

激光雷达探测建筑基坑开挖阶段气溶胶水平分布

赵强^{1,2*}, 苏红超^{1**}, 易明建¹, 余东升³, 徐赤东³¹安徽建筑大学环境与能源工程学院, 安徽 合肥 230601;²安徽省建设领域碳达峰碳中和战略研究院, 安徽 合肥 230601;³中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031

摘要 建筑工地扬尘等气溶胶是大气污染的重要来源,激光雷达是探测建筑工地基坑开挖阶段气溶胶水平时空分布的有力手段。一台 532 nm 波长的便携式微脉冲激光雷达发射激光并接收气溶胶颗粒与激光相互作用的后向散射回波信号,结合颗粒物浓度监测仪,利用 Klett 法和分段斜率法反演气溶胶水平消光系数和 PM₁₀ 质量浓度。结果表明,用激光雷达探测的消光系数反演工地 PM₁₀ 质量浓度是可行的。当基坑开挖、渣土外运等施工作业开始时,工地内的气溶胶颗粒浓度明显高于周边区域,且会向周边扩散;停止施工后,在无风情况下,气溶胶颗粒会聚集在工地区域内,PM₁₀ 质量浓度会维持在一个高水平阶段。研究结果为掌握并控制工地气溶胶颗粒排放情况提供了技术支撑。

关键词 大气光学; 激光雷达; 消光系数; 气溶胶; 建筑基坑; PM₁₀ 质量浓度

中图分类号 X831

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.2010001

1 引言

建筑工地基坑开挖时所产生的扬尘等颗粒物是城市大气气溶胶的重要来源,同时也是雾霾等恶劣天气频发的重要因素。

建筑工地的气溶胶颗粒主要来源于渣土外运和一般施工扬尘,是无组织、无规则的排放。受制于成本等因素,无法确保每个建筑工地附近都存在空气质量监测站,况且有限位置的监测数据也无法全面、准确地反映施工区域内的气溶胶水平时空分布情况。微脉冲激光雷达根据大气对激光的消光、散射等物理效应,接收气溶胶的后向散射回波信号,实现对大气气溶胶的时空分布探测^[1-3]。赵文豪等^[4]利用水平和垂直测量的两台雷达获得区域性气溶胶的三维分布情况,并对水平消光系数与国控站点数据进行对比分析。结果表明,此方法可以有效揭示较大区域内的气溶胶等颗粒物的分布和传输情况,具有效率高、范围广的优点。鲁先洋等^[5]建立一种基

于气溶胶消光系数、质量浓度等参数的数学模型,反演气溶胶水平质量浓度,为探测城市气溶胶动态变化提供了有效数据支持。石鹏等^[6]利用激光雷达探测了城市建筑工地内小尺度面源扬尘的二维质量浓度分布,为建筑工地无组织扬尘快速监测提供了一种新思路。庄全风等^[7]利用多波长气溶胶激光雷达对北京地区持续性雾霾进行了观测并分析成因。

在以往的研究中,激光雷达常用于探测气溶胶消光系数的垂直分布廓线,涉及建筑工地扬尘等气溶胶排放的水平探测较少。本文通过一台便携式激光雷达持续对安徽建筑大学内的一处工地进行实时监测,通过水平扫描测量和定点测量获得基坑开挖阶段建筑工地区域内气溶胶颗粒的原始回波光子信号,反演气溶胶水平消光系数,并结合颗粒物质量监测仪实测数据验证气溶胶消光系数反演 PM₁₀ 质量浓度的可靠性,使得整个工地的污染物颗粒的排放始终处于可知、可控的状态。

收稿日期: 2021-01-29; **修回日期:** 2021-02-02; **录用日期:** 2021-03-18

基金项目: 国家自然科学基金(41005016)、民用航天预研项目(D040103)、国防科技创新特区项目(DH863032001)、安徽省高校优秀青年人才支持计划重点项目(gxyqZD2020036)、安徽建筑大学科研基金(2020QDZ31)

通信作者: *rommel99@163.com; **SuhongchaoD@163.com

2 探测原理与方法

2.1 微脉冲激光雷达探测原理

采用的微脉冲激光雷达为 LVIS-T100 便携式激光雷达,雷达的整体外观如图 1(a)所示,此雷达系统主机主要包括激光发射接收系统和数据采集控制系统两部分,如图 1(b)所示。

其中,接收与发射望远镜光学系统、激光器、后继接收光学系统组成了激光发射接收系统。仪

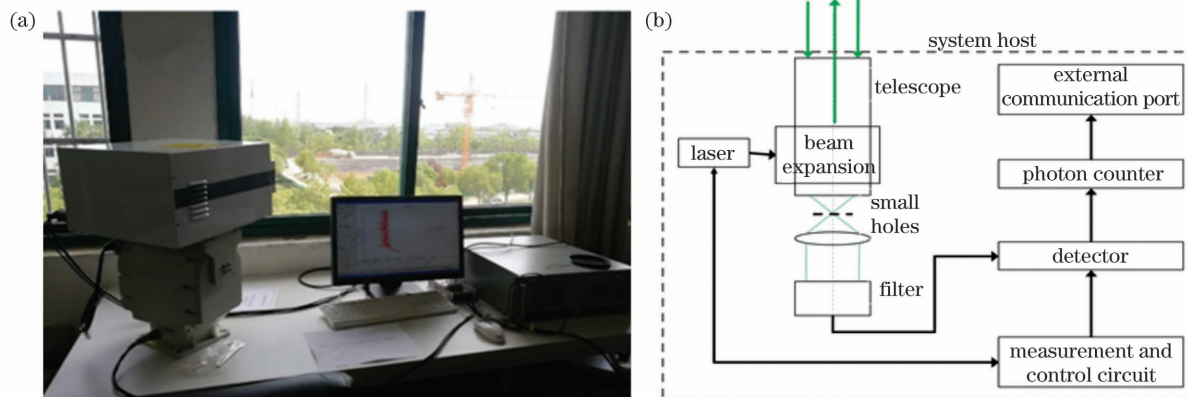


图 1 LVIS-T100 便携式激光雷达。(a)整体外观;(b)雷达系统结构

Fig. 1 LVIS-T100 portable lidar. (a) Overall appearance; (b) radar system structure

研究区域为安徽建筑大学校内的一处新建工地(实训楼),受限于试验场地,激光雷达的放置地点位于建筑工地斜对面的建筑物四楼,如图 2 所示。图 2(a)

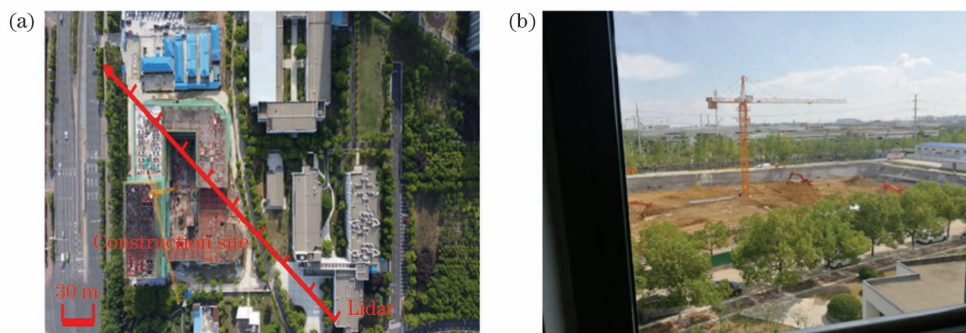


图 2 激光雷达观测建筑工地。(a)位置图;(b)基坑开挖现场图

Fig. 2 Lidar observation of construction site. (a) Location map; (b) site map of foundation pit excavation

为了获取建筑工地的扬尘等气溶胶颗粒的水平分布情况,利用激光雷达水平定点测量和水平扫描测量功能,每隔 30 m 的距离就可以得到一个水平消光系数值。

便携式激光雷达的主要参数如表 1 所示。

2.2 米散射激光雷达反演算法

目前,Fernald 算法在求解激光雷达方程时需要分别考虑空气分子与气溶胶散射,适用于气溶胶浓度较小且空气分子对消光的影响无法忽略的情况,且Fernald算法常用于激光雷达的垂直探测^[8-9]。

器工作时,激光器发出 532 nm 周期性的脉冲激光信号,雷达望远镜接收大气分子与激光相互作用产生的后向散射回波信号,并通过小孔和滤光片进行光学处理之后进入探测器进行光电转换。数据采集控制系统主要由光子计数器、探测器和测控电路组成,通过机械装置固定在主机中,控制仪器工作的时序、数据采集和对外通讯过程。数据反演与控制软件主要由设备状态监控和数据显示与存储等部分组成。

为激光雷达与建筑工地在无人机拍摄图片上的相对位置示意图,图 2(b)为工地基坑开挖现场图。此处通视,利于雷达的水平监测,获取的数据也更为准确。

表 1 激光雷达参数

Table 1 Lidar parameters

Parameter	Content
Laser wavelength/nm	532 (LD pumped Nd:YAG)
Energy/ μ J	$\sim 20@2500$ Hz
Laser pulse width/ns	≤ 15
Receiving telescope	Caliber $\Phi 100$ mm
Filter bandwidth/nm	0.5
Number of acquisition channels	1 piece
Data collector	Multi-channel photon counter

也有学者假设水平气溶胶消光后向散射比和水平大气分子的消光系数为常数,并结合分段斜率法求出水平参考点位置的消光系数值,再运用 Fernald 算法反演气溶胶水平消光系数^[10-11]。

采用 Klett 方法并结合分段斜率法反演气溶胶的水平消光系数^[12]。米散射激光雷达方程为

$$P(z) = C \frac{\beta(z)}{z^2} \exp \left[-2 \int_0^z \alpha(z') dz' \right] \quad (1)$$

距离平方校正后的回波信号可以表示为

$$X(z) = P(z) z^2 = C \beta(z) \exp \left[-2 \int_0^z \alpha(z') dz' \right], \quad (2)$$

式中: $P(z)$ 为米散射激光雷达接收距离 z 处的大气后向散射回波信号; C 为激光雷达系统常数; $\alpha(z)$ 和 $\beta(z)$ 分别为大气的消光系数和后向散射系数。对(2)式两边取对数,得方程的对数形式为

$$\ln[X(z)] = \ln[C\beta(z)] - 2 \int_0^z \alpha(z') dz' \quad (3)$$

实际探测中,由于整个探测路径上的气溶胶颗

粒分布并不均匀,会存在突变的回波信号,使反演的水平消光系数值与真实值之间存在较大误差。为了减小误差,假设每个小段内大气均匀,则可求出 $\alpha(z + \Delta z)$ 处的消光系数,则全程的 $\beta(z)$ 和 $\alpha(z)$ 不随 z 变化,(3)式可表示为

$$\ln[X(z')] = \ln[C\beta] - 2\alpha Z \quad (4)$$

(4)式是一个直线方程,以距离 Z 为横坐标,信号的对数为纵坐标,对每一小段距离用最小二乘法作图,得到一条直线,其斜率的 $-1/2$ 就是 α 值,即为水平消光系数。选取各段距离上的气溶胶消光系数中相关性最高的一段距离的气溶胶消光系数作为边界位置处的水平消光系数。虽然这里假设了大气均匀,但实际上是以长距离探测的数据为依据的,取了全程的平均消光系数值^[13]。

Klett 法假设大气消光系数和后向散射系数满足

$$\beta(z, \lambda_L) = \frac{\alpha(z, \lambda_L)^k}{S} \quad (5)$$

式中: k, S 均为常数; λ_L 为探测波长。则此法的稳定反转解为

$$\alpha(z, \lambda) = \frac{\exp \{ [X(z, \lambda) - X(z_c, \lambda)] / k \}}{1/\alpha(z_c, \lambda) + 2/k \int_z^{z_c} \exp \{ [X(z', \lambda) - X(z_c, \lambda)] / k \} dz'} \quad (6)$$

式中: z_c 表示雷达探测的最大距离; $\alpha(z_c, \lambda)$ 是分段斜率法得到的对应边界值 z_c 处的消光系数。

3 探测结果与分析

3.1 几何因子校正

由于激光发射器与回波光子信号接收器的视角存在不重叠的区域,在某一段距离上回波光子信号接收器只可以接收到部分的回波信号,因此需进行几何因子校正^[14]。选取晴好天气进行水平测试,在大气状况相对均匀的时段,对测得的原始数据进行水平拟合校正,得到几何因子,如图 3(a)所示,激光雷达在几何因子校正前后所能接收的回波光子数变化如图 3(b)所示。

由图 3(a)可以看出,直到在 2 km 左右处,几何校正因子的数值为 1,说明此处的回波信号才完全被回波光子信号接收器接收。图 3(b)的数据来源于 2019 年 8 月 14 日 19 时 10 分 53 秒激光雷达监测的数据,可清晰地看出,采用几何因子校正后,在激光雷达整个探测路径上,即从激光雷达到 2 km

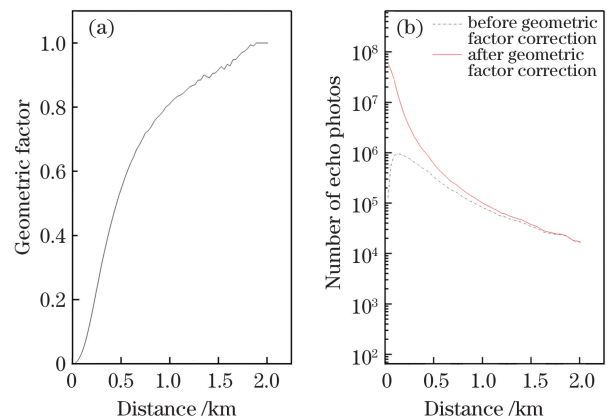


图 3 激光雷达几何因子校正。(a)几何因子;(b)几何因子校正前后回波光子数变化

Fig. 3 Geometric factor correction of lidar. (a) Geometric factor; (b) change number of echo photons before and after geometric factor correction

水平范围里,所有的回波信号皆被回波光子信号接收器接收。并且在同样的长度范围里,激光雷达所接收的大气后向散射回波信号提升了约 3 个数量级,有效地避免了回波光子数接收不完全的情况,保

证了探测结果的准确性、稳定性。同时,拟合的几何因子不可避免地存在误差,不仅是水平大气的波动和非均匀性造成的,还与系统稳定性、光路结构等参数变化相关。

3.2 气溶胶消光系数水平廓线

所述的激光雷达获取数据的时间间隔为 1 min,发射有效脉冲数为 142500。处理获取的原始数据时,背景取值范围设置为 25~30 km,参考点选取范围为 2~4 km,数据处理最大范围是 20 km。结合图 3,选取水平距离 0.6 km 范围内的水平消光系数,得到如图 4 所示的消光系数廓线。

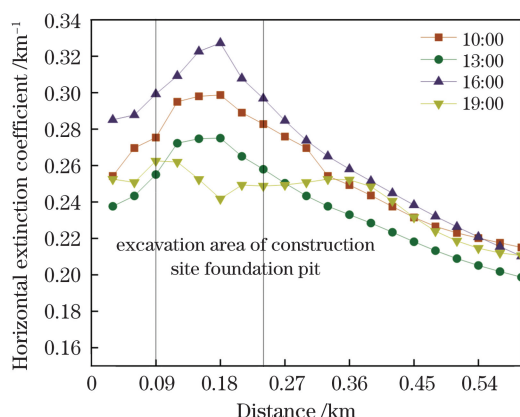


图 4 2019 年 8 月 24 日四个时刻的水平消光系数廓线
Fig. 4 Horizontal extinction coefficient profiles at four moments on August 24, 2019

图 4 中两条竖线之间的范围即为工地在雷达探测路径上的长度范围,其中最近处距雷达约 90 m,最远处约 240 m。每隔 30 m 就可以得到一个水平消光系数值,例如 0.12 km 处的消光系数值是指 0.09~0.12 km 这 30 m 距离内的平均值。从图 4 可以看出:上午 10 点、中午 13 点、下午 16 点这三个时刻在 0~0.3 km 曲线有相同的变化趋势,先上升再下降,在 0.18 km 处有个峰值,且下午 16 点时,水平消光系数值在四个时刻中最大;晚上 19 点,0.18 km 处的水平消光系数值较前三个时刻同一位置的数值要小,原因在于此时的工地施工活动暂停,产生的扬尘等气溶胶颗粒有所减少,但有向外扩散并递减的趋势。

3.3 PM₁₀ 质量浓度计算与水平分布

研究表明,气溶胶水平消光系数值与 PM₁₀ 质量浓度之间存在相关关系^[15-17],故对激光雷达测得的消光系数与颗粒物质量监测仪实测的 PM₁₀ 质量浓度(ρ)进行相关性对比,图 5 给出了对比结果,二者的相关性达到了 0.81。所用监测仪为

TEOM1405 颗粒物质量监测仪,放置于激光雷达前方 210 m 左右处,既能兼顾工地扬尘,又在激光光束路径上。

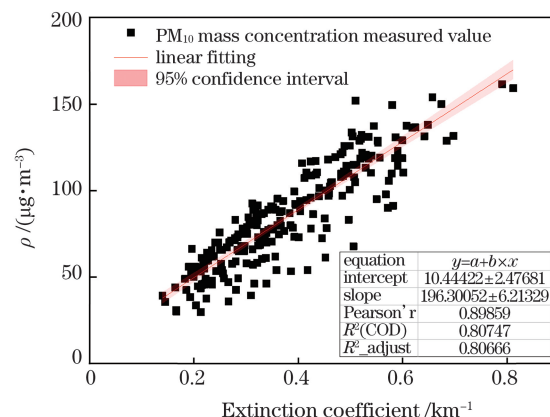


图 5 消光系数与 PM₁₀ 质量浓度的相关关系

Fig. 5 Correlation between extinction coefficient and PM₁₀ mass concentration

图 5 包含用 2019 年 8 月至 11 月探测的 240 组对应数据拟合得到的消光系数反演 PM₁₀ 质量浓度的经验公式,此直线两侧的区域为 95% 的置信区间,截距的标准误差是 2.47,斜率的标准误差为 6.21。通过对比分析可知,可以利用此经验公式反演这一阶段的 PM₁₀ 质量浓度。

图 6 给出了 10 月 19 日至 10 月 22 日每天 9:00 激光雷达反演的 PM₁₀ 质量浓度小时均值柱状图及其与实测值的误差比较,相对误差为 10%~30%。表 2 比较了 10 月 19 日至 22 日 0.21 km 处 PM₁₀ 质量浓度测量值与反演小时均值之间的相对误差,结果表明,10 月 21 日 0.21 km 处的相对误差最小,10 月 19 日、10 月 22 日的反演小时均值小于测量值,其余两天 0.21 km 处的反演小时均值要大于测量值,且 10 月 20 日此处的相对误差最大,达到了 16.67%。

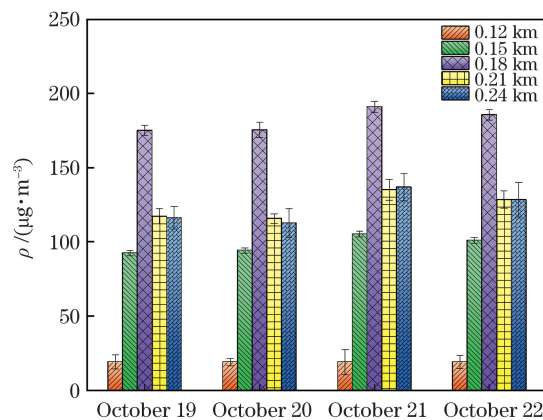


图 6 PM₁₀ 质量浓度小时均值柱状图

Fig. 6 Histogram of the hourly mean value of PM₁₀ mass concentration

表 2 0.21 km 处 PM₁₀ 质量浓度反演小时均值与测量值相对误差比较

Table 2 Comparison of the relative error between the inversion hourly mean value and the measured value of PM₁₀ mass concentration at 0.21 km

Date	Inversion mean value	Measured value	Relative error
October 19	117.2658	132.4139	-11.44%
October 20	115.6744	99.1467	16.67%
October 21	135.1572	122.7809	10.08%
October 22	128.6338	147.6513	-12.88%

图 7 给出了经验公式反演的 PM₁₀ 质量浓度随距离分布情况。图 8 是 10 月 22 日在 0.15, 0.18, 0.21, 0.24 km 处 PM₁₀ 质量浓度一天的变化曲线。

图 7 中两条竖线之间的区域即为工地基坑开挖区域。可以看出: 此时工地中的 PM₁₀ 质量浓度明显高于其他区域; 10 月 19 日至 10 月 22 日 9:00 的峰值出现在 0.18 km 左右, 且 10 月 21 日上午 9:00 的 PM₁₀ 质量浓度数值最大; 且 PM₁₀ 质量浓度的峰值位置处于时刻变化的状态; 10 月 20 日 9:00 的曲线在 0.5 km 左右出现波动, 受到西北风向的影响, 建筑工地区域的气溶胶等污染物颗粒向外扩散。

所选择的四处距离均为雷达探测路径上的建筑工地区域。从图 8 看到: 四处距离的 PM₁₀ 质量浓度一天变化趋势基本一致; 随着施工活动的进行, 在上午 8:00, 9:00 左右会出现一个较大的峰值, 此时的施工强度比较大, 所产生的扬尘等气溶胶颗粒较多; 随后出现下降的趋势, 大约在中午 12:00, PM₁₀ 质量浓度迎来一个低谷, 原因在于中午的施工强度减弱, 工人有一个休息的时间段; 随着下午的继续施

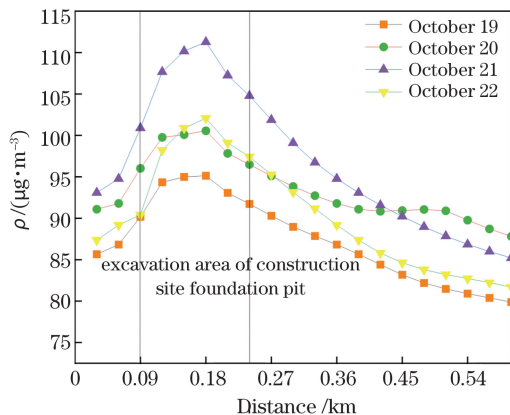


图 7 10 月 19 日至 10 月 22 日每天 9:00 PM₁₀ 质量浓度水平分布廓线

Fig. 7 Horizontal distribution profiles of PM₁₀ mass concentration at 9 o'clock every day from October 19 to 22

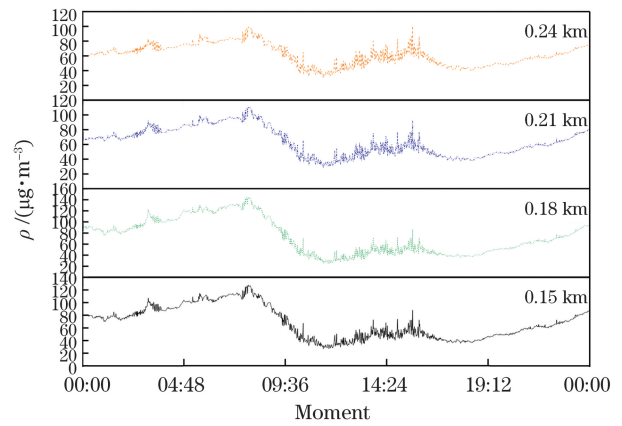
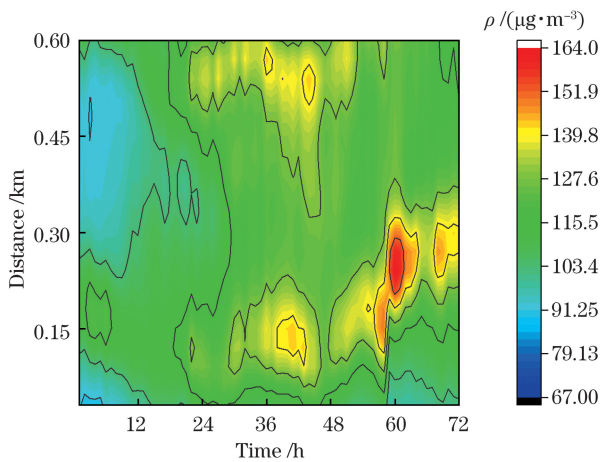


图 8 2019 年 10 月 22 日不同距离处 PM₁₀ 质量浓度的变化

Fig. 8 Change of PM₁₀ mass concentration at different distances on October 22, 2019

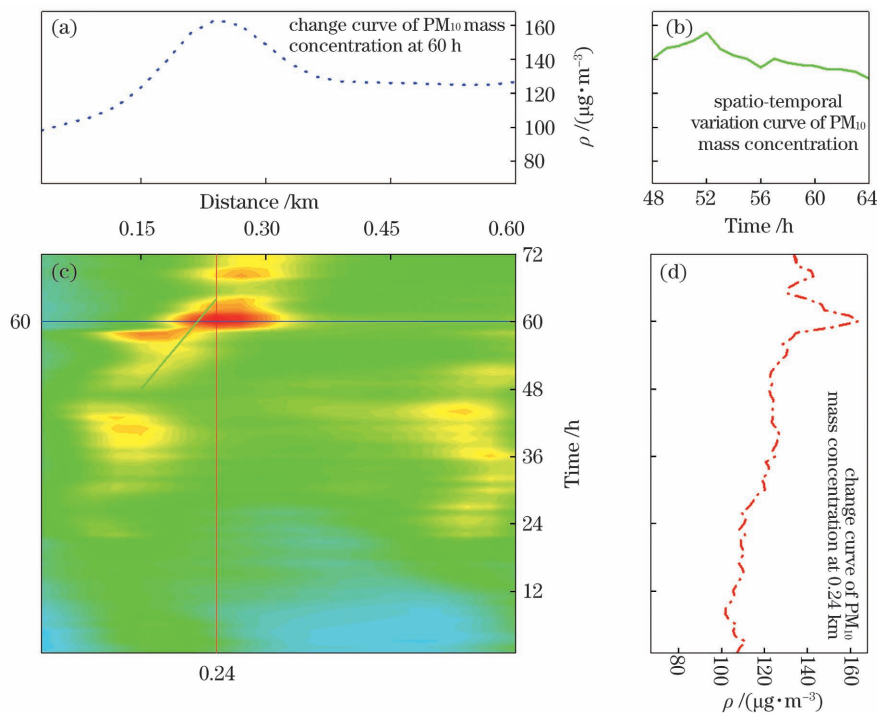
工, PM₁₀ 质量浓度迅速攀升, 但数值较上午的要小, 在下午 15:00, 16:00 左右迎来一个峰值; 待工人下班施工停止后, PM₁₀ 质量浓度缓慢下降, 晚上 19:00 以后有一个小幅度的波动上升趋势。通过调查周边环境发现, 在 19:00 时段颗粒物小幅增加的主要原因, 一是存在附近道路交通量增加、渣土集中外运等情形; 二是夜晚边界层逆温效应阻碍了污染物颗粒的扩散。在 0:00 到 10:00 时间段, 从 0.15 km 到 0.24 km 处的 PM₁₀ 质量浓度有相同变化趋势, 但数值上呈现先增后减的情形, 说明这个时间段内, 随着时间的推移, 工地基坑开挖时产生的扬尘等气溶胶颗粒逐渐向外扩散, 表现为 0.18 km 处的 PM₁₀ 质量浓度较另三处距离最大。上午 10:00 到下午 19:00 左右, 虽然四处距离的变化趋势一致, 但由于东南风的影响, 污染物有所扩散, 产生的扬尘等气溶胶污染物颗粒主要集中在 0.21~0.24 km, 即表现为 0.24 km 处的 PM₁₀ 质量浓度最大。

连续的污染物浓度廓线变化对确定污染源位置和排放规律至关重要。图 9 是连续监测 72 h PM₁₀ 质量浓度时空变化等高线图, 能更好地反映气溶胶水平时空分布及变化规律。图 9 中的闭合曲线表示此处的 PM₁₀ 质量浓度相同, 0.09~0.24 km 是 PM₁₀ 质量浓度连续变化较集中的区域。可以看到: 基坑开挖及渣土外运作业主要集中于 30~48 h, 54~72 h 时间段, 聚集的范围为 0.03~0.33 km; 同时由于东南风的影响, 建筑工地内的气溶胶等颗粒物会随风向飘散, 扩散到建筑工地 1~2 km; 在同一时间, 工地基坑内的 PM₁₀ 质量浓度会高于周边区域, 在高峰车流排放尾气和东南风的共同作用下,

图 9 PM₁₀ 质量浓度变化等高线图Fig. 9 Contour map of PM₁₀ mass concentration change

造成了 PM₁₀ 质量浓度在时间和距离上的分布格局。

图 10 是基于图 9 的 PM₁₀ 质量浓度变化等高线剖面图。图 10(c) 中横线对应的曲线为图 10(a) 中所示的曲线, 表示同一时间(60 h)不同探测距离上的 PM₁₀ 质量浓度分布情况, 此时 0.21 km 处的 PM₁₀ 质量浓度最大, 在随后的探测距离上浓度逐渐减小。图 10(c) 中纵线对应图 10(d) 中所示的曲线, 表示同一距离上(0.24 km)不同时间 PM₁₀ 质量浓度分布情况, 有连续的峰值出现。图 10(c) 斜线对应的曲线为图 10(b) 中所示的曲线, 表示一定距离范围(0.15~0.24 km)一定时间范围(48~65 h)的 PM₁₀ 质量浓度分布情况。

图 10 PM₁₀ 质量浓度变化等高线剖面图Fig. 10 Profile of the contour line of PM₁₀ mass concentration change

4 结 论

利用微脉冲激光雷达探测建筑工地扬尘等气溶胶的原始回波光信号, 通过 Klett 法和分段斜率法反演气溶胶的水平消光系数。利用其与颗粒物质量监测仪实测的 PM₁₀ 质量浓度之间的相关关系, 实现建筑工地气溶胶水平时空分布和污染物颗粒均值情况探测。

结果表明, 建筑工地基坑开挖阶段产生的扬尘等气溶胶主要聚集于 0.09~0.24 km 这 150 m 的区域内, 建筑工地区域的 PM₁₀ 质量浓度明显高于

周边区域, 但会向周边扩散, 导致在某些时间段内出现周边区域的 PM₁₀ 质量浓度高于工地区域的情况。随着施工的正常化, PM₁₀ 质量浓度水平廓线的变化趋势及峰值出现的时间与工地的施工安排密不可分; 停止施工后, 在无明显风速情况下, 气溶胶颗粒会聚集在工地区域内, PM₁₀ 质量浓度会维持在一个高水平阶段。据此可以及时掌握并控制工地污染物颗粒的排放情况, 使得整个工地的污染物颗粒的排放始终处于达标及可控的状态。

参 考 文 献

- [1] Wang Y Q. Study on inverse parameters of lidar and

- optical features of aerosol in Lanzhou [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2007.
- 王音洪. 对兰州激光雷达反演参数及气溶胶光学特性的研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2007.
- [2] Yang X W. Lidar measurement of atmospheric aerosol and its feathers analysis [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2009.
- 杨晓武. 气溶胶的激光雷达探测和特性分析 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2009.
- [3] Chu Y F, Liu D, Wu D C, et al. Algorithm of retrieving boundary layer height based on Raman lidar water vapor data [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(12): 1204009.
- 储玉飞, 刘东, 吴德成, 等. 基于拉曼激光雷达水汽数据探测边界层高度的算法 [J]. 中国激光, 2020, 47(12): 1204009.
- [4] Zhao W H, Yan L, Wang C Y, et al. Detection of atmospheric particulate matter pollution based on three-dimensional atmospheric detection LiDAR [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(10): 1436-1441.
- 赵文豪, 闫利, 王成义, 等. 基于三维大气探测激光雷达的大气颗粒物污染探测 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2019, 44(10): 1436-1441.
- [5] Lu X Y, Li X B, Qin W B, et al. Retrieval of horizontal distribution of aerosol mass concentration by micro pulse lidar [J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(7): 1697-1704.
- 鲁先洋, 李学彬, 秦武斌, 等. 微脉冲激光雷达反演气溶胶的水平分布 [J]. 光学精密工程, 2017, 25(7): 1697-1704.
- [6] Shi P, Du K, Mu C, et al. Measurement method of fugitive dust mass emissions from construction activities using vertical-scanning lidar system [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3): 0301005.
- 石鹏, 杜可, 穆超, 等. 垂直扫描激光雷达观测建筑场地无组织扬尘方法 [J]. 光学学报, 2013, 33(3): 0301005.
- [7] Zhuang Q F, Wang Y M, Wang Z J, et al. Typical case of multi-wavelength aerosol lidar observation of persistent hazy weather in Beijing [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(24): 240101.
- 庄全风, 王一萌, 王章军, 等. 多波长气溶胶激光雷达观测北京地区持续性雾霾的典型案例 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(24): 240101.
- [8] Zhu C X, Cao N W, Yang F K, et al. Micro pulse lidar observations of aerosols in Nanjing [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(5): 050101.
- 祝存兄, 曹念文, 杨丰恺, 等. 南京地区微脉冲激光雷达气溶胶观测 [J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(5): 050101.
- [9] Li H, Wang Z J, Wang H Y, et al. Combined observation of aerosol vertical structure using micro-pulse lidar and compact optical backscatter aerosol detector [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(13): 132801.
- 李辉, 王章军, 王颢樾, 等. 微脉冲激光雷达与小型后向散射探空仪对气溶胶垂直结构联合观测研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(13): 132801.
- [10] Lü L H, Liu W Q, Zhang T S, et al. Two data inversion algorithms of aerosol horizontal distribution detected by MPL and error analysis [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2015, 35(7): 1774-1778.
- 吕立慧, 刘文清, 张天舒, 等. 微脉冲激光雷达水平探测气溶胶两种反演算法对比与误差分析 [J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(7): 1774-1778.
- [11] Du Q C, Ji Y F, Xu C D. Data processing method of aerosol horizontal distribution detected by MPL [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2008, 3(1): 23-27.
- 杜其成, 纪玉峰, 徐赤东. MPL 探测气溶胶水平分布数据处理方法研究 [J]. 大气与环境光学学报, 2008, 3(1): 23-27.
- [12] Ma X, Wang C Y, Han G, et al. Regional atmospheric aerosol pollution detection based on LiDAR remote sensing [J]. Remote Sensing, 2019, 11(20): 2339.
- [13] Lü L H, Liu W Q, Zhang T S, et al. A new micro-pulse lidar for atmospheric horizontal visibility measurement [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(9): 0908005.
- 吕立慧, 刘文清, 张天舒, 等. 新型微脉冲激光雷达测量大气水平能见度 [J]. 中国激光, 2014, 41(9): 0908005.
- [14] Zhong Z Q, Zhou J. Simulated signal calculation for micro pulse lidar [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2003, 20(5): 618-622.
- 钟志庆, 周军. 微脉冲激光雷达探测信号的数值模拟计算 [J]. 量子电子学报, 2003, 20(5): 618-622.
- [15] 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.
- 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, 73.
- [16] Li X B, Xu Q S, Wei H L, et al. Study on relationship between extinction coefficient and mass concentration [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(9): 1655-1658.
- 李学彬, 徐青山, 魏合理, 等. 气溶胶消光系数与质量浓度的相关性研究 [J]. 光学学报, 2008, 28(9):

1655-1658.
[17] Tao Z M, Ma X M, Liu D, et al. Statistical distribution of $PM_{2.5}$ mass concentration profiles at west suburb of Hefei City in 2014[J]. Acta Optica Sinica, 2016,

36(6): 0601001.
陶宗明, 麻晓敏, 刘东, 等. 2014 年合肥西郊 $PM_{2.5}$ 质量浓度廓线统计分布[J]. 光学学报, 2016, 36(6): 0601001.

Aerosol Horizontal Distribution Detected by Lidar in Excavation Stage of Construction Site Foundation Pit

Zhao Qiang^{1,2*}, Su Hongchao^{1**}, Yi Mingjian¹, Yu Dongsheng³, Xu Chidong³

¹ School of Environment and Energy Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei, Anhui 230601, China;

² Anhui Institute of Strategic Study on Carbon Dioxide Emissions Peak and Carbon Neutrality in Urban-Rural Development, Hefei, Anhui 230601, China;

³ Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract

Objective The dust and other particulate matter generated during the excavation of construction site foundation pits are major sources of urban atmospheric aerosols and an important factor in the frequent occurrence of severe weather, such as haze. Aerosol particles on construction sites are derived from slag transportation and general construction dust, which are unorganized and irregular emissions. However, monitoring data in limited locations cannot fully and accurately reflect the spatial and temporal distribution of aerosol levels in the construction area. Lidar with high temporal and spatial resolution, large range, and real-time remote sensing monitoring capabilities has gradually grown into an indispensable observation device in the field of urban fine particle monitoring and atmospheric science research. Therefore, lidar is an effective method for detecting the spatial and temporal distribution of aerosols during the excavation of foundation pits at construction sites.

Methods In this study, a portable micropulse lidar with a 532-nm wavelength emits the laser and receives the backscattered echo signal generated by the interaction between aerosol particles and lasers. Combined with the particle concentration monitor, the Klett and segmented-slope methods are used to invert the aerosol. The horizontal extinction coefficient and particulate matter (PM_{10}) mass concentration are used to ensure that emission of pollutant particles in the entire construction site is always in a known and controllable state.

First, a curve with distance as the abscissa and logarithm of the signal as the ordinate is obtained according to the lidar equation. Then, the least squares method is used to plot each small distance in the curve to obtain the linear equation of each distance, and its 1/2 slope is the value of the horizontal extinction coefficient. The aerosol extinction coefficient of a certain distance with the highest correlation among the aerosol extinction coefficients at each distance is selected as the horizontal extinction coefficient at the boundary position. Finally, the distribution of the horizontal extinction coefficient on the detection path is obtained by substituting the boundary value of the extinction coefficient into the Klett equation. Although the atmosphere is assumed to be uniform, it is based on the long-distance detection data, and the average extinction coefficient value of the whole process is taken.

Results and Discussion Lidar obtains the backscattered signal of aerosol particles on the construction site to the laser, revealing the horizontal distribution of aerosol during the excavation stage of the construction site.

The detection results show that the change in the aerosol particle-level distribution curve at different moments in the excavation area of the site foundation pit first rose and then fell, and an extreme point appeared at 0.18 km. However, the position of the extreme point was not fixed (Fig. 4). The correlation between the extinction coefficient measured by the lidar and PM_{10} mass concentration measured by the particulate matter quality monitor reached 0.81, indicating that using the extinction coefficient to retrieve the PM_{10} mass concentration is feasible. The relative error between the measured value of PM_{10} mass concentration at 0.21 km from October 19 to 22 and inversion hourly average value was between 10% and 30%. Continuous change in the concentration profile of pollutants are essential for determining the location of pollution sources and emission rules and can better reflect the temporal and spatial distribution and change of aerosol levels. The excavation of foundation pits and the export of

muck are mainly concentrated in the period of 30–48 h and 54–72 h. The range of 0.09–0.24 km is the area where the PM_{10} mass concentration changes continuously. Simultaneously, owing to the influence of the southeast wind direction, particulate matter, such as aerosols generated in the construction site, will drift with the wind and spread to the construction site within 1–2 km.

Conclusions The results show that the dust and other aerosols generated during the excavation of the construction site's foundation pit are concentrated in the area of 150 m from 0.09–0.24 km. The PM_{10} mass concentration in the construction site area is significantly higher than that in the surrounding area; however, it will diffuse to the surrounding area, resulting in certain periods. The PM_{10} mass concentration in the surrounding area is higher than that in the construction site.

With the normalization of construction, the change in PM_{10} mass concentration-level profile and the time of peak appearance are inseparable from the construction schedule of the site. After stopping the construction, aerosol particles will gather in the site area without obvious wind speed. The PM_{10} mass concentration will be maintained at a high level. Thus, the discharge of pollutant particles on the construction site can be grasped and controlled in time so that the discharge of pollutant particles on the entire construction site is always in a standard and controllable state.

Key words atmospheric optics; lidar; extinction coefficient; aerosol; construction site foundation pit; mass concentration of PM_{10}

OCIS codes 010.3640; 290.2200; 010.1100