

## 西北高原地区光学湍流的观测与分析

陈小威<sup>1,2</sup>, 李学彬<sup>1</sup>, 孙刚<sup>1</sup>, 刘庆<sup>1</sup>, 朱文越<sup>1</sup>, 翁宁泉<sup>1,3</sup>

- (1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 中国科学院大气成分与光学重点实验室, 安徽合肥 230031; 2. 中国科学技术大学 研究生院科学岛分院, 安徽合肥 230031; 3. 中国科学技术大学 环境科学与光电技术学院, 安徽合肥 230026)

**摘要:** 天文选址的决策和激光传输系统的设计和应用需要掌握大气光学湍流的时空变化规律。利用 HTP-2 型温度脉动仪测量近地面湍流, 用大气相干长度仪测量整层湍流积分效应。分析折射率结构常数  $C_n^2$  的实测数据, 得到近地面光学湍流月平均和季平均的变化规律。分析了早晚两个“转换时刻”不同参数的变化规律。根据广义 Hufnagel-Valley 模式反演得到夜间、白天及“转换时刻”整层湍流廓线, 比较了不同时刻湍流廓线的特点。在连续多年实测数据的基础上所得结论全面可靠, 具有重要的工程参考价值。

**关键词:** 大气光学湍流; Hufnagel-Valley 模式; 大气相干长度; 等晕角

**中图分类号:** P427.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.S111001

## Observation and analysis of optical turbulence in Northwest plateau

Chen Xiaowei<sup>1,2</sup>, Li Xuebin<sup>1</sup>, Sun Gang<sup>1</sup>, Liu Qing<sup>1</sup>, Zhu Wenyue<sup>1</sup>, Weng Ningquan<sup>1,3</sup>

- (1. Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 2. Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei 230031, China; 3. School of Environmental Science and Optoelectronic Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract:** Spatio-temporal evolution of optical turbulence is important for site-testing and optimizing the performance of adaptive optical systems. Measurements were taken over three years using surface layer atmospheric parameter system and differential image motion monitor. Microthermal sensors measured structure constant of refractive index and differential image motion monitors measured atmospheric coherent length and isoplanatic angle. Analysis of structure constant of refractive index showed the monthly and seasonal evolution of surface optical turbulence. Different parameters were analyzed during inversion time. The vertical profile of atmospheric structure constant of refractive index was gained based on Hufnagel-Valley model for night, day and inversion time and different characters were found for different profiles. Based on longtime experiments, the results are credible and valuable for engineering application.

**Key words:** atmospheric optical turbulence; Hufnagel-Valley model; atmospheric coherent length; isoplanatic angle

收稿日期: 2016-02-10; 修订日期: 2016-03-11

基金项目: 国家自然科学基金(41205023, 41375017)

作者简介: 陈小威(1990-), 男, 博士生, 主要从事大气参数测量与分析方面的研究。Email: kachenxiaowei@126.com

导师简介: 翁宁泉(1966-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事大气物理方面的研究。Email: wnq@aiofm.ac.cn

## 0 引言

通常把大气温度或大气密度随机起伏所引起的折射率的随机变化称为大气光学湍流<sup>[1]</sup>。大气光学湍流使光束相位畸变和光强起伏,引起光束扩展、漂移和闪烁等光学湍流效应。由于大气湍流对在其中传播的光波有多种影响,大气光学湍流是研究大气传输时非常重要的问题。此外,大气湍流降低天文望远镜观测星象的分辨率,是天文观测选址的首要考核指标<sup>[2]</sup>。因而,大气湍流的测量及其变化规律的研究具有重要意义。

自 1970 年开始,国外开展了许多大气中光学湍流参数主要是折射率结构常数的测量实验,得到了不同地区和高度的大气光学湍流实验结果<sup>[3]</sup>;同时进行光学湍流模式问题的研究,得到湍流统计模式和参数模式<sup>[1]</sup>。在国内,中国科学院大气物理研究所和中国科学院安徽光学精密机械研究所最先开展了大气光学湍流的研究,并得到了多个地点大气近地面的测量结果和折射率结构常数实测数据的廓线模式<sup>[4]</sup>。孙刚等根据折射率实测数据和常规气象参数探空资料通过 NOAA 模式得到大气湍流高度分布廓线<sup>[5]</sup>。程知等利用实测整层大气相干长度和等晕角反演 Hufnagel-Valley 模型参数<sup>[6]</sup>。文中分析了西北高原地区连续三年的近地面和整层湍流测量数据,并用广义 Hufnagel-Valley 模式反演得到整层湍流廓线,从近地面湍流、整层湍流积分效应和湍流廓线三个角度分析西北高原地区湍流时空变化,所得结论全面可靠,具有重要的工程参考价值。

## 1 理论基础

通常用折射率结构常数  $C_n^2(h)$  表示大气光学湍流强度<sup>[1]</sup>,其表达式为:

$$C_n^2(h) = \left( 79 \times 10^{-6} \frac{P(h)}{T^2(h)} \right)^2 C_T^2(h) \quad (1)$$

式中:  $h$  为高度, m;  $P(h)$  为大气压强, hPa;  $T(h)$  为温度, K;  $C_T^2(h)$  为温度结构常数。由于大气压强和温度随高度变化,  $C_n^2(h)$  也随着高度变化。公式(1)也是折射率结构常数测量的依据和方法。

在天文观测和光学工程中,通常关心整层或整

个路径上大气湍流的总体效应,一般用大气相干长度  $r_0$  来描述。Fried 在研究光学系统调制传递函数和系统分辨率时定义了大气相干长度<sup>[7]</sup>,它表现为  $C_n^2$  在光学路径上的积分。垂直路径大气相干长度为:

$$r_0 = \left( 0.423 \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \int_{h_{\min}}^{\infty} C_n^2(h) dh \right)^{-3/5} \quad (2)$$

式中:  $\lambda$  为波长,文中取 550 nm;  $h_{\min}$  为地面参考高度。 $r_0$  用来描述大气光学湍流沿路径的积分效应,即表示从参考高度开始竖直向上所有湍流对光束传播的影响,  $r_0$  较短,表示路径上湍流较强,反之则湍流较弱<sup>[8]</sup>。

等晕角是自适应光学中重要的参数,表征了光波经过大气湍流到达观测点后的波前角度相关性。垂直路径等晕角表示为<sup>[7]</sup>:

$$\theta_0 = \left( 2.9 \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \int_{h_{\min}}^{\infty} C_n^2(h) h^{5/3} dh \right)^{-3/5} \quad (3)$$

可见等晕角是  $C_n^2(h)$  沿光束路径的积分变量,可以用来描述光学湍流积分效应的强弱。

大气相干长度的积分公式中,垂直路径上各点折射率结构常数权重一样,而折射率结构常数随高度递减,因而低层湍流对大气相干长度影响较大。垂直等晕角的积分公式中包含了一个距离权重因子,各点的折射率结构常数对于等晕角的影响不同,高空湍流对等晕角的影响较大。

## 2 实验设备

实验场地位于中国西北高原,海拔 3 200 m。当地日照时间长,昼夜温差大,气候干燥,全年少雨,具有中国西北高原地区典型气候特征,因而选择该观测站点代表中国西北高原地区。测量地点日出时刻约为 7 时,日落时刻在 20 时左右。测量时间段从 2012 年 4 月~2014 年 6 月,有效数据天数如表 1 所示。

表 1 有效数据天数

Tab.1 Number of days with available data

Year	2012	2013	2014
Days	94	100	45

实验仪器包括中国科学院安徽光学精密机械研究所研制的由 HTP-2 型温度脉动仪和 WXT520 气

象传感器组成的近地面参数测量系统以及大气相干长度仪(DIMM)。图 1(a)为近地面参数测量系统,图 1(b)为大气相干长度仪。温度脉动仪和气象传感器分两层搭建在铁架的 2 m 和 6 m 高度,可以测量近地面不同高度的大气参数。铁架搭建在沙土地面上,周围地面地势平坦。温度脉动仪利用两点式温差法测量大气折射率结构常数  $C_n^2$ 。通过温度传感器不停的测出相距为  $r$  的两点温差  $\Delta T$ ,计算得到温度的结构常数  $C_T^2$ ,再结合同时测量的温度和气压的平均值就计算得到大气折射率结构常数  $C_n^2$ 。WXT520 多功能气象传感器使用电容式测量法测量大气压、温度和湿度;应用超声波准确测定来自所有方向的风速风向。大气相干长度搭建在高 4 m 的屋顶上,用于测量地面 4 m 以上整层大气相干长度;该仪器由光学接收、光电转换系统和数据处理系统两大部分组成。前者的主体单元为卡塞格林望远镜、楔镜和 CCD 摄像机;后者主要由视频信号采集卡、计算机和数据处理软件组成。

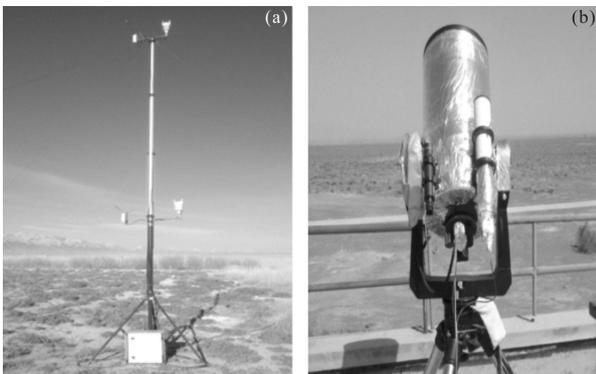


图 1 近地面参数测量系统(a)和大气相干长度仪(b)

Fig.1 Surface layer atmospheric parameter system(a) and DIMM(b)

### 3 实验结果

#### 3.1 光学湍流典型日变化

图 2(a)给出了 5 min 平均后近地面 2 m 和 6 m 高度  $C_n^2$  的典型日变化 (2014-03-16)。由图可见,白天湍流活动较强并在下午 14 时左右达到最大。变化曲线在白天平缓,晚上变化剧烈,说明晚上湍流变化复杂。在 8 时和 19 时左右,湍流强度达到一天中的极小值。这时太阳辐射和地表辐射平衡,没有热量的传递,湍流最弱,被称为“转换时刻”<sup>[1]</sup>。2 m 和 6 m 湍流在变化趋势上相似,但湍流强度有明显差值,说明

折射率结构常数有显著的高度变化特征。图 2(b)给出了大气相干长度  $r_0$  和等晕角  $\theta_0$  的典型日变化 (2013-04-14)。可以看出整层大气相干长度和整层等晕角变化趋势相同,都是上午逐渐减弱,中午达到最小,而后下午逐渐增强,日出后 1 h 和日落前 1 h 左右达到最大,这与近地面湍流变化趋势基本一致。

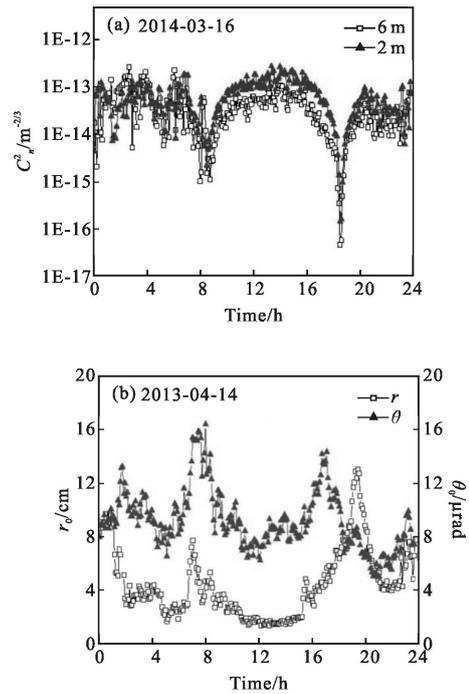
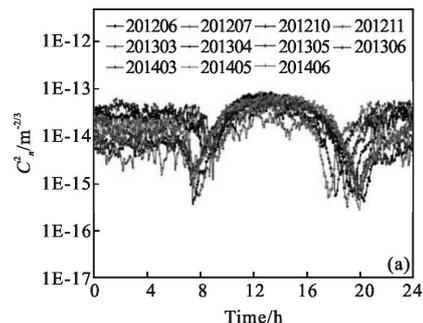


图 2  $C_n^2$ ,  $r_0$  和  $\theta_0$  典型日变化

Fig.2 Daily evolution of  $C_n^2$ ,  $r_0$  and  $\theta_0$  during typical days

#### 3.2 光学湍流月变化

图 3(a)~(c)为折射率结构常数  $C_n^2$ 、大气相干长度  $r_0$  和等晕角  $\theta_0$  的月平均值日变化。文中仅以 6 m 高度  $C_n^2$  为例分析近地面湍流的变化规律。由图 3(a)可以看出不同季节  $C_n^2$  变化趋势相同,都是夜间小,白天大,转换时刻最小。但是一天中的同一时刻,不



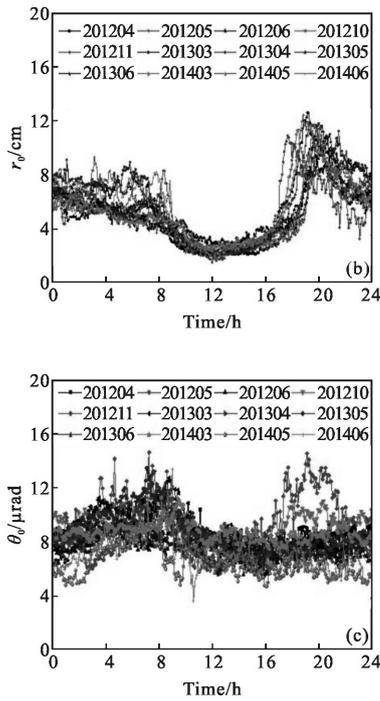


图 3  $C_n^2$ ,  $r_0$  和  $\theta_0$  月平均值日变化

Fig.3 Daily evolution of monthly average of  $C_n^2$ ,  $r_0$  and  $\theta_0$

同月份  $C_n^2$  的值最大可以相差一个量级。由图 3(b)和 (c)可以看出:不同月份  $r_0$  变化趋势相同,傍晚“转换时刻”其值最大,但是早晨“转换时刻” $r_0$  的值没有出现极大值;整层等晕角  $\theta_0$  在早晨 8 时左右达到极大,但在傍晚“转换时刻”没有明显的变化。 $C_n^2$ ,  $r_0$  和  $\theta_0$  的月平均值的日变化趋势在“转换时刻”没有明显的一致性,可能是因为  $r_0$  和  $\theta_0$  分别对低层和高层湍流敏感,“转换时刻”不同海拔高度温度变化和大气运动不同造成光学湍流强度大小不同。

### 3.3 光学湍流季节变化

为了更清楚地了解光学湍流在不同月份的变化情况,图 4 给出了  $C_n^2$ ,  $r_0$  和  $\theta_0$  季节平均值日变化。可以看出,虽然日变化趋势大致相同,不同季节  $C_n^2$ ,  $r_0$  和  $\theta_0$  的值大小明显不同。不同季节白天  $C_n^2$  的值相差不大,但夜间春季和秋季  $C_n^2$  的值大于夏季,说明夏季夜间近地面湍流较小,这可能是夏季低层大气水汽充足,水的比热较大,大气温度梯度较小。而秋季  $r_0$  的值明显小于春季和夏季,但等晕角  $\theta_0$  小于春季和夏季。 $r_0$  主要由低层大气贡献, $\theta_0$  对高层大气比较

敏感<sup>[8]</sup>,结合图 4(a)可知秋季低层大气湍流强,高层大气湍流强度较弱。在早晚两个“转换时刻” $C_n^2$  达到极小值,但  $r_0$  和  $\theta_0$  在早晨“转换时刻”没有明显变化,说明对于  $r_0$  和  $\theta_0$ ,早晨转换时刻并不明显。

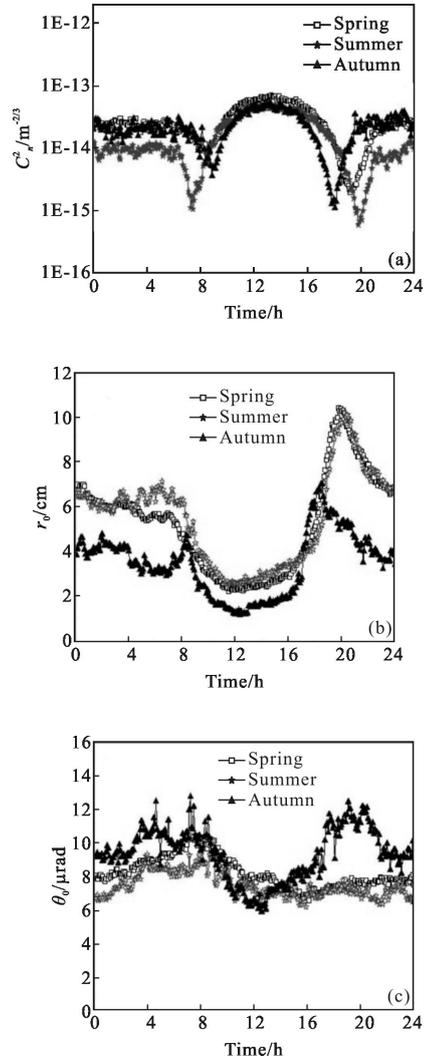


图 4  $C_n^2$ ,  $r_0$  和  $\theta_0$  季节平均值日变化

Fig.4 Daily evolution of seasonal average of  $C_n^2$ ,  $r_0$  and  $\theta_0$

### 3.4 湍流廓线

在工程实践中,因实时获得大气折射率结构常数  $C_n^2$  有一定的困难,通常用大气折射率结构常数  $C_n^2$  平均模式来计算其廓线及其对光波传输的影响,获得模式廓线的方法通常是对实验观测数据进行统计平均来拟合。根据实验地点的气候、纬度、地表特征等实际情况,选取 Hufnagel-Valley 模式为基础进行统计平均拟合,Hufnagel 提出了根据实验资料进行

拟合的多种拟合公式,常用的 Hufnagel-Valley 公式表述如下<sup>[9]</sup>:

$$C_n^2 = a_1 h^c e^{-\frac{h}{b_1}} + a_2 e^{-\frac{h}{b_2}} + a_3 e^{-\frac{h}{b_3}} \quad (4)$$

式中:  $h$  为高度, km。

公式(4)中,模式的表达式有三项:第一项表示在对流层顶经常出现的强湍流层状况,分别由三个参数控制,其中  $b_1$  和  $c$  联合调节了强湍流层的高度和厚度,  $c$  越大强湍流层的高度越高,  $b_1$  一般小于 1, 它越大强湍流层越厚,  $a_1$  则在其他两个参数确定后调节强湍流层的强度;第二项表示边界层中湍流状况,由两个参数控制,  $a_2$  表示边界层湍流强弱,它越大边界层湍流越强,  $b_2$  表示边界层湍流的递减率,它越小湍流随高度递减越快,也就是边界层越薄;第三项表示自由大气中湍流状况,  $a_3$  表示整层大气湍流的强弱,  $b_3$  表示整层大气整体随高度递减的趋势,它越小整层湍流递减越快。这三项随高度的典型变化如图 5 所示。

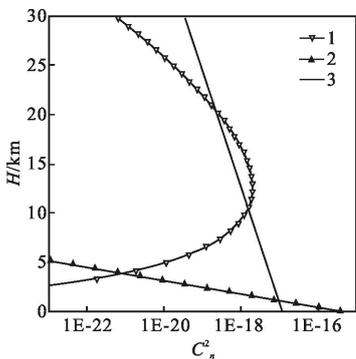


图 5 折射率结构常数拟合公式曲线

Fig.5 Mode expression of structure constant of refractive index

根据大气相干长度和等晕角综合测量系统实测的整层大气相干长度和等晕角在不同时段的数据,结合近地面参数测量系统测量的近地面折射率结构常数,以 Hufnagel-Valley 拟合模式公式为基础,给出了不同时间大气湍流初步拟合模式。表 2 给出不同季节大气相干长度和等晕角不同时段统计平均值。

表 2 不同时段大气相干长度和等晕角统计

Tab.2 Monthly average of in different period

Season	Night(0-4 h)		Day(12-16 h)		Inversion time	
	$r_0$	$\theta_0$	$r_0$	$\theta_0$	$r_0$	$\theta_0$
Spring	5.76	8.76	2.95	8.28	11.45	8.20
Summer	5.79	6.83	2.76	7.16	10.57	10.57
Autumn	6.32	9.59	2.46	7.33	8.76	11.61

图 6 是根据 Hufnagel-Valley 拟合模式,由实际测量的大气相干长度和等晕角得到的不同时间  $C_n^2$  随高度变化的拟合模式廓线。廓线拟合参数见表 3。从图中可以看出,  $C_n^2$  的数值随高度的增加而减小,在边界层迅速减小,在 2~10 km 变化不大;  $C_n^2$  的数值在 10 km 高左右略有增大,这是对流层顶温度梯度较大引起的。在底层,白天模式比夜间和转换时刻模式大 1~2 个量级,而在高于 10 km 的高空中三个时段模式的差别不大。

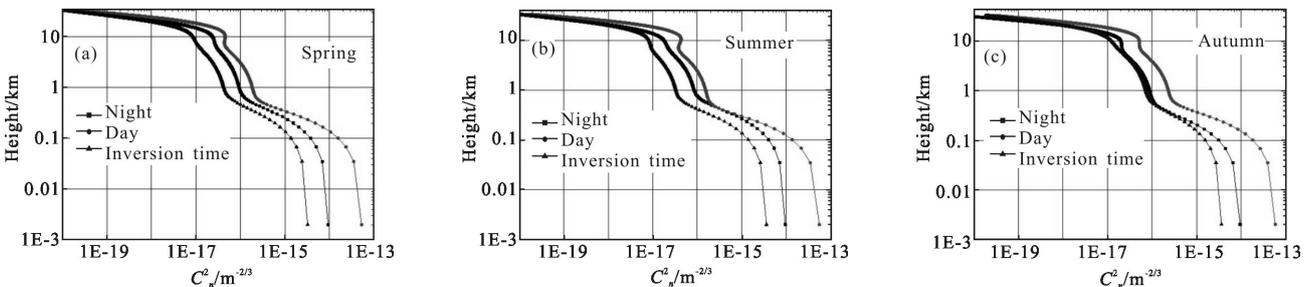


图 6 折射率结构常数拟合模式

Fig.6 Fitted profiles of  $C_n^2$

表 3 湍流模式常数

Tab.3 Constants for turbulence models

Time		$a_1$	$b_1$	$c$	$a_2$	$b_2$	$a_3$	$b_3$	$r_0/\text{cm}$	$\theta_0/\mu\text{rad}$
Spring	Day	2.63e-23	1.07	9.80	1.20e-16	3.918	9.50e-15	9.50e-15	5.76	5.06
	Night	2.36e-23	1.15	9.85	1.90e-16	3.276	5.66e-14	0.064	2.93	3.57
	Inversion	1.76e-23	1.19	9.08	5.50e-17	3.818	3.25e-15	0.112	10.25	8.74
Summer	Day	2.76e-23	1.08	9.59	1.10e-16	3.718	9.66e-15	0.112	5.80	6.06
	Night	2.86e-23	1.16	9.81	2.10e-16	3.276	5.76e-14	0.070	2.76	3.22
	Inversion	2.51e-23	1.21	8.90	4.30e-17	3.818	3.66e-15	0.102	10.5	9.11
Autumn	Day	2.36e-23	1.14	9.98	3.1e-16	3.450	5.95e-14	0.084	2.44	2.89
	Night	2.63e-23	1.07	9.80	1.2e-16	3.250	9.60e-15	0.086	6.34	5.72
	Inversion	1.76e-23	1.21	9.10	9.4e-17	3.818	3.59e-15	0.112	8.74	6.87

## 4 结论

文中以实测站点为代表,分析了西北高原地区的多年实测数据,用广义 Hufnagel-Valley 模式拟合得到春季、夏季和秋季的湍流廓线。大量实测数据统计得到的近地面湍流和整层湍流积分效应的变化规律全面可靠,拟合得到的湍流廓线对于天文选址的决策和激光传输系统的设计和应用具有参考价值。主要结论如下:

(1) 折射率结构常数  $C_n^2$ , 大气相干长度  $r_0$  和等晕角  $\theta_0$  具有明显的日变化规律。典型天气状况下,  $C_n^2$  的值夜间小白天大, 转换时刻最小;  $C_n^2$  的变化趋势夜间复杂白天稳定。 $r_0$  和  $\theta_0$  白天小夜间大, 中午最小且转换时刻最大。

(2) 不同月份,  $C_n^2$ ,  $r_0$  和  $\theta_0$  的变化趋势分别相同但大小不同。 $C_n^2$ ,  $r_0$  和  $\theta_0$  的月平均值的日变化趋势没有明显的一致性, 说明从月时间尺度来看, 低层和高层大气光学湍流的变化不一致。

(3) 折射率结构常数  $C_n^2$  月平均有两个“转换时刻”, 但  $r_0$  在早晨没有明显的“转换时刻”,  $\theta_0$  在傍晚没有明显的“转换时刻”。

(4) 春季近地面湍流较强而整层湍流积分效应较弱, 夏季近地面湍流较强和整层湍流积分效应均较弱。秋季低层大气湍流较强但高层大气湍流较弱。

(5) 根据广义 Hufnagel-Valley 模式拟合得到湍流廓线。 $C_n^2$  的值随高度的增加而减小, 在边界层迅速减小, 在 2~10 km 变化不大; 在低层大气中, 白天模式比夜间和转换时刻模式大 1~2 个量级, 而在高于

10 km 的高空中三个时段模式的差别不大。

下一步可结合常规气象数据分析折射率结构常数  $C_n^2$ , 大气相干长度  $r_0$  和等晕角  $\theta_0$  的变化规律, 探究其变化原因; 用探空数据分析  $C_n^2$  拟合廓线的精度并做修正。

## 参考文献:

- [1] Beland R R. Propagation Through Atmospheric Optical Turbulence, IE/E-O System Handbook Vol.2[M]. US: SPIE Optical Engineering Press, 1993: 201-203.
- [2] Hardy J W. Adaptive Optics for Astronomical Telescopes [M]. New York: Oxford University Press, 1998: 84.
- [3] Wyngaard J C, Izumi Y, Collins S A, et al. Behavior of the refractive index structure parameter near the ground [J]. *J Opt Soc Am*, 1971, 61: 1646.
- [4] Weng Ningquan, Zeng Zongyong, Xiao Liming, et al. Profile and characteristic of refractive index structure constant [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1999, 11(6): 673-676. (in Chinese)
- [5] Sun Gang, Weng Ningquan, Zhang Caiyun, et al. Atmospheric turbulence in typical area based on NOAA model [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 388-393. (in Chinese)
- [6] Cheng Zhi, Hou Zaihong, Jing Xu, et al. High-precision and real-time inversion method of Hufnagel-Valley turbulence profile [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(6): 1562-1567. (in Chinese)
- [7] Fried D L. Anisoplanatism in adaptive optics [J]. *J Opt Soc Am*, 1982, 72(1): 52.
- [8] Weng Ningquan, Wu Yi, Wang Jianye, et al. Experimental study of obtaining atmospheric coherent length from turbulence profile [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, 16(3): 273-276. (in Chinese)
- [9] Hufnagel R, Stanley N R. Modulation transfer function associated with image transmission through turbulent media [J]. *J Opt Soc Am*, 1964, 54: 52-61.