

# 基于 Revised IMPROVE 方法和 MIE 方法计算北京地区气溶胶消光系数的对比分析

刘斌<sup>1</sup>, 臧增亮<sup>1</sup>, 田平<sup>2</sup>, 颜鹏<sup>3</sup>, 蔡恒明<sup>4</sup>, 张仁健<sup>5</sup>

(1.国防科技大学 气象海洋学院, 南京 211101; 2.云降水物理研究和云水资源开发北京市重点实验室中心, 北京 100089; 3.中国气象局气象探测中心, 北京 100081; 4.中国人民解放军 93220 部队, 哈尔滨 150040; 5.中国科学院大气物理研究所 中国科学院东亚区域气候-环境重点实验室 北京 100029)

**摘要:** **目的** 对比分析 IMPROVE 方程的改进算法 (Revised IMPROVE) 和 MIE 方法在北京地区计算消光系数的适用性。 **方法** 基于 2012 年 6 月 3 日至 6 月 30 日北京地区大气颗粒物成分的浓度观测数据, 分别采用 Revised IMPROVE 和 MIE 方法计算颗粒物的消光系数, 其中 MIE 方法的粒径分布采用总量双峰分布体积谱和化学组分体积谱两种方案进行循环试验获取最优拟合结果, 使用散射积分浊度计和黑碳仪的实测数据对计算结果进行对比分析。 **结果** Revised IMPROVE 方程、总量双峰体积谱 MIE 方法和化学组分体积谱 MIE 方法都能较好地计算出了大气颗粒物消光系数, 与观测结果回归方程的相关系数 R 分别达到 0.952、0.9686 和 0.9734。体积谱分布参数的循环试验方法还同时可以获得气溶胶的体积谱分布参数, 总量双峰体积谱和化学组分体积谱 MIE 方法得到的细颗粒和粗颗粒几何平均粒径分别为 0.74、7.5  $\mu\text{m}$  和 0.48、6.0  $\mu\text{m}$ 。 **结论** 采用化学组分体积谱 MIE 方法计算的消光系数与观测结果最为接近, Revised IMPROVE 方程也有较好的准确性, 采用化学组分体积谱 MIE 方法得到的颗粒物体积谱峰值与实际观测结果也较为一致。

**关键词:** 消光系数; Revised IMPROVE; MIE 方法

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2019.06.019

**中图分类号:** X122 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2019)06-0123-06

## Contrastive Analysis of Extinction Coefficient of Aerosol in Beijing Based on Revised IMPROVE Equation and MIE Method

LIU Bin<sup>1</sup>, ZANG Zeng-liang<sup>1</sup>, TIAN Ping<sup>2</sup>, YAN Peng<sup>3</sup>, CAI Heng-ming<sup>4</sup>, ZHANG Ren-jian<sup>5</sup>

(1. College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Nanjing 211101, China;

2. Beijing Key Laboratory of Cloud, Precipitation, and Atmospheric Water Resources, Beijing 100089, China;

3. Meteorological Observation Centre of CMA, 100081; 4. Unit 93220 of PLA, Harbin 150040, China;

5. CAS Key Laboratory of Regional Climate-Environment for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

**ABSTRACT: Objective** To compare and analyze the applicability of the Revised IMPROVE equation and MIE method for calculation of the extinction coefficient of aerosol in Beijing. **Methods** Based on the observation data of atmospheric particulate

收稿日期: 2019-01-30; 修订日期: 2019-02-27

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFC1501702); 国家自然科学基金 (41775123)

作者简介: 刘斌 (1989—), 男, 助理工程师, 主要研究方向为气溶胶资料同化。

通讯作者: 臧增亮 (1977—), 男, 副教授, 主要研究方向为气溶胶资料同化。

matter concentration in Beijing from June 3 to June 30, 2012, the extinction coefficient of particulate matter was calculated by Revised IMPROVE and MIE methods respectively. The particle size distribution of MIE method was based on the total bimodal distribution volume spectrum and the chemical composition volume spectrum of the two schemes were cycled to obtain the best fitting results. The calculated results were compared and analyzed with the measured data of integrating nephelometer and aethalometer. **Results** The Revised IMPROVE equation, the total bimodal volume spectrum MIE method and the chemical composition volume spectrum MIE method could calculate the extinction coefficient of atmospheric particulate matter. The correlation coefficient  $R$  of the regression equation with observation results reached 0.952, 0.9686 and 0.9734, respectively. The cyclical test method of the volume spectrum distribution parameter can also obtain the volume spectrum distribution parameters of the aerosol, and the peaks of the fine particles and the coarse particles obtained by the total bimodal volume spectrum and the chemical composition volume spectrum MIE method were 0.74, 7.5  $\mu\text{m}$  and 0.48, 6.0  $\mu\text{m}$  respectively. **Conclusion** The extinction coefficient calculated by the chemical component volume spectrum MIE method is the closest to that of the observation. The Revised IMPROVE equation also has high accuracy. The peak volume spectrum of particles obtained by the chemical component volume spectrum MIE method is also consistent with the actual observation results.

**KEY WORDS:** extinction coefficient; Revised IMPROVE; MIE method

大气气溶胶是大气与悬浮在其中的固体和液体微粒共同组成的多相系,其吸收和散射作用对大气系统的辐射收支平衡,以及全球环境和气候都有着重要的影响<sup>[1-3]</sup>。气溶胶的散射和吸收效应可以利用消光系数来衡量,激光雷达、浊度计、能见度仪等都可以直接或间接测量气溶胶的消光系数。由于消光系数与气溶胶的浓度、化学成分、粒径分布等参数相关,也可以通过这些参数估计消光系数。常用的估计方法有基于多元回归的 Interagency Monitoring of Protected Visual Environments 法(以下简称 IMPROVE 方法),以及基于 MIE 理论计算每个粒子的消光效率再积分求取的方法(以下简称 MIE 方法)。

IMPROVE 方程是一个基于辐射传输理论、结合大量观测实验建立的不同物种质量浓度和颗粒物消光系数之间的多元线性方程,能够快速计算气溶胶的消光系数。Malm 等<sup>[4]</sup>基于 IMPROVE 网络监测观测的六类物种质量浓度数据,构建了原始的 IMPROVE 方程(Original IMPROVE algorithm),并利用该 IMPROVE 方程估计各种气溶胶化学成分对消光的贡献,为环境监测和环境治理提供了有效的数据支撑。Pitchford 等<sup>[5]</sup>发现,原始的 IMPROVE 方程往往会低估消光系数的高值,高估消光系数的低值,并提出了一种修正算法(Revised IMPROVE algorithm)。Revised IMPROVE 算法使用硫酸盐、硝酸盐和有机物组分的分离组分消光效率模型,其中硫酸盐、硝酸盐和有机物按其质量浓度分为大模态和小模态,文中即采用修正的 IMPROVE 方程(Revised IMPROVE algorithm)。由于 Revised IMPROVE 方程形式简单,并具有良好的计算精度,在国内外得到广泛应用,朱李华<sup>[6]</sup>和 Tao 等<sup>[7]</sup>计算了北京冬季、广州冬季和成都地区的气溶胶消光系数,发现该公式在我国地区具有较好的适用性,气溶胶中硫酸铵、硝酸铵和有机物消光作用贡献比重较大。

MIE 方法是 1908 年米氏(Gustav Mie)通过电磁波的麦克斯韦方程的计算,得到的一个关于光散射的严格解,该方法能精确地描述任何尺度参数均匀球状粒子的散射,是计算气溶胶消光系数的经典方法<sup>[8-11]</sup>。刘新民等<sup>[12]</sup>利用 MIE 方法对北京市夏季大气散射系数进行拟合,计算结果与实际观测数据吻合较好,董海燕<sup>[13]</sup>利用 MIE 方法研究了天津市夏季气溶胶的消光贡献,发现气溶胶消光主要集中于粒径小于 1.00  $\mu\text{m}$  的颗粒物,消光贡献率为 80%以上。

已有很多研究使用 IMPROVE 方程和 MIE 方法计算气溶胶消光系数,但目前使用两种方法计算大气消光系数在北京地区的对比研究方面还较少。文中将采用北京地区 2012 年夏季观测的气溶胶颗粒物成分数据和消光系数实测数据,利用 Revised IMPROVE 方程和 MIE 方法计算大气气溶胶消光系数,评估两种方法的准确性和适用性。

## 2 资料与方法

### 2.1 观测资料

膜采样的地点位于中国科学院大气物理研究所铁塔分部(39°58'N, 116°22'E),位于北京市北三环和北四环之间,海拔约 60 m,采样点距离院内 325 m 铁塔约 50 m,采样点周围没有明显的污染源。于 2012 年 6 月 3 日—30 日进行了 28 d 的连续观测,获得了 PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> 水溶性离子,包括五种阴离子(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、Cl<sup>-</sup>、F<sup>-</sup>、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>)、五种阳离子(Na<sup>+</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>和 Ca<sup>2+</sup>)、有机碳、元素碳等 12 种观测数据,同步利用散射积分浊度计(Aurora 3000 Integrating Nephelometer, Ecotech, Australia)观测大气散射系数。

大气颗粒物水溶性离子的浓度是通过离子色谱测量而得到。文中所用测量离子色谱的仪器型号是 DX-500(Dionex Corp, Sunnyvale, CA),采集大气

颗粒物的滤膜经过纯水萃取后配置成溶液, 将溶液分别通入阴阳离子色谱中, 然后根据色谱仪检测出的每个峰的位置来判断离子的种类, 再通过峰面积转化得到离子的浓度<sup>[14]</sup>。

## 2.2 观测资料的处理

气溶胶消光系数为散射系数与吸收系数之和, 由于观测数据只有散射系数, 而吸收系数需要用黑碳气溶胶进行估计。潘小乐等<sup>[15]</sup>进行气溶胶吸收系数的分离研究表明, 在中国的大部分城市, 对可见光的吸收都是由黑碳气溶胶引起, 吸收系数可以表示为<sup>[16]</sup>:

$$b_{ab} = \sigma \times m_{bc} \quad (1)$$

式中:  $b_{ab}$  为气溶胶吸收系数, (mol/L)/m;  $\sigma$  为大气中分散态单位质量黑碳气溶胶的比吸收系数, 对于城市地区,  $\sigma$  应在 7~10 之间;  $m_{bc}$  是 Aethalometer 在 880 nm 波长处测量的未订正的黑碳浓度,  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

吴兑<sup>[17]</sup>基于平行对比观测得到  $\sigma$  为 8.28, 该换算系数在国内有较好的通用性<sup>[18]</sup>。因此文中使用该拟合公式计算气溶胶吸收系数, 该吸收系数与观测的散射系数相加作为实际的消光系数。

## 2.3 消光系数的计算方法

1) 基于 Revised IMPROVE 方程的消光系数计算方法。Revised IMPROVE 方程形式为:

$$B_{\text{ext imp}} = 2.2 \times f_s(RH) \times c_{s-(\text{NH}_4)\text{SO}_4} + 4.8 \times f_1(RH) \times c_{l-(\text{NH}_4)\text{SO}_4} + 2.4 \times f_s(RH) \times c_{s-(\text{NH}_4)\text{NO}_3} + 5.1 \times f_1(RH) \times c_{l-(\text{NH}_4)\text{NO}_3} + 2.8 \times c_{s\text{-OM}} + 6.1 \times c_{l\text{-OM}} + 1 \times c_{\text{FS}} + 1.7 \times f_{\text{SS}}(RH) \times c_{\text{SS}} + 0.6 \times c_{\text{CM}} + 10 \times c_{\text{EC}} \quad (2)$$

式中:  $B_{\text{ext imp}}$  为计算的消光系数;  $RH$  为相对湿度;  $f(RH)$  为增长因子;  $c_{\text{OM}} = 1.6c_{\text{OC}}$ ;  $c_{\text{SS}} = 1.8c_{\text{Cl}^{-1}}$ ;

$$c_{\text{CM}} = 1.8(c_{\text{PM}_{10}} - c_{\text{PM}_{2.5}}); c_{\text{FS}} = 2.20c_{\text{Al}} + 2.49c_{\text{Si}} + 1.94c_{\text{Ti}} + 1.63c_{\text{Ca}} + 2.42c_{\text{Fe}}$$

对于  $f(RH)$ , 一般认为样品的相对湿度在 40% 之下的时候, 颗粒物消光系数不会随相对湿度变化。文中观测时使用的数据湿度均在 40% 之下, 故  $f(RH)$  取值为 1。另外, 由于测量的是  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$  和  $\text{NH}_4^+$  三种离子, 它们之间并不一定能完全配成  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  和  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ , 根据三个离子浓度之间的相关性的大小, 判断  $\text{NH}_4^+$  先与  $\text{SO}_4^{2-}$  结合或与  $\text{NO}_3^-$  结合, 估计得到  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  和  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  的质量浓度。

2) 基于 MIE 的消光系数计算方法。根据 MIE 理论, 散射光垂直于散射面和平行于散射面的两个分量的振幅函数的参数为:

$$a_n = \frac{\Psi_n(x)\Psi_n'(mx) - m\Psi_n'(x)\Psi_n(mx)}{\xi_n(x)\Psi_n'(mx) - m\xi_n'(x)\Psi_n(mx)} \quad (3)$$

$$b_n = \frac{\mu\Psi_n(x)\Psi_n'(mx) - \Psi_n'(x)\Psi_n(mx)}{m\xi_n(x)\Psi_n'(mx) - \xi_n'(x)\Psi_n(mx)} \quad (4)$$

其中散射粒子的尺度参数  $x = 2\pi a / \lambda$ ,  $a$  为粒子直径,  $\lambda$  为入射光波长,  $m$  为气溶胶复折射指数。MIE 消光效率和消光系数计算方程为:

$$Q_{\text{ext}} = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \text{Re}(a_n + b_n) \quad (5)$$

$$B_{\text{ext MIE}} = \int_0^{\infty} Q_{\text{ext}}(m, r, \lambda) \pi r^2 n(r) dr \quad (6)$$

消光效率  $Q_{\text{ext}}$  表示粒子消光截面与其几何截面之比。当气溶胶粒子复折射率  $m$  有虚部的时候, 存在吸收作用,  $Q_{\text{ext}}$  随颗粒物直径  $d$  的变化规律如图 1 所示。

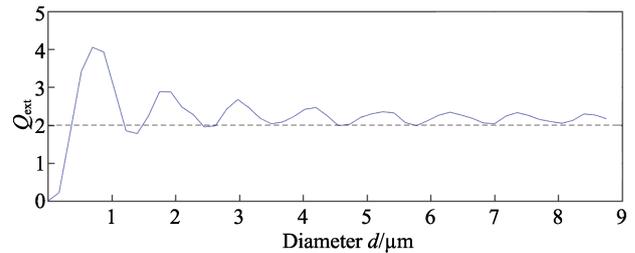


图 1  $Q_{\text{ext}}$  随颗粒物直径  $d$  的变化规律

由式 (6) 可知, 消光系数  $B_{\text{ext MIE}}$  是复折射指数  $m$ 、粒子半径  $r$  和  $dr$  粒径范围内粒子数量之间的函数关系, 其中粒子数谱  $n(r)$  可以由体积谱进行计算, 体积谱的分布采用如下两种假设。

方案 A 基于  $\text{PM}_{10}$  总量双峰态假设的 MIE 计算

假设气溶胶体积谱分布为双峰型。根据对北京夏季布点采样来描述中国北方大气气溶胶体积谱分布特征的相关研究, 得出北京地区气溶胶体积谱在  $0.1 \sim 0.3 \mu\text{m}$  之间出现第一峰, 在  $4.5 \sim 7.0 \mu\text{m}$  之间又会清晰地出现第二个峰<sup>[20]</sup>, 如图 2 所示。由于已知粗细两个粒径段内气溶胶总量, 利用各自的几何平均粒径、标准偏差共 4 个参数就可以确定体积谱的分布。

气溶胶粒子的双峰体积谱分布用式 (7) 描述:

$$\frac{dV}{d \lg D} = \frac{V_1}{\sqrt{2\pi} \lg \sigma_{g1}} \exp\left(-\frac{(\lg D - \lg D_{g1})^2}{2 \lg^2 \sigma_{g1}}\right) + \frac{V_2}{\sqrt{2\pi} \lg \sigma_{g2}} \exp\left(-\frac{(\lg D - \lg D_{g2})^2}{2 \lg^2 \sigma_{g2}}\right) \quad (7)$$

式中:  $V_1$ 、 $V_2$ 、 $D_{g1}$ 、 $D_{g2}$ 、 $\sigma_{g1}$ 、 $\sigma_{g2}$  分别为气溶胶粗、细粒径段总体积、几何平均粒径和几何标准偏差;  $D$  为干气溶胶粒子的粒径。通过式 (7) 可以将粗细两个粒径段的总体积在  $D$  范围内展开, 并细化为各个粒径段, 进而求出各个粒径段内的气溶胶体积, 进一步算出粒子数谱  $n(r)$ , 即可利用式 (6) 计算出消光系数。

在 12 种观测数据中, 由于  $\text{NO}_2^-$ 、 $\text{F}^-$  含量较低, 计算过程中不予考虑其对消光系数的影响。 $\text{K}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  的溶性和活性相近不作显式描述, 以等量  $\text{Na}$  代替, 因此实际考虑 7 种物质作为消光作用的主要来源。

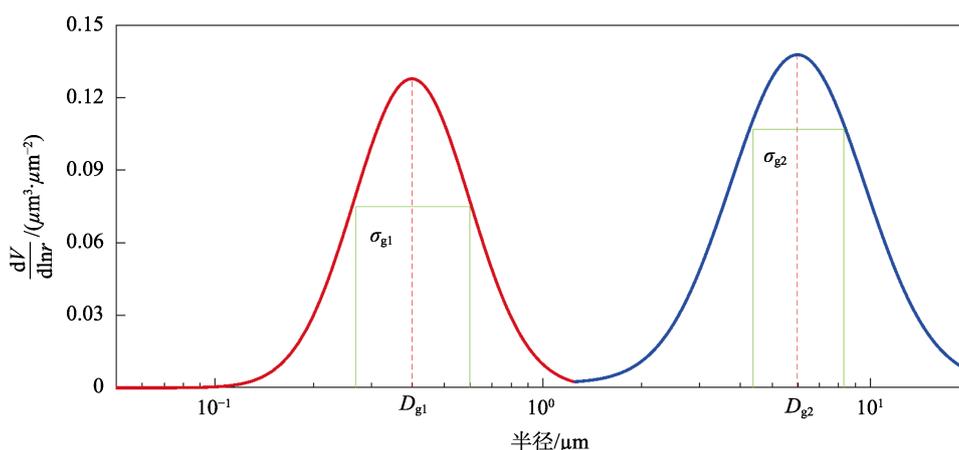


图2 北京地区夏季气溶胶粒子体积谱分布

气溶胶折射率  $m$  的取值采用内混合假设中的均匀混合模型（黑碳为核，其他颗粒物为壳）<sup>[21]</sup>，一般是用体平均法求解其折射率，即除 BC 之外其他 6 种粒子的折射率为  $m_{\text{shell}}$ ：

$$m_{\text{shell}} = \frac{\sum_{j=1}^6 m_j V_j}{\sum_{j=1}^6 V_j} \quad (8)$$

方案 B 基于化学组分体积谱分布假设的 MIE 计算

由于夏季北京气溶胶各个组分的复折射指数和体积谱分布并不相同，用方案 A 计算只能采用平均的复折射指数，忽略了各成分的特性，因此在方案 B 中考虑 PM<sub>10</sub> 所有 12 种化学组分的体积谱分布，分别进行 MIE 计算之后求和得到消光系数。其中 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、EC、OC 采用单峰分布，峰值粒径为 0.54~1.0 μm。Cl<sup>-</sup>、Na<sup>+</sup> 采用双峰分布，峰值粒径为 0.54~1.0 μm 和 3.2~5.6 μm，Mg<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup> 采用单峰分布，峰值粒径为 3.2~5.6 μm<sup>[22]</sup>。方案中 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、EC、OC 谱分布参数设置与 Cl<sup>-</sup>、Na<sup>+</sup> 双峰谱的细粒径段参数 ( $D_{g1}$ 、 $\sigma_{g1}$ ) 一致，Mg<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup> 谱分布参数设置与 Cl<sup>-</sup>、Na<sup>+</sup> 双峰谱的粗粒径段参数 ( $D_{g2}$ 、 $\sigma_{g2}$ ) 一致。各组分的密度和复折射指数采用刘新民文献数据<sup>[12]</sup>。

## 2.4 对比检验方法

为了分析上面三种方法计算出来的消光系数与实际结果的一致性，建立了如下回归方程进行评估：

$$B_{\text{ext}} = K \times B_{\text{extcal}} \quad (9)$$

式中： $B_{\text{ext}}$  为实际消光系数，即观测的散射系数与黑碳的吸收系数之和； $B_{\text{ext cal}}$  为采用 Revised IMPROVE 方程或 MIE 方法计算的消光系数。回归方程的相关系数为  $R$ ，当  $K$  和  $R$  都接近 1 时，表示回归效果较好，计算结果与实际结果相一致。

利用 MIE 方法两种方案计算消光系数时，由于

只有 PM<sub>10</sub> 和各组分质量浓度，而粗细粒径段的  $D_{g1}$ 、 $\sigma_{g1}$ 、 $D_{g2}$ 、 $\sigma_{g2}$  这 4 个参数仍是未知的，对粗细粒径  $D_{g1}$ 、 $D_{g2}$  分别在 0.1~2.0 μm、2.0~10 μm， $\sigma_{g1}$ 、 $\sigma_{g2}$  在 1.0~2.0 μm 范围内循环取值，尝试找到最优的参数值。为寻找最优的拟合参数，定义最优化指数  $Y$ ：

$$Y = |R - 1| + |K - 1| \quad (10)$$

$Y$  取最小值表示  $K$  和  $R$  都接近于 1，从而可以得到对应粗细粒子各自几何平均粒径和几何标准偏差共 4 个参数。

## 3 结果与分析

观测的散射系数与由式 (1) 计算的吸收系数如图 1 所示，可以看出，两者相差 1 个量级以上。这是因为观测的黑碳质量浓度较低，所以两者之和作为实际的消光系数主要由散射系数决定。

### 3.1 基于 Revised IMPROVE 方法的消光系数计算结果分析

图 4 为基于 Revised IMPROVE 方程计算的消光系数  $B_{\text{ext imp}}$  和实际观测的消光系数  $B_{\text{ext obs}}$  的散点图。由图 4 可知， $B_{\text{ext imp}}$  和  $B_{\text{ext obs}}$  的相关系数  $R$  达到了 0.952，这说明 Revised IMPROVE 方程估计的气溶胶消光系数与实际相一致，该方法对北京地区夏季的气溶胶消光系数的估算较为准确。

### 3.2 基于 MIE 方法的消光系数计算结果分析

基于 MIE 方法计算消光系数时，需要对  $D_{g1}$ 、 $\sigma_{g1}$ 、 $D_{g2}$ 、 $\sigma_{g2}$  这 4 个参数进行循环试验，以确定最优的  $Y$  值。经过循环试验，得到两个方案最优化指数  $Y$  最小值对应的 4 个参数见表 1。

方案 A 中颗粒物体积谱粒径参数稍大于经验观测结果，原因可能是由于方案 A 复折射指数采用平均值 ( $1.49+0.0004i$ )，由于相较于各组分计算的消光

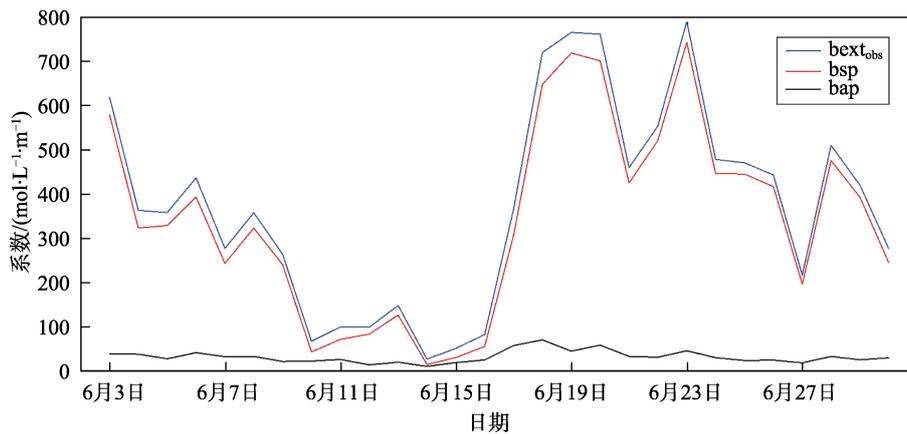


图 3 观测消光系数、观测散射系数和黑碳的消光系数逐日变化趋势

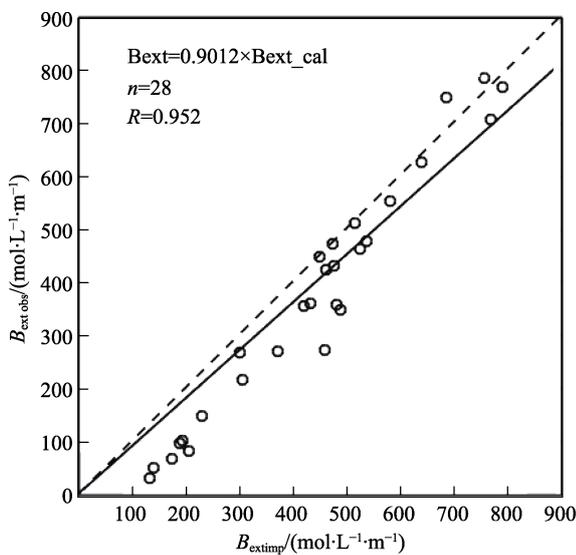


图 4 Revised IMPROVE 方程计算消光系数与观测消光系数相关性散点图

效率偏小，细颗粒物的峰值偏大，可以使消光效率增大，并接近于第一个峰值，弥补复折射指数偏小的效

应。方案 B 中细颗粒谱几何平均粒径为  $0.48 \mu\text{m}$ ，粗粒径为  $6 \mu\text{m}$ ，基本与经验观测结果一致。

表 1 两种方案最优化指数最小值对应的 4 个粒径参数

粒径参数	方案 A	方案 B
$Y$	0.0312	0.0269
$D_{g1}$	0.74	0.48
$\sigma_{g1}$	1.4	1.5
$D_{g2}$	7.5	6.0
$\sigma_{g2}$	1.5	1.25

图 5 为基于判断参数筛选的两种谱分布方案进行 MIE 方法计算的  $B_{\text{ext MIE}}$  与观测消光系数  $B_{\text{ext obs}}$  相关性的散点图。可以看出，计算结果能较好地拟合出北京市夏季消光系数，相比于 Revised IMPROVE 方程，MIE 计算结果数据相关性更好，方案 A 和方案 B 的斜率  $K$  均为 1.00，其中针对各组分的谱分布分别进行 MIE 计算的相关系数  $R$  略高，达到了 0.9734。

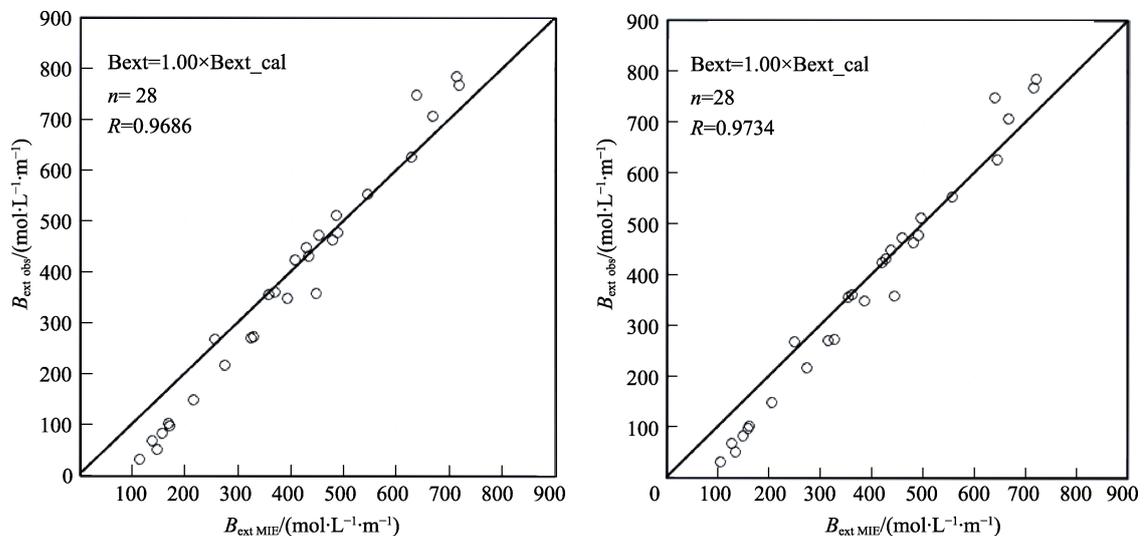


图 5 两种方案下 MIE 方法计算  $B_{\text{ext MIE}}$  的与观测消光系数  $B_{\text{ext obs}}$  相关性散点图

## 4 结论

1) 基于 Revised IMPROVE 方程计算了大气消光系数, 计算值  $B_{\text{ext imp}}$  和实测值  $B_{\text{ext obs}}$  的相关系数为 0.952, 说明该方程适用于北京夏季大气消光系数的解析。

2) 通过定义最优化指数, 经 MIE 计算筛选出最小值对应的气溶胶谱分布参数, 其中总量双峰分布体积谱方案(方案 A)的细颗粒谱几何平均粒径为 0.74  $\mu\text{m}$ , 粗粒径为 7.5  $\mu\text{m}$ 。基于化学组分体积谱方案(方案 B)的细颗粒谱几何平均粒径为 0.48  $\mu\text{m}$ , 粗粒径为 6  $\mu\text{m}$ , 与粒径谱的观测结果一致。

3) 基于 MIE 方法方案 A 和方案 B 计算的大气消光系数, 与实际值的相关系数分别为 0.9686 和 0.9734, 说明 MIE 方法能较好地计算北京夏季大气消光系数, 其中基于化学组分体积谱的准确性最高。

### 参考文献:

- [1] LI Z Q, ACKERMAN T P, WISCOMBE W, et al. Have Clouds Darkened Since 1995[J]. *Science*, 2003, 302(5648): 1150-1151.
- [2] FAN J W, LEUNG L R, LI Z Q, et al. Aerosol Impacts on Clouds and Precipitation in Eastern China: Results from Bin and Bulk Microphysics[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2012, 117(D16).
- [3] ZHAO C, LIU X, LEUNG L R. Impact of the Desert Dust on the Summer Monsoon System over Southwestern North America[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, 12(8): 3717-3731.
- [4] Malm W C, Sisler J F, Huffman D, Eldred R A, et al. Spatial and seasonal trends in particle concentration and optical extinction in the United States[J]. *J Geophys Res*, 1994, 99(D1): 1347-1370.
- [5] PITCHFORD M, MAIM W, SCHICHEL B, et al. Revised Algorithm for Estimating Light Extinction from IMPROVE Particle Speciation Data[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2007, 57(11): 1326-1336.
- [6] 朱李华, 陶俊, 陈忠明, 等. 2010年1月北京城区大气消光系数重建及贡献因子[J]. *环境科学*, 2012, 33(1): 13-19.
- [7] TAO J, ZHANG L, HO K, et al. Impact of PM<sub>2.5</sub> Chemical Compositions on Aerosol Light Scattering in Guangzhou—The Largest Megacity in South China[J]. *Atmospheric Research*, 2014, 135-136: 48-58.
- [8] 王少清, 任中京, 张希明, 等. MIE 散射系数计算方法的研究[J]. *应用光学*, 1997, 18(2): 4-9.
- [9] 杨晔, 张镇西, 蒋大宗. MIE 散射物理量的数值计算[J]. *应用光学*, 1997, 18(4): 17-19.
- [10] 袁易军, 任德明, 胡孝勇. MIE 理论递推公式计算散射相位函数[J]. *光散射学报*, 2006, 117(14): 366-371.
- [11] 项建胜, 何俊华. MIE 光散射理论的数值计算方法[J]. *应用光学*, 2007, 28(3): 363-366.
- [12] 刘新民, 邵敏. 北京市夏季大气消光系数的来源分析[J]. *环境科学学报*, 2014, 24(2): 185-189.
- [13] 董海燕, 韩旸, 蔡斌彬, 等. 天津市气溶胶折射指数及消光特征[J]. *环境污染与防治*, 2009, 31(4): 28-32.
- [14] 牟世芬, 刘克纳, 丁晓静. 离子色谱方法及应用(第二版)[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [15] 潘小乐, 颜鹏, 汤洁. 2006年北京春季气溶胶吸收系数的分离研究[J]. *气候变化研究进展*. 2007, 3(5): 249-254
- [16] ARNOTT W P, MOOSMÜLLER H, SHERIDAN P J, et al. Photoacoustic and Filter-based Ambient Aerosol Light Absorption Measurements: Instrument Comparisons and the Role of Relative Humidity[J]. *J Geophys Res*, 2003, 108(D1): 4034.
- [17] 吴克, 毕雪岩, 邓雪娇, 等. 珠江三角洲大气灰霾导致能见度下降问题研究[J]. *气象学报*, 2006, 64(4): 510-517.
- [18] YAN P, TANG J, HUANG J, et al. The Measurement of Aerosol Optical Properties at a Rural Site in Northern China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, 8(8): 2229-2242.
- [19] CAO J J, LEE S C, CHOW J C, et al. Spatial and Seasonal Distributions of Carbonaceous Aerosols over China[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112: D22S11.
- [20] CHENG T T, WANG H, XU Y F, et al. Climatology of Aerosol Optical Properties in Northern China[J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40: 1495-1509.
- [21] BARNARD J C, FAST J D, PAREDES-MIRANDA G, et al. Technical Note: Evaluation of the WRF-Chem “Aerosol Chemical to Aerosol Optical Properties” Module Using Data from the MILAGRO Campaign[J]. *Atmos Chem Phys Discuss*, 2010, 10: 8927-8961
- [22] 陈永桥. 北京城乡结合部气溶胶中水溶性离子粒径分布和季节变化[J]. *生态学报*, 25(12): 3231-3236.