

DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2022.0271

佟景哲,米家媛,倪长健,等.气溶胶散射吸湿增长因子对霾强度变化的响应特征[J].生态与农村环境学报,2023,39(8):1051–1058.

TONG Jing-zhe, MI Jia-yuan, NI Chang-jian, et al. Characteristics of Aerosol Scattering Hygroscopic Growth Factor under Different Haze Intensities[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2023, 39(8): 1051–1058.

气溶胶散射吸湿增长因子对霾强度变化的响应特征

佟景哲^{1,2}, 米家媛^{1,2}, 倪长健^{1,2}, 蒋梦姣^{1,2}, 杨寅山³, 陈云强^{4①} (1. 成都信息工程大学大气科学学院, 四川成都 610225; 2. 成都平原城市气象与环境四川省野外科学观测研究站, 四川成都 610225; 3. 成都市环境保护科学研究院, 四川成都 610072; 4. 四川省气象服务中心, 四川成都 610072)

摘要: 基于成都市 2017 年 10—12 月浊度计和黑碳仪的逐时观测数据, 结合该时段同时次的能见度 (V)、相对湿度 (H_R)、二氧化氮 (NO_2) 以及细颗粒物 ($\text{PM}_{2.5}$) 浓度监测资料, 利用光学综合法计算气溶胶散射吸湿增长因子, 分析霾强度 (轻微、轻度、中度和重度) 变化对气溶胶散射吸湿增长因子的影响。结果表明: (1) 不同霾强度下的气溶胶散射吸湿增长因子均服从对数正态分布, 该分布函数的数学期望与方差随霾强度的增加而增大。 (2) 气溶胶吸湿性随霾强度的增加而增强, 对轻微、轻度、中度和重度霾而言, 强吸湿模态占比分别为 6.2%、11.4%、50.8% 和 84.5%。 (3) 分别构建了轻微、轻度、中度和重度霾强度下的二次多项式散射吸湿增长模型, 对应全样本模拟值与实测值的决定系数 (R^2) 分别为 0.684、0.627、0.729 和 0.786, 即气溶胶散射吸湿增长模型对样本的选择非常敏感, 其泛化性能随霾强度的增加而增强。

关键词: 气溶胶散射吸湿增长因子; 对数正态分布; 强吸湿模态; 二次多项式; 霾强度

中图分类号: X513 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2023)08-1051-08

Characteristics of Aerosol Scattering Hygroscopic Growth Factor under Different Haze Intensities. TONG Jing-zhe^{1,2}, MI Jia-yuan^{1,2}, NI Chang-jian^{1,2}, JIANG Meng-jiao^{1,2}, YANG Yin-shan³, CHEN Yun-qiang^{4①} (1. College of Atmospheric Science, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. Chengdu Plain Urban Meteorology and Environment Observation and Research Station of Sichuan Province, Chengdu 610225, China; 3. Chengdu Academy of Environmental Sciences, Chengdu 610072, China; 4. Sichuan Meteorological Service Center, Chengdu 610072, China)

Abstract: Based on the hourly observation data from nephelometer and aethalometer, as well as the simultaneous data of visibility (V), relative humidity (H_R), nitrogen dioxide (NO_2) and fine particulate matter ($\text{PM}_{2.5}$) concentrations from October to December 2017 in Chengdu, aerosol scattering hygroscopic growth factors were calculated by optical synthesis method and the influence of haze intensity (slight, mild, moderate and severe) on the aerosol scattering hygroscopic growth factor was analyzed. The results show that: (1) the aerosol scattering hygroscopic growth factors all obeyed Lognormal distribution under different haze intensities, whose mathematic expectation and variance increased with the growing haze intensity. (2) The hygroscopicity of aerosol increased with the growing haze intensity, and proportion of strong hygroscopicity mode were 6.2%, 11.4%, 50.8% and 84.5% for slight, mild, moderate and severe haze. (3) The determination coefficients (R^2) of the simulated and measured values of all the samples corresponding to scattering hygroscopic growth model of quadratic polynomial under slight, mild, moderate and severe haze intensities were 0.684, 0.627, 0.729 and 0.786, respectively. The model of aerosol scattering hygroscopic growth was very sensitive to sample selection and its generalization performance increased with the growing of haze intensity.

Key words: aerosol scattering hygroscopic growth factor; Lognormal distribution; strong hygroscopicity mode; quadratic polynomial; haze intensity

在不同水汽条件下, 单个气溶胶粒径、质量、密度、折射指数等微物理参数会发生变化, 致使气溶胶粒子群宏观上的物理、化学及光学性质不断改变^[1-2]。气溶胶吸湿性不仅危害人体健康, 也是大

收稿日期: 2022-03-30

基金项目: 四川省科技厅应用基础研发项目(2021YJ0314); 国家重点研发计划(2018YFC0214004, 2018YFC1506006)

① 通信作者 E-mail: 179417919@qq.com

气环境、天气和气候过程的重要影响因子,在整个气溶胶科学研究中处于基础地位^[3-5]。

研究发现,弱吸湿性气溶胶主要由含碳和尘埃颗粒构成,而强吸湿性气溶胶主要包含无机盐、被氧化的有机物和盐与有机物的内部混合物^[6-9]。气溶胶散射吸湿增长因子不仅表征气溶胶吸湿的光学效应,也是计算气溶胶辐射强迫的重要参数^[10-11]。LIU 等^[12]利用 2006 年实验观测数据,得到广州地区城市型、海洋型和城市海洋混合型气溶胶的散射吸湿增长因子分别为 2.04 ± 0.28 、 2.68 ± 0.59 和 2.29 ± 0.28 。KIM 等^[13]对韩国高山郡的气溶胶吸湿增长特性进行研究,得到沙尘型和生物质燃烧型气溶胶散射吸湿增长因子分别为 2.00 ± 0.27 和 1.60 ± 0.20 。程雅芳^[14]基于外场实验观测值,发现随着相对湿度从 30% 增长到 80%~90%,散射系数可以增强 1.54~2.31 倍。另外,毛前军等^[15]观测不同粒径无机盐和碳质气溶胶粒子的吸湿增长发现,气溶胶粒径越小,其散射吸湿增长作用越明显。进一步研究指出,黑碳气溶胶通过吸附大量吸湿性物质(硫酸盐、硝酸盐和铵盐等),使黑碳气溶胶混合态、粒径以及化学组成显著变化,进而可能造成气溶胶吸湿光学效应的显著改变^[16-17]。张城语等^[18]基于相对湿度和黑碳质量浓度构建了成都地区气溶胶散射吸湿增长因子的双变量模型,显著提升了气溶胶散射吸湿增长因子的模拟精度。因此,气溶胶散射吸湿性增长因子的变化与气溶胶粒径分布、化学组成以及结构形态密切相关。

霾是发生在大气近地层中以能见度降低为代表的灾害性天气^[19]。研究表明,我国大气污染具有高度复合污染特征^[20-23],是一种新型的“霾化学”烟雾污染,二次气溶胶已成为大气气溶胶的主要部分,在重霾污染期间的占比可高达 80% 左右。邱坚等^[24]研究发现,霾污染期间水溶性组分 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 的质量浓度显著增加,是非霾期间的 2 倍。吴丹等^[25]指出随霾污染的加重,0.4~2.1 μm 粒径段颗粒物浓度迅速增加,细粒子占比增高。此外,相对湿度的增加可促进非均相化学反应发生,加速气态污染物向颗粒物转化,显著提升硫酸化率和氮氧化率,从而影响二次气溶胶浓度的生成^[26-27]。由此可见,在霾的生消演化过程中气溶胶的理化性质也发生显著的改变,这必然会影响到气溶胶吸湿的光学效应,其中的响应特征并不清晰。

成都地区近年来社会经济发展迅猛,大气污染物排放量居高不下,受制于静稳和高湿的气象条件,该区域一直是四川盆地秋冬季污染最严重的区

域之一^[28]。利用成都市 2017 年 10—12 月浊度计、黑碳仪、环境颗粒物监测仪的逐时观测数据和该时段同时次大气能见度(V)、相对湿度(H_R)、二氧化氮(NO_2)监测资料,通过光学综合法计算了气溶胶散射吸湿增长因子,系统探究了该因子对霾强度变化的响应关系,据此深化对霾污染演化机理与气溶胶吸湿光学效应复杂性的认知。

1 资料与方法

1.1 观测位置

观测点位于成都市环境保护科学研究院综合大楼楼顶($30^\circ 39' \text{ N}$, $104^\circ 02' \text{ E}$),距离地面高度 21 m,四周 2 km 内无高大建筑物,视野开阔。另外,观测点周围为集中居住区,5 km 范围内无明显工业大气污染源。

1.2 数据获取和相关仪器

浊度计和黑碳仪的逐时观测资料以及该时段同时次的环境气象监测数据(大气能见度、相对湿度、 NO_2 和 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度)相关仪器介绍如下:

(1)浊度计(AURORA-3000 型, Ecotech 公司, 澳大利亚)的观测波长为 525 nm, 采样频率为 $5 \text{ min} \cdot \text{次}^{-1}$, TSP 切割头, 检测范围 $>0.25 \text{ mm}^{-1}$, 每 24 h 进行零点检查, 24 h 零点漂移 $< \pm 1\%$, 每周用 R134a 气体进行跨度标定, 通过内部温湿度传感器来控制浊度计内部加热系统, 使得仪器内部腔室中气溶胶相对湿度控制在 40% 以下, 将其作为气溶胶的干燥状态。

(2)黑碳检测仪(AE-31 型, Magee Scientific 公司, 美国)获取等效黑碳质量浓度, 有 7 个测量通道, 波长分别为 370、470、520、590、660、880 和 950 nm, 数据采集频率为 $5 \text{ min} \cdot \text{次}^{-1}$ 。黑碳检测仪采用 TSP 切割头, 采样头与仪器连接中间增设硅胶管以减少水分对黑碳测量的影响。等效黑碳质量浓度统一用 C_{bc} 表示。

(3)大气能见度由能见度仪(SWS-200, Biral 公司, 英国)进行监测, 相对湿度由一体式气象站(WS600, LUFFT 公司, 德国)进行监测, NO_2 质量浓度由化学发光 NO 、 NO_2 - NO_x 分析仪(Thermo42i, 美国)监测, 大气中细颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度由环境颗粒物监测仪(GRIMM180, GRIMM 公司, 德国)实时测量, 数据频率为 $5 \text{ min} \cdot \text{次}^{-1}$ 。

1.3 数据质量控制和筛选

首先, 将上述监测数据统一处理成小时均值数据; 其次, 剔除了出现降水、沙尘以及大风现象所在日的全部数据、仪器烘干后相对湿度仍大于 40% 的

异常数据、超出界限值数据、连续无变化数据以及缺测数据;最后,根据 QX/T 113—2010《霾的观测和预报等级》^[29],在小时能见度数值低于 10 km 且环境相对湿度低于 80% 时判断为霾;当环境相对湿度在 80%~95% 之间且 $PM_{2.5}$ 质量浓度高于 $75 \mu g \cdot m^{-3}$ 也判断为霾,能见度 < 2 km 时定义为重度霾,能见度在 2~3 km 时定义为中度霾,能见度在 3~5 km 时定义为轻度霾,能见度在 5~10 km 时定义为轻微霾,据此筛选获得匹配样本 633 个。

1.4 气溶胶散射吸湿增长因子的计算

1.4.1 光学综合法

大气消光系数代表光线在大气中传播单位距离时的相对衰减率,当对比感阈值(κ)为 0.05 时,在 550 nm 波长处的环境大气消光系数与大气能见度的关系^[30]为

$$b_{\text{ext}} = \frac{1}{V} \times \ln \frac{1}{\kappa} \quad (1)$$

式(1)中, b_{ext} 为 550 nm 波长处的环境大气消光系数, km^{-1} ; V 为大气能见度, km。

环境条件下 550 nm 波长处的大气消光系数的计算公式^[31]为

$$b_{\text{ext}} = b_{\text{sp}} + b_{\text{ap}} + b_{\text{sg}} + b_{\text{ag}} \quad (2)$$

式(2)中, b_{sp} 和 b_{ap} 分别为环境条件下 550 nm 波长处的气溶胶散射系数和吸收系数; b_{sg} 和 b_{ag} 分别为环境条件下 550 nm 波长处大气的散射系数和吸收系数。

采用 AURORA-3000 型浊度计观测 525 nm 波长处干燥条件下的气溶胶散射系数^[32]。

$$b_{\text{sp}} = b_{\text{sp},525} \left(\frac{550}{525} \right)^{-\alpha} \quad (3)$$

式(3)中, b_{sp} 为由 $b_{\text{sp},525}$ 订正得到的 550 nm 波长处干燥条件下气溶胶散射系数, mm^{-1} ; α 为成都市 Angstrom 波长指数,取值 1.36。

先用 AE-31 型黑碳检测仪观测得到未经订正的 880 nm 波长处等效黑碳质量浓度,然后利用黑碳质量浓度反演 532 和 550 nm 波长处的吸收系数^[33]。

$$b_{\text{ap},532} = 8.28 C_{\text{BC}} + 2.23, \quad (4)$$

$$b_{\text{ap}} = b_{\text{ap},532} \left(\frac{550}{532} \right)^{-1} \quad (5)$$

式(4)~(5)中, $b_{\text{ap},532}$ 为利用黑碳质量浓度反演 532 nm 波长处的吸收系数, mm^{-1} ; C_{BC} 为等效黑碳质量浓度, $\mu g \cdot m^{-3}$; b_{ap} 为 550 nm 波长处的吸收系数, mm^{-1} 。参照 PENNDRF^[34]的研究成果,对应 550 nm 波长处的 b_{sg} 一般取值为 13 mm^{-1} 。参照 SLOANE 等^[35]的计算方法,对应 550 nm 波长处 b_{ag} 的计算仅

考虑 NO_2 的吸收。

$$b_{\text{ag}} = 0.33 C_{\text{NO}_2} \quad (6)$$

式(6)中, C_{NO_2} 为 NO_2 质量浓度, $10^{-9} g \cdot m^{-3}$ 。

利用光学综合法计算气溶胶散射吸湿增长因子(f):

$$f = \frac{b_{\text{ext}} - b_{\text{ap}} - b_{\text{ag}} - b_{\text{sg}}}{b_{\text{sp}}} \quad (7)$$

1.4.2 Sigmoid 函数参数化方案

利用成都地区气溶胶粒径吸湿增长与散射吸湿增长的关系,构建以气溶胶粒径吸湿增长因子 f_G 为自变量的 sigmoid 函数参数化方案,计算气溶胶散射吸湿增长因子 f ^[36]。

$$f = \frac{17.34}{1 + \exp[-2.43 \times (f_G - 2.15)]} \quad (8)$$

1.4.3 气溶胶散射吸湿增长模型

根据尹单丹等^[37]对幂函数、幂指数以及二次多项式 3 种气溶胶散射吸湿增长模型比对结果,二次多项式形式的散射吸湿增长模型可以最佳表征成都地区气溶胶散射吸湿增长因子随相对湿度的变化特征。

$$f(H_R) = a + b \times \left(1 - \frac{H_R}{100}\right)^{-1} + c \times \left(1 - \frac{H_R}{100}\right)^{-2} \quad (9)$$

式(9)中 a, b, c 为经验参数。

1.5 对数正态分布函数

对数正态分布在地质、水文、生物、材料、经济等研究领域已得到广泛的应用,其概率密度函数^[38]为

$$f(x) = \frac{\beta^\alpha}{\sqrt{2\pi}\sigma(x-a)} \times \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma^2} \times [\ln(x-a) - \mu]^2 \right\} \quad (10)$$

式(10)中, μ 为位置参数; σ 为形状参数; a 为保证值参数。对应的数学期望(E_x)、方差(D_x)的计算如式(11)~(12)所示,数学期望(E_x)与方差(D_x)决定了样本分布的均值与离散程度。

$$E_x = a + \exp \left(\mu + \frac{\sigma^2}{2} \right), \quad (11)$$

$$D_x = \exp(2\mu + \sigma^2) \times (\exp \sigma^2 - 1) \quad (12)$$

2 结果与讨论

2.1 气溶胶散射吸湿增长因子分布对霾强度变化的响应

图 1 给出了成都地区不同霾强度(轻微、轻度、中度和重度)条件下气溶胶散射吸湿增长因子的频

率直方图。由图 1 可见,不同霾强度条件下气溶胶散射吸湿增长因子均为右偏态分布,即相对正态分布曲线而言右侧偏长,左侧偏短;轻微、轻度、中度和重度霾下气溶胶散射吸湿增长因子的偏度分别

为 2.391、0.555、0.454 和 0.336,即气溶胶散射吸湿增长因子的右偏态程度随霾强度的增加而减小,说明气溶胶散射吸湿增长因子的散布范围随霾强度的增加而增大,样本的代表性也随之增强。

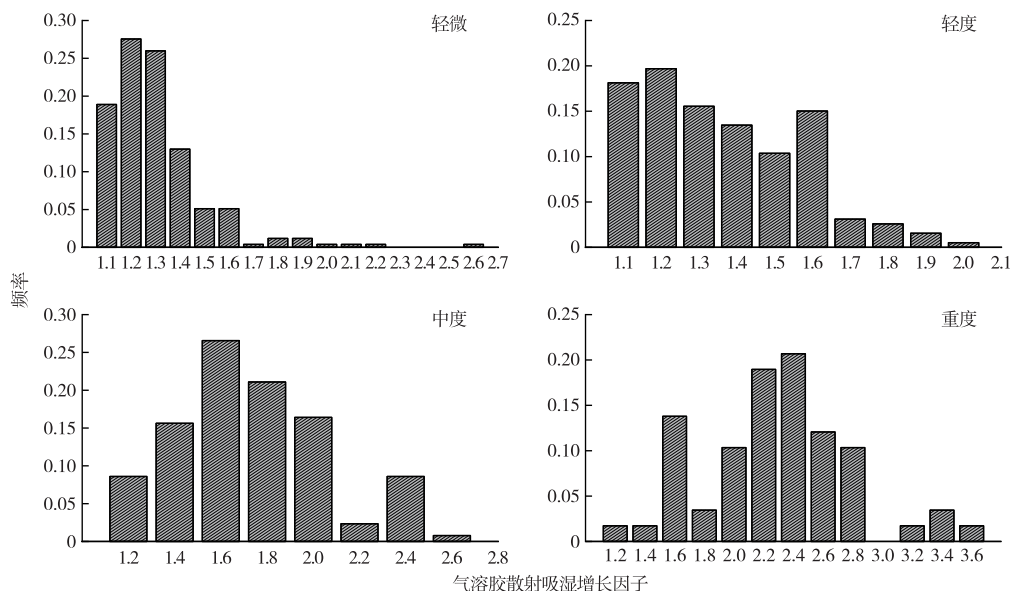


图 1 4 种霾强度条件下气溶胶散射吸湿增长因子的频率

Fig.1 The frequency histogram of aerosol scattering hygroscopic growth factor under four haze intensities

基于不同霾强度条件下气溶胶散射吸湿增长因子的右偏态分布特征,选取对数正态分布函数作为母体函数,据此对不同霾强度条件下气溶胶散射吸湿增长因子进行拟合分析。采用极大似然法进行参数估计,并借助 Kolmogorov-Smirnov 检验 (KS

检验)、相关系数(r)以及均方根误差 (RMSE) 验证对数正态分布函数的适用性。KS 检验、 r 以及 RMSE 的计算参见文献[39]。

不同霾强度条件下对数正态分布函数的拟合结果见表 1。

表 1 4 种霾强度条件下气溶胶散射吸湿增长因子对数正态分布的拟合结果

Table 1 The fitting results of Lognormal distribution of aerosol scattering hygroscopic growth factor under four haze intensities

霾强度	参数	估计值	P	r	RMSE	E_x	D_x
轻微	μ	-1.347	0.752	0.998	0.015	1.412	0.040
	σ	0.591					
	a	0.942					
轻度	μ	-0.772	0.690	0.994	0.044	1.514	0.052
	σ	0.429					
	a	0.804					
中度	μ	0.317	0.829	0.999	0.022	1.961	0.112
	σ	0.234					
	a	0.226					
重度	μ	1.534	0.796	0.997	0.029	2.660	0.246
	σ	0.106					
	a	-2.495					

μ 为位置参数, σ 为形状参数, a 为保证值参数。RMSE 为均方根误差, E_x 为数学期望, D_x 为方差。

由表 1 可知,不同霾强度条件下的气溶胶散射吸湿增长因子均服从对数正态分布,通过了显著性

水平 $\alpha=0.05$ 的 KS 检验 ($P>0.05$); 轻微、轻度、中度和重度霾强度条件下样本累积频率值与对应正态分布累积频率值的相关系数分别为 0.998、0.994、0.999 和 0.997, 对应均方根误差分别为 0.015、0.044、0.022 和 0.029。由此可见, 对数正态分布函数可以很好地表征不同霾强度条件下气溶胶散射吸湿增长因子的概率分布特征。进一步计算发现, 轻微、轻度、中度和重度霾强度条件下对数正态分布函数的数学期望分别为 1.412、1.514、1.961 和 2.660, 数学期望随霾强度的增加而增大; 在霾强度由中度上升至重度时增幅尤为明显, 增幅为 36%; 另外, 轻微、轻度、中度和重度霾强度条件下对数正态分布函数的方差分别为 0.040、0.052、0.112 和 0.246, 方差随霾强度的增加而增大; 与数学期望类似, 在霾强度由中度上升至重度时增幅尤为明显, 增幅为 119%。研究表明, 霾强度的加重通常与高湿背景 (RH 值>80%) 有很好的对应关系, 并且随霾强度增加, 硫酸、硫酸铵以及硝酸铵这类二次水溶性无机粒子增多, 小粒径粒子占比升高, 由此导致气溶胶吸湿能力增强, 表现为数学期望随霾强度的增加而增大^[15,26]; 另外, 在静稳气象条件下, 霾的演化与气溶胶多种理化过程有关, 具有复杂性与不确定性等特点^[19], 这是方差随霾强度增加而增大的原因。

由于环境气溶胶的化学组成与混合状态比较复杂, 根据粒子吸湿性的不同, 将其划分为不同吸湿模态, 以反映气溶胶吸湿性能的强弱^[42]。为了进一步分析气溶胶散射吸湿增长因子对数正态分布参数变化的影响, 基于文献[40]的研究成果, 按吸湿性的差异将气溶胶分为 3 种模态, 即几乎不吸湿模态、弱吸湿模态和强吸湿模态, 并根据可溶性体积比(ε)与气溶胶粒径吸湿增长因子(f_G)给出了不同气溶胶吸湿模态的判定标准(表 2)。利用成都地区气溶胶粒径吸湿增长与散射吸湿增长的关系, 得到气溶胶散射吸湿增长因子 f 在 3 种模态中的分布区间, f 在 1.00~1.17 时为几乎不吸湿模态, >1.17~1.57 时为弱吸湿模态, >1.57 时为强吸湿模态。基于气溶胶散射吸湿增长因子的对数正态分布函数, 分别计算了不同霾强度条件下 3 种模态的出现概率, 结果如图 2 所示。随霾强度的增加, 几乎不吸湿模态和弱吸湿模态的占比总体出现降低趋势; 在轻微和轻度霾强度下, 强吸湿模态占比分别为 6.2% 和 11.4%, 当霾强度上升至中度和重度时, 强吸湿模态占比快速增长至 50.8% 和 84.5%。

表 2 3 种气溶胶吸湿模态的判定标准
Table 2 Criteria for determining three aerosol hygroscopicity modes

指标	几乎不吸湿模态	弱吸湿模态	强吸湿模态
ε	<0.07	0.07~0.24	>0.24
f_G	1.00~1.07	1.07~1.20	>1.20
f	1.00~1.17	1.17~1.57	>1.57

ε 为可溶性体积比, f_G 为气溶胶粒径吸湿增长因子, f 为气溶胶散射吸湿增长因子。

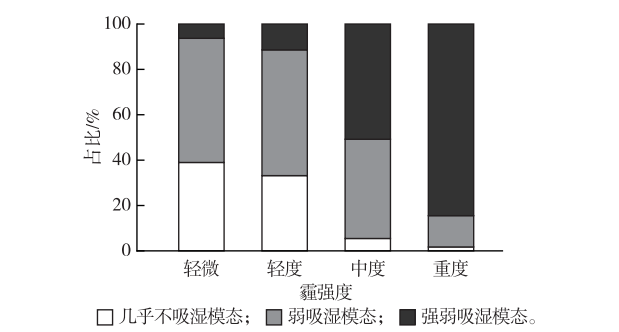


图 2 4 种霾强度条件下各吸湿模态的占比
Fig. 2 The proportion of each hygroscopicity mode under four haze intensities

综上所述可见, 成都地区气溶胶强吸湿模态占比随霾强度的增加而增大, 这与气溶胶散射吸湿增长因子对数正态分布的数学期望随霾强度增加而增大是一致的, 表明在霾的演化过程中气溶胶吸湿性与霾强度变化之间存在正反馈。

2.2 不同霾强度条件下气溶胶散射吸湿性增长因子模型的适用性

由 2.1 节的分析可知, 气溶胶散射吸湿增长因子的分布对霾强度的变化呈现出显著的响应特征, 由此导致不同霾强度条件下气溶胶散射吸湿增长模型的差异。利用二次多项式散射吸湿增长模型对不同霾强度条件下的气溶胶散射吸湿增长因子进行拟合, 相应参数和拟合结果如表 3 和图 3 所示。由图 3 可见, 轻微、轻度、中度和重度霾强度下二次多项式散射吸湿增长模型的确定系数 (R^2) 分别为 0.324、0.465、0.702 和 0.828, 残差平方和 (RSS) 分别为 7.089、4.544、4.157 和 2.478。这一分析结果表明, 随霾强度的增加, 对应气溶胶散射吸湿增长模型的拟合优度随之提升。由此可见, 成都地区气溶胶散射吸湿增长模型对不同霾强度条件下建模样本的选择非常敏感, 这无疑是模型不确定性的重要来源。

表 3 4 种霾强度条件下二次多项式散射吸湿增长模型的拟合参数

Table 3 Fitting parameters of scattering hygroscopic growth model of quadratic polynomial under four haze intensities

霾强度	二次多项式散射吸湿增长模型拟合参数		
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
轻微	1.083	-0.031	0.025
轻度	0.670	0.225	-0.011
中度	0.526	0.279	-0.011
重度	0.748	0.190	-0.003

将对应的二次多项式散射吸湿增长模型对全样本进行模拟。将轻微、轻度、中度和重度霾强度下的二次多项式散射吸湿增长模型分别称之为模型 1、模型 2、模型 3 和模型 4,拟合效果如图 4 所示。实测值与模型 1、模型 2、模型 3 和模型 4 模拟值的决定系数 (R^2) 分别为 0.684、0.627、0.729、0.786,残差平方和 (RSS) 分别为 30.134、35.619、25.865、20.408,即模型的泛化性能也随霾强度的增加而增强。

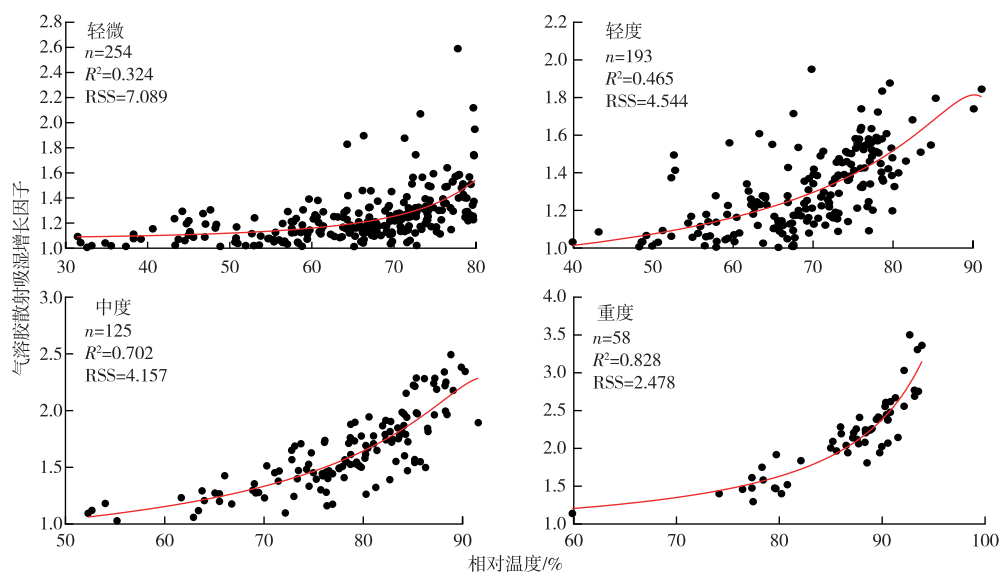


图 3 4 种霾强度条件下二次多项式散射吸湿增长模型的拟合结果

Fig. 3 The fitting results of scattering hygroscopic growth model of quadratic polynomial under four haze intensities

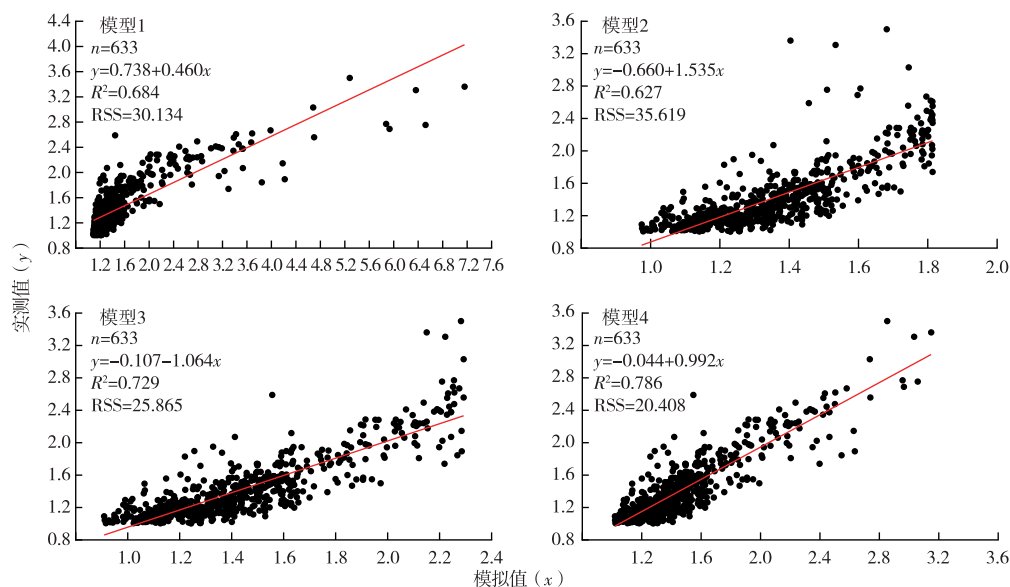


图 4 全样本的拟合结果

Fig. 4 Fitting results of the all sample

综上所述,由于气溶胶散射吸湿增长因子对数正态分布的数学期望和方差随霾强度的增加而增大,故在中度和重度霾强度条件下气溶胶散射吸湿增长因子的代表性更强,能更好地表征气溶胶吸湿增长特性,这也是对应的二次多项式散射吸湿增长模型模拟和泛化性能更优的主要原因。从另一层面而言,中度和重度霾强度下气溶胶散射吸湿增长因子的占比不仅是衡量样本代表性的重要标准,也是决定研究区气溶胶散射吸湿增长模型适用性的关键因素。

3 结论

(1)轻微、轻度、中度和重度霾强度下的气溶胶散射吸湿增长因子均服从对数正态分布,其数学期望与方差随霾强度的增加而增大。

(2)对轻微、轻度、中度和重度霾而言,强吸湿模态占比分别为6.2%、11.4%、50.8%和84.5%,气溶胶吸湿性随霾强度的增加而增强,表明在成都地区霾的演化过程中气溶胶吸湿性与霾强度变化之间存在正反馈。

(3)在轻微和轻度霾强度下构建的气溶胶散射吸湿增长二次多项式散射吸湿增长模型对应全样本模拟值和实测值的决定系数(R^2)分别为0.684和0.627,当霾强度上升至中度和重度时决定系数快速增长至0.729和0.786,即成都地区气溶胶散射吸湿增长模型对建模样本的选择非常敏感,其泛化性能随霾强度的增加而增强。

参考文献:

- [1] ZHANG Q N, ZHAO L J, CHEN S H, *et al.* Hygroscopic Property of Inorganic Salts in Atmospheric Aerosols Measured with Physisorption Analyzer [J]. *Atmospheric Environment*, 2021, 247: 118171.
- [2] HE Q S, ZHOU G Q, GENG F H, *et al.* Spatial Distribution of Aerosol Hygroscopicity and Its Effect on $PM_{2.5}$ Retrieval in East China [J]. *Atmospheric Research*, 2016, 170: 161–167.
- [3] ALBRECHT B A. Aerosols, Cloud Microphysics, and Fractional Cloudiness [J]. *Science*, 1989, 245(4923): 1227–1230.
- [4] STEINFELD J I. Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change [J]. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 1998, 40(7): 26.
- [5] CHARLSON R J, SCHWARTZ S E, HALES J M, *et al.* Climate Forcing by Anthropogenic Aerosols [J]. *Science*, 1992, 255(5043): 423–430.
- [6] WEINGARTNER E, GYSEL M, BALTENSBERGER U. Hygroscopicity of Aerosol Particles at Low Temperatures: 1. New Low-Temperature H-TDMA Instrument: Setup and First Applications [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, 36(1): 55–62.
- [7] SWIETLICKI E, ZHOU J C, BERG O H, *et al.* A Closure Study of Sub-micrometer Aerosol Particle Hygroscopic Behaviour [J]. *Atmospheric Research*, 1999, 50(3/4): 205–240.
- [8] ZHANG X Q, MCMURRAY P H, HERING S V, *et al.* Mixing Characteristics and Water Content of Submicron Aerosols Measured in Los Angeles and at the Grand Canyon [J]. *Atmospheric Environment Part A General Topics*, 1993, 27(10): 1593–1607.
- [9] SAXENA P, HILDEMAN L M, MCMURRY P H, *et al.* Organics Alter Hygroscopic Behavior of Atmospheric Particles [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100(D9): 18755.
- [10] PAN X L, YAN P, TANG J, *et al.* Observational Study of Influence of Aerosol Hygroscopic Growth on Scattering Coefficient over Rural Area near Beijing Mega-city [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, 9: 7519–7530.
- [11] YANG J, LI Z H, HUANG S H. Influence of Relative Humidity on Shortwave Radiative Properties of Atmospheric Aerosol Particles [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1999, 23(2): 239–247.
- [12] LIU X G, ZHANG Y H. Research on the Measurement of Aerosol Hygroscopic Growth Factor in Guangzhou City [J]. *China Environmental Science*, 2009, 29: 1128–1133.
- [13] KIM J, YOON S C, JEFFERSON A, *et al.* Aerosol Hygroscopic Properties during Asian Dust, Pollution, and Biomass Burning Episodes at Gosan, Korea in April 2001 [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40(8): 1550–1560.
- [14] 程雅芳. 珠江三角洲新垦地区气溶胶的辐射特性: 基于观测的模型研究 [D]. 北京: 北京大学, 2007. [CHENG Ya-fang. Radiation Characteristics of Aerosols in Newly Reclaimed Areas of Pearl River Delta: A Model Study Based on Observation [D]. Beijing: Peking University, 2007.]
- [15] 毛前军, 王莉. 典型雾霾粒子及团簇的散射吸湿增长特性 [J]. *光学学报*, 2020, 40(24): 184–192. [MAO Qian-jun, WANG Li. Scattering Hygroscopic Growth Characteristics of Typical Haze Particles and Clusters [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(24): 184–192.]
- [16] 谭天怡, 郭松, 吴志军, 等. 老化过程对大气黑碳颗粒物性质及其气候效应的影响 [J]. *科学通报*, 2020, 65(36): 4235–4250. [TAN Tian-yi, GUO Song, WU Zhi-jun, *et al.* Impact of Aging Process on Atmospheric Black Carbon Aerosol Properties and Climate Effects [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020, 65(36): 4235–4250.]
- [17] KHALIZOV A F, XUE H X, WANG L, *et al.* Enhanced Light Absorption and Scattering by Carbon Soot Aerosol Internally Mixed with Sulfuric Acid [J]. *The Journal of Physical Chemistry A*, 2009, 113(6): 1066–1074.
- [18] 张城语, 倪长健, 佟景哲, 等. 成都地区气溶胶散射吸湿增长因子双变量模型 [J]. *中国环境科学*, 2021, 41(12): 5467–5475. [ZHANG C Y, NI C J, TONG J Z, *et al.* Bivariate Model of Aerosol Scattering Hygroscopic Growth Factor in Chengdu [J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(12): 5467–5475.]
- [19] 张人禾, 李强, 张若楠. 2013年1月中国东部持续性强雾霾天气产生的气象条件分析 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2014, 44(1): 27–36. [ZHANG Ren-he, LI Qiang, ZHANG Ruo-nan.

- Analysis of Meteorological Conditions Caused by Persistent Heavy Smog in Eastern China in January 2013[J]. *Scientia Sinica (Terrestrial)*, 2014, 44(1): 27–36.]
- [20] YANG F, TAN J, ZHAO Q, *et al.* Characteristics of PM_{2.5} Speciation in Representative Megacities and across China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, 11(11): 5207–5219.
- [21] 楚碧武, 马庆鑫, 段凤魁, 等. 大气“霾化学”: 概念提出和研究展望[J]. *化学进展*, 2020, 32(1): 1–4. [CHU Bi-wu, MA Qing-xin, DUAN Feng-kui, *et al.* Atmospheric “Haze Chemistry”: Concept and Research Prospects[J]. *Progress in Chemistry*, 2020, 32(1): 1–4.]
- [22] 张小曳, 孙俊英, 王亚强, 等. 我国雾-霾成因及其治理的思考[J]. *科学通报*, 2013, 58(13): 1178–1187. [ZHANG Xiao-ye, SUN Jun-ying, WANG Ya-qiang, *et al.* Factors Contributing to Haze and Fog in China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(13): 1178–1187.]
- [23] ZHANG X Y, WANG Y Q, LIN W L, *et al.* Changes of Atmospheric Composition and Optical Properties Over Beijing 2008 Olympic Monitoring Campaign[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2009, 90(11): 1633–1652.
- [24] 邱坚, 田苗苗, 王晨波, 等. 冬季南京城区气溶胶化学组分和吸湿性观测[J]. *中国环境监测*, 2021, 37(3): 93–102. [QIU Jian, TIAN Miao-miao, WANG Chen-bo, *et al.* Observation on the Chemical Composition and Hygroscopicity of Aerosols in Nanjing Urban Area in Winter[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2021, 37(3): 93–102.]
- [25] 吴丹, 曹双, 汤莉莉, 等. 南京北郊大气颗粒物的粒径分布及其影响因素分析[J]. *环境科学*, 2016, 37(9): 3268–3279. [WU Dan, CAO Shuang, TANG Li-li, *et al.* Variation of Size Distribution and the Influencing Factors of Aerosol in Northern Suburbs of Nanjing[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(9): 3268–3279.]
- [26] QUAN J N, LIU Q, LI X, *et al.* Effect of Heterogeneous Aqueous Reactions on the Secondary Formation of Inorganic Aerosols during Haze Events[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 122: 306–312.
- [27] 刘凡, 谭钦文, 江霞, 等. 成都市冬季相对湿度对颗粒物浓度和大气能见度的影响[J]. *环境科学*, 2018, 39(4): 1466–1472. [LIU Fan, TAN Qin-wen, JIANG Xia, *et al.* Effect of Relative Humidity on Particulate Matter Concentration and Visibility during Winter in Chengdu[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(4): 1466–1472.]
- [28] LIAO T T, GUI K, JIANG W T, *et al.* Air Stagnation and Its Impact on Air Quality during Winter in Sichuan and Chongqing, Southwestern China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 635: 576–585.
- [29] QX/T 113—2010, 霾的观测和预报等级[S].
- [30] KOSCHMIEDER H. Theorie der Horizontalen Sichtweite[J]. *Beiträge zur Physik der Freien Atmosphäre*, 1924, 12: 33–53.
- [31] 杨寅山, 倪长健, 邓也, 等. 成都市冬季大气消光系数及其组成的特征研究[J]. *环境科学学报*, 2019, 39(5): 1425–1432. [YANG Yin-shan, NI Chang-jian, DENG Ye, *et al.* Characteristics of Atmospheric Extinction Coefficient and Its Components in Winter in Chengdu[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, 39(5): 1425–1432.]
- [32] 李梅芳, 叶芝祥. 基于太阳光度计的成都双流地区夏季气溶胶光学特性研究[J]. *成都信息工程学院学报*, 2014, 29(2): 213–216. [LI Mei-fang, YE Zhi-xiang. The Studies of Aerosol Optical Properties of Chengdu Shuangliu in Summer Based on the Sun Photometer[J]. *Journal of Chengdu University of Information Technology*, 2014, 29(2): 213–216.]
- [33] BERGSTROM R W, RUSSELL P B, HIGNETT P. Wavelength Dependence of the Absorption of Black Carbon Particles: Predictions and Results from the TARFOX Experiment and Implications for the Aerosol Single Scattering Albedo[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2002, 59(3): 567–577.
- [34] PENNDORF R. Tables of the Refractive Index for Standard Air and the Rayleigh Scattering Coefficient for the Spectral Region between 0.2 and 20.0 μ and Their Application to Atmospheric Optics[J]. *JOSA*, 1957, 47(2): 176–182.
- [35] SLOANE C S, WOLFF G T. Prediction of Ambient Light Scattering Using a Physical Model Responsive to Relative Humidity: Validation with Measurements from Detroit[J]. *Atmospheric Environment*, 1985, 19(4): 669–680.
- [36] 张智察, 倪长健, 张城语, 等. 气溶胶粒径吸湿增长与散射吸湿增长的关系[J]. *中国环境科学*, 2020, 40(12): 5198–5204. [ZHANG Zhi-cha, NI Chang-jian, ZHANG Cheng-yu, *et al.* Relationship between Particle Size Hygroscopic Growth and Scattering Hygroscopic Growth[J]. *China Environmental Science*, 2020, 40(12): 5198–5204.]
- [37] 尹单丹, 倪长健, 邓也, 等. 成都秋冬季气溶胶散射吸湿增长模型研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(4): 542–548. [YIN Dan-dan, NI Chang-jian, DENG Ye, *et al.* The Model of Aerosol Scattering Hygroscopic Growth during Autumn and Winter in Chengdu[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2020, 36(4): 542–548.]
- [38] 臧红霞, 郑华山, 陈长茵. 三参数对数正态分布最大熵参数估计方法探讨[J]. *水利科技与经济*, 2014, 20(5): 1–4. [ZANG Hong-xia, ZHENG Hua-shan, CHEN Chang-yin. Maximum Entropy Estimation Methods For LN3 Distribution Considering[J]. *Water Conservancy Science and Technology and Economy*, 2014, 20(5): 1–4.]
- [39] JI Z H, LIU X Q. Comparative Analysis of PM_{2.5} Pollution Risk in China Using Three-Dimensional Archimedean Copula Method[J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2019, 10(1): 2368–2386.
- [40] 李琦, 银燕, 顾雪松, 等. 南京夏季气溶胶吸湿增长因子和云凝结核的观测研究[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(2): 337–346. [LI Qi, YIN Yan, GU Xue-song, *et al.* An Observational Study of Aerosol Hygroscopic Growth Factor and Cloud Condensation Nuclei in Nanjing in Summer[J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(2): 337–346.]

作者简介: 佟景哲(1998—), 男, 满族, 吉林通化人, 研究方向为大气物理学与大气环境。E-mail: tongjz1998@163.com

(责任编辑: 陈 昕)