

新疆戈壁地区近湖面大气湍流强度测量与分析

宗 飞¹, 张志刚¹, 王 柯¹, 霍 文², 胡月宏¹, 常金勇¹, 强希文¹

(1. 西北核技术研究所, 陕西 西安 710024;

2. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 新疆 乌鲁木齐 830002)

摘 要: 利用大气相干长度测量仪和温度脉动仪, 在新疆戈壁地区湖面测量了近水面大气湍流强度, 将大气折射率结构常数归算到等路径的大气相干长度, 进行了比对分析。选择晴好天气, 对近水面大气湍流强度进行统计分析, 给出了典型的近水面大气湍流强度变化特性。结果显示, 秋季晨昏弱湍流时段不明显, 持续时间约 1 h, 日出弱湍流时段主要分布在 9:00 左右, 日落弱湍流时段主要分布在 21:00 左右; 白天强湍流时段持续时间长达 6~8 h, 主要分布在 12:00~20:00; 夜间湍流明显强于白天, 相对于陆地较为平稳。

关键词: 大气光学; 湍流; 折射率结构常数; 大气相干长度

中图分类号: TN24 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)S-0104-05

Measurement and analysis of atmospheric turbulence nearby lake in Gobi area of Xinjiang

Zong Fei¹, Zhang Zhigang¹, Wang Ke¹, Huo Wen², Hu Yuehong¹, Chang Jinyong¹, Qiang Xiwen¹

(1. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China;

2. Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, China)

Abstract: In the Gobi region of Xinjiang, the system of atmospheric coherent length measurement and micro-thermal meter were set up in the surface of lake for measuring atmospheric turbulence. The refractive index structure parameter was used to compute the atmospheric coherence length, the distinctness was analyzed also. The result shows that the time-interval of weak atmospheric turbulence is not obvious at sunset and sunrise in the autumn. At sunset, the time-interval of weak atmospheric turbulence mainly distributes about 9:00; at sunrise, the time-interval of weak atmospheric turbulence mainly distributes about 21:00. In the daytime, The time-interval of strong atmospheric turbulence lasts six to eight hours, and mainly distributes from 12:00 to 20:00. The strength of atmospheric turbulence in the nighttime is obvious stronger in the daytime, it is stabler by in the land.

Key words: atmospheric optics; turbulence; refractive index structure; atmospheric coherence length

收稿日期: 2015-10-05; 修订日期: 2015-11-03

基金项目: 中国沙漠气象科学研究基金(SQJ2014001)

作者简介: 宗飞(1984-), 男, 工程师, 主要从事大气光学方面的研究。Email: zfseabluesky@126.com

0 引言

光波在湍流大气中传输时,大气折射率的起伏会导致光波波前的畸变,破坏光的相干性,造成光学图像的模糊,是造成远距离观测困难的主要原因^[1-5]。准确可靠地分析大气湍流对光传输成像的影响程度需要对大气湍流准确测量。目前局域的温度湍流场主要使用温度脉动仪进行测量,也在发展折射率起伏的光学测量技术;路径大气湍流强度则主要使用大气相干长度仪(DIMM)进行测量。

对于大气湍流强度的测量与分析,近年来国内外不少学者开展了这方面的研究。中国科学院安徽光学精密机械研究所的孙刚等人等利用温度脉动探空仪对合肥地区的大气湍流强度廓线进行了长期测量^[6],分析了合肥地区和北方干旱地区(0~30 km)大气湍流强度随高度变化的分布廓线和分布特性;吴晓庆等人分析了下垫面为草地和水面的大气折射率结构常数变化规律^[7],给出了复杂地形大气湍流强度变化规律;汪建业等利用大气相干长度仪和闪烁仪开展了比对测量实验^[8],验证了基于到达角起伏测量法和闪烁法测量大气湍流强度的可靠性;封双连等人利用温度脉动仪对新疆戈壁地区近地面大气折射率结构常数进行了测量与分析^[9-10],给出了大气湍流在戈壁环境下的日变化规律。

文中对新疆戈壁地区近水面大气湍流强度进行了测量,利用温度脉动仪开展了湖边大气折射率结构常数,利用大气相干长度仪进行了进水面 5 km 传输路径的大气相干长度,并对测量数据进行了统计分析。

1 测量系统简介

近水面大气湍流强度测量系统由水面传输路径大气相干长度测量系统和大气折射率结构常数测量系统组成,架设在新疆戈壁地区淡水湖面上,其中大气相干长度测量系统用于测量湖面以上高度约 6 m、传输距离约 5 km 的大气相干长度,大气折射率结构常数测量系统用于测量距离湖面高度约 2 m 和 6 m 处的大气折射率结构常数。

大气相干长度测量系统使用差分象运动方差法测量大气相干长度 r_0 ,在望远镜上用两个子瞳(直径为 D ,间距为 d)同时成像,通过测量两光斑质心间距

$\Delta\rho_c$ 的抖动量计算得出 r_0 , 该方法是目前最为常用、且得到普遍认可和标准的大气相干长度测量方法。

$$r_0 = \left[\frac{2f^2 [0.36(\lambda/D)^{\frac{1}{3}} - 0.242(\lambda/d)^{\frac{1}{3}}] \lambda^{\frac{5}{3}}}{\langle \Delta\rho_c^2 \rangle - \langle \Delta\rho_c \rangle^2} \right]^{\frac{3}{5}} \quad (1)$$

温度脉动仪是一种得到广泛使用的大气湍流强度测量仪器,它通过测量距离为 r 的空间两点之间的大气温差起伏(ΔT),给出大气温度结构常数(C_T^2),进而结合平均大气温度(ΔT)和压强(p)给出大气湍流强度(C_n^2):

$$C_T^2 = \frac{\langle [\Delta T(r)]^2 \rangle}{r^{2/3}} \quad (2)$$

$$C_n^2 = \left(\frac{79 \times 10^{-6} p}{T^2} \right)^2 C_T^2 \quad (3)$$

利用测杆/塔,可对近地面数十米高度范围的大气湍流强度高度分布进行测量,利用探空仪携带温度脉动仪,可以对整层大气湍流强度廓线进行测量。

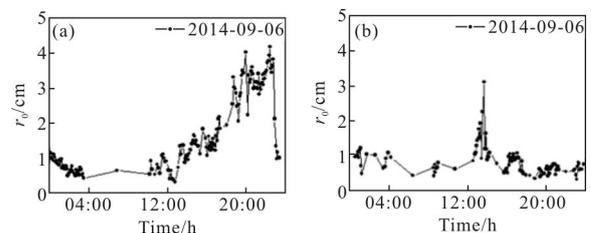
该实验采用的测量仪器是中国科学院安徽光学精密机械研究所研制的大气相干长度仪和大气折射率结构常数测量系统。其中大气相干长度仪子瞳直径 110 mm,子瞳间距 220 mm,焦距 3560 mm。大气折射率结构常数测量系统由 QHTP-II 型温度脉动仪和芬兰 Vaisala 公司生产的 WXT520 气象变送器组成。

2 测量数据及分析

文中所讨论数据为 2014 年 9 月的测量数据。连续测量期间,共取得 19 天测量数据。

2.1 大气相干长度测量数据与分析

对取得的测量数据进行 5 min 平均并绘制数据曲线图,选取测量较为完整的典型数据作为分析对象,所得数据曲线如图 1 所示。由于水平路径距离较长,当水面大气湍流很强时,测量结果超出了大气相干长度仪正常的动态范围,造成强湍流时段数据缺失。测量系统选用典钨灯作为信标光源时,有灯丝熔断现象,也会造成测量中断。



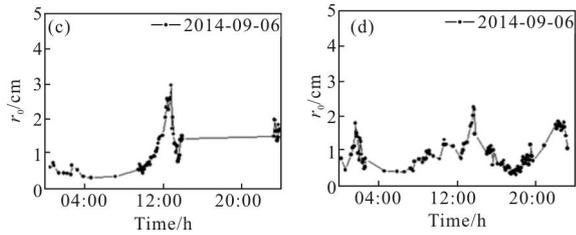


图 1 大气相干长度日变化曲线图

Fig.1 Diurnal variation of r_0

从测量结果可以看出：水面传输路径大气相干长度在 20:00 左右出现全天内测量值较大时段，极大值约为 4 cm，在夜间和上午测量时段大气相干长度数值较小，在 1 cm 左右；水面传输路径大气相干长度在日出前后未出现明显变化，这与戈壁陆地差异较大；午后大气相干长度逐步增大，日落后大气相干长度开始减小；水面传输路径大气相干长度在强、弱湍流转换时段内，有迅速增大和减小的趋势，即一日内强、弱湍流时段的转换时间较短。

2.2 大气折射率结构常数测量数据与分析

由于大气湍流属于随机变量，为分析两台仪器所测数据的整体变化规律，将两个温度脉动仪捆绑在一起，悬挂于距离湖面高度约 6 m 处，实施连续测量。测量数据进行了 5 min 平均，数据变化曲线图如图 2 所示。

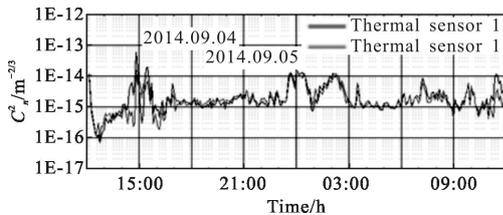


图 2 温度脉动仪测量数据对比

Fig.2 Comparison of test value with two micro-thermal sensors

从图 2 中可以看出，两组测量数据整体变化规律非常一致，说明测量设备的性能稳定；两组测量数据又有所差别，且相对大小随时间不断变化，说明测量设备反映灵敏、精确度高。大气折射率结构常数测量数据日变化曲线图如图 3 所示，其中大气折射率结构常数测量数据进行了 5 min 平均，温度、相对湿度、气压、风速和风向数据为甄别后的原始数据。

从测量结果可以看出，水面大气湍流在日出时段存在不明显的弱湍流，持续时间小于 1 h，大致出现在 9:00 左右，距湖面 6 m 高度处的大气折射率结

构常数接近 $1E-15 m^{-2/3}$ 数量级；正午时段存在明显的强湍流，持续时间长达 6~8 h，主要分布在 12:00~20:00，距湖面 6 m 高度处的大气折射率结构常数接近 $1E-14 m^{-2/3}$ 数量级；日落时段存在不明显的弱湍流，持续时间小于 1 h，大致出现在 21:00 左右，距湖面 6 m 高度处的大气折射率结构常数接近 $1E-15 m^{-2/3}$ 数量级，有时能达到 $1E-16 m^{-2/3}$ 数量级；夜间时段湍流变化较为平稳，距湖面 2 m 高度处大气湍流变化范围在 1~2 个量级之间，距湖面 6 m 高度处大气湍流变化范围可超过两个量级，而陆地夜晚湍流变化多会超过两个量级；正午强湍流时段，大气湍流随高度变化较明显，距湖面 2 m 高度处的大气湍流强度大于 6 m，差值最大时达 1 个量级，夜间无明显整体分层，以距湖面 2 m 高度处的大气湍流强度大于 6 m 的情况为主，某些时段内距水面 6 m 高度处的大气湍流强度大于 2 m。

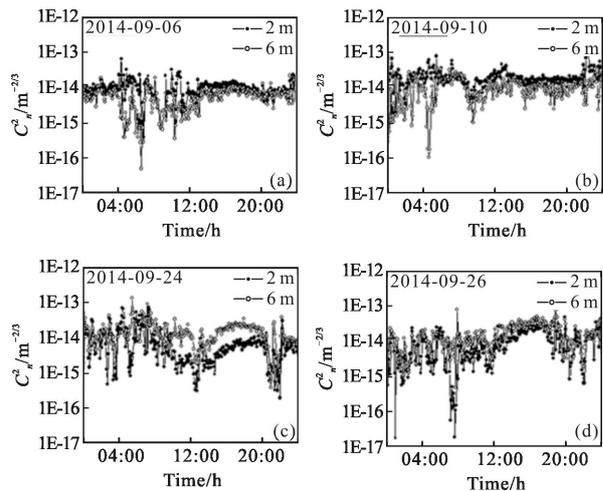
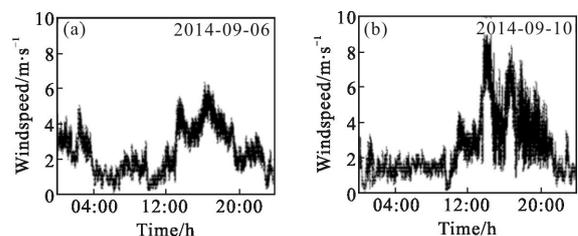


图 3 大气折射率结构常数日变化曲线图

Fig.3 Diurnal variation of C_n^2

2.3 水面环境参数测量与分析

气象传感器可给出大气的温、湿、压、风速、风向 5 个参量。其中风速的变化规律如图 4 所示，湖面风速一般小于 6 m/s，下午时段呈现先增大后减小的趋势，在 16:00 左右出现峰值。



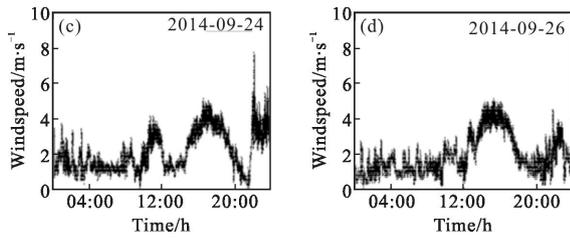


图 4 风速的日变化曲线图

Fig.4 Diurnal variation of wind speed

对于温、湿、压、风向选取典型的数据(9月10日、9月24日数据)进行分析,如图5所示。温度与陆地日变化趋势一致,在日出前达到最小值,日出后逐渐增大,在正午后两小时达到最大值,随后逐渐减小;相对湿度无明显日变化规律;气压全天变化范围小于10 hPa,变化速率缓慢,主要呈现夜晚高、白天低的趋势,在20:00左右常出现极小值;由于测点位于湖的东南侧,风向以东南风和西北风为主,大约在10:00左右开始以西北风为主,在21:00左右变为以东南风为主。

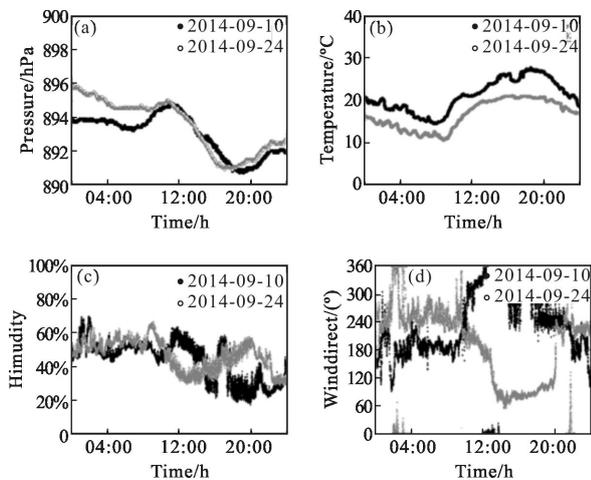


图 5 常规气象参数日变化曲线图

Fig.5 Diurnal variation of meteorologic data

2.4 两套系统测量数据的比对与分析

将水面大气折射率结构常数测量系统所测大气湍流强度数据进行5 min平均,再进行反演给出对应的大气相干长度并与水面传输路径大气相干长度测量系统给出的大气相干长度进行对比,选取了9月10日和24日2天较有代表性的数据,所得数据曲线如图6所示。

从9月10日的实测图与反演图对比可以看出:两者的变化趋势基本一致,全天范围内数值大小相

差不多,大气湍流较为平稳。从9月24日的实测图与反演图对比可以看出:在12:00左右均出现了一个湍流较弱时段,其他时间湍流强度大,数值在1 cm以下。

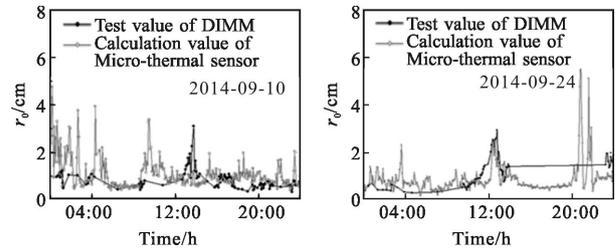


图 6 实测大气相干长度与温度脉动仪反演测量大气相干长度对比

Fig.6 Comparison of r_0 by test value of DIMM and calculation value of micro-thermal sensor

3 结论

水面大气湍流与风具有很好的相关性。在取得的测量数据中,正午强湍流与湖陆风的持续时段几乎完成重合。此外,夜间大气湍流分层明显的时段,与东南风(和湖陆风反向)持续时段几乎完全重合。

水面大气湍流与温湿压相关性不强。从测量结果看,水面大气湍流数据与温湿压数据几乎没有相关性,但从历史近地面测量数据看^[9],大气湍流与温湿压有较大相关性。

通过对比大气相干长度实测数据与大气折射率结构常数反演数据,发现两者整体上具有较好的一致性,但局部存在明显的差异,初步说明了两套测量设备所测数据能够相互验证,更加真实地反映出大气湍流变化特征,导致两者出现差异的主要因素有:大气折射率结构常数测量系统的温度脉动仪及大气环境参数传感器距离湖岸约30 m,因此易受陆地因素的影响;大气相干长度测量仪架设于湖边简易码头,人员走动引起的震动较大,对水面传输路径大气相干长度的测量有影响;测量期间经常出现较强的湖陆风,由于设备不具备防风能力,因此强风对大气相干长度测量仪的测量结果会造成影响;湖面湿度较大,测量期间经常出现60%以上的相对湿度,此时须考虑水汽对大气湍流强度的影响。现有温度脉动仪测量大气折射率结构常数时忽略该部分影响,而大气相干长度仪采用的是光学方法,测量时包含了水汽的影响。

参考文献:

- [1] Fried D L. Optical resolution through a randomly inhomogeneous medium for very long and very short exposures[J]. *J Opt Soc Am*, 1966, 56: 1372-1379.
- [2] Sarazin M, Roddier F. The ESO differential image motion monitor [J]. *Astron Astrophys*, 1990, 227: 294-300.
- [3] Chen Chunyi, Yang Huamin, Tong Shoufeng, et al. Measurement experiment and analysis of laser atmospheric structure constant of refractive index [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35: 422-426. (in Chinese)
陈纯毅, 杨华民, 佟首峰, 等. 激光大气折射率解雇常数测量实验与分析[J]. 红外与激光工程, 20106, 35: 422-426.
- [4] Rao Ruizhong. Modern Atmospheric Optics [M]. Beijing: Science Press, 2012: 4-5. (in Chinese)
饶瑞中. 现代大气光学[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 4-5.
- [5] 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. (in Chinese)
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.
- [6] Sun Gang, Weng Ningquan, Xiao Liming, et al. Profile and character of atmospheric structure constants of refractive index [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(4): 485-490. (in Chinese)
孙刚, 翁宁泉, 肖黎明, 等. 不同地区大气折射率结构常数分布特性及分析[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(4): 485-490.
- [7] Wu Xiaoqing, Ma Chengsheng, Wang Yingjian, et al. Long-term measurements and statistics study on refractive index structure parameter of surface layer [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, 14(2): 551-556. (in Chinese)
吴晓庆, 马成胜, 王英俭, 等. 近地面折射率结构常数的长期测量与统计分析 [J]. 强激光与粒子束, 2002, 14(2): 551-556.
- [8] Wang Jianye, Rao Ruizhong, Liu Xiaochun. Comparison of experimental study of atmospheric coherence length [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(1): 64-66. (in Chinese)
汪建业, 饶瑞中, 刘晓春. 大气相干长度的比对实验研究 [J]. 中国激光, 2005, 32(1): 64-66.
- [9] Feng Shuanglian, Zhang Zhigang, Qiang Xiwen, et al. Statistical analysis of atmospheric refractive index structure constant near ground in Gobi region [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(1): 39-42. (in Chinese)
封双连, 张志刚, 强希文, 等. 戈壁地区近地面大气折射率结构常数的统计分析 [J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(1): 39-42.
- [10] Li Zhichao, Zong Fei, Xuyunxiu, et al. Comparison and analysis about two measuring methods of atmospheric coherence lenth [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34: s201003. (in Chinese)
李志朝, 宗飞, 徐云岫, 等. 两种大气相干长度测量方法比对分析[J]. 光学学报, 2014, 34: s201003.