风速概率分布参数对城市扩展规模的响应

吴文倩¹, 吴息^{1*}, 王彬滨², 许婷婷³

1. 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 气象灾害教育部重点实验室, 南京 210044;

2. 中国电力建设集团四川电力设计咨询有限责任公司, 成都 610041;

3. 新疆维吾尔自治区气象台, 乌鲁木齐 830002

* 联系人, E-mail: wuxi57n@nuist.edu.cn

2017-03-13 收稿, 2017-05-15 修回, 2017-05-18 接受, 2017-07-21 网络版发表

国家重点基础研究发展计划(2010CB428505)和国家自然科学基金重点项目(41230528)资助

摘要 利用北京、哈尔滨、广州等8个大型城市气象站1985~2014年地面风速定时观测资料、同期再分析资料(NCEP1)以及城市规模指标, 每5年为一时间段, 分析不同时段风速Weibull分布各参数(k , c , r)的变化及其与城市扩展规模之间的关系. 结果表明: (1) 风速概率分布参数变化程度与城市规模扩展速度有关; 城市化效应使得位置参数 r 变化最大, 尺度参数 c 次之, 而形状参数 k 变化趋势不明显. (2) 尺度参数 c 随城市建成区面积的增加呈现线性递减趋势, 7个站的回归方程通过检验, 变化率在 $-0.0203 \sim -0.0016 \text{ km}^{-2}$ 之间, 意味着随城市规模扩大, 风速概率密度曲线分布幅度收窄. (3) 位置参数 r 随建成区面积的增加表现为线性上升趋势, 数值由负到正变化, 6个站回归方程通过检验, 变化率在 $0.0014 \sim 0.0171 \text{ km}^{-2}$ 之间, 意味着城市规模扩大会导致静风、微风频率减小. 分析还显示 r 的变化率与纬度相关良好. (4) 以再分析资料拟合参数 c_x 和 r_x , 取相对变量 c/c_x 和 r/r_x 以表征城市化效应对风参数的影响部分, 分析的结果与 c , r 相似. (5) 形状参数 k 与城市规模指标的相关不显著.

关键词 风速, Weibull 分布参数, 城市规模指标, 线性相关

城市特殊的下垫面热力和动力性质, 使得城市大气边界层不同于郊区. Oke^[1]于1987年提出了城市冠层(urban canopy layer)的概念, 并将其定义为由地面至建筑物顶层的高度, 指出由于该层大气直接受到下垫面建筑物的影响, 因而受人类活动的影响最大. 高速的城市化发展, 对城市冠层内部流场和温度场的影响尤为突出. Sneyers等人^[2]研究表明, 比利时于克勒站附近新建的建筑, 导致当地的平均风速减小了 0.24 m/s . Li等人^[3]认为北京市近50年的大范围风速变化在相当程度上到受北京城市化进程的影响. 刘学锋等人^[4]认为城市化的发展是城市气象站风速减小趋势的一个重要原因. 李书严等人^[5]证实了不断增高、密度不断加大的建筑物对气流的阻滞作用使

得城区平均风速呈减少趋势. 数值模拟研究^[6]发现下垫面土地利用类型由耕地等类型变为城市后, 水平风速显著减小, 呈现明显城市拖曳作用. 在气温方面, 任国玉等人^[7]认为城市化因素对中国地面平均气温记录具有显著影响; 丁金才等人^[8]对上海盛夏热岛效应的研究指出, 城市的市区建成面积、土地利用类别、人口密度等都市化因素都影响到城市热岛的范围和强度.

城市化对风速的影响机制最为复杂, 其中影响最大的是粗糙下垫面的摩擦效应, 另外城市参差不齐的建筑, 产生阻挡、扰流、狭管效应等作用导致风速的不确定性, 再者城市下垫面加强了气流的机械湍流, 热岛效应又使市区热力湍流旺盛^[9], 并可能出

引用格式: 吴文倩, 吴息, 王彬滨, 等. 风速概率分布参数对城市扩展规模的响应. 科学通报, 2017, 62: 3369–3378

Wu W Q, Wu X, Wang B B, et al. Response of wind speed probability distribution parameters to urban expansion (in Chinese). Chin Sci Bull, 2017, 62: 3369–3378, doi: 10.1360/N972016-01215

现城市的热岛环流. 越来越快的城市化发展对城市近地风速和气温的影响也愈发明显. 研究表明^[10,11], 城市年平均风速减小的趋势比郊区略明显; 林学椿和于淑秋^[12]、邱新法等人^[13]也认为城市热岛强度随着城市化速度的加快而明显增加.

目前对城乡气候差异的研究多数只分析气温、风速平均值的差异, 通过概率分布来研究城乡气象要素差异的文献较少. 由于风速城市化效应的复杂性, 利用风速概率分布律的参数变化描述风速的变化特征是有效的气候分析手段, 能够较为完整地描述城市风速的概率特征, 而不仅仅是平均风速, 从而为进一步探讨城市化影响的物理机制提供依据和基础, 便于对城市化效应的机理作进一步分析. 针对城市化对风速概率分布的影响研究, 吴息等人^[14,15]以三参数Weibull分布来拟合风速概率分布函数, 对比了城乡、城市发展前后期Weibull分布3个参数的变化形式, 初步探讨了城市化效应对地面风速的影响规律. 本文以三参数Weibull分布函数描述城市风速概率分布, 试图通过建立城市不同发展阶段地面风速Weibull分布参数与城市规模指标之间的统计关系式, 细化和量化城市发展规模对地面风速概率分布的影响程度, 进一步揭示城市化效应对地面风速的影响规律, 从而为城市化效应研究提供新的思路, 同时也为城市生态规划、大气污染气象条件的分析提供一定的参考.

1 资料概况

应用城市气象资料与同时刻背景场的差值可作

为城市化对气候影响的重要标志, 本文采用了3个方面的资料, 即台站天气资料、再分析资料和城市规模指标.

1.1 台站资料

地面台站风速和气温资料来自中国气象数据共享服务网(<http://cdc.nmic.cn/home.do>)所提供的1985~2014年全球地面天气资料定时(00, 06, 12, 18时)数据集. 由于2000年1~6月数据缺测, 考虑到风速存在一定的季节变化, 缺测样本可能导致风速概率分布产生系统偏差, 为确保数据的有效性, 本文使用年限为1985~1999及2001~2014年共29年数据完整的台站资料. 城市站点选取中国东部地区北京、哈尔滨、济南、南京、杭州、南昌、福州、广州8个大型城市气象站, 台站地理概况及迁站信息见表1, 对有迁站的台站, 统计其风速年平均值, 与国家基准站提供的台站年平均值对比, 台站迁站年份与基准站相比经检验无显著差异, 由此认为迁站对数据影响不大, 仍使用该站数据结果. 作为对比在城市周边选择若干县级气象站, 反映城市化效应较弱的序列, 以便分析两者的差异.

1.2 再分析资料

再分析对比资料使用的是与台站同时段的NCEP/NCAR Reanalysis-1(NCEP1)地面风速和气温定时资料, 分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$. 它是美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)与美国国家大气研究中心(National Center for

表1 城市台站的地理概况及迁站信息

Table 1 Geographic location and moving information of city stations

台站名	纬度(N)	经度(E)	台站方位及周围环境	迁站信息
北京	39.80°	116.47°	市区西南方五环高速路附近, 建筑稀疏	无
哈尔滨	45.75°	126.77°	东部市郊农田旁	2013~2014年迁站至45.93°N, 126.57°E, 北部市郊农田旁, 后迁回
济南	36.60°	117.05°	西南部市郊稀疏建筑	无
南京	32.00°	118.76°	市中心密集建筑	2009~2012年迁站至21.93°N, 118.9°E, 南部市郊小区旁, 后迁回
杭州	30.23°	120.17°	市中心公园景区附近	无
福州	26.08°	119.28°	市中心密集建筑	无
南昌	28.60°	115.92°	南部市郊稀疏建筑	无
广州	23.16°	113.33°	东北部市区小区附近	2011~2012年迁站至23.22°N, 113.48°E, 东北部市郊森林公园中, 后迁回

Atmospheric Research, NCAR)共同合作的项目, 采用T62L28模式, 同化方案为谱统计插值SSI, 同化资料来自全球无线电探空仪数据、表面航海数据、航行器数据、地表天气数据、卫星探测数据等^[16]. 使用再分析数据的目的是作为无城市影响的气候背景, Kalnay和Cai^[17]认为NCEP/NCAR再分析库中的地表温度、10 m高风场资料等要素数据对局地由于地表覆盖变化引起的气候变化反映的较少. 李艳等人^[18]、Li等人^[19]也认为NCEP/NCAR再分析近地层风场、气温资料不包含下垫面人为改变的相关影响信息, 主要反映的是气候变化的信号. 所以再分析资料用于表示气候背景是可行的.

1.3 城市规模指标

表示城市化规模的指标很多, 本文主要采用了建成区面积、市区人口等表征城市规模的指标(简称城市规模指标), 数据均取自于历年国家统计局编撰的《中国城市统计年鉴》. 其中建成区是指市行政区域内经过征用的土地和实际建设发展起来的非农业生产建设地段, 与城市有着密切联系.

2 风速概率分布函数及其参数估计

研究表明^[20~22], Weibull分布能较好地拟合实测风速的概率分布函数. 近年来已广泛采用三参数Weibull分布函数描述风速的概率分布.

根据风速的物理意义, 适用于风速的三参数Weibull分布概率密度函数表达式为^[14]

$$f(v) = \begin{cases} \frac{k}{c} \left(\frac{v-r}{c} \right)^{k-1} \exp \left[-\left(\frac{v-r}{c} \right)^k \right], & v \geq 0, \\ 0, & v < 0, \end{cases} \quad (1)$$

式中, k 决定概率密度函数曲线的形状, 称为形状参数(图1); c 为尺度参数, 决定了曲线在横坐标方向上分布宽窄幅度; r 在通用Weibull分布函数中为密度曲线左端点的横坐标值, 称为位置参数.

图2为通用意义的Weibull分布密度曲线与应用于风速的Weibull分布密度曲线示意图. 由于积分域的原因, 一些常用参数估计方法对式(1)中参数估计比较困难. 利用数值方法对风速经验分布函数进行拟合Weibull分布函数曲线的方法获取3个参数的估计值是简单可行的方法^[14].

图1 Weibull分布函数的3个参数对密度曲线的影响
Figure 1 Effect of 3 Weibull distribution parameters to density curves

式(1)积分可得分布律函数:

$$F(v) = 1 - \exp \left[-\left(\frac{v-r}{c} \right)^k \right], \quad v \geq 0. \quad (2)$$

将各时段内风速观测值按由小到大排序: $v_1, v_2, \dots, v_i, \dots, v_n$, 以 $F^*(v_i) = P^*(v < v_i)$ 表示风速 v 小于 v_i 的频率, 则风速的频率分布函数为

$$F^*(v_i) = \begin{cases} 0, & v_i < v_1, \\ \frac{i}{n}, & v_1 \leq v_i \leq v_n, \\ 1, & v_i > v_n. \end{cases} \quad (3)$$

图2 (网络版彩色)通用Weibull分布密度曲线与应用于风速的Weibull分布密度曲线示意图

Figure 2 (Color online) Sketch map of universal Weibull distribution density curve and the Weibull distribution density curve applied to wind speed

根据式(2), 利用数值迭代进行分布函数曲线拟合, 优化算法为L-M算法(Levenberg-Marquardt)加通用全局优化法, 获得 k , c , r 这3个参数拟合值, 此方法的优点能确保拟合函数

$$F(v_n) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{v_n - r}{c} \right)^k \right]$$

趋近1, 图3为南京站1985~2014年风速的拟合效果图, 曲线拟合效果通过统计检验。

3 风速概率分布参数随时间阶段的变化

近30~40年是我国城市化规模快速增长时期, 为反映城市规模扩展与风速概率分布参数变化的关系,

图3 (网络版彩色)南京1985~2014年地面风速Weibull分布函数拟合效果

Figure 3 (Color online) Surface wind speed Weibull distribution function fitting effect of Nanjing during 1985-2014

将各站风速资料划分为1985~1989, 1990~1994, 1995~1999, 2001~2004, 2005~2009, 2010~2014年6个时间段, 分别拟合各时段风速Weibull分布参数。

3.1 城市与邻近县站的风参数变化对比

对比法是常用的城市效应分析方法, 以中高纬度的北京和低纬度的福州为例, 分别在周边选择1~2个县级气象站, 北京邻近站是怀来、蔚县, 福州邻近站为南平。图4为各站风参数逐段变化, 同时以阶段序号($i=1, 2, \dots, 6$)为自变量的回归分析得到风参数的时间倾向率(表2)。可以看出城市站形状参数 k 随时间下降, 县站为微弱下降或上升, 参数变化趋势不明显; 城市站和县站参数变化趋势基本为 c 下降、 r 上升, 但城市站 c , r 倾向率绝对值明显大于县站, 表明参数的变化程度受到台站所在地城市化发展程度的影响, 总之城市与邻近县站风参数的变化特征明显不同, 城市化效应对风参数影响显著, 城市站的参数 c 和 r 的变化程度明显大于邻近县站。

3.2 风速Weibull分布参数随时间变化的一般特征

表3汇总了各城市站风参数的时间变化倾向率, 表中通过0.1信度检验表示回归方程相关系数大于0.7293, 通过0.05信度检验表示回归方程相关系数大于0.8114, 可看出3个参数于台站的时间变化趋势是一致的, 其中尺度参数 c 明显线性递减, 倾向率平均值为-0.8256, 其中广州的参数变化倾向率最大, 为-1.3077; 位置参数 r 呈上升趋势, 倾向率平均值为0.7537, 形状参数 k 倾向率平均为-0.3846, 相对平缓地下降, 变化程度于3个参数中最小。由于城市影响风速的机制十分复杂, 南京、杭州2个城市3个参数的时间倾向率没有能通过统计检验。但参数变化趋势与其他台站一致。

图5为北京、哈尔滨、广州3个城市的位置参数 r 和实测静风概率密度的变化, 可见 r 值由负到正变化, 线性趋势为上升, 静风概率密度为线性递减, 并且低纬度城市变率高于高纬度城市。根据风速Weibull分布参数的物理意义, 尺度参数 c 呈线性递减, 表明随着城市的发展风速密度曲线分布幅度收窄, 风速相对集中。位置参数 r 呈线性上升趋势, 数值变化由负到正, 根据式(1)及图1, 这意味着静风、微风概率有减少的趋势。

参数的城-郊对比以及城市发展前后期的参数对

图4 城市站与县站Weibull分布参数随时间变化

Figure 4 Time-varying of urban and county stations' Weibull distribution parameters

表2 城市站与县站风速Weibull分布参数随时间变化倾向率

Table 2 Time-varying tendency rate of urban and county stations' Weibull distribution parameters

台站名	k	c	r
北京	-0.1097	-0.3782	0.3440
怀来	-0.0504	-0.1108	0.1420
蔚县	0.0396	0.0313	0.0835
福州	-0.2644	-0.7182	0.6355
南平	0.0158	-0.0423	0.1296

比可看出城市化效应对风速概率分布参数影响十分显著, 需要指出的是在总体上城市效应使平均风速下降, 但概率分布分析可以看出不同风速段城市效应的结果是不同的, 大风时动量摩擦消耗很大, 城市风速明

表3 各城市站风速Weibull参数的时间倾向率^{a)}

Table 3 Time-varying tendency rate of Weibull distribution parameters of urban stations^{a)}

台站名	k	c	r
北京	-0.1097**	-0.3782**	0.3440**
哈尔滨	-0.1290	-0.5085**	0.2350*
济南	-0.2185**	-0.5129**	0.4528**
南京	-0.4972	-1.1765	1.2103
杭州	-0.2282	-0.5509	0.4831
福州	-0.2644**	-0.7182**	0.6355**
南昌	-0.3223*	-0.6860**	0.5529**
广州	-1.3077**	-2.0740**	2.1158**
平均	-0.3846	-0.8256	0.7537

a)*为通过0.1信度的检验,**为通过0.05信度的检验,下同

图5 城市站位置参数 r (a)以及台站实测静风概率密度(b)的变化

Figure 5 Changes of location parameter r (a) and observation calm wind probability (b) of urban stations

显小于乡村,而静风、微风时动量摩擦消耗近于零,较强的城市热力不稳定导致风速增大的趋势,这表现在概率密度曲线上最明显的变化为静风出现的概率下降(图5(b)).当风速为静风或微风时,背景大气层结稳定,此时强的城市热岛更易出现^[23],城市中旺盛的热力湍流活动破坏稳定大气层结,同时增强的湍流运动传播至上层大气,使得上层大气动量下传并得以补充地面消耗,两方面因素是导致城市中静风出现概率显著减小的可能原因.文献[15]曾统计过2005年南京站逐时自动站风速资料,0 m/s风速出现频数仅为1次,远小于乡村站静风频数,长期风速资料中静风概率密度减小也同样以热岛强度随城市化发展而增大来解释.

从表4所列变差系数可以看出,位置参数 r 的变化最大,尺度参数 c 次之,3个参数中变化最小是形状参数 k .统计意义上 k 反映密度曲线形状,物理意义上取决于天气气候特征, k 的波动主要是背景气候的波动以及抽样误差造成的,故相对平缓^[14].

4 城市规模指标与风参数的相关特征

4.1 城市建成区面积与风参数的相关分析

城市化主要因下垫面动力、热力特征的改变而对风参数产生影响^[14,15],众多的城市规模指标中尚未有直接体现下垫面特征的指标.通过市区人口、建成区面积等城市规模指标可以一定程度间接体现下垫

面的变化.根据数据划分时段选取1987,1992,1997,2002,2007,2012年城市规模指标,由于《1992年中国城市统计年鉴》相关的统计口径与其他年份不一致,因此改用1991年统计指标代替.对资料进行相关分析的结果表明,尺度参数 c 与建成区面积(km^2)的相关良好,其中广州的相关系数最大为 -0.9621 ,仅杭州站没有达到显著性标准(相关系数 -0.6757).说明风参数的变化与城市规模变化存在联系.

为分析风参数对城市规模扩展的响应程度,以建成区面积 u 与风参数建立回归方程 $y=\alpha+\beta u$,系数 β 反映每增加单位建成区面积所对应的风参数的改变量,称为变化率.

表5可看出台站随着城市规模的扩展,尺度参数 c 递减明显,变化率在 $-0.0203\sim-0.0016\text{ km}^{-2}$ 之间,7个台站统计结果通过检验.位置参数 r 线性趋势上升,变化率在 $0.0014\sim0.0171\text{ km}^{-2}$ 之间,6站通过检验.形状参数 k 倾向率平均变化 -0.0051 km^{-2} ,检验通过率仅40%,与 c , r 相比之下 k 的变化趋势不显著.参数变化趋势与3.2节的结论一致.

相关分析还以市区人口数、GDP等指标作为自变量,得到的回归方程与上述趋势一致,方程检验通过率差异不大.

4.2 参数的城市化相对变量

根据资料分析后可以认为,城乡风速差 D 与乡村

表4 城市站Weibull分布参数变差系数绝对值

Table 4 Absolute values of Weibull distribution parameters variation coefficient in urban stations

参数	北京	哈尔滨	济南	南京	杭州	福州	南昌	广州
k	0.1317	0.2090	0.2557	0.5058	0.3786	0.2572	0.3226	0.5732
c	0.2285	0.2588	0.3218	0.5494	0.4433	0.4017	0.4137	0.6553
r	0.6723	0.4623	1.6459	0.8676	0.8126	1.1823	0.7367	0.8610

表 5 城市站风速Weibull分布参数与建成区面积的回归方程变化率

Table 5 Regression function tendency rate of Weibull distribution parameters of urban stations and city build-up area

台站名	k	c	r
北京	-0.0005**	-0.0016**	0.0014**
哈尔滨	-0.0036	-0.0108**	0.0056**
济南	-0.0039**	-0.0085**	0.0069**
南京	-0.0053	-0.0122*	0.0126*
杭州	-0.0034	-0.0078	0.0071
福州	-0.0058**	-0.0156**	0.0126
南昌	-0.0106	-0.0203*	0.0171*
广州	-0.0077**	-0.0113**	0.0115**
平均	-0.0051	-0.0110	0.0093

风速 V_x 呈线性相关关系, 即:

$$D_1 = b_1 V_x + i. \quad (4)$$

引入城乡气温差 ΔT 之后, 可得到关系式:

$$D_2 = b_2 V_x + a_2 \Delta T + j. \quad (5)$$

以北京站为例, 使用1985~2014年台站及再分析风速、气温资料, 以再分析资料代表乡村风速 V_x 、气温, 拟合得到城乡风速差 D 的回归方程有 $D_1 = -0.7322V_x + 0.9050$, $D_2 = -0.7553V_x + 0.0737\Delta T + 0.5759$, 两方程式自变量均通过显著性检验. 这里 $b_1 < 0$, $b_2 < 0$ 体现摩擦消耗对城市风速的削弱, 式(4)中变量 i 代表除了摩擦作用以外其他城市化效应对风速的影响, 其中最主要的部分为城市化热力效应, 式(5)中引入城乡气温差 ΔT 后, $a_2 > 0$ 则具体体现了城市综合热力效应对风速的增大作用. 根据概率论可得城市与乡村风速Weibull分布参数的关系^[14]:

$$c = (b_1 + 1)c_x, r = (b_1 + 1)r_x + i, k = k_x. \quad (6)$$

以再分析风速资料代表无城市化影响的变量(即代表了背景气候的变化), 拟合风参数 c_x , r_x 并定义相对变量:

$$c/c_x = b_1 + 1, r/r_x = b_1 + 1 + i/r_x. \quad (7)$$

相对变量理论上消除了气候背景的影响, 仅代表城市化对其影响的部分. 变量 $c/c_x = b_1 + 1$ 的变化取决于下垫面的摩擦效应, 影响因素比较单一, 但 r/r_x (或变形为 $r - r_x$, $(r - r_x)/r_x$)不能消除等式右侧的 r_x , 表明 r/r_x 包含摩擦、热力以及背景气候的波动等作用, 影响因素复杂. 变量 c/c_x 用不同城市规模指标试验, 与建成区面积的统计相关最好, 回归方程的残差比

相对较小, 7个城市通过检验, 变化率在 $-0.0003 \sim -0.0063 \text{ km}^{-2}$ 之间(表6); 相对其他城市规模指标而言, r/r_x 以市区人口数 p (万人)等指标的拟合的一元线性回归方程效果略好, 变化率范围 $-0.0027 \sim -0.0351$ /万人, 相对变量绝对值减小, 7个城市通过检验. 相对变量 c/c_x , r/r_x 主要反映城市化影响的部分, 与城市规模指标相关良好, 分析结果仍与3.2节所得结论一致.

图6为北京、广州站相对变量随城市规模指标相关散点图, 北京站相对变量变化程度远小于广州, 结合表6不难看出北京站相对变量变化程度也为8个城市中最小. 统计年鉴显示北京1985年建成区面积373 km^2 , 市区人口586.03万人, 到2014年建成区面积已达1386 km^2 , 市区人口数增至1261.9万人, 而广州2014年市区人口数为695万人, 与北京1990年市区人口数相当. 在资料年限内, 广州等其他城市正处于城市化飞速发展的阶段, 城市化对地面风速变化影响甚大, 当城市规模扩大到一定程度之后(如北京), 城市化进程对风参数的影响已趋减弱, 甚至有可能使得风参数稳定下来.

对结果分析还发现, r/r_x 对人口的变化率与台站所在纬度有关, 相关系数0.8663(回归方程通过检验的台站), 即每单位人口增加产生的 r 参数改变量随纬度而变(图7), c/c_x 对建成区面积的变化率与纬度相关系数仅为0.3847, 不能通过相关系数的显著性检验.

k/k_x 理论上与城市规模不相关, 取决于气候波动和抽样误差^[14], 这里暂不予讨论.

5 结论与讨论

本文以8个城市1985~2014年的定时地面风速资料以及对应再分析风速资料, 分6个时段分别拟合风

表 6 城市站风参数相对变量与城市规模指标线性回归方程

Table 6 Linear regression functions of relative variables of urban wind parameters and city size indexes

台站名	c/c_x	r/r_x
北京	$c/c_x = -0.0003u + 0.7610^{**}$	$r/r_x = -0.0027p + 3.5826^{**}$
哈尔滨	$c/c_x = -0.0018u + 1.2205^{**}$	$r/r_x = -0.0074p + 4.2402^{**}$
济南	$c/c_x = -0.0020u + 1.1901^{**}$	$r/r_x = -0.0183p + 6.0505^{**}$
南京	$c/c_x = -0.0029u + 2.5930^{*}$	$r/r_x = -0.0244p + 15.1418^{*}$
杭州	$c/c_x = -0.0016u + 1.1669$	$r/r_x = -0.0089p + 6.1953$
福州	$c/c_x = -0.0019u + 0.6795^{**}$	$r/r_x = -0.0237p + 4.3959^{*}$
南昌	$c/c_x = -0.0063u + 1.8472^{*}$	$r/r_x = -0.0351p + 8.4943^{**}$
广州	$c/c_x = -0.0020u + 2.1301^{**}$	$r/r_x = -0.0326p + 22.0834^{**}$

图6 (网络版彩色)相对变量与城市规模指标相关散点图. (a) c/c_x ; (b) r/r_x

Figure 6 (Color online) Scatter diagram of relative variables and city size indexes. (a) c/c_x ; (b) r/r_x

图7 (网络版彩色) r/r_x 对人口的变化率与纬度相关散点图

Figure 7 (Color online) Scatter diagram of r/r_x population-varying rate and latitude

速Weibull分布的3个参数,建立参数与城市规模指标之间的函数关系式,分析得出以下结论.

(1) 风速概率分布参数的变化程度与城市规模扩展速度有关;城市化效应使得位置参数 r 变化程度最大,尺度参数 c 次之,而形状参数 k 变化趋势不明显.

(2) 风速概率分布参数于各站时间变化趋势一致,表现为 c 值线性递减, r 值线性趋势上升(数值由负到正变化),而 k 的变化趋势比较平缓.

(3) 城市规模指标与 c , r 相关良好.与 k 的相关则不显著.以再分析资料拟合参数 c_x , r_x ,取相对变量 c/c_x , r/r_x .主要以建成区面积、市区人口为自变量拟合参数 c , r 及相对变量 c/c_x , r/r_x 的一元线性回归方程,结果显示:尺度参数 c 随城市建成区面积增加呈现线性递减的趋势,7个站的回归方程通过检验,变化率在 $-0.0203 \sim -0.0016 \text{ km}^{-2}$ 之间,意味着随城市规模扩大,风速概率密度曲线分布幅度收窄;位置参数 r 随

城市建成区面积的增加表现为线性趋势上升,数值由负到正,6个站回归方程通过检验,变化率在 $0.0014 \sim 0.0171 \text{ km}^{-2}$ 之间,意味着城市规模增加会导致静风、微风的频率减小的效应;相对变量 c/c_x , r/r_x 主要反映城市化影响的部分,分析的结果与 c , r 相似;分析还显示 r/r_x 的变化率与纬度相关良好.

(4) 相对变量 c/c_x 的变化取决于下垫面的摩擦效应,影响因素比较单一; r/r_x 则包含摩擦、热力和气候背景的波动,影响因素复杂.

近年来城市中雾霾现象频发,对城市居民生活质量影响极大.风是近地层内影响污染物扩散的重要动力因子,当风速较小时,霾的出现概率较大,特别是静风和微风有利于霾天气的发生^[24].本文得出城市规模指标与地面风速概率Weibull分布参数 c , r 存在良好相关关系的结论,在后续研究中可通过建立地面风速Weibull分布参数以及各统计量与城市规模指标之间的统计关系式,通过分布参数的变化反映不同范围风速(静风、微风、大风等)所受到的城市化影响,从而在城市规划阶段,就能根据规划的城市规模指标预测未来城市风速的概率分布规律,对城市规划提供极大的帮助,为城市大气污染气象条件分析及雾霾治理提供参考依据,也有利于人们更好地把握风速变化规律,进一步描述气候要素相互影响作用以及气候变化的特征.

需要指出的是,部分城市的风参数与城市规模指标方程没有通过检验,其原因是多方面的,首先由于产业结构和功能的差异,城市规模指标不一定能直接反映出城市下垫面的动力和热力变化状态;其次气象观测站在城市的位置、城市的分布形状(如有的城市狭长分布,有的城市由大的河流分为两部分)

等影响着城市效应在风速观测值上的体现,不一枚影响的对比台站资料,后续研究在综合城市规模指标分析及资料收集等方面需做更多工作。

参考文献

- 1 Oke T R. Boundary Layer Climate. London: Methuan&Co. LTD, 1987. 274
- 2 Sneyers R, Vandiepenbeek M, van Lierde R. Climatological series for Bruxelles Uccle station. The mean wind speed. R Meteorol Inst Belgium Publ, 1988, 127: 23
- 3 Li Z, Yan Z, Tu K, et al. Changes in wind speed and extremes in Beijing during 1960–2008 based on homogenized observations. Adv Atmos Sci, 2011, 28: 408–420
- 4 Liu X F, Jiang Y, Ren G Y, et al. Effect of urbanization and observation environment change on wind speed trend in Hebei Province, China (in Chinese). Plateau Meteorol, 2009, 28: 433–439 [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. 高原气象, 2009, 28: 433–439]
- 5 Li S Y, Chen H B, Li W. The impact of urbanization on city climate of Beijing region (in Chinese). Plateau Meteorol, 2008, 27: 1102–1110 [李书严, 陈洪滨, 李伟. 城市化对北京地区气候的影响. 高原气象, 2008, 27: 1102–1110]
- 6 Zhang C, Shu J. Numerical simulations of effects on urban PBL characteristics with landuse categories modification (in Chinese). J East China Normal Univ (Nat Sci), 2011, 2011: 83–93 [张弛, 束炯. 土地利用类型变化对城市大气边界层特征影响的数值模拟. 华东师范大学学报(自然科学版), 2011, 2011: 83–93]
- 7 Ren G Y, Chu Z Y, Zhou Y Q, et al. Recent progresses in studies of regional temperature changes in China (in Chinese). Clim Environ Res, 2005, 10: 701–716 [任国玉, 初子莹, 周雅清, 等. 中国气温变化研究最新进展. 气候与环境研究, 2005, 10: 701–716]
- 8 Ding J C, Zhang Z K, Xi H, et al. A study of temperature distribution and the heat island effect in the summer of the Shanghai area (in Chinese). Chin J Atmos Sci, 2002, 26: 412–420 [丁金才, 张志凯, 奚红, 等. 上海地区盛夏高温分布和热岛效应的初步研究. 大气科学, 2002, 26: 412–420]
- 9 Chen M. Urban climate study in China (in Chinese). J Nanjing Univ, 1995, 31: 529–532 [陈明. 论我国城市气候研究工作的进展. 南京大学学报, 1995, 31: 529–532]
- 10 Liu D Y, Huang H, Yang Y J, et al. The climate impact of urbanization in Tianjin city (in Chinese). Ecol Environ Sci, 2010, 19: 610–614 [刘德义, 黄鹤, 杨艳娟, 等. 天津城市化对市区气候环境的影响. 生态环境学报, 2010, 19: 610–614]
- 11 Zou L Y, Guo S Y, Wang J, et al. Variation trend of the surface wind speed in Heilongjiang Province from 1961–2004 (in Chinese). Meteorol Monthly, 2010, 36: 67–71 [邹立尧, 国世友, 王冀, 等. 1961~2004年黑龙江省近地层风速变化趋势分析. 气象, 2010, 36: 67–71]
- 12 Lin X C, Yu S Q. Interdecadal changes of temperature in the Beijing region and its heat island effect (in Chinese). Chin J Geophys, 2005, 48: 39–45 [林学椿, 于淑秋. 北京地区气温的年代际变化和热岛效应. 地球物理学报, 2005, 48: 39–45]
- 13 Qiu X F, Gu L H, Zeng Y, et al. Study on urban heat island effect of Nanjing (in Chinese). Clim Environ Res, 2008, 13: 807–814 [邱新法, 顾丽华, 曾燕, 等. 南京城市热岛效应研究. 气候与环境研究, 2008, 13: 807–814]
- 14 Wu X, Wu W Q, Wang B B. Effects of urbanization on surface layer wind speed probability distribution and its parameters (in Chinese). Acta Meteorol Sin, 2016, 74: 623–632 [吴息, 吴文倩, 王彬滨. 城市化对近地层风速概率分布及参数的影响. 气象学报, 2016, 74: 623–632]
- 15 Wu X, Wu W Q. Urban-rural differences in the probability distribution of surface wind speed in Nanjing (in Chinese). Clim Environ Res, 2016, 21: 134–140 [吴息, 吴文倩. 南京地面风速概率分布律的城乡差异. 气候与环境研究, 2016, 21: 134–140]
- 16 Deng X H, Zhai P M, Yuan C H. Comparative analysis of NCEP/NCAR, ECMWF and JMA Reanalysis (in Chinese). Meteorol Sci Technol, 2010, 38: 1–8 [邓小花, 翟盘茂, 袁春红. 国外几套再分析资料的对比与分析. 气象科技, 2010, 38: 1–8]
- 17 Kalnay E, Cai M. Impact of urbanization and land-use change on climate. Nature, 2003, 423: 528–531
- 18 Li Y, Wang Y, Chu H Y, et al. The impact of climate variable and anthropogenic changes of underlying surface press on the change of land surface layer wind energy resources (in Chinese). Chin Sci Bull, 2008, 53: 2646–2653 [李艳, 王元, 储惠芸, 等. 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. 科学通报, 2008, 53: 2646–2653]
- 19 Li Y, Zhu L, Zhao X, et al. Urbanization impact on temperature change in China with emphasis on land cover change and human activity. J Clim, 2013, 26: 8765–8780
- 20 Hu W Z. Formulas and their accuracy for estimating the Weibull parameters by average wind speed and standard deviation (in Chinese). Acta Meteorol Sin, 1988, 4: 502–505 [胡文忠. 由平均风速和其标准差估算 Weibull 参数的近似公式及其精度. 气象学报, 1988, 4: 502–505]
- 21 Ma K Y. A new method to estimation parameters in three-parameters Weibull distribution (in Chinese). Sci Meteorol Sin, 1990, 10: 208–213 [马开玉. 三参数 Weibull 分布参数估计的一种新方法. 气象科学, 1990, 10: 208–213]
- 22 Monahan A H, He Y, Mcfarlane N, et al. The probability distribution of land surface wind speeds. J Clim, 2011, 24: 3892–3909
- 23 He G X, Wang X H, Sun J. The influence of wind speed and direction on urban heat island (in Chinese). Environ Eng, 2016, 34: 145–148 [贺广兴, 王先华, 孙杰. 风速及风向对城市热岛强度的影响研究. 环境工程, 2016, 34: 145–148]
- 24 Wei J S, Sun Y, Yan W L, et al. The preliminary study on characteristics and affecting factors of haze weather in Nanjing (in Chinese). Sci Meteorol Sin, 2010, 30: 868–873 [魏建苏, 孙燕, 严文莲, 等. 南京霾天气的特征分析和影响因子初探. 气象科学, 2010, 30: 868–873]

Summary for “风速概率分布参数对城市扩展规模的响应”

Response of wind speed probability distribution parameters to urban expansion

WU WenQian¹, WU Xi^{1*}, WANG BinBin² & XU TingTing³¹ Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science & Technology (NUIST), Nanjing 210044, China;² Sichuan Electric Power Designing and Consulting Co., Ltd, Power Construction Corporation of China, Chengdu 610041, China;³ Xinjiang Meteorological Observatory, Urumqi 830002, China

* Corresponding author, E-mail: wuxi57n@nuist.edu.cn

Recent studies have indicated that wind speed probability distribution can be described closely using three-parameters Weibull distribution, which has come to be widely used in the description of wind speed probability distribution over the past several years. The fitting effect of probability density curve would be better than the universal three-parameter Weibull distribution in calm wind by changing the universal three-parameter Weibull distribution function definition domain condition $[r, \infty)$ to a limited three-parameter Weibull distribution function definition domain $[0, \infty)$, which would be more applicable to actual wind speed distribution.

Timely observation wind speed of Beijing, Nanjing, Guangzhou, and other 5 large urban stations and their comparative county stations, and corresponding NCEP/NCAR Reanalysis-1 wind speed data collected from 1985–2014 were divided into sets, each of which had an average of six periods. The three parameters (k , c , r) of Weibull distribution of wind speed probability distribution are fitted using numerical iteration to analyze the changes in wind speed probability distribution parameters with respect to differences in wind speed section, and synthetic variations of those parameters can reflect changes in different wind speed sections, such as calm wind, light wind, and strong wind probability under urbanization, which can provide thorough understanding of the relationship to city size indexes and wind speed probability distribution parameters.

Data analysis and mathematical derivation were here used to draw the following conclusions: (1) the relationship of urban-rural wind speed difference D and rural wind speed V_x can be expressed as $D=b_1V_x+i$. Under these conditions, city wind speed parameters k , c , and r and the corresponding rural wind speed parameters c_x , k_x , and r_x have the following relationship: $c=(b_1+1)c_x$, $r=(b_1+1)r_x+i$, $k=k_x$. (2) As shown, parameter c is affected by unitary surface friction function, parameter r by the combination of various kinds of factors, and the change in parameter k is only an expression of climatic random fluctuation produced by constructing relative variables of $c/c_x=b_1+1$, $r/r_x=b_1+1+ir_x$, $k/k_x=1$. (3) It has a correlation with the degree of variation in wind speed probability distribution parameters and the speed of city expansion. Urbanization resulted in significant variations in location parameter r , scale parameter c comes second and shape parameter k did not show any significant changes. (4) Parameter c decreased with city build-up area enlarges. Seven stations' regression equations pass the significant tests and the variation rates are between -0.0203 — 0.0016 km^{-2} , which means that the expansion of city scale will narrow the distribution range of the wind speed probability density curve. Parameter r presents a rising trend (the value changes from negative to positive) along with the extension of city build-up area. Six stations' regression equations showed significant results, and the rates of variation were between 0.0014 and 0.0171 km^{-2} , which indicated that the likelihood of calm wind decreased as the urban area expanded. Analysis also showed a close relationship between parameter r and latitude. (5) Using reanalysis data to fit the comparison parameters c_x and r_x produced the relative variable c/c_x , and r/r_x , analyses showed results similar to the consequences of c and r . Shape parameter k showed a non-significant relationship with the city size index in comparison.

wind speed, Weibull distribution parameters, city size index, linear correlation

doi: 10.1360/N972016-01215