

# 激光雷达对大气颗粒物溯源方式的对比分析

夏文祥<sup>1</sup>, 陈凤松<sup>1\*</sup>, 聂常金<sup>2</sup>

<sup>1</sup>云南省生态环境厅驻文山州生态环境监测站, 云南 文山

<sup>2</sup>文山州辐射环境污染防治中心, 云南 文山

收稿日期: 2025年3月29日; 录用日期: 2025年4月30日; 发布日期: 2025年5月14日

## 摘要

本文利用激光雷达的水平、垂直扫描方式, 分别对砚山工业园区进行一个月的颗粒物溯源监测, 根据不同扫描方式的监测数据, 探讨了两种扫描方式在监测范围、空间范围、数据和时间连续性、溯源效果等方面的差异。研究发现, 水平扫描在近地面污染物分布监测方面具有优势, 而垂直扫描则更适用于大气垂直结构研究。基于两种扫描方式的特点, 提出了融合应用方案, 为提高大气环境监测的全面性和准确性提供了新的思路。

## 关键词

激光雷达, 水平扫描, 垂直扫描, 对比

# Comparative Analysis of Laser Radar for Tracing Atmospheric Particulate Matter

Wenxiang Xia<sup>1</sup>, Fengsong Chen<sup>1\*</sup>, Changjin Nie<sup>2</sup>

<sup>1</sup>The Ecological and Environmental Monitoring Station of DEEY in Wenshan, Wenshan Yunnan

<sup>2</sup>The Radiation Environmental Pollution Prevention and Control Center of Wenshan State, Wenshan Yunnan

Received: Mar. 29<sup>th</sup>, 2025; accepted: Apr. 30<sup>th</sup>, 2025; published: May 14<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

This article uses the horizontal and vertical scanning methods of LiDAR to conduct a one month particle traceability monitoring of Yanshan Industrial Park. Based on the monitoring data of different scanning methods, the differences between the two scanning methods in monitoring range, spatial range, data and time continuity, traceability effect, etc. are explored. Research has found that horizontal scanning has advantages in monitoring the distribution of pollutants near the ground,

\*通讯作者。

文章引用: 夏文祥, 陈凤松, 聂常金. 激光雷达对大气颗粒物溯源方式的对比分析[J]. 环境保护前沿, 2025, 15(5): 718-726. DOI: 10.12677/aep.2025.155081

while vertical scanning is more suitable for studying the vertical structure of the atmosphere. Based on the characteristics of two scanning methods, a fusion application scheme is proposed, providing new ideas for improving the comprehensiveness and accuracy of atmospheric environment monitoring.

## Keywords

LiDAR, Horizontal Scanning, Vertical Scanning, Compare

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

大气环境污染问题随着城市化进程的加快和工业活动的增多而日益严重, 严重威胁着生态环境, 严重威胁着人类的身体健康。制定有效的污染防治措施, 对大气污染物分布和变化趋势的准确监测评估至关重要。在大气环境监测领域, 作为先进的光学遥感技术, 激光雷达的作用越来越大[1]。激光雷达可以实现对大气污染物的高精度、高时空分辨率监测, 发射激光束, 接收大气中颗粒物或气体分子散射的回波信号。激光雷达按照不同的扫描方式, 主要分为两种: 水平扫描和垂直扫描。水平扫描主要是对近地面的大气污染物水平分布情况进行监测, 而垂直扫描则以大气污染物垂直结构的研究为主。这项研究的目的是对两种扫描方式的特性和适用性进行比较分析, 为大气环境监测方案的优化提供科学的基础。近年来, 随着定量反演方法与多波长技术突破[2]、高光谱与机器学习驱动的技术革新[3]、国际研究计划与组网观测应用[4], 都显示了激光雷达在环境污染物监测溯源中有着广泛应用, 特别是针对颗粒物监测, 欧盟 ACTRIS 项目组(2021)通过多站点激光雷达组网观测, 结合气溶胶消光系数与退偏振比参数, 首次实现了跨国界大气污染传输的三维动态追踪, 为区域污染联防联控提供了技术支撑。尽管技术进展显著, 激光雷达仍面临设备成本高、复杂气象条件下信号衰减等挑战。例如, Smith 等(2022)指出, 移动激光雷达与物联网(IoT)网络的结合虽提升了监测灵活性, 但多源数据融合算法仍需优化。中外研究对比显示, 欧洲在激光雷达组网标准化(如 ACTRIS 网络)与数据共享机制上较为成熟, 而中国学者在算法创新(如偏振融合技术)与区域性污染监测方面贡献突出[2]。

## 2. 激光雷达监测技术概述

激光雷达监测技术的基本原理是利用激光与大气中颗粒物或气体分子的相互作用, 通过分析后向散射信号来反演大气参数。激光雷达系统主要由激光发射单元、光学接收单元、信号探测与处理单元以及数据采集与分析单元组成。激光雷达具有高时空分辨率、大探测范围和非接触式测量等优点, 已成为大气环境监测的重要手段[5]。

在大气环境监测中, 激光雷达技术主要应用于气溶胶、云、边界层结构、大气成分(如臭氧、二氧化硫等)的探测。通过长期连续观测, 可以获取大气污染物的时空分布特征、输送规律和来源解析等信息, 为环境管理和决策提供科学依据。

通过水平旋转发射激光束, 水平扫描激光雷达可以获得水平分布在近地面上的大气污染物信息。这种适用于城市尺度大气污染物扩散和输送研究的扫描方式, 水平分辨率高, 覆盖范围广。但垂直方向水平扫描分辨率比较低, 大气污染物垂直分布特点很难得到准确反映。

垂直扫描式激光雷达主要获取大气污染物垂直分布信息，通过垂直方向发射激光束。对于大气边界层结构、污染物垂直输送扩散过程的研究，这种扫描方式能够提供高精度的垂直剖面数据。而垂直扫描水平覆盖有限，大气污染物大范围分布难以得到全面体现[6]。

在数据精度方面，两种扫描方式都受到大气条件、仪器性能和反演算法等因素的影响。水平扫描在近地面监测中通常能获得较高的数据精度，而垂直扫描在中高层大气的监测精度相对较高。时间连续性方面，两种扫描方式都能实现长期连续观测，但垂直扫描在捕捉大气污染物垂直变化的快速过程方面更具优势[7]。

### 3. 两种扫描方式的应用案例

#### 3.1. 研究路线

分别使用光博量子 GBQL-01 型大气气溶胶激光雷达的水平、垂直扫描方式，持续一个月对砚山县工业园区的颗粒物进行扫描监测，根据扫描监测结果进行比对分析。

#### 3.2. 激光雷达水平扫描结果

使用 3.1 中的激光雷达在 2024 年 12 月对砚山县工业园进行水平扫描监测，发现的部分热点如图 1。把所有热点进行汇总得到汇总图，如图 2。根据整个砚山县工业园区 12 月份的污染热点出现次数，列表统计如表 1。

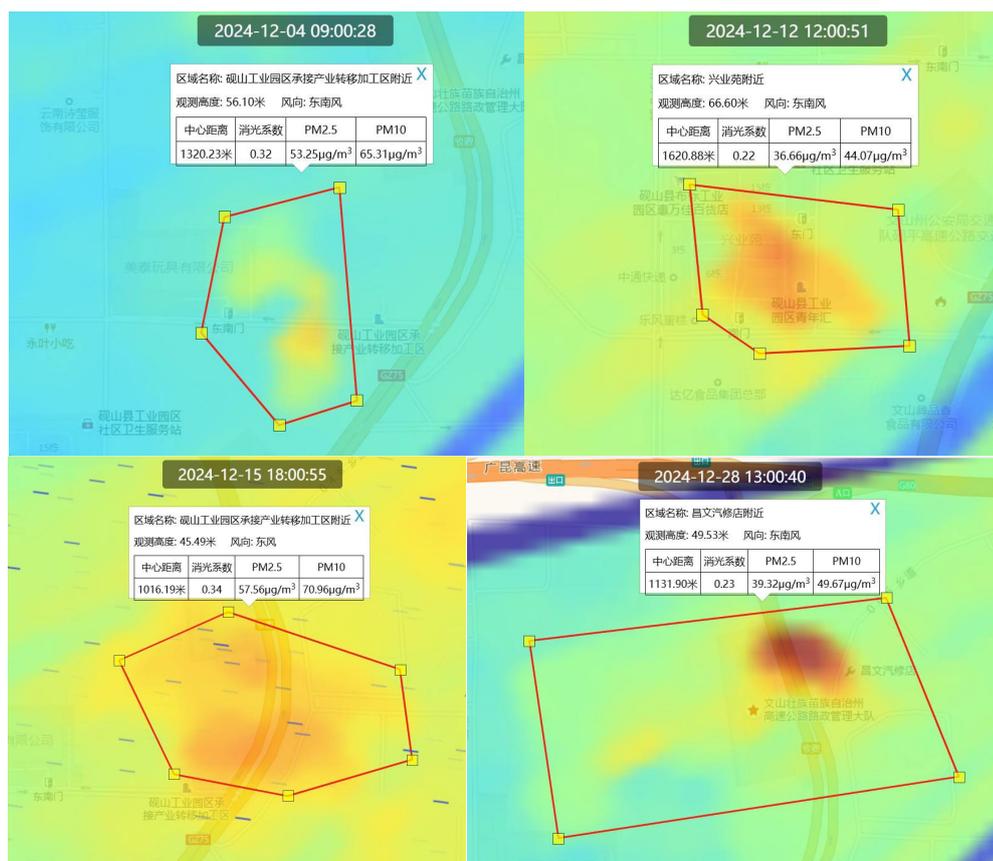
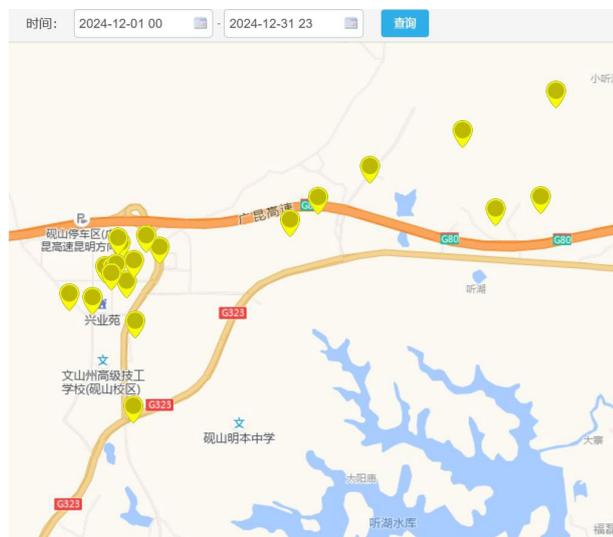


Figure 1. Lidar scanning partial heatmap  
图 1. 激光雷达扫描部分热图



**Figure 2.** Lidar horizontal scanning hotspot statistical chart  
**图 2.** 激光雷达水平扫描热点统计图

**Table 1.** Table of the frequency of pollution hotspots in Yanshan County industrial park in December  
**表 1.** 砚山县工业园区 12 月份的污染热点出现次数表

序号	热点名称	发现频次	污染时间(年-月-日 时)
1	砚山工业园区承接产业转移加工区附近	5	2024-12-04 09、2024-12-15 18、2024-12-20 07、 2024-12-22 13、2024-12-26 11
2	兴业苑附近	4	2024-12-03 15、2024-12-12 12、2024-12-23 11、 2024-12-27 07
3	美泰玩具有限公司附近	4	2024-12-05 07、2024-12-09 16、2024-12-17 10、 2024-12-21 16
4	砚山北收费站附近	2	2024-12-15 10、2024-12-25 08
5	砚山县工业园区社区卫生服务站附近	2	2024-12-03 18、2024-12-19 11
6	云南凯隆新材料有限公司附近	1	2024-12-03 14
7	云南滨运物流港附近	1	2024-12-29 15
8	云南诗莹服饰有限公司附近	1	2024-12-23 10
9	兴业苑东侧 100 米附近	1	2024-12-01 13
10	布标小学东南侧 500 米附近	1	2024-12-05 15
11	广昆高速和 Y054 乡道交口附近	1	2024-12-10 16
12	康传利粮油果蔬店向南 600 米附近	1	2024-12-02 19
13	康传利粮油果蔬店附近	1	2024-12-23 14
14	文山州公安局交通警察支队研平高速公路交巡警大队附近	1	2024-12-26 18
15	昌文汽修店附近	1	2024-12-28 13
16	晨光幼儿园南侧 100 米附近	1	2024-12-05 17
17	柏布榔东侧 100 米附近	1	2024-12-15 17
18	永忠附近	1	2024-12-25 09
19	达亿食品集团总部西侧 100 米附近	1	2024-12-18 15
20	达亿食品集团总部附近	1	2024-12-11 07

### 3.3. 雷达垂直监测结果

使用 3.1 中的激光雷达在 2024 年 12 月对砚山县工业园进行垂直扫描监测，根据每一周扫描的结果

绘制成趋势图，第一周垂直扫描叠加颗粒物变化曲线如图 3，第二周垂直扫描叠加颗粒物变化曲线图 4，第三周垂直扫描叠加颗粒物变化曲线图 5，第四周垂直扫描叠加颗粒物变化曲线图 6。

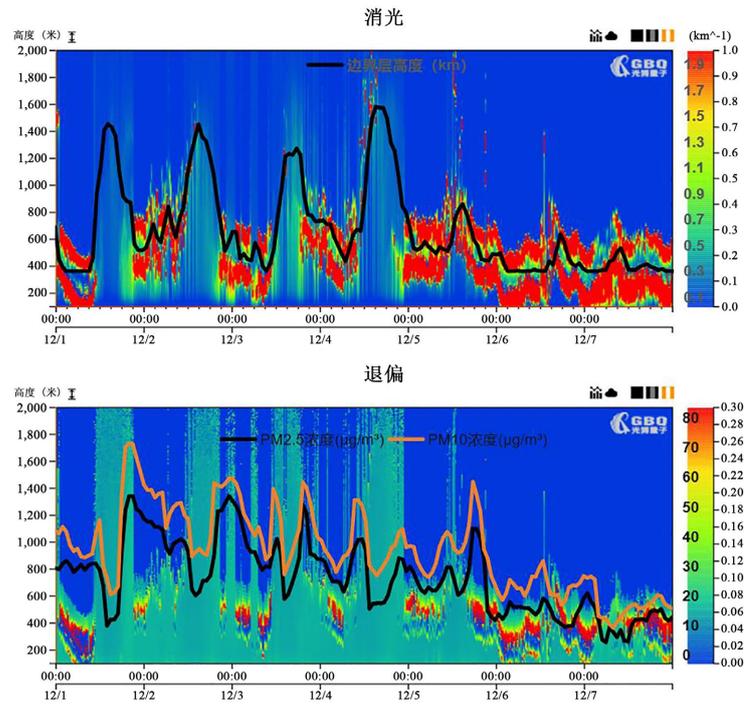


Figure 3. First week change curve  
图 3. 第一周变化曲线

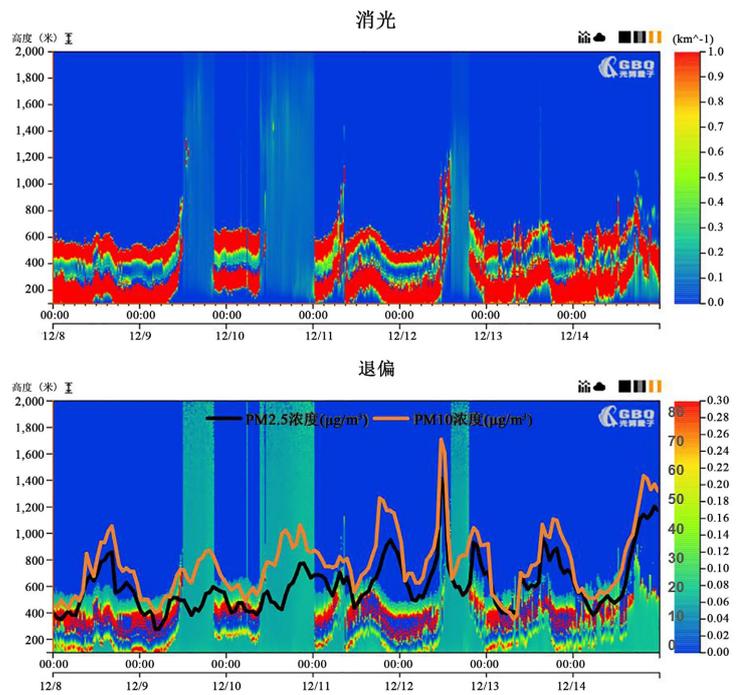


Figure 4. Second week change curve  
图 4. 第二周变化曲线

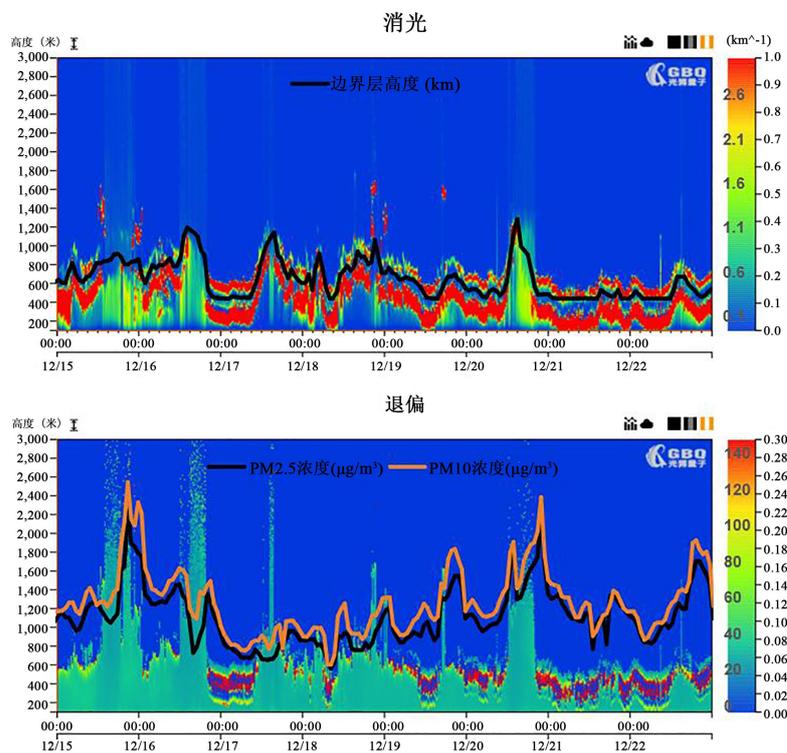


Figure 5. Third week change curve  
图 5. 第三周变化曲线

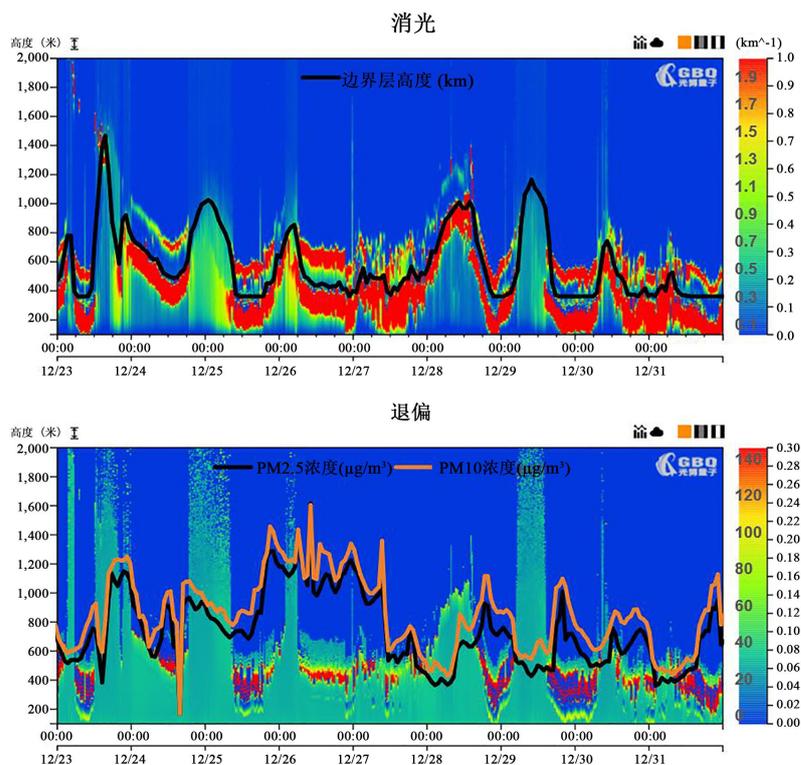


Figure 6. Fourth week change curve  
图 6. 第四周变化曲线

## 4. 分析与讨论

### 4.1. 激光雷达水平扫描结果分析

从污染热点出现的集中区域统计结果来看, 雷达水平扫描共发现 20 处污染热点, 累计出现 32 次污染。由表 1 可知, 在砚山工业园区承接产业转移加工区附近出现 5 次热点、兴业苑附近出现 4 次热点、美泰玩具有限公司附近出现 4 次热点、砚山北收费站附近出现 2 次热点、砚山县工业园区社区卫生服务站附近出现 2 次热点, 以上 5 个区域出现频次相对较多。建议重点关注此区域的污染排放情况, 并及时管控。

### 4.2. 激光雷达垂直扫描结果分析

#### 4.2.1. 第一周污染情况分析

12 月 1 日, 0 时~12 时, 边界层高度下降至 0.4 km 高度, 大气环境容量小, 颗粒物浓度维持在相对高值, 13 时~17 时, 边界层高度上升至 1.4 km 高度, 颗粒物浓度迅速降低, 18 时后, 0.2 km~0.8 km 高度存在污染传输, 颗粒物浓度迅速升高。

2 日凌晨污染传输结束, 边界层高度下降至 0.6 km 高度, 大气扩散条件差, 颗粒物浓度缓慢降低, 20 时后 0.2 km~0.8 km 高度发现短暂污染传输, 颗粒物浓度快速上升。

3 日凌晨污染传输结束, 但边界层高度下降至 0.5 km 高度, 0.3 km~0.6 km 高度虽存在高空降雨, 但未降至地面, 近地面颗粒物浓度缓慢下降, 13 时后边界层高度上升至 1.2 km 高度, 颗粒物浓度迅速降低, 15 时后边界层高度降低至 0.8 km 高度, 受本地源累积影响, 颗粒物浓度逐渐升高。

4 日凌晨出现短时降雨, 受雨水冲刷影响, 颗粒物浓度迅速降低, 降雨结束后, 相对湿度较大, 吸湿增长影响, 颗粒物浓度迅速升高, 12 时~19 时, 边界层高度上升至 1.4 km 高度, 颗粒物浓度迅速降低, 晚间时段, 边界层高度逐渐下降至 0.6 km 高度, 颗粒物浓度缓慢升高。

5 日 0.3 km~0.6 km 高度出现 2 次高空降雨过程, 是导致颗粒物浓度反复波动的主要原因。

6 日~7 日出现降雨过程, 受降雨冲刷作用, 颗粒物浓度维持在较低水平。

#### 4.2.2. 第二周污染情况分析

8 日~9 日出现间歇性降雨天气, 9 日日间降雨结束后, 相对湿度较大, 十分有利于颗粒物吸湿性增长和气态污染物二次转化, 颗粒物逐渐升高。

10 日~11 日晚间~次日早间受低风高湿不利气象条件影响, 颗粒物浓度迅速升高并维持在较高水平, 日间扩散条件改善, 颗粒物浓度逐渐降低。

12 日凌晨受降雨前相对湿度较大, 吸湿增长影响, 颗粒物浓度迅速升高, 3 时~6 时发生短暂降雨, 受降雨冲刷作用, 颗粒物浓度迅速降低。

13 日~14 日凌晨时分均发生短暂降雨过程, 降雨后由于边界层高度较低, 污染快速堆积, 从退偏图谱分析, 首要污染物为  $PM_{2.5}$ 。

#### 4.2.3. 第三周污染情况分析

15 日~16 日, 0.2 km~0.6 km 高度存在污染气团, 是导致砚山县颗粒物浓度升高的主要原因, 15 日 17 时~16 日 1 时, 高空污染气团发生沉降, 颗粒物浓度达到“轻度”污染水平, 16 日晚间至 17 日凌晨, 发生短暂降雨, 受雨水冲刷作用, 颗粒物浓度快速下降。

17 日~18 日, 颗粒物浓度维持在相对低值, 受本地源累积影响颗粒物浓度缓慢升高。

19 日, 16 时 0.2 km~0.8 km 高度存在污染气团, 受污染传输影响颗粒物浓度迅速升高, 22 时后 0.5

km 高空出现降雨，颗粒物浓度降低。

20 日，12 时起 0.2 km~1.2 km 存在污染传输，受污染传输影响，颗粒物浓度迅速上升，于 21 时达到“轻度”污染水平，22 时后发生降雨，颗粒物浓度迅速下降。

21 日和 22 日发生频繁降雨，颗粒物浓度维持在较低水平，22 日 12 时后，受本地源累积影响，颗粒物浓度逐渐上升，于 18 时达到“轻度”污染水平，19 时后，受降雨影响，颗粒物浓度快速下降。

#### 4.2.4. 第四周污染情况分析

23 日 0 时~7 时，边界层高度抬升至 0.8 km 高度，大气环境容量增大，颗粒物浓度缓慢下降，8 时~13 时，边界层高度下降至 0.4 km 高度，受本地源累积影响，颗粒物浓度缓慢上升，17 时后 0.2 km~0.8 km 高度存在污染传输，颗粒物浓度快速上升，于 22 时达到“轻度”污染水平。

24 日凌晨，污染传输结束，颗粒物浓度逐渐下降，日间时段，边界层高度下降 0.5 km 高度，大气扩散条件差，受本地源累积影响，颗粒物浓度逐渐上升且维持较高浓度水平，晚间时段，边界层抬升，颗粒物浓度缓慢下降。

25 日日间时段，颗粒物浓度维持较低水平，18 时后，0.2 km~1 km 高度发现污染传输，颗粒物浓度快速上升，0.2 km~0.6 km 高度存在高空降雨，但未降至地面，颗粒物浓度始终保持“轻度”污染水平。

26 日受静稳高湿不利气象条件影响，叠加云层较低，垂直扩散条件较差，颗粒物浓度维持在较高水平。

27 日凌晨至 7 时，边界层高度缓慢抬升，颗粒物浓度缓慢下降，10 时后发生短暂降雨，受降雨影响，颗粒物浓度快速下降至较低水平。

28 日凌晨时段，边界层抬升至 1 km 高度，大气扩散条件改善，颗粒物浓度始终保持较低水平，8 时后受本地源累积影响，颗粒物浓度缓慢上升。

29 日凌晨至 16 时，边界层高度逐渐抬高至 1.2 km 高度，大气扩散条件较好，颗粒物浓度逐渐降低，17 时~19 时，0.2 km~1.1 km 高度存在短暂污染传输，受该影响，颗粒物浓度迅速升高，20 时后，污染传输结束，颗粒物浓度迅速下降。

30 日和 31 日，砚山县虽出现多次短暂降雨，但边界层高度低，大气扩散条件差是颗粒物浓度反复升高的主要原因。

#### 4.2.5. 边界层高度与污染物累积的时空耦合机制

12 月 1 日案例：当边界层高度(PBLH)从 0.4 km 升至 1.4 km 时，颗粒物浓度下降速率较大，符合 PBLH 与污染物浓度的指数衰减关系[8]。值得注意的是，18 时后污染传输(0.2~0.8 km 高度)导致颗粒物浓度反弹，表明垂直扩散效率受高空污染气团入侵的显著干扰。

通过全月数据统计发现， $PBLH < 0.8$  km 时，颗粒物浓度与 PBLH 的负相关性增强。

#### 4.2.6. 降水清除效率的差异化表现分析

发生短时强降水，颗粒物浓度下降较快，高空降雨未达地面的情况颗粒物仅下降较慢，因雨滴蒸发导致近地面湿度上升，反而促进吸湿率增长。

当降雨持续时间较短及降雨强度较小时，颗粒物反弹概率较高(如 9 日、13 日案例)。

### 4.3. 对比分析

水平扫描在近地面颗粒物分布监测方面具有优势，它能快速获取区域颗粒物的分布情况，有助于发现热点区域及出现频次，相关操作软件结合人工智能图谱分类与图像语义分割算法，自动识别提取扫描图谱中的颗粒物污染热点信息，使得大气中的颗粒物污染物的水平传输、扩散规律以及区域颗粒物分布

特征能够在地图上直观地显示出来, 利于颗粒物污染的直观溯源分析, 为环境管理部门精准溯源及执法提供可靠参考[9]。

而垂直扫描则更适用于大气垂直结构研究, 其能精确获取大气颗粒物在垂直方向上的分布信息, 包括不同高度层的颗粒物浓度、消光系数、退偏振比等参数, 其更适用于空间环境质量的评价与预测。

基于两种扫描方式的特点, 在实际应用中, 应融合水平扫描与垂直探测模式, 融合方式可分为两种。一种是时间交替方式: 按照一定的时间间隔, 交替进行水平扫描和垂直探测。第二种是空间协同方式: 在特定的空间区域内, 同时运用水平扫描和垂直探测。

水平扫描可快速掌握大面积区域内气溶胶的水平分布, 确定污染热点区域及污染物的传输方向和范围; 垂直探测能精确获取不同高度层的气溶胶信息, 了解其垂直分布结构、边界层高度等, 二者结合可全方位掌握大气颗粒物的时空分布特征。再有, 通过水平扫描追踪污染源的扩散路径, 结合垂直探测了解污染物在不同高度的传输情况, 有助于更准确地确定污染源的位置、类型以及传播机制, 为大气污染的溯源和成因分析提供更有力的数据支持。

## 5. 结论与展望

通过对大气环境中污染物监测中水平扫描和垂直扫描激光雷达的应用进行对比分析, 得出如下结论: 水平扫描在近地面污染物水平分布监测方面具有优势, 而垂直扫描在大气垂直结构的研究、边界层高度与污染物累积的时空耦合机制、降水清除效率的差异化表现方面表现出色, 目前国内已有较多的研究成果可供借鉴。两种扫描方式各有特色, 互为补充。基于此, 在实际应用中, 我们提出了将水平扫描和垂直探测模式相融合, 即时间交替方式和空间协同方式的融合, 为环境管理部门优化大气环境监测方案及提高监测的全面性和准确性, 提供良好的技术支撑。

## 参考文献

- [1] 钟梅珍. 激光雷达技术在大气颗粒物监测中的应用与发展研究[J]. 皮革制作与环保科技, 2024, 5(24): 39-41.
- [2] 鲁华章, 汤京生, 汤伟杰. 激光雷达在大气和海洋污染探测中的应用及其发展趋势初探[J]. 工程地球物理学报, 2007(6): 554-559.
- [3] 陈炳龙, 查晨星, 卞月根, 等. 基于陆地生态系统碳监测卫星的气溶胶光学参数反演与验证研究[J]. 激光与光电子学进展, 2025, 62(5): 55-63.
- [4] 万学平, 季群, 华天星, 等. 江苏省颗粒物激光雷达组网在一次复合过程中的应用分析[J]. 环境监控与预警, 2023, 15(5): 30-35.
- [5] 施奇兵. 激光雷达大气污染探测信号解析与热点提取方法[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 江西财经大学, 2022.
- [6] 赵宝义, 庄鹏, 康宝荣, 等. 大气臭氧探测激光雷达研制及其案例分析[J]. 科技创新与应用, 2024, 14(32): 27-30.
- [7] 陆大春, 王耀东, 徐艳丽, 等. 基于激光雷达及图像分析方法的污染源自动识别技术及应用[J]. 中国激光, 2025, 52(1): 204-212.
- [8] Su, T., Li, Z. and Kahn, R. (2018) Relationships between the Planetary Boundary Layer Height and Surface Pollutants Derived from Lidar Observations over China: Regional Pattern and Influencing Factors. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **18**, 15921-15935. <https://doi.org/10.5194/acp-18-15921-2018>
- [9] 高静. 基于激光雷达的颗粒物“地空一体化”监测[J]. 现代信息科技, 2023, 7(18): 167-170, 175.