

# 大气边界层的室内模拟研究<sup>\*</sup>

## ——夹卷层温度场结构分析

袁仁民<sup>1)</sup> 孙鉴泞<sup>2)</sup> 姚克亚<sup>1)</sup> · 曾宗泳<sup>3)</sup> 蒋维楣<sup>2)</sup>

1) (中国科学技术大学地球与空间科学系, 合肥 230026)

2) (南京大学大气科学系, 南京 210093)

3) (中国科学院安徽光学精密机械研究所人气光学重点实验室, 合肥 230031)

**摘 要** 利用室内水槽模拟大气对流边界层, 并用多探头测量和光学方法测量分析夹卷层的夹卷过程和温度场结构。测量结果表明, 夹卷层的温度场不同于各向同性湍流场, 主要原因是夹卷层中含有一些大尺度的相干涡旋。

**关键词:** 水槽; 室内模拟; 夹卷层; 各向异性

## 1 引言

夹卷层是混合层顶部的静力稳定空气层。由于夹卷层像一个逆温的盖子阻碍了大气边界层空气向上运动, 不利于近地面的污染扩散, 同时也影响着混合层湍流场结构, 因此对夹卷层的研究一直受到人们的重视。夹卷层内有来自混合层热泡和被夹卷向下的自由大气空气团, 其内部结构特点不同于混合层及近地面层的温度场, 因而对夹卷层的研究不仅是边界层气象学领域研究的需要, 也是高空光传输的需要。但由于夹卷层处于边界层的顶部, 常规的观测手段不适用, 通常利用飞机、气球、声雷达和微波雷达进行实际大气观测, 取得可供分析的资料不多<sup>[1]</sup>。近几年, 人们借助于数值模拟来研究夹卷层的结构。尽管计算机水平的迅猛发展, 使得数值模拟成为重要的研究手段之一, 但室内模拟实验仍不失为一种很好的途径。

实验室模拟有稳定性和可重复性等优点, 可以为进一步的数值模拟提供参数, 为实际测量提供指导。Deardorff<sup>[2]</sup>和他的合作者<sup>[3]</sup>曾利用室内模拟成功地进行了大气对流边界层的研究, 取得一些独创性的结果, 如得出对流速度尺度 $w_*$ , 提出了夹卷层的结构模型等。出于光传输的需要, 本文利用室内模拟来研究夹卷层的温度场结构。

## 2 实验介绍

实验装置的主体为长方体水槽, 长 200 cm, 宽 40 cm, 高 57 cm。如图 1 所示。实验水槽的四周和底部均为绝热性能较好的透明有机玻璃板, 厚度为 10 mm。整个水槽

2001-01-18 收到, 2001-08-01 收到再改稿

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目 49775257

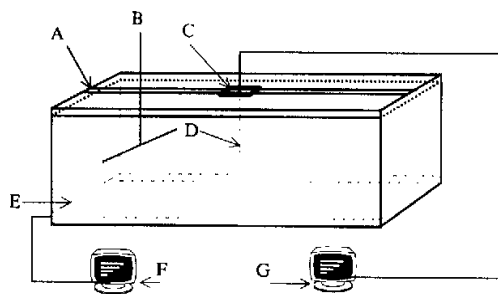


图1 模拟水槽示意图

A: 狭缝和轨道, B: 温度廓线测量传感器, C: 置于轨道上的小车,  
D: 温度脉动测量传感器, E: 油箱, F: 控制用计算机, G: 测量用计算机

固定于金属框架中。水槽底部放置厚度为 8 cm 用于加热的油箱, 油箱内部安装 3 组 20  $\Omega$  的电阻丝, 由专用的控制柜提供三相交流电, 加热功率连续可调。油箱中有温度传感器, 利用数码管直接显示油箱的温度。

水槽上部放置有水平导轨, 供小车水平滚动。导轨的一侧装有步进电动机, 能驱动传感器的水平和上下运动。步进电动机受计算机控制。在进行具体测量的时候, 一方面上下移动探头测量槽内的平均温度廓线, 由步进电机带动, 移动速度约  $2 \text{ cm s}^{-1}$ , 采样频率为 5 Hz。另一方面, 在水槽内靠近光路沿竖直方向放置 6 个测量温度脉动探头, 间隔为 2~4 cm, 采样频率为 25 Hz。

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, 更是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 (根据实际情况而定), 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, 我们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>[3]</sup> 的实验条件, 使之在  $0.2 \sim 0.7 \text{ }^{\circ}\text{C cm}^{-1}$  范围内变化。对流槽模拟边界层和实际大气对流边界层的动力和热力相似性分析参见文献[4,5]。实验共进行了十余次, 重复性很好。

### 3 实验结果

我们测量了温度平均值和脉动值。利用长度为 10 m、直径为  $60 \mu\text{m}$  的漆包铜丝绕成电阻为  $30 \Omega$  ( $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$  时)、长度为 32 cm 的平均温度测量传感器。测量温度脉动的传感器是国产的铂薄膜电阻和 Dantec 公司生产的热膜电阻 (铂薄膜电阻比 Dantec 公司生

产的热膜电阻更适合于在水中测量)。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  $0 \sim 5 \text{ Hz}$ 。输出信号经 A/D 采样并由计算机储存和处理。

图 2a 为固定于  $22 \text{ cm}$  处的探头温度测量记录 and 边界层高度随时间的变化曲线。图 2b 为同时测量得到的热通量廓线, 可以看到该温度记录曲线反映的是夹卷层中的情况。从温度记录上可以看到起伏大, 在很短的时间内最大变化有时超过  $3^\circ\text{C}$ 。根据曲线的形状可以将这一段记录分为两部分, 由图上的虚线分开。第一部分表现为向下尖峰, 第二部分表现为向上尖峰。湍流研究中, 常用偏度系数和峰度系数来表示随机变量与正态分布的偏离程度。偏度系数为三阶中心矩与二阶中心矩  $3/2$  次方的比值, 反映了随机量对平均值的偏离情况。偏度系数大于零表示正偏态, 反之为负偏态; 而峰度系数为四阶中心矩与二阶中心矩平方的比值。均匀各向同性随机场满足正态分布, 其峰度系数为 3, 一般认为具有正态分布的随机场是没有间歇的。所以通常人们利用峰度系数来反映随机量的间歇性。对图 2a 的曲线进行计算, 第一部分表现为负偏态, 偏度系数为  $-1.69$ , 峰度系数为  $5.9$ , 具有较大的间歇性; 而第二部分为正偏态, 偏度系数为  $1.24$ ,

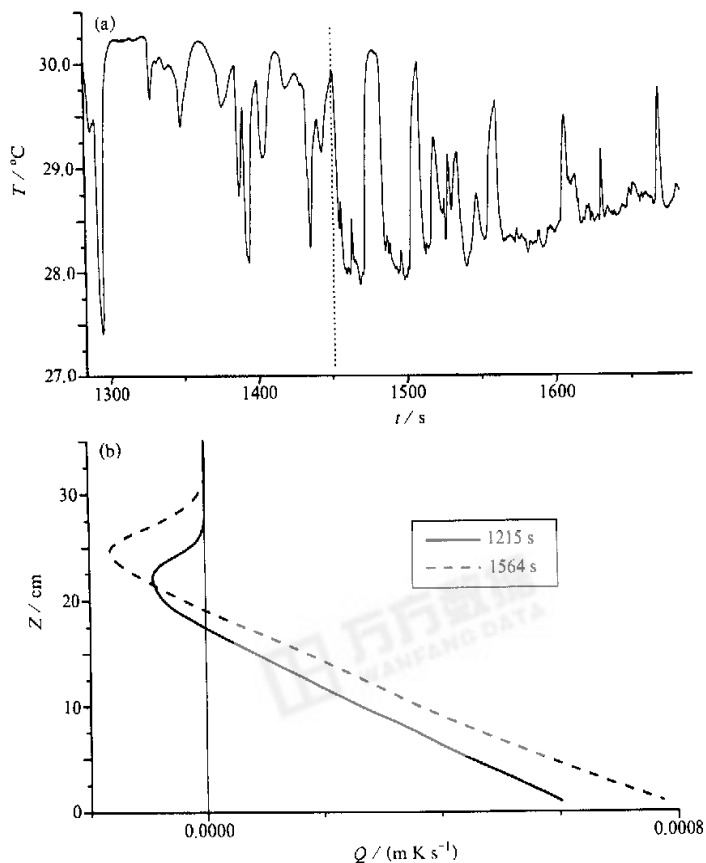


图 2 夹卷层温度脉动记录 (测量点高度为  $22 \text{ cm}$ ) (a) 和温度记录所对应的热通量廓线 (b)

峰度系数为 4.23。根据边界层发展和实验测量的特点可以断定, 在这里所说的第一部分和第二部分应该对应于夹卷层的上面部分和下面部分, 即夹卷层的下半部为正偏态, 夹卷层的上半部为负偏态。

随着底板加热的进行, 从某时刻开始, 探头处的温度突然下降, 表现为向下的尖峰; 从记录上还可以看出, 向下的尖峰具有高频起伏, 而向上尖峰没有高频起伏。从这两点可以说明, 向下的尖峰只能是由于混合层的热泡向上运动所致。因为混合层的温度比混合层顶以上的逆温层的温度低, 混合层热泡运动到逆温层顶表现为具有较大动能但温度较低的涡旋, 当遇到测量探头时, 探头的温度会突然下降。向下尖峰的宽度窄说明温度较低的涡旋经过探头的时间很短, 尖峰的数目少说明探头测量点处主要表现为稳定区域, 只是偶尔有小尺度起伏多但平均温度较低的涡旋出现。

随着加热的进行, 混合层顶逐渐升高, 探头处的位置由较少小尺度起伏的逆温层向较多小尺度的混合层变化, 平均温度将逐渐接近混合层的温度。对照图 2a 的温度记录, 虚线左边, 湍流成分少, 而虚线右边, 湍流是主要特征, 只是温度记录偶尔出现了突然升高, 有的尖峰的温度最高可达探头开始记录的温度。

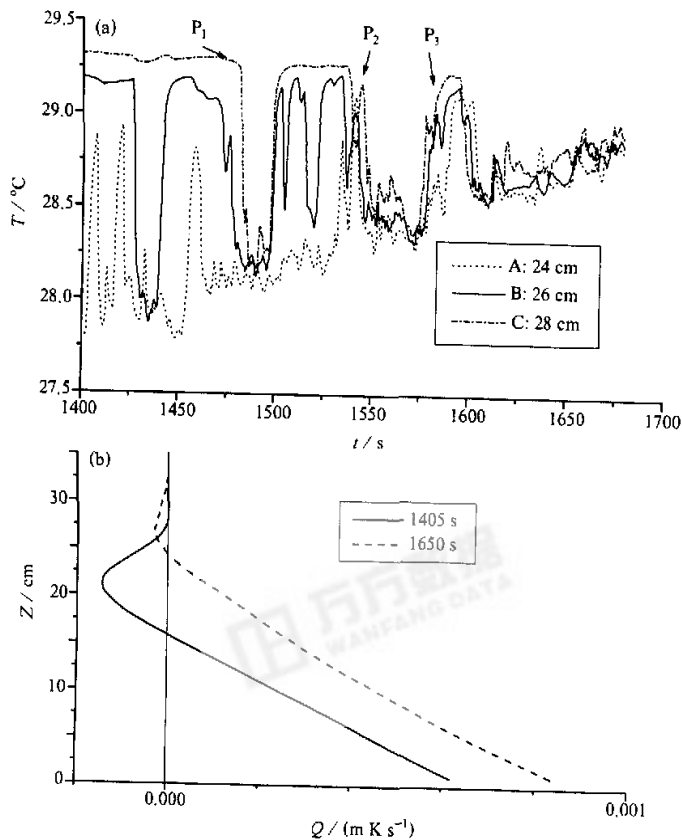


图3 竖直不同高度上温度脉动记录(测量高度分别为24、26、28 cm)(a)和所对应的热通量廓线(b)

图 3a 为处于不同高度三探头测量的温度记录。探头 A、B、C 分别处于 24 cm、26 cm、28 cm 高度。在这段时间内的热通量廓线如图 3b, 可见探头 A、B、C 均处于夹卷层内。从图上可以看到在 1430 s 时探头 B 的温度突然下降了 1℃ 多, 而探头 C 温度此时几乎没有变化。在  $P_1$  位置, 探头 B、C 的温度均下降, 温度记录曲线形状相似, 探头 C 温度信号滞后于探头 B 的信号约 5 s, 可知混合层热泡在上升到夹卷层时先经过探头 B, 5 s 后再经过探头 C, 平均速度约为  $4 \text{ mm s}^{-1}$ 。位置  $P_2$  的情况类似于  $P_1$ 。由  $P_2$  到  $P_3$ , 温度信号由正偏态向负偏态过渡。由图上可以看到  $P_3$  位置, 探头 A、B、C 温度记录变化趋势相同, 属于同一个湍涡引起。 $P_3$  和  $P_1$  或  $P_2$  不同的是探头 A 信号滞后于探头 B 信号, 探头 B 信号滞后于探头 C 的信号, 由此可知该湍涡自上向下运动。引起探头 A、B、C 温度升高是上层温度高的流体被夹卷下来的缘故。根据位移和滞后的时间估算此时湍涡由上向下运动的速度约为  $4 \text{ mm s}^{-1}$ 。从这些可以看到在边界层顶部有一些来自于混合层中下部较大的涡旋, 根据连续性方程, 就会出现逆温层的流体被挤压或夹带到混合层中, 同时也将热量传递到混合层中。 $P_3$  位置, 探头 A、B 和 C 的温度表现为相同的结构, 说明该湍涡在竖直方向的尺度大于 4 cm。观察所有的实验结果, 发现夹卷层内相距为 2 cm 的探头同时出现大起大落的情况很少, 由此可以认为湍涡在竖直方向的尺度一般为 2 cm。

由上面的分析可以看到这样一个过程, 混合层热泡具有较大的速度, 能够上升到混合层顶部。尽管混合层热泡在混合层中比周围的温度高, 但热泡在上升到逆温层后比周围温度低, 因此混合层热泡在上升到逆温层后又称为“冷涡”。冷涡所受到的浮力小于重力, 结果会向下运动, 同时混合层以上的流体运动到混合层中。这就是夹卷过程。

为了研究热泡在到达夹卷层后的水平分布情况, 将四个探头水平放置, 高度均是 19 cm, 相互间隔 4 cm。图 4 给出温度记录曲线和对应时刻的热通量廓线。在曲线  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$  位置处, 均表现为温度突然下降, 只是幅度不等而已,  $P_4$  位置处, 4 个探头的温度均表示为突然上升。可以看出, 湍涡在进入夹卷层后水平尺度可以达到 12 cm, 差不多为边界层厚度一半。湍涡的上边缘可能为椭球面, 因为相邻探头的温度变化是渐变的。这类似于实际大气的圆顶屋形状 (dome-like) 的结构<sup>[6]</sup>。

图 5 为测量的激光光斑。该光斑是准直光束水平经过水槽形成的。通过对光斑的连续观测, 经常可以看到有亮线上升, 到达一定高度后再下降。

在图 5 光斑的中上部有一条几乎贯穿整个光斑的条纹, 说明条纹的水平尺度至少为光斑的直径。由条纹的形状可说明湍涡为半椭球形, 曲面向上。条纹的下边缘是亮线, 条纹的上边缘是有一定宽度的暗区。因为光斑的直径约为 10 cm, 可知条纹的宽度约为 4 mm, 有的条纹宽度更小, 甚至达 1 mm。混合层的对流胞在上升到逆温层后, 对流胞的温度低于周围环境的温度, 但在短时间内, 对流胞和周围环境来不及充分混合, 从而在分界面处约 1 mm 量级的尺度内形成较大的温度梯度, 因而出现了暗区和亮线条纹。因此, 在垂直于分界面方向上温度梯度很大, 而平行于分界面方向上温度梯度很小, 温度场表现为各向异性的特点。在光斑的下部 (图中箭头所指), 有许多条水平亮线组成的亮线簇, 这些亮线的水平尺度一般都大于 5 cm, 而竖直方向的尺度却是毫米量级。对应于温度场中处于逆温梯度最大的位置, 此处也表现了很强的各向异性。

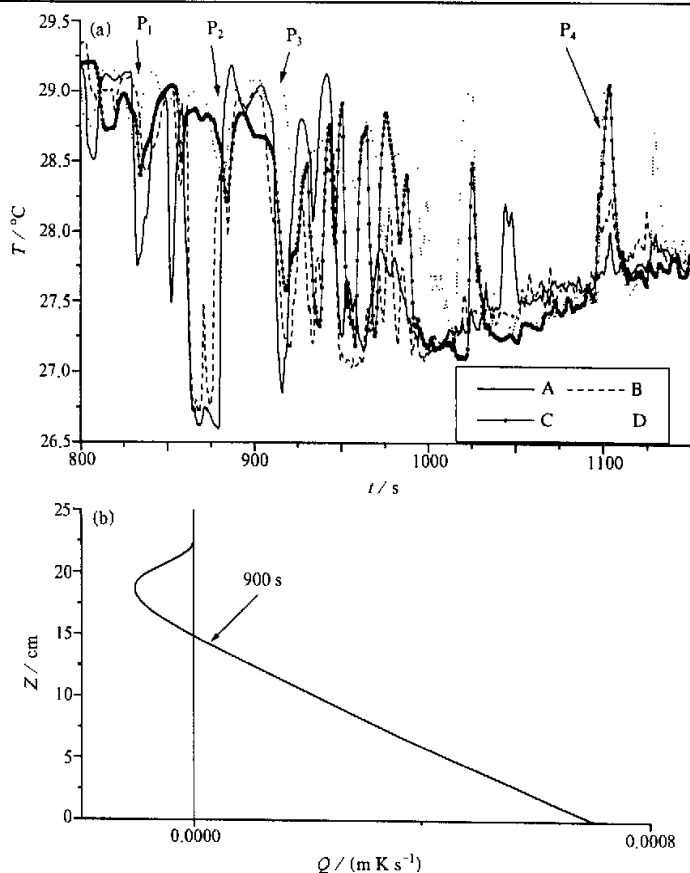


图4 探头水平放置测量结果 (测量高度为19 cm, 探头相邻间隔为4 cm) (a) 和对应的热通量廓线 (b)



图5 准直光斑水平穿透模拟水槽后的光强分布  
光斑中心为19 cm, 光斑直径为9.5 cm

利用时间延迟和快速傅立叶变换得到与图3中B、C两记录相对应的结构函数和功率谱 (如图6a和b所示)。从结构函数曲线可以判断在小尺度范围内幂率约等于  $3/2$ , 从谱曲线上可以得出谱幂率为  $-5/2$ 。实际大气观测得到夹卷层内温度谱也偏陡, 幂率为  $-2$ <sup>[5]</sup>。通过数值计算可以知道, 方波和三角波这种大尺度信号的功率谱偏陡而背离了“ $-5/3$  定律”。

由图6的功率谱曲线可知, 谱峰对应的频率约为  $0.02\text{ Hz}$ , 从图3中B和C两温度曲线的相关分析可知, 迁移速度约为  $0.007\text{ m s}^{-1}$ , 因此峰值频率换算到长度约

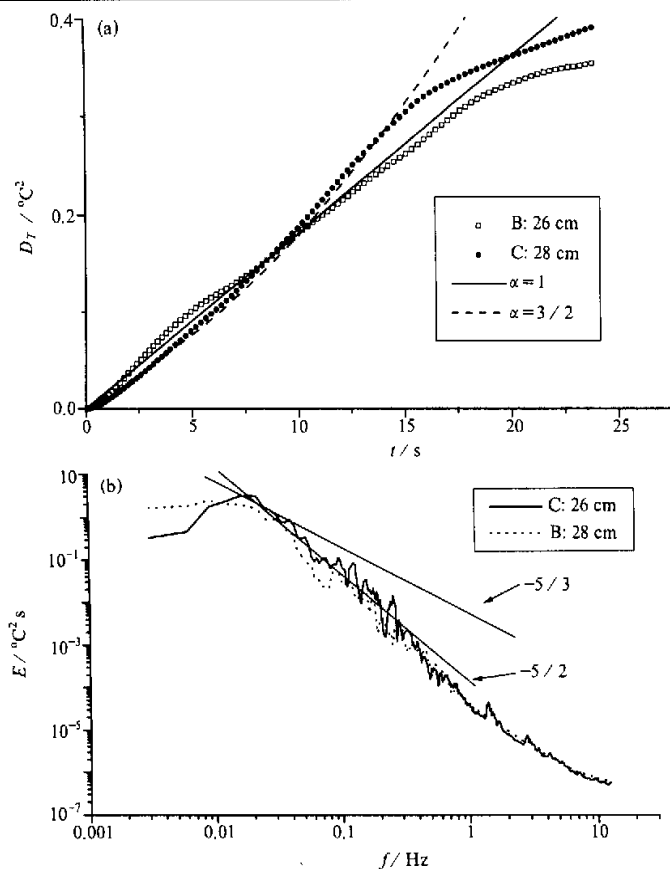


图6 图3中B、C温度脉动的结构函数(a)和功率谱(b)

为30 cm, 为边界层厚度的1.5倍, 这 and 实际大气观测结果相同<sup>[7]</sup>。

夹卷层内温度时间谱率远远偏离了“ $-5/3$ ”, 因此若简单地认为湍流仍符合“ $-5/3$ 定律”, 然后据此计算温度结构常数, 将带来一定的误差。

## 4 结论

通过以上的实验和分析能够得到如下结论:

(1) 沿垂直方向放置多探头测量可以比较清楚地了解夹卷过程。混合层下部产生的大尺度相干结构比周围温度高, 因此称为热泡, 在浮力的作用下向上运动, 但在上升到边界层顶部的逆温层时, 比周围温度低, 因此此时又称为冷涡。由于冷涡所受到的合力向下, 在上升到一定高度后又向下运动, 同时把逆温层中温度较高的流团挤压和夹卷至混合层中。

(2) 沿垂直方向和水平方向放置多探头测量可以确定冷涡的空间尺度, 测量结果表

明冷涡的水平尺度可以达到 12 cm, 而垂直尺度约为 2 cm。夹卷层中的冷涡与周围环境的分界面是具有较强温度梯度的薄层。薄层的厚度为毫米量级。由此可见夹卷层中的温度场结构具有高度的各向异性。

(3) 夹卷层上半部的温度起伏为负偏态, 而下半部为正偏态。夹卷层中的温度结构函数和温度谱都偏离了“ $2/3$  定律 (或  $-5/3$  定律)”。

以上只是从温度记录上对夹卷层的温度场结构进行分析, 要想对夹卷层的湍流场结构和物理过程进行全面深入的了解, 必须知道夹卷层速度场的分布。而速度场的测量, 有待于我们下一步的工作。

### 参 考 文 献

- 1 Beyrich, F. and S. E. Gryning, Estimation of the entrainment zone depth in a shallow convective boundary layer from sodar data, *J. Appl. Meteor.*, 1998, **37**, 255~268.
- 2 Deardorff, J. W., Prediction of convective mixed-layer entrainment for realistic capping inversion structure, *J. Atmos. Sci.*, 1979, **36**, 424~436.
- 3 Willis, G. E. and J. W. Deardorff, A laboratory model of the unstable planetary boundary layer, *J. Atmos. Sci.*, 1974, **31**, 1297~1307.
- 4 孙鉴宁, 蒋维楣, 曾宗泳, 袁仁民, 姚克亚, 对流槽模拟对流边界层实验研究, *南京大学学报*, 2000, **36** (6), 786~790.
- 5 袁仁民, 曾宗泳, 马成胜, 肖黎明, 大气对流边界层光传输的实验室模拟, *光学学报*, 2001, **21** (5), 518~521.
- 6 Kaimal, J. C., J. C. Wyngaard, D. A. Haugen, Y. Izumi and O. R. Cote, Turbulence Structure in the convective boundary layer, *J. Atmos. Sci.*, 1976, **33**, 2125~2169.
- 7 Jensen, N. O. and D. H. Lenschow, An observation investigation of penetrative convection, *J. Atmos. Sci.*, 1978, **35**, 1924~1933.

## A Laboratory Simulation of Atmospheric Boundary Layer Analyses of Temperature Structure in the Entrainment Zone

Yuan Renmin<sup>1)</sup>, Sun Jianning<sup>2)</sup>, Yao Keya<sup>1)</sup>,

Zeng Zongyong<sup>3)</sup> and Jiang Weimei<sup>2)</sup>

1) (Department of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

2) (Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093)

3) (State Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei 230031)

**Abstract** A water convection tank is used to simulate the atmospheric convective boundary layer, and the entrainment processes and temperature structure are analyzed with help of multi-probe temperature sensors and optics method. The results show that temperature structure in the entrainment zone differs from the structure of isotropic turbulence and contains a lots of large-scale coherent eddies.

**Key words:** water tank; laboratory simulation; entrainment zone; anisotropy