

# 湿度起伏对可见光折射率结构常数影响的实验研究

汪 平<sup>1,2</sup> 吴晓庆<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院安徽光学精密机械研究所大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031)

<sup>2</sup> 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 利用合肥郊区夏季三维超声风速计测量的虚温、风速和 Li7500 二氧化碳和水汽分析仪获得的水汽浓度资料, 从两个方面研究湿度起伏对三维超声风速计测量可见光折射率结构常数  $C_n^2$  的影响。对超声虚温进行湿度修正后, 得到真实温度, 比较了由超声虚温和真实温度分别计算得到的温度结构常数  $C_T^2$ 。另一方面, 计算出温湿度相关项  $C_{Tq}$  和湿度结构常数  $C_q^2$  各自对  $C_n^2$  的贡献。结果显示真实温度计算得到的  $C_T^2$  与超声虚温计算得到的  $C_T^2$  有显著差别, 很多时候两者的差异超过 10%。 $C_{Tq}$  对  $C_n^2$  的贡献较大, 可超过 10%, 不可忽略; 而  $C_q^2$  对  $C_n^2$  的贡献很小, 普遍低于 5%, 可以忽略。

**关键词** 大气光学; 折射率结构常数; 温湿度相关项; 超声风速计虚温; 湿度修正

**中图分类号** P427.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0401003

## Experimental Study of Effects of Humidity Fluctuation on the Refractive Index Structure Parameter for Visible Radiation

Wang Ping<sup>1,2</sup> Wu Xiaoqing<sup>1</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> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** Based on the virtual temperature, wind speed and H<sub>2</sub>O concentration data respectively measured by the sonic anemometer and Li7500 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O analyzer sensor in the summer of Hefei, the effects of humidity fluctuation on the measurement of the refractive index structure parameter  $C_n^2$  for visible radiation by sonic anemometer from two aspects are studied. The real temperature from virtual temperature via humidity corrections is obtained. Temperature structure parameter  $C_T^2$  respectively calculated via real temperature and virtual temperature is compared. In the other side, the contributions of humidity structure parameter  $C_q^2$  and temperature-humidity correction  $C_{Tq}$  on  $C_n^2$  are calculated. The results show that the distinction between  $C_T^2$  calculated via real temperature and virtual temperature is obvious, and the difference is more than 10% most of the time. The contribution of  $C_{Tq}$  can be more than 10%, and it can't be ignored. The contribution of  $C_q^2$  is extraordinarily small, lower than 5%, and it can be ignored.

**Key words** atmospheric optics; refractive index structure parameter; correlation of temperature and humidity; sonic anemometers virtual temperature; humidity correction

**OCIS codes** 010.1290; 010.1330

## 1 引言

当光波在大气中传播时, 因与大气湍流相互作用, 从而引起光束漂移、闪烁、相位起伏等一系列湍流效应<sup>[1]</sup>。通常用大气折射率结构常数  $C_n^2$  来描述大

气光学湍流。 $C_n^2$  是激光大气传输、天文观测中一个很重要的参数。从某种意义上说, 得到了  $C_n^2$  就可以计算出大气光学湍流对光电系统的影响。 $C_n^2$  主要是由大气温度和湿度起伏决定的。对于可见光波段,

**收稿日期**: 2013-09-13; **收到修改稿日期**: 2013-11-26

**作者简介**: 汪 平(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事常规气象参数和大气湍流的测量与数据处理等方面的研究。

E-mail: pwang@mail.ustc.edu.cn

**导师简介**: 吴晓庆(1963—), 男, 博士, 研究员, 主要从事大气边界层、大气湍流测量与模式等方面的研究。

E-mail: xqw@aiofm.ac.cn

一般认为湿度起伏的影响可以忽略不计,很多文章在计算折射率结构常数时只考虑了温度起伏<sup>[2-3]</sup>。但对于潮湿环境下,湿度起伏的贡献有时不能忽略<sup>[4-5]</sup>,Arnold等<sup>[6]</sup>分析他人野外数据,甚至发现了湿度起伏影响超过温度起伏。国内关于湿度起伏对折射率结构常数的影响也有研究<sup>[7-8]</sup>,但都仅限于模式计算的结果。本文利用合肥郊区35 m塔上10 m高度处的三维超声风速计和Li7500二氧化碳和水汽分析仪实际测量数据,从两个方面研究湿度起伏对可见光折射率结构常数的影响。

## 2 $C_n^2$ 和 $C_T^2$ 、 $C_q^2$ 、 $C_{Tq}$ 之间的关系

在均匀各向同性湍流的假定下,折射率结构函数  $D_n(r)$  可以定义为

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

式中  $x$  和  $r$  为位置矢量, $r$  是  $r$  的大小, $n'$  是折射率  $n$  的脉动量。对于波长  $\lambda$  而言, $n$  通常是气压  $P$ 、气温  $T$  和比湿  $q$  的函数。 $C_T^2$ 、 $C_q^2$ 、 $C_{Tq}$  与  $C_n^2$  的定义相同,把  $n$  换成气温  $T$  或比湿  $q$  即可。

折射率结构常数  $C_n^2$  可用  $C_T^2$ 、 $C_q^2$  和  $C_{Tq}$  表示出来<sup>[9-11]</sup>,即

$$C_n^2 = A^2 C_T^2 + 2ABC_{Tq} + B^2 C_q^2, \quad (2)$$

式中参数  $A$  和  $B$  在给定波长和气象条件下是常量。在波长为  $0.55 \mu\text{m}$  时,计算得到  $A$  和  $B$  的近似值为

$$A = -7.9 \times 10^{-5} \frac{P}{T^2}, \quad B = -1.98 \times 10^{-5} \frac{P}{T}. \quad (3)$$

## 3 $C_T^2$ 、 $C_q^2$ 和 $C_{Tq}$ 的实验测量

实验中使用美国 Young 公司生产的 CSAT3 型超声风速计和 LI-COR 公司的 Li7500 二氧化碳和水汽分析仪。直接测量的数据包括超声虚温、风速、水汽浓度和气压。

Li7500 二氧化碳和水汽分析仪利用水汽和二氧化碳气体对多个波段的红外辐射具有强烈的吸收作用,仪器的发射端发射特定波段的红外辐射,根据接收端接收到的信号强度,得到吸收率可计算出吸收气体的浓度。计算实验测量的水汽浓度与空气密度的比值,得到比湿  $q$ 。

三维超声风速计通过测量声波在大气中确定距离上的传播时间来得到声速和三个方向上的风速。另一方面,声音的传播速度是与大气的温度和湿度有关的<sup>[12-13]</sup>,即

$$c^2 = \gamma_d R_d T (1 + 0.51) q = \gamma_d R_d T_s, \quad (4)$$

式中  $c$  为声速, $\gamma_d = 1.4$  是干空气的定压比热和定容比热的比值, $R_d = 287.04 \text{ J/kg}$  是干空气的气体常数, $q$  为比湿。超声风速计测量的就是超声虚温  $T_s$ 。在进行湿度修正后,可以得到真实的大气温度为

$$T = \frac{T_s}{1 + 0.51q}. \quad (5)$$

利用这些测量数据即可计算得到  $C_T^2$ 、 $C_q^2$  和  $C_{Tq}$ 。在泰勒冻结假设<sup>[14]</sup>的条件下,可以将(1)式中的位置矢量  $r$  表示成风速与时间的乘积: $r = vt$ ,用  $v$  表示风速大小。这样通过单点位置测量的温湿压和风速数据就可计算出  $C_T^2$ 、 $C_q^2$  和  $C_{Tq}$ ,即

$$C_T^2 = \frac{\langle [T'(x) - T'(x+vt)]^2 \rangle}{(vt)^{2/3}}, \quad (6)$$

$$C_q^2 = \frac{\langle [q'(x) - q'(x+vt)]^2 \rangle}{(vt)^{2/3}}, \quad (7)$$

$$C_{Tq} = \frac{\langle [T'(x) - T'(x+vt)][q'(x) - q'(x+vt)] \rangle}{(vt)^{2/3}}, \quad (8)$$

式中  $T'$  和  $q'$  分别是温度和比湿的脉动量。

## 4 结果分析

### 4.1 实验数据介绍

实验场地位于合肥市西郊水库旁。观测仪器安装在一个35 m高的铁塔上,铁塔西南方向有200 m的开阔地。北边50 m处有一个约20 m高的三层楼,东面300 m处有一片10 m高的树林。美国CSAT3型超声风速计和Li7500型二氧化碳和水汽分析仪安装在10 m高的第二层。CSAT3型超声风速计的温度量程为 $-20 \text{ }^\circ\text{C} \sim +50 \text{ }^\circ\text{C}$ ,精度为 $0.026 \text{ }^\circ\text{C}$ ;风速量程为 $-30 \sim +30 \text{ m/s}$ ,精度小于 $\pm 4 \text{ cm/s}$ 。Li7500的水汽浓度测量量程为 $0 \sim 42 \text{ g/m}^3$ ,精度为 $0.5 \text{ g/m}^3$ (20 Hz)。实验阶段仪器采样频率为20 Hz。表1给出了实验期间一些常规气象参数的日平均值,表中1 hPa为0.1 kPa,RH代表相对湿度。

表1 实验期间常规参数日平均值

Table 1 Daily mean values of meteorological parameter

Date	$P/\text{hPa}$	$T/^\circ\text{C}$	RH/%	$q$
2012-06-03	1003.67	23.9	62.4	0.0122
2012-06-05	1003.66	25.6	74.1	0.0154
2012-06-06	1000.98	23.5	90.5	0.0139
2012-06-09	998.00	29.8	71.1	0.0190
2012-06-10	996.24	29.2	77.6	0.0200
2012-06-11	997.48	26.2	82.4	0.0181
2012-06-12	998.03	27.4	66.6	0.0134
2012-06-14	1000.35	30.7	53.9	0.0149
2012-06-15	1002.44	31.0	71.7	0.0171

## 4.2 温度结构常数 $C_T^2$ 和 $C_{T_s}^2$ 的比较

利用三维超声风速计直接测量的超声虚温  $T_s$  和经过湿度修正的真实温度  $T$ , 分别计算温度结构常数  $C_{T_s}^2$  和  $C_T^2$ 。图 1 给出了  $C_{T_s}^2$  与  $C_T^2$  的对比, 图 2 给出了  $C_{T_s}^2$  与  $C_T^2$  的比值。图 1 和图 2 使用 2012 年 6 月 5 日、6 月 9 日至 6 月 11 日的实验数据, 0 h 与 6 月 5 日这一天的 00:00 点对应, 24 h 对应 6 月 9 日的 00:00 点, 之后每隔 24 h 为后一天的 00:00 点。可以看到两者在很多时候存在明显的差异, 差别超过 10%。同时可以发现两者的比值也是随着时间而变化的, 较大时可以达到 1.4, 而较小时则在 0.7 附近。这种差异性是因为受湿度的影响, 因为  $T_s$  包含着湿度信息。用同时包含温度和湿度信息的  $C_{T_s}^2$  来计算  $C_n^2$  以及分析其中的误差将是一项有意义的工作。

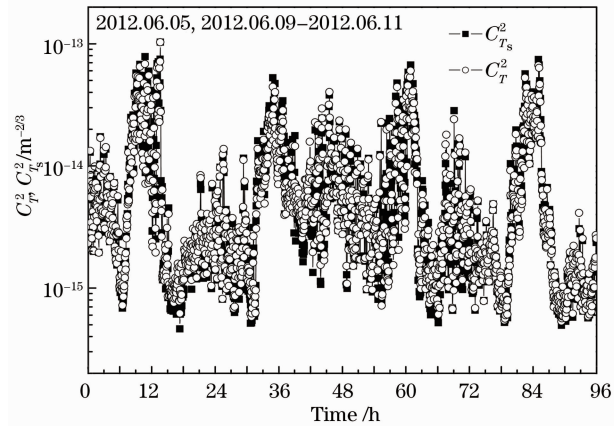


图 1  $C_T^2$  与  $C_{T_s}^2$  的对比

Fig. 1 Comparison of  $C_T^2$  and  $C_{T_s}^2$

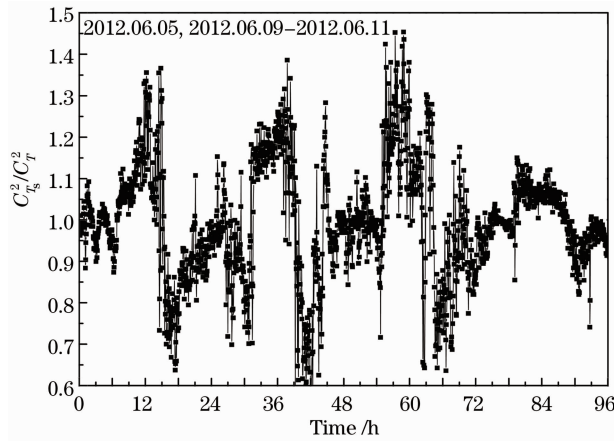


图 2  $C_{T_s}^2$  与  $C_T^2$  的比值

Fig. 2 Values of  $C_{T_s}^2 / C_T^2$

图 3 给出了  $C_T^2$  和比值  $C_{T_s}^2 / C_T^2$  的日变化特征, 两者的日变化有一定的同步性。可以看出在正午  $C_T^2$  最强时, 两者的比值大于 1,  $C_{T_s}^2$  较  $C_T^2$  大; 在日出日

落后,  $C_{T_s}^2$  较  $C_T^2$  小, 两者的比值小于 1。图 4 给出同一实验日期的比湿  $q$  的日变化特征, 图中  $q = 0.0154$  为比湿的日平均值。在 11:00 ~ 13:00 时间段,  $q$  的平均值为 0.0147, 方差为  $1.767 \times 10^{-4}$ ,  $C_{T_s}^2$  较  $C_T^2$  大; 在 16:00 ~ 18:00 时间段,  $q$  的平均值为 0.0157, 方差为  $1.585 \times 10^{-4}$ ,  $C_T^2$  较  $C_{T_s}^2$  小。两者的比较说明, 在比湿  $q$  的起伏较大时,  $C_{T_s}^2$  也较大, 这可能与  $T_s$  包含湿度量有关。

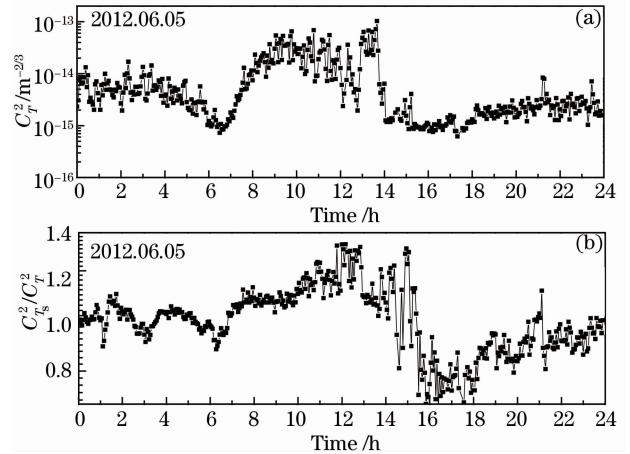


图 3  $C_T^2$  和  $C_{T_s}^2 / C_T^2$  的日变化

Fig. 3 Daily variations of  $C_T^2$  and  $C_{T_s}^2 / C_T^2$

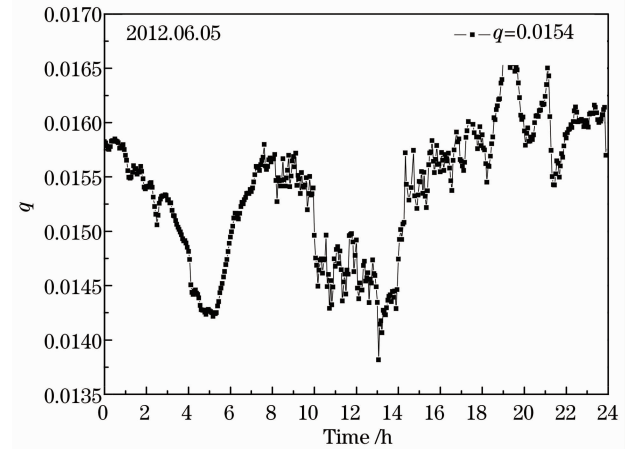


图 4  $q$  的日变化

Fig. 4 Daily variation of  $q$

## 4.3 $C_T^2$ , $C_q^2$ 和 $C_{Tq}$ 对 $C_n^2$ 的贡献

图 5 和图 6 给出了由真实温度  $T$  计算的  $C_T^2$ 、 $C_q^2$  和  $C_{Tq}$  的值, 以及各自对  $C_n^2$  的贡献的百分比, 两者的数据日期和时间序列与图 1 相同, 可以看到湿度结构常数  $C_q^2$  对折射率结构常数的贡献很小, 普遍低于 5%, 可以忽略不计。温湿度相关项  $C_{Tq}$  对  $C_n^2$  的贡献可以达到 10% 以上, 不能忽略。说明湿度起伏对可见光折射率结构常数  $C_n^2$  的影响主要是通过温湿度相关项  $C_{Tq}$  体现出来的。

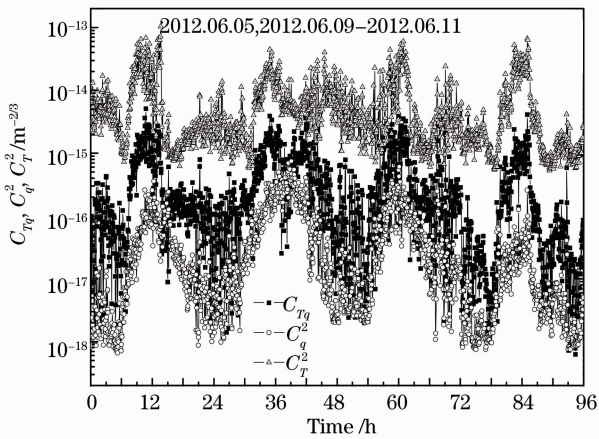


图 5  $C_T^2, C_q^2$  和  $C_{Tq}$  的值

Fig. 5 Values of  $C_T^2, C_q^2$  and  $C_{Tq}$

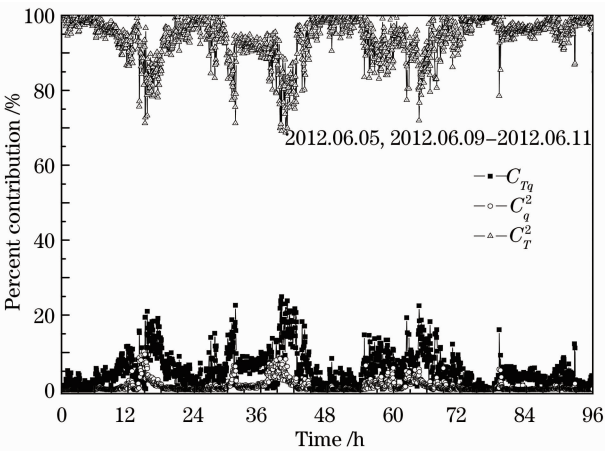


图 6  $C_T^2, C_q^2$  和  $C_{Tq}$  对  $C_n^2$  的贡献

Fig. 6 Percent contribution of  $C_T^2, C_q^2$  and  $C_{Tq}$  to  $C_n^2$

## 5 结 论

利用实验直接测量的超声虚温、风速和水汽浓度信息,从实验角度研究湿度起伏对可见光波段折射率结构常数  $C_n^2$  的影响。比较了由真实温度  $T$  和超声虚温  $T_s$  计算的  $C_T^2$  和  $C_{T_s}^2$  的差异,结果显示两者的差异在很多时候超过 10%,甚至更大,表明对超声虚温  $T_s$  进行湿度修正是必要的。计算出  $C_q^2$  和  $C_{Tq}$  对  $C_n^2$  贡献的百分比,结果表明  $C_q^2$  的贡献可以忽略不计,而  $C_{Tq}$  的贡献可以达到 10% 以上,不可忽略。综上所述,在利用三维超声风速计测量可见光折射率结构常数时,既要超声虚温  $T_s$  进行湿度修正以得

到证实温度  $T$ ,也要考虑  $C_{Tq}$  的贡献量,两者都体现了湿度起伏的影响。

## 参 考 文 献

- 1 Song Zhengfang. Applied Atmospheric Optics [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1990.
- 2 宋正方. 应用大气光学基础[M]. 北京: 气象出版社, 1990.
- 3 Yuan Renmin, Zeng Zongyong, Xiao Liming, *et al.*. Comparison of some methods of measuring refractive index structure parameter [J]. Acta Optica Sinica, 2000, 20(6): 755-761.
- 4 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, 20(6): 755-761.
- 5 Yuan Renmin, Zeng Zongyong, Ma Chengsheng. Estimation optical turbulence by meteorology by factors [J]. Chinese J Quantum Electronics, 2001, 18(1): 87-91.
- 6 袁仁民, 曾宗泳, 马成胜. 利用气象要素估算近地面光学湍流 [J]. 量子电子学报, 2001, 18(1): 87-91.
- 7 C A Friehe, J C La Rue, F H Champagne, *et al.*. Effects of temperature and humidity fluctuations on the optical refractive index in the marine boundary layer [J]. J Opt Soc Am, 1975, 65 (12): 1502-1511.
- 8 M P J L Chang, Carlos O Font, G Charmaine Gilbreath, *et al.*. Humidity's influence on visible region refractive index structure parameter [J]. Appl Opt, 2007, 46(13): 2453-2459.
- 9 T Arnold, R Henry. Estimating effects of temperature and moisture on in the damp unstable boundary layer for visible, infrared, radio, and millimeter wavelengths [C]. SPIE, 1992, 1688: 465-476.
- 10 Wu Xiaqing, Rao Ruizhong. Effects of humidity fluctuation on the structure parameter of the refractive index for visible radiation [J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(12): 1599-1602.
- 11 吴晓庆, 饶瑞中. 湿度起伏对可见光波段折射率结构常数的影响 [J]. 光学学报, 2004, 24(12): 1599-1602.
- 12 Nie Qun, Wu Xiaqing, Fang Qiang. Reinvestigation of humidity fluctuation influence on  $C_n^2$  in visible range [J]. J Atmospheric and Environmental Optics, 2007, 2(3): 175-178.
- 13 聂群, 吴晓庆, 方强. 湿度起伏对可见光波段  $C_n^2$  影响的再研究 [J]. 大气与环境光学学报, 2007, 2(3): 175-178.
- 14 J C Wyngaard, W T Pennell, D H Lenschow, *et al.*. The temperature-humidity covariance budget in the convective boundary layer [J]. Atmos Soc, 1978, 35(1): 47-58.
- 15 W Kohsiek. Measuring  $C_T^2, C_q^2$  and  $C_{Tq}$  in the unstable surface layer, and relations to the vertical fluxes of heat and momentum [J]. Bound-Lay Meteorol, 1982, 24(1): 89-107.
- 16 E L Andreas. Estimating  $C_n^2$  over snow and sea ice from meteorological data [J]. J Opt Soc Am A, 1988, 5(4): 481-495.
- 17 P Schotanus, F Nieuwstadt. Temperature measurement with a sonic anemometer and its application to heat and moisture fluxes [J]. Bound-Lay Meteorol, 1983, 26(1): 81-93.
- 18 J C Kaimal, J E Gaynor. Another look at sonic thermometry [J]. Bound-Lay Meteorol, 1991, 56(4): 401-410.
- 19 G I Taylor. Statistical theory of turbulence [C]. Proc R Soc Lond A, 1935, 151(873): 421-444.

栏目编辑: 王晓球