

# 激光与光电子学进展

## 基于大气消光系数概率分布参数的湿度订正方法

李川<sup>1,2</sup>, 倪长健<sup>1,2\*</sup>, 杨萌<sup>1,2</sup>, 李昕翼<sup>3</sup>, 任至涵<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>成都市气象局, 四川 成都 611130

**摘要** 大气消光系数湿度订正是气溶胶吸湿性研究的重要内容,也是利用卫星气溶胶光学厚度(AOD)产品反演近地面颗粒物质量浓度的关键技术环节。基于成都市 2016 年 1 月至 12 月的逐时 PM<sub>2.5</sub>质量浓度、大气能见度、相对湿度(RH)观测数据,首先,深入探讨了大气消光系数与颗粒物质量浓度之间的统计关系及其对 RH 变化的响应特征,发现在 RH 小于 90% 时,单位质量大气消光系数均服从对数正态分布,并进一步指出该分布函数的形状参数和尺度参数均随 RH 的增加呈现出波动型增长。其次,以干燥环境条件下(RH 小于等于 40%)单位质量大气消光系数对数正态分布参数为基准,通过数学变换消除湿度变化对单位质量大气消光系数概率分布参数的影响,据此提出了大气消光系数湿度订正的原理和计算流程。最后,对该原理的适用性进行研究,结果表明,订正后大气消光系数反演得到的 PM<sub>2.5</sub>质量浓度与实际 PM<sub>2.5</sub>质量浓度相关系数为 0.90,显著优于气溶胶散射吸湿增长因子法的湿度订正结果。

**关键词** 大气光学; 大气消光系数; 对数正态分布; 概率分布参数; 湿度订正; 适用性

中图分类号 P401

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1901005

## Humidity Correction Method Based on Probability Distribution Parameter of Atmospheric Extinction Coefficient

Li Chuan<sup>1,2</sup>, Ni Changjian<sup>1,2\*</sup>, Yang Meng<sup>1,2</sup>, Li Xinyi<sup>3</sup>, Ren Zhihan<sup>1,2</sup>

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

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

<sup>3</sup>Chengdu Meteorological Office, Chengdu, Sichuan 611130, China

**Abstract** Humidity correction on atmospheric extinction coefficient is an important component of aerosol hygroscopicity research, which is also a key technical link for determining the mass concentration of near-ground particulate matter retrieved by satellite aerosol optical depth(AOD). Based on hourly PM<sub>2.5</sub> mass concentration, atmospheric visibility, and relative humidity (RH) data collected in Chengdu from January to December 2016, the statistical relationship between the atmospheric extinction coefficient and particulate matter mass concentration, as well as its response characteristics with RH variation, are discussed in detail. The atmospheric extinction coefficient

收稿日期: 2020-12-01; 修回日期: 2020-12-05; 录用日期: 2020-12-22

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

通信作者: \*ncj1970@163.com

per unit mass follows a log-normal distribution when RH is less than 90%, and the shape and scale parameters of the distribution function exhibit a fluctuating growth as RH increases. Second, based on the log-normal distribution parameter of atmospheric extinction coefficient per unit mass under dry environmental conditions ( $RH \leq 40\%$ ), the effect of humidity change on the probability distribution parameter of atmospheric extinction coefficient per unit mass is eliminated via mathematical transformation. Consequently, the principle and flow chart of humidity correction are proposed for the atmospheric extinction coefficient. Finally, the applicability based on the principle demonstrates that the correlation coefficient of  $PM_{2.5}$  mass concentration calculated by corrected atmospheric extinction coefficient and actual  $PM_{2.5}$  mass concentration is up to 0.90, significantly improving the corresponding humidity correction result using aerosol scattering hygroscopic growth factor method.

**Key words** atmospheric optics; atmospheric extinction coefficient; log-normal distribution; probability distribution parameter; humidity correction; applicability

**OCIS codes** 010.1110; 010.1300; 010.1310

## 1 引言

大气消光系数是可见光在大气中传播单位距离时的相对衰减率,是环境空气质量优劣的重要表征<sup>[1]</sup>。研究表明,大气消光包括气溶胶消光和气体分子消光,气溶胶消光尤其是气溶胶散射消光是大气消光的主体<sup>[2-4]</sup>。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,粒径、质量、密度以及折射指数等微物理参数会发生变化,从而改变气溶胶的光学特性,进而对气溶胶散射系数和大气消光系数产生影响<sup>[5]</sup>。

近地面颗粒物质量浓度是指经过 50℃ 烘干的干粒子质量浓度,与干燥环境下的大气消光系数呈显著的线性关系<sup>[6-8]</sup>。由于气溶胶吸湿性对大气消光系数的非线性作用,大气消光系数和颗粒物质量浓度之间的线性统计关系对湿度的变化非常敏感,是颗粒物质量浓度反演不确定性的主要来源<sup>[9-10]</sup>。因此,对大气消光系数进行湿度订正是利用卫星气溶胶光学厚度(AOD)产品反演近地面颗粒物质量浓度的关键技术环节,也是气溶胶吸湿性研究的重要内容<sup>[11-13]</sup>。

气溶胶散射吸湿增长因子为环境条件下气溶胶散射系数与干燥条件下气溶胶散射系数的比值<sup>[14]</sup>。环境大气中气溶胶散射吸湿增长因子可表征为相对湿度(RH)的函数,即吸湿增长模型。李成才等<sup>[15]</sup>利用该模型很好地拟合了北京地区的气溶胶散射吸湿增长因子随相对湿度的变化特征。Song 等<sup>[16]</sup>分析了气溶胶散射吸湿增长模型在东亚地区的适用性,并给出了模型参数在不同季节的取值。尹单丹等<sup>[17]</sup>通过多模型比对,提出了表征成都

地区秋冬季气溶胶散射吸湿增长的最优模型。目前,基于气溶胶散射吸湿增长因子的湿度订正是消除湿度变化对大气消光系数影响的通用方法。陶金花等<sup>[18]</sup>基于 regional atmospheric modeling system (RAMS) 模拟结果和中分辨率成像光谱仪(MODIS)气溶胶光学厚度数据,在求取近地面环境大气消光系数的基础上,利用北京市周边的气溶胶散射吸湿增长因子进行湿度订正,反演的近地面  $PM_{2.5}$  质量浓度和地面监测数据在趋势上基本一致。受颗粒物质量浓度、吸湿性以及化学组分等因素的共同作用,大气消光系数序列演化是非常复杂的,并具有明显的随机性特征<sup>[19]</sup>。崔蕾等<sup>[20]</sup>针对成都地区的研究表明,经气溶胶散射吸湿增长因子订正后的大气消光系数序列,统计参数(均值和方差)仍对湿度的变化存在显著的响应。由以上分析可见,现行湿度订正方法缺乏对大气消光系数序列特性的深入分析,只是部分消除了湿度变化对大气消光系数统计特征的影响,算法的设计和实际应用两个方面均存在明显的瑕疵。

本文系统分析了相对湿度变化对单位质量大气消光系数概率分布函数的影响,以干燥环境条件下( $RH$  小于等于 40%),单位质量大气消光系数对数正态分布函数的参数为基准,通过数学变换消除湿度变化对单位质量大气消光系数概率分布参数的影响,据此提出了湿度订正的原理和计算流程,并进一步通过实例验证了该原理的适用性。

## 2 资料及资料处理

本实验组使用的资料包括成都市 2016 年 1 月至 12 月期间逐时观测的细颗粒物质量浓度、大气能见度、RH 数据。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), 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 内无明显工业大气污染源。

其中, PM<sub>2.5</sub> 质量浓度资料为成都市区人民南路环境空气自动监测站的小时监测数据, 该站点监测仪器采用小流量采样器(美国热电子环境设备公司)进行大气气溶胶质量浓度的观测。该仪器具有 PM<sub>10</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 粒径切割头, 使用电子天平(AB204-E)并利用减重法求得大气颗粒物质量浓度, 精度为十万分之一, 采样频率为每 5 分钟 1 次。大气能见度采用能见度传感器(Belfort 6000 型)测量, 观测波长为 550 nm, 数据采集频率为 1 次/min, 精度为 ±10%。RH 来自于成都市温江自动气象站提供的小时观测资料, 采样频率为 6 次/min, 除去最大、最小值后, 取 4 次采样值求算平均值。

RH 过大(RH 大于等于 90%)不仅会产生水汽凝结, 也会对颗粒物质量浓度产生影响, 因此只考虑非凝结条件下的气溶胶吸湿性及其对大气消光系数的影响, 对应的 RH 小于 90%, 据此获得研究样本(N), 合计 4112 组。当对比感阈  $\mu$  为 0.05 时, 在 550 nm 波长处, (环境)大气消光系数  $b_{\text{ext}, 550 \text{ nm}}(H_{\text{RH}})$  与大气能见度  $V$  的关系<sup>[21]</sup>为

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

为消除气溶胶质量浓度差异对大气消光的影响, 用大气消光系数  $b_{\text{ext}, 550 \text{ nm}}(H_{\text{RH}})$  除以 PM<sub>2.5</sub> 的质量浓度  $\rho_{\text{PM}_{2.5}}$ , 得到单位质量大气消光系数  $E_{\text{ext}, 550 \text{ nm}}(H_{\text{RH}})$ , 数学表达式为

$$E_{\text{ext}, 550 \text{ nm}}(H_{\text{RH}}) = \frac{b_{\text{ext}, 550 \text{ nm}}(H_{\text{RH}})}{\rho_{\text{PM}_{2.5}}}. \quad (2)$$

波长一定时, 气溶胶散射吸湿增长因子  $f(H_{\text{RH}})$  为

$$f(H_{\text{RH}}) = \frac{b_{\text{sp}, 550 \text{ nm}}(H_{\text{RH}})}{b_{\text{sp}, 550 \text{ nm}}(\text{dry})}, \quad (3)$$

式中:  $b_{\text{sp}, 550 \text{ nm}}(H_{\text{RH}})$  为环境条件下气溶胶散射系数;  $b_{\text{sp}, 550 \text{ nm}}(\text{dry})$  为干燥条件下(RH 小于等于 40%)气溶胶散射系数。

## 3 结果与讨论

### 3.1 湿度对大气消光系数与颗粒物质量浓度统计关系的影响

根据 Mie 散射理论, 干燥环境条件下(RH 小于等于 40%)气溶胶消光系数  $b_{\text{aer}}(\text{dry})$  的计算公式<sup>[18]</sup>为

$$b_{\text{aer}}(\text{dry}) = \pi \int_0^{+\infty} Q_{\text{ext}}(\bar{m}, r, \lambda) n(r) r^2 dr, \quad (4)$$

式中:  $Q_{\text{ext}}(\bar{m}, r, \lambda)$  为颗粒物散射效率, 与粒子的复折射率  $\bar{m}$ 、半径  $r$  和辐射波长  $\lambda$  有关;  $n(r)$  为谱分布函数。而相同条件下的颗粒物质量浓度  $\rho_{\text{PM}_x}$  可以表达为

$$\rho_{\text{PM}_x} = \frac{4}{3} \pi \rho \int_0^x r^3 n(r) dr, \quad (5)$$

式中:  $\rho$  为颗粒物的平均密度。根据 Hansen 等<sup>[22]</sup>的工作, 引入归一化颗粒物散射效率  $\langle Q_{\text{ext}} \rangle$  和有效半径  $\langle r \rangle$  两个参数:

$$\langle Q_{\text{ext}} \rangle = \frac{\int_0^x Q_{\text{ext}}(\bar{m}, r, \lambda) n(r) r^2 dr}{\int_0^x n(r) r^2 dr}, \quad (6)$$

$$\langle r \rangle = \frac{\int_0^x n(r) r^3 dr}{\int_0^x n(r) r^2 dr}. \quad (7)$$

由(4)~(7)式可得,

$$b_{\text{aer}}(\text{dry}) = \frac{3 \langle Q_{\text{ext}} \rangle}{4 \langle r \rangle \rho} \times \rho_{\text{PM}_x}. \quad (8)$$

已有研究指出, 在较小区域和较短时间范围内, 颗粒物的类型和谱分布一定,  $\langle Q_{\text{ext}} \rangle$ 、 $\langle r \rangle$  和  $\rho$  可看作常数。因此, 可近似认为影响干燥环境条件下(RH 小于等于 40%)气溶胶消光系数的各因素相对稳定, 由此得到干燥环境下气溶胶消光系数与颗粒物质量浓度存在的线性关系<sup>[18]</sup>为

$$\rho_{\text{PM}_{2.5}} = A \times b_{\text{ext}, 550 \text{ nm}} + B, \quad (9)$$

式中:  $A$  和  $B$  为待定系数。由于干燥环境条件下(RH 小于等于 40%)气溶胶消光系数  $b_{\text{aer}}(\text{dry})$  在大气消光系数中占比极高, 故(9)式也可以很好地表征干燥环境条件下大气消光系数与颗粒物质量浓度之间的关系<sup>[23-24]</sup>。

随着 RH 的增加, 颗粒物粒径  $r$  的吸湿性增长和颗粒物散射效率  $Q_{\text{ext}}(\bar{m}, r, \lambda)$  的非线性变化愈加显著, 由此导致大气消光的吸湿性增长。因此, 干燥环境条件下大气消光系数与颗粒物质量浓度之间线性关系的适用性随 RH 的增加会降低, 并由此导致利用大气消光系数反演颗粒物质量浓度误差的增加。为定量探讨湿度变化对大气消光系数与颗粒物质量浓度线性关系的影响, 采用成都市 2016 年 1 月至 12 月期间逐时观测的 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度、大气能见度, 由(1)式计算得到大气消光系数, 再以 5% RH 为间隔, 在不同 RH 区间内分析了大气消光系数与 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度的相关系数  $R$ 、按(9)式拟合的残差

平方和(SSR),如图1所示。可以看出,大气消光系数与PM<sub>2.5</sub>质量浓度的相关系数R随RH的增加快速递减,而SSR则随RH的增加快速上升。

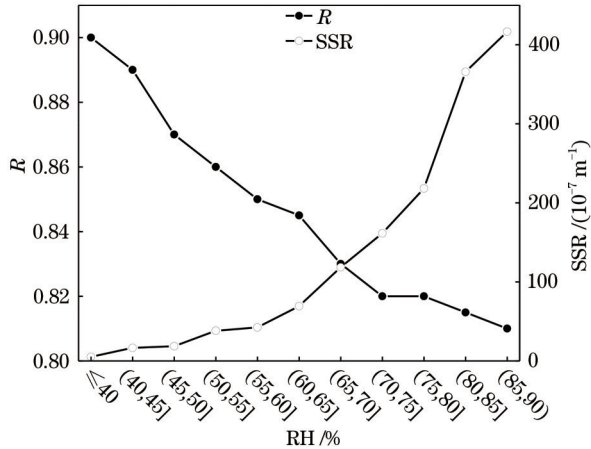


图1 R与SSR随RH的变化

Fig. 1 Variation of R and SSR with RH

上述分析表明,气溶胶吸湿性对大气消光系数非线性作用是大气消光系数与PM<sub>2.5</sub>质量浓度线性关系表征不确定性的重要来源。

### 3.2 湿度对单位质量大气消光系数概率分布函数的影响

为明晰RH变化对大气消光系数及其统计参数的影响,首先绘制了单位质量大气消光系数随RH变化的散点图,如图2所示,并进一步给出了单位质量大气消光系数均值和方差随RH的变化,如图3所示,其中P为显著性检验P值,即概率。综合图2和图3可知,在不考虑颗粒物质量浓度对大气消光系数影响的前提下,湿度的变化显著改变了单位质

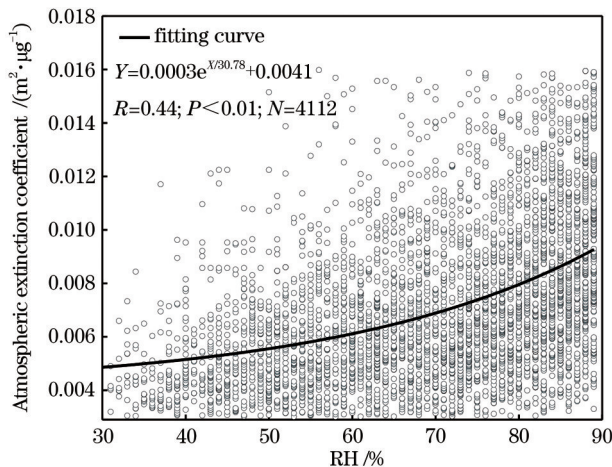


图2 单位质量大气消光系数与RH散点图

Fig. 2 Scatter plot of atmospheric extinction coefficient per unit mass with RH

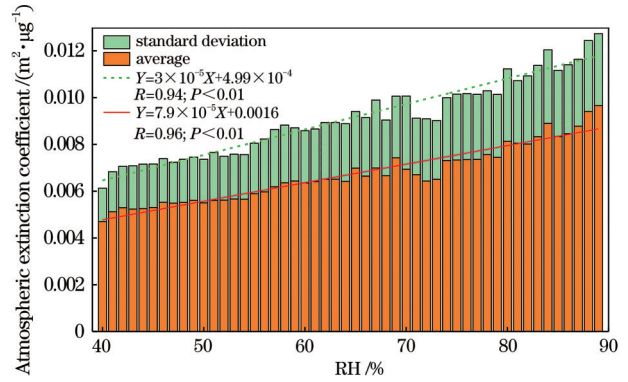


图3 单位质量大气消光系数均值和标准差随RH的变化

Fig. 3 Average and standard deviation of atmospheric extinction coefficient per unit mass changed with RH

量大气消光系数的统计特征,并表现为大气消光系数的吸湿性增长。

孙欢欢等<sup>[19, 25]</sup>在2016年就探讨了单位质量大气消光系数的概率分布特征,指出单位质量大气消光系数整体上服从对数正态分布:

$$f(x) = \frac{1}{x\delta\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{\ln(x) - \mu}{\delta}\right]^2\right\}, \quad (10)$$

式中: $\mu$ 为尺度参数; $\delta$ 为形状参数。

本实验组在相对湿度区间[40%, 90%)内逐点分析了对数正态分布函数对单位质量大气消光系数的适用性,利用矩法计算对数正态分布的尺度参数和形状参数,并对拟合结果进行了Kolmogorov-Smirnov(KS)检验。

图4中实心点线是KS检验统计量随RH的变化曲线,空心点线是KS检验的临界值随RH的变化曲线(对应置信度水平 $\alpha$ 为0.01),其中RH等于40%代表的是干燥环境条件下所有样本的分析结果。由图4可知,在RH区间[40%, 90%)KS检验统计量均小于对应的KS检验临界值。这一研究结果

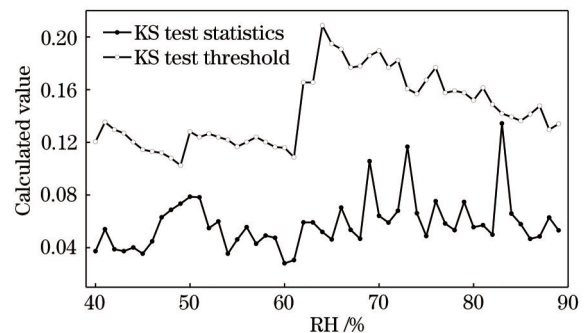


图4 KS检验统计量和临界值随RH的变化

Fig. 4 Variation of KS test statistics and KS test threshold with RH

表明,单位质量大气消光系数在 90% 以下任意 RH 区间内均服从对数正态分布。

图 5 给出了单位大气消光系数对数正态分布参

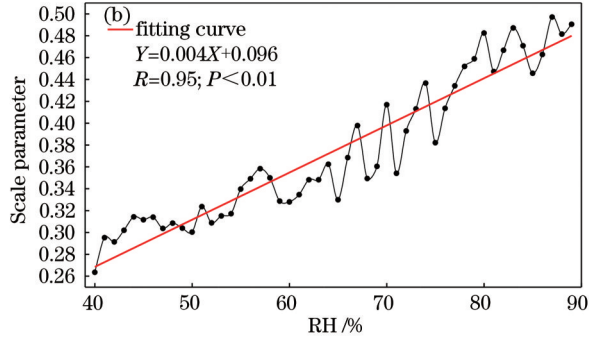
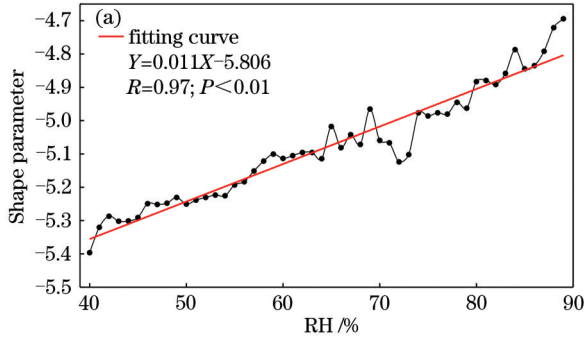


图 5 对数正态分布参数随 RH 的变化。(a)形状参数;(b)尺度参数

Fig. 5 Variation of log-normal distribution parameters with RH. (a) Shape parameter; (b) scale parameter

综合图 4 和图 5 可知,RH 的变化不改变单位质量大气消光系数对数正态分布函数的适用性,但对其形状参数和尺度参数会造成显著的影响,二者随 RH 的增加均呈波动型的增长。

### 3.3 大气消光系数湿度订正原理

已有研究表明<sup>[15]</sup>,单位质量大气消光系数在 RH 小于 40% 时呈现出平稳波动的特征,而当 RH 介于 40%~90% 时,单位质量大气消光系数增长趋势明显。本实验组的研究进一步指出,单位质量大气消光系数对数正态分布函数的参数(尺度参数和形状参数)对 RH 的变化非常敏感,二者随 RH 的变化共同决定了单位质量大气消光系数的吸湿增长特征。

综上分析,大气消光系数湿度订正的原理可以表述如下:以干燥环境条件下(RH 小于等于 40%)单位质量大气消光系数对数正态分布函数的参数为基准,通过数学变换消除湿环境条件下(RH 大于 40%)单位质量大气消光系数对数正态分布形状参数和尺度参数变化的影响,从而保证在不同湿度条件下单位质量大气消光系数统计特征的一致性。

### 3.4 大气消光系数湿度订正的计算流程

为简便起见,记 550 nm 处单位质量大气消光系数  $E_{\text{ext},550\text{nm}}(H_{\text{RH}})$  为  $E_{ij}$ ,其中  $i=1,2,3,\dots,50$ ,分别对应于 RH 区间  $(0,40\%]$ ,  $(40\%,41\%]$ ,  $(41\%,42\%]$ , $\dots$ ,  $(88\%,89\%]$ ;  $j=1,2,3,\dots,K_i$ ,  $K_i$  代表上述 RH 区间  $i$  内的样本量。基于提出的大气消光系数湿度订正原理,相应的计算流程表述如下。

1) 将 RH 小于等于 40% 视为干燥环境条件,计算干燥环境条件下单位质量大气消光系数对数正态分布函数的尺度参数( $\mu_{\leq 40}$ )和形状参数( $\delta_{\leq 40}$ )。

数随 RH 的变化。可知,随着 RH 的增大,形状参数和尺度参数均呈波动型增长,对应的相关系数分别为 0.97 与 0.95,均通过了  $\alpha=0.01$  的显著性检验。

2) 分别对 RH 在区间  $(40\%,41\%]$ ,  $(41\%,42\%]$ , $\dots$ ,  $(88\%,89\%]$  内的单位质量大气消光系数进行数学变换:

$$\ln(E_{ij,\text{new}}) = \frac{\ln(E_{ij}) + m_i}{n_i}, \quad (11)$$

式中:  $m_i$  和  $n_i$  为待定参数。

3) 为保证在不同湿度条件下单位质量大气消光系数统计特征的一致性,求解  $m_i$  和  $n_i$ :

$$\mu_i = \mu_{\leq 40}, \quad (12)$$

$$\delta_i = \delta_{\leq 40}, \quad (13)$$

式中:  $\mu_i$  和  $\delta_i$  分别代表不同湿度区间单位质量大气消光系数对数正态分布函数的尺度参数和形状参数。

4) 依据(11)式,对不同湿度区间内的单位质量大气消光系数进行订正,据此可以得到干燥环境下的单位质量大气消光系数  $E_{ij,\text{new}}$ 。

按上述流程计算单位质量大气消光系数数学变换的待定参数  $m_i$  和  $n_i$ ,二参数随 RH 变化的情况如图 6 所示。由图 6 可知:  $m_i$  恒小于 0,在 RH 小于

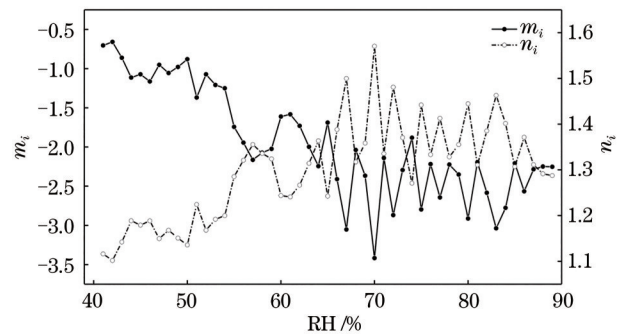


图 6  $m_i$  和  $n_i$  随 RH 的变化

Fig. 6 Variation of  $m_i$  and  $n_i$  with RH

65% 时,  $m_i$  随 RH 的增加呈波动下降的趋势, 在 RH 大于 65% 时,  $m_i$  随 RH 的增加则呈平稳波动的特征;  $n_i$  恒大于 1, 在 RH 小于 65% 时,  $n_i$  随 RH 的增加呈波动上升的趋势, 在 RH 大于 65% 时,  $n_i$  随 RH 的增加也呈平稳波动的特征;  $m_i$  和  $n_i$  随 RH 序列呈显著的负相关, 二者的相关系数为 -0.98, 通过了  $\alpha=0.01$  的显著性检验。

待定参数  $m_i$  和  $n_i$  随 RH 的变化, 本质上反映的是湿度变化对单位质量大气消光系数统计特征影响的复杂性, 上述计算流程可以系统地消除湿环境条件下 (RH 大于 40%) 湿度变化对单位质量大气消光系数对数正态分布函数形状参数和尺度参数的影响, 从而为颗粒物质量浓度的高精度反演提供算法保障。

### 3.5 大气消光系数湿度订正原理的适用性分析

基于上述原理和计算流程对大气消光系数进

行湿度订正, 据此可以反演  $PM_{2.5}$  质量浓度, 这里将该方法称为方案 1。本实验组也同时设计另外 3 种方案, 方案 2 为利用崔蕾等<sup>[20]</sup>提出的湿度订正方法对大气消光系数进行订正, 据此反演  $PM_{2.5}$  质量浓度; 方案 3 为利用在华北地区常用的气溶胶散射吸湿增长因子  $f(H_{RH}) = (1 - \frac{H_{RH}}{100})^{-1}$  对大气消光系数进行湿度订正<sup>[18]</sup>, 据此反演  $PM_{2.5}$  质量浓度; 方案 4 为利用成都地区气溶胶散射吸湿增长因子  $f(H_{RH}) = 0.791 + 0.160(1 - \frac{H_{RH}}{100})^{-1} + 0.0004(1 - \frac{H_{RH}}{100})^{-2}$  对大气消光系数进行湿度订正<sup>[17]</sup>, 据此反演  $PM_{2.5}$  质量浓度。4 种方案在成都地区的适用性分析结果表明, 方案 1、方案 2、方案 3 和方案 4 反演的  $PM_{2.5}$  质量浓度与实测的  $PM_{2.5}$  质量浓度之间的相关系数分别为 0.90、0.88、0.75 和 0.84, 结果如图 7 所示。

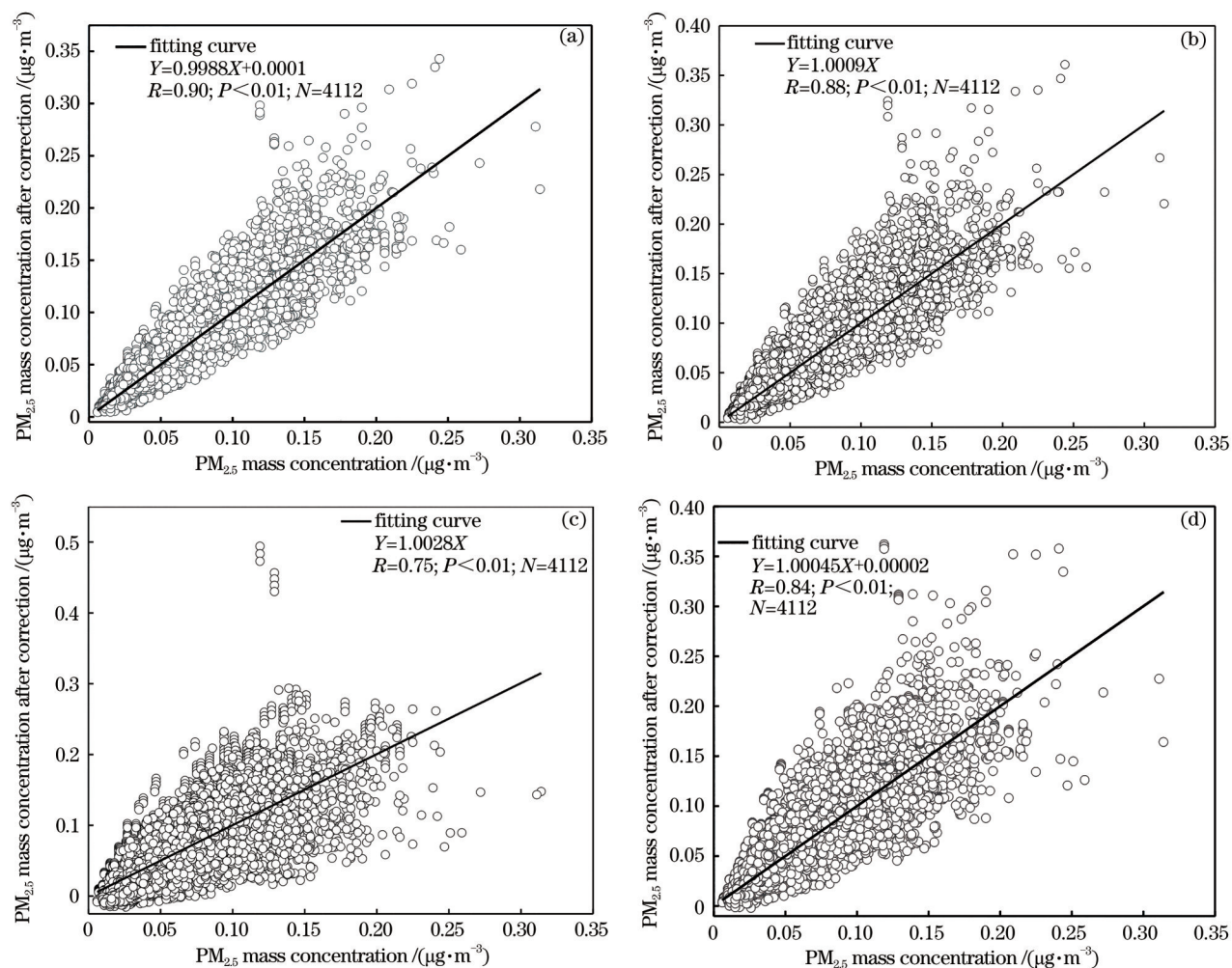


图 7 反演  $PM_{2.5}$  质量浓度与实际  $PM_{2.5}$  质量浓度的散点图。(a) 方案 1; (b) 方案 2; (c) 方案 3; (d) 方案 4

Fig. 7 Scatter plots of inverted  $PM_{2.5}$  mass concentration and actual  $PM_{2.5}$  mass concentration. (a) Scheme 1; (b) scheme 2; (c) scheme 3; (d) scheme 4

基于图 7 的分析表明:方案 1 系统地消除了湿度变化对大气消光系数统计特征的影响,取得了最佳的订正效果;方案 2 基于单位质量大气消光系数的均值与方差进行湿度订正,订正效果略逊于方案 1;由于气溶胶化学组分空间差异很大,方案 3 盲目对气溶胶散射吸湿增长模型进行移植应用,可能会恶化大气消光系数与  $PM_{2.5}$  质量浓度之间的线性关系;方案 4 只是部分消除了湿度变化对大气消光系数统计特征的影响,订正效果介于方案 1 和方案 2 之间。

## 4 结 论

RH 的变化不改变单位质量大气消光系数对数正态分布函数的适用性,但对其形状参数和尺度参数会造成显著的影响,二者随 RH 的增加均呈波动型的增长。

基于大气消光系数概率分布参数的湿度订正法的原理是:以干燥环境条件下(RH 小于等于 40%)单位质量大气消光系数对数正态分布函数的参数为基准,通过数学变换消除湿环境条件下(RH 大于 40%)湿度变化对单位质量大气消光系数对数正态分布参数的影响,从而保证在不同湿度条件下单位质量大气消光系数统计特征的一致性。

实例分析结果进一步验证了所提大气消光系数湿度订正方法的可行性,为利用卫星 AOD 产品反演近地面颗粒物质量浓度提供了新途径。

## 参 考 文 献

- [1] Tsai Y I. Atmospheric visibility trends in an urban area in Taiwan 1961-2003[J]. Atmospheric Environment, 2005, 39(30): 5555-5567.
- [2] Liu P F, Zhao C S, Göbel T, et al. Hygroscopic properties of aerosol particles at high relative humidity and their diurnal variations in the North China Plain[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, 11(7): 3479-3494.
- [3] Flores J M, Bar-Or R Z, Bluvshstein N, et al. Absorbing aerosols at high relative humidity: linking hygroscopic growth to optical properties[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2012, 12(12): 5511-5521.
- [4] Liu X G, Zhang Y H. Advances in research on aerosol hygroscopic properties at home and abroad [J]. Climatic and Environmental Research, 2010, 15(6): 808-816.  
刘新罡, 张远航. 大气气溶胶吸湿性质国内外研究进展[J]. 气候与环境研究, 2010, 15(6): 808-816.
- [5] Adam M, Putaud J P, dos Santos S M, et al. Aerosol hygroscopicity at a regional background site (Ispra) in Northern Italy[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2012, 12(13): 5703-5717.
- [6] Fu H C, Sun Y L, Wang B, et al. Estimation of  $PM_{2.5}$  concentration in Beijing-Tianjin-Hebei region based on AOD data and GWR model[J]. China Environmental Science, 2019, 39(11): 4530-4537.  
付宏臣, 孙艳玲, 王斌, 等. 基于 AOD 数据和 GWR 模型估算京津冀地区  $PM_{2.5}$  浓度[J]. 中国环境科学, 2019, 39(11): 4530-4537.
- [7] Wang X, Hu Y C, Tian B, et al. Analysis of characteristic and correlation of mass concentration of aerosol optical depth retrievals and ground-level  $PM_{2.5}$  in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, China[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(9): 5069-5074.  
王旭, 胡引翠, 田冰, 等. 京津冀地区 AOD 和  $PM_{2.5}$  质量浓度的特征及相关性分析[J]. 环境工程学报, 2016, 10(9): 5069-5074.
- [8] Lin H F, Xin J Y, Zhang W Y, et al. Comparison of atmospheric particulate matter and aerosol optical depth in Beijing City[J]. Environmental Science, 2013, 34(3): 826-834.  
林海峰, 辛金元, 张文煜, 等. 北京市近地层颗粒物浓度与气溶胶光学厚度相关性分析研究[J]. 环境科学, 2013, 34(3): 826-834.
- [9] Bai Y Q, Qi H X, Liu L, et al. Study on the nonlinear relationship among the visibility,  $PM_{2.5}$  concentration and relative humidity in Wuhan and the visibility prediction[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2016, 74(2): 189-199.  
白永清, 祁海霞, 刘琳, 等. 武汉大气能见度与  $PM_{2.5}$  浓度及相对湿度关系的非线性分析及能见度预报[J]. 气象学报, 2016, 74(2): 189-199.
- [10] Wei L F, Yang F M, Tan J H, et al. Research progress on aerosol extinction properties[J]. Environmental Chemistry, 2014, 33(5): 705-715.  
韦莲芳, 杨复沫, 谭吉华, 等. 大气气溶胶消光性质的研究进展[J]. 环境化学, 2014, 33(5): 705-715.
- [11] Li T Y, Tan H B, Wang C L, et al. The method and the corresponding effect of ground fine particulate concentration retrieved by satellite remote sensing AOD[J]. China Environmental Science, 2020, 40(1): 13-23.  
李婷苑, 谭浩波, 王春林, 等. 卫星遥感 AOD 反演地面细颗粒物浓度方法与效果[J]. 中国环境科学,

- 2020, 40(1): 13-23.
- [12] Lin C Q, Li Y, Yuan Z B, et al. Using satellite remote sensing data to estimate the high-resolution distribution of ground-level PM<sub>2.5</sub>[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 156: 117-128.
- [13] Liu X T, Li F, Tan H B, et al. Analysis of sensitivity of monitored ground PM<sub>2.5</sub> concentrations based on satellite remote sensing data[J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(7): 1649-1659.  
刘显通, 李菲, 谭浩波, 等. 基于卫星遥感资料监测地面细颗粒物的敏感性分析[J]. *中国环境科学*, 2014, 34(7): 1649-1659.
- [14] Kong L W, Hu M, Tan Q W, et al. Aerosol optical properties under different pollution levels in the Pearl River Delta (PRD) region of China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2020, 87: 49-59.
- [15] Li C C, Mao J T, Liu Q H, et al. Application of MODIS satellite remote sensing aerosol products in Beijing air pollution research[J]. *Science in China Series (D: Earth Sciences)*, 2005, 35(S1): 177-186.  
李成才, 毛节泰, 刘启汉, 等. MODIS 卫星遥感气溶胶产品在北京市大气污染研究中的应用[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 2005, 35(S1): 177-186.
- [16] 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.
- [17] Yin D D, Ni C J, Deng Y, 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.  
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.
- [18] Tao J H, Zhang M G, Chen L F, et al. A method for estimating near-ground particulate matter based on satellite remote sensing AOT[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2013, 43(1): 143-154.  
陶金花, 张美根, 陈良富, 等. 一种基于卫星遥感 AOT 估算近地面颗粒物的方法[J]. *中国科学: 地球科学*, 2013, 43(1): 143-154.
- [19] Sun H H, Ni C J, Cui L, et al. Stochastic characteristic analysis of time series of extinction coefficient in Chengdu[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(8): 0801001.  
孙欢欢, 倪长健, 崔蕾, 等. 成都市大气消光系数时间序列随机特性分析[J]. *光学学报*, 2016, 36(8): 0801001.
- [20] Cui L, Ni C J, Sun H H, et al. Hygroscopic growth properties of particles in Chengdu and its correction methodology[J]. *Acta Scientiarum 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.
- [21] Koschmieder H. Theorie der horizontalen sichtweite [J]. *Beitrage zur Physik der freien Atmosphere*, 1924: 33-53.
- [22] Hansen J E, Travis L D. Light scattering in planetary atmospheres[J]. *Space Science Reviews*, 1974, 16(4): 527-610.
- [23] 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.
- [24] He X, Deng Z Z, Li C C, et al. Application of MODIS AOD in surface PM<sub>10</sub> evaluation[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2010, 46(2): 178-184.  
何秀, 邓兆泽, 李成才, 等. MODIS 气溶胶光学厚度产品在地面 PM<sub>10</sub> 监测方面的应用研究[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2010, 46(2): 178-184.
- [25] Sun H H, Ni C J, Cui L, et al. Statistical distribution characteristics of surface extinction efficiency in different humidity conditions[J]. *China Powder Science and Technology*, 2016, 22(6): 59-63.  
孙欢欢, 倪长健, 崔蕾, 等. 不同湿度条件下大气消光系数的概率分布特征[J]. *中国粉体技术*, 2016, 22(6): 59-63.