

典型地区高空大气光学湍流模拟研究

青 春^{1,2} 吴晓庆¹ 李学彬¹ 朱文越¹ 黄印博¹ 饶瑞中^{1,3} 蔡 俊^{1,2}

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中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 安徽 合肥 230031

³中国科学技术大学环境科学与光电技术学院, 安徽 合肥 230026

摘要 依据 Tatarski 大气光学湍流参数化方案, 利用数值天气预报模式(WRF)模拟了高美古、茂名、乌鲁木齐等典型地区高空大气光学湍流廓线。并将高美古和茂名使用温度脉动仪实测的光学湍流与其对应的模拟数据做了对比, 结果表明, 模拟的光学湍流廓线与实测的光学湍流廓线吻合得较好, 相关性在 76% 左右。高美古和茂名的对比验证结果表明, 利用 WRF 模拟高空大气光学湍流的方法是可行的, 模拟得到了乌鲁木齐高空大气光学湍流廓线。结合这 3 个典型地区的气候特点, 分析了不同气候类型下光学湍流的特征和变化趋势。

关键词 大气光学; 湍流廓线; 数值天气预报模式; 湍流参数化

中图分类号 O437.5 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0501001

Research on Simulating Atmospheric Optical Turbulence in Typical Area

Qing Chun^{1,2} Wu Xiaoqing¹ Li Xuebin¹ Zhu Wenyue¹ Huang Yinbo¹

Rao Ruizhong^{1,3} Cai Jun^{1,2}

¹Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science, Hefei, Anhui 230031, China

²Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230031, China

³School of Environmental Science and Optoelectronic Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

Abstract Based on the optical turbulence parameterization of Tatarski theory, the optical turbulence profiles of upper air at Gaomeigu, Maoming and Urumqi are simulated by numerical weather research and forecasting (WRF) model. Simulation results are compared with optical turbulence measured by micro-thermometer at Gaomeigu and Maoming. It shows that the simulated and measured optical turbulence profiles are consistent well, and the correlation coefficient is up to 76%. The verified results at Gaomeigu and Maoming show that the method by using WRF model to simulate optical turbulence is feasible, and the optical turbulence profile of upper air at Urumqi is obtained. Combined with the climatic features of these three typical areas, characteristics and variation trend of upper air optical turbulence under different climate types are analyzed.

Key words atmospheric optics; turbulence profile; numerical weather research and forecasting model; turbulence parameterization

OCIS codes 010.1290; 010.1330; 030.4070; 060.4510

1 引 言

光波在大气中传输时, 受大气光学湍流的影响, 出现光强闪烁、像点抖动、成像模糊等现象, 从而影响光

收稿日期: 2015-12-07; **收到修改稿日期:** 2015-12-28

基金项目: 国家自然科学基金(41275020)

作者简介: 青 春(1987—), 男, 博士研究生, 主要从事大气湍流的参数化与模式预报等方面的研究。

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

导师简介: 吴晓庆(1963—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事大气边界层、大气湍流测量与模式、天文选址等研究。E-mail: xqw@aiiofm.ac.cn(通信联系人)

电系统的性能^[1]。折射率结构常数(C_n^2)是表征大气光学湍流强度的重要参数。目前有多种测量大气折射率结构常数的手段,但是利用测量手段在时间和空间上获取 C_n^2 极其有限。开展预报高空大气光学湍流的研究工作,在满足一定精度的情况下既能解决测量手段在时间和空间上的限制,也能满足实际工程应用的需要,将是一种可以摆脱测量方法在测量环境上的局限、获取大气光学湍流参数行之有效的手段。例如,美国夏威夷莫纳克亚天文台开展了预报高空大气光学湍流的工作来优化天文望远镜观测时间表,以提高望远镜的使用效率^[2]。

研究人员在大气光学湍流的参数化方面做了大量的工作。Tatarski^[3]首先给出了大气光学湍流与气象参数之间的关系,即 Tatarski 模式。Hufnagel 等^[4]基于星光闪烁和探空气球测量的数据归纳出高空大气湍流参数模式,但此模式是单一参数、中纬度模型,在使用范围上有所限制。Van Zandt 等^[5]开发了美国国家海洋和大气管理局(NOAA)模式,此模式较为复杂,但效果一般。Bougeault 等^[6]在 1995 年尝试将中尺度气象模式(MM5)模拟大气光学湍流的工作应用到天文学上,并取得了初步结果。Masciadri 等^[7-8]基于非静力学气象模式获得了大气光学湍流的三维分布。许利明等^[9-10]利用中尺度气象模式获得了合肥、库尔勒、东山地区的大气光学湍流强度廓线,但垂直分辨率和模拟高度有待提高。王红帅等^[11-12]尝试将大气光学湍流预报的研究成果运用到天文选址工作中,在阿里等地区成功地进行了大气湍流的预报。

本文在 Tatarski 湍流参数化的基础上,采用了与以往研究所不同的外尺度模式,引入了风速切变和温度梯度这 2 个对高空大气光学湍流有重要影响的量。利用数值天气预报模式(WRF)模拟了高美古、茂名、乌鲁木齐高空气象参数,根据湍流参数化方案计算了光学湍流的强度 C_n^2 ,并将在高美古、茂名实测的 C_n^2 与其对应的模拟数据做了对比验证。

2 模拟方法

模拟采用由美国国家大气研究中心(NCAR)、美国国家环境预测中心(NCEP)联合开发的 WRF(版本 3.4.1)。WRF 为完全可压缩非静力模式,水平方向采用 Arakawa-C 网格点,垂直方向采用地形跟随质量坐标。在时间积分方面采用 Runge-Kutta 算法。WRF 模式的控制方程采用大气运动闭合基本方程组^[13]:

$$\left(\frac{d\mathbf{V}_h}{dt}\right)_\sigma = -\nabla_\sigma\Phi - \sigma\alpha\nabla p^* - f\mathbf{k}\times\mathbf{V}_h + \mathbf{F}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial\Phi}{\partial\sigma} = -p^*\alpha, \quad (2)$$

$$\frac{\partial p^*}{\partial t} + \nabla_\sigma\cdot(p^*\mathbf{V}_h) + \sigma\frac{\partial p^*}{\partial\sigma} = 0, \quad (3)$$

$$p^*\sigma = -\int_0^\sigma \nabla_\sigma\cdot(p^*\mathbf{V}_h)d\sigma - \rho\frac{\partial p^*}{\partial t}, \quad (4)$$

$$c_p\left(\frac{dT}{dt}\right)_\sigma - \alpha\left(\sigma\frac{dp^*}{dt} + p^*\sigma\right) = Q, \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{RT}{\sigma p^* + p_\tau}. \quad (6)$$

式中 $\sigma = \frac{p-p_\tau}{p_s-p_\tau} = \frac{p-p_\tau}{p^*}$, p_s 是地表面气压, p_τ 是大气上界的气压。 α 表示比热容, p 为气压, \mathbf{k} 为 z 方向单位矢量, ρ 为密度, Φ 为位势, \mathbf{F} 为摩擦力, T 为温度, t 为时间, f 为地转系数, \mathbf{V}_h 为风速矢量, c_p 为比定压热容, Q 为非绝热过程的加热率, R 为干空气比气体常数。

由于时间和空间区域跨度大,因此模拟分为 5 段进行。采用 3 层网格嵌套,东西方向格点数从外到内分别为 65、91、124;南北方向格点数从外到内分别为 49、61、97;网格分辨率从外到内分别为 36、12、4 km;静态地形数据的分辨率为 $10'$ 、 $5'$ 、 $2'$;投影方式采用 lambert 正形投影,在中纬度地区产生的变形较小;输入的初始和边界条件资料为再分析资料(FNL),分辨率为 $1^\circ\times 1^\circ$ 。再分析资料从地面到高空分为 26 层,从 1000 hPa 到 10 hPa,包括的最基本参数有:表面气压、海表面气压、位势高度、温度、海表温度、土壤状况、冰覆盖率、相对湿度、风速、垂直运动、涡度以及臭氧。基本 WRF 模拟参数设置见表 1,表中 UTC 为协调世界时。

表 1 基本 WRF 模拟参数设置

Table 1 Basic parameterization settings of WRF simulation

Site	Latitude, Longitude	Simulation order	Vertical layer	Simulation time		Integration step /s	Initial field
				Start time /UTC	End time /UTC		
Gaomeigu	100.0 °E, 26.7 °N	1	96	2013-04-13T00:00	2013-04-15T00:00	180	FNL
		2		2013-04-20T00:00	2013-04-24T00:00		
Maoming	111.4 °E, 21.4 °N	1	72	2014-12-05T00:00	2014-12-06T00:00	180	FNL
		2		2014-12-08T00:00	2014-12-09T00:00		
Urumqi	87.4 °E, 43.5 °N	1	91	2005-06-13T00:00	2005-06-14T00:00	120	FNL

3 大气光学湍流的参数化

根据湍流局地均匀各向同性理论, Tatarski 将大气折射率结构常数与常规气象参数之间的关系表示为^[4]

$$C_n^2 = a L_0^{4/3} M^2, \quad (7)$$

$$M = -\frac{79 \times 10^{-6} P}{T^2} \frac{\partial \theta}{\partial z}, \quad (8)$$

$$\theta = T \left(\frac{1000}{P} \right)^{0.286}, \quad (9)$$

式中 a 为常数, 取 2.8; L_0 为湍流外尺度, 单位是 m; θ 为温度, 单位是 K; T 为气温, 单位是 K; P 为气压, 单位是 hPa; z 为海拔高度, 单位是 m; M 为位势折射率梯度。

通过采用不同外尺度模式计算 C_n^2 的对比表明, 高空风切变以及温度梯度可能是诱导光学湍流的主要因素, 因而将外尺度与高空风切变以及温度梯度联系起来更加符合实际^[14]。加入风切变和温度梯度的外尺度模式(HMNSP99)^[15]为

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

$$S = \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (11)$$

式中 u 、 v 是纬向风速大小和经向风速大小, 单位是 m/s, S 为水平风速的垂直切变。本文将采用这个加入高空风切变以及温度梯度的外尺度模式来计算大气光学湍流强度。

4 模拟与测量对比实验

研制的湍流气象探空仪分别在高美古观测站、茂名博贺海洋气象科学实验基地进行测量。湍流气象探空仪感温部分铂丝响应频率为 0.1~30.0 Hz, 最小温度扰动偏差小于 0.002 °C。分别选取了在高美古和茂名的早晨以及晚上时段作为代表与模拟结果进行对比验证。

4.1 高美古地区对比实验

丽江高美古观测站海拔约 3227 m, 坐标(100.0 °E, 26.7 °N), 属于高原山地气候兼有亚热带季风气候。为了和探空气球测量时间相对应, 模拟分为 2 段进行, 基本模拟参数设置见表 1。高美古早晨模拟与实测的廓线如图 1 所示, 温度廓线[如图 1(a)所示]一致性较好, 相关性为 97.3%, 在海拔 5 km 附近的对流边界层出现了较薄的逆温层现象, 相应地出现了一个强湍流薄层。模拟的风速与实测的风速在海拔 9~11 km 偏差稍大[如图 1(b)所示]。模拟的 C_n^2 廓线和实测的 C_n^2 廓线无论在量级上还是趋势上都符合得较好, 相关性达到了 78.9%。

图 2 为高美古夜晚模拟与实测的廓线。可以看出相比于早晨, 夜晚模拟的风速误差较小, 相关性达到 87.6%。结合图 1~2 可知, 高美古早晨和夜晚的 C_n^2 廓线变化趋势明显, 都在海拔 17 km 附近出现强湍流层。强湍流层通常成对出现, 并且出现强湍流薄层的地方, 风速切变和温度梯度都较大。再次印证了引起光学湍流的两个必要条件: 一是有风速的切变; 二是存在温度梯度^[16-17]。

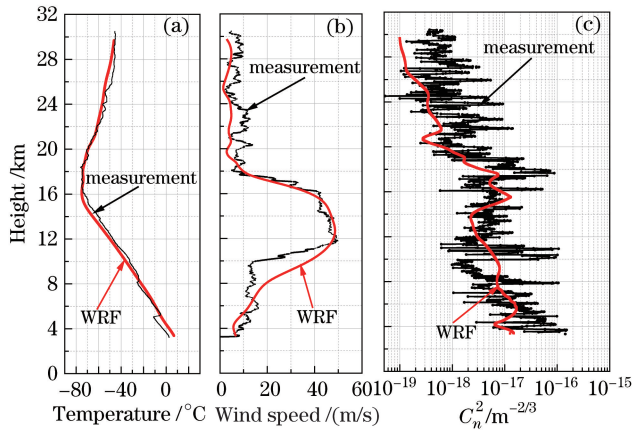


图 1 高美古早晨模拟与实测的廓线。(a)温度廓线;(b)风速廓线;(c) C_n^2 廓线
 Fig. 1 Simulated and measured profiles in the morning at Gaomeigu. (a) Profile of temperature;
 (b) profile of wind speed; (c) profile of C_n^2

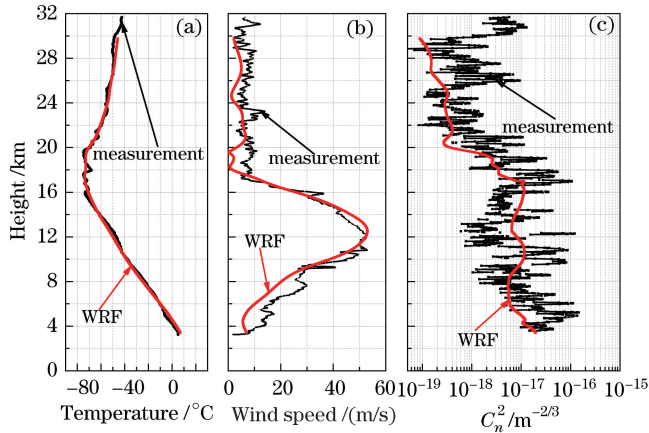


图 2 高美古夜晚模拟与实测的廓线。(a)温度廓线;(b)风速廓线;(c) C_n^2 廓线
 Fig. 2 Simulated and measured profiles at night at Gaomeigu. (a) Profile of temperature;
 (b) profile of wind speed; (c) profile of C_n^2

4.2 茂名地区对比实验

茂名博贺海洋气象科学实验基地海拔约 122 m,坐标(111.4 °E,21.4 °N),属于亚热带季风性湿润气候。茂名地处南亚热带和北热带边缘过渡地带,倚山临海,地貌类型复杂,由于海陆南北配置,既受大陆性又受海洋性气候影响。基本模拟参数设置见表 1。图 3 为茂名上午模拟与实测的廓线对比图。温度、风速廓线符合较好,相关性分别为 96.9%、86.7%。 C_n^2 廓线存在差异,模拟的 C_n^2 廓线偏小,且在海拔 14 km 处出现凹陷。

图 4 为茂名夜晚模拟与实测的廓线。温度、风速廓线相关性分别为 95.3%、87.2%。在海拔 19 km 处模拟的 C_n^2 廓线出现凹陷,模拟的 C_n^2 与实测的 C_n^2 廓线相关性为 73.3%。结合图3~4可看出,茂名上午的 C_n^2 明显大于夜晚,上午出现的强湍流层较厚,夜晚出现的强湍流层较薄。

4.3 WRF 模拟乌鲁木齐地区高空光学湍流强度

乌鲁木齐地区海拔约 932 m,坐标(87.4 °E,43.5 °N),位于亚欧大陆腹地,远离海洋,气候干燥,昼夜温差大,属于中温带大陆性干旱气候。基本模拟参数设置见表 1。高空常规气象参数采用探空站数据,图 5(a)和(b)分别为乌鲁木齐地区早晨模拟与实测的温度和风速廓线,温度廓线几乎完全吻合,相关性达到99.2%;风速廓线也较为一致,相关性为 82.7%。依据在高美古和茂名的对比验证结果,表明利用 WRF 模拟高空光学湍流的方法是可行的。利用 WRF 模拟得到的乌鲁木齐高空光学湍流,如图 5(c)和图 6(c)所示。相比于高美古和茂名早晨的 C_n^2 廓线,乌鲁木齐早晨的 C_n^2 廓线在海拔 10 km 以下有较大波动。图 6 为乌鲁木齐地

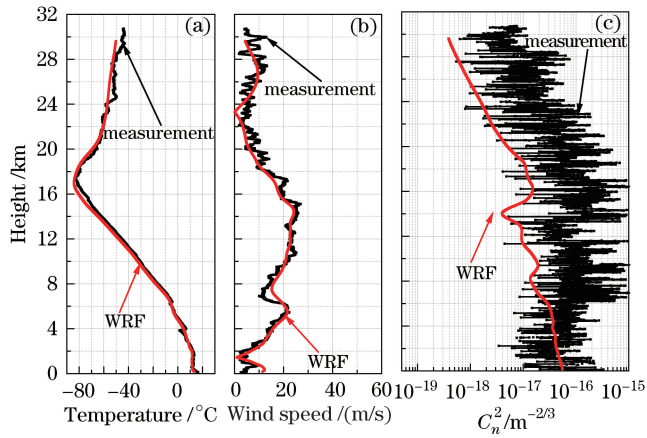


图 3 茂名上午模拟与实测的廓线。(a)温度廓线;(b)风速廓线;(c) C_n^2 廓线

Fig. 3 Simulated and measured profiles at forenoon at Maoming. (a) Profile of temperature; (b) profile of wind speed; (c) profile of C_n^2

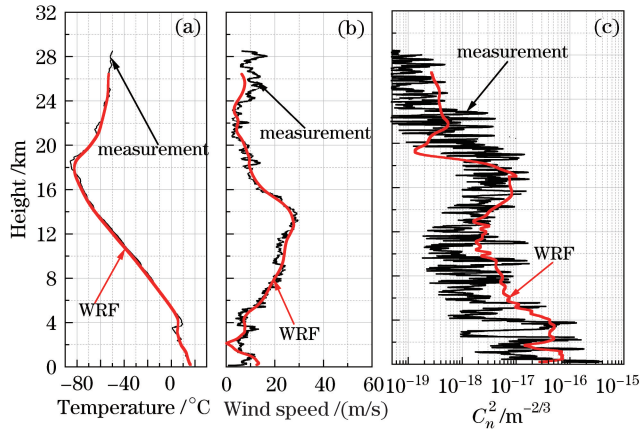


图 4 茂名夜晚模拟与实测的廓线。(a)温度廓线;(b)风速廓线;(c) C_n^2 廓线

Fig. 4 Simulated and measured profiles at night at Maoming. (a) Profile of temperature; (b) profile of wind speed; (c) profile of C_n^2

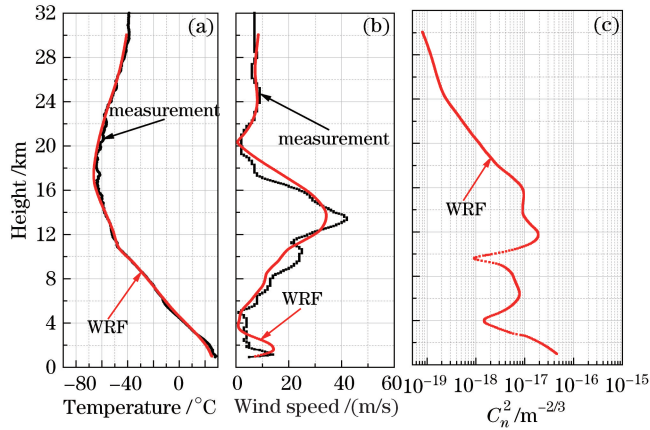


图 5 乌鲁木齐早晨模拟与实测的廓线。(a)温度廓线;(b)风速廓线;(c) C_n^2 廓线

Fig. 5 Simulated and measured profiles in the morning at Urumqi. (a) Profile of temperature; (b) profile of wind speed; (c) profile of C_n^2

区夜晚模拟与实测的廓线。夜晚模拟与实测的温度廓线、风速廓线一致性好,相关性分别为 98.7%、91.9%。 C_n^2 廓线在海拔 10 km 以下相比于早晨波动更加明显。结合图 5(c)和图 6(c),乌鲁木齐地区早晨与夜晚的

强湍流层均出现在 12~16 km, C_n^2 在海拔 10 km 以上的变化趋势, 早晨与夜晚差别不大, 但在海拔 10 km 以下差别较大。

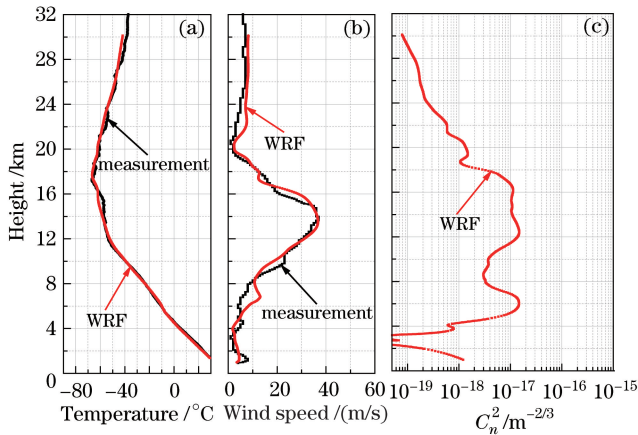


图 6 乌鲁木齐夜晚模拟与实测的廓线。(a)温度廓线;(b)风速廓线;(c) C_n^2 廓线
Fig. 6 Simulated and measured profiles at night at Urumqi. (a) Profile of temperature;
(b) profile of wind speed; (c) profile of C_n^2

4.4 实验小结

在高美古、茂名、乌鲁木齐模拟与实测的温度、风速、 C_n^2 之间的相关性见表 2。高美古、茂名、乌鲁木齐的气候、对流层顶、最大风速、强湍流层的特点如表 3 所示。

表 2 模拟与测量的温度、风速、 C_n^2 之间的相关性

Table 2 Correlation of temperature, wind and C_n^2 between simulation and measurement at Gaomeigu, Maoming and Urumqi /%

Site	Temperature		Wind speed		C_n^2	
	Morning	Night	Morning	Night	Morning	Night
Gaomeigu	97.3	98.7	74.3	87.6	78.9	76.8
Maoming	96.9	95.3	86.7	87.2	74.7	73.3
Urumqi	99.2	98.7	82.7	91.9		

表 3 高美古、茂名、乌鲁木齐气候、对流层顶、最大风速、强湍流层的特点

Table 3 Characteristics of climate, tropopause, maximum wind speed and strong turbulence layer at Gaomeigu, Maoming and Urumqi

Site	Climate type	Tropopause		Maximum wind speed		Strong turbulence layer	
		Height /km	Temperature /°C	Height /km	Wind speed / (m/s)	Height /km	Thickness /km
Gaomeigu	plateau	16	-75	13	50	16	2
Maoming	humid	17	-83	13	30	17	3
Urumqi	dry	14	-67	14	35	14	4

5 结 论

依据 Tatarski 湍流参数化方案, 采用了加入风速切变和温度梯度的外尺度模式, 利用 WRF 模式模拟得到了高美古、茂名、乌鲁木齐的 C_n^2 廓线, 并将高美古、茂名实测的 C_n^2 廓线与其对应的模拟数据做了对比验证, 得出以下结论:

1) 在高美古、茂名模拟的 C_n^2 符合实测的 C_n^2 廓线的变化特征和规律, 相关性在 76% 左右。基于上述验证结果, 表明利用 WRF 模拟高空光学湍流的方法是可行的。因而利用 WRF 模式模拟得到了乌鲁木齐高空光学湍流廓线的特征和变化趋势。

2) 高美古地区属于高原山地气候, 高空的温度、风速、 C_n^2 变化趋势较为明显, 在海拔 16 km 附近出现强湍流薄层; 茂名地区属于亚热带季风性湿润气候, 高空的温度变化明显, 风速变化幅度稍小。上午的 C_n^2 明

显比夜晚大,且上午强湍流层比夜晚厚;乌鲁木齐地区属于中温带大陆性干旱气候,对流层顶温度变化平缓,风速变化明显,在海拔 14 km 附近出现较厚的强湍流层。

3) 模拟乌鲁木齐地区高空光学湍流采用了与高美古、茂名相同的光学湍流参数化方案。然而对于不同气候类型的地区采用同一参数化方案以及外尺度模式是否可行、可靠,值得深入研究,下一步将重点验证参数化方案的普适性。另外,若 WRF 模式输入的初始条件和边界条件采用预报场数据(GFS)则可以预报未来一段时间和空间范围内光学湍流的强度,因而具有重要的光电工程应用参考价值。

参 考 文 献

- 1 Song Zhengfang. Applied atmospheric optics[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1990: 67-70.
宋正方. 应用大气光学基础[M]. 北京: 气象出版社, 1990: 67-70.
- 2 Cherubini T, Businger A, Lyman R, *et al.*. Modeling optical turbulence and seeing over Mauna Kea[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2008, 47(4): 1140-1155.
- 3 Tatarski V I. Wave Propagation in a turbulent medium[M]. New York: McGraw-Hill, 1961.
- 4 Hufnagel R E, Stanley N R. Modulation transfer function associated with image transmission through turbulent media[J]. Journal of the Optical Society of America, 1963, 54(1): 52-60.
- 5 Warnock J M, Van Zandt T E, Green J L. A statistical model to estimate mean values of parameters of turbulence in the free atmosphere (7th edition)[M]. Boulder: Symposium on Turbulence and Diffusion, 1985: 211-214.
- 6 Bougeault P, Hui C D, Fleury B, *et al.*. Investigation of seeing by means of an atmospheric mesoscale numerical simulation[J]. Applied Optics, 1995, 34(18): 3481-3488.
- 7 Masciadri E, Jabouille P. Improvements in the optical turbulence parameterization for 3D simulations in a region around telescope[J]. Astronomy & Astrophysics, 2001, 376(2): 727-734.
- 8 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.
- 9 Xu Liming, Wu Xiaoqing, Wang Yingjian. Forecast optical turbulence with mesoscale weather forecast model[J]. Journal of Atmospheric and Environment 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.
- 10 Xu Liming, Wu Xiaoqing, Wang Yingjian. Methods comparison of estimating optical turbulence profile using conventional meteorology parameters[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(1): 53-57.
许利明, 吴晓庆, 王英俭. 用常规气象参数估算光学湍流廓线方法的比较[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(1): 53-57.
- 11 Wang Hongshuai, Yao Yongqiang, Qian Xuan, *et al.*. The method of modeling atmospheric optical turbulence[J]. Acta Astronomica Sinica, 2012, 53(6): 527-537.
王红帅, 姚永强, 钱璇, 等. 大气光学湍流模型计算方法[J]. 天文学报, 2012, 53(6): 527-537.
- 12 Wang Hongshuai, Yao Yongqiang, Liu Liyong, *et al.*. Forecast of atmosphere optical turbulence at Ali Site by weather research and forecasting model[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3): 0301006.
王红帅, 姚永强, 刘立勇, 等. 基于天气预报模式预报阿里天文站大气光学湍流[J]. 光学学报, 2013, 33(3): 0301006.
- 13 Shen Tongli, Tian Yongxiang, Ge Xiaozhen, *et al.*. Numerical weather forecast[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2003: 31-37.
沈桐立, 田永祥, 葛孝贞, 等. 数值天气预报[M]. 北京: 气象出版社, 2003: 31-37.
- 14 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.
- 15 Ruggiero F H, Debenedictis D A. Forecasting optical turbulence from Mesoscale Weather Prediction Models[C]. 2002 DoD High Performance Modernization Program Users Group Conference, Austin, Texas, 2002.
- 16 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.
- 17 Coulman C E, Vernin J, Fuchs A. Optical seeing-mechanism of formation of thin turbulent laminae in the atmosphere[J]. Applied Optics, 1995, 34(24): 5461-5474.