

激光雷达探测反演 PM_{2.5} 浓度的精度研究

何涛 侯鲁健 吕波 刘玉堂

(济南市环境监测中心站, 山东 济南 250014)

摘要 给出了 355 nm 激光雷达与布设在中国科学院大气物理研究所 325 m 铁塔上的 BAM-1020 颗粒物监测仪对比观测实验的结果,通过 2011 年 9 月 21 日至 10 月 21 日一个月的对比实验发现,激光雷达探测的气溶胶消光系数与实测的 PM_{2.5} 浓度之间存在较好的相关性。利用线性回归模型建立消光系数与颗粒物浓度之间的关系式,并通过铁塔实测的 PM_{2.5} 浓度对该关系式在垂直高度上的反演精度进行研究。结果显示,在 63, 80, 120, 160 m 高度处雷达反演的 PM_{2.5} 与实测值之间的相关系数分别为 0.9447, 0.9331, 0.9284, 0.9308, 说明激光雷达能有效探测颗粒物的垂直分布状况。激光雷达探测将有利于研究污染物的空间分布状况和污染物跨界输送问题,并为区域大气联防联控制定政策和措施提供数据支持。

关键词 大气光学;激光雷达;PM_{2.5} 浓度;消光系数;反演精度;气象因子

中图分类号 P407.5 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0113001

Study of Accuracy of Lidar Inversion PM_{2.5} Concentration

He Tao Hou Lujian Lü Bo Liu Yutang

(Ji'nan Environmental Monitoring Center, Ji'nan, Shandong 250014, China)

Abstract The results of comparison observation experiments between the 355 nm lidar and BAM-1020 particulate monitor laid on a 325 m tower of the Institute of Atmospheric Physics of the Chinese Academy of Sciences are given. Based on the data from 21 September 2011 to 21 October, good correlation between aerosol extinction coefficient by the lidar and PM_{2.5} particulate matter concentration is found. The linear regression model to establish the relationship between the extinction coefficient and the particulate matter concentration is used. The data of PM_{2.5} concentration measured by monitor laid on tower is used to study the inversion accuracy of the relational expression on the vertical height. The study results show that the correlation coefficients between lidar inversion PM_{2.5} and the measured values at 63, 80, 120 and 160 m are 0.9447, 0.9331, 0.9284 and 0.9308, respectively. The result shows that the lidar can detect the vertical distribution of particles. The lidar will be beneficial to study the spatial distribution and cross-border transportation problems of pollutants, as well as provide data to support policies and measurements of joint prevention and control of regional atmospheric.

Key words atmospheric optics; lidar; PM_{2.5} concentrations; extinction coefficient; inversion accuracy; meteorological factors

OCIS codes 010.3640; 010.1100; 010.1310; 010.1120; 280.1120

1 引言

近年来,城市空气污染的治理力度有所加大,但是灰霾等天气却频繁出现,由于大气气溶胶浓度变化直接影响到生存环境和人们的健康,特别是空气动力学直径小于 2.5 μm 的颗粒物 PM_{2.5} 已引起了人们的广泛关注。探测 PM_{2.5} 的时空分布,研究

PM_{2.5} 的形成和变化机制是当前环保领域亟待解决的问题。常规的颗粒物探测仪器只能探测近地面的颗粒物浓度变化,且局地性较强^[1],较难获取颗粒物的时空分布规律,激光雷达的出现使得大气颗粒物的时空探测成为可能。

最近有很多文献都关注激光雷达在颗粒物探测

收稿日期: 2012-06-26; **收到修改稿日期**: 2012-09-19

基金项目: 环保部公益性行业科研专项(2010467007)资助课题。

作者简介: 何涛(1983—),男,硕士,助理工程师,主要从事激光雷达和卫星遥感大气环境参数等方面的研究。

E-mail: hetaok2008@163.com

方面的研究,谭建成等^[2]利用 Mie 散射激光雷达应用 Fernald 方法获得大气颗粒物消光系数,并研究了消光系数与大气监测的可悬浮粒子浓度之间的相关性,结果表明利用激光雷达测量颗粒物浓度是可行的。胡欢陵等^[3,4]也分别提出过利用激光雷达反演的消光系数与可吸入颗粒物质量浓度之间的定量关系式。董云升等^[5]利用激光雷达反演了近地面的颗粒物质量浓度,并与车流量和黑炭浓度进行了比对分析,将激光雷达应用在城市交通污染的分析中。张春光等^[6~8]利用 Mie 散射激光雷达研究了后向散射系数计算颗粒物质量浓度的方法,并建立了后向散射系数与颗粒物质量浓度之间的经验公式,分析了气象因子对气溶胶质量浓度分布的影响,提出了一种指数修正模型。He 等^[9]利用激光雷达对香港地区的气溶胶垂直分布做了研究,通过分析混合层以上的气溶胶含量说明了气溶胶区域输送对气溶胶垂直分布的影响。范广强等^[10]利用双通道偏振激光雷达对上海世博会开幕式前后的沙尘暴过程进行了探测和研究,结果显示偏振激光雷达测量颗粒物消光系数与地面 PM₁₀ 空气污染指数(API)之间存在较好的一致性。Britt 等^[11]利用激光雷达测量研究了加利福尼亚州的圣华金河谷地区农业耕作排放的 PM₁₀。Miffre 等^[12]利用激光雷达研究了城市区域 PM₁₀ 的分布情况,并与实测值做了比较,结果显示将激光雷达、地基颗粒物采样器和空气质量轨迹模型结合在一起是一种有效的污染物评价方法。此外,在 Mie 散射雷达求解、分离大气分子信号和气溶胶信号方面国内也做了较多工作,这些工作将有利于获取更好的反演结果。陈涛等^[13]利用一种新的自适应定标反演方法在有效探测高度内确定标定值,反演微脉冲激光雷达(MPL)回波信号,取得了较好的反演效果。陶宗明等^[14]提出了一种直接的误差传递方法,并用该方法估算了激光雷达反演气溶胶后向散射系数的误差。王玉诏等^[15]利用激光雷达 Mie 散射回波信号与转动拉曼回波信号的差值,结合已知的大气分子消光系数,构造纯气溶胶回波用以反演气溶胶消光系数。刘金涛等^[16]基于碘分子 1107~1108 nm 吸收线之间有一个光谱透射率峰,提出了碘分子滤波器,碘分子滤波器对大气分子的瑞利散射有强烈的抑制作用,而对大气气溶胶的 Mie 散射影响较小。利用这种碘分子滤波器构成的高光谱分辨率激光雷达可以分离大气分子散射和气溶胶散射,从而能够测量大气后向散射比和大

气风场。

目前的一些研究主要集中于激光雷达探测颗粒物的方法和可行性的研究,很少有关于激光雷达探测颗粒物反演精度的研究,特别是对激光雷达在不同空间高度上的颗粒物探测精度的研究较少。为了弄清楚激光雷达在环境监测领域的应用前景,并进一步了解激光雷达探测结果的可靠性和雷达在不同高度层上的颗粒物浓度反演精度,2011年9月21日至10月21日,济南市环境监测中心站大气雷达探测车在中国科学院大气物理研究所325 m铁塔附近进行了为期30天的同步对比观测实验。

本文根据激光雷达在47 m高度处探测反演的消光系数与铁塔上实测的PM_{2.5}浓度数据对两者之间的关系进行了研究,获得了355 nm消光系数与PM_{2.5}浓度之间的定量关系。并通过63,80,120,160 m的铁塔观测数据与雷达探测结果对该定量关系式在垂直高度上的反演精度做了评估。考虑到气象因素对消光系数和PM_{2.5}浓度之间定量关系的影响,文中讨论了温度、相对湿度和风速对该定量关系的影响,并利用HYSPLIT后向轨迹模型分析了观测期间北京市气溶胶的来源。

2 理论介绍

激光雷达遥感大气的物理基础是激光与被探测物质之间发生散射、吸收等物理效应造成光强度的衰减或波长的变化,雷达通过接收器接收后向回波信号来分析被探测物质的性质。

通常假设大气气溶胶对激光的散射为单次散射,为了便于计算,假定气溶胶在空间高度上只是浓度不同,组分之间的比例相同,因此消光系数只是随着浓度而变化。假定最小比例组分的组合为一个基本单位,将该基本单位的气溶胶组合等效为一个粒子,称为等效粒子。这样,不同高度上的气溶胶就是由这种单一的等效粒子组成的,只是粒子数不同。气溶胶在高度 z 处的质量浓度就与该处的消光系数成正比。激光雷达要反演出颗粒物的浓度就必须将由激光雷达回波信号反演出的消光系数与颗粒物浓度建立经验关系,然后通过经验关系计算各高度层上的颗粒物浓度。

采用Fernald后向积分方法^[17]计算消光系数,对激光雷达方程式运用Fernald后向积分方法得到气溶胶消光系数随高度的变化函数为

$$X(z) = -\frac{S_1}{S_2}\alpha_2(z) + \frac{\sigma(z)\exp\left[2\left(\frac{S_1}{S_2}-1\right)\int_z^{z_c}\alpha_2(z)dz\right]}{\frac{\sigma(z_c)}{\alpha_1(z_c) + (S_1/S_2)\alpha_2(z_c)} + 2\int_z^{z_c}\sigma(z)\exp\left[2\left(\frac{S_1}{S_2}-1\right)\int_z^{z_c}\alpha_2(z)dz\right]dz}, \quad (1)$$

式中空气分子的后向散射系数 $\beta_2(z)$ 和消光系数 $\alpha_2(z)$ 由美国 1976 标准大气模式计算得到,其消光后向散射比 $S_2 = \alpha_2(z)/\beta_2(z) = 8\pi/3$; σ 为雷达回波信号;在假定参考高度 Z_c 上的气溶胶消光系数和气溶胶消光后向散射比 $S_1(z)$ 后,即可求解气溶胶消光系数。

由于实验采用 13° 倾角进行探测,探测的区域位于富含气溶胶的大气层内,因此在设置求解参数时,假定气溶胶消光后向散射比为 40,设置标定高度上的气溶胶散射比 $R_s(Z_c) = [\beta_1(Z_c) + \beta_2(Z_c)]/\beta_2(Z_c) = 1.2$ 。将雷达有效探测距离的最大值选取为标定高度,并利用实测的地面温度修正温度标准廓线和 Mie 散射原理计算出空气分子的后向散射系数和消光系数,最后通过 Fernald 后向积分式即 (1) 式计算出 355 nm 消光系数。

3 实验仪器及原理

雷达探测对比实验采用法国 Leosphere 公司生产的 ASL300 型激光雷达进行探测,该雷达的工作波长为 355 nm,发射窗口与接收窗口平行,雷达探测盲区为 200 m,具体参数如表 1 所示。激光雷达放置于中国科学院大气物理研究所铁塔西北侧 221 m 处,为避开雷达探测盲区,探测近地面空间的颗粒物分布状况,雷达观测天顶角设置为 77° ,为提高信号信噪比将每条探测廓线设置为 3000 发脉冲。

表 1 ASL300 激光雷达参数

Table 1 Parameters of ASL300 lidar

Item parameters	
Wavelength /nm	UV (tripled YAG):354.7
Frequency /Hz	20
Output laser energy /mJ	16($\pm 5\%$ shot by shot)
Emission divergence /mrad	0.25
Laser type	Flashlamp pumped
Aperture diameter /mm	150
Filters bandwidth /nm	0.3
Temporal resolution /s	10~30
Temperature range / $^\circ$ C	5~35
Range /km	0.2~20
Data format	Binary and ASCII

颗粒物自动监测采用 β 射线在线监测仪器^[18]

(Met One BAM-1020, 美国), 采样切割粒径为 $2.5 \mu\text{m}$ 。该监测仪是利用 β 射线衰减量测量采样期间增加的颗粒物质量。采样泵将环境空气吸入采样管,经过滤膜后排出,颗粒物附着在采样滤膜上,用 β 射线通过滤膜时的衰减量计算出颗粒物的浓度。PM_{2.5} 监测设备布设于铁塔的 47, 63, 80, 120, 160 m 垂直高度上。

4 实验数据与结果分析

为了弄清 355 nm 消光系数与大气中 PM_{2.5} 浓度的具体关系,对这两者展开拟合研究和相关性分析。将激光雷达回波信号利用 Fernald 后向积分式反演得到 355 nm 消光系数,然后将反演得到的 47 m 高度处的 355 nm 消光系数与铁塔上相同高度实测的 PM_{2.5} 浓度进行线性拟合,拟合结果如图 1 所示,拟合得到的 355 nm 消光系数反演 PM_{2.5} 浓度的经验公式为

$$Y = 104086.1694X + 6.3421, \quad (2)$$

式中 Y 为 PM_{2.5} 颗粒物浓度,单位为 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; X 为 355 nm 激光雷达测得的消光系数,单位为 m^{-1} ,其中拟合用到的 355 nm 消光系数为小时平均值;355 nm 消光系数与实测 PM_{2.5} 颗粒物浓度之间的相关系数 $R=0.9464$,样本数 $N=388$ 个。从拟合结果可以看出,355 nm 消光系数与 PM_{2.5} 颗粒物浓度相关系数较高,相关性很好。

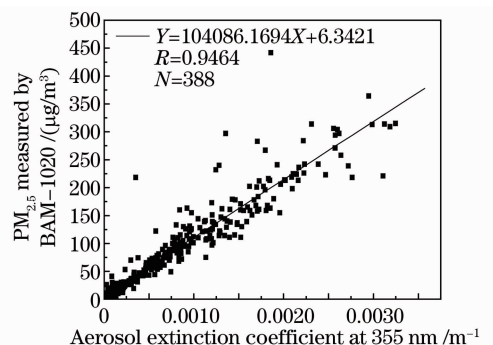


图 1 355 nm 消光系数与实测 PM_{2.5} 浓度线性拟合关系图
Fig. 1 Linear fitting relation diagram of extinction coefficient at 355 nm and measured PM_{2.5} concentrations

(2) 式给出了 355 nm 消光系数与 PM_{2.5} 浓度之

间的经验关系,但在其他高度的反演精度还不清楚,为此将铁塔实测数据与雷达探测数据进行了对比。图2是63,80,120,160 m各高度的雷达反演值与实测颗粒物浓度之间的对比关系图,其中激光雷达反演的PM_{2.5}颗粒物浓度是由激光雷达反演得到的消光系数通过经验公式(2)式计算得出的。通过将雷达反演的颗粒物浓度值与实测的颗粒物浓度进行相关性分析,得出在63,80,120,160 m高度处雷达反

演值与实测值之间的相关系数R分别为0.9447, 0.9331,0.9284,0.9308。从各高度层上的对比结果可以看出,63,80,120,160 m各高度处激光雷达反演的颗粒物浓度与实测的颗粒物浓度之间的相关性都在0.9以上,拟合直线的斜率都较接近1,截距也都较小,说明激光雷达反演的颗粒物浓度与实测值较为一致,激光雷达反演的PM_{2.5}浓度精度较高,可以比较准确地监测颗粒物的垂直分布。

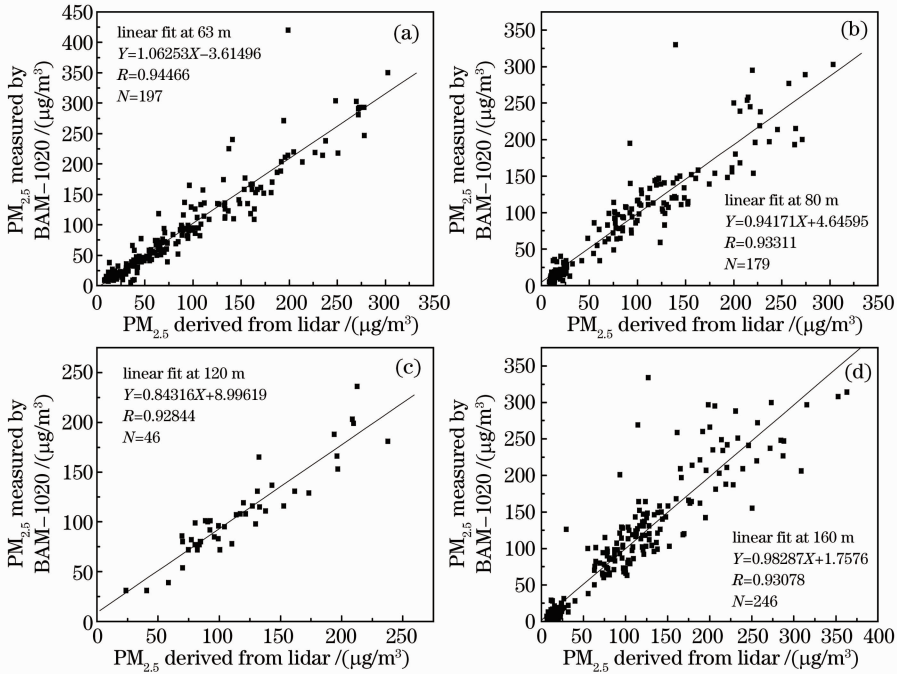


图2 不同高度的PM_{2.5}雷达反演值与实测PM_{2.5}颗粒物浓度之间的对比图。

(a) $z=63$ m; (b) $z=80$ m; (c) $z=120$ m; (D) $z=160$ m

Fig. 2 Correlations between PM_{2.5} derived from lidar and PM_{2.5} concentrations measured by BAM-1020 in different heights. (a) $z=63$ m; (b) $z=80$ m; (c) $z=120$ m; (D) $z=160$ m

5 气象条件对结果的影响分析

为了研究气象因素对消光系数与颗粒物浓度之间定量关系的影响,将考虑气象因素(温度、相对湿度、风速)时消光系数与颗粒物浓度之间的定量关系与不考虑这些气象因素时两者之间的定量关系反演结果进行了对比。考虑气象因子利用多元线性回归拟合得到的355 nm消光系数与PM_{2.5}颗粒物浓度经验公式为

$$Y = 93494.195X - 2.717W + 0.422R_H + 2.675T - 48.449, \quad (3)$$

式中W为水平风速,单位为m/s;R_H为相对湿度;T为大气温度,单位为℃。拟合所用数据均为47 m处实测值和雷达观测数据。数据样本数N=388个。

图3是63,80,120,160 m高度处激光雷达分别

利用(2)式和(3)式反演的PM_{2.5}浓度与实测值的对比图,PM_{2.5}浓度的单位为 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。从图中可以看出,由(2)式和(3)式反演的PM_{2.5}浓度与实测PM_{2.5}浓度之间的相关系数分别为0.9339和0.9463,拟合的直线斜率都接近1,截距都较小。总体上(3)式反演的结果要优于(2)式的,但差异不大,两式反演的结果与实测值的相关性均较好。说明温度、相对湿度、风速对消光系数与颗粒物浓度之间定量关系的影响相对较小,在利用激光雷达探测反演颗粒物浓度时,若无实测的各高度上的气象参数,可在牺牲反演精度的情况下忽略气象条件的影响。

为了分析所观测的气溶胶类型是否单一,研究结果是否具有一定的代表性,利用HYSPLIT后向轨迹模型分析了观测期间主要影响北京(39.93N,

116.28E)气溶胶类型的气团来源,如图4所示。从后向轨迹分析可以看出,2011年9月21日至2011年10月21日影响北京的气团主要来自于西伯利亚、外蒙古、内蒙古、甘肃、宁夏、山西、河北、河南、山

东、江苏、安徽、湖北等地,因此可以认为该时间段北京的气溶胶类型较为多样,观测结果代表的不是同一类型气溶胶特性,因此研究结果有一定代表性。

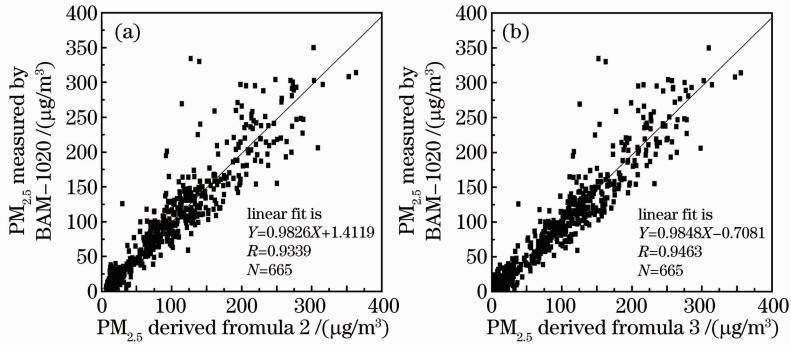


图3 利用(a) (2)式和(b) (3)式反演的 PM_{2.5} 浓度与实测值的对比图

Fig.3 Correlation between PM_{2.5} measured by BAM-1020 and PM_{2.5} derived by (a) formula (2) and (b) formula (3), respectively

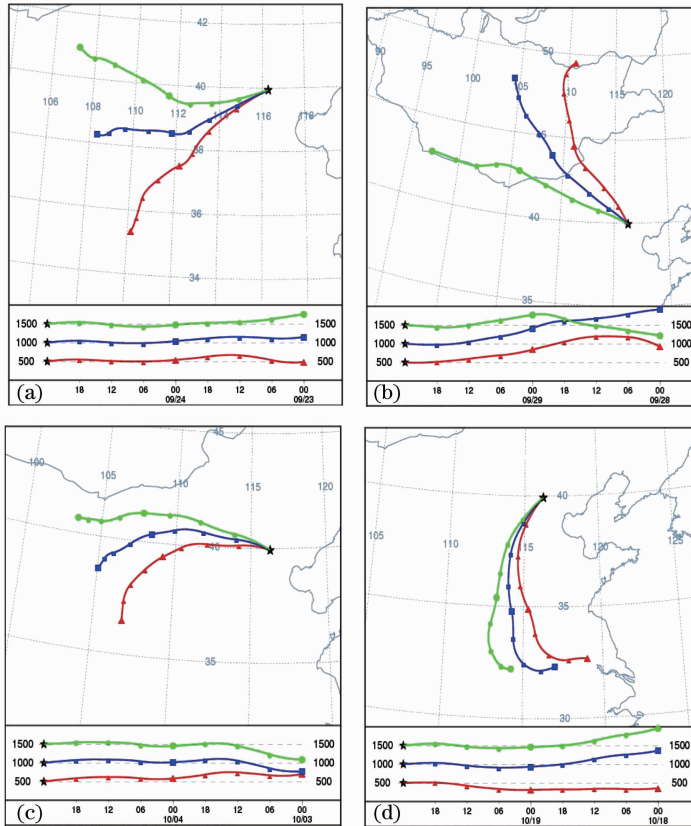


图4 HYSPLIT在北京(39.93N,116.28E)测得的3个不同高度气团48h后向轨迹分析图。后向轨迹结束时间为2011年(a)9月25日00:00(UTC);(b)9月30日00:00(UTC);(c)10月5日00:00(UTC)和(d)10月20日00:00(UTC)

Fig.4 HYSPLIT 48 h backward trajectories of air mass analyzed at three different altitudes in Beijing (source at 39.93N, 116.28E). Backward trajectories of ending at (a) 00:00 UTC 25 Sep. 11; (b) 00:00 UTC 30 Sep. 11; (c) 00:00 UTC 05 Oct. 11 and (d) 00:00 UTC 20 Oct. 11, respectively

6 结 论

从激光雷达探测与铁塔实测的对比实验分析结

果可以看出,通过消光系数反演的颗粒物浓度与实测的颗粒物浓度一致性较好,说明激光雷达能有效

探测颗粒物的垂直分布状况。此外,研究表明温度、相对湿度、风速对消光系数与颗粒物浓度之间定量关系的影响相对较小,若无实测的各高度上的气象参数,可在牺牲反演精度的情况下忽略气象条件的影响。因此,激光雷达探测可以作为常规颗粒物探测仪的辅助探测方式,该方式将有利于研究污染物的区域分布状况和污染物跨界输送问题、以及为区域大气联防联控制定政策和措施提供数据支持。但应该注意的是由于消光系数的求解受到雷达比和边界条件的影响,因此合理地假设雷达比和边界条件成为激光雷达准确探测颗粒物浓度的必要条件。在今后的工作中,将继续对激光雷达在颗粒物探测方面的应用进行深入研究,并探讨不同天气背景、不同季节条件下的雷达比的设置情况。

参 考 文 献

- 1 Sun Zhongdang, Zhao Yong, Li Jing *et al.*. On optimization of atmospheric environmental monitoring sites by matter element analysis in Zhengzhou city [J]. *Chongqing Environmental Science*, 1999, **21**(6): 16~18
孙中党,赵勇,李静等.郑州市大气监测优化布点的研究[J].*重庆环境科学*,1999,**21**(6):16~18
- 2 Tan Jiancheng, Lin Guoyang, Chen Zhenghao *et al.*. Studies of urban aerosols in Macao using a horizontal Mie lidar[J]. *The Journal of Light Scattering*, 2008, **20**(4): 375~378
谭建成,林国杨,陈政豪等.利用激光雷达测量都市上空气溶胶浓度分布[J].*光散射学报*,2008,**20**(4):375~378
- 3 Hu Huanling, Wu Yonghua, Xie Chenbo *et al.*. Aerosol pollutant boundary layer measured by lidar at Beijing [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2004, **17**(1): 59~66
胡欢陵,吴永华,谢晨波.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
- 4 Zhang Damao, Xu Chidong, Yu Tong *et al.*. Development of scanning micro pulse lidar and its applications[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2006, **1**(1): 47~52
张大毛,徐赤东,虞统等.扫描式微脉冲激光雷达的研制与应用[J].*大气与环境光学学报*,2006,**1**(1):47~52
- 5 Dong Yunsheng, Liu Wenqing, Liu Jianguo *et al.*. Application study of lidar in urban traffic pollution[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 315~320
董云升,刘文清,刘建国等.激光雷达在城市交通污染中应用研究[J].*光学学报*,2010,**30**(2):315~320
- 6 Zhang Chunguang, Zhang Yujun, Han Daowen *et al.*. Mass concentration calculation with particulate backscattering coefficient [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2008, **3**(3): 187~192
张春光,张玉钧,韩道文等.用后向散射系数计算颗粒物质量浓度的方法研究[J].*大气与环境光学学报*,2008,**3**(3):187~192

- 7 Zhang Chunguang, Zhang Yujun, Han Daowen *et al.*. Study on retrieval model for vertical distribution of aerosol mass concentration[J]. *Laser Technology*, 2009, **33**(3): 303~306
张春光,张玉钧,韩道文等.气溶胶质量浓度垂直分布反演模型的研究[J].*激光技术*,2009,**33**(3):303~306
- 8 Han Daowen, Liu Wenqing, Liu Jianguo *et al.*. Retrieval method for aerosol mass concentration vertical distribution[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(11): 1567~1573
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
- 9 Q. He, C. Li, J. Mao *et al.*. Analysis of aerosol vertical distribution and variability in Hong Kong[J]. *J. Geophys. Res.*, 2008, **113**(D14): D14211
- 10 Fan Guangqiang, Liu Jianguo, Zhang Tianshu *et al.*. Dual-channel polarization lidar monitoring of sandstorm and its transportation research[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(s1): s114006
范广强,刘建国,张天舒等.双通道偏振激光雷达监测沙尘暴污染及其输送研究[J].*中国激光*,2011,**38**(s1):s114006
- 11 A. H. Britt, A. J. Teresa, L. A. Lowell *et al.*. Lidar-assisted measurement of PM₁₀ emissions from agricultural tilling in California's San Joaquin Valley-Part I: lidar [J]. *Atmos. Environ.*, 2001, **35**(19): 3251~3264
- 12 A. Miffré, M. A. Chacra, S. Geffroy *et al.*. Aerosol load study in urban area by lidar and numerical model[J]. *Atmos. Environ.*, 2010, **44**(9): 1152~1161
- 13 Chen Tao, Zhao Yujie, Liu Dong *et al.*. Inversion of micro-pulse lidar signals with a new calibration method [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(5): 0514001
陈涛,赵玉洁,刘东等.微脉冲激光雷达探测大气气溶胶定标反演新方法[J].*中国激光*,2012,**39**(5):0514001
- 14 Tao Zongming, Wu Decheng, Liu Dong *et al.*. Estimation of aerosol backscatter coefficient error in lidar data processing[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(12): 1214001
陶宗明,吴德成,刘东等.激光雷达反演气溶胶后向散射系数误差估算[J].*中国激光*,2011,**38**(12):1214001
- 15 Wang Yuzhao, Zhang Yinchao, Chen Siying *et al.*. New method for aerosol extinction coefficient inversion by using a rotational Raman-Mie scattering lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(s1): s100512
王玉诏,张寅超,陈思颖等.转动拉曼米氏散射激光雷达反演气溶胶消光系数[J].*光学学报*,2010,**30**(s1):s100512
- 16 Liu Jintao, Chen Weibiao, Song Xiaoquan. Theory of iodine filter based on high spectral resolution lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1548~1553
刘金涛,陈卫标,宋小全.基于碘分子滤波器的高光谱分辨率激光雷达原理[J].*光学学报*,2010,**30**(6):1548~1553
- 17 F. G. Fernald. Analysis of atmospheric lidar observations: some comments[J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(5): 652~653
- 18 Bao Lei. Introduction and routine maintenance of BAM-1020 ambient particulate (PM₁₀) monitor [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2002, **18**(6): 56~58
鲍雷. BAM-1020 大气颗粒物(PM₁₀)监测仪介绍及日常维护经验[J].*中国环境监测*,2002,**18**(6):56~58

栏目编辑:王晓琰