

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 Yangyang, Liu Shuhua, Hu Fei, et al. 2009. Influence of Beijing urbanization on the characteristics of atmospheric boundary layer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (4): 859–867.

北京城市化发展对大气边界层特性的影响

徐阳阳¹ 刘树华^{1, 2*} 胡非² 马楠¹ 王瑶¹ 石宇宁¹ 贾海岩¹

¹ 北京大学物理学院大气科学系, 北京 100871

² 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理与大气化学国家重点实验室, 北京 100029

摘 要 利用中国科学院大气物理研究所大气边界层物理与大气化学国家重点实验室的北京 325 m 气象塔 1993 年~2003 年夏季 (7 月~9 月) 的观测资料, 统计分析了各年的风速与温度廓线分布特征。统计分析结果表明, 随着城市化的发展, 相对风速有逐年减小的趋势, 并且越靠近地面, 相对风速的减小越明显, 这反映了城市建筑对近地面层空气流动的摩擦作用。对风速廓线进行线性拟合得到风速随高度的垂直递增率, 发现无论是 100 m 以下的近地面层还是较高层, 风速的垂直递增率都随城市化发展存在逐年增大的趋势, 表明粗糙下垫面的影响已经向高层扩展。根据温度廓线计算了各年的温度垂直递减率, 发现其有增大的趋势, 这表明城市化发展对边界层热力结构同样有显著影响。本文还依据统计整理得到的近中性层结下的风速廓线资料, 利用莫宁-奥布霍夫相似理论计算了下垫面的空气动力学参数, 结果表明, 地表粗糙度、零平面位移随着城市化发展皆有明显增加的趋势。同时, 分析了各空气动力学参数与平均风速及无量纲风速的关系。其中, 摩擦速度和平均风速二者基本成正比相关, 且摩擦速度随平均风速的增大而增大的趋势越发明显。本文研究结果对研究城市化发展对区域大气边界层结构、气候和环境影响有参考意义, 可为城市大气边界层模式和区域气候模式提供参数化依据。

关键词 城市化进程 边界层结构 下垫面性质 廓线 空气动力学参数

文章编号 1006-9895 (2009) 04-0859-09

中图分类号 P404

文献标识码 A

Influence of Beijing Urbanization on the Characteristics of Atmospheric Boundary Layer

XU Yangyang¹, LIU Shuhua^{1, 2*}, HU Fei², MA Nan¹, WANG Yao¹,
SHI Yuning¹, and JIA Haiyan¹

¹ Department of Atmospheric Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871

² State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract The situation of wind speed and temperature is analyzed by utilizing the observational meteorology data from the Beijing 325-m meteorology tower of the Institute of Atmospheric Physics of Chinese Academy of Sciences. The analysis indicates that the relative wind speed is in decrease, and at lower levels the decrease is even more apparent. The vertical increasing rate of wind speed, calculated by making a linear fitting of the wind speed profile,

收稿日期 2008-02-28, 2008-07-15 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40875004, 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理与大气化学国家重点实验室开放课题 LAPC-KF-2009-04, 北京大学校长基金项目

作者简介 徐阳阳, 男, 1986 年出生, 博士研究生, 主要从事大气边界层物理和环境研究。E-mail: xuyangyang@pku.edu.cn

* 通讯作者 E-mail: lshuhua@pku.edu.cn

shows an increase trend at both the lower levels under 100 m and the levels above. The vertical decreasing rate of temperature, which is generated from the temperature profile, is in increase over those years, indicating the urbanization influence on the thermodynamic structure of boundary layer. By utilizing the wind speed profile in a nearly neutral stratification, the aerodynamic parameters of the boundary layer are calculated based on the Monin-Obukhov similarity theory, showing an apparent increasing trend of the roughness length and zero-plane displacement. The analysis also shows that the relationship between friction wind speed and average wind speed is linear, and the increasing trend of friction wind speed with the average wind speed increases becomes more and more apparent. The results of this paper can be referenced by the researches of urbanization and urban environment, and can also provide potential parameterization for the boundary layer model as well as the regional climate model.

Key words urbanization, structure of boundary layer, characteristics of the underlying layer, profile, aerodynamic parameter

1 引言

随着城市的发展,城市地表热力、动力过程对城市区域的大气边界层产生作用,从而对城市区域气候和环境产生影响。近年来,城市化发展对大气边界层结构、区域气候、环境及灾害性天气的形成机理研究越来越引起人们的重视(Jones, 1990; 孙继松等, 2007; 蒋维楣等, 2007)。曲绍厚等(1981)根据 20 世纪 70 年代北京区域台站的资料,研究了北京城区的气象效应,指出远郊风速最大,近郊风速次之,城中心风速最小的规律。周淑贞等(1998)分析了上海市区域多年风速资料,指出由于上海城市化的高速发展,建筑群高度增高、密度增大,导致城区下垫面粗糙度加大,因而使城区的地面风速减小,1981 年~1985 年的平均风速就比 1911 年~1915 年减少 23.7%。Landsberg (1981)对意大利帕尔玛城市 20 世纪 70 年代风速资料的分析研究,同样发现城市化的发展导致风速明显减小的现象。

北京市作为我国的首都和政治文化中心,人口规模大,经济活动发达,是世界上的特大城市之一。改革开放以后,北京的城市建设十分迅速,尤其是从 20 世纪 90 年代初起,经历了连续十多年的高速发展,城市结构和建筑高度等都发生了很大变化。随着北京城市化步伐的加快,城市规模迅速扩大,北京三环路以外的地区已由 20 世纪 70~80 年代的城郊下垫面发展成现在的典型城区粗糙下垫面,使得大气边界层空气动力学特征发生了变化。北京城市化发展对边界层平均风速、温度及空气动力学参数的影响如何?这是一个值得关注的问题。

本文利用中国科学院大气物理研究所大气边界

层物理与大气化学国家重点实验室北京 325 m 气象塔的 1993 年~2003 年夏季(7 月~9 月)的观测资料,在统计分析逐年的大气边界层风速、温度廓线特征的基础上,计算了地表粗糙度 z_0 、零平面位移高度 d 、摩擦速度 u_* 等大气边界层参数,并分析其变化特征。研究结果揭示了大气边界层结构及其动力学参数随着北京城市化发展的演变规律,可为城市大气边界层模式、大气扩散模式和区域气候模式的参数化提供参考依据。

2 数据资料

中国科学院大气物理研究所大气边界层物理与大气化学国家重点实验室的北京 325 m 气象塔(39°58'N, 116°22'E)(简称气象塔),位于北京德胜门以北约 2.7 km 处,北三环路以北四环路之间。其东面 200 m 处为南北走向的京昌高速公路,北面 50 m 处为东西走向的北土城西路。自 1979 年建成以来,气象塔已经积累了二十多年城市边界层气象要素分布的宝贵资料,正在城市复杂下垫面边界层研究中发挥越来越重要的作用(洪钟祥, 1983)。自气象塔建成到 20 世纪 90 年代初,塔址所处的地区属于北京市的城郊结合部,除正南的北三环路两侧有零星的超过 50 m 的建筑物外,气象塔周围约 1 km 的范围内没有高度超过 20 m 的建筑物。进入 90 年代以后,随着北京市城市建设的加速发展,气象塔周围相继建成众多高大建筑物,包括北面的中鑫嘉园,南面的冠城园、国家质监总局等。气象塔周边从城郊非均匀下垫面转变为复杂的城市粗糙下垫面,所以这一阶段的铁塔观测资料很好地记录了城郊下垫面向典型城市下垫面转变的过程。本文利用的是北京 325 m 气象塔 1993~2003 年夏季(7~

9月)的常规观测资料(其中1996年由于气象塔检修,仅有少量7月份观测数据,代表性相对较差)。气象塔上共有15层自动观测平台,每20s记录一组数据,观测高度分别为9m、15m、32m、47m、65m、80m、103m、120m、140m、160m、180m、200m、240m、280m、320m。测量的基本要素为水平风向、风速(为减小塔身的扰流影响,分为西北臂数据和东南臂数据,需根据风向选取)、温度和相对湿度(其中8层)。本文首先进行了数据质量控制,剔除了明显不满足空间连续性的异常数据,然后进行统计分析和空气动力学参数的计算。

3 计算方法

零平面位移 d 和地表粗糙度 z_0 是描述下垫面空气动力学特征的重要参数。Thom(1971)直接从零平面位移 d 的物理意义出发,提出计算 d 的压力中心法;Kustas等(1986)假设零平面位移 d 与植物高度呈一定的比例关系;Garratt等(1992)建议,在城市区域可用 $d=2/3h$ 来估算城市零平面位移 d , h 为建筑物平均高度。但是这些方法属于经验参数化方法,在实用中存在一定的主观性。近年来,具有快速响应能力的超声观测仪器的应用越来越普遍,尽管利用其所得到的数据可以直接计算湍流等空气动力学参数,但此方法数据采集量及难度较大,并不比间接测量更有代表性和适用性。本文采用的传统的确定地表粗糙度 z_0 和零平面位移 d 的廓线方法,是利用近中性大气稳定度风速廓线资料或非中性层结廓线方程迭代求最佳拟求解。此种方法物理概念简明,理论成熟,使用方便,在计算近地面层湍流通量时被广泛应用。Grimmond等(1999)指出,用观测廓线的方法来估算零平面位移和地面粗糙度,在连续性和代表性上仍具有很好的应用价值。

用廓线法计算空气动力学参数的缺陷在于,利用莫宁-奥布霍夫相似理论推导的风速廓线对数率在中性和近中性层结时成立,用来外推非中性层结情况时误差较大。刘树华等(1995)研究表明,当风速小于2.0m/s时,用此法计算空气动力学参数时相对误差迅速增加。因此,在微风环境中,该方法的使用受到限制。本文在对原始数据进行质量控制后,取10分钟平均风速数据。为了尽量满足近中性层结的条件,克服计算方法的缺陷以减小误

差,选择风速较大(以最高层风速大于12m/s作为基本判据)的时段的数据作为应用计算数据。同时考虑在近地面层风速的对数率较为明显数据,选取了较低的47m、65m、80m、103m、120m高度的风速数据来计算空气动力学参数。

根据莫宁-奥布霍夫相似理论(Moyn et al., 1954),在近中性条件下的风速满足对数率,即

$$\frac{ku}{u_*} = \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) - \Psi_M(\zeta). \quad (1)$$

$\Psi_M(\zeta)$ 是Businger-Dyer风速廓线层结订正函数(Dyer et al., 1982),可按照稳定度来对风速对数廓线进行修正。在强风和阴天条件下,边界层可以近似被认为是中性,此风速对数廓线的稳定度修正函数近似为零。同时,在城市下垫面,建筑物比较密集,平均建筑物高度水平面的空气动力学作用,类似于地面的位移高度,这样对上式进行位移订正,得到

$$\frac{ku}{u_*} = \ln\left(\frac{z-d}{z_0}\right), \quad (2)$$

式中, d 为零平面位移高度, z_0 为地面粗糙度, u_* 为地面摩擦速度, u 为离地面 z 高度的水平风速。 k 是Von Karman常数,一般取为0.4(Stull, 1988)。一般, d 和 z_0 满足关系 $d=c z_0$,其中, c 为常数,一般取值在5~8。本文综合考虑前人的研究结果,结合气象塔周围的环境将 d 和 z_0 的关系选作 $d=6.5 z_0$ 。由(2)式变形得到:

$$u = \frac{u_*}{k} \ln(z-d) - \frac{u_*}{k} z_0. \quad (3)$$

实际计算中,将 d 的尝试值代入(3)式,并用五层的风速廓线资料进行线性拟合,找到 z_0 值。当拟合得到的 z_0 和 d 最佳满足 $d=c z_0$ 的关系时,即得到相应的零平面位移和地表粗糙度。摩擦速度也由最后拟合的直线方程的斜率得知。每一组符合近中性层结特征的风速廓线资料都可以得到一组空气动力学参数 d , z_0 , u_* ,进而可以得到各年气象塔周围的下垫面的空气动力学参数。

4 城市化对风速及温度廓线的影响

城市发展导致地表热力和动力特性的改变,将首先影响边界层风速和温度廓线的结构,进而对区域气候和环境产生影响,所以对城市化进程中边界层风速和温度廓线结构的研究就非常必要。我们对气象塔的1993年~2003年连续11年夏季(7月~

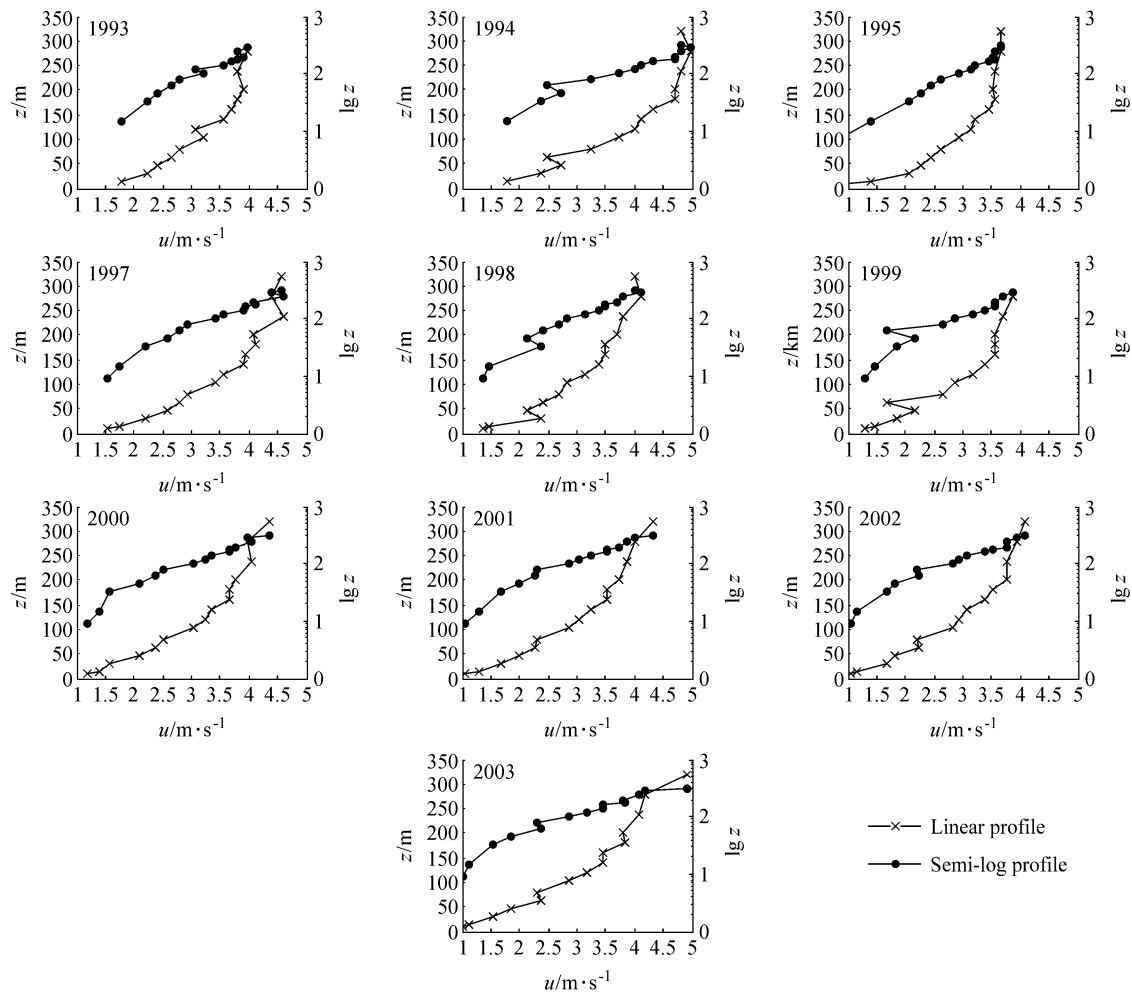


图1 1993~2003年各年夏季平均风速的线性廓线与对数廓线
Fig. 1 Linear profiles and semi-log profiles of summer average wind speed from 1993 to 2003

9月)的观测资料进行了统计计算,得到了每年夏季北京城市下垫面的平均风速廓线结构。为了更好地分析风速廓线与下垫面变化的关系,我们在图1中同时给出风速的线性廓线和对数廓线。

由图1可见,风速廓线的一般特点是,在最低层风速大约为1 m/s,且有逐年减小的趋势。风速在近地面层随高度增加而增大很快,到近150 m处增大开始变缓,在300 m以上的高度达到4 m/s到5 m/s的速度。低层80 m以下的风速呈现逐年减小的整体趋势;另外,还在底层和高层还存在拐点现象,这是由气象塔周围下垫面性质的改变引起的。

同时注意到,夏季三个月的平均风速受到当年区域整体气候状况影响,可能在不同年份整体偏大或偏小。为了更好地反映城市城市化发展所导致下的下垫面变化对风速场结构的影响,本文将受地表粗

糙度影响较小的高处四层(320 m、280 m、240 m、200 m)的风速取平均(三点平滑)的数据作为当年的背景风速,以其他层风速与背景风速之差作为相对风速,统计分析了1993年~2003年各年各层风速的相对变化量(1996年仅少量7月份观测数据,故略去),结果见图2所示。图2中风速前的负号表示底层风速比高层平均风速要小,负值越小表明风速减小越多。可以看出,除1995年和1999年外,其他年份的相对风速数据都呈现逐年减小的趋势,即9 m到180 m风速与该年背景风速的差距是在逐年增大的,这很好地反映出随着城市化的发展,地表粗糙元对风速的削减作用在逐年加剧。

为进一步分析各层风速随城市化发展的变化,计算逐年的各个高度上风速与背景风速的差值(图3),从而更加明显地反映出每一层相对风速的年际

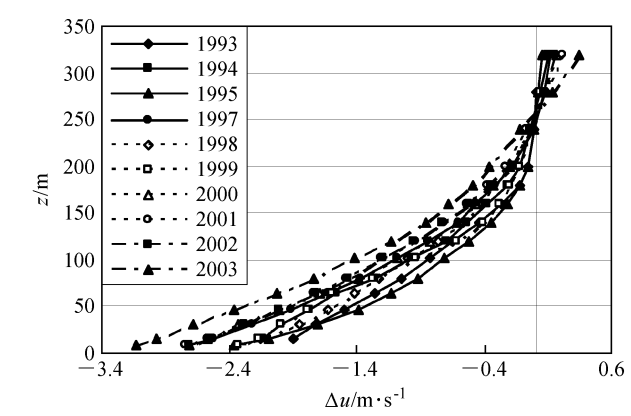


图2 相对风速廓线的年际变化

Fig. 2 Interannual change of the relative wind speed profiles

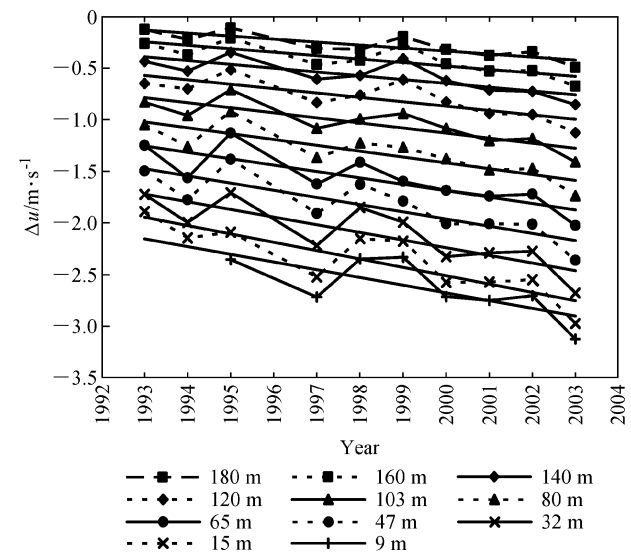


图3 180 m以下各层相对风速的年际变化

Fig. 3 Interannual changes of the relative wind speed on each level under 180-m height

变化。对折线线性拟合后可以明显看出，粗糙元对风速的影响随着高度的降低变的更加明显。

在对风速廓线进行分析过程中，发现风速廓线在高层与低层之间存在明显线性相关的两部分和拐点现象，拐点随着城市化的发展逐年抬升。考虑到近地面常通量层的一般高度及风速廓线的具体形态，本文取以9 m至120 m作为较低层次，140 m到320 m作为较高层次，分别做线性拟合，图4是以2001年风速廓线为例的分层拟合曲线，从中可见，风速廓线存在明显的线性分层和拐点现象。拐点以下由于地面摩擦对于空气流动的阻碍作用，近地面层的风速随高度的衰减明显比较高层的大。我们可以根据拟合直线的斜率计算风速垂直递增率(定

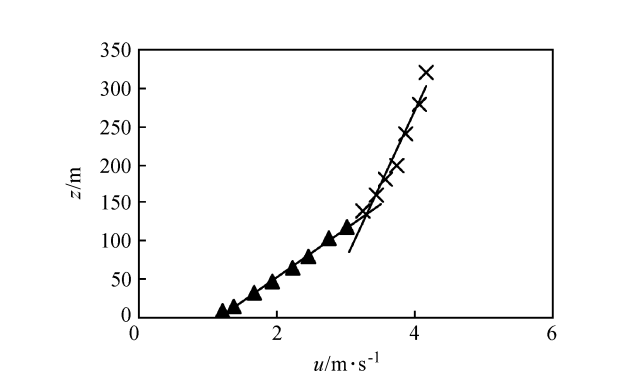


图4 2001年风速廓线分层拟合

Fig. 4 Linear fitting of wind speed profile in 2001

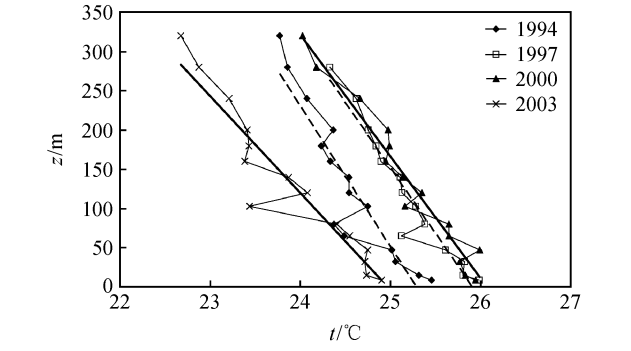


图5 1994年、1997年、2000年和2003年的平均温度廓线

Fig. 5 Average annual temperature profiles in 1994, 1997, 2000, 2003

义为 Γ_w)。 Γ_w 反映了风速在垂直方向的切变，很好地刻画了地面摩擦作用。统计高低不同层次逐年的风速垂直递减率(表1)，发现无论是在120 m以下的近地面层递增率(Γ_{wl})，还是140 m以上较高处的风速垂直递减率(Γ_{wh})都在增加，反映出随着城市化发展，城市冠层对上层风速的影响程度不断增加。

为了研究城市化发展对温度廓线的影响，统计分析了1993~2003年期间温度廓线特征，图5给出了每隔3年的1994年、1997年、2000年和2003年的夏季温度廓线。对温度廓线作线性拟合，得到了各年的温度垂直递减率，并分析了其年变化规律，统计结果见表2所示。由图5和表2分析发现，在20世纪90年代中期，随着城市化的进程的推进，平均温度廓线的形态发生了变化，主要表现在温度垂直减温率有增加的趋势。这是因为，随着城市的发展，气象塔所在的城郊结合部下垫面逐渐被完全的城市下垫面代替，下垫面热力和动力学性质发生了显著变化。城市下垫面主要是房屋和柏油路

表 1 风速垂直递增率的年际变化

Table 1 Interannual change of the vertical increasing rate of wind speed

	1993 年	1994 年	1995 年	1997 年	1998 年	1999 年	2000 年	2001 年	2002 年	2003 年
$\Gamma_{\text{wl}}/\text{s}^{-1}$	12.17	14.21	16.58	16.12	13.81	15.05	17.28	16.06	15.78	18.07
$\Gamma_{\text{wh}}/\text{s}^{-1}$	3.75	3.71	2.40	4.40	4.16	3.23	4.49	5.18	5.15	6.62

表 2 温度垂直递减率的年际变化

Table 2 Interannual change of the vertical decreasing rate of temperature

	1993 年	1994 年	1995 年	1997 年	1998 年	1999 年	2000 年	2001 年	2002 年	2003 年
$\Gamma/\text{K}\cdot\text{km}^{-1}$	4.90	4.66	5.36	5.62	5.28	6.88	6.12	6.61	6.81	7.19

表 3 空气动力学参数的年际变化

Table 3 Interannual changes of the aerodynamical parameters

	1993 年	1994 年	1995 年	1997 年	1998 年	1999 年	2000 年	2001 年	2002 年	2003 年
z_0/m	1.36	3.96	2.83	3.17	3.45	5.08	4.41	4.54	3.37	4.59
d/m	8.90	25.81	18.53	20.82	22.41	33.20	28.78	29.46	22.09	29.91
$u_* / \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	0.69	0.91	0.83	0.92	0.97	1.06	0.82	0.97	0.76	0.86

表 4 摩擦速度与平均风速所拟合直线斜率的年际变化

Table 4 Interannual change of the fitting line slopes of friction speed and average wind speed

	1993 年	1994 年	1995 年	1997 年	1998 年	1999 年	2000 年	2001 年	2002 年	2003 年
$u_* / u(10^{-2})$	6.69	9.42	5.42	9.45	10.56	19.22	10.45	13.4	8.56	11.61

面,植被稀少,在太阳辐射加热下升温很快,加之建筑物增加地表的摩擦作用,影响通风量和热力的散失,感热通量增加,导致温度垂直递减率增大。

5 城市下垫面空气动力学参数的变化

城市化的发展必然导致城市下垫面空气动力学参数的变化。关于应用气象塔资料城市下垫面的空气动力学参数的计算,前人也做过不少研究。胡非(1994)用经验公式 $d=5z_0$ 估算 1986 年前后的 z_0 (0.7 m 左右);张宏升等(1997)和高志球等(2002)分别利用 1993 年和 2001 年的超声风速仪资料计算了 z_0 (分别为 1.0 m 和 1.75 m);陆龙骅等(2002)利用 2001 年的风速梯度计算的 z_0 为 1.34 m。

本文采用统一标准的数据筛选方式和计算方法,对气象塔周围的下垫面空气动力学参数进行长时间的计算(表 3),连续动态地反映了城市化对下垫面参数的影响过程。20 世纪 90 年代到 21 世纪初,气象塔附近的空气动力学参数在逐渐增大,其中下垫面的零平面位移 d 和空气动力学粗糙度 z_0 增大的趋势表现得较为明显。零平面位移 d 由 20

世纪 90 年代初的 10 m 以下逐渐增加到后来的 20~30 m,空气动力学粗糙度也有类似的增加趋势(从 1 m 左右增大到 4~5 m)。到本世纪初,由于气象塔周围的大量密集高层建筑群的影响,此处的空气动力学粗糙度已经很大,转变为典型的城市下垫面。

图 6 是 1993 年至 2003 年摩擦速度和当时水平风速的平均值的关系。可以看出,摩擦速度和平均风速基本满足线性关系,即当平均风速增大时摩擦速度也有相应的增加。当满足近中性层结条件的数据点越多时(如 1997 年、1998 年、2001 年),这种线性就表现得越明显,相关系数 R 可以达到 0.85,有的年份中线性关系表现不明显,这可能与可供计算的数据量有关。王欣等(2003)的研究也表明,对于粗糙而复杂的城市下垫面,此种线性关系没有郊区明显。分析各年的线性拟合直线的斜率发现,摩擦速度随风速增大的变化率呈逐年上升的趋势(表 4),即平均风速相当时,2000 年前后的摩擦速度要比 20 世纪 90 年代初增大,这也很好地反映了气象塔周围建筑物的增高增多对下垫面动力参数的

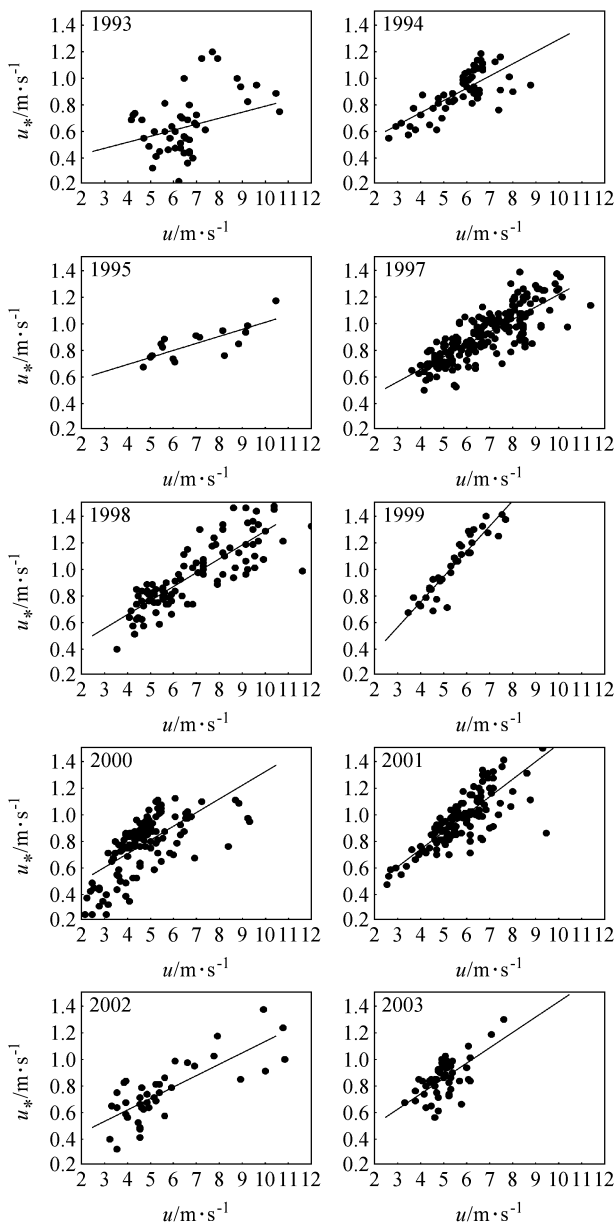


图6 各年摩擦速度与平均速度的关系

Fig. 6 The relationship between the friction speed and average wind speed in each year

影响。茅宇豪等(2006)曾研究了不同人为干扰程度的下垫面的空气动力学参数的性质,对比了粗糙下垫面(如草地)和光滑下垫面(如沙丘)对摩擦速度 u_* 的影响,有相似的结论。

图7是根据风速廓线计算出的1993年至2003年中地表粗糙度 z_0 和零平面位移 d 之和与无量纲风速的对应关系。其中反映近地面风场结构的无量纲风速用廓线资料的最高层(120 m)和倒数第二层(65 m)风速的比值表示(其比值一般在1.2

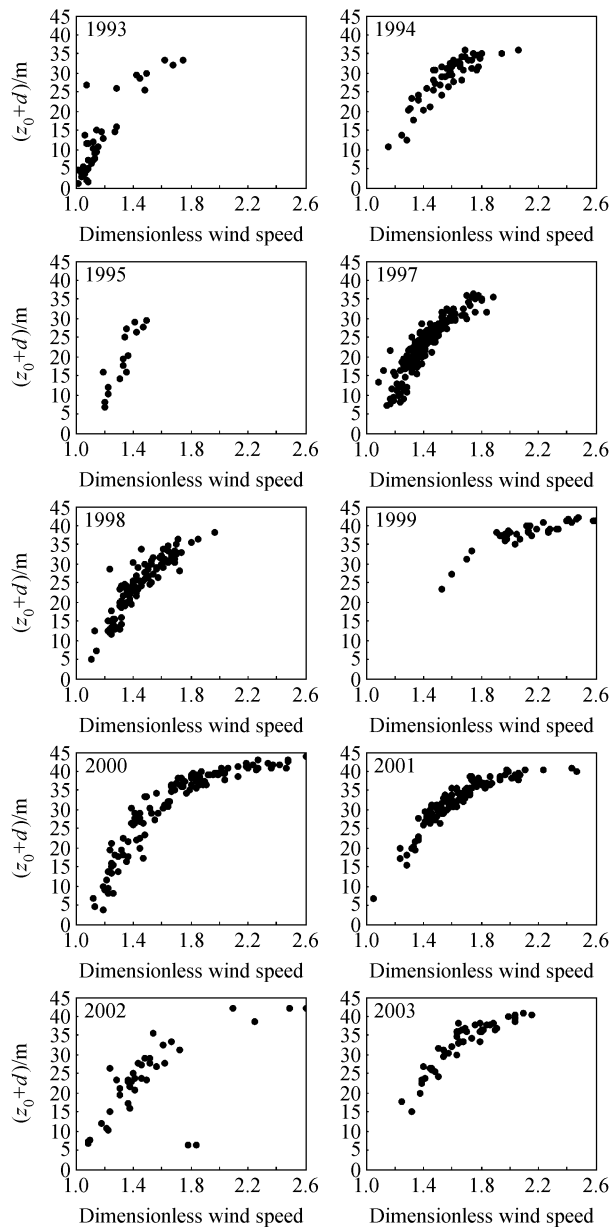


图7 z_0+d 与无量纲风速的关系

Fig. 7 The relationship between z_0+d and the dimensionless wind speed

以上)。 z_0+d 是地表粗糙度的量度,与地表粗糙元的高度和密度以及风场结构有关。可以看到,当无量纲风速大时,即风随高度切变剧烈时, z_0+d 也明显的增大,迅速由10 m以下上升到30 m左右,可见较大风速时,地表粗糙元的摩擦作用表现得较为明显。当无量纲风速增大到2以上时, z_0+d 不再随无量纲风速度增大有明显的增大,而保持在40 m左右。这可能与风速切变的增大使得高空风的动量能够较快地传向地表,从而使得地表摩擦

的影响减少有关。

6 结论

通过对中国科学院大气物理研究所大气边界层物理与大气化学国家重点实验室的北京 325 m 气象塔 1993 年~2003 年夏季逐年风速、温度、湿度观测资料的统计分析得出如下结论:

(1) 随着城市化的发展, 相对风速有逐年减小的趋势, 北京城市化的发展对 200 m 以上高度大气边界层特征影响较小, 且对 120 m 以下的高度影响较大, 并且越靠近地面, 相对风速的减小越明显, 这反映了城市建筑对近地面层空气流动的摩擦作用。

(2) 风速廓线拟合的直线的斜率, 无论是近地面层还是较高层, 风速的垂直递增率都有逐年增大的趋势, 并且粗糙下垫面的影响逐年向高层扩展。反映了随着城市化的发展城市冠层逐年对风速摩擦作用的增强。

(3) 随着城市化的发展, 温度垂直递减率也呈逐年增大的趋势, 表明城市化进程对边界层热结构的改变同样是显著的。

(4) 根据莫宁-奥布霍夫相似理论和近中性层结下风速廓线数据, 计算的各年空气动力学参数表明, 在 1993 年~2003 年的 10 余年间, 地表粗糙度 z_0 、零平面位移 d 有增大的趋势, 地表粗糙度 z_0 由不足 1 m 增加到了 4~5 m, 零平面位移 d 由不足 10 m 增加到了 20~30 m。与前人研究结果的对比表明, 城市化进程对下垫面空气动力学参数有明显的影响。

(5) 摩擦速度 u_* 和平均风速 u 的相关性研究表明, 二者基本满足线性正相关, 且摩擦速度 u_* 随平均风速 u 的增大而增大的趋势逐年明显, 这也是地表粗糙度变化导致下垫面动力性质改变的结果。

(6) 地表粗糙度、零平面位移之和与无量纲风速的关系分析表明, 当风速随高度切变剧烈时, 无量纲风速较大时 $z_0 + d$ 也明显增大, 由 10 m 以下迅速上升到 30 m 左右, 可见在较大的风速时, 地表粗糙度的摩擦作用表现得较为明显。当无量纲风速增大到 2 以上时, $z_0 + d$ 不再随无量纲风速度增大而增大, 而维持在 40 m 左右。

参考文献 (References)

Dyer A J, Bradley E F. 1982. An alternative analysis of flux-grad-

ent relationships at the 1976 ITCE [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 22: 3-19.

高志球, 卞林根, 逯昌贵, 等. 2002. 城市下垫面空气动力学参数的估算 [J]. *应用气象学报*, 13 (特刊): 26-33. Gao Zhiqiu, Bian Lin'gen, Lu Changgui, et al. Estimation of aerodynamic parameters in urban areas [J]. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 13 (Suppl.): 26-33.

Garratt J R. 1992. *The Atmospheric Boundary Layer* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 316pp.

Grimmond C S B, Oke T R. 1999. Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form [J]. *J. Appl. Meteor.*, 38: 1262-1292.

洪钟祥. 1983. 北京 325 米气象塔的测量系统 [M]. 北京: 科学出版社, 189pp. Hong Zhongxiang. 1983. *Measurement System of the Beijing 325 m Meteorology Tower* (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 189pp.

胡非. 1994. 湍流间隙性与大气边界层 [D]. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文. Hu Fei. *Turbulence interval and atmospheric boundary layer* [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences.

Kustas W P, Brutsaert W. 1986. Wind profile constants in a neutral atmospheric boundary layer over complex terrain [J]. *Boundary Layer Meteorology*, 26: 35-54.

Landsberg H E. 1981. *The Urban Climate* [M]. USA: Academic Press, 147pp.

刘树华, 黄子琛, 刘立超, 等. 1995. 空气动力学方法在湍流通量计算中的误差分析 [J]. *气象*, 21 (3): 3-6. Liu Shuhua, Huang Zichen, Liu Lichao, et al. 1995. Errors analysis of aerodynamic method in turbulent flux calculation [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 21 (3): 3-6.

陆龙骅, 卞林根, 程彦杰, 等. 2002. 冬季北京城市近地层的气象特征 [J]. *应用气象学报*, 13 (特刊): 34-42. Lu Longhua, Bian Lin'gen, Cheng Yanjie, et al. 2002. Meteorological characteristics of the ground layer in Beijing in winter [J]. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 13 (Suppl.): 34-42.

蒋维楣, 陈燕. 2007. 人为热对城市边界层结构影响研究 [J]. *大气科学*, 31 (1): 37-47. Jiang Weimei, Chen Yan. 2007. The impact of anthropogenic heat on urban boundary layer structure [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 31 (1): 37-47.

Jones P D. 1990. Assessment of urbanization effects in time series of surface air temperatures over land [J]. *Nature*, 347 (4): 169-172.

茅宇豪, 刘树华, 李婧. 2006. 不同下垫面空气动力学参数的研究 [J]. *气象学报*, 64 (3): 325-334. Mao Yuhao, Liu Shuhua, Li Jing. 2006. Study of aerodynamic parameters for different underlying surfaces [J]. *Acta Meteorological Sinica* (in Chinese), 64 (3): 325-334.

Moinn A S, Obukhov A M. 1954. Basic laws of turbulent mixing in the atmosphere near the ground [J]. *TrAkad Nauk SSSR Geofiz*

Inst, 24 (151): 163–187.

曲绍厚, 宋锡铭, 李玉英, 等. 1981. 北京城区的气象效应 [J]. 地球物理学报, 24 (2): 229–237. Qu Shaohou, Song Ximing, Li Yuying, et al. 1981. The meteorological effect in Beijing city [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 24 (2): 229–237.

Stull R B. 1988. An Introduction to Boundary Layer Meteorology [M]. USA: Kluwer Academic Publishers, 666pp.

孙继松, 舒文军. 2007. 北京城市热岛效应对冬夏季降水的影响研究 [J]. 大气科学, 31 (2): 311–320. Sun Jisong, Shu Wenjun. 2007. The effect of urban heat island on winter and summer precipitation in Beijing region [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (2): 311–320.

Thom A S. 1971. Momentum absorption by vegetation [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 97: 414–428.

王欣, 卞林根, 逯昌贵. 2003. 北京市秋季城区和郊区大气边界层参数观测分析 [J]. 气候与环境研究, 8 (4): 475–484. Wang Xin, Bian Lin'gen, Lu Changgui. 2003. A study of characteristic parameters of atmosphere boundary layer over Beijing in urban and suburban area in autumn [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 8 (4): 475–484.

张宏升, 陈家宜. 1997. 非单一水平均匀下垫面空气动力学参数的确定 [J]. 应用气象学报, 8 (3): 310–315. Zhang Hongsheng, Chen Jiayi. 1997. Estimation of aerodynamic parameters on non-single horizontal homogeneous underlying surface [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 8 (3): 310–315.

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: 30–41. Zhou Shuzhen, Yu Bixia. 1988. Shanghai urban influences on wind velocity [J]. Journal of East China Normal University (Natural Science) (in Chinese), 3: 30–41.