

# 两种气溶胶消光吸湿增长因子的适用性分析

张智察<sup>1,2\*\*</sup>, 倪长健<sup>1,2\*</sup>, 尹丹丹<sup>1,2</sup>, 张莹<sup>1,2</sup>, 邓也<sup>3</sup>, 杨寅山<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都 610225;

<sup>2</sup>高原大气与环境四川省重点实验室, 四川 成都 610225;

<sup>3</sup>成都市环境保护科学研究院, 四川 成都 610072

**摘要** 分别以干燥环境下的平均单位质量气溶胶消光系数和湿环境下烘干气溶胶的散射消光系数为基准, 提出了与之对应的两种气溶胶消光吸湿增长因子  $f_1(R_H)$  和  $f_2(R_H)$ 。基于成都市 2017 年 10—12 月浊度仪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、相对湿度以及  $\text{NO}_2$  和  $\text{PM}_{10}$  的质量浓度), 针对上述两种气溶胶消光吸湿增长因子进行了系统的对比分析。主要结论如下: 1)  $f_1(R_H)$  和  $f_2(R_H)$  均能表征气溶胶吸湿性的光学效应, 二者的判决系数为 0.90(通过了  $\alpha=0.01$  的显著性检验); 2) 多模型的比对结果表明, 二次多项式函数较好地拟合了  $f_1(R_H)$  和  $f_2(R_H)$  随相对湿度的变化特征; 3)  $f_1(R_H)$  和  $f_2(R_H)$  的均值之比随相对湿度的增加而增大。进一步研究指出, 烘干气溶胶的散射消光系数对相对湿度变化的显著响应关系是导致  $f_1(R_H)$  和  $f_2(R_H)$  非一致性演化的根本原因。

**关键词** 大气光学; 气溶胶消光; 吸湿增长因子; 判决系数; 二次多项式函数; 非一致性

中图分类号 P404

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.090103

## Applicability of Two Kinds of Aerosol Extinction Hygroscopic Growth Factors

Zhang Zhicha<sup>1,2\*\*</sup>, Ni Changjian<sup>1,2\*</sup>, Yin Dandan<sup>1,2</sup>,

Zhang Ying<sup>1,2</sup>, Deng Ye<sup>3</sup>, Yang Yinshan<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> College of Atmospheric Science, Chengdu University of Information Technology, Chengdu, Sichuan 610225, China;

<sup>2</sup> Plateau Atmospheres and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu, Sichuan 610225, China;

<sup>3</sup> Chengdu Academy of Environmental Sciences, Chengdu, Sichuan 610072, China

**Abstract** Based on the references of average aerosol extinction coefficient per unit mass concentration in dry environment and baked aerosol scattering extinction coefficient in wet environment respectively, corresponding the two kinds of aerosol extinction hygroscopic growth factor, i. e.  $f_1(R_H)$  and  $f_2(R_H)$ , had been proposed. By utilizing the hourly data from nephelometer and aethalometer, as well as the coincidental environmental and meteorological data, including atmospheric visibility, relative humidity,  $\text{NO}_2$  mass concentration, and  $\text{PM}_{10}$  mass concentration, in Chengdu from October 2017 to December 2017, the comparative study on the two kinds of aerosol extinction hygroscopic growth factors was systematically carried out. The results showed that both  $f_1(R_H)$  and  $f_2(R_H)$  could well characterize the optical effect of aerosol hygroscopicity, and their coefficient of determination was 0.90 (passed the significance test of  $\alpha=0.01$ ). By multi-model comparison, the quadratic polynomial function was proved to best fit the variation of both  $f_1(R_H)$  and  $f_2(R_H)$  with relative humidity. The ratio of average  $f_1(R_H)$  to average  $f_2(R_H)$  increased with the increase of relative humidity. Further research indicated that the significant response of baked aerosol scattering extinction coefficient to the variation of relative humidity was fundamental for the above inconsistency between  $f_1(R_H)$  and  $f_2(R_H)$ .

**Key words** atmospheric optics; aerosol extinction; hygroscopic growth factor; coefficient of determination;

收稿日期: 2019-09-05; 修回日期: 2019-09-14; 录用日期: 2019-09-24

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC0214004, 2018YFC1506006)、四川省科技厅重点研发项目(2018SZ0287, 2018SZDZXX23)

\* E-mail: ncj1970@163.com; \*\* E-mail: zzc19950610@163.com

quadratic polynomial function; inconsistency

OCIS codes 010.1110; 010.1290; 010.1310

## 1 引言

气溶胶是指悬浮于大气中的固体和液体微粒共同组成的多相体系。由于气溶胶中的硫酸盐、硝酸盐、铵盐和海盐等无机成分及部分有机物粒子具有吸湿性,在不同水汽条件下,其粒径、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<sup>[1-2]</sup>。大气气溶胶的吸湿性是联系气溶胶微物理和化学参数的纽带,也是气溶胶基本光学性质的决定性参数,相关研究具有重要的理论意义和应用价值<sup>[3-5]</sup>。

气溶胶消光系数包括散射系数和吸收系数,前者不仅是气溶胶消光的主体,还对湿度变化具有极高的敏感性<sup>[6-8]</sup>。研究表明<sup>[9]</sup>,在90%的高相对湿度(RH,  $R_H$ )条件下,硫酸铵的光散射性比低相对湿度条件下高5倍。因此,一般以湿环境下烘干气溶胶的散射消光系数为基准,利用散射消光吸湿增长因子作为气溶胶吸湿性光学效应的表征,常用并联浊度计的方法进行测量<sup>[10-11]</sup>。Xu等<sup>[12]</sup>利用长江三角洲地区临安区域大气本底监测站观测资料,得到的散射消光吸湿增长因子为1.7~2.0。刘新罡等<sup>[13]</sup>针对北京地区相关研究表明,散射消光吸湿增长因子在 $R_H < 80\%$ 时较为平缓,而在大于80%时,散射消光吸湿增长因子则出现突发性增长。刘新罡等<sup>[14]</sup>针对珠三角地区的进一步研究指出,在 $R_H = 80\%$ 时,海洋型气溶胶的散射消光吸湿增长因子为2.68,明显高于同等湿度条件下城市气溶胶的2.04,即气溶胶类型的变化对气溶胶的吸湿性存在重要影响。另外,崔蕾等<sup>[15]</sup>通过对成都地区单位质量大气消光系数随相对湿度变化特征的研究发现,40%的相对湿度是气溶胶干湿状态的临界点,并在此基础上利用“统计一致性原则”提出了近地面颗粒物浓度的湿度订正新算法。杨寅山等<sup>[16]</sup>基于成都地区颗粒物潮解点为40%这一结论,进一步探究了水汽对大气消光系数及其组分的影响。陶金花等<sup>[17]</sup>以干燥环境下( $R_H \leq 40\%$ )的平均单位质量气溶胶消光系数为基准,构建了另一种气溶胶消光吸湿增长因子,并系统地探讨了该因子在北京地区的演化特征及其模型的适用性问题。

由上述分析可见,基于湿环境下烘干气溶胶的

散射消光系数和干燥环境下的平均单位质量气溶胶消光系数的不同考量,存在与其对应的两种气溶胶消光吸湿增长因子。本文利用成都市2017年10—12月浊度仪和黑碳仪的逐时观测资料以及同时次的环境气象监测数据(大气能见度、相对湿度和NO<sub>2</sub>质量浓度),针对上述两种气溶胶消光吸湿增长因子进行了系统的比对分析,为气溶胶吸湿性光学效应的科学表征奠定坚实的基础。

## 2 资料和方法

### 2.1 资料介绍

本文使用资料包括成都市2017年10—12月浊度仪和黑碳仪的逐时观测资料,以及同时次的环境气象监测数据(大气能见度、相对湿度以及NO<sub>2</sub>和PM<sub>10</sub>质量浓度)。其中,AURORA3000型浊度仪观测波长为520 nm,采样频率为每次5 min,总悬浮颗粒物(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1,1,1,2-四氟乙烷(R134 a)气体进行跨度标定,通过内部温湿度传感器来控制浊度仪内部加热系统,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”状态,并观测烘干气溶胶的散射系数;AE-31型黑碳检测仪观测黑碳质量浓度,数据采集频率为每次5 min。黑碳仪采用TSP切割头,采样头与仪器连接中间增设硅胶管减少水分对黑碳测量的影响。浊度仪和黑碳仪的监测资料经过质量控制后统一处理为小时均值数据。另外,气象要素(大气能见度和相对湿度由德国LUFFTWS600一体式气象站进行监测;气态污染物NO<sub>2</sub>质量浓度由化学发光NO、NO<sub>2</sub>-NO<sub>x</sub>分析仪(Thermo42i, ThermoFisher Scientific,美国)进行监测;PM<sub>10</sub>质量浓度采用微量振荡天平(ThermoTEOMSeries1405, Thermo Fisher Scientific,美国)进行测量。

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

### 2.2 气溶胶消光吸湿增长因子的计算方法

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 $\epsilon = 0.05$ 时,在550 nm波长处环境大气消光系数 $b_{\text{ext},550 \text{ nm}}(R_H)$

( $\text{km}^{-1}$ )与大气能见度  $V(\text{km})$ 的关系如下<sup>[18]</sup>

$$b_{\text{ext},550\text{ nm}}(R_H) = \frac{1}{V} \cdot \ln \frac{1}{\epsilon}. \quad (1)$$

气溶胶的消光是大气消光的主体,在成都地区秋冬季其占比可达 96% 以上<sup>[16]</sup>,故可将大气消光系数近似作为气溶胶消光系数。为消除质量浓度差别对大气消光的影响,按下式计算单位质量气溶胶消光系数( $\text{m}^2/\mu\text{g}$ )。

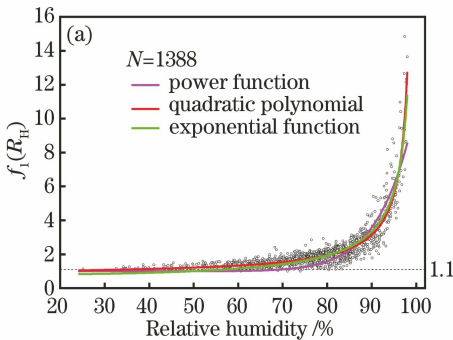
$$E_{\text{ext},550\text{ nm}}(R_H) = \frac{b_{\text{ext},550\text{ nm}}(R_H)}{C_{\text{PM}_{10}}}, \quad (2)$$

式中: $C_{\text{PM}_{10}}$ 为  $\text{PM}_{10}$ 的质量浓度( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )。

研究表明<sup>[17,19]</sup>,当  $R_H \leq 40\%$  时,大气中的气溶胶均以固态颗粒物状态存在,粒径吸湿增长很小,因而可忽略水汽对气溶胶光学效应的影响。干燥环境下( $R_H \leq 40\%$ )的单位质量气溶胶消光系数  $E_{\text{ext},550\text{ nm}}(R_{\text{dry}})$ ( $\text{m}^2/\mu\text{g}$ )的计算同(2)式,并以干燥环境下的平均单位质量气溶胶消光系数  $\bar{E}_{\text{ext},550\text{ nm}}(R_{\text{dry}})$ ( $\text{m}^2/\mu\text{g}$ )为基准,提出了气溶胶消光吸湿增长因子  $f_1(R_H)$ 的计算方法<sup>[18]</sup>,

$$f_1(R_H) = \frac{E_{\text{ext},550\text{ nm}}(R_H)}{\bar{E}_{\text{ext},550\text{ nm}}(R_{\text{dry}})}. \quad (3)$$

气溶胶吸湿性的光学效应主要体现在对其散射消光的影响上,以湿环境下烘干气溶胶的散射消光系数( $\text{Mm}^{-1}$ )为基准,据此可以提出另一种气溶胶消光吸湿增长因子  $f_2(R_H)$ 的计算方法<sup>[20]</sup>,



$$f_2(R_H) = \frac{b_{\text{sp},550\text{ nm}}(R_H)}{b_{\text{sp},550\text{ nm}}(R_{\text{dry}})}, \quad (4)$$

式中: $b_{\text{sp},550\text{ nm}}(R_{\text{dry}})$ 为 550 nm 处烘干气溶胶的散射消光系数,计算方案参见文献<sup>[19]</sup>; $b_{\text{sp},550\text{ nm}}(R_H)$ 为环境条件下 550 nm 处气溶胶散射消光系数,采用间接法进行计算<sup>[20]</sup>。

针对上述监测资料,剔除出现降水、沙尘、大风以及数据缺失时段的全部数据,经严格质量控制得到 1388 组研究样本。

### 3 结果和讨论

#### 3.1 两种气溶胶消光吸湿增长因子的变化特征分析

基于本文的 1388 组研究样本,绘制了  $f_1(R_H)$  和  $f_2(R_H)$  随相对湿度变化的散点图,如图 1 所示。由图 1 可见,两种气溶胶消光吸湿增长因子  $f_1(R_H)$  和  $f_2(R_H)$  随相对湿度的增加而增大, $f_1(R_H)$  和  $f_2(R_H)$  之间的判决系数( $R^2$ )为 0.90,二者之间存在很高的正相关(通过了  $\alpha=0.01$  的显著性检验),对应的散点图见图 2。针对图 1 的进一步诊断发现,在中低相对湿度区间( $R_H < 85\%$ ),吸湿增长因子  $f_1(R_H)$  和  $f_2(R_H)$  随相对湿度的增加均表现为平缓增长,而在高湿度区间( $R_H \geq 85\%$ ),二者则随相对湿度的增加共同呈现出快速增长,这一结论与在北京地区、珠三角以及长三角的相关分析结果总体一致<sup>[14,17,21]</sup>。

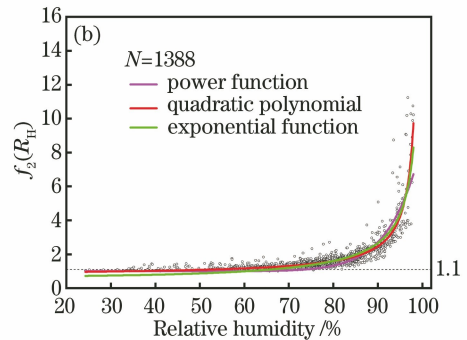


图 1 3 种气溶胶消光吸湿增长模型的拟合曲线。(a)  $f_1(R_H)$ ; (b)  $f_2(R_H)$

Fig. 1 Fitting curves of three kinds of models for aerosol extinction hygroscopic growth. (a)  $f_1(R_H)$ ; (b)  $f_2(R_H)$

由于吸湿增长因子  $f_1(R_H)$  和  $f_2(R_H)$  随相对湿度的增加均呈现出连续平滑增长之特征(图 1),与之对应的吸湿增长模型主要有三种。

第一种是幂函数形式的吸湿性增长模型。实验结果表明<sup>[22-23]</sup>,该模型对于拟合含碳气溶胶  $f(R_H)$  的效果较好,

$$f(R_H) = 1 + a \cdot \left(\frac{R_H}{100}\right)^b, \quad (5)$$

式中: $a$  和  $b$  为经验参数。

第二种是多项式形式的吸湿性增长模型。Kasten<sup>[24]</sup>基于气溶胶与水汽的平衡增长理论得到了吸湿性增长的半经验模型,Song 等<sup>[25]</sup>对这一模型进行了改进,提出了二次多项式形式的吸湿增长模型,

$$f(R_H) = a + b \cdot \left(1 - \frac{R_H}{100}\right)^{-1} + c \cdot \left(1 - \frac{R_H}{100}\right)^{-2}, \quad (6)$$

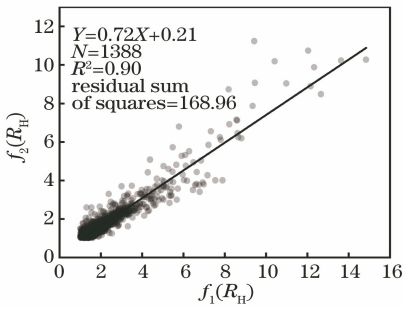


图 2  $f_1(R_H)$ 和  $f_2(R_H)$ 的散点图

Fig. 2 Scatter plots of  $f_1(R_H)$  and  $f_2(R_H)$

式中:  $c$  为经验参数。

第三种是幂指数形式的吸湿增长模型。

$$f(R_H) = a \cdot \left(1 - \frac{R_H}{100}\right)^{-b \cdot \frac{R_H}{100}} \quad (7)$$

表 1 3 种气溶胶消光吸湿增长模型拟合结果的对比

Table 1 Fitting results comparison of three kinds of models for aerosol extinction hygroscopic growth

Hygroscopic growth factor	Model	Parameter			Coefficient of determination $R^2$	Residual sum of squares
		$a$	$b$	$c$		
$f_1(R_H)$	Power function	7.62	14.10	—	0.74	413.78
	Quadratic polynomial	0.74	0.17	0.0002	0.82	298.83
	Exponential function	0.70	0.65	—	0.79	333.04
$f_2(R_H)$	Power function	9.74	12.62	—	0.78	620.43
	Quadratic polynomial	0.73	0.24	0.00001	0.87	356.76
	Exponential function	0.79	0.70	—	0.86	391.65

气溶胶吸湿性增长因子是表征气溶胶吸湿性特征的关键参数,并在利用卫星的气溶胶光学厚度(AOD)反演地面颗粒物质量浓度中有着重要的应用价值。为减小研究样本随机性对分析结果的影响,计算了两种气溶胶消光吸湿增长因子的均值  $\bar{f}_1(R_H)$ 和  $\bar{f}_2(R_H)$ ,二者随相对湿度的变化如图 3 所示。基于该图放大图像的进一步诊断发现,  $\bar{f}_1(R_H)$ 和  $\bar{f}_2(R_H)$  分别在  $[30\%, 39\%]$ 和  $[30\%, 37\%]$ 相对湿度区间内均围绕 1 呈现出一定的弱波动特征,对应的变差系数分别为 0.017 和 0.048;之

该模型已在武清等地秋冬季的相关研究中取得了很好的应用效果<sup>[26]</sup>。

利用上述三种吸湿增长模型分别对  $f_1(R_H)$ 和  $f_2(R_H)$ 随相对湿度变化的散点进行拟合,如图 1 所示。从图 1 可以看出,三种吸湿增长模型的拟合结果整体上都能较好地反映气溶胶吸湿增长因子  $f_1(R_H)$ 和  $f_2(R_H)$ 随相对湿度的变化特征。为明晰三种模型的适用性,进一步计算了相应的判决系数和残差平方和,见表 1。由表 1 可知,  $f_1(R_H)$ 和  $f_2(R_H)$ 的拟合结果具有很好的一致性,即幂函数的拟合效果相对最差,幂指数较好,二次多项式气溶胶消光吸湿性增长模型可以最佳地表征成都地区秋冬季  $f_1(R_H)$ 和  $f_2(R_H)$ 随相对湿度的变化特征。

后随相对湿度的增大,  $\bar{f}_1(R_H)$ 和  $\bar{f}_2(R_H)$ 在统计形态上则发生了显著的变化,气溶胶消光出现了明显的吸湿性增长。因此,相对湿度为 39%和 37%是分别基于  $\bar{f}_1(R_H)$ 和  $\bar{f}_2(R_H)$ 而得到的气溶胶吸湿增长的临界点。这一结果与成都市平均单位质量大气消光系数在相对湿度为 40%时存在突变的结论总体一致,也与烘干气溶胶对相对湿度的要求相吻合<sup>[15,20]</sup>,临界点之间的微小偏差可能与颗粒物吸湿增长的计算方法以及研究时段内气溶胶的化学组分有关。

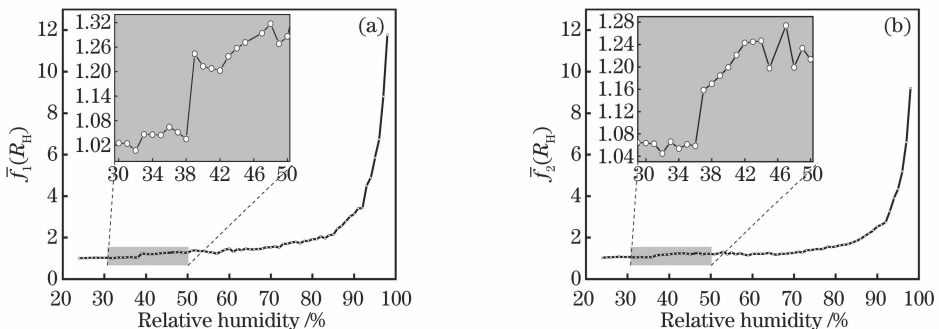


图 3  $\bar{f}_1(R_H)$ 和  $\bar{f}_2(R_H)$ 随  $RH$  的变化

Fig. 3 Variation of  $\bar{f}_1(R_H)$  and  $\bar{f}_2(R_H)$  with  $RH$

上述分析表明,两种气溶胶消光吸湿增长因子  $f_1(R_H)$  和  $f_2(R_H)$  的变化特征基本一致,对应气溶胶吸湿性增长临界点的计算结果也基本相同,二者均能用于表征气溶胶吸湿性增长的光学效应。

### 3.2 两种气溶胶消光吸湿增长因子的偏差及其成因分析

考虑到水汽消光以及气溶胶吸湿性增长对大气消光的显著影响,550 nm 波长处大气消光系数  $b_{\text{ext},550 \text{ nm}}(R_H)$  分解如下<sup>[16]</sup>。

$$b_{\text{ext},550 \text{ nm}}(R_H) = b_{\text{sp},550 \text{ nm}}(R_{\text{dry}}) + b_{\text{ap},550 \text{ nm}} + b_{\text{sg},550 \text{ nm}} + b_{\text{ag},550 \text{ nm}} + b_{\text{sw},550 \text{ nm}}, \quad (8)$$

式中:  $b_{\text{sp},550 \text{ nm}}(R_{\text{dry}})$ 、 $b_{\text{ap},550 \text{ nm}}$ 、 $b_{\text{sg},550 \text{ nm}}$ 、 $b_{\text{ag},550 \text{ nm}}$  和  $b_{\text{sw},550 \text{ nm}}$  分别为 550 nm 波长处的干气溶胶散射系数、干气溶胶吸收系数、气体散射系数、气体吸收系数和气溶胶水汽消光系数。

另外,环境条件下 550 nm 处气溶胶散射消光系数  $b_{\text{sp},550 \text{ nm}}(R_H)$  表示为

$$b_{\text{sp},550 \text{ nm}}(R_H) = b_{\text{sp},550 \text{ nm}}(R_{\text{dry}}) + b_{\text{sw},550 \text{ nm}}. \quad (9)$$

杨寅山等<sup>[16]</sup>的研究表明,气溶胶吸湿性增长在对大气消光的演化造成显著的影响的同时,也会对大气消光不同组分的贡献率产生重要的作用,由此可能导致不同气溶胶消光吸湿增长因子分析结果之间的差异。为此,计算了  $f_1(R_H)$  和  $f_2(R_H)$  的均值之比  $\bar{f}_1(R_H)/\bar{f}_2(R_H)$ , 并绘制了其相对于湿度的散点图,如图 4 所示。由图 4 可知,在环境条件为干状态( $R_H < 38\%$ )时,  $\bar{f}_1(R_H)/\bar{f}_2(R_H)$  总体变化不大,对应的均值和均方差分别为 0.98 和 0.017,之后随相对湿度的增加,受气溶胶吸湿性的影响  $\bar{f}_1(R_H)/\bar{f}_2(R_H)$  显著增大(通过了  $\alpha = 0.01$  的显著性检验)。上述诊断结果指出,气溶胶消光吸湿增长因子  $f_1(R_H)$  和  $f_2(R_H)$  之间存在系统性偏差,具体偏差的情况与相对湿度密切相关,这一结论为气溶

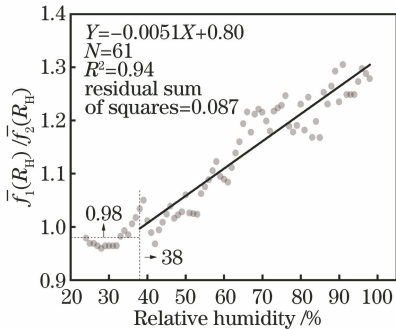


图 4  $\bar{f}_1(R_H)/\bar{f}_2(R_H)$  与相对湿度  $R_H$  的散点图

Fig. 4 Scatter plots of  $\bar{f}_1(R_H)/\bar{f}_2(R_H)$  and relative humidity

胶消光吸湿增长因子  $f_1(R_H)$  和  $f_2(R_H)$  计算结果之间的差异性分析奠定了理论基础。

为明晰气溶胶消光吸湿增长因子  $f_1(R_H)$  和  $f_2(R_H)$  随相对湿度存在系统偏差的成因,由 (2)~(4) 式可以得到:

$$\frac{f_1(R_H)}{f_2(R_H)} = \frac{b_{\text{ext},550 \text{ nm}}(R_H)}{C_{\text{PM}_{10}}} \cdot \frac{b_{\text{sp},550 \text{ nm}}(R_{\text{dry}})}{b_{\text{sp},550 \text{ nm}}(R_H)} = \frac{b_{\text{sp},550 \text{ nm}}(R_{\text{dry}})}{C_{\text{PM}_{10}}} \cdot \frac{b_{\text{ext},550 \text{ nm}}(R_H)}{b_{\text{sp},550 \text{ nm}}(R_H)}. \quad (10)$$

由(10)式可知,  $f_1(R_H)$  和  $f_2(R_H)$  比值的变化与  $[b_{\text{sp},550 \text{ nm}}(R_{\text{dry}})/C_{\text{PM}_{10}}] / \bar{E}_{\text{ext},550 \text{ nm}}(R_{\text{dry}})$  和  $b_{\text{ext},550 \text{ nm}}(R_H)/b_{\text{sp},550 \text{ nm}}(R_H)$  有关。其中,  $[b_{\text{sp},550 \text{ nm}}(R_{\text{dry}})/C_{\text{PM}_{10}}] / \bar{E}_{\text{ext},550 \text{ nm}}(R_{\text{dry}})$  表征烘干后单位质量气溶胶散射系数与干燥环境下的平均单位质量气溶胶消光系数之比,后者一般可视为是一个常数。刘凡等<sup>[27]</sup>针对成都地区的研究指出,相对湿度的增大有利于提升环境大气的硫酸化率(SOR)和氮氧化率(NOR),进而导致  $\text{PM}_{2.5}$  在  $\text{PM}_{10}$  中占比的增大。由于细颗粒物具有更强的散射能力,故  $[b_{\text{sp},550 \text{ nm}}(R_{\text{dry}})/C_{\text{PM}_{10}}] / \bar{E}_{\text{ext},550 \text{ nm}}(R_{\text{dry}})$  随相对湿度的增大呈现出较为显著的增大趋势(通过了  $\alpha = 0.01$  的显著性检验),二者的拟合直线斜率为 0.0060,如图 5 (a) 所示。另外,  $b_{\text{ext},550 \text{ nm}}(R_H)/b_{\text{sp},550 \text{ nm}}(R_H)$  表征环境条件下的大气消光系数与气溶胶散射消光系数之比。研究发现<sup>[18]</sup>,相对湿度的增大也会导致水汽消光系数  $b_{\text{sw},550 \text{ nm}}$  以幂函数形态增大,考虑到烘干气溶胶吸收系数以及分子消光系数对相对湿度变化的敏感性较弱,由此导致大气消光系数与气溶胶散射系数之比的均值  $b_{\text{ext},550 \text{ nm}}(R_H)/b_{\text{sp},550 \text{ nm}}(R_H)$  随相对湿度的增大而呈现出相对较为缓慢的降低趋势(通过了  $\alpha = 0.01$  的显著性检验),二者的拟合直线斜率为 -0.0019,如图 5 (b) 所示。因此,  $[b_{\text{sp},550 \text{ nm}}(R_{\text{dry}})/C_{\text{PM}_{10}}] / \bar{E}_{\text{ext},550 \text{ nm}}(R_{\text{dry}})$  和  $b_{\text{ext},550 \text{ nm}}(R_H)/b_{\text{sp},550 \text{ nm}}(R_H)$  随相对湿度变率的差异导致了  $\bar{f}_1(R_H)/\bar{f}_2(R_H)$  随相对湿度增大而增大,烘干气溶胶散射系数对相对湿度变化显著的响应关系在其中起到了决定性的作用。这与相对湿度对成都地区颗粒物组分影响的分析结果相一致<sup>[27]</sup>,并表现为单位质量大气消光系数和单位质量干气溶胶散射系数随相对湿度的增加而增加<sup>[15-16]</sup>。

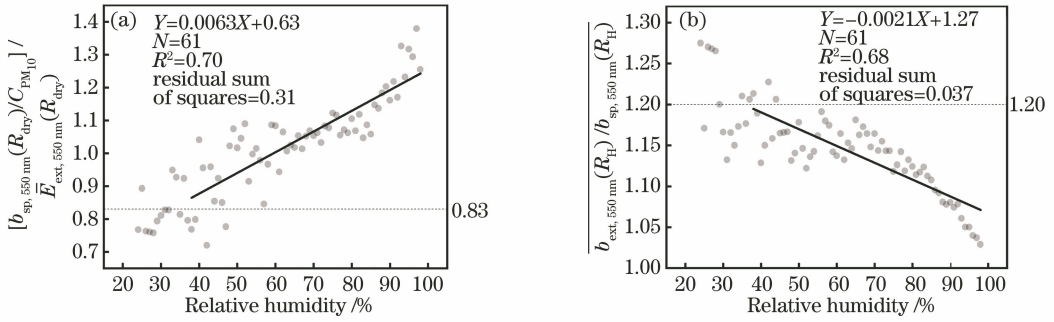


图 5  $\bar{f}_1(R_H)/\bar{f}_2(R_H)$  的影响因子与相对湿度的散点图。(a)  $[b_{sp,550\text{ nm}}(R_{dry})/C_{PM_{10}}]/\bar{E}_{ext,550\text{ nm}}(R_{dry})$ ;

(b)  $\overline{b_{ext,550\text{ nm}}(R_H)/b_{sp,550\text{ nm}}(R_H)}$

Fig. 5 Scatter plots of influential factors of  $\bar{f}_1(R_H)/\bar{f}_2(R_H)$  and relative humidity.

(a)  $[b_{sp,550\text{ nm}}(R_{dry})/C_{PM_{10}}]/\bar{E}_{ext,550\text{ nm}}(R_{dry})$ ; (b)  $\overline{b_{ext,550\text{ nm}}(R_H)/b_{sp,550\text{ nm}}(R_H)}$

### 4 结 论

基于相关性分析,气溶胶吸湿性增长临界点识别以及吸湿增长模型优选的研究结果表明,两种气溶胶消光吸湿增长因子  $f_1(R_H)$  和  $f_2(R_H)$  的变化特征总体是一致的,均可以用于表征气溶胶吸湿性消光系数随相对湿度的变化规律。

当  $R_H \geq 38\%$  时,  $f_1(R_H)$  和  $f_2(R_H)$  的均值之比  $\bar{f}_1(R_H)/\bar{f}_2(R_H)$  随相对湿度的增加而增大。气溶胶吸湿性对大气消光及其组分的差异性影响是导致  $f_1(R_H)$  和  $f_2(R_H)$  非一致性演化的根本原因,烘干气溶胶散射系数对相对湿度变化显著的响应关系在其中起到了决定性的作用。

相对于气溶胶消光吸湿增长因子  $f_1(R_H)$  而言,气溶胶消光吸湿增长因子  $f_2(R_H)$  综合考虑了相对湿度变化对同一气溶胶在环境状态和烘干状态下光学效应的差异。因此,前者侧重于反映气溶胶吸湿的累积光学效应,后者则强调气溶胶吸湿性对其光学效应的渐变影响。

### 参 考 文 献

[1] Bo G Y, Liu D, Wu D C, et al. Two-wavelength lidar for observation of aerosol optical and hygroscopic properties in fog and haze days [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(1): 0113001.  
伯广宇, 刘东, 吴德成, 等. 双波长激光雷达探测典型雾霾气溶胶的光学和吸湿性质 [J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0113001.

[2] Bo G Y, Li A Y, Xu C D. Remote sensing aerosol extinction hygroscopic growth factor and its wavelength dependence using lidar [J]. Acta Optica

Sinica, 2016, 36(6): 0601003.  
伯广宇, 李爱悦, 徐亦东. 激光雷达遥感地表气溶胶消光吸湿因子及其对波长的依赖特性 [J]. 光学学报, 2016, 36(6): 0601003.

[3] Zhang X Y. Aerosol over China and their climate effect [J]. Advances in Earth Science, 2007, 22(1): 12-16.  
张小曳. 中国大气气溶胶及其气候效应的研究 [J]. 地球科学进展, 2007, 22(1): 12-16.

[4] Chyacutelek P, Coakley J A. Aerosols and climate [J]. Science, 1974, 183(4120): 75-77.

[5] Xu B, Huang Y B, Fan C Y, et al. Calculation of equivalent absorption coefficient of uniformly mixed hygroscopic aerosol particles [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(1): 0101001.  
徐博, 黄印博, 范承玉, 等. 吸湿性均匀混合气溶胶粒子等效吸收系数计算分析 [J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0101001.

[6] Fierz-Schmidhauser R, Zieger P, Gysel M, et al. Measured and predicted aerosol light scattering enhancement factors at the high alpine site Jungfraujoch [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2010, 10(5): 2319-2333.

[7] Zhang H, Tao Z M, Ma X M, et al. Fitting of hygroscopic factor between  $PM_{2.5}$  mass concentration and aerosol backscattering coefficient in Hefei area [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(7): 0704006.  
张辉, 陶宗明, 麻晓敏, 等. 合肥地区  $PM_{2.5}$  质量浓度与气溶胶后向散射系数之间吸湿因子的拟合 [J]. 中国激光, 2018, 45(7): 0704006.

[8] Bo G Y, Xie C B, Wang B X, et al. Casestudy of the relationship between aerosol angstrom exponent and relative humidity [J]. Chinese Journal of Lasers,

- 2015, 42(7): 0713002.
- 伯广宇, 谢晨波, 王邦新, 等. 相对湿度影响地表气溶胶波长指数的个例研究[J]. 中国激光, 2015, 42(7): 0713002.
- [9] Svenningsson B, Hansson H C, Wiedensohler A, et al. Hygroscopic growth of aerosol particles and its influence on nucleation scavenging in cloud: experimental results from Kleiner Feldberg [J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 1994, 19(1/2): 129-152.
- [10] Chen J, Zhao C S, Ma N, et al. A parameterization of low visibilities for hazy days in the North China Plain [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, 12(11): 4935-4950.
- [11] Liu X G, Gu J W, Li Y P, et al. Increase of aerosol scattering by hygroscopic growth: observation, modeling, and implications on visibility [J]. *Atmospheric Research*, 2013, 132/133: 91-101.
- [12] Xu J, Bergin M H, Yu X, et al. Measurement of aerosol chemical, physical and radiative properties in the Yangtze delta region of China [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, 36(2): 161-173.
- [13] Liu X G, Zhang Y H. Modelling research on the aerosol scattering hygroscopic growth factor based on measurement-Taking 2006 CAREBeijing campaign for example [J]. *China Environmental Science*, 2009, 29(12): 1243-1248.
- 刘新罡, 张远航. 基于观测的大气气溶胶散射吸湿增长因子模型研究: 以 2006 CAREBeijing 加强观测为例 [J]. *中国环境科学*, 2009, 29(12): 1243-1248.
- [14] Liu X G, Zhang Y H. Research on the measurement of aerosol hygroscopic growth factor in Guangzhou City [J]. *China Environmental Science*, 2009, 29(11): 1128-1133.
- 刘新罡, 张远航. 广州市大气气溶胶散射吸湿增长因子的观测研究 [J]. *中国环境科学*, 2009, 29(11): 1128-1133.
- [15] Cui L, Ni C J, Sun H H, et al. Hygroscopic growth properties of particles in Chengdu and its correction methodology [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(11): 3938-3943.
- 崔蕾, 倪长健, 孙欢欢, 等. 成都颗粒物吸湿增长特征及订正方法研究 [J]. *环境科学学报*, 2016, 36(11): 3938-3943.
- [16] Yang Y S, Ni C J, Deng Y, et al. Characteristics of atmospheric extinction coefficient and its components in winter in Chengdu [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, 39(5): 1425-1432.
- 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.
- [17] Tao J H, Wang Z F, Xu Q, et al. Particulate matter mass extinction hygroscopic growth model in Beijing [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2015, 19(1): 12-24.
- 陶金花, 王子峰, 徐谦, 等. 北京地区颗粒物质量消光吸湿增长模型研究 [J]. *遥感学报*, 2015, 19(1): 12-24.
- [18] Koschmieder H. 1924. Theorie der horizontalen Sichtweite [J]. *Beitrage zur Physik der freien Atmosphäre*, 33-53.
- [19] Wang Z F, Chen L F, Tao J H, et al. Satellite-based estimation of regional particulate matter (PM) in Beijing using vertical-and-RH correcting method [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(1): 50-63.
- [20] Chen Y N, Zhao P S, He D, et al. Characteristics and parameterization for atmospheric extinction coefficient in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2015, 36(10): 3582-3589.
- 陈一娜, 赵普生, 何迪, 等. 北京地区大气消光特征及参数化研究 [J]. *环境科学*, 2015, 36(10): 3582-3589.
- [21] Zhu H, Wang Y Q, Tao J H, et al. Analysis of aerosol hygroscopic growth based on meteorological factors: a case study of Zhejiang Province [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2019, 24(2): 186-198.
- 祝好, 王永前, 陶金花, 等. 基于气象要素的气溶胶吸湿增长分析: 以浙江省为例 [J]. *气候与环境研究*, 2019, 24(2): 186-198.
- [22] Kotchenruther R A, Hobbs P V. Humidification factors of aerosols from biomass burning in Brazil [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1998, 103(D24): 32081-32089.
- [23] Magi B I, Hobbs P V. Effects of humidity on aerosols in southern Africa during the biomass burning season [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, 108(D13): 8495.
- [24] Kasten F. Visibility forecast in the phase of precondensation [J]. *Tellus*, 1969, 21(5): 631-635.
- [25] Song C H, Park M E, Lee K H, et al. An investigation into seasonal and regional aerosol characteristics in East Asia using model-predicted and remotely-sensed aerosol properties [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, 8(22): 6627-6654.

- [26] Chen J, Zhao C S, Ma N, et al. Aerosol hygroscopicity parameter derived from the light scattering enhancement factor measurements in the North China Plain [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, 14(15): 8105-8118.
- [27] Liu F, Tan Q W, Jiang X, et al. Effect of relative humidity on particulate matter concentration and visibility during winter in Chengdu [J]. *Environmental Science*, 2018, 39(4): 1466-1472.
- 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.