

郭云谦, 袁仁民, 罗涛, 等. 2012. 高风速相干结构对通量输送影响的实验研究 [J]. 大气科学, 36 (4): 733-743, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11164.  
Guo Yunqian, Yuan Renmin, Luo Tao, et al. 2012. Research on relationships between high-speed coherent structure and turbulence flux [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (4): 733-743.

# 高风速相干结构对通量输送影响的实验研究

郭云谦<sup>1</sup> 袁仁民<sup>1</sup> 罗涛<sup>1</sup> 孙鉴泞<sup>2</sup> 蒋维楣<sup>2</sup>

1 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230026

2 南京大学大气科学学院, 南京 210093

**摘 要** 切变湍流的相干结构是湍流研究中的重大发现, 它表明湍流运动并非完全随机, 其中具有可检测的有序结构。本文通过处理南京浦口地区大气边界层观测数据, 来分析不稳定层结中高风速相干结构特征。本次观测项目包括对场地中央的气象铁塔上 2 m 和 40 m 高度上超声风速仪的脉动速度、温度测量以及风廓线雷达对边界层风速廓线的测量。对超声水平风速时间序列数据进行小波变换 (时间尺度 400 s), 通过阈值来识别这种高风速相干结构。与多普勒风廓线雷达测量结果对比后发现, 这种方法确定的相干结构符合常规的认识, 具有较长的时间尺度和较大的垂直尺度 (接近边界层厚度)。分析三天相干结构特性得到无量纲空间间隔约为 6, 即每隔 6 个边界层厚度的水平位置出现一个高速相干结构。通过与垂直风速小波系数的比较, 发现高风速相干结构与向下垂直风速之间有较好相关, 这与湍流中“阵风”现象的研究结论相似。使用四象限分析方法分类得到两种动量通量输送为负的运动: 较小水平风速的上扬 (ejection) 运动 (简称为上扬运动) 和较大水平风速的下扫 (sweep) 运动 (简称为下扫运动), 这两种运动在整个湍流活动中处于主导地位。高风速相干结构通过促进下扫运动和抑制上扬运动来影响动量通量的输送。

**关键词** 高风速相干结构 小波变换 sweep 运动 动量通量 感热通量

文章编号 1006-9895(2012)04-0733-11

中图分类号 P404

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11164

## Research on Relationships between High-Speed Coherent Structure and Turbulence Flux

GUO Yunqian<sup>1</sup>, YUAN Renmin<sup>1</sup>, LUO Tao<sup>1</sup>, SUN Jianning<sup>2</sup>, and JIANG Weimei<sup>2</sup>

1 School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026

2 School of Atmospheric Science, Nanjing University, Nanjing 210093

**Abstract** The presence of coherent structures in turbulent shear flows is a great finding in turbulence research, which shows the orderly flows in turbulence which seems fully random. This article analyses the high-speed coherent structure in unstable PBL using the data measured at Pukou, Nanjing. These data include wind velocity measured by the sonic anemometer at the heights of 40 m and 2 m, and the vertical profiles of wind velocity measured with a Doppler wind-profile radar. The authors analyse the fluctuation velocity by employing wavelet transforming at the time scale of 400 s, and the high-speed coherent structure is recognized and located using the threshold value. By comparison with the corresponding wind profiles acquired by radar, these coherent structures satisfy our convention understanding which has long time scales (more than 5 min) and large vertical scales (about thickness of PBL). The nondimensional interval

收稿日期 2011-09-15, 2012-01-20 收修定稿

资助项目 中国科学院知识创新工程重要方向项目 KZCX2-YW-QN502, 国家自然科学基金资助项目 40975004、40975006、43333027

作者简介 郭云谦, 男, 1987 年出生, 硕士研究生, 主要研究方向为大气边界层物理。E-mail: guoyun@email.ustc.edu.cn

通讯作者 袁仁民, E-mail: rmyuan@ustc.edu.cn

between the coherent structures for the three days is about 6, which means that at the distance of six thickness of PBL, one coherent structure can be found. The wavelet coefficient of vertical fluctuation velocity is correlated with the corresponding wavelet coefficient of horizontal fluctuation velocity, which shows that the downward vertical velocity apparently exists in the high-speed coherent structure, this result is similar to the “Gustiness” theory in earlier research. Sweep motion and ejection motion are two dominant types of turbulence motion, which transport minus momentum flux. The high-speed coherent structure influences significantly the momentum flux by promoting the sweep motion and restraining the ejection motion.

**Key words** high-speed coherent structure, wavelet transform, sweep motion, momentum flux, sensible heat flux

## 1 引言

湍流运动是边界层大气最主要的表现形式,其最主要的性质是随机和不规则性(胡非等, 2003)。20 世纪 70 年代以后,人们发现随机湍流中存在一些可以辨识的、准周期的拟序结构,相干结构(coherent structure)一说正式产生。它的起始时刻和位置是不确定的,但是一经触发,就以某种确定的次序发展为特定的运动状态。因此,通常长时间平均中它们容易和不规则运动一起被平均,要识别和测定相干结构需要采用特殊方法(是勋刚, 1994)。

早期发现的温度斜坡结构(ramp)是一种典型温度相干结构(Antonia et al., 1979),这个结构指出近地层温度大体存在先缓慢上升紧接着急剧下降的变化规律。不少研究发现对流边界层中,很多气象要素如温度、水汽密度等,有着类似斜坡(ramp)结构的,缓慢上升紧接着急剧下降至平均状态的过程(Chen et al., 1997),此外在稳定边界层中,也会出现先缓慢下降后急速上升的相干结构过程(Barthlott et al., 2007)。可将边界层中的相干结构具体分成间歇性(streaks)的下扫气流(sweeps)和上扬气流(ejections)(Foster et al., 2006),这两种运动对陆气之间的水汽、感热和动量通量贡献很大(Katul et al., 1997)。国内最近研究的阵风理论和阵风扬沙的机制,通过对北京边界层气象铁塔多层数据的分析,在复杂湍流数据中发现具有阵风性质的相干结构,这种结构对沙尘等大颗粒从近地层到边界层以至自由大气的传输起了重要作用(程雪玲等, 2007; 曾庆存等, 2007; Zeng, et al., 2010)。近期研究中由于仪器和雷达技术的改进,通过对边界层采用多仪器组合、垂直大范围、高时空分辨率的观测,取得高质量的测量数据,可以对相干结构进行更全面的观测。Drobinski et al. (2004)通过分析多普勒激光雷达测量的稳定近地层数据,发现可将之分为不同高度的两层——涡动运动近地层和上方的剪切运

动近地层。并发现动量通量有显著不同的分层特性。Krusche and De Oliveira. (2004) 使用 12 米高度边界层铁塔测量的脉动温度、水汽和风速,发现分别采用间歇性函数和小波变换定出的温度和水汽的相干结构相似,但定出的风速相干结构之间对应不好; Horiguchi et al. (2010) 利用地表脉动风速和声雷达测得的近地层风速廓线,通过小波变换,提出高风速相干结构(high-speed coherent structure)的概念,并发现其和实际结构之间一致性较好。

早期提取相干结构的方法有条件采样(conditional sample)(Singh and Greenhut, 1985; Williams and Hacker, 1992)以及频谱分析(程雪玲等, 2007)。条件采样中规定只在水平和垂直风速、温度、持续时间等大于某个特定值时,才认为其为相干结构。频谱分析中是对脉动风速数据进行傅里叶展开,根据时间尺度划分中间某段频谱区间为相干结构。小波分析是一种能提取时域和频域双重信息的方法,在近期的湍流输送和相干结构中应用逐渐增多(Gao and Li, 1993; Collineau and Brunet, 1993; Chen and Hu, 2003; 胡非, 1998; 陈炯等, 2003)。由于湍流在不同下垫面中可能有不同的表现形式,本文使用南京郊区边界层观测数据,通过小波变换以及定出比较合理的阈值来客观地识别当地出现的高风速相干结构,并利用雷达数据中由风速廓线计算出的相干结构对前者进行验证。接着分析南京郊区高风速相干结构特征,并与其他在不同下垫面边界层中的研究结果进行对比。同时进一步分析相干结构时段内垂直风速以及动量通量的分布,反映高风速相干结构对它们的影响。

## 2 实验及数据处理

### 2.1 观测实验介绍

资料来自 2006 年 2 月 21 日~3 月 2 日(10 天)在南京浦口地区进行的南京城市边界层综合观测实验,观测在城市和郊区同步进行,这里只选用郊

区数据。郊区观测场地位于南京大学浦口校区大气科学园气象观测场内, 为一块 40 m×30 m 的草地 (32.18°N, 118.67°E), 周围无高大建筑物与障碍物, 半径 500 m 以内只有西南方向的几栋家属楼与庄稼地和绿地, 代表了郊区平坦下垫面的基本特征, 周围地形如图 1 所示, 详细情况可参阅刘罡等 (2009)。

郊区观测场地中竖立了一座 40 m 高的气象观测塔。在铁塔 2 m 处和 40 m 处, 分别放置了一套脉动数据测量仪器, 包括一台超声风速温度仪 (CSAT3, Campbell Scientific Inc.) 和水汽脉动分析仪 (KH-20, Campbell Scientific Inc.), 用于测量气流的三维脉动速度、虚温和水汽含量, 数据采样频率为 10 Hz, 本文分析主要关注大尺度的相干结构, 对数据的高频部分利用较少, 为了计算方便, 将数据进行了每秒的滑动平均。气象铁塔旁边设有一台多普勒边界层风廓线雷达, 测量边界层三维风速和折射率结构常数的垂直廓线。雷达廓线有效高度从 200 m 到 1500 m, 分辨率为 50 m。平均采样间隔是 126 s。

## 2.2 四象限分析对湍流运动分类

四象限分析(quadrant analysis)是一种定量地从湍流场测量数据中辨认出特定结构的分析方法 (Wallace et al, 1972; Gao et al., 1989; Horiguchi et al., 2010)。在这种分析中, 湍流根据  $u'$  和  $w'$  的取值被分为以下四类:

$u' \geq 0, w' \geq 0$  (向外交互运动, outward interaction), (1a)

$u' < 0, w' \geq 0$  (上扬运动, ejection), (1b)

$u' < 0, w' < 0$  (向内交互运动, inward interaction), (1c)

$u' \geq 0, w' < 0$  (下扫运动, sweep), (1d)

这里,  $u$  和  $w$  分别是测量的地表水平和垂直风速, 上标 “'” 为减去平均量的脉动值。以上四种湍流运动中, 较小水平风速的上扬 (ejection) 运动 (本文简称为上扬运动) 和较大水平风速的下扫 (sweep) 运动 (本文简称为下扫运动) 都是动量通量为负的运动 ( $u'w' < 0$ )。上扬运动是一种水平低风速的向上湍流运动, 而下扫运动是一种水平高风速的向下湍流运动。地表摩擦力在近地层中以雷诺应力 (动量通量) 的形式体现, 因此动量通量在总体上应该为负, 即上扬和下扫运动应该在湍流运动中起主导作用。在本次测量中, 上扬运动和下扫运动活动时间占整个湍流时间的 75%, 输送动量通量绝对值占比超过 70%。因此, 这两种运动可以作为我们研究湍流动量通量的主要对象。

## 2.3 速度的小波分析

通过小波变换可以进行时域和频域上的同时分析。因此, 小波变换可以很好地运用在湍流数据的分析, 特别是在涡旋结构 (Mahrt, 1991; 胡非, 1998) 和相干结构的尺度及追踪等方面 (Farge, 1992; 陈炯等, 2003)。下面, 介绍小波变换以及本文采用的小波基。

对于风速时间序列  $x(t)$ , 小波系数  $T(a, b)$  由下式求得 ( $a$  为尺度参数,  $b$  为位置参数):

$$T(a, b) = \left( \frac{1}{a} \right) \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi \left( \frac{t-b}{a} \right) x(t) dt, \quad (2)$$

其中,  $\Psi(t)$  是小波基。从公式 (2) 可以看出, 小波系数的取值, 取决于小波基函数的形状。小波基 “墨西哥帽” (Mexican Hat) 被广泛用来进行湍流脉动相关的数据处理 (Gao and Li, 1993; Chen and Hu, 2003), 形式如下:

$$\Psi(t) = (1-t^2) \exp(-t^2/2). \quad (3)$$

此小波基形状平滑且轴对称, 因此时间尺度为  $2a$  (如我们希望提取时间尺度 200 s 的信息, 取  $a=100$  s)。在处理时使用风速标准差 ( $\sigma_u$ ) 对原始风速时间序列进行归一化, 以便不同时刻结果可以互相对照。

图 2 展示 60 分钟的水平风速时间序列及其在不同时间尺度上小波系数分布 [2 月 24 日 11:00~12:00 (北京时, 下同) 数据], 小波系数时间尺度 ( $y$ ) 用  $2a$  来定义。可以看出, 在某个时间尺度上, 小波系数大的位置, 对应时刻水平风速出现局部大值, 并且持续一段时间, 持续时间和该时间尺度对应。如时间尺度  $2a=400$  时, 小波系数高值对应持续 400 s 左右的脉动速度大值。因此, 可以使用小波系数来反映原始数据在该时间尺度上的起伏特征。

## 3 资料分析及结果

### 3.1 近地层湍流和下垫面的基本特征

综合观测实验测量的 10 天数据中, 7 天天气晴好 (2 月 21 日到 24 日、26 日、27 日和 3 月 2 日)。我们挑选 2 月 22 日到 24 日三天每天中午五小时 (10:00~15:00) 共三个时段数据进行不稳定边界层相干结构分析。根据气象记录, 这三个时段内天气晴朗, 超声风速可靠; 风廓线雷达回波强, 可信度高, 并且包含有明显的相干结构特征。计算发现这三个时段内气象条件、大气稳定度、边界层高度等边界层特征量相似, 日变化具有重复性, 可以较好地代表当地强不稳定边界层中湍流特点。下面给出相关的统计结果。

挑选的三个时段内边界层气象条件相似,以 2 月 24 日 10:00~15:00 数据举例,五小时内平均温度为  $9.4^{\circ}\text{C}$ 。40 m 高度每小时平均水平风速分别为 4.8、4.5、4.3、4.5、4 m/s,平均风速标准差为 1.0 m/s; 2 m 高度分别为 2.5、2.1、2、2.4、2.6 m/s,平均风速标准差为 0.8 m/s,水平风速变化小。在 40 m 高空,中午风向为北风,22 日和 23 日平均风速分别为 5.4 m/s 和 5 m/s,中午以东北风为主,三天热力和动力条件与该地区冬季中午时段边界层气象特征相似。



图 1 南京浦口观测场地气象铁塔位置以及周围地形  
Fig. 1 Surrounding terrain of the meteorological observation tower at Pukou, Nanjing

下面是具体边界层特性分析。首先,利用风廓线雷达测量的折射率结构常数 ( $C_n^2$ ) 廓线梯度最大(即湍流强度突然减少)时的高度,可以定位边界层高度(翁宁泉等, 1999)。计算结果显示三个时段内,边界层高度保持在 1200 m 左右,是常见的冬季中午边界层高度。利用无量纲参数  $z/L$  来描述边界层稳定度。其中  $z$  为测量点高度,  $L$  为莫宁奥布霍夫 (Monin-Obukhov) 长度,因而有:

$$z/L = -z \frac{\kappa g H_s}{c_p \rho \theta u_*^3}, \quad (4)$$

其中,  $\kappa$  为卡曼 (Karman) 常数,这里取 0.4;  $H_s$  为地表测量得到的感热通量,  $\theta$  为位温,  $u_*$  为地表测量的水平摩擦速度。三天中午 5 小时数据中,  $z/L$  结果几乎都小于 -1 ( $|z/L| > 1$ ),说明近地层大气层结表现为强不稳定性。

对观测地点地形特征作分析,利用铁塔上分层风速测量,根据边界层对数风廓线计算当地地表粗糙度  $z_0$  和零平面位移  $z_d$ 。计算公式如下:

$$u = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left( \frac{z - z_d}{z_0} \right) - \Psi_M \left( \frac{z - z_d}{L} \right), \quad (5)$$

其中,  $\Psi_M$  为稳定度参数,在强对流(高风速)以及测量位置不高的情况下可以忽略 (Liu and Sun, 2010)。将各层风速数据代入公式 (5),可求得粗糙长度  $z_0$  以及零平面位移  $z_d$ 。2 月 24 日中午 5 小时粗糙长度  $z_0$  分别为 0.9、1.1、1.2、0.9、0.8 m。由此

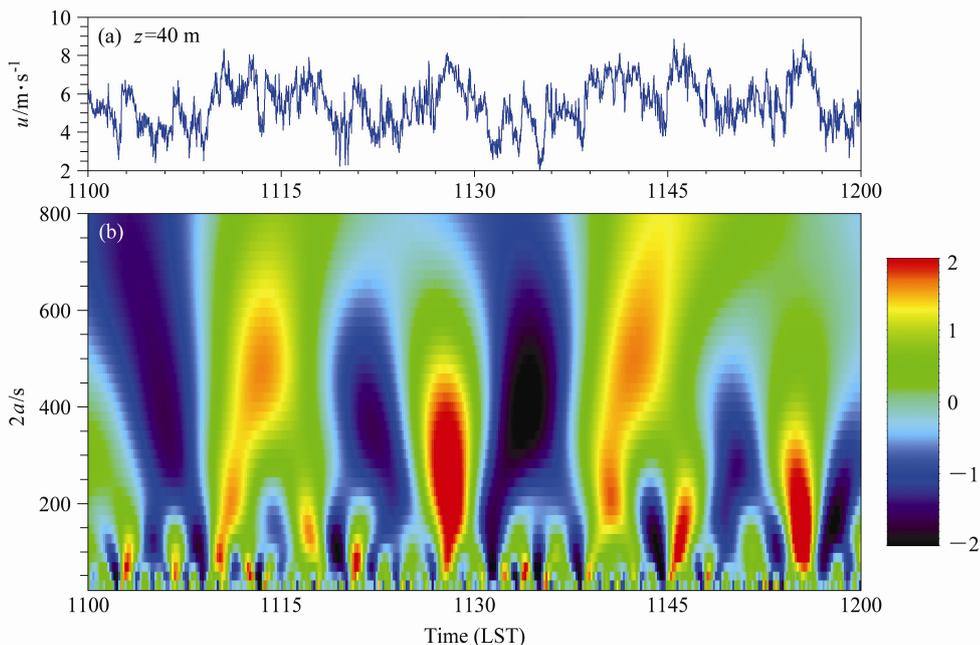


图 2 60 分钟水平风速 (a) 以及对应在各时间尺度上风速小波系数的分布 (b)。  $z$  表示高度

Fig. 2 The 60-min time series of (a) horizontal wind velocity and (b) their wavelet coefficient (color) at different time scales.  $z$  is height

可以看出周围地形粗糙度量级 (1 m 附近) 和典型城郊地形相符 (Oke, 2004)。由于整体地形为西南有少量建筑物, 东北为大量林区。因此不同时刻风向风速的不同, 导致测量数据反映不同源区的湍流特征, 造成计算出的地表粗糙度产生变化 (Oke, 2004)。

由于地表并非绝对水平, 为了进一步分析地表特征, 可以使用平面拟合 (PFR) 对数据进行坐标轴旋转 (Wilczak et al., 2001; Yuan et al., 2011)。以 40 m 处测量数据为例, 从图 3 可以看出, 10 天内归一化垂直速度 ( $w/u$ ) 在不同风向  $\varphi$  上呈现较好正弦特性, 该正弦函数在风向  $45^\circ$  左右有正最大值,  $270^\circ$  左右出现负最大值, 并且比较集中, 说明下垫面拟合平面为一个西高, 东北低的平面, 这与实际地形相符。这个下垫面适合使用 PFR 坐标轴旋转, 即单

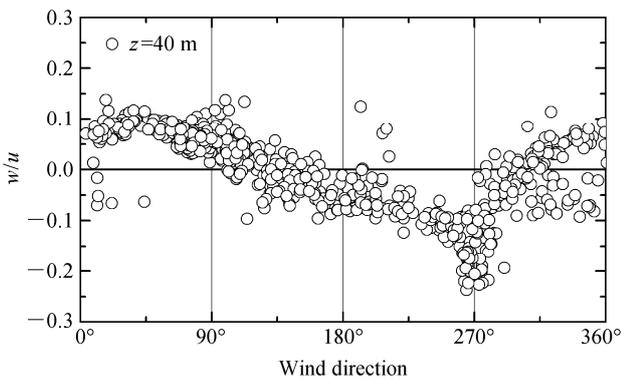
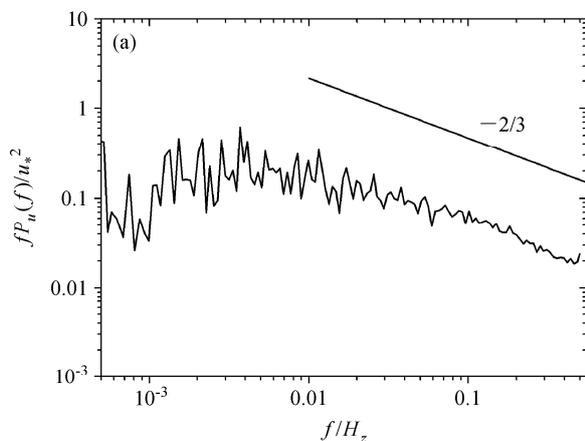


图 3 2006 年 2 月 21 日~3 月 2 日 10 天数据结果统计归一化垂直速度 ( $w/u$ ) 和风向关系 (半小时平均)

Fig. 3 Relation between normalized vertical velocity and wind azimuth (averaged every half an hour) from 21 Feb to 2 Mar, 2006



一平面拟合进行处理。处理后数据获得了明显改变 (例如 24 日 5 小时时段内水平动量通量  $u'w'$  由  $-3185$  变化成  $-4008 \text{ m}^2/\text{s}^2$ )。下文的水平速度  $u$  均指原始数据经过平面拟合 (PFR) 后得到的水平修正速度。

为分析边界层微气象特征以及小波变换的需要, 对湍流速度进行谱分析。图 4 是由 2 月 24 日 5 小时 (10:00~15:00) 时段内 40 m 处测量的逐小时的  $u$  和  $w$  数据经过线性去趋势后, 得到的五小时平均速度功率谱密度。纵坐标为归一化功率谱密度  $fP(f)/u_*^2$ ,  $f$  为频率,  $P(f)$  为快速傅里叶法计算的速度功率谱密度,  $u_*$  为摩擦速度。

可以看出,  $u$  和  $w$  在高频部分, 较好地符合  $-5/3$  律, 与理论一致。 $u$  频谱峰值频率位于  $0.0025 \text{ Hz}$  处, 对应时间尺度为  $400 \text{ s}$ 。根据 Taylor 假定可以得出, 峰值频率对应一个尺度  $1600 \text{ m}$  左右的大涡 ( $40 \text{ m}$  水平风速  $4 \text{ m/s}$ )。这个大涡水平尺度和边界层厚度  $1200 \text{ m}$  相比略大, 是充满边界层的略偏扁平状的涡, 与大涡模型特征相似。因此, 在后面的小波变换中, 我们取峰值频率对应的时间尺度  $2a=400 \text{ s}$  进行变换 (陈炯等, 2003; Horiguchi et al., 2010)。而由于风廓线雷达廓线测量间隔为  $126 \text{ s}$ 、 $400 \text{ s}$  的时间尺度也能与之对应, 使测量频率大于截止频率。 $w$  的峰值频率为  $0.5 \text{ Hz}$ , 对应尺度为  $20 \text{ m}$  的大涡 (垂直风速  $1 \text{ m/s}$ ), 远大于  $u$  的峰值频率, 测点高度不够, 使得在此高度上测量的  $w$  主要还是反映的局地特性 ( $H=40 \text{ m}$ )。

### 3.2 高风速相干结构的识别和特征分析

#### 3.2.1 小波阈值的选取和高风速相干结构的识别

Horiguchi et al. (2010) 文献中提出将持续出现

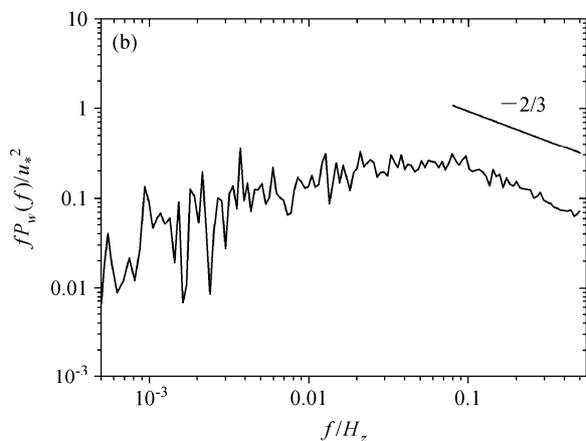


图 4 2006 年 2 月 24 日 40 m 处速度归一化谱密度图 (谱密度由 5 小时内每小时数据平均而来): (a) 水平速度  $u$ ; (b) 垂直速度  $w$

Fig. 4 The normalized power spectrum density of (a)  $u$  and (b)  $w$  on 22 Feb 2006 ( $z=40 \text{ m}$ ). The spectrum density is averaged over the five-hour original data

水平风速高值的时段定为高风速相干结构 (High-speed coherent structure)。在高风速相干结构的分析中将使用到风廓线雷达测量的水平风速廓线的数据 (测量时间间隔 126 s)。由于微波雷达测量在高度较低的位置会有盲区, 因此我们挑选测量高度在 200 m 到 1000 m 范围内的风速廓线进行计算。高风速相干结构, 是出现了持续一定时间的, 具有一定高度范围的高水平风速。图 5 上方显示的是风廓线雷达测量的流线方向的水平风速时间—高度廓线图 (2 月 24 日 12:00 到 14:00), 中间是由 40 m 处超声风速仪测得的水平风速  $u$ , 下方是水平风速在  $2a = 400$  s 的时间尺度上计算出的小波系数。从水平风速廓线上可以明显看出一些实际存在的高风速的相干结构 (圆圈圈出), 它们维持了较长时间, 高度上几乎接近整个边界层。在同时刻的水平速度及小波系数曲线上, 对应也有明显高值。在圆圈圈定的高风速相干结构时段内, 水平速度为 5.3 m/s (总平均为 4.5 m/s), 风速小波系数为 0.83 (总平均为 -0.06)。由于高风速相干结构对应较大的水平风速小波系数, 我们考虑使用后者作为定量反映高风速相干结构的依据。

高风速相干结构, 即水平风速正脉动区域, 应该对应小波系数的正大值。因此, 我们可以定一个阈值 (threshold), 并确定小波系数大于阈值的时段就是高风速相干结构。这里可以初步定一个适合三天 40 m 高度水平风速数据的小波阈值 0.4, 如图 5c 中的横线所示, 此小波阈值的选取使得一些明显的高风速相干结构 (图 5a 中红圈标出) 和小波系数超

过阈值的波峰位置对应良好。下面进一步分析小波阈值 0.4 的合理性。我们知道, 阈值的选取, 可以影响到小波系数大于阈值的时段, 即高风速相干结构出现时间在总时间中所占比例。阈值选取越大, 相干结构时间占比越少。统计三天内 40 m 高度处上述二者之间的关系, 发现当阈值取 0.4 时, 高风速相干结构出现时间占总时间的 30% 左右。过去一些研究主要利用检验这种相干结构出现的个数以及时间占比来反映阈值选取的合理性, 例如 Barthlott et al. (2007) 实验结果为 36%, Horiguchi et al. (2010) 为 25%, 他们认为这种时间占比可以比较好地说明实际相干结构的出现时间。本文的 30% 占比表明 0.4 阈值的选取能使识别出的相干结构与之前研究相符。同时, Horiguchi et al. (2010) 有结论, 水平高风速相干结构, 与 2.2 节中提到的下扫运动的出现紧密相关, 二者具有良好的对应关系。在本次实验测量的 22 日到 24 日的三天数据中, 下扫运动出现时间占总时间的 30% 左右 (32.8%、31.5%、34.4%), 和阈值 0.4 所识别的高风速相干结构的时间占比 30% 一致。因此, 40 m 处风速小波阈值 0.4 的选取是合理的, 能够成为客观地识别和定位这种水平高风速相干结构的标准。同理可以定出 2 m 高度上的水平风速小波系数阈值取 0.2。

采用以上阈值和水平风速小波系数就可以识别高风速相干结构, 将高风速相干结构和雷达风速廓线上体现出的实际存在的相干结构进行对比。如果两者一致性好, 说明这种通过阈值方法定义高风速相干结构具有可行性。为使相干特性体现更明

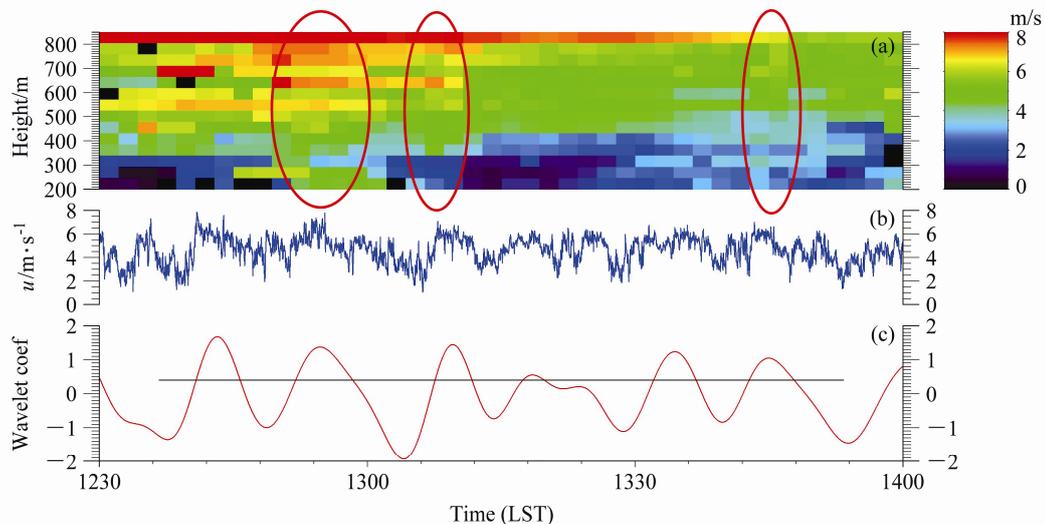


图 5 水平速度垂直廓线 (a) 和地表 40 m 观测的水平速度 (b) 及其小波变换 ( $2a = 400$  s) 系数 (c, 横线表示小波阈值 0.4) 对比

Fig. 5 (a) Vertical profiles of horizontal wind velocity ( $u$ ); (b) horizontal velocity measured at the height of 40 m and (c) its wavelet coefficient ( $2a = 400$  s), the straight line denotes wavelet threshold 0.4

显, 我们将雷达风速廓线也进行相同时间尺度 ( $2a = 400$  s) 的小波变换。将变换后廓线小波系数和 40 m 和 2 m 的水平风速小波系数及识别出的高风速相干结构进行对比, 得到图 6。

图 6a 为多普勒风廓线雷达测量的水平风速  $u$  的小波系数的时间—高度廓线图。为与前文识别出的相干结构对应, 廓线的小波阈值 0.18 也由占总廓线时间比例的 30% 而定。廓线图中小波系数大于阈值的区域, 我们认为是实际存在的高风速相干结构, 用浅色标出。可以看出这些相干结构有很大的空间尺度 (接近边界层厚度) 和一定的时间尺度 (5 分钟以上)。为了使对比结果明显, 廓线下方用短横线标出由 40 m 超声风速仪测量的水平风速小波系数定出的高风速相干结构 (小波系数大于阈值 0.4)。廓线的浅色部分 (雷达相干结构) 和短横线 (小波系数定出的高速相干结构) 的相关程度可以说明我们识别高风速相干结构方法的合理性。从图 6a 中可以看出二者符合较好。

进一步通过统计特征来反映两者对应关系: (1) 在短横线时段内 (即在超声风速确定的相干结构的时段内), 上方雷达廓线图中小波系数均值为 0.19 (廓线整体均值为 0.0068, 接近 0), 比整体均值大 2 个数量级。(2) 进行相关分析, 将雷达廓线同一时间, 不同高度数据进行平均, 压缩成一维数组。然后把数组中大于廓线阈值 0.18 的部分取值为 1, 小

于阈值部分取值-1; 下方由超声风速确定的相干结构 (短横线) 也进行相同设置。将两数组进行相关, 得到相关系数为 0.45, 二者相关性比较好, 偏差可能来自雷达测量时间间隔过大以及某些时间由于上空强湍流作用造成的测量误差。以上统计数据表明两者有着较好的对应关系, 即通过地表测量的水平风速小波系数以及确定的阈值, 确实可以反映上空实际存在的接近整个边界层厚度的高风速相干结构。

### 3.2.2 高风速相干结构特征分析

从图 6 可以看出, 高风速相干结构是间歇性出现的, 类似于原来很多研究中的近地层“喷发现象” (burst phenomenon) (Kline et al., 1967)。一个小风速的上扬运动 (ejection) 和一个高风速的下扫运动 (sweep) 组成了一个喷发的过程 (McNaughton and Brunet, 2002)。二次喷发运动的平均时间间隔 ( $T_b$ ), 即喷发的频率是描述喷发现象很重要的一个参数。在 24 日数据中, 240 min 内, 共有 18 个高风速相干结构, 因此相干结构间隔时间 ( $T_s$ ) 为 800 s。对比其他人的研究, Horiguchi et al. (2010) 的实验在平坦的半岛地形上进行, 得出  $T_s$  为 670 s 左右, 与本文结果接近。Barthlott et al. (2007) 得出  $T_s$  为 250 s 左右, 在他们的实验中测量地形由森林和少数高楼组成, 下垫面的差异导致由速度功率谱中得到最有代表性的时间尺度  $2a$  比本文小, 因此, 在他们的

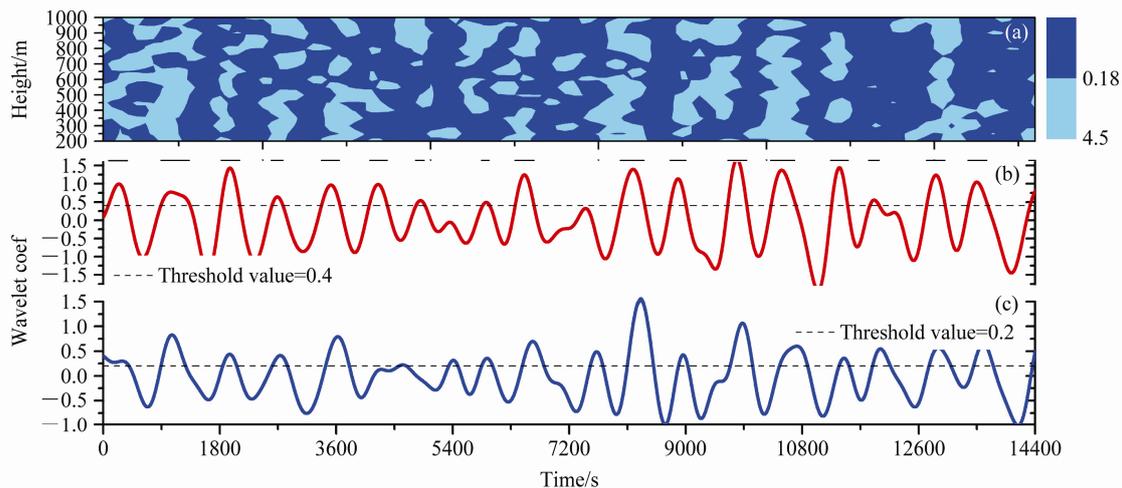


图 6 2006 年 2 月 24 日 10:00~14:00 (a) 多普勒风廓线雷达测量的水平风速  $u$  的小波系数的时间—高度廓线图以及 (b) 40 m (阈值 0.4) 和 (c) 2 m (阈值 0.2) 处水平超声风速  $u$  计算得到的小波系数 (大于阈值的部分即为识别的高风速相干结构)。(a) 浅色: 小波系数大于阈值 0.18 的部分 (雷达测量的相干结构); 下方短横线: 40 m 处小波系数大于阈值 0.4 的时段

Fig. 6 (a) Time-height cross section of wavelet coefficient for  $u$  profile measured by the Doppler wind profile radar from 1000 LST to 1400 LST, 24 Feb 2006; the corresponding time series of the wavelet coefficient for  $u$  measured by sonic anemometer at the heights of (b) 40 m (threshold value 0.4) and (c) 2 m (threshold value 0.2). In (a), the light colour regions denote the wavelet coefficient larger than threshold value 0.18 (30% of the total profile), and the bars below the profile indicate the periods in which the wavelet coefficient is larger than threshold value 0.4 at the height 40 m

$T_s$  计算中会出现一些在大尺度中被忽略的小尺度相干结构, 即相等时间内出现的相干结构比本文要多。Rao et al. (1971) 提出计算无量纲喷发间隔 ( $=U_\infty T_b / \delta$ ), 其中  $U_\infty$  为边界层上自由大气速度,  $\delta$  为边界层厚度,  $T_b$  即为喷发间隔。类似的, 将  $T_b$  换为  $T_s$ , 有相干结构无量纲空间间隔:

$$T_N = U_\infty T_s / \delta = 6.3, \quad (6)$$

其中,  $U_\infty$  取风廓线雷达最上层平均风速,  $\delta$  为边界层厚度 1200 m。  $T_N = 6.3$  表明在每隔 6.3 个边界层高度的水平位置, 就会出现一个相干结构。同理, 可以计算三天的相干结构无量纲空间间隔  $T_N$  分别为 6.5、5.2、6.3。与 Horiguchi et al. (2010) 的实验结果  $T_N$  大多数分布在 3~6.2 之间相比接近。

### 3.2.3 高风速相干结构中垂直风速的特征

通过水平风速的小波系数确定高风速相干结构后, 可以进一步分析垂直风速在此结构中的表现。在不少研究中都发现大气边界层中具有相干结构的阵性强风, 称之为“阵风”。本文研究的高风速相干结构与阵风经小波变换后的结构类似。在程雪玲等 (2007) 的研究中发现, 大风天气中, 阵风风速峰期有下沉运动, 谷期有上升运动。曾庆存等 (2007) 把阵风运用到扬沙理论中, 认为阵风和垂直速度起伏高值同时出现, 这种机制是边界层向上大物质 (沙尘等) 传输的主要手段。图7为对40 m高度的垂直风速和水平风速的小波系数的比较以及二者相关性分析。

如图7a所示, 24日12:00到15:00的3小时内的垂直风速  $w$  和水平风速  $u$  的小波系数呈现了较好的反相关性。为了更好地体现二者曲线的对应关系,  $w$  小波系数采用了  $y$  轴倒置 (上方)。在图中间短横线所标示出的高风速相干结构时段内, 垂直风

速  $w$  的小波系数曲线基本处于波峰, 即出现明显的负大值。统计得短横线时段内  $w$  小波系数均值为  $-0.26$ , 比3小时总均值  $-0.007$  大两个数量级。进一步定量说明二者在小波变换后的对应关系, 采用以下公式计算  $u$  和  $w$  小波系数的落后交叉相关系数, 如图7b图所示。

$$r_{uw}(\tau) = \frac{1}{n-\tau} \sum_{t=1}^{n-\tau} \left( \frac{u_t - \bar{u}}{s_u} \right) \left( \frac{w_{t+\tau} - \bar{w}}{s_w} \right). \quad (7)$$

可以看出二者反相关关系十分明显 ( $< -0.7$ ), 并在  $w$  相对  $u$  延迟 38 s 时落后交叉相关系数有最小值  $-0.76$ 。在其他 2 天数据中, 相关系数都小于  $-0.55$  ( $-0.58$ 、 $-0.65$ ), 相关系数最小值时的延迟时间为 35 s 和 70 s。对落后交叉相关系数进行显著性检验, 使用 Bretherton 方法计算  $u$  和  $w$  小波系数的有效自由度分别为 5.70 和 5.45, 总体有效自由度可以取上述两者的平均 5.58。在自由度为 5 的双侧  $t$  统计量检验表中, 置信度为 95% 的相关系数显著阈值为 0.727, 图7b中计算的相关系数绝对值 0.76 大于此显著阈值, 因此, 可以认为这个相关系数是显著的。 $u$  和  $w$  小波系数的反相关, 说明在水平风速  $u$  出现大值的同时, 垂直方向出现较大的垂直向下速度。即在通过水平风速识别的高风速相干结构中, 会典型延迟地出现垂直向下的高风速。原因可能是由于空气连续性和重力的作用, 水平高风速脉动将引起垂直向下的风速脉动, 这一过程完成并非瞬时, 需要一定的“延迟时间”。

通过对垂直风速的小波变换, 提取出原本并不十分清晰的垂直风速相干结构, 发现它和水平高风速之间相关关系明显。这与“阵风”研究中的水平

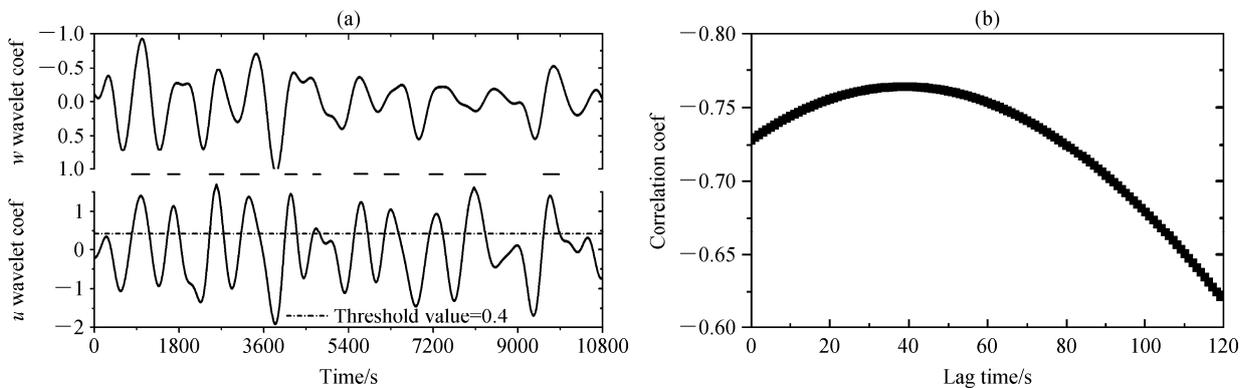


图7 2006年2月24日12:00~15:00三个小时内40 m处垂直风速小波系数 ( $y$ 轴倒置) 和同时段水平风速小波系数 (下方) (a) 以及二者的落后交叉相关系数 (b)。 (a) 虚线为水平风速小波阈值 (0.4), 短横线为下方  $u$  小波系数大于阈值0.4的时段 (即高风速相干结构的时段); (b)  $x$ 轴为  $w$  相对  $u$  的延迟时间  
Fig. 7 (a) The wavelet coefficients for  $w$  ( $y$  axis has been reversed) and  $u$  from 1200 LST to 1500 LST 24 Feb 2006 (the bars indicate the periods in which the wavelet coefficient for  $u$  is larger than threshold value 0.4); (b) the lag correlation coefficient between the two coefficients

阵风峰期对应下沉运动的结论一致。

### 3.3 高风速相干结构对动量通量的影响

在上文定义了垂直风速向下的水平高风速相干结构后, 我们希望得到这个结构对动量通量的输送有怎样的贡献。24 日数据统计, 占总时间 30% 的高速相干结构, 输送的动量通量占总动量通量的 25%。在 2.2 节中提到, 上扬 (ejection) 运动和下扫 (sweep) 运动是动量通量为负的两种湍流运动, 是湍流运动主要表现形式。下面通过分析相干结构对上扬和下扫运动的影响, 来进一步反映其对动量通量的贡献。

将 24 日 5 小时超声风速数据, 进行四象限分析 (公式 1b 和 1d)。分别计算归类出的上扬运动和下扫运动的脉动乘积 ( $u'w'$ ), 即动量通量, 并与相干结构对比, 如图 8 所示。

图 8 所示 5 小时过程中, 40 m 处下扫运动形式的动量通量为  $-3332 \text{ m}^2/\text{s}^2$ , 上扬运动形式的动量通量为  $-3875 \text{ m}^2/\text{s}^2$ , 两者比值为 0.86, 在总动量通量中占比接近。22 日至 24 日三天数据统计二者动量通量比为 0.88 (40 m 处) 和 1.06 (2 m 处)。图 8 数据可以看出, 小波系数与下扫和上扬运动之间有一定的相关关系。如在 40 m 处, 小波系数大的地方, 下扫运动输送动量通量有负的大值, 而上扬运动的动量通量则趋近于 0。在由小波系数确定的占总时间 30% 的相干结构的时段内, 下扫运动输送的动量通量为  $-1875 \text{ m}^2/\text{s}^2$ , 占 5 小时内下扫运动输送的总动量通量 ( $-3332 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ) 的 56%。定义这两个量的

比值 (0.56/0.3) 为下扫运动效率因子 (Barthlott et al., 2007; Horiguchi et al., 2010), 说明在占总时间约 30% 的相干结构内, 下扫运动输送了多少比例的动量通量。效率因子体现了高风速相干结构对下扫运动输送动量通量的贡献, 值越大说明促进作用越大, 小说明抑制作用越大, 等于 1 时说明两者随机分布, 相互没有关系。同理可以定义上扬运动效率因子。结果表明图 8 数据中, 40 m 处的下扫效率因子为 1.78, 上扬效率因子为 0.28; 2 m 处下扫效率因子为 1.51, 上扬效率因子 0.75。可见, 不论在 40 m 还是 2 m, 高风速相干结构对下扫运动都有着很明显的促进作用, 同时对上扬运动有明显的抑制作用。这个现象可以用相干结构中典型出现的垂直风速负脉动来解释, 即在相干结构中典型出现  $u > 0$  的水平高风速和  $w' < 0$  的向下垂直风速, 使得下扫运动形式的湍流运动在高风速相干结构中占据主要地位。表 1 为 22 日至 24 日计算的效率因子。

表 1 2006 年 2 月 22-24 日三天 40 m 和 2 m 处计算得到的 sweep 和 ejection 效率因子

Table 1 The calculated efficiency factors for sweep and ejection motion during 22-24 Feb 2006

	Sweep 效率因子		Ejection 效率因子	
	40 m	2 m	40 m	2 m
2 月 22 日	1.75	1.49	0.30	0.70
2 月 23 日	1.79	1.54	0.24	0.76
2 月 24 日	1.78	1.51	0.28	0.75
平均	1.77	1.51	0.27	0.74

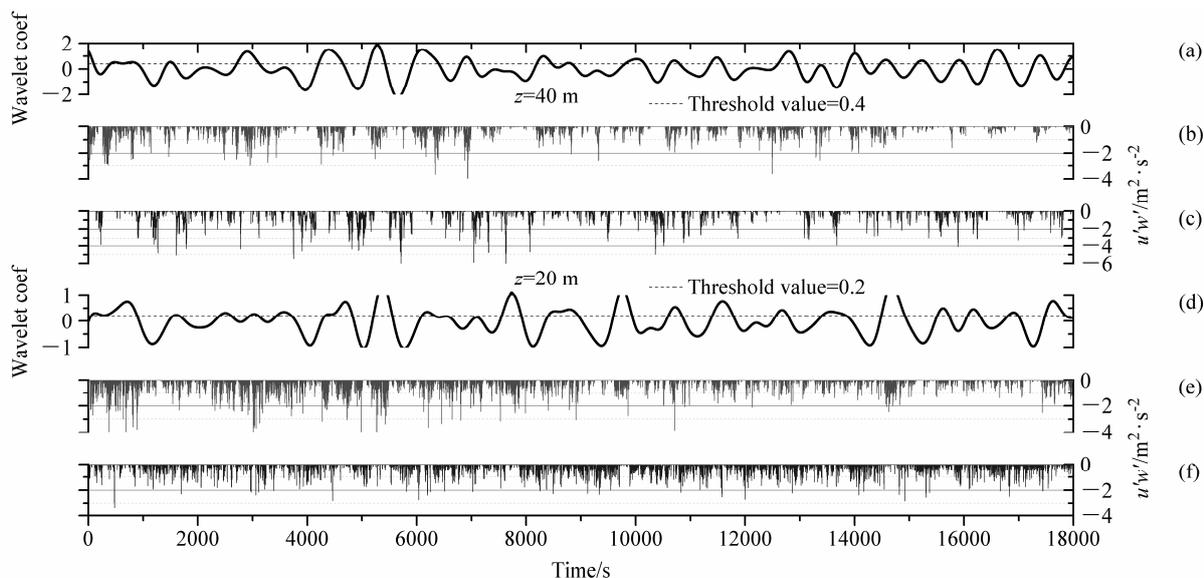


图 8 2006 年 2 月 24 日 10:00~15:00 时段内不同高度测量的 (a、d) 水平风速小波系数以及 (b、e) sweep 和 (c、f) ejection 运动动量通量: (a-c) 40 m; (d-f) 2 m

Fig. 8 The wavelet coefficient for  $u$  and instantaneous  $u'w'$  for sweep and ejection motion at the heights (a-c) 40 m and (d-f) 2 m from 1000 LST to 1500 LST 24 Feb 2006

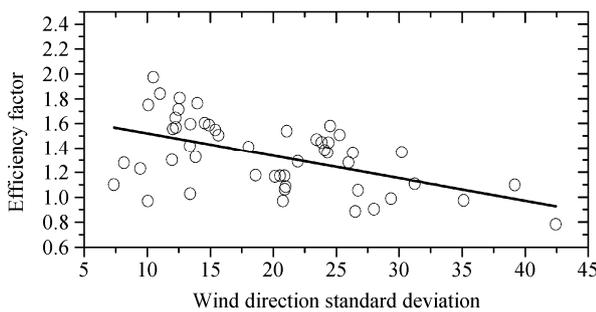


图9 三天内分时段风向标准差和该时段内的 sweep 效率因子之间关系  
Fig.9 The relationship between wind direction standard deviation and efficiency factor for sweep motion in 3 days

表 1 可知在分析的时段内, 40 m 和 2 m 处下扫运动效率因子均值分别为 1.77 和 1.51, 上下浮动很小。统计在本次试验中天气晴朗, 数据质量较好的 7 天中午时段, 40 m 和 2 m 的平均下扫运动效率因子分别为 1.71 和 1.43, 标准差为 0.10 和 0.09, 偏差较小。说明此效率因子在该区域的强不稳定边界层条件下具有一定的代表性, 即高风速相干结构对下扫运动总是存在促进作用。同理, 表 1 中 0.27 和 0.74 的上扬运动效率因子也表明该结构对上扬运动的抑制。高风速相干结构通过对下扫运动的促进和对上扬运动的抑制来影响动量通量。同时, 40 m 处的这种相关关系比 2 m 处大, 说明相干结构在 40 m 处对下扫运动和上扬运动动量通量的影响比 2 m 处更加明显。原因应该是 2 m 高度上测量到的风向变化较 40 m 高度上更加明显 (风向标准差大), 导致高风速相干结构的准层流特性不十分明显, 从而影响了其对动量通量的输送能力。图 9 为三天内风向标准差和下扫运动效率因子之间关系, 可以看出, 风向标准差大, 变化快, 相干结构的准层流特性变差, 下扫运动效率因子也随之变小, 二者之间反相关关系明显 ( $R^2=-0.53$ )。

#### 4 结论和讨论

利用小波阈值对不稳定层结大气边界层中地表风速及其小波系数进行分析, 发现了以下结论:

(1) 将地表水平风速的小波系数所确定出的高风速相干结构 (时间尺度  $2a=400$  s) 与风廓线雷达数据测量的风速廓线作定量比较, 发现相关性较好 ( $R^2 = 0.45$ ), 即由小波系数识别高风速相干结构是可行的。三天高风速相干结构无量纲空间间隔  $T_N$  分别为 6.5、5.2、6.3, 相干结构特征和前人在不同下垫面实验中的测量值有所区别。

(2) 水平风速和垂直风速的小波系数之间存在良好反相关 ( $R^2<-0.7$ )。因此由水平风速确定的高风速相干结构内, 典型延迟地出现向下垂直风速。

(3) 分析高风速相干结构对动量通量的影响。发现相干结构中, sweep 运动发展旺盛, 而 ejection 运动的动量通量受到抑制, 三天 40 m 高度上平均效率因子分别为 1.77 和 0.27。通过对 40 m 和 2 m 数据对比, 发现这种影响和风向标准差有一定的反相关关系 ( $R^2=-0.53$ ), 风向变化越大, 相干结构的准层流特性受到干扰, 对动量通量输送的影响也随之变小。

致谢 中国科学院安徽光机所和中国电子科技集团公司第三十八研究所部分研究人员参与了实验, 在此表示衷心感谢。

#### 参考文献 (References)

- Antonia R A, Chambers A J, Friehe C A, et al. 1979. Temperature ramps in the atmospheric surface layer [J]. *J. Atmos. Sci.*, 36 (1): 99–108.
- Barthlott C, Drobninski P, Fesquet C, et al. 2007. Long-term study of coherent structures in the atmospheric surface layer [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 125 (1): 1–24.
- 陈炯, 郑永光, 胡非. 2003. 用连续子波变换提取城市冠层大气湍流的相干结构 [J]. *大气科学*, 27 (2): 182–190. Chen Jiong, Zheng Yongguang, Hu Fei. 2003. Isolating the coherent structure in atmospheric turbulence in the rough urban canopy layer by using continuous wavelet transform [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 27 (2): 182–190.
- Chen J, Hu F. 2003. Coherent structures detected in atmospheric boundary-layer turbulence using wavelet transforms at Huaihe River basin, China [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 107 (2): 429–444.
- Chen W J, Novak M D, Black T A, et al. 1997. Coherent eddies and temperature structure functions for three contrasting surfaces. Part I: Ramp model with finite microfront time [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 84 (1): 99–124.
- 程雪玲, 曾庆存, 胡非, 等. 2007. 大气边界层强风的阵性和相干结构 [J]. *气候与环境研究*, 12 (3): 227–243. Cheng Xueling, Zeng Qingcun, Hu Fei. 2007. Gustiness and coherent structure of strong wind in the atmospheric boundary layer [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 12 (3): 227–243.
- Collineau S, Brunet Y. 1993. Detection of turbulent coherent motions in a forest canopy. Part 1: Wavelet analysis [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 65 (4): 357–379.
- Drobninski P, Carlotti P, Newsom R K, et al. 2004. The structure of the near-neutral atmospheric surface layer [J]. *J. Atmos. Sci.*, 61 (6): 699–714.
- Farge M. 1992. Wavelet transforms and their applications to turbulence [J]. *Annu. Rev. Fluid. Mech.*, 24 (1): 395–458.
- Foster R C, Vianey F, Drobninski P, et al. 2006. Near-surface coherent structures and the vertical momentum flux in a large-eddy simulation of

- the neutrally-stratified boundary layer [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 120 (2): 229–255.
- Gao W, Li B L. 1993. Wavelet analysis of coherent structures at the atmosphere-forest interface [J]. *J. Appl. Meteor.*, 32 (11): 1717–1725.
- Gao W, Shaw R H, Paw U K T. 1989. Observation of organized structure in turbulent flow within and above a forest canopy [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 47 (1-4): 349–377.
- Horiguchi M, Hayashi T, Hashiguchi H, et al. 2010. Observations of coherent turbulence structures in the near-neutral atmospheric boundary layer [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 136 (1): 25–44.
- 胡非. 1998. 大气边界层湍流涡旋结构的小波分解 [J]. *气候与环境研究*, 3 (2): 97–105. Hu Fei. 1998. Atmospheric boundary layer eddy structure identification by orthonormal wavelet expansion [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 3 (2): 97–105.
- 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 environment research in IAP [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 27 (4): 712–728.
- Katul G, Kuhn G, Schieldge J, et al. 1997. The ejection-sweep character of scalar fluxes in the unstable surface layer [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 83 (1): 1–26.
- Kline S J, Reynolds W C, Schraub F A, et al. 1967. The structure of turbulent boundary layers [J]. *The Journal of Fluid Mechanics*, 30 (4): 741–773.
- Krusche N, De Oliveira A P. 2004. Characterization of coherent structures in the atmospheric surface layer [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 110 (2): 191–211.
- Liu Gang, Sun Jianning. 2010. Impact of surface variations on the momentum flux above the urban canopy [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 101 (3-4): 411–419.
- 刘罡, 孙鉴泞, 蒋维楣, 等. 2009. 城市大气边界层的综合观测研究——实验介绍与近地层微气象特征分析 [J]. *中国科学技术大学学报*, 39 (1): 24–32. Liu Gang, Sun Jianning, Jiang Weimei, et al. 2009. Comprehensive observation research on urban atmospheric boundary layer—Description of field experiment and analysis of micrometeorological properties in the surface layer [J]. *Journal of University of Science and Technology of China (in Chinese)*, 39 (1): 24–32.
- Mahrt L. 1991. Eddy asymmetry in the sheared heated boundary layer [J]. *J. Atmos. Sci.*, 48 (3): 472–492.
- McNaughton K G, Brunet Y. 2002. Townsend's hypothesis, coherent structures and Monin-Obukhov similarity [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 102 (2): 161–175.
- Oke T R. 2004. Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites [R]. Report No., Td. Geneva: World Meteorological Organization.
- Rao K N, Narasimha R, Badri Narayanan M A. 1971. The 'bursting' phenomenon in a turbulent boundary layer [J]. *J. Fluid. Mech.*, 48 (2): 339–352.
- 是勋刚. 1994. 湍流 [M]. 天津: 天津大学出版社, 255pp. Shi Xungang. 1994. *Turbulence* [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 255pp
- Singh Khalsa S J, Greenhut G K. 1985. Conditional sampling of updrafts and downdrafts in the marine atmospheric boundary layer [J]. *J. Atmos. Sci.*, 42 (23): 2550–2562.
- Wallace J M, Eckelmann H, Brodkey R S. 1972. The wall region in turbulent shear flow [J]. *J. Fluid. Mech.*, 54 (1): 39–48.
- 翁宁泉, 曾宗泳, 肖黎明, 等. 1999. 大气折射率结构常数垂直分布特征 [J]. *强激光与粒子束*, 11 (6): 673–676. Weng Ningquan, Zeng Zongyong, Xiao Liming, et al. 1999. Profile and characteristic of refractive index structure constant [J]. *High Power Laser & Particle Beams (in Chinese)*, 11 (6): 673–676.
- Wilczak J M, Oncley S P, Stage S A. 2001. Sonic anemometer tilt correction algorithms [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 99 (1): 127–150.
- Williams A G, Hacker J M. 1992. The composite shape and structure of coherent eddies in the convective boundary layer [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 61 (3): 213–245.
- Yuan Renmin, Kang M, Park S B, et al. 2011. Expansion of the planar-fit method to estimate flux over complex terrain [J]. *Meteor. Atmos. Phys.*, 110 (3-4): 123–133.
- Zeng Qingcun, Cheng Xueling, Hu Fei, et al. 2010. Gustiness and coherent structure of strong winds and their role in dust emission and entrainment [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 27 (1): 1–13.
- 曾庆存, 胡非, 程雪玲. 2007. 大气边界层阵风扬尘机理 [J]. *气候与环境研究*, 12 (3): 252–255. Zeng Qingcun, Hu Fei, Cheng Xueling. 2007. The mechanism of dust entrainment by gustwind [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 12 (3): 252–255.