

# 近地面湍流对整层湍流的贡献及相关研究

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

<sup>1</sup>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

<sup>2</sup>中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 安徽 合肥 230031

<sup>3</sup>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** 用由 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的两年观测数据分析了西北高原地区近地面湍流。近地面参数测量系统分两层分别搭建在 6 m 和 2 m 高度上。温度脉动仪测量折射率结构常数, 气象传感器测量常规气象参数, 大气相干长度仪测量大气相干长度。分析结果表明: 不同高度的折射率结构常数随高度按幂指数规律变化, 白天幂指数平均值为 -0.8, 夜间为 -0.3。用相干长度比评估近地面湍流层对整层湍流的贡献, 结果表明: 相干长度比有明显的日变化特征, 白天小而夜间大; 不同月份相干长度比日变化趋势和大小均不同。讨论了近地面局地视宁度与局地温差的关系, 结果表明: 局地视宁度和局地温差白天正相关, 夜间负相关。

**关键词** 大气光学; 光学湍流; 天文选址; 相干长度比; 大气相干长度; 视宁度

中图分类号 P427.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1101006

## Contribution of the Surface Layer to the Integral Turbulence in Northwest Plateau

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

<sup>1</sup>Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

<sup>2</sup>Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230031, China

<sup>3</sup>School of Environmental Science and Optoelectronic Technology, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

**Abstract** Results from experiments measuring surface layer turbulence in Northwest China are presented. The measurements are taken over two years using surface layer atmospheric parameter system and differential image motion monitor. The surface layer atmospheric parameter system is composed of HTP-2 microthermal sensors and WXT520 meteorological sensors placed at 2 m and 6 m on a mast. Microthermal sensors are used to measure structure constant of refractive index and meteorological sensors are used to measure meteorological parameters. It is observed that structure constant of refractive index in the surface layer falls with exponent altitude dependence with the power index of -0.8 in the day and -0.3 at night. The contribution of surface layer to the integral turbulence is estimated using coherence length ratio. Coherence length ratio changes in a diurnal cycle with large values in the day and small values during the night and the changing trend and monthly averaged values are different between months. Discussion of relationship between local seeing and meteorological variables shows that local seeing correlates with temperature difference positively in the day while negatively during night. Based on longtime experiments, the results are credible and valuable in the work of site-testing and optimizing the performance of adaptive optical systems.

收稿日期: 2015-06-10; 收到修改稿日期: 2015-07-15

基金项目: 国家自然科学基金(41205023, 41375017)

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

导师简介: 翁宁泉(1966—), 男, 博士, 研究员, 主要从事大气物理方面的研究。E-mail: wnq@aiofm.ac.cn(通信联系人)

**Key words** atmospheric optics; optical turbulence; site testing; coherence length ratio; atmospheric coherence length; seeing

**OCIS codes** 010.1330; 010.1290; 010.1080

## 1 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。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。光学湍流效应对天文观测的影响程度是天文观测选址的首要考核指标<sup>[1]</sup>。观测表明,大气湍流随高度呈现层状分布:湍流存在于 $10^2$  m量级的薄层中,各层之间显现出宏观不连续性,不同高度层的湍流对视宁度有不同的贡献。按高度概略划分湍流层,测量不同湍流层对整层视宁度的贡献对于精细观测和自适应光学系统工作性能的优化是有意义的<sup>[2-3]</sup>。Vernin等<sup>[4]</sup>指出对于站址质量的评价,不仅要测量整层积分湍流,还应考虑不同层湍流的相对贡献,他们将整层湍流分成自由大气、边界层、近地面等5个不同区域。近地面层是大气边界层的底层,其范围从地面到几十米高度。近地面层中湍流主要取决于地形和气候状况<sup>[5]</sup>。

国外研究人员使用温度脉动仪、大气相干长度仪(DIMM)和闪达(SCIDAR)等实验设备研究了不同站点整层积分湍流和近地面湍流。西班牙 La Palama 天文台<sup>[4]</sup>、南极大陆<sup>[6]</sup>、墨西哥 OAN-SPN<sup>[7]</sup>和 Hanle<sup>[8]</sup>等站点的研究表明:不同地点因地形不同近地面湍流对整层湍流的贡献不同。以上结果均是在短期测量的数据上进行分析,没有典型特征;只给出了近地面湍流对整层湍流贡献夜间的平均值,对于其日变化目前还没有研究。国内对这方面的研究还未见报道。本文根据在中国西北高原青海德令哈地区的长期观测数据,分析了近地面湍流对整层湍流的贡献并探究近地面视宁度和常规气象参数的关系。

## 2 光学湍流理论基础

Tatarskii 建立了光在湍流大气中的传输理论。通常用折射率结构常数  $C_n^2(h)$  表示大气光学湍流强度,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  $h$  代表高度,单位 m,  $P(h)$  是大气压强,单位 hPa,  $T(h)$  是温度,单位 K,  $C_T^2(h)$  是温度结构常数。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。(1)式也是折射率结构常数测量的依据和方法。

Fried<sup>[9]</sup>引入了参数  $r_0$  来描述光波在大气传输中相位起伏引起的像质退化程度,它是折射率结构常数  $C_n^2(h)$  的积分表达式。对于平面波, Fried 常数  $r_0$  的表达式为

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

式中  $\lambda$  是波长,本文  $\lambda$  取 550 nm,  $h_{\min}$  是地面参考高度。  $r_0$  表示从地面开始竖直向上所有湍流层对光束传播的影响,也称为整层大气相干长度。

Roddier<sup>[10]</sup>将光在湍流大气中的传输理论用于天文学研究, Dierickx<sup>[11]</sup>提出用视宁度  $\varepsilon$  描述大气光学性质,定义  $\varepsilon$  为长曝光点源星像的半峰全宽。视宁度  $\varepsilon$  与整层大气相干长度  $r_0$  的关系为

$$\varepsilon = \frac{0.98\lambda}{r_0}, \quad (3)$$

也就是

$$\varepsilon = 5.25\lambda^{-1/5} \left[ \int_{h_{\min}}^{\infty} C_n^2(h) dh \right]^{3/5}. \quad (4)$$

可以看出,不同层间的湍流大气对光线的作用累积最终导致了望远镜焦距上星像扩展。

对于高度  $h_1$  和  $h_2$  之间的湍流层,局地大气相干长度定义为

$$r_0(h_1, h_2) = \left[ 0.423 \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \int_{h_1}^{h_2} C_n^2(h) dh \right]^{-3/5}, \quad (5)$$

相应的视宁度为

$$\varepsilon(h_1, h_2) = 5.25\lambda^{-1/5} \left[ \int_{h_1}^{h_2} C_n^2(h) dh \right]^{3/5}. \quad (6)$$

### 3 实验仪器和测量结果

#### 3.1 实验仪器

实验场地位于中国科学院紫金山天文台青海观测站,海拔 3200 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 07:00,日落时刻在 20:00 左右。测量时间段为 2013 年 3 月~2014 年 6 月,各月获得有效数据天数如表 1 所示。

表 1 有效数据天数

Table 1 Number of days with available data

Month	2013-03	2013-04	2013-05	2013-06	2014-03	2014-05	2014-06
Days	10	30	30	30	23	11	11

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 DIMM。图 1(a)是近地面参数测量系统,图 1(b)是大气相干长度仪。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。

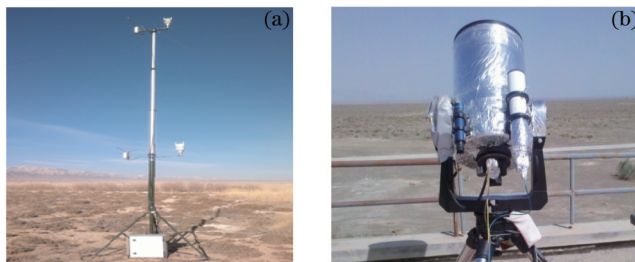


图 1 (a) 近地面参数测量系统; (b) 相干长度仪

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

#### 3.2 测量结果

图 2 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。由图 2 可见,白天湍流活动较强并在

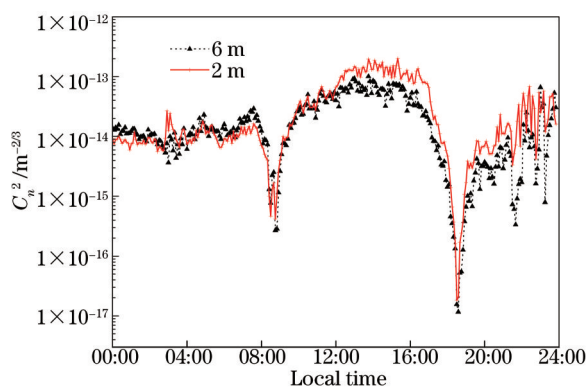


图 2 近地面 2 m 和 6 m 折射率结构常数典型日变化(2014-03-20)

Fig.2 Temporal evolution of  $C_n^2$  during a typical day (2014-03-20)

14:00达到最大,夜晚湍流强度比白天弱1个量级。变化曲线在白天平缓,晚上曲线变化剧烈,说明晚上湍流变化复杂。在08:00和19:00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>[12]</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。

研究表明,近地面 $C_n^2$ 随高度按指数变化;不同地点,指数大小不同<sup>[13]</sup>。文献指出,近地面两个高度测量的 $C_n^2$ 确定的幂指数足够可靠<sup>[14]</sup>。对于德令哈天文观测站,近地面 $C_n^2$ 随高度按指数变化,服从规律

$$\frac{C_n^2(h)}{C_n^2(h_0)} = (h/h_0)^\alpha, \quad (7)$$

式中 $h$ 和 $h_0$ 是高度, $\alpha$ 是指数项。分析近地面2 m和6 m数据,得到不同月份幂指数变化规律,如图3(a)~(c)所示。由图3可见,不同月份幂指数 $\alpha$ 变化规律相同,大小在平均值上下变化。08:00~19:00幂指数平均值为-0.8,00:00~08:00和19:00~24:00的平均值为-0.3。

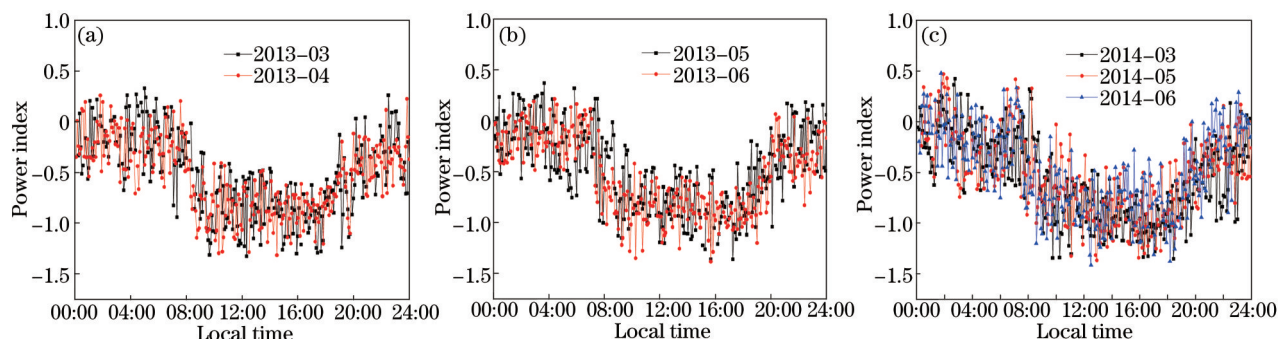


图3 不同月份幂指数月平均值日变化

Fig.3 Daily evolution of power index in different months

图4(a)~(c)给出了DIMM所测大气相干长度 $r_0$ 的月平均值日变化。可以看出不同月份 $r_0$ 变化趋势相同,除个别月份外,其值大小差别不大。从整体上看, $r_0$ 有明显的日变化特征。中午小,夜间大,在转换时刻达到最大。 $r_0$ 的值在白天较稳定,约为3 cm,夜间在平均值附近剧烈变化。这与近地面湍流的日变化特征基本一致。

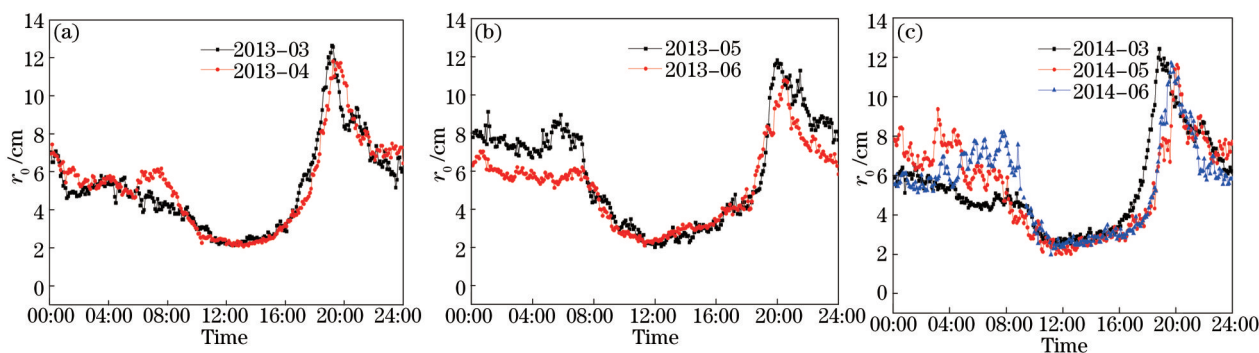


图4 不同月份大气相干长度月平均值日变化

Fig.4 Daily evolution of atmospheric coherence length in different months

## 4 讨 论

### 4.1 相干长度比

Martin等<sup>[15]</sup>提出,近地面局地湍流层对整层湍流的贡献可以用相干长度比(CLR, $C_{LR}$ )来评估:

$$C_{LR} = \frac{\int_{h_1}^{h_2} C_n(h)dh}{\int_{h_{min}}^{\infty} C_n(h)dh} \times 100\%, \quad (8)$$

式中 $h_1$ 和 $h_2$ 分别是局地湍流层上下边界高度, $h_{min}$ 是整层湍流在近地面的起始高度。国外研究人员用 $C_{LR}$ 对不同站址近地面湍流进行评价,所得结论如表2所示。

表2 不同站点 CLR 平均值

Table 2 Averaged CLR at different stations

Site	Height range /m	CLR /%	Time	Time scale /D
La Palma <sup>[4]</sup>	6~12	3	Night	1
Mt.Sanglok <sup>[14]</sup>	2~33	5	Night	26
Mt.Maydanak <sup>[14]</sup>	2~33	6	Night	--
SAO <sup>[14]</sup>	2~33	6	Night	--
Maidanak <sup>[16]</sup>	1.9~3.4	<20	Night	--
Paranal <sup>[15]</sup>	3~21	12.5	Night	9
OAN-SPM <sup>[17]</sup>	2.3~15	16	Night	23
Hanle <sup>[8]</sup>	3~15	34	All day	2

实验中, DIMM 观测高度为 4 m, 最低层温度脉动仪的高度在 2 m。使用(7)式可得近地面  $h_1$  和  $h_2$  高度间湍流层  $C_{LR}$  为

$$C_{LR} = \int_{h_1}^{h_2} C_n(h)dh \left/ \left[ \int_{h_1}^{h_2} C_n^2(h)dh + 2.364 \left( \frac{\lambda}{2\pi} \right)^2 r_0(4, \infty)^{-5/3} \right] \times 100\% \right., \quad (9)$$

式中  $r_0(4, \infty)$  是 DIMM 所测大气相干长度。

图 5(a)~(c) 是  $C_{LR}$  月平均值的日变化图。由图 5 可知,  $C_{LR}$  有显著的日变化特征: 白天近地面湍流对整层湍流的贡献较小, 在 10% 以下; 夜间近地面湍流贡献较大, 最大可达到 45%。这是因为白天阳光充足, 地表辐射加热使近地面湍流活动充分发展, 光学湍流强度较大。同时热量通过湍流向上传递, 上层湍流活动增强使整层湍流积分效应增强,  $C_{LR}$  的值减小; 夜间地表冷却辐射热量, 近地面大气层结稳定, 光学湍流强度较小。同时, 热量通过湍流从高处向下传递, 上层湍流活动减弱, 整层湍流积分活动减弱,  $C_{LR}$  的值变大。因而, 夜间  $C_{LR}$  值比白天大。

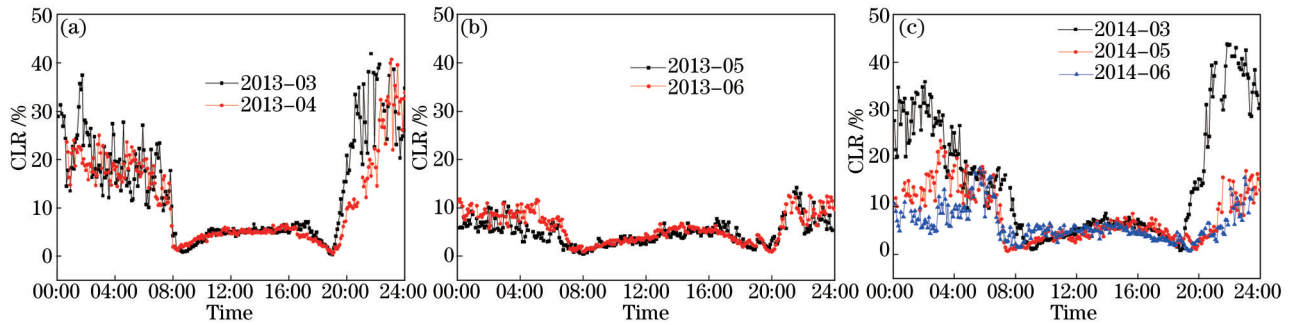


图 5 不同月份 2~30 m  $C_{LR}$  的月平均值日变化

Fig.5 Daily evolution of 2~30 m  $C_{LR}$  in different months

不同月份  $C_{LR}$  的值在白天变化趋势一致, 差别不大; 但夜间变化趋势和大小均不同。2013 年 3 月, 2013 年 4 月和 2014 年 3 月夜间  $C_{LR}$  的值明显大于其他月份。同一时刻, 近地面湍流对整层湍流的贡献随积分高度增加而变大。表 3 给出了近地面不同高度  $C_{LR}$  月平均值。为了方便和相关站点的数据讨论, 给出 4 个不同湍

表 3 近地面不同高度  $C_{LR}$  月平均值

Table 3 Monthly averaged  $C_{LR}$  in the surface layer at different heights

Height range /m	Time	2013-03	2013-04	2013-05	2013-06	2014-03	2014-05	2014-06	Mean
2~15	Day	3	2.9	2.6	2.7	3.3	3.1	3.1	3
	Night	11.6	9.6	3.8	4.1	13.3	5.8	2.3	7.2
6~12	Day	1.1	1.1	0.97	1	1.2	1.1	1.1	1.1
	Night	5	4.2	1.2	1.8	6.1	2.9	1.9	3.3
2~20	Day	3.6	3.4	3.1	3.2	3.8	3.6	3.6	3.5
	Night	15	12.4	4.1	5.3	17.2	7.5	5.4	9.6
2~30	Day	4.4	4.2	3.8	3.9	4.7	4.4	4.6	4.3
	Night	23.4	17.5	6.1	7.4	24.3	10.6	7.6	13.8

流层的  $C_{LR}$  平均值。从两年平均值来看,夜间 2~15 m  $C_{LR}$  平均值为 7.2%, 小于 OAN-SPM 的 16% 和 Hanle 的 34%; 夜间 6~12 m  $C_{LR}$  平均值为 3.3%, 与 La Palma 站址的 3% 大小几乎相同; 夜间 2~20 m  $C_{LR}$  平均值为 9.6%, 略小于 Paranal 的 12.5%。夜间 2~30 m  $C_{LR}$  平均值为 13.8%, 大于 Mt.Sanglok、Mt.Maydanak 和 SAO 这 3 个站点。可以看出,近地面固定湍流层  $C_{LR}$  的数值在不同月份的大小和日变化趋势是不同的,只有在长期观测数据的基础上分时段分析,才能对  $C_{LR}$  的变化有充分可靠的认识。

#### 4.2 近地面视宁度与气象参数关系的讨论

国外有研究分析局地气象参数和视宁度的关系<sup>[6]</sup>,试图用常规气象参数来预测视宁度。Echevarria 等<sup>[17]</sup>在 OAN-SPM 的研究表明视宁度和风速风向、湿度和环境温度等气象参数不存在相关性。Marks 等<sup>[6]</sup>用三层温度脉动仪测量数据计算南极站近地面视宁度,依据温度逆温将近地面视宁度分成了极好、好等不同 4 类,统计了近地面视宁度在不同天气状况下的分布特点。本文就近地面视宁度与近地面温差的关系进行探讨。图 6(a)~(b)分别为不同月份白天和夜间近地面 2~6 m 局地视宁度随 2~6 m 局地温差的变化趋势图,图中温差  $dT$  是 2 m 温度减去 6 m 温度。

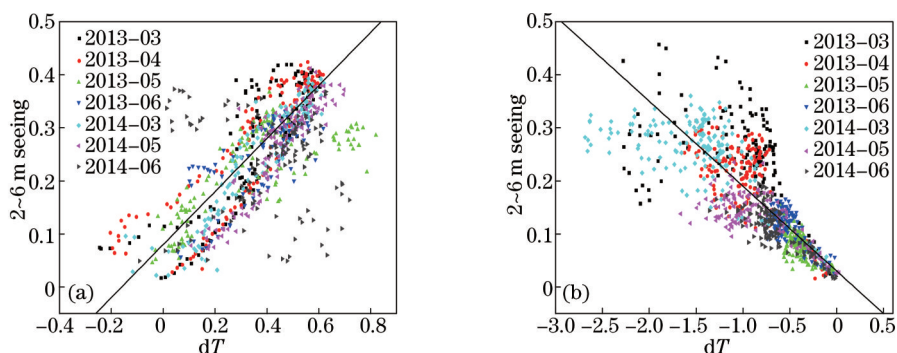


图 6 不同月份局地视宁度与(a)白天和(b)夜间局地温差的关系

Fig.6 Relationship between local seeing and temperature difference (a)in the day and (b)at night

由图 6 可见,  $dT$  白天大于 0, 夜间小于 0。白天, 局地视宁度随着温差增大而减小, 夜晚局地视宁度随着温差减小而增大。这是因为白天太阳辐射使地面温度高于空气温度, 近地面大气密度随着高度增加而减小, 使湍流充分发展。地面-空气温差越大, 近地面湍流活动越剧烈, 湍流积分效应越明显, 局地视宁度越大。在夜间,  $dT$  小于 0, 近地面大气层结稳定, 由 Bulk 估算方法可知, 光学湍流强度随着  $|dT|$  增加而变大<sup>[18]</sup>。因而夜间局地视宁度随着  $dT$  减小而变大。

## 5 结 论

用温度脉动仪和 DIMM 两年的观测数据分析了中国西北高原地区近地面湍流对整层湍流的贡献, 讨论了近地面局地视宁度和局地温差的关系。所得结论对于天文选址的决策和自适应光学系统的设计和应用具有参考价值。主要结论如下: 1) 西北高原地区近地面湍流有明显的日变化特征。近地面湍流强度随高度按幂指数规律变化, 白天幂指数平均值为 -0.8, 夜间为 -0.3。2) 用相干长度比  $C_{LR}$  评估近地面湍流层对整层湍流的贡献。 $C_{LR}$  有明显的日变化特征, 同一月份  $C_{LR}$  夜间的月平均值大于白天。不同月份  $C_{LR}$  的大小和变化趋势均不同。因而对站点  $C_{LR}$  的评估需要长期观测才能得到可靠结论。3) 近地面局地视宁度和局地温差有相关性。近地面局地视宁度和局地温差白天呈正相关关系, 夜间呈负相关关系。

根据湍流随高度变化的幂指数规律计算得到 30 m 高度内近地面湍流对整层湍流的贡献。虽然相关文献表明近地面两个高度测量的  $C_n^2$  确定的幂指数足够可靠, 但仍需研究近地面高层湍流随高度变化规律。未来应结合实地探空测量数据对  $C_{LR}$  进行误差分析, 进一步分析边界层内  $C_{LR}$  变化规律。

### 参 考 文 献

- 1 Liu Guangqian, Yang Lei, Deng Linhua, *et al.*. Influence of atmospheric turbulence on the accuracy of astronomical telescope auto-guiding system[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(1): 0101001.  
柳光乾, 杨磊, 邓林华, 等. 大气湍流对天文望远镜光电导行精度的影响[J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0101001.

- 2 Chou Puzhang, Liu Zhong. Seeing in modern astronomical site testing[J]. Progress in Astronomy, 1993, 11(1): 56–61.  
仇朴章, 刘 忠. 现代天文选址中的视宁度[J]. 天文学进展, 1993, 11(1): 56–61.
- 3 Wang Hongshuai, Yao Yongqiang, Liu Liyong. Forecast of atmosphere optical turbulence at Ali Site by weather research and forecasting model[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3): 0301006.  
王红帅, 姚永强, 刘立勇. 基于天气预报模式预报阿里天文站大气光学湍流[J]. 光学学报, 2013, 33(3): 0301006.
- 4 Vernin J, Munoz-Tunon C. Optical seeing at La Palma Observatory I. General guidelines and preliminary results at the Nordic Optical Telescope[J]. Astronomy and Astrophysics, 1992, 257(2): 811–816.
- 5 Robert R Beland. Propagation through atmospheric optical turbulence[J]. Atmospheric Propagation of Radiation, 1993, 2: 157–232.
- 6 Marks R D, Vernin J, Azouit M, *et al.*. Antarctic site testing—microthermal measurements of surface-layer seeing at the South Pole[J]. Astronomy and Astrophysics, 1996, 118(2): 386–390.
- 7 Sanchez L J, Cruz D X, Avila R, *et al.*. Contribution of the surface layer to the seeing at San Pedro Martir: Simultaneous microthermal and DIMM measurements[C]. Revista Mexicana De Astronomía Y Astrofísica, 2003, 19: 23–30.
- 8 Dhananjay K. Site evaluation study for the Indian National Large Solar Telescope using microthermal measurements[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2014, 437(3): 2092–2105.
- 9 Fried D L. Optical resolution through a randomly inhomogeneous medium for very long and very short exposures[J]. Journal of The Optical Society of America, 1966, 56(10): 1372–1379.
- 10 Roddier F. The effects of atmospheric turbulence in optical astronomy[J]. Progress in Optics, 1981, 19(8): 281–376.
- 11 Dierickx P. Optical performance of large ground-based telescopes[J]. Journal of Modern Optics, 1992, 39(3): 569–588.
- 12 Rao Ruizhong. Modern Atmospheric Optics[M]. Beijing: Science Press, 2012: 156–159.  
饶瑞中. 现代大气光学[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 156–159.
- 13 Wu Xiaoqing, Sun Gang, Weng Ningquan, *et al.*. Measurement and modeling of  $C_n^2$  at typical regions in China[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2007, 2(6): 409–422.  
吴晓庆, 孙 刚, 翁宁泉, 等. 典型地区大气光学湍流测量与模式研究[J]. 大气与环境光学学报, 2007, 2(6): 409–422.
- 14 Gur'yanov A E, Kallistratova M A, Kuttyrev A S, *et al.*. The contribution of the lower atmospheric layers to the seeing at some mountain observatories[J]. Astronomy and Astrophysics, 1992, 262(1): 373–380.
- 15 Martin F, Conan R, Tokovinin A, *et al.*. Optical parameters relevant for high angular resolution at paranal from gsm instrument and surface layer contribution[J]. Astronomy and Astrophysics Supplement Series, 2000, 144(1): 39–44.
- 16 Ehgamberdiev S A, Baijumanov A K, Ilyasov S P, *et al.*. The astroclimate of Maidanak Observatory in Uzbekistan[J]. Astronomy and Astrophysics Supplement Series, 2001, 145(2): 293–304.
- 17 Echevarria J, Tapia M, Costero R, *et al.*. Site testing at Observatorio Astrónomico Nacional in San Pedro Mártir[J]. Revista Mexicana De Astronomía Y Astrofísica, 1998, 34(1): 47–60.
- 18 Wu Xiaoqing, Zhu Xingting, Huang Honghua, *et al.*. Optical turbulence of atmospheric surface layer estimated based on the Monin-Obukhov similarity[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(7): 0701004.  
吴晓庆, 朱行听, 黄宏华, 等. 基于 Monin-Obukhov 相似理论估算近地面光学湍流强度[J]. 光学学报, 2012, 32(7): 0701004.

栏目编辑: 史 敏