

基于 NOAA 模式的典型地区大气湍流高度分布

孙 刚^{1,2}, 翁宁泉¹, 张彩云¹, 高 慧¹, 吴 毅¹

(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. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 研究大气传输问题中的大气湍流主要是研究湍流所造成的折射率随机变化规律。大气折射率结构常数 C_n^2 是表示大气光学湍流强度的一个重要参数。主要利用温度脉动探空仪对大气折射率结构常数 C_n^2 在合肥和北京两个典型地区进行了实地探测及计算分析, 同时根据两个典型地区相应气象站点常规气象探空资料统计分析数据, 通过 NOAA 模式得到大气湍流高度分布廓线, 并与 HV 模式廓线和实际测量数据进行对比验证分析, 为其他不同典型地区大气湍流模式分布特性的研究提供方法验证和参考依据。

关键词: 大气光学; 大气湍流; 大气折射率结构常数; NOAA 模式

中图分类号: O436 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)02-0388-06

Atmospheric turbulence in typical area based on NOAA model

Sun Gang^{1,2}, Weng Ningquan¹, Zhang Caiyun¹, Gao Hui¹, Wu Yi¹

(1. Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Research of atmospheric turbulence is actually investigation of atmospheric refractive index. The atmospheric structure constant of refractive index C_n^2 is an important parameter of denoting atmospheric turbulence. The atmosphere temperature, pressure and C_n^2 were measured in Hefei and Beijing, using new micro-thermal meter. And the statistical character of vertical distribution of atmospheric parameter was investigated by analysis of experimental sounding data in different typical area, offering necessary data for atmospheric turbulence model. Using NOAA model, the atmospheric turbulence models in different typical area were obtained on the basis of actual upper air data. Method evidence and valuable reference will be provided for research on atmospheric turbulence model in other typical area.

Key words: atmospheric optics; atmospheric turbulence; atmospheric structure constant of refractive index; NOAA models

收稿日期: 2013-06-10; 修订日期: 2013-07-13

基金项目: 国家自然科学基金(41205023); 中国科学院合肥物质科学研究院院长基金(Y23D241121)

作者简介: 孙刚(1977-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事大气光学参数测量和模式研究。Email: gsun@aiofm.ac.cn

0 引言

大气湍流是研究大气传输时非常重要的问题。尤其是随着现代非线性动力学的进展,大气湍流在各种时空尺度大气过程的突变及其可预报性中可能扮演着重要的角色^[1]。因此,大气湍流研究在大气科学中的地位与意义日益突出。Kolmogorov 提出了局地均匀各向同性湍流理论^[2],其后 Obukhov 和 Tatarski 等人把他的理论应用到大气中波的传播问题,提出用大气折射率结构常数 C_n^2 来定量描述大气光学湍流的强度,由此大气折射率结构常数 C_n^2 成为表示大气光学湍流强度的一个重要参数。国内外很多人对 C_n^2 进行了观测和研究^[3-4]。在开展大气光学湍流测量实验的同时,人们开始对光学湍流的模式问题进行研究,湍流模式根据其特点分为不同的类型:第一类模式称为经验模式,这一类模式廓线是由平均数据中得出的经验公式,主要是研究折射率结构常数廓线的统计模式,如 SLC 模式(M.G.Miller 1979)、AFGL 模式(R.E.Good 1988)等;第二类模式称为参数模式,主要是研究折射率常数与大气参数的相关模式,这类模式是包含参数的模式,试图包括一些对风和气象参数的相关以反映实际测量中 C_n^2 的复杂性^[5],如 Tatarski 模式^[6](Tatarski 1961)和广泛使用的 Hufnagel 模式(R.Hufnagel 1964)等,在大气物理学的基础上提出用平均的气象参数来计算折射率结构常数,其中最著名的就是 Hufnagel 模式^[7]。这类模式中最复杂的是 NOAA 模式,也被称为 VanZandt 模式。VanZandt 等在对小结构和风切变的统计处理基础上开发了一种双参数的模式。VanZandt 开发这个模式的目的在于利用标准的无线电探空所得到的标准气象资料反演得到 C_n^2 廓线。基于现有的实验条件和数据资料,笔者选取广泛应用的大气湍流参数模式——NOAA 模式为基础,根据实际测量数据得到不同典型地区大气湍流高度分布模式,在此基础上从大气物理基础理论上研究大气背景场和大气光学湍流廓线的动力学关系,为将来建立初步的大气光学湍流预报模式提供参考。

1 实验测量和数据分析

2005 年在合肥地区总共施放了近 260 份探空,

利用探空气球携带自行研制的 QHTP-2 型高灵敏度温度脉动探空仪测量大气折射率结构常数 C_n^2 、大气温度和气压^[8],气球的探测高度一般在 20 km 以上,其中很多接近 35 km 的高度。施放的天气条件一般选择在晴朗的天气,从早晨 8 时至夜间 10 时连续施放。每天的施放探空个数平均为 5 次,有时根据实际天气状况有所变化。合肥位于我国中东部地区,地处由亚热带向暖温带过渡的湿润气候地区,季风气候明显,常年湿润多雨、气候温和,温度梯度和风速梯度变化不大^[9]。通过对上述大量探空实验数据的统计分析得出了合肥地区 C_n^2 随高度变化的垂直分布特性,并以此为基础选取广泛应用的大气湍流参数模式 Hufnagel-Valley 模式,根据实际测量数据对其参数进行调配得到合肥地区 C_n^2 的垂直分布模式。由于利用温度脉动探空仪进行实地探空实验的成本较高,获得一条完整廓线的时间比较长,因此只能在部分地区进行大气折射率结构常数 C_n^2 的实时实地测量。Hufnagel-Valley 模式拟合主要是以实际测量的 C_n^2 廓线作为参考标准,对探空数据的精度要求较高,拟合过程比较复杂和繁琐,得到一条拟合模式廓线相当困难,其优点是能够给出详细解析表达式,使用较方便。由于大气湍流变化的复杂性,拟合模式廓线需根据定期实测 C_n^2 廓线进行修正,这也给 Hufnagel-Valley 模式的使用和推广带来了局限性。

为了弥补 HV 模式对实测 C_n^2 廓线的依赖性和使用的局限性,引入 NOAA 模式,也被称为 VanZandt 模式^[10],利用标准的无线电探空所得到的标准常规气象资料反演得到 C_n^2 廓线。通过无线电探空数据可以得到位温 θ 、比湿 q 和风速矢量 \vec{v} ,在计算模式中用到的参数定义为:

$$N^2 = g \frac{\partial(\ln\theta)}{\partial z} \quad (1)$$

$$q' = \frac{\partial q}{\partial z} \quad (2)$$

$$S = \left| \frac{\partial \vec{v}}{\partial z} \right| \quad (3)$$

$$R_i = \frac{N^2}{S^2} \quad (4)$$

式中: N 为 Brunt-Vaisala 频率; N^2 被称作静态稳定度; g 为重力加速度; q' 为湿度梯度; S 为风速梯度; R_i 为 Richardson 数梯度; z 为垂直高度坐标。NOAA 模式把小结构和风切变以统计方式结合在一起, 位温的小结构以 Brunt-Vaisala 频率 N^2 的形式和湍流层厚度 L 的统计频数表示。因此, C_n^2 在特定高度上的值以这些概率的三重积分表示:

$$C_n^2 = 2.8M_0^2 \int_{L_{\min}}^{L_{\max}} L^{4/3} P_L dL \int_0^\infty P_S dS \int_{-\infty}^\infty N^4 P_N dN^2 \quad (5)$$

式中: $M_0 = -79 \times 10^{-6} P/Tg$; P 为以毫巴为单位的大气压; T 为开氏温标的温度; P_L 为对应于均匀分布的惯性尺度内归一化系数。对于高斯分布:

$$P_S = \frac{S}{\sigma_S} \exp\left[-\frac{S^2 + \bar{S}^2}{2\sigma_S^2}\right] I_0\left(\frac{S\bar{S}}{\sigma_S^2}\right), \quad I_0 \text{ 为修正贝塞尔函数} \quad (6)$$

$$P_N = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_N} \exp\left[-\frac{(N^2 - \bar{N}^2)^2}{2\sigma_N^2}\right] \quad (7)$$

σ_S 和 σ_N 分别为 S 和 N 的标准差:

$$\sigma_S = \sigma_S L^{\alpha_L} \bar{N}^{\alpha_N} \rho^{\alpha_p} \quad (8)$$

$$\sigma_N = \sqrt{6/5} \sigma_S \bar{N}^{1/2} \quad (9)$$

式中: $\sigma_1 = 0.18$, $\alpha_L = -0.3$, $\alpha_N = 1/4$, $\alpha_p = -0.15$ 。概率密度函数 P_L 、 P_S 和 P_N 分别对应湍流层的外尺度、风速剪切和 Brunt-Vaisala 频率, 这些参数可以由常规探空数据得到。现在 NOAA 模式可以给出由边界层直到平流层的合理 C_n^2 廓线。

目前拥有全国十几个不同典型地区气象站点 1990 年~2009 年间常规探空资料近百份, 其中包括新疆库尔勒、安徽阜阳、四川成都、福建厦门、云南昆明、吉林长春、广东西沙和北京等, 基本上涵盖了全国不同地理特征、不同气候条件的大部分典型区域, 利用这些探空数据深入分析研究了全国不同典型地区大气温度、气压、相对湿度和高空风场等常规气象背景参数与大气湍流强度的关系, 建立大气湍流模型与高空气象参数的相关性研究, 利用 NOAA 模式, 可以更加便捷地得到不同典型地区高空湍流廓线模式, 也为深入研究高空大气湍流的动力成因和结构特性提供了坚实的数据资料基础。

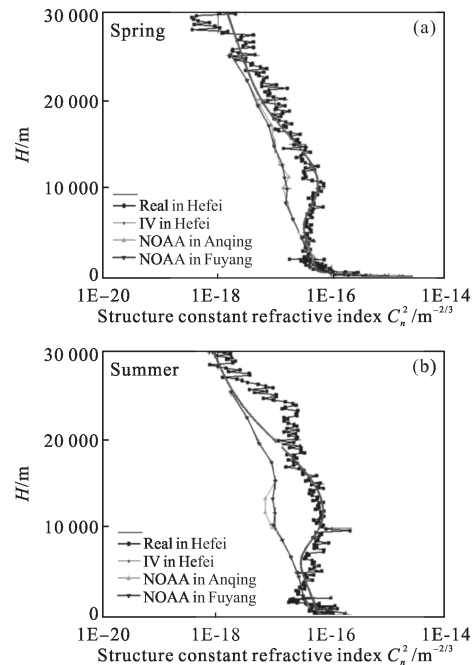
2 实验结果与分析讨论

2.1 合肥地区大气折射率结构常数 C_n^2 模式廓线

分布特性

为了分析验证根据常规探空数据通过 NOAA 模式得到 C_n^2 廓线的可行性, 选择安徽安庆和阜阳地区两个气象站点 1998 年~2008 年间常规探空资料进行统计分析, 由此得到两个地区 11 年不同季节的 NOAA 模式廓线。并从中选取 2005 年度四季 NOAA 模式廓线与合肥地区 2005 年度 240 份利用温度脉动探空仪实际测量的 C_n^2 数据拟合得到的 Hufnagel-Valley 模式进行对比验证分析, 由于合肥地区没有常规气象探空站点资料, 选择与合肥地区地理位置和气候条件相差不大的安庆和阜阳地区作为参考。

图 1 为实际测量 C_n^2 廓线和拟合得到的 HV 模式廓线与 NOAA 模式廓线对比分析图, 其中实测廓线为 2005 年度在合肥地区利用温度脉动探空仪实际测量得到的四季 C_n^2 平均廓线, NOAA 模式廓线是根据安庆和阜阳地区气象站点 2005 年度常规气象探空数据得到的两个地区四季 NOAA 模式廓线。从图中可以看出, NOAA 廓线在不同季节的某些高度层比较好地符合实际测量数据的平均廓线和 HV 模式廓线, 其中秋季和冬季的模式廓线和实测廓线比较相近, 总体变化趋势有较多的一致性; 春季的模式廓



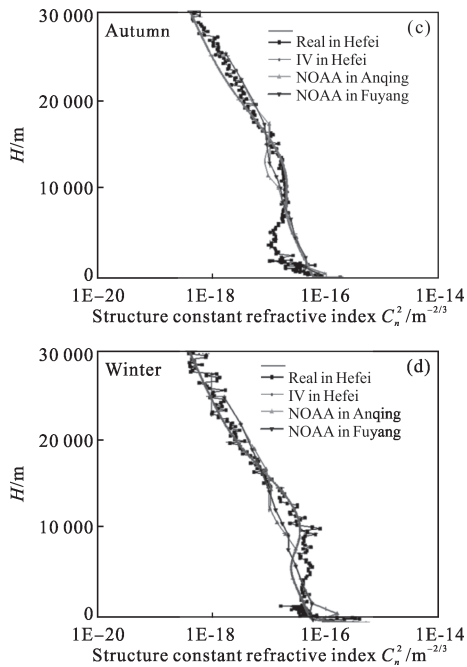


图 1 合肥地区四季实测廓线和 HV 模式廓线与安庆、阜阳地区 NOAA 模式廓线对比图

Fig.1 Contrast of real profile and HV model and NOAA model in four seasons

线和实测廓线在 5 000 m 以下较吻合,5 000 m 以上有一定的差距,但整体差距不超过 0.5 个数量级,有较小的固定偏差;夏季的模式廓线和实测廓线存在较大差异,最大差距在 12 500 m 左右,约为一个数量级,此高度层正好处于对流层顶,大气温度、大气风场等常规气象参数变化较大,对 NOAA 模式廓线的变化有一定影响。从总体看,NOAA 模式廓线能够反映大气湍流高度分布和季节变化特性。

2.2 北京地区大气折射率结构常数 C_n^2 模式廓线分布特性

在北京地区利用温度脉动探空仪测量大气折射率结构常数 C_n^2 ,同时还利用 Vaisala 气象探空仪测量大气温度、相对湿度、气压和风速风向等常规气象参数,两种探空仪同时同地施放,因此为利用 NOAA 模式计算的 C_n^2 廓线和实测 C_n^2 廓线的对比分析提供了很好的条件。根据 Vaisala 气象探空仪同步测量得到的常规气象参数通过 NOAA 模式计算得到 C_n^2 廓线与实测廓线对比分析如下。

图 2 为在北京地区实测的 C_n^2 与 NOAA 模式廓线对比分析图,由于 Vaisala 气象探空仪数据采样

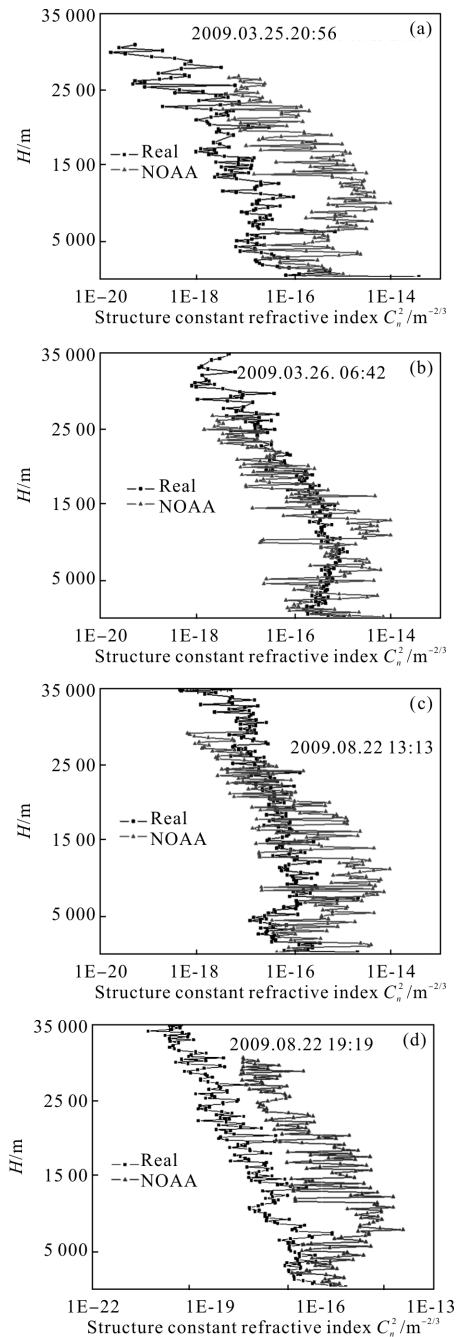


图 2 北京地区实测 C_n^2 平均廓线与 NOAA 模式廓线对比图

Fig.2 Contrast of real profile and NOAA model in Beijing

时间间隔为 2 s,数据比一般气象站点气象资料的密度都要高,因此通过 NOAA 模式计算得到的 C_n^2 廓线与实测 C_n^2 廓线精细程度基本一致,所以将 NOAA 模式廓线同样用 200 m 为一层作平均。从图中可以看出,模式廓线和实测廓线存在一定的差距,但是和实测廓线具有相对一致的高度变化特征,从廓线的整体来看白天两者差别较小,最大差距不超过一个

数量级;夜间两者差别较大,最大差距超过两个数量级。

为了更加全面地分析验证北京地区 NOAA 模式廓线与实测廓线的差别,根据北京市气象局提供的利用 GTS1 型数字式探空仪和 L 波段雷达综合测量的高精度探空资料进行对比分析,数据资料包括 2005 年 7 月到 2007 年 8 月间 26 个月的 30m 等间隔常规气象探空数据,每天均有 7:00、13:00 和 19:00 三次探空实验数据。由于在北京地区实测 C_n^2 廓线数据有限,为了保证对比分析数据时间一致性,从上述高精度探空资料中选取与实测 C_n^2 廓线相同时间段和相近时间段的数据通过 NOAA 模式计算得到 C_n^2 模式廓线。

图 3 为在北京地区实测的 C_n^2 与根据 GTS1 型数字式探空仪数据计算的 NOAA 模式廓线对比分析图,由于 GTS1 型数字式探空仪数据为 30 m 等间隔探空数据,通过 NOAA 模式计算得到的 C_n^2 廓线非常密集,波动量很大,为了便于对比分析,将实测 C_n^2 廓线和相应的 NOAA 模式廓线均进行滑动平均处理。

从图中可以看出,由于两种探空设备施放的时间和天气条件均有不同,模式廓线和实测廓线同样存在一定的差距,但是和实测廓线也具有相对一致的高度变化特征,部分高度两者有重叠,从廓线的整

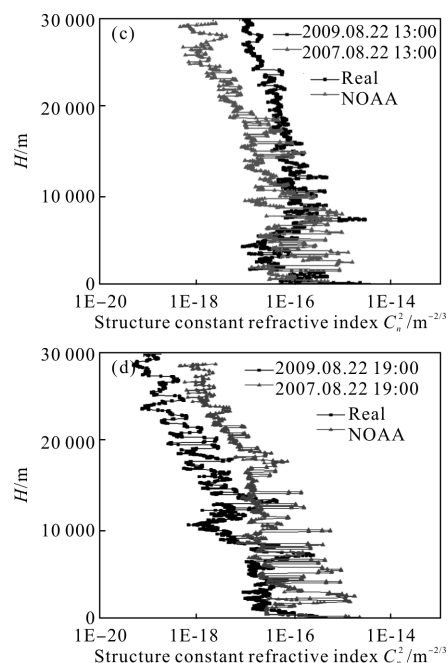
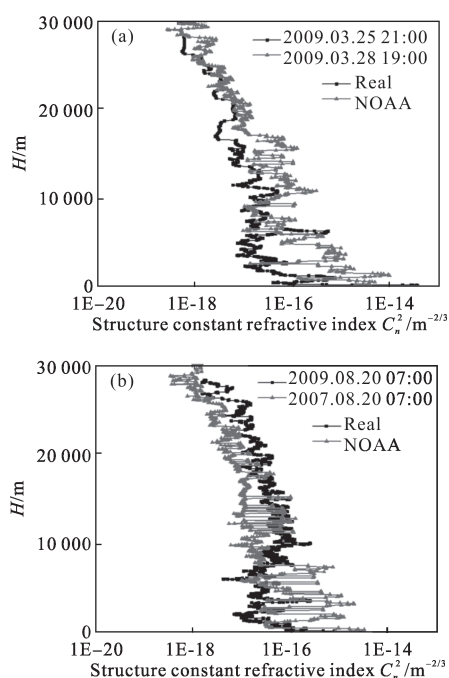


图 3 北京地区实测 C_n^2 平均廓线与 NOAA 模式廓线对比图

Fig.3 Contrast of real profile and NOAA model in Beijing

体来看,NOAA 模式廓线与实测廓线最大差距不超过两个数量级。

由于释放探空成本较高,常规探空资料的数据精度有限,因此文中分析得出的国内典型地区大气折射率结构常数 C_n^2 垂直分布廓线和统计模式还需在今后的研究中进一步修正和验证。

3 结论

通过以上对不同典型地区的大气折射率结构常数 C_n^2 分布廓线和统计模式的分析研究,可以得出以下结论:

(1) 根据安庆和阜阳两个典型地区相应气象站点常规气象探空资料统计分析数据,通过 NOAA 模式得到了两个典型地区大气湍流高度分布廓线,并和合肥地区实际测量数据进行对比验证分析,NOAA 廓线在不同季节的某些高度层比较好地符合实际测量数据的平均廓线,整体差距不超过 0.5 个数量级,总体变化趋势有较多的一致性,是能够反映大气湍流高度分布昼夜和季节变化特性的。

(2) 根据北京地区同步测量常规气象参数通过 NOAA 模式计算得到 C_n^2 廓线与实测 C_n^2 廓线对比分析可以看出,NOAA 模式廓线与实测廓线精细程度

基本一致,两者具有相对一致的高度变化特征,部分高度两者有重叠,最大差距不超过两个数量级。

(3) 利用国内不同地区常规探空资料通过 NOAA 模式得到高空大气湍流的初步模式,可以对我国不同地理位置和不同气候类型的典型地区高空大气湍流垂直分布特性和统计模式规律有比较直观的了解。NOAA 模式相对 Hufnagel-Valley 模式应用比较方便,主要运用常规气象探空数据进行拟合计算,这为将来更加便捷地获取大气湍流分布廓线提供了初步探索。

(4) 从不同典型地区的 NOAA 模式廓线可以看出,不同地区 C_n^2 随高度分布特性是不相同的;同一地区的 C_n^2 分布廓线在不同年份和不同季节也是不相同的,这也表明 C_n^2 在时空分布上的不均匀性。 C_n^2 随高度分布具有明显的成层结构,在整个高度上会不规则地出现湍流较强的层次和湍流较弱的层次,这种成层结构在 C_n^2 的实际观测中也普遍存在。

参考文献:

- [1] Song Zhengfang. Applied Atmospheric Optics [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1990: 67-70. (in Chinese)
宋正方. 应用大气光学基础[M]. 北京: 气象出版社, 1990: 67-70.
- [2] Friedlander S K, Topper L. Turbulence: Classic Papers on Statistical Theory [M]. New York: Interscience Publishers, 1961.
- [3] Beland R R. Propagation Through Atmospheric Optical Turbulence, IE/E-O System Handbook Vol.2[M]. US: SPIE Optical Engineering Press, 1993.
- [4] Rao Ruizhong. Probability analysis of effects of optical properties of atmosphere on laser engineering [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(5): 583-587. (in Chinese)
- [5] Wu Lin, Fang Jiancheng, Yang Zhaohua. Analysis of influence parameters of aero-opticeffects based on turbulence vortex model [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(1): 97-101. (in Chinese)
- [6] Tatarski V I. 湍流大气中的波传播理论[M]. 温景嵩等, 译. 北京: 科学出版社, 1978.
- [7] Hufnagel R, Stanley N R. Modulation transfer function associated with image transmission through turbulent media [J]. *Opt Soc Am*, 1964, 54: 52-61.
- [8] Sun Gang, Weng Ningquan, Xiao Liming, et al. Profile and character of atmospheric structure constant 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 C_n^2 分布特性及分析 [J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(4): 485-490.
- [9] Sun Gang, Weng Ningquan, Xiao Liming. Vertical models of atmospheric structure constant of refractive index C_n^2 [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(2): 183-188. (in Chinese)
孙刚, 翁宁泉, 肖黎明. 合肥地区大气折射率结构常数高度分布模式研究[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(2): 183-188.
- [10] Warnock J M, VanZandt T E. A Statistical model to estimate the refractivity turbulence structure constant C_n^2 in the free atmosphere [C]// NOAA Technical Memorandum ERL AL-10, Aeronomy Laboratory Boulder, 1985: 1-15.