

北京暖湿季节温湿脉动某些特征

陈炎涓 李诗明

(中国科学院大气物理研究所)

提 要

本文利用温度脉动和湿度脉动仪的观测资料,结合气象塔平均气象资料和天气条件,对北京暖湿季节的温湿湍流特征进行初步分析,结果指出:雷雨期间大气边界层里,在惯性区内,温度脉动功率谱的斜率接近负二次幂;稳定天气时,温度脉动功率谱的斜率随风速减小而变陡,当平均风速小于 1m/s 时,谱的斜率接近负二次幂。

湿度与水汽脉动相关系数,在雷雨与锋前暖区天气为正相关,随频率增大而减小;在晴天夜晚稳定天气时,低频段为负值,高频段为弱的正相关。在暖湿稳定天气条件时,水汽脉动对声折射率脉动的百分贡献比其它天气条件时大。

一、引 言

大气温度和水汽脉动对声、光、电传输与大气环境科学均有重要作用,因此近年来国外对大气温度和水汽脉动的测量和研究已有不少工作^[1-3],但过去的许多工作中,基本上都是在水面或干燥陆面上进行,国内在这方面的工作还很少,尤其在潮湿陆面上则更少。暖湿陆面是大气传输和环境科学的重要空间,为了研究暖湿陆面上空的温湿湍流情况及其对大气传输和环境问题的影响,我们于1980年8月(暖湿雨季)在北京气象塔上进行了温度、湿度脉动量的测量,本文是介绍这次观测资料初步分析的一些结果。

二、仪器与资料整理和计算

温度脉动是用安徽光机所研制的温度脉动仪测量,其分辨率为 0.003°C , 频率响应范围为 10^{-2} — 10^4Hz , 湿度脉动是用美国测量有限公司制造的 HMP-14UT 相对湿度仪测量,相对湿度脉动分辨率为 0.5% 左右,频率响应在 2Hz 以下,水汽脉动量是将相对湿度进行温度订正后,再换算成水汽压脉动量,根据实验标定,相对湿度仪的线性度较好。温度和湿度脉动仪安装在北京气象塔 80 和 140m 高度上,温度与湿度脉动仪两感应头的水平距离为 70cm。

在暖湿空气里,如果不考虑气压的变化,根据 Wesely^[4] 的推导,声折射率与温度、水汽变化量的关系可表示成

$$m = -(\theta + qTD/P)/(2T) \quad (1)$$

$$\overline{m^2} = \frac{1}{4T^2} \left[\overline{\theta^2} + \left(\frac{DT}{P} \right)^2 \overline{q^2} + \frac{2DT}{P} \overline{\theta q} \right] \quad (2)$$

式中 $\overline{m^2}$, $\overline{\theta^2}$, $\overline{q^2}$, $\overline{\theta q}$ 分别是声折射率、温度、水汽的方差和温度与水汽的协方差, T 和 P 分别是平均绝对温度和气压, $D = 0.318$ 。上述方差和协方差又可表示成

$$\begin{aligned} \overline{X^2} &= \int_0^\infty \phi_X(K) dK, \\ \overline{\theta q} &= \int_0^\infty \phi_{\theta q}(K) dK \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $X = \theta, q$ 分别是温度和水汽脉动量, $\phi_\theta(K)$, $\phi_q(K)$, $\phi_{\theta q}(K)$ 分别是温度、水汽脉动功率谱和温度—水汽脉动关联谱。

$\phi_X(K)$ 和 $\phi_{\theta q}(K)$ 的计算是用 FFT (快速富氏变换) 方法, Δt (时间间隔) 有两种是 1s 和 0.4s, 由于谱的高频部分要受温度频响的限制, 而低频又受湿度频响的影响, 频响范围在 $10^{-2} \sim 10^0 \text{ Hz}$ 较好, 故本文主要是对这一频段进行分析, 在 320m 气象塔上, 还有温差、风向、风速等平均场气象资料。

三、暖湿条件下温湿湍流特征

1. 温度脉动谱 雷雨天气和晴天夜里稳定天气时的温度脉动谱见图 1, 图中横坐标是 $\frac{fz}{u}$, f 是频率, $f = \frac{cK}{2\pi}$, K 是波数, c 是速度。由图可见, 雷雨天气时期的温度脉动谱有如下特点, 温度脉动谱的无因次频率为 1.0 处出现谷值, 而在 1.5—2.0 时出现峰值, 对这次雷雨天气过程平均风速为 14m/s, 则这时峰值位置的波长相当于 70—100m, 无因次频率在 2 以上的高频部分, 谱值与频率关系接近负二次幂的规律。在夜晚稳定天气时温度脉动谱的特点是, 无因次频率大于 1.0 的高频斜率遵循负三分之五次幂的关系。由图 1 两种不同天气条件下的谱值比较可见, 在相同频率下, 雷雨天气时的湍流能量将比晴天夜里稳定天气大一个数量级以上。

下面我们再来看一下稳定小风条件时温度脉动谱的情况, 在平均风速很小时, 泰勒假说的凝固湍流应用时就碰到困难, 当平均风速接近零时, 在对流情况下 Гурвич^[6] 按因次分析的方法, 推导出温度和风速脉动谱在惯性区内谱的公式为

$$\phi_\theta(f) = cNf^{-2} \quad (4)$$

$$\phi_u(f) = c'sf^{-5/3} \quad (5)$$

式中 N 和 s 分别为温度不均匀平滑率和湍流能量耗散率, c 和 c' 为常数, 并且在强对流下, 由室内实验

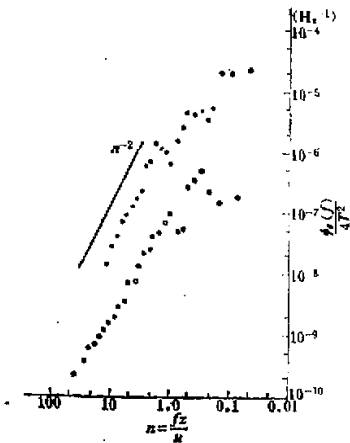


图 1 雷雨和晴天夜里温度脉动谱 (140m)

●雷雨天气(1980年8月15日15时三次平均) ○晴天夜里(1980年8月17日三次平均)

验证了谱的斜率为负二次幂,然而在野外条件下不易观测到,反而在稳定小风时可以观测到负二次幂的谱型,我们观测到的资料如图 2 所示是平均风速小于 1m/s 下温度脉动谱。

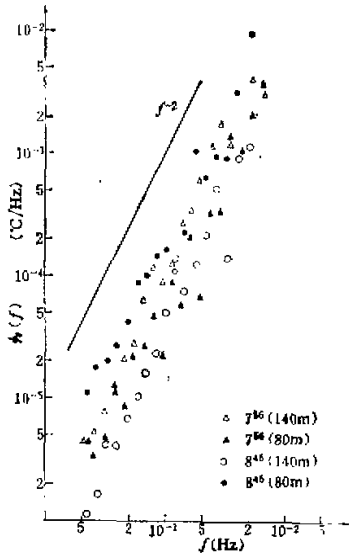


图 2 暖湿稳定小风时的温度脉动谱
 ▲ 1980 年 8 月 22 日 7 时 56 分 (140m); ▲ 1980 年 8 月 22 日 7 时 56 分 (80m); ○ 1980 年 8 月 22 日 8 时 45 分 (140m); ● 1980 年 8 月 22 日 8 时 45 分 (80m)

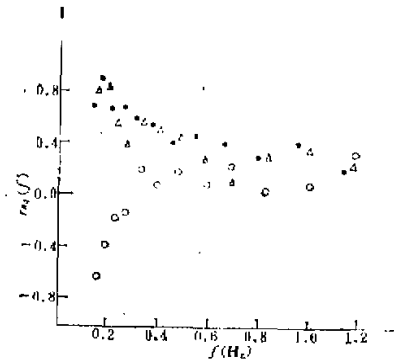


图 3 温度-水汽脉动相关谱
 ● 雷雨; ▲ 锋前暖区; ○ 夜里稳定

我们认为在暖湿、稳定小风条件下近负二次幂的谱是客观存在的,关于它出现的准确条件和机理是间歇性原因还是别的原因均有待于进一步研究。

2. 温度脉动与水汽脉动的相关 一般相关系数可用谱函数表示:

$$r_{\theta q}(f) = \frac{\phi_{\theta q}(f)}{(\phi_{\theta}(f) \cdot \phi_q(f))^{1/2}} \quad (6)$$

式中 $r_{\theta q}(f)$ 是温度-水汽脉动相关系数, $\phi_{\theta}(f)$, $\phi_q(f)$ 和 $\phi_{\theta q}(f)$ 分别是温度、水汽脉动频率谱和温度-水汽脉动关联谱,按照(6)式我们可用计算的谱函数值对在不同频率下的温度-水汽相关系数进行计算,其结果见图 3,在雷雨和锋前暖区天气时,温度-水汽脉动相关系数在所计算的频段内都是正的,在低频相关性好,相关系数大,随频率增大而减小;对夜里稳定天气时,在低频段相关系数为负值,随频率增大而负的相关系数值逐渐减小,当频率大于 0.3Hz 时,相关系数逐渐转为正值,并与频率无明显关系,在 0.1—0.2 之间波动,总的来说在高频段相关系数均较小,上述结果表明在低频时相关性好,高频段水汽-温度脉动相关性较差。我们认为造成这种结果的可能原因,是由于稳定层结时正温度脉动常同时伴随负的水汽脉动(因从上面下来的较暖气块其温度较小),而不稳定层结时正温度脉动常同时伴随着正温度脉动(从下面来的暖气块常是较湿的),并且这种平均场的相关性对低频段联系较为密切,则相关性好,到高频段,由于随机性增大,则相关性差。

我们将雷雨天气和夜晚稳定天气的温度、水汽脉动功率谱和它们的协谱,分别通过

(2), (3) 关系式, 用有限频率积分的方差来表示进行计算, 频率积分限从 0.128 到 1.165 Hz, 将它们方差相对贡献的计算结果列于表 1。

表 1 温度、水汽方差、温度-水汽协方差对声折射率方差的百分贡献 (140m)

天气类型	$\overline{m^2} = \frac{1}{4T^2} \overline{\theta^2} + \frac{2D}{4TP} \overline{\theta q} + \frac{D^2}{4P^2} \overline{q^2}$
雷雨天气(三次平均)	100=87.70+11.18+1.11
夜里稳定天气(二次平均)	100=67.21+10.82+21.98

从上表可以看出, 温度脉动方差项对声折射率脉动方差的贡献总是占主要的, 雷雨和晴天夜里稳定天气时的温度-水汽脉动相关项对声折射率方差的贡献约占 10%, 而水汽脉动方差项对声折射率方差的贡献在夜里稳定天气可达 22%。这种暖湿稳定层结时, 水汽脉动方差项对声折射率有较大贡献的原因, 可能是暖湿稳定时温度层结使得温度、水汽脉动方差值都较小, 而由稳定的温度层结, 可以形成明显的水汽梯度, 由于这种水汽层结的存在, 可以增大一部分水汽脉动量, 这种由于温度层结和水汽层结两部分所造成的水汽脉动方差, 对声折射率脉动方差的相对贡献可能会大些。

参 考 文 献

- [1] Friche, C. A., Larue, J. C., Champagne, F. H., Gibson, C. H. and Dreyer, G. F., 1975, Effects of temperature and humidity fluctuations on the optical refractive index in the marine boundary layer. *J. Opt. Soc. Amer.*, 65, 12, 1502—1511.
- [2] Wesely, M. L., 1976, Combined effect of temperature and humidity fluctuations on refractive index, *J. Appl. Meteor.*, 15, 1, 43—49.
- [3] Fairall, C. W., Schacher, G. E. and Davidson, K. L., 1980, Measurements of the humidity structure function parameters C_θ and $C_{\theta q}$ Over the Ocean, *Boundary-Layer Meteor.*, 19, 1, 81—92.
- [4] Mcbean, G. A. and Elliott, J. A., 1981, Pressure and humidity effects on optical refractive-index fluctuations, *Boundary-Layer Meteor.*, 20, 1, 101—109.
- [5] Hill, R. J., 1978, Spectra of fluctuation in refractivity, temperature, humidity and the temperature-humidity Cospectrum in the inertial and dissipative ranges. *Radio Sci.*, 13, 6, 953—961.
- [6] Гурвич, А. С., Юрченко, Б. Н., 1980, "Частотные спектры пульсаций температуры при турбулентной конвекции. *ИЗВ. АН. СССР. ФАО.*, 16, 8, 854—857.