

强雷雨云边界层小尺度结构和谱特征

叶卓佳 朱翠娟 李兴生 周明煜

(中国科学院大气物理研究所)

提 要

本文利用强雷雨云通过期间北京 325 米气象塔资料,分析了强雷雨云低层流出气流的小尺度结构、湍流结构和谱特征。

一、引 言

雷雨是夏半年常见的天气现象。发展强烈的积雨云能造成强烈的阵性降水或暴雨。积雨云的低层流出气流可造成边界层强烈的风向和风速的垂直切变,这对国民经济各个部门都会造成巨大的影响,因而积雨云的研究在气象学上有着重要的意义。

对积雨云流出气流边界层结构的研究,包括有流体力学实验、数值模拟和场地气象测量^[1-4]。这些工作对于认识强雷雨云的边界层结构提供了依据。我们已在文献[1]中对北京夏季冷锋锋生的过程中雷雨云低层密度流的边界层特征做了初步分析。本文进一步揭露强雷雨云期间在边界层中的小尺度结构、湍流及气象要素谱特征。

本文使用 1980 年 8 月 15 日强雷雨云过境时北京气象塔在 14 个高度上的水平风速、风向、温差; 4 个高度上的垂直速度; 48 米高度上用 Gill 三分量仪测量的速度三个分量(u 、 v 、 w)等资料。

二、雷雨云边界层密度流各要素场特征

图 1a 为 140 米高度上位温(θ)随时间的变化曲线。在整个塔层高度,位温随时间变

表 1

波动序号		第 一 个				第 二 个				第 三 个			
高度(米)		48	140	240	320	48	140	240	320	48	140	240	320
降 温	持续时间(分钟)	17	16	14	14	6	7	8	8	—	23	23	23
	强 度 ($^{\circ}\text{C}$)	-7.2	-7.5	-4.8	-4.4	-2.2	-3.2	-3.2	-3.6	—	-2.4	-3.2	-2.4
升 温	持续时间(分钟)	10	9	10	10	8	5	5	5	—	28	31	32
	强 度 ($^{\circ}\text{C}$)	1.9	4.6	2.9	3.9	0.6	1.3	1.4	0.8	—	2.6	4.4	4.5

1981 年 12 月 29 日收到修改稿。

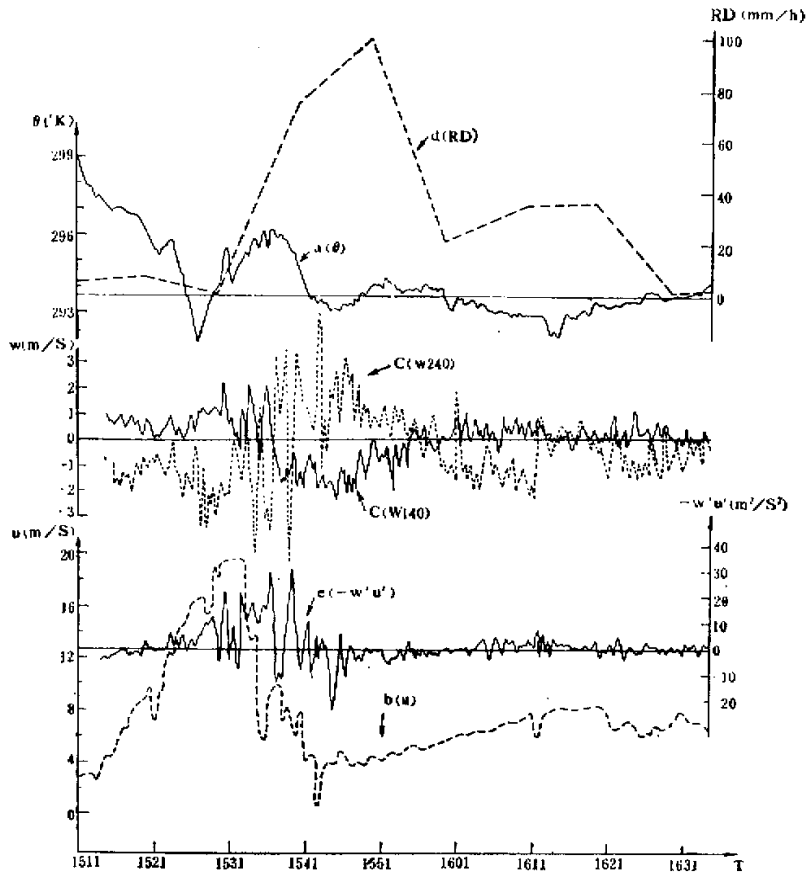


图1 140米高度上位温(θ)、水平风速(u)、140和240米垂直速度(w)、雨强(RD)和48米高($-w'u'$)和($-w'u'$)的时间演变

化大都表现为三个波动,即由三次降温组成:位温最低值分别出现在15时28分、15时46分和16时15分。三次降温及回升的持续时间和强度见表1。从表1看出,雷雨云经过时,在边界层中首先是出现整层同时性强烈降温。在第一次降温时,140米以下高度比其上更强烈。第三次降温时,48米以下高度已没有反应,降温强度逐次减弱,影响高度逐次增高。

图1b为140米高度上水平风速 u 分量随时间演变曲线。除了48米以下高度外整个塔层风迹线由两个波动组成:风速最大值分别出现在15时31分和16时17分,以第一个波动的振幅最大。整个塔层风速是从15时11分同时开始增大的,仅经过20分钟,风速增加了17.6米/秒(140米)。风速增值以140米高度最大,因而在塔层中部形成强风核。第二个波动与第一个波动相比明显减弱。图1a、b表明,第一个风速波动与第一个位温波动相对应,第二个风速波动与第三个温度波动相对应。最低温度比最大风速位相超前

三分钟。

图 1c 为 140 和 240 米两个高度的垂直速度时间迹线图。整个塔层垂直运动状态可分为四个阶段:

(1) 15 时 13 分—31 分。这个阶段与温度场的急剧降温和水平风速迅速增强相对应。48、140、240 和 320 米在这个时段的平均垂直速度($\bar{w}$)分别为 -0.5 、 0.7 、 -1.3 和 1.5 米/秒。即在 48 米和 240 米附近高度为下沉运动, 140 和 320 米附近为上升运动。它说明, 从 48 米到 320 米极浅薄的气层内, 其垂直速度位相竟反相三次, 这说明强雷雨云密度流内的垂直运动场是十分复杂的, 它与大尺度垂直运动的性质很不相同。 $\bar{w}$ 绝对值随高度增加而增大。

(2) 15 时 32 分—37 分。这个时段整个塔层的垂直运动表现为上升和下沉运动交替出现, 时间迹线表现为正负相间, 有如“拉锯式”的强烈振动。这种“拉锯式”的振动的振幅是随高度增大的。例如在 48 米为 $-1.8 \sim 1.1$ 米/秒, 而在 320 米为 $-3.5 \sim 4.5$ 米/秒。垂直运动的瞬时值以这个时段最大。这个阶段正是处在第一次大风后开始减速和第一次强降温后开始升温的时候。

(3) 15 时 38 分—52 分。在 48、140、240 和 320 米的垂直速度的平均值分别为 0.2 、 -1.1 、 1.4 和 -2.0 米/秒。各个高度的垂直速度符号恰好与(1)相反。垂直速度的绝对值对同一高度来说则是随时间推移而减少; 对同一时间则是随高度的增加而增大。这个阶段与第二次降温相对应。

(4) 15 时 53 分—16 时 13 分。这个时期与第三次降温和第二次风速增大相对应。垂直速度符号与(1)相同, 但与(3)相反。其绝对值与(1)相比明显减弱。

图 1d 为雨强(RD)时间变化曲线。它由三个波动组成: 第一个波动与第一次强降温相对应, 峰值雨强为 8 毫米/小时; 第二个波动与第二次降温相对应, 雨强很大, 峰值雨强达 100 毫米/小时, 强降水主要在这个时段; 第三个波动峰值为 37 毫米/小时, 它与第三次降温过程相对应。

图 1c 为 48 米高度 $-u'w'$ 的时间演变曲线。图中表明, $-u'w'$ 在温度第一个波动的升温时期数值最大。这个时期的十分钟平均值 $\overline{-u'w'} \approx 13 \text{ 米}^2/\text{秒}^2$ 。说明这个时期湍流垂直输送非常强烈。强烈的湍流垂直输送时段与第二个雨强急剧上升时期相对应。

从 $\partial u / \partial z$ 时间高度剖面图看出(图略)。在整个雷雨过程中, 15 米以下高度的 $\partial u / \partial z$ 均大于 $0.1/\text{秒}$, 尤以 $10 \sim 15$ 米气层切变值最大。从垂直切变随高度分布看, 大于 $0.1/\text{秒}$ 的 $\partial u / \partial z$ 值以与第一次降温过程相对应的大风时期分布范围最厚, 最大值位于强风核之下。 $\frac{\partial u}{\partial z} > 0.1/\text{秒}$ 对飞机的起飞和着陆会带来巨大的危险。

综上所述: 这次强雷雨云低层流出气流由三次浪涌组成: 第一次浪涌以整层温度同时急剧下降和水平风速的整层同时迅速增强为特征。这个浪涌造成在 320 米气层内降温 7°C , 并在离地 140 米高度上出现 19.7 米/秒的强风中心。与强风相伴随, 在 200 米以下的气层内出现 $\frac{\partial u}{\partial z} > 0.1/\text{秒}$ 的强切变层, 最强部分可达 $1.0/\text{秒}$ 以上, 位于强风核之下。垂直速度绝对值达到几米/秒数值, 并随高度增加而增加; 垂直速度的符号随高度增大出现多

次反号,垂直运动场较为复杂。这次浪涌风场特征是主要的,我们称之为“风浪涌”。第二个浪涌与第二个降温过程相配合,垂直速度仍达几米/秒的量级,其符号与前一个浪涌分布相反,这个浪涌没有风场相对应,但降水十分强烈,雨强达 100 毫米/小时,强烈降水是这个浪涌的主要特征,称之为“雨浪涌”。第三个浪涌有第二强降水与之对应,也有风场,温度场和垂直运动场相对应,但表现都较弱。

三、空间相关函数和湍流积分尺度

根据相关函数定义,气象要素 ϕ 的时间相关函数 $R_\phi^t(k)$, 垂直相关函数 $R_\phi^z(s)$ 分别为:

$$R_\phi^t(j, k) = \left[\sum_{i=1}^{N-j} \phi'(i, k) \phi'(i+j, k) / (N-j) \right] / \sigma_\phi^2(k) \quad (1)$$

$$R_\phi^z(s) = \left[\sum_{i=1}^N \phi'(i, k) \phi'(i, k+s) / N \right] / [\sigma_\phi^2(k) \sigma_\phi^2(k+s)] \quad (2)$$

其中 N 为样品总数 (318), k 为塔上高度层次, i 为样品序号, j 为相关时间间隔, s 为垂直方向距离, $\phi'_i = \phi_i - \bar{\phi}$, $\sigma_\phi^2(k) = \left[\sum_{i=1}^N \phi^2(i, k) / N \right]^{1/2}$, 为标准偏差。其中

$$\bar{\phi} = \sum_{i=1}^N \phi_i / N.$$

根据 Taylor 公式,相关函数可表示为:

$$R_\phi^t(j, k) = \exp[-j\Delta t / L_\phi^t(k)]$$

$$\text{和} \quad R_\phi^z(s) = \exp(-s / L_\phi^z) \quad (3)$$

其中 Δt 为取样时间间隔, L_ϕ^t 和 L_ϕ^z 称为 ϕ 的积分时间尺度和在 z 方向的积分尺度。

(3) 式经过简单变化可得:

$$L_\phi^t(k) = -\Delta t \sum_{j=1}^m j / \ln [R_\phi^t(1, k) R_\phi^t(2, k) \cdots R_\phi^t(m, k)] \quad (4)$$

$$L_\phi^z = -\sum_{i=1}^n s_i / \ln [R_\phi^z(s_1) R_\phi^z(s_2) \cdots R_\phi^z(s_n)] \quad (5)$$

图 2 为由 (1) 式计算得到的 R_u^t 和 R_w^t 在 140 米高度上的数值画的图。于是由 (4) 式计算得到 $L_u^t(140 \text{ 米}) = 439.3 \text{ 秒}$, $L_w^t(140 \text{ 米}) = 138 \text{ 秒}$ 。 L_u^t 约为 L_w^t 的 3.2 倍。

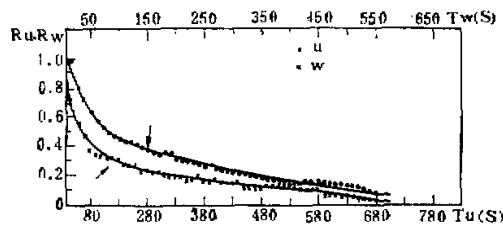


图 2 140 米高度上水平风速 u 和垂直风速 w 时间相关函数 R_u 和 R_w

我们采用 Taylor 冻结一波动假说,可以将一固定点上测量的时间系列变换为同一时间的空间系列。即 $L_{\phi}^z(k) = \bar{U}(k)L_{\phi}^z(k)$ 。因为 $\bar{U}(140 \text{ 米}) = 6.17 \text{ 米/秒}$, 于是我们得到 $L_{\phi}^z(140 \text{ 米}) = 2709 \text{ 米}$, $L_{\omega}^z(140 \text{ 米}) = 851 \text{ 米}$ 。

从(2)式计算得到 $R_{\phi}^z(s)$ 见表 II。从(5)式计算得到 $L_{\phi}^z = 310 \text{ 米}$ 。则 $L_{\phi}^z/L_{\omega}^z \approx 8.7$ 。即 u 分量纵向湍流积分尺度为垂直方向湍流积分尺度的 8.7 倍。这说明, 这种过程涡旋是扁平的, 其水平尺度为几公里量级, 垂直尺度为几百米量级。

表 II 水平风速(u)的垂直相关函数 R_{ϕ}^z

s (米)	0	18	33	48	65	80	112	125	145	165	180	240	265	305
R_{ϕ}^z	1.00	0.91	0.86	0.89	0.79	0.81	0.72	0.69	0.58	0.43	0.48	0.36	0.22	0.10

四、风场的湍流强度

雷雨云期间边界层风场湍流强度及其随高度的分布特征是雷雨云边界层结构的一个重要方面。湍流强度 P_{ϕ} 定义为:

$$P_{\phi} = \sigma_{\phi} / \bar{\phi} \quad (6)$$

其中 $\bar{\phi}$ 和 σ_{ϕ} 的计算方法前面已作说明。下面计算的 σ_{ϕ} 和 P_{ϕ} 是对整个强雷雨过程而言的。

水平速度 u 的标准差 σ_u 和湍流强度 P_u 在不同高度的数值列于表 III。从表 III 看出, 120 米以下, σ_u 和 P_u 都随高度增加而增大; 120 米以上, σ_u 和 P_u 随高度变化情况比较复杂; 表 III 还表明, u 的湍流值约为平均值一半。 v 分量与 u 分量有大致相同的性质。

表 III 水平风速(u)的方差 σ_u 和湍流强度 P_u

高度(米)	15	33	48	80	100	120	140	160	180	200	240	280	320
σ_u (米/秒)	1.24	1.31	2.53	3.23	4.09	5.06	3.93	2.65	2.45	2.59	2.04	4.40	1.90
P_u	0.42	0.41	0.47	0.48	0.79	0.97	0.64	0.41	0.41	0.51	0.42	0.76	0.62

垂直速度的标准差和湍流强度随高度分布列于表 IV。表 IV 表明, σ_w 和 P_w 几乎都随高度增加而增大。 P_w 比 P_u 大得多。这说明垂直速度的湍流强度比水平风速 u 的湍流强度大得多。

表 IV 垂直速度(w)的方差 σ_w 和湍流强度 P_w

高度(米)	48	140	240	320
σ_w (米/秒)	0.579	0.766	1.290	1.210
P_w	2.31	2.39	3.44	6.05

我们利用 48 米高度上 Gill 三分量风速仪测量的 u, v, w 值计算了 $-w'u'$ 和 $-u'v'$ 的标准差 ($\sigma_{-w'u'}, \sigma_{-u'v'}$) 和湍流强度 ($P_{-w'u'}, P_{-u'v'}$)。计算结果为:

$$\sigma_{-w'u'} = 6.70 \text{ 米}^2/\text{秒}^2, \sigma_{-u'v'} = 3.71 \text{ 米}^2/\text{秒}^2,$$

$$P_{-\overline{w'u'}} = \frac{\sigma_{-\overline{w'u'}}}{-\overline{w'u'}} = 2.77, \quad P_{-\overline{w'v'}} = \frac{\sigma_{-\overline{w'v'}}}{-\overline{w'v'}} = 6.08,$$

$$-\overline{w'u'} = 2.42 \text{ 米}^2/\text{秒}^2, \quad -\overline{w'v'} = 0.61 \text{ 米}^2/\text{秒}^2.$$

其中 $-\overline{w'u'}$ 和 $-\overline{w'v'}$ 代表整个强雷雨过程水平风速的两个分量在垂直方向的湍流通量。那么摩擦速度 u_* 可由下式算出:

$$u_* = [(-\overline{w'u'})^2 + (-\overline{w'v'})^2]^{1/2} = 1.58 \text{ 米/秒}$$

从这些数值可以看出, $\sigma_{-\overline{w'u'}}$ 和 $\sigma_{-\overline{w'v'}}$ 要比其平均量大几倍。

对方差和湍流强度的分析表明, 在强雷雨云的边界层中处在高度的湍流状态, 水平风速标准差数值几乎达到其平均值一半, σ_w , $\sigma_{-\overline{w'u'}}$ 和 $\sigma_{-\overline{w'v'}}$ 比其平均值大几倍。

五、强雷雨云边界层谱

雷雨云期间边界层气象要素谱的分析可了解雷雨云各要素场的能量随频率和高度的分布特性。我们计算气象要素功率谱是采用最大熵谱的分析方法^[4], 因为最大熵谱方法有较高的谱分辨能力。这次雷雨过程持续时间为 106 分钟, 水平风速和温差的取样间隔为 20 秒, 垂直速度取样间隔为 5 秒。在做谱计算之前, 我们对使用的资料作了去频和数字滤波^[6]处理, 以提高谱分析的精度。

一维气象要素 ϕ 的功率谱可以表示为:

$$\int_0^\infty n P_\phi(n) d \ln n = \sigma_\phi^2 \quad (7)$$

其中 n 为频率、单位为周/秒, P_ϕ 为气象要素 ϕ 的能量密度, 单位为 $\text{米}^2/\text{秒} \cdot \text{周}$ 。

下面我们的谱曲线将以 $n P_\phi(n) \sim \ln n$ 画图。从 (7) 式看出, 在任意频率间隔 $n \sim n + \Delta n$ 内曲线之下面积就代表在频率范围内所占有的能量, $n P_\phi(n)$ 的峰值位置所对应的频率 n_m 的倒数为涡旋的积分时间尺度。

(1) 水平速度谱

水平速度 u 的功率谱 $n P_u(n)$ 随频率分布如图 3 所示。图中四条曲线分别为 48、140、240 和 320 米高度上 u 的功率谱曲线。图 3 表明, 在 48 米高度上 $n P_u(n)$ 谱线在频率为 4.0×10^{-4} 周/秒时 $n P_u(n)$ 出现峰值。在 140 米高, $n P_u(n)$ 谱线明显地表现为双峰形状, 其中频率较低的峰值位于 4.5×10^{-4} 周/秒, 它与 48 米高度上谱曲线的峰值频率位置很相近; 另一峰值能量比前一个峰值能量更大, 它的位置为 $n = 2.4 \times 10^{-3}$ 周/秒, 其相应的时间尺度为 416.7 秒, 它与第三节中用相关函数方法求出的积分时间尺度为 439.3 秒非常接近。

在 240 和 320 米高度上的谱曲线呈波动状。在低频区, 在上述两个高度上出现峰值能量相对应的频率附近, 240 和 320 米高度上在相应的频率位置也有能量峰值, 但其能量较低。

从整个塔层各高度的能量随频率分布曲线来看, 在频率范围 $4.0 \times 10^{-4} \sim 6.3 \times 10^{-4}$ 周/秒内, 上述 4 个高度都有能量峰值, 随着高度的增加峰值频率向高频方向偏移, 而能量有明显减小的趋势; 当频率在 3×10^{-3} 周/秒— 10^{-2} 周/秒范围内, 能量随着频率 n 的增高

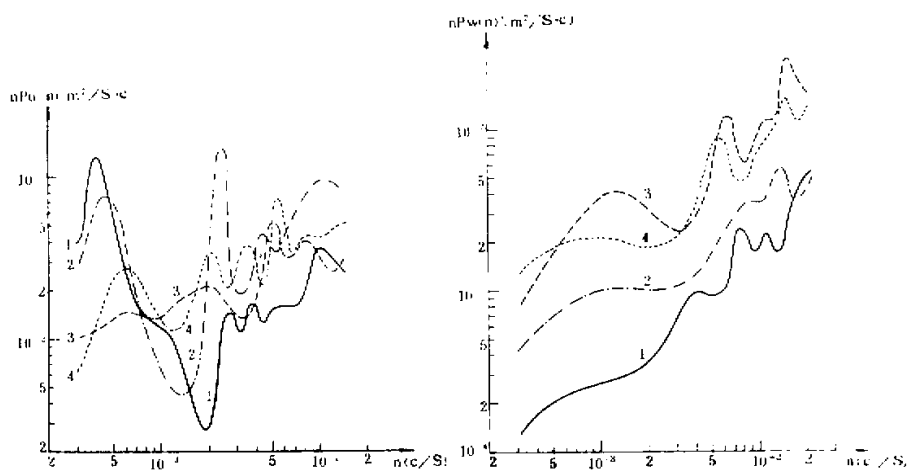


图3 水平风速(u)功率谱 $nP_u(n)$ 随频率 n 的分布。图中“1”, “2”, “3”, “4” 分别表示离地面高度为 48、140、240 和 320 米高度的功率谱曲线

图4 垂直速度(w)功率谱 $nP_w(n)$ 随频率 n 的分布, 图中“1”, “2”, “3”, “4” 含义同图 3

而增大, 并且符合下述规律:

$$nP_u(n) \propto n \quad (8)$$

水平风速 v 分量功率谱曲线(图略)与 u 分量谱非常类似, 在频率范围 $3.8 \times 10^{-4} \sim 4.5 \times 10^{-4}$ 周/秒内, 整个塔层高度内的能谱曲线都出现峰值, 在 240 米以下, 这个峰值能量较大, 而在 320 米, 峰值能量明显减少。在频率在 $2.1 \times 10^{-3} \sim 2.7 \times 10^{-3}$ 周/秒范围内, 整个塔层谱曲线还出现另一个峰值, 但除了在 240 米高度上能量较显著外, 其它各层能量都弱。在谱的高频部分, $nP_v(n)$ 随频率的增加而增加, 并且也符合(8)式规律。

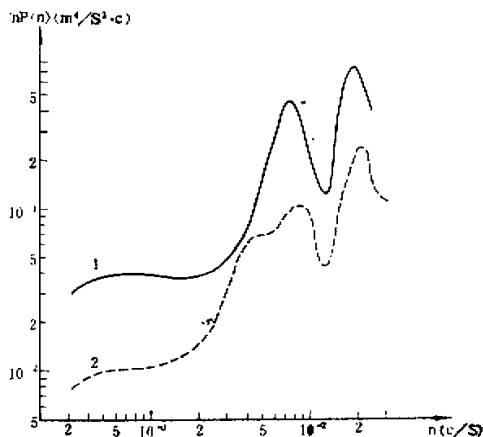


图5 $-w'u'$ 和 $-w'v'$ 的功率谱 $nP_{-w'u'}(n)$ 和 $nP_{-w'v'}(n)$ 随频率 n 的分布。图中“1”和“2”分别表示在 48 米高度的 $-w'u'$ 和 $-w'v'$

(2) 垂直速度谱

48、140、240 和 320 米高度的垂直速度谱曲线见图 4。从图 4 看出,它与水平速度谱曲线的形状是不同的。水平速度谱在频率 n 为 4.3×10^{-4} 周/秒附近为湍流能量峰值区,而在垂直速度谱这个频率附近的能量是非常小的。在水平速度谱,低频能量随高度增高而减小,高频能量随高度增加而增大,但在垂直速度谱,整条谱曲线的能量均随高度增加而增大。而且在我们计算的整个谱段内,垂直速度谱的能量是随频率的增高而增大的,并且也符合与 n 成正比的规律。

(3) $(-w'u')$ 和 $(-w'v')$ 谱

图 5 为在 48 米高度上的 $-w'u'$ 和 $-w'v'$ 功率谱曲线。这两条谱曲线的形状非常相似。谱值在高频段比在低频段大一个量级。在高频段,谱值都表现为双峰形状,其峰值位置约位于 7.5×10^{-3} 周/秒和 2.0×10^{-2} 周/秒。在整个频率范围内 $-w'u'$ 谱值均大于 $-w'v'$ 的谱值。

六、讨 论

从前面对强雷雨云的边界层小尺度结构、湍流强度和谱的分析,我们得到下面一些看法:这个强雷雨云低层流出气流出现了三次浪涌过程,并在其前方形成雷暴飑锋,这与数值模拟的结果^[4]相一致。这种浪涌过程可以在边界层内形成复杂的涡旋运动。由于地面的阻挡作用和复杂的垂直结构,这种涡旋往往具有扁平的特点。从上述分析看出,涡旋的水平尺度可比垂直尺度大一个量级。从风速的能谱分析看出,在同样的频率范围内,水平风速的能量比垂直风速的能量高一个量级。这种涡旋在边界层内存在的高度也可以是不同的,从水平风速能谱曲线(见图 3)的特征可以发现,这次强雷雨过程中在边界层的下部几十米高度上和 140 米到 240 米高度上存在着涡旋中心,前者周期约为 40 分钟,随着高度增大,其能量迅速减小,后者的周期约为 7 分钟,在中心高度之上和之下,能量明显地减少。由于涡旋具有扁平的性质,所以在垂直风速能谱中反应不出上述特征。但垂直速度随高度和随时间具有比较复杂的变化规律,可能与这些涡旋的存在有关。

由于浪涌过程形成的飑锋,和地面的摩擦作用,往往使低层大气形成很强的切变。这种强切变和涡旋涡动使得边界层处在强烈的湍流运动状态,并造成动量和其它物理量的垂直输送。这种湍流垂直输送将反馈于强雷雨云的发展过程。

参 考 文 献

- [1] 朱翠娟等, 强雷雨云中密度流边界层结构分析, (尚未发表)
- [2] Goff, R. C., Vertical Structure of thunderstorm outflow. *Mon. Wea. Rev.* (104), pp. 1429—1440, 1976.
- [3] Simpson, J. E., Effects of the lower boundary on the head of a gravity current. *J. Fluid Mechanics* (53) pp. 759—768, 1972.
- [4] Teske, M. E. and Lewellen, W. S. Turbulent transport model of a thunderstorm gust front, Tenth conference on severe local storms, pp. 143—150.
- [5] 曹鸿兴、罗乔林; 气象历史系列的最大熵谱分析. 科学通报, (8), pp. 351—355, 1979.
- [6] Pesaresi, R., Numerical filtering techniques for the time-series analysis of oceanographic and meteorological data, AID 723864, Technical Memorandum, No. 166, 1971.

THE FINE STRUCTURE AND SPECTRA OF STRONG THUNDERCLOUD IN THE ATMOSPHERIC BOUNDARY LAYER

Ye Zhuojia Zhu Cuiguan Li Xingsheng Zhou Mingyu

(Institute of Atmospheric Physics, Academia Sinica)

Abstract

Using the data of 325 m meteorological tower in Beijing, the fine structure and characteristics of turbulence and spectra of the density current of thunderclouds during the thundercloud passage are analysed.

勘 误 表

对本刊 6 卷 4 期作下列勘误:

页	行(或式)	误	正
424	(2.8) 式右端第一项	$-f_1 \Delta \phi_1$	$f_1 \Delta \phi_1$
425	(3.1) 式左端	$\left(\sigma \Delta f^1 \frac{\partial^2}{\partial \rho^2} \right) \omega$	$\left(\sigma \Delta + f^1 \frac{\partial^2}{\partial \rho^2} \right) \omega$
426	(3.7)(3.8)(3.10) 式中	π^{12}	π_{*}^{12}