

# 模拟的对流边界层大气闪烁频谱特性研究

卢超<sup>1</sup> 罗涛<sup>1</sup> 吴徐平<sup>1</sup> 孙鉴泞<sup>2</sup> 袁仁民<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>中国科学技术大学地球和空间科学学院, 安徽 合肥 230026; <sup>2</sup>南京大学大气科学系, 江苏 南京 210093)

**摘要** 边界层是地面与自由大气的过渡带, 对人类活动有重要影响。由于边界层上部位置较高, 进行精细结构观测很难。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, 对光斑图像数据进行频谱分析。根据光在湍流介质中的传输理论确定无标度区间得到边界层各高度处的标度指数。研究表明, 均匀下垫面标度指数在混合层基本在 $-8/3$ 左右, 接近各向同性湍流的理论值。而夹卷层的标度指数, 实验初期严重偏离理论值, 但在实验后期, 由于对流剧烈也逐渐接近 $-8/3$ , 此时夹卷层也趋于混合均匀。夹卷层平均标度指数与对流 Richardson 数存在一定的关系。标度指数廓线随高度的变化特点与同时刻的热通量廓线和归一化光强方差廓线有比较一致的对应关系。

**关键词** 大气光学; 光学湍流; 标度指数; 水槽模拟; 混合层和夹卷层

中图分类号 P427; P40 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092908.2033

## Spectrum Characteristic of Atmospheric Scintillation in Simulating Convective Boundary Layer

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

(<sup>1</sup>School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China)  
(<sup>2</sup>Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China)

**Abstract** The boundary layer is the transition zone between the surface and free atmosphere. Because of its high level it is difficult to detect the refined structure of the boundary's top layer extensively. Generation and evolution of the atmospheric convective layer were simulated in laboratory convective water tank with the dimension of 150 cm×150 cm×60 cm. When the collision light beam propagated through the simulated atmospheric convective boundary layer, facula image data could be obtained which was used for spectral analysis. Based on the theory of light wave propagation in turbulent media, the scaling exponents could be given by the method of determining dimensionless interzone. It is found that the scaling exponents in the mixed layer are  $-8/3$  under the condition of the homogeneous land surface, which is the classic value of the homogeneous turbulence. However, the scaling exponents highly depart from  $-8/3$  in the beginning of experiments and in the end they are also close to  $-8/3$  because of the vigorous convection. The average scaling exponents in the entrainment zone have relationships with the convective Richardson number. It is also found that the characteristics of the scaling exponent profile are consistent with the contour lines of heat flux profile and normalized light intensity variation profile.

**Key words** atmospheric optics; optical turbulence; scaling exponent; water tank simulation; mixed layer and entrainment zone

## 1 引言

大气边界层对于人类来说尤为重要, 特别是近几年由于自然的或人为的因素, 空气污染日益加剧, 而污染和大气边界层的输送和扩散紧密地联系在一起; 另外, 许多科研工作在大气边界层内进行, 无法

消除边界层中湍流的影响, 需要了解边界层的湍流特征, 如光在大气边界层中传输受边界层中的温度场起伏影响极大, 出现像闪烁、抖动等一些现象<sup>[1,2]</sup>, 对这些现象的解释依赖于对边界层温度场结构的了解。

收稿日期: 2008-07-09; 收到修改稿日期: 2008-11-27

基金项目: 国家自然科学基金(40475009)资助课题。

作者简介: 卢超(1985—), 男, 硕士研究生, 主要从事大气边界层物理方面的研究。E-mail: rjr@mail.ustc.edu.cn

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

E-mail: rmyuan@ustc.edu.cn(通信联系人)

在边界层的研究中,人们多数是通过实际观测和计算机模拟。但是实际观测耗资巨大,而且很难有重复性,计算机模拟的结果也需要实际数据或水槽数据进行验证。室内水槽模拟是根据相似理论,以水为介质来模拟平坦下垫面均匀加热或非均匀加热条件下热对流大气边界层的发展,室内水槽模拟具有重复性高,稳定性好,结果可信等诸多优点<sup>[3]</sup>。

光在大气湍流中的传输问题一直受到人们的重视。在湍流大气中传播的光波,出现强度起伏,相位改变以及相干光谱移动等现象,光波在湍流大气中的这些特性称为光学湍流现象。对光学湍流的一些参量如折射率结构常数、光强闪烁指数、光的偏振特性等人们做了大量的研究,得到了很多成果<sup>[4~9]</sup>。对光强闪烁频谱的标度指数,很多学者也进行了大量的工作<sup>[10~16]</sup>。

本文利用水槽实验得到的光斑图像数据对边界层光学湍流特征进行研究,主要是通过光斑计算光强闪烁频谱的标度指数来研究边界层内湍流各向异性的特征。

## 2 湍流谱理论

对于局地各向同性湍流,湍流折射率起伏的一维功率谱在惯性区间满足标度律<sup>[17]</sup>:

$$V_n(k) \propto k^{-\eta}.$$

对于平面波或球面波,对数光强的高频功率谱密度也满足标度律:

$$P_I(f) \propto f^{-\alpha}, \alpha = \eta + 1,$$

式中 $V_n(k)$ 为湍流的折射率起伏频谱密度函数, $k$ 为湍流的空间波数, $P_I(f)$ 为对数光强的谱密度函数, $f$ 为频率, $\eta$ 称为湍流折射率起伏功率谱的标度指数, $\alpha$ 称为对数光强起伏功率谱的标度指数,对局地均匀各向同性湍流, $\eta = 5/3$ , $\alpha = 8/3$ <sup>[18]</sup>。

因此可以通过对光斑水平方向的光强进行频谱分析,计算其标度指数,将其与理论值进行比较,即可分析边界层中各高度处的湍流与各向同性假设的偏差。

## 3 实验流程

图1即为实验装置示意图。对流水槽的尺寸为 $150\text{ cm} \times 150\text{ cm} \times 60\text{ cm}$ ,该尺寸的选取充分考虑了室内模拟对流边界层的需要,实验中边界层高度不超过 $40\text{ cm}$ ,因此宽高比始终大于 $3$ <sup>[19]</sup>,满足相似性理论的要求。实验水槽的四周和底部均为绝热性能

较好的透明钢化玻璃,厚度为 $10\text{ mm}$ 。整个水槽固定于金属框架中。

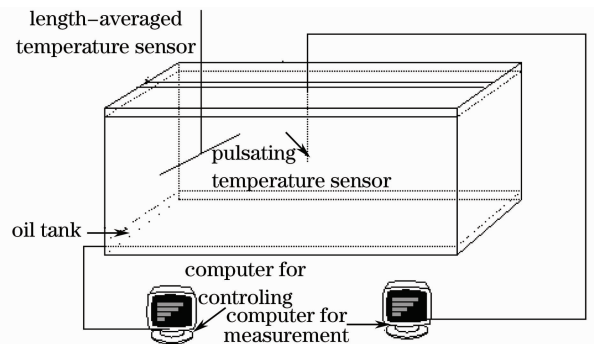


图1 水槽示意图

Fig. 1 Laboratory simulation tank

水槽底部放置厚度为 $6\text{ cm}$ 用于加热的油箱,油箱内均匀放置 $39$ 根电加热管,同时充满绝热性能好、热膨胀系数小的变压器油。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的二次加热法,以保证底面加热均匀。底部的加热功率可调,最大加热功率为 $35\text{ kW}$ 。

供水系统由过滤净化器、储存水箱、水泵、热水器组成。自来水经过过滤净化器后变成纯净水进入储存水箱,这样可以缩短实验时间,更可保证实验时的供水量,易操作控制。排水是由一个小水泵完成的。

模拟大气边界层时,先往水槽中加入冷水至一定高度( $20\text{ cm}$ ),然后在冷水上面加热水。加热水时,热水分布应该均匀,且没有扰动。具体实现时,在冷水上面浮一层薄膜,薄膜上面平放一根塑料管,塑料管两侧开有许多小孔。热水由塑料管流入,再经小孔流到薄膜上,然后缓慢流向水槽,薄膜随水位不断升高。控制电热水器的加热功率可改变流向水槽的热水温度,从而决定了逆温层的温度梯度。逆温梯度大小的选择出于相似性的考虑以及仿照Willis和Deardorff<sup>[20]</sup>的实验条件,通常在 $0.2 \sim 0.7\text{ }^\circ\text{C/cm}$ 范围内变化。水槽加满水后一般先静待 $2 \sim 3\text{ min}$ ,以减少加水导致的扰动。然后启动加热油箱进行加热,产生热对流驱动水槽内边界层的发展<sup>[21]</sup>。

水平平均温度的测量是利用自制的铜电阻温度计来实现的。传感器长度为 $1.40\text{ m}$ ,是由长度约为 $37\text{ m}$ ,直径为 $60\text{ }\mu\text{m}$ ,电阻约为 $105\text{ }\Omega$ 的铜丝绕制而成的。测量电路为自制的恒流源电路。整个测量系统的频率响应为 $25\text{ Hz}$ 。输出信号经A/D采样并由计算机储存和处理。传感器由步进电机驱动上下移动进行温度测量,移动的速度通常为 $0.02\text{ m/s}$ 。

温度测量的空间位置的绝对值误差小于 1 mm，同一次测量相邻点距离的误差小于 0.1 mm。温度传感器测量的绝对误差小于 0.1 °C，同一次测量相邻点温度差值的误差小于 0.01 °C。用平均温度传感器测量了水槽内的温度廓线后，利用“零通量”假定由相邻两条温度廓线即可以得到热通量廓线。图 2 即为实验测得的平均温度廓线和热通量廓线，其中 Height 为水槽的高度， $T$  为温度，Flux 为热通量。

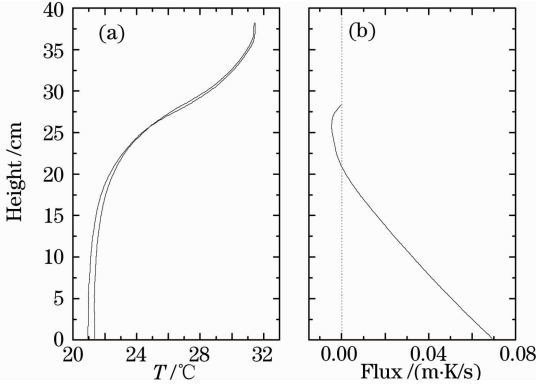


图 2 平均温度廓线(a)和热通量廓线(b)

Fig. 2 Averaged—temperature profile (a) and heat flux profile(b)

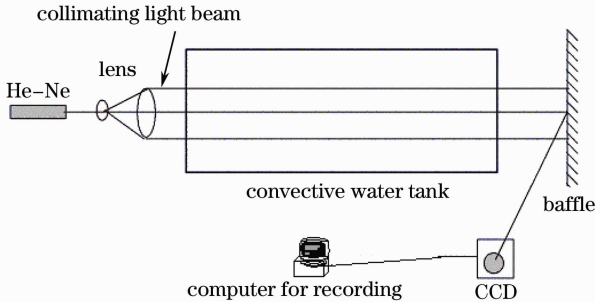


图 3 水槽光路示意图

Fig. 3 Schematic diagram of beam path

光斑采集光路示意图如图 3 所示。测量光路由 He-Ne 激光器、扩束透镜、准直透镜、挡板、CCD 摄像机和负责保存数据的计算机组成。He-Ne 激光经过两次扩束后变成直径为 20 cm 的准直光，当准直光经过水槽中的湍流场后，其振幅和相位将发生变化。在水槽另一侧附近，放置一个接收屏，在接收屏上形成一个圆形光斑。光斑由 CCD 拍摄(5.2 μm×5.2 μm, 60 dB, 256 gray scales 和 1024 pixel×1280 pixel)，计算机采集，采样频率最高 25 Hz，保存图象的分辨率为 1024 pixel×1280 pixel，像素的灰度等级为 256。在实验过程中将 CCD 光圈调到合适的大小使得当光斑最亮的时候不至于使 CCD 饱和，同时当光斑最暗的时候光强的差别也能够 CCD 上反映出来。将圆形光斑沿垂直方向计算归一化方差，即可以得到光束

强度的归一化方差廓线。图 4(a)为实验得到的光斑，图 4(b)为根据光斑计算出的归一化光强方差，其中  $\beta$  为归一化光强方差。

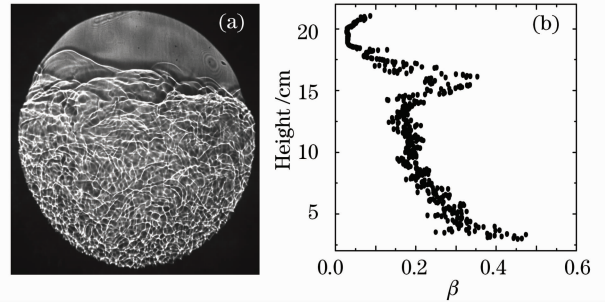


图 4 光斑(a)和归一化光强方差廓线(b)

Fig. 4 The facula image (a) and normalized variance of intensity profile (b)

### 4 数据处理及结果

#### 4.1 数据处理方法

对每幅光斑进行如下处理得到标度指数廓线：

- 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>[22]</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，使用傅里叶变换得到其光强的功率谱，确定无标度区间(即满足标度律不变的区间)并拟合标度指数  $\alpha$ 。
- 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，其中边界层高度根据归一化光强方差廓线给出<sup>[23,24]</sup>。

图 5 是对光斑图像中的行数据使用傅里叶变换方法求得的光强功率谱密度  $k$  为波数， $P_{var}(k)$  为用光强方差进行了归一化处理的功率谱密度。确定无标度区间时，在靠近高频的曲线上找一段斜率不变近似成线性关系的部分，把这一段确定为无标度区间(见图实线标出的区域)。由于噪声的影响在高频段的末尾会出现“翘尾”现象，在拟合中不考虑该部分。

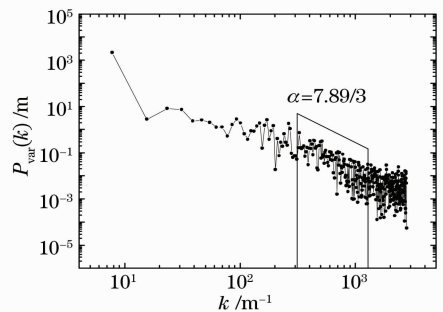


图 5 功率谱无标度区间的确定

Fig. 5 The definition of scale-free range of power spectrum

## 4.2 均匀下垫面标度指数特点

图 6(a) 是实验初期得到的一张标度指数廓线, 从图中可以看出, 标度指数廓线在混合层 ( $0.8z_i$ ) 以下基本在  $-8/3$  左右, 接近各向同性湍流的理论值, 这说明此处的部分已经混合均匀。此时由于是实验初期, 对流不是很强烈, 从图中可以看到, 夹卷层 ( $0.8z_i$  以上) 开始逐渐偏离  $-8/3$ , 说明此处混合不均匀。在  $1.0z_i$  上下附近有时会出现一个峰, 这可能与大尺度结构有关, 因为此处经常出现亮线或亮线族<sup>[25]</sup>, 会使得标度指数变大。在  $1.0z_i$  再往上由于没有能量的传递, 衰减的非常快, 标度指数开始迅速减小。

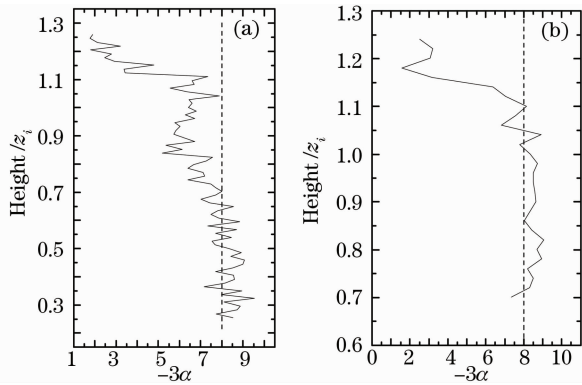


图 6 高度归一化的标度指数廓线

(a) 实验初期; (b) 实验后期

Fig. 6 The normalized scaling exponent profile (a) in the beginning of experiment; (b) in the end of experiment

对应于实验后期, 标度指数廓线就有所不同, 如图 6(b) 所示。该图为实验进行到后期的标度指数廓线, 可以看出, 在混合层中 ( $0.8z_i$  以下), 标度指数还是基本在  $-8/3$  左右, 和初期保持一致。但是由于此时对流活动剧烈,  $0.8z_i$  以上一直到  $1.1z_i$  处标度指数也接近理论值  $-8/3$ 。这说明随着对流活动逐渐旺盛, 湍流活动也越来越剧烈, 夹卷层也开始变得均匀。

图 7 和图 8 分别为实验初期和后期的标度指数廓线及对应的热通量廓线与归一化光强方差廓线。其中开始实验即水槽底部的油箱开始加热的时刻对应于  $t=0$  s,  $t$  为实验进行的时间。

从图 7 可以看出, 在同一时刻下, 标度指数在  $1.1z_i$  附近的地方迅速减小, 归一化光强方差也在此处迅速减小, 热通量在该处对应为 0; 在  $0.8z_i$  以下, 标度指数比较均匀在  $-8/3$  左右, 归一化光强方差也比较均匀, 热通量在  $0.8z_i$  处对应为 0; 在  $1.0z_i$  附近, 标度指数会变得比较大, 归一化光强方差也会出现大值, 此时热通量为负的最大值<sup>[26]</sup>。这说明,

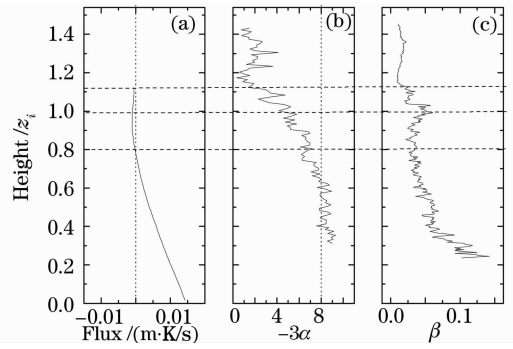


图 7  $t=478$  s 热通量廓线(a), 标度指数廓线(b), 归一化光强方差廓线(c)

Fig. 7  $t=478$  s Heat flux profile (a), scaling exponent profile (b), normalized variance of intensity profile (c)

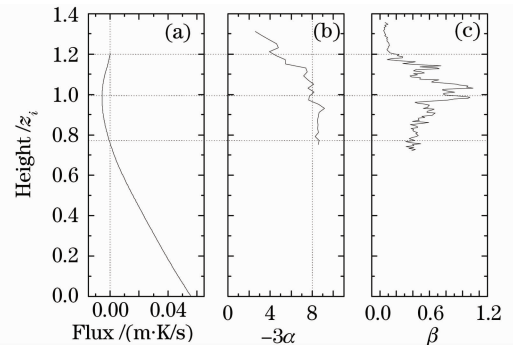


图 8  $t=1448$  s 热通量廓线(a)标度指数廓线; (b)归一化光强方差廓线(c)

Fig. 8  $t=1448$  s Heat flux profile (a) scaling exponent profile; (b) normalized variance of intensity profile (c)

标度指数廓线在空间分布上和归一化光强方差廓线以及热通量廓线有比较好的对应关系。

实验进行到后期时, 水槽中边界层的发展高度已经超过了光斑的高度, 为了进一步观察边界层特别是夹卷层的发展状况, 需要把激光器向上抬。此时水槽下部就不在光斑的范围内, 所以标度指数廓线和归一化光强方差廓线的下部就存在缺测值, 如图 8 所示。

从图 8 可以看出, 在  $1.0z_i$  附近, 归一化光强方差出现了极大值, 热通量也为负的最大值, 此时由于夹卷层混合均匀, 标度指数接近理论值  $-8/3$ , 所以标度指数在  $1.0z_i$  附近就不那么明显。但在  $1.2z_i$  附近, 热通量在此处为 0, 对应于夹卷层顶的位置, 标度指数和归一化光强方差也在此处迅速减小, 这是因为再往上就为自由大气, 没有湍流混合, 标度指数和归一化光强方差就会迅速减小。由于标度指数廓线和归一化光强方差廓线下部缺测,  $0.8z_i$  以下就不予讨论, 但是由图 7 可知, 在混合层中, 它们的一致关系也是相当好的。

从上面分析可以看出, 标度指数与边界层的对流状况存在一定的关系, 为了进一步研究这种关系, 我们对标度指数廓线进行了如下处理: 把某一时刻的标度指数分成  $h_0$  以下的混合层和  $h_0 \sim h_2$  的夹卷层两个部分, 对这两个部分范围内的所有标度指数求平均值, 这样就得出了混合层和夹卷层的平均标度指数随时间的变化规律, 这描述了混合层和夹卷层的平均混合状况, 如图 9 所示, 其中  $t$  为实验开始后经过的时间。

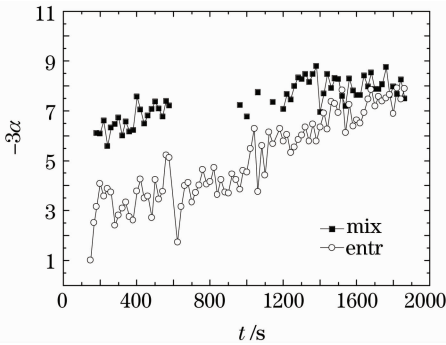


图 9 均匀下垫面混合层和夹卷层的标度指数均值随时间变化图其中 mix 代表混合层 entr 代表夹卷层

Fig. 9 The variation of scaling exponent changed with time in the condition of homogeneous land surface mix: mixed layer entr: entrainment zone

由图 9 可以看出, 对于混合层, 除了实验刚开始的浅混合层形成时期以外, 其他时候的标度指数均接近  $-8/3$ , 表明混合层中混合的比较均匀, 受对流状况影响较小。而对于夹卷层来讲, 可以看出大部分时候都比混合层的标度指数要小, 严重偏离  $-8/3$  这一理论值, 只有在实验后期对流发展较强的时候才接近混合均匀。从图中可以看出夹卷层的标度指数有一定的发展趋势, 这是与边界层对流状况密切相关的, 下面我们将用对流 Richardson 数进行解释。

对流 Richardson 数  $R_i^*$  定义为:

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

式中  $w_* = (g\gamma Q_0 z_i)^{1/3}$  为对流速度尺度,  $Q_0$  为地面热通量,  $g$  为重力加速度,  $\gamma$  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  $R_i^*$  的定义可知, 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 10 为两次实验得到的均匀下垫面夹卷层的平均标度指数和  $R_i^*$  的关系图。

从图 10 看出, 夹卷层中的平均标度指数跟  $R_i^*$  有一定的关系。实验初期, 水槽底部加热很小, 夹卷层的上下温差很大, 此时的  $R_i^*$  较大, 说明对流活动

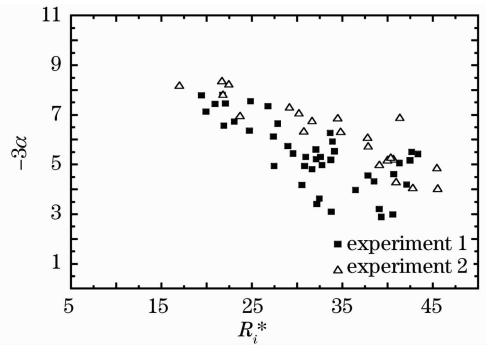


图 10 夹卷层的平均标度指数和  $R_i^*$  的关系图

Fig. 10 The relationship of averaged scaling exponent and  $R_i^*$

比较微弱, 混合就不是很均匀, 因此标度指数就比较小, 偏离理论值  $-8/3$ ; 但是随着实验的进行, 夹卷层上部由于冷却作用降温导致上下温差减小, 同时水槽底部加热作用变强, 促使  $R_i^*$  逐渐变小, 湍流在这时就得到充分发展, 夹卷层也混合得比较均匀, 于是夹卷层的标度指数就接近理论值。这也解释了图 9 中夹卷层标度指数随着时间不断变大最后接近  $-8/3$  的原因。

## 5 结 论

对水槽数据得到的光斑图像计算标度指数并研究其特点, 得到的结论如下:

1) 均匀下垫面标度指数廓线在混合层基本在  $-8/3$  左右, 接近各向同性湍流的理论值, 受对流影响较小;

2) 夹卷层的标度指数受对流情况影响较大, 对流较弱时, 较为偏离理论值  $-8/3$ , 而当对流较强时, 其基本接近  $-8/3$ 。通过对夹卷层平均标度指数与  $R_i^*$  的关系研究, 发现夹卷层的标度指数与  $R_i^*$  也存在一定的关系, 具体的定量关系将在以后研究。

3) 标度指数廓线随高度的变化特点与同时刻的热通量廓线和归一化光强方差廓线有比较好的对应关系。

执着下来还有很多工作值得去做, 例如可以研究非均匀下垫面对流边界层标度指数的特点, 我们将在下一步的工作中继续探索这些问题。

## 参 考 文 献

- 1 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

- 2 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
- 3 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
- 4 Rao Ruizhong. General optical scintillation in turbulent atmosphere[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(8): 547~549
- 5 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
- 6 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
- 7 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
- 8 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
- 9 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
- 10 Rao Ruizhong, Wang Shipeng, Liu Xiaochun *et al.*. Turbulence spectrum effect on wave temporal-frequency spectra for light propagating through the atmosphere[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1999, **16**(11): 2755~2762
- 11 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
- 12 Rao Ruizhong. Light propagation in atmosphere: Turbulence Spectrum and Intermittency[J]. *J. UEST of China*, 1999, **28**(4): 437~442  
饶瑞中. 大气光传播研究中的湍流谱与间歇性[J]. *电子科技大学学报*, 1999, **28**(4): 437~442
- 13 Zhu Wenyue, Ma Xiaoshan, Rao Ruizhong. High-frequency spectrum behavior of laser scintillation in turbulent atmosphere[J]. *High Power Laser And Particle Beams*, 2006, **18**(11): 1793~1795  
朱文越, 马晓珊, 饶瑞中. 激光大气闪烁的高频谱特性[J]. *强激光与粒子束*, 2006, **18**(11): 1793~1795
- 14 Rao Ruizhong, Wang Shipeng, Liu Xiaochun *et al.*. Wavelet spectrum analysis of laser scintillation in a turbulent atmosphere[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(12): 1634~1638  
饶瑞中, 王世鹏, 刘晓春 等. 激光大气闪烁的小波频谱分析[J]. *光学学报*, 1999, **19**(12): 1634~1638
- 15 Rao Ruizhong. Research progress on the laser atmospheric scintillation statistical characteristics [J]. *Opt. Technol. & Information*, 2000, **13**(5): 12~18  
饶瑞中. 激光大气闪烁统计特征的研究进展[J]. *光电子技术与信息*, 2000, **13**(5): 12~18
- 16 Rao Ruizhong, Wang Shipeng, Liu Xiaochun *et al.*. Characteristics of the power spectrum of laser irradiance scintillation in a real atmosphere[J]. *Chinese J. Lasers*, 1999, **26**(5): 411~414  
饶瑞中, 王世鹏, 刘晓春 等. 实际大气中激光闪烁的频谱特征[J]. *中国激光*, 1999, **26**(5): 411~414
- 17 Tatarski. Wave propagation in a turbulent medium [M]. Wen Jingsong *et al.*, transl. Beijing: Science Press, 1978. 51~52  
塔塔尔斯基. 湍流大气中波的传播理论[M]. 温景高等译. 北京: 科学出版社, 1978. 51~52
- 18 Rao Ruizhong, Wang Shipeng, Liu Xiaochun *et al.*. Wavelet spectrum analysis of laser scintillation in a turbulent atmosphere[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(12): 1634~1638  
饶瑞中, 王世鹏, 刘晓春 等. 激光大气闪烁的小波频谱分析[J]. *光学学报*, 1999, **19**(12): 1634~1638
- 19 Poreh M, Rau M, Plate E J. Design considerations for wind tunnel simulation of diffusion within the convective boundary layer[J]. *Atmos Environ*, 1991, **25**: 1251~1256
- 20 Willis. G. E, J. W. Deardorff. A laboratory model of the unstable planetary boundary layer[J]. *J. Atmos. Sci.*, 1974, **31**: 1297~1307
- 21 Yuan Renmin, Sun Jianning, Yao Keya *et al.*. A laboratory simulation of atmospheric boundary layer analyses of temperature structure in the entrainment zone[J]. *Chinese J. Atmospheric sciences*, 2002, **26**(6): 773~780  
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[J]. *大气科学*, 2002, **26**(6): 773~780
- 22 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
- 23 Luo Tao, Yuan Renmin, Sun Jianning. The simulation study of evolution of atmospheric convective boundary layer[J]. *Plateau Meteorology*, 2006, **25**(6): 1001~1007  
罗 涛, 袁仁民, 孙鉴泞. 大气对流边界层发展的模拟研究[J]. *高原气象*, 2006, **25**(6): 1001~1007
- 24 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
- 25 Luo Tao, Yuan Renmin, Sun Jianning. The simulation study of evolution of atmospheric convective boundary layer[J]. *Plateau Meteorology*, 2006, **25**(6): 1001~1007  
罗 涛, 袁仁民, 孙鉴泞. 大气对流边界层发展的模拟研究[J]. *高原气象*, 2006, **25**(6): 1001~1007