

文章编号: 1000-8349(2012)03-362-16

# 大气光学湍流模型研究进展

王红帅<sup>1,2</sup>, 姚永强<sup>1</sup>, 刘立勇<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 国家天文台, 北京 100012; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 综述大气光学湍流模型方法的发展历程和最新进展。大气光学湍流模型方法利用气象数据和光学湍流参数化模型, 能同时获得台址的全面大气光学湍流参数, 包括  $C_n^2$  廓线、大气相干长度、相干时间、视宁度、等晕角和湍流外尺度。介绍了利用气象参数来计算光学湍流的各种方法及其特点, 回顾了国际国内进行光学湍流模型研究的主要研究单位与工作内容, 提出大气光学湍流模型方法国内研究的发展方向。

**关键词:** 大气光学; 大气光学湍流廓线; 视宁度预报; 气象模式

**中图分类号:** P183.4      **文献标识码:** A

## 1 引言

由于地球大气湍流的存在, 来自天体的光线波前会发生畸变, 光强会产生闪烁, 使地基望远镜的成像质量受到严重影响。因此, 现代大型光学、红外望远镜建设前期都需要进行天文选址<sup>[1]</sup>, 找到大气稳定、视宁度好的台址, 以便更加有效地发挥观测设备的效能。目前已有许多成熟的技术设备来测量大气光学湍流参数 ( $C_n^2$  廓线、大气相干长度、大气相干时间、视宁度、等晕角和湍流外尺度等), 如 DIMM(Differential Image Motion Monitor, 较差像运动视宁度仪)、MASS(Multi-Aperture Scintillation Sensor, 多孔径闪烁探测器)、SCIDAR(Scintillation Detection and Ranging, 闪烁探测层析)、SNODAR(Surface layer Non-Doppler Acoustic Radar, 表面层非多普勒声雷达)、探空气球等<sup>[2]</sup>。天文选址通常需要大量的人力、物力和时间。现代大型望远镜的选址工作, 如 TMT(Thirty Meter Telescope)<sup>[3]</sup>、ATST(Advanced Technology Solar Telescope)<sup>[4]</sup>, 及国内的一些选址活动<sup>[7]</sup>, 都历时数年, 耗费巨大。天文选址的湍流测量实际上还有其局限性: 只是提供光学湍流的一个局部测量, 或者是沿着某方向路径的分布, 而对于整个候选台址范围内的光学湍流特征无法同时给出评价。

收稿日期: 2012-01-11; 修回日期: 2012-03-15

资助项目: 国家自然科学基金(11073031,10903014); 中国科学院国家天文台青年人才基金

目前地基望远镜口径越来越大, 造价也越来越高, 对台址条件的要求也愈加苛刻。为了更好地发挥大型望远镜的性能, 许多大型望远镜的运行已逐渐开始优化观测时间表<sup>[8]</sup>, 即根据不同的观测条件安排相应的观测项目。在视宁度好的夜晚, 望远镜的分辨率、可观测的极限星等都会增加, 有利于安排对视宁度要求高的暗弱天体目标进行观测。比如, 当视宁度从 1 角秒变为 0.5 角秒时, 可探测目标的极限星等可以增加 2 个星等, 可观测 AGN 的数量从 5 变为 100<sup>[9]</sup>。对观测时间表的优化, 需要提前预报出台址的光学湍流参数, 实测方法是无能为力的。

从 20 世纪 90 年代开始, 国际天文界逐渐发展了利用中尺度气象模式来计算和预报大气光学湍流强度的方法<sup>[10-12]</sup>。利用中尺度气象模式, 以全球的气象格点数据或者探空雷达、气象卫星等获取的数据作为模式的初始和边界条件, 可以模拟得到目标台址附近几十千米范围内的气象参数的空间分布。根据气象参数和光学湍流参数之间的关系, 也就是“光学湍流参数化<sup>[11]</sup>”, 可以计算出光学湍流参数的空间分布。利用全球气象模式释放的预报场格点数据, 其模拟结果就是对未来光学湍流参数的预报。

相对于实测方法, 大气光学湍流模型方法在 4 个方面得到应用<sup>[13]</sup>: (1) 获得台址附近几十千米范围的大气光学湍流强度的 3 维空间分布; (2) 获取长期的全球性大气光学湍流参数, 帮助天文选址; (3) 获得大气光学湍流廓线等重要参数的预报, 优化大型望远镜的天文观测时间表; (4) 获得光学湍流几十年的长时标特征, 用于探索光学湍流的长期变化趋势。

目前已有诸多天文台址进行过大气光学湍流模型计算研究, 如 Cerro Paranal<sup>[12]</sup>、Roque de los Muchachos<sup>[14]</sup>、San Pedro Martir<sup>[15, 16]</sup>、Mt Graham<sup>[17]</sup>、Dome C、Dome A、南极点<sup>[18, 19]</sup>、Mauna Kea<sup>[20]</sup> 等。与实测数据的对比表明, 大气湍流模型计算方法已具备可靠性和相当的精度, 其模拟结果相对于实测结果的标准差已与实测本身的标准差相当<sup>[21]</sup>。在大气光学湍流参数预报方面, 夏威夷大学已经建立了专门的 Mauna Kea 气象预报中心, 为 Mauna Kea 天文台提供未来 5 天的气象条件和大气光学湍流参数的预报。

大气光学湍流模型方法在美国的战略导弹防御系统中也得到了有效应用<sup>[22]</sup>。大功率机载激光器的首要任务是击毁飞入射程内的敌方导弹, 但由于大气湍流的存在, 激光器发射的光束在大气传播过程中会产生扩束甚至失标, 严重削弱了击毁导弹的能力。为此, 美国空军专门成立了大气决策辅助系统 (Atmosphere Decision Aid), 提前预报大气光学湍流的分布变化, 为机载激光器选择最佳发射时间和路径, 大幅提高命中目标的精准度和击毁能力。

## 2 模型方法

大气光学湍流的模型计算, 首先需要得到局地的气象参数, 再由气象参数计算出大气光学湍流参数。气象参数可以是探空气球的数据, 也可以是数值气象预报的结果。目前用来预报气象参数的气象模式主要有 Meso-NH (Non-Hydrostatic Mesoscale Atmospheric Model, 非静力中尺度大气模式)<sup>[23]</sup> 和 WRF (Weather Research and Forecasting Model, 天气研究与预报模式)<sup>[24]</sup>。MM5 (Mesoscale Model 5, 中尺度模式第 5 代)<sup>[25]</sup> 气象模式也曾经得到过一些

应用,但是目前MM5已经停止更新,逐渐为WRF模式所取代。本节介绍通过气象参数计算大气光学湍流的几种主要方法。

### 2.1 平均廓线

大气光学湍流强度在不同高度的分布( $C_n^2$ 廓线),在自适应光学、光干涉测量、光通信、激光传输等领域都有重要的应用。最初的尝试是根据一些观测结果,拟合出一个平均的 $C_n^2$ 廓线。1971年,Wyngaard<sup>[26]</sup>总结了在美国堪萨斯平原的实验,获得了近地面层的大气温度结构常数 $C_T^2$ 廓线。

在不稳定条件下( $h/L \geq 0$ ),

$$C_T^2(h) = 4.9T^2h^{-2/3}(1 - 7h/L)^{-2/3} \quad . \quad (1)$$

在稳定条件下( $h/L \leq 0$ ),

$$C_T^2(h) = 4.9T^2h^{-2/3}(1 + 2.75h/L)^{2/3} \quad . \quad (2)$$

其中 $h$ 为高度(m), $L$ 为Monin-Obukhov长度,一般为10m左右, $T$ 为特征温度。近地面层几百米的范围内,在不稳定条件下, $C_T^2$ 随着高度 $h^{-4/3}$ 减少,而 $C_n^2$ 可由如下公式计算:

$$C_n^2 = \left( \frac{80 \times 10^{-6}P}{T^2} \right)^2 C_T^2 \quad . \quad (3)$$

1974年,Hufnagel<sup>[27]</sup>给出了地面上3~24 km高度范围自由大气的 $C_n^2$ 平均廓线,

$$C_n^2(h) = 5.94 \times 10^{-23}(W/27)^2h^{10}e^{-h} + 2.7 \times 10^{-16}e^{-h/1.5} \quad , \quad (4)$$

$$W^2 = \frac{1}{15} \int_5^{20} V^2(h) dh \quad , \quad (5)$$

其中 $h$ 为高度(km), $V(h)$ 为高度 $h$ 处的风速, $W$ 取值18 m/s左右。

2004年,Abahamid等人<sup>[28]</sup>通过全球分布的多个天文台址长期累积的168条探空气球数据,统计分析了 $C_n^2$ 中值的廓线,拟合出近地面1km以内的 $C_n^2$ 廓线,

$$C_n^2 = 1.24 \times 10^{-12}h^{-1.53} \quad . \quad (6)$$

上式中 $C_n^2$ 随高度 $h^{-1.53}$ 减少,接近Wyngaard<sup>[26]</sup>的 $h^{-4/3}$ 。在自由大气中,Abahamid<sup>[28]</sup>的 $C_n^2$ 平均廓线的趋势和Hufnagel公式(4)符合得也很好,再次验证了上述平均廓线实际应用的可靠性。

中国科学院安徽光机所在大气湍流平均廓线研究方面有一系列的工作。其研究人员利用探空气球的实测数据,拟合出了国内多个区域的 $C_n^2$ 平均廓线。1996年,吴晓庆等人<sup>[29]</sup>依据1994年12月在兴隆的探空数据,给出了兴隆夜间的 $C_n^2$ 平均廓线公式(公式7)。1999年,翁宁泉等人<sup>[30]</sup>依据1993年8月到9月在昆明的探空数据,拟合出昆明夜间 $C_n^2$ 平均廓线公

式(公式 8); 依据 1993 年 11 月到 12 月在合肥的探空数据, 拟合出合肥夜间  $C_n^2$  的平均廓线公式(公式 9)。2007 年, 吴晓庆等人<sup>[31]</sup> 依据最新的探空资料, 重新拟合出了昆明夜间(公式 10)与合肥夜间(公式 11)的  $C_n^2$  平均廓线公式。2008 年, 孙刚等人<sup>[32]</sup> 依据 2005 年 1 月-12 月的探空数据, 重新拟合出了合肥夜间的  $C_n^2$  平均廓线(公式 12)及其四季节的平均廓线。

兴隆夜间<sup>[29]</sup>:

$$C_n^2(h) = 9.68 \times 10^{-23} h^{10} e^{-1.01h} + 8.1 \times 10^{-18} e^{-h/2.8} + 3 \times 10^{-15} e^{-h/0.812} \quad (7)$$

昆明夜间<sup>[30]</sup>:

$$C_n^2(h) = 3.0 \times 10^{-15} e^{-h/0.13} + 3.5 \times 10^{-17} e^{-h/5.8} \quad (8)$$

合肥夜间<sup>[30]</sup>:

$$C_n^2(h) = 2.3 \times 10^{-22} h^{10} e^{-h/0.79} + 3.9 \times 10^{-16} e^{-h/0.19} + 1.2 \times 10^{-16} e^{-h/3.3} \quad (9)$$

昆明夜间<sup>[31]</sup>:

$$C_n^2(h) = 2.1 \times 10^{-15} e^{-h/0.18} + 5.1 \times 10^{-17} e^{-h/7.2} \quad (10)$$

合肥夜间<sup>[31]</sup>:

$$C_n^2(h) = 2.8 \times 10^{-29} h^{17} e^{-h/0.7} + 2.1 \times 10^{-15} e^{-h/0.10} + 2.0 \times 10^{-17} e^{-h/4.8} \quad (11)$$

合肥夜间<sup>[32]</sup>:

$$C_n^2(h) = 4.0 \times 10^{-26} h^{15.3} e^{-h/0.79} + 2.0 \times 10^{-15} e^{-h/0.10} + 5.0 \times 10^{-17} e^{-h/6.15} \quad (12)$$

图 1 总结了对于不同台址应用的  $C_n^2$  平均廓线。在近地面层,  $C_n^2$  都随着高度的增加而迅速降低, 兴隆站的湍流强度较大, 降幅也明显低于其他台址。在高空, 兴隆和合肥都表现出存在高空湍流层, 符合 Hufnagel 公式的一般特征; 昆明的平均廓线较粗略, 没有表现出高空湍流层。

$C_n^2$  平均廓线反映了大气光学湍流在最一般情况下的特征分布。在没有实测条件的情况下,  $C_n^2$  廓线可以作为描述台址区域湍流特征的替代方案。平均廓线方法不能区分不同的台址地形和不同时间的  $C_n^2$  廓线分布, 当需要准确了解某个台址在某段时间的  $C_n^2$  廓线时, 平均廓线就会显现出其应用的局限性。

## 2.2 物理模型

基于湍流局地均匀各项同性理论, Tatarski<sup>[33]</sup> 推导出了大气折射率结构常数和气象条件及湍流外尺度之间  $L_0$  的关系,

$$C_n^2 = a^2 L_0^{4/3} M^2 \quad (13)$$

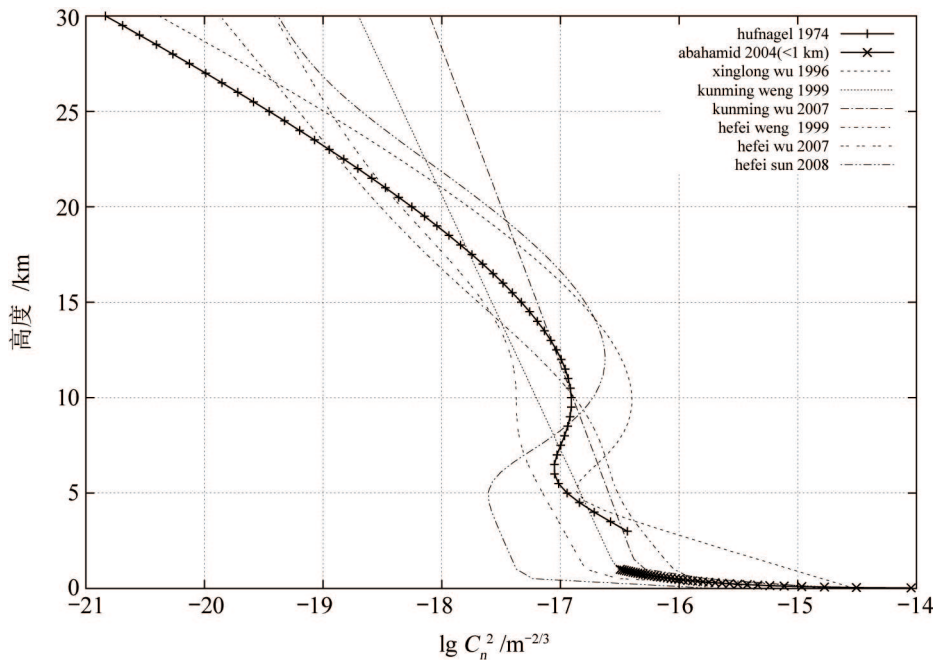


图 1 不同台址的  $C_n^2$  平均廓线

$$M = \frac{\delta N}{\delta h} = -\frac{79 \times 10^{-6} P \delta \theta}{T^2 \delta h} \quad (14)$$

其中,  $a$  为常数,  $N$  为大气折射率,  $P$  为气压 (hPa),  $T$  为温度 (K),  $h$  为高度 (m),  $\theta$  为位温 (K)。

基于不同的湍流外尺度  $L_0$  的廓线的表达式, 物理模型可划分为以下两种形式。

(1) AFGL 模型

AFGL (Air Force Geophysics Laboratory, 空军地球物理实验室), 是美国空军地球物理实验室提出的湍流廓线模型, 也是在美国战略导弹防御系统中使用的模型。1993 年, Dewan<sup>[34]</sup> 根据平流层中的火箭尾迹, 拟合出了湍流外尺度  $L_0$  和风速剪切  $S$  之间的关系, 但这个关系不包括对流层的底部。

$$L_0^{4/3}(h) = 0.1^{4/3} \times 10^Y \quad (15)$$

在对流层中,

$$Y = 1.64 + 42.0S \quad ; \quad (16)$$

在平流层中,

$$Y = 0.506 + 50.0S \quad ; \quad (17)$$

$S$  表示风速剪切,

$$S = \sqrt{(dV_x/dz)^2 + (dV_y/dz)^2} \quad (18)$$

2004 年, Jackson<sup>[35]</sup> 根据美国空军在 1998 年和 1999 年的探空气球数据, 改进了 Dewan 公式, 将  $L_0$  表示为风速剪切和温度梯度的函数。Jackson 分析比较了 Dewan 的线性关系和如下的多项式拟合结果, 表明 4 次多项式拟合的结果最好。

在对流层底部 (1.572~ 5.472 km),

$$Y = 2.9767 + 27.9804(dV/dZ) + 2.9012(dT/dZ) + 1.1843(dT/dZ)^2 + 0.1741(dT/dZ)^3 + 0.0086(dT/dZ)^4 \quad ; \quad (19)$$

在对流层中,

$$Y = 0.7152 + 30.6024(dV/dZ) + 0.0003(dT/dZ) - 0.0057(dT/dZ)^2 - 0.0016(dT/dZ)^3 + 0.0001(dT/dZ)^4 \quad ; \quad (20)$$

在对流层顶中,

$$Y = 0.7716 - 0.0104(dT/dZ) + 0.0056(dT/dZ)^2 - 0.00013(dT/dZ)^3 + 0.00005(dT/dZ)^4 \quad ; \quad (21)$$

在平流层中,

$$Y = 0.6763 + 8.1569(dV/dZ) - 0.536(dT/dZ) + 0.0084(dT/dZ)^2 - 0.0007(dT/dZ)^3 + 0.0002(dT/dZ)^4 \quad . \quad (22)$$

## (2) C-V 模型

C-V 模型最先是由 Coulman 和 Vernin<sup>[36]</sup> 提出的。1988 年, Coulman 和 Vernin 分析了 SCIDAR 实测的  $C_n^2$  廓线和无线电探空仪实测的气象数据, 基于公式 (13) 推导出了在 2~17 km 高度范围的  $L_0$  平均廓线,

$$L_0(h) = \frac{4}{1 + [(h - 8500)/2500]^2} \quad (23)$$

同年, Beland 和 Brown<sup>[37]</sup> 分析探空气球的数据, 进一步推导出了 17 km 以上的  $L_0$  廓线,

$$L_0(h) = 3.07 \times 10^{-1} - 3.24 \times 10^{-2}(h/1000 - 17) + 1.67 \times 10^{-3}(h/1000 - 17)^2 + 4.76 \times 10^{-4}(h/1000 - 17)^3 \quad . \quad (24)$$

2004 年, Abahamid<sup>[28]</sup> 根据更多探空气球的资料, 给出了  $L_0$  在 1 km 以内的边界层表达式,

$$L_0(h) = 3.21h^{-0.11} \quad . \quad (25)$$

需要指出的是, C-V 模型的  $L_0$  廓线是基于多个台址实测数据总结的经验模型。相对于输入实时气象参数的 AFGL 模型, C-V 模型在计算  $C_n^2$  廓线时缺乏对于不同大气条件的区分能力。

### 2.3 分析模型

20 世纪 90 年代开始, 法国尼斯大学针对法国、智利、西班牙和墨西哥境内的 8 个天文台址, 使用探空气球进行了光学湍流廓线的测量, 积累了 145 条实测数据。2006-2007 年期间, Trinquet 和 Vernin<sup>[38, 39]</sup> 通过对这些实测数据的细致分析发现, 位温梯度、风速剪切和温度结构常数在统计上都呈现对数正态分布, 并且其相互之间存在一定的相关性。通过对数据的统计分析, 得出如下分析模型:

$$C_T^2 = \langle C_T^2 \rangle_m \frac{\chi}{\langle \chi \rangle_m} \left( \frac{S}{\langle S \rangle_m} \right)^{1/2}, \quad (26)$$

$$\chi = \frac{d\bar{\theta}}{dz}. \quad (27)$$

其中  $\chi$  表示位温梯度,  $S$  为风速剪切(同公式 18), 尖括号  $\langle \rangle_m$  表示同一高度上所有实测数据的统计中值。Trinquet 和 Vernin 的研究表明, 分析模型、平均廓线、C-V 模型、AFGL 模型在与实测数据的对比中, 分析模型最接近实测数据, 因此最具备实用性。

### 2.4 数值模型

由量纲分析, Tatarski<sup>[33]</sup> 给出了大气温度结构常数的表达式,

$$C_T^2 = 1.6\epsilon_\theta \epsilon^{-\frac{1}{3}}, \quad (28)$$

$\epsilon_\theta$  为温度差异引起的分子扩散率,  $\epsilon$  为湍动能耗散率。

1989 年 Bougeault<sup>[40]</sup> 提出用数值方法来参数化湍流,  $\epsilon_\theta$  表示为:

$$\epsilon_\theta = -2\overline{w'\theta'} \frac{\delta\bar{\theta}}{\delta z}, \quad (29)$$

其中  $w'$  为垂直风速的扰动量,  $\theta'$  为位温扰动量。 $\overline{w'\theta'}$  可以表示为:

$$\overline{w'\theta'} = -0.16L\sqrt{e}\phi_3 \frac{\delta\bar{\theta}}{\delta z}. \quad (30)$$

其中  $\phi_3$  是逆转的湍流普朗特数,  $e$  为湍动能,  $L$  是 Bougeault-Lacarrere 混合长度。

湍动能耗散  $\epsilon$  可以表示为:

$$\epsilon = 0.7 \frac{e^{3/2}}{L}. \quad (31)$$

$L$  可以表示为:

$$L = \sqrt{\frac{2e}{\frac{g}{\theta} \frac{\delta\bar{\theta}}{\delta z}}}. \quad (32)$$

将公式 (29) 和 (31) 代入 (28), 公式 (30) 代入公式 (29) 中, 得到

$$C_T^2 = 0.59L^{4/3} \left( \frac{\delta\bar{\theta}}{\delta z} \right)^2 \phi_3 \quad (33)$$

在稳定的条件下,  $\phi_3$  取 0.78。结合公式 (3) 和 (32), Masciadri<sup>[41]</sup> 最终得到

$$C_n^2 = 3.35 \times 10^{-6} P^{0.856} \theta^{-10/3} \left( \frac{\delta\bar{\theta}}{\delta z} \right)^{4/3} e^{2/3} \quad (34)$$

其中,  $P$  为气压 (Pa),  $T$  为温度 (K),  $\theta$  为位温 (K),  $e$  为湍动能 ( $\text{m}^2/\text{s}^2$ )。

Masciadri 的一系列工作使得数值模型得到最为广泛的应用。Cherubini 等人<sup>[20, 42]</sup> 在 Mauna Kea 的预报系统也使用了这个模型。该模型需要输入的局部气象参数为压强、温度和湍动能。

### 3 研究现状

国际上开展大气光学湍流模型研究的单位主要有, 法国的尼斯大学 FIZEAU 实验室<sup>[43]</sup>、意大利的 ForOT(3D Optical Turbulence Forecasts above Astronomical Sites)<sup>[44]</sup>、美国夏威夷大学的 Mauna Kea 气象中心<sup>[45]</sup>、美国空军导弹防御系统的大气辅助决策部门。在大气光学领域、天文选址会议上有很多相关的报告, 如 2007 年夏威夷会议<sup>[46]</sup>、2008 年的意大利会议<sup>[47]</sup>、2010 年的智利会议<sup>[48]</sup>。2008 年 9 月, 由 Masciadri 倡导组织了国际会议<sup>[47]</sup> “Optical Turbulence-Astronomy meets Meteorology”, 邀请国际上该领域的气象学家和天文学家, 共同讨论和总结大气光学湍流模型的进展。2011 年出版的 “Seeing Clearly”<sup>[13]</sup> 专著中, 特邀天文与大气光学领域的领军人物发表综述, 其中有 1/3 的篇幅是在介绍大气光学湍流模型 (其余部分介绍大气湍流理论、光学湍流测量和自适应光学技术)。

国内开展过大气光学湍流模型研究的单位主要有, 上海天文台、安徽光机所、天津理工大学和国家天文台, 先后取得了阶段性的研究成果。上海天文台侯金良<sup>[49]</sup> 和天津理工大学的李双喜等人<sup>[50]</sup> 先后利用探空气象资料计算大气相干长度。安徽光机所许利明和吴晓庆<sup>[51]</sup> 采用 MM5 气象模式和 AFGL 模型, 预报了合肥、库尔勒和东山的  $C_n^2$  廓线, 其预报结果符合  $C_n^2$  廓线的一般特征。基于大气光学湍流模型方法在天文选址和台址特征化 (site characterization) 方面的重要性, 国家天文台选址组于 2010 年着手开展大气光学湍流模型的研究<sup>[52]</sup>。

#### 3.1 国际研究进展

##### 3.1.1 最初的尝试

1986 年, Coulman 等人<sup>[53]</sup> 尝试使用气象数据计算视宁度, 在与 AAT(Anglo-Australian Telescope) 实测得到的大气视宁度对比中发现, 在视宁度小于 2" 时, 两者符合得很好; 当视宁度达到 5" 时, 没有相关性。笔者第一次提出利用数值模型来预报大气视宁度, 即使是精度不高的预报, 对于优化安排望远镜的观测也是非常有帮助的。



1995年, Bougeault 等人<sup>[10]</sup>第一次采用中尺度数值气象预报模式 PERIDOT, 由法国探空雷达网提供初始数据, 得到法国两个台址 Lannemezan 与 Mont Lachens 的大气视宁度。采用两重嵌套, 第一层水平分辨率为 10 km, 模拟范围 1 000 km×1 000 km, 第二层水平分辨率为 3 km, 模拟范围为 300 km×300 km; 垂直方向每层高度 500 m。视宁度计算结果和实测数据比较显示了一定的相关性, 但是仍发现与实测数据有较大差异。

Masciadri<sup>[11]</sup>在后续研究中分析其原因, 认为 PERIDOT 气象预报模式采用静力学平衡假设, 在小尺度的垂直风速条件下会产生很大误差。在平坦地区可以假设大气完全水平流动(静力学平衡假设), 但优良天文台址通常是山顶地形, 水平气流通过山坡会产生局部的扰动变化。天文台址的高度一般都在 2 000 m~4 000 m 之间, 在山顶区域发生背风波, 在距离山顶 5~15 km 的高空发生重力波, 而光学湍流即由此背风波、重力波、急流或者风剪切产生。因此须放弃静力学假设, 而在光学湍流预测模型中使用完全非静力学方程。

### 3.1.2 法国尼斯大学

1999年, Masciadri 和 Vernin<sup>[11, 12]</sup>在大气光学湍流数值模型研究方面取得了突破性的进展。采用中尺度非静力学大气模式 Meso-NH 对 Cerro Paranal 台址进行数值计算, 得到了台址周围的压强、温度、风速和大气光学湍流强度的廓线, 通过积分得到了大气视宁度、大气相干时间、等晕角、闪烁率和湍流外尺度。模型区域为 60 km×60 km, 水平分辨率 500 m, 垂直分辨率在近地面为 50 m、到高空逐步增加到 600 m。初始数据由欧洲中期天气预报中心分析资料和探空雷达数据提供。模拟结果与 1993 年 14 d 的 SCIDAR 实测数据进行对比, 展示出重建光学湍流空间分布的可行性。

图 2 给出了模型计算与实测  $C_n^2$  廓线的对比<sup>[12]</sup>。可以看出, 两者廓线趋势非常一致, 在近地面光学湍流都非常强, 随着高度增加值迅速减少。在 10~11 km 对流层顶都表现出湍流层。图 3 是模型计算的 Cerro Paranal 湍流活动  $C_n^2$  廓线在东西向的剖面图。图中左边是智利西边的太平洋海岸线,  $C_n^2$  变化强烈; Paranal 位于一个相对比较高的位置, 近地面湍流强度相对较弱, 高空也相对比较稳定。

2006—2007 年, Trinquet 和 Vernin<sup>[38, 39]</sup>进一步提出了分析模型。2009 年, Trinquet 和 Vernin<sup>[54]</sup>利用分析模型针对加纳利岛进行了为期一个月的大气光学湍流 24 h 预报, 预报时间间隔为 1 h。以 WRF 模式预报气象参数, 初始数据由 GFS(Global Forecast System) 提供, 水平分辨率为 1 km, 垂直方向为 30 分层。图 4 给出其预报的加纳利岛 La Palma 湍流  $C_n^2$  廓线的变化情况, 图 5 是在 2009 年 5—6 月间 WRF 计算的视宁度和实测视宁度的对比<sup>[54, 55]</sup>。

### 3.1.3 意大利 ForOT

ForOT(3D Optical Turbulence Forecast above Astronomical Sites) 于 2005 年 2 月在意大利成立, 这是由玛丽·居里杰出人员奖资助的国际项目, 负责人是 Masciadri。

2001 年, Masciadri<sup>[41]</sup>提出了利用实测数据对大气光学湍流模型进行改进的方法, 不再使用统一大气模式的湍动能背景值, 代之以新的对实测  $C_n^2$  廓线拟合的背景值廓线。重新计算表明, 湍动能背景值廓线能够明显地改善模型精度。图 6 显示了背景值改正前后模型结果的对比, 可以看出改正后更加接近实测廓线。

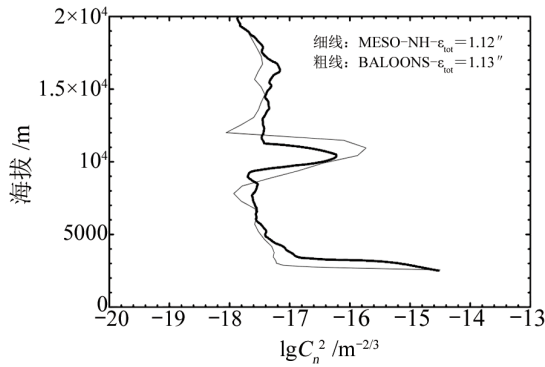


图 2 模型计算和探空气球实测的  $C_n^2$  廓线对比, 细线是模型计算结果, 粗线代表探空气球实测数据<sup>[12]</sup>

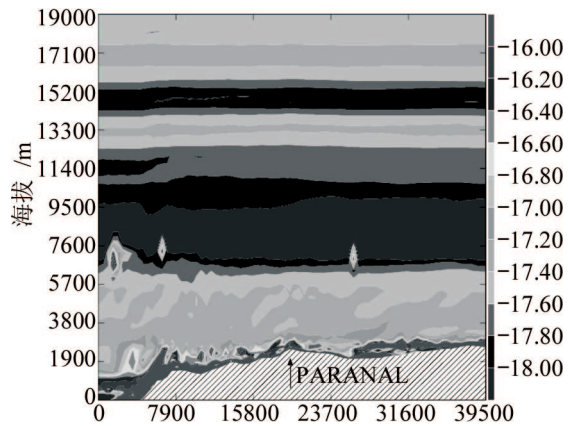


图 3 北智利 Cerro Paranal 上空东西向  $C_n^2$  廓线剖面图, 箭头所指的位置为 Paranal 台址<sup>[11]</sup>

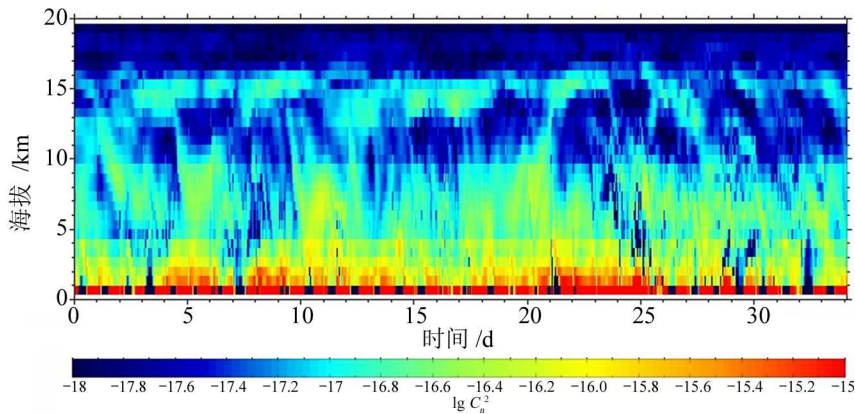


图 4 预报的加纳利岛的  $C_n^2$  廓线变化, 时间长度为 1 个月<sup>[54]</sup>

2002 年, Masciadri<sup>[56]</sup> 在针对墨西哥的 San Pedro Martir 台址模型研究中发现, 光学湍流层在水平方向是各项异性的。在不同方位得到的光学湍流的积分值, 如大气相干长度、等晕角等是不一样的。利用 DIMM、SCIDAR 等进行光学湍流实测时, 通常需要进行天顶角校正。但该文的研究表明, 台址不同方位的光学湍流特征是不同的, 直接进行天顶角校正容易造成统计误差。

2004 年, Masciadri<sup>[57]</sup> 讨论了中尺度大气模型的统计可靠性。对比模型  $C_n^2$  廓线和不同方法实测的  $C_n^2$  廓线, 发现模型计算结果相对于实测  $C_n^2$  廓线的偏差, 并不比各种实测方法 (SCIDAR 和探空气球) 之间的偏差大, 也即其模型精度并不比实测数据的精度差<sup>[58]</sup>。由此得到了一个重要的结论: 大气光学湍流模型方法在局地校准后, 应是一种估计  $C_n^2$  廓线的可信方法。

2006 年, Masciadri<sup>[16]</sup> 采用模型方法得到了 San Pedro Martir 天文台  $C_n^2$  廓线的季节变

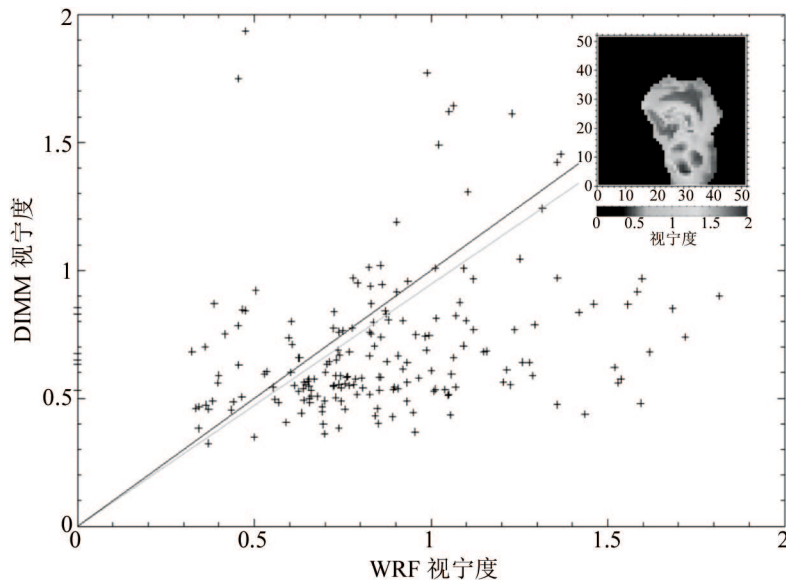


图 5 WRF 计算和实测的视宁度对比, 右上图为加纳利岛 La Plama 视宁度分布的动画截图<sup>[55]</sup>

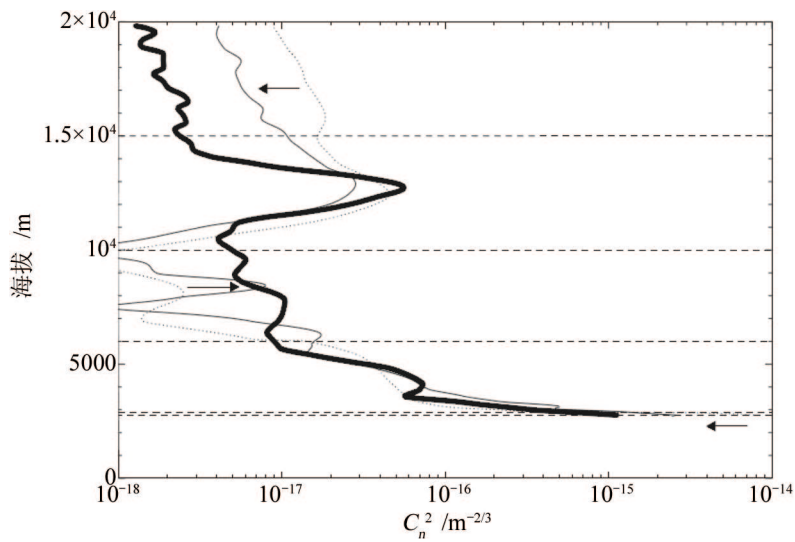


图 6 改正湍动能背景值后  $C_n^2$  廓线模拟结果和改正之前的一个对比, 粗线是 SCIDAR 实测数据, 虚线是改正前的结果, 细实线是改正后的结果<sup>[11]</sup>

化。结果显示, 不同季节的  $C_n^2$  廓线有很大的不同。夏秋季高空湍流层的峰值稍低, 但高度比冬春季高。掌握天文台站的湍流活动特征对于多共轭自适应光学系统设计具有重要意义。针对不同季节的高空湍流峰值变化设置共轭变形镜的位置, 将会获得更大的等晕角和更好的校正效果。

南极的天文观测条件是近年来的一个研究热点。2009 年, Lascaux<sup>[18]</sup> 采用模型方法研究了南极 Dome C 重建光学湍流的可能性。模拟得到的表面层厚度, 自由大气视宁度和表面层视宁度很好地符合了实测数据。2011 年, Lascaux<sup>[19]</sup> 对南极的 Dome C, Dome A 和南极点做了模拟, 显示模型方法可以区分南极内陆不同台址的光学湍流特征。模型方法在以上这些台址的应用和验证, 显示了模型方法强大的适用性与可靠性。

### 3.1.4 美国夏威夷大学 Mauna Kea 气象中心

1999 年, Cherubini 等人<sup>[20, 42]</sup> 通过夏威夷大学的 Mauna Kea 气象中心为夏威夷 Mauna Kea 天文台提供常规气象参数预报。自 2006 年, 提供一系列光学湍流参数预报。初始使用的大气模式为 MM5, 2008 年转为 WRF 模式。这是国际上第一个常规运行的大气光学湍流预报系统, 至今也是唯一的。Cherubini 等人采用的大气光学湍流模型以及校准方法与 Masciadri 方法一致。

图 7 是大气模式 MM5 模拟区域的设置, 采用 4 层嵌套, 最外层分辨率 27 km, 向内依次是 9 km、3 km 和 1 km。最外层由 GFS 提供初始数据, 其模型计算结果依次作为内层的边界和初始条件, 既保证了运算速度和初始条件精度, 又使最内层区域保持足够的分辨率。

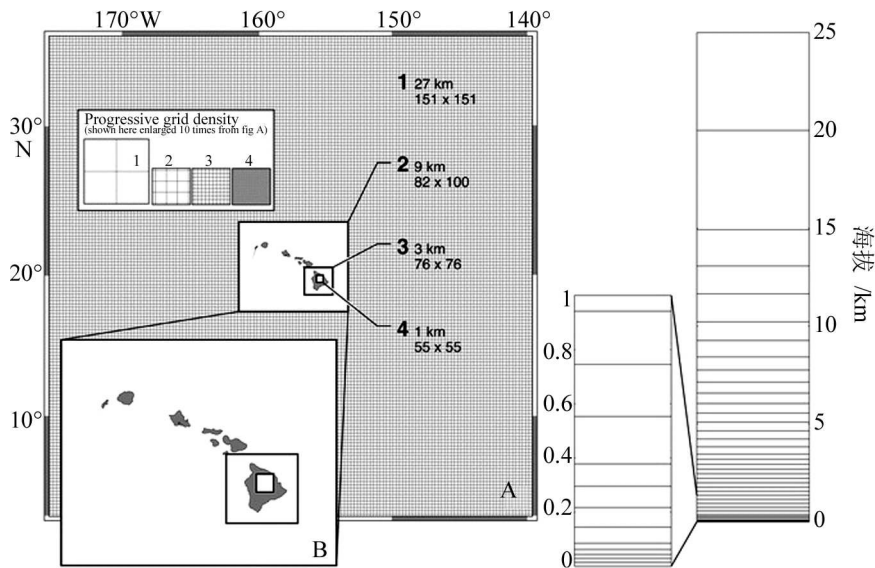


图 7 Mauna Kea 光学湍流预报系统大气模式 MM5 的设置, 采用 4 层嵌套, 由外到内的分辨率分别为 27 km、9 km、3 km 和 1 km, 垂直方向有 50 层<sup>[20]</sup>

### 3.1.5 美国战略导弹防御系统

战略导弹防御系统<sup>[22]</sup>采用机载激光器击毁敌方的导弹。大气湍流的存在严重削弱了激光器的击毁能力,因此需要提前预报大气光学湍流强度的分布,为激光器的发射找到最好的发射时间和路径。美国空军的ADA(Atmosphere Decision Aid)部门负责这项工作。ADA采用MM5模式和AFGL模型,主要预报空军基地上空对流层上部和平流层下部的光学湍流强度的时空分布。

### 3.2 国内研究进展

1989年,侯金良<sup>[49]</sup>使用龙华气象站1984—1985两年的高空气象数据,采用Hufnagel湍流模型计算分析了佘山站 $C_n^2$ 廓线及大气相干长度、相干时间和等晕角,得到佘山站大气相干长度的变化范围5.6~11.0 cm,等晕角的变化范围1.3''~12.9'',相干时间的变化范围是1.0~39.7 ms。

2002—2003年,李双喜等人<sup>[50]</sup>在塔塔尔斯基理论模式框架下,使用10个潜在台址地区气象站的探空资料,给出了不同高度Fried常数 $r_0$ (大气相干长度)的年平均值。随后又使用全国81个气象站10年的探空资料,计算了各测站海拔高度上的 $r_0$ 值的空间分布与季节变化<sup>[59, 60]</sup>,获得了全国范围的 $r_0$ 时空分布的统计结果。由于常规气象探空仪探测精度有限,可能漏掉某些大气层结的精细结构。针对具体天文台站,则计算结果有些包含近地面层,有些不包含近地面层。近地面层湍流可能占整层大气的90%以上<sup>[28]</sup>,不同海拔高度的台站会存在较大的偏差。

安徽光机所在大气光学湍流模型计算方面已有长期的研究积累,曾在国内多个地区进行过 $C_n^2$ 廓线的实地观测。基于这些实测数据,先后拟合出了合肥、兴隆、昆明、东山、库尔勒等地的 $C_n^2$ 平均廓线公式<sup>[29-32]</sup>。2007年,吴晓庆等人<sup>[31]</sup>提出利用中尺度气象模式预报光学湍流。2008年,许利明、吴晓庆等人<sup>[51, 61]</sup>采用AFGL光学湍流模型和MM5气象模式,获得了合肥、库尔勒和东山三地的大气光学湍流廓线;其模型计算结果符合光学湍流廓线的一般特征,但缺乏与实测数据的对比验证。

2010年,国家天文台选址组开始推进大气光学湍流模型方面的研究工作<sup>[52]</sup>,已先后对兴隆站、高美古站和西藏的阿里候选站址进行了光学湍流特征的模型研究,并着手开展全国范围的大气光学湍流特征统计分析工作。利用选址组的优势,在上述台站同步实施大气湍流的实地探测,可对模型计算结果直接比较验证。图8给出模型计算得到的兴隆站2011年9月26日夜间的 $C_n^2$ 廓线。图9是针对阿里站计算得到的 $C_n^2$ 廓线和SCIDAR实测 $C_n^2$ 廓线的对比;其趋势比较一致,但对流层以上的高空部分有明显偏离。尽管高空湍流偏差在数量级上影响不大,但仍需要根据高原局地特征做进一步的模型改进。

## 4 结束语

大气光学湍流模型研究对于天文选址、望远镜观测优化、自适应光学和光学工程应用等都具有重要意义。如果采用模型计算方法能够找出光学湍流条件较好的区域,将大幅度降低

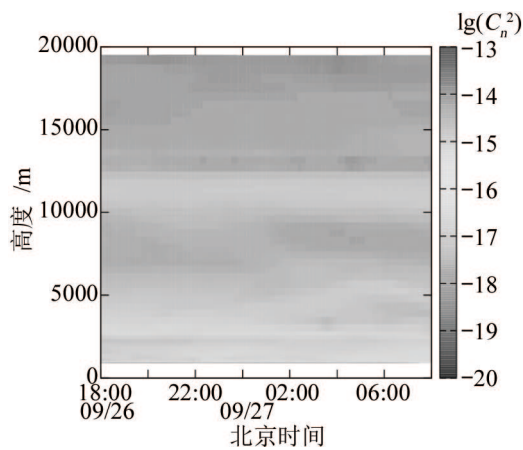


图 8 2011 年 9 月 26 日夜晚兴隆站 14 小时的  $C_n^2$  廓线变化

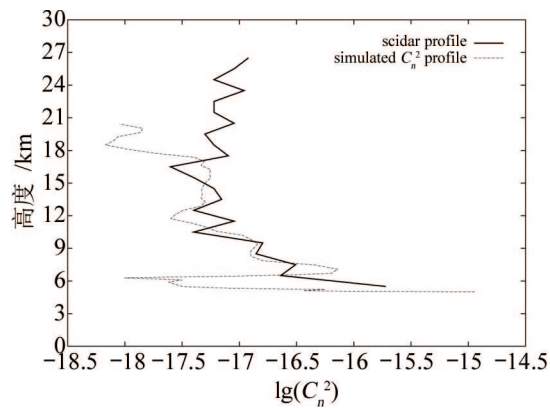


图 9 2011 年 11 月 3 日夜晚阿里站模型  $C_n^2$  廓线和 SCIDAR 实测数据的对比

天文选址野外踏勘的工作强度与费用, 省时省力。针对天文台局部区域的光学湍流预报, 可以优化望远镜的观测时间, 也为地基光电设备运行的最佳时间窗口提供指导。通过模型计算获得高空湍流活动的统计特征, 将为多共轭自适应光学系统设计提供关键指标。

大气光学湍流模型计算获得光学湍流参数, 已在诸多天文台和大气光学传输工程领域得到了应用, 被证明是一种可行的、已具有相当精度的方法。湍流模型方法能同时得到台站附近几十千米范围内的  $C_n^2$  廓线、大气相干长度、相干时间、视宁度、等晕角和湍流外尺度等, 也可以预报未来一段时间的光学湍流参数。

目前国际上已有几个研究团队专门从事大气光学湍流模型的研究; 国内的相关研究工作也有长期积累并取得了阶段性的成果, 但还缺乏与实测的比较验证和更加系统性的研究。大气湍流活动及其季节变化应该具有很强的地域性, 国际上较为成熟的西海岸和海岛型天文台的光学湍流模型, 可能并不适于中国内陆台址, 特别是西部高原地区。因此, 发展适合于中国大陆的大气湍流活动地域模型, 仍将有待开展持续和深入细致的研究工作。

### 参考文献:

- [1] 侯金良. 天文学进展, 1994, 12(2): 126
- [2] 刘立勇, 姚永强. 天文学进展, 2010, 28(4): 392
- [3] TMT Site Selection Team. TMT site testing final report, <http://sitedata.tmt.org/docs/TMT.SiteTestingFinalReport.08-04-08.pdf>, 2008
- [4] ATST site testing final report. <http://atst.nso.edu/files/docs/RPT-0021.pdf>, 2004
- [5] 云南天文台选址组. 天文学报, 1999, 40(3): 319
- [6] 楼柯, 刘忠, 张瑞龙, 等. 天文学进展, 2001, 19(2): 148
- [7] 姚进生, 吴月珍, 姚大志, 等. 天文学进展, 2001, 19(2), 174
- [8] Sarazin M S. SPIE, 1997, 3125: 366
- [9] Veron-Cetty M P, Veron P. ESO Sci Rep, 1996, 17: 1

- [10] Bougeault P, De Hui C, Fleury B. *ApOpt*, 1995, 34: 3481
- [11] Masciadri E, Vernin J, Bougeault P. 1999, *A&AS*, 137: 185
- [12] Masciadri E, Vernin J, Bougeault P. 1999, *A&AS*, 137: 203
- [13] Businger S, Chetubini T. *Seeing Clearly*, TX: Virtualbookworm.com Publishing Inc, 2011: 131
- [14] Masciadri E, Vernin J, Bougeault P. *A&A*, 2001, 365: 699
- [15] Masciadri E, Garfias T. *A&A*, 2001, 366: 708
- [16] Masciadri E, Egner S. *PASP*, 2006, 118: 1604
- [17] Hagelin, S, Masciadri E, Lascaux F. *MNRAS*, 2010, 407, 2230
- [18] Lascaux, F, Masciadri E, Hagelin S, et al. *MNRAS*, 2009, 398: 1093
- [19] Lascaux, F, Masciadri E, Hagelin S, *MNRAS*, 2011, 411: 693
- [20] Cherubini, T, Businger S, Lyman R, et al. *JApMC*, 2008, 47: 1140
- [21] Masciadri E, Avila R, Sanchez L J. *RMxAA*, 2004, 40: 3
- [22] Randy J, Lefevre, Frank H Ruggiero, et al. 2003 User Group Conference, 2003, 270
- [23] <http://mesonh.aero.obs-mip.fr/mesonh>
- [24] <http://www.wrf-model.org>
- [25] <http://www.mmm.ucar.edu/mm5>
- [26] Wyngaard J C, Izumi Y, Stuart A, et al. *JOSA*, 1971, 61: 1646
- [27] Hufnagel R E. Variations of atmospheric turbulence. in *Digest of Technical Papers, Topical Meeting on Optical Propagation through Turbulence*, Optical Society of America, Washington, DC, Wal-l-Wal-4, 1974
- [28] Abahamid A, Vernin J, Benkhaldoun Z, et al. *A&A*, 2004, 422: 1123
- [29] 吴晓庆, 曾宗泳, 马成胜, 等. *量子电子学*, 1996, 13(4): 385
- [30] 翁宁泉, 曾宗泳, 肖黎明, 等. *强激光与粒子束*, 1999, 11(6): 673
- [31] 吴晓庆, 孙刚, 翁宁泉, 等. *大气与环境光学学报*, 2007, 2(6): 409
- [32] 孙刚, 翁宁泉, 肖黎明. *强激光与粒子束*, 2008, 20(2): 183
- [33] 塔塔尔斯基. *湍流大气中波的传播理论*. 温景嵩, 宋正方, 等译. 北京: 科学出版社, 1978: 36
- [34] Dewan E, Good R E, Beland B, et al. *Phillips Laboratory Tech. Rep. PL-TR-93-2043*, 1993
- [35] Jackson A. *AFRL-VS-HA-TR-2004-1116 E.R.P.*, No. 1259, 2004
- [36] Coulman C, Vernin J, Coqueugniot Y, et al. *ApOpt*, 1988, 27: 155
- [37] Beland R R, Brown J H. *Phys Scr*, 1988, 37: 419
- [38] Trinquet H, Vernin J. *PASP*, 2006, 118: 756
- [39] Trinquet H, Vernin J. *EFM*, 2007, 7: 397
- [40] Bougeault P, Lacarrere P. *MWRv.*, 1989, 117: 1872
- [41] Masciadri E, Jabouille P. *A&A*, 2001, 376, 727
- [42] Cherubini T, Businger S, Lyman R. *JApMC*, 2008, 47: 3033
- [43] <http://fizeau.oca.eu>
- [44] <http://forot.arcetri.astro.it>
- [45] <http://mkwc.ifa.hawaii.edu>
- [46] <http://mkwc.ifa.hawaii.edu/symposium>
- [47] <http://forot.arcetri.astro.it/otam08/index.html>
- [48] <http://www.dfa.uv.cl/sitetestingdata/talks.php>
- [49] 侯金良. *中国科学院上海天文台年刊*, 1989, 10: 66
- [50] 李双喜, 付元芬, 黄寅亮, 等. *天文学报*, 2002, 43(1): 106
- [51] 许利明, 吴晓庆, 王英俭. *大气与环境光学学报*, 2008, 3(4): 270
- [52] Wang H S, Yao Y Q, Wang Y P, et al. *Proceedings of the 11th Asian-Pacific Regional IAU Meeting*, 2012
- [53] Coulman C E, Andre J C, Lacarrere P. *pasp*, 1986, 98: 376
- [54] Trinquet H, Vernin J. Using meteorological forecasts to predict astronomical 'seeing', <http://spie.org/x35459.xml?pf=true&ArticleID=x35459>, 2009
- [55] Vernin J, *国家天文台报告*, 2009
- [56] Masciadri E, Acila R, Sanchez L J. *A&A*, 2002, 382: 378

- [57] Masciadri E, Acila R, Sanchez L J. RMAA, 2004, 40: 3  
[58] Masciadri E. SPIE, 2006, 6267: 62671C  
[59] 李双喜, 付元芬, 黄寅亮, 等. 应用气象学报, 2003, 14(2): 230  
[60] 李双喜, 付元芬, 黄寅亮, 等. 天文学报, 2003, 44(4): 431  
[61] 许利明. 硕士论文, 合肥: 中国科学院安徽光机所, 2009

## A Review of Atmospheric Optical Turbulence Modeling Research

WANG Hong-shuai<sup>1,2</sup>, YAO Yong-qiang<sup>1</sup>, LIU Li-yong<sup>1</sup>

(1. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Atmospheric optical turbulence modeling and forecast for astronomy is a relatively recent discipline, but has played important role in site survey for astronomical observatories and optimization of large telescope observing scheduling, and in the applications of adaptive optics technique and atmospheric optical transportation. The numerical approach, by use of meteorological parameters and according to parameterization of optical turbulence, can provide all the optical turbulence parameters, such as  $C_n^2$  profile, coherent length, coherent time, seeing, isoplanatic angle, and, outer scale of turbulence.

This paper reviews the development and recent progress in atmospheric optical turbulence modeling and forecast. The main methods and models to calculate optical turbulence state by meteorological parameters are summarized, including average profile, physical model(AFGL and C-V), analytical model, and numerical model. The main teams of international institutes in this field, including ForOT in Italy, MKWC at Hawaii University, ABL of American Air Force and Fizeau Lab at Nice University, and their contributions to the research are introduced. The ability of the modeling optical turbulence above Cerro Paranal, Roque de los Muchachos, San Pedro Martir, Mt Graham, Dome C, Dome A, South Pole, and Mauna Kea have been confirmed using the measurements of the optical turbulence vertical distribution. The related works by Chinese institutes, including Shanghai Astronomical Observatory, Tianjin Institute of Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics and National Astronomical Observatory, are also briefly reviewed. Further systematic approach with on-site turbulence measurements is emphasized, in order to obtain practicable optical turbulence models fit to the geographies over China.

**Key words:** atmospheric optics; optical turbulence profile; seeing forecast; atmospheric model