

刘熙明, 胡非, 全利红, 等. 2009. 局地相似性关系在城市边界层中的适用性验证 [J]. 气候与环境研究, 14 (2): 183–191. Liu Ximing, Hu Fei, Quan Lihong, et al. 2009. Validation of the local similarity in urban boundary layer [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14 (2): 183–191.

局地相似性关系在城市边界层中的适用性验证

刘熙明^{1,2} 胡非² 全利红² 曹晓彦³ 窦军霞³

1 江西省气象科学研究所, 南昌 330046

2 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

3 中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089

摘要 利用中国科学院大气物理研究所 325 m 铁塔在 2003 年 8 月期间 47 和 120 m 高度上的湍流观测资料, 对局地相似性关系在城市边界层的适用性进行了检验。结果表明: 47 m 高度仍属于城市冠层之上的近地面常通量层, 莫宁-奥布霍夫相似性关系基本适用。但 120 m 高度则基本属于近地面层与自由对流层之间的过渡高度, 在该处, 相似性关系部分适用。同时, 给出了不同的层结稳定度条件下 47 和 120 m 高度上的无量纲速度和温度标准差与稳定度之间的局地相关表达式。

关键词 城市边界层 湍流 局地相似性

文章编号 1006-9585 (2009) 02-0183-09 **中图分类号** P404 **文献标识码** A

Validation of the Local Similarity in Urban Boundary Layer

LIU Ximing^{1,2}, HU Fei², QUAN Lihong², CAO Xiaoyan³, and DOU Junxia³

1 *Meteorological Sciences Institute of Jiangxi Province, Nanchang 330046*

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

3 *Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089*

Abstract The turbulent data at 47 m and 120 m of Beijing 325 m meteorological tower in August 2003 have been employed to validate the local similarity in urban boundary layer. The results show that the 47 m height is in the urban surface layer, and the Monin-Obukhov similarity is basically valid. However, the 120 m height may be the transitional height from the surface layer to the free convective layer, and the Monin-Obukhov similarity is partially valid. As a result of, the local correlative formulas between the normalized standard deviations of wind speed (temperature) and the stability have been presented.

Key words urban boundary layer, turbulence, local similarity

1 引言

城市作为人类居住最密集的地方, 具有显著

的局地气候特征 (刘熙明等, 2006a, 2006b), 如: 城市热岛问题、城市空气污染问题等。由于排放比较集中, 许多重要的大气污染物 (例如汽车尾气) 是通过近地面边界层湍流作用扩散至更

收稿日期 2008-01-15 收到, 2009-01-16 收到修定稿

资助项目 2008 年度城市气象科学研究基金项目 UMRP200810 以及国家自然科学基金资助项目 40605006、40775018

作者简介 刘熙明, 男, 1963 年出生, 博士, 高级工程师, 主要从事城市气象和大气边界层物理研究。E-mail: jx_liuximing@126.com

高处。因此,研究城市边界层湍流特征具有一定的实际意义。

莫宁-奥布霍夫相似性理论指出:各种大气参数和统计量,例如湍流宏观量、动能和通量等,都可能是稳定度参数 z/L 的函数。Businger et al. (1971) 利用 Kansas 试验资料给出了近地层具体的莫宁-奥布霍夫相似理论通量廓线关系,Dyer et al. (1982) 利用 ITCE 试验资料对莫宁-奥布霍夫相似理论通量廓线关系进行了完善,使得该理论在边界层领域中有了极大的实际应用价值。然而,莫宁-奥布霍夫相似理论仅在近于定常和下垫面水平均匀的条件下成立,对于具有复杂下垫面的城市边界层来说,莫宁-奥布霍夫相似理论是否适用受到严峻的挑战(刘熙明等,2007)。胡隐樵等(1993)曾利用日本筑波 213 m 气象塔上的湍流资料对局地相似性关系在城市边界层中的适用性进行了验证,认为塔层资料能较好的遵从局地相似性规律,原则上是更为普遍适用的特征尺度。刘辉志等(2002)应用 1998 年 10~11 月中国科学院大气物理研究所 325 m 铁塔上 3 层(47、120 和 280 m)超声风速温度仪测到的湍流资料,对北京城市下垫面边界层湍流统计特征进行了分析,得到:47 m 高度上无量纲速度分量方差随稳定度变化基本满足莫宁-奥布霍夫相似理论,120 m 高度上,无量纲垂直速度方差随稳定度变化也基本满足莫宁-奥布霍夫相似理论,但 280 m 高度上莫宁-奥布霍夫相似理论不适用。但刘辉志等(2002)仅对湍流资料进行了定性分析。由于近年来北京城市化进展非常快,铁塔附近的零平面位移 d ,粗糙度 z_0 等不断增加,城市冠层高度不断抬升(殷达中等,1999;胡非等,2003;李倩等,2003),其大气边界层湍流特征也在不断发生变化。高志球等(2002)应用 2001 年的资料得到,铁塔观测点的粗糙度 z_0 平均值大约为 1.75 m,零平面位移高度 d 平均值约为 40.12 m;并认为随着铁塔附近建筑物的增高,47 m 高度处的湍流观测将不具备代表性,而应该在 60 m 高度上安装超声仪。因此,有必要对相似性关系在城市边界层的适用性进行验证。Tillman (1972) 认为,莫宁-奥布霍夫相似性关系适用于城市、郊区等各种下垫表面上常通量层中较高的观测高度,并建议在不稳定层结下,采用如下表达式:

$$\frac{\sigma_\theta}{\theta_*} = -C_1 [C_2 - (z-d)/d]^{-\frac{1}{3}}, \quad (1)$$

其中, σ_θ/θ_* 为无量纲位温标准差, z 是观测高度, d 是零平面位移, L 是 Monin-Obukhov 长度, C_1 、 C_2 分别为拟合系数。胡非等(1999)对北京市城市冠层中湍流运动的统计特征进行分析得到:城市冠层中无论白天还是夜晚,垂直方向的湍流强度和湍流脉动风速标准差均小于水平方向,水平方向的相应湍流特征量则总是接近相等,而湍流脉动强度和标准差几乎均大于平坦下垫面边界层的,莫宁-奥布霍夫相似理论在城市冠层中不适用。刘树华等(2005)曾应用 EBEX2000 试验资料,对棉花植被下垫面条件下 2 层不同高度的湍流宏观量、湍流动能和感热通量与稳定度的关系进行了分析,并与 Kansas 试验结果进行了比较。本文的目的就是利用 325 m 铁塔 47 和 120 m 高度上的湍流观测资料,分析北京城市边界层中各湍流特征统计量与稳定度之间的关系并进行比较,同时对相应的高度进行局地相似性定量分析,以期揭示城市边界层中湍流统计量的特征以及城市化进程对边界层湍流特征统计量的影响。

2 资料与处理

UAT-1 型超声风速温度仪是由中国科学院大气物理研究所自行研制的湍流观测仪器,采样频率为 10 Hz。该仪器性能稳定,技术指标达到国外同类先进产品的水平。在中国科学院大气物理研究所 325 m 铁塔的 47、120 和 280 m 3 层高度上分别安装了 3 套 UAT-1 型超声风速温度仪,对北京城市边界层的近地层湍流进行同步观测。

本文所用资料来自安装在 325 m 铁塔 47 和 120 m 高度上的 UAT-1 型超声风速温度仪 2003 年 8 月 16~22 日期间观测到的湍流资料,其中由于天气原因,19 日的资料被剔除。

随着北京市城市化的迅速发展,325 m 铁塔周围的高层建筑不断增加。根据殷达中等(1999)对铁塔 1998 年夏季资料的研究,铁塔观测点的粗糙度 z_0 平均值大约为 3.9 m,零平面位移高度 d 约为 26 m,325 m 铁塔观测点的零平面位移高度在逐年增大。本文中,零平面位移值按照高志球等(2002)得到的 40.12 m 设定,因此 47 和 120

m 层超声风速温度仪对应的 $z-d$ 分别为 7 和 80 m。每个样本时间长度取 0.5 h。

文中对原始资料的处理步骤是: 首先去掉奇异点, 再进行坐标旋转, 使得坐标旋转后的 $\bar{v}=0$ 、 $\bar{w}=0$ 。然后计算平均风速和脉动量 μ' 、 v' 、 w' 、 T' 以及方差:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} (A_i - \bar{A})^2},$$

($A=u, v, w$; N 为 30 min 内的样本数), 并最终计算下列湍流特征量:

$$u_* = [(\overline{u'w'})^2 + (\overline{v'w'})^2]^{\frac{1}{4}}, \quad (2)$$

$$T_* = -\frac{\overline{w'T'}}{u_*}, \quad (3)$$

$$L = -\frac{k(z-d)\frac{g}{T}\overline{w'T'}}{u_*^3}, \quad (4)$$

$$\zeta = \frac{z-d}{L}, \quad (5)$$

$$I_i = \frac{\sigma_i}{\bar{U}}, \quad (6)$$

$$\frac{\sigma_i}{u_*}, \quad (7)$$

$$C_D = \left(\frac{u_*}{\bar{U}}\right)^2, \quad (8)$$

$$H = c_p \rho \overline{w'T'}, \quad (9)$$

其中, ρ 为空气密度; c_p 为空气比热; $\bar{U}$ 为平均风速; u_* 和 T_* 分别为摩擦速度和温度尺度; L 为 Monin-Obukhov 长度; ζ 为无量纲大气层结稳定度参数, z 、 d 分别为观测高度和零平面位移; I_i

为 u 、 v 、 w 方向的湍流强度; σ_i/u_* 为 u 、 v 、 w 方向的风速无量纲标准差; C_D 是拖曳系数; H 为感热通量。

3 结果分析

图 1 分别为 47 和 120 m 高度上的 u_* 、 T_* 随稳定度 ζ 的变化。从图 1a 中可以看到: 47 m 高度上, u_* 在近中性情况下最大; 在不稳定条件下随着不稳定度的增强近似线性减小; 在稳定条件下随着稳定度的增强先迅速而后缓慢地减小, 近似曲线变化。120 m 高度上, u_* 随稳定度的变化比较离散, 但还是可以看到, u_* 在弱不稳定情况下 ($\zeta \approx -0.5$) 最大, 在不稳定条件下随着不稳定度的增强而减小; 而在稳定条件下, 随着稳定程度的增强先迅速减小而后略有增大, 同样具有近似曲线的变化。

由图 1b 可以看到, 2 个高度上的 T_* 在不稳定情况下均为负值, 稳定情况下均为正值, 近中性时约为 0。47 m 高度上, T_* 随着不稳定程度的增强迅速减小, 近似线性变化; 而在稳定情况下, 随着稳定程度的增强变化不大。120 m 高度上, T_* 在稳定情况下与 47 m 高度相似, 但在不稳定情况下, 虽然随着不稳定程度的增大有所减小, 但总体看, T_* 与稳定度之间的关系很离散。

根据风速和温度通量廓线关系:

$$u_* = (kz/\Phi_m)(\partial \bar{u}/\partial z),$$

$$T_* = (kz/\Phi_h)(\partial \bar{T}/\partial z).$$

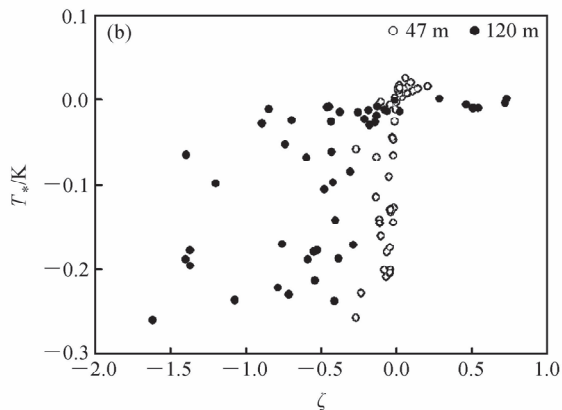
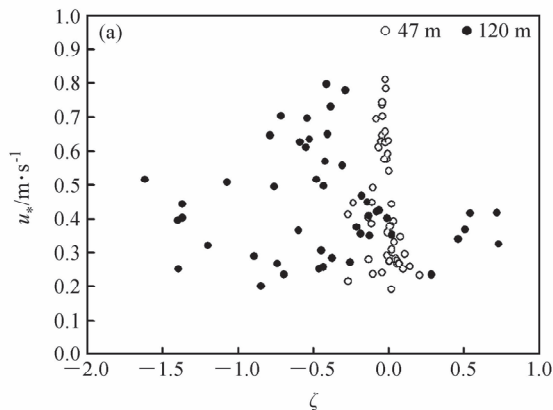


图 1 47 和 120 m 高度上 (a) u_* 、(b) T_* 随稳定度 ζ 的变化

Fig. 1 Changes of (a) u_* and (b) T_* with stability ζ at the height of 47 m and 120 m

式中 Φ_m 和 Φ_h 分别为风速和温度通量函数。Hogstrom (1988) 的研究表明, Φ_m 和 Φ_h 在不稳定时值最小, 随着层结由不稳定向中性过渡缓慢增加 (Φ_h 增加得更快些), 稳定时增加迅速。虽然 Φ_m 不稳定时值最小, 但由于不稳定时风速梯度很小, 因此 u_* 并不是最大; 同样, 不稳定时温度梯度为负值, 随着地面温度的不断升高近地面层的温度梯度不断增大, Φ_h 的值则在减小, 导致 T_* 迅速增大 (负值)。近中性时, 边界层风速梯度大, 温度梯度 $\partial \bar{T} / \partial z = 0$, 所以此时 u_* 最大, $T_* = 0$; 而稳定边界层中, 虽然风速梯度很大, 但由于 Φ_m 随着稳定度的增加迅速增大, 导致 u_* 很快减小; 同样, 稳定层结时, $\partial \bar{T} / \partial z > 0$, $T_* > 0$, 随着稳定度的增加温度梯度增大, Φ_h 也在增大。

可以发现, 47 m 高度上, u_* 、 T_* 随稳定度 ζ 的变化与刘树华等 (2005) 的结果是一致的, 即仍然具有近地面层的相似性关系; 而 120 m 高度上, u_* 、 T_* 随稳定度 ζ 的变化与刘树华等 (2005) 的结果部分一致。说明 47 m 高度属于城

市冠层以上的近地面层, 莫宁-奥布霍夫相似理论仍然适用; 而 120 m 高度基本属于近地面层向自由对流层转换的另一特性层, 在该高度上莫宁-奥布霍夫相似理论部分适用。

图 2 和 3 分别为 47 m 高度无量纲速度标准差 σ_u/u_* 、 σ_v/u_* 、 σ_w/u_* 以及无量纲温度标准差 σ_T/T_* 在稳定和不稳定层结情况下的特征。可以看到, 无论是稳定层结还是不稳定层结, 47 m 高度上, σ_u/u_* 、 σ_v/u_* 、 σ_w/u_* 与 ζ 的关系基本满足 1/3 幂律; 而 σ_T/T_* 与 ζ 的关系基本满足 -2/3 幂律, 而不是一 1/3 幂律。

分别对 47 m 高度上不同层结条件下的 σ_u/u_* 、 σ_v/u_* 、 σ_w/u_* 以及 σ_T/T_* 与 ζ 进行拟合, 得到 47 m 高度上的局地相似关系如下:

稳定情况下:

$$\frac{\sigma_u}{u_*} = 1.77(1 + 10.15\zeta)^{\frac{1}{3}}, \tag{10}$$

$$\frac{\sigma_v}{u_*} = 1.86(1 + 4.24\zeta)^{\frac{1}{3}}, \tag{11}$$

$$\frac{\sigma_w}{u_*} = 1.5(1 + 3.58\zeta)^{\frac{1}{3}}, \tag{12}$$

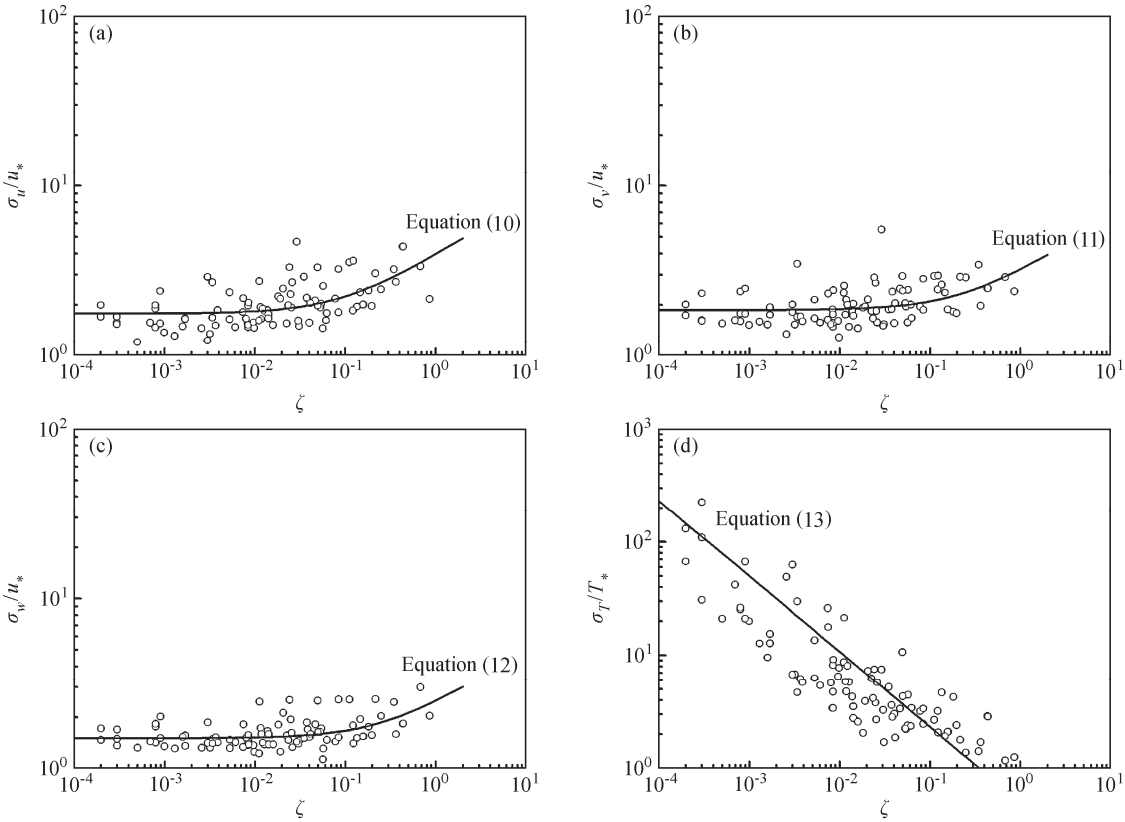


图 2 47 m 高度上稳定层结条件下无量纲风速和温度标准差 (a) σ_u/u_* 、(b) σ_v/u_* 、(c) σ_w/u_* 、(d) σ_T/T_* 随稳定度的变化

Fig. 2 Changes of (a) σ_u/u_* , (b) σ_v/u_* , (c) σ_w/u_* , (d) σ_T/T_* with stability at the height of 47 m under stable condition

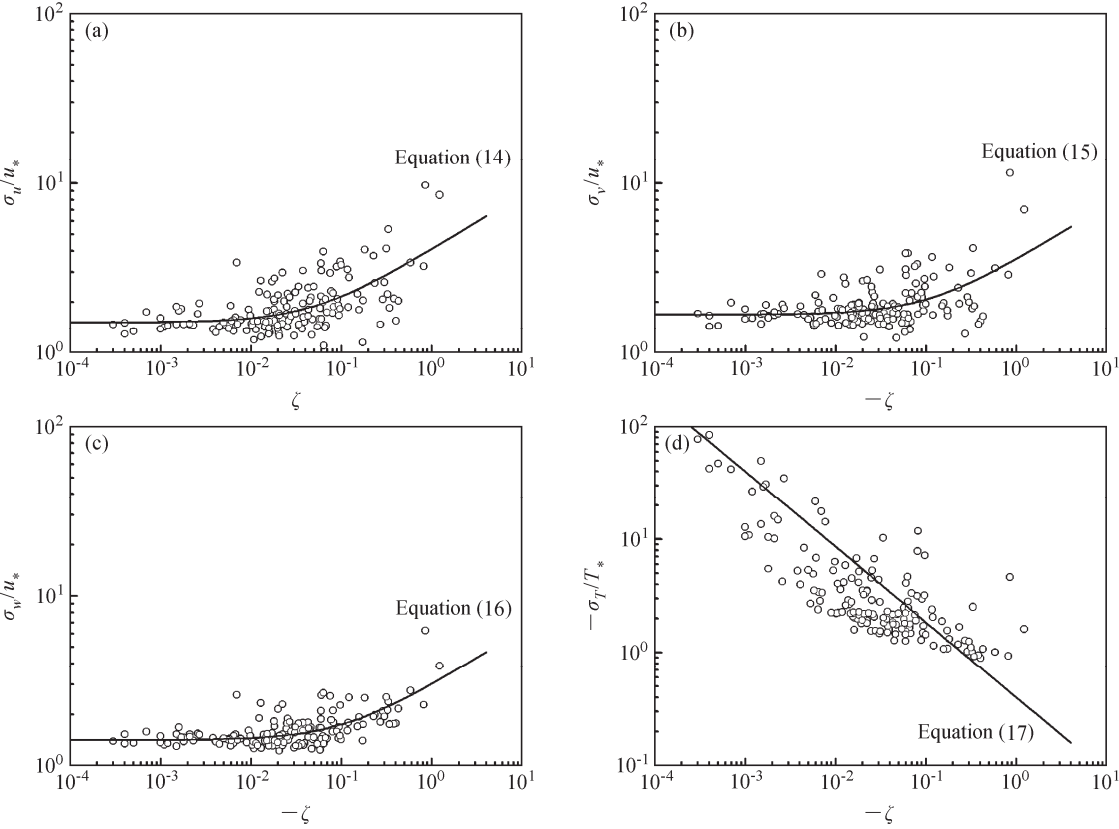


图 3 同图 2，但为不稳定层结
Fig. 3 Same as Fig. 2, but for under unstable condition

$$\frac{\sigma_T}{T_*} = 0.5\zeta^{-\frac{2}{3}}. \quad (13)$$

不稳定情况下：

$$\frac{\sigma_u}{u_*} = 1.51(1-19.0\zeta)^{\frac{1}{3}}, \quad (14)$$

$$\frac{\sigma_v}{u_*} = 1.68(1-8.7\zeta)^{\frac{1}{3}}, \quad (15)$$

$$\frac{\sigma_w}{u_*} = 1.41(1-8.8\zeta)^{\frac{1}{3}}, \quad (16)$$

$$\frac{\sigma_T}{T_*} = -0.4|\zeta|^{-\frac{2}{3}}. \quad (17)$$

分析 120 m 高度上的无量纲速度和温度标准差随 ζ 的变化可以发现，在稳定情况下，相似性很差，但在不稳定情况下，它们之间仍然存在一定的相似性，如图 4 和 5 所示。从图 4 可以看到，稳定层结情况下，除 σ_T/T_* 相似性稍好些，其他各无量纲标准差很离散，基本不满足标度律。

图 5 为不稳定层结情况下，速度和温度的无量纲标准差随稳定度的变化。可以看到，在不稳定层结条件下，速度无量纲标准差与稳定度的关系基本满足 $1/3$ 幂律，温度无量纲标准差与稳定

度的关系更满足 -0.58 幂律。但从图中可以看到，速度和温度的无量纲标准差与稳定度的关系比较离散。

对 120 m 高度上不稳定层结条件下的 σ_u/u_* 、 σ_v/u_* 、 σ_w/u_* 以及 σ_T/T_* 与 ζ 进行拟合，可以得到 120 m 高度上的局地相似关系如下：

$$\frac{\sigma_u}{u_*} = 1.45(1-1.336\zeta)^{\frac{1}{3}}, \quad (18)$$

$$\frac{\sigma_v}{u_*} = 2.19(1-0.018\zeta)^{\frac{1}{3}}, \quad (19)$$

$$\frac{\sigma_w}{u_*} = 1.28(1-1.0\zeta)^{\frac{1}{3}}, \quad (20)$$

$$\frac{\sigma_T}{T_*} = 1.9|\zeta|^{-0.58}. \quad (21)$$

图 6 为 47 和 120 m 高度上各种稳定度条件下平均湍流强度 I_u 、 I_w 和摩擦速度 u_* 、温度尺度 T_* 的日变化。从图 6 (a) 可以看到，47 m 高度上的湍流强度 I_u 、 I_w 均比 120 m 高度上的大，说明 47 m 高度上的湍流总体上比 120 m 上的强，尤其是 10:00~19:00 (北京时间，下同) 之间，差距可达到 0.5 左右。这是由于白天强的太阳短波

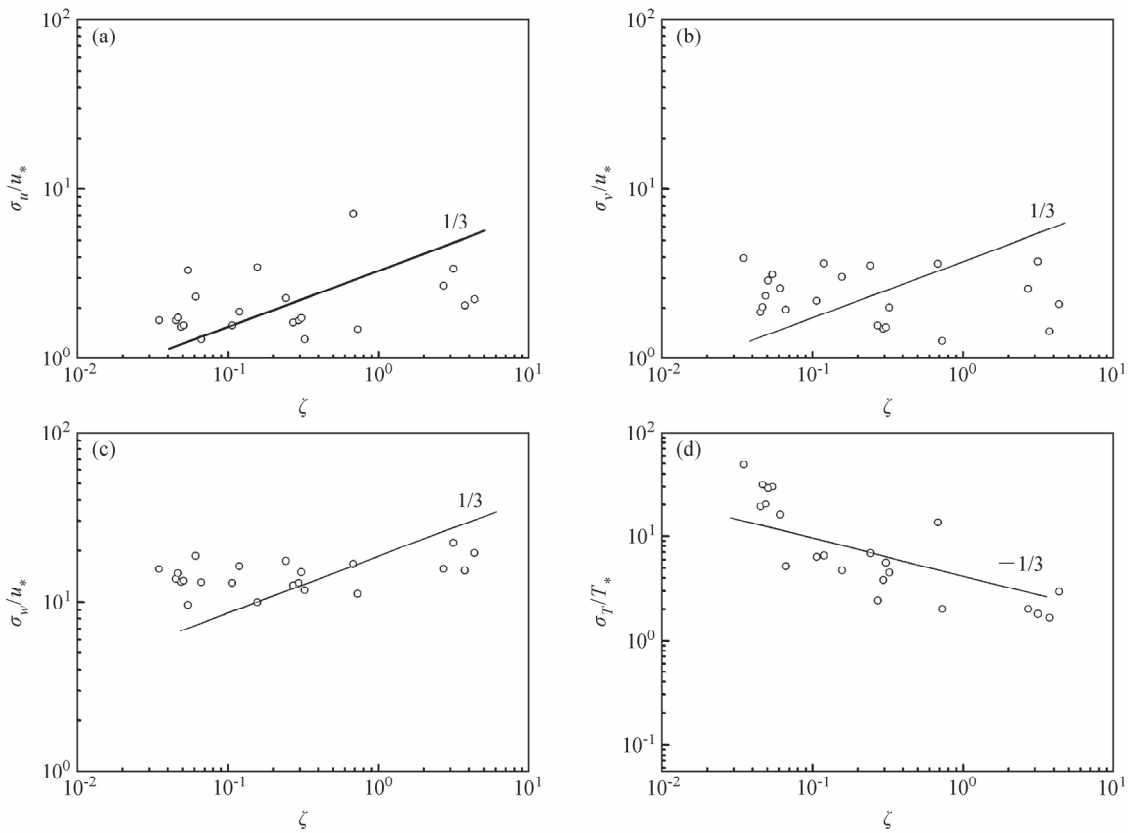


图 4 120 m 高度上稳定层结条件下无量纲风速和温度标准差 (a) σ_u/u_* 、(b) σ_v/u_* 、(c) σ_w/u_* 、(d) σ_T/T_* 随稳定度的变化
Fig. 4 Changes of (a) σ_u/u_* , (b) σ_v/u_* , (c) σ_w/u_* , (d) σ_T/T_* with stability at the height of 120 m under stable condition

辐射导致近地面层的湍流加强，但到了夜间，随着稳定边界层的形成，两层之间的湍流强度明显趋于接近。对于同一高度的湍流强度 I_u 比 I_w 大。另外，47 m 高度上 I_u 日变化不明显，仅在夜间 21:00~01:00 有较小的变化， I_w 在白天有上升的趋势。120 m 高度上，白天 10:00~19:00 之间， I_u 、 I_w 随时间有所减小，而 10:00 之前则有增大的趋势。2 层高度上的 I_u 与 I_v 基本无差别。

摩擦速度 u_* 和温度尺度 T_* 有明显的日变化， u_* 是夜间小，白天大。早晨 6:00 前达到最小，然后开始增大，最大出现在 14:00~15:00。2 个高度上的摩擦速度差别不大。 T_* 则是白天基本为负值，中午前后达到最低值，夜间基本接近 0，其值在 120 m 高度上比 47 m 高度上稍大（绝对值）。

u_* 和 T_* 的日变化特点基本反映了边界层中湍流变化情况。白天，随着对流边界层的形成，边界层中湍流运动加强，而 u_* 是与速度脉动成正比的，因此， u_* 也随着增大。从 (3) 式可以看

到， T_* 主要体现负感热通量 $-\overline{w't'}$ 和摩擦速度 u_* 的关系，但更多的是对感热通量的变化起主导作用。因此， T_* 的日变化特征与负感热通量的日变化特征基本一致。

拖曳系数 C_D 是反映下垫面粗糙程度的参数，其表达式为方程 (8)。图 7 分别给出了 47 和 120 m 高度上的 u_* 与 U 的关系，可以看到其拟合直线的斜率 (u_*/U) 分别为 0.2794 和 0.1459。47 m 高度上的 u_*/U 比刘辉志等 (2002) 应用 1998 年该铁塔同一高度上的资料得到的 0.17 明显大，比胡非等 (1999) 应用 1997 年北京冠层城市湍流资料得到的 0.25 稍大。这主要是由于近年来北京市城市化进程加快，铁塔附近的高层建筑物增多造成的。120 m 高度上的 u_*/U 与 Roth (1993) 提出的 $u_*/U=0.13$ 结果相当。

4 结语

城市化进展不断改变城市边界层的下垫面特

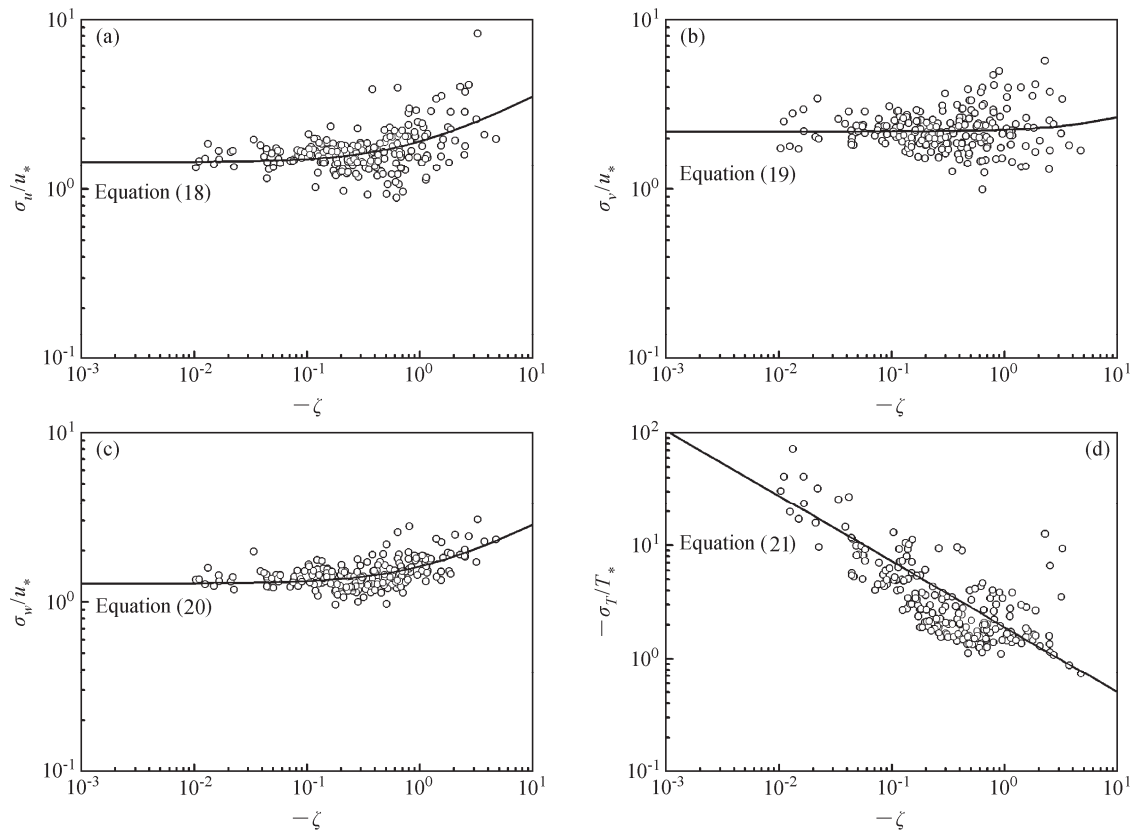


图 5 同图 4，但不稳定层结
Fig. 5 Same as Fig. 4, but for under unstable condition

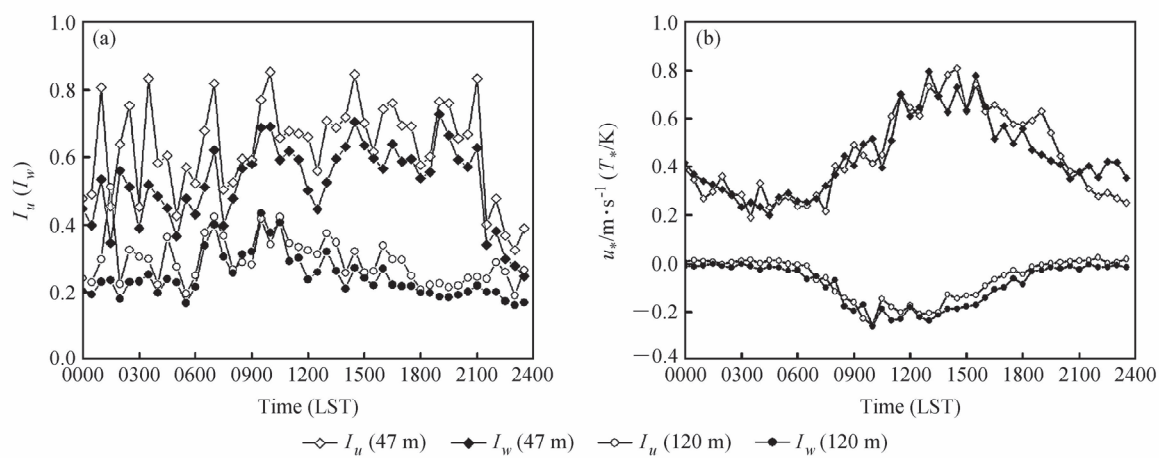


图 6 47 和 120 m 高度上 (a) 湍流强度 I_u 、 I_w 和 (b) 摩擦速度 u_* 、温度尺度 T_* 的平均日变化
Fig. 6 Mean diurnal variations of (a) turbulent intensity and (b) u_* , T_* at the height of 47 m and 120 m

性，从而影响边界层，尤其是近地面层中湍流特性。本文通过分析中国科学院大气物理研究所 325 m 铁塔 2003 年 8 月 47 和 120 m 高度上的湍流资料得到以下结论：

(1) 两层的湍流统计特征有一定的差异。47 m

高度仍然属于城市边界层冠层以上的近地面层，莫宁-奥布霍夫相似性理论仍然适用。而 120 m 高度已基本属于近地面层与自由对流层之间的过渡高度，在稳定层结情况下，莫宁-奥布霍夫相似性理论已不适用；而在不稳定层结情况下，莫宁-奥

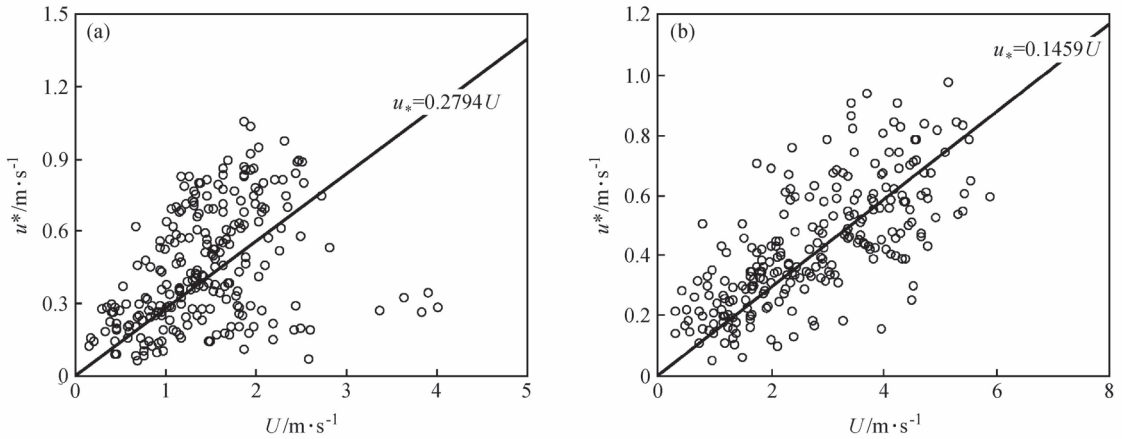


图 7 u_* 随 U 的变化: (a) 47 m; (b) 120 m;

Fig. 7 Relationships of u_* and U : (a) 47 m; (b) 120 m

布霍夫相似性理论仍然基本适用。

(2) 无论是稳定层结还是不稳定层结情况下, 47 m 高度上的无量纲速度和温度标准差与稳定度之间仍然存在局地相似性; 但 120 m 高度上仅在不稳定层结情况下无量纲速度和温度标准差与稳定度之间存在一定的局地相似性。

(3) 47 m 高度上, 无论是水平方向还是垂直方向的湍流强度都比 120 m 高度上的大。

(4) 两层的摩擦速度 u_* 和温度尺度 T_* 有明显的日变化。47 m 高度上的 u_* 比 120 m 高度上的稍大, 而 47 m 高度上的 T_* 绝对值比 120 m 高度上的绝对值小。

(5) 两层的 u_*/U 差别较大, 47 m 高度上的比 120 m 高度上的明显大。

参考文献 (References)

Businger J A, Wyngaard J C, Izumi Y, et al. 1971. Flux-profile relationships in the atmospheric surface layer [J]. J. Atmos. Sci., 28 (2): 181-189.

Dyer A J, Bradley E F. 1982. An alternative analysis of flux-gradient relationship in 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 Lingen, Lu Changgui, et al. 2002. Estimation of aerodynamic parameters in urban areas [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 13 (Suppl.): 26-33.

胡非, 李昕, 陈红岩, 等. 1999. 城市冠层中湍流运动的统计特征 [J]. 气候与环境研究, 4 (3): 252-258. Hu Fei, Li Xin, Chen

Hongyan, et al. 1999. Turbulence characteristics in the rough urban canopy layer [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 4 (3): 252-258.

胡非, 洪钟祥, 雷孝恩. 2003. 大气边界层和大气环境研究进展 [J]. 大气科学, 27 (4): 712-728. Hu Fei, Hong Zhongxiang, Lei Xiaoen. 2003. Recent progress of atmospheric boundary layer physics and atmospheric environmental research in IAP [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (4): 712-728.

胡隐樵, 张强. 1993. 论大气边界层的局地相似性 [J]. 大气科学, 17 (1): 10-20. Hu Yingqiao, Zhang Qiang. 1993. On local similarity of the atmospheric boundary layer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 17 (1): 10-20.

Hogstrom, U. 1988. Nondimensional wind and temperature profiles [J]. Bound.-Layer Meteor., 42: 55-78.

李倩, 刘辉志, 胡非, 等. 2003. 城市下垫面空气动力学参数的确定 [J]. 气候与环境研究, 8 (4): 443-450. Li Qian, Liu Huizhi, Hu Fei, et al. 2003. The determination of the aerodynamical parameters over urban land surface [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 8 (4): 443-450.

刘辉志, 洪钟祥. 2002. 北京城市下垫面边界层湍流统计特征 [J]. 大气科学, 26 (2): 241-248. Liu Huizhi, Hong Zhongxiang. 2002. Turbulent statistical characteristics over the urban surface [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 26 (2): 241-248.

刘树华, 李洁, 刘和平, 等. 2005. 在 EBEX-2000 实验资料中的湍流宏观量特征 [J]. 大气科学, 29 (4): 503-509. Liu Shuhua, Li Jie, Liu Heping, et al. 2005. Characteristics of macro-turbulence variables in EBEX-2000 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29 (4): 503-509.

刘熙明, 胡非, 李磊. 2006a. 北京市夏季城市热岛特征及其近地层气象场分析 [J]. 中国科学院研究生院学报, 23 (1): 70-76. Liu Ximing, Hu Fei, Li Lei. 2006a. Analyses on the characteristics of Beijing summer urban heat island (UHI) and its mete-

orological fields [J]. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences (in Chinese), 23 (1): 70–76.

刘熙明, 胡非, 李磊, 等. 2006b. 北京市夏季城市气候趋势和环境效应的分析研究 [J]. 地球物理学报, 49 (3): 689–697. Liu Ximing, Hu Fei, Li Lei, et al. 2006b. Summer urban climate trends and environmental effect in the Beijing area [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 49 (3): 689–697.

刘熙明, 胡非. 2007. 大气边界层的研究——从均匀到非均匀 [J]. 气象与减灾研究, 30 (2): 7–14. Liu Ximing, HuFei. 2007. Atmospheric Boundary Layer (ABL) research: From homogeneous to heterogeneous [J]. Meteorology and Disaster Reduction Research (in Chinese), 30 (2): 7–14.

Roth M. 1993. Turbulent transfer relationships over an urban surface. Part II: Integral statistics [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 119: 1105–1120.

Tillman A S. 1972. The indirect determination of stability, heat and momentum fluxes in the atmospheric boundary layer from simple scalar variables during dry unstable conditions [J]. J. Appl. Meteor., 11: 783–792.

殷达中, 洪钟祥. 1999. 北京地区严重污染状况大气边界层结构与参数研究 [J]. 气候与环境研究, 4 (3): 303–307. Yin Dazhong, Hong Zhongxiang. 1999. Study on the boundary layer structure and parameters under heavy pollution conditions in Beijing [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 4 (3): 303–307.