

# 沿海市区近地面大气层风、温、湿湍流特征的观测和分析<sup>①</sup>

赵永平 陈永利 杨连素 范继铨

(中国科学院海洋研究所, 青岛 266071)

收稿日期 1991年12月10日

关键词 城市, 近地面, 湍流特征

**提要** 用三向风速仪和高灵敏温湿度脉动观测装置, 测量沿海城市上空大气表面层风速、温度和湿度脉动。并用涡动相关法计算了大气表面层动量、热量和水汽湍流通量, 给出了复杂地形上各物理量的谱特征, 讨论了各湍流通量的特性。结果指出, 风速、温度和湿度谱密度分布基本上都服从 $-5/3$ 律。由于建筑物的影响, 在 $f \geq 0.2\text{Hz}$ 频段内扰动能量明显偏大。动量和热量输送主要由 $f < 0.2\text{Hz}$ 的扰动完成的, 高频扰动的贡献可以忽略不计。

本文用青岛海洋大学研制的风、温、湿脉动观测装置, 于1991年7月15~17日在海洋研究所生物楼顶进行了2d连续观测, 以此资料来研究在复杂楼群等建筑物影响下, 大气表面层风、温、湿湍流特征。

## 1 观测仪器和资料处理

用FYS-I型三分量风速仪测量三维风速脉动, 该仪器起动风速为 $0.2\text{m/s}$ , 响应时间为 $0.1\text{s}$ ; 温度测量的精度为 $0.01^\circ\text{C}$ , 干球温度的响应时间为 $0.1\text{s}$ , 湿球温度响应时间为 $0.5\text{s}$ 。有关研究<sup>[4]</sup>表明, 该风速仪在频率 $f < 0.5\text{Hz}$ 时, 它所得到的谱值与用超声波风温仪所得到的谱值完全一致, 而对 $f > 0.5\text{Hz}$ 的谱值, 前者比后者偏低。本观测中, 采样时间间隔为 $0.5\text{s}$ , 其高频段的截止频率为 $1\text{Hz}$ 。因此, 只要在分析中考虑 $f > 0.5\text{Hz}$ 频段内谱值偏低外, 该仪器的测量精度完全可以达到观测要求。

三维风的观测值分别为东分量、北分量和

垂直方向风速。为求得主方向风(即纵向风)和侧向风, 首先求出合成风 $(w, \alpha)$ , 计算出观测期间风的主方向 $(\bar{\theta})$ , 然后再将合成风分解成主方向风 $(u)$ 和侧向风 $(v)$ , 计算公式为:

$$\begin{aligned} D_i &= \alpha_i - \bar{\alpha} \\ u_i &= w_i \cos D_i \\ v_i &= w_i \sin D_i \end{aligned} \quad (1)$$

## 2 风速、温度和湿度谱的一般特征

每次观测 $40\text{min}$ , 采样时间间隔 $0.5\text{s}$ , 样本数为 $4800$ 。用 $1024$ 快速傅立叶变换(FFT)进行分段谱分析, 然后求出观测期间的平均谱。本

<sup>①</sup> 山东省科委基金项目, 编号9044。

本文观测和分析过程中, 得到青岛海洋大学徐天真、吕红民和本所陆蔼庆同志大力协助, 谨致谢意。

分析中,低频段的截止频率为  $1.9 \times 10^{-3}$  Hz,高频段截止频率为 1 Hz。在进行谱分析之前,首先移去资料系列中的倾向项。

### 2.1 观测期间风、温、湿和动量、热量及水汽通量的一般状况

表 1 中列出了观测和计算结果。

观测仪器感应部分安装在 6 楼顶部 3.5m 高的铁架上,距地面约 28m。其东南方向为一片楼群,高度均在 20m 左右,下垫面状况十分复杂,其南和西南方向为汇泉湾。在平坦下垫面

上,纵向风速的标准差一般均大于垂直风速的标准差,但由于复杂下垫面的影响,垂直风速的标准差与纵向风速的标准差具同一量级,前者为 80.5 cm/s,后者为 76.6 cm/s。干球温度和湿球温度的标准差分别为 0.21 和 0.10 °C,干球温度的变化大于湿球温度的变化。但在有雾或相对湿度为 95% 或以上时,湿球温度的变化大于干球温度的变化。绝对湿度的标准差平均为  $0.15 \times 10^{-3}$ ,空气干燥时较大,潮湿或有雾时较小。

表 1 观测和计算结果

Tab. 1 The results of observations in July, 1991

时间 (日.时)	风速 (cm/s)	风向 (°)	干球 温度 (°C)	湿球 温度 (°C)	绝对 湿度( $\times 10^{-3}$ )	相对 湿度 (%)	$\sigma_u$ (cm/s)	$\sigma_w$ (cm/s)	$\sigma_{T_d}$ ( $\times 10^{-4}$ ) °C	$\sigma_{T_w}$ ( $\times 10^{-4}$ ) °C	$\sigma_Q$ ( $\times 10^{-3}$ ) g/kg	$\overline{-w'u'}$ ( $\text{cm}^2/\text{s}^2$ )	$\overline{w'T'}$ ( $\text{cm}/\text{s}^\circ\text{C}$ )	$\overline{w'Q'}$ ( $\text{cm}/\text{s} \cdot$ $\times 10^{-3}$ )	$u^*$ (cm/s)	Z/L
15.12	260	180	24.14	21.59	15.06	81	57	71	30	11	133	273.2	4.565	-0.171	16.53	-3.60
15.15	440	180	25.08	22.04	15.17	76	80	67	43	16	253	398.4	1.267	0.367	19.96	-0.57
15.18	216	176	24.25	20.87	13.98	74	78	84	31	11	133	770.4	3.852	0.006	27.76	-0.65
15.21	201	174	22.65	21.27	15.22	88	81	83	7	6	76	942.0	0.572	0.293	30.69	-0.07
16.00	192	177	22.87	22.34	16.64	95	56	84	14	13	156	245.6	0.175	0.331	15.67	-0.16
16.03	177	150	22.46	22.24	16.66	97	99	80	5	7	103	716.7	-0.044	-0.058	26.77	0.01
16.06	177	134	22.95	22.54	16.88	96	97	84	5	6	78	271.3	-0.145	-0.010	16.47	0.12
16.10	168	160	25.86	23.61	17.20	83	94	83	43	13	210	821.5	3.885	-0.824	28.66	-0.59
16.12	167	167	24.47	23.22	17.25	90	90	92	34	11	144	746.0	3.970	-0.439	27.33	-0.70
16.15	206	171	25.73	23.83	17.18	85	94	99	41	11	212	1287	6.213	-1.897	35.88	-0.48
16.18	208	173	26.16	24.44	18.44	86	101	88	36	11	197	1082	4.360	-0.954	32.89	-0.44
16.21	157	171	24.45	24.19	18.74	99	75	77	6	9	134	706.0	0.209	0.377	26.57	-0.05
16.22	154	163	23.84	23.72	18.27	99	55	79	4	10	151	275.3	0.351	0.882	16.59	-0.28
17.03	92	338	24.15	23.16	17.30	92	32	66	4	8	124	64.5	-0.048	0.080	8.04	0.33
17.06	116	36	23.88	23.18	17.45	94	57	62	12	9	138	14.5	-0.435	0.159	3.80	2.90

由表 1 可以看到,大气稳定度的日变化十分明显。半夜前后,大气层结多为中性,Z/L 接近 0 值。凌晨 3~6 时,大气趋于稳定,Z/L 为正值。太阳升起后,大气很快变得不稳定,Z/L 为较大的负值。动量输送的变化与大气稳定度有密切的关系,半夜至凌晨大气层结稳定时,动量输送较小,平均风应力仅为  $0.3 \times 10^{-5} \text{N}/\text{cm}^2$ ;中

午至晚上 9 时,大气层结多为不稳定状态,动量下传较大,风应力为  $1 \times 10^{-5} \text{N}/\text{cm}^2$ ,为稳定层结时的 3 倍。热量的传送也与稳定度有密切的关系,中午至傍晚,热量由地面向上传送,最大可达  $78 \text{W}/\text{m}^2$ ,下半夜热量传送的方向反过来,由上向下传送,但其量值很小,平均值为  $2 \text{W}/\text{m}^2$ ,水汽通量的输送方向似与风向有一定的联系,

当风为南风时,水汽多由下向上输送,当风为东南风时,水汽多由上向下传送。这种关系似与测站的位置有关。来自南和东南方向的气团虽然都是来自海上,但由于测站东南方的下垫面为大片楼群,经过该区的气团由于楼群的热力作用,贴地层水汽减少,近地面层水汽逆向分布,从而导致水汽向下输送,而来自南方的气团较少受下垫面建筑物的影响,水汽自下向上传送。有雾时,水汽通量较大,其相当的潜热输送值约为  $25\text{W}/\text{m}^2$ 。

## 2.2 风速谱特征

根据 Kolmogorov 相似理论对惯性次层乱流谱的理论关系<sup>[1]</sup>,风速谱密度可由下式表示:

$$\varphi(f) = \alpha \varepsilon^{2/3} \cdot f^{-5/3} \cdot \bar{u}^{2/3} \quad (2)$$

式中  $\alpha$  为常数,约为 0.15;  $f$  为频率;  $\varepsilon$  为乱流能量耗散率;  $\bar{u}$  为平均风速。乱流能量谱与大气湍流频率之间成  $-5/3$  次幂关系。在平坦下垫面与海上观测都表明<sup>[2,3]</sup>,大气湍流谱都遵守这一规律。图 1 为 1991 年 7 月 16 日 21 时观测到的风扰动谱密度分布。此时平均风速为  $1.56\text{m}/\text{s}$ ,稳定度参数  $Z/L = -0.05$ ,为中性稳定层结,有浓雾,相对湿度为 99%。由图可以看到,垂直风速谱(图 1a)在  $f \leq 0.2\text{Hz}$  频段内,谱值分布基本上符合  $-5/3$  律,在  $f > 0.2\text{Hz}$  的高频范围内,谱值明显偏高。考虑到本仪器在  $f > 0.5\text{Hz}$  范围内的谱值比实际谱值偏低,图中高频端谱值似应比实际还要高些。显然,这些高频扰动完全是由于楼群造成的乱流扰动所致。图 1b 和图 1c 分别为侧向风速和纵向风速谱密度分布,二者基本上都符合  $-5/3$  律,其中侧向风速在  $f \geq 0.4\text{Hz}$ ,纵向风速在  $f \geq 0.5\text{Hz}$  频段内谱值偏高。

将谱密度从低频到高频积分,可以得到湍流总能量(S):

$$S = \int_{f_1}^{f_2} \varphi(f) df = \int_{\ln f_1}^{\ln f_2} f \cdot \varphi(f) d \ln f \quad (3)$$

给出  $f \cdot \varphi(f)$  与  $\ln f$  为坐标的谱密度图(图略),垂直风速的高频部分( $f > 0.2\text{Hz}$ ,下同)对总能

量的贡献很大,达 62%。低频部分的明显峰值出现在 0.03, 0.06 和 0.09Hz 处。侧向风速的高频部分对总能量的贡献减少为 35%,低频部分明显峰值出现在 0.014, 0.03 和 0.05Hz 处。纵向风速高频部分对总能量的贡献进一步减少,

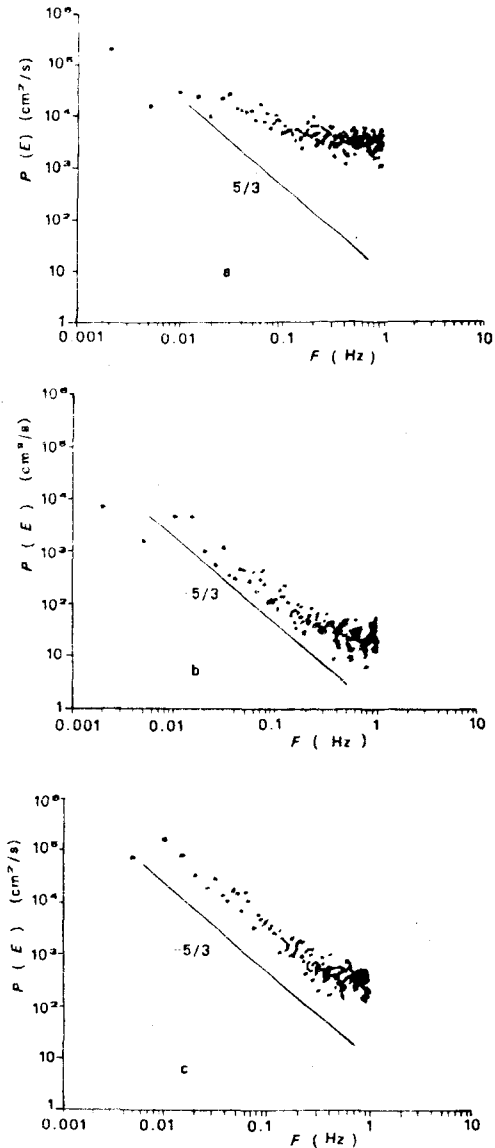


图 1 风速湍流谱(1991 年 7 月 16 日 21:00)

A. 垂直风速 B. 侧向风速 C. 纵向风速

Fig. 1 Spectra of the vertical (A) lateral (B) and longitudinal (c) wind velocity (16 July, 1991, 21:00~21:40)

为 12%。低频部分的峰值基本上与侧向风速一致,但在 0.014Hz 处更为明显。平均高频扰动的

贡献,垂直风速为 60%,侧向风速为 23%,纵向风速为 14%。据 Olesen<sup>[5]</sup> 等的理论模式,垂直风速,侧向风速和纵向风速谱在  $f \geq 0.2\text{Hz}$  的高频扰动对总能量的贡献分别为 16%, 10% 和 5%, 比较本观测的结果表明,在复杂地形上,高频扰动的能量急剧增加,其值为平坦下垫面时的 3~4 倍,其中对垂直风扰动的影响最大。

### 2.3 温度和湿度谱特征

已有的研究表明,温度和湿度谱也具有类似风速谱结构,但迄今给出的谱型的例子并不多。本文用快速响应的高灵敏温度感应元件,测得干球和湿球温度的脉动,并计算相应的绝对湿度的脉动值。由温度和湿度谱密度曲线可见(图略),除去高频段( $f \geq 0.5\text{Hz}$ )谱值稍高外,基本上也符合 -5/3 律。从对各扰动频段对总能量的贡献来说,不同时刻,高频段的贡献变化较大,如温度扰动贡献最大达 42%, 最小仅为 4%, 平均为 24%; 湿度扰动的贡献最大为 28%, 最小为 13%, 平均为 20%。低频温度谱的峰值出现在 0.03 和 0.014Hz 处,湿度谱的峰值分布比较宽,从 0.01~0.1Hz 均有出现。

### 2.4 复杂地形上空动量、热量和水汽输送的若干特征

物理量  $\alpha$  的湍流通量可以用与垂直风速的交叉谱的积分得到:

$$\overline{w\alpha} = \int_{\ln f_e}^{\ln f_h} f \cdot \varphi_{w\alpha}(f) d \ln f \quad (4)$$

其中  $\varphi_{w\alpha}$  为  $w$  和  $\alpha$  脉动量的交叉谱密度。结果表明,动量输送在  $f < 0.2\text{Hz}$  频段内,  $\overline{w\alpha}$  为负值,表示该频段内扰动动量向下传递。在  $f \geq 0.2\text{Hz}$  频段内,扰动动量输送的方向是多变的,有时为正值,动量向上传递,此时它削弱了总的动量的向下传输;有时为负值,动量向下传递,此时它

增加了总的动量向下传输,但其代数和很小。这就是说,  $f \geq 0.2\text{Hz}$  高频范围内的扰动对总的动量输送无重大贡献。热量湍流通量在  $f \geq 0.2\text{Hz}$  频段内,热量输送值较小,对总热量输送贡献较大的扰动主要在频率位于 0.2~0.07Hz 的之间。

水汽湍流通量的交叉谱密度的积分谱比较复杂,在  $f \geq 0.2\text{Hz}$  频段内,湍流通量的代数和有时为正,有时为负,有时接近 0 值,具有明显的不确定性,但在低频段( $f < 0.2\text{Hz}$ )的水汽湍流通量则比较稳定。

## 3 结语

由于缺少更多的资料,很难对各种风场和稳定度条件下的谱特征和各种湍流通量,尤其是水汽通量的变化进行详细分析。本文给出的结果是初步的,其结论有待进一步观测分析。

## 参考文献

- [1] Berman, S., 1965. Estimating the longitudinal wind spectrum near the ground. *Q. J. R. Met. Soc.* 91: 302-317.
- [2] Fujitani, T., 1981. Direct measurement of turbulent fluxes over the sea during AMTEX. *Meteor. and Geophysics* 32(2): 119-134.
- [3] Kaimal, J. C. et al., 1972. Spectral characteristics of surface layer turbulence. *Q. J. R. Met. Soc.* 98: 563-589.
- [4] Mcbean, G. A., 1972. Instrument requirements for eddy correlation measurements. *J. Applied Meteor.* 11(7): 1 078-1 084.
- [5] Olesen, H. R., et al., 1984. Modelling velocity in the lower part of the planetary boundary layer. *Boundary layer Meteor.* 29(3): 285-312.

# THE CHARACTERISTICS OF THE TURBULENCE OF WIND, TEMPERATURE AND HUMIDITY OVER THE COMPLICATED BUILDINGS OF THE CITY

Zhao Yongping, Chen Yongli, Yang Liansu and Fan Jiquan

(*Institute of Oceanology, Academia Sinica, Qingdao, 266071*)

Received: Dec. 10, 1991.

Key Words: City, Surface, Turbulent feature

## Abstract

Using the propeller anemometer and fine wire thermo-couples, the turbulence of 3-dimension wind velocity, temperature and humidity were measured, and using the eddy correlation method, the momentum, heat flux and moisture flux were calculated. The results show that the spectra of the 3-dimension wind velocity, temperature and humidity all obeyed the  $-5/3$  Law except the turbulence with frequency  $f > 0.2$  Hz, in which the turbulent energy was larger than normal obviously, and the momentum and heat flux were mainly completed by the turbulence with  $f < 0.2$  Hz.