

多波长激光雷达探测多种天气气溶胶光学特性与分析

狄慧鸽 侯晓龙 赵虎 阎蕾洁 卫鑫 赵欢 华灯鑫

Detections and analyses of aerosol optical properties under different weather conditions using multi-wavelength Mie lidar

Di Hui-Ge Hou Xiao-Long Zhao Hu Yan Lei-Jie Wei Xin Zhao Huan Hua Deng-Xin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, **63**, 244206 (2014) DOI: 10.7498/aps.63.244206

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.244206>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2014/V63/I24>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[Mach-Zehnder干涉仪条纹成像多普勒激光雷达风速反演及视场展宽技术](#)

[Wind velocity retrieval and field widening techniques of fringe-imaging Mach-Zehnder interferometer for Doppler lidar](#)

物理学报.2014, 63(22): 224205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.224205>

[激光波长对拉曼散射水温遥感系统测温精度及探测深度的影响](#)

[Effects of laser wavelength on both water temperature measurement precision and detection depth of Raman scattering lidar system](#)

物理学报.2014, 63(16): 164209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.164209>

[功率谱反演大气湍流随机相位屏采样方法的研究](#)

[Sampling methods of power spectral density method simulating atmospheric turbulence phase screen](#)

物理学报.2014, 63(10): 104217 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.104217>

[交连值对斜率响应矩阵和迭代矩阵稀疏度的影响](#)

[Influence of coupling coefficient on sparseness of slope response matrix and iterative matrix](#)

物理学报.2014, 63(7): 074206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.074206>

[基于长脉冲光源的钠信标回光特性实验研究](#)

[Experimental study on backscattering characteristics of sodium beacon based on a long pulse laser](#)

物理学报.2014, 63(1): 014208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.014208>

多波长激光雷达探测多种天气气溶胶光学特性与分析*

狄慧鸽[†] 侯晓龙 赵虎 阎蕾洁 卫鑫 赵欢 华灯鑫

(西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 西安 710048)

(2014年6月12日收到; 2014年7月1日收到修改稿)

设计和构建了波长为 355, 532 和 1064 nm 的多波长米散射激光雷达系统, 并研究了多波长激光雷达信号数据处理和反演算法, 实现了对地表气溶胶的探测; 利用该激光雷达对 2013 年冬季西安市上空大气进行了探测, 研究分析了雾霾天、晴天和有云天气的混合层高度、气溶胶消光特性和粒径分布特征. 分析比较了不同波长探测到的混合层高度变化情况. 在雾霾天, 大气混合层高度与晴天和有云天相比明显偏低, 在 0.4 km 附近, 而晴天的混合层高度有 0.5—0.8 km. 利用长波 (1064 nm/532 nm) 段和短波 (532 nm/355 nm) 段两个 Ångström 指数分析了不同天气情况下的粒径分布特征. 对于近地层气溶胶, 雾霾天的长波 Ångström (1064/532) 指数小于短波 Ångström (532/355) 指数, 而晴天与之相反, 说明在近地层雾霾有污染的大气中, 存在有较多的粗粒子. 在云层中, Ångström 指数明显减小, 并且出现负值, 说明云粒子半径比较大.

关键词: 多波长激光雷达, 气溶胶, Ångström 指数, 混合层高度

PACS: 42.68.Wt, 42.79.Qx, 92.30.Ef

DOI: 10.7498/aps.63.244206

1 引言

气溶胶是大气中的重要微量成分, 在干净的大气中含量很低, 但由于交通扬尘、工业污染、人为因素等的影响, 大气中的气溶胶粒子明显增多, 气溶胶对大气能见度、大气辐射平衡和全球气候以及环境变迁等都有影响. 气溶胶属性在时间和空间上有较大的变化, 对气溶胶垂直分布的研究是很重要的. 激光雷达提供了观测气溶胶垂直分布的有效手段. 目前的地基米散射激光雷达以单波长探测为主, 可以获知气溶胶在空间上的相对浓度分布, 但是无法获知大气中所含气溶胶粒径特征信息, 应用受到限制. 气溶胶粒子的回波散射信号特征依赖于发射激光波长, 利用多波长激光雷达不仅可以获得不同波长的气溶胶消光系数, 还可以根据不同波长消光系数之间的关系得到表征粒子特征

的 Ångström 指数等信息, 为我们进一步分析气溶胶微物理特征提供参考.

本文设计了一套多波长米散射激光雷达系统, 可以满足在三个波段 (355, 532 和 1064 nm) 对不同天气情况下的近地层气溶胶的探测需求. 利用该激光雷达对西安上空大气进行了观测. 研究了多波长激光雷达信号反演与数据处理算法, 利用该算法研究分析了雾霾天、有云天气和晴天情况下, 西安上空的混合层高度、气溶胶消光特性和 Ångström 指数变化规律.

2 多波长激光雷达系统

该多波长激光雷达包含三个发射激光波长, 分别为 1064, 532 和 355 nm, 由激光发射系统、信号接收系统、分光系统和数据采集系统组成. 其原理如图 1 所示.

* 国家自然科学基金 (批准号: 61308107)、高等学校博士学科点专项科研基金 (批准号: 20126118120003) 和陕西省自然科学基金 (批准号: 2012JQ5002) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: dihuige@163.com

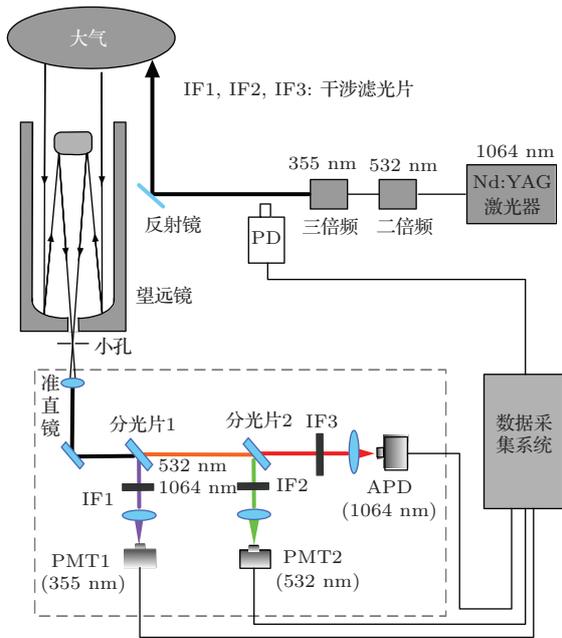


图1 多波长米散射激光雷达系统设计原理图

系统以Nd : YAG脉冲激光器作为光源, 采用基波 1064 nm、两倍频 532 nm 和三倍频 355 nm 为探测波长. 三个波长的激光束经反射镜反射后同时垂直射入大气, 三个波长激光脉冲被传输路径上的空气分子和大气气溶胶所散射, 大气的后向散射光被卡塞格林望远镜接收. 在望远镜后焦面采用小孔光阑限制接收视场为 0.5 mrad, 可以抑制大部分天空背景噪声. 望远镜接收到的光经透镜准直后入射到分光系统, 分光系统采用分色片和窄带滤光片组成, 分离出主要的大气后向散射信号, 滤除大部分天空背景光信号和非弹性散射谱信号. 355 和 532 nm 的回波信号采用 PMT 探测接收, 1064 nm 的回波信号由 Si : APD 探测器探测, 高速示波器采集, 最后由计算机进行处理和显示. 系统的主要参数如表 1 所示.

表 1 多波长米散射激光雷达系统参数表

激光器		分光系统	
类型	Nd : YAG	分色片 1	发散 (0.998)@355 nm
波长/nm	355/532/1064		透射 (0.997)@532 nm, 1064 nm
脉冲能量/mJ	200@355 nm	分色片 2	反射 (0.995)@ 355 nm, 532 nm
	300@532 nm		透射 (0.995)@1064 nm
	500@1064 nm	滤光片带宽	10 nm@355 nm, 532 nm, 1064 nm
脉冲重复频率	10 Hz	滤光片峰值透过率	0.25@355 nm
脉宽	8 ns		0.7@532 nm
发散角	0.5 mrad		0.7@1064 nm
接收望远镜		探测器	
类型	Cassegrain	PMT : CR110@355 nm, 532 nm	
口径	250 mm	Si : APD@1064 nm	
视场	0.6 mrad		

3 多波长米散射信号数据处理与反演

3.1 数据反演算法

多波长激光雷达脉冲经过大气散射后, 接收到的散射信号由激光雷达方程决定, 如下所示^[1]:

$$P(\lambda, L) = P_0(\lambda)C(\lambda)G(\lambda, L)\frac{\beta(\lambda, L)}{L^2} \times \exp\left[-2\int_0^L \alpha(\lambda, l)dl\right], \quad (1)$$

式中, $P(\lambda, L)$ 为激光雷达接收到距离 L 处、波长为 λ 的回波功率; $P_0(\lambda)$ 为雷达发射功率; $C(\lambda)$ 为雷达系统常数; $G(\lambda, L)$ 为系统重叠因子; $\beta(\lambda, L) = \beta_a(\lambda, L) + \beta_m(\lambda, L)$, $\beta_a(\lambda, L)$ 为气溶胶后向散射系数, $\beta_m(\lambda, L)$ 为大气分子后向散射系数; $\alpha(\lambda, L) = \alpha_a(\lambda, L) + \alpha_m(\lambda, L)$, $\alpha_a(\lambda, L)$ 和 $\alpha_m(\lambda, L)$ 分别为气溶胶和大气分子的消光系数.

气溶胶的消光系数可以采用 Fernald 方法反演^[1,2]. 在 Fernald 反演中, 需要假定雷达比 S_a (大气气溶胶消光与后向散射比), 它依赖于激光发射

波长和气溶胶粒子特征, 中国大气气溶胶雷达比在 40—55 之间变化^[3]. 这里假定气溶胶后向散射比为常数, 取 1064 nm 的 Sa 为 40(Sr)^[4]; 当激光波长很接近时, 可认为雷达比相等^[5], 355 和 532 nm 波长较为接近, 雷达比取为 50(Sr); S_m 为大气分子的雷达比, 取为 $8\pi/3$ ^[1].

在利用 Fernald 法对激光雷达数据进行反演时需要提供一个合适高度处的边界值, 这一高度通常选取在不含气溶胶粒子的清洁大气高度, 高度在 7 km 以上. 但是在激光雷达的实际大气探测中, 在有雾霾或有云天气情况下, 系统探测能力较低, 有时候不能达到 7 km 以上, 这时边界点的选取失误将会对 Fernald 反演产生较大的影响, 特别是对多波长信号反演的后续分析产生错误理解, 所以边界点的选取很重要. 根据文献^[6], 边界点性质满足 (2) 式, 本文以此式为 Fernald 法反演气溶胶边界点的判据, 减小系统反演误差. 当系统在雾霾天探测距离较近时, 利用迭代算法在低层大气中可以找一个比较准确的后向散射系数的边界值.

$$\frac{P(\lambda, L_c)L_c^2}{\sigma(\lambda, L_c)} \left\{ 2\tau(\lambda, L_c) + \frac{[2\tau(\lambda, L_c)]^2}{2!} + \dots \right\} = 2 \int_{L_0}^{L_c} P(\lambda, l)l^2 dl, \quad (2)$$

其中,

$$\tau(\lambda, L_c) = \int_{L_0}^{L_c} \sigma(\lambda, l) dl,$$

式中, L_c 为边界点高度, z_0 为大气后向散射信号完全进入视场的最低距离.

3.2 大气混合层高度与 Ångström 指数

混合层高度是大气边界层的一个重要参数. 在大气混合层和其上空的自由大气层之间的过渡区域内, 大气气溶胶的浓度就会发生显著变化. 激光雷达距离平方校正信号 (range-squared-corrected signal, RSCS) 强度 $S(L)$ 与相应高度 (L) 大气气溶胶浓度的大小成比例. RSCS 廓线梯度变化代表着大气气溶胶浓度梯度的变化, 而梯度变化最大的位置就是大气混合层的高度, 记为 h_{GM} , 如下式所示^[7]:

$$h_{GM} = \min \left(\frac{\partial S(L)}{\partial L} \right). \quad (3)$$

Ångström 指数是最常用的大气污染指数. Ångström 波长指数 Å 是度量米散射粒子尺度分布

的一个重要参数. Å 可以用不同波长的后向散射系数表示:

$$\text{Å}(L) = -\frac{\ln(\beta_{a,\lambda_1}(L)/\beta_{a,\lambda_2}(L))}{\ln(\lambda_1/\lambda_2)}, \quad (4)$$

其中, $\beta_{a,\lambda_1}(L)$ 和 $\beta_{a,\lambda_2}(L)$ 分别表示不同波长 λ_1 , λ_2 对应的气溶胶的后向散射系数.

Ångström 波长指数的值一般在 0—4.0 的范围内, 并且与大气气溶胶粒子的平均半径有很好的相关性. 当气溶胶粒子半径与入射激光波长相比很大时, Ångström 指数接近于 0, 它随着粒子尺寸的减小而变大, 当粒子半径很小, 接近分子散射情况时, Ångström 值接近 4. 如果 $\alpha \ll 1$, 那么粒径大于入射波长的粒子就很多; 如果 $\alpha > 2$, 那么粒径小于入射波长粒子的粒子数目所占的比重大.

当光散射受到细粒子模态 (50—500 nm) 和粗粒子模态 (> 500 nm) 的共同影响时, 使用两个 Ångström 指数 (一个在短波范围, 一个在长波范围) 可以对粒子半径进行更深入的分析^[5]. 两个指数的相对大小可以用来分析大粒子在辐射作用中的影响. 本文利用两个波段范围的 Ångström 指数分析不同天气情况下的气溶胶微物理特性信息.

4 大气探测与数据分析

2013 年冬天, 西安地区出现了严重的污染雾霾天气, 运用自行设计构建的三波长激光雷达在 2013 年 11 月份对西安地区上空大气进行了探测, 分析比较了几种典型天气情况下的气溶胶混合层高度和多波长消光散射特征. 探测方式为模拟探测, 一次探测累积时间为 10 min, 采样率 50 M/s, 采样点数 5000 点.

4.1 雾霾天探测结果与分析

2013 年 11 月 21 日西安为严重的雾霾天, 根据气象数据资料, 当天的地面能见度仅有 2—3 km, PM2.5 指数严重超标. 图 1 为实际测试到的三波长距离平方回波信号 (RSCS) (实线), 及回波信号的一阶导数 (虚线), 测试时间为晚上 21:00. 由 RSCS 回波信号可以看出, 三个波长的回波信号变化趋势相符.

由图 2 可以看出, 在雾霾天的混合层高度很低. 根据 (3) 式, 利用各个波长的回波信号求出的混合层高度分别为 0.42 km (1064 nm), 0.4 km

(532 nm), 0.33 km (355 nm), 集中在0.4 km附近, 其中利用1064 nm信号计算出的混合层高度最高, 355 nm信号计算出的混合层高度最低. 这是由于不同波长回波信号受到气溶胶粒子分布特征的影响, 所以由不同波长计算出的混合层高度也会有差别.

图3为根据当天20:00和17:53所测试数据反演出的三波长消光系数和根据消光系数计算出的Ångström指数(长波段Ångström指数记为 $\text{Å}_{532/355}$ 和短波段Ångström指数记为 $\text{Å}_{1064/532}$). 由于当时为重雾霾天气, 所以影响了系统的探测距离, 利用Fernald法反演消光系数时, 边界点的选取是采用(3)式作为判据, 选取中间一个气溶胶很小的点作为边界点. 图中虚线为系统

探测盲区, 其消光系数值确定是采取文献[8]中的方法和当时地面气象能见度值确定.

由图3可以看出, 雾霾天三个波长的消光系数较大, 532 nm波段的消光可达 $1.5\text{--}2.0\text{ km}^{-1}$; 利用三波段消光系数计算出的 $\text{Å}_{532/355}$ 值在 $1\text{--}2$ 之间变化, $\text{Å}_{1064/532}$ 值在 $0.5\text{--}2.5$ 之间变化. 并且在1 km以下的污染层, $\text{Å}_{1064/532}$ 在 $0.6\text{--}1.2$ 之间变化, $\text{Å}_{532/355}$ 在 $1.4\text{--}1.8$ 之间变化, $\text{Å}_{1064/532}$ 值小于 $\text{Å}_{532/355}$ 值, 说明在近地层的气溶胶中有较多的粗粒子(粒子直径为 $1\text{ }\mu\text{m}$)存在, 这是由于在雾霾天气中, 由于吸湿性增长, 气溶胶粒子半径增加的缘故. 在1 km以上高度, 气溶胶消光系数较小, $\text{Å}_{1064/532}$ 和 $\text{Å}_{532/355}$ 相对关系呈现不规律变化.

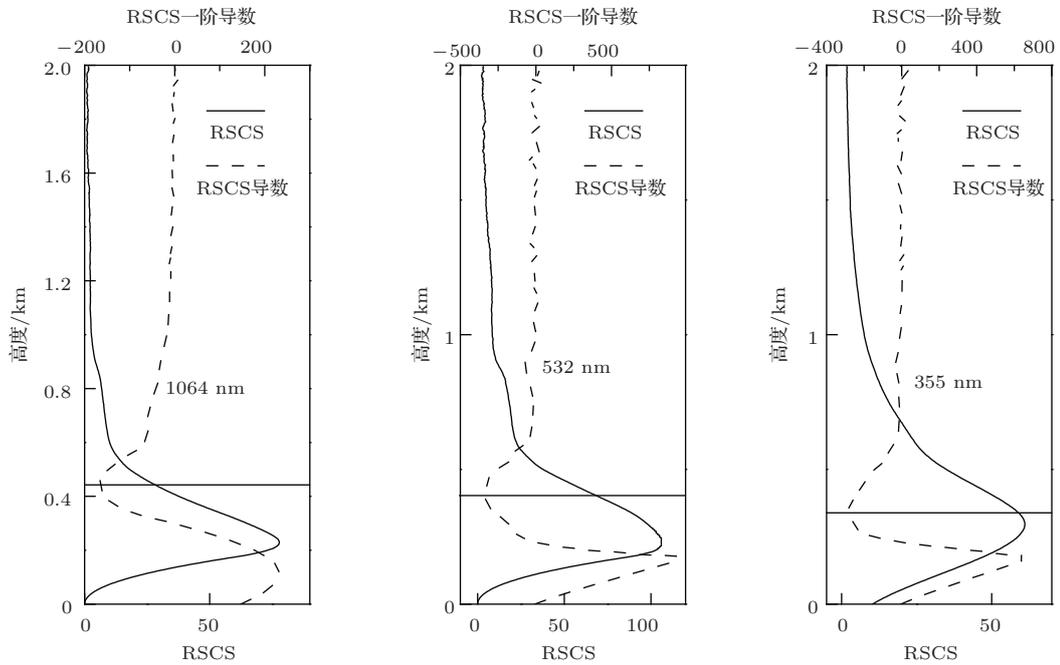


图2 雾霾天混合层高度(2013年11月21日)

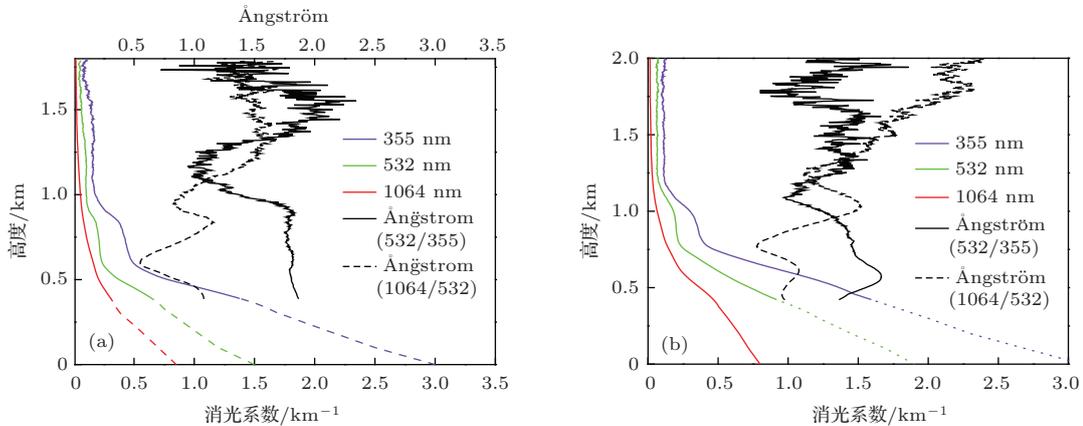


图3 (网刊彩色) 雾霾天多波长消光特性和Ångström指数特性(2013年11月21日)

4.2 有云天气探测数据与分析

2013年11月15日, 西安上空有薄云出现, 地面能见度较好, 利用多波长激光雷达探测到的有云时的RSCS及回波信号的一阶导数曲线见图4; 图5为根据第3节反演算法反演出的消光系数和Ångström指数曲线. 由图5可以明显看出, 在空中3.5 km处有云存在.

由图4可以看出在有云天气情况下, 1064 nm 信号得出的混合层高度为0.64 km, 532 nm 信号得出的为0.55 km, 355 nm 信号得出为0.55 km. 由1064 nm 计算出的混合层高度最高, 三个波长计算出的混合层高度基本都在0.6 km附近.

由图5(a)可以看出, 在晴朗有云天气下, 三个

波长的消光系数比雾霾天的消光系数明显要小. 根据Ångström指数曲线, 底层气溶胶的Ångström指数比在雾霾天气下的Ångström值要大, 并且随着高度增加Ångström值增加. 说明在晴朗天气条件下, 大气中气溶胶粒子半径比雾霾天气下的粒子要小, 并且在1.5 km以下气溶胶粒子半径随高度增加而呈现缓慢减小趋势, 在1.5—3 km之间Ångström指数基本保持为常数, 在2附近呈现微小波动, 说明气溶胶粒子均匀混合. 但是在3.5 km的云层中, 两条Ångström指数曲线呈现较大波动, 并且下降至0.5以下, 说明在云层中粒子半径较大. 特别对355和532 nm消光系数在进入云层后数值大小出现反转, 并且在云层中计算出的Ångström指数呈现负值. 由图5(b)可以看出消光系数在云层

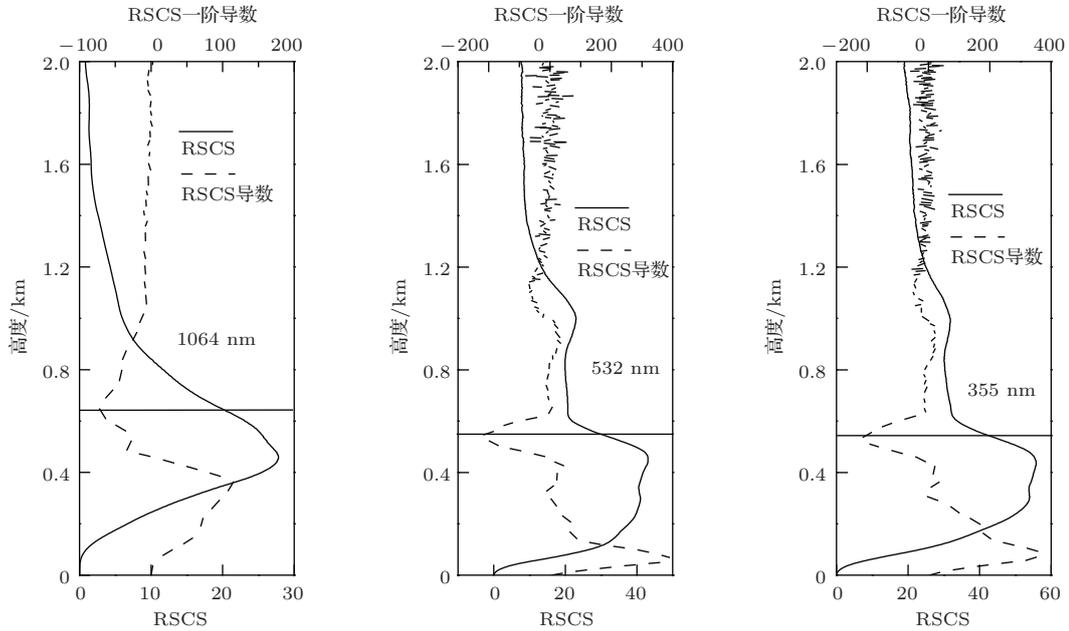


图4 有云天气混合层高度(2013年11月15日)

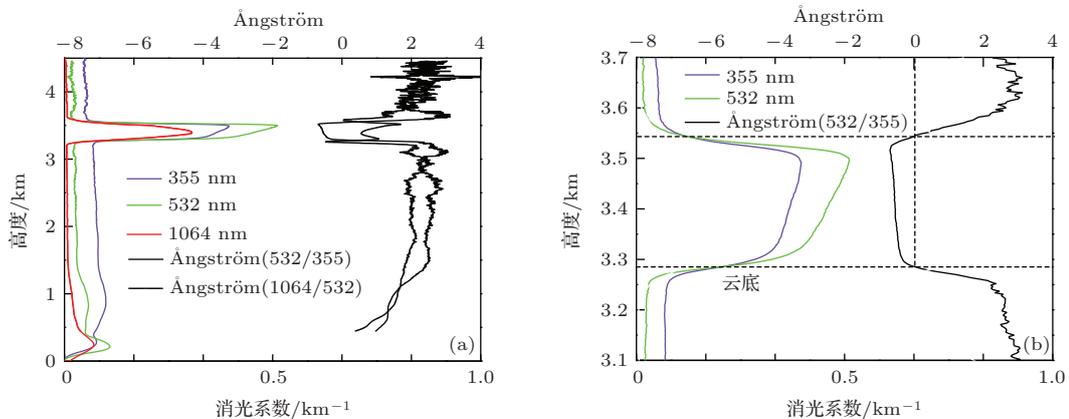


图5 (网刊彩色) 有云天多波长消光特性和Ångström指数特性(2013年11月15日)

中的变化情况, 在高度为3.28 km处, 两条消光系数曲线相交, 并且Ångström值为0, 此处为云底位置. 在云底下部一小段距离(3.25—3.28 km), Ångström值较小, 在0—1.5之间变化, 此段距离为雾霾区域.

4.3 晴天探测数据与分析

2013年11月25日为晴天, 天气能见度较好, 测试时间为下午16:00, 地面能见度在10 km附近. 图6同图2和图4, 为当天的RSCS曲线和RSCS一阶导数曲线, 由1064 nm计算出的混合层高度为0.67 km, 532 nm为0.72 km, 355 nm为0.71 km. 晴天时1064 nm计算出的混合层高度最

低, 532和355 nm得出的混合层高度基本相等. 三个波长的激光雷达计算出的混合层高度均值在0.7 km附近.

图7为晴天时计算出的多波长消光特性和Ångström指数特性. 与雾霾天消光系数相比, 晴天消光系数明显降低. 晴天时的 $\text{Å}_{532/355}$ 指数在0.5—3 km之间随着距离增加而变大, 在0.5—2.5之间变化. 而 $\text{Å}_{1064/532}$ 指数从0.5—3 km的近地面层区域基本变化不大, 在1.5—2之间变化. 在2 km以下近地层区域, 长波段的Ångström指数比短波段的Ångström指数大, 说明在晴天天气情况下, 近地层的气溶胶中主要以细粒子为主, 半径为1 μm附近的大粒子较少.

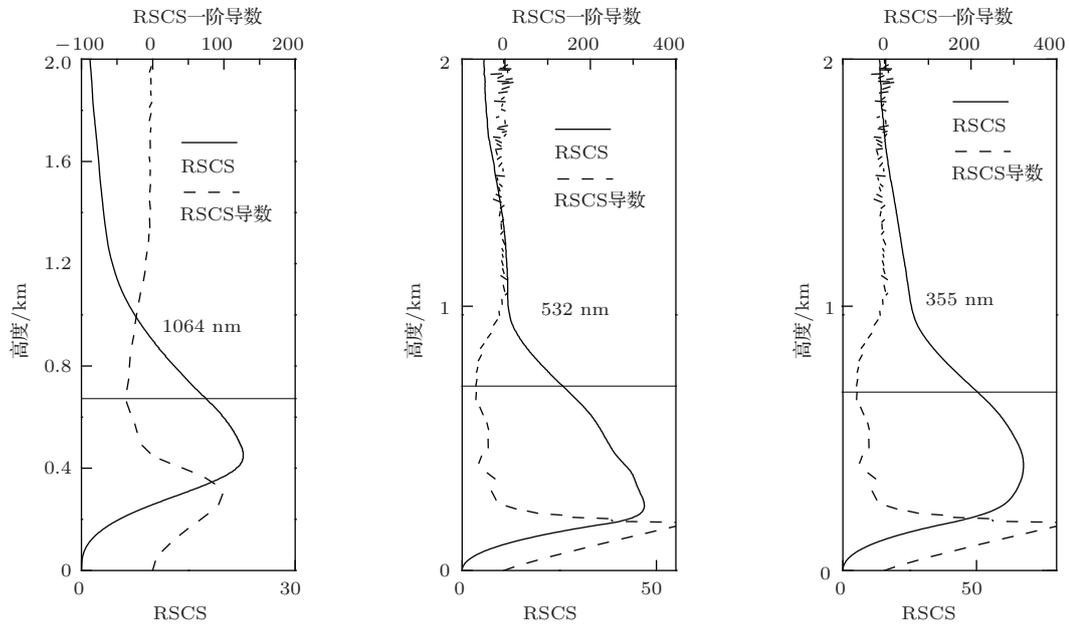


图6 晴天天气混合层高度(2013年11月25日)

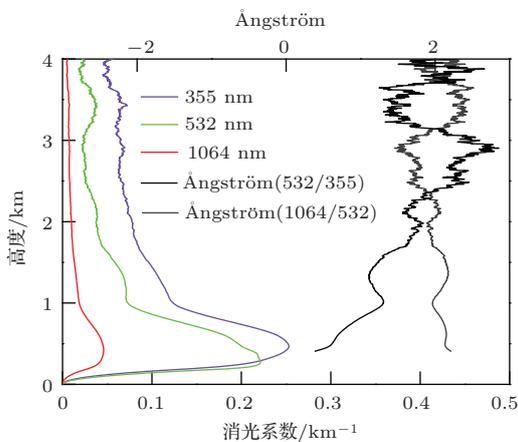


图7 (网刊彩色) 晴天多波长消光特性和Ångström指数特性(2013年11月25日)

4.4 多波长激光雷达对气溶胶的连续观测数据分析

分别在2013年11月15日(有云)晚上19:00至21:00、2013年11月21日(雾霾) 20:00至22:00和2013年11月25日(晴天) 14:30—22:00三种天气情况下, 利用三波长激光雷达对西安上方大气气溶胶进行了连续探测. 根据探测到的三波长实验数据和(3)式, 对三种天气状况下的混合层高度进行了计算, 如图8所示. 由图8可以看出, 利用不同波长的激光探测到的混合层高度是不同的, 在雾霾天, 三个波段的混合层高度分离开来, 而在晴天和有云天

气 532 和 355 nm 信号计算出的混合层高度基本相等, 而与 1064 nm 的混合层高度差别明显; 相比较有云天和晴天, 雾霾天的混合层高度最低, 平均只有 0.4 km, 在相同的时间段内 (图中 19:40—21:20), 晴天和有云天的混合层高度区别不大, 都比雾霾天要高, 在晚上 19:40—21:20 的时间段内, 晴天和有云天的混合层高度平均为 0.55 km; 由图 8(c) 可

见, 在晴天情况下, 白天混合层的高度明显升高, 可达 0.7—0.85 km, 到晚上混合层高度降低至 0.5 km; 比较由三个波长信号的混合层高度, 在雾霾天和有云天, 由长波 1064 nm 信号得出的混合层高度要高于短波 (532 和 355 nm) 信号结果, 而在晴天, 由 1064 nm 信号得出的混合层高度要低于短波信号结果.

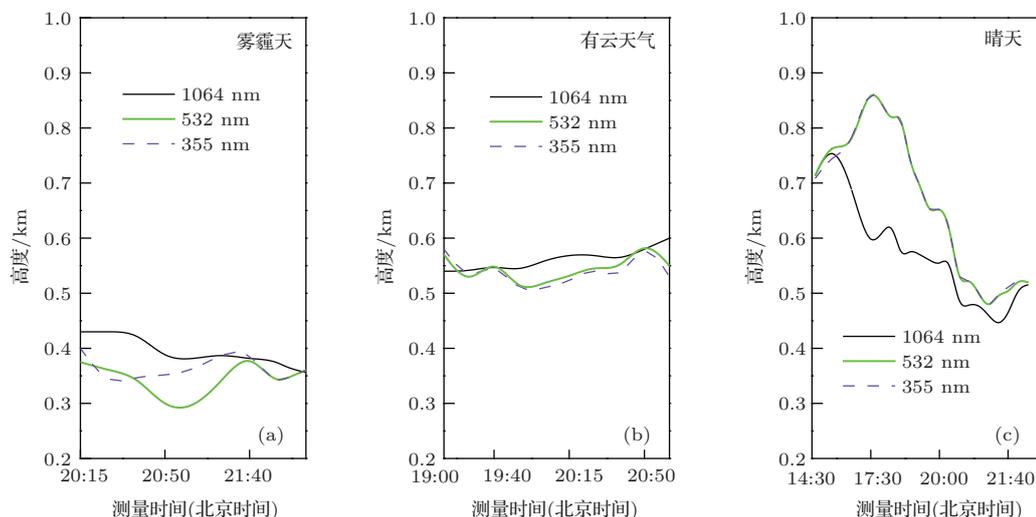


图 8 (网刊彩色) 不同天气情况下连续观测得到的大气混合层高度

5 结 论

本文设计和构建了一台多波长米散射激光雷达系统, 该系统可以实现在三个波段 (355, 532 和 1064 nm) 对不同天气情况下的近地层气溶胶探测; 论述了多波长激光雷达信号数据处理和反演算法; 利用该多波长激光雷达系统在 2013 年冬天对西安市上空大气进行了探测. 研究了雾霾天、有云天和晴天条件下, 西安上空气溶胶的混合层高度、气溶胶消光特性和 Ångström 指数变化规律. 在雾霾情况下, 混合层高度与晴天和有云天天气相比明显偏低, 只有 0.4 km, 而晴天和有云天的混合层高度为 0.5—0.8 km, 晴天白天的混合层高度可达 0.8 km, 晚上为 0.5 km. 并且三个波长信号计算出的混合层高度有所不同, 随着大气状态也会发生变化, 但相互之间的值浮动不大. 在近地层区域高度, 雾霾天的长波 Ångström 指数 ($\text{Å}_{1064/532}$) 小于短波 Ångström 指数 ($\text{Å}_{532/355}$), 而晴天与之相反, 说明在雾霾有污染的大气中, 大气中有较多的粗粒子存在, 而晴天以细粒子为主. 在云层中, 消光系数大小出现反转, Ångström 指数明显减小, 并且出

现负值, 说明云层中粒子半径比较大.

感谢北京大学毛节泰教授为本文写作思路进行的指点和提出的有益建议.

参考文献

- [1] Fernald F G 1984 *Appl. Opt.* **23** 652
- [2] Liu H T, Chen L F, Su L 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 064204 (in Chinese) [刘厚通, 陈良富, 苏林 2011 物理学报 **60** 064204]
- [3] Zhang Z Y, Su L, Chen L F 2013 *Chin. J. Lasers.* **40** 0513002 (in Chinese) [张朝阳, 苏林, 陈良富 2013 中国激光 **40** 0513002]
- [4] Chi R L, Wu D C, Liu B, Zhou J 2009 *Spectrosc. Spectr. Anal.* **29** 1468 (in Chinese) [迟如利, 吴德成, 刘博, 周军 2009 光谱学与光谱分析 **29** 1468]
- [5] Albert A, Frank W, Detlef M, Dietrich A, Andreas H, Wolfgang V H, Ulla W 2002 *J. Geophys. Res.* **107** 4259
- [6] Chen T, Wu D C, Liu B, Cao K F, Wang Z Z, Bo G Y, Yuan L, Zhou J 2008 *Acta Opt. Sin.* **30** 1531 (in Chinese) [陈涛, 吴德成, 刘博, 曹开发, 王珍珠, 伯广宇, 袁林, 周军 2008 光学学报 **30** 1531]
- [7] Flamant C, Pelon J, Flamant P H, Durand P 1997 *Boundary-Layer Meteorol.* **83** 247
- [8] Di H G, Hua D X, Wang Y F, Yan Q 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 094215 (in Chinese) [狄慧鸽, 华灯鑫, 王玉峰, 闫庆 2013 物理学报 **62** 094215]

Detections and analyses of aerosol optical properties under different weather conditions using multi-wavelength Mie lidar*

Di Hui-Ge[†] Hou Xiao-Long Zhao Hu Yan Lei-Jie Wei Xin
Zhao Huan Hua Deng-Xin

(School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

(Received 12 June 2014; revised manuscript received 1 July 2014)

Abstract

A multi-wavelength Mie-scattering lidar is designed and established for detecting the aerosol profiles under different weather conditions. And inversion algorithm about multi-wavelength lidar signal is studied. The atmosphere observations are carried out in Xi'an city in the winter of 2013 by using the multi-wavelength lidar. The mixed-layer depth, aerosol particle size characteristics, and atmosphere extinction are studied and analyzed on haze, cloudy and sunny days. The mixed layer depth is lower on haze day and is just about 0.4 km, while it can reach 0.5–0.8 km on sunny day. The aerosol particle characteristics are discussed under different weather conditions by using two Ångström exponents, one for the short-wavelength range (355 nm/532 nm) and other for long-wavelength range (532 nm/1064 nm). The long-wavelength Ångström exponent is less than the short-wavelength Ångström exponent on haze day, and it is contrary on sunny day. The results show that there are more coarse particles on pollution day. The Ångström exponents significantly decrease, and even become negative in the clouds, showing that cloud particles are relatively large.

Keywords: multi-wavelength lidar, aerosol, Ångström exponent, mixed-layer depth

PACS: 42.68.Wt, 42.79.Qx, 92.30.Ef

DOI: 10.7498/aps.63.244206

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61308107), the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 20126118120003), and the Natural Science Foundation of Shanxi Province, China (Grant No. 2012JQ5002).

[†] Corresponding author. E-mail: dihuige@163.com