

# 空气质量数值预报同化激光雷达资料技术指南（试行）

## 一、编制目的

为推动全国环境空气质量数值预报同化激光雷达资料应用，规范和指导空气质量数值预报同化所需的激光雷达数据的信息采集、存储、加工、传输和应用，规范环境空气质量数值预报同化使用的激光雷达产品的内容和格式，制定本指南。

本指南由中国环境监测总站组织制定，主要起草单位为武汉大学。

## 二、环境监测激光雷达

环境监测激光雷达是主动遥感探测大气环境设备。工作原理为：激光器发射激光脉冲，激光脉冲与大气成分发生作用，产生后向散射回波，接收并反演回波信号，得到大气环境相关信息。

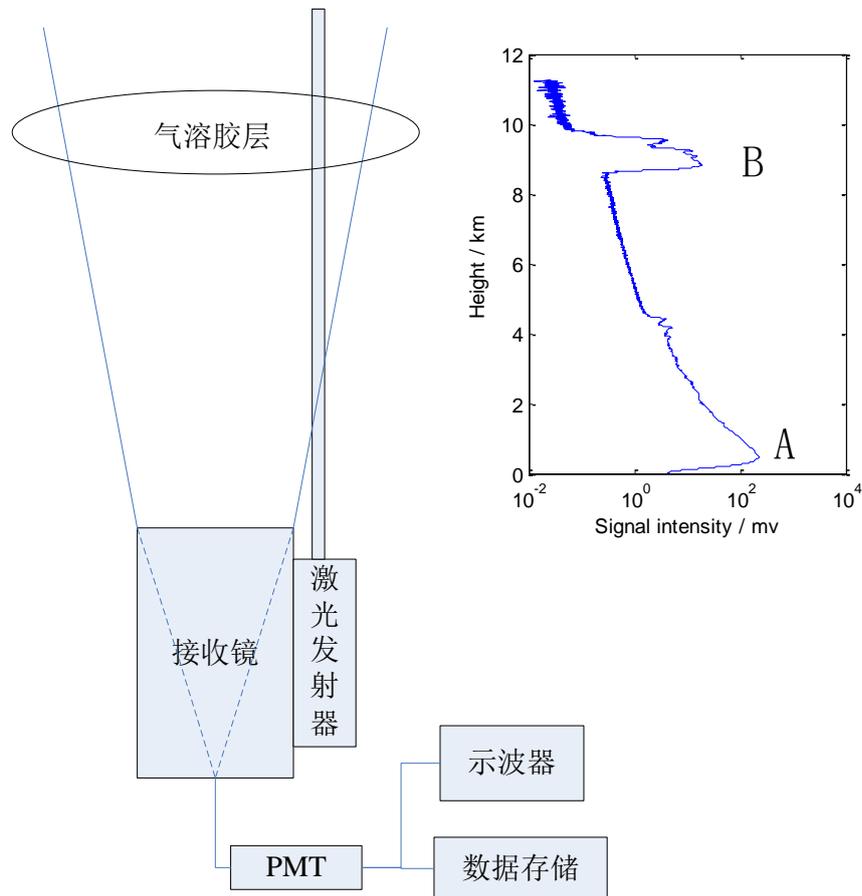


图 1 激光雷达系统框架图（尖峰 A 由于低空几何重叠因子造成，尖峰 B 由于气溶胶层或云层造成）

激光雷达由于其主动探测的优势，激光脉冲时间短、能量大，可以获得大气

成分的垂直分布信息（廓线）。激光雷达十分适合于云层高度、边界层高度监测等定性探测要求，颗粒物浓度等定量探测的精度还有待提高。

**激光雷达分类：**按照激光脉冲与大气成分作用的物理机制，可以分为米散射、瑞利散射、拉曼散射、荧光作用、差分吸收等。按照探测目标的不同，可以分为大气颗粒物和云、大气温度、风速、氮气、二氧化碳、氮氧化物、硫氧化物等。

后文所指的环境监测激光雷达，其作用机制为后向散射中的米散射，探测目标主要为大气气溶胶（大气颗粒物）和云层的垂直分布情况，探测产品仅为垂直向上得到的廓线产品和非廓线产品。

环境监测激光雷达根据波长和偏振探测情况大致分为：（1）532nm 单波长无偏振；（2）532nm 单波长带偏振；（3）532nm 带偏振、355nm 无偏振，等等。其中多波长数据可以提供大气气溶胶粒径大小信息，偏振数据可以提供大气气溶胶粒子外形信息。

### 三、环境监测激光雷达信号反演

环境监测激光雷达信号反演流程：首先对获得的回波信号进行距离修正等预处理，然后采用 Fernald 等方法得到气溶胶后向散射系数廓线/气溶胶消光系数廓线，在此基础上获得颗粒物浓度垂直分布廓线，大气边界层高度等信息。根据环境监测激光雷达硬件配置情况（多波长、偏振）还可以反演得到色比廓线、退偏比廓线。

#### 3.1 环境监测激光雷达回波信号

激光雷达回波信号是激光雷达设备接收到的唯一信号，后期各产品都由此信号反演得到。激光雷达回波信号强度与各影响因素之间关系的数学表达式，一般称之为激光雷达方程，如下式所示：

$$P(r) = C P_0 \frac{\eta A}{r^2} \Delta R \beta(\lambda, r) \exp[-2 \int_0^r \alpha(\lambda, r) dr] \quad (\text{式 1})$$

式中： $P(r)$ 为激光雷达接收到的来自于  $r$  到  $r + \Delta r$  高度大气段的回波信号强度功率值； $P_0$  为发射激光束的功率； $C$  为激光雷达的校正常数； $r$  为探测距离（或高度）； $A$  为接收望远镜的收光面积； $\beta(\lambda, r)$  为大气中某种被探测组分的后向散射系数； $\alpha(\lambda, r)$  为大气总的消光系数； $\eta$  为几何重叠因子，近地面低空信号由于光学结构的原因，激光雷达无信号或有衰减，在高空则保持为常数 1。

探测大气气溶胶的米散射激光雷达反演算法主要有斜率法、Klett 法和 Fernald 方法。斜率法方法简单，无需考虑激光雷达比的问题，但其前提条件（大气气溶胶呈均匀分布）很难满足，斜率法很少能够得到高精度的反演结果。Fernald 方法与 Klett 法的反演思路是一样的，两者之间的区别是 Fernald 方法将大气分子和大气气溶胶区别开来。基于两种成分的单次米散射激光雷达方程反演过程中，大气气溶胶消光系数和后向散射系数可以不依赖激光雷达定标常数而求解。将激光雷达方程 23-1 改写为：

$$P(r) = ECr^{-2} [\beta_a(r) + \beta_m(r)] T_a^2(r) T_m^2(r) \quad (\text{式 2})$$

其中下标 a(aerosol)表示大气气溶胶，下标 m(molecule)表示大气分子，T 表示信号透过率。

### 3.2 环境监测激光雷达信号反演各阶段数据

**距离修正后的回波信号：**对环境监测激光雷达探测得到的回波信号依次进行多次脉冲平均，背景噪声扣除等预处理后，乘以距离的平方，得到距离修正后的信号。

**气溶胶后向散射系数廓线/气溶胶消光系数廓线：**主要基于 Fernald 方法进行。对于气溶胶粒子消光系数和后向散射系数之间的关系，反演起始高度等变化较大的参数，在反演结果中附注标明。

**退偏比廓线：**532nm 的垂直后向散射强度和平行后向散射强度之比。

**色比廓线：**不同波长的后向散射强度之比。

**颗粒物浓度廓线：**包括 PM2.5/PM10/总浓度垂直分布廓线。通过气溶胶消光系数廓线，以退偏比廓线/色比廓线为辅助，反演得到。

**大气边界层高度/气溶胶光学厚度/云高等非廓线产品：**通过大气气溶胶消光系数廓线，反演得到。

其中，大气边界层高度和云高等产品主要是基于定性处理，精度高；气溶胶后向散射系数廓线、气溶胶消光系数廓线、颗粒物浓度廓线、气溶胶光学厚度等产品主要是基于定量处理，精度较低。

### 3.3 环境监测激光雷达信号反演的不确定性

激光雷达反演的误差来源，主要在于一个方程（激光雷达信号方程）解两个未知数（大气气溶胶的消光系数和后向散射系数均为未知）。在反演时，一般假

设大气气溶胶的消光系数和后向散射系数两者比值固定（称为激光雷达比）。应用 Fernald 法后向反演激光雷达方程时，需要先确定 3 个参数：激光雷达比、定标高度（后向反演的起始高度）以及该高度处的大气气溶胶消光系数。

气溶胶的激光雷达比与气溶胶粒子的折射率、尺寸、形态和组成等诸多因素有关，而实际气溶胶粒子的尺寸、形态、组成、折射率等参数的差异很大，因此难以确定气溶胶激光雷达比。实际反演消光系数时，人们通常依据不同参考条件来确定大气气溶胶的激光雷达比值，例如有文献指出，火山爆发后大量气溶胶进入平流层，此时大气气溶胶的激光雷达比分别取 40（6~15km），22（15~20km），40（20~25km）和 43（25~30km），对处于背景期的平流层气溶胶和对流层气溶胶，激光雷达比的参考值可以设置为 50。

定标高度一般选择在相对干净、气溶胶浓度可以忽略的大气层高度作为标定高度  $r_c$ ，例如平流层内或对流层内气溶胶浓度极小的区域（例如对流层顶附近）。定标点处 532nm 波长大气气溶胶消光系数可表述为  $\alpha_a(r_c) = (1.01 - 1)\alpha_m(r_c)$ ，其中  $\alpha_m(r_c)$  为定标高度处大气分子的消光系数，可以通过大气模式计算。

#### 四、环境监测激光雷达产品种类

环境监测激光雷达数据产品分为廓线产品和非廓线产品。激光雷达产品要慎重考虑低空探测盲区和最大探测高度的问题。

##### 廓线产品包括：

1 级：距离修正后的回波信号廓线；

2 级：气溶胶后向散射系数廓线，气溶胶消光系数廓线，及退偏比（532nm 的垂直后向散射强度和平行后向散射强度之比）廓线，色比（不同波长的后向散射强度之比）廓线等；

3 级：颗粒物浓度垂直分布廓线。

##### 非廓线产品包括：

大气边界层高度、气溶胶光学厚度、云高，等等。

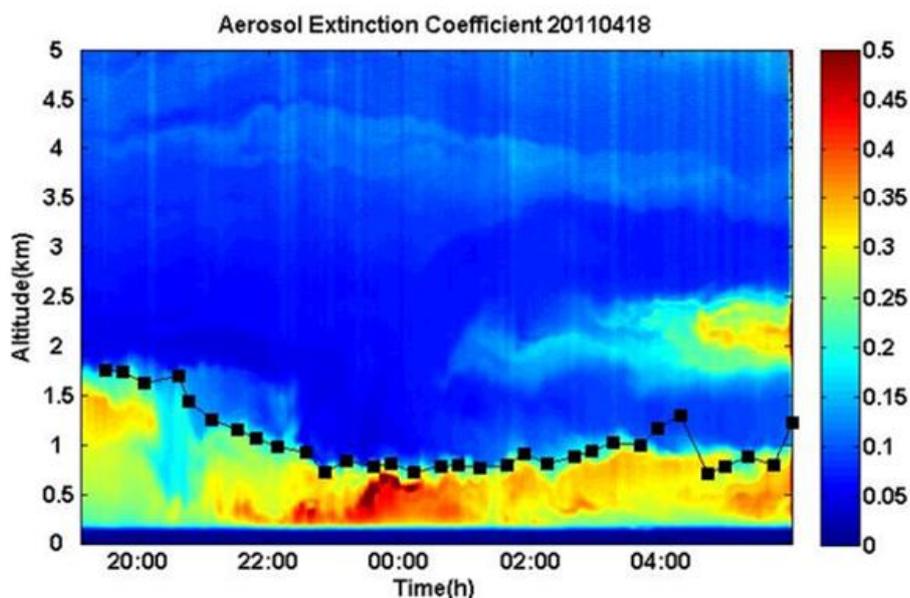


图 2 环境监测激光雷达反演大气气溶胶消光系数廓线伪彩图(颜色表示系数大小, 其中实心黑块表示大气边界层高度变化)

## 五、时间、高度分辨率

激光雷达产品时间分辨率: 1 分钟~1 小时

高度分辨率随高度变化而变化, 低空 3 千米高度包括大气边界层的区域, 对模式计算影响较大, 按 30 米的高度分辨率; 往上 3 千米, 影响较少, 按 60 米的高度分辨率; 再往上直到 10.5 千米左右高空, 按 90 米的高度分辨率。

共计:  $30 \text{ 米} \times 100 + 60 \text{ 米} \times 50 + 90 \text{ 米} \times 50 = 10.5 \text{ 千米}$ 。

## 六、环境监测激光雷达信息传输内容

传输内容为文本格式数据和图片两种形式。

文本格式数据目前为以下三种:

- 1、原始信号或修正后的信号廓线
- 2、颗粒物浓度廓线
- 3、边界层高度

图片为颗粒物浓度廓线随时间变化图, 并加载边界层高度信息。

## 七、环境监测激光雷达产品数据格式

### (一) 传输文件格式

廓线和非廓线数据, 以文本格式数据。颗粒物浓度廓线随时间变化图(附带边界层高度变化信息)为图片格式。

## （二）文件命名规范

Lidar\_PX\_YYYYMMDDhhmmss\_Location\_Instrument.txt

Lidar\_YYYYMMDDhhmmss\_Location\_Instrument.jpg

其中：Lidar：激光雷达资料

PX：产品级别编码，L1 表示激光雷达原始回波信号，L2 表示颗粒物浓度廓线，L3 表示边界层高度

YYYYMMDDhhmmss：第一组数据的年月日时分秒

Location：观测站点的编码

Instrument：站点内的设备编号

## （三）文本格式文件格式

文件头：采用文本格式，记录内容包括：

- 1、站点信息：站点编号，站点拼音，设备编号，站点经纬度，海拔等
- 2、系统硬件信息：设备产商，设备安装时间，激光器脉冲能量，发射重频，数据采集方式（模拟或者光子计数）等
- 3、数据信息：高度分辨率，时间分辨率，数据采集采样分辨率，廓线采样个数，通道信息（几个通道，是否多波长，有无偏振信息）等
- 4、附加信息：有无定标文件，有无气象数据等

时间产品：采用文本格式，按时间依次记录。

## （四）图片格式文件格式

时间跨度：24 小时

附表 文本文件格式示例：

		代码	示例/单位
设备供应商代码	无锡中科光电	ZK	
	怡孚和融	YF	
	蓝盾环保	LD	
	艾沃思	AS	
	Sigma	SM	
	...	...	
激光器脉冲能量		****	毫焦
发射重复频率		****	赫兹
累加次数		****	次
通道数目		*	1 2 3 4 5
波长及偏振代码	355nm	3	3 3P
	532nm	5	5 5P
	1064nm	1	1 1P
	偏振	P	
采集方式	模拟	A	
	光子计数	P	
空间分辨率		****	米
数据更新频率	1	00	分钟
	6	01	
	10	02	
	60	10	
廓线采样点数		1333	1333
标定设备	无	NA	
	PM <sub>2.5</sub>	2	
	PM <sub>10</sub>	1	
	其他	O_**	