

垂直扫描激光雷达观测建筑场地无组织扬尘方法

石鹏 杜可* 穆超 汪凯 王杨

(中国科学院城市环境研究所, 福建 厦门 361021)

摘要 应用激光雷达技术探测近地面大气无组织颗粒物具有重要的理论和应用价值。将激光雷达技术应用于探测城市建筑工地扬尘,利用建筑外墙进行激光雷达信号的相对标定,然后根据激光雷达方程求解沿光学路径的扬尘颗粒物消光系数,通过程控扫描台获取多条路径上的消光系数分布,并结合质量消光效率因子得到二维质量浓度分布情况。结果表明,基于扫描平台的微脉冲雷达系统可以快速获取建筑扬尘二维分布和随时间变化情况,结合粒径谱和风速风向信息进一步得到重型车和小型施工车辆的 PM_{10} 排放因子分别为 8.99×10^3 g/km和 1.75×10^3 g/km;重型车和小型施工车辆的 $PM_{2.5}$ 排放因子分别为 4.57×10^2 g/km和 8.91×10^1 g/km。该方法为城市扬尘快速实时监测提供了一种新思路。

关键词 大气光学;扬尘质量浓度;激光雷达;扬尘消光系数

中图分类号 X831.03 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0301005

Measuremental Method of Fugitive Dust Mass Emissions from Construction Activities Using Vertical-Scanning Lidar System

Shi Peng Du Ke Mu Chao Wang Kai Wang Yang

(Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen, Fujian 361021, China)

Abstract Lidar is a powerful tool for detecting fugitive dust emissions. Here a method using vertical scanning micro pulse lidar (MPL) system to rapidly detect the two-dimensional mass distribution and the temporal variation of fugitive dust plumes in situ is described. In this method the backscattering signal from a building in the far field is used as reference to provide a closure condition to lidar equation. The dust plume's extinction coefficient profiles are determined from the raw MPL signals by inverting the lidar equation. The extinction coefficient profiles are then converted to mass concentration profiles using mass extinction efficiency factor, which is determined by Mie model and simultaneous size distribution measurements. This method quantifies the spatial and temporal variation of the dust's PM_{10} and $PM_{2.5}$ mass concentration when the dust plume passes across the laser light path. In addition, PM_{10} and $PM_{2.5}$ emission factors for heavy-duty and light-duty vehicles traveling in the construction field are determined using this method. The mean PM_{10} emission factors for the heavy-duty and light-duty vehicles are 8.99×10^3 g/km and 1.75×10^3 g/km, respectively; the mean $PM_{2.5}$ emission factors for the heavy-duty and light-duty vehicles are 4.57×10^2 g/km and 8.91×10^1 g/km, respectively. This novel method provides an in-situ rapid way to measure PM mass emissions from urban fugitive dust sources.

Key words atmospheric optics; dust aerosol mass concentration; lidar; dust extinction coefficient

OCIS codes 010.1100; 280.1100; 280.3640

1 引言

扬尘是我国城市大气颗粒物的重要来源,伴随着我国城市化进程的加快,房地产建设项目大量增加,建筑施工扬尘对城市灰霾天气及公众健康影响越来越大^[1]。施工扬尘中工程车辆移动造成的扬尘

排放是典型的无组织排放,它排放的扬尘烟羽形状和边界不规则,尺度较大,且兼有一些交通污染特征。现有的无组织扬尘监测方法(如布点监测法、示踪气体法等)所能观测的扬尘尺度和分辨率有限,并且测量结果易受湍流等因素影响^[2]。

收稿日期: 2012-10-09; **收到修改稿日期**: 2012-11-17

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-EW-408, KZCX2-YW-453)、国家人力资源和社会保障部优秀项目和福建省自然科学基金(2011J06018)资助课题。

作者简介: 石鹏(1985—),男,实习研究员,主要从事环境光电探测方面的研究。E-mail: pshi@iue.ac.cn

* **通信联系人**。E-mail: kdu@iue.ac.cn

激光雷达技术作为探测大气颗粒物的有力工具,具有探测范围大、空间和时间分辨率高、探测灵敏度和精度高等优点,在近地面颗粒物监测方面具有独特优势和重要应用^[3~7]。有学者提出应用激光雷达技术观测城市交通活动造成的无组织排放,但该方法依赖于大气水平均匀的假设^[8]。作者先前提出了一种基于光学遥感技术探测大型军事演习活动造成的沙尘无组织排放的方法^[9],该方法无需假设大气水平均匀分布,并且利用固定障碍物标定信号,但作者发现该方法忽略了不同仰角方向上相对信号的差异,并且所用设备复杂。为完善该方法,本研究构建了一套扫描激光雷达探测系统,选取烟羽后方

建筑外墙为激光雷达在不同高度角的光学路径提供反射面,从而为每条路径上求解激光雷达方程提供闭合条件,并将该方法拓展应用到探测城市建筑工地内无组织扬尘二维质量浓度分布。

2 观测扬尘二维质量浓度分布的反演算法

图1是实验原理示意图,微脉冲激光雷达(MPL)放置在扫描台上,发射激光束从望远镜射向反射板,在一个仰角位置测量完成后,扫描台带动望远镜转向下一个仰角位置测量。

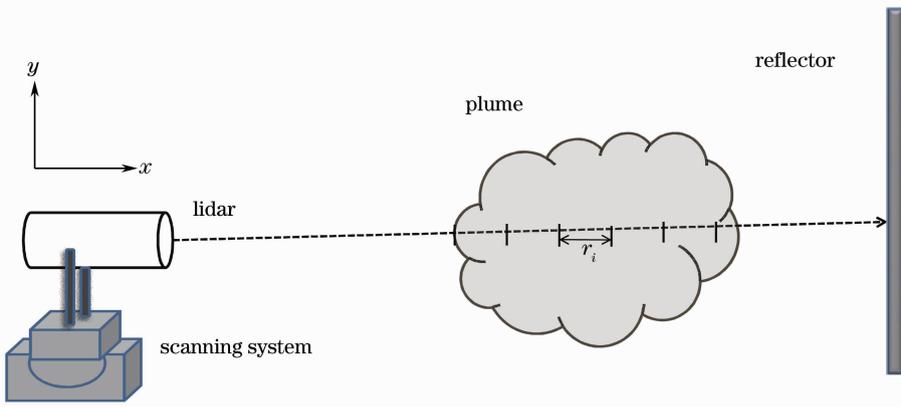


图1 探测无组织扬尘的微脉冲激光雷达系统实验原理示意图

Fig. 1 Experimental setup of the scanning MPL system to detect fugitive dust plume

根据激光雷达方程,发射的激光脉冲在大气中传播时,其削弱过程可以通过下面的方程表述^[10]:

$$p(r) = \left[\frac{O_c(r)EC\beta(r)T^2(r)}{r^2} + p_{bg}(r) + p_{ap}(r) \right] \times \frac{1}{D[p(r)]}, \quad (1)$$

式中 $p(r)$ 为雷达探测器接收到的距离望远镜激光发射口 r 处的回波信号(单位: $\text{count}/\mu\text{s}$), O_c 为几何重叠因子, C 为激光雷达系统常数, E 为发射激光脉冲能量(单位: μJ), β 为颗粒物的后向散射系数(单位: $\text{m}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$), 它是距离 r 的函数, p_{bg} 、 p_{ap} 和 $D[p(r)]$ 分别代表背景噪声(单位: $\text{count}/\mu\text{s}$)、探测器剩余脉冲(单位: $\text{count}/\mu\text{s}$) 和死区时间校正因子(无量纲); T 为距离为 r 的光程中大气的透射率, 它可表示为气溶胶消光系数沿光程 r 的积分^[10]:

$$T^2(r) = \exp \left[-2 \int_0^r \sigma(r') dr' \right], \quad (2)$$

式中 σ 为颗粒物的消光系数。激光雷达方程经过探测器延时、背景噪声、驻留脉冲、距离和几何因子校正后可以得到归一化的后向散射信号(NRB), 为

$S_{\text{NRB}}(r)$ (单位: $\text{count} \cdot \mu\text{s}^{-1} \cdot \mu\text{J}^{-1} \cdot \text{m}^2$), 它与原始信号 $p(r)$ 的关系为^[9,10]

$$S_{\text{NRB}}(r) = \left\{ \left\{ p(r) D[p(r)] \right\} - p_{bg}(r) - p_{ap}(r) \right\} \frac{r^2}{E O_c(r)}. \quad (3)$$

激光雷达方程(1)式经过(3)式处理后可以得到

$$S_{\text{NRB}}(r) = \beta(r) T^2(r) C. \quad (4)$$

引入气溶胶消光后向散射比 $S = \frac{\sigma}{\beta}$, S 与气溶胶的形状和成分以及大气环境(如湿度)有关, 其数值随高度变化而变化。但建筑扬尘主要分布于近地面, 所处大气环境相对稳定, 并且对于同一团扬尘烟羽而言, 其各处气溶胶形状和成分相对恒定, 因而对于同一团扬尘烟羽 S 可以视为常数。将 S 代入(2)式并求导可以得到

$$\beta(r) = - \frac{1}{2ST^2(r)} \frac{dT^2(r)}{dr}. \quad (5)$$

将(5)式代入(4)式, 可以得到

$$S_{\text{NRB}}(r) dr = - \frac{C}{2S} dT^2(r). \quad (6)$$

对(6)式在 $[0, r]$ 区间内积分

$$\int_0^r S_{\text{NRB}}(r^*) dr^* = -\frac{C}{2S} \int_0^r dT^2(r^*) = -\frac{C}{2S} [T^2(r) - T^2(0)] = \frac{C}{2S} [1 - T^2(r)]. \quad (7)$$

将(2)、(4)和(7)式联立即可得到颗粒物消光系数与修正后的归一化激光雷达回波信号的关系：

$$\sigma(r) = \frac{S_{\text{NRB}}(r)}{C^* - 2 \int_0^r S_{\text{NRB}}(r^*) dr^*}, \quad (8)$$

式中 $C^* \equiv C/S$ ，实验中激光雷达的距离分辨率为 5 m，所以颗粒物烟羽在激光路径上的厚度为 $5 \times N^*$ m，(2)式和(8)式可以分别近似成离散形式：

$$T = \exp\left\{-\sum_{i=1}^{N^*} [\sigma(i) \times 5]\right\}, \quad (9)$$

$$\sigma(n) = \frac{S_{\text{NRB}}(n)}{C^* - 2 \sum_{i=1}^n [S_{\text{NRB}}(i) \times 5]}, \quad (10)$$

式中 $n = 1, 2, \dots, N^*$ 。实验时采用烟羽后方的反射板作为反射目标，激光穿过烟羽后射向反射板，反射板对激光的反射系数与激光是否穿过扬尘烟羽无关。假设激光雷达与反射板的距离为 r_0 ，由于背景大

气消光可以忽略，于是当无扬尘烟羽存在时，激光雷达接收到的来自 r_0 处的原始信号 $p_{t0}(r_0)$ 与激光雷达发射能量的关系可以写为^[9]

$$p_{t0}(r_0) = \left[\frac{O_c(r_0)ER}{r_0^2} + p_{\text{bg}}(r_0) + p_{\text{ap}}(r_0) \right] \cdot \frac{1}{D[p(r_0)]}, \quad (11)$$

式中 R 代表反射板对激光的反射系数。对于同一条激光观测路径，当路径中有扬尘烟羽存在时，可以得到

$$p_t(r_0) = \left[\frac{O_c(r_0)ET^2R}{r_0^2} + p_{\text{bg}}(r_0) + p_{\text{ap}}(r_0) \right] \cdot \frac{1}{D[p(r_0)]}, \quad (12)$$

式中 $p_t(r_0)$ 代表有扬尘情况下激光雷达接收到的来自 r_0 处的原始信号。 T 为在一条激光观测路径上的扬尘的总透射率。(11)式和(12)式利用(3)式处理后可以得到：

$$\begin{cases} S_{\text{NRB}t0} = R \\ S_{\text{NRB}t} = T^2 R \end{cases} \quad (13)$$

将(10)式和(13)式联立起来可以得到如下方程组：

$$\begin{cases} \sigma(1) = \frac{S_{\text{NRB}}(1)}{C^* - 10S_{\text{NRB}}(1)} \\ \sigma(2) = \frac{S_{\text{NRB}}(2)}{C^* - 10[S_{\text{NRB}}(1) + S_{\text{NRB}}(2)]} \\ \vdots \\ \sigma(N^*) = \frac{S_{\text{NRB}}(N^*)}{C^* - 10[S_{\text{NRB}}(1) + S_{\text{NRB}}(2) + \dots + S_{\text{NRB}}(N^*)]} \\ \sqrt{\frac{S_{\text{NRB}t}}{S_{\text{NRB}t0}}} = \exp\{-[\sigma(1) + \sigma(2) + \dots + \sigma(N^*)] \times 5\} \end{cases}, \quad (14)$$

式中 $S_{\text{NRB}}(1), S_{\text{NRB}}(2) \dots$ 为对应每个距离单位的归一化的后向散射信号， $\sigma(1), \sigma(2) \dots$ 为对应位置处消光系数。解此方程组即可得到该激光路径上各位置的消光系数，其他激光路径的消光系数求解过程与之相同。各条激光路径上的消光系数分布组合插值即可得到扬尘消光二维分布情况。

通过质量消光效率因子 K^* (单位： g/m^2) 将扬尘消光系数分布转换成扬尘质量浓度分布^[9]，消光效率因子 K^* 可用下式描述：

$$K^* = \frac{C_m}{\sigma} = \frac{D_{\text{pmin}}}{D_{\text{pmax}}} \frac{2 \int_{D_{\text{pmin}}}^{D_{\text{pmax}}} \rho D_p^3 N(D_p) dD_p}{3 \int_{D_{\text{pmin}}}^{D_{\text{pmax}}} Q(\lambda, D_p, \rho) D_p^2 N(D_p) dD_p}, \quad (15)$$

式中 C_m 为颗粒物质量浓度， D_p 为颗粒物直径， ρ 为扬尘的粒子密度，这里取为 $2.5 \times 10^3 \text{ kg}/\text{m}^3$ ， λ 为雷达波长， $Q(\lambda, D_p, \rho)$ 为消光因子，其数值可由 Mie 散

射理论计算得到^[9]。

结合实验时的风速风向信息可以进一步得到建筑工地内移动源扬尘的排放因子(EF)信息,这里的排放因子是指施工车辆每行驶 1 千米所排出的 PM₁₀ 或 PM_{2.5} 的质量,EF 计算公式如下^[9,11]:

$$f_{EF} = \frac{1000}{Y} \sum_{t=0}^T \left[\sum_{y=0}^Y \sum_{z=0}^Z C_m(y, z, t) \Delta y \Delta z \right] u \cos \theta \Delta t, \quad (16)$$

式中 Y 为扬尘点在光学路径上的位置,本实验中 Δy 恒为 5 m; Z 为光学路径中扬尘所在位置高度; Δt 为烟羽持续时间; θ 为风向与观测方向夹角; u 为风速; C_m 为由微脉冲激光雷达测量和计算得到的质量浓度。

3 实验系统

实验系统由美国 SigmaSpace 公司生产的 MPL-4B-IDS 系列 MPL、Fidas 200 型粒径谱仪、气象五参数仪和自行定制的电动扫描台组成。实验中粒径谱仪用于获取扬尘颗粒物粒径分布。

MPL 具有体积小、重量轻、便于移动、模块化结构和自动化程度高的优点,且出射激光经过扩束处理,对人眼比较安全。MPL 工作波长为 532 nm,单次发射脉冲能量为 4~6 μJ ,重复频率为 2500 Hz。雷达空间分辨率为 5 m,数据记录的最小时间为 1 s。

电动扫描台由角位台和水平旋转台组成,通过软件控制可以实现全方位自动扫描,角位台上配有光栅尺,用于精确监测和校正角位台的旋转角度。MPL 放置于扫描台上,角位台和水平旋转台组合可以连续进行不同角度的斜程探测。旋转台和角位台的绝对定位精度均为 20''。

实验系统对无组织扬尘探测时需要反射板,它的作用在于提供一个稳定的、不随扬尘变化的后向漫散射信号。平坦的铁丝网或者相对均匀粗糙的建筑外墙等固定障碍物均可当作反射板^[9]。测量时,将 MPL 放置在扫描台上,激光束从望远镜射出后穿过工地射向对面的建筑外墙;扫描台按照设定的几个仰角角度从 0° 开始,依次扫描,每个角度方向雷达最小测量时间为 1 s,雷达在最高仰角处扫描探测完成后返回 0° 原位开始下一轮扫描。通过反射板进行相对标定可以避免因为假设大气均匀或假定某个高度存在洁净大气带来的误差^[8]。

4 测量结果与讨论

实验地点选择在福建厦门市某建筑工地内,实验系统放置于车内,利用该实验系统对工地内施工和物料运输等车辆移动造成的扬尘排放进行了连续监测。

4.1 标定信号特征

图 2 是在 2011 年 11 月 25 日上午 MPL 探测的 NRB 信号,望远镜到建筑墙壁之间的距离为 765 m, MPL 激光束处于相对下风向,且与风向成一定夹角,工程车辆移动产生的扬尘气溶胶被风带入雷达观测区域内。图 2(a)中的尖峰是在无扬尘时, MPL 测量得到的来自建筑外墙的散射信号,这一信号在图 2(b)、图 2(c)和图 2(d)中一直存在,如图 2 中虚框中所示。在有扬尘穿过 MPL 激光束时,扬尘后向散射信号连续被 MPL 捕获,图 2(b)、图 2(c)和图 2(d)是在连续测量中的不同时刻的后向散射信号,小于 765 m 位置处的尖峰反映了扬尘消光特征,其信号强度远大于环境大气消光和太阳光的干扰,并且随着时间的推移,扬尘位置和强度也在移动变化。

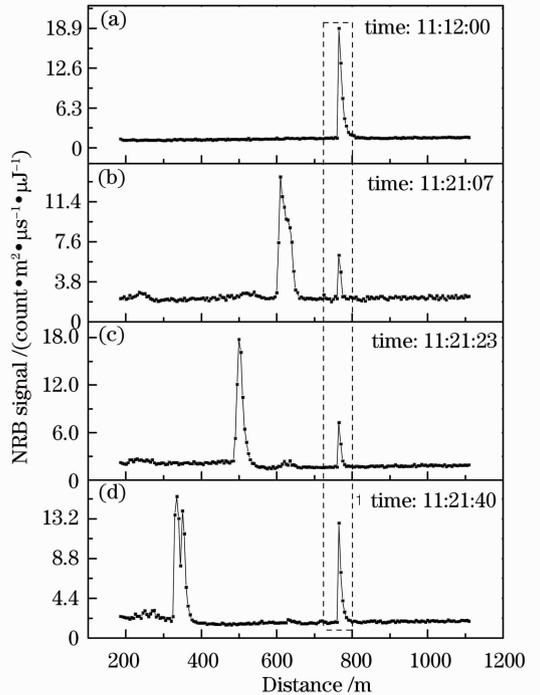


图 2 工地内(a)无扬尘时和(b)、(c)、(d)有扬尘时探测建筑扬尘及其参考目标物的 NRB 信号

Fig. 2 NRB signals from a dust plume and the reference target at an urban construction site when dust doesn't exist (a) and exists (b), (c) and (d)

4.2 MPL 扫描探测

雷达二维扫描仰角分别设为 0° 、 0.5° 、 1.5° 和 2.5° ，雷达在各个角度探测时间为 1 s，从 0° 开始依次探测，直至最大仰角方向探测完成，这个过程视为一个探测循环。4 个扫描方向构成一个竖直的探测平面。前一个循环完成后雷达望远镜回转至 0° 开始下一个循环。实验过程中，在无扬尘时，MPL 进行一次扫描测量，以得到各个仰角方向上来自反射板的信号。当车辆沿着工地道路在上风向前行时，车辆不断带起扬尘，这些扬尘受风力推动吹向探测平面，扬尘中较大颗粒物迅速沉降，较小颗粒物漂移穿过竖直平面时被 MPL 探测到，又被风吹离探测区域。针对建筑工地内施工车辆交通排放的 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ ，在厦门某房地产建设工地内开展了 7 次现场实验，获取了 10 个较为完整的扬尘排放事件数据集。

激光雷达测量得到的原始信号经由(3)式归一化处理，代入方程组(14)式求解，得到消光系数后再根据(15)式中的消光效率因子可以计算得到扬尘质量浓度。测量发现在有扬尘烟羽和无扬尘烟羽情况下同一位置处的后向散射信号相差很大，并且绝大部分扬尘烟羽消光强度远远大于环境大气。经过比较发现，选择相差 5 倍及以上的 NRB 信号进行反演可以抓住绝大部分扬尘烟羽质量，能够识别和获取扬尘的主要特征，并有效排除环境大气影响；同时也有利于非线性方程组(14)式的反演，因为待求解量越多，得到一组稳定且有物理意义的解越困难。

图 3 和图 4 是在 2011 年 11 月 29 日对一次扬尘事件的 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 扫描探测典型结果随时间的变化，图 3 和图 4 中每一条虚线方向代表一个扫描角度，灰度深浅代表了扬尘质量浓度高低，如图 3 和图 4 下方的灰度条所示，扬尘浓度单位为克每立方米。

图 3 和图 4 直观地反映了无组织扬尘漂移进入测量光路，同时扩散的情况。并且可以看到工地内交通排放的无组织扬尘在竖直方向上的二维分布无确定规律。

在建筑工地内，对于重型车(载重量:3~10 t)，实验采用 MPL 测量得到的 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的峰值浓度分别为 $7.10 \times 10^{-1} \text{ g/m}^3$ 和 $3.61 \times 10^{-2} \text{ g/m}^3$ ；对于轻型车(载重量:1~2 t)， PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的峰值浓度分别为 $6.92 \times 10^{-1} \text{ g/m}^3$ 和 $3.51 \times 10^{-2} \text{ g/m}^3$ 。

4.3 移动源扬尘排放因子

以 MPL 的浓度测量结果为基础，结合风速风向信息，可以进一步得到无组织扬尘排放因子，如表 1 所示。其中风速风向由位于实验现场的小型气象五

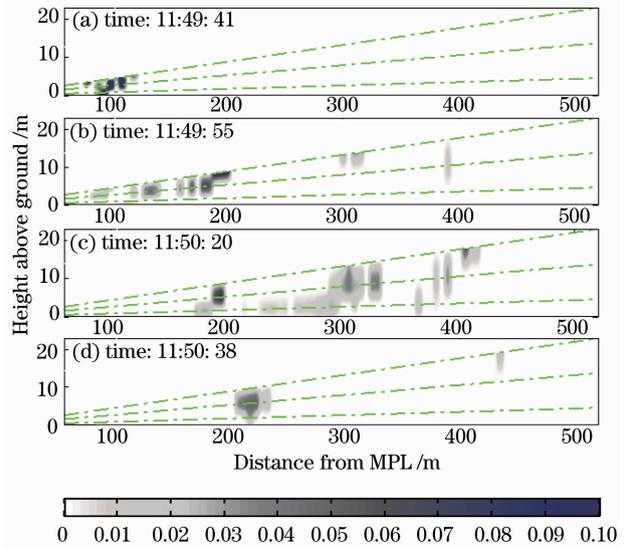


图 3 不同时刻施工车辆穿过工地所排放的 PM_{10} 烟羽二维质量浓度分布

Fig. 3 Evolution of a plume of PM_{10} emitted by the vehicle traveling in the construction field at different times

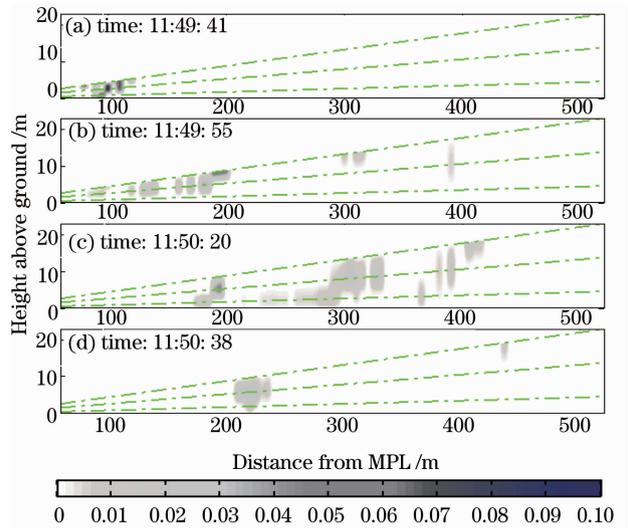


图 4 施工车辆穿过工地所排放的 $PM_{2.5}$ 烟羽二维质量浓度分布

Fig. 4 Evolution of a plume of $PM_{2.5}$ emitted by the vehicle traveling in the construction field

参数仪测量得到。

可以看出，载重量对扬尘排放因子有很大的影响，大型施工车辆 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 排放因子远大于轻型车。

此外，为衡量车速对扬尘排放因子的影响，针对同一种车，测量了在不同车速情况扬尘 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 排放情况。测量结果如表 2 所示。

表 1 重型车和轻型车排放因子

Table 1 Emission factors of heavy vehicles and light vehicles

	Number	PM ₁₀		PM _{2.5}	
		Mean value / (10 ³ g/km)	Standard deviation / (10 ² g/km)	Mean value / (10 ¹ g/km)	Standard deviation / (10 ¹ g/km)
Heavy vehicle	8	8.99	44.70	45.70	22.80
light vehicle	9	1.75	9.83	8.91	5.00

表 2 不同车速下的排放因子

Table 2 Emission factors for a vehicle traveling at different speeds

Speed / (km/h)	Emission factor of PM ₁₀		Emission factor of PM _{2.5}	
	Mean value / (10 ³ g/km)	Standard deviation / (10 ² g/km)	Mean value / (10 ¹ g/km)	Standard deviation / (10 ¹ g/km)
20	2.56	7.62	9.15	3.88
25	3.54	8.41	13.80	4.28
30	1.38	7.42	6.87	4.25

由表 2 可以看出,不同车速情况下扬尘排放因子有所差异,但变化不明显,依据现场情况和经验,本操作单元扬尘排放主要受路基表面粉土含量和运输车辆载重的影响,表面粉土含量越多、车辆载重越大,则产生扬尘越严重。在施工便道和已筑路基上行驶的车辆,受路面坑洼不平的影响以及新筑路基本身强度和平整度的要求,行驶速度通常较慢,此时车辆速度对于扬尘排放影响较小。

5 结 论

将 MPL 技术应用于探测工地内交通扬尘消光特征,利用建筑外墙提供标定信号,通过 MPL 连续扫描测量无组织扬尘的二维消光系数分布,结合粒径谱仪和气象五参数仪得到了扬尘的质量浓度分布和排放因子信息。结果显示,采用 MPL 技术可以快速获得扬尘二维分布和随时间变化情况;结合颗粒物粒径谱和风速风向信息可以进一步得到扬尘排放因子。载重量对工地内移动源扬尘排放因子影响很大,大型施工车辆 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 排放因子是轻型车的 5 倍多。本文的实验系统采用建筑外墙进行定标,所需距离较短,更适宜于高楼林立、缺乏开阔地带的城市环境。实验为建筑工地内无组织扬尘快速监测技术提供了一个新思路,所获得的排放因子信息可以为评估城市扬尘污染和制定排放源清单提供重要数据支持。

对于野外实际的无组织排放过程,目前尚缺乏其他观测数据或手段可以直接对比验证。在下一步工作中,将通过在烟雾模拟舱中设法控制或实时测量舱

内气溶胶浓度与分布,然后比较雷达测量与其他仪器测量结果来进一步研究这种方法的不确定度。

参 考 文 献

- 1 Pusheng Zhao, Yinchang Feng, Tan Zhu *et al.*. Characterizations of resuspended dust in six cities of North China [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(30): 1352~2310
- 2 J. A. Gillies, H. Kuhns, J. P. Engelbrecht *et al.*. Particulate emissions from US department of defense artillery back blast testing [J]. *J. Air & Waste Management Association*, 2007, **57**(5): 551~560
- 3 Bo Guangyu, Liu Dong, Wang Bangxin *et al.*. Two-wavelength polarization airborne lidar for observation of aerosol and cloud [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(10): 209~214
伯广宇, 刘东, 王邦新等. 探测云和气溶胶的机载双波长偏振激光雷达 [J]. *中国激光*, 2012, **39**(10): 209~214
- 4 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): 212~216
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): 212~216
- 5 Chen Tao, Zhao Yujie, Liu Dong *et al.*. Inversion of micro-pulse lidar concentration profiles with a new calibration method [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(5): 227~231
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): 227~231
- 6 Cheng Xuewu, Yang Guotao, Yang Yong *et al.*. Na layer and K layer simultaneous observation by lidar [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(2): 239~243
程学武, 杨国韬, 杨勇等. 高空钠层、钾层同时探测的激光雷达 [J]. *中国激光*, 2011, **38**(2): 239~243
- 7 Yu Haili, Hu Shunxing, Wu Xiaoqing *et al.*. Measurement of CO₂ concentration profiles of lower-troposphere with Raman lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(8): 0801003
于海利, 胡顺星, 吴晓庆等. 拉曼激光雷达探测低对流层大气二氧化碳分布 [J]. *光学学报*, 2012, **32**(8): 0801003
- 8 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
- 9 K. Du, M. J. Rood, E. J. Welton *et al.*. Optical remote sensing to quantify fugitive particulate mass emissions from stationary short-term and mobile continuous sources: part I. method and examples[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(2): 658~665
- 10 Xue Guogang, Sun Dongsong, Yan Changchun *et al.*. A compact aerosol lidar and its signal calibration[J]. *Laser & Infrared*, 2005, **35**(3): 151~153
- 薛国刚, 孙东松, 闫长春 等. 小型气溶胶激光雷达及其信号校准[J]. 激光与红外, 2005, **35**(3): 151~153
- 11 K. Du, W. K. Yuen, W. Wang *et al.*. Optical remote sensing to quantify fugitive particulate mass emissions from stationary short-term and mobile continuous sources: part II. field applications [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(2): 666~672

栏目编辑：王晓琰