

太阳辐射散射分数 Sigmoid 函数建模与验证分析

崇伟^{1,2*}, 吕文华^{1,2}, 张健^{1,3,4}, 梁婧¹, 杨晓彤¹, 张国玉^{1,3,4}

¹ 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;

² 中国气象局气象探测中心, 北京 100081;

³ 光电测控与光信息传输技术教育部重点实验室, 吉林 长春 130022;

⁴ 吉林省光电测控仪器工程技术研究中心, 吉林 长春 130022

摘要 为研究太阳辐射散射分布对日照时数测量的影响,基于大气辐射传输理论,利用泰勒级数展开,建立了散射分数、晴空指数和大气光学质量的 Sigmoid 函数模型。利用不同时间尺度的辐射数据训练集,通过非线性拟合得到了散射分数与晴空指数和大气光学质量的变化关系的数学模型,给出了一维模型 S0 和二维模型 S1。利用不同地域观测站点的太阳辐射数据建立验证数据集,利用 Sigmoid 模型计算了散射分数,分析了实测值与计算值之间的相关系数、平均偏差、均方根误差和 t -统计量等。结果表明,采用 Sigmoid 模型计算的散射分数值与实测值相关系数在 0.8 以上,平均偏差在 ± 0.2 以内,均方根误差在 0.25 以内, t -统计量最小低至 0.0172。本研究为散射辐射分布模型的构建提供了新的方向,下一步需引入更为广泛的辐射数据进行模型跨地域的适用性研究。

关键词 大气光学; Sigmoid 模型; 散射辐射; 晴空指数; 大气光学质量; 日照时数

中图分类号 O432; P413.2

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1901001

Modeling and Validation Analysis of Sigmoid Function for Solar Radiation Diffuse Fraction

Chong Wei^{1,2*}, Lü Wenhua^{1,2}, Zhang Jian^{1,3,4}, Liang Jing¹, Yang Xiaotong¹, Zhang Guoyu^{1,3,4}

¹ School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

² Meteorological Observation Center of CMA, Beijing 100081, China;

³ Key Laboratory of Opto-Electronic Measurement and Optical Information Transmission Technology, Ministry of Education, Changchun, Jilin 130022, China;

⁴ Opto-Electronic Measurement and Control Instrumentation, Jilin Province Engineering Research Center, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract In order to study the influence of the solar radiation diffuse distribution on the measurement of sunshine duration, based on atmospheric radiation transmission theory, the Sigmoid function models of diffuse fraction, clearness index, and atmospheric optical quality are established by Taylor series expansion. Using the training dataset of radiation data with different time scales, the mathematical model of the diffuse fraction varying with the clearness index and the atmospheric optical mass is obtained by nonlinear fitting, and the one-dimensional model S0 and the two-dimensional model S1 are given. Based on the solar radiation data from different observation sites, the diffuse fraction is calculated by the Sigmoid model. The correlation coefficient between the measured and calculated values, mean deviation, root mean square error, and t -statistic are analyzed. The results show that the correlation coefficient between the diffuse fraction calculated with the Sigmoid model and the measured value is above 0.8, the average deviation is within ± 0.2 , the root mean square error is within 0.25, and the minimum t -statistic is as low as 0.0172. This study provides a new thought for the construction of the solar radiation diffuse distribution model, and the next step should introduce more extensive radiation data to study the applicability of the model across regions.

Key words atmospheric optics; Sigmoid model; diffuse radiation; clearness index; atmospheric optical mass;

收稿日期: 2020-04-02; 修回日期: 2020-05-31; 录用日期: 2020-06-23

基金项目: 吉林省科技发展计划(20190302124GX)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY201406037)、长春理工大学科技创新基金(XJLJG-2018-02)

* E-mail: chongwei@cma.cn

sunshine duration

OCIS codes 010.5620; 010.5630; 120.5820

1 引 言

日照时数是太阳在一个地区实际照射的时间长度,是表征一个地区气候学特征的重要参数。太阳辐射散射分数是散射辐射相对于太阳总辐射在天空中的分布比例,与日照时数之间存在着密切的内在联系。根据世界气象组织仪器和观测方法指南(WMO-No. 8)的建议,日照时数定义为在给定时段内太阳直接辐照度超过 $120 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 的各段时间的总和^[1]。通常,日照时数测量仪器通过直接或者间接方式测得直接辐射,然后与 $120 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 阈值进行比较,进而判断和测量日照时数。然而在实际测量中,太阳直接辐射受到云、大气颗粒物、气溶胶水汽、臭氧等大气成分散射和吸收过程的影响,尤其是在多云天气条件下,天空的散射辐射分布将直接影响日照时数的测量准确度。Ångström-Prescott 公式指出,日晴空指数与日照时数呈线性关系,云量和日照时数负相关^[2-3]。研究散射辐射分布模型、分析太阳辐射散射分数规律以及获取准确的日照时数测量数据,对研究天气过程和气候变化具有重要意义,同时对提高水稻、小麦、苹果等农林作物产量,规划和运行太阳能发电站,提升建筑节能效率,发展区域旅游休养产业等具有重要的经济和社会价值。

目前,针对太阳辐射散射分数规律及其与日照时数关系的研究,主要集中在利用分段线性和多项式拟合构建散射分数模型上,尚凯峰等^[4]对低纬度地区水平面太阳辐射的直接分数和散射分数模型进行了研究,建立了大气散射透射比与晴空指数之间的分段线性回归模型;冯巍等^[5]以北京地区为例,对5种有代表性的直接分数和散射分数模型进行了比较研究,给出了主要影响因子和最适用于北京地区的模型;马年骏等^[6]对地球辐射收支卫星(ERBS)的太阳辐射直接分数和散射分数模型进行了改进,通过引入日照百分比建立了多项式模型,一定程度上提升了模型精度;符传博和丹利^[7]通过对大气污染加剧对我国区域散射辐射比例影响的研究发现,日照时数与散射辐射比例高度相关,在大气污染较重的地区,相关系数超过 -0.8 ,大气中气溶胶粒子浓度升高对日照时数和散射辐射比例有重大的影响;张芳等^[8-9]对红外辐射在大气中的传输及其消光特性进行了研究,给出了不同大气廓线、分子衰减和

气溶胶对辐射传输的影响;Hinssen 等^[10-11]研究了基于总辐射反演日照时数的分段线性模型,该模型能够弥补没有日照时的观测数据,利用总辐射数据推出日照时数;Ahwide 等^[12]研究了日平均散射分数与晴空指数的线性关系,预测了利比亚塞卜哈、古达米斯和的黎波里三地的日直接辐射和日照时数;Jamil 和 Siddiqui^[13]提出了利用晴空指数和日照时数估算散射分数的印度通用模型,同样基于线性和多项式拟合进行研究;Li 等^[14]建立了香港地区倾斜面太阳总辐射与日照时数之间的线性关系;Vazquez 等^[15]提出了大气散射、大气吸收和大气光学质量对太阳总辐射与散射辐射之间关系的分段线性作用;Muneer 和 Munawwar^[16]通过统计方法,基于印度、日本、西班牙和英国等地的日照时数、云分布系数和晴空指数研究,提出了日散射辐射组成的二阶多项式经验公式;Fu 等^[17]分析了中国7个城市在1960—2005年间晴天条件下日照时数和散射分数的演变趋势,研究了气溶胶光学厚度和对流层二氧化氮(NO_2)浓度等环境参数对日照时数和散射分数的影响,指出人为活动形成的空气污染与日照时数和散射分数之间呈高度负相关关系;Khorasanizadeh 等^[18]利用多项式和指数拟合函数对伊朗 Kerman 地区散射辐射进行测算,发现一阶线性公式在日散射分数和月平均散射系数模拟方面表现最佳;Fan 等^[19]则通过多项式和指数拟合函数对中国五大气候区水平面散射辐射进行了估算,得出了针对不同的气候区需采用不同的函数模型的结论;Dal Pai 等^[20]则提出了通过晴空指数计算小时、日和月平均散射辐射的四阶多项式模型。

Sigmoid 函数是机器学习中一个比较常用的 S 型函数,其值域在 0 和 1 之间,基本形式是 $f(x) = 1/[1 + \exp(-x)]$,其自变量趋于正无穷或负无穷时函数输出分别趋于 1 和 0 的平滑状态,这与散射分数分布十分类似,因此适合用于散射分数模型构建。基于 Sigmoid 函数进行散射辐射分布的研究尚属罕见,其中较为典型的是 Boland 等^[21-22]于 2008 年和 2010 年利用澳大利亚吉朗地区的 1 h 和 15 min 数据提出了散射辐射值的 Sigmoid 计算模型,2019 年 Rojas 等^[23]又利用该模型对智利、哥斯达黎加和澳大利亚散射分数进行了估算,评估了该模型与温度、降水和纬度等的相关性。从已有的研

究来看,相较于传统的分段线性拟合和四阶多项式拟合,Sigmoid 函数模型能够更好地计算大晴空指数下的低散射分数,即分段线性拟合和四阶多项式拟合在散射分数趋于 0 时存在欠拟合的问题。考虑到利用上述不同模型得到的散射分数计算值与实测值之间的残差不是呈正态分布,选择散射分数计算值与实测值之间绝对百分比误差中位数来衡量不同模型的误差大小,并选择偏差中位数来衡量不同模型之间的优劣,在南半球的研究显示:在绝对百分比误差中位数方面,Sigmoid 函数模型比分段线性拟合小 3.07%,比四阶多项式拟合小 15.48%;在偏差中位数方面,Sigmoid 函数模型比分段线性拟合小 0.01,比四阶多项式拟合小 0.08。可见,基于 Sigmoid 函数的散射分数模型的拟合效果更优,这为太阳散射辐射分布研究提供了一个新的方向。

本文在前人研究成果的基础上,根据大气辐射传输理论,利用泰勒级数展开,以晴空指数表征天气阴晴状态,分析了利用 Sigmoid 函数构建散射分数随晴空指数变化的一元数学模型;同时,通过引入大气光学质量来表征与日照时数密切相关的直接辐射大气透过率,并构建了 Sigmoid 二元数学模型。建立不同时间尺度的相互独立的模型训练数据集与验证数据集,利用训练数据集进行非线性拟合,构建了散射分数相对于晴空指数和大气光学质量的一元 Sigmoid 曲线模型和二元 Sigmoid 曲面模型;利用验证数据集计算分析了散射分数观测值与计算值之间的相关系数、平均偏差、均方根误差和 t -统计量,评价了散射分数 Sigmoid 模型的有效性和适用性。

2 数据资料

2.1 资料来源

数据资料主要包括太阳总辐射和散射辐射测量值,该数据由 FS-S6 型总辐射表测得,其中散射辐射是总辐射表在双轴太阳跟踪器遮光球遮光条件下测得的,FS-S6 型总辐射表属于国产一级总辐射表,年稳定性为 1.5%,小时累计量测量不确定度为 8% (不确定度包含因子 $k=2$)。数据资料分为训练数据集和验证数据集,两个部分相互独立。训练数据集取自云南省丽江市太阳能资源实验观测站(简称丽江站,26.51°N,100.12°E,2380.9 m),该站点的太阳辐射充裕,空气干燥,气溶胶光学厚度小,遮挡物少,站内气象辐射观测设备齐全,站点作为全国辐射仪器比对外场,所得观测数据可靠,因此被广泛用于仪器性能评估和学术研究。训练数据集包括

2012 年 4—8 月的 1 h 辐射观测数据、2012 年 4 月的 10 min 辐射数据和同月的 1 min 辐射数据。考虑辐射数据空间分布和季节对模型的影响,分别选择我国西南(丽江站)、东北(喀左站,119.77°E,41.12°N,341.2 m)、华南(广州站,113.20°E,23.10°N,410.5 m)、华中(武汉站,114.08°E,30.37°N,231.2 m)、西北(乌鲁木齐站,87.39°E,43.47°N,935.3 m)等 5 个站点的辐射数据进行验证分析,丽江站选择同步观测的另一套设备于 2012 年 5 月测量的 10 min 和 1 h 辐射数据进行验证,喀左站、广州站、武汉站和乌鲁木齐站都选择 2012 年 7 月测量的 1 h 辐射数据和 12 月测量的 10 min 辐射数据进行验证,其中,喀左站地处山顶,日照充足,四周无遮挡,适于太阳辐射观测,所得数据准确、可靠;广州站、武汉站和乌鲁木齐站都是国家气象辐射观测一级站,辐射观测最早始于 1959 年,所得数据准确、可靠。

2.2 数据质量控制

为确保用于模型构建和验证的数据的有效性,对待使用的数据资料进行了质量控制。具体步骤如下^[24-26]:

- 1) 剔除数据采集器、供电或太阳跟踪器出现故障前后采集的数据。
- 2) 剔除在太阳高度角小于 7°时测量的辐射数据。
- 3) 经过步骤 1) 和步骤 2) 后,利用剩余辐射数据计算晴空指数 K_t 和散射分数 K_d ,剔除不满足 $0 < K_t < 1$ 和 $0 < K_d < 1$ 对应的辐射数据,计算公式为

$$K_t = \frac{I_g}{I_0 \sin \alpha}, \quad (1)$$

$$K_d = \frac{I_d}{I_g}, \quad (2)$$

式中: I_g 为地面水平面太阳总辐射; I_0 为地球大气层外太阳直接辐射,即太阳常数,取 $1361 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ^[27-28]; α 为太阳高度角; I_d 为地面水平面散射辐射。

- 4) 剔除散射辐射大于 1.1 倍总辐射时对应的辐射数据。
- 5) 剔除总辐射大于太阳常数的 1.2 倍和散射辐射大于太阳常数的 80% 对应的辐射数据。
- 6) 将数据资料按 K_t 进行升序排序,然后将其划分为 10 个等间隔的数据段,计算每个数据段 K_d 值的算术平均值和标准偏差,再计算每个 K_d 值相对于本段平均值的差值绝对值,剔除差值绝对值大于本段标准偏差的 2 倍的辐射数据。

3 模型构建

根据地面水平面太阳总辐射等于法向直接辐射水平分量与散射辐射之和,定义地面法向直接辐射水平分量与地面水平面总辐射之比为直接分数,计算公式为

$$I_g = I_d + I_b, \quad (3)$$

$$I_b = I_n \sin \alpha, \quad (4)$$

$$K_b = \frac{I_b}{I_g}, \quad (5)$$

式中: I_b 为地面法向直接辐射水平分量; I_n 为到达地面的法向直接辐射; K_b 为直接分数。

因此,容易得到散射分数与直接分数之和等于1的关系,即

$$K_d + K_b = 1. \quad (6)$$

根据大气辐射传输理论,太阳辐射穿过大气层到达地面要经过复杂的消光衰减过程,特别是大气中各种气体、水汽和气溶胶等成分的瑞利散射和吸收。假设各种散射和吸收等消光过程相互独立,将朗伯-比尔定律引申到宽光谱段,则到达地面的法向直接辐射^[29]为

$$I_n = \prod_i I_0 \exp(-m_i \delta_i), \quad (7)$$

式中: m_i 为第*i*种消光过程对应的光学质量; δ_i 为第*i*种消光过程对应的光学厚度。

将(1)式、(4)式和(7)式代入(5)式,则直接分数 K_b 可以转化为

$$K_b = \frac{1}{K_t} \cdot \prod_i \exp(-m_i \delta_i) = \frac{1}{K_t} \cdot \exp\left[\sum_i (-m_i \delta_i)\right]. \quad (8)$$

根据(6)式,同时假设消光过程可归类为散射和吸收两个部分,则散射分数可以转变为

$$K_d = 1 - \frac{1}{K_t} \cdot \exp[-(m_r \delta_r + m_a \delta_a)], \quad (9)$$

式中: m_r 为瑞利散射引起的消光过程对应的光学质量; δ_r 为瑞利散射引起的消光过程对应的光学厚度; m_a 为大气吸收等引起的消光过程对应的光学质量; δ_a 为大气吸收等引起的消光过程对应的光学厚度。

根据泰勒级数,将晴空指数 $K_t \in (0, 1)$ 分解为

$$\frac{1}{K_t} = \frac{1}{1 - (1 - K_t)} = \sum_{n=0}^{\infty} (1 - K_t)^n, \quad (10)$$

式中: n 为泰勒级数展开式的多项式次数。

(10)式只有在 $|1 - K_t| < 1$ 才是收敛的,取 $n = 0$,并利用散射消光效应对吸收消光效应进行归一化处理,以 τ 表示,则(9)式可表示为

$$K_d = 1 - \exp[-m_r \delta_r (1 + \tau)]. \quad (11)$$

根据对数恒等式和泰勒级数展开,(11)式可转化为

$$\begin{aligned} K_d &= 1 - \exp\{-\exp\{\ln[m_r \delta_r (1 + \tau)]\}\} = \\ &= 1 - \exp\{-\exp[\ln(m_r \delta_r) + \ln(1 + \tau)]\} = \\ &= 1 - \exp\left[-\exp\left(C + \tau - \frac{1}{2}\tau^2 + \frac{1}{3}\tau^3 - \frac{1}{4}\tau^4 + \dots\right)\right]. \end{aligned} \quad (12)$$

(12)式为导出的散射分数 Sigmoid 通用模型,其中, C 为常数,指数部分的多项式是对大气散射和吸收等消光过程的近似处理,具体模型应将对大气消光贡献较大的变量引入研究。本文将地面总辐射相较于大气层外太阳辐射的占比,即晴空指数 K_t 引入模型。大气消光过程中,直接辐射在大气中穿过的相对路径越长,辐射衰减越多,反之则越少,然而,日照时数是通过测量直接辐射后将测量结果与 120 W/m^2 阈值进行比较获得的,因此,直接辐射衰减越多,对于日照时数的测量影响越大。为此,在引入晴空指数 K_t 的同时,引入大气光学质量作为第二变量。综上所述,本文提出两种散射分数 Sigmoid 模型,编号分别为 S0 和 S1,即

$$\begin{aligned} \text{S0: } K_d(K_t) &= \\ &= a_1 - a_2 \cdot \exp[-\exp(a_3 + a_4 \cdot K_t)], \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \text{S1: } K_d(K_t, m) &= \\ &= a_1 - a_2 \cdot \exp[-\exp(a_3 + a_4 \cdot K_t + a_5 \cdot m)], \end{aligned} \quad (14)$$

式中: $a_1 \sim a_5$ 为模型参数; m 为大气光学质量。

此处大气光学质量是指太阳辐射穿过大气层到达海平面的距离与太阳位于天顶时穿过大气层到达海平面的距离之商。大气光学质量与太阳高度角和站点海拔高度密切相关,精确计算需要通过气压修正和大气折射修正处理,具体计算公式^[30]为

$$m = \frac{p/p_0}{\sin \alpha_s + 0.50572(\alpha_s + 6.07995)^{-1.6364}}, \quad (15)$$

式中: α_s 为经过大气折射修正的太阳高度角; p 为观测站点的大气压力; p_0 为海平面平均大气压力,此项是气压修正,对位于山区等海拔较高的站点尤其重要。

$$\begin{aligned} \alpha_s &= \alpha + 0.061359 \left(\frac{180}{\pi}\right) \times \\ &= \frac{0.1594 + 1.123 \left(\frac{180}{\pi}\right) \alpha + 0.065656 \left(\frac{180}{\pi}\right)^2 \alpha^2}{1 + 28.9344 \left(\frac{180}{\pi}\right) \alpha + 277.3971 \left(\frac{180}{\pi}\right)^2 \alpha^2}, \end{aligned} \quad (16)$$

$$p/p_0 = \exp(-h/h_z), \quad (17)$$

式中： h 为观测站点海拔高度； h_z 为地表附近瑞利大气的标高，取 8434.5 m。

下面对模型参数进行求解。利用 Matlab 编程，导入数据训练集，通过非线性拟合对 S0 和 S1 模型函数进行定向拟合。表 1 列出了求解出的 S0 模型和

S1 模型的参数，分别为 1 h、10 min 和 1 min 三个时间尺度辐射数据，其中 S0 模型参数给出了 95% 的置信区间。S0 和 S1 模型如图 1 所示，其中图 1(a)~(c) 分别为采用 1 h 数据、10 min 数据和 1 min 数据拟合出的 S0 模型曲线，图 1(d)~(f) 则为基于 1 h 数据、10 min 数据和 1 min 数据拟合出的 S1 模型曲面。

表 1 散射分数 Sigmoid 模型 S0 和 S1 的参数

Table 1 Parameters of diffuse fraction sigmoid models S0 and S1

Model	Training data	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
S0	1-h data	0.2258 (0.2057, 0.2458) (with 95% confidence bounds)	-0.7401 (-0.7886, -0.6916) (with 95% confidence bounds)	-5.141 (-5.955, -4.327) (with 95% confidence bounds)	8.406 (7.116, 9.696) (with 95% confidence bounds)	
	10-min data	0.1949 (0.1698, 0.2201) (with 95% confidence bounds)	-0.8155 (-0.8903, -0.7407) (with 95% confidence bounds)	-3.121 (-3.639, -2.604) (with 95% confidence bounds)	5.446 (4.609, 6.283) (with 95% confidence bounds)	
	1-min data	0.2146 (0.2089, 0.2203) (with 95% confidence bounds)	-0.7548 (-0.7749, -0.7346) (with 95% confidence bounds)	-3.604 (-3.803, -3.405) (with 95% confidence bounds)	6.202 (5.889, 6.515) (with 95% confidence bounds)	
S1	1-h data	0.2338	-0.7386	-5.5787	8.6573	0.2926
	10-min data	0.2074	-0.8187	-3.2986	5.5718	0.1356
	1-min data	0.2251	-0.7648	-3.9509	6.4351	0.2379

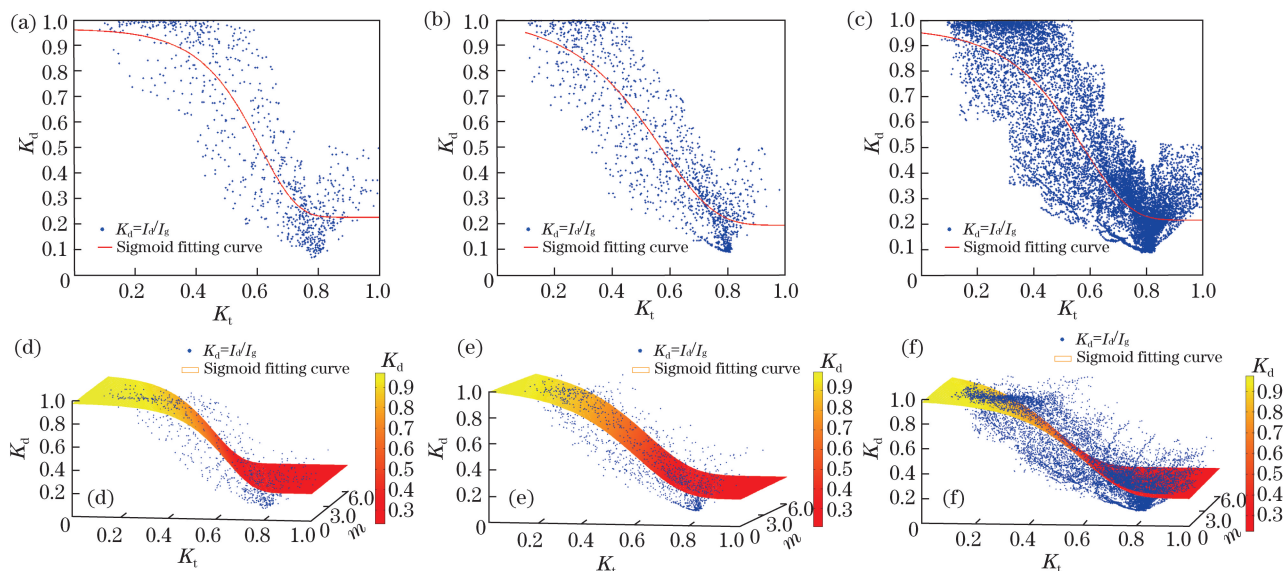


图 1 散射分数 Sigmoid 模型拟合曲线与曲面。(a) 基于 1 h 训练数据拟合的 S0 模型曲线；(b) 基于 10 min 训练数据拟合的 S0 模型曲线；(c) 基于 1 min 训练数据拟合的 S0 模型曲线；(d) 基于 1 h 训练数据拟合的 S1 模型曲面；(e) 基于 10 min 训练数据拟合的 S1 模型曲面；(f) 基于 1 min 训练数据拟合的 S1 模型曲面

Fig. 1 Fitting curves and surfaces of diffuse fraction Sigmoid model. (a) S0 model fitting curve based on 1 h training data; (b) S0 model fitting curve based on 10 min training data; (c) S0 model fitting curve based on 1 min training data; (d) S1 model fitting surface based on 1 h training data; (e) S1 model fitting surface based on 10 min training data; (f) S1 model fitting surface based on 1 min training data

训练数据集之所以包含 1 h、10 min 和 1 min 三个时间尺度的辐射数据,是因为在日照测量和评估方面,通常基于 1 min 日照数据进行测量,以 1 h 日照数据和日累计日照数据进行日照评估和应用,为此,从三个时间尺度研究散射分数随晴空指数和大气光学质量的变化。单从 S0 模型或 S1 模型来看,表 1 中基于 10 min 和 1 min 数据求解出的参数比较接近,但这与基于 1 h 数据求解出的参数差别较大。将 S0 模型和 S1 模型进行对应比较时,不考虑 S1 模型 a_5 参数,基于 1 h 数据求解出的 S0 和 S1 模型的 $a_1 \sim a_4$ 参数接近,基于 10 min 和 1 min 数据求解出的 $a_1 \sim a_4$ 参数接近。二者差别在于,S0 模型是一维 Sigmoid 曲线,而 S1 模型是二维 Sigmoid 曲面。

参数不同,对应的模型形式不同。对具体模型而言,从图 1 可见,S0 模型定义域和值域介于 $(0,1)$,满足晴空指数 K_t 和散射分数 K_d 的取值范围,模型整体呈单调递减的 S 型;S1 模型中晴空指数 K_t 的取值范围为 $(0,1)$,大气光学质量 m 的取值范围为 $(0,6)$,函数值域为 $(0,1)$,模型整体随晴空指数 K_t 呈单调递减,大气光学质量 m 不影响散射分数的单调性。按照晴空指数 K_t 将天气划分为三种情况, $0 < K_t < 0.3$ 属于阴天天气, $0.3 \leq K_t < 0.7$ 属于多云天气, $0.7 \leq K_t < 1.0$ 属于晴天天气。对于 S0 模型,在阴天天气和晴天天气条件下,散射分数随晴空指数的变化较为平缓,而在多云天气下,散射分数随晴空指数近乎呈线性递减趋势,只是不同的模型参数在天气条件转换的节点位置处的斜率不同。对于 S1 模型,不同天气条件下散射分数随晴空指数变化的规律与 S0 模型基本一致,但是,在 S1 模型中,Sigmoid 曲面也并非平直曲面,而是随着大气光学质量存在一定扭曲,而且,散射分数主要集中于大气光学质量 $m < 2$ 以内。

4 性能评价与讨论

为了评价 Sigmoid 模型 S0 和 S1 计算散射分数的性能,利用验证数据集进行验证计算。因为本文提出的 Sigmoid 模型 S0 和 S1 各自有三组参数,分别根据 1 h、10 min 和 1 min 等三个时间尺度的辐射数据求得,因此在验证时,需要找出不同时间尺度的训练数据对构建模型的影响,同时,验证数据集考虑模型对不同季节和不同地域的适用性,故选取丽江站与训练数据同步观测的另一套设备于 2012 年 5 月测量的 10 min 和 1 h 辐射数据,以及喀左站、广

州站、武汉站和乌鲁木齐站于 2012 年 7 月测量的 1 h 数据和 12 月测量的 10 min 数据。由于 1 min 数据未取得,同时考虑到采用 10 min 数据构建模型与采用 1 min 数据构建模型类似,故采用 10 min 数据进行验证。本文引入相关系数、平均偏差、均方根误差、 t -统计量、偏度和峰度等一系列统计分析^[24,31],对实测散射分数与 S0 和 S1 模型计算出的散射分数进行统计比较,以评价 S0 和 S1 模型的计算性能。

相关系数 r 用于分析实测散射分数与 S0 和 S1 模型计算出的散射分数的线性相关性,即

$$r = \frac{\sum_{j=1}^N [K_{dc}(j) - \bar{K}_{dc}][K_{dm}(j) - \bar{K}_{dm}]}{\sqrt{\sum_{j=1}^N [K_{dc}(j) - \bar{K}_{dc}]^2} \sqrt{\sum_{j=1}^N [K_{dm}(j) - \bar{K}_{dm}]^2}}, \quad (18)$$

式中: N 为数据量; $K_{dc}(j)$ 为第 j 个由 S0 或 S1 模型计算出来的散射分数; \bar{K}_{dc} 为 N 个 K_{dc} 的平均值; $K_{dm}(j)$ 为第 j 个实测散射分数; \bar{K}_{dm} 为 N 个 K_{dm} 的平均值。 r 越接近于 1,证明模型的计算性能越好。

平均偏差(E_{MBD})用于分析 S0 和 S1 模型计算散射分数时的系统误差性能。 E_{MBD} 越接近于 0,证明模型计算散射分数的系统误差越小。当 E_{MBD} 大于 0 时,说明计算出的散射分数存在过拟合的现象;当 E_{MBD} 小于 0 时,说明计算出的散射分数存在欠拟合的现象。 E_{MBD} 的计算公式为

$$E_{MBD} = \frac{\sum_{j=1}^N [K_{dc}(j) - K_{dm}(j)]}{N}. \quad (19)$$

均方根误差(E_{RMSD})用于分析 S0 和 S1 模型计算散射分数的随机误差性能。 E_{RMSD} 值越小,证明模型计算散射分数的随机误差越小,精度越高。计算公式为

$$E_{RMSD} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N [K_{dc}(j) - K_{dm}(j)]^2}{N}}. \quad (20)$$

尽管 E_{MBD} 和 E_{RMSD} 能够分别从正确度和精密度两个方面评价 S0 和 S1 模型计算散射分数时的性能,但是 E_{MBD} 和 E_{RMSD} 存在着内在的局限性,例如,在整体过拟合或者欠拟合状态下,有可能出现 E_{RMSD} 非常小,但是 E_{MBD} 非常大的情况,另一方面,在拟合出的大量离散值可以正负抵消的情况下,很

小的 E_{MBD} 和很大的 E_{RMSD} 将同时存在。因此,本文引入 t -统计量,综合 E_{MBD} 和 E_{RMSD} 对模型计算散射分数时的性能进行评价, t -统计量越小,性能越好。计算公式为

$$t = \sqrt{\frac{(N-1)E_{\text{MBD}}^2}{E_{\text{RMSD}}^2 - E_{\text{MBD}}^2}} \quad (21)$$

另外,本文计算了实测散射分数与 S0 和 S1 模型计算出的散射分数残差的偏度(Skewness)和峰度(Kurtosis),给出了残差分布相对于标准正态分布的对称性和尖平程度,理想情况下,标准正态分布的偏度和峰度值都是 0,因此,偏度和峰度值越小,模型计算散射分数时的性能越好。

表 2 给出了基于 S0 和 S1 模型计算的散射分数与实测散射分数的统计结果,相关系数全部在 0.8 以上, E_{MBD} 在 ± 0.2 以内, E_{RMSD} 在 0.25 以内, t -统计量最小低至 0.0172。利用丽江站 2012 年 5 月的 1 h 和 10 min 数据进行验证时,可得由 10 min 训练数据构建的 S0 和 S1 模型的综合指标最佳,由 S0 模型根据 1 h 数据计算出的散射分数与实测散射分数的相关系数达 0.9396,由 S0 模型根据 10 min 数据计算出的散射分数与实测散射分数的相关系数达 0.9441,由 S0 模型根据 1 h 和 10 min 数据计算出的 t -统计量分别为 0.9097 和 1.7282,由 S1 模型以 1 h 数据计算出的散射分数与实测散射分数的相关系数达 0.9426,同样由 S1 模型以 10 min 数据计算出的散射分数与实测散射分数的相关系数达 0.9450,由 S1 模型根据 1 h 和 10 min 数据计算出的 t -统计量分别低至 1.6507 和 0.0910。由 10 min 训练数据构建的 S0 和 S1 模型的综合指标最佳,由 1 min 训练数据构建的 S0 和 S1 模型次之,并且与

由 10 min 训练数据所构建的模型接近,而由 1 h 训练数据构建的 S0 和 S1 模型在三者之中最差。利用喀左站在 2012 年 7 月的 1 h 辐射数据和 2012 年 12 月的 10 min 数据进行验证时,发现由 1 h 训练数据构建的 S0 和 S1 模型的综合指标最佳,由 S0 模型以 1 h 数据计算出的散射分数与实测散射分数的相关系数达 0.9088,由 S0 模型以 10 min 数据计算出的散射分数与实测散射分数的相关系数则达 0.9624,由 S0 模型以 1 h 和 10 min 数据计算出的 t -统计量分别为 1.7631 和 5.6638,由 S1 模型以 1 h 数据计算出的散射分数与实测散射分数的相关系数达 0.9255,由 S1 模型以 10 min 数据计算出的散射分数与实测散射分数的相关系数则达 0.9560,由 S1 模型以 1 h 和 10 min 数据计算出的 t -统计量分别为 5.8554 和 28.2822;由 10 min 与 1 min 训练数据构建的 S0 和 S1 模型的指标接近,相较于由 1 h 训练数据构建的模型,综合指标相对较差。从广州站 2012 年 7 月的 1 h 验证数据来看,相关系数最大仅为 0.8795,计算得到的散射分数较实测值整体偏低,虽然由 2012 年 12 月的 10 min 验证数据得到的相关系数在 0.9 以上,但是此时的 t -统计量偏大;基于武汉站的 1 h 数据和 10 min 数据的验证效果整体较好,相关系数在 0.9 以上,采用 S0 模型并基于武汉站 2012 年 12 月 10 min 验证数据得到的 t -统计量最小,低至 0.0172;乌鲁木齐站的 10 min 验证数据与广州站的 1 h 辐射数据类似,采用 S0 和 S1 模型得到的最大相关系数为 0.8569,而采用其 1 h 数据和 S0 和 S1 模型得到的相关系数在 0.9 以上,平均偏差和均方根误差较采用 10 min 数据得到的结果小,但是 t -统计量相对较大。综合比较来看,采

表 2 采用 S0 和 S1 模型计算的散射分数统计结果

Table 2 Statistical results of diffuse fraction calculated by S0 and S1 models

Model	Training data	Validating data	r	E_{MBD}	E_{RMSD}	t	Skewness	Kurtosis
S0	1-h data	1-h data collected in May, 2012 from Lijiang station	0.9298	0.0406	0.1279	5.8873	0.9493	3.7014
	10-min data		0.9396	0.0059	0.1147	0.9097	0.4265	2.9275
	1-min data		0.9386	0.0930	0.1168	1.4137	0.4543	2.8173
S1	1-h data	10-min data collected in May, 2012 from Lijiang station	0.9325	0.0417	0.1261	6.1695	0.7483	3.6499
	10-min data		0.9426	0.0105	0.1120	1.6507	0.2871	2.9649
	1-min data		0.9426	0.0141	0.1128	2.2154	0.3039	3.0297
S0	1-h data	10-min data collected in May, 2012 from Lijiang station	0.9347	0.0299	0.1221	10.9822	0.8327	3.7552
	10-min data		0.9441	-0.0045	0.1124	1.7282	0.2793	2.8329
	1-min data		0.9434	-7.9555×10^{-4}	0.1141	0.3028	0.3438	2.7508
S1	1-h data	10-min data collected in May, 2012 from Lijiang station	0.9364	0.0310	0.1209	11.5256	0.5323	3.6769
	10-min data		0.9450	2.3221×10^{-4}	0.1108	0.0910	0.0815	2.9916
	1-min data		0.9447	0.0043	0.1115	1.6576	0.0801	3.1446

表 2 续表

Model	Training data	Validating data	r	E_{MBD}	E_{RMSD}	t	Skewness	Kurtosis
S0	1-h data	1-h data collected in July, 2012 from Kazuo station	0.9088	-0.0128	0.1260	1.7631	0.2680	3.0993
	10-min data		0.9045	-0.0690	0.1492	8.9895	0.2047	2.4575
	1-min data		0.9065	-0.0630	0.1549	8.2535	0.2440	2.4820
1-h data	0.9255		-0.0389	0.1210	5.8554	-0.0042	3.0082	
S1	10-min data		0.9115	-0.0833	0.1533	11.1526	0.1538	2.4256
	1-min data		0.9136	-0.0864	0.1537	11.7033	0.1515	2.4872
S0	1-h data	10-min data collected in December, 2012 from Kazuo station	0.9624	0.0128	0.0838	5.6638	-0.3398	3.4018
	10-min data		0.9599	-0.0397	0.1054	14.8894	-0.6306	2.4770
	1-min data		0.9623	-0.0333	0.1013	12.7599	-0.5861	2.4319
1-h data	0.9560		-0.0680	0.1113	28.2822	-1.1048	4.6325	
S1	10-1-min data		0.9555	-0.0929	0.1379	33.3518	-0.6255	2.6717
	1-min data		0.9424	-0.0989	0.1421	35.5077	-0.7060	3.0019
S0	1-h data	1-h data collected in July, 2012 from Guangzhou station	0.8768	-0.0290	0.1263	4.3277	-0.2584	4.2410
	10-min data		0.8326	-0.0785	0.1624	10.1203	-0.1641	3.1330
	1-min data		0.8446	-0.0785	0.1565	10.6224	-0.1482	3.3136
1-h data	0.8795		-0.0240	0.1240	3.6184	-0.2628	4.0508	
S1	10-min data		0.8326	-0.0698	0.1590	8.9599	-0.1949	3.1146
	1-min data		0.8455	-0.0662	0.1514	8.9060	-0.2141	3.2803
S0	1-h data	10-min data collected in December, 2012 from Guangzhou station	0.9419	0.0141	0.0999	5.3019	-0.2218	3.2726
	10-min data		0.9391	-0.0407	0.1177	13.6514	-0.4412	2.3907
	1-min data		0.9420	-0.0342	0.1138	11.6802	-0.3992	2.4080
1-h data	0.9448		-0.0737	0.1209	28.4774	-1.0439	4.4547	
S1	10-1-min data		0.9400	-0.0964	0.1470	32.2035	-0.5575	2.6305
	1-min data		0.9283	-0.1167	0.1658	36.7535	-0.6546	2.9579
S0	1-h data	1-h data collected in July, 2012 from Wuhan station	0.9302	-0.0480	0.1203	7.3646	-0.2067	4.6677
	10-min data		0.9111	-0.0972	0.1569	13.3550	-0.1598	3.2799
	1-min data		0.9166	-0.0943	0.1517	13.4203	-0.0818	3.5798
1-h data	0.9304		-0.0455	0.1194	6.9757	-0.4988	4.7733	
S1	10-min data		0.9097	-0.0898	0.1534	12.1976	-0.3180	3.3477
	1-min data		0.9146	-0.0848	0.1475	11.8862	-0.3789	3.7344
S0	1-h data	10-min data collected in December, 2012 from Wuhan station	0.9296	0.0335	0.1196	10.7714	1.6448	8.0956
	10-min data		0.9165	-5.8784×10^{-5}	0.1257	0.0172	1.1780	7.8858
	1-min data		0.9217	0.0029	0.1230	0.8583	1.0676	7.1379
1-h data	0.9177		-0.0203	0.1255	6.0476	1.4370	9.5559	
S1	10-min data		0.9029	-0.0354	0.1387	9.7338	1.1877	8.2914
	1-min data		0.8941	-0.0473	0.1475	12.4817	0.8640	7.1872
S0	1-h data	1-h data collected in July, 2012 from Urumqi station	0.9483	0.0091	0.0999	3.1903	-0.5119	2.9069
	10-min data		0.9438	-0.0452	0.1280	13.1603	-0.6870	2.2919
	1-min data		0.9467	-0.0382	0.1230	11.3951	-0.6702	2.2984
1-h data	0.9479		-0.0823	0.1294	28.8043	-1.0369	4.0392	
S1	10-min data		0.9453	-0.1022	0.1583	29.5406	-0.6745	2.4640
	1-min data		0.9316	-0.1218	0.1761	33.4283	-0.6958	2.7061
S0	1-h data	10-1-min data collected in December, 2012 from Urumqi station	0.8482	-0.0832	0.1834	5.6485	-0.0880	2.4156
	10-min data		0.8258	-0.1376	0.2230	8.6948	-0.0104	2.0106
	1-min data		0.8318	-0.1292	0.2160	8.2784	-0.0151	2.0626
1-h data	0.8569		-0.0784	0.1773	5.4667	-0.1258	2.2557	
S1	10-min data		0.8312	-0.1315	0.2174	8.4246	-0.0445	1.9770
	1-min data		0.8394	-0.1216	0.2084	7.9730	-0.0731	2.0014

用 S0 和 S1 模型和源自于丽江站的验证数据计算出的散射分数相对较大,而采用喀左站、广州站、武汉站和乌鲁木齐站的验证数据计算出的散射分数相对较小,由其计算的散射分数的 E_{MBD} 普遍小于 0,可见模型 S0 和 S1 基于喀左站、广州站、武汉站和乌鲁木齐站的验证数据计算出的散射分数普遍小于其实际测量值,因此模型 S0 和 S1 对上述 4 站的散射分数计算处于欠拟合状态,这与训练数据集只包括丽江站的辐射数据有关,因此,丽江站的验证数据对模型性能的验证更有效,后续研究需选择跨地域站点数据构成训练数据集,以提高模型的适用性。

以丽江站和喀左站验证数据为例,图 2 和图 3 给出了利用上述站点验证数据集对不同参数的 S0 和 S1 模型的验证对比图,其中 S0 和 S1 模型的三组不同的参数分别对应由 1 h、10 min 和 1 min 辐射数据训练所得的结果。图 2(a)、(b) 分别是利用丽江站 2012 年 5 月 1 h 辐射数据和 10 min 数据并采用具有不同参数的 S0 模型计算出的散射分数与实

测散射分数的验证对比图,可见,由 10 min 和 1 min 数据训练所得的 S0 模型曲线较为接近,计算出的散射分数处于实测散射分数的中间位置,而由 1 h 数据训练所得的 S0 模型则与前两者差距较大,计算出的散射分数也偏大。图 2(c)、(d) 分别是利用喀左站 2012 年 7 月 1 h 辐射数据和 2012 年 12 月 10 min 数据并采用具有不同参数的 S0 模型计算出的散射分数与实测散射分数的验证对比图,与图 2(a)、(b) 不同的是,喀左站数据显示,由 1 h 训练数据所得的 S0 模型曲线更接近实测散射分数,而由 10 min 和 1 min 训练数据所得的 S0 模型曲线则整体偏低,从总体上看,S0 模型对喀左站验证数据整体存在欠拟合现象,其计算出的散射分数普遍低于实测值。

图 3(a)~(c) 和图 3(d)~(f) 分别是利用丽江站 2012 年 5 月的 1 h 辐射数据和 10 min 辐射数据并采用不同参数的 S1 模型计算出的散射分数与实测散射分数的验证对比图,其结果与 S0 模型在一维

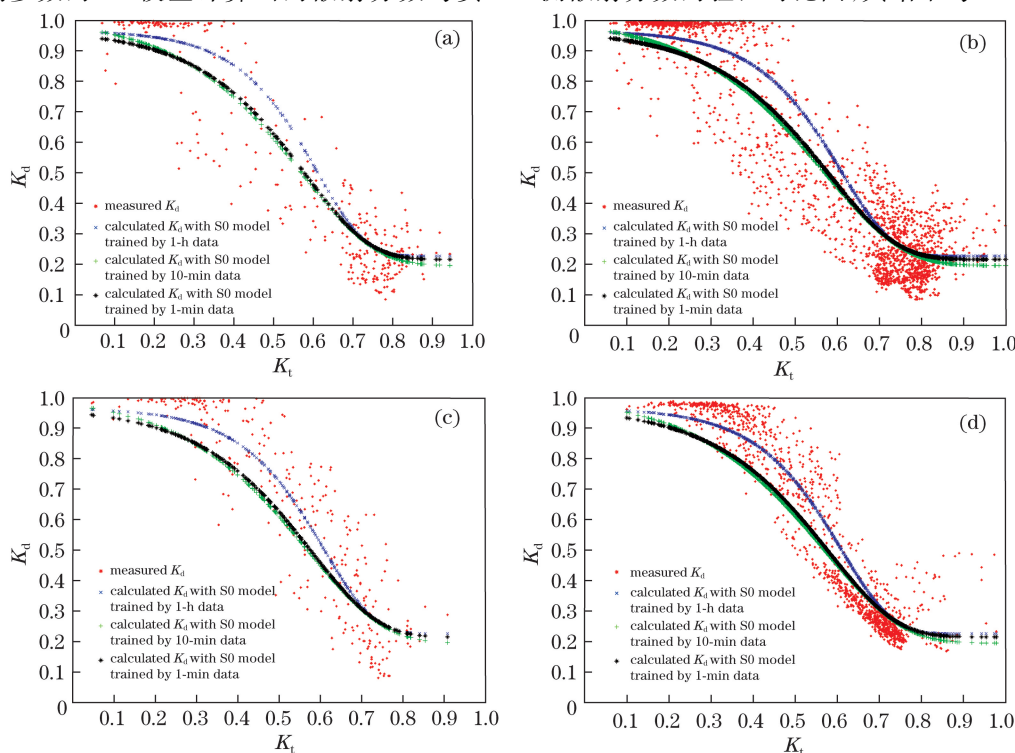


图 2 不同参数的 S0 模型的验证对比图。(a)采用丽江站 2012 年 5 月 1 h 辐射数据验证 S0 模型的对比如图;(b)采用丽江站 2012 年 5 月 10 min 辐射数据验证 S0 模型的对比如图;(c)采用喀左站 2012 年 7 月 1 h 辐射数据验证 S0 模型的对比如图;(d)采用喀左站 2012 年 12 月 10 min 辐射数据验证 S0 模型的对比如图

Fig. 2 Validation comparison diagrams for S0 models with different parameters. (a) Validation comparison diagram for S0 model using 1 h radiation data collected in May, 2012 at Lijiang station; (b) validation comparison diagram for S0 model using 10-min radiation data collected in May, 2012 at Lijiang station; (c) validation comparison diagram for S0 model using 1 h radiation data collected in July, 2012 at Kazuo station; (d) validation comparison diagram for S0 model using 10-min radiation data collected in December, 2012 at Kazuo station

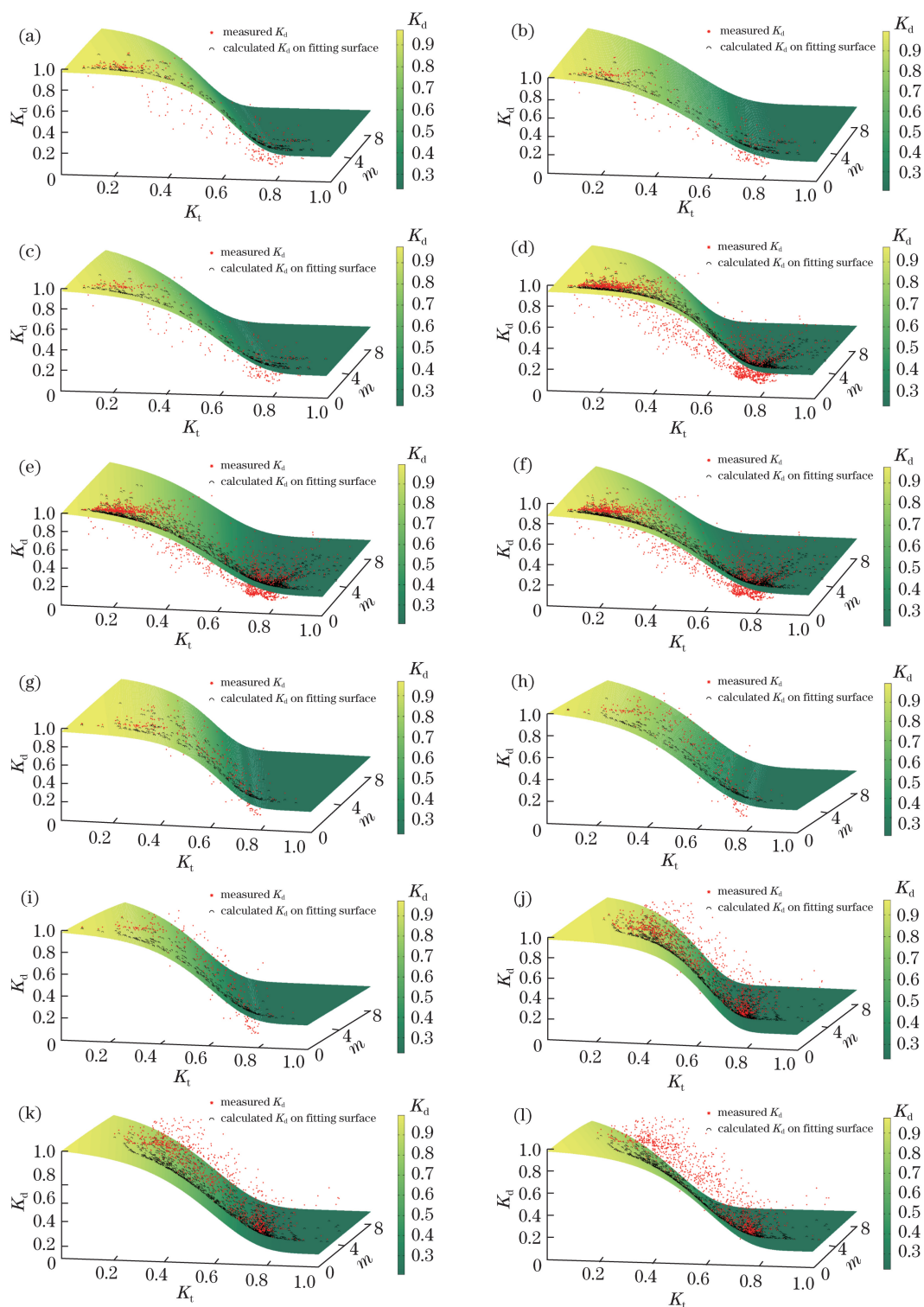


图 3 针对不同参数的 S1 模型的验证对比图。(a)~(c)采用丽江站 2012 年 5 月 1 h 辐射数据验证 S1 模型的对比如图;(d)~(f)采用丽江站 2012 年 5 月 10 min 辐射数据验证 S1 模型的对比如图;(g)~(i)采用喀左站 2012 年 7 月 1 h 辐射数据验证 S1 模型的对比如图;(j)~(l)采用喀左站 2012 年 12 月 10 min 辐射数据验证 S1 模型的对比如图

Fig. 3 Validation comparison diagrams for S1 models with different parameters. (a)–(c) Validation comparison diagrams for S1 model using 1-h data collected in May, 2012 at Lijiang station; (d)–(f) validation comparison diagrams for S1 model using 10-min data collected in May, 2012 at Lijiang station; (g)–(i) validation comparison diagrams for S1 model using 1-h data collected in July, 2012 at Kazuo station; (j)–(l) validation comparison diagrams for S1 model using 10-min data collected in December, 2012 at Kazuo station

空间表现类似,即由 10 min 和 1 min 训练数据所得的 S1 模型能更好地计算出散射分数分布;图 3(g)~(i)和图 3(j)~(l)分别是利用喀左站 2012 年 7 月的 1 h 辐射数据和 2012 年 12 月的 10 min 辐射数据并采用不同参数的 S1 模型计算出的散射分数与实测散射分数的验证对比图,从图中可以清晰看出,采用 S1 模型计算出的散射分数分布整体处于实测散射分数下方,低于实测散射值,表现为欠拟合状态。

5 结 论

为研究太阳辐射散射分数规律对日照时数测量的影响,基于大气辐射传输理论,利用泰勒级数展开,建立了散射分数与晴空指数和大气光学质量的 Sigmoid 数学模型。利用丽江站 1 h、10 min 和 1 min 三个不同时间尺度的辐射测量数据建立训练集,通过 Matlab 非线性拟合,建立了散射分数随晴空指数变化的一元 Sigmoid 模型 S0,以及散射分数随晴空指数和大气光学质量变化的二元 Sigmoid 模型 S1,给出了模型参数及其对应的一维曲线和二维曲面。通过选择丽江站和喀左站、广州站、武汉站和乌鲁木齐等 5 个不同站点的太阳辐射数据作为验证数据集,利用 Sigmoid 模型 S0 和 S1 分别计算了散射分数,分析了散射分数实测值与计算值之间的相关系数、平均偏差、均方根误差和 t -统计量等,形成的结论与展望如下:

1) 由 Sigmoid 模型 S0 和 S1 计算的散射分数值与实际测量值之间的相关系数在 0.8 以上, E_{MBD} 在 ± 0.2 以内, E_{RMSE} 在 0.25 以内, t -统计量最小低至 0.0172,这两个模型适用于天空散射分数模型的构建,为研究散射辐射分布规律对日照时数测量的影响研究提供了新的思路;

2) 丽江站验证数据显示,采用由 10 min 辐射数据构建的 Sigmoid 模型 S0 和 S1 计算散射分数的性能最佳,由 1 min 训练数据构建的模型性能次之,由 1 h 训练数据构建的模型性能最差,因此,在构建 Sigmoid 模型时,需有足够的数量,以保证所构建模型的有效性;

3) 喀左站、广州站、武汉站和乌鲁木齐站验证数据显示,用 Sigmoid 模型 S0 和 S1 计算的散射分数普遍低于喀左站实测散射分数,在跨地域方面,S0 和 S1 模型适用性不强,这与训练数据集未包含喀左站辐射数据有关,后续应引入多站点辐射数据作为训练数据,以进一步提高模型的适用性;

4) 统计分析结果显示,S0 模型的性能与 S1 模

型接近,引入的大气光学质量可在一定程度上反映散射辐射与总辐射和直接辐射之间的关系,能够更为直观地体现散射分数在一天中随时间的变化。

参 考 文 献

- [1] WMO. Guide to meteorological instruments and methods of observation[R]. Geneva: World Meteorological Organization, 2014: 274-276.
- [2] Ångström A. Solar and terrestrial radiation [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1924: 50, 121-125.
- [3] Prescott J A. Evaporation from a water surface in relation to solar radiation[J]. Transactions Royal Society South Australia, 1940, 64: 114-125.
- [4] Shang K F, Liu Y F, Wang D J, et al. Study of separation model of direct and diffuse solar radiation on horizontal surface in low latitude area [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2017, 38(12): 3332-3338.
尚凯锋, 刘艳峰, 王登甲, 等. 低纬度地区水平面太阳辐射的直散分离模型研究[J]. 太阳能学报, 2017, 38(12): 3332-3338.
- [5] Feng W, Dong H, Yang L, et al. Comparison of the fraction model of direct and diffuse solar radiation-Taking Beijing area as an example [J]. Journal of Civil, Architectural and Environmental Engineering, 2015, 37(1): 12-17.
冯巍, 董宏, 杨柳, 等. 太阳辐射直散分离模型比较研究: 以北京地区为例 [J]. 土木建筑与环境工程, 2015, 37(1): 12-17.
- [6] Ma N J, Li F, Bian Z Q, et al. Comparative study of solar beam-diffuse radiation separated model [J]. Water Resources and Power, 2016, 34(4): 211-214, 190.
马年骏, 李芬, 边泽强, 等. 太阳辐射直散分离模型的改进及应用 [J]. 水电能源科学, 2016, 34(4): 211-214, 190.
- [7] Fu C B, Dan L. Influence of intensified air pollution on the sunny diffuse radiation fraction in China [J]. Chinese Science Bulletin, 2018, 63(25): 2655-2665.
符传博, 丹利. 大气污染加剧对中国区域散射辐射比例的影响 [J]. 科学通报, 2018, 63(25): 2655-2665.
- [8] Zhang F, Qi L L, Ji W, et al. Influence of atmosphere in different areas on middle-far infrared radiation transmission [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(4): 0401002.
张芳, 齐琳琳, 吉薇, 等. 不同地域大气对中远红外辐射传输的影响 [J]. 光学学报, 2017, 37(4): 0401002.
- [9] Zhao Z J, Xu F Y, Xu S C, et al. Measurement of atmospheric infrared radiance and extinction characteristics [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(4):

0401004.
赵志军, 许方宇, 徐世春, 等. 大气红外辐射及消光特性实测研究[J]. 光学学报, 2018, 38(4): 0401004.
- [10] Hinssen Y B L, Knap W H. Comparison of pyranometric and pyrhelimetric methods for the determination of sunshine duration[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2007, 24(5): 835-846.
- [11] Chong W, Lü W H, Ding L, et al. Study on estimation method for sunshine duration using global radiation[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2017, 31(10): 1543-1548.
崇伟, 吕文华, 丁蕾, 等. 利用总辐射估算日照时数的方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(10): 1543-1548.
- [12] Ahwide F, Spena A, El-Kafrawy A. Correlation for the average daily diffuse fraction with clearness index and estimation of beam solar radiation and possible sunshine hours fraction in Sabha, Ghdames and Tripoli-Libya[J]. *APCBEE Procedia*, 2013, 5: 208-220.
- [13] Jamil B, Siddiqui A T. Generalized models for estimation of diffuse solar radiation based on clearness index and sunshine duration in India: applicability under different climatic zones[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2017, 157/158: 16-34.
- [14] Li D H W, Lam T N T, Chu V W C. Relationship between the total solar radiation on tilted surfaces and the sunshine hours in Hong Kong[J]. *Solar Energy*, 2008, 82(12): 1220-1228.
- [15] Vazquez M, Ruiz V, Perez R. The roles of scattering, absorption, and air mass on the diffuse-to-global correlations[J]. *Solar Energy*, 1991, 47(3): 181-188.
- [16] Munawwar S, Muneer T. Statistical approach to the proposition and validation of daily diffuse irradiation models[J]. *Applied Energy*, 2007, 84(4): 455-475.
- [17] Fu C B, Dan L, Chen Y L, et al. Trends of the sunshine duration and diffuse radiation percentage on sunny days in urban agglomerations of China during 1960—2005[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2015, 34: 206-211.
- [18] Khorasanizadeh H, Mohammadi K, Goudarzi N. Prediction of horizontal diffuse solar radiation using clearness index based empirical models: a case study [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41(47): 21888-21898.
- [19] Fan J L, Wu L F, Zhang F C, et al. Evaluation and development of empirical models for estimating daily and monthly mean daily diffuse horizontal solar radiation for different climatic regions of China [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 105: 168-186.
- [20] Dal Pai A, Escobedo J F, Dal Pai E, et al. Estimation of hourly, daily and monthly mean diffuse radiation based on MEO shadowring correction[J]. *Energy Procedia*, 2014, 57: 1150-1159.
- [21] Boland J, Ridley B, Brown B. Models of diffuse solar radiation[J]. *Renewable Energy*, 2008, 33(4): 575-584.
- [22] Ridley B, Boland J, Lauret P. Modelling of diffuse solar fraction with multiple predictors[J]. *Renewable Energy*, 2010, 35(2): 478-483.
- [23] Rojas R G, Alvarado N, Boland J, et al. Diffuse fraction estimation using the BRL model and relationship of predictors under Chilean, Costa Rican and Australian climatic conditions[J]. *Renewable Energy*, 2019, 136: 1091-1106.
- [24] Xing H Y, Chong W, Sha Y Z, et al. Model for correcting global solar irradiance measured with rotating shadowband radiometer[J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(4): 046001.
- [25] Kambezidis H D, Psiloglou B E, Synodinou B M. Comparison between measurements and models for daily solar irradiation on tilted surfaces in Athens, Greece[J]. *Renewable Energy*, 1997, 10(4): 505-518.
- [26] Younes S, Claywell R, Muneer T. Quality control of solar radiation data: present status and proposed new approaches[J]. *Energy*, 2005, 30(9): 1533-1549.
- [27] Schmutz W, Fehlmann A, Finsterle W, et al. Totalsolar irradiance measurements with PREMOS/PICARD [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2013, 1531: 624-627.
- [28] Gueymard C A. A reevaluation of the solar constant based on a 42-year total solar irradiance time series and a reconciliation of spaceborne observations [J]. *Solar Energy*, 2018, 168: 2-9.
- [29] Ruiz-Arias J A, Alsamamra H, Tovar-Pescador J, et al. Proposal of a regressive model for the hourly diffuse solar radiation under all sky conditions [J]. *Energy Conversion and Management*, 2010, 51(5): 881-893.
- [30] Rigollier C, Bauer O, Wald L. On the clear sky model of the ESRA: European Solar Radiation Atlas: with respect to the heliosat method [J]. *Solar Energy*, 2000, 68(1): 33-48.
- [31] Chen S, Hu M, Zeng R, et al. Measurement error of PM_{2.5} concentration based on side scattering lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(12): 1201003.
陈松, 胡森, 曾然, 等. 基于侧向散射激光雷达的PM_{2.5}浓度测量误差[J]. 光学学报, 2017, 37(12): 1201003.