氣候與環境研究
Climatic and Environmental Research

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

司鹏 梁冬坡 陈凯华 罗传军

Urbanization Effect on Average and Extreme Temperature Warming in Tianjin during the last 60 Years

SI Peng LIANG Dongpo CHEN Kaihua LUO Chuanjun

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20060

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

成都地区城市化对气候影响的模拟研究

Simulation Study of Urbanization Impact on Climate in Chengdu

气候与环境研究. 2020, 25(3): 240 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2020.19182

基于1873年以来器测气温的二十四节气气候变化

Climatic Changes in the Twenty-Four Solar Terms Based on Temperature Observations Back to 1873

气候与环境研究. 2018, 23(6): 670 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18044

基于卫星遥感揭示长三角台站周边城市土地利用扩张及其对气温记录的影响

Satellite Remote Sensing-Based Urban Land-Use Expansion and Its Influence on Surface Air Temperature Records in the Yangtze River Delta, China

气候与环境研究. 2018, 23(5): 607 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18023

暖季极端降水与温度的关系研究——以安徽省为例

Relationship between Precipitation Extremes with Temperature in the Warm Season in Anhui Province

气候与环境研究. 2017, 22(5): 623 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17009

基于均一化观测序列的京津冀地区气候变化格局分析

Analysis of Climate Change in Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Homogenized Observations

气候与环境研究. 2018, 23(5): 524 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2018.17054

中国东北暖季气温变化特征及其与海温和大尺度环流的关系

Variability of Warm Season Surface Air Temperature over Northeastern China and Its Relationships with Sea Surface Temperature and Large-scale Atmospheric Circulation Pattern

气候与环境研究. 2018, 23(4): 479 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2018.17085

关注微信公众号，获得更多资讯信息

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.1006-9585.2020.20060

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

司鹏[1] 梁冬坡[2] 陈凯华[1] 罗传军[1]

1 天津市气象信息中心，天津 300074
2 天津市气候中心，天津 300074

摘 要 基于天津均一化的逐日平均、最低和最高气温观测数据，以及利用天津区域自动站定时观测气温整合数据对城乡台站的划分结果，研究分析了天津地区 1959～2000 年、1959～2005 年、1959～2012 年、1959～2017 年 4 个时段平均温度和极端温度事件的趋势特点及其变化幅度。结果表明，天津地区的气温增暖是毋庸置疑的，4 个时段年平均气温增加幅度分别达 1.35°C、1.65°C、1.71°C、2.05°C，其中，冬季上升幅度相对最大，分别为 2.45°C、2.82°C、2.55°C、2.86°C。城市化导致的年平均气温增暖幅度在逐年增强，4 个时段的增暖贡献分别达 3.73%、3.71%、4.73%、5.17%，但对于冬季来说，乡村区域的增暖趋势幅度明显大于城市区域，这一特点在年和季节极端冷事件（TN10p、TX10p）和极端最低气温事件（TNn）中有明显表现。因此，在时间尺度上，城市化对天津地区的平均和极端温度增暖影响仍然是较为显著的，并且乡村区域的城市化进程相对城市区域更为突出。

关键词 均一化气温数据 气温增暖 极端气温 城市化影响

文章编号 1006-9585(2021)02-0142-13 **中图分类号** P467 **文献标识码** A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20060

Urbanization Effect on Average and Extreme Temperature Warming in Tianjin during the last 60 Years

SI Peng[1], LIANG Dongpo[2], CHEN Kaihua[1], and LUO Chuanjun[1]

1 *Tianjin Meteorological Information Center*, *Tianjin* 300074
2 *Tianjin Climate Center*, *Tianjin* 300074

Abstract The trend changes of average and extreme temperatures in Tianjin during 1959 –2000, 1959 –2005, 1959–2012, and 1959–2017 were analyzed based on the homogenized daily mean, minimum, and maximum temperature data and the classification of urban and rural area derived from the hourly integrated temperature data at automatic stations. Results indicate a warming change in Tianjin, which is evident from the annual mean temperatures increasing by 1.35°C, 1.65°C, 1.71°C, and 2.05°C of the four-time periods, respectively. The annual mean temperatures for the four-time periods are observed to be largest in winter with increases of 2.45°C, 2.82°C, 2.55°C, and 2.86°C, respectively. The annual mean temperature warming caused by Tianjin's urbanization increases yearly with the warming contributions of 3.73%, 3.71%, 4.73%, and 5.17% of the four-time periods to the whole region, separately. However, the warming amplitude in the rural area during winter is significantly larger than that in the urban area, as revealed from the annual and

收稿日期 2020-05-14；**网络预出版日期** 2020-11-17
作者简介 司鹏，女，1983 年出生，硕士，高级工程师，主要从事气候资料分析处理、气候变化等方面研究。 E-mail: spsbox@163.com
通讯作者 梁冬坡，E-mail: 271556305@qq.com
资助项目 国家自然科学基金项目 41905132
Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 41905132)

seasonal extreme cold events (TN10p and TX10p) and extreme minimum temperature events (TNn). Therefore, the urbanization effect on the average and extreme temperature warming in Tianjin is still significant on the time scale. Furthermore, urbanization in rural areas is more prominent than that in urban areas.

Keywords　Homogenized temperature data, Warming, Temperature extremes, Urbanization effect

1　引言

一直以来，与高速发展的综合气象观测系统自身矛盾的是，观测资料的应用水平明显滞后，主要原因是资料本身的质量问题（李庆祥, 2011）。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资料存在非均一性问题，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。均一化是解决气候资料非均一性的重要技术手段，通过剔除数据中的系统偏差，保留真实的气候变化特征（Rahimzadeh and Zavareh, 2014; Hewaarachchi et al., 2017）。全球变暖已然成为国内外社会各界的共识，由此衍生的气候变化以及极端气候变化研究相继增多（Li et al., 2012; Lin and Franzke, 2015; Guan et al., 2017; Ding et al., 2018）。但不少研究并没有对直接使用的观测资料进行进一步的均一化处理（王晓利和侯西勇, 2017; 陈锐杰等, 2018; 张扬等, 2018），这对于研究结果和结论可能造成一定的偏差。近年来，我国气象工作者对气候资料的均一化研究取得显著成果（李庆祥等, 2012; 远芳等, 2015; 朱亚妮等, 2015; 杨溯等, 2016）。但是在对各个站点资料的前期处理中，前人的研究中并没有考虑台站自身业务变革导致的非均一性，造成许多不必要的断点订正（司鹏和徐文慧, 2015; Si et al., 2018）。另外，随着我国气象业务现代化发展，区域自动站观测系统已步入成熟阶段，相比国家级气象观测站，其具有站点覆盖密的优势，能够全面系统地捕捉到局地气候变化特点。但目前来看，区域自动站的观测资料并没有在气候变化分析中被很好的利用，主要原因还是资料的质量和观测时间长度问题导致。

为此，司鹏和徐文慧（2015）通过改进原始资料的预处理、参考序列的建立方法以及序列断点的订正原则等均一化处理技术，剔除迁站、仪器变更、自动站业务化应用等因素在气温序列中的突变影响，建立了能够反映天津地区真实气候变化特征的均一化气温数据集。同时，为充分发挥区域自动站观测资料的气候价值，其通过多源数据整合技术，对天津 3 类数据源的 280 个区域自动站小时气温数据进行整合，建立了系统完整的长时间尺度地面定时基础数据产品，该产品的研制解决了当前天津地区气象业务现代化和精细化对高时空分辨率、高精度数据产品的需求，研发技术为天津气象资料的集约化管理奠定了基础。天津作为我国北方最大的沿海开放城市，近年来在实现京津冀协同发展新格局的背景下，调整及优化了城市布局和空间结构，这势必会造成新城、城乡接合部、重点乡镇等区域的改造和快速崛起，但随之也带来了城市化进程的不利影响（如气候变暖等）。目前，已有研究针对城市化导致的天津局地气温增暖进行了分析和探讨，显著的城市和乡村气温差已被证明（郭军等, 2009; 刘德义等, 2010; 孟丹等, 2013），但同样，这些研究均是基于未经过均一化处理的资料，并且城乡台站的划分均为简单人为定义的单站，或者以人口为依据的简单划分，对定量检测城市化导致的天津局地气温增暖影响存在一定的不确定性。

因此，本文拟利用研制的具有局地特点的天津均一化历史气温数据产品，以及经过整合的天津区域自动站定时观测气温数据，对天津近 60 年平均温度和极端温度变化进行分析，揭示以天津为代表的京津冀地区城市化发展导致的气温趋势变化特点及其幅度。以此为我国城市化快速发展的典型区域或局地气候变化分析提供参考依据，同时为制定科学对策来减缓和适应气候变化带来的不利影响提供基础支撑。

2　资料与方法

2.1　资料

研究中用到的地面基础资料有两类，均由天津市气象信息中心提供。一类是天津均一化历史气温数据集，该数据集的具体处理过程参见司鹏和徐文慧（2015），选取 13 个国家站 1951～2017 年逐日平均、最低和最高气温数据，用于天津平均温度和极端温度变化分析，其中，1951～2012 年的资料

源自司鹏和徐文慧（2015）得到的均一化数据产品，2013～2017 年时段资料为原始逐日观测资料；另一类是天津定时观测气温整合数据产品，选取 280 个区域自动站 2008～2016 年小时气温数据，作为划分城乡台站类型的依据之一。两类基础资料的台站分布如图 1 所示。在城乡台站划分中，还用到 MODIS（Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer）反演地表温度数据 MOD11A2 地表温度（http://ladsweb.nascom.nasa.gov[2019-08-01]），该产品为 MODIS 陆地产品中 3 级 V005 版标准数据产品，空间分辨率为 1 km，时间分辨率为 8 d，选取时间段为 2014 年 1 月 1 日至 12 月 31 日。

2.2 研究方法

2.2.1 定时观测气温整合数据产品

该产品是基于全国综合气象信息数据共享平台（CIMISS）、气象资料业务系统（MDOS）以及省级自动站实时数据质量控制系统 3 类数据库实时质控后的地面气温观测数据，通过数据整合、融合序列检验、质量控制等得到的天津区域自动站相对完整、时间序列较长且质量较高的小时气温资料。

2.2.1.1 数据整合及融合序列检验

数据整合过程中，综合 3 类业务系统资料质控技术的先进性以及数据库存储资料的时间长度，对每段时期主要基础数据源进行选取，得到 2008～2013 年的数据源以 CIMISS 为主，2014～2017 年以 MDOS 为主，省级质控系统的数据作为 2011～2017 年期间缺测资料的补充数据源。同时，为保证整合数据的连续性和可靠性，对 CIMISS 和 MDOS 数据源在 2013～2017 年重合时间段做融合序列检验。检验方法参照杨溯等（2016）在研制全球降水数据集用到的多源数据对比融合技术，包括一致率检验、相关系数检验、均值 t 检验和方差 F 检验，其中的阈值标准根据天津地面观测资料的实际情况设置。保留同时通过 4 个检验的整合序列，否则予以剔除。

2.2.1.2 整合数据的质量控制

研究中通过气候异常值检验、空间一致性检验对上述整合后的小时气温数据进行质量控制，对每

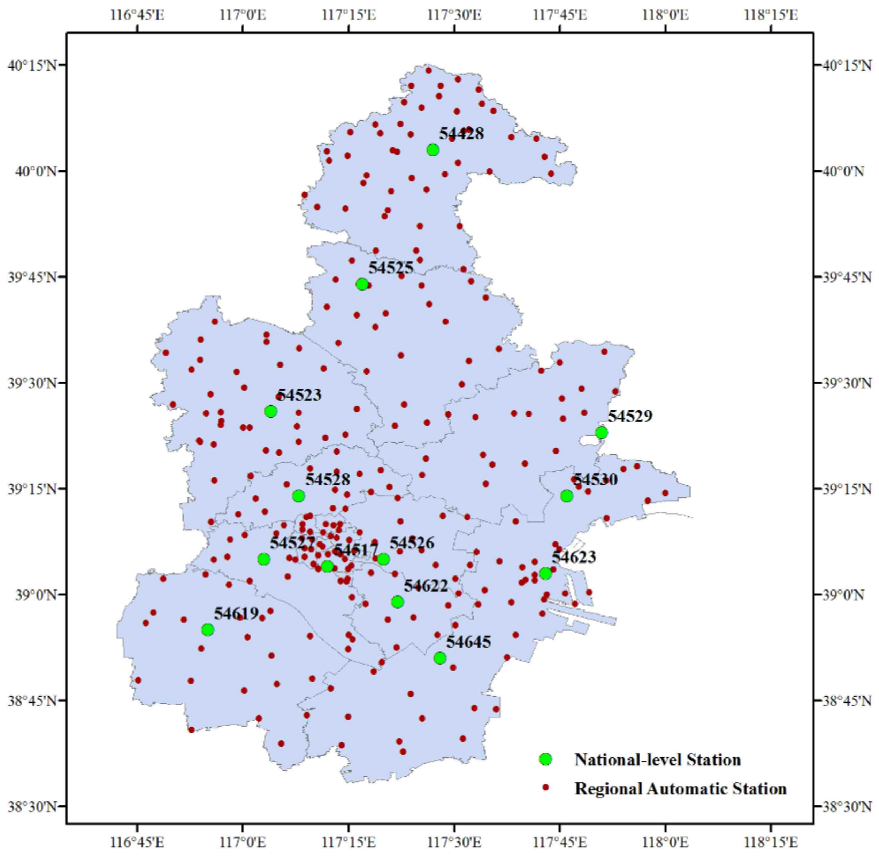

图 1 天津地面气象观测站的地理分布（绿色代表国家站，红色代表区域自动站）

Fig. 1 Geographical distribution of surface observation stations in Tianjin (solid green circles represent the national-level stations and solid red circles represent the regional automatic stations)

一步检验出并确定的错误值进行置缺处理。

（1）气候异常值检验：

$$\overline{x_i}-n\sigma \leqslant x_{ij} \leqslant \overline{x_i}+n\sigma, \quad (1)$$

其中，x_{ij}代表被检验的小时气温值，$\overline{x_i}$为被检验小时值所在日值序列的平均值，σ为被检验小时值所在日值序列的标准差，n=3～5。这里为验证检验效果，分别对倍数 n =3～5 进行试验分析，通过对输出的 3～5 倍标准差的检验结果，发现 5 倍标准差没有检测出疑误数据，3 倍标准差检验出的疑误数据大多被认为是可信的，因此，最终选取 n=4。

（2）空间一致性检验：

$$\left|Z_i-\overline{Z_{ij}}\right|>n\sigma_{ij}, \quad n=3\sim 5, \quad (2)$$

其中，Z_i为被检站的标准化小时气温值，$\overline{Z_{ij}}$和σ_{ij}分别为参考站的对应被检站小时值所在标准化日值序列的气温平均值和标准差。同样为验证检验效果，分别对参考站数量（5 和 20）以及 n =3～5 标准差倍数进行试验分析，依据空间距离分别选取被检站周边邻近的 5 个和 20 个站，利用算术平均拟合参考站。对 2 种数量的参考站均进行 3～5 倍标准差的检验，通过分析得到，20 个站疑误数据的检验结果均多于 5 个站的，但大多为可信的，而 5 个站的基本包含 20 个站中的疑误数据，因此，最终选取参考站数量为 5 个且 n=5。

2.2.2　城乡台站类型划分

研究中基于定时观测气温整合数据产品，对 2008～2016 年小时气温数据进行月值和年值统计，根据逐年气温变化的空间分布结合天津地面观测站所在环境的实际情况对 13 个国家站城乡台站类型进行划分。由于天津各区域自动站建站时间不同，依据台站数量和气温资料的完整性，主要对 2010 年、2012～2016 年气温年值的分布情况进行比较分析。利用区域自动站观测资料来评估城市化影响，在前人研究中是有所尝试的（Kim and Baik, 2005）。

如图 2 所示，由整合定时气温数据统计得到天津地区的年平均气温基本呈逐年增暖变化，这与天津近年来城市化发展导致的气候变化特点一致（蒋明卓等, 2015），同时也说明了基于 3 类数据库整合后数据的可靠性。从逐年气温的空间分布来看，天津北部山区的低值区（蓟州）和中心城区的高值区（市台）均较为明显，市区四郊（东丽、津南、天津、北辰）和塘沽滨海区均呈现较强的增暖变化，并且随着时间推移中心城区的高值区逐年扩张，而北部山区的低值区逐年缩小。其中表现最为明显的是 2014 年气温变化（图 2d），其逐月气温的空间分布也呈现出相同的变化特点（图 3），特别是冬季（图 3a）和夏季（图 3c）月份。因此，这里主要依据 2014 年区域自动站整合气温数据的空间分布特点，结合 13 个国家站所在探测环境（表 1），对其城乡台站类型进行划分，结果如表 1 所示。

同时，为得到客观准确的划分结果，作为对比

表 1　天津 13 个国家站元数据和台站类型划分信息

Table 1　Metadata and distribution of urban-rural stations information at 13 national-level meteorological stations in Tianjin

区站号	站名	站类	资料起始时间	台站所在环境	区域自动站台站类型	MODIS数据阈值	MODIS数据台站类型
54428	蓟州	一般站	1957-01-01	乡村	乡村站	1.49	乡村站
54517*	市台	一般站	1951-01-01	市区	城市站	−0.39	乡村站
54523	武清	一般站	1959-01-01	郊外	乡村站	−0.31	乡村站
54525	宝坻	基本站	1959-03-01	乡村	乡村站	0.73	乡村站
54526	东丽	一般站	1955-01-01	集镇	城市站	1.58	城市站
54527*	天津	基本站	1958-01-01	郊外	城市站	−0.25	乡村站
54528*	北辰	一般站	1958-01-01	郊外	城市站	1.00	乡村站
54529	宁河	一般站	1964-01-01	乡村	乡村站	−0.16	乡村站
54530	汉沽	一般站	1974-01-01	郊外	乡村站	1.09	乡村站
54619	静海	一般站	1959-01-01	城镇	乡村站	0.62	乡村站
54622*	津南	一般站	1974-01-01	郊外	城市站	0.58	乡村站
54623	塘沽	基本站	1951-01-01	滨海	城市站	2.00	城市站
54645	大港	一般站	1986-01-01	郊外	乡村站	0.41	乡村站

*表示该站点台站类型划分结果不同。

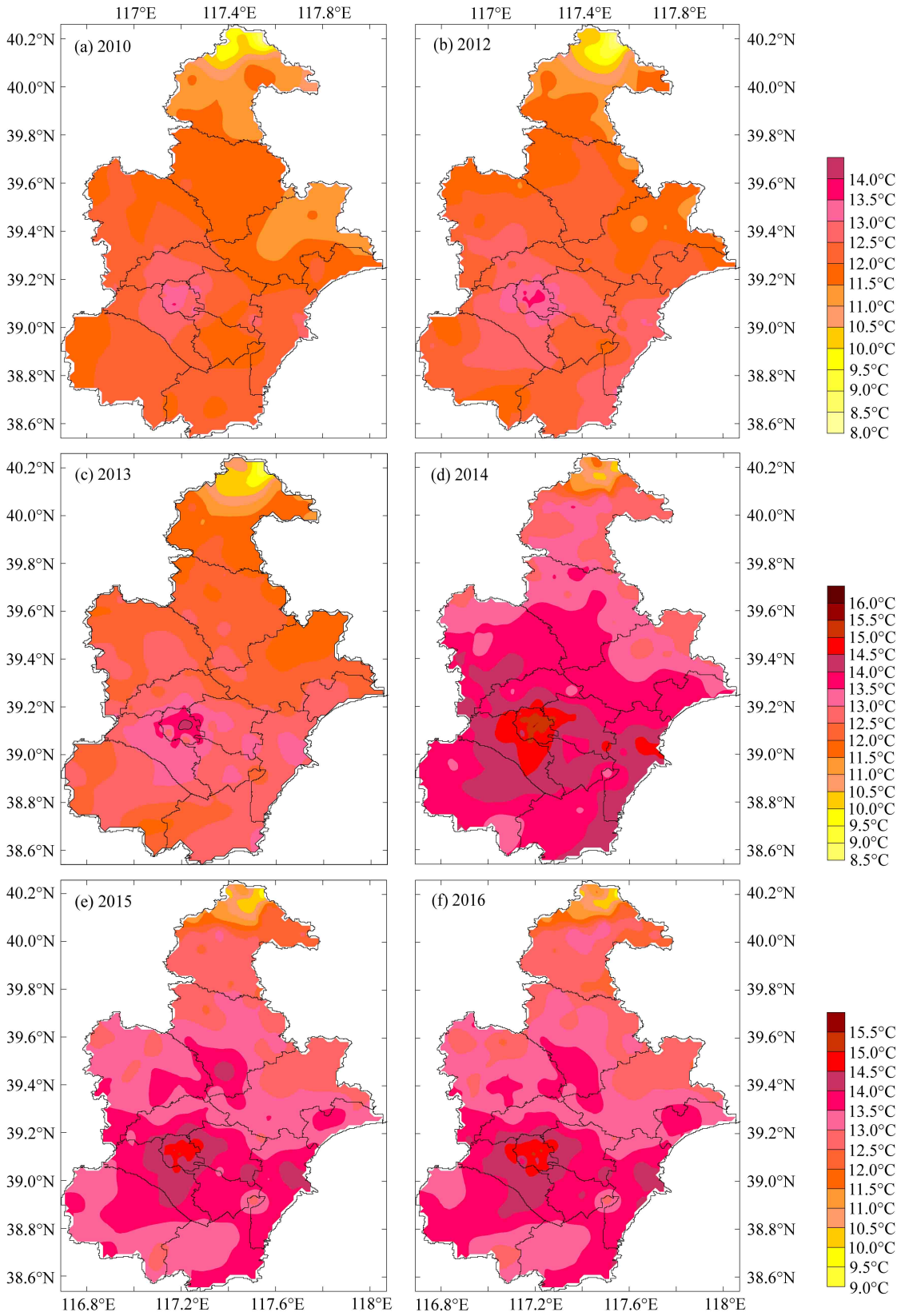

图 2 天津区域自动站整合气温数据年值空间分布：（a）2010 年；（b）2012 年；（c）2013 年；（d）2014 年；（e）2015 年；（f）2016 年

Fig. 2 Spatial distribution of annual values of integrated temperature data at the automatic observation station in Tianjin in (a) 2010, (b) 2012, (c) 2013, (d) 2014, (e) 2015, and (f) 2016

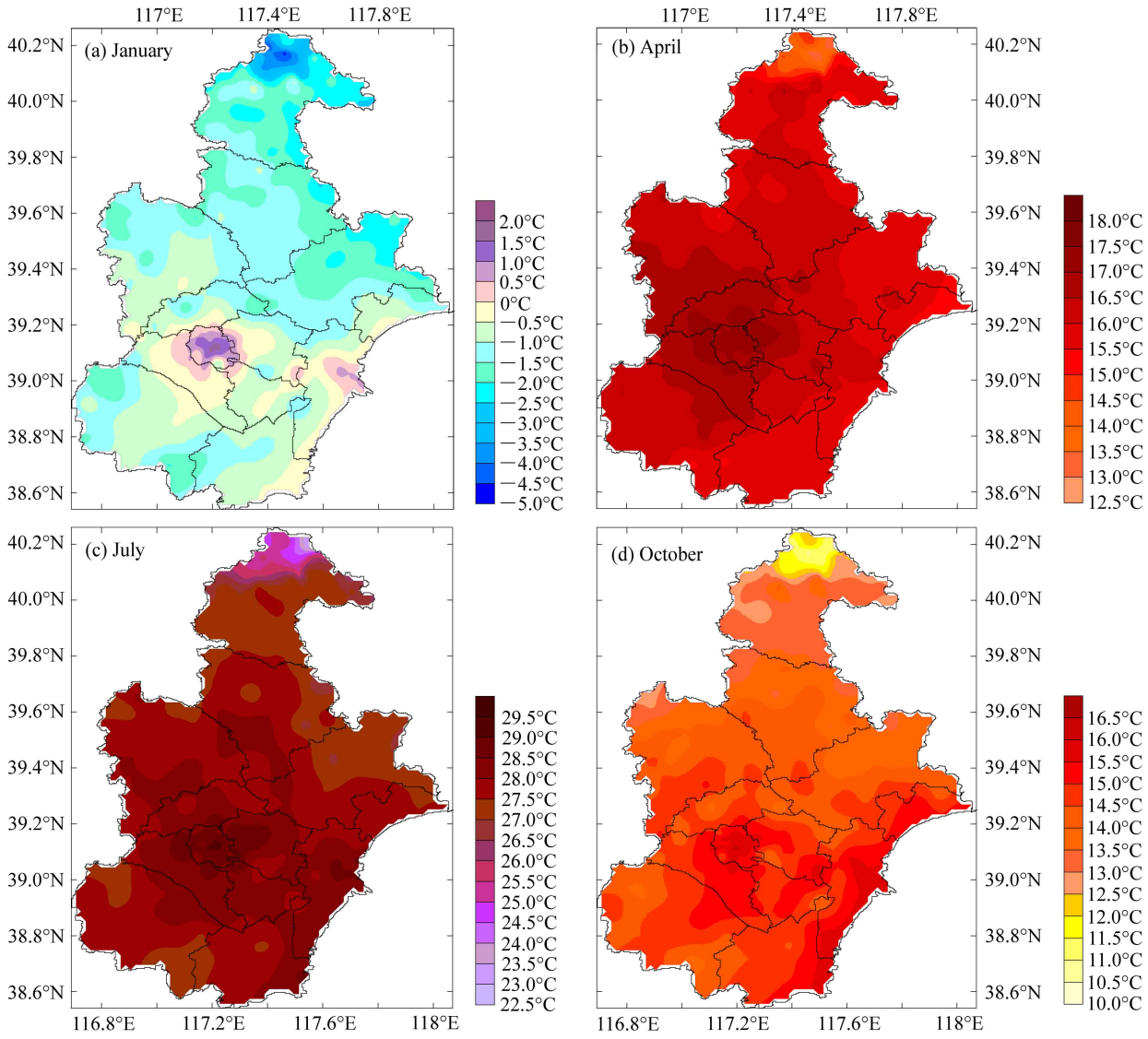

图 3　2014 年天津区域自动站整合气温数据月值空间分布：（a）1 月；（b）4 月；（c）7 月；（d）10 月

Fig. 3　Spatial distribution of monthly values of integrated temperature data at the automatic observation station in (a) January, (b) April, (c) July, and (d) October 2014 in Tianjin

研究中也给出利用 MODIS 反演地表温度数据的台站类型划分结果。选用 Si et al.（2014）用到的华北五省（北京、天津、河北、山西、内蒙）410 个国家站作为划分基础，对整个华北五省共拼接 46 副数字图像（2014 年 1 月 1 日至 12 月 31 日，每 8 d 一期产品），根据城市热岛效应原理（IPCC, 2001），计算每幅图像中各个气象站周围 2 km 范围分别与 10、15、20、25、30、35、40 和 50 km 范围内地表平均温度的差值，对其进行算术平均。通过统计发现，每个气象站 8 个半径范围差值幅度基本一致，因此，分别以各站 8 个半径范围差值幅度的算术平均作为阈值，划分原则参照 Si et al.（2014）。即：（1）阈值≥2.0，均定义为“城市站”；（2）1.0≤阈值<2.0，并且台站所在环境为“市区”或“集镇”或“城镇”，定义为“城市站”；（3）除了（1）、（2）情况之外的，均定义为“乡村站”。结果如表 1 所示。

通过比较得到，仅市台（54517）、天津（54527）、北辰（54528）和津南（54622）4 个台站类型划分结果不一致。从台站实际情况来看，MDOIS 数据的划分结果是不合理的：（1）市台站（54517）位于市区繁华地带，受城市化影响较为严重；（2）对于天津站（54527），考虑到该站是作为天津整个天气气候状况的地面观测代表站，将

其定义为乡村站是不妥当的；（3）北辰（54528）和津南（54622）2 个站均为环城四郊站，由于城镇化发展影响，造成 2 个站周围环境已经不符合气象探测标准，目前已经在迁址过程中。所以，这 4 个站均应划分为城市站。对于出现划分结果的不一致，这里考虑原因有如下几点：（1）遥感反演产品部分区域值缺测和产品精度等客观问题，以及不同天气条件下城市热岛效应强弱的影响；（2）阈值 2 km 范围的选取，对于过去位于城郊繁华地带的台站，因迁站搬离至郊区，造成周围多为农田或荒地的乡村下垫面，取值 2 km 作为基准来对比更大半径范围的地表温度会导致台站划分结果的偏差（如 54527 站）；（3）台站经纬度的测量误差等造成 MODIS 数据图像上定位的偏差，导致下垫面判断有误（如 54517 站）。

因此，从上述分析来看，利用区域自动站整合数据产品结合元数据的台站类型划分结果是符合客观事实的，能够为本文的研究结论提供可靠基础。根据表 1 中资料起始年限，研究中选取时间序列相对较长的蓟州（54428）、市台（54517）、武清（54523）、宝坻（54525）、东丽（54526）、天津（54527）、北辰（54528）、静海（54619）和塘沽（54623）9 个站作为研究对象，并且通过主分量（PCA）分析（Li et al., 2004）构建天津整个地区、城市和乡村区域的距平序列来进行年（季节）平均气温和极端气温变化分析，该方法在中国东北部（司鹏等, 2010a）、北京（司鹏等, 2009）、深圳（司鹏等, 2010b）等地区的区域平均温度序列建立中均得到很好的应用效果。城市化对天津地区的增暖影响拟利用拟合的城市区域与乡村区域气温趋势变化差值表示。城市化增暖贡献利用城乡区域气温趋势变化差值与整个天津区域趋势变化的比值表示。

3 天津近 60 年气温增暖趋势变化分析

3.1 年尺度变化分析

表 2 给出 IPCC（2001）、Trenberth et al.（2007）、IPCC（2013）3 次评估报告及中国气候变化蓝皮书（中国气象局气候变化中心, 2018）统计得到的近百年或近 60 多年全球、亚洲及中国区域平均气温增暖幅度。根据表 2 列出的 IPCC 和中国气候变化蓝皮书各个统计时段的时间节点，研究中分别统计了天津整个区域、城市和乡村区域 1959～2000 年、1959～2005 年、1959～2012 年、1959～2017 年的年、季节平均气温趋势变化（表 3～7）。

如表 3 所示，天津整个区域 4 个时段的气温均呈显著上升趋势，分别为 0.322°C/10 a、0.350°C/10 a、0.317°C/10 a、0.348°C/10 a，增温幅度分别达 1.35°C、1.65°C、1.71°C、2.05°C，均高于表 2 给出的全球、亚洲及中国区域百年（或近 60 多年）年平均气温的升高幅度。从各个时段趋势对比来看，气温逐年增暖较为明显，但相比 1959～2005 年，1959～2012 年上升幅度有所下降，而 1959～2017 年又逐渐升高。据李庆祥等（2006）研究表明，1998 年是 1951～2005 年中国气温最暖年份。同样，1998 年也是天津地区 1959～2012 年期间的最暖年份，相对全序列均值偏暖 1.10°C。近年来，1998～2012 年出现的全球变暖停滞（global warming hiatus）

表 2 IPCC 3 次评估报告及中国气候变化蓝皮书统计的气温增暖变化

Table 2 Temperature warming change from the three IPCC reports and the Blue Book on Climate Change in China

评估报告	统计时段	区域范围	增温幅度
IPCC AR3	1861～2000年	全球陆地及海洋表面	0.6±0.2°C
IPCC AR4	1906～2005年	全球陆地及海洋表面	0.74±0.18°C
IPCC AR5	1880～2012年	全球陆地及海洋表面	0.85°C
中国蓝皮书	1901～2017年	亚洲陆地	1.59°C
中国蓝皮书	1951～2017年	亚洲陆地	0.23°C/10 a
中国蓝皮书	1901～2017年	中国陆地	1.21°C
中国蓝皮书	1951～2017年	中国陆地	0.24°C/10 a

注：表中IPCC AR3、AR4、AR5分别引自IPCC（2001）、Trenberth et al.（2007）、IPCC（2013），中国蓝皮书引自中国气候变化蓝皮书（中国气象局气候变化中心, 2018）。

表 3 天津地区 1959～2000 年、1959～2005 年、1959～2012 年、1959～2017 年年平均气温变化趋势

Table 3 Trend changes of the regional annual mean temperature in Tianjin covering 1959–2000, 1959–2005, 1959–2012, and 1959–2017

	年平均气温变化趋势/℃ (10 a)$^{-1}$			
	1959～2000年	1959～2005年	1959～2012年	1959～2017年
区域平均	0.322*	0.350*	0.317*	0.348*
城市平均	0.328*	0.356*	0.324*	0.356*
乡村平均	0.316*	0.343*	0.309*	0.338*
城市与乡村差值	0.012*	0.013*	0.015*	0.018*

*表示通过95%置信度的显著性检验。

现象备受科学界的广泛关注，对该现象及其影响因子的研究结论也是存在很大争议（Gleisner et al., 2015; Medhaug and Drange, 2016; Amaya et al., 2018）。通过统计发现，天津整个区域 1998～2012 年气温变化趋势为−0.437°C/10 a（通过$\alpha = 0.05$显著性水平检验），从统计角度来看，同样出现了明显的增暖变缓现象。但是从整体发展趋势来看（表 3），与全球大背景气候变化一致（表 2 中 IPCC 的 3 次评估报告），天津地区的气温增暖趋势仍在持续上升，近 60 年（1959～2017 年）的平均气温升高幅度（2.05°C）（表 3）大于同一时期中国区域的气温变化（1.61°C）（表 2）。

从城乡对比来看（表 3），城市化导致的天津地区年平均气温增暖是逐年增加的，4 个时段城乡差值分别为 0.012°C/10 a、0.013°C/10 a、0.015°C/10 a、0.018°C/10 a，即城市化增暖分别达 0.05°C、0.06°C、0.08°C、0.11°C，增暖贡献分别达 3.73%、3.71%、4.73%、5.17%。另外，研究中也统计了 1959～2017 年天津城乡区域最高、最低气温变化趋势，结果显示，城乡区域年平均最低气温趋势增暖幅度（0.497°C/10 a、0.527°C/10 a）均为最高气温（0.189°C/10 a、0.158°C/10 a）的 3 倍左右（均通过$\alpha = 0.05$显著性水平检验），表现出明显的城市化导致的区域或局地气温增暖变化特点（IPCC, 2001），即最低气温的增暖趋势幅度最大，平均气温次之，最高气温相对最小（Li et al., 2004; Zhou et al., 2004）。

3.2　季节尺度变化分析

从表 4～7 给出的季节气温变化来看，与年平均气温一致（表 3），天津整个区域 4 个时段季节气温均呈显著增暖趋势变化（均通过$\alpha = 0.05$显著性水平检验，除表 4 夏季外），其中，冬季上升幅度相对最大，4 个时段分别为 0.584°C/10 a（表 4）、0.599°C/10 a（表 5）、0.473°C/10 a（表 6）、0.485°C/10 a（表 7），分别升高了 2.45°C、2.82°C、2.55°C、2.86°C，明显高于对应年平均气温的上升幅度，春季次之，夏秋季相对最小。而除了秋季以外，1998 年并不是各个季节 1959～2012 年期间的最暖年份，并且通过统计得到，各个季节 1998～2012 年气温减少趋势均没有通过$\alpha = 0.05$显著性水平检验。说明从长期趋势变化来看，1998～2012 年变暖停滞现象在天津地区的各个季节尺度中并不具有代表性。

表 4　1959 ~ 2000 年天津地区季节平均气温变化趋势

Table 4　Trend changes of the regional season mean temperature in Tianjin during 1959–2000

	季节平均气温变化趋势/°C (10 a)$^{-1}$			
	春季	夏季	秋季	冬季
区域平均	0.329*	0.175	0.232*	0.584*
城市平均	0.339*	0.181	0.236*	0.582*
乡村平均	0.317*	0.168	0.227*	0.588*
城市与乡村差值	0.022*	0.013	0.009*	−0.006*

*表示通过95%置信度的显著性检验。

表 5　1959 ~ 2005 年天津地区季节平均气温变化趋势

Table 5　Trend changes of the regional season mean temperature in Tianjin during 1959–2005

	季节平均气温变化趋势/°C (10 a)$^{-1}$			
	春季	夏季	秋季	冬季
区域平均	0.436*	0.181*	0.235*	0.599*
城市平均	0.447*	0.188*	0.245*	0.591*
乡村平均	0.423*	0.172*	0.224*	0.609*
城市与乡村差值	0.024*	0.016*	0.021*	−0.018*

*表示通过95%置信度的显著性检验。

表 6　1959 ~ 2012 年天津地区季节平均气温变化趋势

Table 6　Trend changes of regional season mean temperature in Tianjin during 1959–2012

	季节平均气温变化趋势/°C (10 a)$^{-1}$			
	春季	夏季	秋季	冬季
区域平均	0.407*	0.192*	0.241*	0.473*
城市平均	0.418*	0.195*	0.256*	0.467*
乡村平均	0.393*	0.188*	0.222*	0.480*
城市与乡村差值	0.025*	0.007*	0.034*	−0.013*

*表示通过95%置信度的显著性检验。

表 7　1959 ~ 2017 年天津地区季节平均气温变化趋势

Table 7　Trend changes of the regional season mean temperature in Tianjin covering 1959–2017

	季节平均气温变化趋势/°C (10 a)$^{-1}$			
	春季	夏季	秋季	冬季
区域平均	0.470*	0.222*	0.238*	0.485*
城市平均	0.482*	0.225*	0.251*	0.481*
乡村平均	0.455*	0.218*	0.220*	0.491*
城市与乡村差值	0.027*	0.007*	0.031*	−0.010*

*表示通过95%置信度的显著性检验。

从城乡对比来看（表 4～7），4 个时段均表现出显著的城市化增暖现象（均通过$\alpha = 0.05$显著性水平检验，除表 4 夏季外），但从冬季的城乡差值

能够看出，乡村区域的城市化发展速度明显快于城市区域。主要原因可能是，近年来天津新城、城乡接合部、重点乡镇等乡村区域的改造和快速崛起，造成下垫面由原有的自然环境（如农田、绿地等）发生了根本的变化。人工建筑物、构筑物高度集中，以水泥、沥青、金属板等坚硬密实、干燥不透水的建筑材料，代替了原来疏松和植物覆盖的土壤或空旷的荒地，加之人类活动影响（空调取暖、高密度聚居、高强度的经济活动等），从而导致这些乡村区域相对老城区（城市区域）表现出了幅度较大的增暖趋势（周淑贞和束炯, 1994）。研究中统计了1959～2017年冬季最高和最低气温城乡区域的趋势变化，结果显示，城乡区域冬季最低气温的趋势增暖幅度（0.709°C/10 a、0.787°C/10 a）均为最高气温（0.210°C/10 a、0.198°C/10 a）的3倍以上（均通过$\alpha = 0.05$显著性水平检验），其中，乡村区域冬季最低气温的上升趋势幅度比城市区域更为突出，其他季节的最低气温亦是如此。

4 天津近60年极端气温变化分析

4.1 年尺度变化分析

极端温度事件指标采用世界气象组织指数专家组（ETCCDMI）（Peterson et al., 2001）推荐使用的7个温度指数（表8），来描述天津地区不同极端温度事件出现的频率、变化幅度等特征。选取1981～2010年作为代表某一台站气温要素超过气候阈值的极端指数标准值。

如表8所示，天津地区4个时段的年平均极端最低气温（TNn）均表现出显著的增加趋势，但极端最高气温（TXx）的增加趋势并不显著。同样，这些变化特点也体现在城乡区域，除此之外，从城乡对比来看（表8中的差值），4个时段的城市区域TNn增加幅度均小于乡村区域，而TXx则相反，城市区域TXx增加（减少）幅度要大于（小于）乡村区域。所以，不难看出，天津地区极端气温增暖趋势在时间尺度上是较为显著的，并且乡村区域表现的更为明显。

图4给出利用鲁棒局部权重回归得到的天津地区年平均TN10p、TN90p、TX10p及TX90p的平滑曲线。该方法是一种非参数回归方法，不拘泥于任何理论上的数学函数，用来平滑等间距（或非等间距）分布的时间序列或散点图，能够在鲁棒拟和过程中有效地避免异常值对平滑曲线的歪曲，可以很好的描述变量之间关系的细微变化（Cleveland, 1979）。如图所示，天津地区4个时段的冷事件（TN10p、TX10p）均表现出明显的减少趋势，而暖事件（TN90p、TX90p）均表现出明显的增加趋势。从变化幅度来看（表8），冷昼日数（TX10p）和暖昼日数（TX90p）日数变化均远远小于冷夜日数（TN10p）和暖夜日数（TN90p），表现出日极端事件的趋势变化幅度小于夜极端事件，尤其是冷事件的趋势幅度相差极大，导致温度日较差（DTR）的显著减小。4个时段年平均DTR趋势减少幅度分别达−0.357°C/10 a、−0.362°C/10 a、−0.371°C/10 a、−0.337°C/10 a。IPCC AR3（2001）曾指出DTR的大幅度减少是表征城市热岛对地面气温增暖影响的主要原因之一，而城市热岛效应更是城市化影响的表现特征之一。同样，城乡区域的DTR均呈显著减少趋势，4个时段均达到了−0.3°C/10 a以上。从城乡对比来看（表8中的差值），乡村区域的DTR减少幅度均大于城市区域，4个时段分别达到0.070°C/10 a、0.048°C/10 a、0.051°C/10 a、0.065°C/10 a（均通过$\alpha = 0.05$显著性水平检验）。

表8 天津地区年平均极端温度指数变化趋势

Table 8 Trend changes of the annual temperature extremes in Tianjin

	TXx变化趋势/℃ (10 a)$^{-1}$		TNn变化趋势/℃ (10 a)$^{-1}$		TN10p变化趋势/d (10 a)$^{-1}$		TN90p变化趋势/d (10 a)$^{-1}$		TX10p变化趋势/d (10 a)$^{-1}$		TX90p变化趋势/d (10 a)$^{-1}$		DTR变化趋势/℃ (10 a)$^{-1}$	
	区域	差值	区域	差值	区域	差值	区域	差值	区域	差值	区域	差值	区域	差值
1959～2000年	−0.094	0.175	1.040*	−0.216**	−3.823*	0.418**	1.632*	0.211**	−0.255	−0.035	0.484	0.433	−0.357*	0.070**
1959～2005年	0.072	0.145	1.000*	−0.159**	−3.974*	0.267**	2.274*	0.243**	−0.351	−0.006	0.869*	0.315	−0.362*	0.048**
1959～2012年	0.049	0.090	0.848*	−0.177**	−3.822*	0.240**	2.359*	0.246**	−0.420	0.056	0.699*	0.228	−0.371*	0.051**
1959～2017年	0.100	0.084	0.875*	−0.180**	−3.678*	0.226**	2.758*	0.089**	−0.695*	−0.013**	0.961*	0.238**	−0.337*	0.065**

注：TXx、TNn、TN10p、TN90p、TX10p、TX90P和DTR分别表示极端最高气温、极端最低气温、冷夜日数、暖夜日数、冷昼日数、暖昼日数和气温日较差；区域表示区域平均极端温度指数趋势变化，*表示通过95%置信度的显著性检验；差值表示城市与乡村区域极端温度指数的趋势差值，**表示城市和乡村区域均通过95%置信度的显著性检验。

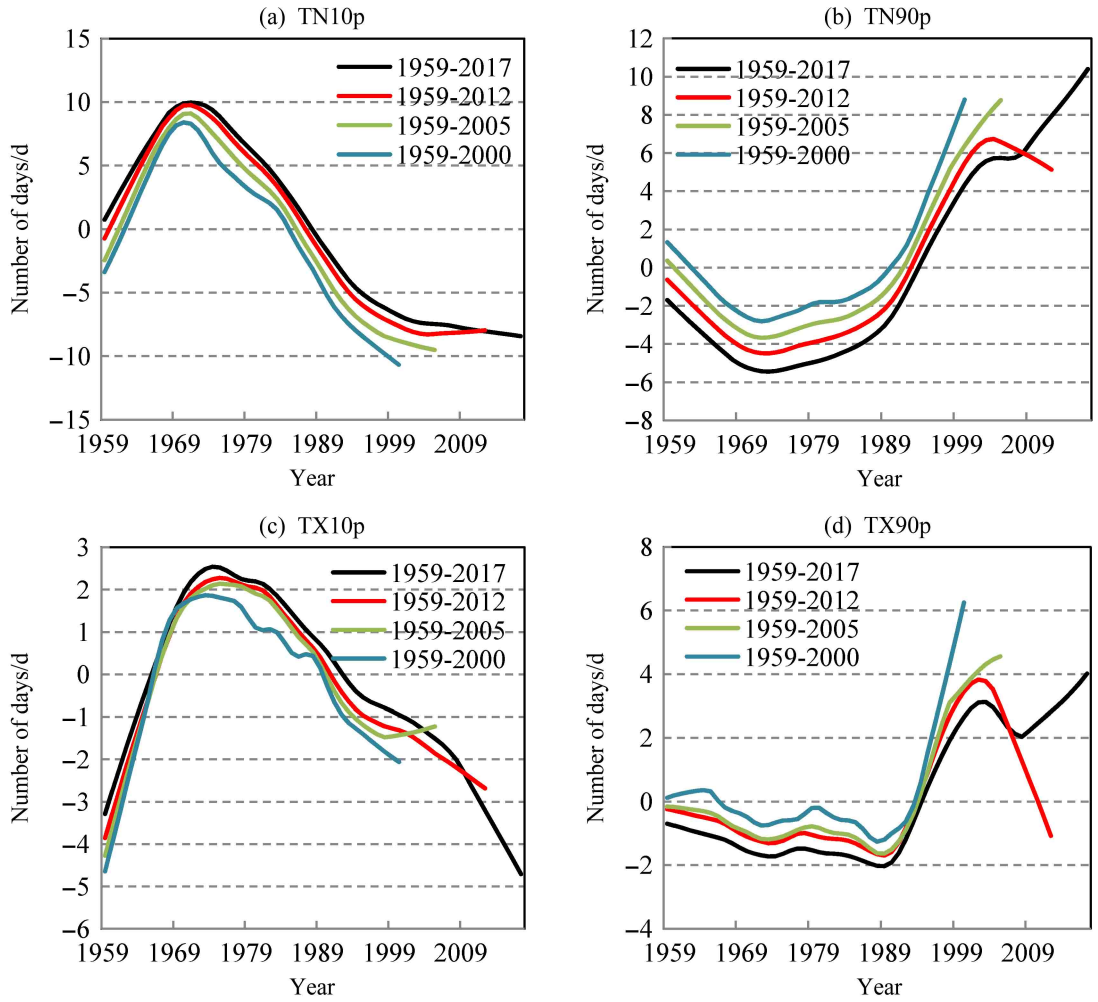

图 4　天津地区年平均（a）冷夜日数 TN10p、（b）暖夜日数 TN90p、（c）冷昼日数 TX10p、（d）暖昼日数 TX90p 极端事件 1959～2000 年、1959～2005 年、1959～2012 年和 1959～2017 年低通滤波平滑曲线

Fig. 4　Lowest filter smoothing for the regional annual temperature extremes for (a) cold nights (TN10p), (b) warm nights (TN90p), (c) cold days (TX10p), and (d) warm days (TX90p) during 1959–2000, 1959–2005, 1959–2012, and 1959–2017 in Tianjin

4.2　季节尺度变化分析

如图 5 所示，天津地区 4 个时段季节 TNn 均呈显著增加趋势（通过$\alpha = 0.05$显著性水平检验），其中，冬季最为明显（图 5d）。对于 TXx 来说，春秋季趋势幅度增加明显（图 5a、5c）（除 1959～2000 年以外），但除 4 个时段的秋季和 1959～2017 年春秋季变化幅度显著外，其他均不显著。从城乡差值来看（表略），乡村区域的 TNn 增加幅度明显大于城市区域，特别是冬季，4 个时段的城乡差值均在 0.1°C/10 a 以上。另外，从图 5 还可以看出，4 个时段各季节 TN10p、TN90p、TX10p 及 TX90p 趋势变化特点均与对应年尺度一致（图 4），同样表现出了夜极端事件（TN10p、TN90p）远远大于日极端事件（TX10p、TX90p）的特点，导致各季节 DTR 均呈显著减少趋势，特别是冬季，减少幅度分别达−0.526°C/10 a、−0.579°C/10 a、−0.560°C/10 a、−0.540°C/10 a。从城乡对比来看（表略），乡村区域各季节 DTR 减少幅度均比城市区域明显，4 个时段城乡冬季 DTR 趋势差值分别达 0.050°C/10 a、0.052°C/10 a、0.064°C/10 a、0.087°C/10 a（均通过$\alpha = 0.05$显著性水平检验）。因此，结合上述分析，更加说明了天津乡村区域受城市化影响的突出性。

5　结论和讨论

本文利用均一化的逐日气温观测资料，基于定时观测气温整合数据对城乡台站的划分结果，分析

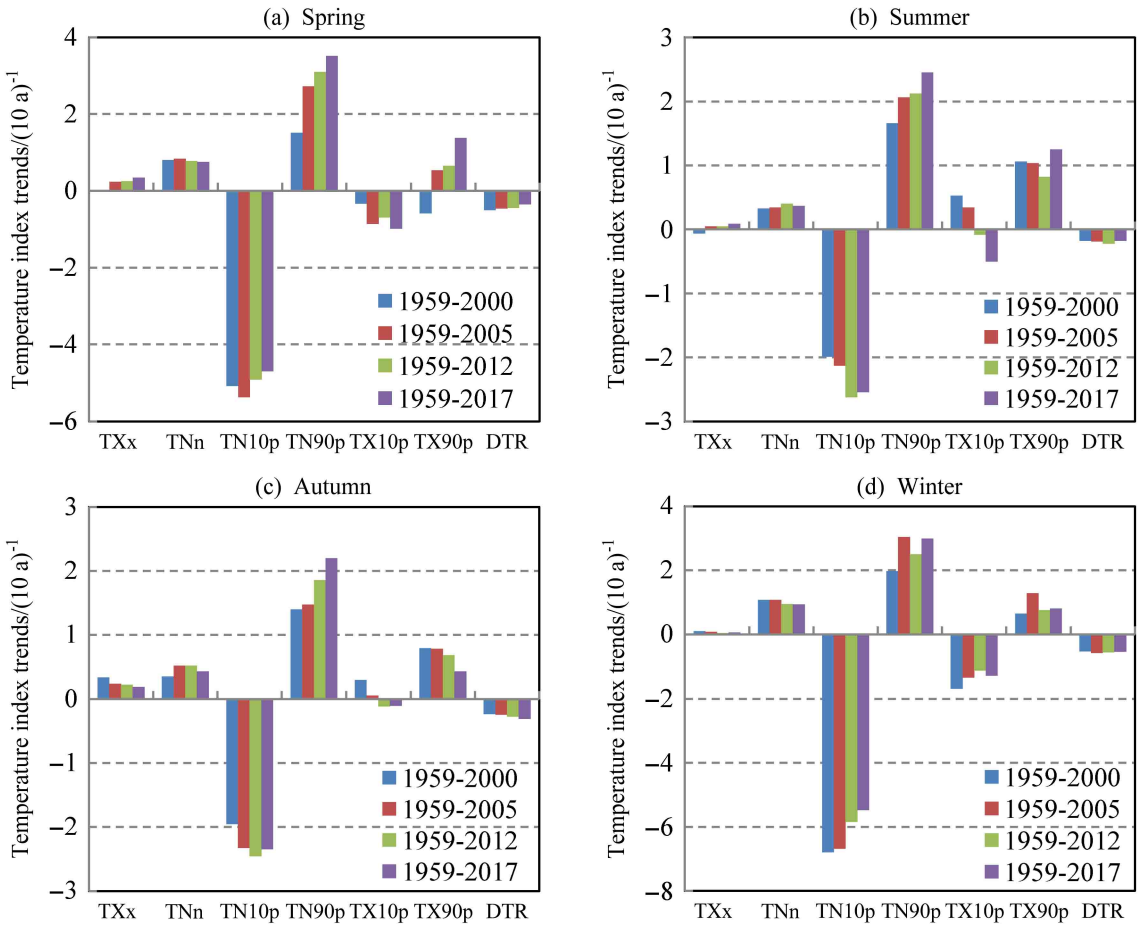

图 5 天津地区 1959～2000 年、1959～2005 年、1959～2012 年和 1959～2017 年季节平均极端温度指数趋势变化：（a）春季；（b）夏季；（c）秋季；（d）冬季

Fig. 5 Regional trend changes of the seasonal extreme temperature indexes in Tianjin for (a) spring, (b) summer, (c) autumn, and (d) winter during 1959–2000, 1959–2005, 1959–2012, and 1959–2017 in Tianjin

了天津地区近 60 年平均温度、极端温度事件及城市化影响导致的气温增暖变化特征及其幅度，得到以下结论：

（1）1959～2000 年、1959～2005 年、1959～2012 年、1959～2017 年 4 个时段天津地区的年平均气温均呈显著上升趋势变化，升高幅度分别达 1.35°C、1.65°C、1.71°C、2.05°C，均高于 IPCC 的 3 次评估报告和中国蓝皮书给出的全球、亚洲及中国区域百年（或近 60 多年）年平均气温的升高幅度。其中，冬季上升幅度相对最大，分别为 2.45°C、2.82°C、2.55°C、2.86°C。

（2）从城乡对比来看，城市化导致的天津地区年平均气温增暖是逐年增强的，4 个时段分别达 0.05°C、0.06°C、0.08°C、0.11°C，增暖贡献达 3.73%、3.71%、4.73%、5.17%。对于冬季来说，乡村区域的增暖幅度明显大于城市区域，并且其年和其他季节最低气温的上升幅度均比城市区域更为突出。

（3）对于极端气温变化来说，天津地区 4 个时段的年平均 TNn 和 TXx 均表现出趋势增加变化，日极端事件（TX10p、TX90p）的趋势变化幅度远远小于夜极端事件（TN10p、TN90p），导致日较差（DTR）的显著减小，4 个时段分别达−0.357 °C/10 a、−0.362°C/10 a、−0.371°C/10 a、−0.337 °C/10 a。这些变化特点同样表现在季节尺度上，特别是冬季。并且通过城乡对比发现，城市化对乡村区域的年和季节极端温度增暖影响表现的更为明显。

气候资料的均一化研究并不是一成不变的，需要在实践应用中不断进行探索，改进研究方法和技术手段，最终才能得到相对可靠的均一化数据产品（Si et al., 2019）。本研究所采用的均一化逐日气温数据是结合天津局地气象站实际情况，通过改进

均一化研究技术中的不足而得到的，一定程度上增强了研究结论的可靠性。本文的分析一方面肯定了前人对局地平均气温和极端气温的研究结论，如局地气温增暖的共识；另一方面本文还得出了一些新的结论，如城市化导致的区域或局地气温增暖变化，不仅仅是城市气候的显著特征，更是一个地方发展程度的代表，因为从观测事实来看，天津地区的城市化对乡村区域的平均气温和极端气温增暖影响相对城市区域更为突出；另外，对于增暖停滞现象，从统计角度，在天津地区年尺度的温度变化中有所体现，但是在季节尺度变化中并不显著，说明目前的观测数据并不足以支持或否定天津地区变暖停滞的结论，而出现的年尺度气温变化可能主要是由于大背景气候系统内部（如北大西洋涛动、太平洋十年涛动、大西洋多年代振荡等）的相互作用导致的阶段性升温变缓或气温降低所致（Guan et al., 2017）。因此，通过本文的研究分析能够对天津地区的气温增暖变化及其城市化影响给予新的认识。

参考文献（References）

Amaya D J, Siler N, Xie S P, et al. 2018. The interplay of internal and forced modes of Hadley Cell expansion: Lessons from the global warming hiatus [J]. Climate Dyn., 51(1-2): 305−319. doi:10.1007/s00382-017-3921-5

陈锐杰, 刘峰贵, 陈琼, 等. 2018. 近 60 年青藏高原东北缘极端气温事件与气温日较差分析——以西宁地区为例 [J]. 高原气象, 37(5): 1188−1198.　Chen Ruijie, Liu Fenggui, Chen Qiong, et al. 2018. Variations of extreme air temperature events and diurnal temperature range in Xining, northeastern Qinghai−Tibetan Plateau from 1955 to 2015 [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 37(5): 1188−1198. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2018.00022

Cleveland W S. 1979. Robust locally weighted regression and smoothing scatterplots [J]. J. Amer. Stat. Assoc., 74(368): 829−836. doi:10.1080/01621459.1979.10481038

Ding Z Y, Wang Y Y, Lu R J. 2018. An analysis of changes in temperature extremes in the Three River Headwaters region of the Tibetan Plateau during 1961-2016 [J]. Atmos. Res., 209: 103−114. doi:10.1016/j.atmosres.2018.04.003

Gleisner H, Thejll P, Christiansen B, et al. 2015. Recent global warming hiatus dominated by low-latitude temperature trends in surface and troposphere data [J]. Geophys. Res. Lett., 42(2): 510−517. doi:10.1002/2014GL062596

Guan X D, Huang J P, Guo R X. 2017. Changes in aridity in response to the global warming hiatus [J]. J. Meteor. Res., 31(1): 117−125. doi:10.1007/s13351-017-6038-1

郭军, 李明财, 刘德义. 2009. 近 40 年来城市化对天津地区气温的影响 [J]. 生态环境学报, 18(1): 29−34.　Guo Jun, Li Mingcai, Liu Deyi. 2009. Effects of urbanization on air temperature of Tianjin in recent 40 years [J]. Ecology and Environmental Sciences (in Chinese), 18(1): 29−34. doi:10.3969/j.issn.1674-5906.2009.01.006

Hewaarachchi 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. 2001. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press.

IPCC. 2013. Summary for policymakers [M]//Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press.

蒋明卓, 曾穗平, 曾坚. 2015. 天津城市扩张及其微气候特征演化研究——基于城市热环境的角度 [J]. 干旱区资源与环境, 29(9): 159−164.　Jiang Mingzhuo, Zeng Suiping, Zeng Jian. 2015. Urban expansion of Tianjin and the micro climate characteristics evolution—based on the urban thermal environment perspective [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment (in Chinese), 29(9): 159−164. doi:10.13448/j.cnki.jalre.2015.310

Kim Y H, Baik J J. 2005. Spatial and temporal structure of the urban heat island in Seoul [J]. J. Appl. Meteor. Climatol., 44(5): 591−605. doi:10.1175/JAM2226.1

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 Homogeneity of Climatic Data (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press.

李庆祥, 李伟, 鞠晓慧. 2006. 1998 年以来中国气温持续极端偏暖的事实 [J]. 科技导报, 24(4): 37−40.　Li Qingxiang, Li Wei, Ju Xiaohui. 2006. Analysis on the persistent extreme warm period over China since 1998 [J]. Science & Technology Review (in Chinese), 24(4): 37−40. doi:10.3321/j.issn:1000-7857.2006.04.010

Li J, Dong W J, Yan Z W. 2012. Changes of climate extremes of temperature and precipitation in summer in eastern China associated with changes in atmospheric circulation in East Asia during 1960−2008 [J]. Chinese Sci. Bull., 57(15): 1856−1861. doi:10.1007/s11434-012-4989-2

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, Shen Yan. 2012. Development of homogenized monthly precipitation dataset in China during 1900−2009 [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 67(3): 301−311. doi:10.11821/xb201203002

Li Q X, Zhang H Z, Liu X N, et al. 2004. Urban heat island effect on annual mean temperature during the last 50 years in China [J]. Theor. Appl. Climatol., 79(3-4): 165−174. doi:10.1007/s00704-004-0065-4

Lin Y, Franzke C L E. 2015. Scale-dependency of the global mean surface temperature trend and its implication for the recent hiatus of global warming [J]. Sci. Rep., 5: 12971. doi:10.1038/srep12971

刘德义, 黄鹤, 杨艳娟, 等. 2010. 天津城市化对市区气候环境的影响 [J]. 生态环境学报, 19(3): 610−614.　Liu Deyi, Huang He, Yang

Yanjuan, et al. 2010. The climate impact of urbanization in Tianjin city [J]. Ecology and Environmental Sciences (in Chinese), 19(3): 610−614. doi:10.3969/j.issn.1674-5906.2010.03.021

Medhaug I, Drange H. 2016. Global and regional surface cooling in a warming climate: A multi-model analysis [J]. Climate Dyn., 46(11-12): 3899−3920. doi:10.1007/s00382-015-2811-y

孟丹, 王连喜, 李琪, 等. 2013. 天津市气候变化及其与城市化发展的关系 [J]. 南京信息工程大学学报 (自然科学版), 5(5): 455−461. Meng Dan, Wang Lianxi, Li Qi, et al. 2013. Climate change characteristics of Tianjin and its relationship to urbanization [J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition) (in Chinese), 5(5): 455−461. doi:10.3969/j.issn.1674-7070.2013.05.011

Peterson T C, Folland C, Gruza G, et al. 2001. Report on the activities of the Working Group on Climate Change detection and related rapporteurs 1998-2001 [R]. ICPO Publication Series No.48.

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

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 Environ. Res. (in Chinese), 20(6): 663−674. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.15014

Si P, Luo C J, Liang D P. 2018. Homogenization of Tianjin monthly near-surface wind speed using RHtestsV4 for 1951−2014 [J]. Theor. Appl. Climatol., 132(3-4): 1303−1320. doi:10.1007/s00704-017-2140-7

Si P, Luo C J, Wang M. 2019. Homogenization of surface pressure data in Tianjin, China [J]. J. Meteor. Res., 33(6): 1131−1142. doi:10.1007/s13351-019-9043-8

司鹏, 李庆祥, 轩春怡, 等. 2009. 城市化对北京气温变化的贡献分析 [J]. 自然灾害学报, 18(4): 138−144. Si Peng, Li Qingxiang, Xuan Chunyi, et al. 2009. Contribution of urbanization to change of air temperature in Beijing [J]. Journal of Natural Disasters (in Chinese), 18(4): 138−144. doi:10.3969/j.issn.1004-4574.2009.04.023

司鹏, 李庆祥, 李伟. 2010a. 城市化进程对中国东北部气温增暖的贡献检测 [J]. 气象, 36(2): 13−21. Si Peng, Li Qingxiang, Li Wei. 2010a. Impact of urbanization on surface air temperature warming in Northeast China [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 36(2): 13−21. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2010.2.002

司鹏, 李庆祥, 李伟, 等. 2010b. 城市化对深圳气温变化的贡献 [J]. 大气科学学报, 33(1): 110−116. Si Peng, Li Qingxiang, Li Wei, et al. 2010b. Urbanization-induced surface air temperature change in Shenzhen [J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33(1): 110−116. doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2010.01.014

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

Trenberth K E, Jones P D, Ambenje P, et al. 2007. Observations: Surface and atmospheric climate change [M]//Solomon S, Qin D, Manning M, et al. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press.

王晓利, 侯西勇. 2017. 1961~2014 年中国沿海极端气温事件变化及区域差异分析 [J]. 生态学报, 37(21): 7098−7113. Wang Xiaoli, Hou Xiyong. 2017. Analysis of spatiotemporal variations and regional differences in extreme temperature events in the coastal area of China during 1961−2014 [J]. Acta Ecologica Sinica (in Chinese), 37(21): 7098−7113. doi:10.5846/stxb201609091830

杨溯, 徐文慧, 许艳, 等. 2016. 全球地面降水月值历史数据集研制 [J]. 气象学报, 74(2): 259−270. Yang Su, Xu Wenhui, Xu Yan, et al. 2016. Development of a global historic monthly mean precipitation dataset [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 74(2): 259−270. doi:10.11676/qxxb2016.016

远芳, 曹丽娟, 唐国利, 等. 2015. 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, 11(5): 331−336. Yuan Fang, Cao Lijuan, Tang Guoli, et al. 2015. Homogenization of monthly pressure data at 825 Chinese stations [J]. Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis (in Chinese), 11(5): 331−336. doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2015.05.006

张扬, 白红英, 苏凯, 等. 2018. 1960~2013 年秦岭陕西段南北坡极端气温变化空间差异 [J]. 地理学报, 73(7): 1296−1308. Zhang Yang, Bai Hongying, Su Kai, et al. 2018. Spatial variation of extreme temperature change on southern and northern slopes of Shaanxi section in Qinling Mountains during 1960−2013 [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 73(7): 1296−1308. doi:10.11821/dlxb201807009

中国气象局气候变化中心. 2018. 中国气候变化蓝皮书 [R]. 北京: 中国气象局, 3−4. Climate Change Center of China Meteorological Administration. 2018. Blue Book on Climate Change in China(in Chinese) [R]. Beijing: China Meteorological Administration, 3-4.

周淑贞, 束炯. 1994. 城市气候学 [M]. 北京: 气象出版社, 3−4. Zhou Shuzhen, Shu Jiong. 1994. Urban Climatology (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 3-4.

Zhou L M, Dickinson R E, Tian Y H, et al. 2004. Evidence for a significant urbanization effect on climate in China [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 101(26): 9540−9544. doi:10.1073/pnas.0400357101

朱亚妮, 曹丽娟, 唐国利, 等. 2015. 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, 11(6): 379−386. Zhu Yani, Cao Lijuan, Tang Guoli, et al. 2015. Homogenization of surface relative humidity over China [J]. Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis (in Chinese), 11(6): 379−386. doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2015.06.001