

中国西部典型地区整层光学湍流观测与分析

陈小威^{1,2} 李学彬^{1*} 刘庆¹ 孙刚¹ 张守川¹ 朱文越¹ 翁宁泉^{1,3}

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 基于大气相干长度和等晕角综合测量系统在中国西部地区的长期测量资料, 分析了大气相干长度和等晕角的时间变化和统计分布特征, 给出了白天、夜间、傍晚转换时刻三个时段大气相干长度和等晕角的平均值和标准差。对原始数据的概率分布统计表明, 不同地区不同月份大气相干长度和等晕角近似满足对数正态分布, 并采用样本偏度和样本峰度描述样本分布同正态分布的偏离程度。分析了大气相干长度和等晕角月平均值的相关性, 定性评估了不同时段高层湍流和近地湍流对大气相干长度和等晕角的贡献。

关键词 大气光学; 大气相干长度; 等晕角; 对数正态分布; 相关性分析

中图分类号 P427.1 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0801003

Measurement and Analysis of Integral Optical Turbulence at Western Typical Zones in China

Chen Xiaowei^{1,2} Li Xuebin¹ Liu Qing¹ Sun Gang¹ Zhang Shouchuan¹
Zhu Wenyue¹ Weng Ningquan^{1,3}

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

²Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230031, China

³School of Environmental Science and Optoelectronic Technology, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

Abstract The temporal and statistical properties of atmospheric coherence length and isoplanatic angle are investigated, based on the long-term measured datum of synthetic measuring system of atmospheric coherence length and isoplanatic angle in the west of China. Meanwhile the mean and standard deviation of atmospheric coherence length and isoplanatic angle in three periods of daytime, nighttime and dusk are given. The probability distributions of initial data show that both atmospheric coherence length and isoplanatic angle are approximately satisfied with log-normal distribution. Besides, the distribution deviation between the sample distribution and log-normal distribution is estimated by sample skewness and sample kurtosis. The correlation between monthly mean of atmospheric coherence length and isoplanatic angle is analyzed, and the effects of the magnitude of upper air and surface turbulence on atmospheric coherence length and isoplanatic angle are evaluated qualitatively.

Key words atmospheric optics; atmospheric coherence length; isoplanatic angle; log-normal distribution; correlation analysis

OCIS codes 010.1330; 010.1290; 010.1080

收稿日期: 2016-04-07; 收到修改稿日期: 2016-04-25

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。E-mail: xbli@aiofm.ac.cn

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,并引起光束扩展、漂移和闪烁等大气光学湍流效应。大气相干长度 r_0 和等晕角 θ_0 是描述光束传输路径上整层光学湍流效应的基本参数。大气湍流将口径为 D 的光学系统的实际分辨率限制在 λ/r_0 ,将光学系统可校正的角视场范围限制在 θ_0 以内。不同站点大气相干长度和等晕角的观测和特征分析,对于天文选址决策、自适应光学和激光传输工程的系统设计具有重要的应用价值。

天文选址工程中,大气相干长度和等晕角是评估天文台址质量的重要指标。近年来国内外不断有文献报道不同站址大气相干长度和等晕角的测量结果。如国外 Walters 等^[1]对美国大陆、Puerto Rico 和夏威夷群岛 20 年的测量结果进行了统计分析; Skidmore 等^[2]分析了美国 TMT 选址项目中 Cerro Tolar 等 5 个站址大气相干长度和等晕角测量值的统计分布,并研究了测量值的时间变化特征; Sabil 等^[3]给出了欧洲 ELT 选址项目中 Aklim 和 ORM 等站址的相干长度和等晕角。自 20 世纪 50 年代开始,国内研究人员为寻找优良天文台址进行着不懈努力,先后在云南昆明^[4]、河北兴隆^[5]、云南丽江^[6]、西藏阿里^[7]、广东茂名^[8]等地进行了观测,初步得到了中国不同地区大气相干长度和等晕角。然而随着时间和气候变化,当地环境发展会对站址天文环境产生影响;同时我国幅员辽阔、地形复杂,决定了我国典型区域分布众多,以上研究远远不足,仍需对更多区域进行长期观测。

2012 年以来,中国科学院安徽光学精密机械研究所在青海、新疆、甘肃等地区进行了长期测量。利用自行研制的大气相干长度和等晕角综合测量系统^[9],测量得到大气相干长度和等晕角。本文对大气相干长度和等晕角的测量结果进行了统计分析,给出了不同地区不同月份大气相干长度和等晕角的日变化特征,统计了不同时段平均值和标准差,同时分析了大气相干长度和等晕角的相关性。

2 测量原理与仪器构造

大气相干长度 r_0 的测量方法有多种,如恒星拖影法、光电扫描法、剪切干涉法和差分像运动法等。其中差分像运动法(DIMM)是测量大气相干长度的标准方法^[2]。等晕角 θ_0 的测量方法主要有恒星闪烁法。中国科学院安徽光学精密机械研究所研制的大气相干长度和等晕角综合测量系统,利用差分像运动法测量光束的到达角起伏方差来确定大气相干长度,利用恒星闪烁法测量光强起伏来计算等晕角。该仪器以恒星作为光源,可以实现白天和夜间连续测量。为分析方便,将不同天顶角处的观测结果转化为天顶角为 0 的垂直大气相干长度和垂直等晕角,并据此进行理论说明和数据分析。

2.1 测量原理

Freid^[10]在研究受湍流大气影响的望远镜光学分辨率时引入了大气相干长度,表达式为

$$D(r) = 6.88 (r/r_0)^{5/3}, \quad (1)$$

即当接收光学系统的半径 r 等于相干长度 r_0 时波结构函数 $D(r)$ 的值为 6.88 rad^2 ,此时系统的分辨率达到最佳极限。Lutomirski 等^[11]利用随机介质中波的传播理论将大气相干长度表示为折射率结构常数的路径积分,对于平面波,大气相干长度 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 λ 是波长,本文 λ 取 500 nm , $C_n^2(h)$ 是折射率结构常数, h_{\min} 是地面参考高度。

利用差分像运动法测量大气相干长度时,信标光通过两子孔径在光学系统焦平面形成两像的质心相对位置方差与大气相干长度满足一定关系。测量时分纵向和横向进行处理,具体表达式为^[12]

$$r_{0l} = \left\{ \frac{2 [0.179 (\lambda/D)^{1/3} - 0.0968 (\lambda/d)^{1/3}] \lambda^{5/3}}{\sigma_l^2} \right\}^{3/5}, \quad (3)$$

$$r_{0t} = \left\{ \frac{2 [0.179 (\lambda/D)^{1/3} - 0.145 (\lambda/d)^{1/3}] \lambda^{5/3}}{\sigma_t^2} \right\}^{3/5}, \quad (4)$$

式中 D 为子瞳直径, d 为子瞳间距, σ_l^2 和 σ_t^2 分别为垂直和平行于两子孔连线的像运动方差。 r_{0l} 和 r_{0t} 对应于纵向和横向方差算出的 r_0 分量。在湍流均匀各向同性假设下,取 r_{0l} 和 r_{0t} 的算术平均值,得到 r_0 。

等晕角表达式为^[13]

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

理论计算表明,选择合适的孔径直径,可使孔径接收的相对光强起伏方差的路径权重函数匹配等晕角测量要求路径的 3/5 次方,并使下式成立

$$\theta_0 = 0.09676 [\lg(1 + \sigma_s^2 / \langle S \rangle^2)]^{-3/5}, \quad (6)$$

式中 σ_s^2 表示光强起伏方差, $\langle S \rangle$ 表示孔径接收的光强平均值。

2.2 仪器构造

所用仪器如图 1(a)所示,该仪器在晴朗无云的天气条件下能够实现全天 24 h 不间断测量。仪器分成光学接收、光电转化系统和数据处理系统两大部分,前者包括卡塞格林式光学望远镜、光学成像系统和 CCD 摄像机;后者包括视频卡、计算机和数据处理软件。图 1(b)为该仪器的测量原理图,望远镜主镜前安装光阑,光阑上有两圆形通光孔,两通光孔各自安装一楔镜。通过楔镜对光线的偏折作用,星光在 CCD 探测面成两像。通过计算两像质心位置的相对偏差,根据差分像运动原理得到整层大气相干长度。通过计算每一个星像的强度起伏计算相对光强起伏方差,可得到等晕角。实验期间 CCD 采集频率 75 Hz,曝光时间 2 ms,采集帧数 1000 frame,采集时间 13 s。大气相干长度和等晕角综合测量系统对仪器本身的抖动、接收系统的光学质量、望远镜焦距的温度效应以及星像亮度的起伏等因素不敏感,测量精度良好。汪建业等^[14]利用激光雷达验证了差分像运动测量法测量大气相干长度的可靠性,于龙昆等^[8,13,15]理论分析了大气相干长度和等晕角测量数据的误差来源,详细分析可参阅相关文献。

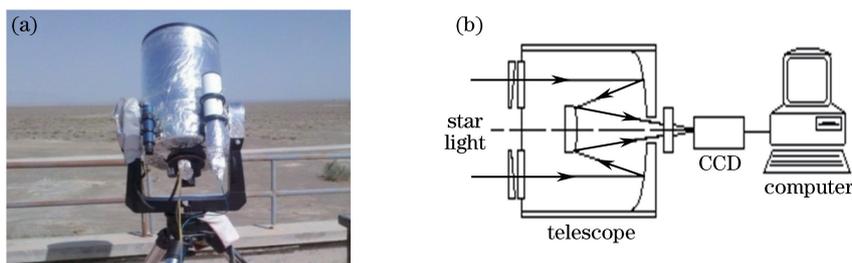


图 1 (a) r_0 和 θ_0 综合测量系统; (b) 其测量原理图

Fig. 1 (a) Synthetical measuring system of r_0 and θ_0 ; (b) its measuring principle diagram

3 测量结果分析

新疆库尔勒观测点海拔 1300 m,地处欧亚大陆和新疆腹心地带,温带大陆性干旱气候特征显著。青海德令哈观测场海拔 3200 m,位于柴达木盆地东北边缘,属高原大陆性气候。云南丽江观测点处于低纬高原,海拔 3200 m,干湿季节分明,属高原型西南季风气候。山西五寨观测点海拔 2800 m,地处晋西北黄土高原,一年中多受季风影响,四季分明,属亚寒带大陆性气候。甘肃地区先后在嘉峪关、张掖和武威分别进行 8、9、10 月份的观测,三个观测场均位于河西走廊上,海拔在 1500 m 左右,属温带大陆性气候。本文以上述地区为代表,分析中国西部相应气候地形条件下站址的天文条件。

3.1 r_0 和 θ_0 日变化特征

图 2 给出了 2012 年 10 月 19 日青海地区 5 min 平均后 r_0 和 θ_0 的日变化,测量地点日出时刻约为 07:00,日落时刻为 20:00 左右。由图 2 可以看出,白天 r_0 和 θ_0 的值较小,这是由于太阳加热大气使湍流活动增强,整层湍流强度变大;而夜间地表冷却辐射热量,湍流活动减弱,整层湍流强度较小。在日出后 1 h 和日落前 1 h 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^[16],此时 r_0 和 θ_0 开始变大或减小。大气相干长度的日变化特征同近地面光学湍流变化特征一致,而等晕角在 20:00 的变化趋势与之不同,这是因为低层湍流对大气相干长度的影响较大,而等晕角对高空湍流较为敏感,使得 r_0 和 θ_0 的变化不同步。

图 3 给出了不同地区大气相干长度月平均值的日变化,可以看出不同地区不同月份大气相干长度的日

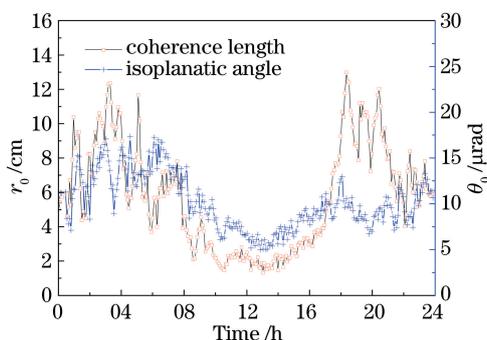


图 2 r_0 和 θ_0 典型日变化

Fig. 2 Temporal daily evolution of r_0 and θ_0

变化趋势相同,均是白天小夜间大,早晚各有一个转换时刻,在转换时刻大气相干长度的值达到极大。同一地区不同月份大气相干长度的值大小不同。从新疆地区来看,夜间秋季小于春季和夏季,白天秋季最大。由于不同地区不同月份的日出和日落时间不同,早晨和傍晚的转换时刻也不同,如新疆、青海和甘肃地区 10 月份日落时刻较早,因而傍晚转换时刻比春季和夏季提前。比较而言,傍晚转换时刻的大气相干长度较大,往往是每天的最大值。

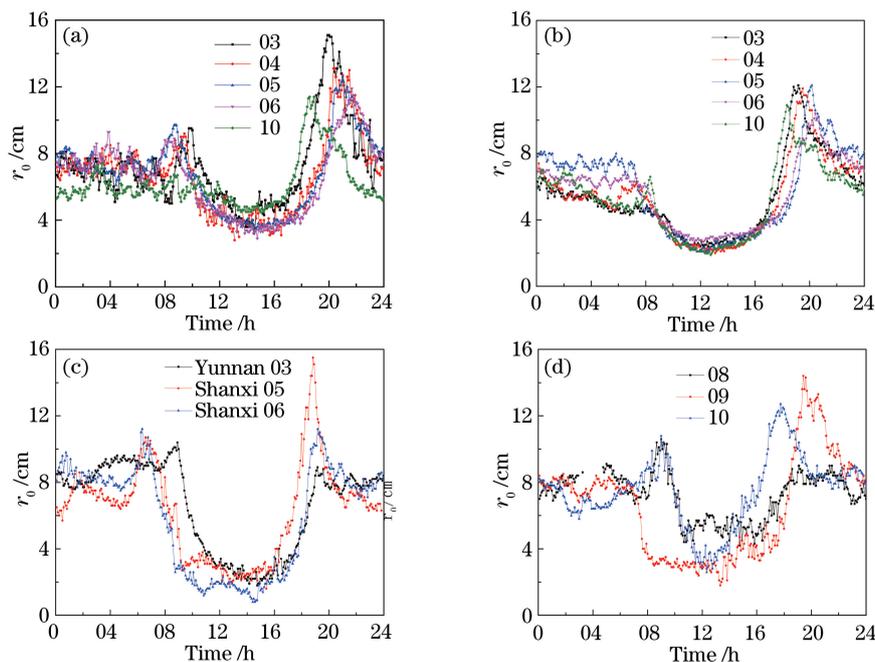


图 3 不同地区 r_0 月平均值日变化。(a)新疆;(b)青海;(c)云南和山西;(d)甘肃

Fig. 3 Daily evolution of r_0 monthly mean in different months. (a) Xinjiang; (b) Qinghai; (c) Yunnan and Shanxi; (d) Gansu

图 4 是不同地区等晕角月平均值的日变化,可以看出同一地区不同月份等晕角的日变化趋势相同,如新疆和青海地区各月及山西地区 5 月和 6 月;不同地区不同月份等晕角的日变化趋势不同。从日变化趋势来看,等晕角的变化趋势有 3 种:1) 等晕角日变化较平缓,转换时刻附近偏大,但没有出现明显的峰值,如新疆和青海地区各月及云南地区 3 月。2) 等晕角的值白天小夜间大,在早晚转换时刻附近各有一个明显的峰值,如山西地区 5 月和 6 月。3) 等晕角日变化平缓无规律,没有明显的峰值,如甘肃地区 8 月到 10 月。等晕角变化趋势的不同可能是因为不同地区地形和高空大气运动强弱有差异,造成高空湍流强弱不同,进而造成等晕角的日变化趋势不同,具体原因有待进一步研究。

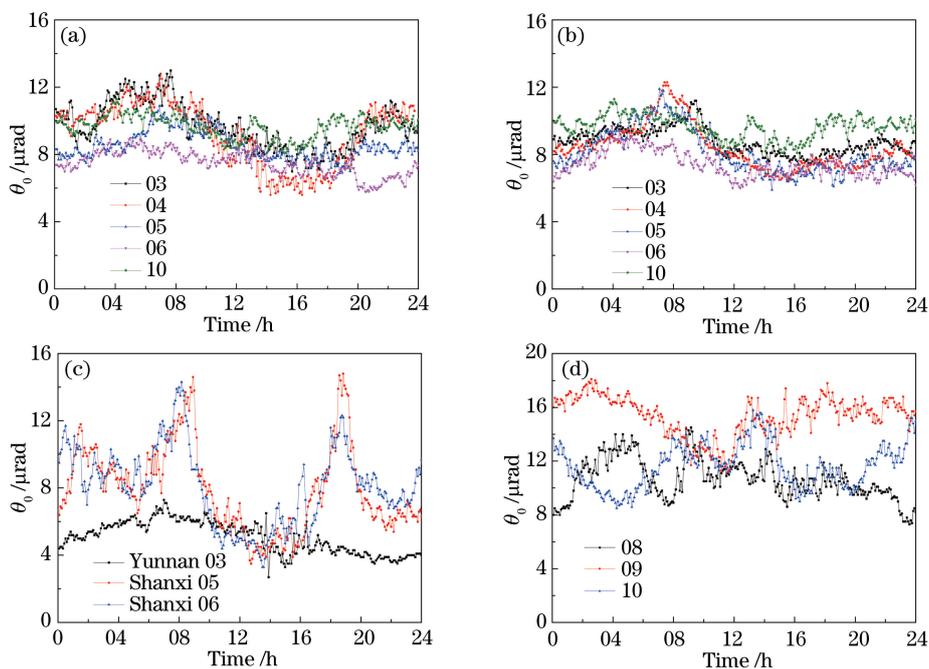


图 4 不同地区 θ_0 月平均值日变化。(a)新疆;(b)青海;(c)云南和山西;(d)甘肃

Fig. 4 Daily evolution of θ_0 monthly mean in different months. (a) Xinjiang; (b) Qinghai; (c) Yunnan and Shanxi; (d) Gansu

3.2 r_0 和 θ_0 月变化特征

由于大气相干长度和等晕角的值在不同时段差别明显,为了评估站址不同时段整层湍流效应强弱,对大气相干长度和等晕角进行分时段统计。以早晚两个转换时刻的前后 1 h 为 4 个节点,将一天分为夜间、早晨转换时刻、白天和傍晚转换时刻 4 个时段。由于早晨转换时刻不明显,本文仅对夜间、白天和傍晚转换时刻三个时段进行分析。为了方便画图,将图 3 中不同地区不同月份按实测先后顺序进行编号。新疆 3~10 月为 1~5 号,青海 3~10 月为 6~10 号,云南 3 月为 11 号,山西 5~6 月为 12~13 号,甘肃 8~10 月为 14~16 号。图 5 为不同时段 r_0 和 θ_0 月平均值和标准差。由图 5(a)可知,不同地区不同月份白天和夜间大气相干长度的值差别不大,大气相干长度的值白天在 4 cm 附近分布,夜间为 7.5 cm 左右。傍晚转换时刻大气相干长度的值明显大于白天和夜间,其中云南 3 月和甘肃 8 月最小,分别为 8.86 和 8.97 cm;新疆 3 月和山西 5 月最大,均大于 15 cm。图 5(b)是不同时段等晕角的平均值和标准差,可以看出除山西 5 月和 6 月以外,不同地区不同月份三个时段等晕角值的差别不明显。而如上文分析,山西 5 月和 6 月等晕角转换时刻有明显的峰值,因而平均后傍晚转换时刻的值大于其他时段。甘肃 9 月三个时段等晕角最大,均大于 16 cm。综合上述分析可以发现,山西和甘肃地区整层大气相干长度和等晕角的平均值较大,整层湍流效应弱于其他观测地区。

将得到的不同时段大气相干长度和等晕角的平均值与 Walters 等^[1]的分析结果比较发现,虽然个别地

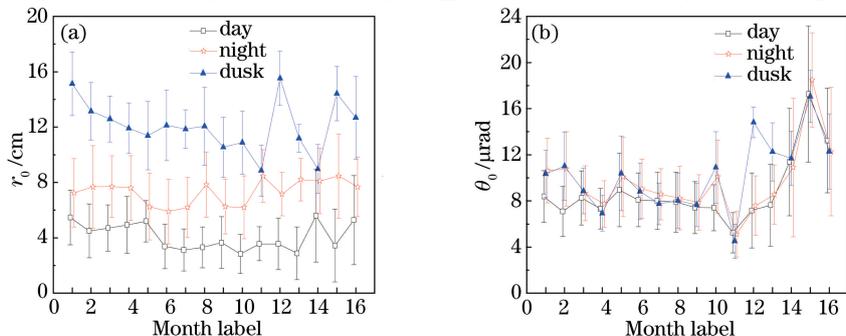


图 5 不同时段 r_0 和 θ_0 月平均值和标准差。(a)大气相干长度 r_0 ; (b)等晕角 θ_0

Fig. 5 Monthly mean and standard deviation of r_0 and θ_0 in different periods.

(a) Atmospheric coherence length r_0 ; (b) isoplanatic angle θ_0

区的值大小略有差异,但结果在量级上是一致的。

4 讨 论

4.1 r_0 和 θ_0 概率分布

为了更详细地了解实验期间各地区大气相干长度和等晕角的分布特征,对剔除不合理值后的原始数据进行统计。Walters 等^[1]分析了大气相干长度和等晕角的统计分布并指出,相比于正态分布, r_0 和 θ_0 更符合对数正态分布。图 6 和图 7 分别给出了不同地区 r_0 和 θ_0 的对数概率分布图。由图 6 可知,总体上 r_0 趋向对数正态分布,虽然不同地区不同月份 $\ln(r_0)$ 的概率分布的中心略有差别,但基本在 $\ln(r_0)=2$ 附近,说明大气相干长度 $r_0=7.4$ 是最大概率;青海和山西地区的分布呈双峰结构,这可能是由于 r_0 一般具有典型日变化特征,两地白天和夜间的分布差别大,使概率分布有两个概率极大值;由图 6、7 中的(c)、(d)可以看出, r_0 在 $\ln(r_0)<1$ 处有明显的拖尾现象。

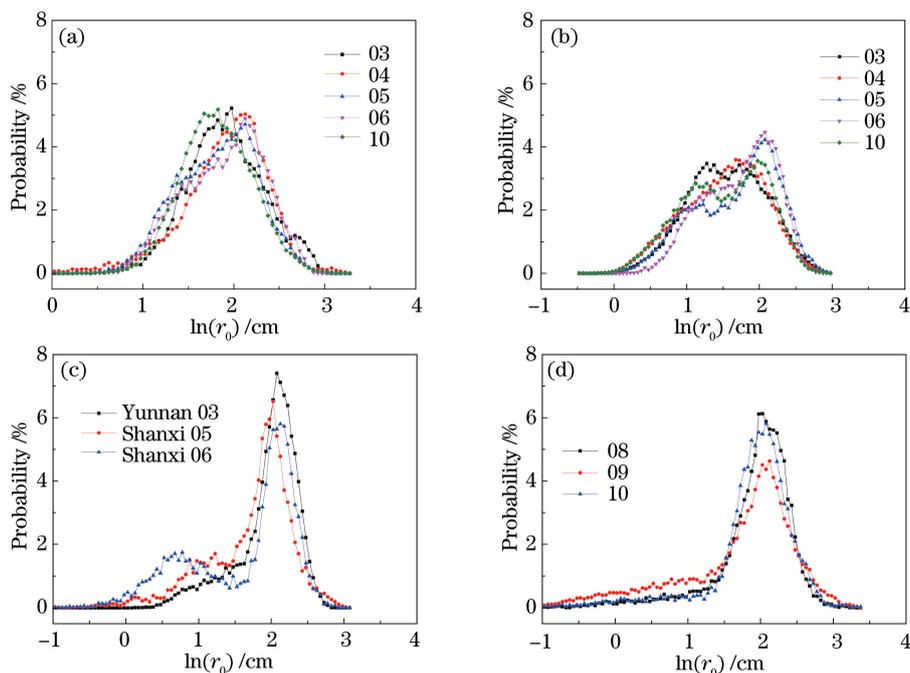


图 6 不同月份 $\ln(r_0)$ 概率分布图。(a)新疆;(b)青海;(c)云南和山西;(d)甘肃

Fig. 6 Probability distributions of $\ln(r_0)$ in different months. (a) Xinjiang; (b) Qinghai; (c) Yunnan and Shanxi; (d) Gansu

图 7(a)~(d)为不同月份等晕角 θ_0 的对数概率分布图。可以看出, θ_0 近似服从对数正态分布,同一地区不同月份 $\ln(\theta_0)$ 的概率分布中心位置差别不明显,如新疆、青海和山西地区各月;3 月份不同地区概率分布中心差别较大,新疆和青海在 2.2 附近,云南为 1.5; 5、6 月份新疆、青海和山西地区 $\ln(\theta_0)$ 的概率分布中心均在 2.2 附近,差别不大。不同地区不同月份概率分布中心差别较大,如云南 3 月和甘肃 10 月出现极大概率时 $\ln(\theta_0)$ 分别为 1.5 和 2.9。由于等晕角白天和夜间的值差别不大,所以 $\ln(\theta_0)$ 的概率分布没有出现双峰结构。

统计学中常用样本偏度 Sk 和样本峰度 Ku 描述样本分布同正态分布的偏离程度^[17]。 Sk 反映总体分布的非对称性, Ku 反映总体分布在概率极大值点附近的尖峭程度。对于正态分布, $Sk=0, Ku=3$ 。为了定量地评估 r_0 和 θ_0 与对数正态分布的偏离程度,图 8 给出了不同地区不同月份 r_0 和 θ_0 样本偏度和样本峰度的分布。可以看出,除极个别月份外, $\ln(r_0)$ 和 $\ln(\theta_0)$ 的样本偏度小于 0,且在 $-1 \sim 0$ 之间,说明这些月份 $\ln(r_0)$ 和 $\ln(\theta_0)$ 小于其平均值的概率较大,这与上文分析的拖尾现象是一致的。除了新疆地区 2 月和甘肃地区各月外,其他月份 $\ln(r_0)$ 和 $\ln(\theta_0)$ 的样本峰度均在 3 附近变化。

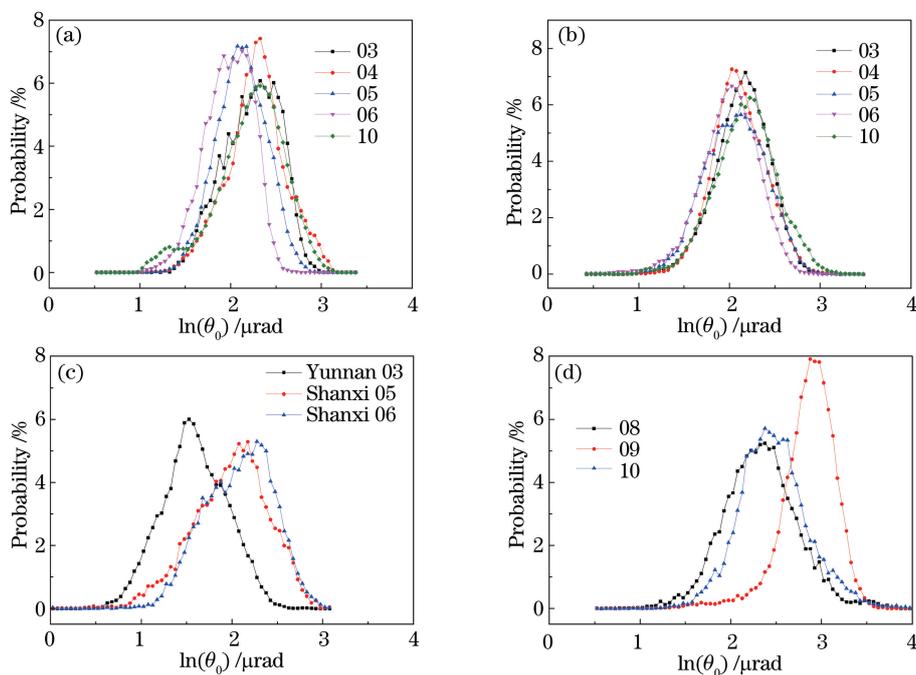


图 7 不同月份 $\ln(\theta_0)$ 概率分布图。(a)新疆；(b)青海；(c)云南和山西；(d)甘肃

Fig. 7 Probability distributions of $\ln(\theta_0)$ in different months. (a) Xinjiang; (b) Qinghai; (c) Yunnan and Shanxi; (d) Gansu

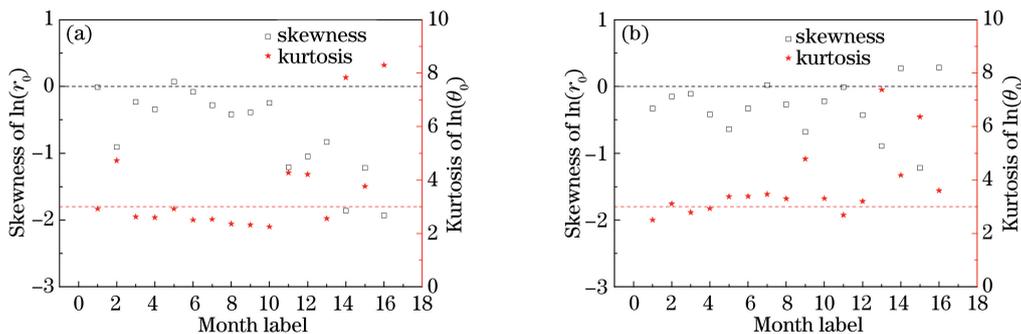
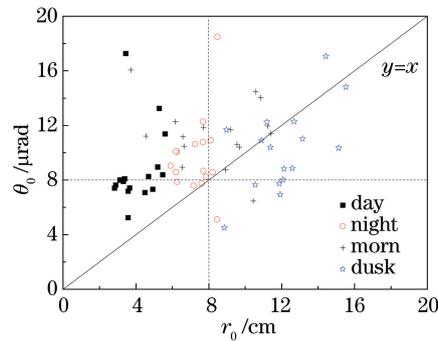


图 8 $\ln(r_0)$ 和 $\ln(\theta_0)$ 的样本偏度和样本峰度。(a)大气相干长度对数 $\ln(r_0)$ ；(b)等晕角对数 $\ln(\theta_0)$

Fig. 8 Sample skewness and sample kurtosis of $\ln(r_0)$ and $\ln(\theta_0)$. (a) Logarithm of atmospheric coherence length $\ln(r_0)$ ；
(b) logarithm of isoplanatic angle $\ln(\theta_0)$

4.2 r_0 和 θ_0 相关性分析

作为衡量整层湍流效应强弱的参数, r_0 和 θ_0 都是折射率结构常数沿路径的积分。然而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, 这是因为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。对不同高度折射率结构常数的敏感性差异导致了 r_0 和 θ_0 的大小变化不同步, 为了定性评估不同月份这种差异, 图 9 对不同地区不同时段 r_0 和 θ_0 的月平均值进行相关性分析, r_0 和 θ_0 的单位分别为 cm 和 μrad 。可以看出, 总体上看 θ_0 随着 r_0 的增加而变大, 当 r_0 较大, 如 $r_0 > 8$ cm 时, 大部分月份 $\theta_0 > 8 \mu\text{rad}$ 。以 $r_0 = \theta_0$ 作为参考, 定性分析不同时段高层湍流和近地湍流对 r_0 和 θ_0 的相对贡献。白天近地层强湍流使 r_0 较小, 而此时等晕角较大, 说明白天高空湍流弱; 夜间, 近地层湍流变弱, r_0 变大, 等晕角增加, 高空湍流可能减小或不变。傍晚转换时刻 r_0 较大, 而 θ_0 大概率分布在直线 $y = x$ 下方, 说明这些月份夜间转换时刻近地层湍流弱而高空湍流强。

图 9 r_0 和 θ_0 相关性分析Fig. 9 Correlation analysis of r_0 and θ_0 .

5 结 论

利用大气相干长度和等晕角综合测量系统,在新疆、青海和甘肃等地区进行了长期测量。对大气相干长度和等晕角的测量结果进行了统计分析,主要结论如下:

1) 不同地区不同月份大气相干长度的日变化趋势相同,均是白天小夜间大,早晚各有一个转换时刻,在转换时刻大气相干长度的值达到极大。从平均值来看,大气相干长度的值白天在 4 cm 附近变化,夜间为 7.5 cm 左右。新疆 3 月和山西 5 月傍晚转换时刻最大,分别为 15.1 cm 和 15.5 cm。

2) 同一地区不同月份等晕角的日变化趋势相同;不同地区不同月份等晕角的日变化趋势不同,大致可以分为 3 种变化趋势:① 等晕角日变化较平缓,转换时刻附近偏大,但没有出现明显的峰值;② 等晕角的值白天小夜间大,在早晚转换时刻附近各有一个明显的峰值;③ 等晕角日变化平缓无规律,没有明显的峰值。

3) 分白天、夜间、傍晚转换时刻三个时段,统计得到不同地区不同月份大气相干长度和等晕角的平均值和标准差。分析表明,山西和甘肃地区整层大气相干长度和等晕角的平均值较大,整层光学湍流效应弱于其他观测地区。

4) 对原始数据进行概率分布统计。分析结果表明大气相干长度近似满足对数正态分布,青海和山西地区对数概率分布图出现双峰结构;等晕角近似满足对数正态分布。用样本偏度和样本峰度描述样本分布同正态分布的偏离程度, $\ln(r_0)$ 和 $\ln(\theta_0)$ 的样本偏度小于 0,且在 $-1 \sim 0$ 之间;除了新疆地区 2 月和甘肃地区各月外,其他月份 $\ln(r_0)$ 和 $\ln(\theta_0)$ 的样本峰度均在 3 附近变化。

5) 分析了大气相干长度和等晕角的相关性,从变化趋势上看,等晕角随着大气相干长度的增加而变大,大气相干长度大于 8 cm 时,不同月份等晕角大概率大于 8%;定性评估了不同时段高层湍流和近地湍流对大气相干长度和等晕角的贡献,白天近地层湍流强,高空湍流弱,傍晚转换时刻近地层湍流弱而高空湍流强。

基于多年实测数据对不同地区不同月份整层湍流效应进行了分析,在现有实测数据基础上对不同地区整层光学湍流效应进行分析。然而对于站址天文条件优劣的评估需要结合多年数据、多种参数综合考虑,为了得到更可靠全面的结论,下一步应继续对相关地区进行长期观测,并结合其他参数对不同地区进行比较分析。

参 考 文 献

- 1 Walters D L, Bradford L W. Measurements of r_0 and θ_0 : Two decades and 18 sites[J]. Applied Optics, 1997, 36(30): 7876-7886.
 - 2 Skidmore W, Els S, Travouillon T, *et al.* Thirty meter telescope site testing V: Seeing and isoplanatic angle[J]. Publ Astro Soc Pac, 2009, 121(884): 1151-1166.
 - 3 Sabil M, Benkhaldoun Z, Habib A, *et al.* Astroclimate at Jbel Aklim site in Moroccan anti-atlas: 2008-2010 seeing and isoplanatic angle statistics from the E-ELT site testing data[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9145: 91453E.
 - 4 Song Zhengfang, Yang Gaochao, Liu Xiaochun, *et al.* Measurements of atmospheric seeing in Yunnan observatory[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 1997, 14(1): 68-74.
- 宋正方, 杨高潮, 刘晓春, 等. 云南天文台大气视宁度测量[J]. 量子电子学报, 1997, 14(1): 68-74.

- 5 Song Zhengfang, Zeng Zongyong, Yang Gaochao, *et al.* The measurements of atmospheric seeing at Xinglong observation station[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 1998, 15(1): 93-98.
宋正方, 曾宗泳, 杨高潮, 等. 兴隆大气视宁度测量[J]. 量子电子学报, 1998, 15(1): 93-98.
- 6 Cen Xuefen, Qian Tongling, Wang Jiancheng, *et al.* The seeing at Gaomeigu in 2000 and 2001 [J]. Publications of Yunnan Observatory, 2002, 4(6): 45-50.
岑学奋, 钱铜铃, 王建成, 等. 高美古的大气视宁度[J]. 云南天文台台刊, 2002, 4(6): 45-50.
- 7 Yao Y Q, Wang H S, Liu L Y, *et al.* Site characterization studies in high plateau of Tibet [J]. SPIE, 2012, 8444: 84441K.
- 8 Yu Longkun, Wu Yi, Hou Zaihong, *et al.* Measurement and analysis of whole layer atmospheric coherence length at seaside of South China Sea [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(11): 3046-3049.
于龙昆, 吴毅, 侯再红, 等. 南海海边整层大气相干长度的测量与分析[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(11): 3046-3049.
- 9 Yang Gaochao, Liu Xiaochun, Fan Chengyu, *et al.* Measurement of atmospheric coherence length and isoplanatic angle [J]. High Power Laser and Particle Beams, 1994, 6(2): 215-220.
杨高潮, 刘晓春, 范承玉, 等. 大气相干长度与等晕角的测量[J]. 强激光与粒子束, 1994, 6(2): 215-220.
- 10 Fried D L. Optical resolution through a randomly inhomogeneous medium for very long and veryshort exposures [J]. Journal of the Optical Society of America, 1966, 56(10): 1372-1379.
- 11 Lutomirski R F, Yura H T. Wave structure function and mutual coherence function of an optical wave in a turbulent atmosphere [J]. J Opt Soc Am, 1971, 61(4): 482-487.
- 12 Roddier F. The effects of atmospheric turbulence in optical astronomy [J]. Progress in Optics, 1981, 19(8): 281-376.
- 13 Yu Longkun, Shen Hong, Jing Xu, *et al.* Study on the measurement of isoplanatic angle using stellar scintillation [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(3): 0301001.
于龙昆, 沈红, 靖旭, 等. 利用恒星闪烁测量等晕角的研究[J]. 光学学报, 2014, 34(3): 0301001.
- 14 Wang Jianye, Rao Ruizhong, Liu Xiaochun. Comparison of experimental study of atmospheric coherence length [J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(1): 64-66.
汪建业, 饶瑞中, 刘晓春. 大气相干长度的对比实验研究[J]. 中国激光, 2005, 32(1): 64-66.
- 15 Yu Longkun, Wu Yi, Hou Zaihong, *et al.* Study on the measurement of coherence length by differential image motion monitor [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(12): 1201004.
于龙昆, 吴毅, 侯再红, 等. 利用差分像运动监测仪法测大气相干长度的研究[J]. 光学学报, 2013, 33(12): 1201004.
- 16 Chen Xiaowei, Sun Gang, Liu Qing, *et al.* Contribution of the surface layer to the integral turbulence in Northwest Plateau [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(11): 1101006.
陈小威, 孙刚, 刘庆, 等. 近地面湍流对整层湍流的贡献及相关研究[J]. 光学学报, 2015, 35(11): 1101006.
- 17 Sheng Zhou, Xie Shiqian, Pan Chengyi, *et al.* Probability theory and mathematical statistics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2001: 250-252.
盛骤, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2001: 250-252.