

马艳,郭飞燕,郭丽娜,等.基于1899—2015年观测资料的青岛风环境变化特征[J].海洋气象学报,2018,38(3):67-74.
Ma Yan, Guo Feiyan, Guo Lina, et al. Characteristics of wind speed changes in Qingdao based on observation data from 1899 to 2015[J].Journal of Marine Meteorology,2018,38(3):67-74. DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2018.03.008.(in Chinese)

基于1899—2015年观测资料的青岛风环境变化特征

马艳^{1,2},郭飞燕²,郭丽娜²,黄容²,毕玮²,张凯静²

(1. 青岛市气象灾害防御工程技术研究中心,山东 青岛 266003; 2. 青岛市气象局,山东 青岛 266003)

摘要: 基于青岛站1899—2015年117 a年平均风速和青岛市88个自动站1961—2015年逐日风速资料,结合NCEP/NCAR再分析资料,分析青岛风速气候变化特征。结果表明:在全球气候变化背景下,青岛站的风速变化是一个先增强(1899—1938年),再波动维持(1939—1991年),之后又减小(1992—2015年)的过程;20世纪90年代后的风速变化对1961—2015年青岛站风速明显下降($0.41 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}/(10 \text{ a})$)贡献显著;1961—2015年青岛偏北风减小趋势为 $0.33 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}/(10 \text{ a})$;青岛东南沿海地区平均风速减小趋势大于北部内陆地区的分布特征是对青岛城市化发展水平区域差异的响应,城市化对地面年平均风速减弱贡献率约为-17.3%。

关键词: 风速变化;青岛;气候变化;城市化

中图分类号: P467 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2018)03-0067-08

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2018.03.008

Characteristics of wind speed changes in Qingdao based on observation data from 1899 to 2015

MA Yan^{1,2}, GUO Feiyan², GUO Lina², HUANG Rong², BI Wei², ZHANG Kaijing²

(1. Qingdao Engineering Technology Research Center for Meteorological Disaster Prevention, Qingdao 266003, China;
2. Qingdao Meteorological Bureau, Qingdao 266003, China)

Abstract The wind speed changes in Qingdao are analyzed on the basis of annual average wind speed data from Qingdao Station from 1899 to 2015 and daily wind speed data from 88 automatic stations in Qingdao from 1961 to 2015 together with NCEP/NCAR re-analyses. The results show that in the context of global climate change, the wind speed changes at Qingdao Station were reinforced from 1899 to 1938, sustained with fluctuations from 1939 to 1991, and diminished from 1992 to 2015. The wind speed changes since 1990s did significant contribution to the wind speed downtrend at Qingdao Station from 1961 to 2015, approximately by $0.41 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ per decade. Moreover, the northerly wind decreased approximately by $0.33 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ per decade from 1961 to 2015. The wind speed downtrend in the southeastern coastal areas of Qingdao is greater than that in the northern inland areas, which responds to the regional difference of urbanization in Qingdao. The urbanization contributes to the weakened surface annual average wind speed at -17.3%.

Key words wind speed changes; Qingdao; climate change; urbanization

收稿日期:2017-12-14; 修订日期:2018-01-30

基金项目:青岛市气象局局校合作科研课题(2015qdxh02);山东省气象局科研项目(2015sdqxm08)

作者简介:马艳,女,研究员,主要从事海洋气象学研究,qdyanma@163.com。

引言

近年来,我国中东部地区大气污染加剧,大范围霾事件急剧增多,严重影响人们的生活和健康。在污染源相对稳定的时间内,城市大气污染的程度主要取决于大气自身的扩散条件^[1]。风速是反映大气扩散条件的要素之一。全球气候正经历着一场以变暖为主要特征的变化过程^[2-3],近50 a 中国几乎全部地区的风速都在显著减小,冬、春季和西北西部最明显,风速大幅减小主要是由于亚洲冬、夏季风的减弱^[4-6]。Jiang et al.^[7-8]基于1956—2014年风速观测资料,指出在中国大部分区域平均风速、大风日和最大风速呈现下降趋势,全球变暖是风速下降的主要背景。由于区域内本身自然影响因素的特殊性,在风速呈减弱趋势的共性下,各区域的气候变化又各具特点^[9-13]。Li et al.^[14]分析北京市1960—2008年12个气象观测站资料,发现北京市冬季风速下降幅度最大。张人禾等^[15]指出2013年1月东亚冬季风异常偏弱,在中国东部区域表面风速的减弱和水平风垂直梯度的减小为2013年1月中国东部持续性雾霾天气的维持和发展提供了有利的气象条件。谭成好等^[16]研究表明,近50 a 来华中地区霾日增加受人为污染物排放增多和东亚季风减弱的共同影响。而冷空气到达北京上空后对下层的影响减弱,3级以上偏北风频率减少是1980—2015年北京地区大气污染扩散条件变化特征^[17]。20世纪90年代前,中国霾日数与盛行风速呈显著负相关^[18]。

青岛是我国北方重要沿海城市,其城市的发展从清末开始。进入21世纪,随着西海岸建设经济重心的实施,城镇范围逐步扩大,2006—2011年青岛城乡、工矿、居民用地增幅达20.68%^[19]。人类生产和生活极大地改变了城市大气的热力和动力状况,青岛局地气候特征发生了变化,空气污染问题也频频出现^[20-21]。再者,青岛为中国最早开创和发展气象科技的三大城市(香港、上海、青岛)之一。1898年3月青岛建立了气象机构,1899年有了气象记录,虽然气象观测工作在1914年6月—1915年3月、1937年9月—1938年1月两次间断,仍具有长资料序列的优势。本文基于1899—2015年百年尺度风观测资料,开展青岛风环境变化特征分析,对了解全球气候变化和城市化进程背景下,以青岛为代表的北方沿海城市风速气候特征具有科学意义,也为青岛生态宜居城市建设提供科学依据。

1 资料与方法

青岛站(54857)现为国家基本气象站,1899—1960年其观测地址位于青岛市观象山,1961年之后迁至现址青岛市伏龙山,两站相距仅700 m,观测场高度相差不到1 m,观测环境基本一致。本文以1899—2015年的青岛站年平均风速为基础,使用趋势分析等方法研究青岛风速百年气候变化特征;进一步分析1961—2015年青岛市88个地面气象站逐日风速和风向资料,结合水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 的NCEP/NCAR再分析资料,揭示在全球变暖的气候背景下以及不同城市发展阶段情形下,青岛市近55 a来风环境的空间差异性。其中,青岛、崂山、胶南、即墨、胶州、平度和莱西站是青岛市7个国家级地面气象观测站。

2 青岛站平均风速对全球气候变化的响应

1899—2015年青岛站117 a年平均风速变化曲线如图1所示。由于观测资料在1914、1915、1937和1938年的部分月份有缺失,考虑资料的连续性,本文阶段性地分析青岛风速变化特征。首先,1899—1913年青岛年平均风速为 $3.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,风速呈现增大趋势,增长速率为 $0.12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}/(10 \text{ a})$ 。在观测资料恢复的1916年后青岛年平均风速继续增强,1925年年平均风速达 $5.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,之后基本保持平稳;1916—1936年的21 a间,平均风速为 $5.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,风速增长速率为 $0.13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}/(10 \text{ a})$ 。

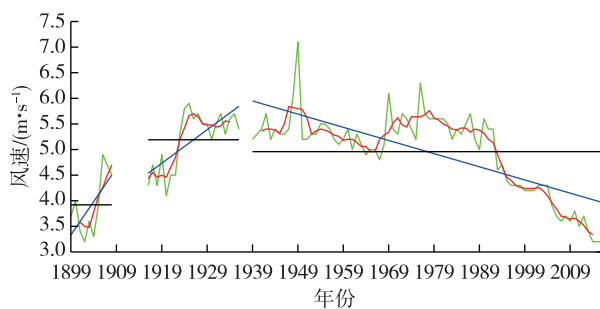


图1 1899—2015年青岛站的平均风速(绿色曲线;单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)及其5 a滑动平均时间序列(红色曲线;单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)、气候态平均(黑色直线)和变化趋势(蓝色直线)

Fig.1 Average wind speed (green curve), time series of running mean in five years (red curve), climate mean state (black straight line), and change trend (blue straight line) from Qingdao Station from 1899 to 2015 (units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

从 1939—2015 年共有 77 a 连续的风观测资料,其平均风速为 $5.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,风速减小速率为 $0.25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}/(10 \text{ a})$,这 77 a 的风速减小速率不但远大于前两个阶段风速的增长速率,而且还远大于全国 50 a 来的风速减小速率 ($0.12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}/(10 \text{ a})$)^[7]。在这 77 a 间,1939—1992 年风速变化较为平缓,从 5 a 滑动平均来看,振荡幅度在 $0.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内。1949 年年平均风速高达 $7.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,是有史以来风速最大的一年。由风速的 MK 检验图(图 2)可以看到,UF 指数在 1939—1955 年少变,该时段的线性趋势也显示风速变化较小,风速增长速率仅为 $0.12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}/(10 \text{ a})$ 。UF 指数在 1956—1967 年表现为下降趋势,对应风速时间序列也呈减小趋势,风速减小速率为 $0.36 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}/(10 \text{ a})$ 。从 1968 年开始风速呈增加趋势,其中 1968—1982 年风速保持小幅变化,10 a 风速仅增加 $0.09 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,1983—1991 年平均风速要比上一阶段有所减小,风速的变化仍很平缓。但从 1992 年开始 UF 指数迅速降低,且在 2005 年左右风速明显减弱,风速减弱速率为 $0.65 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}/(10 \text{ a})$,是 117 a 间风速减弱最强的阶段;年平均风速从 1992 年的 $5.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 下降到 2015 年的 $3.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,远远低于气候态平均水平。

青岛站 1899—2015 年年平均风速的季节变化如图 3 所示。青岛四季的风速在 117 a 里也大致呈现为先增强(1899—1938 年)、再波动维持(1939—1991 年)、又急剧减小的趋势(1992—2015 年),具

有和年平均风速相似的变化趋势。但各个季节在不同时期平均风速具有不同的变化特征。譬如,1939—2015 年 77 a 春、夏、秋、冬四个季节风速减小趋势分别为 $0.21 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}/(10 \text{ a})$ 、 $0.35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}/(10 \text{ a})$ 、 $0.19 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}/(10 \text{ a})$ 、 $0.23 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}/(10 \text{ a})$,夏季是风速减小趋势最明显的季节;而 1961—2015 年 55 a 中春、夏、秋、冬四季的风速减小趋势则分别为 $0.34 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}/(10 \text{ a})$ 、 $0.33 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}/(10 \text{ a})$ 、 $0.44 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}/(10 \text{ a})$ 、 $0.48 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}/(10 \text{ a})$,冬季风速的减小趋势最显著,均通过了 99% 的信度检验。近 55 a 的风速减弱趋势明显高于近 77 a 的,尤其在冬季,前者是后者两倍多,20 世纪 90 年代后风速的显著减小是主要贡献者。本文将在后文中重点分析 1961—2015 年青岛风速变化原因。

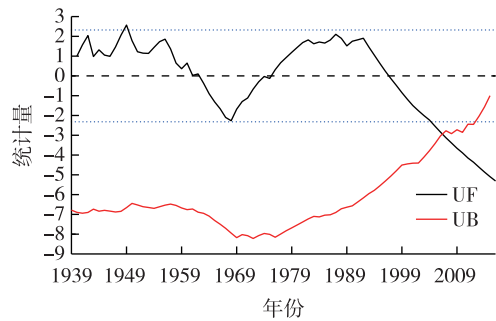


图 2 1939—2015 年青岛站年平均风速的 Mann-Kendall 突变分析

Fig.2 Abrupt change analysis of annual average wind speed from Qingdao Station from 1939 to 2015 using Mann-Kendall test

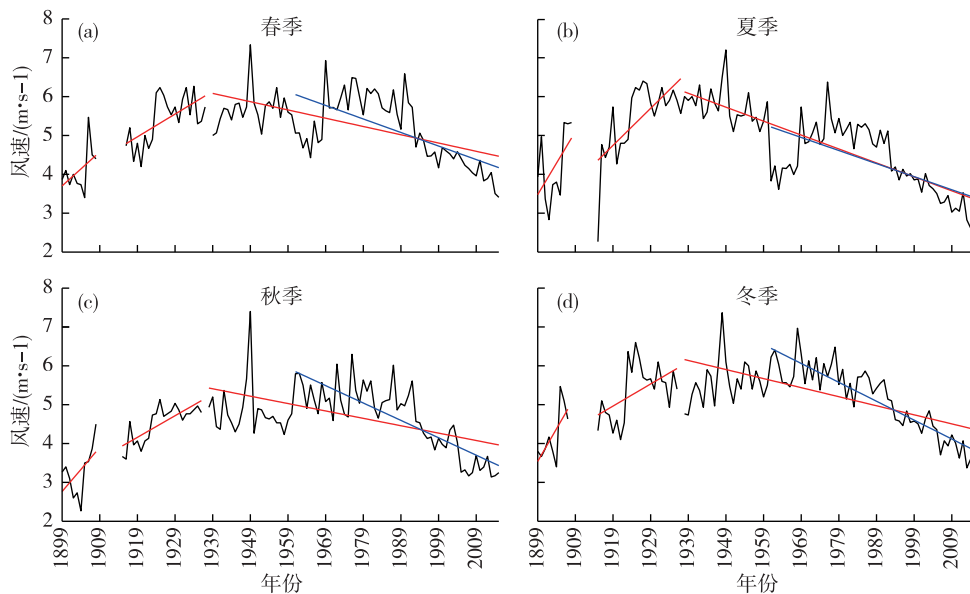


图 3 1899—2015 年青岛站春(a)、夏(b)、秋(c)、冬(d)各季平均风速(黑线;单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)及 1961—2015 年风速变化趋势(蓝线;单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig.3 Seasonal average wind speed (black line; a. spring, b. summer, c. autumn, d. winter) from Qingdao Station from 1899 to 2015 and change trend of wind speed (blue line) from 1961 to 2015 (units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

3 全球气候变化背景下 1961—2015 年青岛大尺度环流背景特征

利用 NCEP/NCAR $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料,分析 1961—2015 年冬季(12、1、2月)和夏季(6、7、8月)地面平均风场和 500 hPa 平均高度场(图略)。整体来说,地面风场上,冬季欧亚大陆为反气旋环流,中国大陆为高压控制,山东半岛地区多为风速低于 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的弱西北流场;夏季在山东半岛主要是弱的东南流场影响。在 500 hPa 位势高度场上,中国冬季都是较为平直的纬向环流,冷空气影响势力偏北偏东;夏季,西北太平洋副热带高压整体偏东。

分析表明,21 世纪最初 10 年之后青岛站平均风速呈现为明显的减小趋势(图 1)。本文对比分析了 2006—2015 年近 10 a 和 1961—2015 年共计 55 a

夏季和冬季 500 hPa 位势高度场和地面风速值的差异,如图 4 和图 5 所示。冬、夏两季在我国中东部范围内均表现为位势高度正距平,东亚大槽偏弱,西北太平洋副热带高压呈现为偏强特点。Qu et al.^[22] 指出加强的西北太平洋副热带高压,伴随着充沛的暖湿空气,与包括山东在内的中国东部低能见度现象呈显著负相关。 $45 \sim 55^\circ \text{N}$ 东西带是冷空气影响山东半岛的上游地区,500 hPa 位势高度差在冬季和夏季表现为相反的变化特征:冬季为偏差小值区,夏季为偏差大值区。近 10 a 来自北方的冷空气强度趋于减弱,向南的渗透影响能力也趋于减弱,减弱强度夏季强于冬季,但显著性检验表明这种差异不显著。Qu et al.^[23] 定量分析指出 1973—2012 年中国东部冷空气强度每 10 a 减小 $0.15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,冷空气发生频率在 40 a 间减小了 18%。

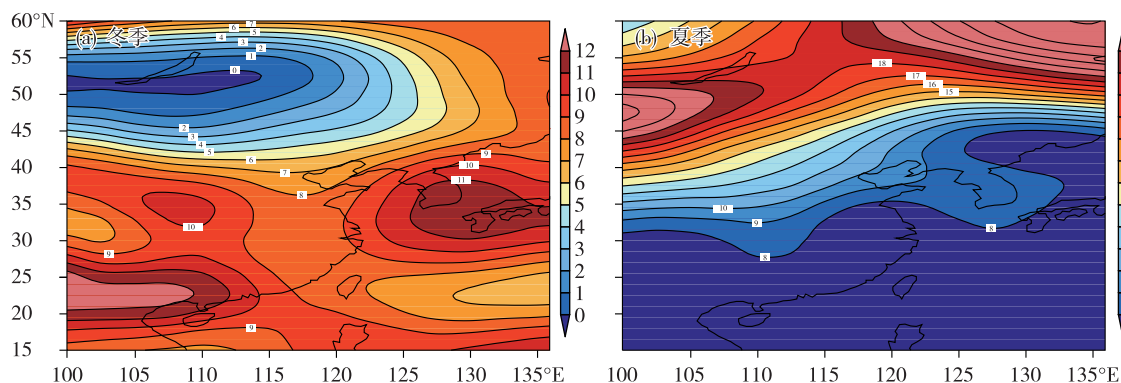


图 4 2006—2015 年与 1961—2015 年冬季(a)和夏季(b)500 hPa 平均位势高度差(单位:gpm)

Fig.4 Average geopotential height difference (units: gpm) at 500 hPa between the year from 2006 to 2015 and the year from 1961 to 2015 in winter (a) and in summer (b)

与近 10 a 影响我国中东部冷空气强度减小相对应的是,我国中东部夏季地面风速近 10 a 也表现为减小的分布特征,风速增大的区域主要出现在东

南沿海(图 5)。冬季,地面风速存在明显的空间差异:($30 \sim 50^\circ \text{N}$, $110 \sim 117^\circ \text{E}$)为风速的正距平区,而在我国东海、黄海到渤海及其沿海地区皆表现为负

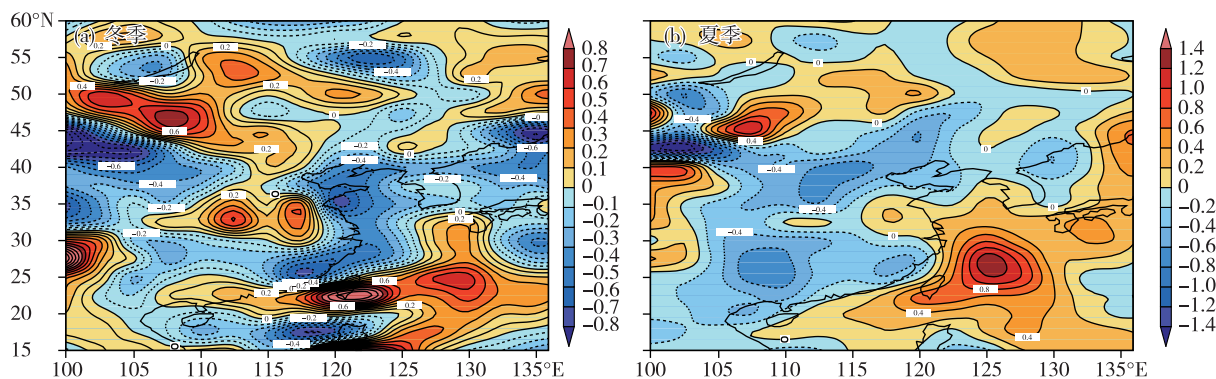


图 5 2006—2015 年与 1961—2015 年冬季(a)和夏季(b)地面平均风速差(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig.5 Average surface wind speed difference (units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) between the year from 2006 to 2015 and the year from 1961 to 2015 in winter (a) and in summer (b)

的风速距平带,并且在山东半岛南部存在着一个负距平大值区。近 10 a 山东半岛冬季地面风速的减小是明显的,且地面风速差异通过了 0.001 的显著性检验。研究^[24]表明,亚洲夏季风自 20 世纪 70 年代末就开始变弱。Jiang et al.^[7]基于 1956—2004 年观测资料分析也指出东亚大槽趋于向北向东调整,强度有所减弱,并且冬季风和夏季风强度均呈减小特点。

4 青岛局地风场对城市化进程的响应

青岛市辖管 6 个市辖区(市南、市北、李沧、崂山、黄岛、城阳),代管 4 个县级市(即墨、胶州、平度、莱西)。在全球气候变化背景下,青岛市不同地区风速变化呈现出局地性变化特征。由 1961—2015 年青岛市年平均风速变化趋势系数分布(图 6)可以看到,东南沿海地区风速减小趋势较大,北部内陆地区相对较小,其中沿海青岛站年平均风速减小趋势最大($0.41 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}/(10 \text{ a})$),内陆平度站最小($0.16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}/(10 \text{ a})$)。在相同的气候背景下,这是局地风场对近年来青岛市自南向北推进城市化的响应。周雅清和任国玉^[25]指出城市化对华北地区平均气温和平均最低气温增温明显,而陶寅等^[26]指出城市化对安徽省年平均风速有很显著的减弱作用。青岛地区近几十年发展迅速,尤其在南部沿海地区城市化进程显著,势必会对青岛当地的气象要素造成影响。本文以青岛站为城市站,崂山、胶南、即墨、胶州、平度和莱西站为乡村站,考察城市化对地面风速的影响。城市化贡献率的计算

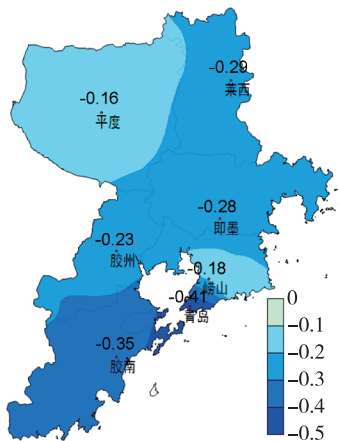


图 6 青岛市 1961—2015 年平均风速变化趋势系数(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}/(10 \text{ a})$)

Fig.6 Coefficients of annual average wind speed change trend in Qingdao from 1961 to 2015 (units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}/(10 \text{ a})$)

方法如下:

$$E_u = \frac{T_u - T_r}{|T_u|} \times 100\% \quad (1)$$

其中, E_u 为城市化贡献率,反映了城市化影响在城市附近台站相对风速趋势变化中所占的比率; T_u 和 T_r 分别为青岛站和其他 6 个台站相对风速的变化趋势系数。若城市化贡献率为正值则表明城市化对风速起到增加贡献,若为负值则表明城市化对风速起到减弱贡献^[26]。

如表 1 和表 2 所示,青岛站和崂山站之间变化趋势系数差达到了 $-0.234 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}/(10 \text{ a})$,相对于崂山站,青岛站对年平均风速造成减弱贡献率为 -46.5% 。而相对于胶南站,城市化对平均风速起到了增强的贡献,青岛站城市化影响为 14.5% ,青岛站和胶南站之间变化趋势系数差为 $0.073 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}/(10 \text{ a})$ 。这是因为胶南站位于青岛西海岸,城市发展起步早,与城市参考站青岛站差距较小,城乡差别近于消失,胶南站也已发展为一个城市站。改革开放初期青岛城市发展主要集中在东海岸的老城区和黄岛地区,1992 年青岛市东部大开发,实现城市中心东移,2001 年建设西海岸经济新区,青岛经济重心西移,青岛市城镇范围逐步扩大。按照 1993 年民政部撤县设市标准^[27],截至 1998 年,莱西和即墨市区人口规模小,城市化水平低。表 2 表明相对于即墨站和莱西站,青岛站城市化影响并不明显。城市化对风速贡献率的大小反映了青岛各区市城市化水平的高低和发展步伐。就季节而言,相对于崂山和胶州站,平均风速在冬季受城市化影响较大,与崂山、莱西站比较,城市化在夏季影响较大;而即墨站,在冬季城市化对平均风速造成了减弱影响,在夏季则是增加的贡献。城市化对平均风速贡献率的季节差异反映了青岛作为一个北方沿海城市观测站点处下垫面组成和性质的季节差异。整体来说,城市化使地面年平均风速减小,城市化贡献率约为 -17.3% 。

表 1 青岛市 1961—2015 年各站相对风速的变化趋势系数
Table 1 Coefficients of relative wind speed change trend at stations in Qingdao from 1961 to 2015
($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}/(10 \text{ a})$)

	青岛	崂山	胶南	胶州	即墨	莱西	平度
冬季	-0.553	-0.267	-0.556	-0.291	-0.468	-0.481	-0.380
夏季	-0.401	-0.257	-0.460	-0.299	-0.460	-0.394	-0.281
全年	-0.503	-0.269	-0.576	-0.299	-0.497	-0.498	-0.357

表2 青岛站的城市化贡献率(相对于各广义乡村站)

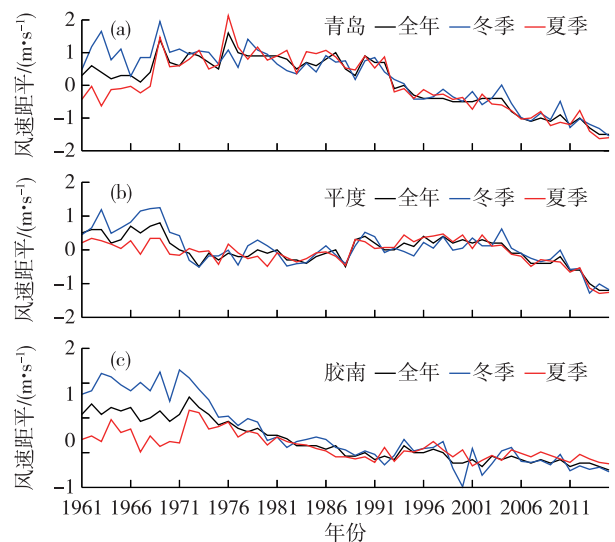
Table 2 Contribution rate of urbanization at Qingdao Station (relative to stations in the countryside in a broad sense) %

	崂山	胶南	胶州	即墨	莱西	平度
冬季	-51.7	0.5	-47.4	-15.4	-13.2	-30.6
夏季	-35.9	14.7	-25.4	14.7	-39.4	-29.9
全年	-46.5	14.5	-40.6	-1.2	-1.0	-29.0

图7为青岛站、平度站和胶南站1961—2015年平均风速距平年变化曲线,其中1981—2010年的年平均风速为气候态风速值。1961—2015年青岛、平度、胶州三站全年、冬季和夏季的平均风速均通过99%的线性趋势检验。在20世纪60年代和70年代,青岛站年平均风速呈现维持增长态势,之后持续下降,1991—2000年平均风速下降显著,下降率每年达到了 $0.15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;2001—2015年平均风速为 $3.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,平均风速下降率有所减缓,下降率为 $0.72 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}/(10 \text{ a})$ 。平度站年平均风速表现为阶段性的增长和下降,但整体呈现为下降的趋势,下降率为 $0.16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}/(10 \text{ a})$ 。其中,20世纪60—90年代平度站年平均风速都呈现为增长趋势,20世纪80年代年平均风速增长率达到了 $0.36 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}/(10 \text{ a})$ 。2001—2015年,平均风速又转为快速下降趋势。值得注意的是,在20世纪80年代和90年代,内陆平度站具有和沿海青岛站相反的风速变化趋势;2001—2015年间,平度站的年平均风速减小率($1.02 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}/(10 \text{ a})$)远大于青岛站的风速减小率($0.72 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}/(10 \text{ a})$)。在相同的气候背景下,这反映了青岛市区和平度市不同的城市发展速度和发展阶段对城市风速的影响。胶南站年平均风速呈现为下降趋势,下降率为 $0.349 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}/(10 \text{ a})$,1988年后胶南站年平均风速均低于气候值($2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)。此外,冬、夏两季青岛、平度和胶南站的年平均风速均是下降的,且在冬季下降最显著。

青岛属半湿润温带季风气候,冬季盛行西北风,夏季盛行东南风。青岛地区偏北风强度的变化一定程度反映了冬季冷空气对青岛的影响强弱。本文统计了1961—2015年青岛7个基本气象站WNW、NW、NNW、N、NNE、NE六个风向出现频率以及出现各风向对应的风速,以反映青岛偏北风变化情况。全市偏北风平均风速呈持续下降趋势(表3),平均风速从20世纪60年代的 $3.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 下降到了21世纪最初10年的 $2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,偏北风出现

频率变化不大,平均频率为35.4%。1961—2015年全市偏北风下降率约为 $0.33 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}/(10 \text{ a})$,偏北风出现频率为35.8%。与2001—2010年相比,2010—2015年,胶南、胶州、即墨、莱西各站偏北风出现频率增大明显,偏北风风力也有所增强,特别是在胶州站偏北风风力加大明显,这与大尺度环流背景的调整和变化有关,也与胶州站2011年由市区(海拔高度12.4 m)迁站至郊区(海拔高度84.4 m)有一定关系。

图7 1961—2015年青岛站(a)、平度站(b)和胶南站(c)平均风速距平年变化曲线(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)Fig.7 Anomaly of annual wind speed change from Qingdao Station (a), Pingdu Station (b) and Jiaonan Station (c) from 1961 to 2015 (units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

5 结论

1) 1899—2015年青岛站的平均风速变化是一个先增强(1899—1938年),再波动维持(1939—1991年),之后又减小(1992—2015年)的过程;1992—2015年风速持续降低,风速减弱速率为 $0.65 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}/(10 \text{ a})$,是117 a来风速减弱最强的阶段。

2) 青岛站春、夏、秋、冬四季的平均风速均呈减小趋势,1939—2015年77 a夏季风速减小趋势显著,1961—2015年55 a冬季风速减小趋势显著;近55 a的风速减小趋势($0.41 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}/(10 \text{ a})$)明显强于近77 a的情形($0.25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}/(10 \text{ a})$),20世纪90年代后风速的显著减小是其主要贡献者。

3) 1961—2015年青岛地区平均风速呈减小分布,东南沿海地区风速减小幅度大,北部内陆地区减小幅度小,全市偏北风减小率约为 $0.33 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}/$

(10 a)。城市化对年平均风速造成减小贡献率最大为-46.5%,不同地区风速减小幅度、年变化差异和当地城市化水平高低相关。

表3 偏北风(WNW-NE)出现频率和平均风速

Table 3 Frequency and average wind speed of northerly wind (WNW-NE)

时段	青岛		崂山		胶南		胶州		即墨		莱西		平度	
	频率/ %	平均 风速/ (m·s ⁻¹)	频率/ %	平均 风速/ (m·s ⁻¹)	频率/ %	平均 风速/ (m·s ⁻¹)	频率/ %	平均 风速/ (m·s ⁻¹)	频率/ %	平均 风速/ (m·s ⁻¹)	频率/ %	平均 风速/ (m·s ⁻¹)	频率/ %	平均 风速/ (m·s ⁻¹)
1961—1970年	28.0	2.8	31.5	3.3	37.1	4.3	40.5	4.3	29.5	4.0	40.7	3.5	40.3	4.1
1971—1980年	40.5	5.2	31.3	3.1	41.3	3.5	40.0	4.1	28.2	3.1	37.7	3.4	35.5	3.8
1981—1990年	39.5	4.8	36.0	3.9	41.5	2.7	37.3	3.2	28.3	2.9	33.4	3.4	34.5	3.6
1991—2000年	41.0	4.3	33.0	3.6	39.5	2.3	36.2	3.3	28.6	2.8	37.3	1.6	35.2	3.7
2001—2010年	41.0	3.3	29.0	1.9	39.8	1.7	34.2	3.0	31.2	2.2	36.7	2.5	36.4	2.9
2010—2015年	40.1	3.6	32.6	1.8	45.3	1.9	39.9	4.1	35.8	2.3	41.0	2.8	36.5	2.6

参考文献:

[1] 张小曳,孙俊英,王亚强,等. 我国雾-霾成因及其治理的思考[J].科学通报,2013,58(13):1178-1187.

[2] 丁一汇,戴晓苏. 中国近百年来的温度变化[J].气象,1994,20(12):19-26.

[3] 陈隆勋,朱文琴,王文,等. 中国近45年来气候变化的研究[J].气象学报,1998,56(3):257-271.

[4] 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.

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

[6] 史培军,张钢锋,孔锋,等. 中国1961—2012年风速变化区划[J].气候变化研究进展,2015,11(6):387-394.

[7] Jiang Y, Luo Y, Zhao Z, et al. Changes in wind speed over China during 1956-2004[J].Theor Appl Climatol, 2010, 99(3):421-430.

[8] Jiang Y, Luo Y, Zhao Z. Maximum wind speed changes over China[J]. Acta Meteor Sinica, 2013,27(1):63-74.

[9] 金巍,任国玉,曲岩,等. 1971—2010年东北三省平均地面风速变化[J].干旱区研究,2012,29(4):648-653.

[10] 马芹,张晓萍,万龙,等. 1957—2009年黄土高原地区风速变化趋势[J].自然资源学报,2012,27(12):2123-2134.

[11] 郑祚芳,高华,刘伟东. 北京地区近地层风能资源的气候变异及下垫面改变的影响[J].太阳能学报,2014,35(5):881-886.

[12] 付桂琴,赵春生,张杏敏,等. 1961—2010年河北省地面风变化特征及成因探讨[J].干旱气象,2015,33(5):815-821.

[13] 曹永旺,延军平. 1971—2013年环渤海地区风速的时空特征[J].中国沙漠,2015,35(5):1320-1329.

[14] Li Z, Yan Z, Tu K, et al. Changes in wind speed and extremes in Beijing during 1960-2008 based on homogenized observations[J]. Adv Atmos Sci, 2011,28(2):408-420.

[15] 张人禾,李强,张若楠. 2013年1月中国东部持续性强雾霾天气产生的气象条件分析[J].中国科学:地球科学,2014,44(1):27-36.

[16] 谭成好,赵天良,崔春光,等. 近50年华中地区霾污染的特征[J]. 中国环境科学,2015,35(8):2272-2280.

[17] 郭淳薇,孙兆彬,李梓铭,等. 北京地区近35年大气污染扩散条件变化[J].环境科学,2017,38(6):2202-2210.

[18] 潘玮,左志燕,肖栋,等. 近50年中国霾年代际特征及气象成因[J].应用气象学报,2017,28(3):257-269.

[19] 邢容容,刘乐军,马安青. 青岛市1990—2011年土地利用/覆盖变化研究[J].水土保持通报,2013,33(3):220-225.

[20] 田咏梅,马艳,于进付,等. 气候变化背景下青岛地区气候环境特征分析[J]. 海洋湖沼通报,2012(4):10-15.

[21] 毕玮,万夫敬,陆雪,等. 青岛地区霾污染天气特征分析[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2015,45(5):11-18.

[22] Qu W, Wang J, Gao S, et al. Effect of the strengthened western Pacific subtropical high on summer visibility decrease over eastern China since 1973[J]. J Geophys Res: Atmos, 2013,118(13):7142-7156.

[23] Qu W, Wang J, Zhang X, et al. Effect of cold wave on winter visibility over eastern China[J]. J Geophys Res: Atmos, 2015,120(6):2394-2406.

[24] Wang H. The weakening of the Asian monsoon circulation after the end of 1970's[J]. Adv Atmos Sci, 2001, 18

- (3):376-386.
- [25] 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.
- [26] 陶寅,黄勇,杨远建,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.
- [27] 韩同欣. 青岛市城市化水平测度及发展对策研究[J]. 中国人口资源与环境,2001,11(52):85-87.