

敖雪,翟晴飞,崔妍,等,2020. 城市化对辽宁省近地面风速的影响分析[J]. 气象,46(9):1153-1164. Ao X,Zhai Q F,Cui Y, et al,2020. Analysis of urbanization effect on near-surface wind speed change in Liaoning Province[J]. Meteor Mon,46(9):1153-1164(in Chinese).

城市化对辽宁省近地面风速的影响分析*

敖雪¹ 翟晴飞² 崔妍¹ 沈历都¹ 周晓宇¹ 赵春雨¹ 朱玲¹

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

提 要: 利用 1979—2018 年辽宁省逐月风速资料和再分析资料,结合卫星遥感分类方法,并采用 UMR(urban minus rural)方法和 OMR(observation minus reanalysis)方法定量分析了城市化对辽宁省近地面风速的影响。研究表明:近 40 年辽宁省年和四季风速均呈减小趋势,城市站的减小速率明显快于乡村站,UMR 值的变化趋势为 $-0.11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,城市化影响贡献率为 73.3%;空间分布上,辽宁中北部城市群减小趋势较明显,南部和东南部风速减小相对缓慢;UMR 方法计算的城市化影响呈现自西向东逐渐增强的纬向分布形势。再分析资料的减小趋势与乡村站的减小趋势较接近,春季风速的减小速率最明显;OMR 值的变化趋势为 $-0.10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,对应的城市化影响贡献率为 66.7%,利用两种方法计算得到的城市化影响和贡献率较一致,均能在一定程度上反映城市化对风速的影响。空间分布上,再分析资料显示渤海海峡风速呈微弱增加趋势,风速减小的高值区位于渤海北部和黄海北部。两种方法计算的城市化影响空间分布均呈现为西部和南部受城市化影响较小、中东部受城市化影响较大,一致性较好。

关键词: 城市化,风速,气候变化,辽宁省

中图分类号: P467,P425

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.09.003

Analysis of Urbanization Effect on Near-Surface Wind Speed Change in Liaoning Province

AO Xue¹ ZHAI Qingfei² CUI Yan¹ SHEN Lidu¹ ZHOU Xiaoyu¹ ZHAO Chunyu¹ ZHU Ling¹

1 Shenyang Regional Climate Center, Shenyang 110166

2 Liaoning Weather Modification Office, Shenyang 110166

Abstract: Using monthly wind speed data from 1979 to 2018 in Liaoning Province and reanalysis data, combined the UMR (urban minus rural) method and OMR (observation minus reanalysis) method combined with satellite remote sensing classification methods, this paper quantitatively analyzed the impact of urbanization of Liaoning Province on near-surface wind speed. The results show that in the past 40 years, the annual and four season wind speeds in Liaoning Province have shown a decreasing trend. The decreasing rate at urban stations is significantly faster than that at rural stations. The trend of UMR value (urban-rural anomaly) is $-0.11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} (10 \text{ a})^{-1}$, and the contribution rate of urbanization impact is 73.3%. In spatial distribution, the decreasing trend of urban agglomerations in central and northern Liaoning is more obvious, and the wind speed decreases relatively slowly in the south and southeast. The urbanization

* 2018 年辽宁省气象局科研课题(BA201803)、辽宁省科学技术计划项目(2019-MZ-199 和 2019-ZD-0859)和中国气象局气候变化专项(CCSF202013)共同资助

2020 年 3 月 20 日收稿; 2020 年 7 月 13 日收修定稿

第一作者:敖雪,主要从事气候变化研究. E-mail: aoxuefyh@163.com

通讯作者:赵春雨,主要从事气候变化研究. E-mail: springrainscn@163.com

impact calculated by UMR method shows increasing zonal distribution from west to east. The decreasing trend at the reanalysis data is closer to that of rural stations. The decreasing rate of wind speed in spring is the most obvious. The changing trend of OMR value is $-0.10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$, and the corresponding urbanization impact contribution rate is 66.7%. The urbanization impact and contribution rate calculated by the two methods are relatively consistent, and both can reflect the impact of urbanization on wind speed to a certain extent. Reanalysis data show that the wind speed in the Bohai Strait has a slight increasing trend, and the high-value areas with reduced wind speed are located in the northern Bohai Sea and the northern Yellow Sea. In a word, the spatial distribution of the urbanization impact calculated by the two methods is that the western and southern regions are less affected by urbanization while the central and eastern regions are more affected and their consistency is better.

Key words: urbanization, wind speed, climate change, Liaoning Province

引 言

风影响人类的生活、交通和大气环境等,它不仅表征着大气环流特征,也是重要的清洁能源,风速的减小为风能资源的利用和开发迎来了挑战,风速的变化会对局地环境产生较为深远的影响。随着人类社会的逐步发展,中国的城市化进程日益加快,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(Seaman et al, 1989)。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,风速的变化也与城市化效应休戚相关;因此,探索和研究城市化发展对风速变化的影响具有重要意义。Tuller(2004)、Hobbins et al(2004)、Hartmann and Wendler(2005)、Wan et al(2010)、王遵娅等(2004)、任国玉等(2005; 2009)、刘伟东等(2014)针对全球风速进行了大量研究,得出近地面风速普遍减小的观测事实后,又对大范围风速减小的原因展开了讨论。已有研究表明,导致风速减小的可能原因,除了大气环流的变化(Jiang et al, 2010; 王遵娅等, 2004)、测风仪器型号更换(曹丽娟等, 2010; 曹丽娟和严中伟, 2011; 刘佳等, 2012; 郑红等, 2014)、台站迁移以及观测场周边环境的变化(刘学锋等, 2009a; 2012)等因素外,城市化进程造成的影响也不容忽视。Landsberg(1981)对意大利帕尔玛城市风速展开研究,指出城市的快速发展导致风速减弱; Coutts et al(2007)指出城市化进程导致城市下垫面的热力和动力特征发生改变,从而导致城市风速发生变化,这是影响区域气候变化的重要因子; Li et al(2011)针对北京城市化效应对风速展开分析,

研究表明城市站风速下降较郊区站显著,风速减弱趋势的 20%是由于城市化导致的; Wu et al(2016)研究指出中国东部近地面风速呈显著下降趋势,风速再分析资料没有明显变化趋势,下垫面土地利用的变化引起阻力系数显著上升,土地利用的变化是风速减小的重要原因之一; Li et al(2018)利用研究城市化对华东地区风速的影响,指出近地面风速减弱主要是因为我国东部快速城市化引起台站观测区下垫面变化所致,城市化发展越快的地区,风速减弱越明显; 周淑贞和余碧霞(1988)研究发现上海快速的城市化进程,建筑群的增多,导致城市下垫面粗糙度增大,城区风速明显减小; 刘学锋等(2009a)研究指出城市化效应和观测环境的改变是风速下降的重要原因; 张爱英等(2009)对我国风速变化趋势进行分析后指出风速减小主要是由城市化和观测环境改变影响的,其影响程度约占 2/3; 陶寅等(2016)和卞韬等(2018)量化评估近地面风速序列变化中的城市化影响程度。这些研究均表明城市化效应是导致风速减小不可忽视的原因。

辽宁省是东北地区的工业和经济中心,近年来该地区城市化发展迅速,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。该地区经济迅速发展,城市区域扩张,城市人口及建筑面积持续加大,工业发展所消耗的能源资源量逐步增大,这些因素导致该地区温度、风速等发生变化。然而,城市化效应对辽宁省风速有哪些影响,影响有多大,目前还不清楚,因此本文利用 1979—2018 年辽宁省逐月风速资料和再分析资料,结合卫星遥感分类方法,统计分析了不同类型台站近地面风速时空变化规律,并采用 UMR(urban minus rural)方法和 OMR(observation minus reanalysis)方法定量分析了城市化效应对辽宁省近地面

风速的影响。该研究不仅能更好地了解不同尺度近地面风速变化的特征,对于深入认识近地面风速变化的原因及其驱动机制也是十分有益的,为预测辽宁省未来风速变化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,为风能资源评估、城市发展规划、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6个方面:(1)辽宁省61个国家气象站1979—2018年逐月平均风速资料,来源于国家气象信息中心发布的均一化风速数据集,该资料经过了均一化处理和初步的质量控制,订正了人为因素造成的误差值(曹丽娟等,2010;曹丽娟和严中伟,2011;刘小宁,2000)。(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》(辽宁省统计局,2019)。(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》(中华人民共和国公安部治安管理局,2014)以及《中国人口年鉴2017》(中国社会科学院人口与劳动经济研究所,2018)。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下发的中国公里网格人口分布数据集(PopulationGrid_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,从而生成的 $1\text{ km}\times 1\text{ km}$ 的空间人口密度数据。(5)再分析资料采用1979—2018年NCEP-DOE Reanalysis 2(以下简称NCEP)10 m高度的经向风(u)、纬向风(v),利用再分析资料的逐日定时纬向风和经向风分量求出逐日定时风速,分辨率为T62的高斯格点,范围为 $88.542^\circ\text{N}\sim 88.542^\circ\text{S}$ 、 $0^\circ\sim 358.125^\circ\text{E}$ 。该资料由美国国家环境预测中心和大气研究中心共同研发,是目前全球再分析资料中时间尺度最长的资料之一。该资料在同化和拟合过程中并未采用地面观测资料,故基本不受陆地表面变化的影响(Kanamitsu et al,2002)。(6)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,还专门针对亚洲地区的地理特征进行了开发,排除了灯光饱和问题的干扰,也无需对放大增益进行人为控制,为亚洲地区的城市化强度分析提供便利条件(傅颖,2013)。

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(图1)。

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一次;(3)测风仪器高度均在10 m左右,未发生过观测高度变更;(4)气象站不位于城区中心或者居民区内;(5)气象观测站所在经纬度上的人口密度不超过 $300\text{ 人}\cdot\text{km}^{-2}$;(6)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 $\times 100\%$)不超过35%。具体方法可以参考任国玉等(2010)和张爱英等(2010)。通过上述检验筛选过程,最后选出乡村站5个,分别是丹东的宽甸、营口的熊岳、朝阳的建平和喀左以及本溪的草河口。

1.2.2 城市站的选择

采用统计数据比较法,利用DMSP/OLS卫星

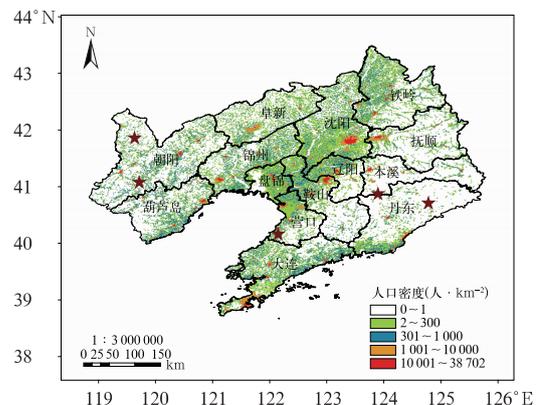


图1 辽宁省乡村站和人口密度空间分布
Fig. 1 Distribution of rural weather stations and population density in Liaoning Province

夜间灯光数据,提取辽宁省城镇用地空间信息(郑有飞等,2014;舒松等,2011;He et al,2006)。该方法主要依据以下两个基本假设来提取辽宁省城市空间信息:(1)统计年鉴上的城镇用地面积数据能较为准确地反映辽宁省各市城镇用地的真实面积,所以利用 DMSP/OLS 数据提取的各城市城镇用地面积应尽量与统计年鉴数据相近;(2)自 20 世纪 90 年代起,辽宁省城镇用地面积持续增长,上一个时期的城市格点不会在下一个时期消失,因此上一时期的城市格点会在下一时期得到保留。在此基础上,设定各市不同动态阈值,采用二分法思路,不断变化阈值,计算每个动态阈值下的城镇面积,并将计算结果与统计年鉴对比,直到某一阈值下利用卫星夜间灯光数据计算的城镇面积值与统计年鉴充分接近,则该阈值为该市的最佳阈值。当各市最佳阈值确定后,计算各站点 7 km 半径之内的夜间灯光灰度值的平均值,如果计算值大于该站点所在市的阈值,则该站为城市站。

从 1993、2003、2013 年卫星夜间灯光空间分布(图 2)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 年共计有城市站 31 个;2013 年共计有城市站 40 个。随着城市化的发展,部分站点转换成城市站,凌源从城市站转换成非城市站,可能是凌源城市化进程较周边站点缓慢,从而退化成非城市站。本文选定从 1993—2013 年始终为城市站的 29 个站点代表城市站。

1.2.3 UMR 方法

UMR 方法是目前应用最为广泛的一种方法,其主要思想是认为在同一时期内,与城市邻近的郊区或乡村台站受城市化的影响较小,而且与城区具有同样的区域气候条件,能够近似地代表城市化之前的气候变化特征。利用郊区、乡村站建立参考序列,并与城市测站进行对比,就得到了城市化的气候效应。其关键点在于非城市台站的合理选取和参考序列的建立方法。这种思路可以应用于单个城市,一般是选择一个典型台站,或者若干均匀分布的台站的平均值来代表城市和郊区的气候特征;也可以应用于某个大区域,根据城市化水平的高低将台站划分为不同等级,比较各个等级之间的差异。

本文将 29 个城市站风速资料分别减去其对应的气候态平均值(1981—2010 年),得到每个站的风速距平序列,然后将 29 个城市站风速距平序列进行

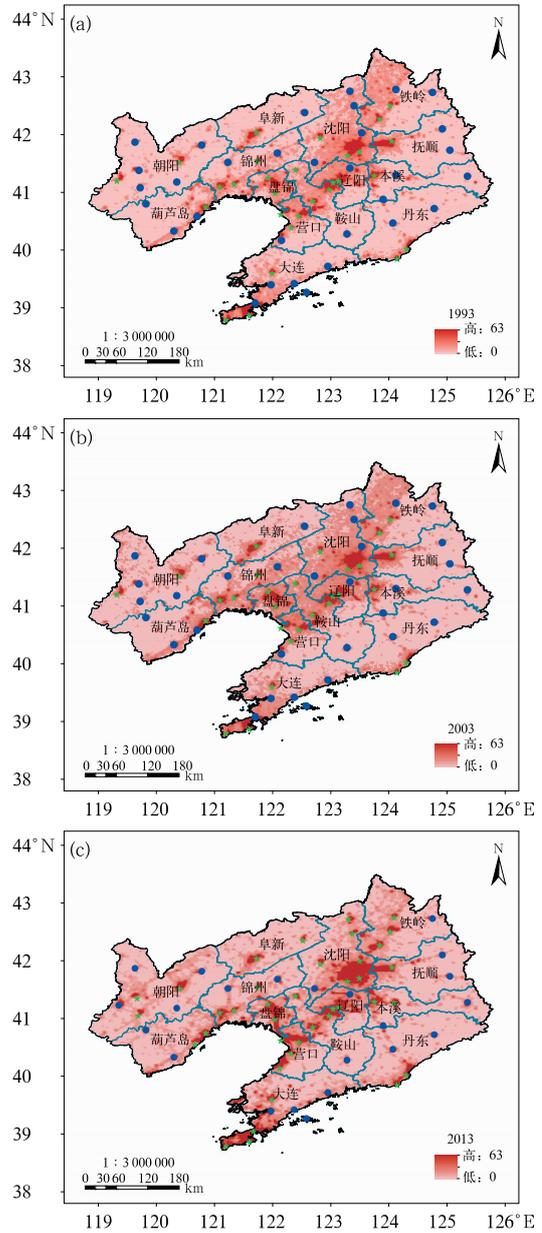


图 2 1993 年(a)、2003 年(b)、2013 年(c)卫星夜间灯光灰度值和城市站、非城市站的空间分布 (绿色圆点:城市站;蓝色圆点:非城市站)

Fig.2 Distribution of urban stations and rural stations of Liaoning Province and DMSP/OLS nighttime light gray value in 1993 (a), 2003 (b) and 2013 (c) (green dots: urban station; blue dots: unurban station)

区域平均得到城市风速距平序列;乡村站的处理方法与城市站一致,是把 5 个乡村站序列平均作为参考序列。

1.2.4 OMR 方法

Kalnay and Cai(2003)提出了一种量化评估城市化对地面气温趋势影响的新方法,即观测减去

再分析的方法(OMR)。该方法利用 NCEP/NCAR 再分析资料在同化和拟合过程中未采用地面观测数据的特点,通过比较地面观测资料与再分析资料的差异来研究城市化效应问题,已经在国内外得到广泛应用。

本文利用均一化风速资料减去再分析风速资料的差值来评估城市化进程对辽宁省近地面风速变化的影响。OMR 方法的理论原理在于 NCEP 再分析资料能较好地呈现出由于大气环流变化和温室气体排放增多所引起的大尺度气候变化,并且该资料在同化和拟合的过程中没有采用地面观测资料,所以对城市化和下垫面变化不敏感,基本不会受到陆地表面变化的影响,能在一定程度上代表下垫面平均气候变化特征,可以作为城市气候研究的参考序列(Kanamitsu et al, 2002)。因此,利用观测资料减去再分析资料能将局地气象要素变化信息从全球气候变化的大背景中剥离出来。

本文先将 NCEP 再分析风速资料和均一化风速资料减去气候态平均值(1981—2010年),得到风速距平序列,从而有效避免了对风速插值进行海拔订正(Simmons et al, 2004),利用双线性插值方法将再分析资料插值到对应的 29 个城市站上,然后将双线性插值得到的再分析数据与同时段均一化资料进行比较分析,定量化评估城市化对辽宁省近地面风速的影响。文中 OMR 值为城市站风速距平与再分析资料的距平序列之差,OMR 贡献率则为 OMR 值的变化趋势与城市站风速资料变化趋势的比值。

1.2.5 城市化影响定义

为了定量评价城市化对近地面风速的影响,参照初子莹和任国玉(2005)定义以下术语。

城市化影响:由城市化因素引起的城市附近台站气象要素的线性变化趋势,用 ΔX_{ur} 表示,城市站气象要素变化趋势 X_u 与乡村站气象要素变化趋势 X_r 的差异来表征该地区的城市化影响。即:

$$\Delta X_{ur} = X_u - X_r \quad (1)$$

城市化影响贡献率:指城市化影响在城市站气象要素变化趋势中所占的比例,用 E_u 表示

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

UMR 值表示城市站风速距平与乡村站风速距平之差;城市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,并用非参数统计研究方法对线性趋势进行了显著性检验(Mann, 1945; Kendall, 1975)。

2 结果分析

2.1 UMR 方法下城市化对平均风速的影响分析

表 1 表明 1979—2018 年辽宁省年和四季风速的城市化影响程度。表 2 是风速变化趋势与全国、东北地区的对比情况。

从表中可以发现:无论是城市站还是乡村站,风速均呈减小趋势,城市站的减小速率明显快于乡村站,就四季而言均表现为春季减小速率最快,冬季次之,夏季和秋季减小速率相对较慢;城市化发展对年平均风速的影响较大,城市化的影响贡献率高达 73.3%,说明近 40 年辽宁省风速的减小主要是由城市化导致的。夏季的城市化影响贡献率最大,秋季和冬季次之,城市化进程对春季风速变化的影响相对较小。春季风速的减小趋势显著,但是城市化影响贡献率较小,说明辽宁省春季风速显著减小的过程中,城市化发展对其的影响不大,春季风速减小的主要原因可能是大气环流变化的影响,且中国的海陆气压梯度春季减弱最为明显,造成春季近地面风速减小。陈练(2013)在气候变暖背景下中国风速变化及其影响因子研究中也得出了类似结论。城市化对石家庄风速的影响贡献率为 86%,四季的城市化贡献率介于 82%~89%(卞韬等, 2018);城市化进程对安徽省风速的贡献率为 40%,四季的城市化贡献率介于 27.3%~65.9%(陶寅等, 2016);刘学锋等(2009a)研究指出城市化进程对河北省 1975—2004 年近地面风速的影响超过 25%;张爱英等(2009)研究指出全国探空站近地面风速减小趋势的 2/3(66.7%)是因为城市化影响和观测环境变化引起的。与前人的研究相比,辽宁省城市化对风速的影响相对较强,这与 21 世纪后辽宁省快速的城市化有关,也可能与研究区域、研究时段以及乡村站的选取有关。

针对全国范围的风速变化研究表明(史培军等, 2015;赵宗慈等, 2016),从 20 世纪 60 年代以来,中国近地面风速明显减小,其中风能资源丰富的三北地区(西北、华北、东北)和环渤海地区风速下降最为显著,均通过显著性水平检验。全国年平均风速的减小趋势为 $0.13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,辽宁省城市站年平均风速的下降速率为 $0.15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,大于全国范围的下降速率,小于东北地区的变化趋势 [$0.17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$](中国气象局气候变化

中心,2019)。金巍等(2012)在研究东北三省平均地面风速变化中指出黑龙江大兴安岭地区风速下降速率介于 $0.2\sim 0.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$, 辽宁和黑龙江大部分地区风速减小显著。本文选取的 5 个乡村站地面风速减小趋势明显较城市站、全国和东北地区偏弱,仅为 $0.04 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$, 说明选取的乡村站代表性较高,其变化趋势能较好地反映观测环境不受建筑物阻挡和城市化影响的背景风场变化情

况。辽宁省四季风速均呈减小趋势,尤以春季和冬季减小最为明显,这可能与全球变暖的经向非均质性有关(卞韬等,2018),同时辽宁省冬季风起源于西伯利亚高压,近年来西伯利亚高压的强度和影响逐渐减弱,导致冷高压爆发频次显著下降,地面气压变弱,寒潮发生频率减少,强度减弱(金巍等,2011;王遵娅等,2004)。

表 1 1979—2018 年辽宁省城市站和乡村站年和四季平均风速城市化影响及城市化影响贡献率
Table 1 Urbanization effect and contribution rate of urbanization to the annual and seasonal mean wind speed between urban stations and rural stations of Liaoning Province from 1979 to 2018

要素	年	春季	夏季	秋季	冬季
城市化影响/ $[\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}]$	-0.11*	-0.06*	-0.12*	-0.09*	-0.11*
城市化影响贡献率/%	73.3	31.6	85.7	69.2	68.8

注: * 表示通过 0.05 显著性水平检验,下同。

Note: * indicates passing the 0.05 significance level test. The same below.

表 2 1979—2018 年辽宁省城市站和乡村站年和四季平均风速变化趋势与全国、东北地区对比[单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$]

Table 2 Linear trends of annual mean wind speed between urban stations and rural stations of Liaoning Province from 1979 to 2018 and the comparison to those of mainland China and Northeast China [unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$]

时间	城市站	乡村站	全国	东北地区
年	-0.15*	-0.04	-0.13*	-0.17*
春季	-0.19*	-0.13*	-0.14*	-0.23*
夏季	-0.14*	-0.02	-0.09*	-0.14*
秋季	-0.13*	-0.04	-0.12*	-0.16*
冬季	-0.16*	-0.05	-0.15*	-0.17*

图 3 给出了 1979—2018 年辽宁省平均风速距平的年际变化曲线及线性趋势,可以发现近 40 年辽宁省城市站和乡村站年平均风速与 UMR 序列均呈一致减小趋势,减小速率分别是 $0.15, 0.04, 0.11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$, 其中城市站风速和 UMR 序列减小速率均通过显著性水平检验。城市站风速在 20 世纪 80、90 年代风速偏大,21 世纪后风速呈阶梯状递减,2012 年达到最低值,之后略有增大,但均小于气候常年值。乡村站风速在 20 世纪 80 年代偏大,从 90 年代到 21 世纪 00 年代中期风速缓慢减小,2007 年风速达到最小值,之后开始逐渐增大,乡村站年平均风速整体上呈微弱的减小趋势,未通过显著性水平检验。1988 年之前,乡村站风速距平基本大于城市站,UMR 距平呈负值,1989 年开始 UMR 逐渐出现正距平,到 2002 年城市站风速距平开始小于乡村站,UMR 呈一致负值,且随时间推移距平差异呈增大趋势,2017 年 UMR 达 $-0.64 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。成皎等(2017)研究指出咸宁地区近 34 年城市站和乡村

站风速分别以 0.18 和 $0.05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 的速率变小,城市化影响达 $-0.13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。陶寅等(2016)在研究城市化对安徽省风速的影响中指出,进入 21 世纪后城市化进程明显加快,城市站比例明显提高,城市站风速被城市下垫面的摩擦效应消弱(吴息等,2016),所以 21 世纪后城市站风速显著减小,城乡差异增大。辽宁省城市化影响也随着城镇建设的进一步发展而加剧,进入 21 世纪后辽宁省城镇化率超过 55%,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。

图 4 给出了辽宁省城市站和乡村站风速变化趋势以及城市站与乡村站风速变化趋势差异(城市化影响)的空间分布。除阜新站和宽甸站以外,近 40 年辽宁省各站的近地面风速均呈减小趋势,变化趋势介于 $-0.39\sim 0.18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,其中辽宁中北部城市群减小趋势较明显,尤以铁岭、辽阳、盘

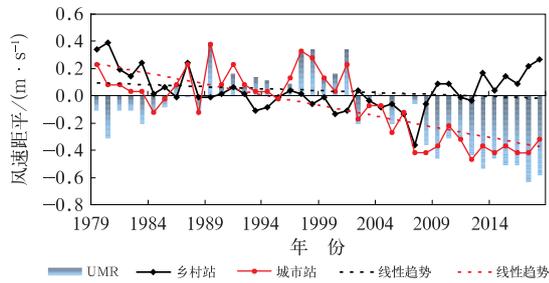


图 3 1979—2018 年辽宁省平均风速距平际变化
Fig. 3 Interannual anomalies of annual mean wind speed in Liaoning Province from 1979 to 2018

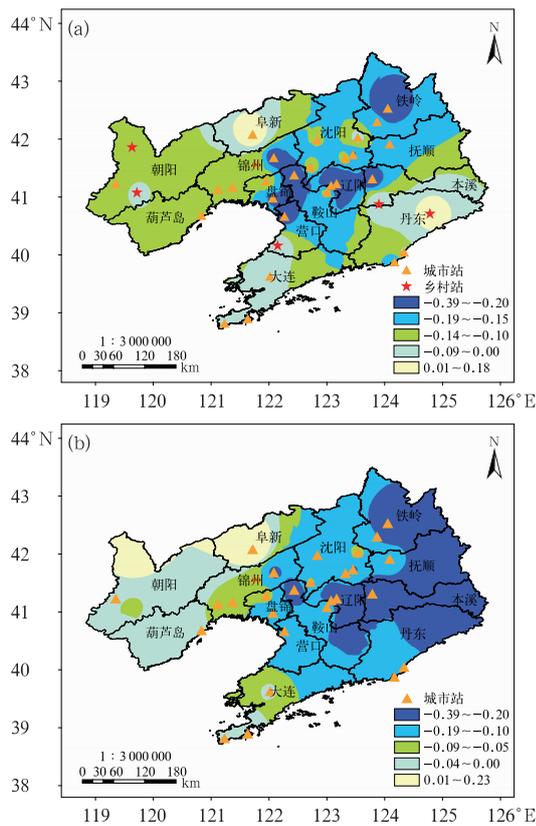


图 4 1979—2018 年辽宁省城市站和乡村站风速变化趋势(a)和城市化影响(b)的空间分布[单位: $m \cdot s^{-1} \cdot (10 a)^{-1}$]
Fig. 4 Spatial distribution of annual mean wind speed trend (a) and the urbanization impact (b) in Liaoning Province from 1979 to 2018 [unit: $m \cdot s^{-1} \cdot (10 a)^{-1}$]

锦最为显著,风速下降趋势均超过 $0.2 m \cdot s^{-1} \cdot (10 a)^{-1}$;大连、丹东、阜新风速减小相对缓慢,均小于 $0.09 m \cdot s^{-1} \cdot (10 a)^{-1}$;辽宁西部风速下降速率居中,阜新为城市站,但其风速增加较明显,可能是因为阜新是常年大风地区,绿化少,沙质化严重,并且阜

新站海拔高度较高,明显高于临近的彰武、北镇、黑山等台站,所以城市化对其影响较小。图 4b 城市化影响呈现自西向东逐渐增强的纬向分布形势,城市化影响介于 $-0.39 \sim 0.23 m \cdot s^{-1} \cdot (10 a)^{-1}$,城市化影响的高值区位于东部和中部部分地区,低值区位于朝阳葫芦岛一带;西部和环渤海区域为辽宁省风能资源丰富区,但是西部经济发展与省内其他区域比较相对滞后,且大量人口流失到中部和东部,所以城市化发展相对中部和东部缓慢,城市化对风速的影响也相对较小。

2.2 OMR 方法下城市化对平均风速的影响分析

表 3 给出了利用 OMR 方法计算的城市化影响和城市化影响贡献率,可以发现,观测资料和再分析资料的风速均呈减小趋势,观测资料的减小趋势明显快于再分析资料,再分析资料的减小趋势与乡村站的减小趋势比较接近,未通过显著性水平检验。就四季而言,春季风速的减小速率最明显,夏季次之;就城市化影响贡献率而言,年和四季的城市化贡献率均超过 50%,冬季的城市化影响贡献率最大,达 75%,城市化对年平均风速的贡献率为 66.7%,说明辽宁省风速减小主要是由于城市化所致。利用 UMR 和 OMR 方法计算的城市化对风速的影响贡献率较一致,年贡献率在 70% 上下,四季贡献率均显示春季最小,但是 UMR 方法计算的夏季城市化影响贡献率最大,OMR 方法则是冬季,可能是因为 NCEP 再分析风速资料在夏季和冬季可信度相对较差(施晓晖等, 2006; Liu et al, 2010)。成蛟等(2017)利用 UMR 和 OMR 方法计算城市化对咸宁地区风速影响,结果显示 UMR 方法计算的城市化影响更为显著,城市化影响贡献率为 75%,OMR 方法对应的贡献率为 69%,与本文结论较一致。李艳等(2008)利用观测资料和 NCEP 再分析资料分别计算其对应的风能密度,结果显示观测资料的下降趋势明显大于再分析资料,并认为土地利用和城市化是造成风速下降的主要原因,贡献率约占 85%;陈练(2013)研究指出 1971—2005 年全国近地面风速以 $0.16 m \cdot s^{-1}$ 减小,但是高空风速减小较缓慢,从而推断出城市化对风速的贡献率约为 69%;Jiang et al(2010)和赵宗慈等(2011)研究发现 NCEP 和 ERA 两种风场再分析资料均是呈减小趋势,但趋势明显小于观测资料,并指出城市化和大气环流的变化是中国风速变小不可忽视的原因。

表 3 1979—2018 年辽宁省年和四季平均风速城市化影响及城市化影响贡献率
Table 3 Urbanization effect and contribution rate of urbanization to the annual and seasonal mean wind speed in Liaoning Province from 1979 to 2018

要素	年	春季	夏季	秋季	冬季
OBS	-0.15*	-0.19*	-0.14*	-0.13*	-0.16*
NCEP	-0.05	-0.09	-0.06	-0.05	-0.04
城市化影响/[$m \cdot s^{-1} \cdot (10 a)^{-1}$]	-0.10*	-0.10*	-0.08*	-0.08*	-0.12*
城市化影响贡献率/%	66.7	52.6	57.1	61.5	75.0

图 5 给出了观测资料与再分析资料的风速距平及 OMR 序列的年际变化,可以发现近 40 年辽宁省观测资料和再分析资料的平均风速与 OMR 序列均呈一致减小趋势,减小速率分别是 $0.15, 0.05, 0.10 m \cdot s^{-1} \cdot (10 a)^{-1}$;城市站风速和 OMR 序列减小速率均通过显著性水平检验。NCEP 风速在 1990 年之前偏大,1991—1997 年逐渐减小,1998—2006 年风速缓慢提升,2007—2014 年又逐渐减小,2015 年之后风速再次增大,NCEP 风速资料的年际变化是上下波动的,变化趋势未通过显著性水平检验。1988 年之前,NCEP 风速距平基本大于城市站风速,OMR 距平呈负值;1989 年开始逐渐出现正距平,2002 年之后城市站风速距平基本小于 NCEP,OMR 呈一致负值;对比 UMR 和 OMR 序列可以发现,二者的变化趋势比较一致,NCEP 风速与乡村站风速相关性较好,计算得到的城市化影响和贡献率也较接近,说明这两种方法估算的结果均能在一定程度上反映辽宁省城市化对风速的影响。

图 6 给出再分析资料与观测资料平均风速及其差异的空间变化趋势,从观测资料中可以发现,除阜新和旅顺口站以外,其他站点的平均风速均显著

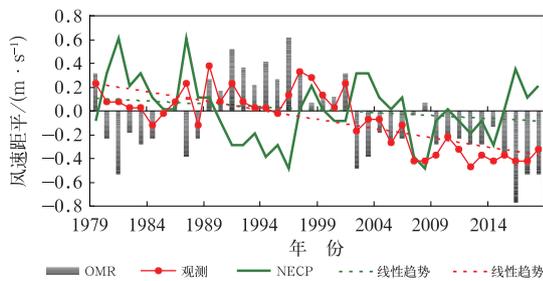


图 5 1979—2018 年辽宁省城市站风速距平与再分析资料的风速距平及 OMR 序列的年际变化
Fig. 5 Interannual anomalies of annual mean wind speed at urban stations and NCEP-DOE reanalysis (NDR) wind speed, and OMR time series in Liaoning Province from 1979 to 2018

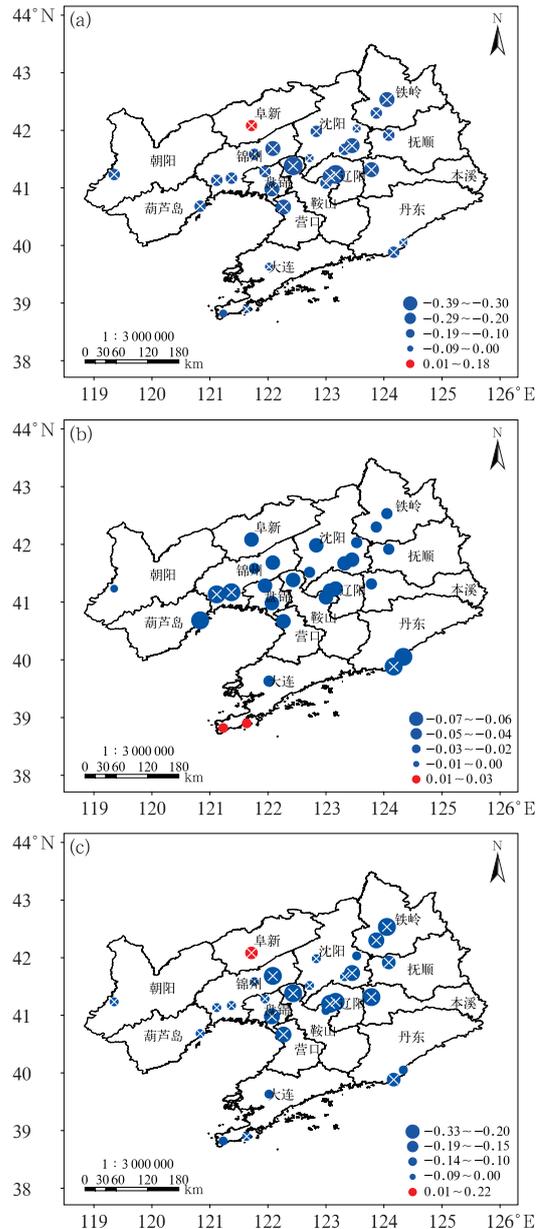


图 6 1979—2018 年辽宁省城市站风速变化趋势(a), NCEP 风速变化趋势(b)和城市化影响(c)的空间分布 [单位: $m \cdot s^{-1} \cdot (10 a)^{-1}$,白色×表示该站点通过 0.05 显著性水平检验]
Fig. 6 Spatial distribution of annual mean wind speed trend at urban stations (a), NCEP reanalysis wind speed (b) and the urbanization impact (c) in Liaoning Province from 1979 to 2018[unit: $m \cdot s^{-1} \cdot (10 a)^{-1}$, white ×; $P < 0.05$]

减小趋势,减小趋势超过 $0.05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,辽宁中部地区减小趋势较明显,辽阳站为 $0.39 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。从再分析资料的空间变化趋势中可以看出,辽宁省渤海海峡风速呈不显著增加趋势,除东港、锦州、凌海之外,其他地区风速均呈不显著减小趋势。再分析资料的减小趋势明显小于观测资料,约为 $-0.07 \sim 0.03 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,风速减小的高值区位于渤海北部和黄海北部海岸带临近站点,低值区位于凌源。图6c为观测资料与再分析资料差异的空间分布,在某种程度上反映了城市化进程对辽宁省风速变化产生的影响。可以看出城市化影响在辽宁省有一定区域性,中部、北部、东部偏大,西部和南部偏小,除丹东、旅顺口等站点外,城市化影响比较显著,其中辽阳、沈阳、鞍山等中部城市群的城市化影响最为明显,辽宁省绝大部分地区受城市化影响导致平均风速减小,变化趋势约为 $-0.024 \sim 0.330 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。对比图4b(UMR方法计算的城市化影响空间分布),可以发现二者均呈现西部和南部受城市化影响较小、中东部受城市化影响较大,一致性较好。赵佳莹和徐海明(2014)对中国区域观测资料与再分析资料风速对比分析后指出,再分析资料与观测资料在长期变化趋势上差异较大,表现为中国东北部地区观测风速显著减弱,而再分析资料则没有明显的增加或减弱趋势,变化趋势不显著,这与本文结论相近。徐阳阳等(2009)研究1993—2003年风速廓线后指出,随着城市化发展,平均风速呈逐年减小趋势,且越邻近地面风速减小越显著,这反映了城市建筑对近地面风速的摩擦作用。由上述分析可知,辽宁省平均风速存在明显减弱趋势,任国玉等(2009)、刘学锋等(2009b; 2012)均指出,无论近地面还是高空,风速基本都呈减弱趋势,但减弱趋势在近地面比自由大气要大得多,城市化影响是近地面风速减弱的主要原因。这些研究与本文得出的风速减小在很大程度上依赖于快速城市化影响的结果是一致的。

3 结论与讨论

(1)1979—2018年辽宁省年和四季风速均呈减弱趋势,城市站的减小速率明显快于乡村站,就四季而言,春季减小速率最快,冬季次之,夏季和秋季减小速率相对较慢;城市化发展对年平均风速的影响较大,城市化影响贡献率高达73.3%,说明近40年

辽宁省风速的减小主要是由城市化造成的,明显大于城市化对南方地区风速的影响贡献率。夏季的城市化影响贡献率最大,城市化进程对春季风速变化的影响相对较小。

(2)在年际变化趋势上,城市站、乡村站年平均风速与UMR序列均呈一致减小趋势,城市站风速在20世纪80、90年代风速偏大,21世纪风速呈阶梯状递减;乡村站风速在80年代偏大,90年代到21世纪00年代中期风速缓慢减小,2007年之后又逐渐增大,乡村站风速呈不显著减小趋势。1988年之前,乡村站风速距平基本大于城市站,UMR距平呈负值;1989年开始逐渐出现正距平,21世纪UMR呈一致负值,且随时间推移距平差异呈增大趋势。

(3)空间分布上,辽宁省绝大部分地区风速呈减小趋势,辽宁中北部城市群减小趋势较明显,南部风速减小相对缓慢,西部居中;UMR方法计算的城市化影响呈现自西向东逐渐增强的纬向分布形势,城市化影响的高值区位于东部和中部地区,低值区位于朝阳葫芦岛一带,西部和环渤海区域为风能资源丰富区,但是西部经济发展较缓慢,大量人口流失到中部和东部,所以城市化发展相对中部和东部缓慢,城市化对风速的影响也相对较小。

(4)观测资料和再分析资料的风速均呈减小趋势,观测资料的减小趋势明显快于再分析资料,再分析资料的减小趋势与乡村站的减小趋势较一致。不同与辽宁省,南方地区风速再分析资料的减小速率大于乡村站,基于OMR方法计算的风速城市化影响并不显著。就四季而言,春季风速的减小速率最明显,夏季次之;就城市化影响贡献率而言,年和四季的城市化贡献率均超过50%,冬季的贡献率最大,春季最小,城市化对年平均风速的贡献率为66.7%,说明辽宁省风速减小主要是由于城市化所致。利用UMR方法和OMR方法计算的城市化对风速的影响贡献率较一致,均能在一定程度上反映城市化对风速的影响。

(5)NCEP风速资料的年际变化是上下波动的,变化趋势未通过显著性水平检验。1988年之前,NCEP风速距平基本大于城市站风速,OMR距平呈负值;1989年开始逐渐出现正距平,从2002年之后OMR呈一致负值;对比UMR和OMR序列可以发现,二者的变化趋势比较一致,NCEP风速与乡村站风速相关性也较好。空间分布上,再分析资料显示渤海海峡风速呈微弱增加趋势,其他地区呈减小

趋势;风速减小的高值区位于渤海北部和黄海北部,低值区位于凌源。两种方法计算的城市化影响空间分布均呈现为西部和南部受城市化影响较小、中东部受城市化影响较大,一致性较好。

本文利用辽宁省逐月风速资料和再分析资料,采用 UMR 和 OMR 方法定量分析了城市化对辽宁省近地面风速的影响,得到若干新的结果。本文不仅利用常规参考台站的遴选原则和方法,还结合了卫星遥感分类方法,采用两种评估方法和多种资料进行分析,不同于以往研究工作中的单一方法和单一资料的城市化效应研究;在全国范围内年平均风速减小的大环境下,本文利用更多的台站且充分考虑台站下垫面物理覆盖特征来研究城市化对风速的影响,也是对前人工作的有利补充。结合作者前期利用两种方法检测城市化对气温的影响研究可以发现,本文选择的乡村站是比较有代表性的参考站,两种方法检测的城市化影响比较接近;且马明敏等(2008)在研究近 47 年沈阳风速的变化特征及影响因子中指出,城市化对风速影响的贡献率超过 60%,与本文的结论较一致。但是针对同一时期、同一地点,关于城市化效应的量化评估结果仍存在不确定性。UMR 方法在实际分析中,乡村站本身不能完全排除人类活动的影响,乡村站所受的影响越大,检测的城市化影响贡献率也就越小,该方法的检测是偏于保守的(Ren et al, 2015)。OMR 方法虽然能检测出局地城市化所引起的气温变化信息,但其结果还包括区域性土地利用变化所产生的影响,不是单一的城市化影响结果;且该方法受到再分析资料质量的限制,该资料在云、气溶胶等因素上的考虑不够充分,且地面能量收支平衡存在误差,导致 OMR 方法也存在一定不确定性(Hua et al, 2008)。全球大气环流的变化和本地城市化效应对风速的影响贡献率如何进一步定量剥离,取决于究竟是热力强迫效应还是城市下垫面动力摩擦效应对风速的影响占主导地位,这都需要在后续工作通过数值模拟和结合统计等多种方法来验证,以减小城市化气候效应研究中的不确定性,获得更全面的定量分析。

参考文献

卞韬,任国玉,张立霞,2018. 城市化对石家庄站近地面风速趋势的影响[J]. 气候变化研究进展, 14(1): 21-30. Bian T, Ren G Y, Zhang L X, 2018. Significant urbanization effect on decline of near-surface wind speed at Shijiazhuang Station[J]. Progr Inquisit Mutat Climatis, 14(1): 21-30(in Chinese).

曹丽娟,鞠晓慧,刘小宁,2010. PMFT 方法对我国年平均风速的均一性检验[J]. 气象, 36(10): 52-56. Cao L J, Ju X H, Liu X N, 2010. Penalized maximal F test for the homogeneity study of the annual mean wind speed over China[J]. Meteor Mon, 36(10): 52-56(in Chinese).

曹丽娟,严中伟,2011. 地面气候资料均一性研究进展[J]. 气候变化研究进展, 7(2): 129-135. Cao L J, Yan Z W, 2011. Progresses in research of homogenization of climate data[J]. Adv Climate Change Res, 7(2): 129-135(in Chinese).

陈练,2013. 气候变暖背景下中国风速(能)变化及其影响因子研究[D]. 南京:南京信息工程大学. Chen L, 2013. Changes and their impact factors of wind speed (energy) over China under the background of climate warming[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology(in Chinese).

成姣,任永建,张艳,等,2017. 城市化对咸宁地区风速和相对湿度的影响分析[J]. 气象与环境科学, 40(4): 57-62. Cheng J, Ren Y J, Zhang Y, et al, 2017. Impact analysis of urbanization on wind speed and relative humidity in Xianning Area[J]. Meteor Environ Sci, 40(4): 57-62(in Chinese).

初子莹,任国玉,2005. 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, 63(4): 534-540. Chu Z Y, Ren G Y, 2005. Change in urban heat island magnitude and its effect on mean air temperature record in Beijing Region[J]. Acta Meteor Sin, 63(4): 534-540(in Chinese).

傅颖,2013. 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. Fu Y, 2013. The impact of urbanization on extreme temperature in the middle and lower reaches of Yangtze River[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology(in Chinese).

金巍,任国玉,曲岩,2011. 1961—2008 年东北三省地面气压变化特征[J]. 高原气象, 30(6): 1661-1667. Jin W, Ren G Y, Qu Y, 2011. Change of surface pressure in Northeast China during 1961—2008[J]. Plateau Meteor, 30(6): 1661-1667(in Chinese).

金巍,任国玉,曲岩,等,2012. 1971—2010 年东北三省平均地面风速变化[J]. 干旱区研究, 29(4): 648-653. Jin W, Ren G Y, Qu Y, et al, 2012. Change in surface mean wind speed of Northeast China during the period of 1971—2010[J]. Arid Zone Res, 29(4): 648-653(in Chinese).

李艳,王元,储惠芸,等,2008. 中国陆域近地层风能资源的气候变异和下垫面人为改变的影响[J]. 科学通报, 53(21): 2646-2653. Li Y, Wang Y, Chu H Y, et al, 2008. The climate influence of anthropogenic land-use changes on near-surface wind energy potential in China[J]. Chin Sci Bull, 53(18): 2859-2866 (in Chinese).

辽宁省统计局,2019. 辽宁统计年鉴 2018[R]. 北京:中国统计出版社. Liaoning Provincial Bureau of Statistics, 2019. Liaoning Statistical Yearbook(2018)[R]. Beijing: China Statistics Press(in Chinese).

刘佳,马振峰,范广洲,等,2012. 多种均一性检验方法比较研究[J]. 气象, 38(9): 1121-1128. Liu J, Ma Z F, Fan G Z, et al, 2012. Research on the comparison of different homogeneity test methods

- [J]. Meteor Mon, 38(9): 1121-1128(in Chinese).
- 刘伟东, 张本志, 尤焕苓, et al, 2014. 1978—2008年城市化对北京地区气温变化影响的初步分析[J]. 气象, 40(1): 94-100. Liu W D, Zhang B Z, You H L, et al, 2014. Preliminary analysis of urbanization effects on temperature change in Beijing during 1978—2008[J]. Meteor Mon, 40(1): 94-100(in Chinese).
- 刘小宁, 2000. 我国40年年平均风速的均一性检验[J]. 应用气象学报, 11(2): 27-34. Liu X N, 2000. The homogeneity test on mean annual wind speed over China[J]. Quart J Appl Meteor, 11(2): 27-34(in Chinese).
- 刘学锋, 梁秀慧, 任国玉, 等, 2012. 台站观测环境改变对我国近地面风速观测资料序列的影响[J]. 高原气象, 31(6): 1645-1652. Liu X F, Liang X H, Ren G Y, et al, 2012. Impact of the observational environment change on surface wind speed in China[J]. Plateau Meteor, 31(6): 1645-1652(in Chinese).
- 刘学锋, 江滢, 任国玉, 等, 2009a. 河北城市化和观测环境改变对地面风速观测资料序列的影响[J]. 高原气象, 28(2): 433-439. Liu X F, Jiang Y, Ren G Y, et al, 2009a. Effect of urbanization and observation environment change on wind speed trend in Hebei Province, China[J]. Plateau Meteor, 28(2): 433-439(in Chinese).
- 刘学锋, 任国玉, 梁秀慧, 等, 2009b. 河北地区边界层内不同高度风速变化特征[J]. 气象, 35(7): 46-53. Liu X F, Ren G Y, Liang X H, et al, 2009b. The characteristics of wind speed variation at different altitudes of boundary layer in Hebei Province[J]. Meteor Mon, 35(7): 46-53(in Chinese).
- 马明敏, 姜晓艳, 刘树华, 等, 2008. 近47年城市化发展对沈阳区域局地气候的影响研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 44(1): 108-114. Ma M M, Jiang X Y, Liu S H, et al, 2008. Urbanization effects on local climate in Shenyang in recent 47 Years[J]. Acta Sci Nat Univ Pekinensis, 44(1): 108-114(in Chinese).
- 任国玉, 郭军, 徐铭志, 等, 2005. 近50年中国地面气候变化基本特征[J]. 气象学报, 63(6): 942-956. Ren G Y, Guo J, Xu M Z, et al, 2005. Climate changes of China's mainland over the past half century[J]. Acta Meteor Sin, 63(6): 942-956(in Chinese).
- 任国玉, 张爱英, 初子莹, 等, 2010. 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, 38(1): 78-85. Ren G Y, Zhang A Y, Chu Z Y, et al, 2010. Principles and procedures for selecting reference surface air temperature stations in China[J]. Meteor Sci Technol, 38(1): 78-85(in Chinese).
- 任国玉, 张爱英, 王颖, 等, 2009. 我国高空风速的气候学特征[J]. 地理研究, 28(6): 1583-1592. Ren G Y, Zhang A Y, Wang Y, et al, 2009. Climatology of upper wind speeds over China[J]. Geogr Res, 28(6): 1583-1592(in Chinese).
- 史培军, 张钢锋, 孔锋, 等, 2015. 中国1961—2012年风速变化区划[J]. 气候变化研究进展, 11(6): 387-394. Shi P J, Zhang G F, Kong F, et al, 2015. Wind speed change regionalization in China in 1961—2012[J]. Progr Inquisit Mutat Climatis, 11(6): 387-394(in Chinese).
- 施晓晖, 徐祥德, 谢立安, 2006. NCEP/NCAR再分析风速、表面气温距平在中国区域气候变化研究中的可信度分析[J]. 气象学报, 64(6): 709-722. Shi X H, Xu X D, Xie L A, 2006. Reliability analyses of anomalies of NCEP/NCAR reanalysis wind speed and surface temperature in climate change research in China[J]. Acta Meteor Sin, 64(6): 709-722(in Chinese).
- 舒松, 余柏菴, 吴健平, 等, 2011. 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, 26(2): 169-176. Shu S, Yu B L, Wu J P, et al, 2011. Methods for deriving urban built-up area using night-light data: assessment and application[J]. Remote Sens Technol Appl, 26(2): 169-176(in Chinese).
- 陶寅, 黄勇, 杨元建, 等, 2016. 城市化进程对安徽省风速的影响[J]. 气候变化研究进展, 12(6): 519-526. Tao Y, Huang Y, Yang Y J, et al, 2016. Impact of urbanization on wind speed in Anhui Province[J]. Climate Change Res, 12(6): 519-526(in Chinese).
- 王遵娅, 丁一汇, 何金海, 等, 2004. 近50年来中国气候变化特征的再分析[J]. 气象学报, 62(2): 228-236. Wang Z Y, Ding Y H, He J H, et al, 2004. An updating analysis of the climate change in China in recent 50 years[J]. Acta Meteor Sin, 62(2): 228-236(in Chinese).
- 吴息, 吴文倩, 王彬滨, 2016. 城市化对近地层风速概率分布及参数的影响[J]. 气象学报, 74(4): 623-632. Wu X, Wu W Q, Wang B B, 2016. Effects of urbanization on surface layer wind speed probability distribution and its parameters[J]. Acta Meteor Sin, 74(4): 623-632(in Chinese).
- 徐阳阳, 刘树华, 胡非, 等, 2009. 北京城市化发展对大气边界层特性的影响[J]. 大气科学, 33(4): 859-867. Xu Y Y, Liu S H, Hu F, et al, 2009. Influence of Beijing urbanization on the characteristics of atmospheric boundary layer[J]. Chin J Atmos Sci, 33(4): 859-867(in Chinese).
- 张爱英, 任国玉, 郭军, 等, 2009. 近30年我国高空风速变化趋势分析[J]. 高原气象, 28(3): 680-687. Zhang A Y, Ren G Y, Guo J, et al, 2009. Change trend analyses on upper-air wind speed over China in past 30 years[J]. Plateau Meteor, 28(3): 680-687(in Chinese).
- 张爱英, 任国玉, 周江兴, 等, 2010. 中国地面气温变化趋势中的城市化影响偏差[J]. 气象学报, 68(6): 957-966. Zhang A Y, Ren G Y, Zhou J X, et al, 2010. On the urbanization effect on surface air temperature trends over China[J]. Acta Meteor Sin, 68(6): 957-966(in Chinese).
- 赵佳莹, 徐海明, 2014. 中国区域探空资料与再分析资料风速场的对比分析[J]. 气候与环境研究, 19(5): 587-600. Zhao J Y, Xu H M, 2014. Comparison of wind velocity among reanalysis and radiosonde datasets over China[J]. Climatic Environ Res, 19(5): 587-600(in Chinese).
- 赵宗慈, 罗勇, 江滢, 等, 2011. 全球大风在减少吗? [J]. 气候变化研究进展, 7(2): 149-151. Zhao Z C, Luo Y, Jiang Y, et al, 2011. Is global Strong Wind Declining? [J]. Progr Inquisit Mutat Climatis, 7(2): 149-151(in Chinese).
- 赵宗慈, 罗勇, 江滢, 等, 2016. 近50年中国风速减小的可能原因[J]. 气象科技进展, 6(3): 106-109. Zhao Z C, Luo Y, Jiang Y, et al, 2016. Possible reasons of wind speed decline in China for the last 50 years[J]. Adv Meteor Sci Technol, 6(3): 106-109(in Chi-

- nese).
- 郑红,王波,周永吉,等,2014.黑龙江省人工观测与自动观测气象数据均一性检验[J].干旱气象,32(2):292-297. Zheng H, Wang B, Zhou Y J, et al, 2014. Homogeneity test of artificial and automatic meteorological observation data in Heilongjiang Province [J]. J Arid Meteor, 32(2):292-297(in Chinese).
- 郑有飞,傅颖,尹继福,2014.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,30(2):293-301. Zheng Y F, Fu Y, Yin J F, 2014. Impact of urbanization on summer temperature in the middle and lower reaches of Yangtze River in atmospheric circulation background [J]. J Trop Meteor, 30(2): 293-301(in Chinese).
- 中华人民共和国公安部治安管理局,2014.中华人民共和国全国分县市人口统计年鉴[R].北京:群众出版社. Order Control Bureau of Ministry of Public Security of the People's Republic of China, 2014. The Points of the People's Republic of China Population Statistics Counties [R]. Beijing: Qunzhong Publishing House(in Chinese).
- 中国气象局气候变化中心,2019.2019年中国气候变化蓝皮书[R].北京:科学出版社. Climate Change Center of China Meteorological Administration, 2019. Blue Book on climate change in China (2019)[R]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- 中国社会科学院人口与劳动经济研究所,2018.中国人口年鉴2017[R].北京:中国社会科学出版社. The Institute of Population and Labor Economics, Chinese Academy of Social Sciences, 2018. Almanac of China's Population(2018)[R]. Beijing: China Social Sciences Press(in Chinese).
- 周淑贞,余碧霞,1988.上海城市对风速的影响[J].华东师范大学学报(自然科学版), (3):67-76. Zhou S Z, Yu B X, 1988. Shanghai urban influences on wind velocity [J]. J East China Norm Univ (Nat Sci), (3):67-76(in Chinese).
- Coutts A M, Beringer J, Tapper N J, 2007. Impact of increasing urban density on local climate: spatial and temporal variations in the surface energy balance in Melbourne, Australia [J]. J Appl Meteor Climatol, 46(4):477-493.
- Hartmann B, Wendler G, 2005. The significance of the 1976 Pacific climate shift in the climatology of Alaska [J]. J Climate, 18(22): 4824-4839.
- He C Y, Shi P J, Li J G, et al, 2006. Restoring urbanization process in China in the 1990s by using non-radian cecalibrated DMSP/OLS nighttime light Imagery and statistical data [J]. Chinese Sci Bull, 51(7):856-861.
- Hobbins M T, Ramirez J A, Brown T C, 2004. Trends in pan evaporation and actual evapotranspiration across the conterminous U. S.: paradoxical or complementary? [J]. Geophys Res Lett, 31(13):L13503.
- Hua L J, Ma Z G, Guo W D, 2008. The impact of urbanization on air temperature across China [J]. Theor Appl Climatol, 93(3-4): 179-194.
- Jiang Y, Luo Y, Zhao Z C, et al, 2010. Changes in wind speed over China during 1956—2004 [J]. Theor Appl Climatol, 99(3-4): 421-430.
- Kalnay E, Cai M, 2003. Impact of urbanization and land-use change on climate [J]. Nature, 423(6939):528-531.
- Kanamitsu M, Ebisuzaki W, Woollen J, et al, 2002. NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis(R-2) [J]. Bull Amer Meteor Soc, 83(11): 1631-1644.
- Kendall M G, 1975. Rank Correlation Techniques, Charles Griffen [M]. London ISBN, 195205723.
- Landsberg H E, 1981. The Urban Climate [M]. New York: Academic Press, 147.
- Li Z, Yan Z W, Tu K, et al, 2011. Changes in wind speed and extremes in Beijing during 1960—2008 based on homogenized observations [J]. Adv Atmos Sci, 28(2):408-420.
- Li Z Q, Song L L, Ma H, et al, 2018. Observed surface wind speed declining induced by urbanization in East China [J]. Climate Dyn, 50(3-4):735-749.
- Liu C, Wang Y Q, Bian J C, 2010. Applicability evaluation of NCEP/NCAR reanalysis temperature, geopotential height and wind field data in the upper troposphere and lower stratosphere [J]. Meteor Environ Res, 1(7):45-50, 53.
- Mann H B, 1945. Nonparametric tests against trend [J]. Econometrica, 13(3):245-259.
- Ren G Y, Li J, Ren Y Y, et al, 2015. An integrated procedure to determine a reference station network for evaluating and adjusting urban bias in surface air temperature data [J]. J Appl Meteor Climatol, 54(6):1248-1266.
- Seaman N L, Ludwig F L, Donall E G, et al, 1989. Numerical studies of urban planetary boundary-layer structure under realistic synoptic conditions [J]. J Appl Meteor, 28(8):760-781.
- Simmons A J, Jones P D, Bechtold V C, et al, 2004. Comparison of trends and low-frequency variability in CRU, ERA-40, and NCEP/NCAR analyses of surface air temperature [J]. J Geophys Res, 109:D24115. doi:10.1029/2004JD005306.
- Tuller S E, 2004. Measured wind speed trends on the west coast of Canada [J]. Int J Climatol, 24(11):1359-1374.
- Wan H, Wang H L, Swail V R, 2010. Homogenization and trend analysis of Canadian near-surface wind speeds [J]. J Climate, 23(5):1209-1225.
- Wu J, Zha J L, Zhao D M, 2016. Estimating the impact of the changes in land use and cover on the surface wind speed over the East China Plain during the period 1980—2011 [J]. Climate Dyn, 46(3-4):847-863.