

颗粒物分界层 Mie 散射激光雷达识别的 sigmoid 算法

朱育雷^{1,2},倪长健^{1*},邓佩云¹ (1.成都信息工程大学大气科学学院高原大气与环境四川省重点实验室,四川 成都 610225; 2.贵州省气象台,贵州 贵阳 550002)

摘要: 基于成都市 2013 年 6 月~2015 年 5 月期间由 Mie 散射激光雷达探测的大气消光系数廓线资料,发现混合层以上在颗粒物消光和分子消光之间一致存在一个 S 型的过渡区,利用 sigmoid 函数对此分布形态进行模拟,通过计算该函数上下曲率最大点所在的高度,据此提出了颗粒物分界层 Mie 散射激光雷达识别的 sigmoid 算法.针对该算法模拟效果的分析表明,颗粒物分界层过渡区附近大气消光系数理论廓线和实测廓线保持了高度的相关性,二者在春夏秋冬四季的相关系数(R)分别为 0.9971 ± 0.0052 、 0.9935 ± 0.0167 、 0.9979 ± 0.0038 和 0.9990 ± 0.0021 (均通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验).基于 sigmoid 算法计算的颗粒物分界层过渡区与成都市温江站探空资料得到的逆温层之间存在很好的对应关系.

关键词: 颗粒物分界层; 过渡区; 大气消光系数; sigmoid 函数; 逆温层

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2018)10-3654-08

Sigmoid algorithm for calculating particle boundary layer based on mie scattering lidar. ZHU Yu-lei^{1,2}, NI Chang-jian^{1*}, DENG Pei-yun¹ (1.Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2.Guizhou Meteorological Observatory, Guiyang 550002, China). *China Environmental Science*, 2018,38(10): 3654~3661

Abstract: Based on the data of atmospheric extinction coefficient detected by Mie scattering lidar from June 2013 to May 2015 of Chengdu, it was found that there was a S-shaped transitional zone between aerosol extinction and molecular extinction above mixing layer, and sigmoid function was used to simulate this vertical distribution. By obtaining the heights of the upper and lower maximum curvature points of the function, a sigmoid algorithm for calculating the transition zone of particle boundary layer based on Mie scattering lidar was proposed. The results showed that, as to the atmospheric extinction coefficient in the transition zone and its vicinity, simulated profiles and measured ones maintained a significant correlation, and the correlation coefficients of the two in spring, summer, autumn and winter were 0.9971 ± 0.0052 , 0.9935 ± 0.0167 , 0.9979 ± 0.0038 and 0.99895 ± 0.0021 respectively (Passing the significance test of 0.05). Further researches indicated that there existed a good correspondence between the transition zone of particle boundary layer calculated by sigmoid algorithm and the inversion layer identified by sounding data in Wenjiang station.

Key words: particle boundary layer; transition zone; atmospheric extinction coefficient; sigmoid function; inversion layer

作为由液态或固态微粒在空气中组成的悬浮体系,大气颗粒物主要存在于大气边界层内,并在热力和动力因素的共同作用下呈现出相应的垂直分布形态^[1]. Wu 等^[2]对澳门城市道路旁 2~79m 范围内细颗粒物 11h 的监测结果表明,细颗粒物质量浓度随高度增加呈递减趋势;中国科学院大气物理研究所气象铁塔不同高度的连续观测数据分析结果显示颗粒物垂直分布又可细分为渐缓递减型和快速递减型^[3];考虑到地球重力的作用,数值模式中通常假定气溶胶含量随高度满足负指数递减^[4].颗粒物随高度递减的结论已得到诸多观测事实的论证,孙玫玲等^[5]在此基础上根据天津市大气边界层观测铁塔资料揭示了颗粒物质量浓度随高度变化的复杂性.激光雷达由于具备对大气光学特性垂直分布进行高时空分辨率探测的优点,现已成为探测颗粒物垂

直分布和反演大气边界层结构的重要手段^[6-7].胡欢陵等^[8]根据北京空气污染物垂直结构测量试验(BAPIE)数据对北京地区气溶胶高度分布进行了讨论,指出近地面气溶胶层的变化特征不仅对于低层大气中气溶胶的垂直输送、光化学反应等大气物理和环境化学过程是重要的,而且对于大气环境质量预报乃至采取改善城市大气环境质量的措施都有重要意义;韩道文等^[9]利用激光雷达探测的地面消光系数和振荡天平获得的地面颗粒物质量浓度,建立了二者之间的统计学关系,进而通过消光系数廓线反演了颗粒物质量浓度的垂直分布;通过对比灰

收稿日期: 2018-03-07

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划重点支持项目(91644226); 四川省科技厅重点研发项目(2018SZ0287)

* 责任作者, 教授, ncj1970@163.com

霾天气和晴好天气溶胶垂直分布的雷达观测结果,吕阳等^[10]探讨了负指数分布在不同环境空气质量条件下描述消光廓线的适用性.近年来,激光雷达也被广泛应用于混合层高度的分析和计算,并形成了丰富的方法体系^[11-14].针对颗粒物含量随高度变化的复杂性,朱育雷等^[15-16]利用成都市 Mie 散射激光雷达探测的资料,通过对近地层以上大气消光系数的系统分析和总结,指出 Logistic 曲线能更好地表征大气消光系数在边界层内的垂直演变形态,据此提出了基于 Logistic 曲线识别混合层高度的新方法,并在 MODIS 卫星 AOD 反演近地面湿消光系数中得到了验证.颗粒物分界层涵纳了颗粒物存在的空间高度以及垂直分布形态等重要内容,并可能对大气边界层高度的科学界定有重要指示意义^[17-18].目前,利用 Mie 散射激光雷达对颗粒物分界层的研究尚不多见,相关研究亟待加强.

为此,本文利用成都市 2013 年 6 月~2015 年 5 月期间由 Mie 散射激光雷达探测的资料,通过对大气消光系数廓线形态的细致分析,提出了颗粒物分界层 Mie 散射激光雷达识别的 sigmoid 算法.在系统验证该算法模拟性能的基础上,进一步探讨了颗粒物分界层过渡区的形成原因.

1 资料介绍

使用的资料包括成都市 2013 年 6 月~2015 年 5 月期间 Mie 散射激光雷达探测数据、地面 PM_{2.5} 质量浓度数据以及地面常规气象观测和探空资料:(1)Mie 散射雷达数据由四川省环境监测总站提供.观测仪器为北京怡和融科技有限公司生产的 EV-lidar 激光雷达,设置于西南交通大学九里堤校区土木馆(104.06°E,30.70°N)楼顶,距地高度 35m,数据采集频率为 1 次/3min,主要观测范围可达 30km,探测盲区为 60m,测距分辨率为 15m;(2)PM_{2.5} 质量浓度数据使用美国热电子环境设备公司生产的大气污染物环境监测分析仪(1400a 环境颗粒物检测仪)进行观测,监测点位于成都市人民南路四段(104.07°E, 30.63°N),数据采集频率为 1 次/5min,精度为 $\pm 1.5\mu\text{g}/\text{m}^3$;(3)地面常规气象观测资料由成都市温江气象站(103.83°E, 30.70°N)观测,数据采集频率为 4 次/d,主要包含气温、总云量、低云量和风速等气象要素;用于对比的探空数据采集频率为 2 次/d(探

测时间分别为北京时间 07:00 和 19:00),其垂直空间上的分辨率为 5m,主要包含气温、气压、湿度和露点温度等气象要素.

近地面 PM_{2.5} 质量浓度与所选常规气象观测资料分别反映了研究区空气质量状况以及污染物散布能力的强弱,在本文仅作为选取典型大气消光系数廓线样本的参考指标.气象站与激光雷达布设点位的水平距离不超过 20km,加之城市下垫面差异对环境气象要素廓线的影响随高度的升高而减小,故二者在大气边界层顶附近区域的探测结果在物理意义上可用于相互印证.

2 研究方法

2.1 颗粒物分界层大气消光系数廓线特征

研究表明,成都及其周边地区四季均以静小风为主,冬季尤甚^[19].因此,颗粒物垂直分布形态主要取决于地面颗粒物的浓度水平以及大气边界层的垂直扩散能力,并可进一步作为边界层湍流场结构反演的重要依据.目前,激光雷达虽已被广泛用于大气边界层结构的探测,但对混合层以上大气消光系数廓线的特征尚缺乏系统的了解.基于成都市 2013 年 6 月~2015 年 5 月期间 Mie 散射激光雷达探测资料的比对,发现在混合层以上大气消光系数垂直形态的演变是一致的,即在颗粒物消光和分子消光之间均存在一个 S 型的过渡区.为此,选择 8 个代表性样本对此形态演化的一致性进行了系统的分析.选择样本首先考虑的是大气热力的差异,从每个季节各选 2 个样本;另外,样本的选择也兼顾了研究区空气质量的状况,包括优、良、轻度污染、中度污染和重度污染等不同等级.8 个研究样本对应的环境气象参数见表 1.

表 1 研究样本对应的近地面颗粒物质量浓度和相关气象要素
Table 1 Near-surface particulate mass concentration and related meteorological elements of study samples

时间	PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	温度 ($^{\circ}\text{C}$)	风速 (m/s)	相对湿度 (%)	云量总云 量/低云量
2017-07-06 11:00	53	27.7	0	77	8/4
2013-07-10 09:00	21	21.4	0	93	10/6
2013-10-19 08:00	119	17.2	0.2	83	10/0
2013-10-20 11:00	111	16.4	0.3	91	10/0
2014-01-23 12:00	282	11.3	0.5	53	10/10
2014-01-27 10:00	275	10.0	0.4	86	10/10
2014-04-08 09:00	136	15.1	1.2	72	10/3
2014-04-15 10:00	125	20.1	0.2	76	10/6

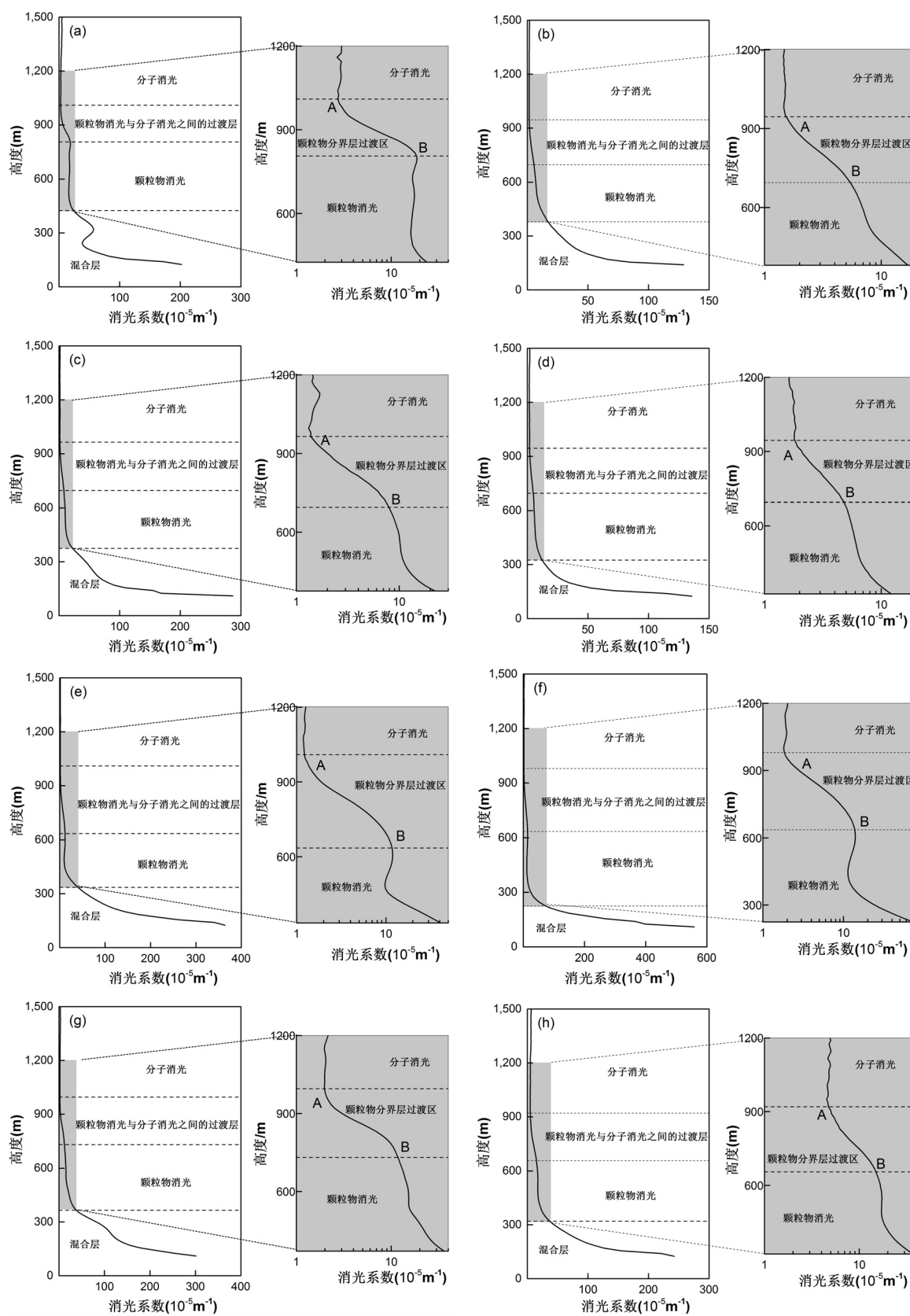


图1 研究样本的大气消光系数廓线

Fig.1 Atmosphere extinction coefficient profiles of study samples

a:2017-07-06 11:00; b:2013-07-10 09:00; c:2013-10-19 08:00; d:2013-10-20 11:00; e:2014-01-23 12:00; f:2014-01-27 10:00; g:2014-04-08 09:00;

h:2014-04-15 10:00

图 1 分别绘制了表 1 中 8 个研究样本对应的大气消光系数廓线以及该廓线在混合层以上区域的放大部分,其中混合层的计算方法参见文献[15].从图 1 的放大部分来看,大气消光系数廓线在混合层以上随高度整体是递减的,并最终一致呈现出 S 型形态特征,与该形态对应的包括上下 2 个曲率最大点 A 和 B. B 点是大气消光系数自下而上从缓降向速降的临界点, A 点则是大气消光系数自下而上从速降向缓降的临界点. 大气消光系数在 A 点以上总体保持不变,与分子消光量级(10^{-5}m^{-1})相当,表明该区域颗粒物的含量已经极少,大气消光基本上就是分子消光;大气消光系数在 B 点以下为 10^{-4}m^{-1} 左右,仍以颗粒物消光为主. 以上分析可见,大气消光系数廓线下曲率最大点 B 代表了颗粒物消光向分子消光转变的临界点,而上曲率最大点 A 则代表了颗粒物消光实际转化为分子消光的临界点. 从这个意义上而言, A 点及其以下区域可视为颗粒物消光占据主导的颗粒物分界层, A 点与 B 点之间的 S 型区域则是颗粒物消光向分子消光转换的颗粒物分界层过渡区. 进一步分析发现,作为上下曲率最大点之间的过渡区,其顶部位置 A 处于 1000m 附近,样本之间变化不大,而过渡区范围则在样本之间差异较为明显,其变化范围介于 205~375m. 上述分析表明,大气消光系数在颗粒物分界层过渡区一致呈现出 S 型形态,这是颗粒物浓度垂直演化的重要特征之一,代表了该区域湍流的结构状况,其演化与大气边界层动力和热力因素有关.

2.2 颗粒物分界层识别的 sigmoid 算法的设计及流程

通过对表 1 中 8 个样本大气消光系数廓线演变共性的整合,构建了该系数在混合层以上垂直分布的概念模型,如图 2 所示. 由该图可见,颗粒物分界层是颗粒物在大气底层的富集区域,它与分子消光之间存在一个 S 型的过渡区,即 A 和 B 之间所在的高度区,理论上可将上曲率最大点 A 作为颗粒物分界层过渡区项(颗粒物分界层顶),将下曲率最大点 B 作为颗粒物分界层过渡区底.

由图 2 可见,大气消光系数在颗粒物分界层过渡区附近呈现出的 S 型形态特征,利用 sigmoid 函数对其进行模拟,算法的流程如下:

(1)表征混合层以上大气消光系数垂直分布的

数学模型为 $\sigma(z)$, 见式(1),

$$\sigma(z) = \sigma_m - (\sigma_m - \sigma_n) \times \frac{1}{1 + e^{u(z)}} \quad (1)$$

式中: $u(z)$ 的表达式如下:

$$u(z) = \frac{z_0 - z}{s} \quad (2)$$

式中: z 是混合层以上的高度; z_0 为颗粒物分界层过渡区中心高度; σ_m 为混合层以上、 z_0 高度以下平均大气消光系数; σ_n 为 z_0 高度以上的平均大气消光系数,代表干洁空气分子的消光系数; s 为与颗粒物分界层过渡区厚度有关的参数,主要反映的是该区域边界层湍流场的结构特征.

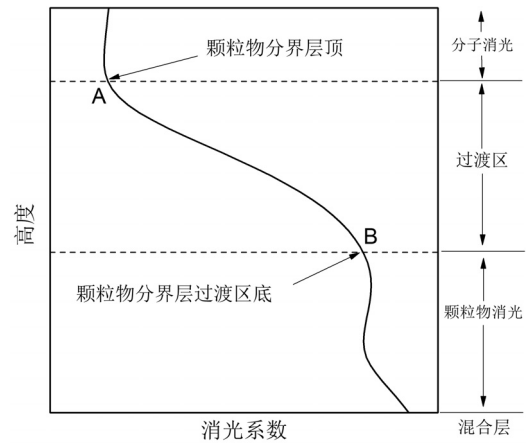


图 2 混合层以上大气消光系数 S 型廓线概念模型

Fig.2 Conceptual model of S type profile of atmospheric extinction coefficient above mixing layer

(2)根据混合层以上大气消光系数廓线的实测值与模拟值,利用免疫进化算法^[20]优化目标函数 f , 据此得到模型参数 z_m 和 s .

$$\min f = [\sigma(z) - \sigma'(z)]^2 \quad (3)$$

式中: $\sigma(z)$ 为 z 高度处实测大气消光系数.

(3)基于混合层以上大气消光系数的模拟廓线 $\sigma'(z)$, 进一步计算颗粒物分界层 S 型过渡区上下曲率最大值点所在的高度,记为 H_A 和 H_B , 表达式为,

$$\begin{cases} H_A = z_0 + s \times \ln(2 + \sqrt{3}) \\ H_B = z_0 + s \times \ln(2 - \sqrt{3}) \end{cases} \quad (4)$$

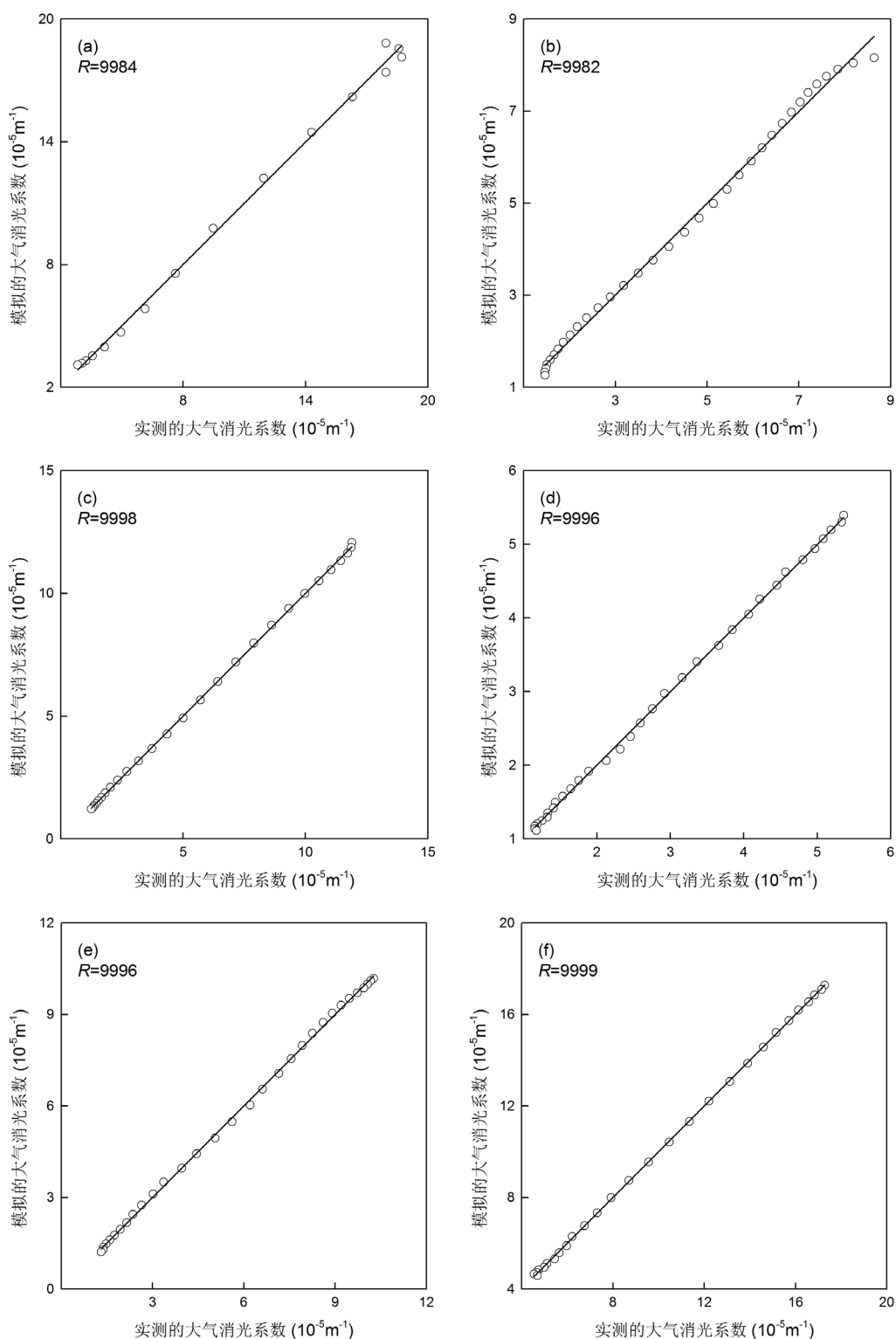
3 结果与讨论

3.1 sigmoid 算法的模拟效果分析

为检验 sigmoid 算法对混合层以上大气消光

系数垂直分布的模拟能力,首先基于 3.1 节公式 (1)~(4) 计算了表 1 中 8 个样本对应的大气消光系数,进一步绘制了颗粒物分界层过渡区附近大气消光系数理论廓线和实测廓线的散点图,见图 3.由该图可见,研究样本大气消光系数实测值与模拟值

的相关系数(R)均达到了 0.99 以上,并通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验.上述分析表明,利用 sigmoid 算法能够很好地模拟颗粒物分界层过渡区附近大气消光系数实测廓线的变化特征,算法具有良好的稳定性和模拟精度.



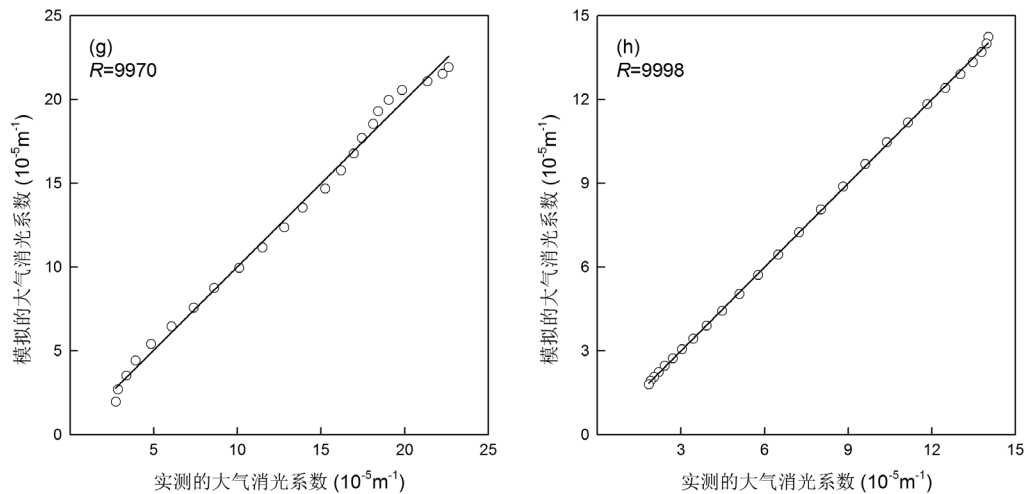


图 3 混合层以上实测大气消光系数与模拟结果的散点

Fig.3 Scatter plots of monitored atmosphere extinction coefficients and simulated results above mixing layer

a:2017-07-06 11:00; b:2013-07-10 09:00; c:2013-10-19 08:00; d:2013-10-20 11:00; e:2014-01-23 12:00; f:2014-01-27 10:00; g:2014-04-08 09:00; h:2014-04-15 10:00

针对上述 8 个样本可能存在统计意义上代表性不足这一问题,按气象观测 4 个时段(02:00、08:00、14:00 和 20:00)在每年四个季节中间时段连续选择 15 天(降水或沙尘天除外),即每个时段包括 30 个样本,合计 480 个样本.进一步计算了四季混合层以上

实测大气消光系数与模拟结果的相关系数,所有样本均通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验,结果见表 2.大样本统计结果表明,S 型形态是大气消光系数在颗粒物分界层垂直演变的共性特征,利用 sigmoid 函数对颗粒物分界层过渡区进行模拟是可行的.

表 2 混合层以上实测大气消光系数与模拟结果的相关系数

Table 2 Correlation coefficients of monitored atmosphere extinction coefficients and simulated results above mixing layer

季节	相关系数				
	02:00	08:00	14:00	20:00	平均
春	0.9984 ± 0.0027	0.9981 ± 0.0021	0.9931 ± 0.0137	0.9986 ± 0.0021	0.9971 ± 0.0052
夏	0.9954 ± 0.0112	0.9990 ± 0.0005	0.9846 ± 0.0461	0.9951 ± 0.0089	0.9935 ± 0.0167
秋	0.9983 ± 0.0032	0.9976 ± 0.0039	0.9967 ± 0.006	0.9989 ± 0.0020	0.9979 ± 0.0038
冬	0.9989 ± 0.0028	0.9996 ± 0.0004	0.9986 ± 0.0025	0.9987 ± 0.0027	0.9990 ± 0.0021
平均	0.9978 ± 0.005	0.9986 ± 0.0017	0.9933 ± 0.0171	0.9978 ± 0.0039	0.9969 ± 0.0069

3.2 颗粒物分界层气象成因的分析

以上分析可知,在颗粒物消光和分子消光之间存在一个 S 型过渡区,sigmoid 函数对此形态的模拟具备可行性.一般而言,大气颗粒物的主要来源是下垫面,包括自然过程和人为活动 2 个方面,并通过垂直扩散自下而上形成某种递减廓线形态^[21].颗粒物垂直分布与气象条件的状况密切相关,是大气动力和热力综合作用的结果,通过颗粒物廓线也可反演大气湍流场的结构特征^[22].低云通过其辐射效应用于边界层垂直热力结构,进而对大气稳定度产生重要影响.综合表 1 和图 1 可见,低云增强能在统计

意义上降低颗粒物分界层过渡区的起始高度,加大颗粒物分界层过渡区的厚度.为进一步探究大气热力因子对研究区颗粒物分界层过渡区的影响,选取了表 1 中与气象探空时刻最接近的 4 个样本,绘制了温度廓线(实线)和颗粒物分界层过渡区(虚线),见图 4.初步的诊断结果表明,温度场的垂直结构特征对颗粒物分界层过渡区有着重要的影响.

基于图 4 的分析发现,大气边界层顶的逆温与颗粒物分界层过渡区之间存在很好的对应关系.虽然颗粒物分界层过渡区与对应逆温层的位置不完全重合,但温度探空廓线在颗粒物分界层过渡区附

近均存在逆温现象,其中颗粒物分界层过渡区的顶部与逆温的关系最为密切.以图 4(a)为例,颗粒物分界层过渡区的顶部位于该逆温层强度的中心区域,逆温强度达 $0.44^{\circ}\text{C}/100\text{m}$,图 4(b)、图 4(c)、图 4(d)与此类似,在该高度的逆温强度分别为 $0.31^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 、 $0.22^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 、 $0.13^{\circ}\text{C}/100\text{m}$.进一步分析指出,逆温层强度越强,颗粒物分界层过渡区的高度越小,

二者之间存在负相关关系.由上可见,作为一种稳定的层结,逆温层的出现使大气在垂直方向上不易产生对流运动,削弱了颗粒物的垂直扩散能力,由此导致颗粒物垂直分布形态的改变;另外,颗粒物分界层过渡区顶部强逆温中心的存在总体阻断了颗粒物向上散布的穿透,这可能是颗粒物分界层过渡区形成的重要气象成因.

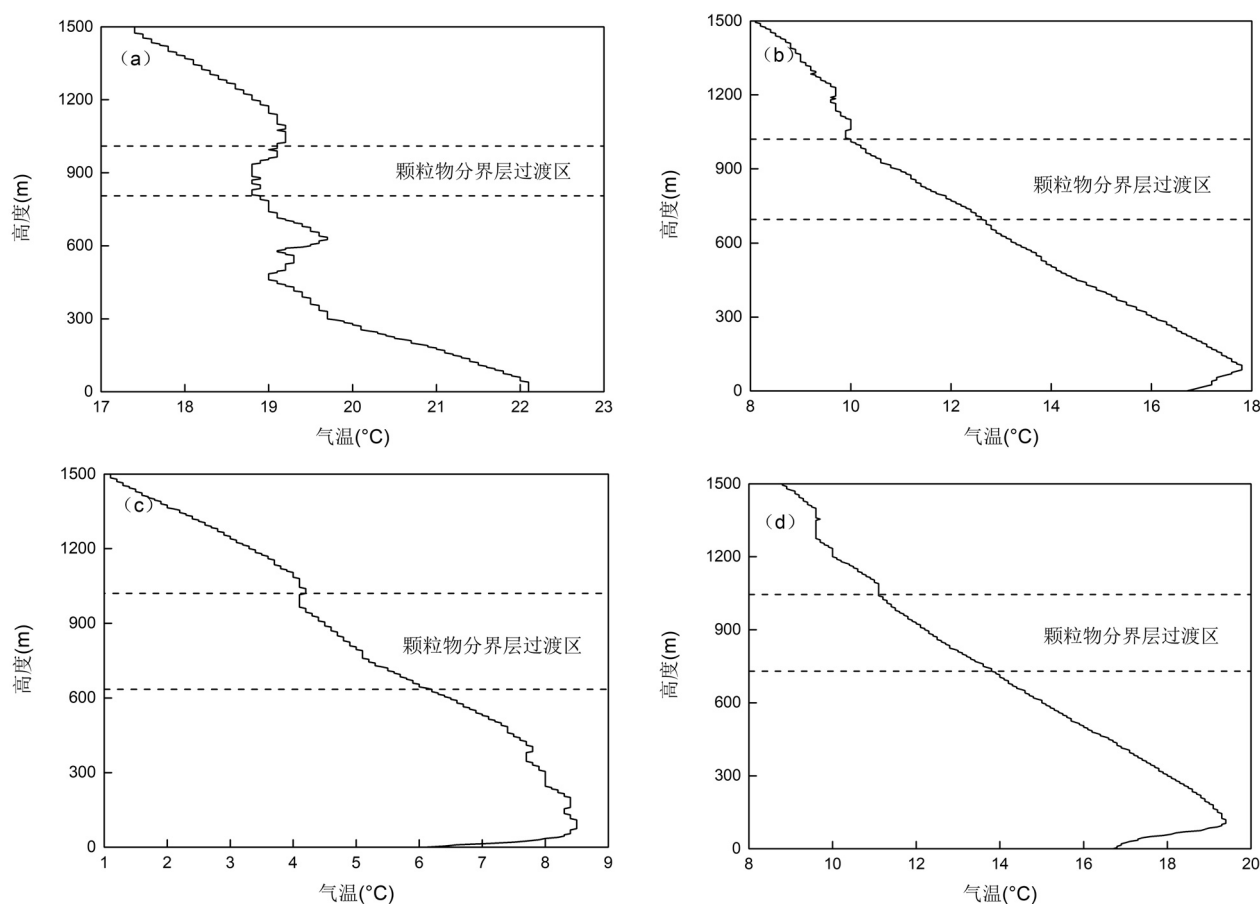


图4 基于 sigmoid 算法识别的颗粒物分界层过渡区与温度探空廓线的对比

Fig.4 Comparison of the transition zone of aerosol boundary layer identified by sigmoid algorithm with the temperature profiles

a:2013-07-10 09:00;b:2013-10-19 08:00;c:2014-01-27 10:00;d:2014-04-08 09:00

4 结论

4.1 基于成都市 2013 年 6 月至 2015 年 5 月期间由 Mie 散射激光雷达探测的大气消光系数廓线资料,统计发现混合层以上在颗粒物消光和分子消光之间一致存在一个 S 型的过渡区.

4.2 利用 sigmoid 函数对大气消光系数 S 型形态进行模拟,通过计算该函数上下曲率最大点所在的高度,据此提出了颗粒物分界层 Mie 散射激光雷达识别的 sigmoid 算法.进一步研究表明,该算法是一种

普适的方法,具有模拟精度高以及计算稳定等优点,可用于后续颗粒物分界层结构的诊断.

4.3 初步的诊断结果表明,大气热力条件是颗粒物分界层过渡区演变的重要影响因子,其中温度层结的作用最为关键.颗粒物分界层过渡区的顶部总体位于逆温层强度的中心区域,这可能是颗粒物分界层过渡区形成的重要气象原因.

参考文献:

[1] 孙永亮,赵天良,邱玉琨,等.成都一次霾过程中颗粒物消光作用的垂

- 直变化 [J]. 中国环境科学, 2018,38(5):1629-1636.
- [2] Wu Y, Hao J-M, Fu L X, et al. 2002. Vertical and horizontal profiles of airborne particulate matter near major roads in Macao, China [J]. *Atmospheric Environment*, 36(31):4907-4918.
- [3] 丁国安,陈尊裕,高志球,等.北京城区低层大气 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 垂直结构及其动力特征 [J]. 中国科学:地球科学, 2005,35(s1):31-44.
- [4] Wang Z, Chen L, Tao J, 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.
- [5] 孙玫玲,穆怀斌,吴丹朱,等.天津城区秋季 $PM_{2.5}$ 质量浓度垂直分布特征研究 [J]. 气象, 2008,34(10):60-66.
- [6] 何涛,侯鲁健,吕波,等.激光雷达探测反演 $PM_{2.5}$ 浓度的精度研究 [J]. 中国激光, 2013,40(1):206-211.
- [7] Luo T, Yuan R, Wang Z. Lidar-based remote sensing of atmospheric boundary layer height over land and ocean [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2014,7(1):173-182.
- [8] 胡欢陵,吴永华,谢晨波,等.北京地区夏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.
- [9] 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.
- [10] 吕阳,李正强,尹鹏飞,等.结合地基激光雷达和太阳辐射计的气溶胶垂直分布观测 [J]. 遥感学报, 2013,17(4):1008-1020.
- [11] Hoff R M, Guise-Bagley L, Staebler R M, et al. Lidar, nephelometer, and in situ aerosol experiments in southern Ontario [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1996,101(D14):19199-19209.
- [12] Menut L, Flamant C, Pelon J, et al. Urban boundary-layer height determination from mixing layer measurements over the paris area. [J]. *Applied Optics*, 1999,38(6):945-954.
- [13] Steyn D G, Baldi M, Hoff R M. The detection of mixed layer depth and entrainment zone thickness from mixing layer backscatter profiles [J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 1999,16(7):953-959.
- [14] Brooks I M. Finding Boundary Layer Top: Application of a Wavelet Covariance Transform to Lidar Backscatter Profiles [J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 2003,20(8):1092-1105.
- [15] 朱育雷,倪长健,谭钦文,等.基于 logistic 曲线识别混合层高度的新方法 [J]. 中国环境科学, 2017,37(5):1670-1676.
- [16] 朱育雷,倪长健,孙欢欢,等.MODIS 卫星遥感 AOD 反演近地面“湿”消光系数新模型的构建及应用 [J]. 环境科学学报, 2017,37(7):2468-2473.
- [17] 夏俊荣,吴丹,齐冰,等.华北香河站一次霾污染事件的综合观测研究 [J]. 气象与环境科学, 2016,39(2):10-17.
- [18] 于彩霞,吴瑞娇.基于 CALIOP 的安徽沿淮地区霾天气溶胶类型及垂直分布特征 [J]. 环境科学学报, 2018,38(4):1317-1326.
- [19] 周书华,倪长健,刘培川.成都市温江边界层风场特征的研究 [J]. 四川环境, 2014,33(3):30-35.
- [20] 倪长健,丁晶,李祚泳.免疫进化算法 [J]. 西南交通大学学报, 2003,38(1):87-91.
- [21] 毛节泰,张军华,王美华.中国大气气溶胶研究综述 [J]. 气象学报, 2002,60(5):625-634.
- [22] 孟宁,贝耐芳,李国辉,等.关中地区冬季人为源减排对 $PM_{2.5}$ 浓度的影响 [J]. 中国环境科学, 2017,37(5):1646-1656.

作者简介: 朱育雷(1992-),男,四川西昌人,硕士,主要研究方向为大气物理学与大气环境.发表论文 5 篇.