

基于EOF分解的辽宁省城市化气候效应检测

敖雪¹, 翟晴飞^{2*}, 崔妍¹, 周晓宇¹, 沈历都¹, 赵春雨¹, 宁喜龙³

(1. 沈阳区域气候中心, 沈阳 110166; 2. 辽宁省人工影响天气办公室, 沈阳 110166;

3. 阜新市气象局, 辽宁 阜新 123100)

摘要:论文利用1961—2017年逐日气象数据以及社会经济数据,构建新的城市化指标,分析了城市化对辽宁气候变化的影响。研究表明:辽宁省气温呈显著增加趋势,国家站增温速率明显快于乡村站;城市化对平均最低气温影响最显著,平均气温次之,平均最高气温相对较弱;就四季而言,秋季城市化影响贡献率最大,冬季和夏季次之,春季相对较小。空间分布上,城市化影响高值区位于辽宁中部和西部地区,与辽宁省城市化发展水平基本吻合,城市化对气温的影响不是单一的,对于多数地区尤其是沈阳、大连等经济发展水平较高的地区,起到增温作用,但也对少数台站的升温起到了抑制作用。气温指标中,城市化对年和四季平均气温的影响最显著,对应模态均是第一模态,方差贡献率均在89%以上,空间相关性均通过显著性检验,其次是平均最低气温和日较差;季节变化特征上,冬季和春季的增温相对于秋季和夏季明显。降水指标基本对应第二模态,方差贡献率在9%~18%之间,城市化对气温的影响强于降水;结合时间系数,城市化效应表现为春季和冬季降水、大雨和暴雨日数略有增加,年、夏季、秋季降水、小雨、中雨日数减少。城市化对降水的影响表现出两面性,一方面使年降水和小量级降水减少,另一方面又使极端降水事件增多。

关键词:城市化; EOF; 气候变化; 辽宁省

随着人类社会的逐步发展,中国的城市化进程必将日益加快,城市化发展不仅改变了城市本身的下垫面特征,还产生了大量的污染物和人为热,导致近地层大气结构改变,形成了以城市化效应为主的局地气候^[1]。中国快速的城市化发展和日益增多的城市人口,导致城市和城郊地区气候条件发生变化,并对全球气候变暖、大气污染物的增多和扩散、资源能耗以及人体健康等诸多方面产生深远影响。为此国家“十二五规划”在第二十一章中明确提出了积极应对全球气候变化的要求;《“十二五”国家应对气候变化科技发展专项规划》把城市化对气候影响的量化分析作为气候变化科学基础研究的重点方向之一。城市化效应对气候的影响已经

成为国内外一个具有重大现实和科学意义的难题。国外部分学者从20世纪80年代开始就已经展开了城市化对气候的影响研究, Hansen等^[2]研究发现1880—1985年全球变暖0.5~0.7℃,北半球和南半球变暖幅度近似,1980年以来的增暖与早期以1940年为中心的增暖有所不同,早期的增暖主要集中在高纬度地区,而1980年以来的增暖则是全球性的。Karl等^[3]通过对美国1219个气象站历史气温数据的分析,发现城市站年平均气温比乡村站高0.1℃,城市化可能是气温日较差减小,平均气温和最低气温升高的原因。Balling等^[4]通过研究美国东部地区1920—1984年平均气温后发现,城市化效应是导致该地区增温的主要原因,剔除城市化后64 a

收稿日期: 2019-09-20; 修订日期: 2019-12-12。

基金项目: 2018年辽宁省气象局科研课题(BA201803, 201818); 辽宁省科学技术计划项目(2019-MZ-199, 2019-ZD-0859)。

[Foundation: Scientific Research Project of Liaoning Meteorological Bureau in 2018, No. BA201803 and 201818; Science and technology Plan Project in Liaoning Province, No. 2019-MZ-199 and 2019-ZD-0859.]

第一作者简介: 敖雪(1986—), 女, 重庆人, 硕士, 工程师, 主要从事气候变化研究。E-mail: aoxuefyh@163.com

*通信作者简介: 翟晴飞(1985—), 男, 辽宁阜新人, 高工, 主要从事云降水物理和人工影响天气研究。

E-mail: 15840322495@163.com

引用格式: 敖雪, 翟晴飞, 崔妍, 等. 基于EOF分解的辽宁省城市化气候效应检测[J]. 地理科学进展, 2020, 39(9): 1532-1543. [Ao Xue, Zhai Qingfei, Cui Yan, et al. Detection of urbanization effect on the climate change in Liaoning Province based on empirical orthogonal function methods. Progress in Geography, 2020, 39(9): 1532-1543.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2020.09.010

仅增温 $0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。Goodridge^[5]和 Hughes 等^[6]研究表明城市化效应导致美国加州和南非的城市和乡村气温增幅差异明显。Morris 等^[7]通过对墨尔本市的城市化效应研究发现,即便墨尔本处于云量较多、风速较大的环境下,该地区依然存在热岛效应。Kim 等^[8]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。Fumiaki^[9]利用人口密度作为城市发展的指标,对 561 个气象站 1979 年 3 月至 2006 年 2 月的气温数据进行分析,研究城市化对日本近期气温趋势的影响,结果表明,在人口密度大的观测站,监测到气温异常变暖趋势,即使是人口密度较弱的地区,也存在 $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ~ $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 的增温趋势;城市化效应不仅在大城市可以检测到,在日本轻度城市化的地区也可以检测到。

在中国,初子莹等^[10]利用 EOF 分解的方法来确定乡村站,研究发现城市化效应对气温的影响随时间增大,国家站的城市化影响为 $0.16\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,城市化影响贡献率高达 71%。Ren 等^[11]分析了城市化对华北气温变化趋势的影响,发现城市化对大城市群的影响最显著,增温速率为 $0.16\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$;对小城市群的影响最小,变暖速率只有 $0.07\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$;基于国家站的城市化贡献率达到 37.9%。周雅清等^[12]对华北地区最高最低气温和日较差城市化影响进行研究,结果表明,城市化对日较差、平均气温、最低气温影响显著,城市化增温冬季最大,夏季最小。张爱英等^[13]采用 UMR(Urban Minus Rural)方法对 614 个国家站和 138 个乡村站的气温资料进行对比分析,发现中国大陆气温序列中有 $0.076\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 的城市化影响,城市化影响贡献率高达 27.33%,城市化对国家站气温的影响非常显著。Yang 等^[14]分析了城市化对中国东部地区平均气温的影响后得出,中国东部地区城市化影响达 $0.14\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,城市化贡献率为 24.2%。任国玉等^[15]对比分析石家庄站和藁城站气温概率分布特征,发现所有气温的概率密度均向高温方向偏移,城市化对最低气温影响显著,对最高气温影响有限,城市化对气温分布的影响在冬春两季比夏秋两季更显著。金凯等^[16]对 1955—2004 年和 1975—2004 年华北区域均一化气温序列中的城市化效应进行检测,发现城市化影响贡献率分别为 19% 和 23%,城市热岛效应对华北地区气温的影响比较显著。Jia 等^[17]分析城市化进程对武汉

气温升高的影响,结果表明城市发展水平越高的站点,其城市化热岛强度增加趋势越明显,1988—2004 年增加尤其显著,城市热岛强度在夏季最强,冬季最弱,平均气温总体上升的一半可以归因于过去半个世纪的快速城市化。Wen 等^[18]利用 763 个国家站(Reference Climate and Meteorological Stations, RCBMS)的数据集分析中国大陆的地面气温变化,指出城市化偏差是中国地面气温观测记录中最大的系统偏差,订正城市化偏差可以去除因为城市化效应引起的不确定性。UMR 方法在实际分析中,评估方法比较单一,不能剔除乡村站自身的人类活动影响,也不能检测土地覆盖类型变化对气温的影响,乡村站所受的影响越大,检测的城市化影响贡献率也就越小,该方法的检测是偏于保守的。

辽宁省作为东北老工业基地的重要组成部分,工业城市密集分布,城市化水平整体较高,2015 年末辽宁省城市化率已达到 67.53%,超出全国平均水平 11.43 个百分点。20 世纪 90 年代,辽中南城市群形成了继京津冀、长三角和珠三角城市密集区的第四大规模城市群。近年来辽宁省发展工业所消耗的能源资源量逐步增大,城市区域扩张,城市人口及建筑面积持续加大,由此所导致的城市废气排放量增加,城市热岛效应等因素导致该地区气候发生变化。然而,国内外有关辽宁省城市化效应的研究较少,目前有吴继华等^[19]通过对辽宁沿海各城市城市化指标和气候指标进行关联性分析;沈志超^[20]分析了城市化对东北地区冬季极端气温事件的影响;司鹏等^[21]通过对比分析东北地区城乡台站气温序列的变化趋势,就城市化对气温增暖的贡献程度进行了检测。关于城市化对气候的影响研究还主要集中在北京、上海及珠三角等地的大城市,一般利用传统 UMR 方法进行分析,评估方法比较单一,因此为了更好地认识城市化对辽宁省气候变化的影响,本文将利用辽宁省 61 个国家级气象站 1961—2017 年逐日气候资料和社会经济数据,构建新的城市化发展指标,将 25 项气候指标进行 EOF 分解,将各项气候指标的前 10 个模态逐一与城市化发展指标的特征模态进行对比,提取出受城市化影响较大的气候指标及其对应模态,尝试从观测资料中分离出城市化气候效应的信号,分析辽宁省整体的城市化效应以及不同气候要素对城市化影响的敏感性,为预测辽宁省未来气候变化趋势提供科学

的理论依据,进而推测城市化对未来城市气候变化可能产生的影响,为城市的发展规划、环境保护、区域气候变化诊断分析和预测提供较为科学的指导。

1 资料与方法

1.1 研究资料

研究资料包括以下4个方面:①辽宁省52个国家级气象站1961—2017年逐日平均气温、最低气温、最高气温和降水量资料,来源于国家气象信息中心发布的均一化气温数据集,该资料经过了均一化处理 and 初步的质量控制,订正了人为因素造成的误差值。②建成区密度和建成区面积数据来源于《辽宁省统计年鉴2018》。③人口资料来源于《中华人民共和国全国分县市人口统计资料》以及《中国人口年鉴2017》,研究时间段为1985—2017年。基于地面气象站位置查询对应人口资料,如果地面气象站位于市区,则选用市辖区人口数据;如果位于县或者县级市,则选用对应的县人口数据。④人口密度资料来源于中国科学院地理科学与资源研究所的中国公里网格人口分布数据集(Population-Grid_China, <http://www.geodoi.ac.cn/>),该数据集是以遥感数据获取的土地利用类型数据及人口统计数据为基础,利用地理信息系统的空间分析功能,构建人口空间分布模型,将统计型人口数据空间化,从而生成1 km×1 km的空间人口密度数据。

1.2 研究方法

1.2.1 乡村站的选择

乡村站的筛选根据辽宁省气象观测站基础信息资料、辽宁省台站历史沿革资料、辽宁省统计年鉴和中国公里网格人口分布数据集来完成。资料包括气象站经纬度、海拔高度、仪器变更和迁站情况、各市县人口资料、人口密度资料、各市县建成区面积和土地面积数据等。

选择乡村站步骤如下:①气象站观测资料时间连续性好,数据记录时间不晚于1961年;②气象站迁站次数不超过1次;③气象站不位于城区中心或者居民区内;④气象观测站所在经纬度上的人口密度不超过300人/km²;⑤气象站所在县或区的建成区密度(建成区密度=建成区面积/土地总面积×100%)不超过30%。具体方法可以参考任国玉等^[22]和张爱英等^[13]。通过上述检验筛选过程,最后选出

乡村站5个,分别是大连的长海县、鞍山的岫岩、营口的熊岳、朝阳的建平县以及本溪的草河口(图1);国家站47个,把国家站作为一个整体来对城市化影响和贡献率展开分析。

1.2.2 城市发展指标

城市发展指标有很多,如人口、GDP、建成区面积等,但最广泛使用的是人口指数,Karl等^[3]研究指出人口数量为1万的城市热岛强度仅0.32℃,10万人的城市热岛强度超过0.32℃,100万人的则可以达到0.91℃,说明城市人口数量越多,城市化效应越显著。Portman^[23]利用人口密度数据构建城市化指标,指出该指标能较好地判断城市规模和城市化效应。Chung等^[24]利用人口和气温数据构建了半对数方程,研究发现人口的快速增长是造成气温升高的主要因素,而人口增长最快的城市也是城市化效应最明显的城市,说明人口数据能很好地反映城市化效应。

本文利用县市级人口资料建立标准化城市化因子,首先以辽宁省起始年份(1985年)的人口数据作为人口基准值,然后在此基础上,计算辽宁省52个台站每年人口除以人口基准值的比值,该数值即为标准化城市化因子^[25]。标准化城市化因子能较好地划分城市规模大小和各市县城市化发展速率,能比原始人口数据更好地体现出城市化进程。

1.2.3 城市化影响定义

为了定量评价城市化对气温的影响,参照周雅清等^[12]定义以下术语。

城市化影响:由城市热岛效应导致的气温变

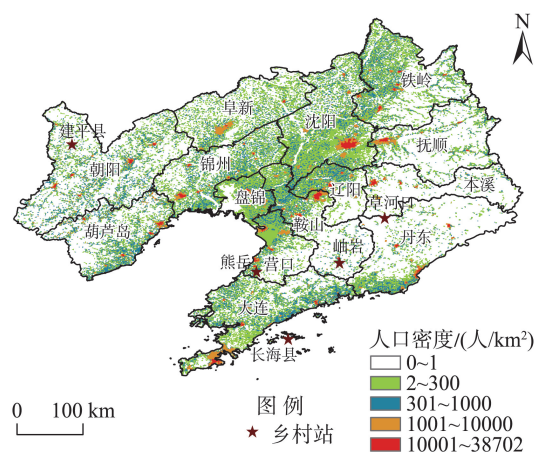


图1 辽宁省乡村站和人口密度空间分布

Fig.1 Distribution of rural stations and the population density in Liaoning Province

化,用 ΔX_{ur} 表示,国家站气温变化趋势 X_u 与乡村站气温变化趋势 X_r 的差异来表征该地区的城市化影响。即

$$\Delta X_{ur} = X_u - X_r \tag{1}$$

城市化影响贡献率:指城市化影响在国家站气温变化趋势中所占的比例,用 E_u 表示

$$E_u = |\Delta X_{ur}/X_u| \times 100\% = |(X_u - X_r)/X_u| \times 100\% \tag{2}$$

国家站和乡村站平均气温序列的变化趋势估计采用最小二乘法,并用非参数统计方法对线性趋势进行显著性检验。

2 结果分析

2.1 城市化对气温的影响分析

表1给出了1961—2017年辽宁省国家站和乡村站四季气温平均增温率及城市化影响贡献率结果,可以看出,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,国家站的增温速率快于乡村站;平均气温、平均最高气温、平均最低

气温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;就城市化影响贡献率而言,平均最低气温较大,平均气温次之,平均最高气温相对较小。虽然分析时段有差别,但是研究结果与张爱英等^[13]和任国玉等^[15]基本一致。就四季而言,秋季的城市化影响贡献率最大,冬季和夏季次之,城市化进程对春季气温变化的影响相对较小,其中秋季最低气温的贡献率超过50%,说明秋季的增温超过一半以上是由城市化造成的。因为春季的增温趋势显著,但是城市化增温贡献率较小,说明辽宁省春季快速升温的过程中,城市化发展对其的影响不大,春季增温的主要原因可能是温室效应和大尺度环流的影响。初子莹等^[10]、吉莉等^[26]在对北京和重庆地区城市热岛效应季节变化研究中也得出了类似结论。

表2为1961—2017年辽宁省的城市化影响和城市化影响贡献率,可以发现,国家站和乡村站的气温呈显著增加趋势,国家站的增温趋势明显快于乡村站。城市化发展对平均最低气温的变化影响

表1 1961—2017年辽宁省国家站和乡村站平均增温率及城市化影响贡献率
Tab.1 Average rate of increase of temperature of the four seasons between the national stations and the rural stations and the contribution of urbanization effect on the trends of temperature in Liaoning Province, 1961–2017

温度要素	增温率与城市化影响	春季	夏季	秋季	冬季
平均气温增温率	国家站增温率/(℃/10 a)	0.322 [*]	0.189 [*]	0.196 [*]	0.397 [*]
	乡村站增温率/(℃/10 a)	0.267 [*]	0.146 [*]	0.124 [*]	0.261 [*]
	城市化影响/(℃/10 a)	0.055 [*]	0.043 [*]	0.072 [*]	0.136 [*]
	城市化影响贡献率/%	17.1	22.8	36.7	34.3
平均最高气温增温率	国家站增温率/(℃/10 a)	0.284 [*]	0.204 [*]	0.163 [*]	0.274 [*]
	乡村站增温率/(℃/10 a)	0.275 [*]	0.192 [*]	0.148 [*]	0.264 [*]
	城市化影响/(℃/10 a)	0.009	0.012 [*]	0.015 [*]	0.01
	城市化影响贡献率/%	—	5.9	9.2	—
平均最低气温增温率	国家站增温率/(℃/10 a)	0.472 [*]	0.266 [*]	0.369 [*]	0.541 [*]
	乡村站增温率/(℃/10 a)	0.268 [*]	0.141 [*]	0.182 [*]	0.294 [*]
	城市化影响/(℃/10 a)	0.204 [*]	0.125 [*]	0.187 [*]	0.247 [*]
	城市化影响贡献率/%	43.2	47.0	50.7	45.7

注: *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。下同。

表2 1961—2017年辽宁省城市化影响及城市化影响贡献率
Tab.2 Effects of urbanization on the trends of temperature and contribution rate of urbanization effect on the trends of temperature for Liaoning Province, 1961–2017

温度要素	国家站趋势/(℃/10 a)	乡村站趋势/(℃/10 a)	城市化影响/(℃/10 a)	城市化影响贡献率/%
平均气温	0.281 [*]	0.194 [*]	0.087 [*]	31.0
平均最高气温	0.238 [*]	0.225 [*]	0.013	—
平均最低气温	0.459 [*]	0.236 [*]	0.223 [*]	48.6

最大,最低气温的增幅上有接近一半的部分是由于城市化影响导致的;国家站和乡村站的最高气温增温趋势差异较小,平均最高气温的城市化影响相对较弱,最高气温的增暖仅5.5%是由城市化影响引起;最高气温和最低气温城市化影响贡献率差异较大,可能是因为近年来辽宁城区重工业污染加剧,国家站和乡村站气溶胶浓度会存在一定差异,白天城区高浓度的气溶胶会减弱太阳的短波辐射,在一定程度上减弱城市热岛效应的增温作用,所以最高气温增幅较小;而夜晚城区的气溶胶类似于低层云,削弱了城区的发射的长波辐射和冷却效应,因此最低气温的城市化影响显著,而最高气温的城市化影响相对较小^[27-29]。平均气温的升高也有近1/3是因为城市化引起的,影响较为显著。李娇等^[30]在对沈阳气温城市化偏差分析中得出,平均气温和平均最低气温的城市化影响贡献率在30%~40%之间,与本文结果大体一致。沈志超^[20]对东北地区90个气象站和5个乡村站1957—2010年气温趋势变化展开研究,发现平均气温的城市化影响贡献率为

10.46%,城市化对极端气温指数的影响更大。

图2为1961—2017年辽宁省国家站和乡村站气温变化趋势差异的空间分布,即辽宁省城市化影响空间分布。可以发现,城市化进程导致平均气温和最低气温升高,且增加幅度高于最高气温,平均气温和最低气温的城市化影响介于 $-0.05\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ~ $0.25\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 和 $-0.09\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ~ $0.50\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 之间,温康民等^[31]在对全国685个国家站1961—2015年平均气温序列中的城市化影响研究中指出,城市化影响明显存在于国家站地面气温资料中,华北地区、东北地区城市化影响较大,其值介于 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ~ $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 之间,与本文研究结果比较接近。平均气温和平均最低气温的空间分布基本一致,城市化影响高值区位于辽宁中部和西部地区,南部和东部地区受城市化影响相对较小。其中铁岭的西丰、大连的庄河等地方为负值,即城市化使这些站点的平均气温和最低气温呈下降趋势,但强度很弱;个别站点城市化影响出现负值,可能是由于本文选取的参考站仍不一定是真正乡村站,并且乡村站本身不

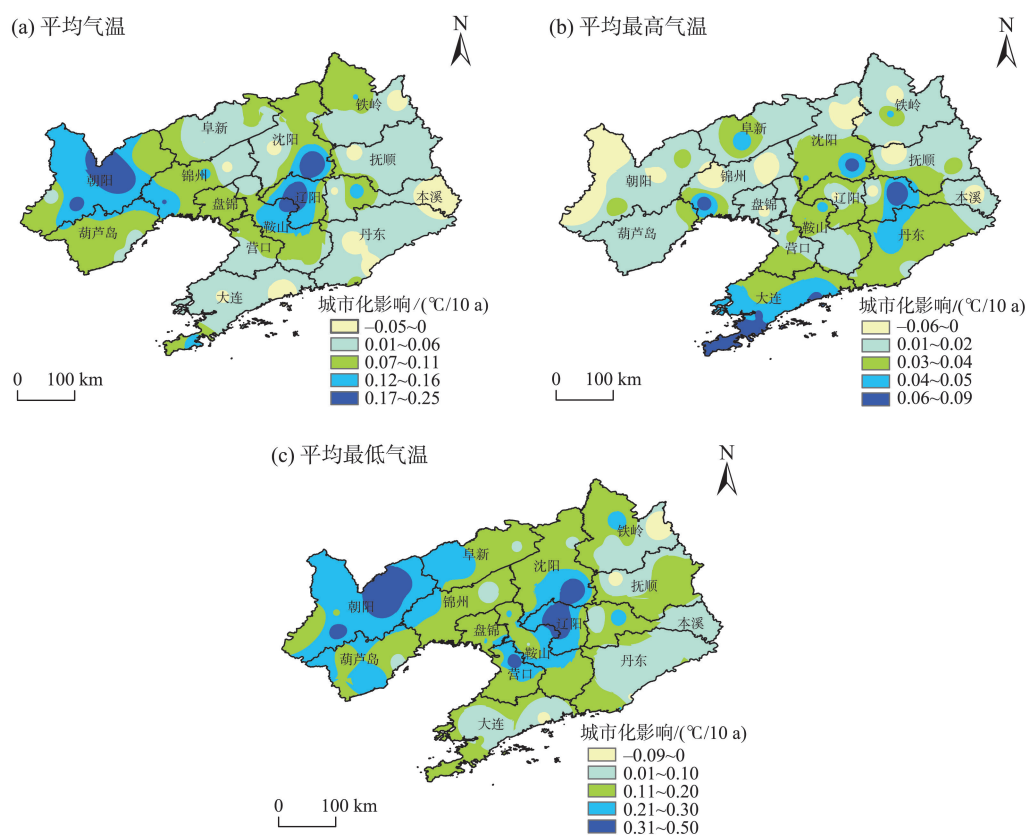


图2 1961—2017年辽宁省国家站和乡村站气温变化趋势差异的空间分布

Fig.2 Difference in temperature change trend between the national stations and the rural stations in Liaoning Province, 1961–2018

能完全排除人类活动的影响,乡村站所受的影响越大,检测的城市化影响也就越小,所以导致部分站点出现负值,不一定是城市化的负向影响。从图2b可看出城市化对最高气温的影响相对较小,高值区集中在南部和东部地区,和平均气温以及最低气温空间分布刚好相反,城市化影响介于 $-0.06\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}\sim 0.09\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 之间,其中朝阳的建平、凌源、锦州的义县、黑山等地区均是负值。上述分析表明,辽宁省城市化影响空间分布与辽宁省城市化发展水平基本吻合,其中大连一直都是辽宁省GDP最高、城市化发展迅速的地区;沈阳、辽阳等地是辽宁中部城市群,是辽宁经济发展带,所以以沈阳和辽阳为辐射中心,会出现溢出效应。朝阳的城市化程度与增温不吻合可能是因为该区是干旱和半干旱地区,湿度低、水体少、绿化少,所以增温迅速,气候变率的影响大于城市化的影响。城市化对气温的影响不

是单一的,对于多数地区起到增温作用,尤其是沈阳、大连等经济发展水平较高的地区;也对少数台站的升温起到了抑制作用,而这些台站地区多是乡村站和夜间灯光灰度低值区,这与郑有飞等^[32]和高静等^[33]的研究结果相一致。

2.2 EOF 空间模态对比分析

本文先将标准化城市化因子进行 EOF 分解,找到能代表辽宁省城市化效应空间分布的特征模态;再把25个气候指标分别进行 EOF 分解,将每个气候指标的前10个模态的特征向量和时间系数逐一与标准化城市化因子的特征模态进行对比分析。当气候指标对应模态与标准化城市化因子的特征模态空间相似性高,方差贡献率大,则说明该气候指标可能受城市化影响,该模态在城市化主导下形成。

图3a为1985—2017年辽宁省标准化城市化因

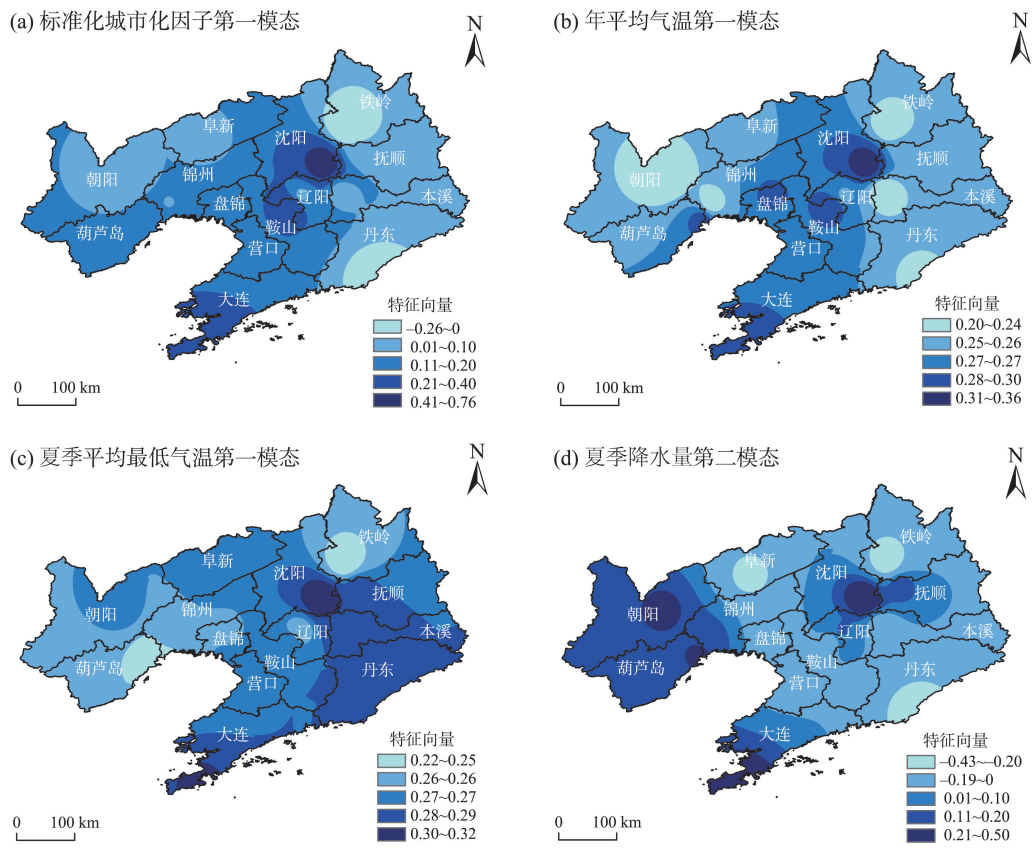


图3 1985—2017年辽宁省标准化城市化因子第一模态特征向量空间分布(a)、年平均气温第一模态特征向量空间分布(b)、夏季平均最低气温第一模态特征向量空间分布(c)和夏季降水量第二模态特征向量空间分布(d)

Fig.3 The first empirical orthogonal function (EOF) mode of standardized urbanization index (a), the first EOF mode of average temperature (b), the first EOF mode of summer average minimum temperature (c) and the second EOF mode of summer precipitation (d) in Liaoning Province, 1985–2017

子第一模态特征向量空间分布,第一模态的方差贡献率为88.1%,整个辽宁省除了丹东和铁岭外呈一致正值,均表现出正向城市化趋势,结合对应的时间系数变化曲线来看(图4a),1985—2017年时间系数呈显著上升趋势,1995年之前为负值,之后为正值,说明从1995年以来,辽宁省城市化水平是不断增加的;从空间上看,2个高值中心分别位于沈阳和大连地区,辽宁省中部和南部城市化效应比较明显。结合辽宁省实际城市发展情况,可以发现标准化城市化因子第一模态的高值中心与辽宁省城市密集地带较一致,高值中心与辽宁省经济发展最快、城市化水平最高的城市基本吻合,因此辽宁省标准化城市化因子第一模态能较好的表征城市化发展的空间变化形势。

本文选用的气候指标共25项,包括气温指标16项,降水指标9项,将气候指标距平场逐一进行EOF分解,前10个模态的累积方差贡献率均在95%以上,当气候指标的某个模态的高(低)值区空间分布与标准化城市化因子的特征模态空间分布较一致,且空间相关性高,则认为该气候指标受城市化影响。图3给出了标准化城市化因子第一模态与几个气候指标典型模态的对比情况,可以发现,年平均气温第一模态特征向量空间分布与标准化城市化因子的特征模态空间分布基本一致,高值中心位

于沈阳和大连,高值区位于中部和南部,呈带状分布,从沈阳康平一直延伸到渤海海峡,低值中心位于朝阳、铁岭、丹东,整个辽宁省呈一致正值。结合时间系数(图4b)来看,1985—2017年时间系数呈显著上升趋势,平均气温明显升高。年平均气温第一模态对应的方差贡献率为89.6%,与标准化城市化因子特征模态空间相关性高达0.79,通过0.001的显著性检验,一致性较好,表明城市化发展导致辽宁省年平均气温增加。夏季平均最低气温第一模态的方差贡献率为81.2%,与标准化城市因子特征模态空间相关性为0.54,其空间分布呈现沈阳、大连地区为高值中心,铁岭和葫芦岛为低值中心,区域内为一致正值,结合时间系数(图4c)可以发现,受城市化影响夏季平均最低气温呈显著增加趋势。夏季降水量与标准化城市化因子相关性较好的为第二模态,方差贡献率为9.08%,空间相关性为0.59,空间分布上呈现多个高值中心,分别是沈阳、大连和辽宁西部地区,结合时间系数(图4d)来看,1985—2017年时间系数上下波动,无明显变化趋势。平均气温和夏季平均最低气温第一模态和夏季降水量的第二模态特征向量空间分布与标准化城市化因子的特征模态空间分布较一致,且空间相关性高,该指标受城市化影响,是城市化的对应模态。

表3给出了25项气候指标对应的EOF模态与

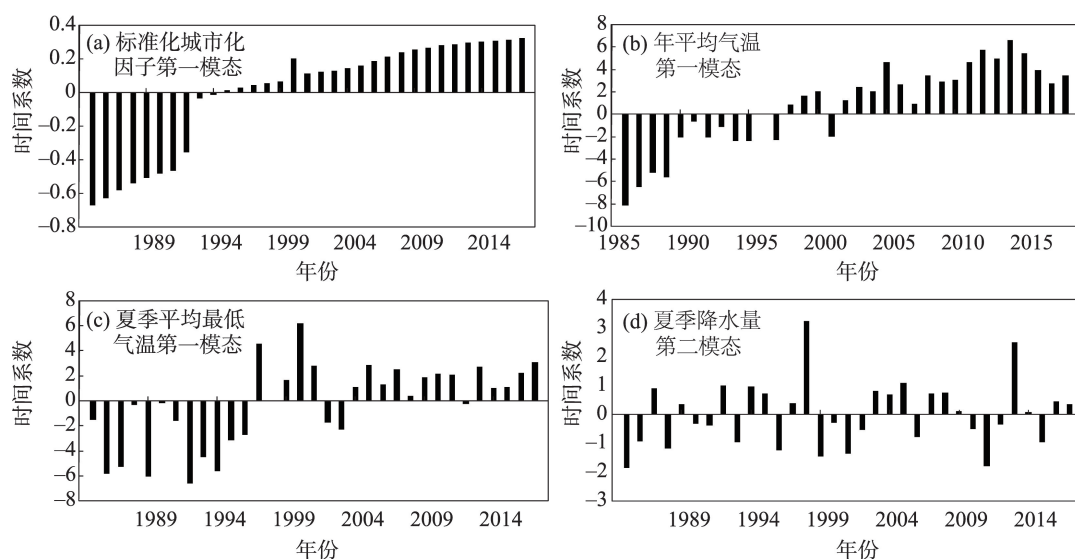


图4 1985—2017年辽宁省标准化城市化因子第一模态特征向量时间系数(a)、年平均气温第一模态特征向量时间系数(b)、夏季平均最低气温第一模态特征向量时间系数(c)和夏季降水量第二模态特征向量时间系数(d)

Fig.4 The time factor of the first empirical orthogonal function (EOF) mode of standardized urbanization index (a), the time factor of the first EOF mode of average temperature (b), the time factor of the first EOF mode of summer average minimum temperature (c) and the time factor of the second EOF mode of summer precipitation (d) in Liaoning Province, 1985—2017

表3 辽宁省气候指标对应的 EOF 模式与标准化
城市化因子的空间相关性

Tab.3 Gray threshold of night light in different
years in cities of Liaoning Province

气候指标	对应 模态	方差 贡献率/%	空间相关 系数
年平均气温	1	89.6	0.79**
春季平均气温	1	93.4	0.36*
夏季平均气温	1	89.2	0.65**
秋季平均气温	1	90.8	0.45*
冬季平均气温	1	92.9	0.71**
年平均最高气温	5	0.82	0.42*
春季平均最高气温	无	无	无
夏季平均最高气温	1	88.7	0.35*
秋季平均最高气温	3	1.71	0.36*
冬季平均最高气温	5	0.36	0.49*
年平均最低气温	1	88.2	0.47*
春季平均最低气温	3	1.14	0.33*
夏季平均最低气温	1	81.2	0.54**
秋季平均最低气温	3	1.71	0.37*
冬季平均最低气温	1	87.9	0.48*
气温日较差	1	86.4	0.44*
年降水量	3	7.42	0.46*
春季降水量	无	无	无
夏季降水量	2	9.08	0.59**
秋季降水量	2	10.7	0.44*
冬季降水量	2	11.5	0.38*
小雨日数	2	16.4	0.41*
中雨日数	2	17.3	0.43*
大雨日数	2	19.6	0.47*
暴雨日数	2	14.1	0.49*

注: *、**分别表示通过 0.05、0.001 显著性水平检验。

标准化城市化因子的空间相关系数。气候指标 EOF 模式空间相关性没通过 0.05 显著性检验,且空间分布格局与标准化城市化因子差异大,则认为无对应模式;如果好几个模式都通过显著性检验,则选取空间相关系数最高的模式为其对应模式。从表 3 可以看出,除春季平均最高气温和春季降水外,其余 23 项气候指标均有对应的城市化模式,占总数的 92%,其中气温指标 15 项,降水指标 8 项。城市化对年和四季平均气温的影响最显著,对应模式均是第一模式,方差贡献率均在 89%以上,且空间相关性均通过显著性检验。其次是平均最低气温和日较差,其中日较差、年平均、夏季和冬季平均最低气温对应的均是第一模式,方差贡献率在 80%以

上;季节变化特征上,冬季和春季的增温相对于秋季和夏季明显,年平均最低气温的显著升高和最高气温增幅较小,必将导致日较差的明显减小。最高气温受城市化影响相对较弱,除了夏季最高气温之外,最高气温对应的模式均在第三模式之后,春季最高气温无对应模式,方差贡献率均小于 2%,因此最高气温没有平均气温、最低气温和日较差的城市化效应显著。

降水方面,9 项降水指标中有 7 项对应模式均是第二模式,方差贡献率在 9%~18%之间,低于大部分气温指标,城市化对气温的影响强于降水;结合时间系数,城市化效应表现为春季和冬季降水、大雨和暴雨日数略有增加,年降水、夏季和秋季降水、小雨以及中雨日数减少。辽宁省城市化对降水的影响表现出两面性,一方面城市化使年降水和小量级降水减少,而另一方面又使极端降水事件增多。吴息等^[34]在北京城市热岛效应对降水的影响中指出,城市化导致北京市中心出现暴雨的概率和强度均明显增加。Wu 等^[35]指出珠江三角洲的快速城市化导致极端小时降水量和频率都显著增加。Shepherd 等^[36]利用 TRMM 卫星资料研究城市化对美国休斯顿地区降水的影响,发现城市化导致下风区发生大雨和暴雨的概率增加,出现小雨的概率减少。这与王萃萃等^[37]、廖镜彪等^[38]和赵酉龙等^[39]的研究结果也较一致。

3 结论和讨论

- (1) 1961—2017 年辽宁省平均气温、平均最高(最低)气温均呈显著增温趋势,国家站的增温速率明显快于乡村站;气温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;就城市化影响贡献率而言,平均最低气温较大,平均气温次之,平均最高气温相对较小;就四季而言,秋季的城市化影响贡献率最大,冬季和夏季次之,春季相对较小。
- (2) 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 48.6%,其次是平均气温,贡献率为 31.0%,平均最高气温的城市化影响相对较弱,最高气温的增暖仅 5.5%由城市化影响引起。最高气温和最低气温城市化影响贡献率差异较大,其原因可能是城市热岛强度的非对称性以及

国家站和乡村站气溶胶浓度之间的差异所致。

(3) 平均气温和平均最低气温的空间分布基本一致,城市化影响高值区位于辽宁中部和西部地区,南部和东部地区受城市化影响相对较小。其中铁岭的西丰、大连的庄河等地区为负值,即城市化使这些站点的气温呈下降趋势,但强度很弱。辽宁省城市化影响空间分布与城市化发展水平基本吻合,城市化对气温的影响不是单一的,对于多数地区起到增温作用,尤其是沈阳、大连等经济发展水平较高的地区;也对少数台站的升温起到了抑制作用,而这些台站地区多是乡村站和夜间灯光灰度低值区。

(4) 标准化城市化因子第一模态的高值中心与辽宁省城市密集地带较一致,高值中心与辽宁省经济发展最快、城市化水平最高的城市基本吻合,所以辽宁省标准化城市化因子第一模态能较好地表征城市化发展的空间变化形势。

(5) 16项气温指标中,城市化对年和四季平均气温的影响最显著,对应模态均是第一模态,方差贡献率均在89%以上,空间相关性均通过显著性检验;其次是平均最低气温和日较差,其中日较差、年平均、夏季和冬季平均最低气温对应的均是第一模态,方差贡献率在80%以上;季节变化特征上,冬季和春季的增温相对于秋季和夏季明显。

(6) 9项降水指标中有7项对应模态均是第二模态,方差贡献率在9%~18%之间,低于大部分气温指标,城市化对降水的影响弱于气温;结合时间系数,城市化效应表现为春季和冬季降水、大雨和暴雨日数略有增加,年降水、夏季和秋季降水、小雨以及中雨日数减少。辽宁省城市化对降水的影响表现出两面性,一方面城市化使年降水和少量级降水减少,而另一方面又使极端降水事件增多。

本文结合气候数据以及社会经济数据,筛选出国家站和乡村站,利用各台站的人口数据构建新的城市化发展指标,并利用EOF分解等方法提取出受城市化影响较大的气候指标及其对应模态,尝试从观测资料中分离出城市化气候效应的信号,虽然不能完全分离大尺度气候变化和城市化效应,但是该研究结果也能较好地反映城市化进程对辽宁省气候的影响。中国的城市化气候效应研究仍有较长的路要走,在今后的工作中应结合遥感、数值模拟等分析手段,进行长序列和高分辨率的城市化气候

效应模拟研究,以期能明确城市化效应在不同城市群、不同气候区之间的一致性和差异性,进一步探索城市化与气候之间相互影响的过程和作用机制。

参考文献(References)

- [1] Seaman N L, Ludwig F L, Donall E G, et al. Numerical studies of urban planetary boundary layer structure under realistic conditions [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1989, 28(8): 760-781.
- [2] Hansen J R, Lebedeff. Global trends of measured surface air temperature [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1987, 92(13): 345-372.
- [3] Karl T R, Diaz H F, Kukla G. Urbanization: Its detection and effect in the United States climate record [J]. *Journal of Climate*, 1988, 1(11): 1099-1123.
- [4] Balling R C, Idso S B. Historical temperature trends in the United States and the effect of urban population growth [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1989, 94: 3359-3363.
- [5] Goodridge J D. Urban bias influences on long-term California air temperature trends [J]. *Atmospheric Environment*, 1992, 26B(1): 1-7.
- [6] Hughes W E, Balling R C. Urban influences on South African temperature trends [J]. *International Journal of Climatology*, 1996, 16: 935-940.
- [7] 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.
- [8] Kim Y H, Baik J J. Maximum urban heat island intensity in Seoul [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2002, 41 (6): 651-659.
- [9] Fumiaki F. Detection of urban warming in recent temperature trends in Japan [J]. *International Journal of Climatology*, 2009, 29(12): 1811-1822.
- [10] 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. [Chu Zhiying, Ren Guoyu. Change in urban heat island magnitude and its effect mean air temperature record in Beijing region. *Acta Meteorologica Sinica*, 2005, 63(4): 534-540.]
- [11] Ren G Y, Zhou Y Q, Chu Z Y, et al. Urbanization effect on observed surface air temperature trend in North China [J]. *Journal of Climate*, 2008, 21(6): 1333-1348.
- [12] 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. [Zhou Yiaqing, Ren Guoyu. The effect of urbanization on maximum, minimum temperatures and daily temperature range in North China. *Plateau Meteorology*, 2009, 28(5): 1158-1166.]
- [13] 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. [Zhang Aiying, Ren Guoyu, Zhou Jiangxing, et al. On the urbanization effect on surface air temperature trends over China. *Acta Meteorologica Sinica*, 2010, 68(6): 975-966.]
- [14] Yang X C, Hou Y L, Chen B D. Observed surface warming induced by urbanization in east China [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2011, 116(D14). doi: 10.1029/2010JD015452.
- [15] 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. [Ren Guoyu, Zhang Lei, Bian Tao, et al. Urbanization effect on change of daily temperature at Shijiazhuang Weather Station. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(2): 398-410.]
- [16] 金凯, 王飞, 夏磊, 等. 华北地区均一化地面气温序列中的城市化影响检测 [J]. *地球环境学报*, 2015, 6(3): 180-187. [Jin Kai, Wang Fei, Xia Lei, et al. Identifying urban bias for homogenized surface air temperature series of the North China. *Journal of Earth Environment*, 2015, 6(3): 180-187.]
- [17] Jia W Q, Ren G Y, Suonan K Z, 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.
- [18] Wen K H, Ren G Y, Li J, et al. Recent surface air temperature change over mainland China based on an urbanization-bias adjusted dataset [J]. *Journal of Climate*, 2019, 32: 2690-2705.
- [19] 吴继华, 马慧强, 韩增林. 辽宁沿海经济带城市化对气候影响的实证分析 [J]. *资源开发与市场*, 2012, 28(10): 897-899. [Wu Jihua, Ma Huiqiang, Han Zenglin. Impact of urbanization to climate of Liaoning Province coastal economic belt. *Resource Development & Market*, 2012, 28(10): 897-899.]
- [20] 沈志超. 东北冬季极端气温趋势变化及其城市化影响 [J]. *安徽农业科学*, 2013, 41(31): 12387-12391. [Shen Zhichao. Regional studies of the extreme temperature changes in Northeast China and their response to urbanization. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2013, 41(31): 12387-12391.]
- [21] 司鹏, 李庆祥, 李伟. 城市化进程对中国东北部气温增暖的贡献检测 [J]. *气象*, 2010, 36(2): 13-21. [Si Peng, Li Qingxiang, Li Wei. Impact of urbanization on surface air temperature warming in Northeast China. *Meteorological Monthly*, 2010, 36(2): 13-21.]
- [22] 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. [Ren Guoyu, Zhang Aiying, Chu Ziyang, et al. Principles and procedures for selecting reference surface air temperature stations in China. *Meteorological Science and Technology*, 2010, 38(1): 78-85.]
- [23] Portman D. Identifying and correcting urban bias in regional time series: Surface temperature in China's northern plains [J]. *Journal of Climate*, 1993, 6: 2298-2308.
- [24] Chung U, Choi J, Yun J I. Urbanization effect on the observed change in mean monthly temperatures between 1951-1980 and 1971-2000 in Korea [J]. *Climate Change*, 2004, 66: 127-136.
- [25] 聂安祺, 陈星, 冯志刚. 中国三大城市带城市化气候效应的检测与对比 [J]. *气象科学*, 2011, 31(4): 372-383. [Nie Anqi, Chen Xing, Feng Zhigang. Detection and comparison of effect of urbanization on climate in three mega city agglomerations of China. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2011, 31(4): 372-383.]
- [26] 吉莉, 李强, 张爽, 等. 城市化进程对重庆北碚城郊气温变化的影响 [J]. *气象科技*, 2015, 43(2): 320-325. [Ji Li, Li Qiang, Zhang Shuang, et al. Impact analysis of urbanization on air temperature of Chongqing outskirts. *Meteorological Science and Technology*, 2015, 43(2): 320-325.]
- [27] Ren G Y, Zhou Y Q. Urbanization effect on trends of extreme temperature indices of national stations over Mainland China, 1961-2008 [J]. *Journal of Climate*, 2013, 27: 2340-2360.
- [28] 曹巍, 邵全琴, 刘纪远, 等. 北京地区土地利用/覆盖及其变化对气温升高的影响分析 [J]. *气候与环境研究*, 2013, 18(4): 451-460. [Cao Wei, Shao Quanqin, Liu Jiyuan, et al. Impact of land use/land cover and its change on climate warming in Beijing area. *Climatic and Environmental Research*, 2013, 18(4): 451-460.]
- [29] 张雷, 任国玉, 任玉玉. 单次极端高温过程中城市热岛效应的识别 [J]. *气候与环境研究*, 2015, 20(2): 167-176. [Zhang Lei, Ren Guoyu, Ren Yuyu, et al. Identification of urban effect on a single extreme high temperature event. *Climatic and Environmental Research*, 2015, 20(2): 167-176.]
- [30] 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. [Li Jiao, Ren Guoyu, Ren Yuyu, et al. Effect of data homogenization on temperature trend estimation and urban bias at Shenyang Station. Transactions of Atmospheric Sciences, 2014, 37(3): 297-303.]
- [31] 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. [Wen Kangming, Ren Guoyu, Li Jiao, et al. Adjustment of urbanization bias in surface air temperature over the mainland of China. Progress in Geography, 2019, 38(4): 600-611.]
- [32] 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. [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. Journal of Tropical Meteorology, 2014, 30(2): 293-301.]
- [33] 高静, 龚健, 李靖业. “源—汇”景观格局的热岛效应研究: 以武汉市为例[J]. 地理科学进展, 2019, 38(11): 1770-1782. [Gao Jing, Gong Jian, Li Jingye. Effects of source and sink landscape pattern on land surface temperature: An urban heat island study in Wuhan City. Progress in Geography, 2019, 38(11): 1770-1782.]
- [34] 吴息, 王晓云, 曾宪宁, 等. 城市化效应对北京市短历时降水特征的影响[J]. 南京气象学院学报, 2000, 23(1): 68-72. [Wu Xi, Wang Xiaoyun, Zeng Xianning, et al. The effect of urbanization on short duration precipitation in Beijing. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2000, 23(1): 68-72.]
- [35] Wu M W, Luo Y, Chen F, et al. Observed link of extreme hourly precipitation changes to urbanization over coastal South China [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2019, 58(2): 1799-1819.
- [36] Shepherd J M, Burian B J. Detection of urban-induced rainfall anomalies in a major coastal city [J]. Earth Interactions, 2003, 3: 7-13.
- [37] 王萃萃, 翟盘茂. 中国大城市极端强降水事件变化的初步分析[J]. 气候与环境研究, 2009, 14(5): 553-560. [Wang Cuicui, Zhai Panmao. Changes of precipitation extremes in China's large cities. Climatic and Environmental Research, 2009, 14(5): 553-560.]
- [38] 廖镜彪, 王雪梅, 李玉欣, 等. 城市化对广州降水的影响分析[J]. 气象科学, 2011, 31(4): 384-390. [Liao Jingbiao, Wang Xuemei, Li Yuxin, et al. An analysis study of the impacts of urbanization on precipitation in Guangzhou. Journal of the Meteorological Sciences, 2011, 31(4): 384-390.]
- [39] 赵酉龙, 周顺武, 郑丹, 等. 城市化对南京气候影响的数值模拟研究[J]. 气象与环境科学, 2019, 42(2): 1-9. [Zhao Youlong, Zhou Shunwu, Zheng Dan, et al. Numerical simulation study on climate impacts of urbanization in Nanjing. Meteorological and Environmental Sciences, 2019, 42(2): 1-9.]

Detection of urbanization effect on the climate change in Liaoning Province based on empirical orthogonal function methods

AO Xue¹, ZHAI Qingfei^{2*}, CUI Yan¹, ZHOU Xiaoyu¹, SHEN Lidu¹,
ZHAO Chunyu¹, Ning Xilong³

(1. Shenyang Regional Climate Center of Liaoning Province, Shenyang 110166, China;

2. Liaoning Weather Modification Office, Shenyang 110166, China;

3. Fuxin Meteorological Service, Fuxin 123100, Liaoning, China)

Abstract: Based on the daily climate data and socioeconomic data from 1961 to 2017, a new urbanization index was established and the influence of urbanization on climate change of Liaoning Province was analyzed. The results show that the temperature in Liaoning Province exhibits a significant warming trend, and the rate of warming at the national stations is obviously faster than at the rural stations. The influence of urbanization from large to small are in the following order: The average minimum temperature > the average temperature > the average maximum temperature. The contributions of urbanization in the four seasons are as follows: Autumn > winter > summer > spring. In terms of spatial distribution, the high-value areas affected by urbanization are located in the central and western regions of Liaoning Province, which are basically in line with the urbanization development level of the province. Urbanization does not have a spatially consistent influence on temperature—it plays a warming role in most areas, especially in areas with high economic development level such as Shenyang and Dalian, but it also has a restraining effect on the warming of a few stations. Among the temperature indices, urbanization has the most significant influence on the annual and four-season average temperature, with corresponding first mode, and contribution rate over 89%. The spatial correlation of the annual and four-season average temperature has passed the significance test. In addition, urbanization has influence on the mean minimum air temperature and the daily range. In terms of seasonal variation characteristics, the temperature increase in winter and spring is more obvious than that in autumn and summer. The precipitation index basically corresponds to the second mode, and the contribution rate is between 9% and 18%. The influence of urbanization on temperature is stronger than that on precipitation. Combined with the time coefficient, the urbanization effect shows that the precipitation in the spring and winter and the number of days of heavy rain and rainstorm increased slightly, but the number of days of light rain and moderate rain and the precipitation in the summer and autumn decreased. Urbanization has a two-sided influence on precipitation. On the one hand, urbanization reduces annual precipitation and precipitation of small magnitude; on the other hand, it increases extreme precipitation events.

Keywords: urbanization; EOF; climate change; Liaoning Province