

北京城市下垫面边界层湍流统计特征*

刘辉志 洪钟祥 P4 A

(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 分析了1998年10月在北京325 m气象塔47 m、120 m及280 m 3层取得的湍流资料, 讨论了湍流宏观统计特征量等随稳定度变化的规律。结果表明, 47 m及120 m观测到的感热通量的日变化基本一致, 城市边界层中近地层高度可达100 m左右, 这主要是由于下垫面粗糙度很大所致。同时发现当冷空气来临时, 边界层中的感热通量会有明显增大。

关键词: 城市下垫面; 湍流; 感热通量; 北京

1 前言

近几十年来, 随着理论研究的深入、观测技术的进步和一系列大型大气边界层综合观测实验的实施, 大气边界层物理研究有了较大的进展。在水平均一、粗糙下垫面(比如森林及高农作物)上空边界层大气湍流的研究取得了不少成果, 但对水平非均一、粗糙下垫面(比如城市)边界层大气湍流特征的了解较少, 这主要是由于缺乏系统的观测资料所致。城市作为人口密集地区, 工业污染物排放较集中, 近些年来由于城市快速发展带来的空气污染及局地气候变化, 已经引起了人们的极大关注。因此研究城市下垫面大气边界层显得尤为重要, 这也是当今大气边界层物理研究的热点之一。只有弄清城市大气边界层变化特征, 才能为城市空气污染的预报与治理, 为城市发展的合理化规划提供科学的依据。

城市边界层近地层可分为两层, 即粗糙次层和常通量层。粗糙次层内大气湍流是三维的, 流场受单个粗糙元及其总体的直接影响; 粗糙次层以上(常通量层内)大气湍流过程可当作水平均一下垫面来处理。因此测量湍流参数感应仪器应安放在粗糙次层以上, 这样取得的观测资料才可以代表整个粗糙下垫面, 才能采用一般微气象学原理来分析观测数据。

北京325 m气象塔建成时位于北京市城乡结合部, 这些年来随着北京市城市建设的快速发展和城市规模的不断扩大, 已基本处于市区, 已从当初城郊下垫面变为现在的城市粗糙下垫面, 是目前国际上研究城市边界层的一个难得的理想观测平台。

在中国科学院“九五”重大项目“空气污染预报的理论和方法”的资助下, 1998年10月12日~11月6日在北京325 m气象塔开展了大气污染物浓度及气象场观测, 有关大气污染物浓度分布规律见文献[1]。本文主要分析观测期间在47 m、120 m和280 m 3层高度上取得的湍流资料。湍流观测仪器采用中国科学院大气物理研究所自行开发研制

2000-06-21收到, 2000-11-06收到修改稿

* 中国科学院创新工程项目 KZCX2-204、中国科学院“九五”重大项目 KZ951-A1-403 及国家自然科学基金资助项目 40105003 共同资助

的 UAT-1 型超声风速温度仪, 利用其测得的声虚温可得到感热通量。Kaimal 和 Gaynor^[2]认为, 用超声风速仪测温具有与垂直风速分量有相同的空间分辨率及不受老化和大气污染影响等优点。同时王介民等^[3]发现在干旱与半干旱地区, 超声风速温度仪测得感热通量与用铂金丝测得的感热通量结果相符得很好, 不考虑湿度及水平风速订正而带来的感热通量误差一般不超过 10%。因此本文直接采用超声风速温度仪测感热通量, 同时忽略湿度及水平风速的影响 (在秋冬季北京地区空气很干燥, 湿度影响不大)。

2 观测实验及数据处理

近几年来北京 325 m 气象塔周围高层建筑逐年增多, 目前气象塔观测点粗糙度 z_0 平均值 (与风向有关) 大约 3.9 m, 平面向移高度 d 平均值约为 23 m^[4]。与国外城市下垫面 z_0 、 d 相比, 北京 325 m 气象塔已基本处于市区, 属于典型城市粗糙度下垫面。观测湍流场的 3 台超声风速温度仪安装高度分别为 47 m、120 m 和 280 m, 对应的 z' ($z' = z - d$) 分别为 24 m、97 m 和 257 m。这样测量湍流参数感应仪器可认为是安放在粗糙次层以上, 取得的观测资料可以认为代表整个粗糙度下垫面。数据采集利用位总线技术, 用一台 PC 机同时控制 3 层超声风速温度仪的数据采样, 这样可保证不同高度上超声风速温度仪采样同时进行。观测期间 47 m 和 280 m 高度上湍流资料有效时间长度达 300 h 以上, 120 m 上湍流资料有效时间长度为 100 h 左右, 每台超声风速温度仪采样频率均为 10 Hz。样本时间长度对计算湍流宏观统计特征量有影响, Roth^[5]每个样本时间长度取为 1 h, 一般每个样本时间长度取为 30~45 min; 本文每个样本时间长度取为 0.5 h。

原始资料处理步骤如下: 首先去掉奇异点, 再进行坐标变换, 使得坐标变换后平均横向风速 $\bar{v} = 0$, 主导风向为 x 轴; 然后计算平均风速及脉动量 u' 、 v' 、 w' 及 T' , 去掉趋势项, 得到新的脉动量 u' 、 v' 、 w' 及 T' ; 最后计算 u' 、 v' 、 w' 及 T' 的均方根值, 可得到摩擦速度 u_* 、特征温度 T_* 及奥布霍夫长度 L 等湍流统计特征量, 其中

$$u_* = (\overline{u'^2} + \overline{v'^2})^{1/4}, \quad T_* = -\frac{\overline{w'T'}}{u_*}, \quad L = \frac{-u_*^3}{k \frac{g}{T} \overline{w'T'}}$$

下面主要分析城市边界层湍流宏观统计特征量随稳定度及高度等变化规律。

3 结果分析

拖曳系数 C_D 反映下垫面粗糙状况, 其表达式为

$$C_D = (u_* / U)^2,$$

其中 u_* 为摩擦速度, U 为某一高度上的平均速度。一般来说, C_D 既是稳定度 z'/L 的函数, 又与平均风速 U 有关。图 1 给出了北京 325 m 气象塔 47 m 高度测得的所有观测期间各种稳定度条件下 u_* 与 U 变化关系。可发现拟合直线的斜率即 u_* / U 大约为 0.17 ($z' = 24$ m), 比下垫面粗糙度 $z_0 \leq 0.01$ m、 u_* / U 一般小于 0.1 要大。这与观测

点下垫面粗糙度较大相一致 ($z_0 = 3.9$ m, 比 Hogström^[6] 及 Roth^[5] 得到的城市下垫面 $u_* / U = 0.13$ 结果大一些, 主要是由于本文观测点下垫面粗糙度比前两者大所致。同时发现城市下垫面拖曳系数均比乡村大, 城市边界层中动量输送大于乡村下垫面。

3.1 方差

3.1.1 无量纲速度方差

均匀平坦下垫面近地层无量纲速度

方差随稳定度变化的规律过去讨论得很

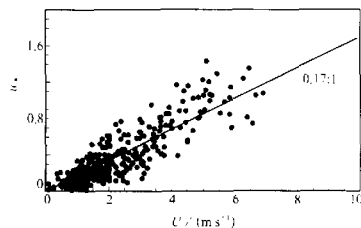


图 1 47 m 高度上 ($z' = 24$ m) u_* 随平均风速 U 的变化

多, 有关城市下垫面近地层无量纲速度方差随稳定度变化的规律, 由于缺乏观测资料, 系统研究开展得较少。Roth^[5] 进行了有关城市下垫面近地层湍流特征研究, 不过 Roth 观测资料得到的稳定度变化范围很窄 ($-1.8 < z' / L_v < -0.05$)。 σ_{u_v} / u_* 在不稳定条件下与 z' / L_v 是否存在函数关系, 过去的研究中人们的认识未完全统一。例如 Sorbjan^[7] 认为 σ_{u_v} / u_* 与 z' / L_v 之间不存在 $1/3$ 次方律, 莫宁-奥布霍夫相似理论不适用于水平风速方差, 但是 Hedde 和 Durand^[8] 在海洋上观测结果发现近地层不稳定层下 σ_{u_v} / u_* 与 z' / L_v 之间存在 $1/3$ 次方律, 最近 Andreas 等^[9] 在草地植被不均匀地面上的观测也发现, σ_{u_v} / u_* 在不稳定层结时可服从 $1/3$ 次方律。图 2 给出在 47 m 高度上 ($z' = 24$ m) 观测到 σ_{u_v} / u_* 随 z' / L 变化。Clarke 等^[10] 在工业区观测点得到拟合

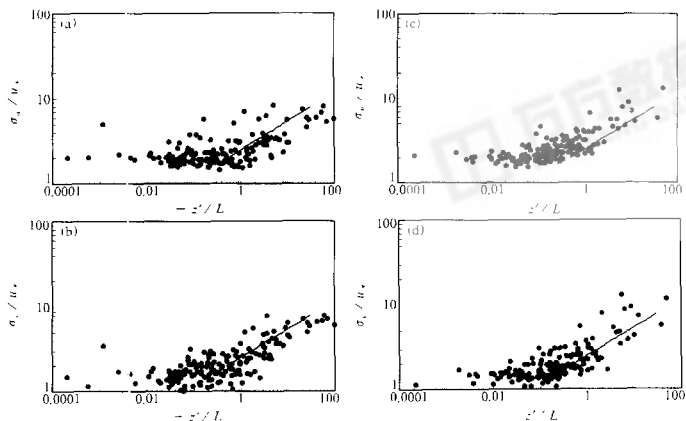


图 2 47 m 高度上 ($z' = 24$ m), 不稳定层结下 σ_{u_v} / u_* (a), σ_{u_v} / u_* (b) 和稳定层结下 σ_{u_v} / u_* (c), σ_{u_v} / u_* (d) 随 z' / L 的变化

曲线为

$$\sigma_v / u_* = 2.5(-z' / L_v)^{1/3}, \quad (z' / L_v < -1)$$

其中 L_v 为考虑湿度影响的奥布霍夫长度, 本文用 L 来代替 L_v , 即不考虑湿度的影响 (以下同)。Roth^[5] 在加拿大温哥华的观测结果提到, 当 $z' / L_v < -0.6$ 时, $\sigma_{u,v} / u_*$ 与 z' / L_v 基本上满足 $1/3$ 次方律。从图 2 可以发现, 在北京 325 m 气象塔 47 m 观测到 σ_v / u_* 在 $z' / L < -1$ 范围内基本上满足 $1/3$ 次方律, σ_u / u_* 离散度较大, 这主要可能由于水平方向速度扰动受到局地地形 (包括建筑物等) 及低频扰动的影响。

在稳定层结下, 图 2c、2d 表明, $\sigma_{u,v} / u_*$ 与 z' / L 在较稳定层结下基本上满足 $1/3$ 次方律。稳定层结下 $\sigma_{u,v} / u_*$ 与 z' / L 关系过去讨论不多, 我们在青藏高原观测结果发现稳定层结下 $\sigma_{u,v} / u_*$ 与 z' / L 满足 $1/3$ 次方律^[11]。当然由于稳定层结下存在重力内波等影响, 对此不作进一步讨论。

47 m 高度上 ($z'=24$ m) 无量纲垂直速度分量方差随 z' / L 变化见图 3。从图 3 可以看出, 本观测区 47 m 高度上得到 σ_v / u_* 在不稳定层结下随 z' / L 变化与 Clarke 等^[10] 及 Roth^[5] 观测结果基本符合, 近中性时 σ_u / u_* 值比 Panofsky 和 Dutton^[12] 在乡村下垫面的观测结果偏小一些, 这与过去其他学者得到的结果一致, 即城市下垫面无量纲垂直速度方差 σ_u / u_* 比乡村下垫面小。在稳定层结下, σ_u / u_* 与 z' / L 基本上满足 $1/3$ 次方律, 这与 Panofsky 和 Dutton^[12] 给出的稳定层结下 σ_u / u_* 近似为常数不一致。相对于不稳定层结, 稳定层结下 σ_u / u_* 离散度大些。上述分析结果表明, 在城市下垫面近地层无量纲速度分量方差随稳定度变化基本上满足莫宁-奥布霍夫相似理论。

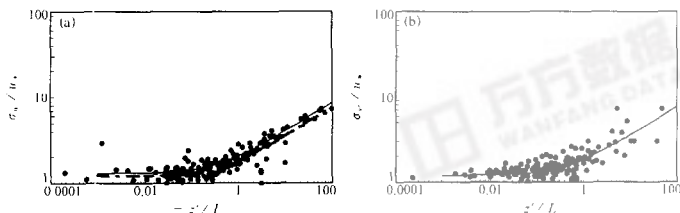


图 3 47 m 高度上 ($z'=24$ m) 随 z' / L 的变化

(a) 不稳定层结 [实线: 文献^[12], $\sigma_v = 1.25(1 - 3z' / L)^{1/3}$, 虚线: 文献^[10], $\sigma_v = 1.2(1 - 2.5z' / L)^{1/3}$]; (b) 稳定层结 [实线: Clarke 等^[10], $\sigma_v = 1.2(1 + 2.5z' / L)^{1/3}$]

图 4 给出 325 m 气象塔 120 m ($z'=97$ m) 高度上观测到的 σ_w / u_* 随稳定度的变化。在不稳定层结下, 与 Clarke 等^[10] 结果相比, 120 m 高度上 σ_u / u_* 与 z' / L 基本满足 $1/3$ 次方律, 稳定层结下 σ_u / u_* 离散度较大。与 47 m 上观测到结果相比, 120 m 上观测到无量纲垂直速度分量同样满足莫宁-奥布霍夫相似理论, 这表明 120 m 基本上与 47 m 处在同一特性层, 即近地层内。280 m 高度上观测到的 σ_u / u_* 随稳定度变化不符合 $1/3$ 次方律 (图略), 这主要由于 280 m 已处在近地层以上的边界层中, 莫宁-奥布霍夫相似理论不适用, 应采用边界层局地相似理论。

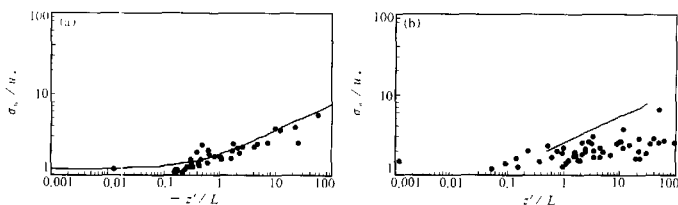


图4 120 m高度上 (\$z'=97\$ m) \$\sigma_w / u_*\$ 随 \$z'/L\$ 的变化

(a) 不稳定层结 [实线: 文献^[10], $\sigma_w = 1.2(1 - 2.5z'/L)^{1/3}$]; (b) 稳定层结 (实线: 斜率为 1/3)

3.1.2 无量纲温度方差

在自由对流条件下, 近地层无量纲温度方差与 \$z'/L\$ 存在 \$-1/3\$ 次方律^[13]。Wyngaard 和 Cote^[14]根据在堪萨斯平坦草地上的观测数据得到如下经验关系式, 即

$$\sigma_T / T_* = 0.95(-z'/L_y)^{-1/3}, \quad z'/L_y < -0.03$$

北京 325 m 气象塔 47 m (\$z'=24\$ m, \$z'/z_0=6.1\$) 高度观测得到无量纲温度方差随稳定度变化见图 5, 从图 5 可以看出, 在不稳定层结下, 我们观测结果与 Wyngaard 和 Cote^[14]在乡村下垫面得到的结果基本相符, 即在不稳定层结 \$\sigma_T / T_*\$ 与 \$z'/L\$ 满足 \$-1/3\$ 次方律。稳定层结下, \$\sigma_T / T_*\$ 较离散, 随 \$z'/L\$ 无明显变化规律。

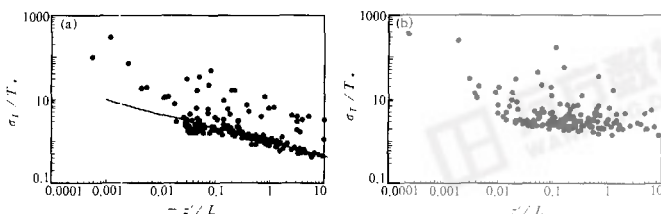


图5 47 m高度上 (\$z'=24\$ m) \$\sigma_T / T_*\$ 随 \$z'/L\$ 的变化

(a) 不稳定层结; (b) 稳定层结

图 6 给出 120 m 高度上 (\$z'=97\$ m, \$z'/z_0=24.5\$) \$\sigma_T / T_*\$ 随 \$z'/L\$ 的变化关系。结果表明在不稳定层结下, 120 m 高度上 \$\sigma_T / T_*\$ 与 \$z'/L\$ 仍满足 \$-1/3\$ 次方律, 稳定层结下由于资料太少, 无明显变化规律。

3.2 感热通量

利用超声风速温度仪测得声虚温可求得感热通量, 在半干旱或干旱地区, 对超声风速温度仪测得的感热通量不作湿度及水平风速的订正, 误差在 10% 以内^[3]。感热通量 $H = \rho c_p \overline{w'T'}$, 其中 $c_p = 1.005 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 。

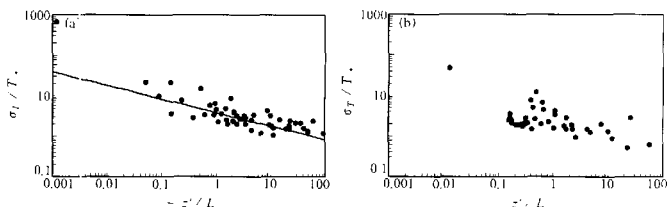


图6 120 m高度上($z'=97$ m) σ_s / T 随 z' / L 的变化
(a) 不稳定层结; (b) 稳定层结

图7给出观测期间10月15~17日3天在47 m、120 m和280 m三高度上观测到的感热通量日变化。从图7可以发现, 47 m和120 m两高度上观测到的感热通量日变化基本一致, 280 m高度上感热通量日变化与前两层有差别。这再次表明47 m和120 m基本处于同一特性层, 即常通量层, 因此在粗糙城市下垫面大气边界层近地层厚度可达100 m以上, 这主要由于下垫面粗糙度大所致($z_0=3.9$ m)。另外从平均场风速分布可见(图略), 在17日4时开始, 47 m高度上风速由前一时刻 3 m s^{-1} 增大至 6 m s^{-1} (120 m高度上风速由前一时刻 5 m s^{-1} 增大至 10 m s^{-1})。从17日04:00开始到17日16:00有一次冷锋过境。从图7还可以看出, 当冷锋来临时, 边界层中感热通量有明显增大, 在47 m、120 m及280 m三高度上均如此。这主要是由于冷锋侵入一般从边界层上部开始, 逐渐扩展到边界层下部, 降温亦首先从上层开始。此时大气稳定度参数 z' / L 近似为零, 但热量通量最大值可达 150 W m^{-2} 以上, 这主要是由于此时大气边界层热力结构处于不稳定状态的缘故。因此当冷锋来临时, 边界层内存在剧烈的热量交换。

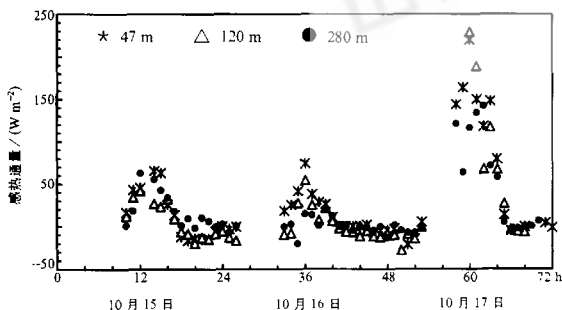


图7 47 m、120 m和280 m三高度上感热通量的日变化

4 小结

本文分析了 1998 年 10 月~11 月北京 325 m 气象塔 47 m、120 m 和 280 m 3 层取得的湍流资料, 讨论了湍流宏观统计量等随稳定度变化的规律。结果表明在不稳定层结下, 城市下垫面近地层无量纲速度分量、温度方差随稳定度变化基本上满足莫宁-奥布霍夫相似理论, 城市下垫面无量纲垂直速度方差比乡村下垫面小, 城市下垫面拖曳系数比乡村下垫面大, 城市边界层中动量输送大于乡村边界层。还发现 47 m 及 120 m 观测到的感热通量的日变化基本一致, 表明城市边界层中近地层高度可达 100 m 左右, 这主要是由于下垫面粗糙度很大所致。同时发现当冷空气来临时, 边界层中的感热通量会有明显的增大。

致谢: 感谢中国科学院大气物理研究所大气边界层探测部同志提供的宝贵的观测资料及支持。

参 考 文 献

- 1 刘小红、洪钟祥, 北京气象塔秋季大气 O_3 、 NO_x 及 CO 浓度变化的观测实验, 自然科学进展, 2000, 10(4), 338~342.
- 2 Kaumal, J. C. and J. E. Gaynor, Another look at sonic anemometer / thermometer, *Bound.-Layer Meteor.*, 1991, 56, 401~411.
- 3 王介民、刘晓虎、祁永强, 应用涡旋相关方法对戈壁地区湍流输送特征的初步研究, 高原气象, 1990, 9(2), 120~129.
- 4 殷达中、洪钟祥, 北京地区严重污染状况大气边界层结构与参数研究, 气候与环境研究, 1999, 4(3), 303~307.
- 5 Roth, M., Turbulent transfer relationships over an urban surface. Part II: Integral statistics, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1993, 119, 1105~1120.
- 6 Hogstrom, U., H. Bergstrom and H. Alexandersson, Turbulence characteristics in a near neutrally stratified urban atmosphere, *Bound.-Layer Meteor.*, 1982, 23, 449~472.
- 7 Sorbjan, Z., *Structure of the Atmospheric Boundary Layer*, Englewood Cliffs, N. J.: Prentice Hall, 1~317.
- 8 Hedde, T. and P. Durand, Turbulence intensities and bulk coefficients in the surface layer above the sea, *Bound.-Layer Meteor.*, 1994, 71, 415~432.
- 9 Andreas, E., R. J. Hill, J. R. Gosz, R. I. Moore, W. D. Otto and A. D. Sarma, Statistics of surface-layer turbulence over terrain with meter-scale heterogeneity, *Bound.-Layer Meteor.*, 1998, 86, 379~408.
- 10 Clarke, J. F., J. K. S. Ching and J. M. Godowitch, An experimental study of turbulence in an urban environment, Tech. Rep. U. S. E. P. A., Research Triangle Park, N. C., NMS PB 2260855.
- 11 刘辉志、洪钟祥, 青藏高原政则地区近地层湍流特征, 大气科学, 2000, 24(3), 289~300.
- 12 Panofsky, H. A. and J. A. Dutton, *Atmospheric Turbulence*, New York: John Wiley and Sons, 1984, 1~397.
- 13 Hill, R. J., Implications of Monin-Obukhov similarity theory for scalar quantities, *J. Atmos. Sci.*, 1989, 46, 2236~2244.
- 14 Wyngaard, J. C. and O. R. Cote, The budgets of turbulent kinetic energy and temperature variance in the atmospheric surface layer, *J. Atmos. Sci.*, 1971, 28, 190~201.

Turbulent Statistical Characteristics over the Urban Surface

Liu Huizhi and Hong Zhongxiang

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

Abstract The turbulent data obtained at the height of 47 m, 120 m, and 280 m at the Beijing 325 m meteorological tower in October–November 1998 have been analysed in this study. The variations of the turbulent statistics with the stability have been investigated. The results show that diurnal variations of the sensible heat flux observed at 47 m is almost the same as that observed at 120 m. It shows that the height of the urban surface layer can be over 100 m due to the large roughness length over the urban surface. At the same time, it is found that the sensible heat flux has a distinct increase when a cold front comes.

Key words: urban boundary layer; turbulent statistics; sensible heat flux; Beijing

万方数据
WANFANG DATA