

基于城市化偏差订正的中国大陆 1961–2015 年 月平均地面气温网格数据集

温康民¹, 任国玉^{2,3*}, 李 娇⁴, 任玉玉³, 郑秀丽¹, 孙秀宝⁵, 周雅清⁶

1. 福建省福州市气象局, 福州 350000; 2. 中国地质大学(武汉)环境学院大气科学系, 武汉 430074; 3. 国家气候中心, 北京 100081; 4. 辽宁省铁岭市气象局, 铁岭 112000; 5. 中国科学院南海海洋研究所, 广州 510000; 6. 山西省晋中市气象局, 晋中 030600

摘 要: 基于中国气象局国家气象信息中心提供的国家级地面气象站均一化气温月值数据, 选择 763 个国家站的数据; 以目标站周围 300 km 范围内的站点为参考站, 利用参考站和目标站去线性趋势年平均气温序列的相关系数判定, 取相关系数最大, 并且显著性水平为 0.005 的显著性检验的 4 个参考站作为该目标站的参考站; 然后, 以各个参考站与其目标站年平均气温序列相关系数的平方为权重, 计算参考站月平均气温加权平均值, 即为参考序列; 再利用城市站序列趋势和参考序列趋势的差值作为订正值, 对目标站进行线性订正; 最后, 利用反距离权重插值法将全国范围 763 个站点的气温数据插值成 $2^\circ \times 2^\circ$ 的格点数据。以北京、武汉、银川、深圳作为华北、华中、西北和华南地区的大城市代表站, 发现其在过去 55 年的相对城市化偏差分别为 67.0%、75.4%、32.7% 和 50.3%, 与前人针对单站评估城市化影响的结果基本一致。该数据集存储为.txt 格式, 每个文件按照年月命名, 每个文件由头文件和 18 行、32 列的平均气温 ($^\circ\text{C}$) 数据组成, 前 6 行是头文件, 分别为列数, 行数, 左下角格点经度, 左下角格点纬度, 网格大小, 缺测值。数据集由 660 个数据文件组成, 数据量为 2.75 MB (压缩为 1 个文件, 895 KB)。

关键词: 国家基本基准站; 地面气温; 月均气温; 城市化; 1961–2015

DOI: <https://doi.org/10.3974/geodp.2021.01.04>

数据可用性声明:

本文关联实体数据集已在《全球变化数据仓储电子杂志 (中英文)》出版, 可获取:
<https://doi.org/10.3974/geodb.2019.06.08.V1>.

1 前言

气候变化监测及检测需要可靠的长序列地面气温观测资料作为基础数据。然而, 城市化的影响已经成为全球陆地区域地面气温观测资料中系统误差的最主要来源之一^[1–4]。改革开放以后, 一方面中国逐步放开了原有对人口流动的控制, 城市建设创造了大量的建筑业、工业等就业岗位, 进城的外来工逐年增多, 伴随私人小汽车的普及, 促进了高速公路的快速发展, 另一方面, 人们对环境质量要求也逐步提高, 乡村地区和小城镇基础设施逐步改

收稿日期: 2020-09-26; 修订日期: 2021-01-29; 出版日期: 2021-03-25

基金项目: 中华人民共和国科学技术部 (2018YFA0605603); 国家自然科学基金 (41575003)

*通讯作者: 任国玉 CN-BT74Q14J, 中国地质大学(武汉)环境学院, 国家气候中心, guoyoo@cma.gov.cn

数据引用方式: [1] 温康民, 任国玉, 李娇等. 基于城市化偏差订正的中国大陆 1961–2015 年月平均地面气温网格数据集[J]. 全球变化数据学报, 2021, 5(1): 27–36. <https://doi.org/10.3974/geodp.2021.01.04>.

[2] 温康民, 任国玉, 李娇等. 基于城市化偏差订正的中国大陆月平均地面气温网格数据集 (1961–2015) [J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2019. <https://doi.org/10.3974/geodb.2019.06.08.V1>.

善,这些都加剧了乡村的城市化进程。伴随城市化进程的发展,国家基本气象站和基准气候站周围的监测环境也有了很大的变化,很多站的周围环境由以前的偏远乡村逐渐演化为城镇或城市郊区,因此,我国气候变化研究中所用的基础气温数据,大部分都受到了城市化的影响,例如北京站自1961年以后,国家基本/基准站气温观测资料中的城市化偏差达到71.0%^[5]。在中国的气候变化研究领域,所用的基础资料一般来自于国家基本气象站和基准气候站(本文简称国家站)。已有的区域研究表明,这个观测网的地面气温资料序列,在很大程度上受到了城市热岛效应加强因素的影响,存在较大的系统偏差。因此,《基于城市化偏差订正的中国大陆月平均地面气温网格数据集(1961–2015)》以国家气象信息中心提供的国家基本基准站均一化月气温资料和课题组前期发展的143个乡村站均一化月气温数据为主要数据源,基于城市化对目标站平均地面气温趋势的影响为线性增加的假设,提出了自东往西迭代订正的方法^[6],具体给出了每个国家站的参考站(Rural Station)及其城市化偏差(Urbanization Bias),进而在此基础上评价了1961–2015年中国国家站城市化偏差的分布和变化,实现了1961–2015年中国大陆城市化偏差订正月平均地面气温网格数据集。

2 数据集元数据简介

《基于城市化偏差订正的中国大陆月平均地面气温网格数据集(1961–2015)》^[7]的名称、短名名称、通讯作者、作者、地理区域、数据年代、数据时间分辨率、数据空间分辨率、数据集组成、数据出版与共享服务平台、数据共享政策等信息见表1。

3 数据研发方法

3.1 数据选择及预处理

3.1.1 国家气象站资料

中国气象局国家气象信息中心提供的“国家级地面气象站均一化气温月值数据集”^[9]包含中国2,419个国家级台站1951–2016年均一化逐月平均气温、平均最高及最低气温。由于1961年之前的数据及2016年的数据缺测较多,故1961–2015年被作为研究时段。然后,确保1961–2015年的资料缺测率不大于2%,共有764个国家站符合要求。国家站中的缺测值,通过缺测年之前及之后5年,总共10年的平均值来替换。对于143个参考站中的79个国家站,我们将其从选出的764个国家站中剔除,因此,共685个国家站用于本文城市化偏差订正。

3.1.2 参考站资料

任国玉等和Ren等^[10–11]建立的我国大陆143个地面气温乡村站网是在全国2,400个长序列观测站中选出的,对站点数据的起止年及观测连续性、观测点周围聚落人口、迁站、测站与附近城镇中心的距离、观测场周围12 km²范围内人工建筑的比率等诸多信息进行了考虑。其月平均地面气温资料同样来源于中国气象局国家气象信息中心,对于少数站中的缺测数据,同样通过缺测年之前及之后5年,总共10年的平均值来替换。

表 1 《基于城市化偏差订正的中国大陆月平均地面气温网格数据集（1961–2015）》元数据简表	
条 目	描 述
数据集名称	基于城市化偏差订正的中国大陆月平均地面气温网格数据集（1961–2015）
数据集短名	AdjustedUrbanBiasMonTemChina_1961-2015
作者信息	温康民 E-8903-2019, 福建省福州市气象局, wenkangmin@126.com 任国玉 J-9953-2012, 中国地质大学(武汉)环境学院、国家气候中心, guoyoo@cma.gov.cn 李娇 AAC-5450-2021, 辽宁省铁岭市气象局, lijiaostu@163.com 张爱英 AAW-6017-2021, 北京市气象局, zhangay66@sohu.com 任王玉 AAC-3663-2021, 国家气候中心, renyuyu@126.com 孙秀宝 AAC-3839-2021, 中国科学院南海海洋研究所, 165546192@qq.com 周雅清 AAC-3645-2021, 山西省晋中市气象局, zhouyqsx@126.com
地理区域	中国大陆
数据年代	1961–2015
时间分辨率	月
空间分辨率	2° × 2°
数据格式	.txt
数据量	数据量为 2.75 MB（压缩为一个文件，895 KB）
数据集组成	1961 年 1 月至 2015 年 12 月城市化偏差订正的地面气温网格数据
基金项目	中华人民共和国科学技术部（2018YFA0605603）；国家自然科学基金（41575003）
数据计算环境	ArcGIS
出版与共享服务平台	全球变化科学研究数据出版系统 http://www.geodoi.ac.cn
地址	北京市朝阳区大屯路甲 11 号 100101, 中国科学院地理科学与资源研究所
数据共享政策	全球变化科学研究数据出版系统的“数据”包括元数据（中英文）、通过《全球变化数据仓储电子杂志（中英文）》发表的实体数据（中英文）和通过《全球变化数据学报（中英文）》发表的数据论文。其共享政策如下：（1）“数据”以最便利的方式通过互联网系统免费向全社会开放，用户免费浏览、免费下载；（2）最终用户使用“数据”需要按照引用格式在参考文献或适当的位置标注数据来源；（3）增值服务用户或以任何形式散发和传播（包括通过计算机服务器）“数据”的用户需要与《全球变化数据学报（中英文）》编辑部签署书面协议，获得许可；（4）摘取“数据”中的部分记录创作新数据的作者需要遵循 10%引用原则，即从本数据集中摘取的数据记录少于新数据集总记录量的 10%，同时需要对摘取的数据记录标注数据来源 ^[8]
数据和论文检索系统	DOI, DCI, CSCD, WDS/ISC, GEOSS, China GEOSS, Crossref

3.2 技术路线

3.2.1 城镇站对应参考站的确定

在构建各个国家站的参考站时，我们借鉴气候数据质量控制空间一致性检验的邻站选取方法^[12–14]。把处于某站为中心，某个固定半径范围内的参考站当作该国家站的参考站，二者间的距离计算式为：

$$d(A_1,A_2)=R\cos^{-1}\left[\sin\varphi_1\sin\varphi_2+\cos\varphi_1\cos\varphi_2\cos(\theta_1-\theta_2)\right]$$

(1)

式中， θ_1 和 φ_1 分别为 A_1 点(国家站)的经度和纬度； θ_2 和 φ_2 分别为 A_2 点（乡村站）的经度和纬度； R 代表地球的半径，取平均值约 6,371 km。

首先，确保乡村站距离国家站不得大于 300 km。其次，为确保在乡村站稀少的东北和

青藏高原中西部区域的国家站可以选出适当的乡村站,我们通过自东向西逐经度迭代的订正方法来订正国家站中的城市化偏差,同时经过订正的国家站可作为后续订正的乡村站。

去趋势的温度序列主要表示地面气温在年际和年代际尺度上的变异性,通过去趋势后国家站和乡村站的年平均气温相关系数当作判断指标,确保候选乡村站与国家站处于同一个自然气候子区。计算各个国家站与其候选乡村站的去趋势年均及月均气温的相关系数,相关系数若通过信度水平为 0.005 的显著性检验 ($t_{0.005}=0.364$),则该乡村站可以作为国家站的参考站。

3.2.2 城镇站参考序列的建立

本文规定当目标站的参考站数量大于 4 个时,根据年平均气温去除趋势后相关系数大小,将相关性最高的 4 个站点作为最终的参考站;当参考站数量 ≤ 4 时则全部保留。对于每个目标站,将各个参考站与目标站月平均气温序列去趋势相关系数作为权重,计算所有参考站月平均地面气温的加权平均值,得到每个目标站 1961–2015 年月平均地面气温的参考序列。

3.2.3 城市化偏差订正方法

该方法基于两点假定:(1)建立的某目标站参考气温序列的线性趋势代表该区域大尺度背景气温变化趋势;(2)城市化对目标站平均地面气温趋势的影响为线性增加,即这种影响在不同年份和年代是相近的。以目标站序列最后一年(这里为 2015 年)为基准,向前依次递加平均每年的城市化偏差,订正后的序列以站点当前和最近未来几年的气温值为固定值,新的气温数据在未来数年内具有更好的可延展性,参见式(3)。

$$T'_i = T_i - (\Delta T_{u-r} / 10)(i - j) \quad (2)$$

$$T'_i = T_i + (\Delta T_{u-r} / 10)(k - i) \quad (3)$$

式中, T'_i 为订正后的气温值, T_i 为订正前的气温值, ΔT_{u-r} 为整个时期目标站和参考站的气候倾向率差值,即城市化偏差 ($^{\circ}\text{C}/10\text{a}$), i 代表订正的年份, j 和 k 分别代表气温序列的起始和终止年份。

4 数据结果与验证

4.1 数据集组成

基于城市化偏差订正的中国大陆月平均地面气温网格数据集,是 1961 年 1 月–2015 年 12 月中国大陆逐月地面气温城市化偏差订正后的网格数据集,空间分辨率为 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$,单位是 $^{\circ}\text{C}$,以压缩后的总数据量为 895 KB,数据解压后共 660 个文件,文件 196201 表示 1962 年 1 月,在 ArcGIS 软件下应用此数据。

中国大陆 1962 年 1 月 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 分辨率城市化偏差订正的地面气温空间分布见图 1。我国地域横跨约 64 个经度和 36 个纬度,区域内气候差异明显,因此地面气温的空间分布差异较大。从整体上来看,地面气温的空间分布(1962 年 1 月)具有南高北低的特点,其值在 15.84 至 -26.46 $^{\circ}\text{C}$ 之间。华南地区的地面气温最高,其次是西南至华北一带,东北北部地面气温最低。

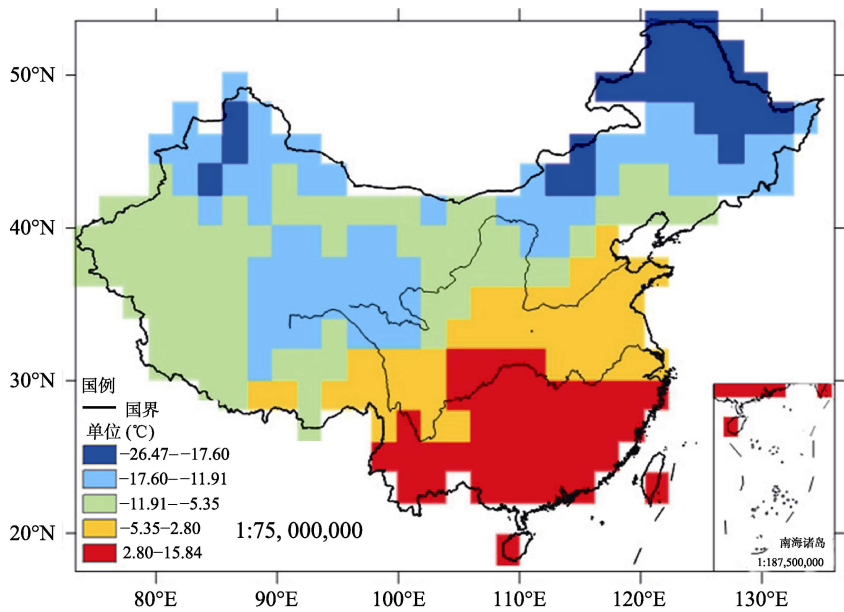


图 1 中国 1962 年 1 月格点平均气温空间分布图（依据审图号为 GS(2016)1569 号的标准地图制作）

4.2 数据结果

图 2 是 1961–2015 年，中国格点年平均气温变化趋势的空间分布图，近 55 年来，华中部分及西南部分地区以 $0-0.1\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 的速度增长，为我国最弱的变暖区域；华北除内蒙以外、西南除西藏以外、华南地区大部，年平均气温以 $0.1-0.2\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 的速度增长；东北北部、内蒙东部及辽宁西北部、青海、新疆南部及西部、西藏北部地区的年平均气温以

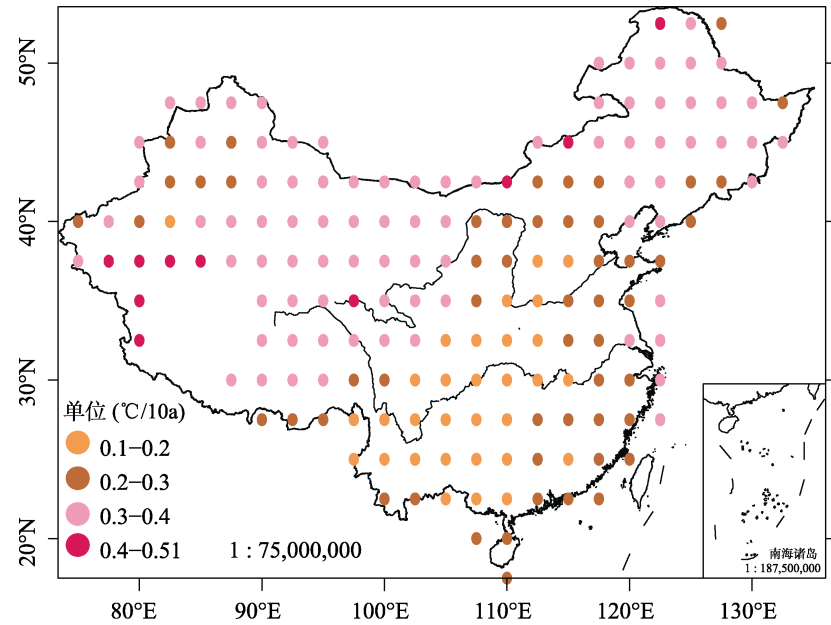


图 2 中国格点年平均气温变化趋势空间分布图（依据审图号为 GS(2016)1569 号的标准地图制作）

0.3–0.4 °C/10a 的速度增长。其余大部分地区包括华东大部、东北大部、内蒙、陕西部分、新疆大部及西藏南部以 0.2–0.3 °C/10a 的速度增长，而西藏西部部分地区呈现最大变暖趋势，为 0.4–0.51 °C/10a。

从季节变化来看（图 3），1961–2015 年，我国春季平均气温在西南部分地区的增速仅为 0–0.1 °C/10a，在西南除西藏大部、华中部分、广东、海南等地区的增暖速率为 0.1–0.2 °C/10a；而在江浙、内蒙、东北中部、新疆北部及西南部，均以 0.3–0.4 °C/10a 的速率增加；最大的速率为东北北部、内蒙东部及西部部分地区，达 0.4–0.5 °C/10a；最大增暖区域为西藏西部，在 0.5 °C/10a 以上；其余地区在 0.2–0.3 °C/10a 之间。我国夏季平均气温有一个明显的特点，即华中大部地区以–0.1–0 °C/10a 减小。在华南大部、华北除内蒙及陕西、西南部分地区、华东部分地区、新疆西部部分地区以 0–0.1 °C/10a 的速率增加；在海南、东南沿海、江浙地区、内蒙南部、东北东部及南部、西南部分、新疆西部部分地区以 0.1–0.2 °C/10a 的速率增加；增暖速率在 0.3 °C/10a 以上的地区包括东北北部部分、内蒙东部部分、青海、西藏西北地区；其余地区包括东北大部、西北大部、内蒙大部以 0.2–0.3 °C/10a 的速率增加。秋季平均气温在东北、华东大部、内蒙、新疆、西藏南部、陕西、海南以 0.2–0.3 °C/10a 的速率增加；西藏北部、青海中部、新疆东南及西北部以 0.3–0.4 °C/10a 的速率增加，而在西南部分延伸至华北部分地区出现最弱的增暖，为 0–0.1 °C/10a；在西南

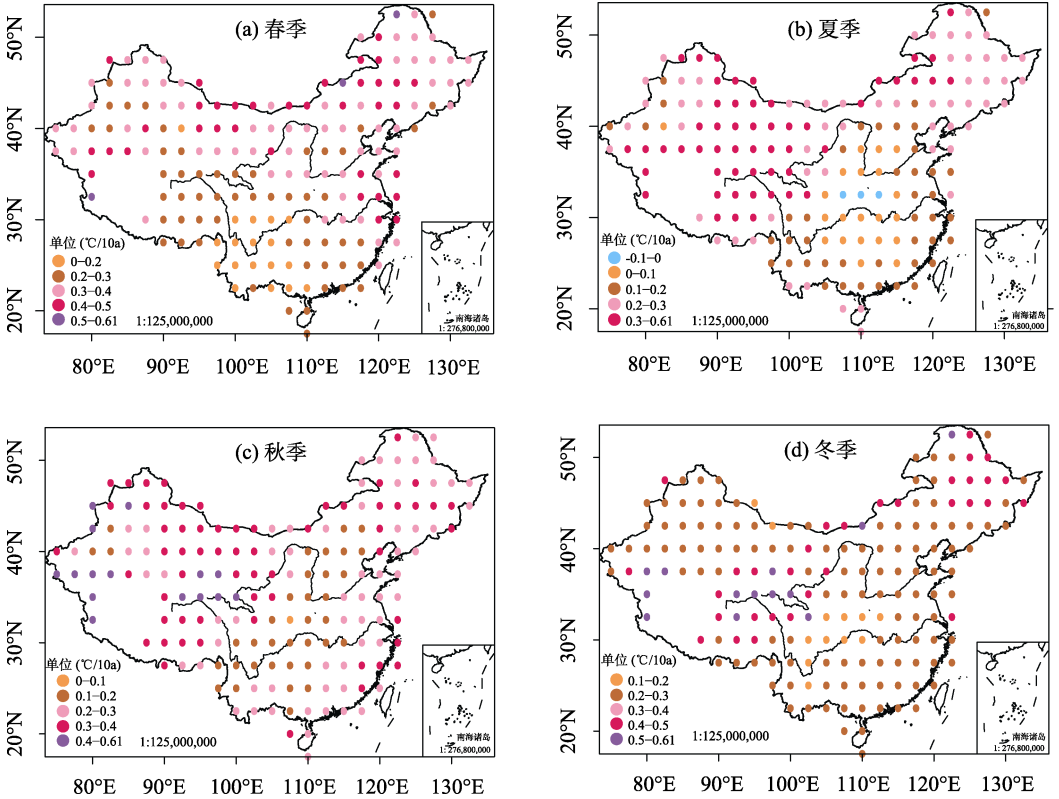


图 3 中国格点季节平均气温变化趋势空间分布图（依据审图号为 GS(2016)1569 号的标准地图制作）

除西藏、华南大部、华中及华北部分、东北东部及北部少量地区以 0.1–0.2 °C/10a 的速率增加，趋势大于 0.3–0.4 °C/10a 出现在青海、西藏北部、新疆北部部分地区；增暖大于 0.4 °C/10a 出现在西藏西部地区。冬季平均气温在华中部分、华南及西南部分、新疆中部及北部少量地区以 0.1–0.2 °C/10a 的增加，为冬季气温最弱的变暖区域，其中部分地区以 0–0.1 °C/10a 增加；东南沿海地区、江苏部分、东北大部、华北北部、西藏中部以 0.3–0.4 °C/10a 的增加；增暖速率为 0.4–0.61 °C/10a 出现在东北中部及北部部分、西藏东部及西部、青海及甘肃部分地区，其余包括华东大部、华南部分、东北南部、内蒙东部、华北和西南部分、新疆大部以 0.2–0.3 °C/10a 增加。

图 4 展示了利用不包含城市化偏差的 763 个国家基本/基准站计算得到的中国区域年平均的距平曲线。1969 年之前的区域距平降低。1969–1987 年气温距平改变不大，为平稳期。1987 年以后是一个气温距平快速增加时期，较大气温距平值在该段时间出现。80 年代末期，是区域年平均距平由负向正转变的年代际转变时期。

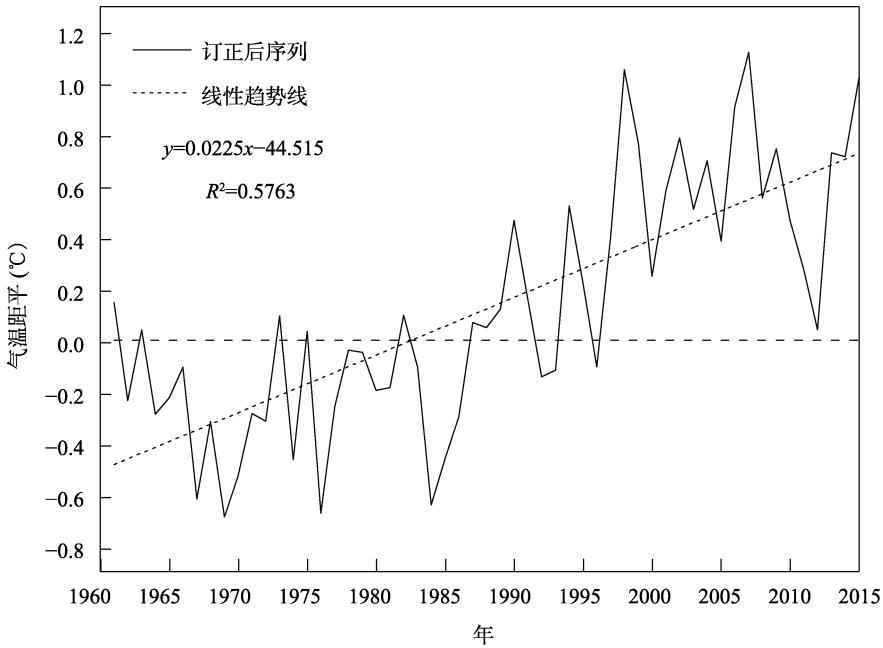


图 4 去城市化影响的中国区域年距平序列曲线图

从季节平均距平的年代际变化来看（图 5），不难发现各季的平均距平曲线在 70 年代中后期以前，都显示出较明显的降低趋势；90 年代中后期则逐渐步入一个相对温暖期，季节距平值大于 0 占大多数。春季气温距平 90 年代中后期以前基本在 0 值线附近波动，90 年代末开始，春季平均距平值都在 0 值线以上，且距平值都在较大的正值范围内波动。夏季平均距平与春季有相似的演变特征，90 年代中期以前，区域距平大多数接近 0，而后至 2015 年的区域距平都大于 0，值也较大。70 年代中期之前，气温距平呈微弱下降趋势，从 70 年代中后期至 90 年代中期，气温距平波动幅度很小。秋季气温距平 90 年代中期以

前小于 0 的占大多数，在 90 年代中期以后，气温距平多数大于 0，且距平值比较大。冬季气温距平在 80 年代末之前小于 0 的占大多数，且值比较小，80 年代末之后，大于 0 的占大多数。

4.3 数据结果验证

通过与先前学者评价单站城市化偏差的研究方法进行对比，以验证本文订正城市化偏差的方法和所获结果的合理性。综合考虑资料的可用性和站点分布的均匀性，挑选北京、武汉、银川和深圳 4 个站点拟作为华北、华中、西北、华南区域的代表性大城市站，对订正的结果开展了检验。

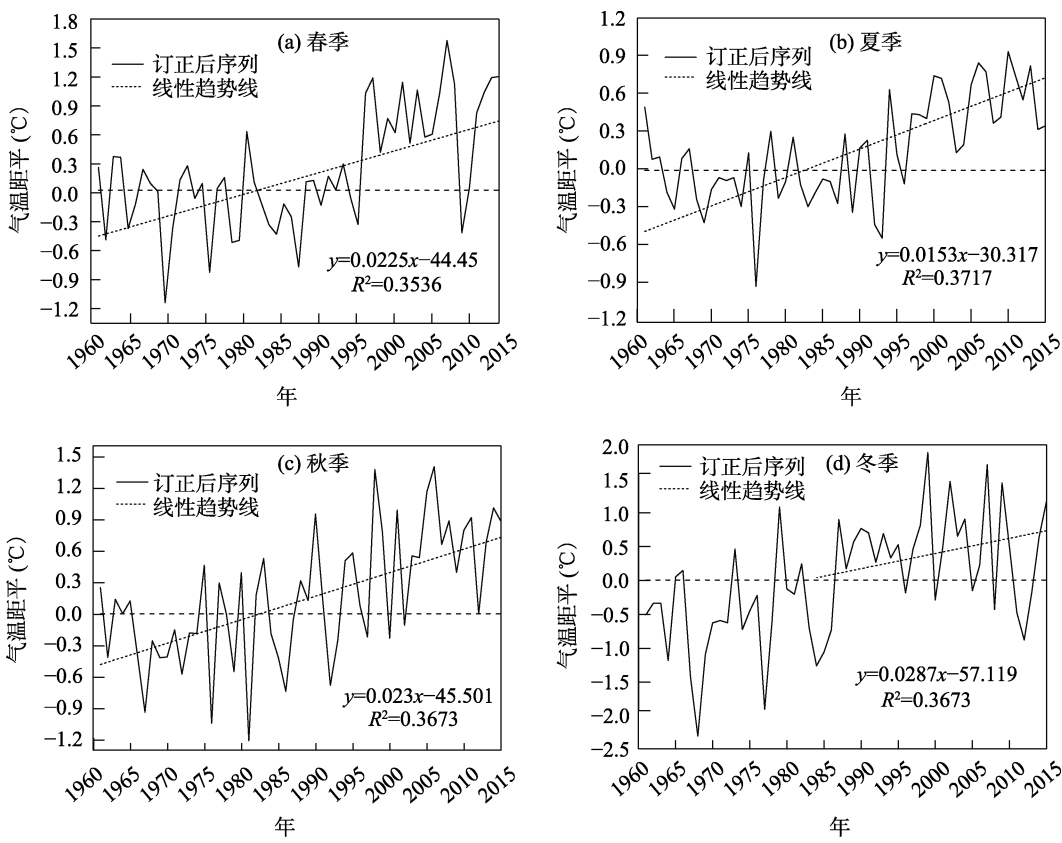


图 5 去城市化影响的中国区域四季距平序列曲线图

本文分析结果同初子莹等^[15]订正 1961–2000 年及 Yan 等^[16]估计北京站 1977–2006 年期间的城市化偏差非常一致；同 Ren 等和陈正洪等^[17,18]订正武汉站的结果，李凤琴等^[19]订正银川站的结果，及 Chen 等、张恩洁等和司鹏等^[20–22]订正深圳站的结果进行了比较，由于所用的参考站、选取参考站的方法、参考序列时间长度及研究时间范围的差异性，发现本文与前人所获得的订正结论较为一致。

5 讨论和总结

本数据集在假设城市化对国家站平均地面气温趋势的影响是线性递增的基础上, 通过中国气象局国家气象信息中心提供的“国家级地面气象站均一化气温月值数据集”, 以及课题组发展的 143 个乡村站的成果, 利用城市与乡村比对的方法, 采用自东向西逐经度订正的手段, 对我国近半个多世纪气温中的城市化偏差进行了订正, 得到一些有益的发现。结果表明, 与订正城市化偏差前我国地面气温变化的零散分布, 温度演变趋势在订正后分布相对较为集中, 呈现带状, 这与我国实际的气候变化和气候带分布比较吻合, 另外, 订正城市化偏差后我国的增温趋势广泛显著降低, 表明我国国家站地面气温记录中含有明显的城市化偏差, 较大的偏差分布于华北地区、华中部分、东北北部、西南部分、新疆及西藏部分地区, 为 $0.1\text{--}0.3\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$; 采用网格面积加权法^[23], 估算得到我国区域地面气温序列中的相对城市化偏差为 19.6%。

本数据集是在站点基础上订正国家站地面气温中的城市化偏差, 基本消除了城市化偏差的影响, 基于本数据集分析现代气候变化, 所获得的全国和区域地面气温变化趋势时空特征较为符合实际。因此, 本数据集一方面对气候变化监测、检测和模拟研究具有显著意义, 另一方面, 对气候变化影响评估也有重要价值, 水资源及农业领域的气候变化影响评估所需的区域背景气候变化信息, 本数据集可做重要参考。

作者分工: 任国玉对数据集的开发做了总体设计; 温康民采集和处理了国家基本/基准站气温数据; 李娇、周雅清设计了模型和算法; 任玉玉做了数据验证; 温康民、郑秀丽、孙秀宝撰写了数据论文等。

利益冲突声明: 本研究不存在研究者以及与公开研究成果有关的利益冲突。

参考文献

- [1] Ren, G. Y., Zhou, Y. Q., Chu, Z. Y., *et al.* Urbanization effect on observed surface air temperature trends in North China [J]. *Journal of Climate*, 2008, 21: 1333–1348.
- [2] 张爱英, 任国玉, 周江兴等. 中国地面气温变化趋势中的城市化影响偏差[J]. *气象学报*, 2010, 68(6): 957–966.
- [3] Yang, X. C., Hou, Y. L., Chen, B. D. Observed surface warming induced by urbanization in east China [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116: D14113.
- [4] Wang, J., Tett, S. F. B., Yan, Z. W. Correcting urban bias in large-scale temperature records in China, 1980–2009 [J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44: 401–408.
- [5] 初子莹, 任国玉. 北京地区城市热岛强度变化对区域温度序列的影响[J]. *气象学报*, 2005, 63(4): 534–540.
- [6] 温康民, 任国玉, 李娇等. 国家基本/基准站地面气温资料城市化偏差订正[J]. *地理科学进展*, 2019, 38(4): 600–611.

- [7] 温康民, 任国玉, 李娇等. 基于城市化偏差订正的中国大陆月平均地面气温网格数据集 (1961–2015) [J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2019. <https://doi.org/10.3974/geodb.2019.06.08.V1>.
- [8] 全球变化科学研究数据出版系统. 全球变化科学研究数据共享政策 [OL]. <https://doi.org/10.3974/dp.policy>. 2014.05 (2017 年更新).
- [9] 国家气象信息中心. 中国国家级地面气象站均一化气温月值数据集(V1.0)评估报告[M]. 北京: 国家气象信息中心, 2013.
- [10] 任国玉, 张爱英, 初子莹等. 我国地面气温参考站点遴选的依据、原则和方法[J]. 气象科技, 2010, 38(1): 78–85.
- [11] Ren, G. Y., Li, J., Ren, Y. Y., *et al.* An integrated procedure to determine a reference station network for evaluating and adjusting urban bias in surface air temperature data [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climate*, 2015, 54: 1248–1266.
- [12] Karl, T. R., Williams, C. N. An approach to adjusting climatological time series for discontinuous inhomogeneities [J]. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 1987, 26: 1744–1763.
- [13] Mitchell, T. D., Jones, P. D., *et al.* An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids [J]. *International Journal of Climatology*, 2005, 25: 693–712.
- [14] 李庆祥. 气候资料均一性研究导论[M]. 北京: 气象出版社, 2011: 43–44.
- [15] 初子莹, 任国玉. 北京地区城市热岛强度变化对区域温度序列的影响[J]. 气象学报, 2005, 63(4): 534–540.
- [16] Yan, Z. W., Li, Z., Li, Q. X., *et al.* Effects of site change and urbanisation in the Beijing temperature series 1977–2006 [J]. *International Journal of Climatology*, 2010, 30: 1226–1234.
- [17] 陈正洪, 王海军, 任国玉等. 湖北省城市热岛强度变化对区域气温序列的影响[J]. 气候与环境研究, 2005, 10(4): 771–779.
- [18] Ren, G. Y., Chu, Z. Y., Chen, Z. H., *et al.* Implications of temporal change in urban heat island intensity observed at Beijing and Wuhan stations[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34: L05711.
- [19] 李凤琴, 谭华. 近 50 年来城市化对银川市局地气候的影响[J]. 宁夏工程技术, 2009, 8(4): 303–309.
- [20] 司鹏, 李庆祥, 李伟等. 城市化对深圳气温变化的贡献[J]. 大气科学学报, 2010, 33(1): 110–116.
- [21] 张恩洁, 赵昕奕, 张晶晶. 近 50 年深圳气候变化研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2007, 43(4): 535–541.
- [22] Chen, X. L., Zhao, H. M., Li, P. X., *et al.* Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 104: 133–146.
- [23] Jones, P. D., Hulme, M. Calculating regional climatic time series for temperature and precipitation: methods and illustrations [J]. *International Journal of Climatology*, 1996, 16: 361–377.