

# 基于激光雷达和微波辐射计的气溶胶质量浓度反演算法研究与分析

季承荔<sup>1,2</sup>, 陈臻懿<sup>3\*</sup>, 黄艺峰<sup>3</sup>, 茆佳佳<sup>1</sup>, 王志成<sup>1</sup>, 古锐昌<sup>4</sup>, 刘爱明<sup>4</sup>, 张春生<sup>4</sup>, 项衍<sup>5</sup>

<sup>1</sup>中国气象局气象探测中心, 北京 100081;

<sup>2</sup>中国气象局气象探测工程技术研究中心, 北京 100081;

<sup>3</sup>北京工商大学轻工科学与工程学院, 北京 100048;

<sup>4</sup>深圳市国家气候观象台, 广东 深圳 518040;

<sup>5</sup>安徽大学物质科学与信息技术研究院, 安徽 合肥 230601

**摘要** 大气气溶胶是重要的大气污染物之一, 气溶胶质量浓度的垂直分布及其与气象要素的相互影响, 对理解大气污染传输具有重要意义。激光雷达因具有高时空分辨率的探测优势而成为研究气溶胶颗粒物立体分布的有力工具。本文利用深圳米散射激光雷达、微波辐射计和近地面气溶胶质量浓度监测仪, 根据均方差选取最优参数, 建立基于消光系数的温湿融合 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度反演模型, 并以深圳气象梯度观测塔 4 个高度的 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度小时均值为基准, 对模拟结果进行了验证分析。结果显示: 模拟值与观测值两者的变化趋势一致性较好, 相关系数受模拟高度、相对湿度影响, 并进行了晴天、多云天气下的对比, 深圳气象梯度观测塔上 4 个高度的模拟值和实测值相关系数均大于 0.68, 平均绝对误差和均方根误差最大值分别为 6.88  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  和 18.56  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。比较 4 个季节的模拟效果发现, 冬季的模拟结果准确性要低于其他三个季节。最后通过个例分析, 结合地面温度、相对湿度、风场和气压场, 分析了深圳夏季颗粒物质量浓度的时空分布特征。

**关键词** 激光雷达; PM<sub>2.5</sub> 质量浓度; 消光系数

**中图分类号** X831; P412.25; P407.5

**文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/CJL231280

## 1 引言

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胶体体系<sup>[1]</sup>, 其化学成分复杂、性质多变<sup>[2]</sup>。既有森林火灾、火山灰等天然来源, 又有工业生产、燃料燃烧等人为来源<sup>[3]</sup>。大气中的气溶胶不仅直接影响地气系统的能量收支, 带来全球气候变化<sup>[4]</sup>, 还会污染人类的生存环境<sup>[5]</sup>, 进而直接危害人体健康<sup>[6]</sup>。激光雷达以其独特的高时空分辨率和高测量精度成为一种重要的气溶胶主动遥感工具<sup>[7-8]</sup>, 通过激光与大气的散射物理过程<sup>[9]</sup>, 得到气溶胶的垂直分布特性, 满足大气探测需要。激光雷达反演气溶胶消光系数的技术已经非常成熟<sup>[10-13]</sup>, 但反演气溶胶质量浓度垂直分布方面的研究虽备受关注, 却一直进展不大<sup>[14-17]</sup>。陶宗明等<sup>[18]</sup>利用侧向散射激光雷达、PM<sub>2.5</sub> 质量浓度监测仪, 对合肥地区 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度垂直分布廓线进行了相关研究; 张文娟等<sup>[19]</sup>和吴仪等<sup>[20]</sup>分别利用微脉冲激光雷达和米散射激光雷达, 建立起消光系数和 PM<sub>2.5</sub> 质量

浓度的线性模型, 并研究其反演精度, 但上述研究未考虑温湿等气象要素对 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度的影响。莫祖斯等<sup>[21]</sup>综合地面气象要素和颗粒物质量浓度, 建立基于神经网络的 PM<sub>2.5</sub> 浓度预测模型, 但地面气象要素与高空差异较大, 会给反演结果带来误差。探空获取的温湿廓线可以对激光雷达反演算法模型进行融合, 但探空每天仅有两个时次, 无法满足激光雷达实时探测的需求。地基多通道微波辐射计是一种利用亚毫米级到厘米级波长的电磁波(微波)进行测量的设备<sup>[22]</sup>, 它可以获取垂直方向上高空间、分钟级的大气温湿廓线<sup>[23]</sup>, 极大地弥补了探空数据的不足。因此, 可以将微波辐射计的温湿数据代入 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度反演模型, 降低地面与高空气象差异带来的误差。

由于缺乏长期的高空 PM<sub>2.5</sub> 实际测量值作为标准, 一直未对激光雷达反演的 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度产品开展过准确性评估, 因此其无法在业务中广泛应用。本研究将微波辐射计的温湿廓线实时融入激光雷达消光系数反演 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度的算法模型, 以深圳气象梯度观测

收稿日期: 2023-10-12; 修回日期: 2023-12-15; 录用日期: 2023-12-25; 网络首发日期: 2024-01-10

基金项目: 中国气象局创新发展专项(CXFZ2024J011, CXFZ2024J057)、民用航天技术预先研究项目(D020305)、中国科学院环境光学与技术重点实验室开放基金(2005DP173065-2021-07)

通信作者: \*zychen@btbu.edu.cn

塔 4 个高度的  $PM_{2.5}$  质量浓度为标准值, 评估晴空、多云等不同天气条件、不同季节下激光雷达反演气溶胶质量浓度垂直廓线的准确性。

## 2 数据和方法

### 2.1 实验场地和数据来源

本研究所使用的观测数据, 来源于深圳国家综合

气象观测专项外场的气象梯度观测塔(简称梯度塔, SZMT)、米散射激光雷达、微波辐射计(MVR)和近地面  $PM_{2.5}$  质量浓度监测仪, 其中梯度塔上所用设备为高度 70、120、220、335 m 的  $PM_{2.5}$  质量浓度监测仪, 具体设备及测量参数见表 1。

表 1 仪器和观测参数

Table 1 Instruments and monitoring parameters

Instrument	Parameter	Type	Temporal-spatial resolution
LiDAR	Aerosol extinction coefficient	AGHJ-I-LIDAR (MPL)	7.5 m, 3 min
Microwave radiometer	Temperature, relative humidity	MP-3000 Radiometric	50 m, 3 min
$PM_{2.5}$ monitor	$PM_{2.5}$ mass concentration	Handix- $PM_{2.5}$ monitor (POPS-1100)	1 h

### 2.2 气溶胶消光系数

本研究所用的米散射激光雷达, 出射波长为 532 nm, 垂直距离分辨率为 7.5 m, 时间分辨率为 3 min。基于激光雷达方程, 利用 Fernald 法<sup>[24]</sup>进行气溶胶消光系数反演, 获取消光系数  $\alpha_a(z)$ 。假设  $S_1 =$

$\alpha_a(z)/\beta_a(z)$  是大气气溶胶的消光散射比, 这里设为常数 50<sup>[25]</sup>,  $\beta_a(z)$  是大气气溶胶的后向散射系数, 大气分子消光散射比  $S_2 = \alpha_m(z)/\beta_m(z) = 8\pi/3$ , 其中  $\alpha_m(z)$  为大气分子的消光系数, 可由标准大气模式得到,  $\beta_m(z)$  是大气分子后向散射系数。

$$\alpha_a(z) = -\frac{S_1}{S_2} \alpha_m(z) + \frac{X(z) \exp\left[2\left(\frac{S_1}{S_2} - 1\right) \int_z^{z_c} \alpha_m(z) dz\right]}{\alpha_a(z_c) + \frac{S_1}{S_2} \alpha_m(z_c)} + 2 \int_z^{z_c} \frac{X(z) \exp\left[2\left(\frac{S_1}{S_2} - 1\right) \int_z^{z_c} \alpha_m(z) dz\right] dz}{\alpha_a(z_c) + \frac{S_1}{S_2} \alpha_m(z_c)}, \quad (1)$$

式中:  $X(z)$  为距离修正的激光雷达回波信号;  $\alpha_a(z)$  和  $\alpha_m(z)$  分别为高度  $z$  处大气气溶胶和大气分子的消光系数;  $z$  是高度;  $\alpha_m(z_c)$  是大气分子在参考高度  $z_c$  处的消光系数。

### 2.3 算法模型

假设大气气溶胶在任何高度组分之间的比例均匀但浓度分布不均, 此时消光系数只随着高度而变化。将最小比例组分的组合假设为一个等效粒子, 这样不同高度的气溶胶即可转化为等效粒子数随高度的差异。当高度  $z$  处的气溶胶组成为  $n(z)$  个等效粒子时, 高度  $z$  处气溶胶的消光系数  $\alpha_a(z)$  和质量浓度的关系<sup>[26]</sup>可以用线性模型表示为

$$m(z) = a\alpha(z) + C. \quad (2)$$

胡欢陵等<sup>[26]</sup>研究了近地面气溶胶消光系数  $\alpha_a(z)$  与近地面气溶胶质量浓度  $m(z)$  的相互关系, 给出了指数模型的经验公式,

$$m(z) = a\alpha(z)^b + C, \quad (3)$$

式中:  $m(z)$  为高度  $z$  处的气溶胶质量浓度;  $a(z)$  为高度  $z$  处的气溶胶消光系数;  $a, b$  是与气溶胶尺度谱分布、组分及光学折射率有关的比例系数;  $C$  与测量系统有关。

本文算法以指数模型为基础, 考虑气象因素的影

响, 并融入微波辐射计的温湿廓线, 实时反演  $PM_{2.5}$  质量浓度。需要指出的是, 气象因素对气溶胶质量浓度空间垂直分布的影响非常复杂<sup>[27]</sup>, 尤其降水条件下, 激光雷达信号衰减严重, 因此, 本文只研究非降水天气条件下, 温度和湿度对气溶胶垂直分布的影响。

$$m(z) = a \times \alpha_a(z)^b + \exp\left\{-\left(z - z_0\right) \cdot \left[\frac{273 - T(Z)}{273}\right] \frac{1}{t}\right\} \times H_{RH}(Z) + C, \quad (4)$$

式中:  $T(Z)$  为温度;  $H_{RH}(Z)$  为相对湿度;  $z_0$  为气溶胶标高;  $1/t$  是伸缩因子, 温度对气溶胶垂直分布的影响近似符合指数递减规律, 但是变化幅度却可能小很多, 伸缩因子可以使曲线更加平缓。温湿廓线由微波辐射计获取。实际运用时, 先对样本数据进行预处理, 包括异常值处理(采用三倍标准差剔除)、雨天数据及缺失值剔除, 选取激光雷达最低高度的消光系数、微波辐射计地面温湿度和近地面  $PM_{2.5}$  质量浓度, 临近 2500 个时次的的数据参与模型拟合, 以均方差最小为依据, 自动拟合确定模型参数  $a, b, C$ ; 选取高度  $z$  处的消光系数、温度和相对湿度以最新时次的参数  $a, b, C$  代入式(4), 计算得到高度  $z$  处的  $PM_{2.5}$  质量浓

度  $m(z)$ 。为研究  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度反演的准确性,与深圳气象梯度观测塔 4 个高度 (70 m、120 m、220 m 和 335 m) 的  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度进行比对验证,具体算法流程见图 1。本文选取了不同季节、不同天气的部分数

据进行模拟值与实测值的相关性分析,其中多云天气情况 (clouds) 为存在消光系数突变大于  $1 \text{ km}^{-1}$  的无降水日<sup>[28]</sup>, 洁净无云的无降水日则为晴朗天气情况 (clean)。

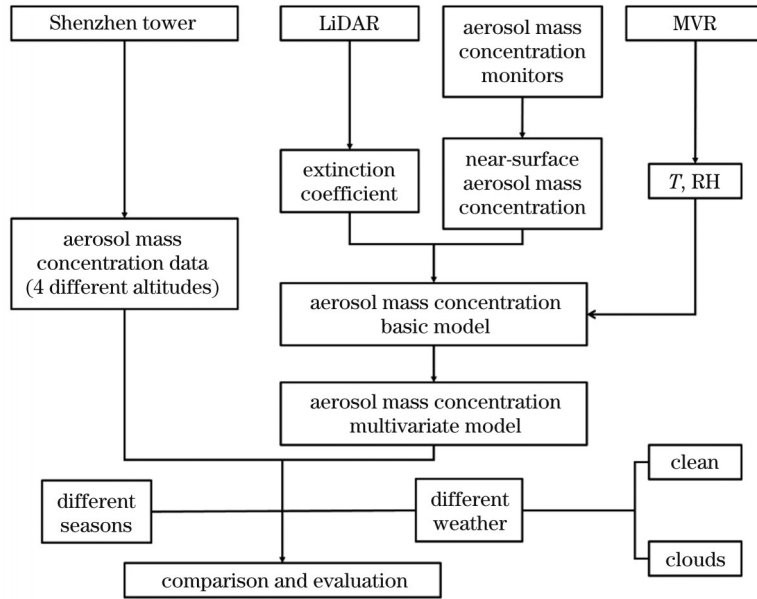


图 1  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度多元拟合模型的算法流程

Fig. 1 Flow chart of  $\text{PM}_{2.5}$  mass concentration multivariate fitting model

## 2.4 模型评估

为了评估  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度多元拟合的模型性能,对模拟值和实际观测值进行比对分析。具体的评价指标包括相关系数 ( $R$ )、平均绝对误差 (MAE)、均方根误差 (RMSE), 它们的计算公式分别为

$$E_{\text{MAE}} = \frac{\sum_{i=1}^N |x_i - x_f|}{N}, \quad (5)$$

$$E_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - x_f)^2}{N}}, \quad (6)$$

式中:  $N$  为有效数据点数;  $x_i$  为实际测量值  $x_f$  为模拟值。

## 3 分析与讨论

考虑到影响  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度分布的因素较多, 本文的  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度多元拟合模型主要是考虑温度和相对湿度对  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度分布的影响, 因此选取了气象条件比较稳定 (无雨雪、无大风) 情况下的数据进行分析。本节以 2022 年 8 月为例, 比对线性模型、指数模型和多元拟合模型这三种模型的拟合情况。根据实验数据及经验数据,  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度多元拟合模型中的参考高度  $z_0 = 4 \text{ km}$ , 伸缩因子  $t = 4$ 。分析不同天气下的模型反演结果, 并对不同季节下的  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度多元模拟结果进行评估, 最后选取某个时间段结合气压场、地面数据等, 综合分析深圳地区  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度垂直分布

的微观物理特征。

### 3.1 模型比较

图 2 是以 2022 年 8 月为例, 定量分析两种基本模型——线性模型、指数模型和  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度多元拟合模型模拟结果的准确性, 三种模型的具体参数及相关性结果见表 2。在深圳气象梯度观测塔 4 种高度 (70 m, 120 m, 220 m 和 335 m) 下, 线性模型和指数模型模拟结果与实测值的相关系数  $R$  均低于 0.66, 平均绝对误差  $> 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 均方根误差  $> 18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 指数模型比线性模型在模拟效果上更为稳定; 经过温湿廓线融合的多元模拟模型结果, 相较前两种基本模型, 模拟结果与实测值的相关系数  $R$  提高到 0.80 以上, 平均绝对误差和均方根误差最小值约为  $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  和  $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。由此可见, 温度与相对湿度对气溶胶质量浓度反演有较大影响, 多元模拟模型对于气溶胶质量浓度的数值模拟准确性有了明显的提升, 较适合于长时期的  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度模拟, 本文接下来的分析也将只采用多元拟合模型。

### 3.2 不同天气

#### 3.2.1 晴朗天气

为分析不同天气条件下的模拟结果, 图 3 为晴朗天气下, 深圳气象梯度观测塔 4 个高度  $\text{PM}_{2.5}$  实测值与  $\text{PM}_{2.5}$  多元拟合模拟值的比对。图 3(a)~(d) 分别为 70 m、120 m、220 m、335 m 高度处  $\text{PM}_{2.5}$  实测值与消光系数反演的  $\text{PM}_{2.5}$  多元拟合模拟值之间的相关系数  $R$ 。可以看出, 4 个高度的模拟和实测值的相关系数

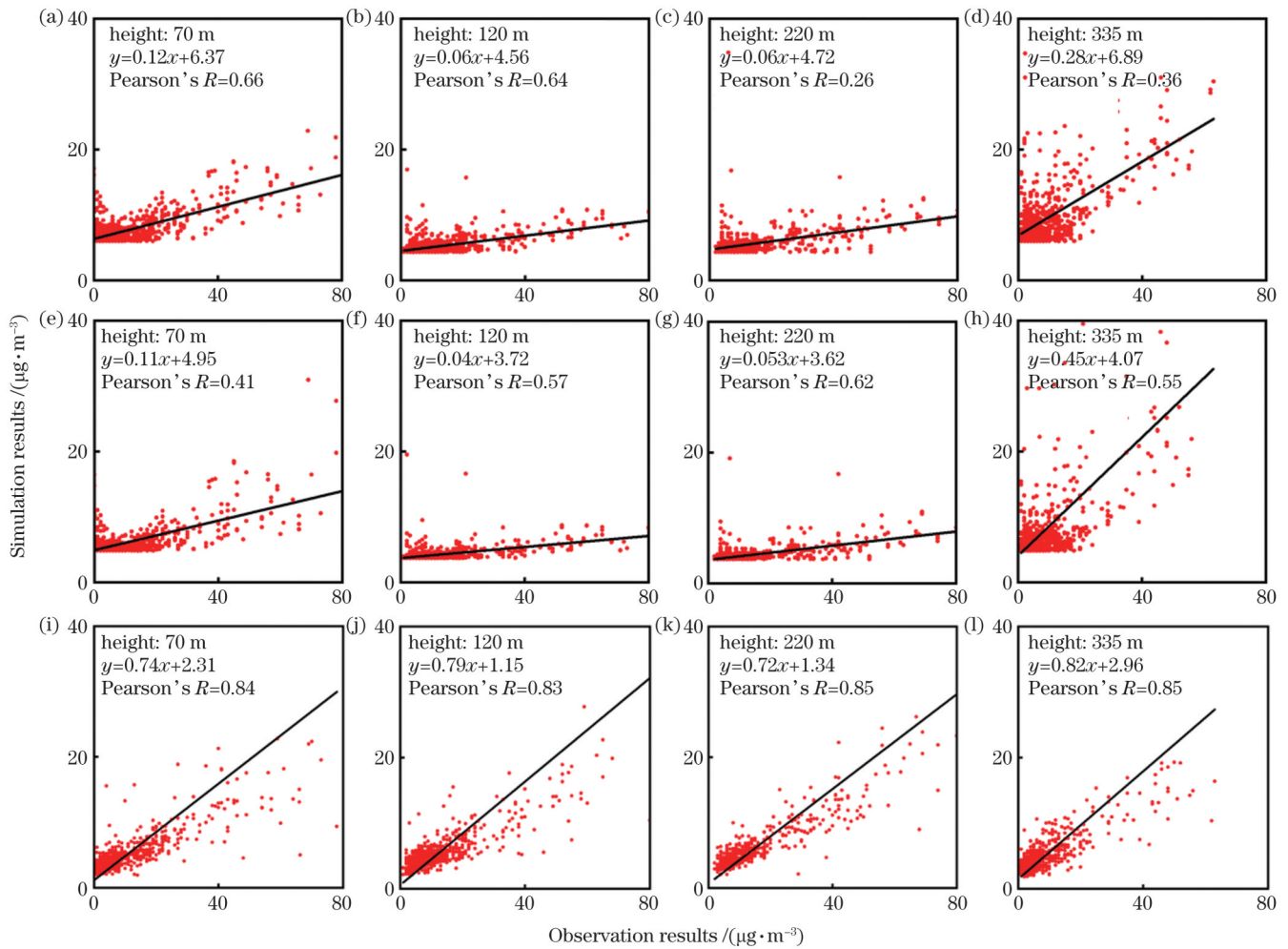


图 2 2022 年 8 月三种模型在 70 m、120 m、220 m、335 m 高度下与实测的比对结果。(a)~(d)线性模拟；(e)~(h)指数模拟；(i)~(l)多元拟合模拟

Fig. 2 Comparison of observed results with three models' results at 70 m, 120 m, 220 m, and 335 m heights in August, 2022. (a)~(d) Linear model; (e)~(h) exponential model; (i)~(l) multivariate fitting model

表 2 2022 年 8 月三种模型模拟结果准确性评估

Table 2 Assessment of the accuracy of three model simulation results in August, 2022

Model type	Parameters	R	MAE / ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )	RMSE / ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )
Linear	$a=14.15$	$<0.63$	$>10$	$>18$
	$c=4.10$			
Exponential	$a=3.71$	$<0.66$	$>5$	$>15$
	$b=6.44$			
	$c=7.76$			
Multivariate fitting	$a=12.56$	$>0.8$	$>4$	$>7$
	$b=0.51$			
	$c=13.56$			

为均在 0.68 以上。结合表 3 可知,平均绝对误差和均方根误差均处于较低值,其中在 70 m 高度为最低值,分别为  $4.99 \mu\text{g}/\text{m}^3$  和  $14.28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,最接近实际观测值。

### 3.2.2 多云天气

图 4(a)~(d)为多云天气下的  $\text{PM}_{2.5}$  实测值与多元拟合模拟值的相关系数。同样可见模拟值与实测值在

不同高度下变化趋势的一致性。由于在实际处理时进行了云剔除,模拟值与实测值之间的相关性没有受到影响,相关系数  $R$  在 0.7 以上,平均绝对误差均低于  $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,均方根误差为  $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$  以下。通过不同天气的比对,表明多元拟合模型反演  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度在多云天气下同样适用。综合晴天和多云天气,平均绝对误差和均方根误差最大值分别为  $6.88 \mu\text{g}/\text{m}^3$  和  $18.56 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,

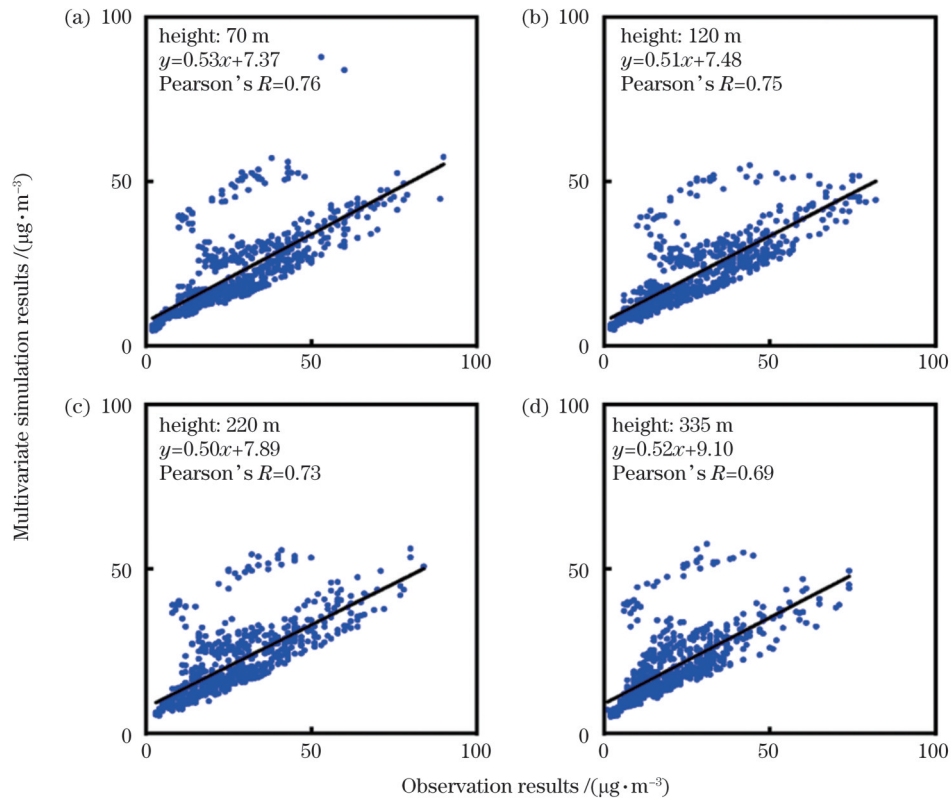


图 3 晴朗天气下不同高度模型模拟值和观测值相关性。(a) 70 m;(b) 120 m;(c) 220 m;(d) 335 m

Fig. 3 Correlation between simulated and observed values of models at different heights under clean days. (a) 70 m; (b) 120 m; (c) 220 m; (d) 335 m

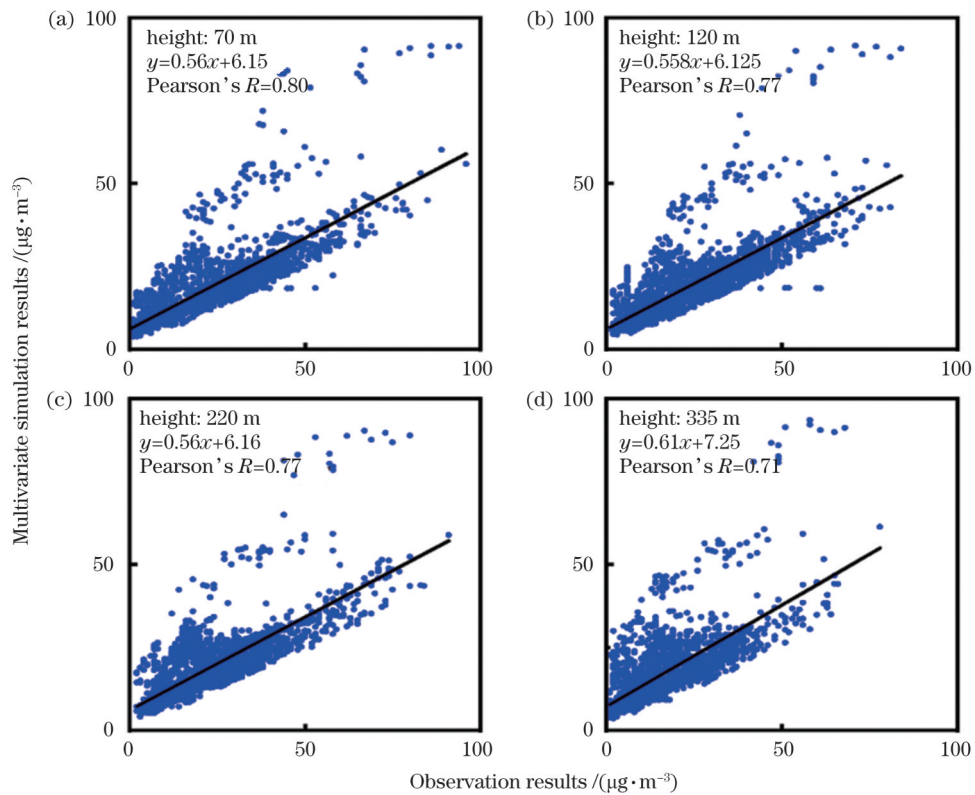


图 4 多云天气下不同高度模型模拟值和观测值相关性。(a) 70 m;(b) 120 m;(c) 220 m 和 (d) 335 m

Fig. 4 Correlation between simulated and observed values of models at different heights under cloudy days. (a) 70 m; (b) 120 m; (c) 220 m; (d) 335 m

出现在晴天下的 335 m 高度。不同天气下 4 个高度的 具体对比值见表 3。

表 3 不同天气情况下模拟结果准确性评估

Table 3 Accuracy evaluation of simulation results under different weather conditions

Comparison	Model type	Period	R	MAE / ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )	RMSE / ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )	Heigh / m
Different weather conditions	Multivariate fitting	Clean days (N=1152)	0.76	4.99	14.28	70
			0.75	5.13	15.65	120
			0.73	5.94	16.11	220
			0.69	6.88	18.56	335
		Cloudy days (N=2322)	0.80	4.04	13.98	70
			0.77	4.75	14.43	120
			0.77	4.80	15.06	220
			0.71	6.21	17.67	335

### 3.3 不同季节

图 5 和表 4 为深圳地区 4 个季节 4 个高度的 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度模拟结果,图 5 显示观测点 4 个季节 4 个高度的 PM<sub>2.5</sub> 平均质量浓度均在 35  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  以下,且 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度具有明显的季节变化规律——在冬季相对较高,4 个高度的平均值为 31.52  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,其他三个季节分

别为 23.33  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (春)、14.39  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (夏)和 19.39  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (秋),4 个高度的模拟值与实测值相关系数范围分别为 0.78~0.93、0.71~0.81、0.73~0.80 和 0.63~0.75,即冬季的模拟结果要明显低于其他三个季节。造成模拟效果冬季较差的原因可能是冬季的大气层更为稳定,高空逆温层的存在使气溶胶聚集于边界层以内不易扩

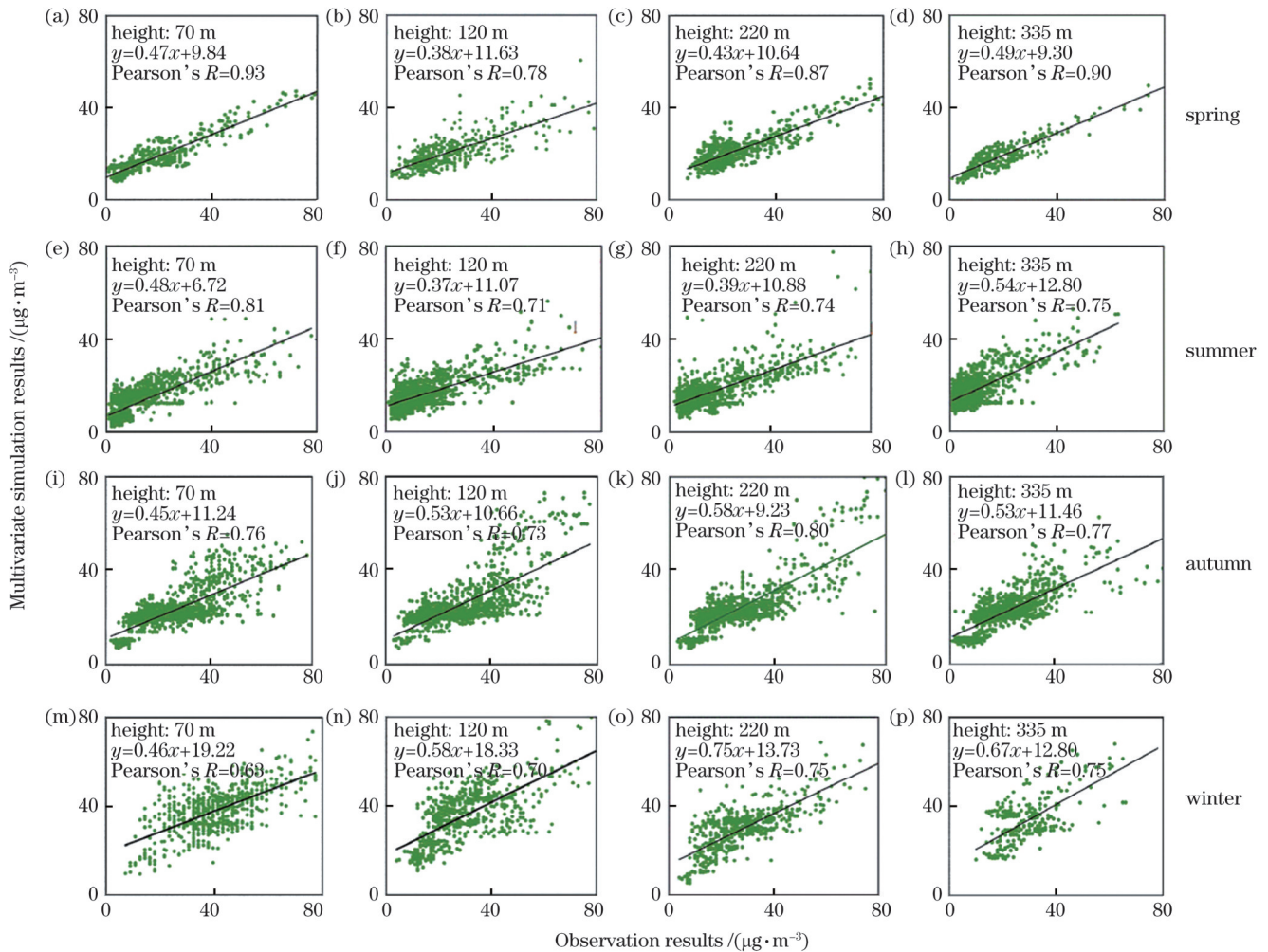


图 5 不同季节模拟值与实测值相关性。(a)~(d)春季;(e)~(h)夏季;(i)~(l)秋季;(m)~(p)冬季

Fig. 5 Correlation between simulated and measured values in different seasons. (a)–(d) Spring; (e)–(h) summer; (i)–(l) autumn; (m)–(p) winter

表 4 不同季节下的模型模拟结果准确性评估  
Table 4 Accuracy evaluation of model simulation results in different seasons

Period	Comparison	Height /m				R	MAE / ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )	RMSE / ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )
		70	120	220	335			
Spring (N=647) (2023-03—2023-05)	Observed $\text{PM}_{2.5}$	28.75	29.32	28.49	28.54	0.78-0.93	2.51-4.98	5.41-16.19
	Simulated $\text{PM}_{2.5}$	30.85	31.62	31.25	30.66			
Summer (N=1350) (2022-07-01—2022-08 &.2023-06)	Observed $\text{PM}_{2.5}$	9.04	20.24	21.22	13.98	0.71-0.81	5.78-12.65	15.23-19.35
	Simulated $\text{PM}_{2.5}$	15.45	20.69	21.15	10.93			
Autumn (N=1192) (2022-09—2022-11)	Observed $\text{PM}_{2.5}$	23.72	23.92	22.00	14.85	0.73-0.80	6.51-10.77	15.45-20.14
	Simulated $\text{PM}_{2.5}$	26.80	26.59	25.90	14.69			
Winter (N=584) (2022-12—2023-02)	Observed $\text{PM}_{2.5}$	28.46	28.10	26.25	20.86	0.63-0.75	12.06-15.19	19.28-26.93
	Simulated $\text{PM}_{2.5}$	27.16	25.37	26.37	26.27			

散。而近地层较高的气溶胶浓度对激光衰减严重,从而影响消光系数反演的准确性。

### 3.4 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度时空分布个例分析

为更直观地研究气溶胶消光系数、 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度时空分布及传输过程,本文选取2022年7月29日作为个例进行分析,图6是当日0:00—18:00米散射激光雷达探测的气溶胶消光系数[图6(a)]、微波辐射计获取的温度[图6(b)]、相对湿度[图6(c)]廓线和温湿融合的多元拟合模型模拟的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度时空分布图[图6(d)]。深圳当日气压场较弱,在低压控制下,空气气流上升,以南风/西南风为主,风力较小,以微风及以下( $<3\text{ m/s}$ )为主。在早上8:00点之

前,消光系数集中在 $0.2\text{ km}^{-1}$ 以下[图6(a)],温度较高( $>28\text{ }^\circ\text{C}$ ),温度随着高度的升高而降低[图6(b)],近地面相对湿度 $>85\%$ ,0.6 km以上高空相对湿度降低[ $<75\%$ ,图6(c)]。此时边界层1 km内的气溶胶消光系数较低( $<0.3\text{ km}^{-1}$ ), $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度同消光系数均随着高度的增加而降低,但梯度不明显[图6(d)]。这是因为虽然夏季气溶胶混合能力相对较强,气溶胶扩散过程通常趋向于垂直沉降,但7月29日早上质量浓度随高度变化混合并不均匀,主要和当日稳定的层结及微风有关,风力较小,不利于扩散。8:00—14:00,近地面温度开始升高( $>30\text{ }^\circ\text{C}$ ),温度随高空分布更加均匀,相对湿度则出现明显分层,从近地面到0.2 km

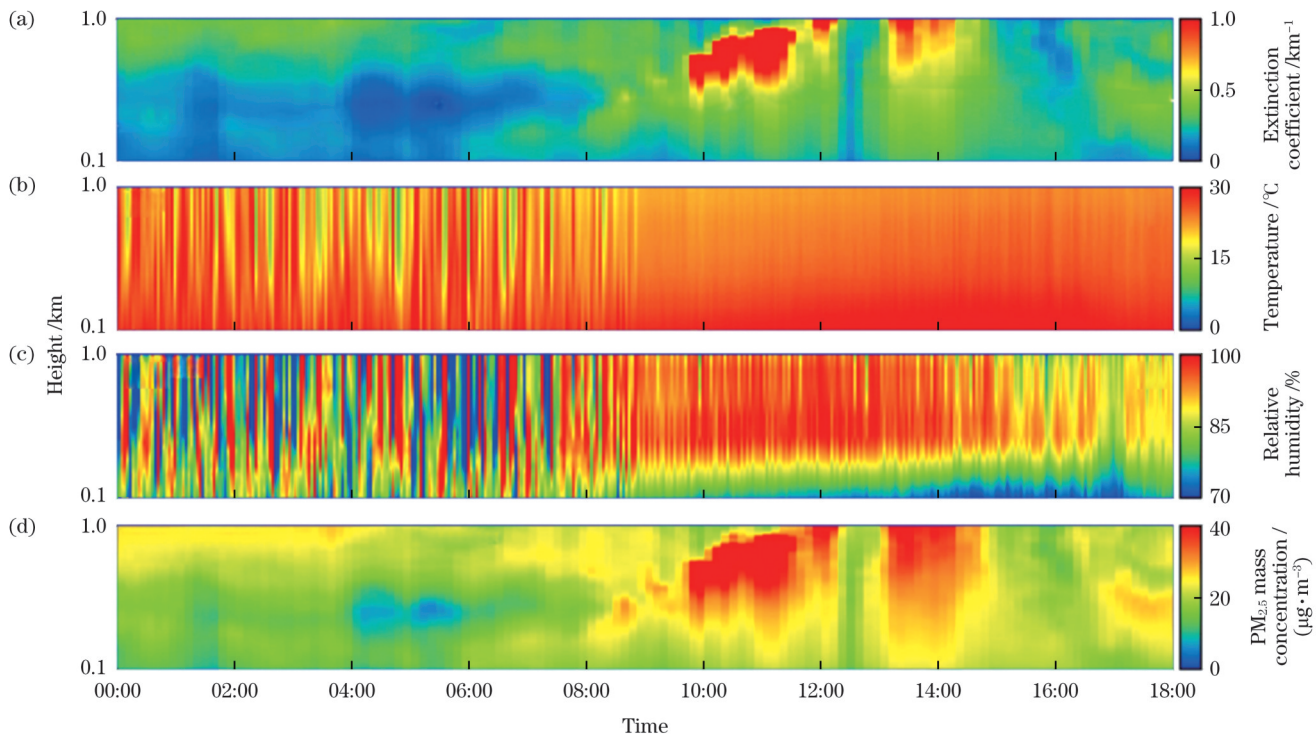


图 6 2022年7月29日观测点0:00—18:00的测量结果。(a)消光系数;(b)温度;(c)相对湿度;(d) $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度  
Fig. 6 Measurement results from 0:00 to 18:00 at observation points on July 29, 2022. (a) Extinction coefficient; (b) temperature; (c) relative humidity; (d)  $\text{PM}_{2.5}$  mass concentration

相对湿度逐渐降低,主要集中于 80% 以下(59%~78%),而在 0.3~1.0 km 相对湿度明显升高,高温高湿条件下,高空中的气溶胶吸湿性增加,0.48 km 以上的消光系数均值  $>0.5 \text{ km}^{-1}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度则在相应的高度处观测到高值( $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ),0.68 km 以上观测到云层。这表明大气气溶胶在垂直空间中的分布受温度和相对湿度的影响较大。此外,气溶胶的垂直分布也完全体现在  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度的高度变化中,为分析大气气溶胶垂直分布的微观物理特征提供了分析手段。

## 4 结 论

本文比对了两种消光系数反演  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度基本模型——线性模型和指数模型的模拟结果,发现两种模型相关系数  $R$  均小于 0.66,平均绝对误差  $>10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,均方根误差  $>18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,但指数模型在 4 个高度的模拟结果相对稳定,也更接近实际值。因此建立了基于指数模型,融合温度、相对湿度的  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度多元模拟模型。以均方差指标最小为依据选取最优参数,对输出模型进行了验证分析。相较前两种基本模型,多元模拟模型结构的准确性有了很大提高,4 个高度的相关系数  $R$  均保持在 0.80 以上,平均绝对误差和均方根误差最小值约为  $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  和  $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。在晴朗和多云天气条件下,4 个高度的相关系数  $R$  均达到了 0.68 以上,平均绝对误差和均方根误差也同样分别低于  $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$  和  $19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。不同季节下的模拟结果显示,深圳地区的  $\text{PM}_{2.5}$  平均质量浓度集中在  $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$  以下,  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度模拟结果具有季节变化规律,春夏秋冬的模拟结果要优于冬季,这可能是由于冬季相对较高的气溶胶质量浓度为模拟带来了不确定性。同时,考虑到激光雷达及微波辐射计测量过程带来的不确定性,气溶胶质量浓度反演的多元拟合模型验证结果在可接受的范围内表现良好。最后开展了  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度时空分布的个例分析,为激光雷达对颗粒物质量浓度的长时期、高时空分辨率监测应用提供了新途径。

## 参 考 文 献

- [1] 吴健,杨春平,刘建斌.大气中的光传输理论[M].北京:北京邮电大学出版社,2005.  
Wu J, Yang C P, Liu J B. Theory of light transmission in the atmosphere[M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2005.
- [2] 李正强,谢一焜,张莹,等.大气气溶胶成分遥感研究进展[J].遥感学报,2019,23(3):359-373.  
Li Z Q, Xie Y S, Zhang Y, et al. Advance in the remote sensing of atmospheric aerosol composition[J]. Journal of Remote Sensing, 2019, 23(3): 359-373.
- [3] 徐薇,修光利,陶俊,等.上海市大气散射消光特征及其与颗粒物化学组成关系研究[J].环境科学学报,2015,35(2):379-385.  
Xu W, Xiu G L, Tao J, et al. Characterization of light scattering extinction and the relationship with particle components in Shanghai[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(2): 379-385.
- [4] Winker D M, Pelon J, Coakley J A, Jr, et al. The CALIPSO mission: a global 3D view of aerosols and clouds[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2010, 91(9): 1211-1230.
- [5] Chan C K, Yao X H. Air pollution in mega cities in China[J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(1): 1-42.
- [6] Solomon P A, Costantini M, Grahame T J, et al. Air pollution and health: bridging the gap from sources to health outcomes: conference summary[J]. Air Quality, Atmosphere & Health, 2012, 5(1): 9-62.
- [7] Comerón A, Muñoz-Porcar C, Rocadenbosch F, et al. Current research in lidar technology used for the remote sensing of atmospheric aerosols[J]. Sensors, 2017, 17(6): 1450.
- [8] 董宗戈,邓凯,蔡旺.大气探测激光雷达技术发展综述[J].光电技术应用,2022,37(6):53-57.  
Dong Z G, Deng K, Cai W. Summary of laser radar technology development for atmospheric detection[J]. Electro-Optic Technology Application, 2022, 37(6): 53-57.
- [9] 田晓敏,刘东,徐继伟,等.大气探测激光雷达技术综述[J].大气与环境光学学报,2018,13(5):321-341.  
Tian X M, Liu D, Xu J W, et al. Review of lidar technology for atmosphere monitoring[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2018, 13(5): 321-341.
- [10] Klett J D. Lidar inversion with variable backscatter/extinction ratios[J]. Applied Optics, 1985, 24(11): 1638-1643.
- [11] Chen Z Y, Huang Y F, Yao Z L, et al. The aerosol optical characteristics in different dust events based on a 532 nm and 355 nm polarization lidar in Beijing[J]. Remote Sensing, 2023, 15(14): 3494.
- [12] 董德保,张广元,陆大春,等.寿县一次沙尘过程气溶胶谱分布和光学特性的阶段性特征[J].激光与光电子学进展,2022,59(19):1901002.  
Dong D B, Zhang G Y, Lu D C, et al. Stageful characteristics of aerosol spectral distribution and optical properties during a dust episode in Shouxiang[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(19): 1901002.
- [13] 毛飞跃,徐维维,臧琳,等.地基Mie散射激光雷达反演的研究进展与挑战[J].光学学报,2023,43(18):1899907.  
Mao F Y, Xu W W, Zang L, et al. Research progress and challenges in retrieval of ground-based Mie scattering lidar[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(18): 1899907.
- [14] 李斯文.气溶胶质量浓度分布的激光雷达探测方法研究[D].西安:西安理工大学,2022:26.  
Li S W. Study on lidar detection method of aerosol mass concentration distribution[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2022: 26.
- [15] 韩道文,刘文清,刘建国,等.气溶胶质量浓度空间垂直分布的反演方法[J].中国激光,2006,33(11):1567-1573.  
Han D W, Liu W Q, Liu J G, et al. Retrieval method for aerosol mass concentration vertical distribution[J]. Chinese Journal of Lasers, 2006, 33(11): 1567-1573.
- [16] 罗卉卉,陈臻懿,张天舒,等.基于CALIPSO卫星和地面观测资料的气溶胶垂直分布对比[J].中国激光,2019,46(12):1201003.  
Luo H H, Chen Z Y, Zhang T S, et al. Comparison of aerosol vertical distribution based on CALIPSO satellite and ground observation data[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(12): 1201003.
- [17] 付松琳,谢晨波,李路,等.基于激光雷达探测技术的  $\text{PM}_{2.5}$  浓度辨识研究[J].光学学报,2021,41(9):0928001.  
Fu S L, Xie C B, Li L, et al.  $\text{PM}_{2.5}$  concentration identification based on lidar detection[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(9): 0928001.
- [18] 陶宗明,麻晓敏,刘东,等.2014年合肥西郊  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度廓线统计分布[J].光学学报,2016,36(6):0601001.  
Tao Z M, Ma X M, Liu D, et al. Statistical distribution of  $\text{PM}_{2.5}$  mass concentration profiles at west suburb of Hefei city in 2014[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(6): 0601001.
- [19] 张文娟,吕波,孙凤娟,等.气溶胶消光系数反演  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度方法研究[J].红外与激光工程,2020,49(S2):20200367.



- Zhang W J, Lü B, Sun F J, et al. Research on inversion method of  $PM_{2.5}$  mass concentration by aerosol extinction coefficient[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(S2): 20200367.
- [20] 吴仪, 邓孺孺, 秦雁, 等. 秋冬季节珠三角典型区域气溶胶浓度垂直分布的激光雷达反演[J]. *遥感学报*, 2020, 24(3): 302-318.
- Wu Y, Deng R R, Qin Y, et al. Vertical distribution of aerosol mass concentration over Pearl River Delta observed by LiDAR during autumn and winter[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2020, 24(3): 302-318.
- [21] 莫祖斯, 卜令兵, 王勤, 等. 基于GRNN神经网络模型结合气溶胶消光系数和气象要素评估颗粒物质量浓度[J]. *中国激光*, 2022, 49(17): 1710001.
- Mo Z S, Bu L B, Wang Q, et al. Estimation of particulate matter mass concentration based on generalized regression neural network model combining aerosol extinction coefficient and meteorological elements[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(17): 1710001.
- [22] 雷连发, 卢建平, 朱磊, 等. 多通道地基微波辐射计大气遥感[J]. *遥感学报*, 2014, 18(1): 180-191.
- Lei L F, Lu J P, Zhu L, et al. Atmospheric remote sensing using multi-channel ground-based microwave radiometer[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2014, 18(1): 180-191.
- [23] 谭泉, 姚志刚, 赵增亮, 等. 多波段微波辐射计反演大气温湿廓线性能分析[J]. *遥感技术与应用*, 2015, 30(1): 170-177.
- Tan Q, Yao Z G, Zhao Z L, et al. Analysis of atmospheric parameter retrievals from multi-band microwave sounding instruments[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2015, 30(1): 170-177.
- [24] Fernald F G. Analysis of atmospheric lidar observations: some comments[J]. *Applied Optics*, 1984, 23(5): 652-653.
- [25] Tesche M, Ansmann A, Müller D, et al. Vertically resolved separation of dust and smoke over Cape Verde using multiwavelength Raman and polarization lidars during Saharan Mineral Dust Experiment 2008[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2009, 114(D13): D13202.
- [26] 胡欢陵, 吴永华, 谢晨波, 等. 北京地区秋冬季颗粒物污染边界层的激光雷达观测[J]. *环境科学研究*, 2004, 17(1): 59-66, 73.
- Hu H L, Wu Y H, Xie C B, et al. Aerosol pollutant boundary layer measured by LiDAR at Beijing[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2004, 17(1): 59-66, 73.
- [27] 申付振, 郭胜利, 张玮, 等. 南京北郊气溶胶质量浓度空间垂直分布反演[J]. *应用光学*, 2016, 37(3): 425.
- Shen F Z, Guo S L, Zhang W, et al. Retrieving aerosol mass concentration vertical distribution in north suburb area of Nanjing city[J]. *Journal of Applied Optics*, 2016, 37(3): 425.
- [28] 齐思齐. 利用双波段偏振激光雷达观测研究气溶胶与云的识别及气溶胶吸收特性[D]. 兰州: 兰州大学, 2020: 30.
- Qi S Q. Study on the identification of aerosol and cloud and the absorption characteristics of aerosol by using dual-band polarized lidar observation[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2020: 30.

## Aerosol Mass Concentration Retrieval Algorithm Based on LiDAR and Microwave Radiometry

Ji Chengli<sup>1,2</sup>, Chen Zhenyi<sup>3\*</sup>, Huang Yifeng<sup>3</sup>, Mao Jiajia<sup>1</sup>, Wang Zhicheng<sup>1</sup>, Gu Ruichang<sup>4</sup>, Liu Aiming<sup>4</sup>, Zhang Chunsheng<sup>4</sup>, Xiang Yan<sup>5</sup>

<sup>1</sup>*CMA Meteorological Observation Centre, Beijing 100081, China;*

<sup>2</sup>*CMA Meteorological Observation Engineering Technology Research Center, Beijing 100081, China;*

<sup>3</sup>*School of Light Industry Science and Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China;*

<sup>4</sup>*Shenzhen National Climate Observatory, Shenzhen 518040, Guangdong, China;*

<sup>5</sup>*Institute of Physical Science and Information Technology, Anhui University, Hefei 230601, Anhui, China*

### Abstract

**Objective** The technology for retrieving aerosol extinction coefficients from LiDAR is mature. However, further progress is required to retrieve the vertical distribution of aerosol mass concentration. In addition, accuracy evaluation of aerosol mass concentration from LiDAR is challenging owing to the lack of standard vertical  $PM_{2.5}$  mass concentration. Therefore, in this study, a  $PM_{2.5}$  mass concentration retrieval algorithm was developed by integrating real-time temperature, relative humidity, and extinction coefficient profiles. The  $PM_{2.5}$  mass concentration at four heights of the Shenzhen Meteorological Gradient Observation Tower was used as the standard value to evaluate the accuracy of the model under different weather conditions and seasons.

**Methods** The influence of meteorological factors on the vertical distribution of aerosol mass concentration is extremely complex, particularly under precipitation conditions where the LiDAR signal attenuation is severe. Therefore, in this study, only the effects of temperature and relative humidity on the vertical distribution of aerosols under non-precipitation weather conditions were investigated. In practical applications, sample data are initially preprocessed, including the outlier handling (triple standard deviation removal), rainy day data, and missing value removal. The extinction coefficient at the lowest height of the LiDAR, ground temperature, relative humidity from the microwave radiometer, and  $PM_{2.5}$  mass concentration near the ground were substituted into an exponential model. The data from 2500 h were subsequently used for model fitting. The model parameters were automatically determined based on the minimum mean square error. Thus, the extinction coefficient, temperature, and relative humidity profiles at a specific height could be selected to calculate the  $PM_{2.5}$  mass concentration at the corresponding height. To investigate the accuracy of the  $PM_{2.5}$  mass concentration inversion, comparisons were conducted between  $PM_{2.5}$  mass concentrations at four heights (70, 120, 220, and 335 m) on the Shenzhen Meteorological Gradient Observation Tower.

**Results and Discussions** By comparing different weather conditions, the correlation coefficients between the simulated and

measured values at the four heights are over 0.68 (Figs. 3 and 4). The maximum mean absolute error (MAE) and root mean square error (RMSE) are  $6.88 \mu\text{g}/\text{m}^3$  and  $18.56 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , respectively, appearing at a height of 335 m on sunny days. In different seasons, the correlation coefficients at the four heights range from 0.78–0.93, 0.71–0.81, 0.73–0.80, and 0.63–0.75, respectively (Table 4). The  $\text{PM}_{2.5}$  mass concentration spatiotemporal distribution and transport process on July 29, 2022, was selected as a case study for analysis (Fig. 6). Before 08:00, the aerosol extinction coefficient within 1 km of the boundary layer is relatively low ( $<0.3 \text{ km}^{-1}$ ), and the  $\text{PM}_{2.5}$  mass concentration, and extinction coefficient decreased with increasing altitude. However, the decrease in gradient was insignificant. This is because the  $\text{PM}_{2.5}$  mass concentration mixed unevenly with altitude changes owing to stable stratification on that day. Moreover, relatively weak winds are not conducive to diffusion. Under high temperature and relative humidity conditions, the hygroscopicity of aerosols at high altitudes increases. Thus, the averaged extinction coefficient over 0.48 km is greater than  $0.5 \text{ km}^{-1}$ , and high  $\text{PM}_{2.5}$  mass concentration ( $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) is observed simultaneously. This indicates that atmospheric aerosol vertical distribution is significantly influenced by temperature and relative humidity. In addition, the vertical distribution of aerosols is fully reflected in the height variation of  $\text{PM}_{2.5}$  mass concentration, which provides an analytical tool for examining the vertical distribution of aerosol microscopic physical characteristics.

**Conclusions** This study established a multivariate  $\text{PM}_{2.5}$  mass concentration fitting model based on an exponential model combining temperature, relative humidity, and extinction profiles. The optimal parameters were selected based on the minimum mean-square deviation index, and the output was validated. Compared to the linear and exponential basic models, the accuracy of the multivariate fitting model has been improved, with correlation coefficients at all four heights above 0.80. The minimum MAE and RMSE are approximately  $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  and  $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , respectively. Under clear and cloudy weather conditions, the correlation coefficients at four altitudes exceed 0.68, and the MAE and RMSE are below  $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$  and  $19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , respectively. The simulation results spanning different seasons demonstrate that the average mass concentration of  $\text{PM}_{2.5}$  in Shenzhen is below  $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . The simulated  $\text{PM}_{2.5}$  mass concentration exhibited seasonal variation patterns. In addition, the simulation results for spring, summer, and autumn are better than those for winter. This may be due to the uncertainty caused by the relatively high aerosol mass concentrations in winter. Considering the uncertainty caused by the LiDAR and microwave radiometer measurement processes, the validation results of the proposed multivariate model performed well within an acceptable range.

**Key words** LiDAR;  $\text{PM}_{2.5}$  mass concentration; extinction coefficient