

# 天津市郊大气边界层湍谱特征分析\*

王存忠

曹文俊

(气象出版社, 北京, 100081) (南京气象学院, 南京, 210044)

## 提 要

用 1990 年 7 月在天津市郊的观测资料, 计算了风速谱、温度谱及动量和热量通量的协谱。结果表明, 市郊下垫面上的大气湍流谱特征与平坦地形上得到的典型结果基本一致, 但满足各向同性的湍流尺度似乎比在平坦地形上的略大, 谱的峰值频率区域略窄, 谱的低频区(含能区)特征与平坦地形上的情况也不同。

**关键词:** 大气边界层, 大气湍流, 湍流谱。

## 1 引 言

1960 年代以来, 随着观测手段和计算能力的不断提高, 人们对大气湍流谱特征的分析越来越深入, 尽管由于描述湍流的谱方程不是从流体力学方程严格推导出来的, 大气湍流也难以做到重复测量, 使不同的研究者总结出的描述大气边界层湍流模式不尽相同, 但所得到的主要结论还是一致的。对于平坦地形, 湍流研究已经有许多实验和较为清楚的理论分析<sup>[1-3]</sup>。以速度谱为例, 一般认为, 在不同稳定度情况下, 惯性区湍谱遵从 Monin-Obukhov 相似理论; 谱密度满足  $-5/3$  次方规律; 低频区谱的分布在不同稳定度情况下出现较大的离散度; 在近中性或稳定情况下, 谱曲线随  $z/l$  值变化呈现规律性分布, 而不稳定情况下谱曲线的排列顺序缺少明确的规律性。对于非平坦或下垫面粗糙度较大情况下的湍谱特征的研究, Kaimal<sup>[4]</sup>等人曾得出一些很有启发性的结果; 王立治<sup>[5]</sup>等在北京郊区观测的结果表明, 该地近地面湍谱的低频区谱密度起伏较大; 张霁深<sup>[6]</sup>等人则认为, 由于城市建筑群的存在, 使近地面层动力影响显著加强, 导致近中性层结下湍谱曲线对稳定度的变化反应极不灵敏。王介民<sup>[7]</sup>通过对兰州市的一次观测实验的分析, 认为城市地区的湍流谱结构与平坦地形的湍流谱结构没有实质性的差异。

本文通过对天津市郊实测资料分析, 试图说明市郊下垫面的湍谱特征与前人总结的平坦下垫面的湍谱特征有何不同。

## 2 观测场地与资料情况

观测塔位于天津市南部边缘, 距塔 50m 范围为开阔地带, 50m 以外的北侧有一座两层楼高的孤立建筑物。距塔 300m 以外, 不同方位的建筑物高度变化于 3—30m 之间。探

\* 1992 年 6 月 15 日收到原稿, 1992 年 12 月 21 日收到修改稿。该文得到国家自然科学基金的资助。

测仪器为超声风速仪和温度脉动仪,取样频率为 10 次/s,单份资料长度为 55—60min,测点离地面高度为 35m。温度脉动仪直接测定温度。本文计算了 7 月 28 日、29 日、30 日三天的资料。

### 3 资料处理及计算方法

首先对实测资料进行坐标转换,将纵向风、横向风、垂直方向风分量分别调整到  $x$ 、 $y$ 、 $z$  坐标轴上,然后对风速和温度资料进行数据中心化处理,即可得到风速和温度的脉动序列  $u'$ 、 $v'$ 、 $w'$  及  $T'$ 。对于数据中可能存在的野点,用下述方法判断并剔除:

对于第  $m$  个数据,与其前后 5 个数据求平均值  $\bar{x}'_m = \frac{1}{11} \sum_{j=-5}^5 x'_{m+j}$ ,则该点在这 11 个点中的涨落方差为  $\sigma_m^2 = \frac{1}{11} \sum_{j=-5}^5 (x'_{m+j} - \bar{x}'_m)^2$ 。

以  $x'_m \pm 5\sigma_m$  为判别区间,对于  $x'_m \in [x'_m - 5\sigma_m, x'_m + 5\sigma_m]$  的数据,认为是正常数据,否则视为野点被剔除,并用第  $m-1$  个数据代替。该方法有一定的缺陷,如对于开始及最后 5 个数据不能加以判别,对于若干个(超过几倍的 11 个数据点)野点连续分布的资料处理效果比较差。

从理论上说,经中心化处理的数据序列,其求和值应为零,不为零的序列被认为是趋势变化的。实际计算过程中,只要脉动序列之和值不大于  $10^{-2}$  量级,就认为是平稳的,不需要去倾处理,否则需要去倾。去倾的计算方法可参见文献[8]。

将经上述处理的脉动资料序列以 4096 个数据长度为单位顺序截取,每个观测时次的资料可截取 8 段,分别用 FFT 方法计算每段的谱分布,然后将对应相等频率的谱密度值求平均,即可得到该时次的估计谱(主要取其高频部分)。将同时次未经分段的资料以 16 个数据为单位求平均,得到一个新的数据序列,对该序列进行 FFT 计算,得到的估计谱(主要取其低频部分)与前面得到的估计谱合并,再加以简单的平滑,就是本文后面给出的结果。用上述计算方法得到的谱,其低频截止频率为  $2.4 \times 10^{-4}$  Hz,高频截止频率为 5 Hz,频带宽度超过 4 个数量级,

本文计算了 3d 的资料,从结果来看,这 3d 中  $z/l$  值的变化范围不是足够宽的。这里  $z$  为测点高度, $l$  为莫宁-奥布霍夫长度,其计算式为  $l = -u_*^3 / (K \frac{g}{\theta} \overline{w'T'})$ ,其中  $K=0.4$ ,  $g=9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ , $\theta$  用平均温度  $T$  代替, $u_*$  为摩擦速度,其计算式为  $u_*^2 = [\overline{u'w'^2} + \overline{v'w'^2}]^{1/2}$ 。另一重要的统计特征量  $T_*$  的计算式为  $T_* = -\overline{w'T'}/u_*$ 。

在对能谱曲线的坐标进行无量纲化归一时,涉及到的无量纲脉动耗散率  $\psi_i$  和无量纲温度脉动耗散率  $\psi_H$ ,以及对协谱曲线无量纲化归一时涉及到的归一化因数  $G(z/l)$ ,  $H(z/l)$ ,  $K(z/l)$ ,均采用 Kaimal<sup>[9]</sup> 给出的经验公式计算。

### 4 结果分析

本文图中取双对数坐标。横坐标  $f$  (或  $n$ ) 为无量纲缩频(或频率)。纵坐标作了无量纲化处理,即取为  $nS_x/A$  或  $nS_i/A_i$ 。其中  $S_x$  代表  $S_u$ 、 $S_v$ 、 $S_w$  等功率频密度, $S_i$  为温度谱密度。

具体表达式在图中标明。 $S_w, S_u, S_{wv}$ 为协谱密度,其归一化表达也在图中标明。

### 4.1 稳定度对湍谱的影响

稳定度是大气湍流运动的重要制约因素。图 1 表明,不同频区受稳定度变化影响的程度不同。高频(惯性区)归一化谱曲线的位置与  $z/l$  值的变化基本无关,湍谱满足  $nS(n) \propto f^{-2/3}$  的变化规律( $f = nz/\bar{u}$ ,  $\bar{u}$  为平均风速),低频区(含能区)谱线位置受  $z/l$  值变化的影响明显,湍谱近似满足  $nS(n) \propto f^{+1}$  变化规律,这一特征说明高频区湍流运动是动力因素起决定作用<sup>[10]</sup>。在低频区,当稳定度增大(或不稳定程度减小)时,湍谱的峰值频率变高,但谱密度变小。这一方面说明随着稳定性的增强,湍流运动的平均尺度变小;另一方面说明大气湍流能量随着稳定性的增强而减小。图 1 中  $z/l$  值的变化对不同频区谱密度的影响程度及谱曲线的位置关系,表明稳定度的变化主要影响含能区尺度的涡旋能量,即越不稳定的空气,含能区涡旋能量越大。从图 1 还可看到,  $w$  方向上低频区的谱密度受  $z/l$  值变化的影响不如水平方向上那么明显,其原因是否与地面的限制作用和粗糙度的影响有关,有待于作进一步研究。

表 1 显示了天津市郊的湍流谱峰值频率( $f_{mz}$ )与前人<sup>[1,10]</sup>总结的平坦下垫面上湍流谱峰值频率( $f_{mp}$ )的比较。表中  $f_{mz}$ ( $x$  分别取  $u, v, w$  方向)为  $x$  谱达到最大值所对应的无量纲

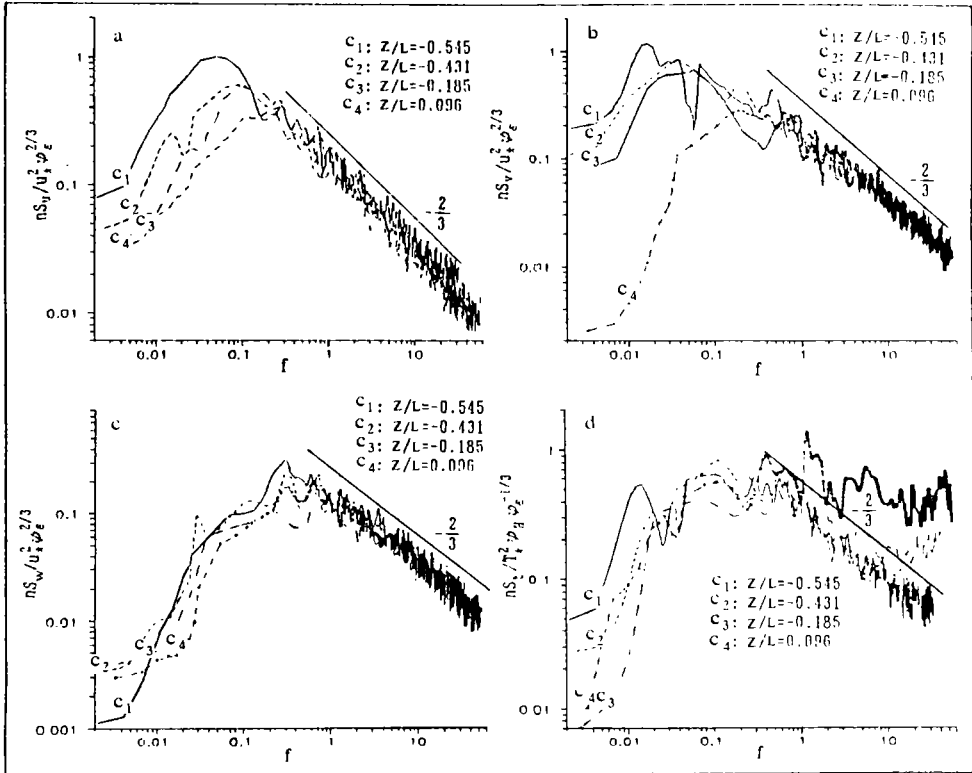


图 1 不同  $z/l$  值对应的速度谱、温度谱的比较

(纵轴分别为 a.  $nS_u/u^2 \cdot \phi_e^{2/3}$ , b.  $nS_v/v^2 \cdot \phi_e^{2/3}$ , c.  $nS_w/w^2 \cdot \phi_e^{2/3}$ , d.  $nS_v/T^2 \cdot \phi_H^2 \cdot \phi_e^{-1/3}$ )

表 1 天津市郊与平坦下垫面上的湍谱峰值频率的比较

稳定度条件	峰值频率					
	$f_{mu}$		$f_{mv}$			
	$f_{mu}$	$f_{mv}$	$f_{mw}$	$f_{mu}$	$f_{mv}$	$f_{mw}$
近中性	0.18	0.2	0.35	0.05	0.3	0.47
$-0.545 < z/l < 0.096$	0.04—0.2	0.02—0.25	0.2—0.4			

频率。

由表 1 可见,与平坦地形相比较,天津市郊所得到的湍谱峰值频率在  $u$  方向上变高,在  $v$  和  $w$  方向上变低,故  $f_{mv} - f_{mu}$  值缩小,意味着市郊上的湍谱三维峰值频率区变窄了。在  $z/l$  值从  $-0.545$  变至  $0.096$  过程中,峰值频率向高频区移动(图 1 也可见到)三个方向上的移动量值均为  $0.2$  左右,也就是说,稳定度的变化对峰值频率值的影响程度在三个方向上相近。结合图 1 可以看出,随着不稳定性的增强,在垂直方向上湍流的主导涡旋尺度是增大的。

Haugen 等人总结出平坦下垫面上速度谱在  $f \approx 0.18f_{max}$  处向低频方向开始明显偏离其中性状态。根据图 1 的估计,三个方向上的谱  $f$  与  $f_{max}$  的比值在  $0.3-0.5$  时就明显偏离其中性状态,也就是说谱的形状不如平坦地形上的平展,这说明天津市郊的建筑物增大了下垫面的粗糙度,使得湍谱的峰值频率区变窄。

随着  $z/l$  值的变化,温度谱分布呈现的规律性变化比速度谱差,这可能是仪器的灵敏度不够和噪声干扰引起的。若从  $z/l < 0$  的几条曲线分析,则温度谱的形状和基本特征与速度谱类似,只是温度谱较速度谱稍平展些。

#### 4.2 三个方向上能谱的比较

由于热力条件、地表特征和地面限制作用,三个方向上的谱在高频区虽十分相似,但在低频区却存在差异。一般认为,平坦地形上稳定和近中性条件下,低频区三个方向上的谱密度满足  $S_u(n) > S_v(n) > S_w(n)$  的关系,并且存在  $f_{mu} < f_{mv} < f_{mw}$  的特征,在不稳定条件下, $u$  谱量值大体相等或两者难以找到明确的差异,并且峰值频率的大小关系也难以确定。但从图 2 可以看到,在  $z/l = 0.096$  的条件下,低频区谱密度及峰值频率的关系与平坦地形上的特征相符合,但在  $z/l < 0$  的情况下,总是有  $f_{mv} < f_{mu} < f_{mw}$  的关系,并且  $S_v(n) > S_u(n) > S_w(n)$  的特征也很明显,这与平坦地形上的情况是不同的。这一结果代表性如何还有待于进一步的研究,目前可以解释为粗糙的下垫面可能会加大风向的摆动,使横向风分量脉动加大,才有在不稳定情况下  $S_v(n) > S_u(n)$  (在低频区)的关系。另外,峰值频率的变化及其在不同方向上的量值关系,可能与下垫面的粗糙度有关。

由图 2 还可以看到, $z/l = 0.096$  条件下, $u$  方向脉动能量最大, $v$  方向次之, $w$  方向最小。 $z/l < 0$  的条件下, $v$  方向脉动能最大, $u$  方向次之, $w$  方向最小。

#### 4.3 局地各向同性分析

很多观测分析表明,湍谱在惯性区满足各向同性假设。在惯性区内  $S_v/S_u$  和  $S_w/S_u$  的值为  $4/3$ 。Haugen 认为<sup>[1]</sup>,近中性条件下当  $n > 10\bar{u}/z$  时,上述结论被可靠证实。按照 Haugen 总结的结果,我们的实测风速取  $\bar{u} = 3.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,测点高度  $z = 35 \text{ m}$ ,那么应该在  $n >$

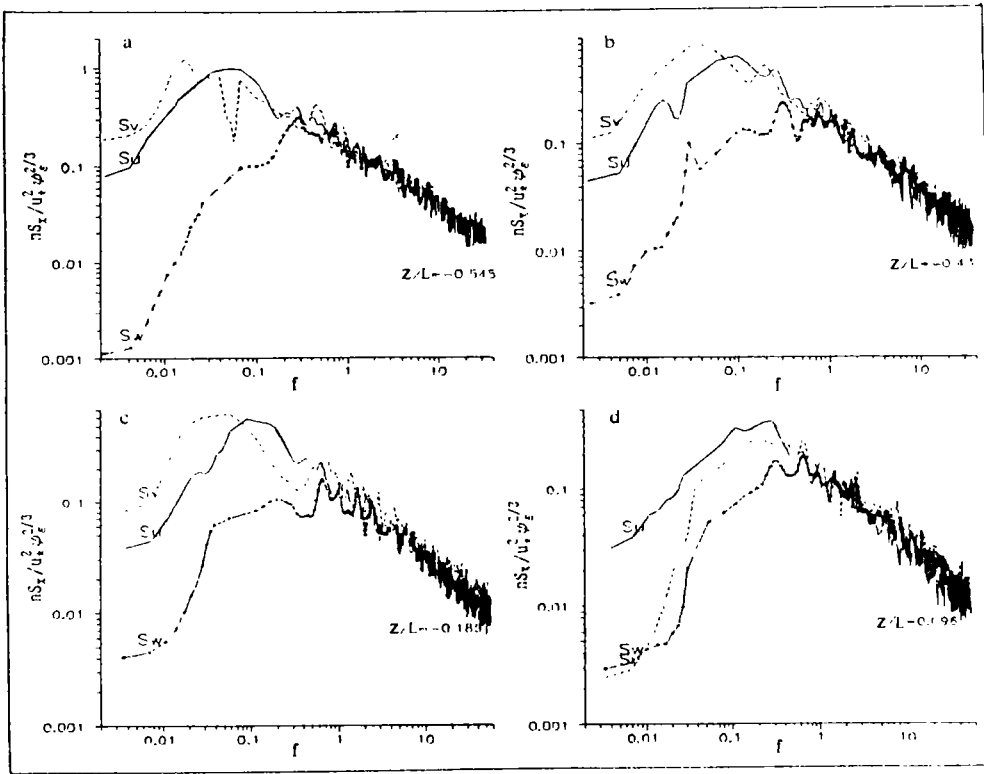


图2 不同稳定度情况下三个方向上速度谱的比较

(纵轴为:  $nS_x/u_*^2 \phi_x^{2/3}$ )

1Hz 的区域  $S_v/S_u$  和  $S_w/S_u$  的值才达到  $4/3$ 。图3表明,在  $n > 0.4$  的区域,  $S_w/S_u$  的值达到  $4/3$ ; 在  $n > 0.06$  的区域,  $S_w/S_v$  与  $4/3$  很接近, 而  $S_v/S_u$  达到  $4/3$ , 说明天津市郊下垫面上湍流满足各向同性的尺度, 比 Haugen 总结的平坦地形上的湍流尺度大几倍。Haugen 还认为<sup>[1]</sup>, 在  $n > 0.133$  的区域, 对于水平分量来说,  $-2/3$  次方定律可以相当可靠地得到证实。而从图1可以看出, 水平分量在  $n > 0.03$  的区域, 垂直分量在  $n > 0.03$  的区域,  $-2/3$  次方定律就得到满足了。从谱曲线的形状及三个方向上谱密度分配来看, 下垫面粗糙度的加大使满足  $-2/3$  次方定律的尺度增大。由图3还可以看到, 在低频区,  $S_w/S_u$  值比  $S_v/S_u$  值偏离  $4/3$  的程度大; 在稳定条件下,  $S_v/S_u$  明显偏离  $4/3$  所对应的  $n$  值为  $n = 0.03$ , 不稳定情况下这样的  $n$  值要小得多, 说明不稳定程度的增加也使满足  $-2/3$  次方定律的尺度增大。

#### 4.4 协谱

在  $z/l = -0.43$  条件下, 由图4可见, 协谱在惯性区随  $n$  的变化符合  $-4/3$  次方规律, 峰值频率均在  $n = 0.01\text{Hz}$  左右 (即  $f = 0.1$  左右), 这与 Kaimal 得到的结果是一致的。与自谱相比, 协谱曲线的起伏比较大。在所有频带内,  $S_{uw}$  (动量通量) 总是在  $S_{ux}$  (垂直热通量) 的上方, 而  $S_{uw}$  与  $S_u$  (水平热通量) 的曲线则有交叉关系。表2列出了  $S_{uw}$ ,  $S_u$ ,  $S_{ux}$  的相对大小。

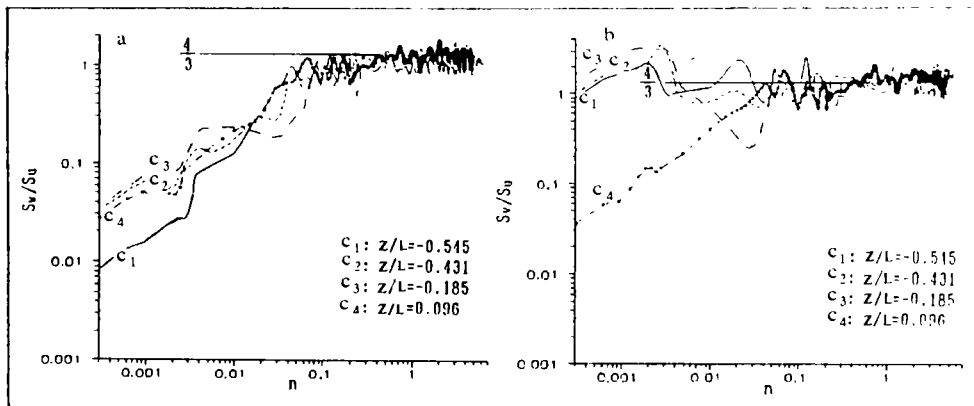


图3  $S_w/S_u$ (a),  $S_v/S_u$ (b)值随  $n$  值的分布  
( $n$  的单位为 Hz)

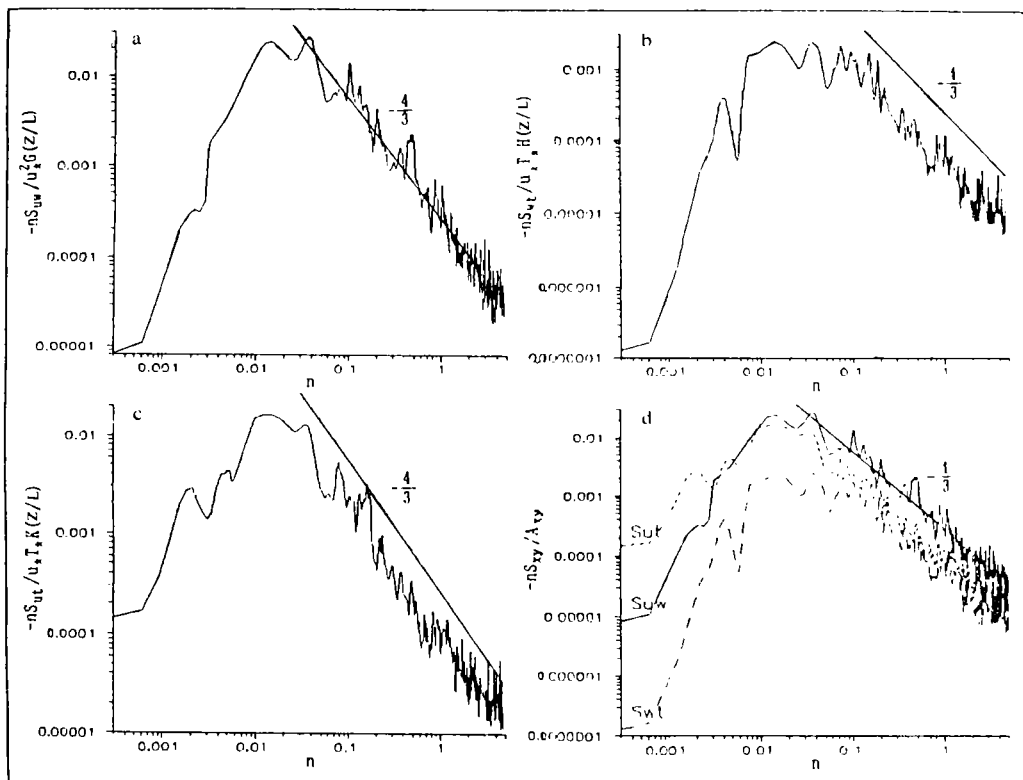


图4  $z/l = -0.545$  条件下的协谱

(纵轴分别为 a.  $-nS_{uw}/u_w^2 G(z/L)$ ; b.  $-nS_{uw}/u_w T_w H(z/L)$ ; c.  $-nS_{uw}/u_w T_w K(z/L)$ ; d.  $-nS_{xy}/A_{xy}$ )

图4或表2说明,在 $z/l = -0.43, z = 35m$ 的条件下,垂直方向上动量输送效率总比热量输送效率高。在低频区,动量输送及水平热量输送均比垂直方向上热量输送率高,这与Haugen(1973)的结论有相悖之处,但作为个例计算结果的确如此,其原因有待今后作进一步研究。在高频区,热量输送效率在水平方向上与垂直方向上相当,而动量输送率则比它们略高些。

图5反映了协谱受稳定度的影响情况。随着 $z/l$ 值的变化,协谱峰值频率及其形状的关系

表2 不同n值时动量、热量通量间的关系

频率范围	$S_{uw}, S_{ut}, S_{wt}$ 关系	对应的湍涡尺度
$n < 0.03$	$S_{wt} < S_{uw} < S_{ut}$	$\lambda > 130m$
$0.03 < n < 0.1$	$S_{wt} < S_{ut} < S_{uw}$	$40m < \lambda < 130m$
$n > 0.1$	$S_{uw} > S_{ut}, S_{ut}$ 与 $S_{wt}$ 接近	$\lambda < 40m$
所有频域	$S_{wt} < S_{uw}$	

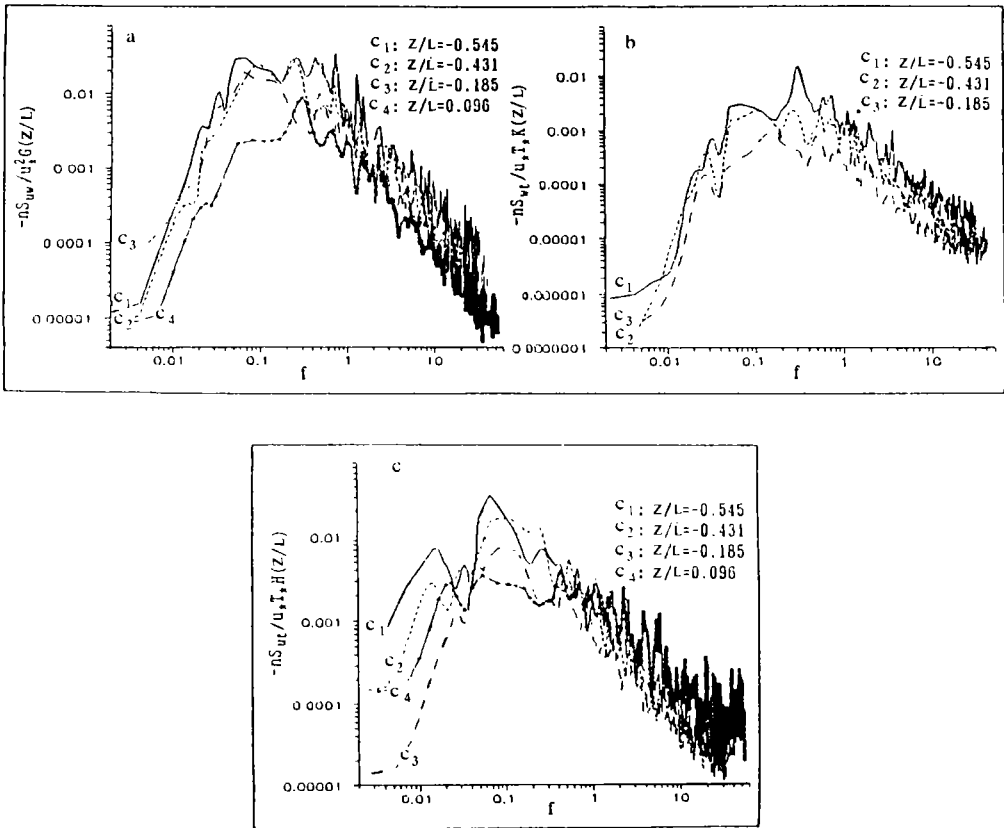


图5 不同 $z/l$ 值对应的协谱

(纵轴分别为 a.  $-nS_{uw}/u_*^2 G(z/l)$ ; b.  $-nS_{wt}/u_* T_* K(z/l)$ ; c.  $-nS_{ut}/u_* T_* H(z/l)$ )

变化趋势与速度谱的变化趋势类似。所不同的是,协谱在高频区也受  $z/l$  值变化的影响,小的  $z/l$  值对应的协谱曲线一般总是在大的  $z/l$  值对应的协谱曲线的上方,说明不稳定性的加强增大了湍流的热量、动量输送率。稳定度的变化对垂直方向上的动量、热量通量影响较水平方向上的要小。在  $f > 0.2$  的频区,  $S_{uw}$  变化幅度明显加大;在  $f > 0.1$  的区域,  $S_{uw}$  变化幅度明显加大,说明对于较大的湍涡来说,由于地面限制和粗糙度的作用,当不稳定性增强时,使垂直方向的通量增大大量有些减小。

## 5 结束语

通过对观测资料的计算分析表明,天津市郊下垫面上的湍流仍然符合 Monin-Obukhov 相似理论,湍谱的某些基本特征与平坦地形上的相似,但下垫面建筑物的存在加大了粗糙度,致使市郊下垫面条件下的湍流谱表现出某些不同于平坦地形上湍谱的特征,这些不同特征可以归纳为:

(1) 湍流的平均尺度增大,满足  $-2/3$  次方定律的尺度增大。

(2)  $f_{mu}$  向高频区伸展,  $f_{mw}$  向低频方向伸展。平坦地形上的  $f_{mu} < f_{mv} < f_{mw}$  的一般关系不再成立,峰值频率变窄。

(3) 横向谱低频区起伏较大,双峰特征明显,横向谱密度比纵向及垂直方向谱密度大。

通过对协谱的分析发现,动量和热量通量输送率受稳定度的影响比较大,随着不稳定性的增强,两者输送效率增大。动量与热量输送效率,在低频区水平方向高于垂直方向,而在高频区则量值差别不大,说明较大的湍涡受地面的限制作用明显。

## 参考文献

- [1] 豪根 D A 主编. 微气象学. 李兴生等译. 北京: 科学出版社, 1984.
- [2] 潘契夫 S. 随机函数和湍流. 谈镐生等译. 北京: 科学出版社, 1976.
- [3] 周明煜等. 大气边界层物理的研究进展. 大气科学, 1979, 3(3): 210—218.
- [4] Roth M et. al. Velocity and temperature spectra and cospectra in an unstable suburban atmosphere. Bound Layer Met. 1989, 47: 309—320.
- [5] 王立治等. 城郊大气近地面层湍流特征的初步研究. 大气科学, 1985, 9(1): 11—18.
- [6] 张霄琛等. 北京市郊区及城市边缘的大气湍流结构特征. 大气科学, 1991, 15(4): 87—96.
- [7] 王介民. 山谷城市的近地层湍流谱特征. 大气科学, 1992, 16(1): 11—17.
- [8] 王宏禹. 随机数字信号处理. 北京: 科学出版社, 1988.
- [9] Kamal J C et al. Spectral characteristics of surface layer turbulence. Q J R Met Soc. 1972, 98(417): 563—589.
- [10] 李宗恺等. 空气污染气象学原理及应用. 北京: 气象出版社, 1986.



# SPECTRAL CHARACTERISTICS OF SURFACE-LAYER TURBULENCE OVER THE SUBURBS OF TIANJIN

Wang Cunzhong

(Beijing Meteorological Press, Beijing, 100081)

Cao Wenjun

(Nanjing Institute of Meteorology, Nanjing, 210044)

## Abstract

The observational data of July, 1987 in the suburbs of Tianjin is used to compute the spectra of velocity, the spectra of temperature, the cospectra of velocity and temperature. The results show that the characteristics of the atmospheric turbulence spectra over the suburbs is basically in accordance with some typical results over the smooth terrain. But the scale, in which turbulence can obey the isotropic condition, over the suburbs is larger than over the smooth terrain. The spectrum peak frequency area is a bit narrow. The feature of the spectrum area in low frequency is out of accordance with that of the smooth terrain either.

**Key words:** Atmospheric boundary layer, Atmospheric turbulence, Turbulence spectrum.

## 作者来函

本人一时疏忽,在校样上误加了文字,使《气象学报》第 52 卷第 2 期刊登的《珠江三角洲局地强风暴发生的环境条件》一文中出现一处错误,谨向读者表示歉意,现订正如下:

页	行	原文	订正后
252	倒 8	当 $\bar{x}(1) < \bar{x}(0)$ 时,将 $x_i$ 从低值向高值排列,得到数列 $x_n, \bar{x}_f$ 为 $x_n$ 的前 $n-m$ 个数的平均值。	当 $\bar{x}(1) < \bar{x}(0)$ 时, $\bar{x}_f$ 为 $x_n$ 的前 $n-m$ 个数的平均值。