

文章编号: 1001-4322(2005)04-0485-06

不同地区大气折射率结构常数分布特性及分析^{*}

孙 刚, 翁宁泉, 肖黎明, 马成胜

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

摘 要: 大气湍流对光波传播的影响主要是由于大气随机起伏的湍流引起折射率的随机起伏,破坏了光波的相干性。研究传输问题就是研究湍流所造成的折射率随机变化的规律。主要利用 HTP-2 型温度脉动探空仪对大气折射率结构常数进行了实地探测及计算分析。通过对大量探空实验数据的统计分析,分别得出了合肥地区和北方干旱地区(0~30 km)大气折射率结构常数在不同季节的白天和夜间的分布廓线和分布特性,对合肥地区和北方干旱地区的大气湍流结构特性有了比较清晰的认识,为大气光学传输工程的应用和理论计算提供了参考。

关键词: 应用光学; 大气湍流; 大气折射率结构常数; 分布特性

中图分类号: O437

文献标识码: A

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,它称之为湍流输送^[1],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上对大气过程的突变及其可预报性可能扮演着重要的角色。因此,大气湍流研究在大气科学中的地位与意义日益突出。

在讨论光波和电磁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得出,在湍流惯性区内两点间的结构常数只与两点间的距离的 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湍流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^[2]。可表示为

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

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

式中: $D_n(r)$ 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的湍流,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一个重要参数。国内外很多人对 C_n^2 进行了观测和研究^[3,4]。

在光波和电磁波段,折射率 n 可以表述为温度 T (单位:K)、气压 p (单位:hPa)的函数

$$n - 1 = 79(p/T) \times 10^{-6} \quad (3)$$

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 $n = \bar{n} + n'$, $T = \bar{T} + T'$, $p = \bar{p} + p'$ 并代入(3)式,可以容易地得到折射率起伏项的表达式^[5]为

$$n' = 79(p'/\bar{p} - T'/\bar{T})(p/\bar{T}) \times 10^{-6} \quad (4)$$

在实际大气中一般有 $p'/\bar{p} \ll T'/\bar{T}$,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^[6],因此, n 和 C_n 可表示为

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

$$C_n^2 = (79p/\bar{T}^2)^2 C_T^2 \times 10^{-12} \quad (6)$$

* 收稿日期:2004-09-01; 修订日期:2004-12-13

基金项目:国家 863 计划项目资助课题

作者简介:孙 刚(1977-),男,硕士研究生,主要从事激光大气传输的研究,安徽合肥 1125 信箱二室;E-mail:sungang0988@sina.com.cn.

这就是折射率结构常数直接测量的依据和方法^[7]。

1 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 HTP—2 型温度脉动探空仪,它装在气象用的 120 号气球上,气球的上升速度为 400 m/min。探测器使用两个相距 1 m 的长度为 2.4 cm、直径 10 μm 的铂丝电阻,测量两点的温度差 $T_1 - T_2$,频率相应范围是 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,经气象探空接收机,再解调后由计算机串行口直接采集,每秒钟采集 100 次,采样 6 s。测量得到两点的温度脉动差值^[8],再将它平均就得到大气温度结构常数 C_T^2

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

同时采用了气象中常用的气球称重方法估算了气球升速,这样由气球上升的时间就可以估算出气球的高度,再由平均的温度廓线模式得到气球所在高度的温度值,此温度值为估算值,由压高公式可以得到气球所在高度的气压。由(6)和(7)式就可以计算出大气折射率结构常数 C_n^2 。由公式(6)也可以得出,即使所估算的温度有 10 $^\circ\text{C}$ 的误差,所带来的折射率常数误差也不会超过 20%,不会有量级的误差,气压的误差及所带来的相对误差会更小。因此,用平均的温度廓线计算出的 C_n^2 基本可以满足精度的要求,这种根据模式给出的平均温度计算得到的折射率结构常数 C_n^2 是可信的^[9]。

从 2002 年 5 月到 2003 年 4 月,在合肥地区共获取了近 40 份探空气球测量 C_n^2 的资料,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。气球最大的探测高度一般在 20 km 以上,其中很多接近 30 km 的高度。施放的天气条件一般选择在晴朗的天气,施放的时间一般在下午 3 时和同一天的晚上 8 时左右。

由于合肥地处由亚热带向暖温带过渡的湿润气候地区^[10],季风气候明显,常年湿润多雨、气候温和,温度梯度和风速梯度变化不大,为了对不同地区、不同气候条件的大气折射率结构常数 C_n^2 的分布有一个比较清晰的了解,我们选取了北方干旱地区的探空资料作为比较,从 2001 年 4 月到 2002 年 3 月近一年在北方干旱地区共得到 44 份探空资料,气球探测高度一般在 25 km 以上,其中很多接近 35 km 的高度。施放的天气条件一般选择在晴朗的天气,探空施放时间一般在中午 12 时和同一天晚上 10 时至次日凌晨。

通过对上述大量探空实验数据的统计分析分别得出了合肥地区和北方干旱地区(0~30 km) C_n^2 随高度变化的分布廓线和分布特性。

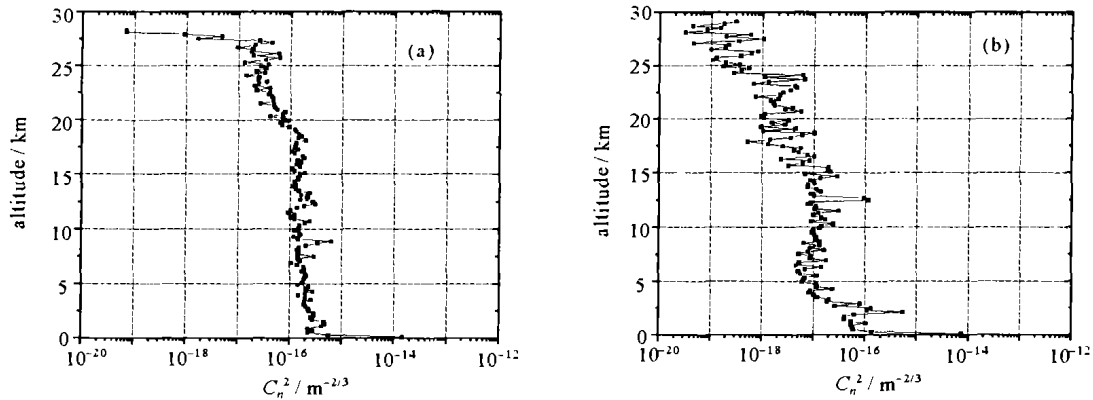
2 实验结果和分析讨论

2.1 合肥地区大气折射率结构常数 C_n^2 分布廓线

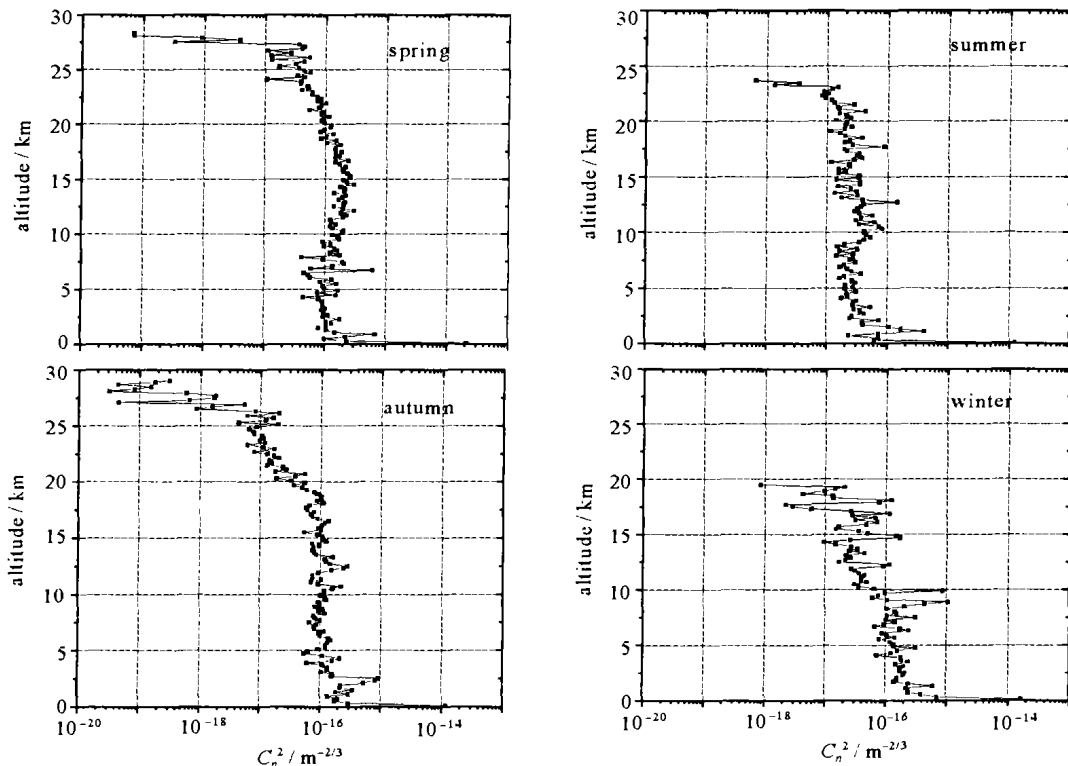
大气湍流强度随高度的分布是相当复杂的,在受到地球复杂表面和各种天气条件影响的大气边界层(白天一般在 1~2 km 高度),大气折射率结构常数 C_n^2 主要受到地面热辐射引起的不稳定对流的影响。在自由大气中,大气折射率结构常数 C_n^2 主要受到温度梯度和风速梯度的综合作用。

图 1 是在合肥地区用 HTP—2 型温度脉动探空仪实测的 C_n^2 随高度分布的平均廓线。测量时间是从 2002 年 5 月到 2003 年 4 月,测量高度为 0~30 km,数据按白天和夜间进行分类,在高度上用 200 m 为一层作平均。图(a)和图(b)分别是合肥地区白天和夜间的 C_n^2 随高度分布的平均廓线,从两图中可以看出,一般低层的 C_n^2 比高层的大, C_n^2 随着高度的增加有逐渐减小的趋势。地面的 C_n^2 一般在 $10^{-14} \sim 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$,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,白天的 C_n^2 大约在 1.5 km 处有所增大,夜间的 C_n^2 大约在 2 km 处有所增大。在此高度范围内正好存在覆盖逆温层^[11],对 C_n^2 的变化趋势有所影响。从 3 km 开始 C_n^2 随着高度的增加趋于稳定,并伴有小量的起伏波动,白天在 $10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$ 左右,夜间在 $10^{-17} \text{ m}^{-2/3}$ 左右。在 18km 左右的高度 C_n^2 均出现较明显的减小现象,并随着高度的增加 C_n^2 减小的趋势也逐渐增大,夜间 C_n^2 减小幅度较大,在 24 km 处已降至 $10^{-19} \text{ m}^{-2/3}$ 左右;而白天的 C_n^2 在 27 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。从廓线的整体来看白天的湍流比夜间的湍流要大 1~2 个量级,这些现象说明了合肥地区 C_n^2 随高度变化的昼夜差别。

图 2 是在合肥地区不同季节的 C_n^2 随高度分布的平均廓线。数据分别按春、夏、秋、冬不同季节进行分类,在高度上用 200 m 为一层作平均。从图 2 中可以看出,不同季节 C_n^2 随高度的分布是有差别的。四个季节 C_n^2 廓线从整体来看变化趋势大体相同,即低层的 C_n^2 比高层的大, C_n^2 随高度的增加有逐渐减小的趋势,但各自的

Fig. 1 Average profile of C_n^2 for Hefei district图 1 合肥地区大气折射率结构常数 C_n^2 平均廓线

变化特点却不尽相同。地面的 C_n^2 一般在 $10^{-15} \sim 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$, 随着高度的上升, C_n^2 迅速减小, 各个季节减小的量级也各不相同。夏季的 C_n^2 减小量较大, 从地面开始随着高度的增加, C_n^2 由 $10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 迅速减小到 $10^{-17} \text{ m}^{-2/3}$ 左右, 减小达 3 个数量级, 这主要是由于夏季地表温度较高, 随高度增加大气温度迅速减小, 这对 C_n^2 的变化有很大影响; 而春、秋、冬三个季节的 C_n^2 减小量级大致相同, 并且随着高度的增加, C_n^2 的变化趋势也大体相同。从 20 km 开始四个季节的 C_n^2 随高度的变化趋于复杂、各不相同, 只是在局部高度区间有重叠, 但整体都是缓慢递减的, 在此期间均有不同程度的波动, 其中冬季 C_n^2 变化波动最为剧烈。

Fig. 2 Average profile of C_n^2 for four seasons of Hefei district图 2 合肥地区四季 C_n^2 平均廓线

由于不同季节天气条件的限制, 春、秋两季的 C_n^2 探测高度较高, 达到 30 km 左右; 夏、冬两季的 C_n^2 探测高度相对较低, 分别为 25 km 左右和 20 km 左右, 这主要是由于夏、冬两季合肥地区的季风运动较强烈, 对温度脉动探空的信号有一定的影响。从图中不难看出, 春、秋两季的 C_n^2 从 25 km 开始随高度的增加明显减小, 减小量较大, 达到 3 个数量级左右。由以上的分析可以得出, 合肥地区大气折射率结构常数 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。从图中不难看出 C_n^2 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的层和湍流较弱的层次。这种成层结构在 C_n^2 的观测中普遍存在, 这是由于湍流在时间和空间上的间歇性引起的, 它也反映出 C_n^2 是一个随时间和高度变化的复杂的大气参量。

2.2 北方干旱地区大气折射率结构常数 C_n^2 分布廓线

北方干旱地区常年干旱少雨、气候干燥,温度梯度和风速梯度变化较大。

图 3 是在北方干旱地区用 HTP-2 型温度脉动探空仪实测的 C_n^2 随高度分布的平均廓线。测量时间是从 2001 年 4 月到 2002 年 3 月,测量高度为 0~35 km,数据同样按白天和夜间进行分类,在高度上用 200 m 为一层作平均。从两图中可以看出 C_n^2 随高度变化的整体趋势,地面的 C_n^2 一般在 $10^{-13} \sim 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$,随着高度的升高逐渐减小,在 2 km 左右减小趋缓,并有小量的增大趋势。白天的 C_n^2 大约在 2 km 处有所增大,夜间的 C_n^2 大约在 2.5 km 处有所增大,夜间增加的量较大,在此高度范围同样也存在覆盖逆温层对 C_n^2 变化趋势的影响。从 3 km 开始一直到 14 km,白天的 C_n^2 稳定在 $10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ 左右。夜间的 C_n^2 保持缓慢减小的趋势,在 18 km 左右的高度 C_n^2 还出现较明显的增大现象,并随着高度的增加 C_n^2 继续减小,夜间 C_n^2 减小幅度较大,在 24 km 处已降至 $10^{-19} \text{ m}^{-2/3}$ 左右;而白天的 C_n^2 在同一高度只减小至 $10^{-17} \text{ m}^{-2/3}$ 左右,在此期间 C_n^2 同样有小量的波动,夜间的波动幅度较大。从廓线的整体来看白天的湍流比夜间的湍流同样要大 1~2 个量级。这些现象都说明北方干旱地区的 C_n^2 随高度变化的昼夜差别。同合肥地区昼夜 C_n^2 比较可以得出:在对流层,北方干旱地区昼夜 C_n^2 均比合肥地区的 C_n^2 大一个量级左右。

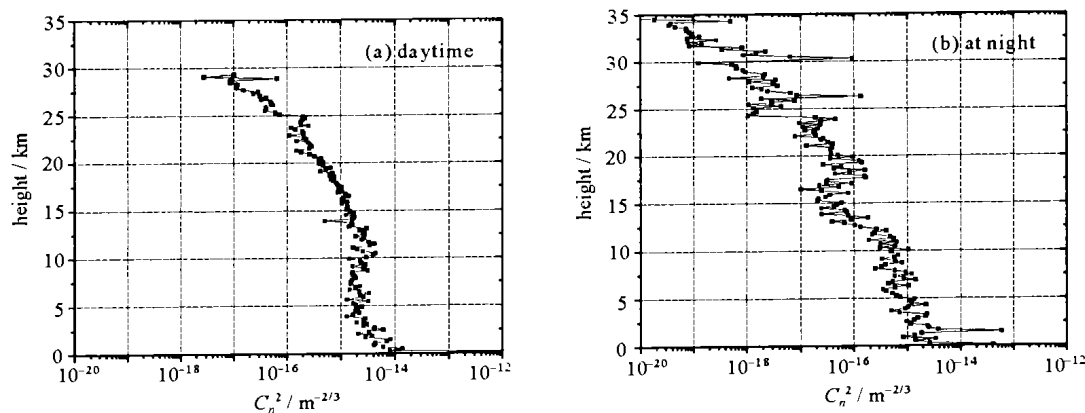


Fig. 3 Average Profile of C_n^2

图 3 北方地区大气折射率结构常数 C_n^2 平均廓线

图 4 是在北方干旱地区不同季节的 C_n^2 随高度分布的平均廓线。数据按春、夏、秋、冬不同季节进行分类,在高度上同样用 200 m 为一层作平均。从图 4 中可以看出,不同季节 C_n^2 随高度的分布各不相同。一般低层的 C_n^2 比高层的大, C_n^2 随高度的增加逐渐减小。地面的 C_n^2 一般在 $10^{-14} \sim 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$,随着高度的上升, C_n^2 迅速减小,但是各个季节减小的量级均不相同,春、秋、冬三个季节的 C_n^2 减小较大,从地面开始随着高度的增加, C_n^2 由 $10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 迅速减小到 $10^{-17} \sim 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$,减小量最大达 3 个数量级;而夏季的减小量相对较小,在相同高度比其他季节的 C_n^2 大 1~2 个数量级。这主要是和太阳辐射有关,由于北方干旱地区夏季辐射较强,温度较高,对流较大,湍流也较强,湍流强度也较大;其他季节的辐射较弱,对流也较弱,相应的大气湍流强度也较小;在 25 km 以下,四季 C_n^2 廓线的变化趋势大体一致,从 25 km 开始四个季节的 C_n^2 随高度的变化趋于复杂、各不相同,在此期间均有不同程度的波动,其中春季和冬季 C_n^2 变化波动最为明显。由于北方干旱地区受季风运动的影响较小,温度脉动探空的信号也较好,因此探测高度一般都较高,四季都在 30 km 左右。同合肥地区四季 C_n^2 比较可以得出:北方地区的夏季 C_n^2 较大,在对流层一般在 $10^{-5} \sim 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$,比合肥地区夏季 C_n^2 大 1~2 个量级;合肥地区秋季 C_n^2 较大,在对流层内的部分高度比北方地区秋季 C_n^2 要大 1 个量级;两个地区春季和冬季的 C_n^2 差别不大。

3 结 论

通过以上对合肥地区和北方干旱地区的大气折射率结构常数 C_n^2 分布廓线和分布特征的分析研究,可以得出以下结论:

不同地区的大气折射率结构常数 C_n^2 分布廓线是不相同的;同一地区的 C_n^2 分布廓线在白天夜间和不同季节内是不相同的;从廓线的整体来看两个地区白天的湍流比夜间的湍流均要大 1~2 个量级,北方干旱地区的昼夜 C_n^2 比合肥地区的也要大 1 个量级;两个地区相同季节 C_n^2 分布廓线也存在较大差异。

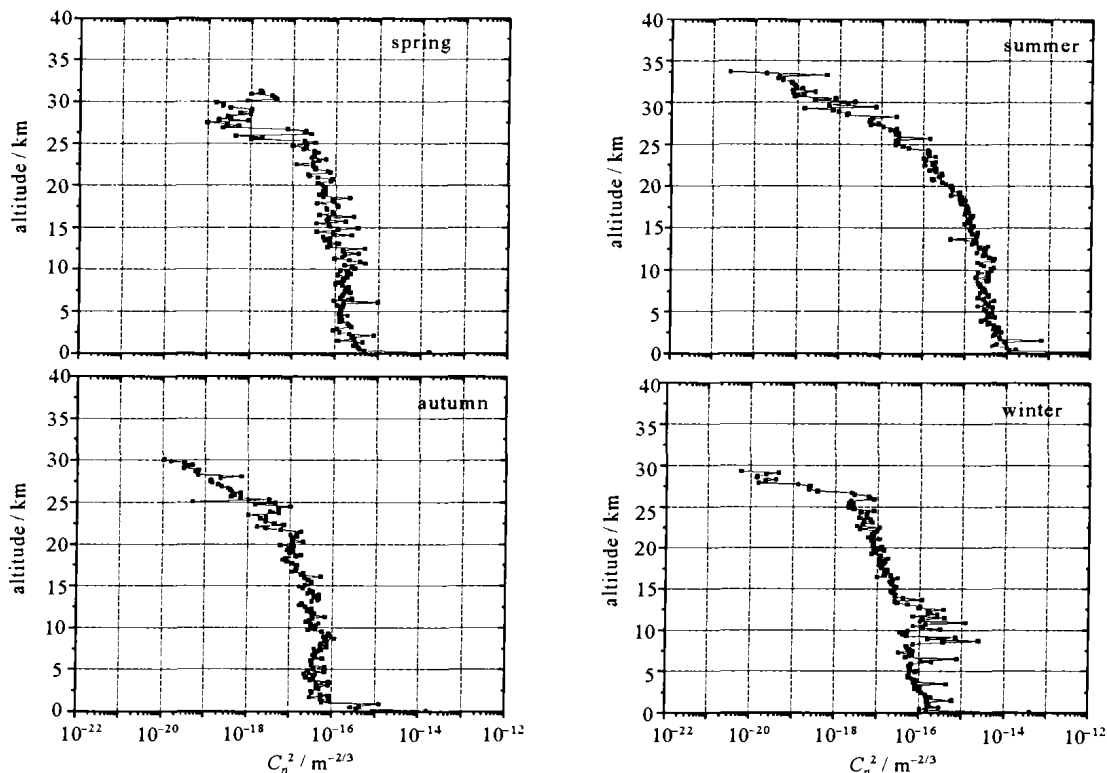


Fig. 4 Average profile of C_n^2 for four seasons of the horthem area

图 4 北方地区四季 C_n^2 平均廓线

C_n^2 在随高度减小的起伏上叠加了随机的起伏,这说明有些大气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。

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 km 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的层次和湍流较弱的层次。这种成层结构在 C_n^2 的观测中普遍存在,这是由于湍流在时间和空间上的间歇性引起的,也反映出 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两地大气折射率结构常数 C_n^2 分布廓线和分布特征还需在今后的探测中进一步验证。

参考文献:

- [1] 盛裴轩,毛节太,李建国,等.大气物理学[M].北京:北京大学出版社,2003.(Sheng P X, Mao J T, Li J G, et al. Atmospheric physics. Beijing: Peking University Press, 2003)
- [2] 宋正方.应用大气光学基础[M].北京:气象出版社,1990.67—70.(Song Z F. Applied atmospheric optics. Beijing: China Meteorological Press, 1990. 67—70)
- [3] Beland R R. Propagation through atmospheric optical turbulence[M]. SPIE Optical Engineering Press, 1993.
- [4] Barletti Reffaele, Cepatelli Guido. Mean vertical profile of atmospheric turbulence relevant for astronomical[J]. *J Opt Soc Am*, 1976, **66** (12): 1380—1383.
- [5] 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.(Zhou X J, Tao S C, Yao K Y. Senior atmospheric physics. Beijing: China Meteorological Press, 1991. 252—346)
- [6] 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.(Weng N Q, Zeng Z Y, Xiao L M, et al. Study of average time and source data differentiation in measuring atmospheric optical turbulence. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(9): 1101—1105)
- [7] 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, **24**(6): 755—756.(Yuan R M, Zeng Z Y, Xiao L M, et al. Comparison of some methods of measuring refractive index structure. *Acta Optica Sinica*, 2000, **24**(6): 755—756)
- [8] 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.(Xiao L M, Weng N Q, Ma C S, et al. Experimental research on the reliability of C_n^2 sonde and its data processing method. *Journal of Hefei University of Technology*, 2004, **27**(2): 179—182)
- [9] 孙刚,翁宁泉,肖黎明,吴毅,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.(Sun G, Weng N Q,

Xiao L M, et al. Profile and character of atmospheric temperature. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(5): 592—596)

- [10] 中国自然资源丛书编撰委员会. 中国自然资源丛书(安徽卷)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1995. (China Nature Resource Series Editor Committee. China nature resource series(Anhui) Volume. Beijing, China Environment Science Press, 1995)
- [11] 袁仁民, 马成胜, 范爱媛. 混合层顶覆盖逆温层变化规律研究[J]. 安徽气象, 2003, (4): 27—31. (Yuan R M, Ma C S, Fan A Y. Discussion on capping inversion. *Anhui Weather*, 2003, (4): 27—31)

Profile and character of atmospheric structure constants of refractive index

SUN Gang, WENG Ning-quan, XIAO Li-ming, MA Cheng-sheng

(National Atmospheric Optics Laboratory, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, P. O. Box 1125, Hefei 230031, China)

Abstract: Random fluctuation of turbulence brings random fluctuation of refractive index and makes atmosphere become a random fluctuation medium, which destroys the coherence of light-wave. Research of atmospheric turbulence is actually investigation of atmospheric refractive index. The atmospheric structure constant of refractive index is an important parameter of denoting atmospheric turbulence. In this paper, the atmospheric structure constant of refractive index is measured both noonday and at night everyday, at all seasons, respectively, using HTP—2 micro-thermal meter. The vertical profile of refractive index in Hefei and the North(0~30 km) is investigated by analysis of experimental data.

Key words: Applied optics; Atmospheric turbulence; Atmospheric structure constant of refractive index; Variance profile