

文章编号: 1001-4322(2002)04-0551-06

## 近地面折射率结构常数的长期测量和统计分析

吴晓庆, 马成胜, 王英俭, 曾宗泳, 龚知本

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 国家863计划大气光学重点实验室, 安徽合肥 230031)

**摘要:** 统计分析了1997~2000年合肥地区一复杂地形处近地面折射率结构常数  $C_n^2$  的测量数据。给出了不同下垫面、不同季节、不同高度上  $C_n^2$  的统计结果。白天  $C_n^2$  强弱依次为6月、5月、4月、9月、1月。白天水面上  $C_n^2$  比草地上小, 夜间比草地上大。不论白天还是夜晚, 近地面  $C_n^2$  都随高度递减, 且3~10m高的  $C_n^2$  递减较慢, 10~15m高的  $C_n^2$  递减较快。  $C_n^2$  随月份的日变化与模式计算结果基本一致。

**关键词:** 折射率结构常数; 统计分析; 模式比较

**中图分类号:** TN247

**文献标识码:** A

折射率结构常数  $C_n^2$  是研究光波在大气中传播的一个重要物理量。当激光束在湍流大气中传播时, 光强在空间和时间上都产生不均匀的分布, 它使激光雷达与光通讯接收机上收到的信号功率具有随机性, 增加了雷达接收机检测信号的难度。激光雷达的漏报概率与光通讯中误码率随值增大和传输距离增大而增大。从某种意义上说,  $C_n^2$  的大小决定了光电系统在多大范围内可有效使用。  $C_n^2$  还与系统的其它参数如所选光波波长、发射和接收口径等因素有关。因此, 光电系统设计之前, 尽可能弄清系统使用地区的情况十分必要。在均匀各向同性湍流假定下,  $C_n^2$  定义为

$$\overline{[n(x) - n(x+r)]^2} = C_n^2 r^{2/3} \quad (1)$$

式中:  $n$  是大气折射率;  $x$  和  $r$  是位置矢量,  $r$  是矢量  $r$  的大小; 上划线表示系综平均。

对于可见光和近红外光波, 折射率主要是由于温度起伏引起的。与(1)式类似, 温度结构常数  $C_T^2$  可定义为

$$\overline{[T(x) - T(x+r)]^2} = C_T^2 r^{2/3} \quad (2)$$

因此可直接由温度结构常数  $C_T^2$  得到  $C_n^2$

$$C_n^2 = (79 \times 10^{-6} P/T^2)^2 C_T^2 \quad (3)$$

在一些特定地区, 有一些人开展过  $C_n^2$  的长期测量。Waller<sup>[1]</sup>对地处沙漠的白沙基地—9m高  $C_n^2$  的三年数据, 进行了日变化和季节变化的分析。Davidson<sup>[2]</sup>在 Monterey 湾沿光路13km的水面上进行了光学测量  $C_n^2$  和气象参数估算  $C_n^2$  的对比测量。Andreas<sup>[3]</sup>提出在雪地和冰面上用气象资料估算  $C_n^2$  的两种方法。两年后<sup>[4]</sup>, 他用该方法估算了 Beaufort 海浮冰上的  $C_n^2$ , 对一年的资料分四个季节进行统计,  $C_n^2$  的概率分布接近 beta 分布。Peterko<sup>[5]</sup>对声雷达测量的  $C_n^2$  进行概率统计, 在300m以下其概率分布不是对数正态分布。这些工作都是在下垫面较为平坦的情况下进行的。本文统计分析了1997~2000年合肥地区一复杂地形处近地面折射率结构常数  $C_n^2$  的测量数据。给出了不同下垫面、不同季节、不同高度上  $C_n^2$  的统计结果。

## 1 实验场地和实验仪器

实验场地位于合肥市一水库旁。在500m水平路径上设置了21个  $C_n^2$  测量点, 各点相距25m。光路正下方是约2m宽的黄土路面, 呈南北走向(与正北夹角约166°)。图1是实验场地示意图。1至6号测量点, 下垫面是草地, 较平坦。在1号点, 7至12号点路面两侧被大面积鱼塘包围, 13至18号点路面西侧是水库, 东侧是小面积水塘。19至21号点, 路面两侧是灌木丛, 东面8m外有一片松树林, 西面与水库很近。由于地面略有坡度, 北高南低, 因此需将21个点的传感器离地面高度进行适当调整, 使之在同一水平线上。

大气湍流测量要求传感器灵敏度高、反应快。我们研制的温度脉动测量仪, 噪声为0.002℃, 带宽为0.05~20Hz。微温传感器使用两根直径为10μm钨丝, 组成惠斯登电桥的两臂, 测量相距为1m的空间两点温差, 传感器输出与两测量点温差起伏成正比。采样频率为60Hz, 求出10s的平方平均值后, 由泰勒假定可从(2)式得到

• 收稿日期: 2001-10-10; 修订日期: 2002-02-21

基金项目: 国家863激光技术领域资助课题(863-410-9.3)

作者简介: 吴晓庆(1963-), 男, 助理研究员, 从事大气湍流测量与研究; E-mail: xqwu@naol.hfcas.ac.cn.

温度结构常数  $C_T^2$ , 再由(3)式计算出  $C_n^2$ 。500m 水平路径上 21 个  $C_n^2$  测量由 21 个单片机完成, 计算机选通各单片机, 下达信号采集和数据传送指令, 得到各点在同一时间内测量的  $C_n^2$ 。500m 水平光路上还等间距设置 5 个铁塔, 测量距地面 5m 高度上的温度、湿度、风速和风向。采用 NOVELL 网和无盘工作站方式进行信号的采集和数据的传送。此外用辐射总表和直射总表(响应波段为 0.3~3 $\mu$ m)连续自动地每半分钟测量天空向下的漫射辐射和太阳直射辐射, 得到了地面的总辐射。

## 2 统计结果

### 2.1 $C_n^2$ 日变化和季节变化

图 2 是 1997 年 1 月和 4 月  $C_n^2$  月平均的日变化。可以看出  $C_n^2$  的强度和两个最小时段随季节变化十分明显。

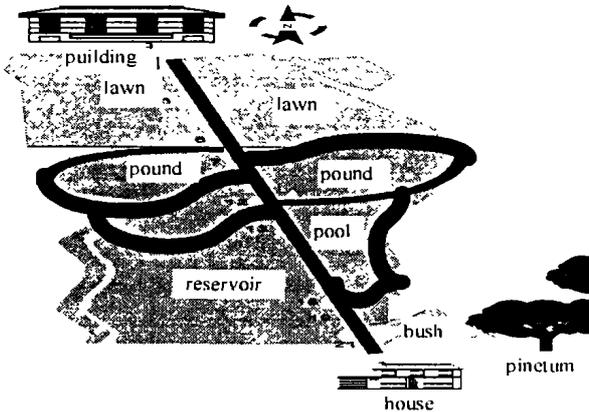


Fig. 1 Experimentation area  
图 1 实验场地示意图

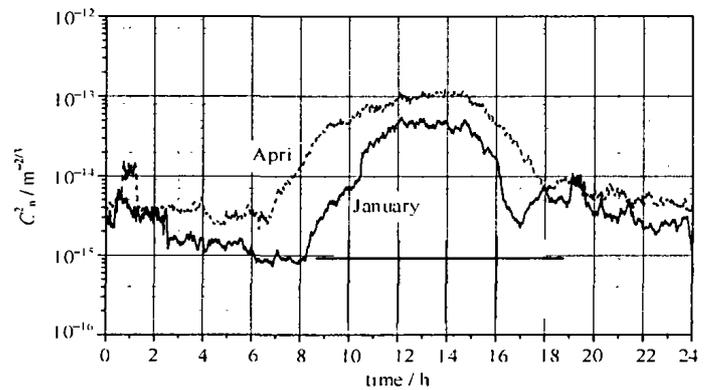


Fig. 2 Average diurnal variation of  $C_n^2$   
图 2 月平均  $C_n^2$  的日变化

### 2.2 不同月份草地和水面上 $C_n^2$ 累积概率分布

表 1 是 1997 年  $C_n^2$  测量记录。在对数据进行统计分析之前, 先进行预处理, 即剔除因断丝、停电以及数据传输错误等因素造成的异常数据。1 至 6 号站点测量的  $C_n^2$  进行平均, 代表草地上的  $C_n^2$ 。7 至 18 号站点测量的  $C_n^2$  进行平均, 代表水面上的  $C_n^2$ 。8 点至 16 点和 20 点至 4 点分别代表白天和夜晚。图 3, 图 4 是不同月份白天和夜晚, 草地和水面上  $C_n^2$  的累积概率分布。白天草地上  $C_n^2$  月变化规律很清楚, 由强至弱的月份依次为: 6 月、5 月、4 月、9 月、1 月。而白天水面上  $C_n^2$  月变化不明显, 1 月  $C_n^2$  最小, 9 月  $C_n^2$  次之, 4, 5, 6 三个月  $C_n^2$  强弱重叠。夜晚草地和水面上  $C_n^2$  月变化顺序除 1 月外其它均一致。对草地上和水面上  $C_n^2$  进行比较, 白天草地上  $C_n^2$  比水面上大, 夜晚比水面上小。图 5 是各月  $C_n^2$  放在一起进行统计的结果。草地上  $C_n^2$  与水面上  $C_n^2$  相差不多, 80% 情况下草地上  $C_n^2$  略小于水面上  $C_n^2$ , 草地上出现大的  $C_n^2$  的机会比水面上多。

### 2.3 不同高度 $C_n^2$ 累积概率分布

表 2 是不同高度  $C_n^2$  的测量记录。图 6 是不同高度  $C_n^2$  累积概率分布。图 7 是将表 2 中不同高度上的  $C_n^2$  按白天和晚上分别进行平均, 得到的平均  $C_n^2$  随高度的变化。由图 6 和图 7 可看出, 不管白天还是夜晚,  $C_n^2$  都随高度的增加而下降, 且 3~10m 高的  $C_n^2$  递减较慢, 10~15m 高的  $C_n^2$  递减较快。

表 1 1997 年  $C_n^2$  测量记录

Table 1 Record of  $C_n^2$  measured in 1997

month	1	4	5	6	9
sum of data	97 400	126 869	50 899	46 246	33 429
sum of days	12	23	9	10	6

表 2 不同高度  $C_n^2$  测量记录

Table 2 Record of  $C_n^2$  measured at different height

height/m	sum of data	measurement period
3	292 463	1999-9~2000-11
10	296 283	1999-9~2000-11
15	127 732	2000-3~2000-11

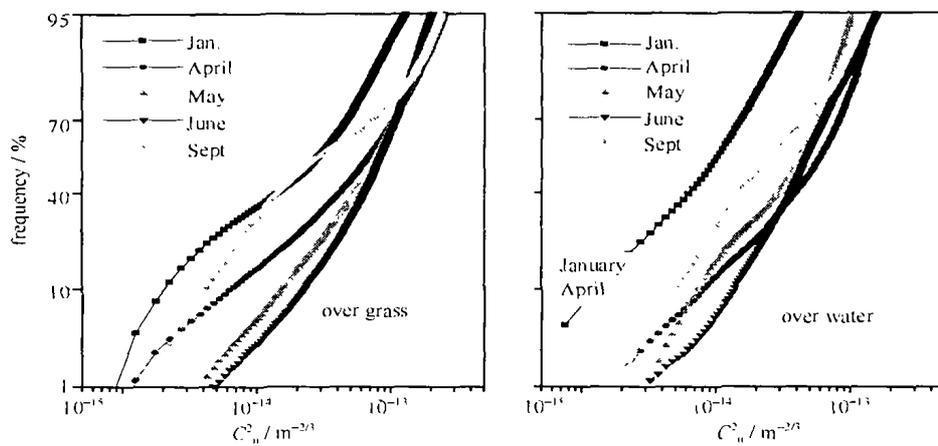


Fig. 3 Cumulative probability distributions of  $C_n^2$  over grass and water in daytime

图 3 不同月份白天草地和水上  $C_n^2$  累积概率分布

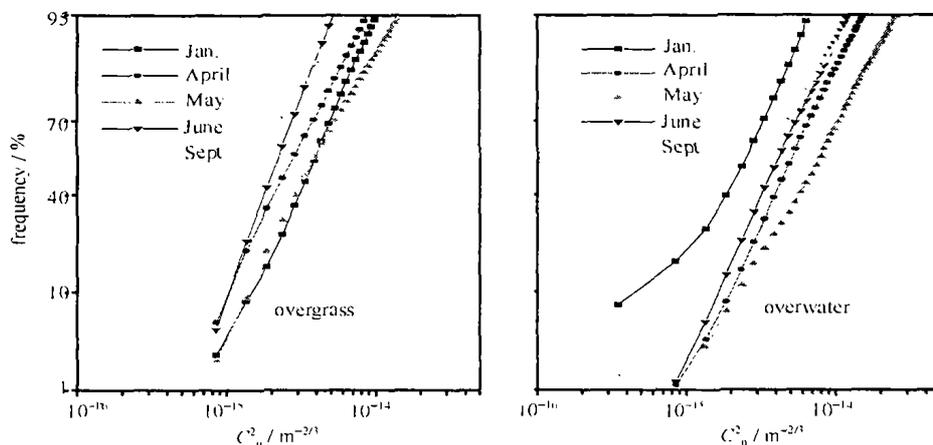


Fig. 4 Cumulative probability distributions of  $C_n^2$  over grass and water in nighttime

图 4 不同月份夜晚草地和水上  $C_n^2$  累积概率分布

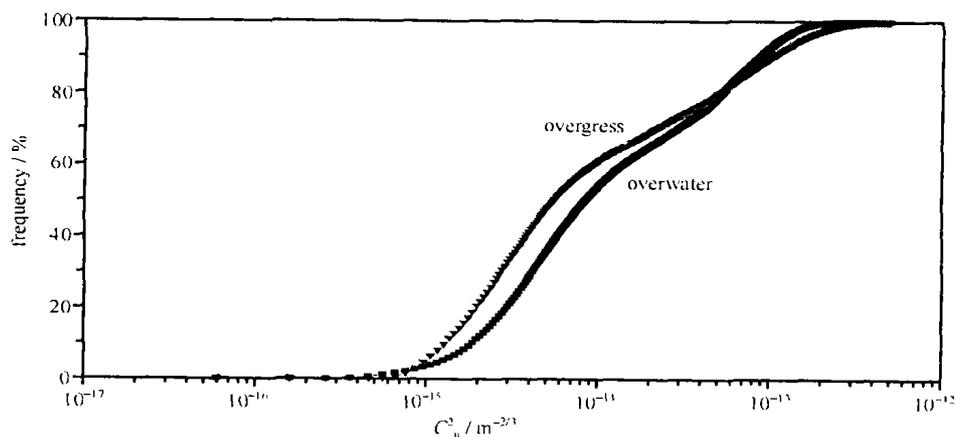


Fig. 5 Cumulative probability distributions of  $C_n^2$

图 5 草地和水上  $C_n^2$  累积概率分布

### 3 数据分析与讨论

由于地表受太阳辐射、地面摩擦等因素的影响,造成了近地面大气风和温度在垂直方向上的不均匀分布,在一定条件下形成了近地面湍流。辐射过程最显著的特点是日变化,因此近地面湍流则以日变化为主要特征。白天由于太阳辐射,地表温度高于气温。夜晚由于辐射冷却,地表温度低于气温,地表和空气间的能量交换决定

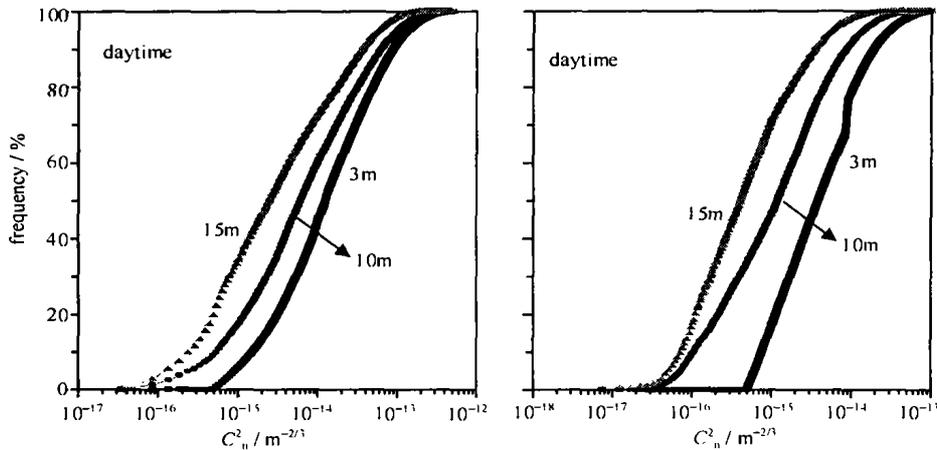


Fig. 6 Cumulative probability distributions of  $C_n^2$  in different altitude

图 6 不同高度  $C_n^2$  累积概率分布

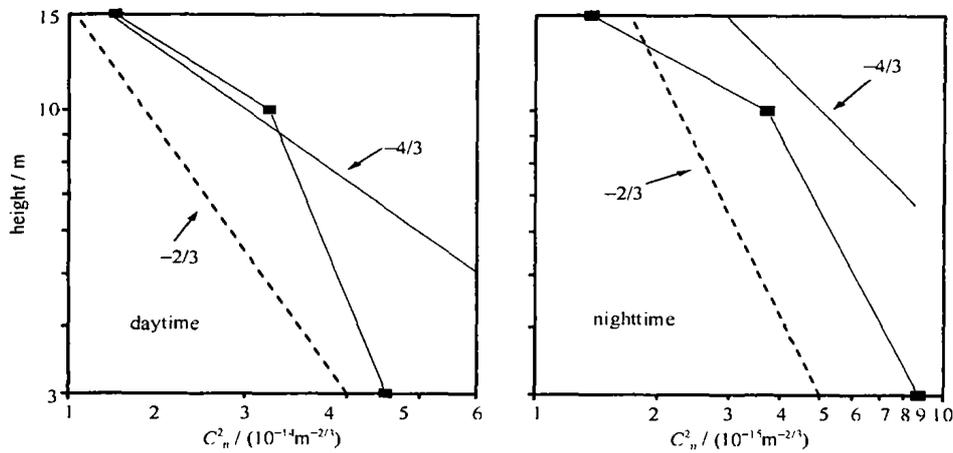


Fig. 7 Mean  $C_n^2$  at different heights

图 7 平均  $C_n^2$  随高度的变化

了  $C_n^2$  的量级。为了定性以至定量地研究这一问题,我们提出了一种大气光学折射率结构常数的数值模式。通过解大气边界层风速、位温、绝湿控制方程、表面热平衡方程和土壤热传导方程,得到地表温度、表面层的动量通量、显热通量和潜热通量。再由 Monin-Obukhov 相似理论,从湍流通量和  $C_n^2$  的经验关系计算出  $C_n^2$ 。模式需要输入的基本参数是:日期、预报的开始时间和结束时间、经纬度、时区、土壤及地表植被特性(包括地表反照率、土壤类型、土壤含水量、地温、粗糙度等)、两个高度上的温、湿、压、风速、风向和云量等。

图 8 是用模式<sup>[7]</sup>计算和实测的晴天不同月份总的向下辐射通量(太阳向下辐射+大气向下辐射)。两者比较除 1 月有一点差别外,其它月份几乎一致。辐射通量强弱排序为:6 月、5 月、4 月、9 月、1 月。这与图 3 白天草地上  $C_n^2$  月变化规律一致。其中 1 月的辐射通量与其它月份相差较大,其对应的 1 月  $C_n^2$  与其它月份相差也较大(见图 2,图 3)。图 9 是用模式计算的不同月份  $C_n^2$  的日变化。 $C_n^2$  强度变化与两个最小值出现的时刻与实测数据基本一致。夜间  $C_n^2$  与太阳辐射没有直接关系,其月变化规律与白天不同。 $C_n^2$  的大小不仅与温度梯度有关,还与风速有很大关系。

下垫面是草地还是水面对  $C_n^2$  的产生有较大差别,见图 2,图 3。一般来说,白天草地上  $C_n^2$  比水面上大,夜晚则比水面上小。这是因为反映水体的导热率和比热都比陆地高得多,因此,水面的温度变化比较缓慢,水温的日变化也比陆地小,在晴朗的日子里,就会出现白天陆地气温高于水面气温,夜间水面气温高于陆地的情形。这样,白天陆地上  $C_n^2$  要比水面上大,而夜晚,水面上空气容易出现不稳定,有利于湍流的发展。事实上 7 至 18 号点测量的  $C_n^2$  的还不是真正意义上水面上的  $C_n^2$ ,尤其在吹东风时受松树林的影响很大<sup>[8]</sup>。当夜间湍流较弱吹东风时,中间测量点的  $C_n^2$  比南北两端弱。当湍流较强吹西风时,中间测量点的  $C_n^2$  比两端强。

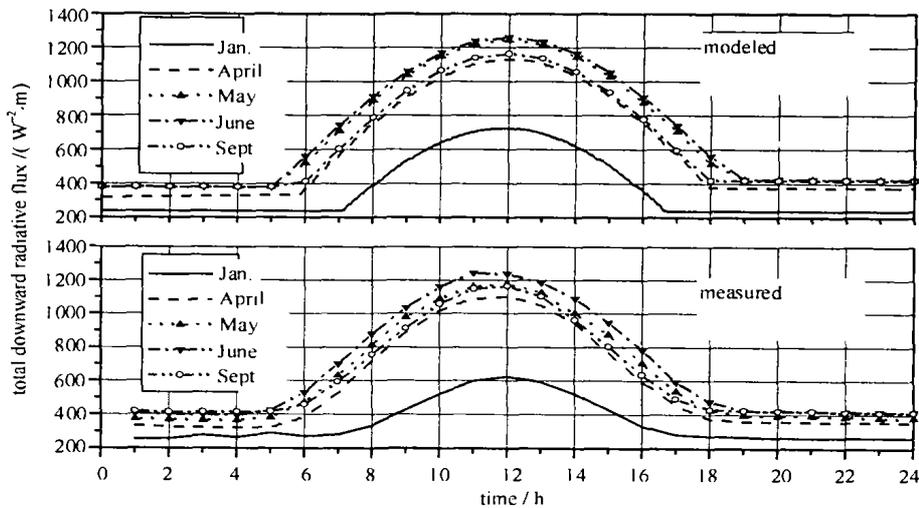


Fig. 8 Measured and modeled total downward radiative flux in different months

图 8 实测和模式计算的不同月份总的向下辐射通量

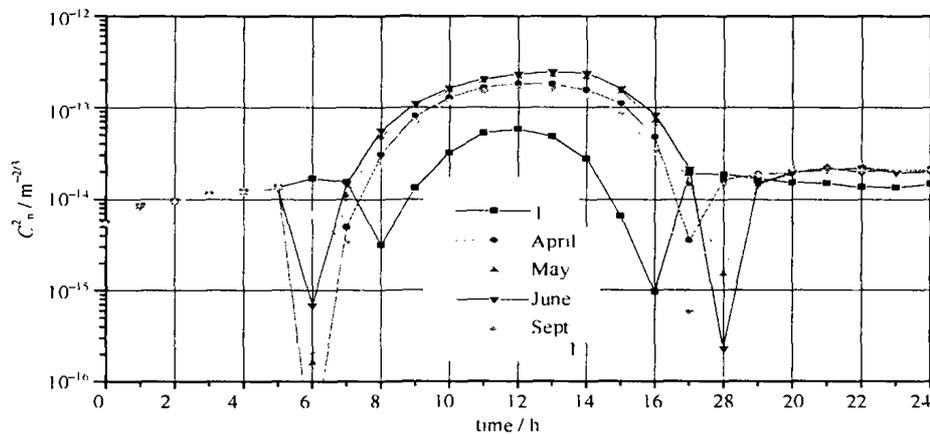


Fig. 9  $C_n^2$  calculated by model in different months

图 9 模式计算的不同月份的  $C_n^2$

#### 4 结 论

近地面  $C_n^2$  的产生主要是由于地气能量交换引起的温度起伏。对已有月份  $C_n^2$  资料分析可知：白天  $C_n^2$  强弱依次为 6 月、5 月、4 月、9 月、1 月，与总的向下辐射通量一致。夜间  $C_n^2$  强弱与太阳辐射无直接关系。白天水面上  $C_n^2$  比草地上小，夜间比草地上大。近地面  $C_n^2$  随高度递减，3~10m 高的  $C_n^2$  递减较慢，10~15m 高的  $C_n^2$  递减较快。 $C_n^2$  随月份的日变化与模式计算结果基本一致。

致谢 周军研究员审阅了本文，并对实验进行了指导，魏合理博士提供了太阳辐射实测数据。

#### 参考文献：

[1] Walters D L. Diurnal and seasonal variations in the atmospheric structure parameter( $C_n^2$ )that affect the atmospheric modulation transfer function(MTF)[J]. *SPIE*, 1981, **277**:6—9.

[2] Davidson K L. Verification of the bulk method for calculating overwater optical turbulence[J]. *Applied Optics*, 1981, **20**(17):2919—2924.

[3] Andreas E L. Estimating over snow and sea ice from meteorological data[J]. *Optical Society of America*, 1988, **5**(4):481—495.

[4] Andreas E L. The refractive index structure parameter,  $C_n^2$ , for a year over the frozen Beaufort sea[J]. *Radio Science*, 1989, **24**(5):667—679.

[5] Petenko I V. 1994, Spatial and temporal variability of optically active turbulence in the convective atmospheric boundary layer[J]. *SPIE*, 1994, **2222**:705—715.

[6] 魏合理, 徐青山, 张天舒. 用 GMS-5 气象卫星遥测地面太阳总辐射[J]. *江苏气象*, 2001, 103—110. (Wei H L, Xu Q S, Zhang T S. Observa-

tion of solar irradiance at the surface from GMS-5, *Jiangsu meteorology*, 2001, 103—110)

- [7] 吴晓庆, 王英俭, 曾宗泳, 等. 一维近地面大气光学折射率结构常数的数值模式[J]. 大气科学, (待发表). (Wu X Q, Wang Y J, Zeng Z Y, et al. A numerical model of atmospheric optical refractive index structure parameter) (to be published)
- [8] 曾宗泳, 刘小勤, 马成胜, 等. 复杂地形近地面光学湍流[J]. 强激光与粒子束, 1999, 11(6):668—672. (Zeng Z Y, Liu X Q, Ma C S, et al. Optical turbulence in the surface layer over complex terrain. *High power laser particle beams*, 1999, 11(6):668—672)

## Long-term measurements and statistics study on refractive index structure parameter of surface layer

WU Xiao-qing, MA Cheng-sheng, WANG Ying-jian, ZENG Zong-yong, GONG Zhi-ben

(Anhui Institute of Optical and Fine Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**Abstract:** The data of  $C_n^2$  refractive index structure parameter from 1997 to 2000 at a complex terrain in Hefei are studied statistically. Results of  $C_n^2$  in different ground covers, different seasons, different heights are presented. Months goes when  $C_n^2$  in daytime from strong to weak are June, May, April, September, January. The  $C_n^2$  over the grass are larger than that over the water in daytime, while the result of the comparison in nighttime is the reverse. The  $C_n^2$  decreases with altitude increase both in day and at night. The  $C_n^2$  falls slower from 3 to 10m than 10 to 15m.  $C_n^2$ s measured and modeled agree well with each other.

**Key words:** refractive index structure parameter; statistic study; model comparison