

城市下垫面空气动力学参数的确定*

李倩 刘辉志 胡非 洪钟祥 李爱国

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

摘 要 分析近 10 年北京 325 m 气象塔常年观测资料, 研究城市化发展对城市大气边界层动力学结构和特征的影响。结果表明, 空气动力学粗糙度和零平面位移总体是逐年递增的。气象塔西南方向的高层建筑群是 20 世纪 90 年代初期逐渐建成, 在 SW 方向, 空气动力学粗糙度和零平面位移在 90 年代增加明显, 增加的幅度 1997 年和 1999 年之间较大, 这一点与气象塔西南方向城市化的加快相符合。而在 NE、SE 和 NW 方向, 从 1987 年到 1994 年空气动力学粗糙度和零平面位移增加明显, 1994 年以后变化较小。

关键词: 空气动力学; 地面粗糙度; 零平面位移

1 引言

地面粗糙度、零平面位移等是研究大气边界层的重要参数, 这些空气动力学动力参数直接影响着大气边界层的结构变化。城市边界层的空气动力学动力参数相对较平坦均一的下垫面更为复杂。地面粗糙度的大小和下垫面粗糙元的形态学分布和空间分布密切相关^[1]。通常所讲的地面粗糙度就是指空气动力学粗糙度长度 z_0 , 其定义为风速为零的高度^[2]。对于城市下垫面, 粗糙元的分布非常复杂, 空间分布上存在很大的非均匀性, 如何确定城市下垫面地面粗糙度、零平面位移目前尚无最佳方案^[1]。

对于空气动力学粗糙度和零平面位移通常利用中性层结下梯度风速资料来计算。近年来的另一种方法是利用单一高度上快速响应的超声风温仪观测的风、温湍流资料, 根据方差随稳定度变化的规律进行计算, 这种方法又称方差法 (Variance Method)^[3]; 此方法虽能直接计算湍流特征, 但超声风温仪的观测对下垫面均匀性等条件要求较高。另外还有一种方法, 就是根据地面粗糙元的形态测量学 (morphometry) 得到地面粗糙元的分布情况来估测下垫面空气动力学参数^[1]。不同的方法有不同的优缺点。虽然用梯度观测的方法在实际应用中会有一定困难, 如真正中性层结资料很难获得, 高质量风廓线的测量困难和实施风速梯度观测的不便等, 但用此方法来估算零平面位移高度和空气动力学粗糙度仍是目前常用的基本方法之一。

北京 325 m 气象塔建成初期, 所处区域为市郊地区, 塔址周围的地形反映了市郊的一般特征, 有农田、房舍、树木、小河等, 半径 500 m 范围内无高大建筑群和树林。进入 20 世纪 80 年代末以后, 随着北京市城市建设及城市化规模的快速发展, 该地区

2002-10-31 收到, 2003-06-13 收到再改稿

* 国家自然科学基金资助项目 40105003

逐渐发展成为建筑物较多且分布不均匀的市区下垫面。本文利用气象塔多年积累的风廓线资料,分析研究城市化发展对城市下垫面空气动力学动力参数的影响。

2 北京 325 m 气象塔及观测资料

北京 325 m 气象塔位于北京市内德胜门以北约 2.7 km 的中国科学院大气物理研究所分部院内,距离北三环路由 1 km,经纬度为 ($39^{\circ}58'N$, $116^{\circ}22'E$),海拔高度 49 m。该塔建于 1974 年,1979 年 8 月正式投入使用^[4]。目前气象塔周围建起了多座高层建筑,已从当初城郊下垫面变为现在的城市粗糙复杂下垫面。气象塔现位于三环路与四环路之间,塔东面 200 m 处为南北走向的八达岭高速公路,北面 50 m 处为东西走向的北土城西路,南面 100 m 耸立一排高度为 80 m 左右的冠城园住宅区。该塔目前是国际上研究城市边界层和监测城市低层大气污染垂直分布的一个难得的理想观测平台,在城市复杂下垫面边界层及城市大气污染研究中将发挥出越来越重要的作用。

本文分析的资料是 1986~1999 年间北京 325 m 气象塔观测得到的气象资料。观测资料的采样间隔为 20 s 一次,观测资料主要包括西北测臂、东南测臂所测的水平风速,风向,相对湿度和温度。

对实际观测的资料进行质量控制是进行理论分析的必要前提^[5],其遵循的基本原则是最大限度保持资料的原有状态,对出现问题的资料进行合理的校正和订正。在这个过程中,要求所进行的工作不影响整个资料的物理意义。

首先分析不符合一般统计特征的温度和风速资料,将有问题的资料剔除,再用插值方法进行补救,在近地层中由于垂直变化剧烈,即物理量的一阶导数很大,所以采用三点线性平滑。

在处理风向资料时,由于风向变化的随机性很大,很难找到合适的诊断与订正原则,且在对订正资料做平均时,风向资料的处理中存在一个“过零问题”。在这种情况下,采用气象上常用的“最大频率风向法”,即把风向从 $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 划分为 16 个方向,然后取频率最大的平均风向为实际风向。

对于由于各种原因造成的不满足空间连续性的资料,也按照不符合一般统计特征的资料来处理,使用插值方法补救。对于不满足时间连续性的资料,首先要判断是否有特殊天气系统出现(例如冷锋过境往往会出现风、温、湿的剧烈变化),然后再根据实际情况进行处理,本文主要的处理方式也是插值方法。

3 空气动力学动力参数

3.1 北京 325 m 气象塔空气动力学粗糙度

利用风速梯度资料拟合对数风速廓线的方法,定量计算北京 325 m 气象塔空气动力学粗糙度随下垫面的改变情况。

在各年的风速资料中首先选取大风条件下的观测资料,这是由于在大风条件下,边界层通常处于近中性层结(真正处于中性层结下的廓线资料一般很难获得)。根据莫宁-奥布霍夫相似理论^[2],中性层结近地面层水平风速分布满足对数律,即

$$U = \frac{u_*}{k} \ln \frac{z-d}{z_0},$$

其中， U 为水平风速； u_* 为近地面层摩擦速度； k 是 von Karman 常数，一般取为 0.4； z 为离地面的实际高度； z_0 为地面粗糙度； d 为零平面位移。根据经验关系，通常有 $d=c z_0^{[6]}$ ，其中 c 为常数，一般取值在 5~7。

由上式可以通过最佳拟合得到 z_0 和 d ，具体步骤是：选取不同 d 值，由 U 和 $\ln(z-d)$ 作线性回归，直到 U 和 $\ln(z-d)$ 相关系数达到最大时 d_i 为零平面位移 d 的真值；由线性斜率取 u_*/k 可得 u_* ，由截距 $(u_*/k) \ln z_0$ 可得 z_0 的真值。

图 1~4 给出了不同年份地面粗糙度的结果，表 1 给出了在 SW、NE、SE 和 NW 4 个方位平均地面粗糙度随年份的变化。

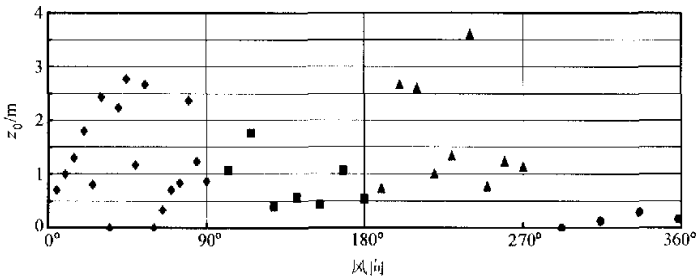


图 1 1987 年地面粗糙度随风向的变化

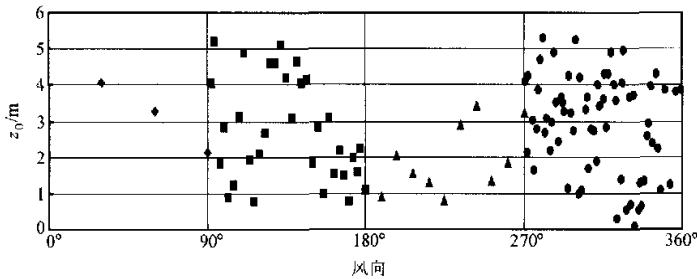


图 2 1994 年地面粗糙度随风向变化

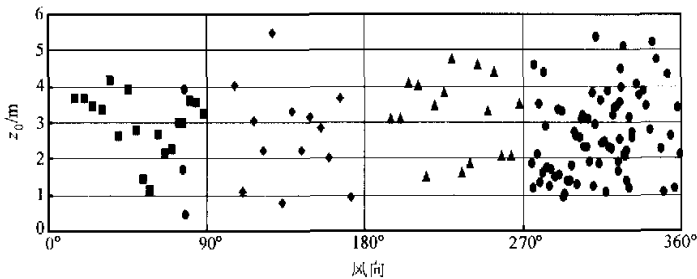


图 3 1997 年地面粗糙度随风向变化

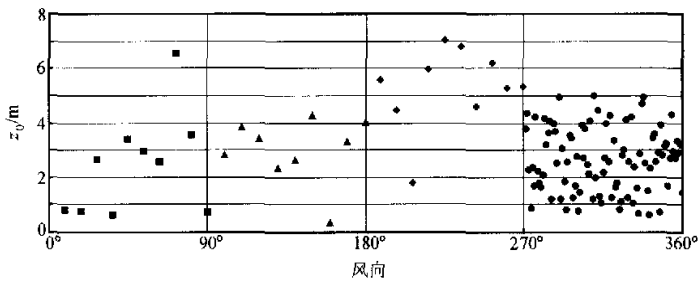


图 4 1999 年地面粗糙度随风向变化

表 1 不同风向的平均粗糙度随年份的变化 m

年份	NE	SE	SW	NW
1987	1.29	0.83	1.67	0.15
1994	3.17	2.74	1.93	2.93
1997	2.97	2.98	3.06	2.66
1999	2.46	2.99	5.31	2.75

由图 1~4 和表 1 可以看出,空气动力学粗糙度总体是逐年递增的,尤其是在 WS 方向,增加的幅度最大。这主要是由于进入 20 世纪 90 年代初期,在气象塔西南方向逐渐建成不少高层建筑群,城市化的发展使气象塔从市郊下垫面变成典型的城市下垫面。

图 5 给出了各个风向平均地面粗糙度的年际变化。由图 5 可以看出,不论是哪个方向,气象塔地面空气动力学粗糙度,从 1986 年到 1999 年呈逐年递增的趋势。1987 年开始迅速递增,1994 年后递增趋势减缓。其中 NE 方向的空气动力学粗糙度甚至有减小的趋势,这可能与该方向城市改造有关,而 1999 年的减小也许与样本平均个数有关。但是 SW 方向的空气动力学粗糙度在 1995 年后增长速度急剧升高,原因是 1994 年后,气象塔西南方向逐渐出现了平均高度在 50 m 以上的高层建筑群(冠城园)。

前面利用大风条件下平均风速廓线资料计算 z_0 , 同样,也可根据粗糙元的分布计算 z_0 。Lettau^[7]提出了一种估计空气动力粗糙度长度的方法,此方法是以粗糙元的平均垂直高度范围 (h^*),一个粗糙元出现在风中的平均轮廓或垂直截面积 (s_s),以及

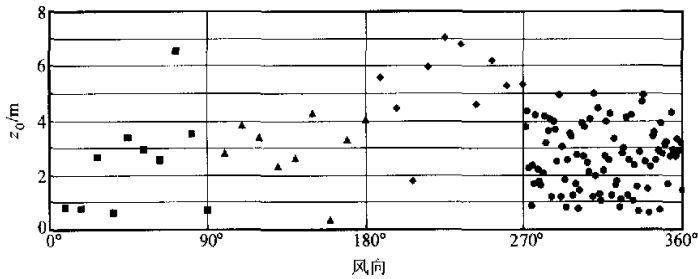


图 5 不同风向上粗糙度的年际变化趋势

每个粗糙元的地域大小 (S_L = 地面总面积与粗糙元之比) 为基础的。

$$z_0 = 0.5h^* \left(\frac{S_s}{S_L} \right), \quad (1)$$

如果粗糙元间距均匀, 不太靠近, 其高度和形状又很相似, 则这个关系式是可以采纳的。对于城市下垫面, 由于粗糙元分布不均匀, 计算 z_0 应该区分不同方位。

Kondo 和 Yamazawa^[8] 提出一个类似的关系式, 考虑了各个粗糙元的变化。令 S_i 代表该单元 i 占有的实际水平面积, h_i 代表该元的高度, 如果 N 个元占有的总面积为 S_T , 那么粗糙度长度可以近似地表示为

$$z_0 = \frac{0.25}{S_T} \sum_{i=1}^N h_i S_i = \frac{0.25}{L_T} \sum_{i=1}^N h_i w_i, \quad (2)$$

即空气动力粗糙度的近似值也可以通过对沿直线移动时所遇到的各个粗糙元求和 L_T 来做出, 这种情况下, 我们必须考虑在移动方向上每个元的纵向宽度 w_i 。

本文利用 (2) 式, 根据 2002 年城市规划图及数字地图对气象塔周边粗糙元进行评估, 估算了气象塔周边范围的地面空气动力粗糙度, 具体结果见表 2。

表 2 平均地面粗糙度 (z_0) 在不同风向的分布

m

	NE	SE	SW	NW
形态测量学估测值 (2002 年)	2.50	3.00	5.25	2.75
风速梯度资料拟合计算值 (1999 年)	2.46	2.99	5.31	2.75

由表 2 可以看出其粗糙度分布和时间间隔不长的 1999 年粗糙度在各个方向上的分布十分类似。由于气象塔周围地区实际地形情况非常复杂, 表 2 给出的只是 4 个风向上粗糙度的粗略估算。形态测量学方法对粗糙度的估算需要对下垫面粗糙元有比较详细和精确的了解, 由此充分体现了粗糙元决定粗糙度的规律。同时粗糙元的测量相对于其他观测手段, 更为灵活简便, 计算也十分方便, 这种方法不失为一种简单易行且较为可靠的定量描述空气动力学粗糙度的方法。但该方法的缺点在于完全依靠粗糙元的性质和分布, 而要非常准确地了解粗糙元的信息并不十分容易; 同时, 根据粗糙元计算粗糙度只是经验公式。

3.2 北京 325 m 气象塔零平面位移

在陆地上, 如果各个粗糙元被组合得非常密集, 那么这些粗糙元顶部的作用就好似一个位移了的地面。当地面有较高的覆盖物 (如城市建筑、树林、农作物) 时, 这时平均风速为零的高度应是粗糙度和一个与覆盖物高度有关的订正值之和, 这个订正值称为位移长度或零平面位移, 其典型值约为覆盖物高度的 2/3 到 4/5。利用 (1) 式, 应用中性层结条件下的风速廓线, 不仅可以计算出空气动力学粗糙度 z_0 , 同时也可以计算出零平面位移高度 d 。图 6~9 给出零平面位移高度随不同年份的变化, 表 3 给出平均零平面位移在 NE、SE、SW、NW 4 个方向随不同年份的变化。

从图 6~9 和表 3 可以发现, 零平面位移变化趋势也是逐年递增的, 和空气动力学粗糙度一致。SW 方向, 零平面位移高度也是 1994 年以后明显增加, 增加的幅度在 1997 年和 1999 年之间较大; NE、SE 和 NW 方向从 1987 年到 1994 年增加幅度较大, 1994 年以后变化较小。图 10 给出不同风向零平面位移高度的年际变化。

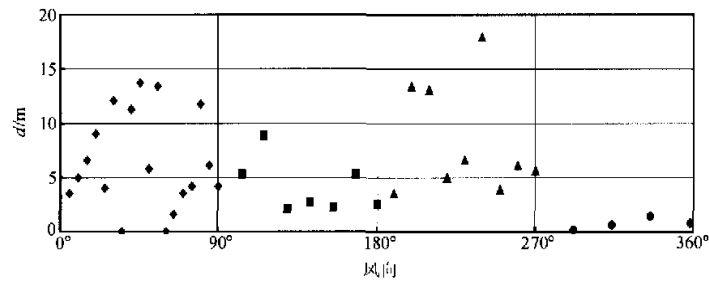


图 6 1987 年零平面位移高度随风向变化

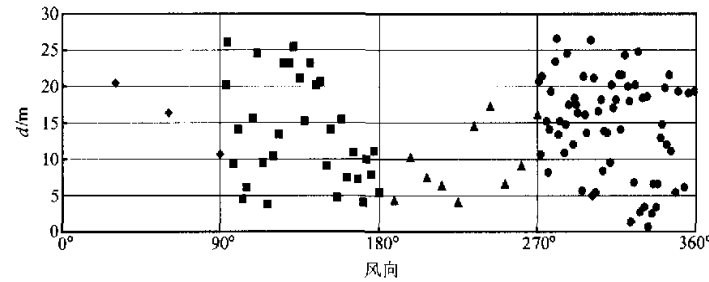


图 7 1994 年零平面位移高度随风向变化

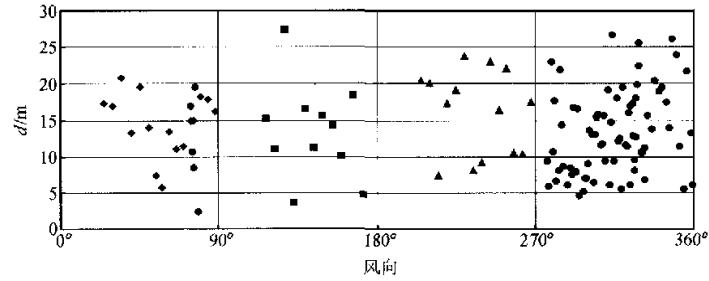


图 8 1997 年零平面位移高度随风向变化

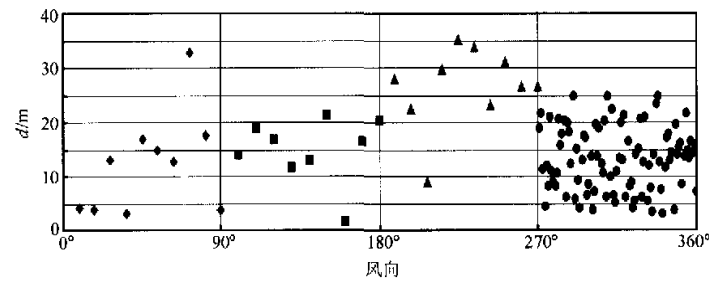


图 9 1999 年零平面位移高度随风向变化

表 3 平均零平面位移随年份的变化

m

年份	NE	SE	SW	NW
1987	6.46	4.17	8.36	0.77
1994	15.83	13.69	10.22	14.67
1997	14.87	14.90	15.30	13.15
1999	12.31	14.96	26.38	13.22

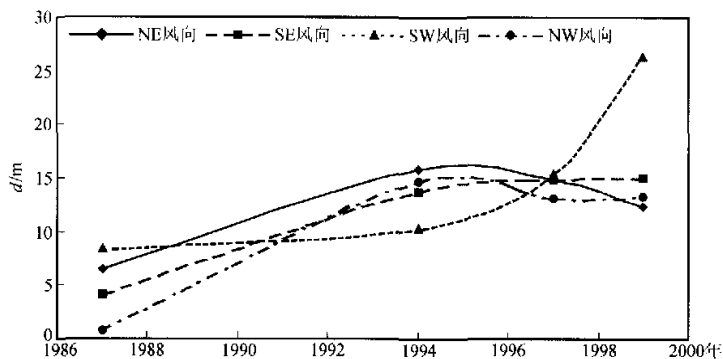


图 10 不同风向上零平面位移高度的年际变化趋势

值得指出的是,对于均匀、平坦的下垫面来说,空气动力学粗糙度和零平面位移是不随风向变化的;而对于城市下垫面,由于粗糙元在不同方位分布是不均匀的,空气动力学粗糙度和零平面位移与风向有关^[9]。北京是一个正处于快速发展的城市,气象塔所处的位置已由建塔初期(20世纪80年代左右)的市郊地区发展为市区地段,周围的高层建筑不断涌现,而其他建筑物或拆或建,变化频繁。在此背景下,用简单短期资料来分析空气动力学参数这样一种随外界环境敏感变化的物理量,且用一个平均的数据对大气边界层空气动力学参数进行简单的描述,其物理意义和物理代表性尚不能完全满足各方面研究的需要。

4 结果与讨论

本文分析近10年北京325 m气象塔常年观测资料,研究城市化发展对城市大气边界层动力学结构和特征的影响。结果表明,空气动力学粗糙度和零平面位移总体为逐年递增。气象塔西南方向的高层建筑群是20世纪90年代初期逐渐建成的,在SW方向,空气动力学粗糙度和零平面位移90年代增加明显,增加幅度1997年和1999年之间较大,这一点与气象塔西南方向城市化的加快相符合。而在NE、SE和NW方向,从1987年到1994年空气动力学粗糙度和零平面位移增加明显,1994年以后变化较小。

参 考 文 献

- 1 Grimmond, C. S. B., T. S. King, and M. Roth, Aerodynamic roughness urban areas derived from wind obser-

- vation, *Bound. -Layer Meteor.*, 1998, **89**, 1~24.
- 2 Stull, R. B., *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*, Kluwer Academic Publishers, New York, 1988.
- 3 Rotach, M. W., Determination of the zero plane displacement in an urban environment, *Bound. -Layer Meteor.*, 1994, **67**, 187~193.
- 4 洪钟祥, 北京气象塔, 北京 325 米气象塔的测量系统, 中国科学院大气物理研究所集刊, 第 11 号, 北京: 科学出版社, 1983, 1~7.
- 5 陈明、洪钟祥, 大气边界层观测资料的质量控制方案研究及其应用, 大气科学, 1993, **17**, 98~105.
- 6 Parlange, M. B., and W. Brutsaert, Regional roughness of the landes forest and surface shear stress under neutral conditions, *Bound. -Layer Meteor.*, 1989, **48**, 69~81.
- 7 Lettau, H., Note on aerodynamic roughness parameter estimation on the basis of roughness element description, *J. Appl. Meteor.*, 1969, **8**, 828~832.
- 8 Kondo, J., and H. Yamazawa, Aerodynamic roughness over an inhomogeneous ground surface, *Bound. -Layer Meteor.*, 1986, **35**, 331~348.
- 9 Wieringa, J., Representative roughness parameters for homogeneous terrain, *Bound. -Layer Meteor.*, 1993, **63**, 323~363.

The Determination of the Aero Dynamical Parameters over Urban Land Surface

Li Qian, Liu Huizhi, Hu Fei, Hong Zhongxiang, and Li Aiguo

(State key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry,
Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract The effect of the urbanization on the structure of the urban boundary layer has been examined by analyzing the data obtained from the Beijing 325 m meteorological tower in recent 10 years. We find the aerodynamical roughness length and the zero plane displacement is increasing with the development of the urbanization in recent decade years. The increase amplitude of the aerodynamical parameters over urban land surface is not the same in different direction, which is accorded with the urban construction speed in different direction.

Key words: aerodynamics; roughness length; zero plane displacement