

Chen Z Y, Sun J N, Yuan R M, et al. An analysis of convective boundary layer eddy structure in water tank by orthonormal wavelet. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, 47(6):964~970

对流槽湍流涡旋结构特征的小波分析

陈子云¹ 孙鉴宁¹ 袁仁民² 蒋维楣¹

1 南京大学大气科学系,南京 210093

2 中国科技大学地球与空间科学系,合肥 230026

摘要 为研究夹卷层的湍流特性,用对流槽模拟大气对流边界层并做湍流温度测量.能谱分析表明,混合层湍流谱幂律接近“ $-5/3$ ”次律;而夹卷层湍流谱幂律有明显的分段特征.利用离散正交小波对其湍流脉动信号进行去噪和尺度分解,将原始信号分成均匀各向同性小尺度涡旋成分和大尺度涡旋成分,并对分解后的信号做能谱分析.结果表明,不论是在混合层还是在夹卷层,小涡都能很好地满足 Kolmogorov 的“ $-5/3$ ”次律;而大尺度涡旋则在混合层和夹卷层中表现出不同的特征.

关键词 对流槽 夹卷层 湍流 小波变换

文章编号 0001-5733(2004)06-0964-07 中图分类号 P421 收稿日期 2003-06-19,2004-06-19 收修定稿

AN ANALYSIS OF CONVECTIVE BOUNDARY LAYER EDDY STRUCTURE IN WATER TANK BY ORTHONORMAL WAVELET

CHEN Zi-Yun¹ SUN Jian-Ning¹ YUAN Ren-Min² JIANG Wei-Mei¹

1 Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China

2 Department of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

Abstract Using orthonormal wavelet transform, we make an analysis to experimental data of convective boundary layer turbulence in water tank, including multi-scale decomposition and high frequency noise removing. Spectrum analysis shows that turbulence in the mixed layer is very different from that in the entrainment zone. This difference may be caused by various characteristics of large scale elements in turbulence. While the small scale turbulence in both the mixed layer and the entrainment zone are similar, they are homogeneous and their spectra are satisfied with the Kolmogorov's $-5/3$ exponent law.

Key words Water tank, Entrainment zone, Turbulence, Wavelet transformation.

1 引言

对流边界层湍流涡旋结构一直是大气边界层物理和湍流扩散研究的重要课题,以往的工作大都集中在讨论湍流量的垂直分布,通量计算和湍流能量

收支问题上^[1~3].大气湍流包含各种不同尺度的涡旋结构,不同尺度的涡旋在物质和能量的传输过程中承担着不同的作用.长期以来,理论上大都是按照 Kolmogorov 的思想研究均匀各向同性湍流模型.在边界层中发现了相干结构以后^[4~6],非均匀各向同性湍流的研究日益受到重视.而边界层顶部的物理

基金项目 国家自然科学基金项目(40105002,40075004).

作者简介 陈子云,男,1980年生,南京大学大气科学系大气物理专业硕士研究生. E-mail jnsun@netra.nju.edu.cn

过程(夹卷过程)对边界层与自由大气之间的物质和能量交换有着重要影响,近年来这方面的研究越来越受到人们的关注,由于观测资料不易获得,这方面的研究进展比较缓慢.人们对夹卷的认识主要表现在夹卷速度、夹卷通量比以及夹卷层零阶结构和一阶结构模式等概念的建立和参数化方面^[7~9].对夹卷层内部结构的分析研究则很少见到^[10~11].

对流槽能很好地模拟对流边界层的发展以及对流边界层的结构分布和湍流特征^[10~11].模拟结果表明对流槽中温度湍流结构与大气近地层湍流结构不仅在概率分布、结构函数、谱等方面完全相似,而且温度斜坡型的特征与大气中的情况也是完全相似的^[12],因而使得对流边界层湍流涡旋结构的深入研究成为可能.对流槽模拟实验的优点在于测量数据可靠、细节观察透彻、实验条件易于控制,并可使用不同手段进行测量. Deardroff et al.^[13]基于对流槽实验提出关于夹卷速度的参数化方案;孙鉴泞等^[14]利用光学成像技术观察到混合层和夹卷层的不同湍流结构,并根据对流槽实验结果提出了关于夹卷速度的另一种参数化方案;袁仁民等^[15]则对夹卷层内湍流温度测量值进行了细致分析,结果表明夹卷层的湍流结构表现出各向异性.本文运用小波变换与信号分解技术对对流槽实验的湍流温度测量值做进一步研究,分析对流边界层(包括夹卷层)的湍流涡旋结构特征.

2 小波变换与涡旋结构分析

早期的信号分析工作都是基于傅里叶变换滤波的,但它只是在频率或波数空间中的一种分解,并未真正涉及信号的时空尺度.近 20 年里兴起的小波(也称子波)变换方法,很快被用来弥补傅里叶变换方法的不足,并有不少研究工作已将其应用于普通湍流的分析当中^[16~18].比如,1989 年 Argoul et al.^[16]用小波分析法分析湍流的风洞实验数据,首次在计算机上给出湍流级串的直观图示.1992 年 Farge^[17]将连续小波变换用于湍流的研究.

2.1 连续小波变换

函数 $f(t)$ 在小波母函数为 $\psi_{ab}(t)$ 时的连续小波变化被定义为 $f(t)$ 与 $\psi_{ab}(t)$ 的褶积^[19]:

$$W_{f(a,b)} = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi_{ab}(t) dt \quad (1)$$

其中, $\psi_{ab}(t)$ 是 $\psi(t)$ 经过平移(参数为 b)和伸缩(参数为 a)变换得到的小波函数族:

$$\psi_{ab}(t) = \left[\frac{t-b}{a} \right] \quad (2)$$

数学上要求母函数 $\psi(t)$ 满足一系列严格要求.目前,被广泛使用的连续小波函数有墨西哥帽、法兰西帽和 Morlet 函数等^[18].

小波变换可形象地看成数学显微镜,其光学性质则取决于母函数 $\psi(t)$.小波变换可以根据 $f(t)$ 中不同尺度的成分自动变焦,调整分辨率.正如文献^[19]指出,对于湍流信号而言,小波函数具有明确的物理意义:如果 b 是空间参数,则 ψ_{ab} 表示物理空间中 b 处的一个空间尺度为 a 的湍流结构;如果 b 是时间参数,则 ψ_{ab} 表示时刻 b 发生了一个时间尺度为 a 的事件.小波变换相当于将信号与小波函数在某一位置 b 做局部的相关分析,如果其相关性高,则表明信号在该处含有该小波成分,使得信号在该处与小波具有很好的一致性.

实验主体为长方体水槽(长、宽、高分别为 200cm,40cm,45cm),四周为绝热性能较好的透明有机玻璃板,底部放置加热油箱,测量温度脉动的 6 个探头放置在水槽的中央垂直线上,间隔为 2~4cm,采样频率为 25Hz.模拟大气对流边界层时,先往水槽中加入等温冷水至一定高度,通常为 20cm,然后在其上逐层加热水.通过控制加热器的加热功率可调节热水温度,从而使所加热水形成逆温层,并具有一定的温度梯度.待槽中逆温层趋于稳定,通过油箱进行底部加热,当水槽中混合层湍流发展较为充分时(通常开始加热 5min 后),开始测量夹卷层和混合层中的温度脉动.有关具体实验装置及测量方法,详见文献^[11]、^[14]、^[15].

图 1 为对流槽模拟实验中槽中一固定探头的温度记录(已做去噪处理).传感器为 Dantec 公司生产的热膜电阻.采样频率为 25Hz.由图上可以看出,前 170s 探头处于对流边界层顶上的逆温层中,温度记录主要表现为波动特征;随后在 170~360s 时段里,由于对流边界层的发展,混合层顶不断抬升,探头处

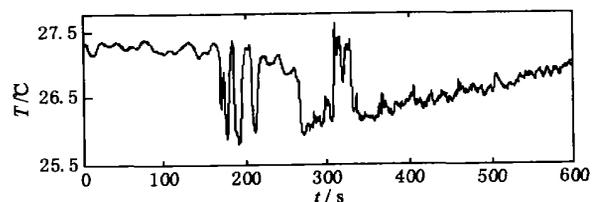


图 1 对流槽实验的温度记录

Fig. 1 The temperature record in the water convection tank

于夹卷层中,温度记录表现出剧烈的变化,这是由来自夹卷层上、下不同性质流体的强烈混合所致;360s之后,随着混合层顶的继续抬升,探头处于混合层中,温度记录表现为较均匀的湍流特征.

图 2a 和 2b 分别是图 1 中 170 ~ 210s 和 430 ~ 470s 时段的温度记录,对应于探头处于夹卷层和混合层上部的情况. 图 2c 和 2d 分别是它们的 Morlet 连续小波变换,图中纵坐标为时间尺度,横坐标则代表实际的采样时刻,黑色代表小波变换系数 $W(a,b) > 0$,白色代表 $W(a,b) < 0$. 图 2 (c, d) 中简单地看出不同时间尺度的湍流涡旋结构(彩色图

或灰度图可很好地表现小波变换系数的突变和变化细节,但对看清涡旋结构帮助不大). 从湍流涡旋尺度结构图上可以看出,在不同时间尺度上,湍流具有越来越精细的涡旋结构,但夹卷层和混合层中的涡旋结构还是表现出明显的不同特征. 在夹卷层中(图 2 c),小尺度涡旋与大尺度涡旋之间存在较明显的分离现象. 涡旋结构的自相似性比较差,与湍流结构的串级理论不相符合,表现出显著的非均匀湍流特征. 在混合层上部(图 2d),涡旋结构的自相似性较好,基本表现为均匀湍流特征. 而在混合层中下部则为典型的均匀湍流(图略).

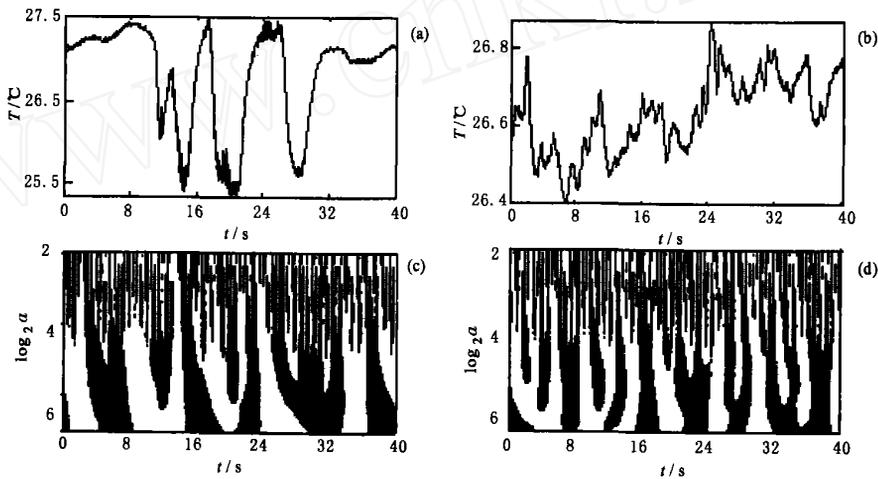


图 2 温度记录及其小波变换

(a) 夹卷层中温度记录; (b) 混合层中温度记录; (c) 夹卷层温度记录的小波变换; (d) 混合层温度记录的小波变换.

Fig. 2 The temperature record and their wavelet transforms

2.2 离散正交小波变换^[20]与去噪

在连续小波变换中,当 a, b 连续取值时变换系数 $W(a,b)$ 对应于不同 a, b 的值并不是相互独立的,它们之间有一定的重复信息. 在处理实际的离散信号时,可以通过取特定的 a 和 b 来构造离散的完备正交小波函数序列. 通常取 $a = a_0^j, b = ib_0 a_0^j, a_0 = 2, b_0 = 1$,称为二进小波序列. 从而有 $a = a_0^{i+j}, b = ib_0 a_0^{i+j}$. 任意函数 $f(t)$ 都可以用 $\psi_{i,j}$ 的线性组合逼近到任意高的精度. 对于采样间隔为 Δt 的离散数据序列 $f(t)$, 其小波变换简化为

$$W_f(i, j) = \sum_{k=1}^n \psi_{i,j}(k) f(k), \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

$$f(t) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} \sum_{i=-\infty}^{\infty} W_f(i, j) \psi_{i,j}(t) 2^j, \quad (4)$$

表达式(4)与傅里叶变换有两点明显的不同,一是级数展开有两个指标,分别表征尺度和位置,二是基函数本身也包含了尺度和位置信息. 离散小波变换常用

快速算法,如 Mallat 交叉映射金字塔算法(FWT)^[21]. 有些重要的离散正交小波母函数并不能像连续小波母函数那样写出具体的表达式,如 Daubechies 小波.

对流槽实验的温度测量数据中包含有大量的噪声,主要是白噪声. 它是由贯穿整个频带的近似等幅的谱能所组成. 表现为时间序列中的尖端,由完全随机的杂乱信号或测试电路的电磁震荡产生. 白噪声使能谱在高频“翘尾”是湍流分析时经常遇到的现象. 实际上由于黏性耗散作用高频湍流能量应该是衰减的,因此在分析湍流资料时必需消除高频噪声. 胡非等^[22,23]在对大气湍流资料进行去噪处理时,经过数值实验发现三阶 Daubechies 小波的使用效果非常好. 本文采用相同的方法,并对使用的数据进行了小波去噪处理.

图 3 和图 4 分别为混和层和夹卷层中温度测量记录经去噪后所得信号及其功率谱密度 ($S(f)$) 分析. 其中谱密度指的是单位频率上的能量,也就是谱能在频率空间上的分布(一般为信号强度方差). 图

3b 显示, 混和层湍流的能谱密度较好地符合 “- 5/3” 次律. 而由图 4b 中可以看出, 夹卷层中湍流能谱密度明显分成两段: 低频部分偏陡, 不符合 “- 5/3” 次律; 高频部分则仍然较好地符合 “- 5/3” 次律. 这与小波变换所得的涡旋结构相一致. 即混合层中湍流较均匀, 自相似性较好, 功率谱密度基本符合 “- 5/3” 次律; 而夹卷层中湍流不均匀, 涡旋结构有较明显的大、小尺度分离, 功率谱密度分成两段.

2.3 区分涡旋结构

将离散小波变换看作一个滤波器可以将原始信号分解成 “近似” 和 “细节” 两部分. 它们各占一半数据长度, 并不增加数据之存储量, 但由它们却可以精

确地重构原信号. 即原始信号 = “近似” + “细节” [18, 20].

区分大、小涡旋依据的标准是: (1) 分解出来的小涡应该是各向同性的; (2) 大、小尺度涡旋应该关联度很小; (3) 小尺度涡旋的能量远小于大尺度涡旋的能量; (4) 大涡对湍流通量的贡献远小于小涡 [24]. 在上述准则下, 通过数值实验发现, 对于对流槽湍流温度信号取三阶 Daubechies 小波的 7 次分解较好 (对于 25Hz 的采样数据, 相当于分解到 $2^7/25s$ 的特征尺度).

图 5 是对图 3a 所示的原始信号的分解. 也就是按照大小涡旋的区分标准, 将图 3a 的信号 (混合层

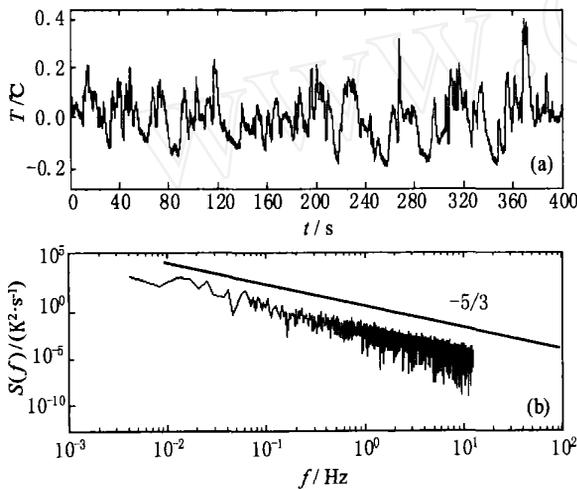


图 3 混合层湍流温度信号 (a) 及其功率谱 (b)

Fig. 3 The temperature record in mixed layer (a) and its power spectrum (b)

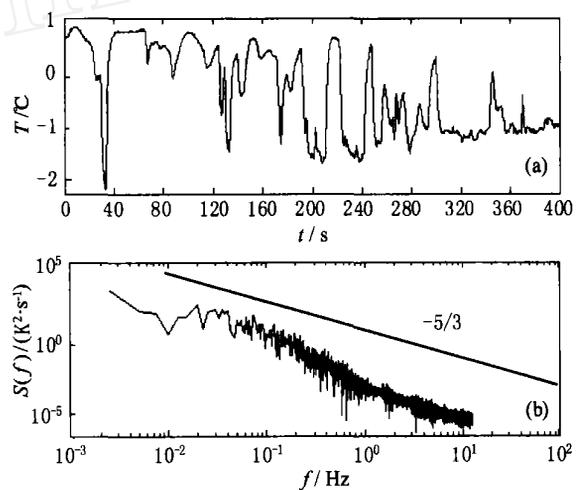


图 4 夹卷层湍流温度信号 (a) 及其功率谱 (b)

Fig. 4 The temperature record in entrainment zone (a) and its power spectrum (b)

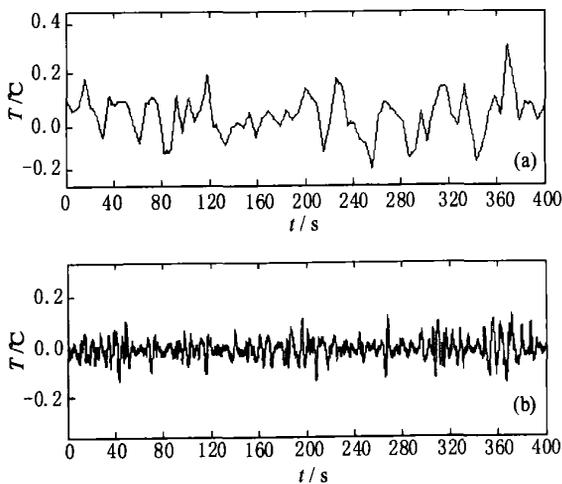


图 5 对混合层原始温度记录用三阶 Daubechies 小波分解获得的信号 (a) 大涡信号; (b) 小涡信号.

Fig. 5 Daubechies three-order wavelet decomposition for the temperature record in mixed layer

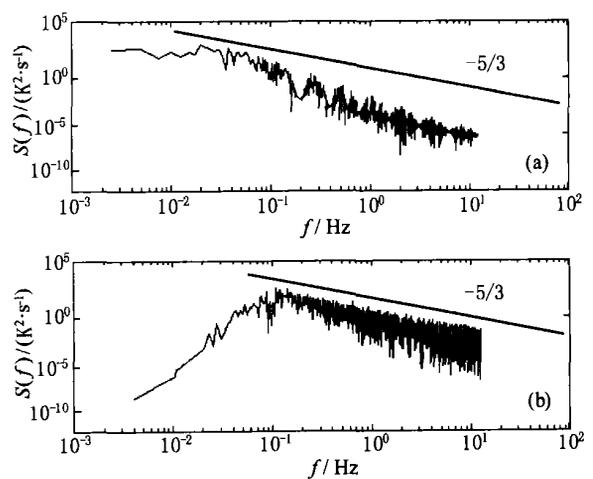


图 6 对应于图 5 的功率谱密度分析 (a) 大涡信号的功率谱; (b) 小涡信号的功率谱.

Fig. 6 The power spectrum for Fig. 5

经过探头)分解成“近似”+“细节”两个部分.然后分别进行分析.图 6a 为大尺度湍流的能谱密度明显偏离“ $-5/3$ ”次律,而图 6b 中的小尺度湍流能谱密度则很好的符合“ $-5/3$ ”次律.再看原始信号的湍流能谱密度(图 3b 所示),它也较好地满足“ $-5/3$ ”次律.由此可见,混合层中大尺度湍流并没有明显改变湍流能谱的形状,说明大、小尺度湍流之间存在内在联系,本文将这种联系理解为自组织性,对流层中湍流信号的小波变换(图 2d 所示)具有较好的自相似性也反映出这一性质.事实上,对流槽模拟实验中的混合层湍流是对流湍流,且发展较充分.因而湍流涡旋结构比较均匀,其能量的传递符合串级理论解释.

图 7 是对图 4a 所示的原始信号的分解.也就是按照大小涡旋的区分标准,将图 4a 的信号(夹卷层经过探头)分解成“近似”+“细节”两个部分.然后分别进行分析.图 8 是对应于图 7 的功率谱密度分析.图 8a 所示为大尺度湍流的能谱密度偏离“ $-5/3$ ”次律,而图 8b 中的小尺度湍流能谱密度基本符合“ $-5/3$ ”次律.然而原始信号的湍流能谱密度(图 4b 所示)并不满足“ $-5/3$ ”次律,而是出现了分段现象.由此可见,夹卷层中大尺度湍流改变了湍流能谱形状,说明大、小尺度湍流之间缺乏内在联系,夹卷层中湍流信号的小波变换(图 2c)表现出大小涡旋之间较明显的分离现象,表明夹卷层中湍流在大、小涡旋之间缺乏自组织性,自相似性较差,至少其间的能量传递很难用串级理论解释.

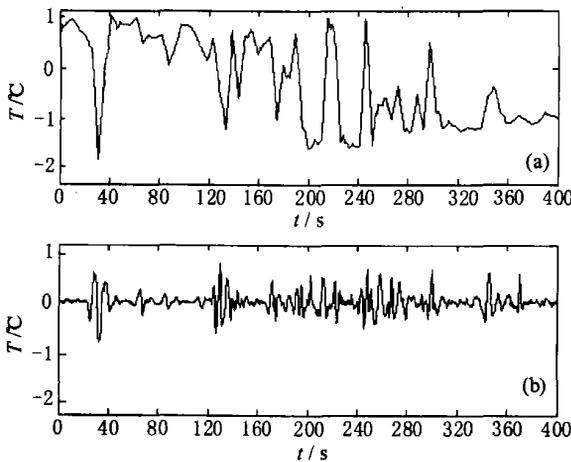


图 7 对夹卷层原始温度记录用三阶 Daubechies 小波分解获得的信号
(a) 大涡信号; (b) 小涡信号.

Fig. 7 Daubechies three-order wavelet decomposition for the temperature record in entrainment zone

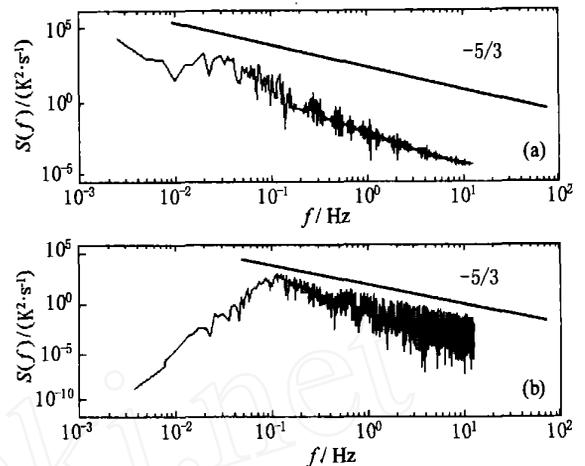


图 8 对应于图 7 的功率谱密度分析
(a) 大涡信号的功率谱; (b) 小涡信号的功率谱.

Fig. 8 The power spectrum for Fig. 7

为了进一步分析混合层和夹卷层大尺度涡旋结构特征,本文对分别位于混合层中下部、混合层上部及夹卷层的湍流温度信号做三阶 Daubechies 小波的 7 次分解.用获得的大涡信号进行能谱分析.具体做法是:对能谱分段取平均,在双对数坐标下做线性拟合,拟合所得直线的斜率即是大涡能谱密度的谱幂律.表 1 所列是 6 个实验的数据处理结果.

表 1 混合层不同位置大涡信号的谱幂律

Table 1 The exponent of power spectrum for the big eddy signal in different locations of convectively mixed layer

实验次数	探头位置		
	混合层中下部	混合层上部	夹卷层
1	- 2.17	- 2.12	- 2.97
2	- 2.30	- 2.28	- 3.03
3	- 2.17	- 2.14	- 2.95
4	- 2.23	- 2.20	- 2.99
5	- 2.15	- 2.15	- 2.89
6	- 2.16	- 2.15	- 2.88

表 1 中数据显示,混合层中下部与混合层上部的大涡信号谱幂律非常接近,都在 -2.2 附近.说明整个混合层内湍流涡旋结构特征是一致的;而夹卷层内大涡信号谱幂律明显比前者偏陡,为 $-2.9 \sim -3.0$,说明夹卷层的大尺度涡旋特征与混合层不同.就目前的认识而言,混合层中湍流发生的机制是对流,而夹卷层中湍流发生机制是夹卷混合,本文认为充分发展的对流使湍流趋于均匀,湍流能量通过串级过程从大尺度涡旋传递给小尺度涡旋直至耗

散掉. 因此对流层中的湍流具有较好的自相似性, 各向同性特征很明显. 夹卷层中的湍流则是来自夹卷层上、下的不同性质的流体混合产生的. 这种混合主要体现在夹卷层内的大尺度涡旋上, 由于参与混合的流体性质不同, 因此造成夹卷层中的湍流具有很强的不均匀性. 夹卷层内存在的小尺度涡旋, 本文认为它由大尺度涡旋破碎和来自混合层的上冲泡的携带共同组成, 而非串级过程产生, 可能混合层上冲泡的携带贡献更大, 因此夹卷层湍流的自相似性较差. 由此可见, 混合层和夹卷层湍流特征的不同是由不同的发生机制造成的.

3 结论与讨论

小波变换可以直观清晰地表现不同尺度的湍流结构. 用对流槽模拟实验的混合层和夹卷层湍流温度信号所做的小波变换表明, 混合层湍流结构具有较强的自相似性, 夹卷层湍流结构自相似性比较差.

离散小波变换可对实测湍流信号进行有效的尺度分解. 数值实验表明, 对于对流槽实验的湍流温度而言, 采用三阶 Daubechies 小波的 7 次分解较好. 分离出的小尺度湍流不论在混合层还是在夹卷层, 其谱幂律都能较好地满足 Kolmogorov 的“ $-5/3$ ”次律.

能谱分析发现, 在混合层中, 大尺度湍流的存在并未明显改变原始信号的能谱形状, 仍基本为“ $-5/3$ ”次律; 而在夹卷层中, 大尺度湍流使原始信号的能谱形状显现分段特征, 低频段偏陡, 高频段仍为“ $-5/3$ ”次律.

从湍流发生机制上分析, 混合层中大、小尺度湍流属同一性质, 即对流湍流. 因此自相似性良好, 湍流较均匀. 表现为能谱基本满足“ $-5/3$ ”次律. 而在夹卷层中, 大、小尺度湍流性质不同, 大尺度涡旋由来自夹卷层上下不同性质流体混合产生, 而小尺度涡旋湍流则可能主要来自对流层上冲泡的携带. 因此自相似性较差, 湍流不均匀, 表现为能谱具有分段特征.

基于上述结果与分析, 本研究认为混合层和夹卷层湍流涡旋结构的不同特征是由大尺度涡旋湍流造成的, 本质上讲, 是由大尺度湍流的不同发生机制造成的. 目前人们对对流边界层的了解已经比较深入, 而对夹卷层的认识还很不充分, 细致研究夹卷层湍流特征有助于全面了解夹卷机制, 并建立合理的

物理模型. 当然, 仅有夹卷层的温度场特征是不够的, 还需细致了解夹卷层的速度场特征, 我们将对此做进一步研究.

参考文献

- [1] Kaimal J C, Wyngard J C, Haugen D A, et al. Turbulence structure in the convective boundary layer. *J. Atmos. Sci.*, 1976, **33**: 2152 ~ 2169
- [2] Lenschow D H, Wyngard J C, Pennel W T. Mean-field and Second-moment budgets in a baroclinic convective boundary layer. *J. Atmos. Sci.*, 1980, **37**: 1313 ~ 1326
- [3] ZHOU Ming-Yu, Lenschow D H, Stawkov B B, et al. Wave and turbulence structure in a shallow baroclinic convective boundary layer and overlying inversion. *J. Atmos. Sci.* 1985, **42**: 47 ~ 57
- [4] Wilzak J M. Large-scale Eddies in the unstably stratified atmospheric surface layer. Part I. Velocity and temperature structure. *J. Atmos. Sci.*, 1984, **41**(24): 3537 ~ 3550
- [5] Antonia R A, Chambers A J, Friche C A, et al. Temperature ramps in the atmospheric surface layer. *J. Atmos. Sci.*, 1979, **36**(1): 99 ~ 108
- [6] Williams A G, Hacker J M. The composite shape and structure of coherent eddies in the convective boundary layer. *Boundary-layer Meteorology*, 1992, **61**(3): 213 ~ 245
- [7] Deardroff J W. Prediction of convective mixed-layer entrainment for realistic capping inversion structure. *J. Atmos. Sci.*, 1979, **36**: 424 ~ 436
- [8] Angevine W M, Grimsdell A W, Mckeen S A, et al. Entrainment results from the Flatland boundary layer experiment. *J. Geophys. Res.* 1998, **103**(D12): 13689 ~ 13701
- [9] Vanzanten M C, Duynkerke D G, Gijpers J W. Entrainment parameterization in convective boundary layer. *J. Atmos. Sci.*, 1999, **56**: 813 ~ 828
- [10] Willis G E, Deardroff J W. A laboratory model of the unstable planetary boundary. *J. Atmos. Sci.*, 1974, **31**: 1297 ~ 1307
- [11] 孙鉴泞, 蒋维楣, 曾宗泳等. 对流槽模拟对流边界层实验研究. 南京大学学报, 2000, **36**: 786 ~ 790
Sun J N, Jiang W M, Zeng Z Y, et al. A laboratory simulation of CBL in a water convection tank. *Journal of Nanjing University* (in Chinese), 2000, **36**: 786 ~ 790
- [12] 袁仁民, 曾宗泳, 肖黎明等. 湍流池湍流特征研究. 力学学报, 2000, **32**: 257 ~ 263
Yuan R M, Zeng Z Y, Xiao L M, et al. On turbulent property of convective flows in a turbulent cell. *Acta Mechanica Sinica* (in Chinese), 2002, **32**: 257 ~ 263
- [13] Deardroff J W, Willis G E, Stockton B H. Laboratory studies of the entrainment zone of a convectively mixed layer. *J. Fluid Mech.*, 1980, **100**: 41 ~ 64
- [14] 孙鉴泞, 蒋维楣, 袁仁民. 对流边界层顶部特征的对流槽实验模拟研究. 地球物理学报, 2002, **45**(增刊): 231 ~ 238
Sun J N, Jiang W M, Yuan R M. Laboratory study on the top zone of a convective boundary layer in a water convection tank.

- Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2002, **45**(Suppl.): 231 ~ 238
- [15] 袁仁民,孙鉴泞,姚克亚等. 大气边界层的室内模拟研究——夹卷层温度场结构分析. *大气科学*, 2002, **26**: 773 ~ 780
Yuan R M, Sun J N, YAO K Y, et al. A laboratory simulation of atmospheric boundary layer analyses of temperature structure in the entrainment zone. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2002, **26**: 773 ~ 780
- [16] Argoul F, Arneodo A, Grasseau G, et al. Wavelet analysis of turbulence reveals the multifractal nature of Richardson cascade. *Nature*, 1989, **338**: 51 ~ 53
- [17] Farge M. Wavelet transforms and their application to turbulence. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 1992, **24**: 395 ~ 457
- [18] 赵松年,熊小芸. 子波变换与子波分析. 北京:电子工业出版社, 1997
Zhao S N, Xiong X Y. *Wavelet Transform and Analysis*. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1997
- [19] 姜楠,王振东,舒玮. 子波分析辨识壁湍流猝发事件的能量最大准则. *力学学报*, 1997, **29**(4): 406 ~ 412
Jiang N, Wang Z D, Shu W. The maximum energy criterion for identifying burst events in wall turbulence using wavelet analysis. *Acta Mechanica Sinica* (in Chinese), 1997, **29**(4): 406 ~ 412
- [20] 陈逢时. 子波变换理论及其在信号处理中的应用. 北京:国防工业出版社, 1998
Chen F S. *The Theory of Wavelet Transfer and Its Application in Signal Dealt*. Beijing: National Defences Industry Press, 1998
- [21] Mallat S G. Multiresolution approximations and wavelet orthonormal bases of $L^2(R)$. *Trans. of Amer. Math. Soc.*, 1989, **315**: 69 ~ 88
- [22] 胡非. 大气边界层湍流涡旋结构的小波分解. *气候与环境研究*, 1998, **3**(2): 97 ~ 105
Hu F. Atmospheric boundary layer eddy structure identification by orthonormal wavelet expansion. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 1998, **3**(2): 97 ~ 105
- [23] 徐敏,蒋维楣,胡非等. 湍流湿度脉动特性研究——根据淮河流域实验资料. *地球物理学报*, 2002, **45**(1): 17 ~ 25
Xu M, Jiang W M, Hu F, et al. Study on the characteristics of turbulent moisture-based on the data obtained from HuaiHe river basin experiment. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2002, **45**(1): 17 ~ 25
- [24] 汪健生,张金钟,舒玮. 提取壁湍流相干结构的极值滤波方法. *力学学报*, 2002, **27**(4): 519 ~ 524
Wang J S, Zhang J Z, Shu W. The digital filter method of extracting the coherent structure in wall turbulence. *Acta Mechanica Sinica* (in Chinese), 2002, **27**(4): 519 ~ 524