

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2020.0079

AO Xue, CUI Yan, ZHAI Qingfei, et al. Effect of urbanization on the air temperature variation of Liaoning Province [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(3):1067–1076. [敖雪, 崔妍, 翟晴飞, 等. 辽宁省气温变化趋势中的城市化影响研究[J]. 冰川冻土, 2020, 42(3):1067–1076.]

## 辽宁省气温变化趋势中的城市化影响研究

敖 雪<sup>1</sup>, 崔 妍<sup>1</sup>, 翟晴飞<sup>2</sup>, 周晓宇<sup>1</sup>, 沈历都<sup>1</sup>, 赵春雨<sup>1</sup>, 宁喜龙<sup>3</sup>

(1. 沈阳区域气候中心, 辽宁 沈阳 110166; 2. 辽宁省人工影响天气办公室, 辽宁 沈阳 110166; 3. 阜新市气象局, 辽宁 阜新 123100)

**摘 要:** 利用1961–2017年逐日平均、最低、最高气温资料、DMSP/OLS卫星夜晚灯光数据, 定量分析了城市化对辽宁省平均气温和极端气温指数趋势变化的影响。研究表明: 辽宁省气温呈显著增加趋势, 城市站增温速率明显快于乡村站; 平均最低气温增温率最快, 平均气温次之, 平均最高气温相对较慢; 四季增温速率依次为: 冬季>春季>秋季>夏季; 最低气温的城市化影响贡献率最大, 平均气温次之, 最高气温相对较小; 城市站最低气温的明显升高和最高气温增幅较小, 必将导致日较差明显减小和日较差城市化影响贡献率的增大。城市化加剧了辽宁省极端低温事件的显著减少和极端高温事件的明显增加, 城市化对极端气温事件影响显著。与冷事件有关的极端气温指数的城市化影响均为负值, 与暖事件有关的均为正值; 相对指数的城市化影响贡献率较大, 持续时间指数次之, 除气温日较差以外的绝对指数相对较小。基于最低气温的极端气温指数比基于最高气温的极端气温指数受城市化影响更显著, 其原因可能是城市热岛强度的非对称性以及城市站和乡村站气溶胶浓度之间的差异, 导致最高气温的增加没有最低气温的增加显著。

**关键词:** 城市化; 极端气温; 气候变化; 辽宁省

**中图分类号:** P467      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-0240(2020)03-1067-10

### 0 引言

IPCC AR5指出, 过去一百年全球平均地表温度升高了 $[0.85(0.65 \sim 1.06) ^\circ\text{C}]$ , 1951年以来全球平均地表温度升温速率几乎为1880年以来的两倍, 预测到21世纪末, 全球平均地表气温可能升高 $1.1 \sim 6.4 ^\circ\text{C}$ <sup>[1]</sup>。除全球气候变化自身的因素外, 土地利用和温室气体的排放等人类活动很可能是影响气温变化的重要因素。在全球变暖背景下, 快速的经济发展和城市化进程导致下垫面性质发生变化, 城市区域扩展, 城市热岛效应越发明显, 极端气候事件频发。近年来, 国内外众多学者都展开了城市化对气温的影响研究。Kim等<sup>[2]</sup>对1973–1996年韩国首尔地区城市化展开研究, 发现城市热岛效应在秋季和冬季较显著, 夏季较弱, 四季的热岛强度具有差异。Morris等<sup>[3]</sup>研究表明, 墨尔本城市化导致

的热岛效应并未受较大风速和较多云量的影响。任国玉等<sup>[4]</sup>对河北两站气温的概率分布进行对比, 发现气温的概率密度都有升高的趋势, 冬春两季的城市化影响贡献率比夏秋两季更高。周雅清等<sup>[5]</sup>针对快速城市化进程对华北区域气温的影响进行分析, 发现日较差、最低气温和平均气温的城市化影响显著, 冬季的城市化增温最大, 夏季最小。黄宏涛等<sup>[6]</sup>对珠三角地区研究发现, 改革开放后气温增温区域比近50年范围扩大, 强度增加; 就城市化而言, 广州的城市化影响比近50年有所减小, 而佛山、惠州地区的城市化影响增大。白莹莹等<sup>[7]</sup>研究城市化进程对重庆夏季高温天气的影响, 发现城市站高温日数显著减少, 与郊区站差异明显, 城市化对平均气温和最低气温起到增温效应, 对最高气温则起到降温效应。吴婕等<sup>[8]</sup>分析城市化对华南地区

收稿日期: 2019-03-26; 修订日期: 2019-07-02

基金项目: 辽宁省气象局科研课题(BA201803; 201818); 中国气象局气候变化专项(CCSF202013)资助

作者简介: 敖雪(1986–), 女, 重庆人, 工程师, 2012年在南京信息工程大学获硕士学位, 从事气候变化研究. E-mail: aoxuefyh@163.com

通信作者: 赵春雨, 正研级高级工程师, 从事气候变化研究. E-mail: springrainscn@163.com.

区域气候的影响,结果表明在城市化影响下,城市站高温日数明显增加,气温日较差呈下降趋势。Wang等<sup>[9]</sup>通过研究南京城市扩展过程中的气温变化,发现气温梯度从乡村到城区逐渐增大,快速的城镇化对当地气温影响显著。Jia等<sup>[10]</sup>研究城镇化进程对武汉地区气温变化的影响,发现武汉站附近城镇化效应明显,城市热岛强度在1988–2004年增幅明显,城市热岛强度具有明显季节特征,夏季强,冬季弱。Park等<sup>[11]</sup>利用UMR(Urban Minus Rural,城市减去乡村)方法评估了两个时段期间城镇化对韩国局部气温变暖趋势的影响,结果显示,在近40年来,30%~45%的局部变暖趋势可能是由于城市化的影响,站点的分类方法和研究时段的划分都会影响城镇化效应的评估。

城镇化不仅会导致平均气温显著升高,也会对极端气候事件产生影响。对中国地区的研究表明,近年来全国极端暖事件发生频率明显增多,极端冷事件发生频率显著减少。郑祚芳<sup>[12]</sup>和张雷等<sup>[13]</sup>对北京极端气温变化特征及其对城市化的响应进行分析,发现北京极端最高、最低气温呈显著增加趋势,北京市区极端气温的增温率明显高于郊区,城镇化影响显著。周雅清等<sup>[14]</sup>研究指出,基于最低气温的极端指数城镇化影响贡献率均超过50%,比基于最高气温的城镇化影响显著。彭霞等<sup>[15]</sup>和贾艳青等<sup>[16]</sup>对长三角地区极端气温事件进行分析,发现极端高温事件显著上升,1990–2010年,城镇化对极端高温事件的影响明显增强,快速城镇化对长三角北部城市极端高温事件的影响大于南部城市;综上所述,城镇化对极端气温事件的影响不容忽视。

辽宁省位于我国东北地区,是气候变暖最显著的地区之一;2016年8月,辽宁省持续高温闷热,平均气温较常年同期明显偏高2.4℃,为近28年来历史同期最高值;2017年5月18–20日为1961年以来最早的高温过程,高温日数多,持续时间长达3~6d;2017年全省80%以上的站点最高气温超过35℃,有52站日最高气温达极端事件标准,17站日最高气温为1961年以来历史极大值,其中义县、羊山和绥中均超过40℃。辽宁省极端气温事件的增加是否与城镇化有关,急需在前人的分析工作基础上,进一步展开研究。

快速的城市化给辽宁带来一系列气候影响。但是,国内针对气候受城镇化影响的研究基本集中在几个一线大城市,一般只侧重于平均气温或者极

端气温二者之一进行分析,对辽宁的研究少之又少。为了更加深入的认识辽宁省气温受城市化的影响,拟使用夜间灯光数据和城镇面积数据提取城市阈值,划分城市站和乡村站,结合UMR法分析城镇化对辽宁省气温平均状态、极端状态的影响,为辽宁省气温变化趋势的预测提供指导,为认识气候观测资料序列的不确定性,其结果对全球和区域气温变化检测和归因研究有重要意义,为更加深入了解城市发展对周边环境气候的影响提供重要的参考依据。

## 1 资料与方法

### 1.1 资料来源

研究资料包括以下三个方面:(1)1961–2017年辽宁国家站气温(包括逐日平均、最低以及最高气温)资料。(2)DMSP/OLS卫星夜晚灯光数据来源于国家地理数据中心,研究时间段为1993–2013年,该数据不仅经过了偶然噪声滤除处理和消云处理等过程,排除了灯光饱和问题的干扰<sup>[17]</sup>。(3)城镇用地面积来自于辽宁省统计年鉴(1993–2013年)。

### 1.2 极端气温指数与城镇化影响定义

采用“欧洲地区极端事件统计和区域动力降尺度”项目(STARDEX)定义的9个极端气温指数(表1),根据指数的计算方法将极端气温指数分为三类:(1)绝对指数,基于固定阈值和原始观测数据的指数,包括霜冻日数tnfd、结冰日数txice、气温日较差trav;(2)相对指数,基于相对阈值的指数,包括冷日比例txf10、暖日比例txf90、冷夜比例tnf10、暖夜比例tnf90;(3)持续时间指数,包括热日持续指数txhw90、冷夜持续指数tncw10。

为了定量评价城镇化对气温的影响,城镇化影响 $\Delta X_u$ 和城镇化影响贡献率 $E_u$ 参照文献<sup>[5]</sup>定义来计算。极端气温指数线性趋势通过最小二乘法计算,变化趋势显著性检验采用Mann-Kendall非参数检验方法,城镇化影响显著性采用相关系数的 $t$ 检验方法进行检验,参见文献<sup>[29]</sup>。

### 1.3 研究方法

采用统计数据比较法,利用DMSP/OLS卫星夜间灯光数据,提取辽宁省城镇用地空间信息<sup>[18–20]</sup>。该方法需要假定辽宁省统计年鉴上的城镇面积为辽宁省真实用地面积;并且从20世纪90年代开始,城镇面积是持续增加的。以此为依据,通过设置各市分级阈值,结合二分法,调整阈值,

表 1  极端气温指数的定义  
Table 1  Definition of the extreme temperature indexes

指数名称	定义	单位
霜冻日数 tnf <sub>d</sub>	日最低气温<0 ℃的全部日数	d
结冰日数 txice	日最高气温<0 ℃的全部日数	d
气温日较差 trav	日最高气温与最低气温之差的平均值	℃
冷日比例 txf <sub>10</sub>	日最高气温低于第 10 百分位天数的百分比	%
暖日比例 txf <sub>90</sub>	日最高气温高于第 90 百分位天数的百分比	%
冷夜比例 tnf <sub>10</sub>	日最低气温低于第 10 百分位天数的百分比	%
暖夜比例 tnf <sub>90</sub>	日最低气温高于第 90 百分位天数的百分比	%
热日持续指数 txhw <sub>90</sub>	日最高气温>历史同期(气候基准期内逐年以该日为中点的连续 5 日)第 90 百分位数的最长连续天数	d
冷夜持续指数 tncw <sub>10</sub>	日最低气温<历史同期(气候基准期内逐年以该日为中点的连续 5 日)第 10 百分位数的最长连续天数	d

计算每个阈值下的城镇面积,直到与统计年鉴上的城镇面积充分接近,认为该阈值为这个城市的最佳阈值。确定最佳阈值后,通过比较国家站 7 km 范围内的平均夜灯灰度值与该国家站所在城市阈值,来判定城市站和乡村站。

表 2 为辽宁省各市不同年份卫星夜间灯光灰度阈值。各市的灯光阈值基本与城市的发展水平一致,其中沈阳、大连、辽阳灰度值较大,丹东、阜新相对较小,随着年份的增加,各市灰度阈值明显呈增加趋势。

表 2  辽宁省各市不同年份夜晚灯光灰度阈值  
Table 2  Gray thresholds of night light in cities of Liaoning Province in 1993, 2003, 2013

城市	1993 年	2003 年	2013 年
沈阳	24	46	52
大连	16	28	45
鞍山	18	25	34
抚顺	20	23	38
本溪	7	17	29
丹东	5	10	17
锦州	14	19	33
营口	19	26	41
阜新	9	14	19
辽阳	22	29	48
铁岭	11	22	25
朝阳	6	16	22
盘锦	21	36	43
葫芦岛	14	16	21

从 1993 年、2003 年、2013 年卫星夜间灯光空间分布图中可以看出,随时间推移,沈阳、大连等部分地区灰度值增大,城市化明显。1993 年共计城

市站 31 个,乡村站 30 个;2013 年共计城市站 40 个,乡村站 21 个。随着城市化的发展,部分乡村站转换成城市站,凌源从城市站转换成乡村站,可能是凌源城市化进程较周边站点缓慢,从而退化成乡村站(图 1)。本文选定从 1993 – 2013 年始终为城市站的 29 个站点代表城市站,始终为乡村站的 21 个站点代表乡村站。

2  结果与分析

2.1  城市化对平均气温的影响

从表 3 中可以看出,除秋季的最高气温之外,城市站和乡村站平均气温、平均最高气温、平均最低气温的增温率均通过显著性检验,城市站的增温速率明显快于乡村站,其中城市站年平均最低气温增温率最大,为 0.501 ℃·(10a)<sup>-1</sup>,而乡村站年平均最高气温增温率相对较小,仅 0.212 ℃·(10a)<sup>-1</sup>。城市站和乡村站平均最低气温增温率差异较大,为 0.176 ℃·(10a)<sup>-1</sup>,平均气温增温率差异为 0.091 ℃·(10a)<sup>-1</sup>,平均最高气温增温率差异为 0.017 ℃·(10a)<sup>-1</sup>,相对较小;无论城市站还是乡村站,均是平均最低气温增温率最快,平均气温次之,平均最高气温增温速率相对较慢。就四季而言,三者变化基本一致,均表现为冬季增温速率最快,春季、秋季次之,夏季增温速率最慢,该结论与李娇等<sup>[21]</sup>和任国玉等<sup>[4]</sup>的研究结论基本一致。

从 1961 – 2017 年辽宁省城市站和乡村站气温变化趋势中可以看出(图 2),近 57 年来,城市站平均气温增温超过 1.9 ℃,乡村站增温超过 1.3 ℃,其增暖趋势明显大于我国平均气温的增暖趋势 [0.23 ℃·(10a)<sup>-1</sup>],也超出了全球平均气温的增幅速度 [0.12 ℃·(10a)<sup>-1</sup>]<sup>[22]</sup>,因此,剔除掉全球大背



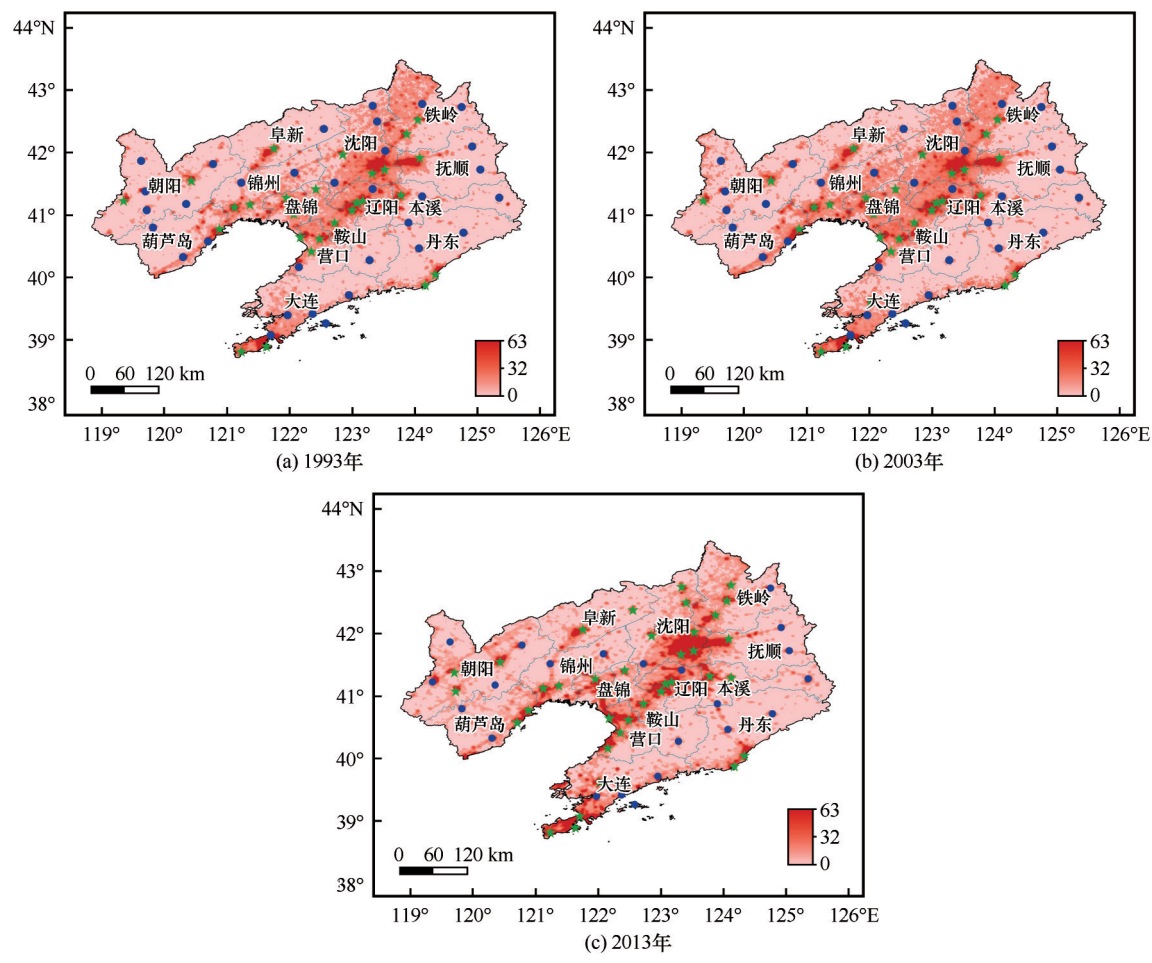


图1 1993年、2003年、2013年卫星夜间灯光灰度值和城市站、乡村站的空间分布(绿色代表城市站;蓝色代表乡村站)

Fig. 1 Distribution of city stations and rural stations of Liaoning Province and DMSP/OLS nighttime light gray value in 1993, 2003 and 2013 (green: urban station; blue: rural station)

表3 1961 – 2017年辽宁省城市站和乡村站平均增温率

Table 3 The average increasing rate of temperature at city stations and rural stations of Liaoning Province from 1961 to 2017						
温度要素	台站类型	年	春季	夏季	秋季	冬季
平均气温增温率/[ $^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ ]	城市	0.335*	0.341*	0.183*	0.226*	0.425*
	乡村	0.244*	0.307*	0.158*	0.165*	0.367*
平均最高气温增温率/[ $^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ ]	城市	0.229*	0.288*	0.146*	0.139*	0.276*
	乡村	0.212*	0.288*	0.142*	0.123	0.271*
平均最低气温增温率/[ $^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ ]	城市	0.501*	0.543*	0.279*	0.382*	0.615*
	乡村	0.325*	0.387*	0.214*	0.242*	0.471*

注: \*表示通过0.05显著性水平检验。

景的增温速率,辽宁省较快的气温增幅很大程度上来自于城市化的加速发展。20世纪60、70年代气温相对较低,从80年代开始增温。本文将1985年前后时间段分开进行分析发现,1961 – 1984年城市站平均气温呈微弱下降趋势,变化趋势为 $-0.12^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ ,1985年之后气温急速上升,增温速率为 $0.56^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ ;而乡村站增温明显较城

市站缓慢,1961 – 1984年乡村站变化趋势为 $0.08^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ ,1985年之后的变化速率为 $0.2^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 。在平均最高气温方面,城市站1985年前后的气温变化趋势分别为 $0.06^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 和 $0.34^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ ,乡村站分别为 $0.06^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 和 $0.26^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 。城市站的平均最低气温在1985年之后呈显著增温趋势,增温速率超过 $0.8^{\circ}\text{C}\cdot$

(10a)<sup>-1</sup>, 但乡村站 1985 年之后的增温速率仅 0.17℃·(10a)<sup>-1</sup>。综上所述, 城市站在 1985 年发生了显著的增温突变, 这与辽宁省重工业污染发展的时间相吻合, 邹旭东等<sup>[23]</sup>在分析 1951 – 2012 年沈阳市气象条件变化与空气污染的关系中明确指出

20 世纪 80 年代后期城镇面积扩展, 重工业持续发展, 城市污染排放增多, 气温呈增加趋势; 而乡村站的变化相对平缓, 则说明乡村站能很好的代表背景气温变化和非城市化影响区域的发展速率, 乡村站的选择比较合理。

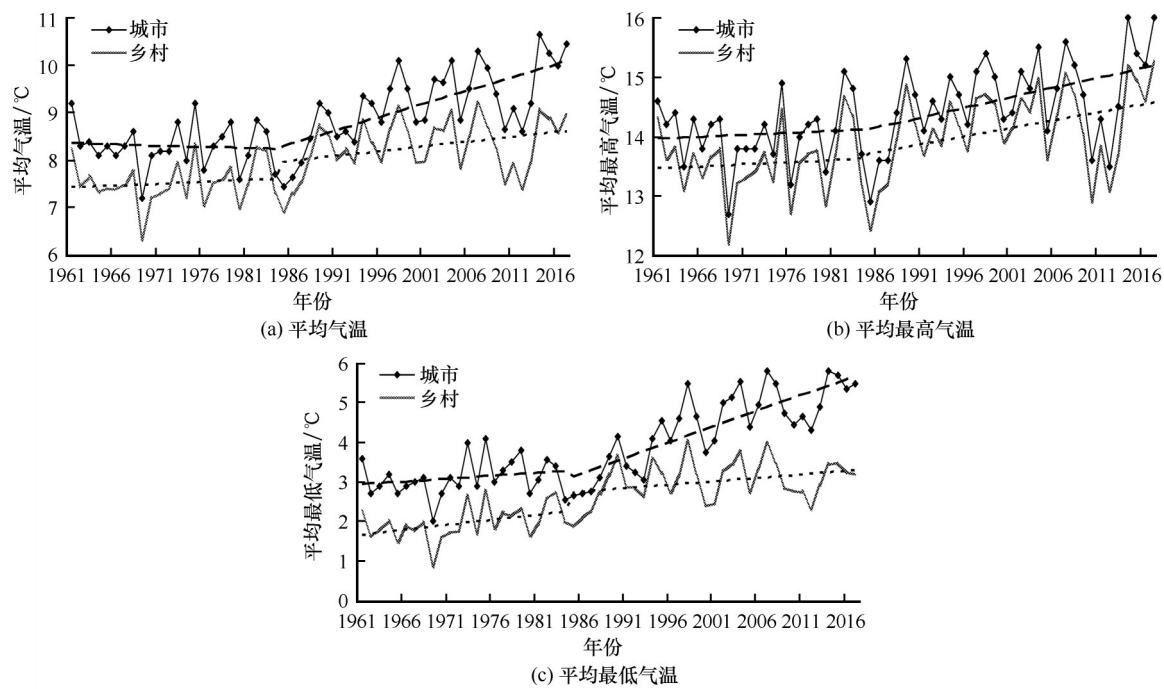


图2 1961 – 2017 年辽宁省城市站和乡村站年气温的年际变化趋势

Fig. 2 The annual variations of the average temperature (a), the average maximum temperature (b) and the average minimum temperature (c) of city stations and rural stations in Liaoning, 1961 – 2017

表 4 表明 1961 – 2017 年辽宁省的城市化影响程度, 可以发现, 无论是城市站还是乡村站, 气温均是呈增加趋势, 在平均最低气温方面, 城市站和乡村站的增幅差异较大, 在平均最高气温方面, 城市站和乡村站增幅比较接近。由此可知, 城市化发展对平均最低气温的变化影响最大, 城市化影响贡献率高达 35.1%, 其次是平均气温, 城市化影响贡献率为 27.2%, 平均最高气温的城市化影响相对较弱, 最高气温的增暖仅 7.4% 是由城市化影响引起。城市站最低气温的明显增加和最高气温增幅较小,

必将导致日较差的明显减小和日较差城市化影响贡献率的增大。对比赵春雨等<sup>[24]</sup>1961 – 2006 年辽宁省城市化研究, 可以发现平均气温的城市化影响贡献率从 14.9% 增加到本文的 27.2%, 可见最近 10 年的气温增温率明显, 城市化对气温的影响显著, 辽宁省城市化影响也随着城镇建设的进一步发展而加剧, 2011 年辽宁省城镇化率达 62.1%, 在全国各自治区中排名仅次于广东和浙江位列第三, 2017 年年底城镇化率进一步提升, 达 67.5%, 高出全国平均值 9 个百分点。

表4 1961 – 2017 年辽宁省城市化影响及城市化影响贡献率

Table 4 Influence of urbanization and its contribution rate in Liaoning Province, 1961 – 2017

温度要素	城市站趋势/[℃·(10a) <sup>-1</sup> ]	乡村站趋势/[℃·(10a) <sup>-1</sup> ]	城市化影响/[℃·(10a) <sup>-1</sup> ]	城市化影响贡献率/%
平均气温	0.335*	0.244*	0.091*	27.164
平均最高气温	0.229*	0.212*	0.017*	7.424
平均最低气温	0.501*	0.325*	0.176*	35.130

注: \*表示通过 0.05 显著性水平检验。

## 2.2 城市化对极端气温指数的影响

本文采用9个极端气温指数,计算近57年辽宁省极端气温指数的变化趋势,并对变化趋势进行了显著性评估,从表5可以发现除乡村站的结冰日数和热日持续指数无显著性变化趋势外,其它指数均通过了显著性检验;霜冻日数、结冰日数、气温日较差、冷日比例、冷夜比例、冷夜持续指数均呈减

少趋势,而暖日比例、暖夜比例、热日持续时间均呈增加趋势,城市化加剧了辽宁省城市站和乡村站极端低温事件的减少和极端高温事件的增加,这与贾艳青<sup>[16]</sup>分析的城市化对长三角地区极端气温事件影响的结论相一致。所有的极端气温指数在城市站和乡村站具有相似的变化趋势(图略),只是城市站的变化趋势较乡村站显著。

表5 1961–2017年辽宁省城市站和乡村站极端气温指数变化趋势及城市化影响  
Table 5 The change trends of extreme temperature indexes in city stations and rural stations, their influence and their contribution rate on urbanization in Liaoning Province, 1961–2017

指数名称	城市站趋势/[℃·(10a) <sup>-1</sup> ]	乡村站趋势/[℃·(10a) <sup>-1</sup> ]	城市化影响 $\Delta X_{ur}$ /[℃·(10a) <sup>-1</sup> ]	城市化影响贡献率 $E_u$ /%
霜冻日数 tnf <sub>d</sub>	-0.973*	-0.612*	-0.361*	37.102
结冰日数 tx <sub>ice</sub>	-0.231*	-0.170	-0.061*	26.407
气温日较差 tr <sub>av</sub>	-0.487*	-0.119*	-0.368*	75.565
冷日比例 tx <sub>f10</sub>	-0.016*	-0.009*	-0.007*	43.750
暖日比例 tx <sub>f90</sub>	0.011*	0.006*	0.005*	45.455
冷夜比例 tn <sub>f10</sub>	-0.031*	-0.016*	-0.015*	48.387
暖夜比例 tn <sub>f90</sub>	0.021*	0.011*	0.010*	47.619
热日持续指数 tx <sub>hw90</sub>	0.409*	0.239	0.170*	41.565
冷夜持续指数 tn <sub>cw10</sub>	-1.002*	-0.573*	-0.429*	42.814

注: \*表示通过0.05显著性水平检验。

从城市化影响上看,所有与冷事件有关的极端气温指数的城市化影响均为负值,而与暖事件有关的极端气温指数的城市化影响均为正值,且冷事件的城市化影响绝对值较暖事件的偏大,这与Ren等<sup>[25]</sup>提出的中国大陆极端气温指数的城市化影响的数值分布情况比较一致。在绝对指数中,城市化影响均为负值,城市化加剧了霜冻日数、结冰日数、气温日较差的减少,其中气温日较差的城市化影响贡献率高达75.6%,说明近年来气温日较差的显著减小有70%以上是由于城市化进程的持续发展、城市规模的快速扩张、城市人口不断增加以及污染加剧等原因造成的。就相对指数而言,冷夜比例和暖夜比例的城市化影响贡献率较冷日比例和暖日比例偏大,其中冷夜比例受城市化影响最大,其值的升高有近5成是城市化影响导致的。对持续时间指数而言,热日持续指数和冷夜持续指数的城市化影响贡献率比较接近,均在40%左右。因此,可以发现相对指数的城市化影响贡献率较大,持续时间指数次之,除气温日较差以外的绝对指数相对较小。或许是由于选取的极端气温指数不同,李娇等<sup>[21]</sup>在沈阳站气温趋势和城市化偏差分析中得出的是相对指数的贡献率最大,绝对指数次之,持续时间指数的影响较为微弱的结论。综上所述,城市

化加剧了辽宁省国家级气象站极端低温事件的减少和极端高温事件的增加,城市化对极端气温事件变化的影响非常显著。

由于霜冻日数、结冰日数的极端事件季节性强,故不对其四季变化展开分析,本文计算持续时间指数和相对指数的四季变化情况,发现四季变化与年平均变化趋势相近,均表现为与冷事件有关的极端气温指数的城市化影响均为负值,与暖事件有关的极端气温指数的城市化影响均为正值。在相对指数中,冷日比例的城市化影响贡献率在冬季最明显,为53.3%,暖日比例的城市化影响贡献率在秋季最大,为46.2%;冷夜比例和暖夜比例的城市化影响贡献率均表现为夏季变化最显著,贡献率均在60%以上。在绝对指数中,热日持续指数和冷夜指数的城市化影响贡献率均表现为秋冬两季最为显著,热日持续指数对应的贡献率均是100%,冷夜持续指数的贡献率也均超过50%。由于城市化影响造成的四季气温日较差显著增大,均超过70%,其中春季贡献率为82.2%,夏季次之,秋冬两季相对较小(表6)。

图3给出极端气温指数城市化影响贡献率的对比情况,可以清楚反映城市化对不同指数的不同影响。受城市化影响最小的为结冰日数,贡献率为



表6 1961—2017年辽宁省城市站和乡村站极端气温指数城市化影响和城市化影响贡献率四季变化

Table 6 Seasonal urbanization impact ( $\Delta X_{ur}$ ) and urbanization impact contribution rate ( $E_u$ ) in Liaoning Province, 1961—2017

指数名称	春		夏		秋		冬	
	$\Delta X_{ur}$	$E_u$	$\Delta X_{ur}$	$E_u$	$\Delta X_{ur}$	$E_u$	$\Delta X_{ur}$	$E_u$
气温日较差 trav	-0.338*	82.238	-0.249*	79.808	-0.415*	72.426	-0.475*	72.519
冷日比例 txf10	-0.004	—	-0.011	—	-0.005*	45.455	-0.016*	53.333
暖日比例 txf90	0.004	—	0.001	—	0.006*	46.154	0.005*	45.455
冷夜比例 tnf10	-0.012	—	-0.021*	61.765	-0.017*	59.259	-0.016	—
暖夜比例 tnf90	0.008*	40.000	0.016*	66.667	0.001	—	0.006*	54.545
热日持续指数 txhw90	0.189*	64.948	0.229	—	0.211*	100.000	0.151*	100.000
冷夜持续指数 tncw10	-0.121	—	-0.003	—	-0.157*	55.477	-0.584*	54.326

注:  $\Delta X_{ur}$  表示城市化影响,  $E_u$  表示城市化影响贡献率, \*表示通过 0.05 显著性水平检验, “—” 表示城市化影响未通过 0.05 显著性检验, 则不计算城市化影响贡献率。

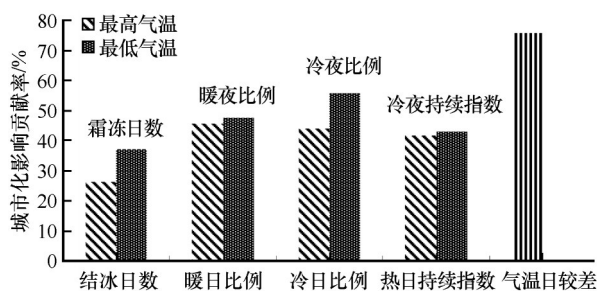


图3 极端气温指数的城市化影响贡献率对比

Fig. 3 Urbanization impact contribution rates of some extreme temperature indexes

26.1%; 城市化对气温日较差的影响最为显著, 这是因为城市站的最低气温增幅最为明显, 最高气温增温幅度最小, 因此, 日较差明显减少, 而乡村站增温较缓慢, 最低气温和最高气温差异较小, 所以导致的日较差城市化贡献率最大。基于最低气温的极端气温指数(霜冻日数、暖夜比例、冷夜比例、冷夜持续指数)比基于最高气温的极端气温指数(结冰日数、暖日比例、冷日比例、热日持续指数)受城市化影响更显著。Ren 等<sup>[25]</sup>和季崇萍<sup>[26]</sup>在城市化影响研究中指出, 夜晚的城市热岛强度明显高于白天, 这种非对称性现象就导致了最低气温快速增温, 基于最低气温的极端气温指数趋势变化显著; 于凤硕等<sup>[27]</sup>计算了山东省极端气温冷暖事件的非对称性影响和贡献率, 指出城市热岛强度的非对称具有复杂的差异性。并且由于最近几年城市不断增加的重工业污染物, 导致气溶胶浓度与乡村站不尽相同, 城区白天较高的气溶胶浓度会使太阳辐射减少, 从而影响城市热岛效应, 导致最高气温的增温没有最低气温的增温显著<sup>[13,26]</sup>。

### 3 讨论

本文结合土地利用资料和卫星夜间灯光数据,

对辽宁省具有长序列观测的国家级气象站进行分类, 得到 29 个城市站和 21 个乡村站, 并对城市站由于城市化过程引起的极端气温变化趋势进行评估, 得到若干新的结果。前人有关这方面的区域尺度研究, 除了对城市站进行分类并单独开展评价外, 还对国家站作为一个整体的城市化影响和贡献率开展分析<sup>[28-30]</sup>。在乡村站一致的情况下, 针对城市站的分析结果, 要比同时期针对所有国家站的分析结果来的大, 因此严格地说本文结果和前述工作得到的结论不具有可比性。

另外, 由于目前采用所有方法选择的乡村站都不是真正的乡村站, 致使针对同一时期、统一地区或站网的分析结果差异也比较大, 只有那些基于更乡村的参考站获得的估计结果<sup>[31]</sup>, 或者采用最优指纹等方法获得的估算值<sup>[32]</sup>, 才接近真实的城市化影响及其城市化贡献率。因此, 本文给出的针对城市站的评价结果, 是偏于保守的, 实际的城市化影响和城市化贡献率应该略大。

### 4 结论

(1) 1961—2017 年辽宁省各气温值呈显著增加趋势, 增温速率城市站明显比乡村站大; 四个季节相比较, 平均气温、平均最高(最低)气温变化一致, 增温速率由快到慢依次为冬季、春季、秋季和夏季。

(2) 近 57 年辽宁省城市站平均气温增温超过 1.9℃, 乡村站增温超过 1.3℃, 剔除掉全球大背景的增温速率, 辽宁省较快的气温增幅很大程度上来自于城市化的加速发展。城市站在 1985 年发生显著的增温突变, 这与辽宁省重工业污染发展的时间相吻合; 而乡村站的变化相对平缓, 说明乡村站能很好的代表背景气温变化和非城市化影响区域的

发展速率,乡村站的选择比较合理。

(3) 城市化发展对平均最低气温的变化影响最大,城市化影响贡献率高达 35.1%,其次是平均气温,贡献率为 27.2%,平均最高气温的城市化影响相对较弱,最高气温的增暖仅 7.4% 由城市化影响引起。城市站最低气温的明显增加和最高气温增幅较小,必将导致日较差的明显减小和日较差城市化影响贡献率的增大。

(4) 从年变化上看,城市化效应使得辽宁省极端低温事件显著减少,极端高温事件明显增加,城市化对极端气温事件影响非常显著。在城市化影响上,与冷事件有关的极端气温指数的城市化影响均为负值,与暖事件有关的极端气温指数的城市化影响均为正值。在城市化影响贡献率上,相对指数的城市化影响贡献率较大,持续时间指数次之,除气温日较差以外的绝对指数相对较小。

(5) 极端气温指数的四季变化与年变化趋势类似,均表现为与冷事件有关的极端气温指数城市化影响为负值,与暖事件有关的城市化影响均为正值。在相对指数中,冷日比例的城市化影响贡献率在冬季最显著,暖日比例在秋季最显著,二者均是春夏两季贡献率相对较小;冷夜比例和暖夜比例的城市化影响贡献率均表现为夏季变化最显著,贡献率均在 60% 以上。在绝对指数中,热日持续指数和冷夜持续指数的城市化影响贡献率均表现为秋冬两季最为显著。

(6) 受城市化影响最小的极端指数为结冰日数,影响最大的指数为气温日较差。与基于最高气温的极端气温指数相比,基于最低气温的极端气温指数受城市化影响更大,其原因可能是城市热岛强度的非对称性以及城市站和乡村站气溶胶浓度之间的差异,导致最高气温的升高没有最低气温的升高显著。

## 参考文献(References):

- [1] Qin Dahe, Thomas Stocker, 259 Authors and TSU (Bern & Beijing). Highlights of the IPCC Working Group I Fifth Assessment Report[J]. Climate Change Research, 2014, 10(1): 1-6. [秦大河, Stocker T, 259 名作者和 TSU(驻伯尔尼和北京). IPCC 第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(1): 1-6.]
- [2] Kim Y H, Baik J J. Maximum urban heat island intensity in Seoul[J]. Journal of Applied Meteorology, 2002, 41(6): 651-659.
- [3] Morris C J G, Simmonds I, Plummer N. Quantification of the influence of wind and cloud on the nocturnal urban heat island of a large city[J]. Applied Meteorology, 2001, 40: 169-182.
- [4] Ren Guoyu, Zhang Lei, Bian Tao, et al. Urbanization effect on change of daily temperature at Shijiazhuang weather station[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(2): 398-410. [任国玉, 张雷, 卞韬, 等. 城市化对石家庄站日气温变化的影响[J]. 地球物理学报, 2015, 58(2): 398-410.]
- [5] Zhou Yaqing, Ren Guoyu. The effect of urbanization on maximum, minimum temperatures and daily temperature range in north China[J]. Plateau Meteorology, 2009, 28(5): 1158-1166. [周雅清, 任国玉. 城市化对华北地区最高、最低气温和日较差变化趋势的影响[J]. 高原气象, 2009, 28(5): 1158-1166.]
- [6] Huang Hongtao, Wu Rongjun, Wang Xiaoyun, et al. Effect of urbanization on temperature and diurnal temperature range in Pearl River Delta[J]. Meteorological Monthly, 2016, 42(7): 847-856. [黄宏涛, 吴荣军, 王晓云, 等. 城市化对珠三角地区气温及日较差的可能影响[J]. 气象, 2016, 42(7): 847-856.]
- [7] Bai Yingying, Cheng Bingyan, Wang Yong, et al. Influences of urbanization speed on the summer high temperature and sultry weather in Chongqing[J]. Meteorological Monthly, 2015, 41(3): 319-327. [白莹莹, 程炳岩, 王勇, 等. 城市化进程对重庆夏季高温炎热天气的影响[J]. 气象, 2015, 41(3): 319-327.]
- [8] Wu Jie, Xu Ying, Shi Yu. Urbanization effects on local climate change in South China[J]. Climatic and Environmental Research, 2015, 20(6): 654-662. [吴婕, 徐影, 师宇. 华南地区城市化对区域气候变化的影响[J]. 气候与环境研究, 2015, 20(6): 654-662.]
- [9] Wang F, Ge Q S, Wang S W, et al. A new estimation of urbanization's contribution to the warming trend in China[J]. Journal of Climate, 2015, 28(22): 8923-8938.
- [10] Jia Wenqian, Ren Guoyu, SuoNan Kanzhuo, et al. Urban heat island effect and its contribution to observed temperature increase at Wuhan station, Central China[J]. Journal of tropical meteorology, 2019, 25(1): 102-113.
- [11] Park B J, Kim Y H, Min S K, et al. Long-term warming trends in Korea and contribution of urbanization: an updated assessment[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2017, 122(20): 148-224.
- [12] Zheng Zuofang. Characteristics of extreme temperature variation and their response to urbanization in Beijing[J]. Scientia Geographica Sinica, 2011, 31(4): 459-463. [郑祚芳. 北京极端气温变化特征及其对城市化的响应[J]. 地理科学, 2011, 31(4): 459-463.]
- [13] Zhang Lei, Ren Guoyu, Liu Jiang, et al. Urban effect on trends of extreme temperature indices at Beijing meteorological station[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(5): 1150-1159. [张雷, 任国玉, 刘江, 等. 城市化对北京气象站极端气温指数趋势变化的影响[J]. 地球物理学报, 2011, 54(5): 1150-1159.]
- [14] Zhou Yaqing, Ren Guoyu. Urbanization effect on long-term trends of extreme temperature events in North China[J]. Plateau Meteorology, 2014, 33(6): 1589-1598. [周雅清, 任国玉. 城市化对华北地区极端气温事件频率的影响[J]. 高原气象, 2014, 33(6): 1589-1598.]
- [15] Peng Xia, Guo Bingyao, Wei Ning, et al. Characteristics of extreme heat events variations and their response to urbanization in Yangtze River Delta region in recent sixty years[J]. Resources and Environment in Yangtze Basin, 2016, 25(12): 1917-1926. [彭霞, 郭冰瑶, 魏宁, 等. 近 60 年长三角地区极端高温事件变化特征及其对城市化的响应[J]. 长江流域



- 资源与环境, 2016, 25(12): 1917 – 1926. ]
- [16] Jia Yanqing, Zhang Bo, Zhang Yaozong, et al. Effect of urbanization on spatial and temporal variation of extreme temperature events in the Yangtze River Delta [J]. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(5): 814 – 828. [贾艳青, 张渤, 张耀宗, 等. 城市化对长江三角洲地区极端气温影响的时空分异研究[J]. *自然资源学报*, 2017, 32(5): 814 – 828. ]
- [17] Fu Ying. The impact of urbanization on extreme temperature in the middle and lower reaches of Yangtze River [D]. Nanjing: Nanjing University of information Science & Technology, 2013. [傅颖. 城市化对长江中下游地区极端温度变化的影响研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2013. ]
- [18] Zheng Youfei, Fu Ying, Yin Jifu, et al. Impact of urbanization on summer temperature in the middle and lower reaches of Yangtze River in atmospheric circulation background [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2014, 30(2): 293 – 301. [郑有飞, 傅颖, 尹继福, 等. 大气环流背景下城市化对长江中下游夏季温度的影响研究[J]. *热带气象学报*, 2014, 30(2): 293 – 301. ]
- [19] Shu Song, Yu Bolang, Wu Jianping, et al. Methods for deriving urban built-up area using night-light data: assessment and application [J]. *Remote Sensing Technology and application*, 2011, 26(2): 169 – 176. [舒松, 余伯菡, 吴健平. 基于夜间灯光数据的城市建成区提取方法评价与应用[J]. *遥感技术与应用*, 2011, 26(2): 169 – 176. ]
- [20] He Chunyang, Shi Peijun, Li Jinggang, et al. Restoring urbanization process in China in the 1990s by using non-radiance-calibrated DMSP/OLS nighttime light imagery and statistical data [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(7): 856 – 861.
- [21] Li Jiao, Ren Guoyu, Ren Yuyu, et al. Effect of data homogenization on temperature trend estimation and urban bias at Shenyang station [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2014, 37(3): 297 – 303. [李娇, 任国玉, 任玉玉, 等. 资料均一化对沈阳站气温趋势和城市化偏差分析的影响[J]. *大气科学学报*, 2014, 37(3): 297 – 303. ]
- [22] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis. Working Group I contribution to the Fifth Assessment Report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013: 760 – 816.
- [23] Zou Xudong, Yang Hongbin, Zhang Yunhai, et al. Changes of meteorological factors in Shenyang City during 1951 – 2012 and its relationship with air pollution [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(1): 76 – 83. [邹旭东, 杨洪斌, 张云海, 等. 1951 – 2012年沈阳市气象条件变化及其与空气污染的关系分析[J]. *生态环境学报*, 2015, 24(1): 76 – 83. ]
- [24] Zhao Chunyu, Ren Guoyu, Wang Ying, et al. Study on the effect of urbanization development on regional temperature sequence in Liaoning Province [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2009, 37(29): 14251 – 14254. [赵春雨, 任国玉, 王颖, 等. 辽宁省城市化发展对区域气温序列的影响研究[J]. *安徽农业科学*, 2009, 37(29): 14251 – 14254. ]
- [25] Ren Guoyu, Zhou Yiaqing. Urbanization effect on trends of extreme temperature indices of national stations over Mainland China, 1961 – 2008 [J]. *Journal of Climate*, 2013, 27: 2340 – 2360.
- [26] Ji Chongping, Liu Weidong, Xuan Chunyi, et al. Impact of urban growth on the heat island in Beijing [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, 49(1): 69 – 77. [季崇萍, 刘伟东, 轩春怡, 等. 北京城市化进程对城市热岛的影响研究[J]. *地球物理学报*, 2006, 49(1): 69 – 77. ]
- [27] Yu Fengshuo, Lian Lishu, Li Baofu, et al. Effect of urbanization on extreme temperature events in Shandong Province [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2019, 47(1): 129 – 139. [于凤硕, 廉丽姝, 李宝富, 等. 城市化对山东省极端气温事件的影响[J]. *气象科技*, 2019, 47(1): 129 – 139. ]
- [28] Zhou Yaqing, Ren Guoyu. Change in extreme temperature events frequency over mainland China during 1961 – 2008 [J]. *Climate Research*, 2011, 50(1/2): 125 – 139.
- [29] Ren Guoyu, Zhou Yaqing, Chu Ziyang, et al. Urbanization effect on observed surface air temperature trend in North China [J]. *Journal of Climate*, 2008, 21(6): 1333 – 1348.
- [30] Ren Guoyu, Li Ji, Ren Yuyu, 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 Climatology*, 2015, 54: 1248 – 1266.
- [31] Zhang Aiyang, Ren Guoyu, Zhou Jiangxing, et al. On the urbanization effect on surface air temperature trends over China [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2010, 68(6): 975 – 966. [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): 975 – 966. ]
- [32] Sun Ying, Zhang Xuebin, Ren Guoyu, et al. Contribution of urbanization to warming in China [J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6: 706 – 709.

## Effect of urbanization on the air temperature variation of Liaoning Province

AO Xue<sup>1</sup>, CUI Yan<sup>1</sup>, ZHAI Qingfei<sup>2</sup>, ZHOU Xiaoyu<sup>1</sup>, SHEN Lidu<sup>1</sup>,  
ZHAO Chunyu<sup>1</sup>, NING Xilong<sup>3</sup>

(1. Shenyang Regional Climate Center, Shenyang 110166, China; 2. Liaoning Weather Modification Office, Shenyang 110166, China; 3. Fuxin Meteorological Bureau, Fuxin 123100, Liaoning, China)

**Abstract:** Based on the daily average temperature, the average maximum temperature and the average minimum temperature data from 1961 to 2017 and DMSP/OLS satellite nighttime light data, the influence of urbanization on the trend of average temperature and extreme temperature indices of Liaoning Province was quantitatively analyzed. The results show that the temperature in Liaoning Province exhibits a significant warming trend, and the rate of warming trend at urban stations is obviously faster than at rural stations. The growth rate of the average minimum temperature is the fastest, followed by the average temperature, and the average maximum temperature is relatively slow. The warming rates of four seasons are as follows: winter > spring > autumn > summer; the contributions of urbanization from large to small are in order: the average minimum temperature > the average temperature > the average maximum temperature. The significant increase of the minimum temperature and the slight growth of the maximum temperature at the city stations should lead to the decrease of the daily range of temperature, and enhance the contribution of urbanization. Urbanization aggravates the significant decrease of the extreme low temperature events and the significant increase of extreme high temperature events in Liaoning Province. Urbanization has a significant impact on extreme temperature events. The urban effect of the extreme temperature index related to the cold events is negative, while that related to the warm events is positive. In terms of the contribution rate of urbanization effect, the relative index is larger, followed by the duration index, and the absolute index except the daily temperature range is relatively small. The extreme temperature index based on the lowest temperature is more affected by urbanization than that based on the highest temperature. The spatial asymmetry of urban heat island intensity and the difference of aerosol concentration between urban station and rural station results in the increase of maximum temperature not as significant as that of minimum temperature, which may explain the urban effect on the extreme temperature index.

**Key words:** urbanization; extreme air temperature; climate change; Liaoning Province

(责任编辑: 周成林; 编辑: 庞瑜, 周成林)