

大气光学湍流模式研究——方法和进展*

吴晓庆^{1)2)3)†} 杨期科¹⁾²⁾³⁾ 黄宏华¹⁾²⁾³⁾ 青春¹⁾²⁾³⁾胡晓丹¹⁾²⁾³⁾ 王英俭¹⁾²⁾³⁾

1) (中国科学院合肥物质科学研究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, 合肥 230031)

2) (先进激光技术安徽省实验室, 合肥 230037)

3) (中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 合肥 230026)

(2022 年 10 月 17 日收到; 2022 年 11 月 25 日收到修改稿)

分层是大气湍流特别是高空湍流显著特征. 在某一固定高度真实光学湍流 C_n^2 值在平均值上有 1—2 个量级甚至更大的起伏. 以观测数据建立的湍流廓线模式, 是一个统计平均的结果. 既不能代表某次实际大气湍流廓线的分层特征, 也没有预报功能, 不能完全满足光学工程需求. 受限于计算机的容量和速度, 无法通过 DNS (direct numerical simulation) 以及 LES (large eddy simulation) 求解 Navier-Stokes 方程来预报光学湍流, 解决方案是通过中尺度天气数值预报模式 MM5/WRF, 预报出常规气象参数, 再由湍流参数化方案计算出 C_n^2 . 本文介绍了近地面层、边界层和自由大气层 C_n^2 预报方法和研究成果, 从湍流动能预报方程和温度脉动方差预报方程详细推导出 Tatarski 公式, 归纳出该公式所隐含的物理意义和适用条件. 重点介绍了神经网络预报 C_n^2 和 C_n^2 估算和预报方法在南极天文选址的最新研究进展. 分析了以实验数据拟合的经验模式、建立在 Kolmogorov 湍流理论基础之上含有常规气象参数的参数模式、与中尺度气象模式有关的预报模式、基于数据驱动的神经网络方法等不同模式的特点和差异. 强调 Kolmogorov 湍流理论是现有大气光学湍流参数模式的理论基础.

关键词: 大气光学湍流, 湍流模式, Tatarski 公式, 神经网络预报 C_n^2 , 南极天文选址

PACS: 92.60.hk, 47.27.E-, 07.05.Mh, 95.45.+i

DOI: 10.7498/aps.72.20221986

1 引言

大气折射率结构常数 C_n^2 是描述光电系统受大气湍流影响的重要参数. 知道了 C_n^2 就可以计算出光束在大气中传播时发生的相位起伏, 光强闪烁等一系列湍流效应. 分层是大气湍流特别是高空湍流显著特征. 在某一固定高度真实光学湍流 C_n^2 值在平均值上有 1—2 个量级甚至更大的起伏. 以观测数据建立的湍流廓线模式^[1], 如 Hufnagel 模式、SLC 模式、AFGL AMOS 模式、CLEAR I 模式,

以及冬季兴隆^[2]、大气光学湍流模式研究- C_n^2 廓线模式^[3]中的高美古、拉萨、大柴旦、茂名、荣成等 C_n^2 廓线公式, 基本上代表的是一个统计平均的结果. 既不能代表某次实际大气湍流廓线的分层特征, 也没有预报功能, 不能完全满足光学工程需求. 由于大气光学湍流具有从毫米尺度至百米尺度旋涡的很大带宽, Reynolds 数可大到 10^8 量级. 受限于计算机的容量和速度, 通过 DNS (direct numerical simulation) 以及 LES (large eddy simulation) 求解 Navier-Stokes 方程, 来解决大气光学湍流问题不太现实. 可行的方法是通过中尺度天气数值

* 国家自然科学基金 (批准号: 91752103, 41576185) 和中国科学院战略性先导科技专项 (A 类) (批准号: CXJJ-19S028) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xqw@aiofm.ac.cn

模式 MM5/WRF, 预报出常规气象参数, 再由湍流参数化方案计算出 C_n^2 [4,5]. Coulman 等 [6] 最早提出有可能从气象参数预报大气光学湍流. Masciadri 等 [7] 采用流体非静力假设的中尺度模式 Meso-Nh, 由 ECMWF (European Center for Medium Weather Forecast) 提供的数据作为初始场, 从湍流动能收支方程出发, 得到湍流动能耗散率 ε 、温度方差耗散率 ε_θ 和混合长度 L , 预报出 C_n^2 . Lascaux 等 [8] 将中尺度模式估算和预报光学湍流廓线和视宁度方法用于南极天文选址. 亦已证实, 最强的光学湍流出现在只占边界层 10% 的最下面的大气层-近地面层. 其 C_n^2 与温度梯度、风剪切、粗糙度、显热通量等气象参量密切相关, 这些气象参量与作为驱动力的太阳辐射彼此存在紧密的联系. Monin-Obukhov 相似理论是建立近地面层湍流模式的基石. 经过 Wyngaard 等 [9], Andreas [10], Davidson 等 [11], Rachele 与 Tunick [12] 和 Tunick [13] 的工作建立了较为成熟的近地面层 C_n^2 估算算法.

本文介绍了热对流主导的近地面层、边界层 C_n^2 和风剪切主导的自由大气层 C_n^2 参数化方法和研究成果. 从湍流动能预报方程和温度脉动方差预报方程推导出 Tatarski 公式, 归纳出该公式所隐含的物理意义和适用条件. 重点介绍了神经网络预报 C_n^2 和湍流参数化方法应用到南极天文选址的最新研究进展. 分析了经验模式、参数模式、预报模式和神经网络方法等不同湍流模式的特点和差异, 强调 Kolmogorov 湍流理论是现有大气光学湍流参数模式的理论基础.

2 近地面层湍流模式

2.1 相似理论的近地面层 C_n^2 估算

约占大气边界层 10% 的近地面层高度在 10^0 至 10^2 m, 其湍流通量随高度的变化很小. Monin-Obukhov 相似理论反映的是近地面层显热、动量等湍流通量与气温、风速廓线的关联. 无量纲化的物理量与其特征量之比可以表示成稳定度参数 ($\zeta = z/L$) 的函数, L 为 Obukhov 长度.

C_n^2 与温度、湿度以及温湿相关项的结构常数之间的关系为 [14]

$$C_n^2 = A^2 C_T^2 + 2ABC_{Tq} + B^2 C_q^2. \quad (1)$$

根据相似理论, 各结构常数与高度以及各特征

尺度 (u_* , t_* , q_*) 的组合可表示成 ζ 的无量纲相似性函数 (f_T , f_q , f_{Tq}).

$$C_T^2 = t_*^2 z^{-2/3} f_T(\zeta), \quad (2a)$$

$$C_q^2 = q_*^2 z^{-2/3} f_q(\zeta), \quad (2b)$$

$$C_{Tq} = r_{Tq} t_* q_* z^{-2/3} f_{Tq}(\zeta). \quad (2c)$$

在可见光和近红外波段, (1) 式中, 波长取 $0.55 \mu\text{m}$, $A = 79.0 \times 10^{-6} \frac{P}{T^2}$, $B = -56.4 \times 10^{-6}$ [10]. 温湿度相关系数 $r_{Tq} = C_{Tq} / \sqrt{C_T^2 C_q^2}$, 其值取 0.6—1 之间.

无量纲结构常数的相似性函数 $f(\zeta)$ 由实验确定. 最具代表性的是 Wyngaard 相似性函数 [15],

$$f(\zeta) = \begin{cases} 4.9[1 - 7(\zeta)]^{-2/3}, & \zeta < 0, \\ 4.9[1 + 2.4(\zeta)^{2/3}], & \zeta > 0. \end{cases} \quad (3)$$

上述公式中的特征尺度 u_* , t_* , q_* , 以及 Obukhov 长度 L 可由两层常规气象参数得到:

$$u_* = \frac{k\Delta u}{\Psi_u \Delta \ln z}, \quad (4a)$$

$$t_* = \frac{k\Delta T}{\Psi_H \Delta \ln z}, \quad (4b)$$

$$q_* = \frac{k\Delta q}{\Psi_q \Delta \ln z}, \quad (4c)$$

$$L = \frac{T(1 + 0.61q)(\Delta V)^2 \Psi_H}{\Delta \ln \times g[\Delta T + 0.61T\Delta q] \Psi_u^2}. \quad (4d)$$

通常情况认为 $f_T(\zeta) = f_{Tq}(\zeta) = f_q(\zeta)$, (2) 式、(4) 式代入 (1) 式:

$$C_n^2 = \frac{f_T(\zeta) k^2 (A^2 (\Delta T)^2 + 2ABr_{Tq} \Delta T \Delta q + B^2 (\Delta q)^2)}{z^{2/3} [\ln(z_2/z_1) - \Psi_T(\zeta)]}, \quad (5)$$

其中 $\Delta u = u(z_2) - u(z_1)$, $\Delta T = T(z_2) - T(z_1)$, $\Delta q = q(z_2) - q(z_1)$. Ψ_u , Ψ_H , Ψ_q 分别是无量纲积分函数, 由实验确定. 这样由两个高度层上的风速、温度、绝对湿度的平均值就可以计算出 C_n^2 , 简称梯度法. 若将两个高度中的一个确定为地面或海面计算出 C_n^2 的方法称为整体法, 亦称 Bulk 法.

由相似理论导出的边界层湍流与高度的依赖关系为: 大气层结不稳定时 (如白天), C_n^2 随高度按 $-4/3$ 指数递减; 大气层结处于中性时 (如日出后或日落前 1 小时附近), C_n^2 随高度按 $-2/3$ 指数递减; 大气层结稳定时 (如夜晚), C_n^2 随高度也按 $-2/3$ 指

数递减. Kaimal 等^[16] 根据实测数据拟合出一个对流边界层 $C_n^2(h)$ 廓线模式, 模式参数为对流层顶高度 h_i 和湍流通量. Waters 和 Kunkel^[17] 对 Kaimal 模式进行改进, 通过参考高度 h_0 上的 $C_n^2(h_0)$ 和 h_i 方便的估算出对流边界层的 $C_n^2(h)$.

$$C_n^2(h)/C_n^2(h_0) = \begin{cases} (h/h_0)^{-4/3}, & h_0, h \leq 0.5h_i, \\ (0.5h_i/h_0), & 0.5h_i \leq h \leq 0.7h_i, \\ 2.9(0.5h_i/h_0)^{-4/3}(h/h_i)^3, & 0.7h_i \leq h \leq h_i. \end{cases} \quad (6)$$

在此基础上 Kukharets 和 Tsvang^[18] 以及 Murph y 等^[19] 又对 (6) 式进行了修改, 使之能用近地面层任何参考高度上的 $C_n^2(h_0)$ 估算对流边界层湍流 $C_n^2(h)$.

$$p = \begin{cases} -0.11(12 - TH)^2 + 1.83(12 - TH) - 6.22, & 0.75 < TH < 3.5, \\ 1.45 - 0.02(TH - 6)^2, & 3.5 < TH < 8.5, \\ -0.048TH^2 + 0.68TH - 1.06, & 8.5 < TH < 11.25, \end{cases} \quad (9)$$

$$TH = \frac{\text{time} - \text{sunrise}}{TP}, \quad TP = \frac{\text{sunset} - \text{sunrise}}{12}. \quad (10)$$

HAP 模式是否符合白天大气边界层的 C_n^2 随高度变化规律, 是否具有普适性, 还需要通过实验检验. 至今为止, 还没有类似 Kaimal 系列模式那样方便计算中性或稳定层结的边界层湍流, 众多实验也不支持相似理论预测的 $-2/3$ 指数递减.

我们在国内较早基于 Monin-Obukhov 相似理论, 通过测量两高度层上的风速、温度、绝对湿度差值, 实现了用常规气象参数估算近地面 C_n^2 的两种方法^[22]; 将相似理论首次运用到估算大气基本处于稳定层结的南极近地面层的 C_n^2 也相当成功^[23]; 提出了采用不同的无量纲结构常数的相似性函数 $f(\zeta)$ 对 C_n^2 估算精度影响的方法^[23,24].

从图 1 可看出, 如果两层高度、气温、风速相对误差分别为 5%, 20%, 20%, 在大气稳定条件下, 三种相似性函数估算 C_n^2 的不确定度相当, 在 30% 左右. 在大气不稳定条件下, 选用 Wyngaard 函数估算 C_n^2 的不确定度约 47%, Btaille 函数为 72%, Thiermann 函数不确定度为 20%.

$$C_n^2(h)/C_n^2(h_0) = \frac{0.046(h/h_i)^{-4/3} + 0.6 \exp(-12((h/h_i) - 1.1)^2)}{0.046(h_0/h_i)^{-4/3}}. \quad (7)$$

Kaimal 系列模式反映了对流大气边界层 $C_n^2(h)$ 随高度变化按相似理论预测的以 $-4/3$ 指数递减. 与 Kaimal 系列模式不同的是 Andrews 等^[20,21] 最近提出的 HAP(Hufnagel/Andrews/Phillips) 模式. HAP 模式中边界层 $C_n^2(h)$ 随高度变化的指数 p 依赖白天时间 (time) 和日出 (sunrise)、日落 (sunset) 的当地时间. HAP 模式中的边界层湍流为

$$C_n^2(h) = C_n^2(h_0)(h_0/h)^p. \quad (8)$$

h_0 是测量仪器离地面高度或参考高度, h 是离地面 1 km 范围内的高度.

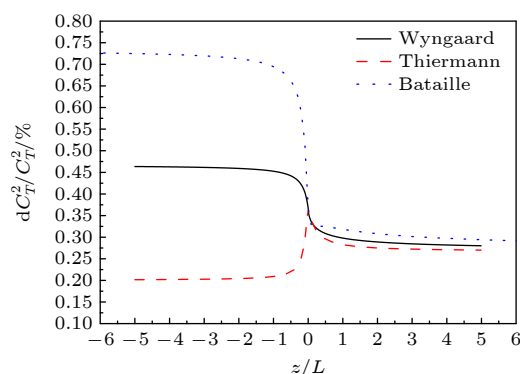


图 1 不同大气稳定度下模式估算不确定度

Fig. 1. The uncertainty of C_n^2 estimated by model under different stability parameter.

2.2 一维大气边界层模式的近地面层 C_n^2 估算和预报

由 (1) 式、(2) 式和 (4) 式可知, 从实测两层温度、湿度、风速值, 得到特征参数 u_* , t_* , q_* , 可计算出近地面层某高度 C_n^2 . 特征参数也可以从一维大气边界层模式中的湍流通量得到. 其基本思路是: 通过地表能量平衡方程、土壤热传导方程、近地面层湍流通量参数化方程, 得到地表面温度, 和近地面层动量通量、显热通量和潜热通量, 进而得到特征参数 u_* , t_* , q_* 和 Obukhov 长度 L , 再由

(1) 式得到 C_n^2 . 然后继续计算出边界层高度、湍流交换系数和边界层湍流通量, 代入大气边界层风速、位温、绝对湿度的控制方程, 进行下一时刻预报. 这样依靠一维大气边界层模式就建立了近地面层光学湍流的预报模式. 模式初始输入的基本参数是: 日期、预报的开始时间和结束时间、经纬度、时区、土壤及地表植被特性 (包括地表反照率、土壤类型、土壤含水量、地温、粗糙度等)、以及温、湿、压、风速、风向廓线和云量等.

Burk 较早使用一维边界层数值模式估算 C_n^2 [25]. 在国内我们率先采用一维边界层气象模式 [26] 进行了近地面层光学湍流 C_n^2 预报研究. 一次输入相关参数, 可得到 24 h 内温度、湿度、风场、 C_n^2 等物理量. 模式与实测 C_n^2 进行了比较, 能准确反映近地面层 C_n^2 日变化规律. 对 C_n^2 有显著影响的参数是: 不同季节、土壤的热容量和含水量、不同的下垫面以及云量等. 图 2 是一维边界层模式估算的合肥地区近地面层 C_n^2 随季节的日变化.

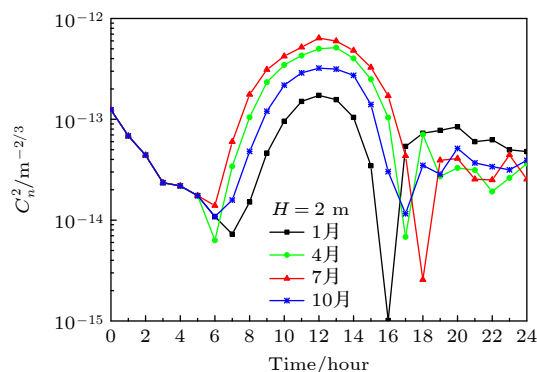


图 2 一维边界层模式估算的合肥地区近地面层 C_n^2 随季节的日变化

Fig. 2. Seasonal and diurnal variation of C_n^2 at surface layer in Hefei area estimated by one-dimensional boundary layer model.

2.3 中尺度气象模式的近地面层 C_n^2 估算和预报

一维大气边界层模式只考虑了地气间几个相互耦合的物理过程. 包括太阳长、短波辐射的净辐

射能量在近地面层加热空气的感热输送、气相变化的潜热输送、以及加热土壤层或植被冠层等之间的能量分配; 近地面层湍流通量输送过程的 Monin-Obukhov 相似理论参数化; 大气边界层风速、位温、绝对湿度的控制方程等. 与中尺度气象模式相比, 一维大气边界层模式只是中尺度气象模式的一部分. 采用中尺度气象模式预报近地面层 C_n^2 , 在初始场数据的获取、多尺度大气运动的多重嵌套网格模拟、大气边界层参数化方案的选择、常规气象参数模拟精度等方面更具有优势. 将使我们现在依赖于传统测量技术对光学湍流时间和空间分布的认知, 从较小区域拓展到较大区域乃至全球范围, 这是传统测量方法和边界层模式难以实现的. 中尺度气象模式最具代表性的是 Meso-Nh, MM5, WRF 和 Polar WRF 等模式. 这些中尺度模式源代码开放, 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. 图 3 是运行中尺度气象模式预报出常规气象参数, 再由湍流参数化方案计算出 C_n^2 的流程.

Cheinet 和 Beljaars [27] 采用欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 综合预报系统 (integrated forecast system, IFS), 预报出 $1^\circ \times 1^\circ$ 经纬度网格上的常规气象参数, 结合相似理论再计算出 C_n^2 , 预报的结果能够反映近地面 C_n^2 的日变化、季节变化以及区域特征. 方法与 Cheinet 类似, 有点差别是我们采用中尺度气象模式 MM5 [28]/WRF [29] 先预报出数公里尺度的常规气象参数, 再通过相似理论后处理, 预报出近地面光学湍流 C_n^2 .

2.4 人工神经网络法估算近地面 C_n^2

人工神经网络主要由神经元、层和网络组成. 神经元之间以输入层、隐藏层、输出层, 通过权重相互连接, 构成神经网络. 例如 BP (back propagation) 算法 [30] 又称为误差后向传播算法, 是在单层神经网络基础上发展的, 根据输入模型中的映射关系利用反向传播算法调整权值和阈值, 从而构造出多层



图 3 中尺度气象模式预报 C_n^2 流程图

Fig. 3. Flow chart of Forecasting C_n^2 With mesoscale numerical model.

网络. 其算法流程为: 使用初始设定的权重分布和阈值; 根据 (11) 式前向传播计算隐藏的输入和输出层神经元; 根据 (12) 式后向传播更新权重和阈值; 根据样本进行不断地学习, 逐层递归地计算实际输出值与期望值之间的偏差并返回给输入层, 对网络的权重和偏差进行反复的调整训练, 直至达到预先设定的学习训练次数, 或输出值符合预先设定的误差时停止训练.

$$x_j^l = \sum_k w_{kj}^l y_k^{l-1} + b_j^l, \quad (11)$$

$$w_{ij}^{l+1} = w_{ij}^l - \eta \delta_j^l y_i^{l-1}, \quad (1 \leq l \leq L),$$

$$b_j^{l+1} = b_j^l - \eta \delta_j^l, \quad (1 \leq l \leq L). \quad (12)$$

上式中第一层是输入层, 最后一层是输出层 L , 中间是隐含层. w_{ij}^l 代表连接第 l 层的第 i 个神经元和第 $l-1$ 层的第 j 个神经元的权重值. b_j^l 是偏差, 根据前向传播进行修正. $\delta_i^l = \frac{\partial E}{\partial x_i^l}$ 表示第 l 层第 j 个神经元上的误差. $y_i^l = f(x_i^l)$ 是激活函数, η 是学习率.

Wang 和 Basu^[31] 于 2016 年提出一种基于数据驱动的人工神经网络模型, 以五个常规的气象参数 (气温、相对湿度、气压、温度梯度和风切变) 作为输入, 使用了广泛流行的 Levenberg-Marquardt 后向传播算法作为训练函数, 成功预报了夏威夷 Mauna Ke 天文台附近近地面的 C_n^2 .

苏昶东^[32] 结合自适应遗传算法 AGA (adaptive genetic algorithm) 和 BP 算法各自的优点, 构造了 AGA-BP 混合算法 (图 4), 并应用相似理论的梯度法、Polar WRF 和 AGA-BP 人工神经网络法等三种方法对南极泰山站近地面湍流 C_n^2 进行估算^[33].

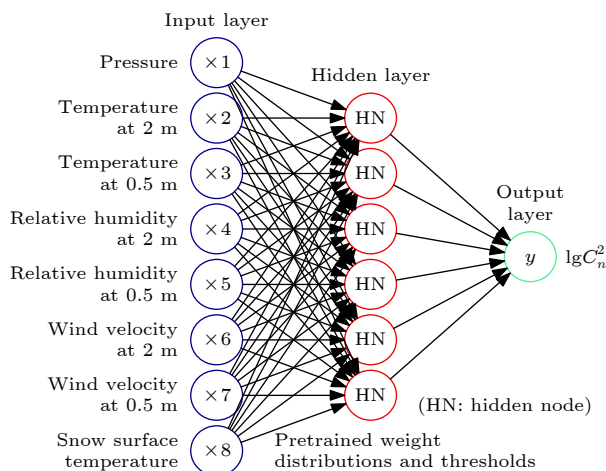


图 4 AGA-BP 神经网络结构

Fig. 4. AGA-BP neural network architecture.

比对所用的测量数据是 2013 年 12 月 30 日至 2014 年 2 月 10 日在南极泰山站测量的两层气温、相对湿度、风速, 以及气压、地表面辐射温度、大气光学湍流强度 C_n^2 等多种大气参数^[34], 图 5 是选取了其中的 1 月 29 日至 31 日 3 天的实测数据与三种方法估算 C_n^2 的比对结果.

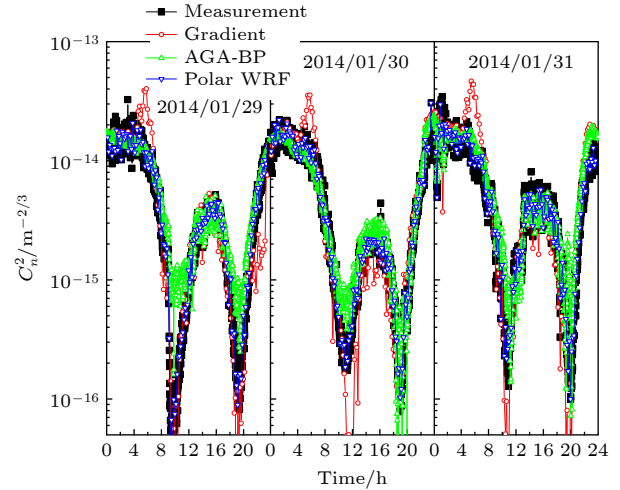


图 5 三种方法 C_n^2 估算值与实测值的比对结果

Fig. 5. Comparison results of estimated and measured C_n^2 of three methods.

采用均方根误差 (RMSE) 和相关系数 (R_{xy}) 对三种 C_n^2 方法的估算结果进行评估. C_n^2 的估算值和观测值先取对数 ($\lg C_n^2$), 分别用 x_i 和 y_i 表示, 各统计量的计算表达式如下:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2 / n}, \quad (13a)$$

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)(y_i - \bar{y}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2}}. \quad (13b)$$

表 1 是三种 C_n^2 估算方法的比对结果. 梯度法、AGA-BP 混合神经网络估算法、Polar WRF 法估算的 $\lg(C_n^2)$ 与实测的 $\lg(C_n^2)$ 比对, 其 RMSE 分别为 0.41, 0.29 和 0.40; R_{xy} 分别为 0.61, 0.90 和 0.67. 从表 1 对比结果看, 神经网络法估算的 C_n^2 与实测值符合的更好.

表 1 三种 C_n^2 估算方法的比对结果

Table 1. Comparison results of C_n^2 by three estimation methods.

	Gradient	AGA-BP	Polar WRF
RMSE	0.41	0.29	0.40
R_{xy}	0.61	0.90	0.67

3 C_n^2 廓线估算和预报

3.1 Tatarski 方法

Tatarski 将风速场的 Kolmogorov 湍流理论推广到温度场和折射率场这些与波传播密切相关的标量场. 从量纲分析, 这些标量场在惯性子区的二阶结构函数遵从三分之二定律, 且仅与两个参量平均动能耗散率 ε (因粘滞导致湍流动能转化成热能的耗散) 和标量脉动耗散率 ε_N (因分子扩散而平滑标量不均匀性的耗散) 有关. 如温度结构函数 $D_T(r)$ 为^[35]

$$D_T(r) = C_T^2 r^{2/3} = a^2 \frac{\varepsilon_T}{\varepsilon^{1/3}} r^{2/3}, \quad (14)$$

$$C_T^2 = a^2 \frac{\varepsilon_T}{\varepsilon^{1/3}}, \quad (15)$$

式中, a^2 为常数; ε 为湍流动能耗散率; ε_T 为温度脉动耗散率. Tatarski 提出了 C_n^2 廓线估算公式, 该公式的形式为

$$C_n^2 = 2.8 L_0^{4/3} M^2. \quad (16)$$

Dewan^[36] 通过量纲分析的方法较详细给出了这一公式的推导过程. 与 Dewan 推导过程不同的是, 本文从湍流动能预报方程和温度脉动方差预报方程, 经过假定简化计算出 ε 和 ε_T 代入 (15) 式, 推导出 Tatarski 公式. 目的是了解该公式所隐含的物理意义和适用条件.

不考虑对流项, 仅考虑垂直方向湍流量, 三维湍流动能 E 的预报方程简化成一维方程为^[37]

$$\frac{dE}{dt} = -\overline{u'w'} \frac{\partial \bar{U}}{\partial z} - \overline{v'w'} \frac{\partial \bar{V}}{\partial z} + K_b \nabla^4 E + \beta \overline{\theta'w'} - \varepsilon. \quad (17)$$

上式等式右边第一和第二项是 E 的剪切产生项, 第三项代表 E 的扩散项, 第四项代表 E 的浮力项 (β 为浮力系数), 最后一项代表粘性耗散项. $\overline{u'w'}$ 和 $\overline{v'w'}$ 是动量通量, $\overline{\theta'w'}$ 是显热通量, K_b 是四阶扩散项系数^[38]. 采用 K 理论, 即湍流量是湍流输运系数与平均物理量梯度的乘积.

$$\overline{u'w'} = -K_m \frac{\partial \bar{U}}{\partial z}, \quad (18a)$$

$$\overline{v'w'} = -K_m \frac{\partial \bar{V}}{\partial z}. \quad (18b)$$

(18) 式代入 (17) 式, 在湍流平稳和均匀的假定下, 忽略扩散项和浮力项对 E 的贡献. E 的剪切产生项等于黏性耗散项.

$$\varepsilon = K_m \left[\left(\frac{\partial \bar{U}}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{V}}{\partial z} \right)^2 \right]. \quad (19)$$

K_m 涡旋黏滞系数, $\bar{U}$ 和 $\bar{V}$ 为径向和横向平均风速. 温度脉动方差预报方程为

$$\frac{\partial \overline{T'^2}}{\partial t} = -\frac{\partial \overline{w'T'^2}}{\partial z} - \overline{w'T'} \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} - \varepsilon_T - \varepsilon_R. \quad (20)$$

这里 ε_T 是温度脉动耗散率, ε_R 是辐射耗散率. 忽略三阶项 $\overline{w'T'^2}$ 和辐射耗散的贡献, 在湍流平稳的假定下, 方程 (20) 简化为

$$\varepsilon_T = -\overline{w'T'} \frac{\partial \bar{T}}{\partial z}. \quad (21)$$

根据 K 理论, $\overline{w'T'} = -K_T \frac{\partial \bar{T}}{\partial z}$, (21) 式为:

$$\varepsilon_T = K_T \left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial z} \right)^2. \quad (22)$$

K_T 为涡旋扩散系数. 将 (19) 式、(22) 式代入 (15) 式, 令 $\alpha = K_T/K_m$, K_m 的量纲为 $[m^2 \cdot s^{-1}]$, 按 Prandtl 混合长理论, K_m 近似看成湍流的混合长尺度 L_0 与湍流的风速尺度 V_0 乘积, $K_m \approx L_0 V_0$, V_0 又可写成 L_0 与平均风速梯度 $S = \sqrt{\left(\frac{\partial \bar{U}}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{V}}{\partial z} \right)^2}$ 的乘积, $V_0 = L_0 \cdot S$. (15) 式可写成:

$$C_T^2 = \alpha a^2 L_0^{4/3} \left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial z} \right)^2, \quad (23)$$

$$L_0 = \sqrt{\frac{K_m}{S}}. \quad (24)$$

根据 C_n^2 和 C_T^2 的关系, 就得到 (16) 式. (16) 式中的 M 表示为

$$M^2 = \left[\left(\frac{79 \times 10^{-6} \bar{P}}{\bar{T}^2} \right) \left(\frac{d\bar{T}}{dz} + \gamma_a \right) \right]^2. \quad (25)$$

这里, $\bar{T}$ 单位是绝对温度 (K), $\bar{P}$ 是气压 (hPa), γ_a 是干空气绝热递减率 ($9.8 \times 10^{-3} K \cdot m^{-1}$), z 是高度 (m), 系数 αa^2 通常取 2.8. (16) 式中, 外尺度与混合长尺度视为同一个量 L_0 . 除 L_0 外, 其它量都可以从标准气象探空数据或中尺度气象模式产品中得到. 在实验数据的基础上将 $L_0^{4/3}$ 作为高度 h 、或者风切变和温度梯度的函数, 产生了 Coulman, Dewan 和 HMNSP99 等外尺度模式.

与平均风速梯度 S 有关的 Dewan^[39] 外尺度公式为

$$L_0^{4/3} = 0.1^{4/3} \times 10^{(1.64+42.0S)}, \text{ 对流层}, \quad (26a)$$

$$L_0^{4/3} = 0.1^{4/3} \times 10^{(0.506+50.0S)}, \text{平流层.} \quad (26b)$$

与 Dewan 类似的 HMNSP99 外尺度参数化公式^[40]增加了温度梯度.

$$L_0^{4/3} = 0.1^{4/3} \times 10^{\left(0.362+16.728S-192.347\frac{\partial T}{\partial z}\right)}, \text{对流层,} \quad (27a)$$

$$L_0^{4/3} = 0.1^{4/3} \times 10^{\left(0.757+13.819S-57.784\frac{\partial T}{\partial z}\right)}, \text{平流层.} \quad (27b)$$

Coulman 外尺度经验公式为^[41]

$$L_0(z) = \frac{4}{1 + \left(\frac{z-8500}{2500}\right)^2}. \quad (28)$$

从 Tatarski 公式推导过程, 不难发现该公式成立需要满足三个条件. 第一, 湍流平稳, 即湍流的剪切产生项与耗散项平衡. 第二, 湍流均匀, 亦就是湍流的扩散项对上述动态平衡影响很小. 第三, 外尺度与湍流涡旋粘滞系数和平均风速场梯度有关. Tatarski 公式只能用于高空湍流主要是由于风剪切产生的情况, 因此不适宜用于热对流占主导的近地面层的湍流估算和预报.

3.2 Thorpe 尺度法

用薄饼 (pancakes) 来形象比喻低平流层的湍流层垂直方向数十米厚, 水平方向有数百公里的这一特征. 在海洋中也发现类似的湍流层结构. 其共同点是在整体稳定的位温廓线背景下, 因剪切不稳定造成局部位温的翻转. 海洋研究中的 Thorpe 尺度首先被 Basu^[42] 用来作为外尺度由 Tatarski 公式估算 C_n^2 廓线.

该方法引入了一个 Thorpe 尺度参量 L_T , Thorpe 尺度 L_T 与外尺度 L_0 之间具有线性关系, 即:

$$L_0 = cL_T, \quad (29)$$

式中, c 是待定系数. 代入 (23) 式为

$$C_T^2 = c_1 L_T^{4/3} \left(\frac{\partial \theta_s}{\partial z}\right)^2. \quad (30)$$

Thorpe 尺度 L_T 的计算过程如下:

1) 将探空测量的气温廓线, 转换成位温廓线 θ , 每一个位温值与相应的高度值对应, $\{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n\}$ 对应 $\{h_1, h_2, \dots, h_n\}$;

2) 将位温进行冒泡升序排列, 排序后的位温

序列对应相应的高度廓线, $\{\theta_{s1}, \theta_{s2}, \dots, \theta_{sn}\}$ 对应 $\{h_{s1}, h_{s2}, \dots, h_{sn}\}$;

3) 将排序前、后高度相减, 得到位移量 $\Delta h_i = h_i - h_{si}$ 的均方根或 Δh_i 的绝对值作为 Thorpe 尺度 L_T .

Basu 根据 2002 年在夏威夷 Mauna Kea 天文台获得的 12 m 空间分辨率的气象探空数据, 利用该外尺度模式并结合 Tatarski 高空湍流模式估算得到了 C_n^2 廓线. 胡晓丹等^[43] 利用 Thorpe 尺度估算了 2012 年南极点冬季和夏季 C_n^2 廓线. 并用 Thorpe 尺度估算了新疆库尔勒、广东茂名海边、西藏拉萨三个地区的 C_n^2 廓线^[44]. 吴骥首次将海洋中的 Ellison 尺度应用于大气 C_n^2 廓线估算, 并提出混合尺度模型 (WSPT) 估算 C_n^2 廓线^[45,46].

3.3 Masciadri 的中尺度天气预报数值模式预报 C_n^2 廓线

Masciadri 等^[7] 使用 (15) 式 C_T^2 的参数化公式, 再由中尺度天气预报模式 Meso-Nh 中的湍流动能预报方程和位温脉动方差预报方程, 经过假定简化计算出 ε 和 ε_θ , 得到 C_T^2 , 进而计算出 C_n^2 . 与 3.1 节不同的是, Masciadri 用位温替换气温, 而且直接给出湍流动能耗散率 ε 与湍流动能 E 的关系为

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

L 称为 Bougeault-Lacarrere 混合长度, 在非常平稳的大气层, L 近似等于 Deardoff 长度.

$$L = \sqrt{\frac{2E}{g/\theta \cdot \partial \theta / \partial z}}. \quad (32)$$

为使方程 (21) 闭合, 采用 K 理论, 其涡旋扩散系数 K_T 与湍流动能 E 关系为

$$K_T = 0.16L\sqrt{E}\varphi_3. \quad (33)$$

φ_3 为比例系数. 最后得到与 (23) 式类似的公式为

$$C_T^2 = 0.58\varphi_3 L^{4/3} \left(\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z}\right)^2. \quad (34)$$

我们以 Tatarski 公式为基础在国内较早开展了中尺度 MM5 模式预报 C_n^2 廓线的初步研究^[28], 在此基础上进行了 WRF 模式预报光学湍流的进一步研究^[47-49].

3.4 退火-后向 (SA-BP) 混合神经网络预报 C_n^2 廓线

Wang 和 Basu^[31] 利用人工神经网络首次对近地面 C_n^2 进行了估算和预报. 人工神经网络的 C_n^2 廓线估算和预报还未见报道. 苏昶东等^[50] 提出退火-后向 (simulating annealing-back propagation, SA-BP) 混合神经网络算法预报 C_n^2 廓线. SA-BP 神经网络架构如图 6 所示, 包括输入层、隐含层以及输出层等三个互连节点. 输入层有六个常规气象参数变量, 输出层有一个节点. 其中隐含层节点的计算公式为

$$L_k \leq \sqrt{I \cdot (O + 3)} + 1, \quad (35)$$

式中, I , O 分别表示输入和输出层的节点数; L_k 是隐含层神经元的最大个数. 按 (35) 式计算隐藏层有五个节点. 图 6 中线条代表在网络学习过程中优化的权重和非线性传递函数. SA-BP 混合神经网络结合了 BP 神经网络和 SA 算法, BP 模型输入的初始权重分布和阈值是 SA 算法的优化结果 (见图 7). 模拟退火算法, 是一种全局搜索算法, 会跳出局部极值找到最小值. 整个模型基于数据驱

动, 具有很强的鲁棒性和通用性. 在大柴旦实测的 23 条 C_n^2 廓线中, 选取 17 条廓线为训练数据, 剩余的 6 条廓线用来评估验证 SA-BP 模型预测的 C_n^2 . 采用 (13) 式 RMSE 和 R_{xy} 作为评估量化指标, 并与 HMNSP99 外尺度参数化公式的 Tatarski 方法估算的 C_n^2 廓线进行比较. 表 2 是 6 条实测 C_n^2 廓线与 SA-BP 预测和 HMNSP99 估算的 C_n^2 廓线定量比对, SA-BP 预测的 C_n^2 廓线比 HMNSP99 估算的 C_n^2 廓线更接近测量值.

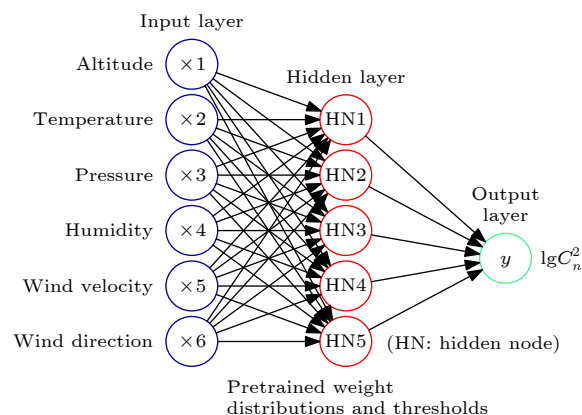


图 6 SA-BP 神经网络的结构图

Fig. 6. SA-BP neural network architecture.

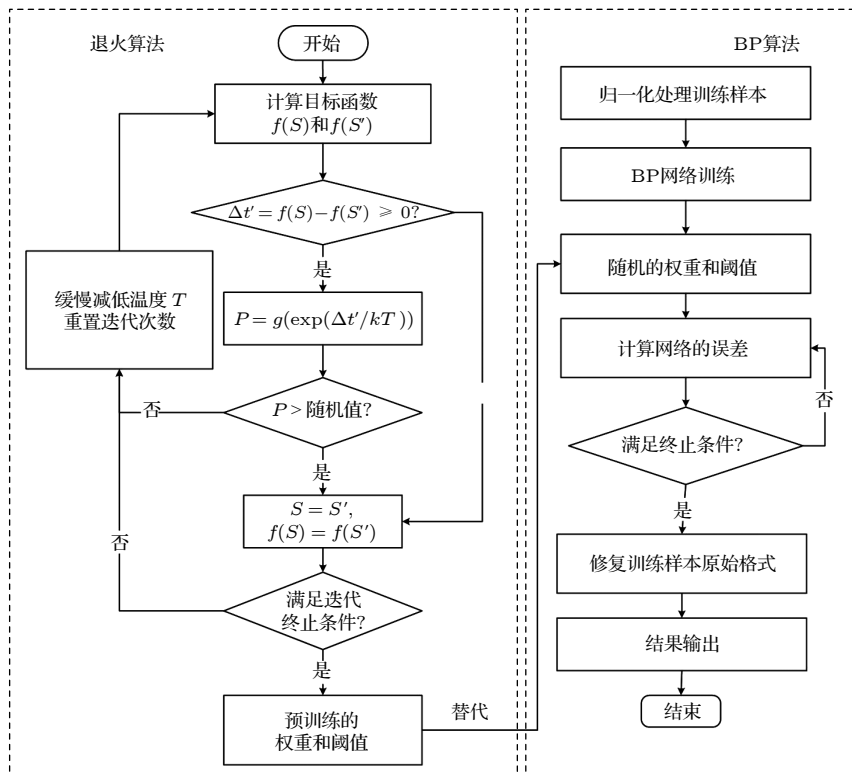


图 7 SA-BP 神经网络算法流程图

Fig. 7. Block diagram of the SA-BP neural network.

4 南极天文选址研究进展

选择最好的天文台址放置大口径望远镜一直是天文学家追求的目标. 实验表明南极大气湍流主要集中在几十至几百米的边界层内, 自由大气层湍流很弱^[51–55], 无疑成为下一代大型光学/红外天文望远镜在地球上寻找地基站址的理想场所, 已日益成为科研强国争夺南极天文研究的主战场.

近几年在国家自然科学基金和中国极地研究中心合作项目支持下, 开展了南极天文选址研究. 提出一种超声风速计实时测量光学湍流强度的新方法^[56], 首次实现了南极泰山站、昆仑站近地面大气光学湍流直接测量; 开展了包括梯度法、神经网络法、WRF 和 Polar WRF 等多种方法对南极泰山站近地面大气光学湍流强度估算和预报研究^[23,57,58], 检验和证实了湍流模式估算南极近地面大气光学湍流的可行性; 首次使用 Polar WRF 模拟结果来计算南极大陆近地面 C_n^2 随时间的变化, 为准确预报南极大陆大气光学湍流时空变化以及三维湍流时空分布可视化成为可能^[59–61](图 8). 用 Tatarski 公式 (23) 式估算了南极 Dome A(昆仑站) 视宁度 $\varepsilon_{\text{FWHM}}$ ^[62](图 9). 模式估算的 $\varepsilon_{\text{FWHM}}$ 与实测结果的均方根误差 (RMSE) 和相关系数 (R_{xy}) 分别为 0.42 和 0.81. 意味着风剪切是触发南极边界层湍流的主要因素.

5 分析与展望

大气光学湍流主要分布在近地面层、边界层、自由大气层三个主要区域. AFGL AMOS 为代表的以观测数据拟合的 C_n^2 廓线经验模式, 涵盖了上述三个区域, 仅是高度的函数. 按大气光学湍流模式研究- C_n^2 廓线模式中表 1 的模式种类和代表性选取 C_n^2 廓线模式, 能方便的计算出相干长度、等晕角、相干时间等对光电系统影响的关键参数. 但经

验模式不能反映湍流的时间变化和分层特征, 只能用于相同地理、大气环境下的激光传输性能的定性评估.

建立在 Kolmogorov 湍流理论基础之上含有常规气象参数的 C_n^2 参数模式, 如相似理论估算近地面 C_n^2 和以 Tatarski 公式估算 C_n^2 廓线; 以及采用中尺度气象模式预报出常规气象参数, 进而采用 C_n^2 参数化方法预报出 C_n^2 ; 和基于数据驱动的网络估算和预报 C_n^2 在某些方面已获得相当成功. 但准确估算和预报光学湍流 C_n^2 的机理仍未完全揭示和认知, 制约重大光学工程应用的关键湍流基础难题仍需深入研究.

梯度法和 Bulk 法是运用相似理论对热对流占主导的近地面层湍流进行估算的常用方法. 梯度法避免了使用如下垫面粗糙度、地表面/海表面的温湿度等这些难以准确测量的参数, 但对温湿度传感器测量精度要求较高, 特别是当大气处于中性或弱稳定状态, 这时两层温湿梯度会很小. 因海水热容量大, 海面上气温梯度不大, 而海、气间的温湿量差别很大, 这时适合用 Bulk 法来估算海面上的显热、潜热等湍流通量和 C_n^2 . 运用相似理论估算近地面 C_n^2 需要满足以下几个条件, 水平均匀、湍流充分发展、存在常通量层. 对于包括非均匀下垫面在内的复杂下垫面大气边界层结构和理论研究, 特别是夜晚稳定的大气条件下, 如何选择合适的相似性函数, 有待深入研究.

Tatarski 公式和 Masciadri 使用常规气象参数廓线估算 C_n^2 廓线, 都是基于 (15) 式的 Kolmogorov 的湍流理论. 在湍流平稳、湍流均匀、K 理论成立等假定下, 将如何计算出 ε 和 ε_T , 转变成如何计算混合长尺度或外尺度 L_0 . 区别就是 Tatarski 公式中的 L_0 , 是从实测数据拟合出位温梯度、风速梯度这些中间量与 L_0 的关系, 得到一系列外尺度参数化模式如 Dewan 模式、HMNSP99 模式、Coulman

表 2 6 条实测 C_n^2 廓线与 SA-BP 预测和 HMNSP99 估算的 C_n^2 廓线定量比对 (RMSE/ R_{xy})

Table 2. Quantitative comparison of 6 measured C_n^2 profiles with prediction by SA-BP and by HMNSP99 (RMSE/ R_{xy}).

气球编号	探空日期	探空时间	HMNSP99 (RMSE/ R_{xy})	SA-BP (RMSE/ R_{xy})
1	13/08/2020	20:03	1.30/0.65	0.49/0.72
2	14/08/2020	20:11	1.24/0.61	0.67/0.72
3	15/08/2020	20:05	1.34/0.43	0.75/0.77
4	20/08/2020	07:25	0.76/0.47	0.46/0.71
5	21/08/2020	07:17	0.74/0.76	0.43/0.80
6	22/08/2020	07:10	0.76/0.50	0.36/0.83

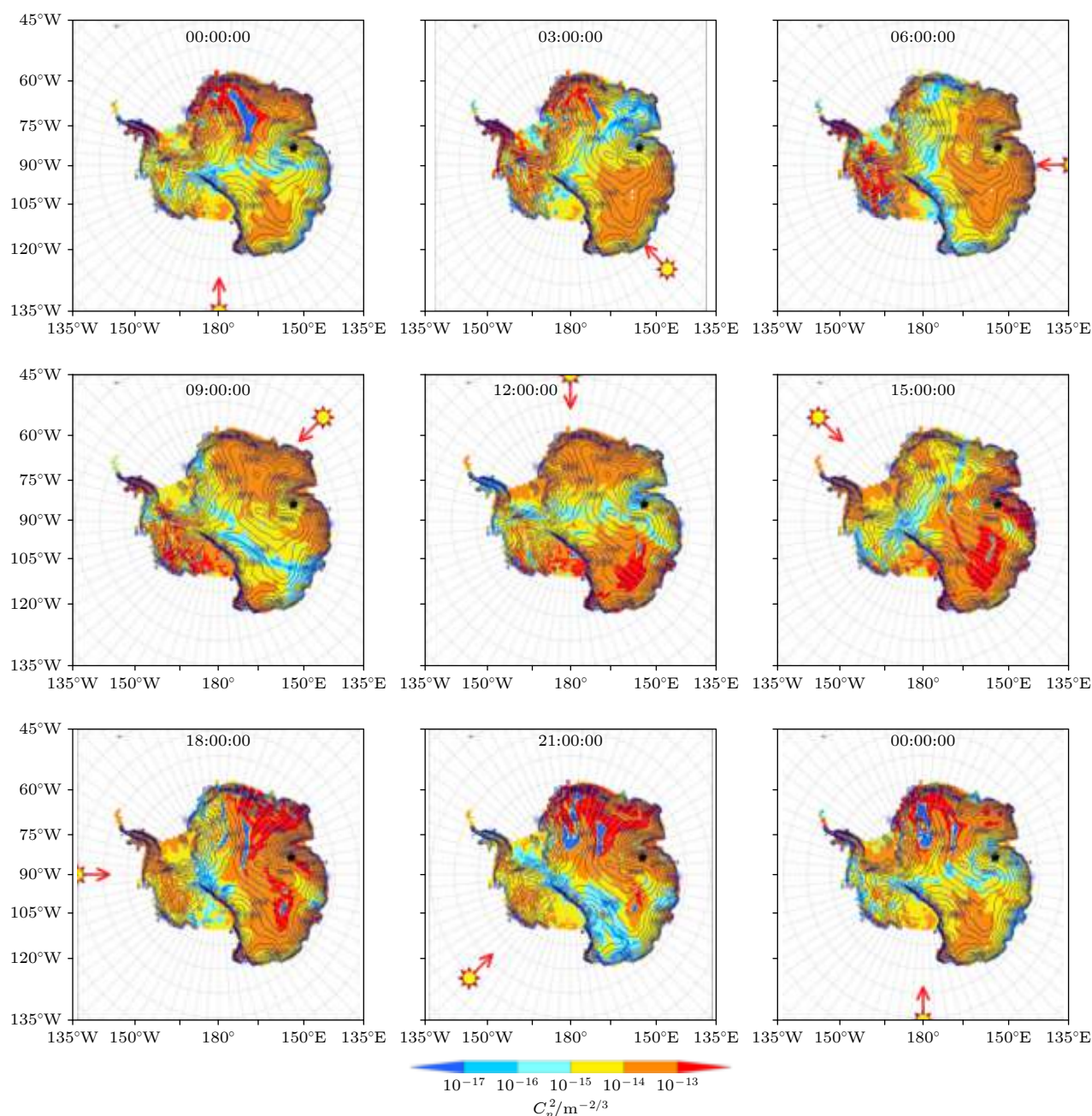


图 8 Polar WRF 模拟的 2014 年 1 月 30 日 (UTC) 南极高原 2 m 高度处 C_n^2 的日变化. 等高线表示地形高度 (m), 太阳图标引出的红色箭头表示太阳光照射方向, 黑色五角星表示泰山站位置, 灰色同心圆表示间隔为 5° 的纬度

Fig. 8. Polar WRF simulated diurnal evolution of C_n^2 at 2 m above model surface of Antarctic Plateau on 30 January, 2014 (UTC), represented by colors. The contours represent the terrain height (m). There are red arrows drawn with a tail at the center of the Sun symbol; the direction of each arrow indicates the direction of sunlight. The black stars show the location of the Taishan Station. The interval of the gray concentric circles representing the latitudes is 5° .

模式、以及 Thorpe 尺度模式、Ellison 尺度模式等. 而 Masciadri 方法则是求解湍流动能方程经过一系列假设简化得到 L_0 与湍流动能 E 的关系式. 两种方法在估算 C_n^2 廓线时都获得一定程度的成功. 目前存在的问题是中间变量与 L_0 关系的系数有不确定性, 是否存在普适的外尺度模式是研究的一大难点. 此外, 在稳定的大气背景下, 低平流层常出

现很薄的强湍流层区域, 往往是非平稳、非均匀、各向异性的. 这些不能用 Kolmogorov 的湍流理论完全描述的低平流层下的片状层湍流, 如何利用常规气象参数准确估算和预报是另一大难题.

可以通过对中尺度气象模式预报的常规气象参数进行后处理, 由湍流参数化公式预报 C_n^2 , 或将湍流参数化公式耦合到中尺度气象模式中直接输

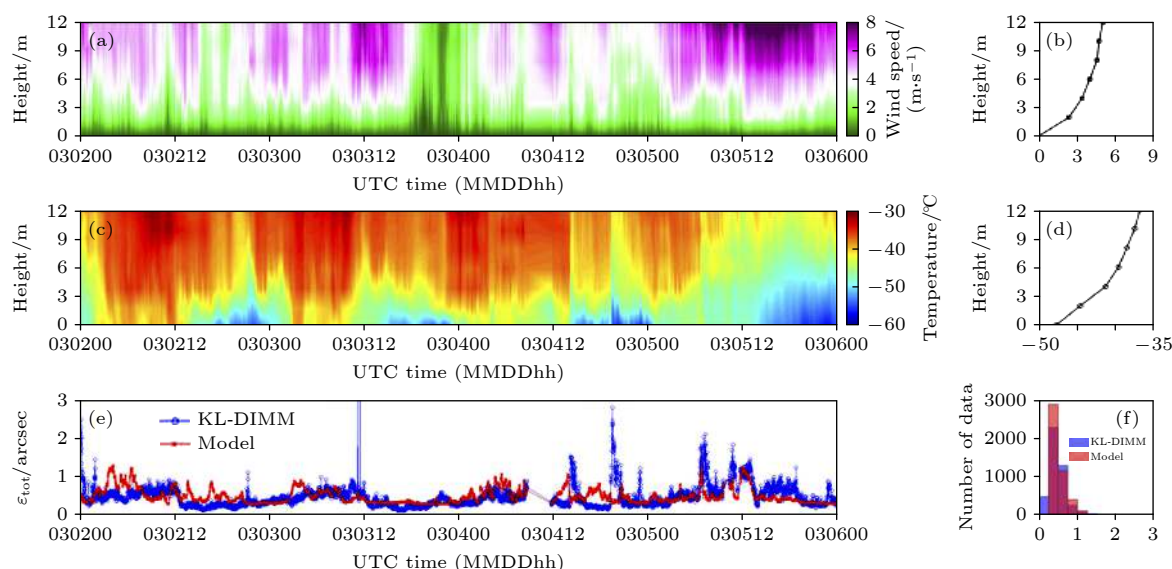


图9 南极昆仑站整层视宁度估算与实测比较(实测视宁度数据来自文献[55]) (图9(b)是平均风速廓线, (d)是平均气温廓线, (f)是视宁度的统计分布)

Fig. 9. Comparison of seeing estimated and measured of whole layer at Kunlun station, Antarctica (The seeing data measured from literature [55]).

出 C_n^2 的预报结果. 由于中尺度模式网格点阵尺度比光学湍流时空尺度大的多, 为获得光学湍流时空尺度上模拟数据, 需要将中尺度模式与微尺度模式嵌套. 微尺度模式的初始和边界条件由中尺度模式模拟结果提供, 再将湍流参数化公式耦合到微尺度模式中, 得到近地面至低平流层模式网格点上平均湍流强度的估算和预报.

与依赖实测数据拟合的经验模式和建立在Kolmogorov湍流理论基础之上的参数模式不同, 基于数据驱动的神经网络估算和预报 C_n^2 , 尽管存在选取何种网络模型的学习及决策过程呈现“黑盒子”性质, 缺乏物理解释, 但估算和预报结果常优于经验模式和参数模式, 为 C_n^2 估算和预报开辟了新的途径.

需要强调的是, 随机保守标量场(如温度场、折射率场等)满足局地均匀、各向同性假定的Kolmogorov湍流理论, 是现有大气光学湍流测量、湍流效应计算和湍流参数模式的理论基础. 构建合适的光学湍流外尺度参数化公式, 进行中尺度模式与微尺度模式嵌套, 开展光学湍流参数化新方法的研究, 是在这个理论框架下, 今后提高光学湍流估算和预报精度努力的方向. 可以预见随着激光大气传输工作的深入开展, 对于非Kolmogorov湍流的测量、湍流效应计算和湍流强度的估算和预报这些关键湍流问题的研究会得到高度重视. 期待提

出新概念、发展新理论、建立新方法和突破新技术等解决非Kolmogorov湍流基础难题.

文中所用的南极泰山数据获取, 得到中国极地中心的大力支持, 感谢中国南极第30次科考队员田启国、金鑫森为泰山站测量系统安装的付出; 感谢国家天文台商朝晖团队提供昆仑站视宁度测量数据下载链接.

参考文献

- [1] Beland R 1993 *The Infrared and ElectroOptical Systems Handbook, SPIE* (Bellingham, WA: Optical Engineering Press) p211
- [2] Wu X Q, Ma C S, Zeng Z Y 1996 *Chin. J. Quantum Electron.* **13** 385 (in Chinese) [吴晓庆, 马成胜, 曾宗泳 1996 量子电子学 **13** 385]
- [3] Wu X Q, Yang Q K, Huang H H, Qing C, Hu X D, Wang Y J 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 069201 (in Chinese) [吴晓庆, 杨期科, 黄宏华, 青春, 胡晓丹, 王英俭 2023 物理学报 **72** 069201]
- [4] Zhang Z S, Cui G X, Xu C X 2002 *Mech. Eng.* **24** 1 (in Chinese) [张兆顺, 崔桂香, 许春晓 2002 力学与实践 **24** 1]
- [5] Wu X Q 2017 *Laser Optoelectron. Prog.* **54** 010001 (in Chinese) [吴晓庆 2017 激光与光电子学进展 **54** 010001]
- [6] Coulman C E, Andre J C, Lacarrere P, Guillingham P R 1986 *Publ. Astron. Soc. Pac.* **98** 376
- [7] Masciadri E, Vernin J, Bougeault P 1999 *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **137** 185
- [8] Lascaux F, Masciadri E, Hagelin S 2010 *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **403** 1714
- [9] Wyngaard J C, Izumi Y, Collins S A 1971 *J. Opt. Soc. Am.* **61** 1646
- [10] Andreas E L 1988 *J. Opt. Soc. Am.* **5** 481
- [11] Davidson K L, Schacher G E, Fairall C W, Goroch A K 1981

- Appl. Opt.* **20** 2919
- [12] Rachele H, Tunick A 1992 *Proceedings, Battlefield Atmospherics Conference, White Sands Missile Range New Mexico*, SPIE **1688** 251
- [13] Tunick A D 1998 U. S. Army Research Laboratory, ARL-TR-1615
- [14] Hill R J 1980 *J. Opt. Soc. Am.* **70** 1192
- [15] Wyngaard J C 1973 *On Surface Layer Turbulence, in Workshop of Micrometeorology* (Boston: American Meteorological Society) pp101–149
- [16] Kaimal J C, Wyngaard J C, Haugen D A, Cote O R, Izumi Y 1976 *J. Atmos. Sci.* **33** 2152
- [17] Walters D L, Kunkel K E 1981 *J. Opt. Soc. Am.* **71** 397
- [18] Kukharets V P, Tsvang L R 1980 *Izv. Atmos. Oceanic Phys.* **16** 73
- [19] Murphy E A, Dewan E M, Sheldon S M 1985 *in Adaptive Optics, Proc. SPIE* **551** 156
- [20] Andrews L C, Phillips R L, Crabbs R, Wayne D, Leclerc T, Sauer P 2010 *Proc. SPIE* **7588** 758809
- [21] Andrews L C, Phillips R L, Crabbs R, Wayne D, Leclerc T, Sauer P 2012 *Proc. SPIE* **8238** 82380F
- [22] Wu X Q, Zhu X T, Huang H H, Hu S X 2012 *Acta Opt. Sin.* **32** 0701004 (in Chinese) [吴晓庆, 朱行听, 黄宏华, 胡顺星 2012 光学学报 **32** 0701004]
- [23] Wu X Q, Tian Q G, Jin X M, Jiang P, Qing C, Cai J, Zhou H Y 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 039201 (in Chinese) [吴晓庆, 田启国, 金鑫森, 姜鹏, 青春, 蔡俊, 周宏岩 2017 物理学报 **66** 039201]
- [24] Wu X Q, Wang Y J, Zeng Z Y, Ma C S, Yuan R M 2002 *Acta Meteorol. Sin.* **60** 1 (in Chinese) [吴晓庆, 王英俭, 曾宗泳, 马成胜, 袁仁民 2002 气象学报 **60** 1]
- [25] Burk S D 1980 *J. Appl. Meteor.* **19** 562
- [26] Wu X Q, Wang Y J, Zeng Z Y, Gong Z 2002 *High Power Laser Part. Beams* **14** 819 (in Chinese) [吴晓庆, 王英俭, 曾宗泳, 龚知本 2002 强激光与粒子束 **14** 819]
- [27] Cheinet S, Beljaars A 2011 *Boundary-Layer Meteorol* **138** 453
- [28] Xu L M 2008 *M. S. Thesis* (Hefei: University of Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [许利明 2008 硕士学位论文 (合肥: 中国科学院大学)]
- [29] Qing C, Wu X Q, Li X B, Zhu W Y, Qiao C H, Rao R Z, Mei H P 2016 *Opt. Express* **24** 13303
- [30] Rumelhart D E, Hinton G E, Williams R J 1986 *Nature* **323** 533
- [31] Wang Y, Basu S 2016 *Opt. Lett.* **41** 2334
- [32] Su C D, Wu X Q, Luo T, Wu S, Qing C 2020 *Appl. Opt.* **59** 3699
- [33] Wu X Q 2019 *J. Anhui Normal Univ. (Nat. Sci.)* **42** 511 (in Chinese) [吴晓庆 2019 安徽师范大学学报自然科学版 (特约稿) **42** 511]
- [34] Wu X Q 2014 *J. Anhui Normal Univ. (Nat. Sci.)* **37** 511 (in Chinese) [吴晓庆 2014 安徽师范大学学报(自然科学版) (特约稿) **37** 511]
- [35] Corrsin S 1951 *J. Appl. Phys.* **22** 469
- [36] Dewan E M 1980 *Optical Turbulence Forecasting: A turorial Air Force Geophysics Laboratory Technical Report No. AFGL-TR-80-0030*, ADA 086863
- [37] Horne J D 2004 *M. S. Thesis* (Monterey, CA: Naval Postgraduate School) p163
- [38] Hodur R M 1997 *Mon. Weather Rev.* **125** 1414
- [39] Dewan E M, Good R E, Beland B, Brown J 1993 *Environmental Research Paper (Phillips Laboratory, Hansom Air Force Base)* No. 1121 PL-TR-93-2043, ADA 279399
- [40] Ruggiero F H, DeBenedictis D A 2002 *HPCMP Users Group Conference* Austin, Texas, January 13–14, 2002 p11
- [41] Coulman C, Vernin J, Coqueugniot Y, Caccia J 1988 *Appl. Opt.* **27** 155
- [42] Basu S 2015 *Opt. Lett.* **40** 4130
- [43] Hu X D, Wu X Q, Qing C 2019 *Chin. J. Polar Res.* **31** 301 (in Chinese) [胡晓丹, 吴晓庆, 青春 2019 极地研究 **31** 301]
- [44] Hu X D, Su C D, Luo T, Qing C, Sun G, Liu Q, Li X B, Zhu W Y, Wu X Q 2019 *High Power Laser Part. Beams* **31** 081002 (in Chinese) [胡晓丹, 苏昶东, 罗涛, 青春, 孙刚, 刘庆, 李学彬, 朱文越, 吴晓庆 2019 强激光与粒子束 **31** 081002]
- [45] Wu S, Su C D, Wu X Q, Luo T, Li X B 2020 *Publ. Astron. Soc. Pac.* **132** 084501
- [46] Wu S, Wu X Q, Su C D, Yang Q K, Xu J Y, Luo T, Huang C, Qing C 2021 *Opt. Express* **29** 12455
- [47] Qing C, Wu X Q, Li X B, Huang H H, Cai J 2015 *High Power Laser Part. Beams* **27** 061009 (in Chinese) [青春, 吴晓庆, 李学彬, 黄宏华, 蔡俊 2015 强激光与粒子束 **27** 061009]
- [48] Qing C, Wu X Q, Li X B, Zhu W Y, Rao R Z, Mei H P 2015 *Chin. J. Lasers* **42** 0913001 (in Chinese) [青春, 吴晓庆, 李学彬, 朱文越, 饶瑞中, 梅海平 2015 中国激光 **42** 0913001]
- [49] Qing C, Wu X Q, Li X B, Zhu W Y, Huang Y B, Rao R Z, Cai J 2016 *Acta Opt. Sin.* **36** 0501001 (in Chinese) [青春, 吴晓庆, 李学彬, 朱文越, 黄印博, 饶瑞中, 蔡俊 2016 光学学报 **36** 0501001]
- [50] Su C D, Wu X Q, Wu S, Yang Q K, Han Y J, Qing C, Luo T, Liu Y 2021 *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **506** 3430
- [51] Travouillon T, Ashley M C B, Burton M G, Storey J W V, Loewenstein R F 2003 *Astron. Astrophys.* **400** 1163
- [52] Lawrence J S, Ashley M C B, Tokovinin A, Travouillon T 2004 *Nature* **431** 278
- [53] Agabi A, Aristidi E, Azouit M, Fossat E, Martin F, Sadibekova T, Vernin J, Ziad A 2006 *PASP* **118** 344
- [54] Aristidi E, Fossat E, Agabi A, Mékarnia D, Jeanneaux F, Bondoux E, Challita Z, Ziad A, Vernin J, Trinquet H 2009 *Astron. Astrophys.* **499** 955
- [55] Ma B, Shang Z H, Hu Y, Hu K L, Jiang P 2020 *Nature* **583** 771
- [56] Wu X Q, Tian Q G, Jiang P, Chai B, Qing C, Cai J, Jin X M, Zhou H Y 2015 *Adv. Polar Sci.* **26** 305
- [57] Qing C, Wu X Q, Huang H H, Tian Q G, Zhu W Y, Rao R Z, Li X B 2016 *Opt. Express* **24** 20424
- [58] Qing C, Li X B, Wu X Q, Tian Q G, Liu D, Rao R Z, Zhu W Y 2018 *Astron. J.* **155** 13
- [59] Yang Q K, Wu X Q, Han Y J, Qing C 2021 *Appl. Opt.* **60** 4084
- [60] Yang Q K, Wu X Q, Wu S, Han Y J, Su C D, Zhang S T, Qing C 2021 *J. Opt. Soc. Am.* **38** 1483
- [61] Yang Q K, Wu X Q, Han Y J, Qing C, Wu S, Su C D, Wu P F, Luo T, Zhang S T 2021 *Opt. Express* **29** 44000
- [62] Yang Q K, Wu X Q, Han Y J, Qing C, Wu S, Su C D, Wu P F, Zhang S T 2021 *Opt. Express* **29** 35238

Analysis of atmospheric optical turbulence model— methods and progress*

Wu Xiao-Qing^{1)2)3)†} Yang Qi-Ke¹⁾²⁾³⁾ Huang Hong-Hua¹⁾²⁾³⁾ Qing Chun¹⁾²⁾³⁾
Hu Xiao-Dan¹⁾²⁾³⁾ Wang Ying-Jian¹⁾²⁾³⁾

1) (*Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,
HFIPS, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China*)

2) (*Advanced Laser Technology Laboratory of Anhui Province, Hefei 230037, China*)

3) (*Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

(Received 17 October 2022; revised manuscript received 25 November 2022)

Abstract

Stratification is a significant characteristic of atmospheric turbulence, especially high-altitude turbulence. At a fixed height, the real optical turbulence value fluctuates by 1–2 orders of magnitude or even greater on the average value. The turbulence profile model based on the observed data is a statistical average result. It can neither represent the stratification characteristics of an actual atmospheric turbulence profile nor have the prediction function, and can not fully meet the demand of optical engineering. Owing to the limitation of the capacity and speed of the computer, it is impossible to solve the Navier Stokes equation through direct numerical simulation (DNS) and large eddy simulation (LES) to predict the optical turbulence. The solution is to predict the conventional gas parameters through the mesoscale weather numerical prediction model MM5/WRF, and then calculate the turbulence parameters through the turbulence parameterization scheme. In this paper, the prediction methods and research results of C_n^2 in surface layer, boundary layer and free atmosphere layer are introduced. Tatarski formula is derived in detail from the turbulence kinetic energy prediction equation and the temperature fluctuation variance prediction equation, and the physical meaning and applicable conditions of the formula are summarized. The latest research progress of neural network prediction and Antarctic astronomical site selection is mainly introduced. The characteristics and differences among different models, such as the empirical model fitted with experimental data, the parameter model with conventional meteorological parameters based on Kolmogorov turbulence theory, the prediction model related to mesoscale meteorological model, and the neural network method based on data driving and so on, are analyzed. It is emphasized that Kolmogorov turbulence theory is the theoretical basis of the existing atmospheric optical turbulence parameter models.

Keywords: atmospheric optical turbulence, turbulence model, Tatarski formula, neural network prediction of C_n^2 , astronomical site selection

PACS: 92.60.hk, 47.27.E–, 07.05.Mh, 95.45.+i

DOI: 10.7498/aps.72.20221986

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 91752103, 41576185), the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. CXJJ-19S028).

† Corresponding author. E-mail: xqwu@aiofm.ac.cn

大气光学湍流模式研究——方法和进展

吴晓庆 杨期科 黄宏华 青春 胡晓丹 王英俭

Analysis of atmospheric optical turbulence model— methods and progress

Wu Xiao-Qing Yang Qi-Ke Huang Hong-Hua Qing Chun Hu Xiao-Dan Wang Ying-Jian

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 049201 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20221986

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221986>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于深度卷积神经网络的大气湍流相位提取

Extracting atmospheric turbulence phase using deep convolutional neural network

物理学报. 2020, 69(1): 014209 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20190982>

海洋上空折射率结构常数廓线估算

Estimation of profile of troposphere over the sea

物理学报. 2021, 70(24): 244204 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20211201>

一个新的海边光学湍流外尺度和Cn2的廓线模式

A new model for the profiles of optical turbulence outer scale and Cn2 on the coast

物理学报. 2018, 67(1): 014206 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171324>

分子离子, 和态的不透明度

Molecular opacities of $A^2\Pi_u$ and states of nitrogen cation

物理学报. 2022, 71(19): 193101 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220734>

N掺杂对-Ga₂O₃薄膜日盲紫外探测器性能的影响

Effect of N-doping on performance of -Ga₂O₃ thin film solar-blind ultraviolet detector

物理学报. 2021, 70(17): 178503 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210434>

(n = 0—4)团簇的电子结构、成键性质及稳定性

Electronic structures, chemical bonds, and stabilities of (n = 04) clusters: Anion photoelectron spectroscopy and theoretical calculations

物理学报. 2021, 70(2): 023601 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201351>