

# 激光与光电子学进展

## 一种估测气溶胶吸收系数垂直分布的理论方法

李宝莹<sup>1,2,3</sup>, 崔生成<sup>1,3\*</sup>, 乔智<sup>1,2,3</sup>, 张梓晗<sup>1,3</sup>, 李学彬<sup>1,3</sup>, 罗涛<sup>1,3</sup>, 刘娜娜<sup>1,3,4</sup>

<sup>1</sup>中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所中国科学院大气光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;

<sup>2</sup>中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 安徽 合肥 230026;

<sup>3</sup>先进激光技术安徽省实验室, 安徽 合肥 230037;

<sup>4</sup>中国科学技术大学环境科学与光电技术学院, 安徽 合肥 230026

**摘要** 研究气溶胶辐射强迫和激光大气传输效应, 需要掌握气溶胶光吸收特性参数及其垂直分布情况。提出一种基于实测与模式相结合的方法来估测垂直高度上气溶胶吸收系数分布。首先采用太阳辐射计和激光雷达观测的数据分别反演整层气溶胶光学厚度(AOD)和消光廓线, 再将辐射传输计算软件 moderate spectral resolution atmospheric transmittance algorithm and computer model (MODTRAN) 和 santa barbara DISORT atmospheric radiative transfer (SBDART) 在相应气溶胶模式下的数据结果作为约束条件, 得到气溶胶吸收廓线, 并通过外场实验测量数据进行反演实验。结果表明, 所提方法是可行的, 可作为气溶胶吸收系数垂直分布有效获取的一种新的技术途径。

**关键词** 大气光学; 气溶胶; 吸收系数廓线; 激光雷达; 太阳辐射计; 辐射传输

中图分类号 O648.18

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1901001

## Theoretical Method to Estimate Vertical Distribution of Aerosol Absorption Coefficient

Li Baoying<sup>1,2,3</sup>, Cui Shengcheng<sup>1,3\*</sup>, Qiao Zhi<sup>1,2,3</sup>, Zhang Zihan<sup>1,3</sup>, Li Xuebin<sup>1,3</sup>, Luo Tao<sup>1,3</sup>,  
Liu Nana<sup>1,3,4</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

<sup>2</sup>Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei,  
Anhui 230026, China;

<sup>3</sup>Advanced Laser Technology Laboratory of Anhui Province, Hefei, Anhui 230037, China;

<sup>4</sup>School of Environmental Science & Optoelectronic Technology, University of Science and Technology of China,  
Hefei, Anhui 230026, China

**Abstract** To evaluate the effects of aerosol radiation forcing and laser atmospheric transport, it is necessary to know the parameters of aerosol light absorption characteristics and its vertical distribution. Thus, this paper presents a method based on a combination of field measurements and models to estimate the aerosol absorption coefficient distribution at vertical height. With the proposed method, the aerosol optical depth (AOD) and extinction profile at the entire layer are obtained via inversion with data observed using a sun-photometer and a LiDAR. Then, the aerosol absorption profile is obtained via selecting the corresponding aerosol modes as constraints from the moderate spectral resolution atmospheric transmittance

收稿日期: 2021-01-12; 修回日期: 2021-01-21; 录用日期: 2021-01-29

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC0213101)、十三五装备预研项目(41416030204)、中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA17040524)

通信作者: \*csc@aiofm.ac.cn

algorithm and computer model (MODTRAN) and santa barbara DISORT atmospheric radiative transfer (SBDART) model. An inversion test is performed using data measured in a field experiment, and the results demonstrate that the proposed method is feasible and can be employed to obtain the vertical distribution of the aerosol absorption coefficient.

**Key words** atmospheric optics; aerosol; absorption coefficient profile; lidar; sun-photometer; radiative transfer

**OCIS codes** 010.1110; 010.1030; 280.1100; 010.5620

## 1 引言

大气气溶胶指大气中悬浮着的各种固体和液体粒子<sup>[1]</sup>,它通过吸收和散射改变传输强度和方向,从而影响辐射在大气中的传输。气溶胶层通过吸收太阳辐射而增温,并通过大气环流输送热量,实现大气升温<sup>[2]</sup>;除直接辐射效应外,气溶胶吸收辐射加热还会使云层蒸发,影响云的形成和寿命<sup>[3]</sup>。研究证实了亚洲沙尘层内的高吸收性颗粒对辐射强迫和升温速率增加的重要作用,以及对垂直分布变化的影响<sup>[4-6]</sup>。东亚作为主要的沙尘来源区,沙尘气溶胶对太阳辐射有较强的散射和吸收能力,且通过输送显著影响区域和全球气候<sup>[7]</sup>。考虑到气溶胶时空分布变化大、垂直分布差异远大于水平变化,因此研究气溶胶吸收特性高度分布意义重大。

气溶胶吸收研究主要体现在两个方面,一是利用理论模型进行模式模拟,二是利用主被动观测。观测手段主要包括地基观测、空基和卫星遥测。地基观测技术利用过滤系统对吸收进行测量,其滤光片负载效应、气溶胶与过滤介质之间的多次散射效应显著影响测量<sup>[8-9]</sup>。兰州大学利用 SACOL 站<sup>[10]</sup>黑碳仪的长期连续测量数据,计算得到该地区的气溶胶吸收系数,并分析其在长时间尺度上的变化和特征天气条件的影响<sup>[11]</sup>。中国科学院安徽光学精密机械研究所自行设计的光声光谱仪<sup>[12]</sup>适用于测量近地面层的气溶胶吸收系数;单次散射反照率光谱仪<sup>[13]</sup>可在单波长对气溶胶消光和吸收进行测量。非小型化的原位测量设备通常只能实现地基定点测量,无法得到垂直方向上的分布信息,也难以大规模获取所需的气溶胶吸收特性。利用全球气溶胶自动观测网(AERONET)<sup>[14]</sup>数据可以反演光学厚度(AOD)和单次散射反照率,从而间接得到整层气溶胶的吸收情况<sup>[15]</sup>,由于受到天空条件和数据质量的限制,可用数据数量较少,且人力难以抵达地区的数据无法获取。利用光栅分光光谱仪观测得到全天空散射辐射,并在晴空天气条件下反演单次散射反照率,来反映气溶胶的吸收特性,与其他地基测量仪器的结果有较好的一致性<sup>[16]</sup>。激光雷

达可进行高分辨率的连续观测,得到垂直的消光信息<sup>[17-19]</sup>,目前已有利用三波长主动观测来反演气溶胶吸收廓线的报道<sup>[20]</sup>。机载观测局限性较大,不能连续长时间观测且易受地域限制和空域管制。卫星可在全球尺度进行遥测,但从记录的地-气混合辐射信号中提取气溶胶吸收特性参数,尤其是定量获取垂直廓线分布<sup>[21-22]</sup>仍然值得深究。

基于前述现状分析,每种技术手段各有优劣势,综合利用多种观测技术的优势,或是一种有效的新手段。基于此,本文提出一种“观测+模式”相结合的方式来获取气溶胶吸收系数高度分布。

## 2 实验概况

野外观测实验于 2020 年 8 月在我国西北地区开展。实验地点位于青海省西北部的大柴旦,地理区域范围为 37.58°~39.2° N, 90.17°~96.37° E,海拔为 2829~5655 m。大柴旦具有典型的内陆高原荒漠气候,含氧量为 73%,年平均气温为 1.4 °C,年平均降水量为 83.5 mm,无霜期为 108 d。观测场位置为(37.85° N, 95.35° E),海拔 3180 m。

利用太阳辐射计和激光雷达主被动联合观测方式进行实地测量,并结合辐射传输模式模拟,得到气溶胶的吸收廓线。太阳辐射计和激光雷达实物如图 1 所示。

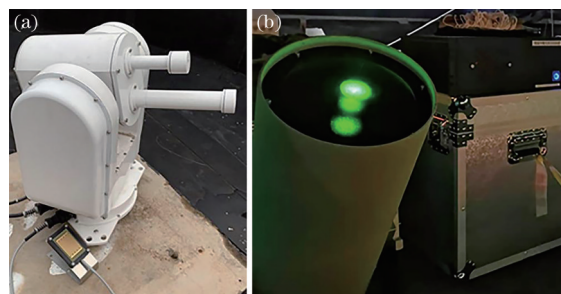


图 1 测量仪器。(a) 太阳辐射计;(b) 激光雷达

Fig. 1 Measuring instrument. (a) Sun-photometer; (b) lidar

## 3 测量仪器

### 3.1 仪器概述

实验采用的仪器和主要参数如表 1 所示。

表 1 仪器和主要参数说明  
Table 1 Description of instrument and main parameters

Main instrument	Working wavelength $\lambda$ /nm	Sampling period $T$ /min	Experimental time
Lidar	532	5	2020.08.01 12:38—17:30
			2020.08.08 11:26—23:59
Sun-photometer	400/520/610/670/780/860/940/1050	1	2020.08.01 11:17—20:30
			2020.08.08 07:21—15:39

### 3.2 微脉冲激光雷达

采用中国科学院安徽光学精密机械研究所研制的微脉冲激光雷达(MPL),选用Nd:YAG激光器,工

作波长为 532 nm,空间分辨率为 30 m,单次测量时间为 5 min。基于Fernald法<sup>[23]</sup>对回波信号进行处理分析,得到垂直方向上的消光系数的分布,具体可表示为

$$\beta_a(z, \lambda_L) = -\beta_m(z, \lambda_L) + \frac{P_L(z, \lambda_L) z^2 \exp\left[-2(S_1 - S_2) \int_{z_c}^z \beta_m(z', \lambda_L) dz'\right]}{\frac{P_L(z_c, \lambda_L) z_c^2}{\beta_a(z_c, \lambda_L) + \beta_m(z_c, \lambda_L)} - 2S_1 \int_{z_c}^z P(z', \lambda_L) z'^2 \exp\left[-2(S_1 - S_2) \int_{z_c}^{z'} \beta_m(z'', \lambda_L) dz''\right] dz'}, \quad (1)$$

式中: $P_L(z, \lambda_L)$ 为接收到的回波信号; $z$ 为高度; $\lambda_L$ 为工作波长; $S_1, S_2$ 分别对应气溶胶和空气分子的激光雷达比; $\beta_m, \beta_a$ 分别为空气和气溶胶的后向散射系数; $z_c$ 为标定高度,即选定对流层顶附近气溶胶含量相对较低的高度。

由于光束发射和接收的同轴几何关系,MPL探测近区存在重叠效应<sup>[24]</sup>。通过MPL水平测量实验,利用斜率法<sup>[25]</sup>计算几何因子为 $Y(900\text{ m}) = 1$ 。

### 3.3 太阳辐射计

采用中国科学院安徽光学精密机械研究所研制的DTF型太阳辐射计<sup>[26]</sup>,共8个通道,中心波长分别为400, 520, 610, 670, 780, 860, 940, 1050 nm,滤光片半带宽为10 nm,接收视场角为 $1^\circ$ 。测量每1 min得到一组电压信号,通过Langley法<sup>[27]</sup>得到各波长处整层大气气溶胶光学厚度。

考虑到MPL的工作波长为532 nm,利用440~870 nm Ångström 波长指数插值得到对应波长下的气溶胶光学厚度,计算公式为

$$\frac{\tau_{\lambda_1}}{\tau_{\lambda_2}} = \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)^{-\alpha}, \quad (2)$$

式中: $\tau$ 和 $\lambda$ 分别代表光学厚度和波长; $\alpha$ 为Ångström 波长指数。

## 4 气溶胶吸收系数垂直分布的估测方法

### 4.1 气溶胶吸收系数垂直分布估测原理

大气辐射传输计算模型MODTRAN已广泛应

用于大气透过率的计算,基于此,依据实验场地的特点,选择其中的沙尘气溶胶模型、中纬度夏季大气廓线、波长550 nm,通过不同高度范围的辐照度 $E_0, E_1$ ,计算各自对应的透过率 $T_0, T_1$ ,得到整层气溶胶光学厚度 $\tau_{\text{MODTRAN}}$ 和MPL探测高度以上的气溶胶光学厚度 $\tau_{\text{MODTRAN}, > 6\text{ km}}$ 。

考虑到观测场在实验时间前后没有显著的气溶胶输送事件,故视模型模拟结果近似反映大气背景情况。对MODTRAN与DTF型太阳辐射计两种方式得到的整层大气气溶胶光学厚度进行对比,得到校正因子 $\eta_1$ ,即

$$\eta_1 = \frac{\tau_{\text{DTF}}}{\tau_{\text{MODTRAN}}}. \quad (3)$$

视MPL探测高度以上大气为背景大气,其中气溶胶物理、化学性质变化小,结合校正因子计算6 km以下的气溶胶光学厚度 $\tau_{6\text{ km}}$ ,表达式为

$$\tau_{6\text{ km}} = \tau_{\text{DTF}} - \eta_1 \times \tau_{\text{MODTRAN}, > 6\text{ km}}. \quad (4)$$

由于MPL探测过渡区的存在,该区域回波信号接收不完全,反演得到的廓线不能准确反映实际情况,且MODTRAN中气溶胶廓线的垂直分辨率较大,故选择平面平行大气辐射传输模式SBDART<sup>[28]</sup>。模式SBDART将大气划分为一系列平面薄层,低层大气垂直分辨率较高。运行时采用65个大气层,近地面垂直分辨率为30 m,大气廓线选择中纬度夏季。模式的关键输入参数有气溶胶光学厚度、单次散射反照率、不对称因子、能见度、Ångström 波长指数。使用的气溶胶光学特性数据来自太阳辐射计数据。

为有效获取 MPL 过渡区的消光廓线,将计算得到的  $\tau_{6\text{km}}$  扣除由 MPL 实测廓线积分得到的  $\tau_{\text{MPL}}$  后,再输入到 SBDART 计算模型,便可得到校正的 MPL 过渡区的消光廓线,计算方法为

$$\tau_{\text{MPL}} = \int_0^{6\text{km}} \alpha'(z) dz, \quad (5)$$

$$\eta_2 = \frac{\tau_{6\text{km}}}{\tau_{\text{MPL}}}, \quad (6)$$

$$\tau_{\text{SBDART}} = \tau_{6\text{km}} - \eta_2 \cdot \tau_{\text{MPL}, > 900\text{m}}, \quad (7)$$

$$\tau_{\text{SBDART}} = \int_0^{0.9\text{km}} \alpha'(z) dz, \quad (8)$$

式中:  $\alpha'$  为气溶胶消光系数;  $\eta_2$  为 MPL 相对 DTF 的校正因子。

根据实验区的地理位置特征可知,气溶胶单次散射反照率(SSA)在时间尺度上变化小,采用 MODTRAN 沙尘气溶胶模式中默认的单次散射反照率在垂直高度上的分布,计算得到气溶胶吸收系数在垂直高度上的分布,即

$$\sigma(z) = \alpha'(z) \cdot [1 - \omega(z)], \quad (9)$$

式中:  $\omega$  为气溶胶的单次散射反照率;  $\sigma$  为气溶胶的吸收系数。

上述计算过程的高度分布示意如图 2 所示。

#### 4.2 气溶胶吸收系数垂直分布估测流程

气溶胶吸收系数垂直分布估测方法流程如图 3 所示。

具体步骤如下。

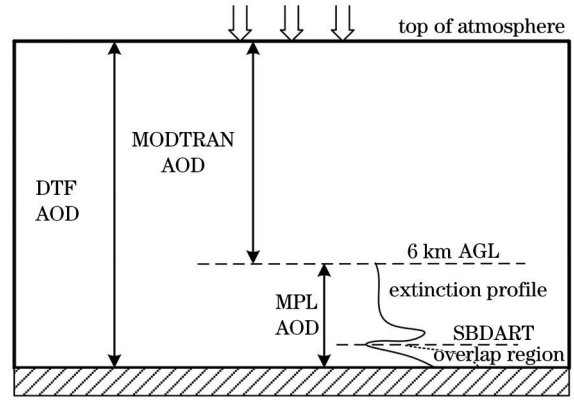


图 2 计算高度分布示意图,用 AGL(above ground level) 表示地面以上

Fig. 2 Diagram of calculating height distribution, AGL for above ground

1) 利用 MODTRAN 模式模拟结果和 DTF 实测数据,计算 6 km AGL 以下大气气溶胶的光学厚度;

2) 基于 MPL 观测得到的消光廓线,计算 6 km AGL 以下的大气气溶胶光学厚度,扣除由步骤 1) 计算得到的光学厚度,获取 MPL 过渡区的气溶胶光学厚度;

3) 通过步骤 2) 中的 MPL 过渡区光学厚度约束 SBDART 标准消光廓线,结合 MPL 实测廓线,得到 6 km AGL 以下完整的消光廓线;

4) 根据 MODTRAN 对应气溶胶模式下的 SSA 垂直分布,结合步骤 3) 中得到的消光廓线,利

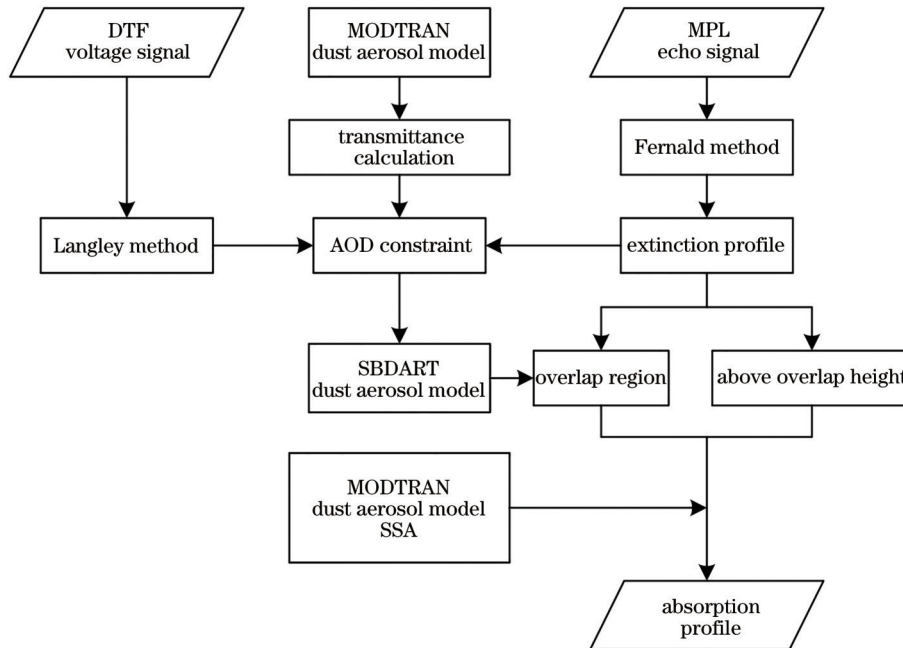


图 3 气溶胶吸收廓线估测方法流程

Fig. 3 Procedure of aerosol absorption profile estimation



用(9)式计算得到气溶胶吸收系数廓线。

## 5 结果与分析

对 2020 年 8 月 1 日和 8 日在大柴旦的 MPL 实测数据进行反演,得到实验时间内的日平均、每小时平均消光廓线,结果如图 4 所示。可以看出,随高

度增加,气溶胶消光系数减小,至 800 m AGL 附近出现最小值,随后消光增加,在 2~3 km AGL 附近有一明显气溶胶层。从每小时平均消光廓线可以看出,随时间的累积,近地面气溶胶消光特性稳定,主要集中在下层区域的气溶胶逐渐有由低层向高空抬升输送的过程。

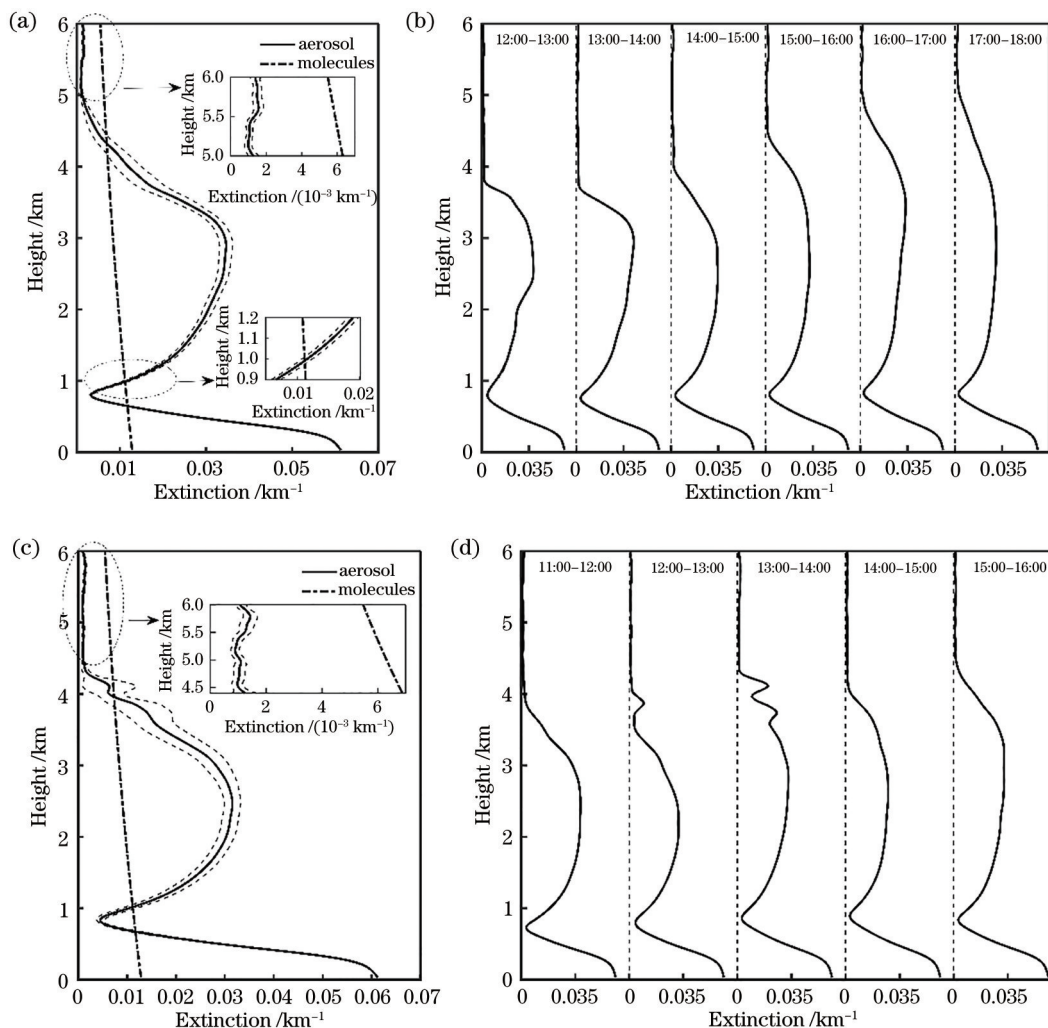


图 4 2020 年 8 月 1 日和 8 日气溶胶消光廓线。(a)(c) 1 日和 8 日的日平均消光廓线;(b)(d) 1 日和 8 日的每小时平均廓线  
Fig. 4 Aerosol extinction profile on 1 & 8 August, 2020. (a)(c) Average daily profile on 1 & 8 August, respectively; (b)(d) hourly average profile on 1 & 8 August, respectively

考虑到 MPL 探测近区重叠效应的存在,实测数据反演的 900 m 以下廓线难以准确反映实际大气气溶胶状况。因此,利用 DTF 实测数据和 MODTRAN 模式模拟联合约束 SBDART 标准廓线,来补充 MPL 过渡区的消光廓线,如图 5(a)所示,近地面气溶胶消光系数随高度的变化满足指数分布。基于 MODTRAN 中的沙尘气溶胶模型的单次散射反照率高度分布,结合修正过的消光廓线,计算气溶胶吸收系数。图 5(b)为气溶胶吸收系数

在垂直高度上的分布情况,可以看出,吸收廓线与消光廓线的分布趋势基本一致。沙尘作为该地区的主要气溶胶来源,并且是气溶胶吸收的主要类型之一,气溶胶吸收系数的变化在一定程度上与消光变化一致。

最后,利用拉格朗日混合单粒子轨迹 (HYSPPLIT) 模型分析气流源轨迹,定性分析气溶胶类型,验证结果的合理性。图 6 分别为 2020 年 8 月 1 日 18:00(对应 UTC10:00)和 8 日 16:00(对应

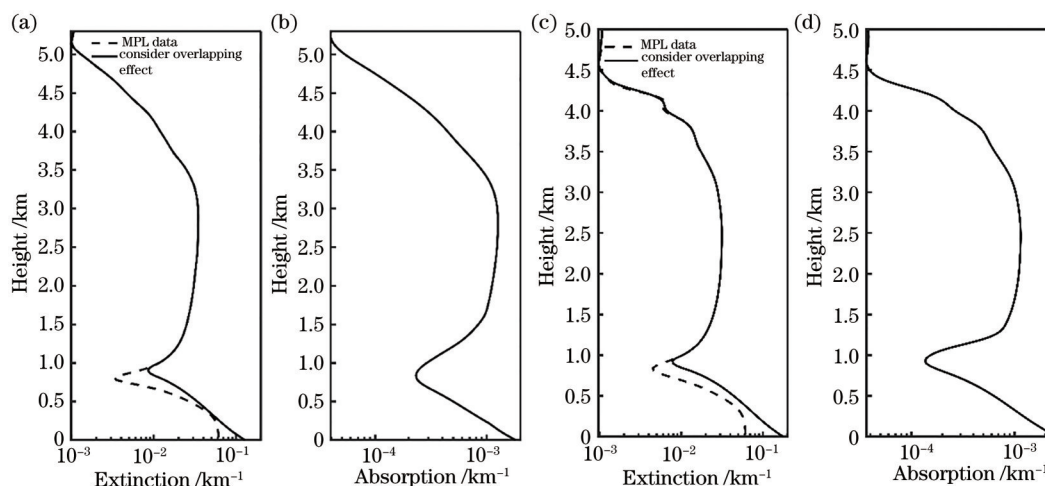


图 5 气溶胶日平均廓线。(a)(c) 1日和8日的日平均消光廓线;(b)(d) 1日和8日的日平均吸收廓线

Fig. 5 Aerosol average daily profile. (a)(c) Average daily extinction profile on 1 & 8 August, respectively; (b)(d) average daily absorption profile on 1 & 8 August, respectively

UTC8:00)的气流向后回推 24 h 的模拟轨迹图。根据气溶胶消光和吸收系数廓线图,即图 5,选取 0.5, 1, 2.5 km AGL 三个典型高度进行分析。结果显示:0.5, 1 km AGL 高度的气流后向轨迹均为短距离,且方向差异明显;在 2.5 km AGL 高度处的气流来向基本一致,且距离较远,即向西至新疆。由于实验地位于西北偏僻地区,地广人稀,且植被覆盖

率低,气溶胶主要以扬沙为主,人为源影响小。气溶胶粒子通过短距离输送,衰减较弱,因此近地面消光/吸收作用明显。远距离的气溶胶通过对流抬升和水平长距离输送,上升到气溶胶层,且经过远距离输送过程中的大颗粒沉降,气溶胶浓度减小,消光和吸收作用减弱。因此,气溶胶消光和吸收系数的垂直分布趋势具有一定的合理性。

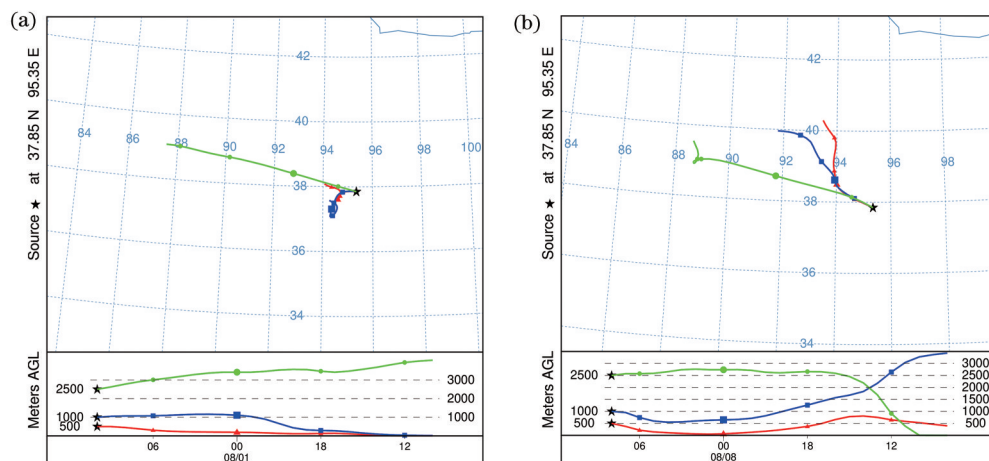


图 6 气流 24 h 后向轨迹示意。(a) 2020 年 8 月 1 日;(b) 2020 年 8 月 8 日

Fig. 6 Flow trajectory after 24 h. (a) 1 August, 2020; (b) 8 August, 2020

## 6 结 论

基于外场实测与模式模拟相结合的思路,提出了获取气溶胶吸收系数垂直分布的理论方法。这种方法主要利用太阳辐射计和激光雷达的实测数据,结合辐射传输模型分别对 6 km AGL 以上、6 km AGL 以内、激光雷达过渡区高度层内的数据进行约束,得到大气气溶胶吸收系数在 6 km AGL

垂直高度上的分布情况。并利用实验数据验证了所提方法的合理性和可行性,有望为未来外场测试提供气溶胶吸收参数廓线支持。下一步将结合地面气溶胶吸收数据,进一步开展气溶胶吸收系数垂直分布定量分析的研究。

## 参 考 文 献

[1] Sheng P X, Mao J T, Li J G, et al. Atmospheric

- physics[M]. Beijing: Peking University Press, 2003.  
盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 大气物理学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2003.
- [2] Moosmüller H, Chakrabarty R K, Arnott W P. Aerosol light absorption and its measurement: a review[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2009, 110(11): 844-878.
- [3] Koren I, Martins J V, Remer L A, et al. Smoke invigoration versus inhibition of clouds over the amazon[J]. *Science*, 2008, 321(5891): 946-949.
- [4] Guan H, Schmid B, Bucholtz A, et al. Sensitivity of shortwave radiative flux density, forcing, and heating rate to the aerosol vertical profile[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2010, 115(D6): D06209.
- [5] Noh Y M, Müller D, Lee H, et al. Estimation of radiative forcing by the dust and non-dust content in mixed East Asian pollution plumes on the basis of depolarization ratios measured with lidar[J]. *Atmospheric Environment*, 2012, 61: 221-231.
- [6] Noh Y M. Single-scattering albedo profiling of mixed Asian dust plumes with multiwavelength Raman lidar[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 95: 305-317.
- [7] Huang J P, Wang T H, Wang W C, et al. Climate effects of dust aerosols over East Asian arid and semiarid regions[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, 119(19): 11398-11416.
- [8] Saturno J, Pöhlker C, Massabò D, et al. Comparison of different Aethalometer correction schemes and a reference multi-wavelength absorption technique for ambient aerosol data[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2017, 10(8): 2837-2850.
- [9] Weingartner E, Saathoff H, Schnaiter M, et al. Absorption of light by soot particles: determination of the absorption coefficient by means of aethalometers[J]. *Journal of Aerosol Science*, 2003, 34(10): 1445-1463.
- [10] Huang J P, Zhang W, Zuo J Q, et al. An overview of the semi-arid climate and environment research observatory over the loess plateau[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2008, 25(6): 906-921.
- [11] Wang Z H. Observational study on the characteristics of aerosol and the retrieval of vertical distribution over semi-arid region[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2010: 30-37.  
王振海. 半干旱地区气溶胶的观测研究及垂直分布的反演[D]. 兰州: 兰州大学, 2010: 30-37.
- [12] Liu Q, Wang G S, Liu K, et al. Measurements of atmospheric aerosol optical absorption coefficients using photoacoustic spectrometer[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(9): 3010-3014.  
刘强, 王贵师, 刘锟, 等. 基于光声光谱技术的大气气溶胶吸收系数测量[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(9): 3010-3014.
- [13] Zhao W, Xu X, Dong M, et al. Development of a cavity-enhanced aerosol albedometer[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2014, 7(8): 2551-2566.
- [14] Holben B N, Eck T F, Slutsker I, et al. AERONET: a federated instrument network and data archive for aerosol characterization[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 66(1): 1-16.
- [15] Dubovik O, King M D. A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from sun and sky radiance measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2000, 105(D16): 20673-20696.
- [16] Bi J R. Observation and simulation study of aerosol features and their direct radiative forcing over northwestern China[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2014: 68-76.  
闭建荣. 西北地区气溶胶特征及其直接辐射强迫的观测模拟研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2014: 68-76.
- [17] Li J, Gong W, Mao F Y, et al. Dual field of view lidar for observing atmospheric aerosols over Wuhan [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(12): 1201001.  
李俊, 龚威, 毛飞跃, 等. 探测武汉上空大气气溶胶的双视场激光雷达[J]. *光学学报*, 2013, 33(12): 1201001.
- [18] Ma X M, Tao Z M, Shan H H, et al. Statistical distribution of extinction coefficients of tropospheric aerosols detected by lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(11): 1101003.  
麻晓敏, 陶宗明, 单会会, 等. 激光雷达探测对流层气溶胶消光系数的统计分布[J]. *光学学报*, 2020, 40(11): 1101003.
- [19] Wu B, Li Y F, Jiang L L, et al. Characteristics of pollution process in northern Zhejiang province based on lidar and tower wind field data[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(13): 130101.  
吴彬, 李艳芳, 蒋璐璐, 等. 基于激光雷达与铁塔风场数据的浙江北部地区一次污染过程及其特征研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(13): 130101.
- [20] Tesche M, Müller D, Gross S, et al. Optical and microphysical properties of smoke over Cape Verde inferred from multiwavelength lidar measurements [J]. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*,

- 2011, 63(4): 677-694.
- [21] Yang H, Xie C B, Fang Z Y, et al. Joint observations of vertical distribution of aerosols in Hefei area by spaceborne and ground-based lidars[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(1): 0110001.  
杨昊, 谢晨波, 方志远, 等. 星-地激光雷达联合观测合肥地区的气溶胶垂直分布[J]. 中国激光, 2021, 48(1): 0110001.
- [22] 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.  
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.
- [23] Fernald F G. Analysis of atmospheric lidar observations: some comments[J]. Applied Optics, 1984, 23(5): 652-653.
- [24] Xu C D, Ji Y F. Research and application of MPL-A1/T micro pulse lidar[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2008, 3(5): 337-343.  
徐亦东, 纪玉峰. MPL-A1/T 型微脉冲激光雷达的研制与应用[J]. 大气与环境光学学报, 2008, 3(5): 337-343.
- [25] Sasano Y, Shimizu H, Takeuchi N, et al. Geometrical form factor in the laser radar equation: an experimental determination[J]. Applied Optics, 1979, 18(23): 3908-3910.
- [26] Li J Y, Zhan J, Gao Y Q, et al. Development and calibration of DTF-5 sun-photometer[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2009, 4(2): 141-149.  
李建玉, 詹杰, 高亦桥, 等. 新型太阳光度计 DTF-5 的研制及标定[J]. 大气与环境光学学报, 2009, 4(2): 141-149.
- [27] O'Neill N T, Miller J R. Combined solar aureole and solar beam extinction measurements 1: calibration considerations[J]. Applied Optics, 1984, 23(20): 3691-3696.
- [28] Ricchiazzi P, Yang S R, Gautier C, et al. SBDART: a research and teaching software tool for plane-parallel radiative transfer in the earth's atmosphere[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79(10): 2101-2114.