

# 合肥地区大气湍流随高度分布日变化特性分析

孙 刚, 翁宁泉, 肖黎明

( 中国科学院安徽光学精密机械研究所大气光学中心, 安徽 合肥 230031 )

**摘 要:** 大气折射率结构常数  $C_n^2$  是表示大气光学湍流强度的重要参数。利用 QHTP-2 型温度脉动探空仪对  $C_n^2$  进行了实地探测, 通过对大量探空实验数据的统计分析得出了合肥地区 0~35 km 高度  $C_n^2$  分布廓线和日变化特性, 对合肥地区的大气湍流结构特性有了比较清晰的认识, 研究结果为进一步进行湍流特征和大气性质的遥感探测及实际激光工程应用提供了有意义的参考。

**关键词:** 大气湍流; 大气折射率结构常数; 廓线; 日变化

中图分类号: O357.5; P427

文献标识码: A

文献编号: 1673-6141(2007)02-0094-05

## Daily Variation Analysis of Atmospheric Turbulence Profile in Hefei

SUN Gang, WENG Ning-quan, XIAO Li-ming

(Center of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**Abstract:** Research of light-transfer in atmosphere is actually investigation of atmospheric refractive index variation caused by atmospheric turbulence. The atmospheric structure constant of refractive index  $C_n^2$  is an important parameter of atmospheric turbulence intensity.  $C_n^2$  was measured using QHTP-2 micro-thermal meter. The vertical profile of  $C_n^2$  and daily variation were investigated by analysis of experimental data in Hefei with 0~35 km height range, and structure characteristics of atmospheric turbulence were given. Results are significant to further turbulence characteristics research, remote sensing of atmosphere characteristics and laser engineering applications.

**Key words:** atmospheric turbulence; atmospheric structure constant of refractive index; variance profile; daily variation

## 1 引 言

地球大气无时无刻不处于湍流运动状态, 大气结构及其物理参数经历着空间与时间各种尺度上的随机变化。这种变化引起了大气中能量、动量与物质成份等新的输送过程, 称之为湍流输送, 其输送

速率比分子热运动引起的输送要大几个数量级。其次, 大气湍流对水的相变、冰晶的增长与破碎, 以及对声波、电磁波与光波等在大气中的传播都有极为重要的影响。尤其是随着现代非线性动力学的进展, 大气湍流在各种时空尺度大气过程的突变及其可预报性中可能扮演着重要的角色。因此, 大气湍

收稿日期: 2006-05-24; 修改日期: 2006-08-28

基金项目: 国家高技术 863 计划激光技术领域资助课题 (200212)

E-mail: [gsun@aiofm.ac.cn](mailto:gsun@aiofm.ac.cn)

流研究在大气科学中的地位与意义日益突出。

在讨论光波传播中的大气湍流效应时, 主要是关心小尺度湍流运动, 这通常满足 Kolmogorov 局地均匀各向同性的假定。Kolmogorov 引入结构函数来研究局地均匀各向同性湍流的统计结构, 同时用量纲分析的方法证明: 在湍流惯性区内两点间的结构常数只与两点间距离的  $2/3$  次方有关, 与两点的位置和相对方向无关, 这就是著名的“ $2/3$ ”定律。Kolmogorov 的理论是在速度起伏的基础上推导的, 但在小尺度的情况下温度起伏或折射率起伏同样可以认为满足局地均匀各向同性的假定和结构函数的“ $2/3$ ”定律<sup>[1]</sup>, 具体情况表示如下

$$D_n(r) = \langle [n(r_1 + r) - n(r_1)]^2 \rangle = C_n^2 r^{2/3}, \quad (1)$$

$$D_T(r) = \langle [T(r_1 + r) - T(r_1)]^2 \rangle = C_T^2 r^{2/3}. \quad (2)$$

其中  $D_n(r)$  和  $D_T(r)$  分别是折射率和温度的结构函数,  $C_n^2$  和  $C_T^2$  分别是折射率和温度的结构常数。对于局地均匀各向同性湍流, 通常用结构常数可以表示湍流的强度, 大气折射率结构常数  $C_n^2$  是表示大气光学湍流强度的重要参数, 国内外很多人对  $C_n^2$  进行了观测和研究<sup>[2-3]</sup>。

在光波和电磁波波段, 折射率  $n$  可以表述为温度  $T$ 、气压  $P$  的函数

$$n - 1 = 79 \frac{P}{T} \times 10^{-6}, \quad (3)$$

在光波和无线电波段湿度变化的影响比较小, 可以不考虑。按照研究微小起伏时常用的小扰动法分别把折射率  $n$ 、温度  $T$  和气压  $P$  分解为平均项和起伏项:  $n = \bar{n} + n'$ ,  $T = \bar{T} + T'$ ,  $P = \bar{P} + P'$ , 代入 (3) 式, 得到折射率起伏项的表达式<sup>[4]</sup>

$$n' = 79 \left( \frac{P'}{\bar{P}} - \frac{T'}{\bar{T}} \right) \times 10^{-6}, \quad (4)$$

在实际大气中一般有  $\frac{P'}{\bar{P}} \ll \frac{T'}{\bar{T}}$ , 因此研究折射率的起伏主要是研究温度起伏的影响, 其他参数如气压、湿度等起伏的影响可以忽略<sup>[5]</sup>, 表示为

$$n' = -79 \frac{\bar{P}}{\bar{T}^2} T' \times 10^{-6}, \quad (5)$$

$$C_n^2 = \left( 79 \frac{\bar{P}}{\bar{T}^2} \right)^2 C_T^2 \times 10^{-12}. \quad (6)$$

这就是  $C_n^2$  直接测量的依据和方法<sup>[6]</sup>。

## 2 实验测量

大气温度结构常数  $C_T^2$  的测量采用了安徽光机

所研制的 QHTP-2 型温度脉动探空仪<sup>[7]</sup>, 它装在气象用的 120 号气球上, 气球的上升速度为 5 m/s。探测器使用两个相距 1 m、长 2.4 cm、直径 10  $\mu\text{m}$  的铂丝电阻, 测量两点的温差  $T_1 - T_2$ , 相应频率范围是 0.05~30 Hz, 系统噪声 0.002 K。信号用调频方式调制, 在 400 MHz 的载波上由发射机发射到地面, 由 GTK-400 探空接收机接收, 解调后由计算机串行口直接采集, 每秒钟采集 100 次, 采样 2.5 s。测量得到两点的温度脉动差值, 平均后得到大气温度结构常数  $C_T^{2[8]}$

$$C_T^2 = \frac{(T_1 - T_2)^2}{r^{2/3}}. \quad (7)$$

QHTP-2 型温度脉动探空仪同时装有温度传感器和气压传感器, 可以实时得到仪器所在高度的温度值和气压值, 由压高公式可以准确得到仪器实时的飞行高度。由 (6) 和 (7) 式可以计算出不同高度的大气折射率结构常数  $C_n^2$ 。2005 年 1~12 月, 在合肥地区共施放了近 240 份探空, 利用探空气球携带自行研制的 QHTP-2 型高灵敏度温度脉动探空仪测量、大气温度和气压, 探空气球施放地点位于合肥市西郊董铺水库中间的半岛上。气球的探测高度一般在 20 km 以上, 其中很多接近 35 km 高度, 一般选择在晴朗的天气, 在 8:00~22:00 连续施放。每天施放的探空个数平均为 5 次, 根据实际天气状况有所变化。

通过对上述大量探空实验数据的统计分析得出了合肥地区  $C_n^2$  随高度分布的平均廓线, 并以此为基础对合肥地区  $C_n^2$  随高度的日变化特征进行了研究。

## 3 实验结果和分析讨论

### 3.1 合肥地区 $C_n^2$ 分布廓线

大气湍流强度随高度的分布是相当复杂的, 受到地球复杂表面和各种天气条件影响的大气边界层(白天一般在 1~2 km 高度),  $C_n^2$  主要受到地面热辐射引起的不稳定对流的影响。在自由大气中,  $C_n^2$  主要受到温度梯度和风速梯度的综合作用。

图 1 是在合肥地区用 QHTP-2 型高灵敏度温度脉动探空仪实测的  $C_n^2$  随高度分布的平均廓线。测量时间从 2005 年 1~12 月, 测量高度为 0~30 km 左右, 数据按白天和夜间进行分类, 为了更细致地了解  $C_n^2$  随高度的变化规律, 从 0~2 km 每 50 m 为

一层进行平均，2 km 以上以 200 m 为一层进行平均。从两图中可以看出，一般低层的  $C_n^2$  比高层的大， $C_n^2$  随高度增加有逐渐减小的趋势。地面  $C_n^2$  一般在  $10^{-15} \sim 10^{-14} \text{m}^{-2/3}$  左右，随着高度的上升， $C_n^2$  迅速减小，在 1~1.5 km 减小趋缓，并有小量的增大趋势，白天  $C_n^2$  约在 2 km 处有所增大，夜间  $C_n^2$  约在 1.7 km 处有所增大，由于此高度范围内正好存在覆盖逆温层<sup>[9]</sup>，对  $C_n^2$  的变化趋势会有所影响。从 3 km 开始  $C_n^2$  随高度增加逐渐递减趋于稳定，伴有小量起伏波动，白天在  $10^{-17} \text{m}^{-2/3}$  左右，夜间在  $10^{-18} \text{m}^{-2/3}$  左右。白天  $C_n^2$  减小的趋势较缓和，夜间减小幅度较大，在 20 km 处已降至  $10^{-19} \text{m}^{-2/3}$  左右；而白天  $C_n^2$  在 20 km 之下一直维持在  $10^{-17} \text{m}^{-2/3}$  左右，在此期间  $C_n^2$  同样有不同程

度的起伏波动，夜间的波动幅度较大。从廓线整体来看，白天的湍流比夜间的湍流要大 1~2 个量级左右，这些现象都说明合肥地区  $C_n^2$  随高度变化的昼夜差别。

由于  $C_n^2$  在不同时间和不同季节随高度的变化都是不相同的，因此研究它在不同季节随高度的变化规律也是非常必要的。图 2 是合肥地区不同季节  $C_n^2$  随高度分布的平均廓线。数据按春、夏、秋、冬进行分类，在高度上同样分别用 50 m 和 200 m 为一层进行平均。从图中可以看出，不同季节  $C_n^2$  随高度的分布是有差别的，整体来看它在四个季节变化趋势大体相同，即低层的  $C_n^2$  比高层的大，随高度的增加有逐渐减小的趋势，但各自的变化特点却不尽相同。地面  $C_n^2$  一般在  $10^{-15} \sim 10^{-14} \text{m}^{-2/3}$  左

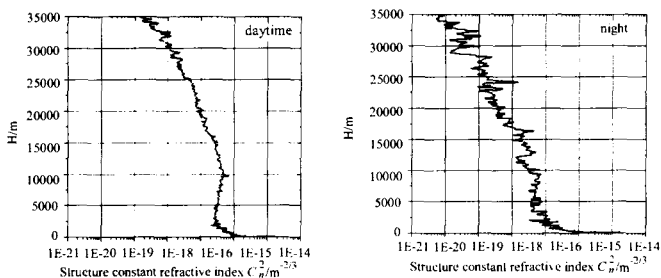


图 1 合肥地区昼夜  $C_n^2$  平均廓线

Fig.1 Average profiles of  $C_n^2$  in Hefei region

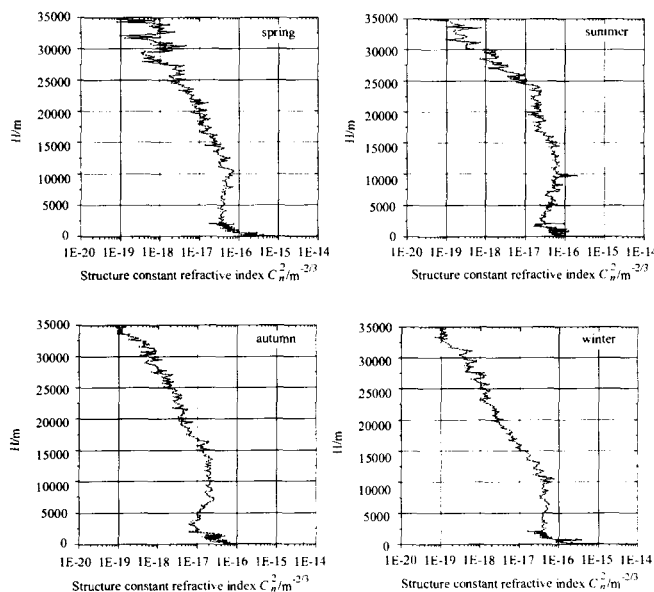


图 2 合肥地区四季  $C_n^2$  平均廓线

Fig.2 Average profiles of  $C_n^2$  in Hefei region in different seasons

右, 随着高度上升而迅速减小。四个季节  $C_n^2$  随高度的变化各不相同, 其中春、秋两季的变化趋势大体一致, 在 15 km 以下基本维持在  $10^{-17}m^{-2/3}$  左右, 从 15 km 以上减小趋势逐渐增大; 夏季  $C_n^2$  的变化略有不同, 25 km 以下保持在  $10^{-17}m^{-2/3}$  左右, 从 25 km 开始迅速减小; 在 30 km 以上, 三个季节的  $C_n^2$  均减小到  $10^{-19}m^{-2/3}$  左右。这表明在局部高度区间不同季节的大气湍流强度是基本一致的, 四季的  $C_n^2$  整体都是缓慢递减的, 在此期间均有不同程度的波动。由于不同季节天气条件的限制, 各个季节的探测高度均有不同。

由以上的分析可以得出, 合肥地区  $C_n^2$  分布廓线在不同时间和不同季节随高度的变化都是不相同的, 具有明显的成层结构, 在整个高度上会不规则地出现湍流较强和较弱的层次。这种成层结构在  $C_n^2$  的观测中普遍存在。

### 3.2 合肥地区 $C_n^2$ 日变化特性分析

为了更加细致地研究合肥地区  $C_n^2$  的日变化规律, 对大量的探空数据进行分时段分析处理, 即根据探空施放的时间, 把探空数据资料根据一天不同时间段进行分类, 再对不同时间段内的数据进行分

层平均处理, 从而更加清晰地研究  $C_n^2$  在一天中不同时间随高度变化的规律。

图 3 是合肥地区不同季节  $C_n^2$  在一天中不同时间段随高度分布的平均廓线, 数据同样按春、夏、秋、冬进行分类, 每个季节内的探空数据又按照施放时间进行不同时间段的分类, 在高度上根据精度的要求分别用 50 m 和 200 m 为一层作平均。从图中可以比较清楚地  $C_n^2$  在不同时间段随高度的变化不同。四个季节  $C_n^2$  的日变化曲线从整体来看都是随高度的增加逐渐减小, 但各自的变化特点却不尽相同。大气湍流强度大体上都是早晚弱、中午强, 其中春、夏、冬三个季节  $C_n^2$  在不同时间段随高度变化差异较大, 只是在局部高度区间有重叠, 在此期间均有不同程度的波动。也就是说这三个季节中大气湍流在一天中随高度的变化是有较大差异的。从秋季  $C_n^2$  的日变化平均廓线可以看出, 不同时间段的廓线基本重叠, 随高度的变化趋势基本相同, 这说明合肥地区秋季大气湍流日变化差异不大, 一天中不同时刻的大气湍流强度比较接近, 尤其在 15 km 以下不同时间段的湍流强度基本维持在  $10^{-17}m^{-2/3}$  左右。

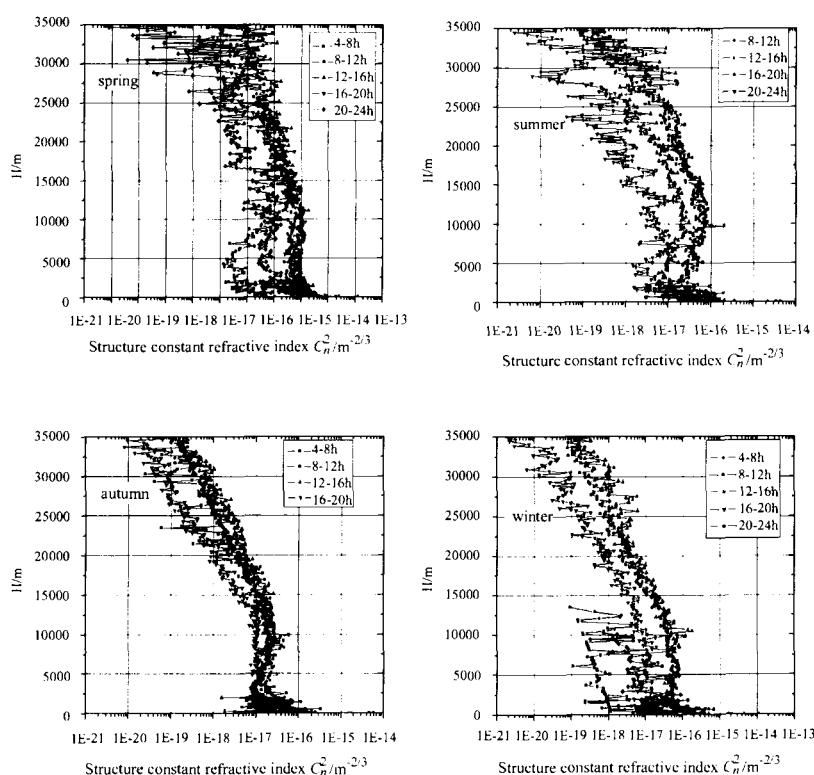


图 3 合肥地区四季  $C_n^2$  日变化平均廓线

Fig.3 Daily variation profiles of  $C_n^2$  in Hefei region in different seasons

## 4 结 论

通过以上分析研究, 可以得出以下结论:

1) 合肥地区的  $C_n^2$  分布廓线存在明显的昼夜和季节变化: 从廓线整体来看合肥地区白天的湍流比夜间的湍流均大 1~2 个量级左右, 不同季节分布廓线也存在差异;

2)  $C_n^2$  在随高度减小的起伏上叠加了随机的起伏, 有些层次会出现强湍流或者强湍流团。这些强湍流的层次在不同时间不同地点的探空实验中会出现在不同的高度, 这也表明  $C_n^2$  在时空分布上的不均匀性;

3)  $C_n^2$  随高度的变化不是一个缓变函数, 具有鲜明的跳跃式结构。湍流强度总体来说是随高度减弱的, 在十几公里的对流层顶处  $C_n^2$  的数值稍有增大。  $C_n^2$  随高度分布具有明显的成层结构, 在整个高度上会不规则地出现湍流较强和较弱的层次;

4) 合肥地区  $C_n^2$  在相同季节的不同时间段随高度的变化都是不相同的, 具有明显的日变化特征, 在一天中的不同时间段随高度的变化是不相同的, 一般是早晚弱、中午强, 这种日变化在  $C_n^2$  的观测中普遍存在, 这都是由于湍流在时间和空间上的间歇性引起的, 反映出  $C_n^2$  是一个随时间和高度变化的复杂的大气参量。

由于释放探空成本较高, 探空资料数量有限, 因此本文分析得出的合肥地区  $C_n^2$  垂直分布廓线和统计模式还需在今后的探测中进一步验证。

### 参考文献:

- [1] Song Zhengfang. *Applied Atmospheric Optics* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1990, 67-70(in Chinese).  
宋正方. 应用大气光学基础 [M]. 北京: 气象出版社, 1990: 67-70.
- [2] Robert R, Beland. Propagation through atmospheric optical turbulence [C]. *SPIE, Optical Engineering Press*, 1993.
- [3] Barletti R, Cepatelli G. Mean vertical profile of atmospheric turbulence relevant for astronomical seeing [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1976, **66**(12): 127-128.
- [4] Zhou Xiuji, Tao shanchang, Yao Keya. *Atmospheric Physics* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1991: 252-346(in Chinese).  
周秀骥, 陶善昌, 姚克亚. 高等大气物理学 [M]. 北京: 气象出版社, 1991: 252-346.
- [5] Weng Ningquan, Zeng Zongyong, Xiao Liming, et al. Study of average time and source data differentiation in measuring atmospheric optical turbulence [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(9): 1101-1105(in Chinese).  
翁宁泉, 曾宗泳, 肖黎明, 等. 大气光学湍流测量中平均时间和原始数据的筛选 [J]. 强激光与粒子束, 2004, **16**(9): 1101-1105.
- [6] Yuan Renmin, Zeng Zongyong, Xiao Liming, et al. Comparison of some methods of measuring refractive index structure [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000: 755-756(in Chinese).  
袁仁民, 曾宗泳, 肖黎明, 等. 不同方法测量折射率结构常数的比较 [J]. 光学学报, 2000: 755-756.
- [7] Xiao Liming, Weng Ningquan, Ma Chengsheng, et al. Experimental research on the reliability of sonde and its data processing method [J]. *Journal of Hefei University of Technology*, 2004, **27**(2): 179-182(in Chinese).  
肖黎明, 翁宁泉, 马成胜, 等.  $C_n^2$  探空仪的可靠性实验与数据处理方法 [J], 合肥工业大学学报, 2004, **27**(2): 179-182.
- [8] Sun Gang, Weng Ningquan, Xiao Liming, et al. Profile and character of atmospheric temperature [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(5): 592-596(in Chinese).  
孙刚, 翁宁泉, 肖黎明, 等. 大气温度分布特性及对折射率结构常数的影响 [J]. 光学学报, 2004, **24**(5): 592-596.
- [9] Yuan Renmin, Ma Chengsheng, Fan Aiyuan. Discussion on capping inversion [C], *Anhui Weather*, 2003: 27-31(in Chinese).  
袁仁民, 马成胜, 范爱媛. 混合层顶覆盖逆温层变化规律研究 [C]. 安徽气象, 第二届苏皖两省大气探测、环境遥感与电子技术学术研讨会论文集专辑, 2003: 27-31.