

利用 Tatarski 方案估算不同环境下的光学湍流廓线

蔡俊^{1,2}, 李学彬¹, 武鹏飞¹, 吴晓庆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 230026)

摘要: 大气光学湍流的存在会严重制约光学系统的性能。为了能够降低大气湍流的影响, 满足光电工程的应用, 准确地估算出不同场景下的大气光学湍流廓线具有十分重要的指导意义。基于 Tatarski 光学湍流参数化方案和广泛应用的外尺度模式, 利用探空仪测量的气象探空数据, 对内陆(合肥)、海陆交界处(茂名)和远海海洋这三个不同环境下的大气光学湍流廓线进行估算。将合肥和茂名两地的估算值与实际观测的廓线进行对比验证, 发现在变化趋势和量级上相近, 为该模式估算远海海洋的大气光学湍流廓线提供了依据。结果表明模式能够较好地估算出不同环境下的光学湍流廓线。此外, 还发现高空光学湍流的发生与风切变和温度梯度有重要关系。

关键词: 光学湍流廓线; 湍流参数化; 外尺度; 探空

中图分类号: P427 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1111002

Estimation of atmospheric optical turbulence profiles in different environments based on Tatarski parameterization scheme

Cai Jun^{1,2}, Li Xuebin¹, Wu Pengfei¹, Wu Xiaoqing¹

- (1. Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
2. Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: Atmospheric optical turbulence severely restricts the performance of optical systems. In order to reduce the influence of atmospheric turbulence and meet the application of photoelectric engineering, it is very important to accurately estimate the atmospheric optical turbulence profiles in different scenes. Based on the Tatarski optical turbulence parameterization scheme and the representative outer scale models, the meteorological data measured by the sounding instrument were used to estimate optical turbulence profiles of inland area(Hefei), sea-land interface (Maoming) and open sea, respectively. The estimations were compared with the observed profiles at Hefei and Maoming. There is a good consistency both in trend and magnitude, which provides the evidence for estimating the atmospheric optical turbulence profile of open sea with this model. The results show that the model can precisely estimate the optical turbulence profiles in different environments. In addition, it is found that the occurrence of upper air optical turbulence is closely related to wind shear and temperature gradient.

Key words: optical turbulence profile; turbulence parameterization; outer scale; sounding

收稿日期: 2018-06-10; 修订日期: 2018-07-20

基金项目: 国家自然科学基金(41576185)

作者简介: 蔡俊(1989-), 男, 博士生, 主要从事大气光学湍流测量与模式方面的研究。Email: cj013095@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 吴晓庆(1963-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事大气湍流测量与模式、天文选址等方面的研究。Email: xqwu@aiofm.ac.cn

0 引言

大气中温度的随机变化会引起空气密度的随机变化,进而引起大气折射率随时间和空间的无规则变化。通常把大气折射率场的变化主要是由温度起伏引起的湍流称为大气光学湍流。大气光学湍流会引起一系列的湍流效应,严重制约着天文观测、光学遥感成像、自由空间光通信以及激光大气传输等先进光电工程性能的发挥。大气折射率结构常数 C_n^2 是描述大气光学湍流强度的重要参量,其随高度的变化称为大气光学湍流廓线。准确地估算出大气光学湍流廓线对采用相应的自适应光学手段降低大气光学湍流的影响、提高光学系统的性能具有重要意义。

国内外学者已经开展了大气光学湍流廓线模式估算方面的工作^[1-7]。当前获取 C_n^2 廓线的常用测量手段为探空气球测量和遥感测量。前者是通过气象气球携带微温传感器来测量得到温度结构函数和温度、湿度、气压等气象参数,进而得到 C_n^2 廓线^[8];后者自 1974 年起,由 Rocca 等^[9]发展起来,该技术包括以恒星为光源的 Scintillation Detection and Ranging (SCIDAR)^[10]、Slope Detection and Ranging (SLODAR)^[11]、Multi-Aperture Scintillation Sensor(MASS)^[12]、single-star SCIDAR^[13]等技术,以及激光雷达测量法^[14]。这些方法虽然很有效,但是需要耗费大量的人力、财力和物力,且难以进行长时间的连续观测。因此,建立 C_n^2 与温度、气压、风速等常规气象参数之间的关系,构建有效的模式来估算 C_n^2 就显得十分必要,而且已经成为了大气光学湍流的重要研究方向。

目前开展的 C_n^2 廓线模式研究主要集中在陆地下垫面环境下,在海陆交界处和远海海洋环境下进行的估算 C_n^2 廓线的工作还非常有限。文中利用在内陆(合肥)、海陆交界处(茂名)和远海海面(航海船)上施放探空气球获得的实验数据,依据 Tatarski 高空光学湍流参数化方案来估算得到大气光学湍流廓线,为光电工程在不同场景下应用所需要的大气光学湍流廓线模式提供技术支持。

1 Tatarski 高空光学湍流参数化方案

根据 Kolmogorov 的局地均匀各向同性理论, Tatarski^[14]认为大气折射率结构常数 C_n^2 与常规气象参数具有如下关系:

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

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

式中: α 为常数,通常取为 2.8; L_0 为湍流外尺度; M 为位势折射率梯度; θ 为位温,单位是 K; P 为大气压强,单位是 hPa。且位温 θ 与气温 T 的关系为:

$$\theta = T \left(\frac{1000}{P} \right)^{0.286} \quad (3)$$

在该模式的所有输入参数中,除了湍流外尺度 L_0 外,其余各参量都可以通过搭载在探空气球上的传感器测量得到。所以,外尺度的精度对于估算结果具有重要影响。关于外尺度估算模式已经开展了大量工作,其中最具代表性的是 Dewan 外尺度模式、HMNSP99 外尺度模式和 Coulman 外尺度模式。

1.1 Dewan 外尺度模式

Dewan 等^[15]通过大量的实验观测数据将外尺度和风切变建立联系,分别提出了对流层和平流层的外尺度公式:

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

$$Y = \begin{cases} 1.64 + 42 S, & \text{troposphere} \\ 0.506 + 50 S, & \text{stratosphere} \end{cases} \quad (5)$$

$$S = \left[\left(\frac{\partial u}{\partial h} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial h} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

式中:参量 Y 为风切变 S 的线性函数; u 、 v 分别为径向和横向风速。

1.2 HMNSP99 外尺度模式

Jackson 和 Reynolds^[16]利用 1999 年 6 月在新墨西哥霍罗曼空军基地获得的探空数据推导出同时包含风切变和温度梯度的外尺度公式,该模式与 Dewan 模式的区别在于 Y 函数中加入了温度梯度量。

$$Y = \begin{cases} 0.362 + 16.728 S - 192.347 \frac{dT}{dh}, & \text{troposphere} \\ 0.757 + 13.819 S - 57.784 \frac{dT}{dh}, & \text{stratosphere} \end{cases} \quad (7)$$

1.3 Coulman 外尺度模式

Coulman 等^[17]通过在法国和美国等地用 SCIDAR 和探空气球测量的大量 C_n^2 与气象参数数据,分段拟合得到湍流外尺度关于高度变化的经验公式:

$$L_0(h) = \begin{cases} 3.21 \left(\frac{h}{1000} \right)^{-0.11} - 2.4616, & h \leq 2000 \text{ m} \\ \frac{4}{1 + \left(\frac{h-8500}{2500} \right)^2}, & 2000 \text{ m} \leq h \leq 17000 \text{ m} \\ 0.307 - 0.0324 \left(\frac{h}{1000} - 17 \right) + 0.00167 \left(\frac{h}{1000} - 17 \right)^2 + 0.000476 \left(\frac{h}{1000} - 17 \right)^3, & h \geq 17000 \text{ m} \end{cases} \quad (8)$$

2 模式与实验观测对比分析

为了检验模式的适用条件,同时也为了满足不同场景下应用的需要,使用自行研制的湍流探空仪在内陆、海陆交界和远海海面三种不同的环境下进行探空测量。利用上述的 Tatarski 参数化公式估算得到大气折射率结构常数 C_n^2 廓线,并与实测的 C_n^2 廓线进行对比验证。由于大气光学湍流的发生需要具备一定的动力学条件和热力学条件,其动力学条件要求空气层中具有明显的风速切变;热力学条件要求空气层中具有一定的不稳定性,这与温度梯度具有密切的关系。因此,选取同时包含风切变和温度

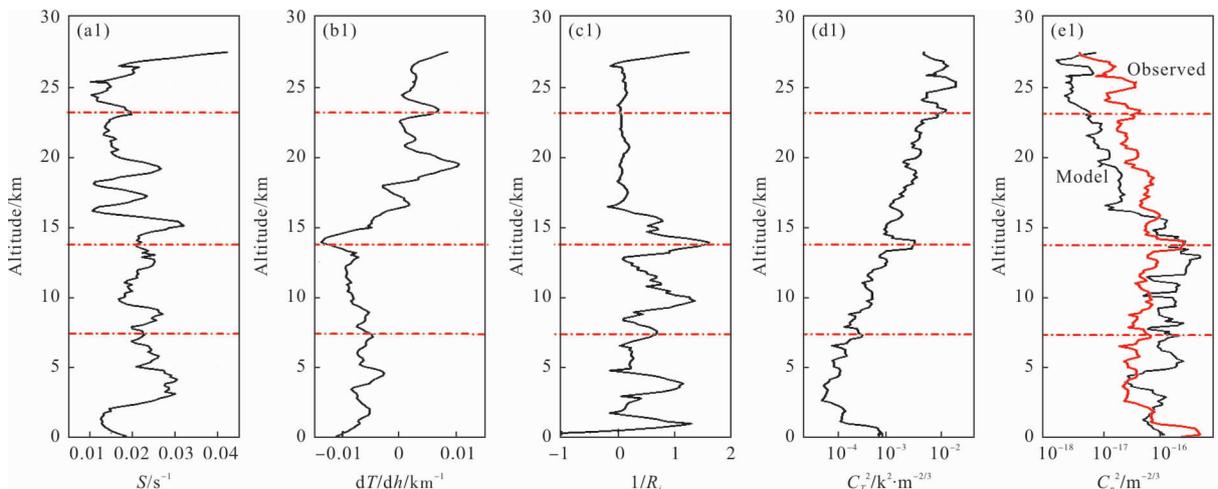
梯度因子的 HMNSP99 外尺度模式。Richardson 数能够反映风速剪切和温度分层对湍流发展产生的影响,有助于进一步探究湍流的发生机制,其表达式为:

$$R_i = \frac{g}{\theta} \frac{d\theta/dT}{(dV/dh)^2} \quad (9)$$

式中: g 为重力加速度; V 为水平风速,单位是 m/s。当 $R_i < 0.25$ 时,大气层结处于不稳定状态,湍流发生。 R_i 有时很大,因此主要研究 R_i 的倒数。相应的, $1/R_i > 4$ 时,湍流发生。

2.1 内陆环境下的湍流估算结果分析

合肥地处中纬度地带,属亚热带季风性湿润气候,季风明显,四季分明,气候温和,地势由西北向东南倾斜,西南部属大别山余脉。图 1 为合肥地区 2016 年 7 月 22 日和 11 月 4 日风切变、温度梯度、Richardson 数的倒数 $1/R_i$ 、温度结构常数 C_T^2 和大气折射率结构常数 C_n^2 廓线分布图。可以看到, C_n^2 的模式估算值与实际观测值变化趋势一致,符合得较好。同时发现,在平流层模式估算值稍微小于实测值。总的来说, Tatarski 湍流参数化方案基本上能够较好地完成内陆地区的大气光学湍流廓线估算工作。同时如图中红色虚线所示,在风切变、温度梯度和 $1/R_i$ 起伏较大的地方通常伴随着强湍流薄层的出现。在整个过程中,风切变和温度梯度波动明显; $1/R_i$ 在对流层起伏较大,对应的 C_n^2 值较大,在平流层基本没有起伏,相应的 C_n^2 值也较小。



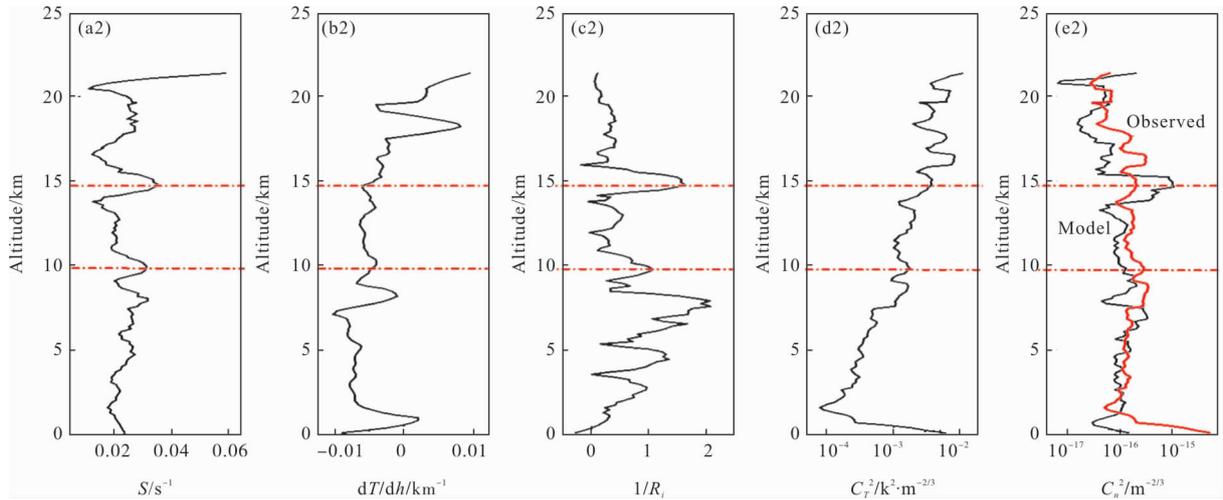


图 1 2016 年 7 月 22 日和 11 月 4 日合肥风切变(a1)、(a2);温度梯度(b1)、(b2); $1/R_i$ (c1)、(c2);温度结构常数(d1)、(d2)和大气折射率结构常数(e1)、(e2)廓线

Fig.1 Profiles of wind shear (a1), (a2); temperature gradient (b1), (b2); inverse of Richardson number (c1), (c2); structure parameter of temperature (d1), (d2); refractive index structure parameter (e1), (e2) on July 22, 2016 and November 4, 2016 in Hefei

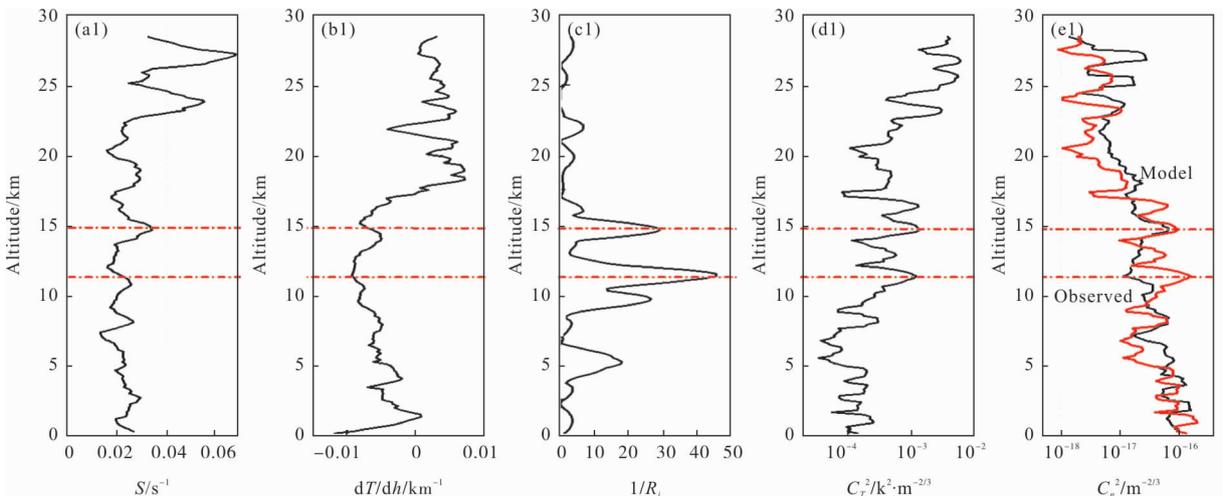
2.2 海陆交界环境下的湍流估算结果分析

实验地点茂名博贺海洋气象科学实验基地位于中国南海之滨,地处北回归线以南,属热带亚热带季风湿润气候,由于海陆南北配置,既受大陆性又受海洋性气候影响。紧邻着海边施放了载有湍流气象探空仪的气象气球。图 2 为茂名地区 2016 年 12 月 29 日和 2017 年 1 月 1 日风切变、温度梯度、 $1/R_i$ 、 C_t^2 和 C_n^2 廓线图。从图中可以看到, C_n^2 的模式估算值总体上稍大于实测值,但是基本上反映出了海边光学湍流廓线的变化特征,且能够比较精准地捕捉到海边大气光学湍流变化的细节,尤其是 12 月 29 日,两者在变

化趋势和量级上都高度吻合。和内陆地区一样,在风切变、温度梯度和 $1/R_i$ 波动较大时,也出现了强湍流层。海边的 $1/R_i$ 总体上更大,尤其是在对流层区域经常出现大于 4 的情况,对应的湍流都较强。

2.3 远海海洋环境下的湍流估算结果分析

2014 年 6 月在实验船上施放气象气球对远海海洋进行探空测量,遗憾的是该次实验中只测量了温度、湿度、气压、风速和风向的廓线,缺少实测的大气折射率结构常数 C_n^2 廓线。由于没有实测的 C_n^2 廓线作为对比,将前文所述的三种外尺度模式都用来估算远海海洋环境下的 C_n^2 廓线,并比较这三种模式的估算结果。



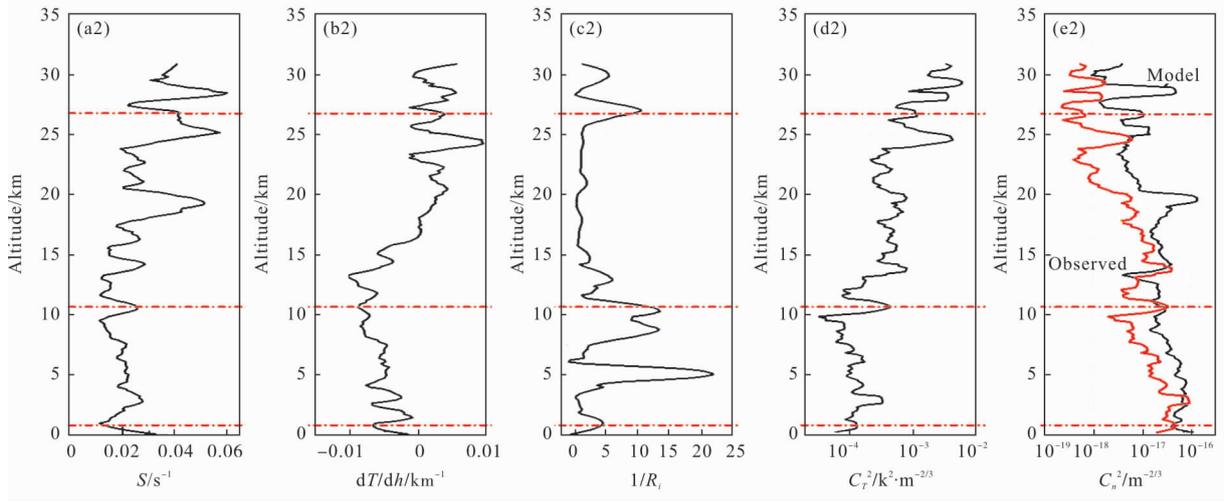


图 2 2016 年 12 月 29 日和 2017 年 1 月 1 日茂名风切变(a1)、(a2); 温度梯度(b1)、(b2); $1/R_i$ (c1)、(c2);

温度结构常数(d1)、(d2)和大气折射率结构常数(e1)、(e2)廓线

Fig.2 Profiles of wind shear (a1), (a2); temperature gradient (b1), (b2); inverse of Richardson number (c1), (c2); structure parameter of temperature (d1), (d2); refractive index structure parameter (e1), (e2) on December 29, 2016 and January 1, 2017 in Maoming

需要指出的是,在该次实验施放的气象气球中,只有 6 月 21 日的上升高度达到 25 km,其他的都低于 16 km。这主要是由于随着气球的横向漂移和实验船的不断行驶,船体上的接收天线接收不到载波信号,无法接收采集数据。图 3 为根据 6 月 21 日和 25 日的探空数据,利用上述三种模式估算的外尺度。Coulman 模式因为只是高度的函数,估算结果是一条平滑的曲线,最大值约为 4 m,在 8.4 m 高度处出现了一个峰值。总体上,Dewan 模式的估算结果最大,HMNSP99 模式次之,Coulman 模式最小。从估算结果来看,远海海洋的外尺度基本上小于 10 m,随高度抖动比较剧烈,在 20 km 以上,三种模式估算结果都很小,远小于 1 m。

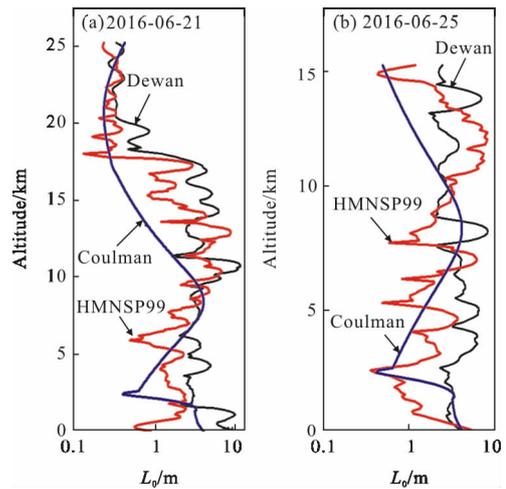
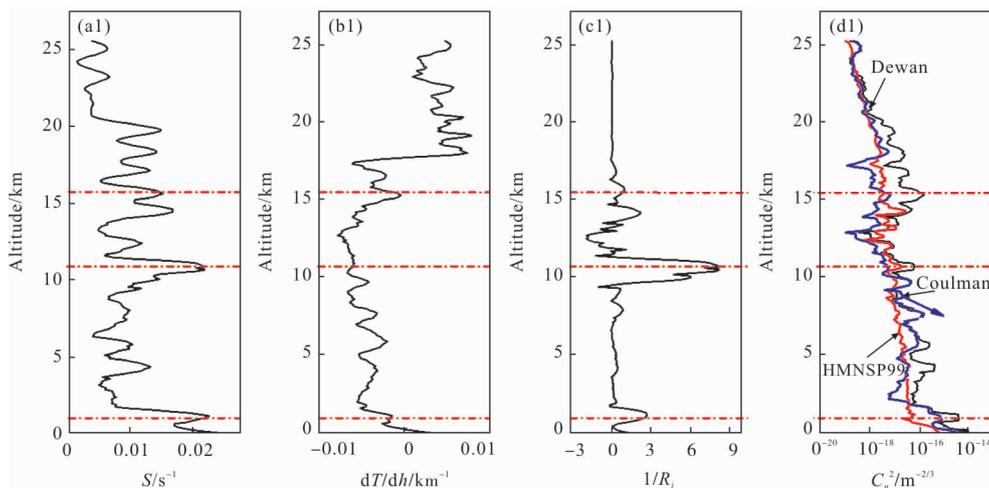


图 3 远海海洋三种外尺度的比较

Fig.3 Comparison of outer scales estimated by three models on the open sea

图 4 为 2014 年 6 月 21 日和 25 日远海海洋风



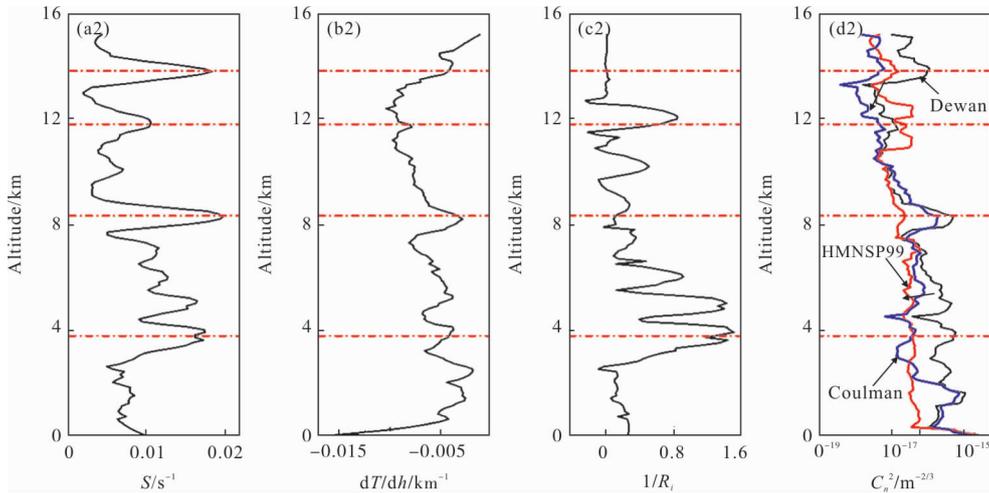


图 4 2014 年 6 月 21 日和 25 日远海海洋风切变(a1)、(a2);温度梯度(b1)、(b2); $1/R_i$ (c1)、(c2);大气折射率结构常数(d1)、(d2)廓线
Fig.4 Profiles of wind shear (a1),(a2); temperature gradient (b1),(b2); inverse of Richardson number (c1),(c2); refractive index structure parameter (d1),(d2) on June 21 and 25, 2014 on the open sea

切变、温度梯度、 $1/R_i$ 和 C_n^2 廓线图。从整体上来看，三种外尺度模式估算的远海海洋环境下的大气折射率结构常数廓线一致性较好， C_n^2 的变化范围大约在 $10^{-14} \sim 10^{-19} \text{ m}^{-2/3}$ 之间，随高度递减。整个高度上，Dewan 模式和 Coulman 模式在变化趋势和精细结构上具有更好的一致性。在对流层底部，HMNSP99 模式的估算结果最小；在 10~12 km 和 20 km 以上，三者具有更高的吻合度。6 月 21 日，远海海洋环境下的 $1/R_i$ 在 10.7 km 附近出现最大值，对应地出现了一个强湍流薄层；其他高度上 $1/R_i$ 较小，不超过 1.5。与内陆地区和海边相似，在风切变、温度梯度和 $1/R_i$ 起伏较大的地方，通常强湍流层相应地出现。

3 结论

主要基于 Tatarski 高空大气光学湍流参数化方案，利用具有代表性的湍流外尺度模式估算了内陆(合肥)、海陆交界处(茂名)和远海海洋这三个不同环境下的大气折射率结构常数 C_n^2 廓线，并进一步探究了促使高空大气光学湍流发展的相关因子，可以得到以下结论：

(1) 根据 Tatarski 高空大气光学湍流参数化方案和同时包含有风切变与温度梯度因子的 HMNSP99 外尺度模式估算了合肥和茂名两地的廓线，并与实测的廓线进行了比较，发现模式估算值与

实测值展现了较好的一致性，表明模式能够有效地估算高空大气光学湍流，为将该模式用于估算远海海洋的光学湍流廓线提供了依据。

(2) 基于上述方案，将三种外尺度模式都用于估算远海海洋环境下的外尺度廓线和大气光学湍流廓线，发现远海海洋的外尺度基本上不超过 10 m；高空光学湍流强度分布在 $10^{-14} \sim 10^{-19} \text{ m}^{-2/3}$ 之间。三种外尺度模式的估算结果展现出良好的一致性，尤其是在 10~12 km 及 20 km 以上区域。需要指出的是缺乏实际观测的 C_n^2 廓线来进行对比验证，且探测的高度不足。因此，未来还需要进行更多的实验来深入地论证。

(3) 高空大气光学湍流的发生与风切变和温度梯度密切相关，当风切变、温度梯度和 Richardson 数的倒数起伏较大时常出现强湍流薄层。

(4) Tatarski 高空大气光学湍流参数化方案基本上能够较好地完成内陆、海陆交界处和远海海洋等不同环境下大气光学湍流廓线的估算。但是，在捕捉某些特定高度上湍流强度的精细结构变化还稍显欠缺，这需要长时间的大量观测数据对模式进行不断地校正和完善。此外，提高探空仪的响应频率，获得更高分辨率的探空数据也有助于提高模式的精度。

参考文献：

[1] Wu Xiaoqing, Zeng Zongyong, Ma Chengsheng, et al.

- Observations of atmospheric turbulence by balloon – borne instrument at Xinglong station [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 1996, 13 (4): 385–390. (in Chinese)
- 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, 1996, 13(4): 385–390.
- [2] Sun Gang, Weng Ningquan, Zhang Caiyun, et al. Atmospheric turbulence in typical area based on NOAA model [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43 (2): 388–393. (in Chinese)
- 孙刚, 翁宁泉, 张彩云, 等. 基于 NOAA 模式的典型地区大气湍流高度分布 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(2): 388–393.
- [3] 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. (in Chinese)
- 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.
- [4] Tatarski V I. Wave Propagation in a Turbulent Medium [M]. New York: McGraw–Hill, 1961.
- [5] Beland R R. Propagation Through Atmospheric Optical Turbulence[M]. Bellingham: SPIE Press, 1993.
- [6] 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.
- [7] Ni Zhibo, Huang Honghua, Huang Yinbo, et al. Atmospheric turbulence profile measurement techniques based on scintillation method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(1): 160–165. (in Chinese)
- 倪志波, 黄宏华, 黄印博, 等. 基于闪烁法的大气湍流廓线技术[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(1): 160–165.
- [8] Bufton J L, Minott P O, Fitzmaurice M W, et al. Measurements of turbulence profiles in the troposphere [J]. *J Opt Soc Am*, 1972, 62(9): 1068–1070.
- [9] Rocca A, Roddier F, Vernin J. Detection of atmospheric turbulent layers by spatiotemporal and spatioangular correlation measurements of stellar–light scintillation [J]. *J Opt Soc Am*, 1974, 64(7): 1000–1004.
- [10] Avila R, Vernin J, Masciadri E. Whole atmospheric – turbulence profiling with generalized scidar [J]. *Appl Opt*, 1997, 36(30): 7898–7905.
- [11] Wilson R W. SLODAR: measuring optical turbulence altitude with a Shack–Hartmann wavefront sensor [J]. *Mon Not R Astron Soc*, 2002, 337(1): 103–108.
- [12] Tokovinin A. Measurement of seeing and the atmospheric time constant by differential scintillations [J]. *Appl Opt*, 2002, 41(6): 957–964.
- [13] Caccia J L, Azouit M, Vernin J L. Wind and C_n^2 profiling by single–star scintillation analysis [J]. *Appl Opt*, 1987, 26(7): 1288–1294.
- [14] Gimmestad G G, Roberts D W, Stewart J M, et al. Development of a lidar technique for profiling optical turbulence [J]. *Opt Eng*, 2012, 51(10): 101713.
- [15] Dewan E M, Good R E, Beland R R, et al. A model for (optical turbulence) profiles using radiosonde data [R]. PL–TR–93–2043, 1993.
- [16] Ruggiero F H, Debenedictis D A. Forecasting optical turbulence from mesoscale numerical weather prediction models [C]//Preprints, DoDHPCMP Users Group Conference, 2000.
- [17] Coulman C, Vernin J, Coqueugniot Y, et al. Outer scale of turbulence appropriate to modeling refractive–index structure profiles [J]. *Appl Opt*, 1988, 27(1): 155–160.