

# 模拟的对流边界层光学湍流的特征尺度分析

卢 超<sup>1,2</sup> 袁仁民<sup>2</sup> 罗 涛<sup>2</sup> 吴徐平<sup>2</sup> 孙鉴泞<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 深圳市国家气候观测台, 广东 深圳 518040  
<sup>2</sup> 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 安徽 合肥 230026  
<sup>3</sup> 南京大学大气科学学院, 江苏 南京 210093

**摘要** 边界层作为地面与自由大气的过渡带对人类活动影响很大。边界层湍流结构尤其是夹卷层的湍流特征,是边界层研究的一个重要方面,这对于加深对边界层的认识以及研究边界层参数化具有十分重要的意义。由于边界层上部位置较高,难以进行精细结构观测。在室内对流水槽(150 cm×150 cm×60 cm)中模拟了大气对流边界层的发生发展。将准直光通过模拟对流边界层得到光斑图像数据。利用改进协方差法对光斑图像进行功率谱分析,找出功率谱密度最大值所对应的频率即峰值频率,峰值频率对应的波长为涡的特征尺度。研究结果表明,在混合层,峰值波长较小,说明此处混合比较均匀,小尺度结构占主导地位。而夹卷层的峰值波长较大。夹卷层的平均峰值波长与对流 Richardson 数存在一定的关系,这种关系受下垫面类型以及对流状况的双重影响。

**关键词** 大气光学;峰值波长;功率谱分析;水槽模拟;混合层和夹卷层;非均匀下垫面

**中图分类号** P427; P40 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0201002

## Characteristic Scale Analysis of Atmospheric Optical Turbulence in Simulating Convective Boundary Layer with Water Tank

Lu Chao<sup>1,2</sup> Yuan Renmin<sup>2</sup> Luo Tao<sup>2</sup> Wu Xuping<sup>2</sup> Sun Jianning<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Shenzhen National Climate Observatory, Shenzhen, Guangdong 518040, China

<sup>2</sup> School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

<sup>3</sup> School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China

**Abstract** The boundary layer is very important to human activity as the transition zone between the surface and free atmosphere. Turbulence structure of the boundary layer especially the entrainment layer is an important aspect for the boundary layer research, which is very important to improve understanding of the boundary layer and the research of the boundary layer parameterization. Because of the high level of the top of the boundary layer, it is difficult to detect extensively. Generation and evolution of the atmospheric convective layer are simulated in laboratory convective water tank with the dimension of 150 cm×150 cm×60 cm. When the collimated light beam propagates through the simulated atmospheric convective boundary layer, facula image data can be obtained. Using improved covariance method for power spectrum analysis on the facula image, the peak frequency can be found by finding the maximum power spectral density corresponding to the frequency, which is needed to obtain the peak wavelength as the characteristic scale of eddy. It is found that, in the mixed layer, peak wavelength is small, which means that the mixed layer is homogeneously mixed and small scale dominated there. But in entrainment layer the peak wavelength is larger. The average peak wavelength in the entrainment zone has some relation with the convective Richardson number, and the relation is influenced by surface types and convection condition.

**Key words** atmospheric optics; peak wavelength; power spectrum analysis; water-tank simulation; mixed layer and entrainment layer; inhomogeneous land surface

**OCIS codes** 010.1290; 010.1330

**收稿日期**: 2011-07-22; **收到修改稿日期**: 2011-09-13

**基金项目**: 国家自然科学基金(40975006,40975004)和中国科学院知识创新工程重要方向(KZCX2-YW-QN502)资助课题。

**作者简介**: 卢 超(1985—),男,硕士研究生,助理工程师,主要从事大气探测方面的研究。E-mail: rjr@mail.ustc.edu.cn

**导师简介**: 袁仁民(1968—),男,博士,副教授,主要从事大气边界层物理、大气光学等方面的研究。

E-mail: rmyuan@ustc.edu.cn

## 1 引言

作为地面与自由大气的过渡带,大气边界层对于人类活动影响很大,人类的很多活动都在边界层内进行,不可避免会受到边界层的影响。此外,边界层承担着地面与自由大气之间能量与物质的交换作用,对于地面的气象分布、污染物的扩散有重要影响,这都需要对大气边界层做进一步的研究。

边界层尤其是上部夹卷层的湍流特征,是边界层研究十分重要的方面。湍流是由各种不同尺度、不同幅度和不同相干度的层次结构组成的。一般借助于一些基本的数学工具(如傅里叶变换、小波分析等)人们可以对湍流场的大小尺度结构俗称大、小涡结构进行细致的统计刻化<sup>[1~3]</sup>。在湍流大气中传播的光波,会出现强度起伏、相位改变以及闪烁、抖动<sup>[4,5]</sup>等现象,光波在湍流大气中的这些特性被称为光学湍流现象。对光学湍流的一些参量如折射率结构常数、光强闪烁指数和光的偏振特性等人们做了大量的研究,得到了很多成果<sup>[6~15]</sup>。Andrews等<sup>[16]</sup>采用修正 Rytov 理论的方法建立了适用于强起伏区的唯象闪烁模型。把大气湍流引起的光强起伏看成是大尺度湍涡引起的起伏对小尺度湍涡引起的起伏的调制的结果,给出了在强和弱湍流情况下的光强闪烁指数,对研究湍流的各种尺度有重要意义。

边界层顶部位置较高,在外场对其进行精细观测很难,同时,受到观测仪器、观测环境、成本等各方面的影响,可重复性不高。相比之下,室内水槽具有稳定性、可重复性和容易实现等优点,可以弥补外场观测的不足。

利用室内水槽模拟方法,人们已对均匀下垫面的边界层湍流特性、参数化(包括夹卷速度参数化、夹卷层厚度参数化等)、光学特性等方面进行了研究,获得了一些有价值的结果<sup>[17~22]</sup>。然而,对于非均匀下垫面边界层的模拟研究,仍然比较欠缺。

本文在前人研究的基础上,尝试使用室内水槽模拟均匀下垫面尤其是热力非均匀下垫面情况下热对流边界层的发展,采集分析实验中得到的光斑图像。利用改进协方差法对光斑图像进行频谱分析,求出功率谱密度最大处所对应的频率,该频率对应的波长(峰值波长)也代表着湍流的一种特征尺度,它表示湍流中能量最大,最活跃的湍流本身的大小。进而从峰值波长的角度对边界层内部各处的尺度特征进行分析研究。

## 2 实验和方法

### 2.1 实验流程介绍

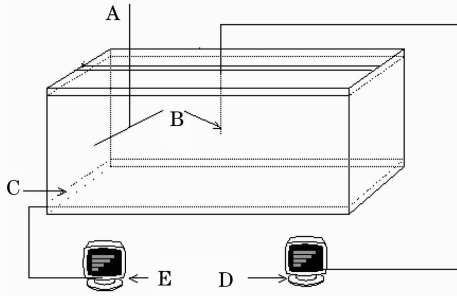
用水槽模拟实际地球大气流体,在改进人们对真实大气的了解等方面,一直发挥着重要的作用。在水槽模拟中,一些关键变量容易控制,这就有助于从大量重复的实验中得到准确的统计量,这一点在野外观测很难实现。

在用水槽模拟大气边界层时,为了与实际大气相符合,要满足一些相似特性,主要包括:几何相似、动力相似、运动相似以及热力学相似。几何相似通常考虑物理边界层尺度相似,即水槽宽度与模拟的边界层高度之比要满足一定条件,一般来讲只要大于3就满足几何相似。在几何相似的前提下,动力和运动相似可以同时满足,这一点要求 Reynolds 数和 Rayleigh 数等一些无量纲数与实际大气相仿。本实验实际模拟时这些无量纲数远小于实际大气边界层的值,但远大于临界值,因而流场可以看作相似的。假如水槽和真实边界层在对应的时间对应的位置有对应的温度,那么水槽模拟就满足热力学相似。这一点只要求满足相等的长度尺度比(几何相似)、相等的时间尺度比(可能需要考虑动力)和相等的温度尺度比就可以了。当以上相似性要求都满足以后,就可以利用水槽来模拟实际大气边界层了<sup>[23]</sup>。

一开始,人们利用水槽来研究平坦下垫面对流边界层。最著名的要数 Deardorff 等<sup>[24,25]</sup>的加热水槽模型,他们最先利用空气热对流的方法研究野外实验结果,利用圆柱形水槽研究穿透对流,然后利用水槽研究对流边界层结构和污染扩散特性。由于夹卷层的特殊性,水槽经常被用来研究夹卷层的特性<sup>[26~28]</sup>。另外一类是澳大利亚 CSIRO 大气研究分部用于对流边界层污染扩散的盐水槽。Hibberd 等<sup>[29,30]</sup>对此进行了详细描述,并模拟研究不同的对流边界层扩散机制,尤其研究了无剪切的熏烟扩散。

本文利用水槽模拟了热力均匀和非均匀对流边界层的发生发展。实验在中国科学技术大学地球与空间科学学院进行。图1为实验装置示意图。对流水槽是在充分考虑几何相似、运动相似、动力相似以及热力相似等基础上设计和建造的。尺寸为150 cm×150 cm×60 cm,这一尺寸可以很好地满足室内模拟对流边界层的需要。在实验中边界层高度不超过40 cm,因此宽高比始终大于3,满足相似性理论的要求<sup>[31]</sup>。水槽底部放置了厚度为6 cm用于加热的油箱,尺寸为145 cm×145 cm,油箱内充满了热膨胀系数小、绝缘性能好的变压器油,油中均

匀放置 39 根电加热管。加热时,先利用电热管对油加热,油升温以后再对水槽内的水进行加热,这种二次加热法可以保证底面加热均匀。



A: length-averaged temperature sensor; B: pulsating temperature sensor; C: oil tank; D: computer for measurement; E: computer for control

图 1 水槽示意图

Fig.1 Simulated tank in laboratory

图 2 为水槽实验的光学采集系统。该采集系统由扩束透镜、He-Ne 激光器、挡板、CCD 摄像机、准直透镜和存储数据的计算机组成。经过两次扩束手段,He-Ne 激光变成一束准直光束,该准直光束直径为 20 cm。在水槽的另一侧放置一个接收挡板,让准直光从水槽的一侧经过水槽中的湍流场照射在另一侧的接收挡板上,可以形成一个圆形的光斑。光斑由 CCD 拍摄(5.2  $\mu\text{m} \times 5.2 \mu\text{m}$ , 60 dB, 256 gray scales, and 1024 pixel $\times$ 1280 pixel),计算机采集,采样频率最高可以达到 15 Hz,得到的光斑图象为灰度图,灰度等级为 256,整个图像分辨率为 1024 pixel $\times$ 1280 pixel。在实验过程中将 CCD 光圈调到合适的大小用以消除 CCD 量化造成的误差。图 3 为实验得到的光斑。

由图 3 可以看出,在光斑图像的下部,光强起伏比较小,说明这一部分湍流混合比较均匀,对应于混合层。在上部,则出现了大尺度的亮线,光强起伏较大,湍流不是充分混合,说明这一部分湍流混合受到抑制,对应于夹卷层。以上说明光斑图像能够比较

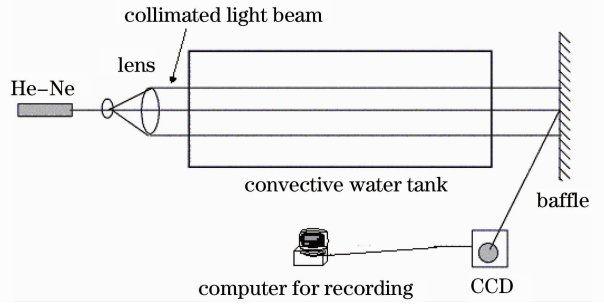
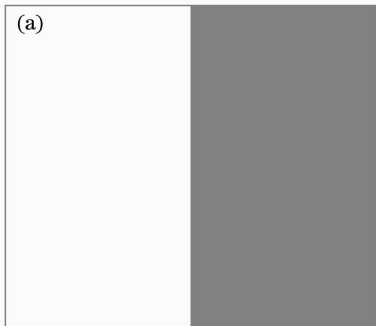


图 2 水槽光路示意图

Fig.2 Beam path of the tank

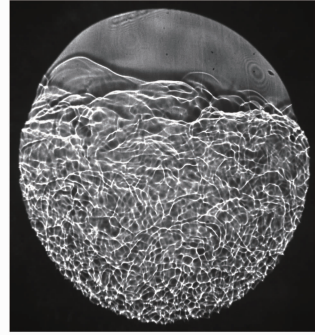


图 3 光斑

Fig.3 Facula image

准确地描述整个边界层的湍流混合状况,可以以此为依据进行后续研究。

为了模拟热力非均匀平坦下垫面,在油箱上放置一个厚度为 3 cm,尺寸为 145 cm $\times$ 145 cm 的不锈钢板框架。框架的上表面为 2 mm 厚的不锈钢板,下表面等间隔焊接钢丝。在框架上下表面之间可以填塞海绵。由于充满水的海绵具有极好的隔热作用,在整个实验过程(一般约为 30 min)中海绵内部温度升高不超过 1 $^{\circ}$ ,低于框架表面以上的水的温度,确保框架的这部分表面不会出现自下而上的热量;而没有充塞海绵的部分由水充满,随着油箱加热,框架的这部分表面温度逐渐升高。利用这个简单装置实现多种平坦热力非均匀下垫面。本文主要

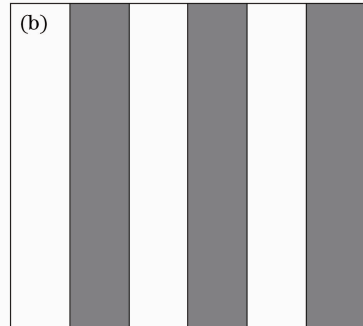


图 4 (a) A 型非均匀下垫面;(b) B 型非均匀下垫面。其中黑色区域代表海绵填充区

Fig.4 Type A inhomogeneous land surface; (b) type B inhomogeneous land surface. Black area denotes foam rubber area

研究两种不同类型的非均匀下垫面,如图 4(a)和(b)所示。图 4(a)把整个油箱底部分成两个部分,将其中一个部分全部填充海绵,如黑色区域所示,以后简称这种类型的下垫面为 A 型非均匀下垫面。图 4(b)把整个油箱分成六等份,隔一个部分填充一条海绵,这种下垫面类型简称为 B 型非均匀下垫面。光束沿图 4(a)和(b)的水平方向穿过整个边界层区域,这样形成的光斑图像能够描述边界层整体的变化特征,较准确地反映出下垫面的非均匀性对边界层各高度处湍流的影响。

## 2.2 数据处理方法

对每幅光斑进行如下处理得到峰值波长随高度的廓线:

- 1) 将光斑图像读取为灰度值矩阵,通过边缘检测确定光斑边缘位置<sup>[32]</sup>。
- 2) 从光斑中随高度以 2 行的间隔抽取行数据。
- 3) 将数据去除掉边缘以外的点,对其进行功率谱分析得到其光强的功率谱,因为进行空间上等间隔采样,所以频率就对应为波数。找出功率谱密度最大值所对应的波数,对波数求倒数即得到峰值波长。这样就得到了边界层内峰值波长随高度廓线。
- 4) 将每条廓线的高度坐标除以边界层高度进行归一化处理,得到高度归一化的峰值波长廓线。

功率谱分析主要分为经典法和现代法两种。经典功率谱计算方法是通过傅里叶变换实现的,在计算中对整个信号求傅里叶变换,对求得的实部和虚部求平方和得到能量,继而根据能量求得功率谱密度,而对数据工作区以外的未知数据则假设为零。这相当于对数据加窗,容易导致旁瓣和假峰的出现,求得的离散谱精度不高,方差性能较差,谱分辨率低。现代谱估计是通过观测数据估计参数模型再按照求参数模型输出功率的方法估计信号功率谱,这一方法回避了数据观测区以外的数据假设问题,具有更高的分辨率。基于参数建模的功率谱估计主要包括自回归模型(AR)、滑动平均模型(MA)、自回归滑动平均模型(ARMA)。其中 AR 模型参数的精确估计可以通过解一组线性方程求得,计算量较小,因此是现代功率谱估计中最常用的方法。AR 模型的参数提取算法主要包括最大似然估计法、Burg 算法、协方差法、改进协方差法以及自相关法<sup>[33]</sup>。改进协方差法是同时使前向和后向预测误差均最小的技术,本文主要应用此方法对光斑数据进行功率谱分析。

对一条光斑行数据应用经典法和改进协方差法

求得功率谱密度,结果如图 5 所示,其中  $k$  为波数,  $S(k)$  为功率谱密度。图中虚线为经典方法计算得到的功率谱密度,图中用 Classic 表示;实线为利用改进协方差法计算得到的谱密度,图中用 AR 表示。由于分析的数据是图像的灰度值,实验表明该灰度值与光强有很好的线性关系,因此纵坐标  $S(k)k$  的单位是灰度值的平方,此处没有标注。竖直实线对应的横坐标即为所求的峰值频率。从图 5 可以看出,经典法得到的功率谱曲线振荡较大,能量峰值不是很明显,有时候很可能会出现几个峰,这对于峰值频率的求解带来了很大困难。而利用改进协方差法求得的功率谱曲线非常平滑,能较好地显示出能量的峰值,这使得峰值频率的求解过程较为容易,因此在以下的研究中,采用改进协方差法来求得峰值频率进而得到峰值波长。

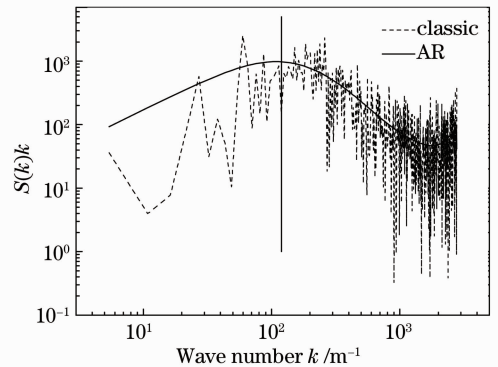


图 5 两种方法计算得到的功率谱密度的比较  
Fig. 5 Comparison of power spectral density calculated by two methods

## 3 数据处理及结果

这里简要介绍一下大气边界层的结构特征。大气边界层从地面向上依次分为贴地层、近地面层、自由对流层、混合层、夹卷层和稳定层。本实验主要模拟其中最重要的混合层和夹卷层两部分。一般定义边界层高度为  $Z_i$ ,混合层高度为  $h_0$ ,边界层顶定义为  $h_2$ ,一般有  $h_0 < Z_i < h_2$ 。其中混合层的范围为  $0.1Z_i \sim 0.8Z_i$ ,湍流在该层内强烈混合,发展很充分。夹卷层处于混合层上部至边界层顶,该层为逆温层,由于自由大气向下卷挟和混合层热泡垂直向上穿透,在这一层中会形成夹卷过程,影响着该层的湍流结构,该层范围一般定义为  $h_2 - h_0$ 。

首先,分析一下均匀下垫面边界层各高度处峰值波长的特征,图 6 为一次实验中均匀下垫面边界层的峰值波长廓线,其中  $\lambda$  为峰值波长,单位为 cm,



纵坐标为归一化高度,  $H$  为实际高度,  $Z_i$  为边界层高度。

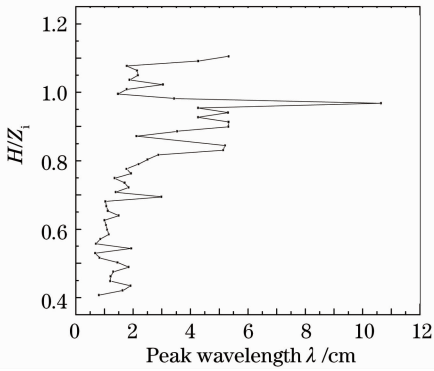


图 6 均匀下垫面边界层峰值波长廓线图  
Fig. 6 Peak wavelength profile under homogeneous land surface

从图 6 可以看出,混合层的峰值波长普遍偏小且基本保持不变,说明在混合层内部,能量集中分布在小尺度湍流上,而到了夹卷层,峰值波长逐渐变大,在  $Z_i$  高度左右会出现一个峰值,这与光斑上对应的大尺度结构亮线有关。原因如下:在混合层内部,随着湍流混合,湍流的能量逐渐从较大涡向较小涡传输<sup>[34]</sup>。最终混合层湍流均匀混合,小尺度湍流占主导地位。随着下垫面的加热,伴随着对流作用,这些小尺度湍流逐渐向上移动。由于夹卷层是逆温层,阻碍了湍流继续向上垂直运动。受此阻碍作用,小尺度湍流逐渐向两边挤压,在边界层顶部附近形成一个水平尺度很大的涡,因此光斑图像上在此处附近会出现大尺度亮线。由于以上原因,导致夹卷层内部的湍流尺度比混合层大。

由以上的结论可知,边界层内部的尺度特性是与对流有一定关系的,为了研究这种关系,把边界层分成混合层和夹卷层两个部分,分别研究这两个部分峰值波长与 Richardson 数  $R_i^*$  的关系。

对流 Richardson 数  $R_i^*$  定义为

$$R_i^* = g\beta\Delta\theta z_i / w_*^2,$$

式中  $w_* = (g\beta Q_0 z_i)^{1/3}$  为对流速度尺度,  $Q_0$  为地面热通量,  $g$  为重力加速度,  $\beta$  为空气的热膨胀系数,  $\Delta\theta$  为夹卷层上下温差,  $z_i$  为边界层高度。

由  $R_i^*$  的定义可看出,当夹卷层上下的温差越小,地面热通量越大时,对流越强烈,混合就越均匀,此时  $R_i^*$  也越小,反之就越大。

图 7 是两次模拟实验得到的混合层平均峰值波长与  $R_i^*$  的关系图,其中空心圆代表均匀下垫面,实心圆代表 A 型非均匀下垫面,  $\lambda$  为峰值波长,单位为 cm。

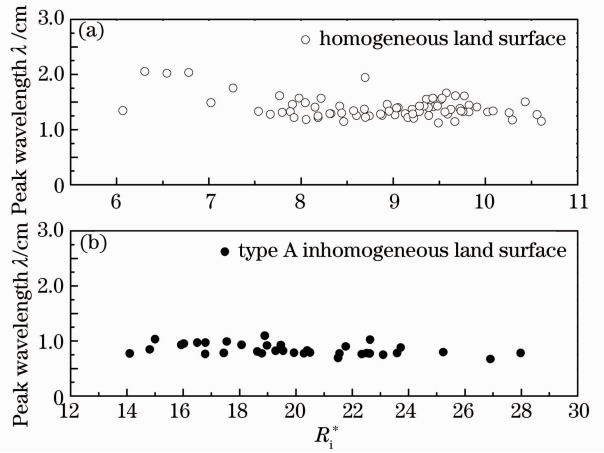


图 7 混合层平均峰值波长与  $R_i^*$  的关系  
Fig. 7 Relation of averaged peak wavelength and  $R_i^*$  in mixed layer

从图 7 可以看出,不管是均匀下垫面还是非均匀下垫面边界层,其混合层的峰值波长不随  $R_i^*$  的变化而变化,而是保持在一个稳定的值,这说明混合层内部湍流的尺度与对流活动的强弱关系不大。均匀下垫面和非均匀下垫面边界层中,混合层光学湍流的特征没有明显的差别,一个可能的原因是与我们实验的方式有关。光束先穿过一种类型下垫面边界层,再穿过另外一种类型下垫面的边界层,每一种类型下垫面的边界层都可以看做是一个均匀下垫面边界层,测量的结果仍表现为均匀下垫面边界层的特征。而在边界层的顶部,即夹卷层的位置,就可能是另外一种情况了。

对比于混合层峰值波长与  $R_i^*$  的关系,夹卷层则有所不同。图 8 为各种不同类型下垫面情况下的

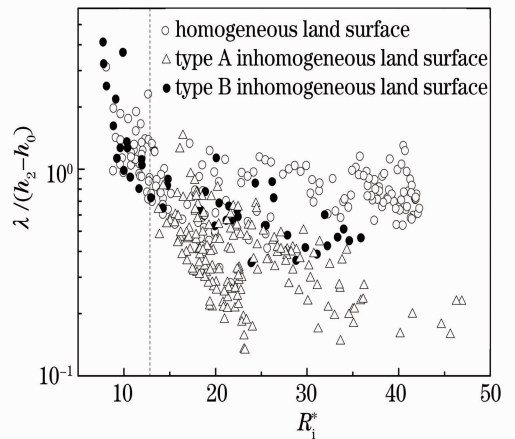


图 8 各种不同类型下垫面情况下的夹卷层平均峰值波长与  $R_i^*$  的关系

Fig. 8 Relation of averaged peak wavelength and  $R_i^*$  in entrainment layer under different types of land surface

夹卷层平均峰值波长与  $R_i^*$  的关系,其中空心圆代表均匀下垫面,实心圆代表 B 型非均匀下垫面,空心三角代表 A 型非均匀下垫面,纵坐标用夹卷层厚度进行了归一化处理,其中  $h_2$  为边界层顶, $h_0$  为混合层高度, $h_2-h_0$  为夹卷层厚度, $\lambda$  为峰值波长。

如图 8 所示,几种类型的下垫面边界层其夹卷层的峰值波长与  $R_i^*$  的关系大体一致,都是随着  $R_i^*$  的增大而减小。在垂直虚线的左侧区域,三条曲线符合的比较一致,这一区域对应  $R_i^*$  较小的情况。在这个区域中,由于下垫面加热较强,热对流活动剧烈,受非均匀性的影响较弱,强烈的热对流挟带着小尺度湍流上升进入夹卷层,由于受顶部逆温的影响垂直活动受到抑制,向水平方向伸展形成大尺度结构,峰值波长随  $R_i^*$  的减小而增大,这也与图 6 的结论是一致的。但是在垂直虚线的右侧,情况就有所不同了。这一区域的  $R_i^*$  较大,说明热对流活动较弱,此时其受下垫面非均匀性的影响较大。由于受下垫面非均匀性的影响,在边界层内部会出现局地环流,使边界层内部湍流的垂直运动受到抑制,导致热对流活动比较弱,上升进入夹卷层的小尺度湍流能量不足,因此不易再向水平方向扩展形成尺度较大的结构,此时的夹卷层湍流尺度较小,对应的峰值波长也较小。

由于 A 型非均匀下垫面边界层非均匀性最为明显,因此其峰值波长随着  $R_i^*$  的增加下降的最明显,B 型非均匀下垫面边界层其次,其特性接近于均匀下垫面边界层,均匀下垫面最高,因为在均匀下垫面情况下,能向上运动进入夹卷层的湍流最多。这与以上结论有很好的 consistency。

## 4 结 论

依据相似性原理,利用室内水槽模拟了均匀和非均匀下垫面对流边界层的发生发展,利用准直光系统生成光斑图像,对光斑图像进行频谱分析,计算出光斑的峰值波长,从这个角度出发研究对流边界层内部的光学湍流现象,得到如下结果:

1) 均匀下垫面与非均匀下垫面边界层混合层的峰值波长普遍偏小且基本保持不变,而到了夹卷层,峰值波长逐渐变大,在  $Z_0$  高度左右会出现一个峰值。说明在混合层内部,能量集中分布在小尺度湍流上,此时小尺度湍流占主导地位。随着下垫面的加热,对流活动旺盛,这些小尺度湍流被对流挟带向上运动进入夹卷层,受顶部逆温层的影响被迫向水平方向拉伸,结果形成了水平尺度较大的湍流。

2) 均匀下垫面和非均匀下垫面边界层其混合层的平均峰值波长与  $R_i^*$  关系不明显。夹卷层的平均峰值波长与  $R_i^*$  呈明显的反相关,其关系受对流活动及下垫面非均匀性的双重影响。在  $R_i^*$  较小时,各类型下垫面边界层曲线符合比较一致,此时主要受对流活动的影响, $R_i^*$  越小,对流活动越强,此时进入夹卷层的小尺度湍流越多,向水平方向拉伸形成的结构尺度就越大;在  $R_i^*$  较大时,曲线特征随着下垫面类型的不同相互分离,此时非均匀性的影响占主导地位,非均匀性越强,混合层的对流活动越弱,随着对流垂直输送进入夹卷层的湍流就越少,导致上升进入夹卷层的湍流不易向水平扩展,形成的湍流尺度就越小。

## 参 考 文 献

- 1 M. Farge. Wavelet transforms and their applications to turbulence[J]. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 1992, **24**: 395~457
- 2 J. F. Muzy, E. Bacry, A. Arneodo. Multifractal formalism for fractal signals: the structure-function approach versus the wavelet-transform modulus-maximum method [J]. *Phys. Rev. E*, 1993, **47**(2): 875~884
- 3 E. Bacry, A. Arneodo, U. Frisch *et al.*. Turbulence and Coherent Structures [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publisher, 1991, 450
- 4 Yi Xiuxiong, Guo Lixin, Wu Zhensen. Study on the optical scintillation for Gaussian beam propagation in the slant path through the atmospheric turbulence [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(4): 433~438
- 易修雄, 郭立新, 吴振森. 高斯光束在湍流大气斜程传输中的闪烁问题研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(4): 433~438
- 5 Ji Xiaoling, Lü Baida. Effect of turbulence on the spectral shift of partially coherent light [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(4): 506~510
- 季小玲, 吕百达. 湍流对部分相干光光谱移动的影响[J]. *中国激光*, 2005, **32**(4): 506~510
- 6 Rao Ruizhong. General optical scintillation in turbulent atmosphere[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(8): 547~549
- 饶瑞中. 湍流大气中光闪烁的通用理论[J]. *中国光学快报*, 2008, **6**(8): 547~549
- 7 Pan Feng, Han Qiqi, Ma Jing *et al.*. Measurement of scintillation and link margin for laser beam propagation on 3.5-km urbanised path[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(1): 1~3
- 8 Ma Xiaoshan, Zhu Wenyue, Rao Ruizhong. Annular-aperture averaging factor of optical scintillations in turbulent atmosphere [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1543~1547
- 马晓珊, 朱文越, 饶瑞中. 湍流大气中光波闪烁的圆环孔径平均因子[J]. *光学学报*, 2007, **27**(9): 1543~1547
- 9 Ma Xiaoshan, Zhu Wenyue, Rao Ruizhong. Large aperture laser scintillometer for measuring the refractive index structure constant of atmospheric turbulence[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6): 898~902
- 马晓珊, 朱文越, 饶瑞中. 测量大气折射率结构常数的大口径激光闪烁仪[J]. *中国激光*, 2008, **35**(6): 898~902
- 10 Ji Xiaoling, Chen Senhui, Li Xiaoqing. Polarization properties of partially coherent electromagnetic Hermite-Gaussian beams in atmospheric turbulence[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1): 67~72
- 季小玲, 陈森会, 李晓庆. 部分相干电磁厄米-高斯光束通过湍流大气传输的偏振特性[J]. *中国激光*, 2008, **35**(1): 67~72

- 11 Dai Fushan, Li Youkuan. Estimation of the optical turbulence in the marine atmospheric surface layer based on meteorological data [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 191~196  
戴福山, 李有宽. 利用气象要素估算海洋大气近地层光学湍流 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 191~196
- 12 Liu Fei, Ji Xiaoling. Turbulence distance of partially coherent Cosh-Gaussian array beams [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(7): 0713001  
刘飞, 季小玲. 部分相干双曲余弦高斯阵列光束的湍流距离 [J]. *中国激光*, 2011, **38**(7): 0713001
- 13 Qiao Chunhong, Fan Chengyu, Huang yinbo *et al.*. Scaling laws of high energy laser propagation through atmosphere [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2): 433~437  
乔春红, 范承玉, 黄印博等. 高能激光大气传输的定标规律 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(2): 433~437
- 14 He Yuanxing, Jiang Wenhan, Li Xinyang. Far-field propagation of focused Gaussian beam through atmospheric turbulence and effects of adaptive phase compensation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(3): 0312001  
贺元兴, 姜文汉, 李新阳. 聚焦高斯光束在湍流大气中的远场传输及相位补偿效果 [J]. *中国激光*, 2011, **38**(3): 0312001
- 15 Xiao Shumei, Mei Haiping, Qian Xianmei *et al.*. Atmospheric turbulence random phase difference with the demodulating algorithm of correlation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 0201002  
肖树妹, 梅海平, 钱仙妹等. 大气湍流随机相位差的相关解调算法研究 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(2): 0201002
- 16 L. C. Andrews, R. L. Phillips, C. Y. Hopen *et al.*. Theory of optical scintillation [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1999, **16**(6): 1417~1429
- 17 Yuan Renmin, Zeng Zongyong, Xiao Liming *et al.*. On turbulent property of convective flows in a turbulent cell [J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2000, **32**(3): 257~263  
袁仁民, 曾宗泳, 肖黎明等. 湍流池湍流特征研究 [J]. *力学学报*, 2000, **32**(3): 257~263
- 18 J. N. Sun, W. M. Jiang, P. Y. Li *et al.*. A laboratory and numerical simulation of the entrainment rate on the top of CBL [J]. *J. University of Science and Technology of China*, 2003, **33**(1): 119~124  
孙鉴泞, 蒋维楣, 李萍阳等. 对流边界层顶部夹卷速度参数化的模拟研究 [J]. *中国科学技术大学学报*, 2003, **33**(1): 119~124
- 19 Li Pingyang, Jiang Weimei, Sun Jianning *et al.*. A laboratory modeling of the velocity field in the convective boundary layer with the particle image velocimetry technique [J]. *Advances in Atmospheric Science*, 2003, **20**(4): 631~637  
李萍阳, 蒋维楣, 孙鉴泞等. 实验速度场测量技术及对流边界层特征研究 [J]. *大气科学进展*, 2003, **20**(4): 631~637
- 20 Chen Ziyun, Sun Jianning, Yuan renmin *et al.*. An analysis of convective boundary layer eddy structure in water tank by orthonormal wavelet [J]. *Chinese J. Geophysics*, 2004, **47**(6): 964~970  
陈子贇, 孙鉴泞, 袁仁民等. 对流槽湍流涡旋结构特征的小波分析 [J]. *地球物理学报*, 2004, **47**(6): 964~970
- 21 Yuan Renmin. Study of characteristic of depth of entrainment zone above the mixed layer in the daytime [J]. *Chinese J. Geophysics*, 2005, **48**(1): 19~24  
袁仁民. 白天混合层顶部夹卷层厚度的特征研究 [J]. *地球物理学报*, 2005, **48**(1): 19~24
- 22 Lu Chao, Luo Tao, Wu Xuping *et al.*. Spectrum characteristic of atmospheric scintillation in simulating convective boundary layer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2033~2038  
卢超, 罗涛, 吴徐平等. 模拟的对流边界层大气闪烁频谱特性研究 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(8): 2033~2038
- 23 R. Yuan, X. Wu, T. Luo *et al.*. A review of water tank modeling of the convective atmospheric boundary layer [J]. *J. Wind Engng. Ind. Aerodyn.*, 2011, **99**(10): 1099~1114
- 24 J. W. Deardorff, G. E. Willis. Groundlevel concentration fluctuations from a buoyant and a non-buoyant source within a laboratory convectively mixed layer [J]. *Atmospheric Environment*, 1984, **18**(7): 1297~1309
- 25 J. W. Deardorff, G. E. Willis. Further results from a laboratory model of the convective planetary boundary layer [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1985, **32**(3): 205~236
- 26 J. W. Deardorff, G. E. Willis, B. H. Stockton. Laboratory studies of the entrainment zone of a convectively mixed layer [J]. *J. Fluid Mech.*, 1980, **100**(1): 41~64
- 27 Yuan Renmin, Yao Keya, Sun Jianning *et al.*. A laboratory simulation of atmospheric boundary layer analyses of temperature in the entrainment zone [J]. *Chinese J. Atmospheric Sciences*, 2002, **26**(6): 773~780  
袁仁民, 姚克亚, 孙鉴泞等. 大气边界层的室内模拟研究——夹卷层温度场结构分析 [J]. *大气科学*, 2002, **26**(6): 773~780
- 28 Yuan Renmin, Luo Tao, Sun Jianning. Laboratory study of optical turbulence at the top of convective boundary layer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(9): 1287~1292  
袁仁民, 罗涛, 孙鉴泞. 对流边界层顶部光学湍流的室内模拟研究 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(9): 1287~1292
- 29 M. F. Hibberd, B. L. Sawford. Design criteria for water tank models of dispersion in the convective boundary layer [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1994, **67**(1-2): 97~118
- 30 M. F. Hibberd, B. L. Sawford. A saline laboratory model of the planetary convective boundary-layer [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1994, **67**(3): 229~250
- 31 M. Poreh, M. Rau, E. J. Plate. Design considerations for wind tunnel simulation of diffusion within the convective boundary layer [J]. *Atmos Environ*, 1991, **25**(7): 1251~1256
- 32 Luo Tao, Yuan Renmin, Sun Jianning. Laboratory study of inhomogeneity of atmospheric boundary layer [J]. *High Power Laser And Particle Beams*, 2006, **18**(3): 372~376  
罗涛, 袁仁民, 孙鉴泞. 大气边界层各向异性的室内模拟研究 [J]. *强激光与粒子束*, 2006, **18**(3): 372~376
- 33 Yao Wenjun. Research on AR model power spectrum estimation based on the algorithm and Burg algorithm [J]. *Computer & Digital Engineering*, 2007, **10**(35): 32~35  
姚文俊. 自相关法和 Burg 法在 AR 模型功率谱估计中的仿真研究 [J]. *计算机与数字工程*, 2007, **10**(35): 32~35
- 34 R. B. Stull. 1988. An Introduction to Boundary Layer Meteorology [M]. Yang Changxin Transl.. Beijing: China Meteorological Press, 1991  
斯塔尔. 边界层气象学导论 [M]. 杨长新译. 北京: 气象出版社, 1991