

中尺度气象模式预报大气光学湍流的现状与展望

吴晓庆

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

摘要 光学湍流预报涉及大气科学、计算数学、光学工程等多个学科以及计算机技术、湍流测量技术等多种技术。提高低平流层下对大气光学湍流的预报能力成为迫切需要。讨论了预报光学湍流时选用中尺度气象模式的原因、具有代表性中尺度气象模式的特点、光学湍流参数化、中尺度气象模式预报光学湍流的研究现状及所面临的挑战等问题,并对该领域下一阶段的发展进行了展望。对符合我国地域气候特征的外尺度参数化公式、中尺度模式与微尺度模式嵌套以及低平流层下非 Kolmogorov 湍流的统计特征和大气光学湍流参数化新方法进行研究,该研究对提高光学湍流预报的空间分辨率和预报精度具有重要意义。

关键词 大气光学; 中尺度气象模式; 光学湍流; 预报; 现状与展望

中图分类号 P456.7 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.010001

Current Situation and Prospect of Mesoscale Meteorological Model in Atmospheric Optical Turbulence Forecast

Wu Xiaoqing

Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract Optical turbulence forecast involves many subjects such as atmospheric science, computational mathematics and optical engineering and many technologies such as computer technology and turbulence measurement technology. It is urgently needed to improve the capability of atmospheric optical turbulence forecast in low stratosphere. The reason why the mesoscale meteorological model is chosen for forecasting optical turbulence, the characteristics of representative mesoscale meteorological model, optical turbulence parameterization, current situation and challenges of optical turbulence forecasting are discussed. The prospect of future development in this field is discussed. The outer scale parameterization formula in accordance with the regional climatic characteristics of China, the nesting of mesoscale and microscale models, and the non-Kolmogorov turbulence statistical characteristic and the new method for the atmospheric optical turbulence parameterization under low stratosphere are studied. The study will has an important significance in spatial resolution and forecast accuracy of optical turbulence forecast.

Key words atmospheric optics; mesoscale meteorological model; optical turbulence; forecast; current situation and prospect

OCIS codes 010.1290; 010.7060

1 引言

大气中通常存在小尺度折射率起伏,即大气湍流,该现象对大气中声、光和其他电磁波的传播产生不可忽视的影响。大气折射率结构常数 C_n^2 是描述大气光学湍流的重要参数,从某种意义上说,已知 C_n^2 的时空分布便可计算出大气湍流对光电系统的影响。仪器测量和模式估算是获取 C_n^2 时空分布最常用的两种方法。大部分仪器的制作成本和维护成本较高,且只能获得小范围内的光学湍流时空分布,难以进行大范围、

收稿日期: 2016-07-22; **收到修改稿日期:** 2016-08-16; **网络出版日期:** 2016-12-28

基金项目: 国家自然科学基金(41275020,41576185)

作者简介: 吴晓庆(1963—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事大气湍流测量与模式方面的研究。

E-mail: xqwu@aiofm.ac.cn

较长时间的测量。为满足光学工程方面的需求,研究者们相继提出了 Hufnagel 模式^[1]、SLC 模式、CLEAR I 模式和冬季兴隆 C_n^2 廓线公式^[2]等。该类模式是在大量观测数据基础上拟合出的经验公式,代表统计平均结果。另一类 C_n^2 廓线模式是基于 Tatarski 公式提出的^[3-5],利用高空风速、位温、气压等平均气象要素的历史资料估算 C_n^2 ,但这些参数化模式没有预报功能。Masciadri 等^[6-7]采用中尺度天气预报模式,从湍流动能收支方程出发,得到湍流动能耗散率 ϵ 、位温方差耗散率 ϵ_θ 和混合长度 L ,从而可预报 C_n^2 。

与仪器实时测量 C_n^2 廓线和通过湍流模式估算 C_n^2 廓线相比,利用中尺度气象模式预报光学湍流在天文观测和光学工程等领域具有如下优势:

- 1) 可对过去和未来长时间内的 C_n^2 进行估算和预测;
- 2) 可绘制三维 C_n^2 的时空分布图,便于对候选站址进行筛选;
- 3) 可根据预报结果制定计划,合理安排观测时间。

目前,依赖于传统测量技术对光学湍流时间和空间分布的测量局限在较小区域内,光学湍流预报技术的兴起和发展可将测量范围拓展到较大区域乃至全球范围,这是传统测量方法难以实现的。鉴于此,本文对光学湍流预报中涉及的选用中尺度气象模式的原因、具有代表性中尺度气象模式的特点、光学湍流参数化、中尺度气象模式预报光学湍流研究现状、预报光学湍流面临的挑战和对未来的展望等几个方面进行了讨论。

2 预报光学湍流选用中尺度气象模式的原因

20 世纪初,Bjerknes^[8]提出了数值天气预报的概念,并对其内涵进行了具体说明,认为大气的未来状态原则上完全可由大气的初始状态、已知的边界条件、描述大气运动变化规律的数学物理方程组较为精确地计算出来。大气探测技术和高性能计算机的发展为数值天气预报模式的发展提供了可靠的初值条件和有力的计算手段与工具。大气中包含大、中、小尺度的大气运动系统,大气现象的时空尺度示意图如图 1 所示^[9]。

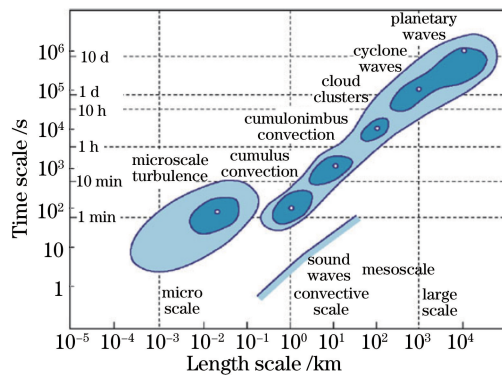


图 1 大气现象的时空尺度示意图^[9]

Fig. 1 Time scale and space scale of atmospheric phenomena^[9]

实际大气运动系统是各种尺度系统的叠加,利用大气运动方程、热力学方程和连续方程几乎可以描述大气中各种尺度的系统。根据研究对象不同尺度的运动特征,对不同数量级的方程各项进行取舍简化,结合物理假定、初始条件、边界设定等得到相应的大气预报模式,如表 1 所示。

表 1 各类大气预报模式

Table 1 Different atmosphere predictive models

Model	Resolution of horizontal scale /km	Horizontal scale /km	Time scale
General circulation model	100	$10^2 - 10^4$	1 - 10 d
Limited area model	7 - 50	20 - 200	12 h - 3 d
Non-hydrostatic mesoscale model	0.05 - 10	0.02 - 200	1 min - 1 d
Large eddy model	0.05	0.001 - 0.05	1 min - 5 h

中尺度天气预报模式是通过一系列方程模拟温度、气压、水汽、风速等大气参数随时间的演变。模式内的大气三维空间被分割成一系列网格点阵,每个格点上的气象参数值代表了当时的大气状况。通常尺度模式的时间尺度为 1~2 d,水平尺度为 0.5~10 km,垂直尺度为 500 m。

大气光学湍流具有较宽的带宽,小到毫米尺度的旋涡和大到数百米尺度的旋涡均可能存在,由 $L/l \sim R_e^{3/4}$ (L 为需要模拟的最大尺度, l 为最小的湍流耗散尺度, R_e 为 Reynolds 数)可简单估计大气光学湍流的 Reynolds 数。大气光学湍流具有非常高的 Reynolds 数,最大可达 10^8 量级。Reynolds 数若增加 1 个量级,直接数值模拟三维湍流需要的网格数需增加 3 个量级。对光学湍流进行直接数值模拟时要求网格尺度至少小于湍流的耗散尺度,则三维网格数达 10^{18} 量级。在目前乃至可预见的将来,受限于计算机的容量和速度,利用直接数值模拟(DNS)以及大涡模拟(LES)求解 Navier-Stokes 方程来解决大气光学湍流问题不太现实。

大气湍流的发生机制可分为动力学机制和热力学机制两大类。前者针对存在大尺度剪切流的情况,后者主要针对由热对流引起大气湍流的情况。在稳定的大气背景下,低平流层常出现很薄的、伴随很强温度梯度的强湍流层,对流层顶附近狭窄强风带中也常出现强湍流层,这些强湍流层往往是由于高山、强对流天气、急流、冷暖空气交汇、重力波等扰动源引起的,在 Kelvin Helmholtz 不稳定或对流不稳定的条件下发展成湍流。扰动源形成大气湍流的示意图如图 2 所示。这些扰动源属于中尺度气象模式,属于流体非静力假定的中尺度模式解决的范畴。目前,由于光学湍流发生的物理过程具有高 Reynolds 数,无法使用 DNS 或 LES 等方法精确求解,因此必须借助参数化方法,通过建立中尺度天气预报数值模式输出产品与光学湍流特征量的关系来估算和预报光学湍流。

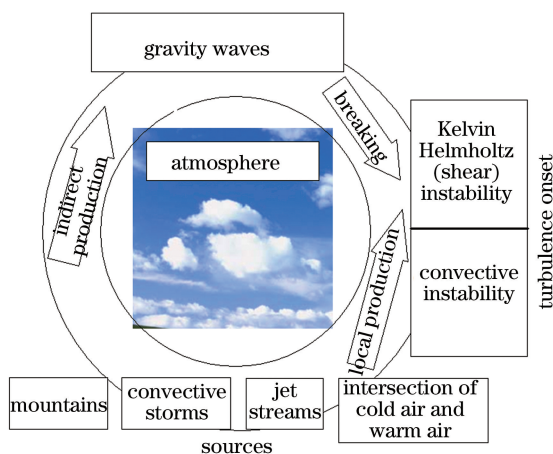


图 2 扰动源引起大气湍流的示意图

Fig. 2 Diagram of atmospheric turbulence caused by disturbance sources

3 具有代表性中尺度气象模式的特点

目前存在多种中尺度大气数值模式^[10-12],作为区域实时预报模式应具有以下特点:

- 1) 模拟区域覆盖全球,具有多重网格嵌套设置,模式预报的初始场既可选用观测资料,也可选用全球模式或其他区域模式的短期预报结果;
- 2) 具有流体静力和非流体静力两种动力学框架,地形垂直于坐标系,物理过程参数化比较客观精细,模式的数值计算精度和稳定性较高;
- 3) 可在不同硬件平台运行,软件移植方便,可以满足不同用户的需求。

具有代表性的中尺度气象模式包括第 5 代中尺度模式 (MM5)和天气研究与预测 (WRF)。两种模式的源代码开放,从相关网站可获取全球气象观测基础数据库、全球高程数据库、全球土壤和植被系数数据库等模式运行所需的基础数据。从软件的处理流程上看,两种模式一般都分为前处理、主模式和后处理。前处理包括资料的下载、数据同化等,后处理主要包括图形化处理、生成产品等,前、后处理一般对计算机的要求不高,计算量主要集中在主模式部分。国内外已有许多研究人员开展了对 MM5 和 WRF 的模拟研究。与 MM5 相比,WRF 在模式软件框架设计、核心动力模块、硬件平台支持、应用范围、数据格式、可移植等方面更具优势。模式程序编写的标准化、动力框架与物理方案等功能的模块化以及模式程序的并行化使模式程

序能够在巨型计算机上运行,这是新一代气象数值预报模式的总体要求。

4 光学湍流参数化

4.1 C_n^2 廓线模式

国内外有许多研究人员提出了 C_n^2 廓线模式,这类模式是在大量观测数据基础上总结出的经验公式,代表一个统计平均结果。该类模式[如潜艇激光通信(SLC)模式、地球物理实验室空军毛伊岛光学站(AFGL AMOS)夜晚模式、CLEAR I 夜晚模式、Hufnagel-Valley(5/7)模式、冬季兴隆 C_n^2 廓线模式]中的参数仅含有高度或少量的气象参数,限于篇幅,这里不再赘述,其表达式参见附录 A。

4.2 Tatarski 方法

根据常规气象参数廓线数据估算光学湍流强度 C_n^2 的常用公式为 Tatarski 公式,其表达式为

$$C_n^2 = 2.8L_0^{4/3}M^2, \quad (1)$$

$$M^2 = \left[\left(\frac{79 \times 10^{-6} P}{T^2} \right) \left(\frac{dT}{dh} + \gamma_a \right) \right]^2, \quad (2)$$

式中 γ_a 为干空气绝热递减率($9.8 \times 10^{-3} \text{ km}^{-1}$), h 为高度(m), T 为温度(K), P 为气压(Pa),除 L_0 外,其他量都可以从标准气象探空数据或中尺度天气预报数值模式输出产品中得到。Coulman 模式的外尺度经验公式为

$$L_0(h) = 4 \left/ \left[1 + \left(\frac{h - 8500}{2500} \right)^2 \right] \right. \circ \quad (3)$$

Dewan 模式中有 $L_0 \approx 0.1L'$,其中 L' 为湍流混合层厚度。在实验数据基础上,将 $L_0^{4/3}$ 看作是风切变的函数,即

$$\begin{cases} L_0^{4/3} = 0.1^{4/3} \times 10^{(1.64+42.0S)}, & \text{troposphere} \\ L_0^{4/3} = 0.1^{4/3} \times 10^{(0.506+50.0S)}, & \text{stratosphere} \end{cases}, \quad (4)$$

式中 S 为风剪切量, $S = \left[\left(\frac{\partial u}{\partial h} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial h} \right)^2 \right]^{1/2}$ 。

与 Dewan 类似的 HMNSP99 外尺度参数化公式增加了温度梯度:

$$\begin{cases} L_0^{4/3} = 0.1^{4/3} \times 10^{(0.362+16.728S-192.347\frac{dT}{dh})}, & \text{troposphere} \\ L_0^{4/3} = 0.1^{4/3} \times 10^{(0.757+13.819S-57.784\frac{dT}{dh})}, & \text{stratosphere} \end{cases} \circ \quad (5)$$

将微温传感器附加在全球定位系统电子气象探空仪上^[13],微温传感器测量的 C_n^2 统计平均时间为 5 s,响应频率为 0.1~20 Hz,噪声约为 $2 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}$ 。通过测量 30 km 以下的温度、湿度、气压、风速风向和 C_n^2 ,对 C_n^2 廓线模式、常规气象参数估算的 C_n^2 与实测的 C_n^2 进行比较。图 3 为在合肥进行的温度、 C_n^2 廓线、风速、风向的一次探空实例,测量时间为 2014 年 5 月 7 日 21:48:58-23:46:34。

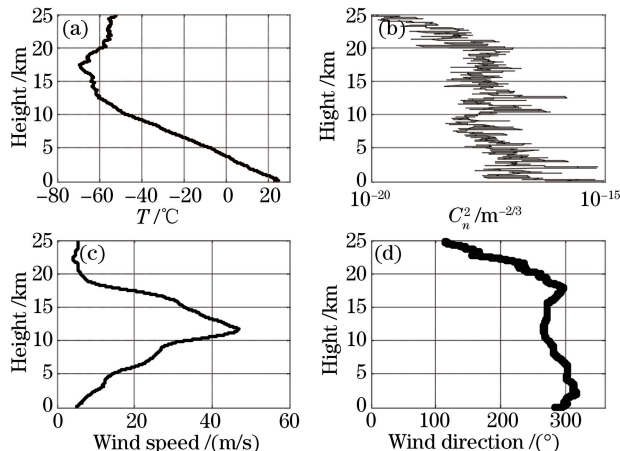


图 3 (a) 温度、(b) C_n^2 廓线、(c) 风速和 (d) 风向的探空测量结果

Fig. 3 Sounding measurement results of (a) temperature, (b) C_n^2 profile, (c) wind speed and (d) wind direction

图4为 C_n^2 廓线模式值与实测值的比较,测量时间与图3相同。SLC模式中 C_n^2 数据取自夏威夷的AMOS观测站,观测站位于四面环海、海拔为3 km的死火山。对各种测量数据(闪烁、声雷达、飞机等)进行几何平均,再进行多项式拟合后得到该处的大气湍流模式,它是一种亚热带湍流大气模式。AFGL AMOS夜晚模式是对SLC-night模式的改进,数据取自高分辨率探空测量,通过采用算术平均和多项式拟合得到该模式下的数据。CLEAR I夜晚模式的数据取自海拔为1.216 km的美国新墨西哥沙漠,使用高分辨率探空测量,采用类似的处理方法得到该模式下的数据。Hufnagel模式有几个版本,以高空风速作为参数,最新版本模式的适用范围可推广至近地面层。形成Hufnagel模式的数据主要取自中纬度地区星光闪烁和气球探空的测量数据,因此Hufnagel模式是一种中纬度湍流大气模式。从图4可以看出 C_n^2 的实测值和模式值具有一些共同特点: C_n^2 在近地面层随高度迅速递减; C_n^2 在平流层随高度递减;在对流层顶附近存在强湍流层,形成一个鼓包,但强湍流层高度与纬度和季节变化有关。

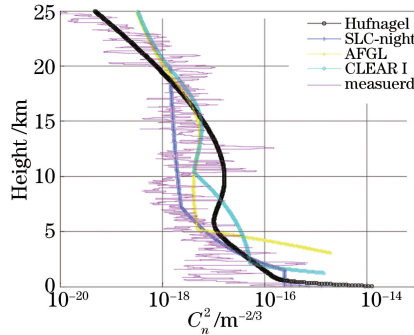


图4 C_n^2 廓线模式值与实测值比较

Fig. 4 Comparison of C_n^2 profile model values and measured data

图5为采用4种外尺度模式(HMNSP99、Dewan、Stereborg、Coulman)估算 C_n^2 的结果与测量值的比较,采用图3中相同的常规气象参数廓线,其中Stereborg模式的外尺度取1 m。从变化趋势和量级看,使用HMNSP99的外尺度模式估算的 C_n^2 与测量值较为接近。

图6为3种外尺度模式下 L_0 的估算结果与测量值的比较,其中Stereborg模式外尺度取1 m。外尺度的测量值是由实测的 C_n^2 和常规气象参数廓线代入(1)式得到的。由(1)式可知,采用不同的外尺度模式估算 L_0 的结果在变化趋势和量级上差别很大,因此选择合适的外尺度模式是利用Tatarski公式估算 C_n^2 的关键。

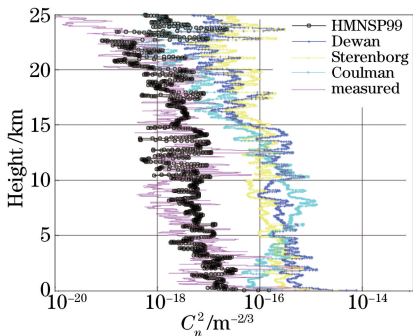


图5 4种外尺度模式下 C_n^2 的估算结果与测量值的比较

Fig. 5 Comparison of C_n^2 estimated by four outer scale models and measured data

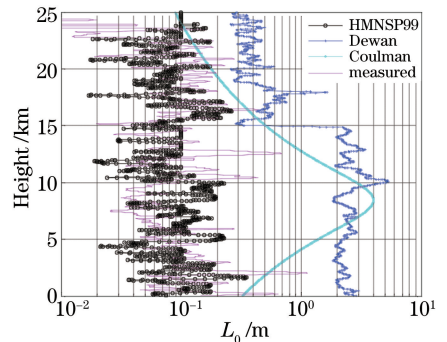


图6 3种外尺度模式下 L_0 和测量值的比较

Fig. 6 Comparison of L_0 estimated by three outer scale models and measured data

4.3 Masciadri 方法

Masciadri方法从湍流动能收支方程出发,建立湍流动能耗散率 ϵ 、位温方差耗散率 ϵ_θ 、混合长度 L 与湍流动能 e 的关系,预报出 C_n^2 。折射率结构常数 C_n^2 与温度结构常数 C_T^2 满足

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

$$C_T^2 = 1.6\epsilon^{-1/3}\epsilon_\theta. \quad (7)$$

在位温方差控制方程中,忽略三阶脉动量和辐射耗散量,可得

$$\epsilon_\theta = -2\bar{w}'\bar{\theta}' \frac{\partial \theta}{\partial z}, \quad (8)$$

$$\bar{w}'\bar{\theta}' = -K \frac{\partial \theta}{\partial z}, \quad (9)$$

$$\frac{de}{dt} = -\bar{w}'\bar{u}' \frac{\partial u}{\partial z} - \bar{w}'\bar{v}' \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z}(\bar{w}'e) - \epsilon + \beta\bar{w}'\bar{\theta}', \quad (10)$$

式中 K 为扩散系数, β 为浮力系数, \bar{w}' 为, $\bar{\theta}'$ 为, \bar{u}' 为, \bar{v}' 为, \bar{u}' 为, \bar{v}' 为。 u' 、 v' 、 w' 为各个速度分量的平均值, $\bar{\theta}'$ 为位温脉动量的平均值。

(10)式中右边第 1、2 项为 e 的剪切产生或损失项,第 3 项为湍动能(TKE)的湍流运输,第 4 项为 TKE 的粘性耗散,第 5 项为浮力产生或消耗项。扩散系数 K 与湍流动能 e 的关系为

$$K = 0.16L\sqrt{e}\varphi_3, \quad (11)$$

式中 φ_3 为比例系数。湍流动能耗散率 ϵ 与湍流动能 e 满足

$$\epsilon = 0.7e^{3/2}/L. \quad (12)$$

将(8)~(12)式代入(7)式可得

$$C_T^2 = 0.2\theta^{2/3} \left(\frac{\partial \theta}{\partial z} \right)^{4/3} e^{2/3} \varphi_3. \quad (13)$$

Cherubini 等^[7]采用的 TKE 闭合方案与 Masciadri 方法略有不同,差异主要表现在 L 和比例系数的确定方法上。

5 中尺度气象模式预报光学湍流实例

1986 年, Coulman 等^[14]提出从气象参数预报大气光学湍流的可能性。1995 年, Bougeault 等^[15]采用流体静力假设的中尺度模式 PERIDOT, 由法国探空网提供初值条件, 实现了使用中尺度气象模式估算和预报法国境内 Lachens 山附近视宁度。但该模式忽略了对流和小尺度垂直方向的加速度等因素, 水平分辨率较低, 部分预报结果与实测不符。1999 年, Masciadri 等^[6]采用流体非静力假设的中尺度模式 Meso-Nh, 以欧洲中期天气预报中心提供的数据作为初始场, 设置水平分辨率为 500 m, 第 1 个网格点的高度设为 50 m, 设置后一个网格间隔为前一网格间隔的 1.3 倍, 当网格设置达到 3 km, 设置 600 m 的网格间隔直至 20 km, 从而得到具有较高时空分辨率的湍流预报值。2007 年, Cherubini 等^[7]选用 MM5 模式预报 C_n^2 , 未改变模式的水平分辨率, 但在垂直分辨率和 TKE 闭合方案上与 Masciadri 方法略有不同。2010 年, Mahalov 等^[16]将微尺度模式耦合到天气预报模式中, 并将水平网格间距为 1 km、垂直网格间距为 150 m 的 WRF 输出产品作为微尺度模式的初始场和边界条件, 以模拟高对流层和低平流层的光学湍流。2010 年, Lascaux 等^[17]将中尺度模式估算和预报光学湍流廓线以及视宁度方法用于南极天文选址。我国开展高空光学湍流估算和预报的起步相对较晚。2003 年, 李双喜等^[18-19]利用历史高空气象参数估算了国内潜在天文台站的 Fried 参数 r_0 。2008 年, 许利明等^[20]开展了利用 MM5 预报高空 C_n^2 的初步研究, 并在此基础上进一步研究了利用 WRF 模式对光学湍流的预报^[21-23]。Wang 等^[24]选用 WRF 模式估算光学湍流, 并将这一方法运用到中国西部天文选址。表 2 为中尺度气象模式预报光学湍流的现状。图 7 为运用 WRF 估算云南天文台高美古站光学湍流强度的一次实例^[22]。

表 2 中尺度气象模式预报光学湍流的现状

Table 2 Current situation of optical turbulence forecast based on mesoscale meteorological model

Reference number	Country	Mesoscale model	Simulation date	Simulation site
[15]	France	PERIDOT	1990	Lachens (France)
[6]	France	Meso-Nh	1993	Cerro Paranal (Chile)
[7]	USA	MM5	2002	Mauna Kea (USA)
[16]	USA	WRF	2006	Hawaii (USA)

Reference number	Country	Mesoscale model	Simulation date	Simulation site
[17]	Italy	Meso-Nh	2005	Dome (Antarctic)
[20]	China	MM5	2007	Hefei, etc (China)
[25]	USA	WRF	2008—2009	Hawaii (USA)
[24]	China	WRF	2011	Gaomeigu (China)
[21-23]	China	WRF	2015	Maoming (China) Gaomeigu (China)

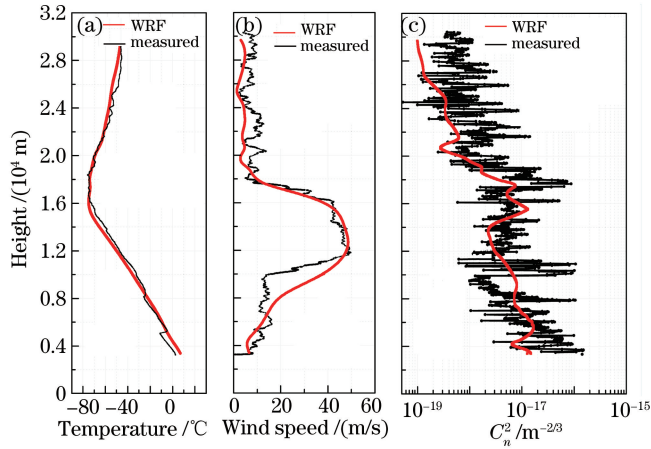


图 7 高美古 WRF 估算与实测结果的比较。(a) 温度廓线；(b) 风速廓线；(c) C_n^2 廓线

Fig. 7 Comparison of WRF and measured data at Gaomeigu. (a) Temperature profiles;

(b) wind speed profiles; (c) C_n^2 profiles

6 预报光学湍流面临的挑战和展望

光学湍流预报涉及多学科的交叉和融合,光学湍流预报技术的进步来自光学湍流模式的改进、计算机能力的提升以及中尺度模式的不断完善等多种因素。预报光学湍流的不确定性主要由以下两方面因素产生:

1) 中尺度气象模式运行中的初始误差和模式误差导致估算的 C_n^2 存在误差。初始误差指观测资料的数量和质量有限,资料分析和同化处理过程中的缺陷使中尺度数值模式的初始场存在不确定性。模式误差指求解中尺度数值模式中的数学物理方程时采用的简化、近似、参数化以及计算误差等使预报结果产生不确定性。这两类误差使中尺度气象模式预报的温度、湿度、气压、风速、风向、湍流动能等参数存在不确定性^[26-27],计算的外尺度有偏差,因此使预报的 C_n^2 值偏离真实值。此外,漏报、误报与光学湍流的产生密切相关的扰动源等天气过程也会对预报 C_n^2 值的精度产生严重影响。

2) 光学湍流参数化的不完善导致估算的 C_n^2 存在误差。现有的光学湍流模式都存在某些不足,Hufnagel 模式只含有风速,没有风速剪切、温度梯度等与光学湍流密切相关的量;Tatarski 模式中的关键参数是外尺度,外尺度是描述湍流惯性区的一个参量,难以直接测量;Dewan 模式拟合的外尺度与风速剪切量公式未完全反映高空湍流的分层特点。这些模式除了受纬度、季节、地形等因素的影响外,模式中也并没有包含大气稳定度、Richardson 数等参量,使模式的普适性受到限制。Masciadri 等开展了如何将已有的湍流参数化方程耦合到中尺度天气预报模式中,并未涉及非 Kolmogorov 湍流参数化问题。此外,高空光学湍流参数化是建立在 Tatarski 公式的基础上,而源自湍流动能 e 预报方程的 Tatarski 公式是在满足以下 3 个条件时才成立:1) 湍流平稳,即湍流的产生项与耗散项平衡;2) 湍流均匀,即湍流的扩散项对上述动态平衡的影响很小;3) 混合长度可用湍流涡旋扩散系数和平均场梯度表示。在稳定的大气背景下,低平流层出现的很薄的强湍流层区域往往是非平稳、非均匀、各向异性的。因此,如何利用常规气象参数对低平流层下片状层湍流进行估算和预报还有待进一步研究。

数值天气预报已经在几个关键问题上取得了突破,这些问题包括物理过程参数化、集合预报技术及其对分析和预报不确定性的合理估计、利用观测获得更理想的初值条件等^[28]。未来 10 年或更长时间,就分辨率

而言,全球天气和气候模拟能够完成全球水平分辨率为 1 km 的对流分辨模拟,并能够充分耦合大气-陆地-海洋-海冰模型。在分享这些成果的基础上,为提高光学湍流的预报精度,还需从以下三个方面开展工作:

1) 构建合适的光学湍流外尺度参数化公式。采用不同的外尺度模式 C_n^2 的估算结果在变化趋势和量级上差别很大,选择合适的外尺度模式是利用 Tatarski 公式估算 C_n^2 的关键。根据由高精度、高空间分辨率的湍流气象探空仪测量的 C_n^2 廓线和常规气象参数廓线数据,分析温度梯度、风速梯度、Brunt Vaisala 频率、Richardson 数和 C_n^2 等廓线参数,构建符合我国地域气候特征的对流层、平流层光学湍流外尺度的参数化公式。

2) 中尺度模式与微尺度模式嵌套。随机起伏的湍流场(如速度场、温度场等)是具有多尺度时空结构的非线性场,借助结构函数,对能谱进行描述和量纲分析,是认识湍流多尺度现象的重要手段。为获得光学湍流在时空尺度上进行结构函数和谱分析所需的模拟数据,需将中尺度模式与微尺度模式嵌套。微尺度模式的初始条件和边界条件由中尺度模式的模拟结果提供,再将微尺度模式的模拟结果反馈给中尺度模式,从而提高模拟精度。

3) 开展光学湍流参数化新方法的研究。光学湍流参数化的实质是解决平均场和湍流场的关系问题。贝叶斯理论利用先验信息和样本数据来估计未知样本,概率(联合概率和条件概率)是先验信息和样本信息在贝叶斯模型中的表现形式,尝试采用贝叶斯分层模型估算 C_n^2 ,对探空历史数据进行统计分析,重点分析风剪切、温度梯度、Richardson 数及剪切层厚度,建立 Bayesian Hierarchical 参数化湍流模式,借鉴集合预报技术,从一组均有可能代表大气湍流真实状况的初值集合出发,积分得到一组预报值的集合,推断大气湍流运动的所有可能的状态,从而提高光学湍流预报结果的准确性。

十多年前,低平流层只是人类间接关注的领域。随着光学工程、天文观测和高技术发展的带动,低平流层如今已是人类频繁活动的新领域^[29],低平流层下大气光学湍流预测预报能力的提高成为了重要的国家需求,因此迫切需要研究人员在相关的基础理论、观测数据和预测预报方法上开展研究。通过研究低平流层下非 Kolmogorov 湍流的统计特征和光学湍流参数化新方法,将湍流参数化方程耦合到中尺度天气预报模式中,将在现有基础上显著提高光学湍流空间分辨率和估算预报精度。

参 考 文 献

- [1] Beland R R. Propagation through atmospheric optical turbulence[J]. Atmospheric Propagation of Radiation, 1993, 2: 157-232.
- [2] Wu Xiaoqing, Zeng Zongyong, Ma Chengsheng, *et al.* Observations of atmospheric turbulence by balloon-borne instrument at Xinlong station[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 1996(4): 385-390.
吴晓庆, 曾宗泳, 马成胜, 等. 兴隆大气湍流气球探测[J]. 量子电子学报, 1996(4): 385-390.
- [3] Coulman C E, Vernin J, Coquegniot Y, *et al.* Outer scale of turbulence appropriate to modeling refractive-index structure profiles[J]. Applied Optics, 1988, 27(1): 155-160.
- [4] Dewan E M. A model for C_n^2 profiles using radiosonde data[M]. California: University of California Libraries, 1993.
- [5] Trinquet H, Vernin J. A statistical model to forecast the profile of the index structure constant C_n^2 [J]. Environmental Fluid Mechanics, 2007, 7(5): 397-407.
- [6] Masciadri E, Vernin J, Bougeault P. 3D mapping of optical turbulence using an atmospheric numerical model-I. A useful tool for the ground-based astronomy[J]. Astronomy and Astrophysics Supplement Series, 1999, 137(1): 185-202.
- [7] Cherubini T, Businger S, Lyman R, *et al.* Modeling optical turbulence and seeing over Mauna Kea [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2008, 47(4): 1140-1155.
- [8] Bjerknæs V. Das problem der wettvorhersage: betrachtet vom standpunkte der mechanik und der physik[M]. Meteor Zeits, 1904: 1-7.
- [9] Persson A. User guide to ECMWF forecast products[M]. Bracknell: ECMWF, 2013.
- [10] Chen Dehui, Xue Jishan. An overview on recent progresses of the operational numerical weather prediction models[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2004, 62(5): 623-633.
陈德辉, 薛纪善. 数值天气预报业务模式现状与展望[J]. 气象学报, 2004, 62(5): 623-633.
- [11] Chen Dehui, Yang Xuesheng, Zhang Hongliang, *et al.* Strategy for designing a non-hydrostatic multi-scale community

- model dynamic core[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2003, 14(4): 452-461.
- 陈德辉, 杨学胜, 张红亮, 等. 多尺度非静力通用模式框架的设计策略[J]. *应用气象学报*, 2003, 14(4): 452-461.
- [12] Cheng Linsheng. The current status of mesoscale numerical model development and its application prospects [J]. *Plateau Meteorology*, 1999, 18(3): 350-360.
- 程麟生. 中尺度大气数值模式发展现状和应用前景[J]. *高原气象*, 1999, 18(3): 350-360.
- [13] Wu Xiaoqing, Qian Xianmei, Huang Honghua, *et al.* Measurements of seeing, isoplanatic angle, and coherence time by using balloon-borne microthermal probes at gaomeigu[J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2014, 55(2): 144-153.
- 吴晓庆, 钱仙妹, 黄宏华, 等. 丽江高美古 Fried 参数、视宁度、等晕角及相干时间的探空测量[J]. *天文学报*, 2014, 55(2): 144-153.
- [14] Coulman C E, Andre J C, Lacarrere P, *et al.* The observation, calculation, and possible forecasting of astronomical seeing[J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 1986, 98(601): 376-387.
- [15] Bougeault P, De Hui C, Fleury B, *et al.* Investigation of seeing by means of an atmospheric mesoscale numerical simulation[J]. *Applied Optics*, 1995, 34(18): 3481-3488.
- [16] Mahalov A, Moustou M. Characterization of atmospheric optical turbulence for laser propagation [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2010, 4(1): 144-159.
- [17] Lascaux F, Masciadri E, Hagelin S. Mesoscale optical turbulence simulations at Dome C: Refinements [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2010, 403(4): 1714-1718.
- [18] Li Shuangxi, Fu Yuanfen, Huang Yinliang, *et al.* Calculation and statistical analysis of Fried parameter r_0 of astronomical seeing over China [J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2003, 44(4): 431-446.
- 李双喜, 付元芬, 黄寅亮, 等. 我国天文视宁度 Fried 参数 r_0 的计算与统计分析 [J]. *天文学报*, 2003, 43(1): 431-446.
- [19] Huang Yinliang, Li Shuangxi, Fu Yuanfen, *et al.* Seasonal variation of the Fried parameter r_0 and behaviour of subtropical jet stream [J]. *Journal of Tianjin Institute of Technology*, 2004, 20(3): 1-4.
- 黄寅亮, 李双喜, 付元芬, 等. Fried 参数 r_0 的季节变化与东亚副热带急流活动 [J]. *天津理工大学学报*, 2004, 20(3): 1-4.
- [20] Xu Liming, Wu Xiaoqing, Wang Yingjian. Forecast optical turbulence with mesoscale weather forecast model [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2008, 3(4): 270-275.
- 许利明, 吴晓庆, 王英俭. 利用中尺度天气预报模式预报大气光学湍流 [J]. *大气与环境光学学报*, 2008, 3(4): 270-275.
- [21] Qing Chun, Wu Xiaoqing, Li Xuebin, *et al.* Forecast upper air optical turbulence based on weather research and forecasting model [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(6): 061009.
- 青春, 吴晓庆, 李学彬, 等. 基于天气数值预报模式预报高空光学湍流 [J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27(6): 061009.
- [22] Qing Chun, Wu Xiaoqing, Li Xuebin, *et al.* Estimation of atmospheric optical turbulence profile by WRF model at Gaomeigu [J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(9): 0913001.
- 青春, 吴晓庆, 李学彬, 等. WRF 模式估算丽江高美古大气光学湍流廓线 [J]. *中国激光*, 2015, 42(9): 0913001.
- [23] Qing Chun, Wu Xiaoqing, Li Xuebin, *et al.* Research on simulating atmospheric optical turbulence in typical area [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(5): 0501001.
- 青春, 吴晓庆, 李学彬, 等. 典型地区高空大气光学湍流模拟研究 [J]. *光学学报*, 2016, 36(5): 0501001.
- [24] Wang H S, Yao Y Q, Qian X, *et al.* Method of modeling atmospheric optical turbulence [J]. *Chinese Astronomy and Astrophysics*, 2013, 37(3): 345-356.
- [25] Alliss R J, Felton B D. Improved climatological characterization of optical turbulence for space optical imaging and communications [C]. *Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference*, 2010: E25.
- [26] Wang Hui, Liu Na, Li Benxia, *et al.* An overview of ocean predictability and ocean ensemble forecast [J]. *Advances in Earth Science*, 2014, 29(11): 1212-1225.
- 王辉, 刘娜, 李本霞, 等. 海洋可预报性和集合预报研究综述 [J]. *地球科学进展*, 2014, 29(11): 1212-1225.
- [27] Mu Mu, Chen Boyu, Zhou Feifan, *et al.* Methods and uncertainties of meteorological forecast [J]. *Meteorological Monthly*, 2011, 37(1): 1-13.

穆 穆, 陈博宇, 周非凡, 等. 气象预报的方法与不确定性[J]. 气象, 2011, 37(1): 1-13.

[28] Bauer P, Thorpe A, Brunet G. The quiet revolution of numerical weather prediction[J]. Nature, 2015, 525(7567): 47-55.

[29] Lü Daren, Bian Jianchun, Chen Hongbin, *et al.* Frontiers and significance of research on stratospheric processes[J]. Advances in Earth Science, 2009, 24(3): 221-227.

吕达仁, 卞建春, 陈洪滨, 等. 平流层大气过程研究的前沿与重要性[J]. 地球科学进展, 2009, 24(3): 221-227.

《激光与光电子学进展》增设“资讯”栏目 通知

为了更好地服务广大科研工作者,提供更全面的科研和产业信息,《激光与光电子学进展》(核心)自 2017 年第 1 期开始,增设“资讯”栏目,来稿要求简短,篇幅限制在 2 页以内。

收稿范围:

1. 重点项目简介

国家级和省部级项目简介,以项目的目的意义、总体目标、研究内容、预期效益等为主要内容。

2. 简讯

所在课题组有价值的重要研究成果展示,以图文形式进行简要报道,争取国内首发权。

“资讯”栏目平均录用周期为 **20** 天,稿件录用后将于最近的一期出版!

欢迎来稿!

如需了解更多信息,请联系编辑部。

《激光与光电子学进展》编辑部

021-69918427

2017.01.10