第 14 卷 第 1 期
2018 年 1 月

气 候 变 化 研 究 进 展
CLIMATE CHANGE RESEARCH

Vol. 14 No. 1
January 2018

doi:10.12006/j.issn.1673-1719.2017.030
卞韬 , 任国玉 , 张立霞 . 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 , 2018, 14 (1): 21-30

城市化对石家庄站近地面风速趋势的影响

卞 韬[1,2]，任国玉[2,3]，张立霞[1]

1 河北省石家庄市气象局，石家庄 050081；
2 中国地质大学（武汉）环境学院大气科学系，武汉 430074；
3 中国气象局气候研究开放实验室／
中国气象局国家气候中心，北京 100081

摘 要：利用 1972—2012 年石家庄城市站和 4 个乡村站地面风速资料，采用城乡对比方法，对石家庄城市站地面风速序列中的城市化影响进行分析，结果表明，石家庄站年和季节平均地面风速和平均 10 min 最大风速的长期下降趋势，主要是由城市化因素引起。具体结论如下：(1) 石家庄站年和四季平均风速、平均 10 min 最大风速和大风日数均呈极显著的减少趋势，年平均减少速率分别为 −0.15 (m/s)/10a、−1.05 (m/s)/10a 和 −2.90 d/10a；乡村站年平均风速呈微弱下降趋势，年平均 10 min 最大风速减少较为明显，年大风日数减少趋势非常显著，减少速率分别为 −0.02 (m/s)/10a、−0.21 (m/s)/10a 和 −2.19 d/10a。(2) 石家庄站年平均风速下降趋势中的城市化影响为 −0.13 (m/s)/10a，城市化影响非常显著，城市化贡献率达到 86.0%。该站春、夏、秋、冬季平均风速变化的城市化影响分别为 −0.16 (m/s)/10a、−0.10 (m/s)/10a、−0.13 (m/s)/10a 和 −0.15 (m/s)/10a，城市化贡献率分别为 82.8%、87.6%、88.6% 和 85.4%。(3) 石家庄站年平均 10 min 最大风速变化趋势中的城市化影响为 −0.84 (m/s)/10a，城市化贡献率为 79.7%；春、夏、秋、冬季平均 10 min 最大风速变化趋势中的城市化影响分别为 −0.94 (m/s)/10a、−0.80 (m/s)/10a、−0.60 (m/s)/10a 和 −1.01 (m/s)/10a，城市化贡献率分别达到 90.4%、78.6%、64.9% 和 79.1%。(4) 城市化对石家庄站年大风日数减少的影响不显著，但冬季大风日数减少仍明显与城市化过程有关。

关键词：地面风速；变化趋势；城市化影响；城市化贡献率；石家庄站

引 言

风是重要的气候要素之一，是控制蒸散的关键因子，它不但可以反映大气环流的特征，也是衡量区域风能资源的基本指标。风速的变化往往对地区的环境产生较为深远的影响。作为蒸散的重要驱动因子，风速的变化将直接影响陆地水循环过程。在提倡大力发展清洁能源的今天，风能的发展潜力与风速变化也休戚相关，近年来世界大多数地区风速降低已经对风能资源的开发利用带来了挑战。此外，风速的减小不利于大气中污染物的扩散，可能是一些地区雾霾日数明显增加的原因之一。因此，探索和研究风速的变化及其原因意义重大。

关于近地面风速的变化，国内外已有不少研究成果。国内学者针对全国、区域以及单个地点风速的变化做了大量研究。国内研究[1-7]发现，中国大范围区域近地面平均风速和大风频率普遍呈现出明显的减小趋势。国内关于近地面风速变化的研究特

收稿日期：2017-02-20；**修回日期**：2017-05-15
资助项目：国家自然科学基金项目（41575003）
作者简介：卞韬，女，高级工程师，biantao0107@163.com；任国玉（通信作者），男，研究员，guoyoo@cma.gov.cn

www.climatechange.cn

别是早期的分析工作，对于后来提出“全球静稳”概念起到推动作用[8-9]。在国外，Pirazzoli 等[10]通过研究意大利 1951—2000 年的年平均风速变化，发现当地风速在 20 世纪 70 年代之前为上升期，之后风速开始减小。Tuller[11]报告了加拿大西海岸近地面风速长期下降的现象，指出 1950—1999 年期间年平均风速下降速率为 −0.17 (m/s)/10a，后来 Wang 等[12]也注意到加拿大西部和南部的地面风速明显减小。Hobbins 等[13]分析了 1962—1990 年美国本土 48 个州的地面风速资料，发现平均风速下降趋势为 −0.05 (m/s)/10a，Hartmann 等[14]分析美国阿拉斯加地区 1951—2001 年期间资料得到相近似的平均下降速率；McVicar 等[9]还发现 1979—2008 年南北半球中低纬度大部分地区风速减小明显，高纬度地区（纬度＞ 70°）风速在增大；Kousari 等[15]的研究表明伊朗 1975—2005 年整体风速呈上升趋势，仅局部地区风速减小显著。此后，在欧洲、日本、俄罗斯、墨西哥、澳大利亚和印度等许多地区都发现近 30—50 年地面风速明显下降的现象。例如，McVicar 等[16]发现 1975—2006 年澳大利亚全国年平均风速的减小趋势达到 0.09 (m/s)/10a。

在发现近地面平均风速普遍减小的观测事实以后，研究者对大范围风速下降的原因进行了探讨。以中国的研究为例，目前一般认为，近地面风速变化除了受大尺度气候变化影响外，还受到局地尺度城市化和观测环境变化的影响[17-20]。随着城市不断蔓延扩大及农村人口进一步向城市集中，城市化对地面风速变化的影响已引起研究者关注。彭珍等[21]指出，随着北京城市化步伐加快，下垫面粗糙度逐年增加，其阻碍作用增加了地表对空气水平平均动能的消耗，使得近地面风速存在明显的递减趋势。刘学锋等[17]研究表明，台站所在地城市化程度和观测场周围环境改变是风速减小趋势不可忽略的原因；张爱英等[18]通过分析高空不同层次平均风速变化趋势剖面，认为全国平均近地面风速减弱趋势大约 2/3 是由于城市化和观测环境变化引起的；于宏敏等[20]发现，1971—2004 年黑龙江省近地层风速呈显著减弱趋势，城市站减弱趋势较乡村站明显，城市站与乡村站的风速差值有增大趋势，表明城市化对近地面风速下降具有重要影响；Li 等[6]分析评价了北京市城市化因素对近地面风速的影响，发现位于城市内的台站风速下降更明显，1960—2008 年间城市化对风速变化的影响约为 −0.05 (m/s)/10a，说明了总体风速下降趋势的 1/5 左右是由城市化因素造成；陶寅等[22]利用 1981—2010 年安徽省 61 个站的逐日风速资料，结合卫星遥感台站分类法，全面分析了城市化进程对安徽省风速的影响。

石家庄站是一个典型的大陆温带城市气象观测站，过去研究表明，伴随着快速的城市化，其城市热岛强度增加趋势十分显著[23]，不仅对石家庄站地面气温均值变化趋势有显著影响，而且对极端气温事件变化趋势的影响也很明显[24]。但是，城市化对石家庄站近地面风速的长期变化趋势有什么影响，或者影响有多大，目前还不清楚。本文利用石家庄地区城市和周围 4 个乡村气象观测站 1972—2012 年的地面风速数据，对比分析城市站和乡村站地面风速的变化趋势，定量评估石家庄站地面风速序列趋势变化中的城市化影响程度。本文研究结论对于了解我国北方典型城市气象站近地面风速变化特征及其原因，更好地认识不同尺度近地面风速变化的驱动机制和评估风能资源潜力，均具有参考价值。

1 资料和方法

以石家庄气象站代表城市站，附近不同方向的藁城、元氏、平山和新乐 4 个气象站代表乡村站，观测站的基本信息详见表 1。各站月平均地面风速、月平均 10 min 最大风速和月大风日数数据来自河北省信息共享平台，数据时段为 1972—2012 年。考虑到 1969—1970 年有一次仪器更换，另外 10 min 最大风速数据 1971 年之后才有，而且石家庄站在 2013 年 1 月 1 日迁站，因此选取研究时段为 1972—2012 年。2004 年后，石家庄的测风仪器陆续由 EL 电接风型转换为 CAWS600B 自动气象观测，由于仪器测感应器原理不同，可能造成测风数据存在一定的偏差。但对各站与参考序列差值序列的统计检验，未发现明显断点，因此本文未做均一化订正。季节划分为：春季（3—5 月）、夏季（6—8 月）、秋季（9—

www.climatechange.cn

www.climatechange.cn

表 1　城乡气象站基本信息

Table 1　Information of the stations used in the study

站点	经纬度	海拔高度 /m	建站时间 /（年 / 月 / 日）	迁站时间 /（年 / 月 / 日）	建成区人口 / 万
石家庄	114.42°E，38.03°N	81.0	1955/01/01	2013/01/01	270
藁城	114.81°E，38.01°N	53.5	1958/08/01	1969/07, 1999/01	10
元氏	114.53°E，37.75°N	66.4	1960/01/01	1982/02, 1998/01, 2007/01	8
平山	114.02°E，38.25°N	131.0	1959/01/01	1961/09, 1964/01, 2000/01	10
新乐	114.68°E，38.35°N	70.8	1959/03/01	1961/05, 1963/12, 1989/05, 2003/01	10

11 月）、冬季（12 月至次年 2 月），其中 1972 年冬季采用 1971 年 12 月—1972 年 2 月资料。

石家庄气象站在 2012 年 12 月 31 日前未迁过站，观测站位于城市的西部。20 世纪 80 年代初以前，观测站远离城市建成区，周围环境空旷，建筑物很少；1980 年代初以来，石家庄城市化进程加速，观测站附近建筑物逐渐增多，目前已成为一个典型的城市观测站。4 个郊区气象站实际上是小城镇站，为县城所在地，分布在石家庄站东、南、西北和东北 4 个方向，平均海拔高度为 80.4 m，与城市站高度 (81.0 m) 非常接近，距离石家庄市区均在 20 km 以上；人口密度小，城镇人口在 10 万左右，经济发展相对缓慢，城镇化程度较低。这 4 个郊区站观测场周围的探测环境虽然受到一定程度的城镇化影响，但影响较弱，可以作为石家庄地区相对具有代表性的乡村站。这些站曾在以往的城市化影响分析中被当作参考站使用 [23-24]。

采用 4 个乡村站平均风速、平均 10 min 最大风速和大风日数的平均获得乡村站参考序列。采用最小二乘法 [25] 对平均风速、平均 10 min 最大风速和大风日数进行线性趋势拟合，即趋势倾向率，样本数为 41。

城市化是指城市人口和建成区面积不断扩大的过程。这个过程引起城市下垫面热力性质明显改变，人为热释放量和气溶胶含量逐渐增多，对市区及其附近郊区气候产生显著影响。为了定量评价城市化对地面风速变化趋势的影响，参照 Ren 等 [26] 和 Bian 等 [24] 定义如下术语：

(1) 城市化影响：指由于城市热岛效应加强等因素引起的城市附近台站地面风速、10 min 最大风速和大风日数线性趋势的变化，用 ΔX_{ur} 表示。设 X_u 为城市站地面风速（10 min 最大风速或大风日数）的变化趋势，X_r 为乡村站（平均）地面风速（10 min 最大风速或大风日数）的变化趋势，则城市化影响的表达式为：

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

当 $\Delta X_{ur} > 0$ 时，表示城市化影响使地面风速（10 min 最大风速或大风日数）增大或增多；当 $\Delta X_{ur} = 0$ 时，表示城市化影响为 0；当 $\Delta X_{ur} < 0$ 时，表示城市化影响使地面风速（10 min 最大风速或大风日数）减小或减少。地面风速（10 min 最大风速或大风日数）城乡差值序列的线性趋势则为城市化影响的另一种表达形式，在数值上等同于 ΔX_{ur}。

(2) 城市化贡献率：指城市化影响对城市附近台站地面风速（10 min 最大风速或大风日数）趋势变化的百分比贡献，即城市化影响在城市附近台站地面风速（10 min 最大风速或大风日数）趋势变化中所占的比率，用 E_u 表示。表达式为：

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

考虑到使城市化贡献率 $0 \leqslant E_u \leqslant 100\%$，所以取了绝对值。当 $E_u = 0$ 时，表示城市化对城市站地面风速（10 min 最大风速或大风日数）变化趋势没有贡献；当 $E_u = 100\%$ 时，表示城市站地面风速（10 min 最大风速或大风日数）变化完全是由城市化影响造成的。实际计算当中，少数情况下 E_u 可能超过 100%，说明可能存在某种尚未认识到的局地因子影响，这种情况按 100% 处理。本文只对城市化影响

通过了显著性检验的地面风速、10 min 最大风速和大风日数序列给出城市化贡献率。

2 结果分析

2.1 城乡风速的变化趋势

2.1.1 平均风速

图 1 给出了 1972—2012 年石家庄城、乡年平均风速的变化曲线及线性趋势。20 世纪 80 年代末之前，石家庄城市站年平均风速的变化趋势不明显，之后则表现为明显的减小趋势，2003 年达到最低值，仅为 1.0 m/s，之后略有增大，但均小于 1.5 m/s；近 41 年石家庄城市站年平均风速的减小趋势为 −0.15 (m/s)/10a，通过了 0.001 的显著性水平检验（表 2），减小趋势极显著。20 世纪 80 年代中期前，乡村站年平均风速呈减小趋势，之后开始缓慢增大，90 年代中后期的增大趋势较明显，2004 年后再趋向减小；整体上近 41 年石家庄乡村站年平均风速表现为微弱的减小趋势，减小趋势为 −0.02 (m/s)/10a，未通过显著性检验。

2.1.2 10 min 最大风速

从石家庄城、乡年平均 10 min 最大风速的变化曲线及线性趋势（图 2）可以看到，2002 年之前，石家庄城市站年平均 10 min 最大风速的减小趋势并不明显，年平均 10 min 最大风速一般在 9 m/s 以上；之后的减小趋势很明显，年平均 10 min 最大风速一般在 7 m/s 以下，2011 年最小，仅为 5.6 m/s。近 41 年石家庄城市站年平均 10 min 最大风速呈减小趋势，减小趋势为 −1.05 (m/s)/10a，通过了 0.001 的显著性检验（表 2）。20 世纪 90 年代中期前，乡村站年平均 10 min 最大风速的减小趋势不明显，之后表现为增大趋势，但 2005 年之后表现为快速减小趋势，整

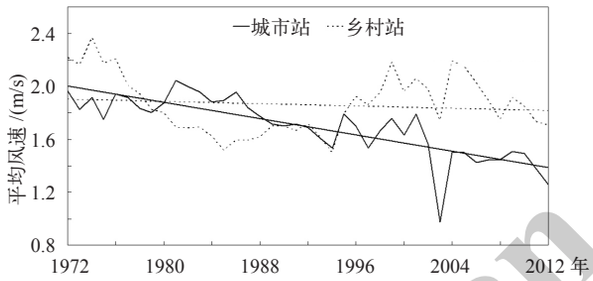

图 1 1972—2012 年石家庄城、乡年平均风速的变化曲线及线性趋势

Fig. 1 Annual mean near-surface wind speed of Shijiazhuang station and the surrounding 4 rural stations during 1972−2012

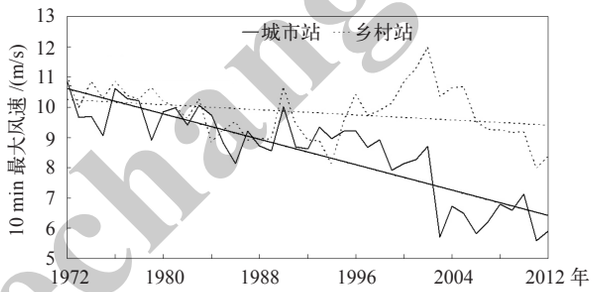

图 2 1972—2012 年石家庄城、乡年平均 10 min 最大风速的变化曲线及线性趋势

Fig. 2 Annual mean near-surface 10 min maximum wind speed of Shijiazhuang station and the surrounding 4 rural stations during 1972−2012

表 2 1972—2012 年石家庄城、乡年和四季平均风速、10 min 最大风速及大风日数的线性趋势

Table 2 Linear trends of annual and seasonal mean near-surface wind speed, 10 min maximum wind speed and gale days of Shijiazhuang station and the surrounding 4 rural stations during 1972−2012

时间	平均风速 /((m/s)/10a)		10 min 最大风速 /((m/s)/10a)		大风日数 /(d/10a)	
	城市站	乡村站	城市站	乡村站	城市站	乡村站
年	−0.15***	−0.02	−1.05***	−0.21	−2.90***	−2.19***
春季	−0.19***	−0.03	−1.04***	−0.10	−0.72**	−0.97***
夏季	−0.12***	−0.01	−1.02***	−0.22	−0.64*	−0.41
秋季	−0.15***	−0.02	−0.92***	−0.32*	−0.71***	−0.51**
冬季	−0.17***	−0.02	−1.27***	−0.27	−0.89***	−0.32*

注：*，** 和 *** 分别表示通过 0.05、0.01 和 0.001 的显著性检验，下划线表示通过 0.1 的显著性检验，下同。

www.climatechange.cn

www.climatechange.cn

体上近 41 年乡村站年平均 10 min 最大风速呈现出减小趋势，减小速率为 −0.21 (m/s)/10a，但仅通过了 0.1 的显著性检验。

2.1.3　大风日数

从图 3 可以看到，20 世纪 70 年代中期到 80 年代初这段时间，石家庄城市站年大风日数呈明显的增多趋势，80 年代中期后开始表现为减少趋势，2002 年之后减少的非常明显，年大风日数都在 3 d 以下，2003 年、2007 年、2011 年和 2012 年甚至全年无大风天出现；近 41 年石家庄城市站年大风日数呈极显著的减少趋势，减少趋势达到 −2.90 d/10a（通过了 0.001 的显著性检验，表 2）。20 世纪 80 年代末之前，乡村站年大风日数减少趋势非常明显，之后到 2005 年大风日数有所增多，2005 年之后又开始减小；近 41 年乡村站年大风日数的减少趋势为 −2.19 d/10a，通过了 0.001 的显著性检验，减少趋势极显著，这与年平均风速微弱的减小趋势明显不同。

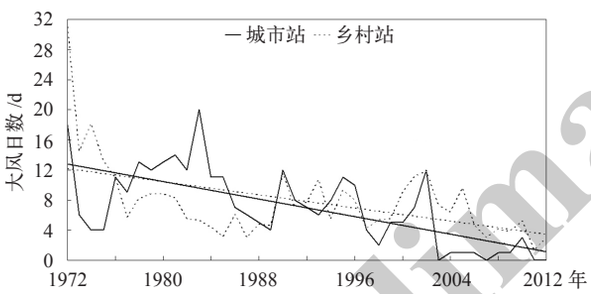

图 3　1972—2012 年石家庄城、乡年大风日数的变化曲线及线性趋势

Fig. 3　Annual gale days of Shijiazhuang station and the surrounding 4 rural stations during 1972−2012

2.2　城市化影响

2.2.1　平均风速

图 4 给出了 1972—2012 年石家庄城、乡年平均风速差值序列的变化曲线及线性趋势。1972—1978 年城、乡年平均风速差值为负值，城市站年平均风速小于乡村站，之后到 1995 年，城、乡差值均为正值，1995 年之后又转为负值，2003 年达到最低值（−0.8 m/s）。20 世纪 80 年代末之前，城、乡差值呈上升趋势，之后表现为持续的下降趋势。整体上近 41 年，石家庄城、乡年平均风速差值以 −0.13 (m/s)/10a 的速率明显下降，趋势通过了 0.01 的显著性检验（表 3），说明石家庄城市站年平均风速减小的城市化影响非常显著；城市化贡献率达到 86.0%，表明石家

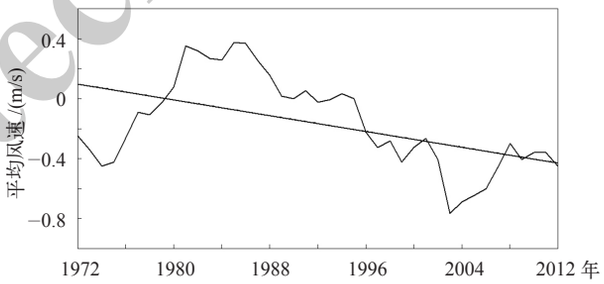

图 4　1972—2012 年石家庄城、乡年平均风速差值序列的变化曲线及线性趋势

Fig. 4　Difference series of annual mean near-surface wind speed between Shijiazhuang station and the surrounding 4 rural stations during 1972−2012

表 3　1972—2012 年石家庄城市站年和四季平均风速、10 min 最大风速及大风日数的城市化影响及其贡献率

Table 3　Urbanization effects and contributions in the annual and seasonal mean near-surface wind speed, 10 min maximum wind speed and gale days at Shijiazhuang station during 1972−2012

时间	平均风速		10 min 最大风速		大风日数	
	城市化影响 /((m/s)/10a)	城市化影响贡献率 /%	城市化影响 /((m/s)/10a)	城市化影响贡献率 /%	城市化影响 /(d/10a)	城市化影响贡献率 /%
年	−0.13**	86.0	−0.84***	79.7	−0.71	/
春季	−0.16***	82.8	−0.94***	90.4	−0.25	/
夏季	−0.10***	87.6	−0.80***	78.6	−0.23	/
秋季	−0.13***	88.6	−0.60***	64.9	−0.20	/
冬季	−0.15***	85.4	−1.01***	79.1	−0.56*	62.9

www.climatechange.cn

庄城市站年平均风速减小趋势主要是由城市化影响造成的。

近 41 年，石家庄城市站春、夏、秋、冬平均风速减小的城市化影响分别为−0.16 (m/s)/10a、−0.10 (m/s)/10a、−0.13 (m/s)/10a 和 −0.15 (m/s)/10a，均通过了 0.001 的显著性检验（表 3），城市化影响极显著，其中春季和冬季的城市化影响相对较强，夏、秋季相对较弱；城市化贡献率分别为 82.8%、87.6%、88.6% 和 85.4%。与年平均风速一致，石家庄四季平均风速减小趋势的主要原因来自城市化影响。

2.2.2 10 min 最大风速

图 5 表明，近 41 年石家庄城、乡年平均 10 min 最大风速差值以负值为主，只有少数几年（1984 年、1987 年、1993 年和 1994 年）为正值，说明城市站年平均 10 min 最大风速一般小于乡村站；20 世纪 90 年代末之前，城、乡年平均 10 min 最大风速差值序列的变化趋势不明显，之后的下降趋势非常明显。近 41 年，石家庄城市站年平均 10 min 最大风速的城市化影响为 −0.84 (m/s)/10a，通过了 0.001 的显著性检验，城市化贡献率为 79.7%（表 3）。

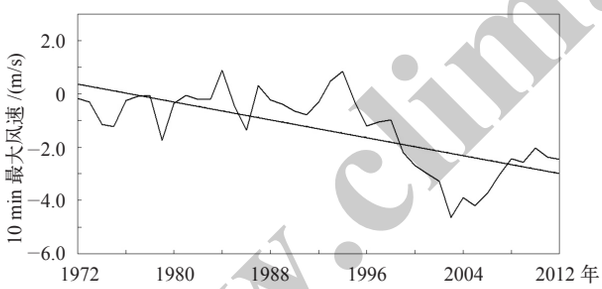

图 5 1972—2012 年石家庄城、乡年平均 10 min 最大风速差值序列的变化曲线及线性趋势

Fig. 5 Difference series of annual mean 10 min maximum wind speed between Shijiazhuang station and the surrounding 4 rural stations during 1972−2012

近 41 年，石家庄城市站春、夏、秋、冬平均 10 min 最大风速变化的城市化影响分别为 −0.94 (m/s)/10a、−0.80 (m/s)/10a、−0.60 (m/s)/10a 和 −1.01 (m/s)/10a，均通过了 0.001 的显著性检验（表 3），其中冬季的城市化影响最强，秋季相对弱些；四季平均城市化贡献率分别为 90.4%、78.6%、64.9% 和 79.1%。

2.2.3 大风日数

从石家庄城、乡年大风日数差值序列的变化曲线及线性趋势（图 6）看，1972—1975 年城、乡年大风日数差值为负，城市站年大风日数少于乡村站；之后到 20 世纪 90 年代中期的较长时间内，城、乡年大风日数差值以正值为主，城市站年大风日数一般多于乡村站；90 年代后期之后城、乡年大风日数差值又以负值为主。近 41 年，石家庄城、乡年大风日数差值序列呈下降趋势，下降趋势为 −0.71 d/10a，未通过显著性检验。

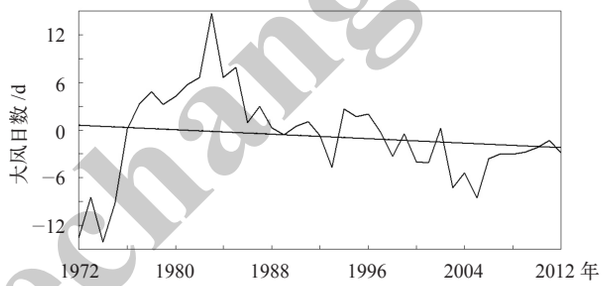

图 6 1972—2012 年石家庄城、乡年大风日数差值序列的变化曲线及线性趋势

Fig. 6 Difference series of annual mean gale days between Shijiazhuang station and the surrounding 4 rural stations during 1972−2012

近 41 年，石家庄城市站四季大风日数减少的城市化影响分别为 −0.25 d/10a、−0.23 d/10a、−0.20 d/10a 和 −0.56 d/10a，其中只有冬季通过 0.05 的显著性检验（表 3），其他三季的城市化影响均不明显。石家庄城市站冬季大风日数减少的城市化贡献率为 62.9%。

3 讨 论

针对全国范围的早期研究表明，自 20 世纪 50 年代中期到 21 世纪初，中国近地面平均风速的减小是非常明显的，大部分线性趋势通过了显著性检验；全国年平均风速的减小趋势为 −0.11 (m/s)/10a，华北地区年平均风速的减小趋势与全国平均变化相近 [1-2]。本文结果表明，石家庄城市站年平均风速呈极显著的减小趋势，减小趋势为 −0.15 (m/s)/10a，比全国和华北地区平均下降速率略大，石家庄城市

www.climatechange.cn

www.climatechange.cn

站四季平均风速减小趋势一般也比全国或华北地区更强（表 4)。但是，石家庄乡村 4 个站年和四季平均风速的减小趋势比全国或华北地区弱，更比附近的石家庄城市站地面风速下降趋势弱得多，没有通过显著性检验。这说明本文所选的 4 个乡村站代表性较高，其观测记录基本上反映了不受周围人工建筑物阻挡情况下的背景风场变化。石家庄城市和乡村站冬、春季平均风速减小，可能与我国寒潮发生频率减小、强度减弱密切相关 [1]，而后者又与全球气候变暖的经向非均质性 [23] 有关。

表 4　石家庄城、乡站 (1972—2012 年) 年平均风速变化趋势与全国、华北地区 (1954—2000 年) 对比 [1]

Table 4　Linear trends of annual mean near-surface wind speed of Shijiazhuang station and the surrounding 4 rural stations during 1972−2012, and the comparison to those of mainland China and North China during 1954−2000 [1]

(m/s)/10a

时间	石家庄城市站	石家庄乡村站	全国	华北地区
年	−0.15	−0.02	−0.11	−0.12
春季	−0.19	−0.03	−0.12	−0.16
夏季	−0.12	−0.01	−0.08	−0.05
秋季	−0.15	−0.02	−0.10	−0.09
冬季	−0.17	−0.02	−0.14	−0.19

一个有趣的现象是，尽管在分析时期石家庄城市站年平均风速和平均 10 min 最大风速呈现出持续性下降，4 个乡村站年平均近地面风速和平均 10 min最大风速的减小趋势却经历了明显年代际波动，表现为在 20 世纪 90 年代中期前为下降趋势，而 20 世纪 90 年代中期以后直至 2003 年前后出现短暂上升趋势，此后发生波动性下降（图 1 和图 2)。乡村站记录的近几十年平均和极端风速的年代际波动，可能和西伯利亚高压强度和温带东亚地区冬季寒潮频率的年代尺度变异性有关，其中 20 世纪 90 年代中期以后直至 2003 年前后的短暂上升趋势对应西伯利亚高压恢复增强和温带东亚地区冬季寒潮频率再次增加 [27-28]。但是，2003 年以后西伯利亚高压和东亚冬季风强度并未减弱 [29]，冬季寒潮发生频率亦未减少，而石家庄周围 4 个乡村站的年和冬季平均风速和平均 10 min 最大风速却转而回落。这个新近下降变化与东亚冬季风年代际变异背景不协调，可能与近 10 年河北省小城镇城市化过程加快，4 个县城气象站周围观测环境变坏有联系。如果这个推论成立，则近 10 余年乡村站平均风速和极端风速的这种明显回落，在一定程度上削弱了对石家庄站城市化影响及其相对贡献的估计值，实际的城市化影响有可能更大。

即使存在参考站代表性问题，本文的分析结论表明，城市化对石家庄城市站年和四季平均风速、平均 10 min 最大风速以及冬季大风日数减小（少）的影响都非常显著，其城市化贡献率也都很高。年平均风速减小的城市化影响为 −0.13 (m/s)/10a，城市化贡献率达到 86%，各个季节平均的城市化贡献率大体一致，介于 82% ~ 89% 之间。这一结果，显然比张爱英等 [18] 根据探空资料推测得到的全国探空站近地面平均风速下降趋势 2/3 是由城市化和观测环境改变引起的估计数值来的大，也比刘学锋等 [17] 针对河北省、于宏敏等 [20] 针对黑龙江省，陶寅等 [22] 针对安徽省，以及 Li 等 [6] 针对北京市分析得到的结果大得多。刘学锋等 [17] 认为，城市化对河北省国家基准、基本站 1975—2004 年地面平均风速减小的影响程度至少达到 25%；于宏敏等 [20] 虽然未给出城市化贡献率，但根据他们的计算结果推测 1971—2004 年两个代表站的城市化贡献率为 19.4%。陶寅等 [22] 的结论是：安徽省 1981—2010 年城市站与乡村站年平均风速趋势系数之差为 −0.10 (m/s)/10a，城市化对年平均风速减弱的贡献率为 40%。同前人研究结果比较，石家庄城市站年和季节平均风速减小的城市化影响更强，主要与 20 世纪 90 年代以来的 20 多年该站处于特大城市建成区内，以及石家庄快速的城市化过程有关，可能在一定程度上也和不同研究所选区域、资料时段和乡村站不同有关。

本文分析还发现，石家庄站年和四季平均 10 min 最大风速以及冬季大风日数减小（少）的城市化贡献率也在 62.0% 以上，最高达到 90.4%。但是，石家庄站除冬季外其他季节平均大风日数的显著减小趋势中，尽管城市化影响也是负值，然而却不明显，说明春、夏、秋季平均大风日数的显著减少更主要是由大尺度环流场变化造成的，也可能和所选

www.climatechange.cn

乡村站多位于县城北部，或者乡村站观测场南部附近具有人工障碍物，在暖季偏南风情况下，与石家庄城市站一样感受到了城市化影响有关。但是，这个问题还需要开展进一步调查分析。

本文选取的乡村站应该为目前所获得的比较有代表性的参考站，但由于这些站都在小城镇附近，其近地面风速观测记录可能在一定程度上仍受到城市化影响。因此，本文给出的城市化对石家庄站地面风速序列趋势的影响，应看作为最低估计值，在大风日数序列中城市化影响和贡献率的估算中，这个问题可能更为突出。尽管如此，本文的分析结果清楚表明，城市发展导致下垫面改变，对石家庄站近地面风速减小产生了十分显著的影响。

4 结 论

利用 1972—2012 年石家庄城市站和 4 个乡村站地面风速资料，采用城、乡对比方法，对石家庄城市站地面风速序列中的城市化影响进行了全面分析，得到以下结论。

(1) 石家庄城市站的年和春、夏、秋、冬季平均风速均呈极显著的减小趋势，下降速率分别为 −0.15 (m/s)/10a、−0.19 (m/s)/10a、−0.12 (m/s)/10a、−0.15 (m/s)/10a 和 −0.17 (m/s)/10a，其中春季的减小趋势最强，夏季的减小趋势相对最弱；乡村站年和四季平均风速均呈微弱的减小趋势。

(2) 石家庄城市站的年和春、夏、秋、冬季平均 10 min 最大风速均呈极显著的减小趋势，减小速率分别为 −1.05 (m/s)/10a、−1.04 (m/s)/10a、−1.02 (m/s)/10a、−0.92 (m/s)/10a 和 −1.27 (m/s)/10a，其中冬季的减小趋势最强，秋季的减小趋势相对最弱。乡村站年平均 10 min 最大风速的减小趋势仅通过了 0.1 的显著性检验，且四季中只有秋季平均 10 min 最大风速减小趋势显著。

(3) 石家庄城、乡站年大风日数均呈极显著的减少趋势，下降速率分别为 −2.90 d/10a 和 −2.19 d/10a。城市站四季大风日数均表现为显著的减少趋势，其中冬季的减少趋势最强，夏季的减少趋势相对较弱；乡村站夏季以外的季节减少趋势显著或非常显著，夏季较为显著。

(4) 石家庄城市站年平均风速减小的城市化影响为 −0.13 (m/s)/10a，城市化影响非常显著，城市化贡献率达到 86.0%，表明该站年平均风速减小趋势主要是由城市化影响造成的。城市站四季平均风速减小的城市化影响均达到极显著水平，城市化贡献率在 82% 到 89% 之间。

(5) 石家庄城市站年平均 10 min 最大风速减小的城市化影响为 −0.84 (m/s)/10a，城市化影响非常明显，城市化贡献率为 79.7%。春、夏、秋、冬平均 10 min 最大风速减小的城市化影响分别为 −0.94 (m/s)/10a、−0.80 (m/s)/10a、−0.60 (m/s)/10a 和 −1.01 (m/s)/10a，均达到极显著水平，城市化贡献率在 65% 到 91% 之间。

(6) 石家庄城市站年大风日数减少的城市化影响不明显，但冬季大风日数减少的城市化影响仍然显著，城市化贡献率为 62.9%。

因此，在 1972—2012 年期间，石家庄城市站年和季节平均地面风速和平均 10 min 最大风速的长期显著下降趋势，主要是由于此期间快速城市化过程引起的。同期冬季大风日数的明显减少趋势，也主要和城市化因素有关。■

参考文献

[1] 王遵娅 , 丁一汇 , 何金海 , 等 . 近 50 年来中国气候变化特征的再分析 [J]. 气象学报 , 2004, 62 (2): 228-236

[2] 任国玉 , 郭军 , 徐铭志 , 等 . 近 50 年中国地面气温变化基本特征 [J]. 气象学报 , 2005, 63 (6): 942-956

[3] Xu M, Chang C P, Fu C B. Steady decline of east Asian monsoon winds, 1969−2000: evidence from direct ground measurements of wind speed [J]. Journal of Geophysical Research, 2006, 111: 1-8

[4] 荣艳淑 , 梁嘉颖 . 华北地区风速变化的分析 [J]. 气象科学 , 2008, 28 (6): 655-658

[5] Jiang Y, Luo Y, Zhao Z, *et al*. Changes in wind speed over China during 1956−2004 [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2010, 99: 421-430

[6] Li Z, Yan Z W, Tu K, *et al*. Changes in wind speed and extremes in Beijing during 1960–2008 based on homogenized observations [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2011, 28 (2): 408-420

[7] 金巍 , 任国玉 , 曲岩 , 等 . 1971−2010 东北三省地面平均风速变化 [J]. 干旱区研究 , 2012, 29 (4): 648-653

www.climatechange.cn

www.climatechange.cn

[8] Vautard R, Cattiaux J, Yiou P, *et al*. Northern Hemisphere atmospheric stilling partly attributed to an increase in surface roughness [J]. Nature Geoscience, 2010, 3: 756-761

[9] McVicar T R, Roderick M L. Atmospheric science: winds of change [J]. Nature Geoscience, 2010, 3 (11): 747-748

[10] Pirazzoli P A, Tomasin A. Recent near-surface wind changes in the central Mediterranean and Adriatic areas [J]. International Journal of Climatology, 2003, 23 (8): 963-973

[11] Tuller S E. Measured wind speed trends on the west coast of Canada [J]. International Journal of Climatology, 2004, 24 (11): 1359-1374

[12] Wang H, Wang H L, Swail V R. Homogenization and trend analysis of Canadian near-surface wind speeds [J]. Journal of Climate, 2010, 23 (5): 1209-1225

[13] Hobbins M T, Ramírez J A, Brown T C. Trends in pan evaporation and actual evapotranspiration across the conterminous US: paradoxical or complementary? [J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31 (13), L13503

[14] Hartmann B, Wendler G. The significance of the 1976 Pacific climate shift in the climatology of Alaska [J]. Journal of Climate, 2005, 18 (22): 4824-4839

[15] Kousari M R, Ahani H, Hakimelahi H. An investigation of near surface wind speed tends in arid and semiarid regions of Iran [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2013, 114 (1−2): 153-168

[16] McVicar T R, Niel T G V, Li L T, *et al*. Wind speed climatology and trends for Australia, 1975−2006: capturing the stilling phenomenon and comparison with near-surface reanalysis output [J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35 (20): 288-299

[17] 刘学锋 , 江滢 , 任国玉 , 等 . 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 , 2009, 28 (2): 433-439

[18] 张爱英 , 任国玉 , 郭军 , 等 . 1980—2006 年我国高空风速变化趋势分析 [J]. 高原气象 , 2009, 28 (3): 680-687

[19] 赵宗慈 , 罗勇 , 江滢 . 全球大风在减少吗 [J]. 气候变化研究进展 , 2011, 7 (2): 149-151

[20] 于宏敏 , 徐永清 , 张洪玲 . 黑龙江省的城市化对近地面风速变化的影响 [J]. 太阳能学报 , 2014, 35 (9): 1797-1802

[21] 彭珍 , 胡非 . 北京城市化进程对边界层风场结构影响的研究 [J]. 地球物理学报 , 2006, 49 (6): 729-732

[22] 陶寅 , 黄勇 , 杨元建 , 等 . 城市化进程对安徽省风速的影响 [J]. 气候变化研究进展 , 2016, 12 (6): 519-526

[23] 卞韬 , 任国玉 , 张翠华 , 等 . 石家庄气象站记录的城市热岛效应及其趋势变化 [J]. 南京信息工程大学学报 : 自然科学版 , 2012, 4 (5): 402-408

[24] Bian T, Ren G Y, Zhang B X, *et al*. Urbanization effect on long-term trends of extreme temperature indices at Shijiazhuang station, North China [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2015, 119 (3−4): 407-418

[25] 魏凤英 . 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 北京 : 气象出版社 , 2007: 36-41

[26] 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, 2014, 27 (6): 2340-2360

[27] Gong D Y , Ho C H. The Siberian High and climate change over middle to high latitude Asia [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2002, 72: 1-9

[28] Jeong J H, Ou T, Linderholm H W, *et al*. Recent recovery of the Siberian High intensity [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2011, 116: 1-9

[29] Ding Y H, Liu Y J, Liang S J, *et al*. Interdecadal variability of the East Asian winter monsoon and its possible links to global climate change [J]. Journal of Meteorological Research, 2014, 28 (5): 693-713

www.climatechange.cn

Significant urbanization effect on decline of near-surface wind speed at Shijiazhuang station

BIAN Tao [1, 2], REN Guo-Yu [2, 3], ZHANG Li-Xia[1]

1 *Shijiazhuang Meteorological Bureau, Shijiazhuang* 050081*, China*; 2 *Department of Atmospheric Science, School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China*; 3 *Laboratory for Climate Studies of China Meteorological Administration, National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing* 100081*, China*

Abstract: Based on data of the surface wind speed at Shijiazhuang city meteorological station (simplified as Shijiazhuang station) and four rural meteorological stations during 1972−2012, urbanization effect on the surface wind speed series at Shijiazhuang station was analyzed using an urban−rural difference method. The results showed that: (1) In 1972−2012, there were very significant decreased trends on annual and seasonal mean wind speeds, mean maximum wind speeds of 10 min and gale days at Shijiazhuang station, and the annual mean decreased trends were −0.15 (m/s)/10a, −1.05 (m/s)/10a and −2.90 d/10a respectively. Annual mean wind speed of rural stations showed weakly decreased trend, the decreased trend on annual mean maximum wind speed of 10 min was more obvious, and the decreased trend on annual gale days was very significant. The decreased trends on annual mean wind speed, annual mean maximum wind speed of 10 min and annual gale days at rural stations were −0.02 (m/s)/10a, −0.21 (m/s)/10a, and 2.19 d/10a, respectively; (2) In the study period, urbanization effect on the annual mean wind speed at Shijiazhuang station was −0.13 (m/s)/10a, which was very significant, and the urbanization contribution reached 86.0%, indicating that the urbanization effect is large and significant. Urbanization effect on the mean wind speeds of the urban station in spring, summer, autumn and winter were −0.16 (m/s)/10a, −0.10 (m/s)/10a, −0.13 (m/s)/10a and −0.15 (m/s)/10a respectively, and the urbanization contributions were 82.8%, 87.6%, 88.6% and 85.4%, respectively; (3) Urbanization effect on the annual mean maximum wind speed of 10 min at the urban station was −0.84 (m/s)/10a, and the urbanization contribution was 79.7%. Urbanization effects on the seasonal mean maximum wind speed of 10 min were −0.94 (m/s)/10a, −0.80 (m/s)/10a, −0.60 (m/s)/10a and −1.01 (m/s)/10a, respectively for spring, summer, autumn and winter, with the urbanization contributions of 90.4%, 78.6%, 64.9% and 79.1%, respectively; (4) Urbanization effect on the annual gale days at Shijiazhuang station was not significant, but the urbanization effect on the winter gale days was large and significant.

Keywords: Surface wind speed; Trend; Urbanization effect; Urbanization contribution; Shijiazhuang

www.climatechange.cn