

声回波团块结构的温湿脉动特征

陈炎涓 李诗明

(中国科学院大气物理研究所)

提 要

本文分析了北京地区暖湿时期的声回波团块结构与温湿脉动量的关系,得到下面三点初步结果: 1. 温湿脉动联合作用结果的声折射率脉动方差($\overline{n^2}$)随时间的起伏变化与声回波强度随时间变化的团块结构形态非常相似。2. 从声回波团块结构的传真图片类型特征来看是属于潮湿型的,其湿空气稳定度层结(考虑水汽通量作用)是接近中性层结。3. 在有团块回波时期的声折射率脉动(n)谱值比无团块回波时期的 n 谱值要大10倍。

一、引 言

周明煜等^[1]发现边界层大气中存在团块结构,并分析了出现团块结构的气象条件和团块结构的重要意义,但由于受当时观测资料的限制,未能对团块结构与温湿湍流量的关系作更深入的分析。为此,我们于1980年8月中、下旬在北京气象塔地区,同时进行声雷达回波强度传真图片记录和在气象塔80米、140米高度上进行温湿脉动记录。此外,还有气象塔系统的地面和塔上平均场的气象资料作配合观测。

二、声回波团块结构出现的气象条件(温湿层结)

在这一节里,我们主要分析、介绍出现声回波团块结构时的宏观天气现象和声回波强度传真图片的宏观结构类型,然后从这些宏观类型现象中,综合分析了有团块回波层的局地稳定度问题。图1是1980年8月24日21时45分至25日00时23分的声回波强度传真图片。从图1可以清楚看到一块一块黑白分明的黑色团块回波,团块回波的形态和它的统计特征与文献[1]类似。当时宏观天气现象是阴天,处于暖区天气系统中,云量是四,云状为高层云,无低云,近地层相对湿度为60—70%,风速较小约2米/秒左右,水平风速垂直切变很小,风向在垂直方向变化较大,有明显分层现象,在63米和180米两个高度上是南南西风向,其他各层均是东北风向,温度层结稳定,但并无逆温存在。我们从声回波强度传真图片上可以看出,在文献[1]的图1—2中,团块回波层以下存在回波强度密集的强稳定层回波结构型,团块回波层中声回波强度是稀稀拉拉的几个团块回波讯号,其他广大空间回波讯号强度均为较小的弱讯号区。从本文图1中,22:30—23:00这

段时间里,在 60 米以上除局部有团块回波,强度较强外,其他地方回波强度都较弱,就其低层而言,回波强度讯号的稀拉宏观形态结构与文献 [2] 中夜晚潮湿型边界层声回波结构相似。从团块回波层宏观整体而言,回波强度不算大,这又与平均大气层结为近中性的声回波强度情况相类似。

为了进一步认识出现团块回波的大气平均情况,我们对出现团块层的局地稳定度作了计算,下面我们先简单叙述一下湿空气情况下的大气稳定度标准,然后再作计算和讨论。如前所述,团块回波具有潮湿型特征,因此它的稳定度层结条件可以按照未饱和湿空气稳定度来处理,关于未饱和湿空气稳定度的表示方法已有各种形式^[3-5],但总的一条是要考虑水汽的作用,在利用质点法考虑空气垂直稳定度时,通常是按阿基米德定律,考虑单位容积空气所受到的浮力 $f = g\rho - g\rho'$, ρ' 是气块空气的密度, ρ 是周围空气的密度,浮力对单位质量气块引起的加速度为:

$$\frac{d^2z}{dt^2} = \frac{g(\rho - \rho')}{\rho'}, \quad (1)$$

利用准静力学条件 $p' = p$, 由湿空气状态方程可得 $\rho'/\rho = T_v/T_v'$, T_v 、 T_v' 分别是四周空气虚温 and 个别气块的虚温,那么代入(1)式得

$$\frac{d^2z}{dt^2} = \frac{T_v' - T_v}{T_v}, \quad (1')$$

式中

$$T_v = T(1 + 0.6s), \quad s = 0.622 \frac{e}{p};$$

$$T_v' = T'(1 + 0.6s'), \quad s' = 0.622 \frac{e'}{p'}.$$

当气块上下运动时,气块内部水汽量不变,即 s' 为常数,所以 $\frac{dT_v'}{dz} = (1 + 0.6s') \frac{dT'}{dz} = -\gamma_s(1 + 0.6s') \simeq -\gamma_s$, 而环境水汽一般随高度分布不是常数,则 $\frac{\partial T_v}{\partial z} = (1 + 0.6s) \cdot \frac{\partial T}{\partial z} + 0.6T \frac{\partial s}{\partial z} = -\gamma(1 + 0.6s) + 0.6T \frac{\partial s}{\partial z} \simeq -\gamma + 0.6T \frac{\partial s}{\partial z}$, 所以有 $T_v' = (T_v')_0 - \gamma_s z$; $T_v = (T_v)_0 - \gamma z + 0.6T \frac{\partial s}{\partial z} z$, 将 T_v' 和 T_v 代入上式,并假定在 $z = 0$ 高度处,空气是静止不动的,即 $(T_v')_0 = (T_v)_0$, 并定义 $\frac{\partial T_v}{\partial z} = -\gamma_v$, 由 γ_v 定义可得, $\gamma_v = \gamma - 0.6T \frac{\partial s}{\partial z}$, γ_v 是表示考虑了温度和湿度直减率后的综合层结量,亦即 γ 经湿度垂直分布订正后的量,因此有 $T_v = (T_v)_0 - \gamma_v z$, 所以有

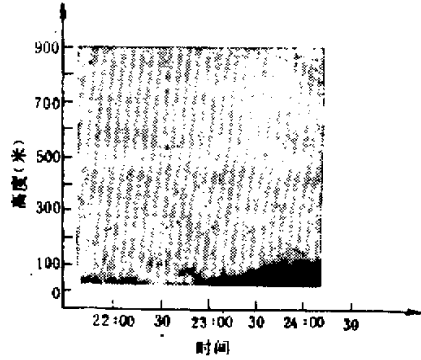


图1 声回波强度传真图片

$$\begin{aligned}\frac{d^2z}{dt^2} &= g \frac{T'_v - T_v}{T_v} = \frac{[(T'_v)_0 - \gamma_a z] - [(T_v)_0 - \gamma_v z]}{T_v} g \\ &= \frac{\gamma_v - \gamma_a}{T_v} g z.\end{aligned}\quad (2)$$

通常所说湿空气(未饱和)的稳定度是指个别气块所受力的运动状态,即当垂直运动气块具有正的加速度时,则大气是不稳定的,当垂直运动气块获得负加速度时,则大气是稳定的,当垂直运动气块加速度为零时,则大气是中性的,于是从(2)式可得湿空气稳定度判据为

$$\left. \begin{aligned}\text{当 } \gamma_v > \gamma_a \text{ 时, 则 } \frac{d^2z}{dt^2} > 0 \text{ 为不稳定大气,} \\ \text{当 } \gamma_v = \gamma_a \text{ 时, 则 } \frac{d^2z}{dt^2} = 0 \text{ 为中性大气,} \\ \text{当 } \gamma_v < \gamma_a \text{ 时, 则 } \frac{d^2z}{dt^2} < 0 \text{ 为稳定大气,}\end{aligned}\right\} \quad (3)$$

在考虑未饱和湿空气的稳定度条件时,要看四周空气 T_v 的直减率(γ_v)与干绝热直减率(γ_a)的相对大小来决定其稳定度,因 $\gamma_v = \gamma - 0.6T \frac{\partial s}{\partial z}$, 如果 s 随高度不变,则 $\frac{\partial s}{\partial z} = 0$, 有 $\gamma_v = \gamma$, 这时未饱和湿空气稳定度的判据与干空气完全相同。在通常大气中, $\frac{\partial s}{\partial z} \approx 0$, 而是 $\frac{\partial s}{\partial z} < 0$ 的,尤其在出现逆温时 $\frac{\partial s}{\partial z}$ 负数值更大,因 $\frac{\partial s}{\partial z} < 0$, 所以 $\gamma_v > \gamma$, 大气稳定时, $\gamma_v < \gamma_a$, 即要使 $\gamma - 0.6T \frac{\partial s}{\partial z} < \gamma_a$, 如果 $-0.6T \frac{\partial s}{\partial z}$ 为较大正值时,就是要 γ 为很小值($\gamma < 0$)才能使上式成立,这时就要出现逆温才能使大气稳定,所以考虑 $-0.6T \frac{\partial s}{\partial z}$ 的影响在某些地方的某些时段有很大实用意义,当 $-0.6T \frac{\partial s}{\partial z}$ 为正值,但正的不大时, γ 可以大于等于零。总的来说由于 $-0.6T \frac{\partial s}{\partial z}$ 的正值作用将使大气稳定度趋向更不稳定一些,相当于干空气温度直减率 γ 增大 $-0.6T \frac{\partial s}{\partial z}$ 值,同样与干绝热直减率 γ_a 相比,温度直减率增大即不稳定度增大,所以湿空气(未饱和) γ_v 的不稳定度比 γ 的不稳定度大,其数值为 $-0.6T \frac{\partial s}{\partial z}$ 。

下面我们分析计算一下声回波团块比较集中出现时段附近(1980年8月24日, 22:00—23:30), 出现团块回波层次上63—140米之间平均温度层结(γ)和虚温层结(γ_v)随时间的变化,并将计算结果绘于图2,图中符号空心圆圈表示 γ 值,符号黑实点表示 γ_v 值,从图2明显可见,对温度层结而言 $\gamma < \gamma_a$ 是稳定的,对湿空气真实层结判据虚温层结 γ_v 来说,在中间约一个小时内 $\gamma_v \approx \gamma_a$, 这时在这层次里湿空气为近中性层结。在这种近中性层结下传真图上声回波团块出现的可能性怎样呢?

从大气脉动湍流能量的观点来看,在近中性层结时,团块回波出现的可能性当温度层结 γ 与一定条件下水汽层结 $-0.6T \frac{\partial s}{\partial z}$ 的结合合适使 $\gamma_v \approx \gamma_a$, 从整体上说是近中性

层结,但由于在近中性时有少数空气块水汽脉动与温度脉动存在正相关,从而分别引起的水汽层结脉动与温度层结脉动亦存在正相关作用,因此这部分这种脉动量的叠加将形成较大的层结脉动量,从而获得较大层结脉动的湍流能量与平均状态的湍能有较明显的差别。在近中性附近的声回波强度是与层结脉动平方成正比的,因此就可获得与平均状态有较明显差别的回波强度,即可比较容易地获得团块回波。从团块回波结构图可以看出,团块回波上下移动比较缓慢或垂直移动位移很小,这种中性附近层结只需较小幅度脉动就可获得强度差别明显的团块回波,这种脉动量较小的,浮力也较小,造成上下运动的加速度也小,因此团块回波上下运动是缓慢的,符合我们观测到的团块运动的真实情况。如果层结(γ_e)脉动较大,那么在3—4次连续回波构成的团块回波,前后几次回波的高度位置应该反映出位移差别,然而这种团块回波的高度差异并不明显,这表明团块回波的绝对强度并不太大。

传真图片中团块回波情况以黑白分明的黑块来表示,团块带中的环境空间呈淡白色,这表示背景地带回波强度较弱。然而,粗略地看,声回波强度与虚位温梯度的平方成正比,而声回波强度与照射在相纸图片上绿影灯光强度成正比,但光强与图片上的黑度在光强合适的范围内,黑度(线性刻度)才与光强的对数尺度成线性关系。传真相纸上的回波图片黑度(线性部分)可表示成

$$B = \alpha \left(\log \frac{H}{H_i} \right), \quad (4)$$

式中 α 是传真相纸的反差系数, H_i 是与相纸材料有关的常数称惰延量, H 是绿影灯光强照射到该点相纸的曝光量,它正比于后向散射能量(即声回波强度),因此黑度值的大小与声回波强度对数成正比,即 B 的等差级与 H 的等比级相对应。可见要改变一个等差黑度值,则在不同 H 值下, H 的相对比值是相同的,但是改变 ΔH 的绝对值是不同的,在 H 低值端要求的 ΔH 绝对值小,而 H 高值端则要求 ΔH 值大。这就是说, H 在低值端只需改变 ΔH 较小量它们的黑度值就可分辨,而 H 在高值端,则要改变 ΔH 较大值时才能分辨。而 H 值大体上正比于 $\left(\frac{dT}{dz} \right)^2$,则黑度分辨率与 $\frac{dT}{dz}$ 的关系大体上可表示为 $\Delta B \propto \frac{2\Delta \frac{dT}{dz}}{dT/dz}$, $\Delta \frac{dT}{dz}$ 是温度脉动引起的温度层结脉动。如果对不同温度层结下的温度层结脉动是相同的,则黑度的分辨能力 $\frac{dT}{dz}$ 为小值时的分辨能力要大于 $\frac{dT}{dz}$ 大值时的分辨能力,这就是说在同样的温度梯度脉动量情况下,对平均的 $\frac{dT}{dz}$ 值小时,则黑度分辨能力大(黑度差别

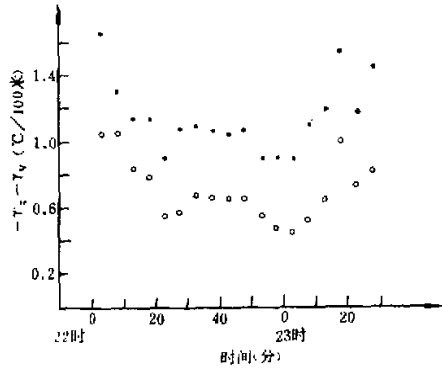


图2 r 和 r_e 随时间变化图
(1980年8月24日22:00—23:30)

大),而对平均的 $\frac{dT}{dx}$ 值大时,则黑度差别小,不容易分辨(分辨能力差).因此在传真图片上的团块回波在近中性时比较容易出现,其他层结条件时就不容易出现团块回波现象.

三、声回波团块结构的温湿特性

从声的散射能量观点来看,单点声雷达后向散射的回波强度与声折射指数的结构系数 (C_s^2) 成正比, C_s^2 与声折射指数脉动功率谱 S_n 成正比,而声折射指数脉动方差又与 S_n 成正比.因此,声回波强度的大小起伏也正比于声折射指数脉动方差 $\overline{n^2}$ 的起伏, $\overline{n^2}$ 值的大小与温度脉动量和湿度脉动量有关,下面我们先将温度脉动和湿度脉动观测资料,按 $\overline{n^2}$ 与温湿脉动量的关系式,计算出 $\overline{n^2}$ 值随时间的起伏变化,然后再与声回波团块结构的传真图片进行比较.

根据 Wesely^[6] 的推导,声折射指数脉动的方差 $\overline{n^2}$ 可写成

$$\overline{n^2} = \frac{\overline{T'^2}}{4\bar{T}^2} + \frac{2D}{4\bar{P}\bar{T}} \overline{T'Q'} + \frac{D^2}{4\bar{P}^2} \overline{Q'^2}. \quad (5)$$

式中 T' 是温度脉动, Q' 是水汽脉动, $\bar{T}$ 和 $\bar{P}$ 分别是平均温度和平均气压, $\overline{T'^2}$ 、 $\overline{Q'^2}$ 和 $\overline{T'Q'}$ 分别是温度方差、水汽方差和温度脉动与水汽脉动相关方差.具体计算 $\overline{n^2}$ 和 $\overline{n^2}$ 随时间变化的方法是将温度脉动和湿度脉动原始资料,按时间先后顺序排列进行读数,每隔一秒钟读一个数,每平移 5 秒钟取 20 个数为一组,按顺序先分别算出各组(每组为 20 个数)中 $\overline{T'^2}$ 、 $\overline{Q'^2}$ 和 $\overline{T'Q'}$ 的值,下标 i 是表示组数顺序号,然后再按(5)式计算出 $\overline{n_i^2}$ 值.我们按上述方法计算了 1980 年 8 月 24 日 22:42—23:25 时段范围内 140 米高度上 $\overline{n^2}$ 随时间的起伏变化,计算结果绘于图 3(图中将 $\overline{n^2} \leq 5 \cdot 10^{-10}$ 的值都点在 $5 \cdot 10^{-10}$ 上).图中

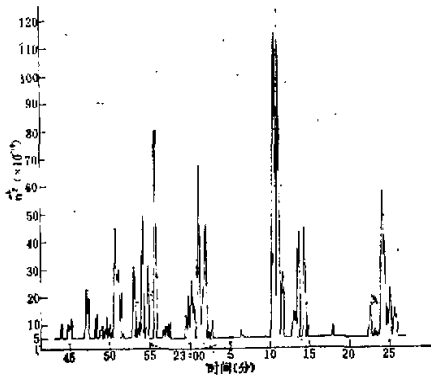


图 3 $\overline{n^2}$ 随时间变化

(1980 年 8 月 24 日 22:42—23:25)

1 中声回波强度图片(在 140 米高度附近)上的团块回波随时间的变化形式非常相似,在 $\overline{n^2}$ 出现很大值的分布时间,与团块回波出现时的分布时间大体上比较接近,它们两者在整

每个数据所占空间尺度约 50 米(在所计算时段内,平均风速为 2.5 米/秒,时间为 20 秒),这与我们声雷达探测在 140 米高度横向声束尺度为 20 多米(半功率点声束张角为 8 度)相比,前者约为后者的两倍.于是,我们从 50 米空间得到的 $\overline{n_i^2}$ 的起伏量将比实际声束尺度(140 米高度)20 多米的 $\overline{n^2}$ 量的变化幅度要略小一些(这是因为前者平均尺度比后者大,前者 30—50 米尺度的变化量被平滑掉了).每间隔 5 秒钟为一组(20 个数)计算一个数据,这相当于声雷达探测每 5.6 秒发射一次讯号,接收一个数据.将图 3 与图 1 加以比较可以看出,图 3 的 $\overline{n^2}$ 随时间的起伏变化形式与图

体绝对时间上有些差异, 这可能反映了 $\bar{n}^2$ 值在直接测量温度、湿度脉动处与声回波探测处两地空间分布的不均匀性。除这种可能反映空间不均匀性的时间有些差别外, $\bar{n}^2$ 值的时间相对分布与声雷达回波强度团块的相对时间分布是比较吻合的, 这就是说声回波强度的团块结构现象, 是反映低层大气在一定温湿层结条件下, 温湿脉动联合作用的结果, 是一种反映温湿脉动不均匀的特征现象。为了了解在相似气象背景条件下, 有无团块回波的湍流能谱情况, 我们还计算了有团块和无团块时温湿联合作用的湍流能谱。

四、声回波团块结构的温湿能谱

温度、湿度联合作用声折射指数的功率谱同样可按 Wesely^[6] 的结果表示为

$$S_n = S_T + \frac{2D\bar{T}}{\bar{P}} C_{OQT} + \frac{\bar{T}^2 D^2}{\bar{P}^2} S_Q, \quad (6)$$

式中 $S_n = 4\bar{T}^2 \phi_n$, ϕ_n 是声折射指数功率谱, S_T 和 S_Q 分别是温度和水汽脉动功率谱, C_{OQT} 是温湿脉动协谱, $D = 0.318$ 。

我们分别将有团块回波时期和无团块回波时期的温湿脉动资料(140米), 分别代入(6)式, 用 FFT 方法计算出有团块回波时期的 S_n 谱和无团块回波时期的 S_n 谱, 计算结果见图 4。图中黑点符号表示 1980 年 8 月 24 日 22:48—25:58 有团块时期的 S_n 谱, 用圆圈表示 1980 年 8 月 24 日 23:02—23:10 无团块回波时期的 S_n 谱, 从图 4 S_n 谱值的比较可见, 在惯性区间尺度内, 有团块回波时期 S_n 的谱值要比无团块回波时期大 3—4 倍, 为了更符合声回波团块结构的实际情况, 均换算成空间谱, 将相同空间尺度的谱值进行比较(22:48—22:58 时段 140 米上的平均风速为 2.14 米/秒, 在 23:02—23:10 时期 140 米上的平均风速为 4.14 米/秒), 则在惯性区间内, 有团块回波时 S_n 谱值比无团块时要大 10 倍。从图 4 还可看出, 在有团块回波 S_n 谱存在三个峰值, 峰值的尺度位置分别在 500 米、140 米和 15 米处, 无团块回波时的 S_n 谱无明显峰值存在。在 500、140、15 米三个尺度附近有团块时的谱值与无团块回波时相比, 前者约为后者的 30 倍。有团块回波时这种峰尺度在图 3 中也有反映, 在图 3 中 $\bar{n}^2$ 的峰值时间尺度约在 4 分钟和 1 分钟; 若平均风速按 2.2 米/秒估算, 那么图 3 中 4 分钟和 1 分钟左右的 $\bar{n}^2$ 大值起伏变化是与图 4 中 500 米和 140 米的峰值尺度相当的, 在图 4 中 15 米左右的峰值尺度, 在图 3 中 $\bar{n}^2$ 的数值被用 20 秒钟的统计光滑了, 所以看不见这样小的尺度变化了。

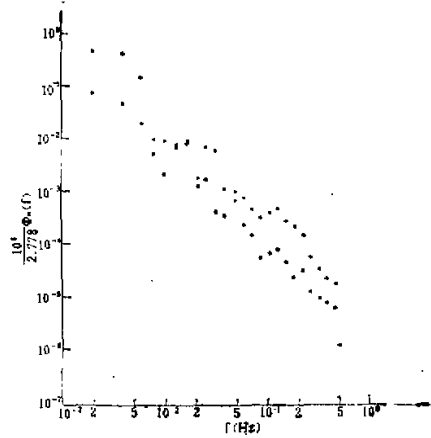


图 4 声折射指数脉动功率频谱

参 考 文 献

- [1] 周明煜等, 大气边界层中湍流场的团块结构, 中国科学, 第5期, 614—622, 1981.
- [2] Russell, P. B. and Uthe, E. E., Sodar Network measurements of regional mixing depth and stability patterns for an air quality model/11, Joint Conference on Applications of Air Pollution Meteorology, American Meteorological Society, November 29, p. 72—79, December 2, 1977. Salt Lake City, Utah.
- [3] Zilitinkevich, S. S., Effects of humidity stratification on hydrostatic stability, IZU. ANSSR, Atmos. and Ocean. phys., 655—658, 1966.
- [4] Fritz Herbert, Walter-Georg Panhans, Theoretical studies of the parameterization of the non-neutral surface boundary layer, B. L. M., Vol. 16, No. 2, p. 155—168, 1979.
- [5] Zamora, R. J., Richardson number Computations in the planetary boundary layer, studies of nocturnal stable layers at BAO, BAO report 4, NOAA/ERL, Wave Propagation Laboratory, January 1983, Boulder, Colorado, p. 109—129.
- [6] Wesely, M. L., The combined effect of temperature and humidity fluctuations on refractive index, J. Appl. Meteor., Vol. 15, p. 43—49, 1976.

THE TEMPERATURE-MOISTURE FLUCTUATION CHARACTER OF SOUND LUMP ECHOES

Chen Yanjuan Li Shiming

(Institute of Atmospheric Physics, Academia Sinica)

Abstract

In the paper, the sound lump echoes associated with temperature-moisture fluctuation from warm moist period in Beijing area have been analysed. It is found that, (1) the variation of sound refractive index fluctuation variances ($\overline{n^2}$) with time is very analogous to that of morphology of sound lump echoes with time, (2) the sound lump echoes always appear in the vicinity of neutral stratification of moist air, (3) the spectrum value of the sound refractive index fluctuation in the presence of the sound lump echoes is ten times greater than that in the absence of lump echoes.