

城市冠层中湍流运动的统计特征*

胡 非 李 昕 陈红岩 刘 罡

(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 对 1997 年夏天和冬天北京湍流运动的各种统计特征量进行了初步的统计分析。结果表明, 城市冠层中湍流运动的各种统计特征量与平坦下垫面条件下边界层湍流运动的相比, 有不同的地方也有相似的地方; 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的, 水平方向的相应湍流特征量则总是接近相等; 城市冠层中湍流脉动强度和标准差几乎均大于平坦下垫面边界层的; 平均风速 $u \geq 1 \text{ m/s}$ 时的湍流统计特征量与 $u < 1 \text{ m/s}$ 时的有所不同; 城市冠层的阻力系数较大, 可达 0.0625, Panofsky 等提出的公式 $\sigma_w / u_* = 1.3(1 - 3z/L)^{1/3}$ 在城市冠层中并不适用。

关键词 城市冠层 湍流

1 引言

城市边界层结构, 特别是其湍流运动特性对于城市大气环境研究和城市下垫面条件下的地-气相互作用研究等是十分重要的。像北京这样的大城市, 近几年来发展迅速, 到处高楼林立, 空气污染问题日益严重。由于许多重要的大气污染物(例如汽车尾气)都是在贴近地面的层次中排放的, 并通过边界层湍流作用而扩散至更高的层次, 因此城市边界层湍流研究是非常有实际意义的研究课题。

城市下垫面粗糙元主要是楼房, 其边界层下部的结构与一般平坦下垫面情形不同, 在靠近地面的底部存在一个称为城市冠层(urban canopy)的层次^[1,2], 其厚度大约为建筑物的平均高度。

虽然已有大量关于城市边界层的研究工作, 但大都未涉及城市冠层。由于受到建筑物的强烈影响, 城市冠层中形成复杂的三维湍流场, 传统的 Monin-Obukhov 相似理论不适用。目前对这一层次内的湍流特性所知甚少, 主要依靠观测实验来积累对它的认识 and 了解^[2~6]。本文就是针对 1997 年在北京所做的两次观测实验结果所做的一些统计分析, 而有关的湍流谱分析以及多尺度小波分析等可参见文献[7,8]。

2 观测实验

本文所分析的实验数据来自两次观测实验, 一次是 1997 年 7 月 9 日~10 日在北京大学物理楼顶平台上进行的, 该楼共有 5 层, 楼基有一部分位于地面之上, 在距楼顶平台 2 m 高度上架设两台超声风速温度仪(水平相距 3 m), 一台属于北京大学地球物理

1999-05-10 收到

* 中国科学院“九五”重大A项目KZ951-A1-403-02资助

系, 一台属于中国科学院大气物理研究所。其中大气物理所的仪器型号为 SAT-211/3K, 由美国 Appl. Tech. Co. 公司生产, 采样频率为 20 Hz, 声程为 15 cm (本文只限于分析这台仪器的测量结果)。观测场地位于北京市西北部北京大学和清华大学校园之间, 周围有许多教学和住宅楼房以及公共交通设施, 属于典型的城市下垫面。观测高度离地面约 20 m, 属于城市冠层。

另一次实验是 1997 年 12 月 13 日~17 日在中国科学院大气物理研究所 325 m 气象铁塔院内进行的, 该实验点位于北京市北三环路以北约 1 km 处, 周围亦有大量高层建筑物。观测仪器为与前次实验相同的一台超声风速温度仪, 观测高度为离地面 10 m, 因此也在城市冠层之中。

以上两次实验分别代表了夏天和冬天的情况。特别是 1997 年 7 月北京市出现了罕见的高温天气 (我们测量到的最高气温为 41°C)。两次实验期间天气均晴朗, 平均风速小于 3 m/s。共获得 120 多小时湍流脉动资料。这些资料在必要时又可按小风 (平均风速 $u < 1$ m/s) 和非小风 ($u \geq 1$ m/s) 分为两组进行处理。小风常常是造成严重大气污染的条件。

3 结果及分析

在对原始资料进行必要的预处理后 (却野点、去趋势等)^[9], 按正点后半小时进行统计, 计算出平均风速 U 、摩擦速度 u_* 、Monin-Obukhov 长度 L 、湍流强度 I_i 和风速标准差 σ_i / u_* ($i = u, v, w$) 以及感热通量 H_0 和阻力系数 C_D 等。动量和热量通量均用涡旋相关法计算。

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

式中, ρ 是空气密度, τ_* 是地表湍流摩擦阻力, $\overline{u'w'}$ 和 $\overline{v'w'}$ 分别是 u 和 v 方向的湍流通量。

湍流感热通量由下式计算:

$$H_0 = \rho c_p \overline{w'T'}, \quad (2)$$

式中, c_p 是空气的定压比热。阻力系数为

$$C_D = (u_* / U)^2. \quad (3)$$

另一个重要的量是大气层结稳定度参数 L , 称为 Monin-Obukhov 长度, 定义为

$$L = - \frac{\rho c_p T_0 u_*^3}{kgH_0}, \quad (4)$$

其中, g 代表重力加速度, k 代表 von Karman 常数, T_0 代表平均参考温度。在大气边界层研究中, 通常用无量纲高度 z/L 来作为稳定度参数, 以便对不同时间、不同地点的观测资料进行统计处理。

湍流强度定义为

$$I_i = \sigma_i / U, \quad i = u, v, w, \quad (5)$$

式中, σ_i 代表湍流风速的均方差。

表 1 给出了 1997 年 12 月 16 日 09 点~17 日 09 点的观测结果。

表 1 1997 年 12 月 16 日 09 点~17 日 09 点的观测结果 (半小时平均)

时间	$U / (\text{m/s})$	z / L	$u_* / (\text{m/s})$	I_z	I_v	I_w	σ_u / u_*	σ_v / u_*	σ_w / u_*	$H_0 / (\text{W/m}^2)$
09:00~09:30	1.542	-0.104	0.252	0.406	0.375	0.241	2.489	2.295	1.478	14.400
10:00~10:30	1.673	-0.474	0.169	0.301	0.276	0.206	2.988	2.738	2.045	19.769
11:00~11:30	1.735	-0.251	0.201	0.286	0.267	0.182	2.470	2.309	1.574	17.654
12:00~12:30	2.006	-1.300	0.135	0.543	0.536	0.184	8.046	7.954	2.731	28.062
13:00~13:30	0.918	-0.120	0.369	0.601	0.712	0.388	1.493	1.770	0.963	52.837
14:00~14:30	1.425	-0.043	0.388	0.438	0.533	0.280	1.607	1.958	1.028	22.053
15:00~15:30	0.935	-0.020	0.374	0.532	0.749	0.344	1.330	1.872	0.859	9.271
16:00~16:30	0.764	-0.015	0.264	0.541	0.673	0.301	1.731	2.084	0.923	4.794
17:00~17:30	0.592	-0.010	0.154	0.554	0.596	0.257	2.131	2.295	0.988	0.316
18:00~18:30	0.545	0.125	0.127	0.854	0.531	0.248	3.662	2.276	1.063	-2.248
19:00~19:30	0.884	0.016	0.204	0.561	0.637	0.306	2.431	2.759	1.324	-1.201
20:00~20:30	0.923	0.056	0.194	0.491	0.422	0.248	2.342	2.010	1.181	-3.562
21:00~21:30	0.389	0.680	0.081	0.760	0.585	0.211	3.661	2.816	1.015	-3.128
22:00~22:30	0.638	0.875	0.073	0.352	0.506	0.134	3.071	4.413	1.169	-2.987
23:00~23:30	0.784	-0.104	0.164	0.644	0.439	0.187	3.087	2.106	0.899	3.938
00:00~00:30	0.675	-0.277	0.081	0.731	0.348	0.144	6.088	2.898	1.202	1.271
01:00~01:30	0.638	0.501	0.071	0.560	0.336	0.168	5.029	3.018	1.508	-1.560
02:00~02:30	0.558	1.306	0.106	0.497	0.545	0.173	2.621	2.871	0.912	-13.434
03:00~03:30	0.449	0.029	0.186	0.886	0.817	0.297	2.138	1.971	0.717	-1.601
04:00~04:30	0.438	0.202	0.133	0.713	0.664	0.229	2.352	2.187	0.755	-4.072
05:00~05:30	0.338	0.758	0.097	0.744	0.792	0.289	2.590	2.758	1.007	-5.976
06:00~06:30	0.483	0.534	0.150	0.510	0.579	0.223	1.644	1.866	0.717	-15.536
07:00~07:30	0.468	0.909	0.093	0.715	0.631	0.190	3.589	3.167	0.954	-6.363
08:00~08:30	0.494	0.055	0.236	0.767	0.969	0.381	1.604	2.026	0.796	-6.199
09:00~09:30	0.559	0.018	0.237	0.578	0.936	0.366	1.364	2.209	0.864	-2.080

在表 1 所示的观测时段中, 平均风速大都小于 1 m/s , 大气层结稳定度变化不大, z/L 在 ± 1.3 之间变化, 大都处于中性偏稳定层结。感热通量白天最大值约 53 W/m^2 , 晚上最大 (负值) 也只有约 15 W/m^2 , 二者相差 3 倍多; 摩擦速度小于 1 m/s , 且晚上比白天的值要小; 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的。水平方向的湍流特征量则总是接近相等 (表 2~4)。

表 2 给出了不同稳定度条件下两次实验的统计平均特征。可以看出, 在不稳定层结条件下摩擦速度和其他湍流统计特征量的值均大于稳定层结下的。表 3 和表 4 则进一步给出了不同稳定度和不同风速条件下的统计平均结果。无论是在稳定或不稳定条件下, 平均风速 $U < 1 \text{ m/s}$ 情形下的湍流强度均大于 $U \geq 1 \text{ m/s}$ 情形下的, 而湍流脉动风速标准差的正好相反。注意到 σ_i / u_* ($i = u, v, w$) 的大小反应了大气扩散参数的大小^[9], 所以小风条件是不利于污染物扩散的。

为了进一步直观地反映城市冠层中湍流特征量随风速大小和稳定度的变化, 我们将有关结果绘于图 1~5 中。图 5 还给出了二条理论曲线, 一条是 Panofsky 等^[10]提出的, 即在均匀下垫面上不稳定边界层中, 存在如下经验关系:

$$\sigma_w / u_* = 1.3(1 - 3z/L)^{1/3}, \quad (6)$$

另一条是本文拟合的修正关系式:

$$\sigma_w / u_* = 0.8(1 - 3z/L)^{2/3}. \quad (7)$$

可见在城市冠层中, (7) 式比 (6) 式更接近实际。

图 6 给出了摩擦速度与平均风速的关系, 拟合结果是

$$u_* = 0.25U. \quad (8)$$

由 (3) 式得到阻力系数为 0.0625, 远大于其它文献所报道的值(一般小于 0.05)^[2]。

表 2 不同层结稳定度时的统计平均结果

参量 稳定度	U	z/L	u_*	I_u	I_v	I_w	σ_u/u_*	σ_v/u_*	σ_w/u_*
$z/L > 0$	1.030	0.832	0.239	0.784	0.801	0.301	3.267	3.506	1.348
$z/L < 0$	1.231	-0.278	0.330	0.599	0.518	0.267	2.758	0.479	1.286

表 3 稳定层结条件下 ($z/L > 0$) 的统计平均结果

参量 风速	U	z/L	u_*	I_u	I_v	I_w	σ_u/u_*	σ_v/u_*	σ_w/u_*
$U \geq 1 \text{ m/s}$	1.577	1.143	0.313	0.583	0.637	0.276	3.584	4.186	1.717
$U < 1 \text{ m/s}$	0.608	0.592	0.287	0.938	0.926	0.321	3.023	2.982	1.064

表 4 不稳定层结条件下 ($z/L < 0$) 的统计平均结果

参量 风速	U	z/L	u_*	I_u	I_v	I_w	σ_u/u_*	σ_v/u_*	σ_w/u_*
$U \geq 1 \text{ m/s}$	1.689	-0.426	0.192	0.510	0.455	0.262	3.068	2.898	1.642
$U < 1 \text{ m/s}$	0.741	-0.119	0.194	0.694	0.581	0.272	2.425	2.031	0.904

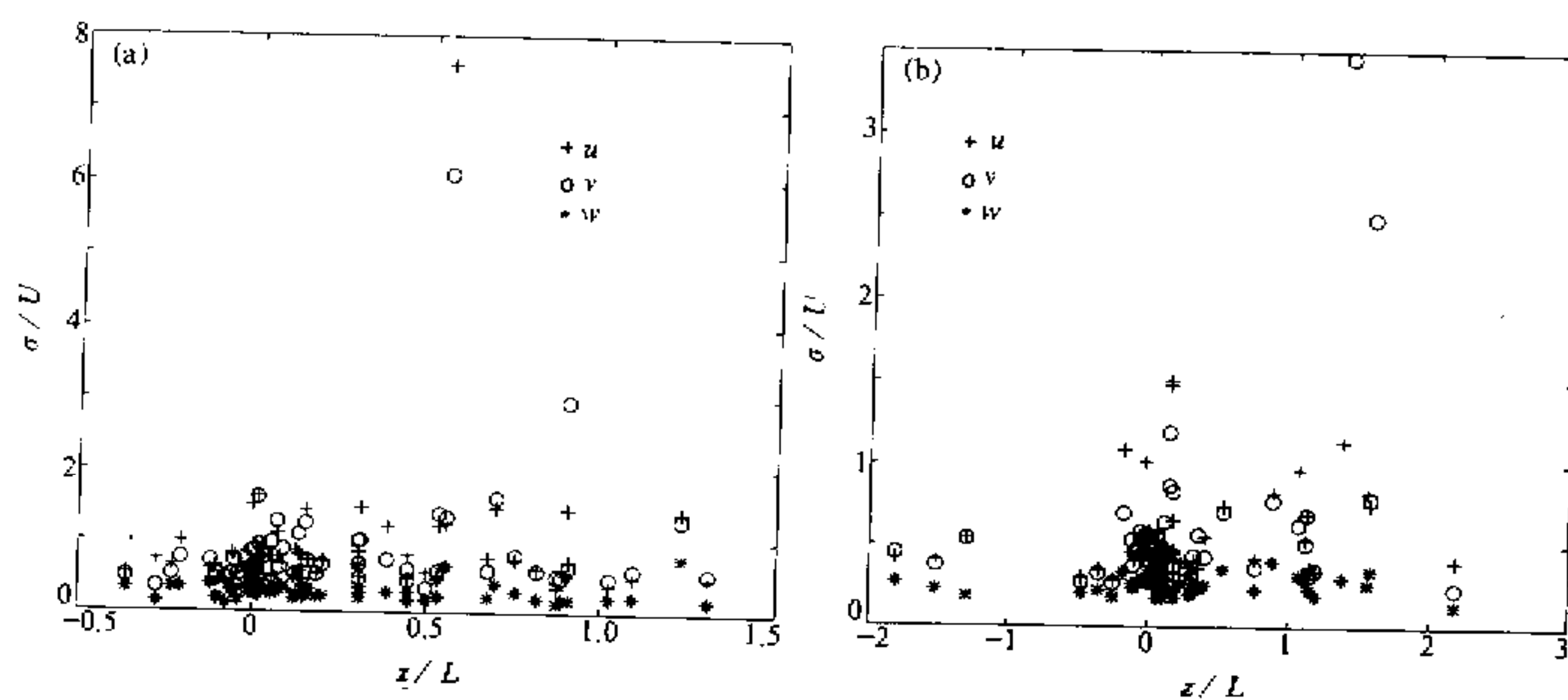


图 1 湍流强度随稳定度的变化
(a) $U < 1 \text{ m/s}$; (b) $U \geq 1 \text{ m/s}$

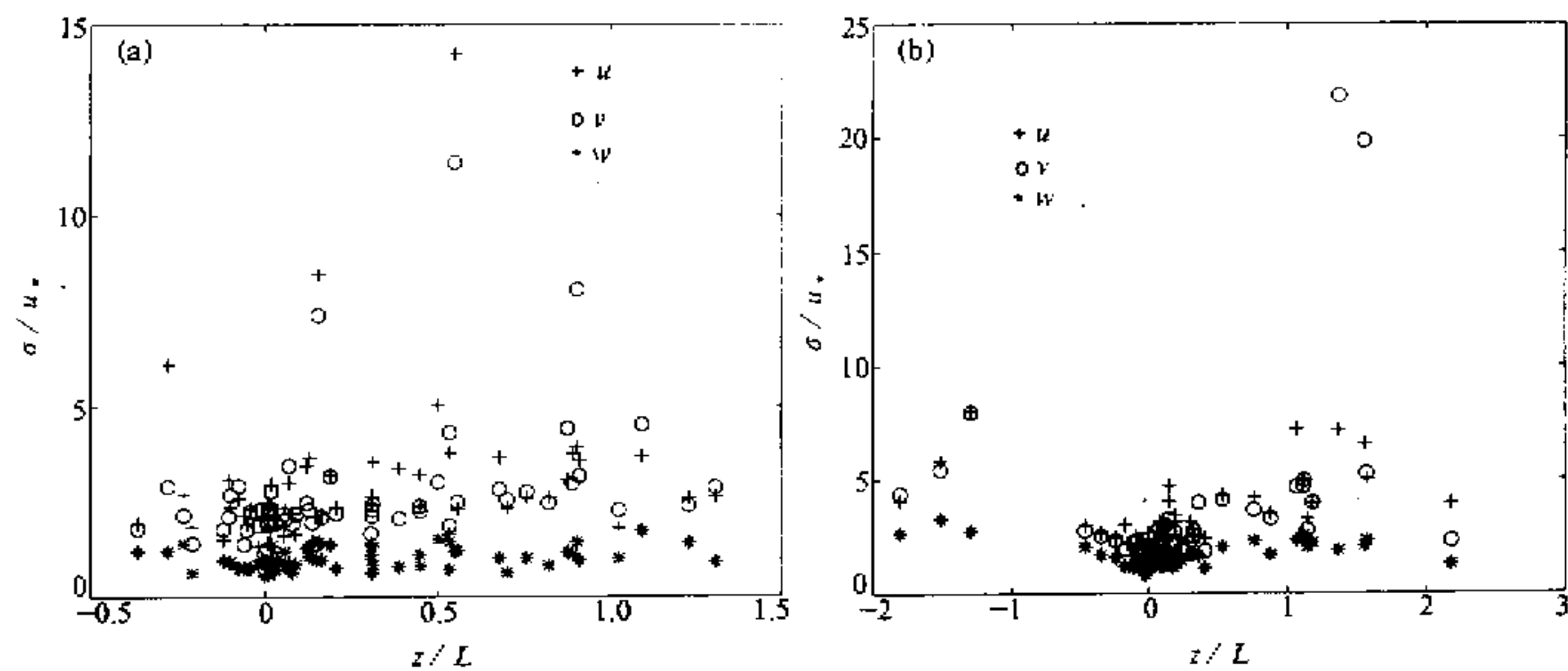


图2 湍流风速脉动标准差随稳定度的变化
(a) $U < 1 \text{ m/s}$; (b) $U \geq 1 \text{ m/s}$

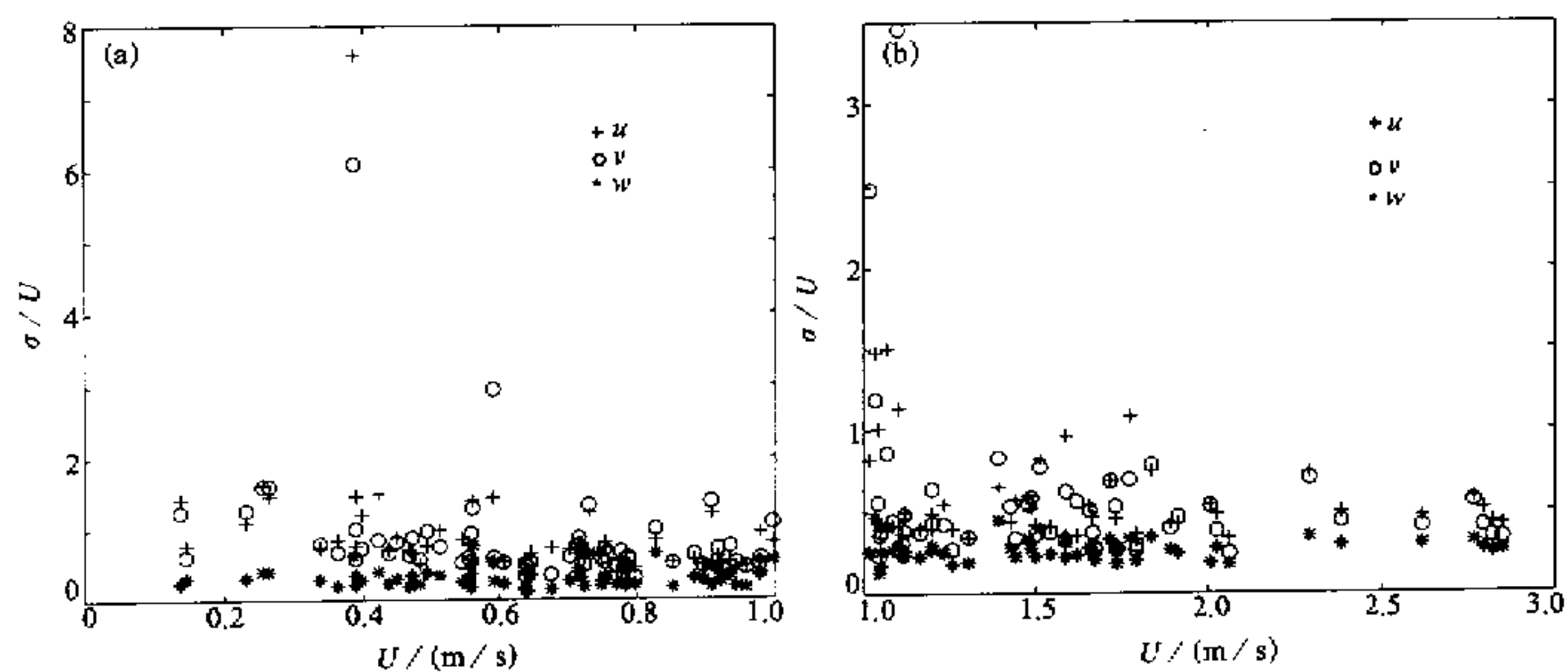


图3 湍流强度随平均风速大小的变化
(a) $U < 1 \text{ m/s}$; (b) $U \geq 1 \text{ m/s}$

最后, 表5给出了与其他实验结果的比较, 由于不同作者的观测仪器和观测场地是不同的, 因此, 这些对比只能提供一种量级上的比较。

表5 近中性条件下不同文献给出的湍流脉动风速标准差的对比

文献	[12]	[13]	[6]	[14]	本文
统计量					
σ_u / u_*	2.08	2.39	2.36	2.48	3.21
σ_v / u_*	1.83	1.92	2.40	2.20	3.15
σ_w / u_*	1.18	1.25	1.31	1.46	1.33

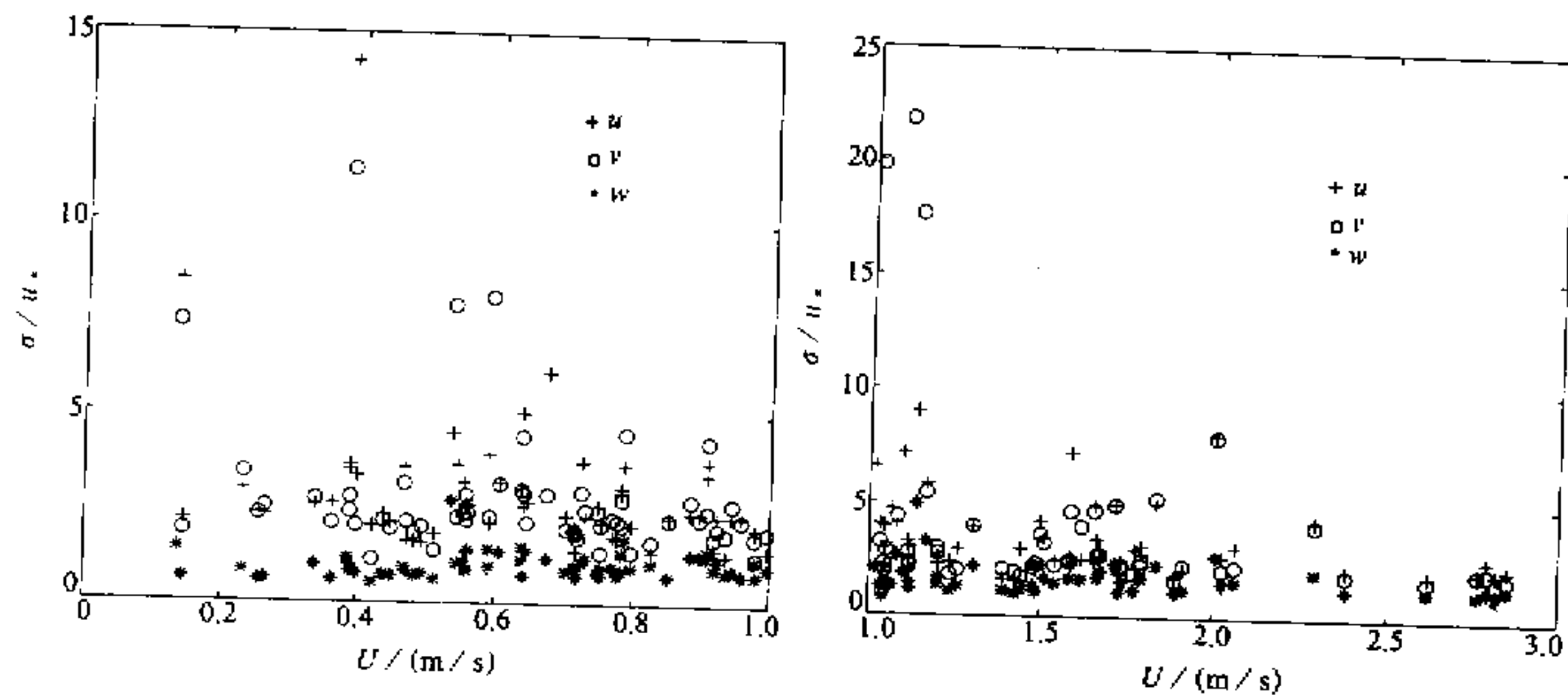


图4 湍流风速脉动标准差随平均风速大小的变化
(a) $U < 1 \text{ m/s}$; (b) $U \geq 1 \text{ m/s}$

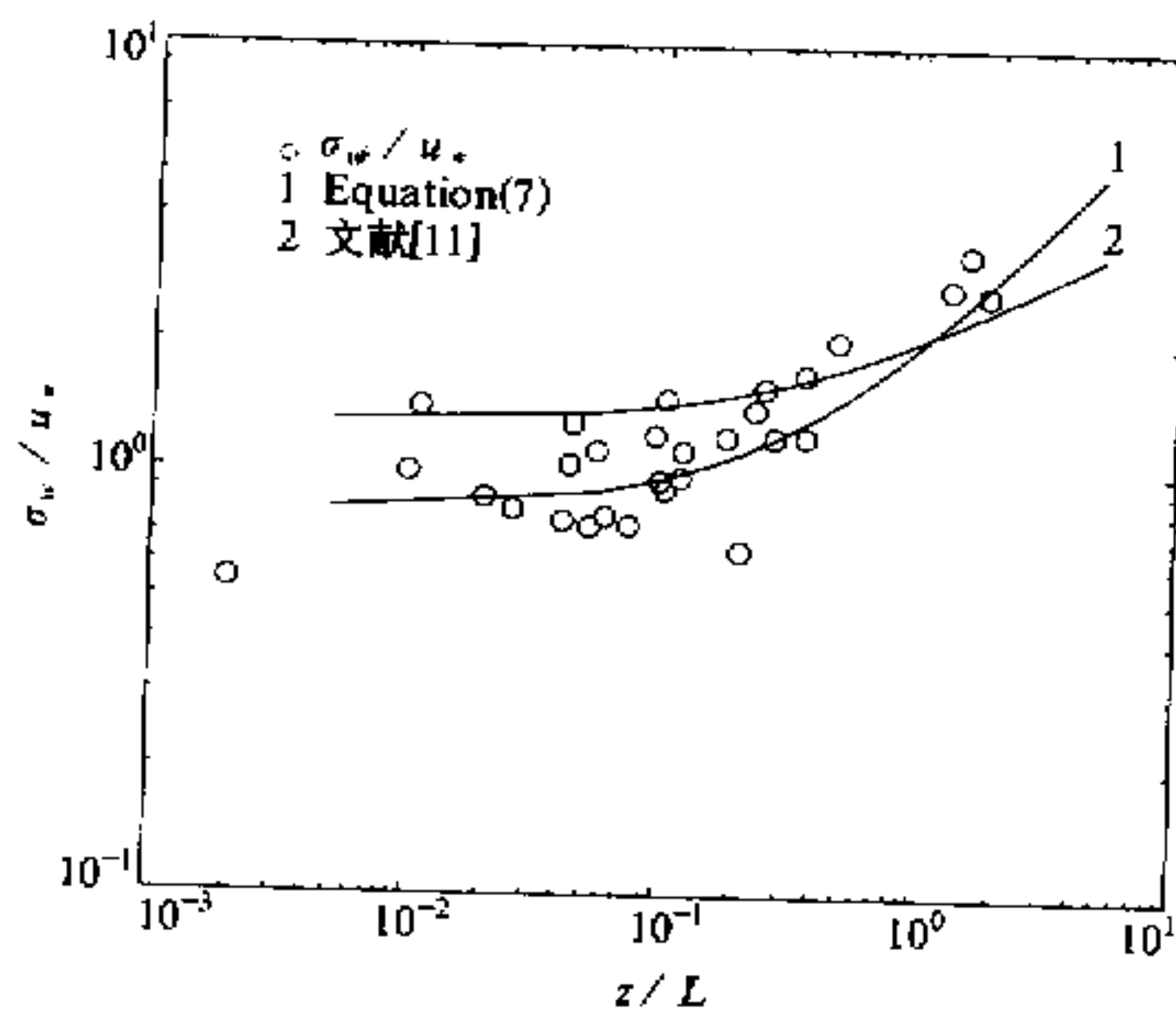


图5 湍流风速脉动标准差与稳定度的关系

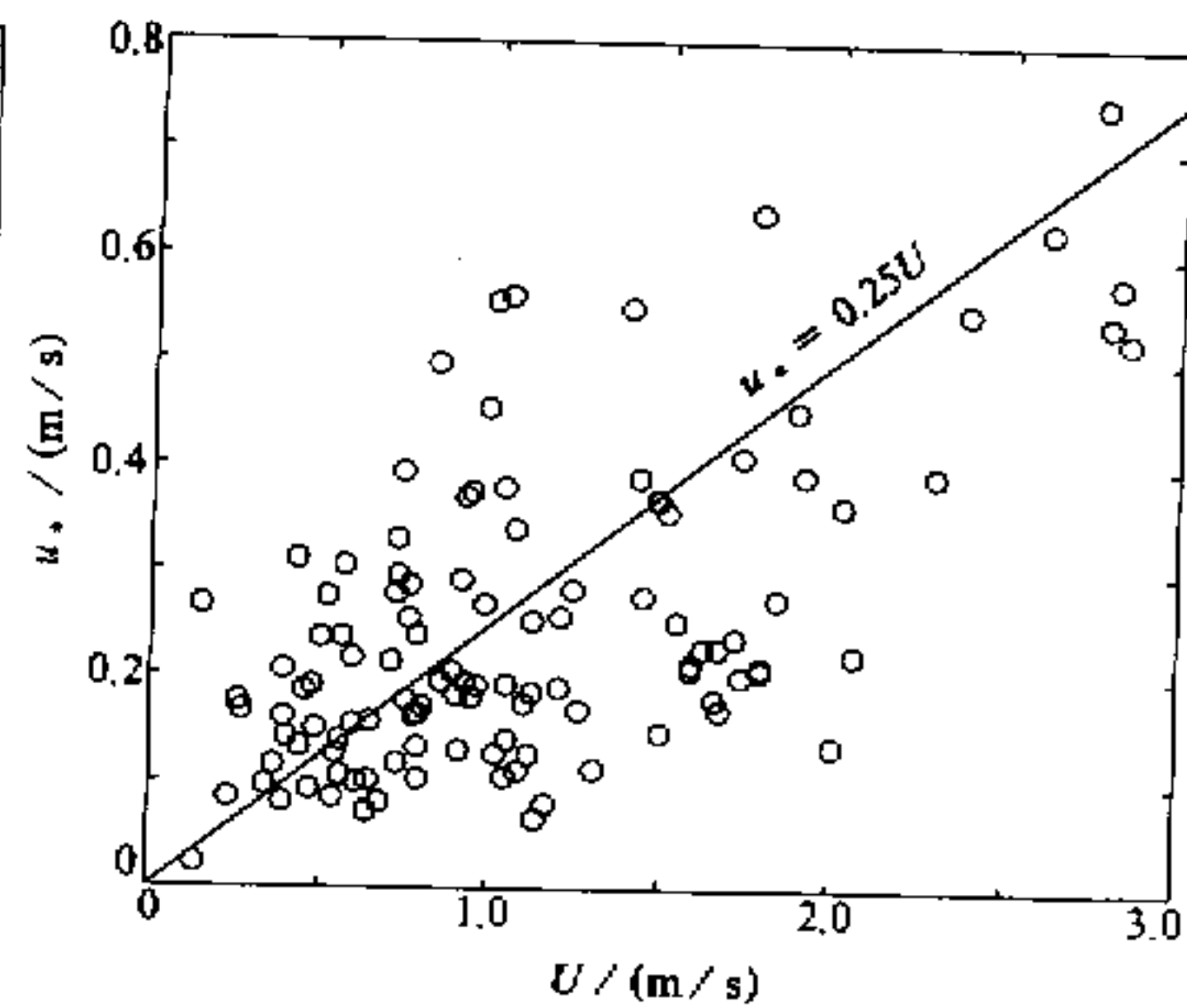


图6 湍流摩擦速度与平均风速大小的关系

4 结论

本文结果表明, 城市冠层中湍流运动的各种统计特征量与平坦下垫面条件下边界层湍流运动的相比, 有不同的地方也有相似的地方。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的, 水平方向的相应湍流特征量则总是接近相等; 城市冠层中湍流脉动强度和标准差几乎均大于平坦下垫面边界层的。平均风速 $U \geq 1 \text{ m/s}$ 时的湍流统计特征量与 $U < 1 \text{ m/s}$ 时的有所不同。例如, 无论是稳定或不稳定条件下, 平均风速 $U < 1 \text{ m/s}$ 情形下的湍流强度均大于 $U \geq 1 \text{ m/s}$ 情形下的, 而

湍流脉动风速标准差正好相反, 城市冠层的阻力系数较大, Panofsky 等提出的公式 (6) 在城市冠层中并不适用, 本文给出的修正关系式 (7) 则更接近实际一些。

致 谢 衷心感谢北京大学地球物理系张儒琛教授在观测实验中给予的帮助

参 考 文 献

- 1 Oke, T. R., 1988, The Urban Energy Balance, *Prog. Phys. Geo.*, 12, 471~508.
- 2 Rotach, M. W., 1993, Turbulence close to a rough urban surface, Part I: Reynolds stress, *Boundary Layer Meteorology*, 65, 1~28.
- 3 Rotach, M. W., 1993, Turbulence close to a rough urban surface, Part II: Variances and gradients, *Boundary Layer Meteorology*, 66, 75~92.
- 4 Roth, M. and Oke, T. R., 1993, Turbulence transfer relationships over an urban surface, Part I: Spectral characteristics, *Q. J. R. Meteor. Soc.*, 119, 1071~1104.
- 5 Roth, M., 1993, Turbulence transfer relationships over an urban surface, Part II: Integral statistics, *Q. J. R. Meteor. Soc.*, 119, 1105~1120.
- 6 Wang, J., 1992, Turbulence characteristics in an urban atmosphere of complex terrain, *Atmospheric Environment*, 26A, 2717~2724.
- 7 胡非, 1998, 大气边界层湍流涡旋结构的小波分解, *气候与环境研究*, 3(2), 97~105.
- 8 李昕, 1998, 大气湍流混沌特征的研究, 中国科学院大气物理研究所博士论文.
- 9 陈红岩、胡非、曾庆存, 1999, 处理时间序列提高计算湍流通量的精度, *气候与环境研究* (待发表).
- 10 Pasquill, F., 1962, *Atmospheric Diffusion*, Wiley, New York.
- 11 Panofsky, H. A. et al., 1977, The characteristics of turbulent velocity components in the surface layer under convective conditions, *Boundary-Layer Meteor.*, 11, 355~361.
- 12 Agarwal, P. et al., 1995, Surface layer turbulence processes in low wind speeds over land, *Atmospheric Environment*, 29, 2089~2098.
- 13 Panofsky, H. A. and Dutton, J. A., 1984, *Atmospheric Turbulence*, Wiley, New York.
- 14 Hogstrom, V. et al., 1982, Turbulence characteristics in a near-neutrally stratified urban atmosphere, *Boundary-Layer Meteor.*, 23, 449~472.

Turbulence Characteristics in the Rough Urban Canopy Layer

Hu Fei, Li Xin, Chen Hongyan and Liu Gang

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

Abstract With the use of sonic anemometer for measuring turbulent wind and temperature fluctuations in the urban boundary layer, two experiments were carried out in Beijing in the summer and winter of 1997. One of the experiments was conducted in the campus of Beijing University, and the other near the Beijing 325 m meteorological tower. Preliminary results of the turbulence statistics are presented.

Key words urban canopy layer turbulence