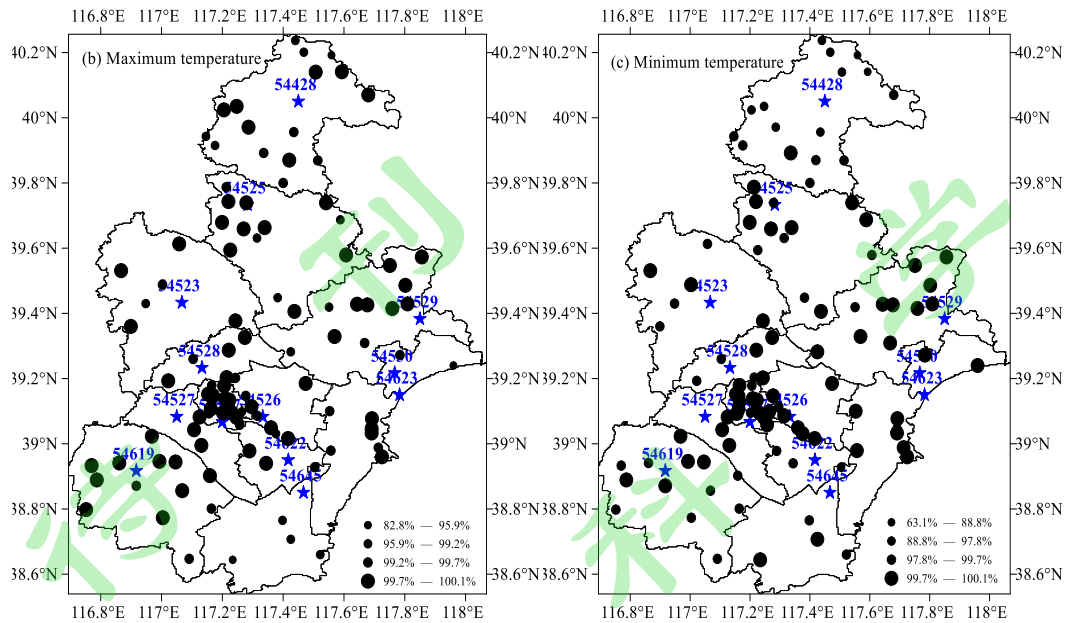


图 4 逐个区域站与其对应国家级气象站日平均气温 (a)、日最高气温 (b) 和日最低气温 (c) 差值标准差分别在 0.0—1.5℃、0.0—2.0℃ 和 0.0—2.5℃ 范围内所占比例。

Fig. 4 The proportion of standard deviation for daily observation difference series between each regional automatic weather station and its corresponding national weather station (a for mean temperature; b for maximum temperature; c for minimum temperature) in the range of 0.0-1.5℃, 0.0-2.0℃ and 0.0-2.5℃, respectively.

对于日平均气温来说 (图 4a), 与对应国家级气象站差值标准差比例在 0.0—1.5℃ 范围内, 除了蓟州区 (54428) 的 A2165 (51.9%)、A2113 (86.1%)、A2109 (89.1%) 和 A2112 (89.6%) 4 个站以外, 其他均达到 95% 以上, 并且达到 100% 的区域站占 80% 左右。查阅台站元数据信息发现, 这 4 个站的海拔高度分别为 555m、330m、230m、140mm, 明显高于该区对应国家站的海拔高度 (32m)。日最高气温 (图 4b) 的各个区域站与对应国家站差值标准差在 0.0—2.0℃ 范围内, 除了滨海新区 (54623) 的 A2804 (82.8%)、A2661 (93.4%) 以及蓟州区 (54428) 的 A2165 (92.3%) 以外, 其他均达到 95% 以上, 并且达到 99% 以上的区域站占 83%。而日最低气温的差值标准差相对最大, 从图 4c 给出的 0.0—2.5℃ 范围内统计结果显示, 蓟州区 (54428) 的 A2165 站相对最低为 63.1%, 另外该区还有 5 个区域站的占比在 86.6%—92.3%, 包括 A2112 (88.8%)、A2109 (91.0%) 和 A2113 (92.1%), 同样这些站的海拔高度基本在 100m—230m 左右。这也解释了上述图 3 分析得到的 54428 区的日平均气温和日最低气温差值标准差相对其他行政区较大的原因。除此之外, 其他区域站日最低气温差值标准差均达 95% 以上, 其中 99% 以上的占 83%。

因此,综合来看,通过质量控制以及均一性分析得到的天津 106 个区域自动气象站的小时平均气温、最高和最低气温数据具有一定的可靠性。

4.2 基于区域自动站观测数据的天津气温趋势变化特征

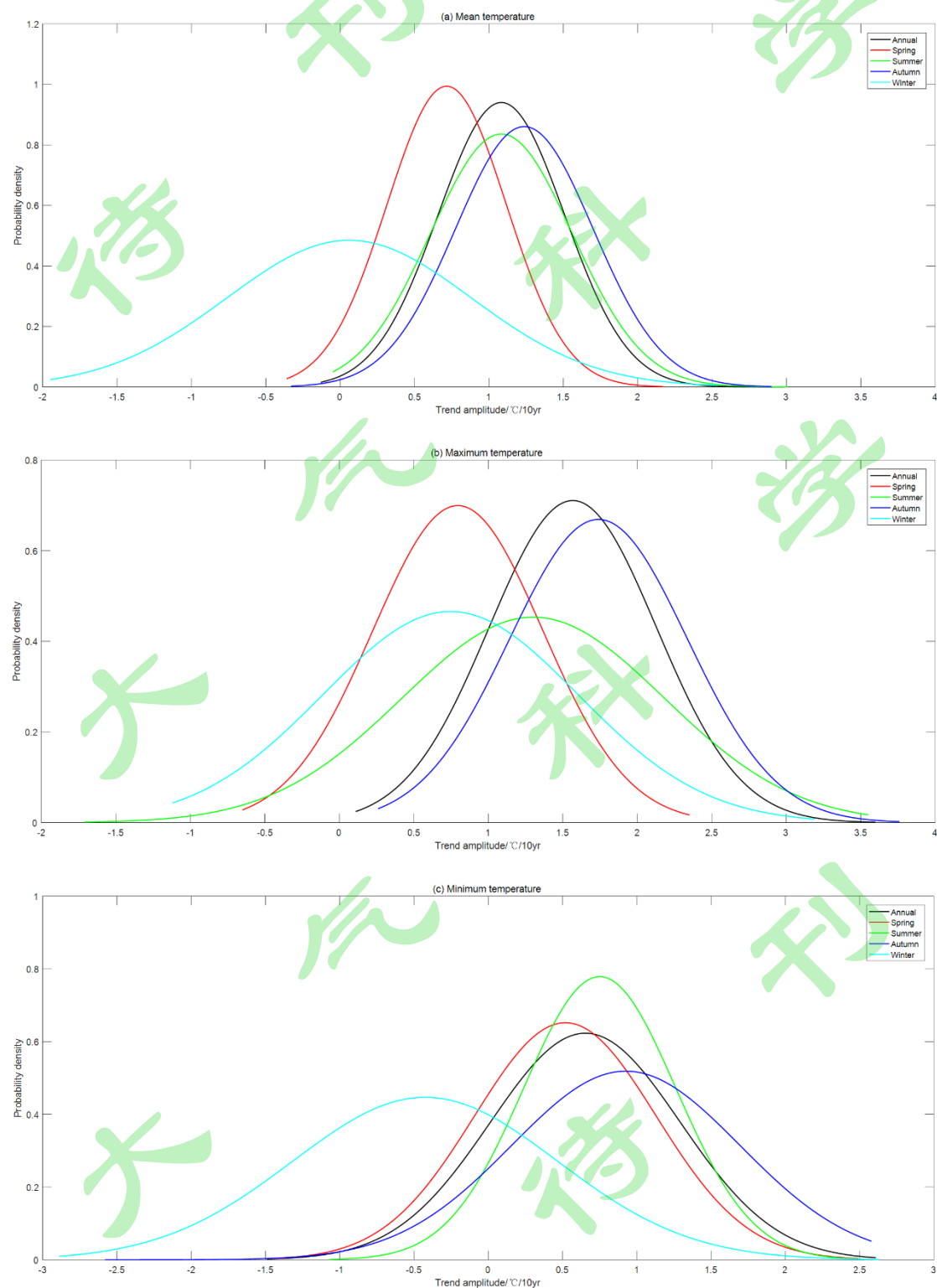


图 5 天津区域自动站 2012—2023 年平均气温 (a)、最高气温 (b)、最低气温 (c) 的年和

各季节趋势变化的概率分布。

Fig. 5 Probability density function of trends in annual and seasonal mean temperature (a), maximum (b) and minimum temperature (c) series based on hourly observations at regional automatic weather station during the period of 2012-2023.

研究中采用迭代加权最小二乘法（鲁棒回归）（Cross, 1977; 施能等, 1992; Si et al., 2014）对天津 106 个区域自动站 2021—2023 年平均气温、最高和最低气温年、各季节序列的趋势变化进行拟合。鲁棒回归分析能够在因变量样本可能存在粗差（离群值、异常值、缺测值或多重共线性等）的前提下，尽可能保证回归参数求解的正确性，并且相比最小二乘估计能够给出相对无偏的、有效的参数估计量。

如图 5 所示，对于年序列变化来说，106 个区域气象站的平均气温（图 5a）有 67.0% 的站呈显著增加趋势（ $\alpha = 0.05$ ），变化幅度范围 $0.863—2.984^{\circ}\text{C}/10\text{yr}$ ，其中 94.4% 的站达 $1.0^{\circ}\text{C}/10\text{yr}$ 以上。最高气温（图 5b）呈显著增加趋势（ $\alpha = 0.05$ ）的站占 79.2%，变化幅度范围 $1.100—3.600^{\circ}\text{C}/10\text{yr}$ ，达到 $1.5^{\circ}\text{C}/10\text{yr}$ 以上的站有 71.4%。对于最低气温来说（图 5c），呈显著增加趋势（ $\alpha = 0.05$ ）的站有 40.6%，变化幅度范围 $0.660—2.606^{\circ}\text{C}/10\text{yr}$ ，其中 69.8% 的站达到 $1.0^{\circ}\text{C}/10\text{yr}$ 以上；另外还有 15.1% 的站呈趋势减少变化，但从统计学意义上，仅有蓟州区的 A2162 和宝坻区的 A2202 年序列减少趋势是统计显著的（ $\alpha = 0.05$ ），幅度分别为 $1.467^{\circ}\text{C}/10\text{yr}$ 、 $1.492^{\circ}\text{C}/10\text{yr}$ 。

从季节序列变化来看，平均气温（图 5a），春季有 97.2% 的站表现出增加趋势，但仅有市区的 A3506、A3510、A3512 站统计显著（ $\alpha = 0.05$ ），幅度分别为 $2.174^{\circ}\text{C}/10\text{yr}$ 、 $1.330^{\circ}\text{C}/10\text{yr}$ 、 $1.428^{\circ}\text{C}/10\text{yr}$ 。夏季呈增加趋势的站达到了 98.1%，其中 46.2% 的站统计显著（ $\alpha = 0.05$ ），幅度范围 $0.939—3.014^{\circ}\text{C}/10\text{yr}$ 。同样，秋季也有 98.1% 的站表现出增加趋势，其中统计显著的占 70.2%，幅度范围 $1.057—2.905^{\circ}\text{C}/10\text{yr}$ 。而冬季呈增加趋势的站有 52.8%，但仅有市区的 A3512 是统计显著的（ $\alpha = 0.05$ ），幅度为 $1.722^{\circ}\text{C}/10\text{yr}$ ；另外，还有 46.2% 的站表现出减少趋势，但仅有宝坻区的 A2211 是统计显著的（ $\alpha = 0.05$ ），幅度为 $1.945^{\circ}\text{C}/10\text{yr}$ 。

最高气温（图 5b），春季有 92.5% 的站表现出增加趋势，其中宝坻区 A2263、市区 A3512 统计显著（ $\alpha = 0.05$ ），幅度分别为 $2.346^{\circ}\text{C}/10\text{yr}$ 、 $2.308^{\circ}\text{C}/10\text{yr}$ 。夏季呈增加趋势的站有 96.2%，其中的 39.2% 统计显著（ $\alpha = 0.05$ ），幅度范围 $1.319—$

3.551°C/10yr; 同时, 宁河区的 A2309 和津南区的 A3302 表现出显著的减少趋势 ($\alpha = 0.05$), 幅度分别为 1.710°C/10yr、1.122°C/10yr。秋季 100% 的区域站表现出增加趋势, 其中的 63.2% 统计显著 ($\alpha = 0.05$), 幅度范围 1.316—3.760°C/10yr。冬季有 84.0% 的站呈增加趋势, 但仅有 7.9% 是统计显著的 ($\alpha = 0.05$), 幅度范围 2.308—3.192°C/10yr。

最低气温 (图 5c), 春季有 84.9% 的站呈增加趋势, 仅有 1.3% 统计显著 ($\alpha = 0.05$), 幅度范围 0.964—2.493°C/10yr; 另外, 蓟州区的 A2118 和 A2162 表现出显著减少趋势 ($\alpha = 0.05$), 幅度分别为 1.419°C/10yr、0.713°C/10yr。夏季有 95.3% 的站呈增加趋势, 其中, 33.7% 统计显著 ($\alpha = 0.05$), 幅度范围 0.958—2.512°C/10yr。秋季呈增加趋势的站有 92.5%, 其中, 趋势变化统计显著的占 45.9% ($\alpha = 0.05$), 幅度范围 1.030—2.581°C/10yr; 而蓟州区的 A2162 表现出显著的减少趋势 ($\alpha = 0.05$), 幅度为 2.583°C/10yr。冬季 67.9% 的站呈减少趋势, 其中宝坻区 A2263、滨海新区 A2604、市区 A3517 是统计显著的 ($\alpha = 0.05$), 幅度分别为 2.017°C/10yr、2.889°C/10yr、1.889°C/10yr。

因此, 基于区域自动站观测数据分析表明, 从年尺度变化来看, 天津地区最高气温的增加趋势和变化幅度相对最为明显, 其次是平均气温, 而最低气温相对最小。对于季节尺度来说, 3 类小时气温的变化特点与年尺度基本一致, 其中, 夏季和秋季的气温增加趋势和变化幅度相对显著, 特别是秋季。这一研究结论与近年来包括中国在内的世界各地出现破纪录高温热浪一样 (Vautard et al., 2020; Ding et al., 2022; Ma et al., 2023; White et al., 2023; Qian et al., 2024), 均反映出快速气候变暖背景下对极端高温事件发生发展的加剧效应 (Fischer et al., 2021; Mckinnon et al., 2024; Xu et al., 2025)。

5 结论与讨论

本文基于天津地区 325 个区域自动气象站小时平均气温、最高气温和最低气温观测数据, 结合建站至今的迁站、要素升级以及采集器更新等台站元数据信息, 通过数据质量控制和均一性检验分析, 形成了 2008—2023 年时间上均一的天津区域自动站小时气温数据集。得到的主要结论如下:

(1) 数据质量控制结果显示, 3 类小时气温值主要存在内部一致性、气候异常值以及空间一致性问题。查阅台站元数据信息以及分析气温时间序列的变化特

征，通过人工核实，置缺或修正了 15 个站 148 条内部一致性疑误信息；针对气候异常值问题，在 4 倍标准差阈值条件下，分别置缺小时平均气温、最高和最低气温疑误信息 3 个站 19 条、18 个站 21 条、31 个站 66 条；对于空间一致性检查结果，在 5 倍标准差、3 个邻近站的阈值条件下，分别置缺小时平均气温、最高和最低气温值 3 个站 5 条、2 个站 2 条以及 1 个站 1 条。

(2) 依据观测时间序列长度至少包含 10 年或以上，并且 2012—2023 年连续有观测数据的原则，筛选出了质量控制后的 3 类气温要素共同区域站 112 个。并在此基础上，利用惩罚最大 F 检验 (PMFT)，结合台站元数据，对 112 个站的日数据进行了均一性检验，得到迁站是造成区域自动站气温观测序列非均一性的主要原因，其中，最低气温序列受其影响最为明显，其次是平均气温序列，而最高气温序列受其影响相对最小。

(3) 进而，研究中对 3 类气温要素具有统计显著断点并且有确切元数据支持的 6 个区域站进行了剔除，最终得到天津 106 个区域自动站 2008—2023 年相对均一的小时平均、最高和最低气温序列。通过对其 2012—2023 年区域平均序列以及逐个区域站分别与对应 11 个行政区的国家级气象站日值差值标准差的对比分析得到，研制的 106 个区域自动站小时气温数据是相对可靠的。

(4) 基于区域自动站观测数据分析表明，近 10 年来天津地区，最高气温的增加趋势和变化幅度相对最为明显，其次是平均气温，而最低气温相对最小，其中，年序列呈显著增加趋势 ($\alpha=0.05$) 的站分别占 79.2%、67.0%、40.6%，对应的变化幅度范围分别为 1.100—3.600°C/10yr、0.863—2.984°C/10yr、0.660—2.606°C/10yr。并且夏季和秋季的气温增加趋势和变化幅度最为显著，特别是秋季，其最高气温有 100% 的区域站表现出增加趋势，其中 63.2% 统计显著 ($\alpha=0.05$)，幅度范围为 1.316—3.760°C/10yr。

需要指出的是，在对区域自动站观测数据进行均一化分析中，最为困难的是台站元数据的收集整理。如果没有相对详尽的元数据信息，很大程度上会造成无法客观判断部分断点的可靠性，同时也可能导致无法找到均一性相对较好的站点作为待检站参考序列的客观依据。所以，本研究是在有合理元数据佐证的情况下，仅对非均一的站点进行了剔除，而并未对其进行订正，并且在没有建立参考序列的情况下，通过对断点的检验统计量 PF_{max} 值进行分析，来进一步断定站点的均

一性。所以，在未来区域自动站观测序列均一化数据集的研制工作中，详尽台站元数据的收集整理仍然是重中之重，以此通过建立合理可靠的参考序列来实现长年代气候观测数据的均一性订正，为区域/局地气候和极端气候变化研究领域提供更加完整可靠的数据基础。

参考文献 (References)

- Applequist S, Durre I, Vose R. 2024. The Global Historical Climatology Network Monthly Precipitation Dataset, Version 4[J]. *Sci. Data*, 11, 633. doi: 10.1038/s41597-024-03457-z
- 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
- Cao L J, Yan Z W, Zhao P, et al. 2017. Climatic warming in China during 1901-2015 based on an extended dataset of instrumental temperature records[J]. *Environ. Res. Lett.*, 12(6): 064005. doi: 10.1088/1748-9326/aa68e8
- Cerlini P B, Silvestri L, Saraceni M. 2020. Quality control and gap-filling methods applied to hourly temperature observations over central Italy[J]. *Meteorol. Appl.*, 27(3): e1913. doi: 10.1002/met.1913
- Cross A M, 1977. Confidence intervals for bisquare regression estimates[J]. *J. Am. Stat. Assoc.*, 72(358): 341-354. doi: 10.1080/01621459.1977.10481001
- Ding T, Li X, Gao H. 2022. An unprecedented high temperature event in southern China in autumn 2021 and the essential role of the mid-latitude trough[J]. *Adv. Climate Change Res.*, 13(6): 772-777. doi: 10.1016/j.accre.2022.11.002
- Dumitrescu A, Cheval S, Guijarro J A. 2020. Homogenization of a combined hourly air temperature dataset over Romania[J]. *Int. J. Climatol.*, 40(5): 2599-2608. doi: 10.1002/joc.6353
- Fischer E M, Sippel S, Knutti R. 2021. Increasing probability of record-shattering climate extremes[J]. *Nat. Clim. Change*, 11(8): 689. doi:10.1038/s41558-021-01092-9
- Hansen J, Ruedy R, Sato M, et al, 2010. Global surface temperature change[J]. *Rev.*

- Geophys., 48 (4): RG4004. doi: 10.1029/2010RG000345
- Hewaratchi A P, Li Y B, Lund R, et al. 2017. Homogenization of daily temperature data[J]. J. Climate, 30 (3): 985-999. doi: 10.1175/jcli-d-16-0139.1
- IPCC, 2021. 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.
- Izsák B. 2023. Homogenization and interpolation of relative humidity hourly values with MASH and MISH software[J]. Int. J. Climatol., 43 (13): 6285-6299. doi: 10.1002/joc.8205
- Jones P D, Lister D H, Osborn T J, et al., 2012. Hemispheric and large-scale land-surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2010[J]. J. Geophys. Res. Atmos., 117 (D5): D05127. doi: 10.1029/2011JD017139
- Lawrimore J H, Menne M J, Gleason B, et al., 2011. An overview of the global historical climatology network monthly mean temperature data set, Version 3[J]. J. Geophys. Res. Atmos., 116, D19121. doi: 10.1029/2011JD016187
- Li Q X, Sun W B, Yun X, et al., 2021. An updated evaluation of the global mean land surface air temperature and surface temperature trends based on CLSAT and CMST[J]. Climate Dyn., 56 (1-2): 635-650. doi: 10.1007/s00382-020-05502-0
- 刘莹, 严婧, 王海军, 等. 2016. 基于温湿关系的小时相对湿度数据质量控制方案研究[J]. 暴雨灾害, 35 (3): 234-242. Liu Ying, Yan Jing, Wang Haijun, et al. 2016. Study on an hourly relative humidity data quality control scheme based on the relationship between temperature and relative humidity[J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 35(3): 234-242. doi: 10.3969/j.issn.1004-9045.2016.03.006
- Ma Y Y, Chen Y T, Hu X X, et al. 2023. The 2022 record-breaking high temperature in China: Sub-seasonal stepwise enhanced characteristics, possible causes and its predictability[J]. Adv. Climate Change Res., 14 (5): 651-659. doi: 10.1016/j.accre.2023.09.008
- Mckinnon K A, Simpson I R, Williams A P. 2024. The pace of change of summertime temperature extremes[J]. PNAS, 121 (42): e2406143121. doi:

10.1073/pnas.2406143121

- Menne M J, Durre I, Vose R S, et al. 2012. An overview of the global historical climatology network-daily database[J]. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, 29 (7): 897-910. doi: 10.1175/JTECH-D-11-00103.1
- Menne M J, Williams C N, Gleason B E, et al., 2018. The global historical climatology network monthly temperature dataset, Version 4[J]. *J. Climate*, 31 (24): 9835-9854. doi: 10.1175/JCLI-D-18-0094.1
- Muller R A, Rohde R, Jacobsen R, et al., 2013. A new estimate of the average earth surface land temperature spanning 1753 to 2011[J]. *Geoinformatics & Geostatistics: An Overview*, 1, 1. doi: 10.4172/2327-4581.1000101
- Peterson T C, Vose R S, 1997. An overview of the global historical climatology network temperature database[J]. *B. Am. Meteorol. Soc.*, 78 (12): 2837-2850. doi: 10.1175/1520-0477(1997)078<2837:AOOTGH>2.0.CO;2
- Qian C, Ye Y B, Jiang J C, et al. 2024. Rapid attribution of the record-breaking heatwave event in North China in June 2023 and future risks[J]. *Environ. Res. Lett.*, 19 (1): 014028. doi:10.1088/1748-9326/ad0dd9
- Rahimzadeh F, Zavareh M N. 2014. Effects of adjustment for non-climatic discontinuities on determination of temperature trends and variability over Iran[J]. *Int. J. Climatol.*, 34 (6): 2079-2096. doi: 10.1002/joc.3823
- Rohde R, Muller R, Jacobsen R, et al., 2013. Berkeley earth temperature averaging process[J]. *Geoinformatics & Geostatistics: An Overview*, 1, 2. doi: 10.4172/gigs.1000103
- Rohde R A, Hausfather Z, 2020. The Berkeley Earth land/ocean temperature record[J]. *Earth Syst. Sci. Data*, 12 (4): 3469-3479. doi: 10.5194/essd-2019-259
- 任芝花, 张志富, 孙超, 等. 2015. 全国自动气象站实时观测资料三级质量控制系统研制 [J]. *气象*, 41 (10): 1268-1277. Ren Zhihua, Zhang Zhifu, Sun Chao, et al. 2015. Development of three-step quality control system of real-time observation data from AWS in China [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 41(10): 1268-1277. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2015.10.010

- Smith C D, Mekis E, Hartwell M, et al. 2022. The hourly wind-bias-adjusted precipitation data set from the Environment and Climate Change Canada automated surface observation network (2001–2019) [J]. *Earth Syst. Sci. Data*, 14 (12): 5253–5265. doi: 10.5194/essd-14-5253-2022
- 施能, 王建新. 1992. 稳健回归的反复加权最小二乘迭代解法及其应用[J]. *应用气象学报*, 3(3): 353–358. Shi Neng, Wang Jianxin. 1992. A method of iteratively reweighted least square and its application[J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 3(3): 353–358. doi: CNKI:SUN:YYQX.0.1992-03-013
- Si P, Zheng Z F, Ren Y, et al. 2014. Effects of urbanization on daily temperature extremes in North China[J]. *J. Geogr. Sci*, 24 (2): 349–362. doi:10.1007/s11442-014-1092-4
- 司鹏, 徐文慧. 2015. 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*, 20 (6): 663–674. Si Peng, Xu Wenhui. 2015. Homogenization of Tianjin daily surface air temperatures by software pack RHtestsV4 during 1951–2012[J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 20 (6): 663–674. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.15014
- 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, 5–18. Si Peng, Wang Ji, Li Huijun, et al. 2020. Homogenization and application of meteorological observation data at provincial level. China Meteorological Press, Beijing, China (in Chinese), 5–18.
- Si P, Li Q X, Jones P. 2021. Construction of homogenized daily surface air temperature for the city of Tianjin during 1887–2019[J]. *Earth Syst. Sci. Data*, 13 (5): 2211–222. doi: 10.5194/essd-13-2211-2021
- 司鹏, 梁冬坡, 陈凯华, 等. 2021. 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*, 26 (2): 142–154. Si Peng, Liang Dongpo, Chen Kaihua, et al. 2021. Urbanization Effect on Average and Extreme Temperature Warming in Tianjin during the last 60 Years[J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 26(2): 142–154. doi:10.3878/j.issn.1006-585.2020.20060

- 司鹏, 郭军, 赵煜飞, 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 Peng, Guo Jun, Zhao Yufei, et al. 2022. New series of daily maximum and minimum temperature observations for Beijing, China since 1841[J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 80(1): 136-152. doi:10.11676/qxxb2022.008
- Si P, Li Q X, Chen X Y, et al. 2024. Construction of daily precipitation series and the observational characteristics of extreme precipitation in Tianjin, China, during 1888-2022[J]. Adv. Climate Change Res., 15(1): 52-61. doi: 10.1016/j.accre.2024.02.002
- 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]. Adv. Atmos. Sci., 38 (5): 875-888. doi: 10.1007/s00376-021-1012-3
- Vautard R, Aalst M V, Boucher O, et al. 2020. Human contribution to the record-breaking June and July 2019 heatwaves in Western Europe[J]. Environ. Res. Lett., 15 (9): 094077. doi:10.1088/1748-9326/aba3d4
- White R H, Anderson S, Booth J F, et al. 2023. The unprecedented Pacific Northwest heatwave of June 2021[J]. Nat. Commun., 14 (1): 727. doi: 10.1038/s41467-023-36289-3
- 王海军, 闫养养, 向芬, 等. 2014. 逐时气温质量控制中界限值检查算法的设计[J]. 高原气象, 33 (6): 1722-1729. Wang Haijun, Yan Qiaoqiao, Xiang Fen, et al. 2014. Algorithm design of quality control for hourly air temperature[J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 33 (6): 1722-1729. doi: 10.7522/j.issn.1000-0534.2014.00028
- Wang X L. 2008. Penalized maximal F test for detecting undocumented mean shift without trend change [J]. J. Atmos. Ocean. Tech., 25(3): 368-384. doi: 10.1175/2007JTECHA982.1
- 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 (15): 2513-2536. doi: 10.1007/s00382-017-3755-1
- Xu Q Y, Wei S H, Li Z C, et al. 2025. A new evaluation of observed changes in diurnal

temperature range[J]. Geophys. Res. Lett., In Review.

Yun X, Huang B Y, Cheng J Y, et al., 2019. A new merge of global surface temperature datasets since the start of the 20th Century[J]. Earth Syst. Sci. Data, 11 (4): 1629-1643. doi: 10.5194/essd-2019-80

杨溯. 2025. 中国百年均一化降水日值和月值数据集研制 (1900-2022) [J]. 大气科学, 49 (1): 13-22. Yang Su. 2025. The development of a homogenized in-situ daily and monthly precipitation dataset over China in last 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

中国气象局. 2003. 地面气象观测规范[M]. 北京: 气象出版社, 123. China Meteorological Administration. 2003. Specifications for Surface Meteorological Observation in China[M]. China Meteorological Press, Beijing, China (in Chinese), 123.

中国气象局. 2020. 地面气象自动观测规范[M]. 北京: 气象出版社, 101. China Meteorological Administration. 2020. Specifications for Surface Meteorological Automatic Observation in China[M]. China Meteorological Press, Beijing, China (in Chinese), 101.