

JJF

中华人民共和国国家计量技术规范

JJF XXXX-XXXX

PM₁₀ 和 PM_{2.5} 切割器校准规范

Calibration Specification for PM₁₀ and PM_{2.5} Separate Device

(征求意见稿)

XXXX—XX—XX 发布

XXXX—XX—XX 实施

国家市场监督管理总局 发布

PM₁₀ 和 PM_{2.5} 切割器校准规范

Calibration Specification for PM₁₀ and PM_{2.5}

Separate Device

JJF XXXX-XXXX

归口单位：全国环境化学计量技术委员会

主要起草单位：上海市计量测试技术研究院

中国计量科学研究院

参加起草单位：

本规范委托全国环境化学计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

参加起草人：

目 录

引 言	(III)
1 范围.....	(1)
2 引用文件.....	(1)
3 术语和计量单位.....	(1)
4 概述.....	(2)
5 计量特性.....	(2)
5.1 50%切割粒径 (D_{a50})	(2)
5.2 捕集效率的几何标准差.....	(2)
6 校准条件.....	(2)
6.1 环境条件.....	(2)
6.2 标准及其他设备.....	(2)
7 校准项目和校准方法.....	(3)
7.1 切割器校准项目	(3)
7.2 切割器校准方法.....	(3)
8 校准结果表达.....	(5)
9 复校时间间隔.....	(5)
附录 A PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 切割器校准原始记录 (荐)	(6)
附录 B PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 切割器校准证书内页格式.....	(7)
附录 C PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 切割器粒子分离器的分离效率-粒径的校准曲线制作.....	(8)
附录 D 气溶胶测量装置示意图及稳定性考察示例	(9)
附录 E PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 切割器 50%切割粒径的不确定度评定实例.....	(10)

引 言

本规范依据 JJF1071-2010《国家计量校准规范编写规则》、JJF1001《通用计量术语及定义》、JJF1059.2-2012《用蒙特卡洛法评定测量不确定度》、GB/T 31159-2014《大气气溶胶观测术语》以及 HJ93-2013《环境空气颗粒物（PM₁₀ 和 PM_{2.5}）采样器技术要求及检测方法》的有关规定和相关技术材料编写。

本规范为首次制定。

PM₁₀ 和 PM_{2.5} 切割器校准规范

1 范围

本规范主要适用于进气口流量为 16.67 L/min 的环境空气颗粒物 (PM₁₀ 和 PM_{2.5}) 切割器的校准, 其他流量的切割器可参照本规范校准。

2 引用文件

HJ 93-2013 环境空气颗粒物 (PM₁₀ 和 PM_{2.5}) 采样器技术要求及检测方法

HJ 653-2013 环境空气颗粒物 (PM₁₀ 和 PM_{2.5}) 连续自动监测系统要求及检测方法

凡是注日期的引用文件, 仅注日期的版本适用于本方法; 凡是不注日期的引用文件, 其最新版本适用于本方法。

3 术语和计量单位

3.1 空气动力学等效直径 aerodynamic diameter

与所表征的粒子具有相同的运动速度, 密度为 1 g/cm³ 球形粒子的直径。(引自 GB/T 31159-2014 大气气溶胶观测术语)

3.2 可吸入颗粒物 inhalable particle (PM₁₀)

可吸入颗粒物是指空气动力学直径小于或等于 10 μm 的气溶胶粒子。

3.3 细颗粒物 fine particle (PM_{2.5})

细颗粒物是指空气动力学直径小于或等于 2.5 μm 的气溶胶粒子。

3.4 切割器 particle separate device

指具有将不同粒径粒子分离功能的装置。(引自 HJ 93-2013 环境空气颗粒物 (PM₁₀ 和 PM_{2.5}) 采样器技术要求及检测方法)

3.5 50%切割粒径 (D_{a50}) 50% cut-point diameter

指切割器对颗粒物的捕集效率为 50%时所对应的粒子空气动力学当量直径。(引自 HJ 93-2013 环境空气颗粒物 (PM₁₀ 和 PM_{2.5}) 采样器技术要求及检测方法)

3.6 捕集效率的几何标准差 (σ_g) geometric standard deviation of sampling efficiency

3.6.1 切割器捕集效率的几何标准差分为 σ_{g16} 和 σ_{g84} ;

3.6.2 σ_{g16} 为 16%捕集效率对应的粒子空气动力学等效直径 D_{a16} 与 50%捕集效率对应的粒子空气动力学等效直径 D_{a50} 的比值;

$$\sigma_{g16} = \frac{D_{a16}}{D_{a50}} \quad (1)$$

3.6.3 σ_{g84} 为 50%捕集效率对应的粒子空气动力学等效直径 D_{a50} 与 84%捕集效率对应的粒子空气动力学等效直径 D_{a84} 的比值;

$$\sigma_{g84} = \frac{D_{a50}}{D_{a84}} \quad (2)$$

4 概述

PM₁₀ 和 PM_{2.5} 切割器是环境空气颗粒物（主要指可吸入颗粒物和细颗粒物）监测工作中与颗粒物采样器或监测仪配套使用的装置，能够将环境空气中可吸入颗粒物和细颗粒物分离出来，按原理可分为旋风式、撞击式和虚拟撞击式等。广泛应用于环境保护、劳动防护、疾控卫生等领域。

5 计量特性

表 1 计量特性

序号	校准项目	技术要求	
		PM ₁₀ 切割器	PM _{2.5} 切割器
1	50%切割粒径 (D_{a50})	(10±0.5) μm	(2.5±0.2) μm
2	捕集效率的几何标准差 (σ_g)	1.5±0.1	1.2±0.1

6 校准条件

6.1 环境条件

温度为 (15~30) °C，相对湿度不大于 85 %RH。

6.2 校准标准器及其他设备

6.2.1 校准 PM_{10} 切割器用气溶胶标准粒子

可采用表 2 要求的 8 种空气动力学直径范围为 $(3.0\sim 17.0)\mu m$ 的单分散粒子有证标准物质；也可采用干燥的 ISO 12103-1 A2 精细试验粉尘或 ISO 12103-1 A3 中级试验粉尘（粒径分布如“附录 F”所示）。

表 2 单分散粒子有证标准物质的粒径要求

i	1	2	3	4	5	6	7	8
$D_{ai} (\mu m)$	3.0 ± 0.5	5.0 ± 0.5	7.0 ± 0.5	9.0 ± 0.5	11.0 ± 1.0	13.0 ± 1.0	15.0 ± 1.0	17.0 ± 1.0

6.2.2 校准 $PM_{2.5}$ 切割器用气溶胶标准粒子

采用 8 种空气动力学直径范围为 $(1.5\sim 4.0)\mu m$ 的单分散粒子有证标准物质，详见表 3。

表 3 单分散粒子有证标准物质的粒径要求

i	1	2	3	4	5	6	7	8
$D_{ai} (\mu m)$	1.5 ± 0.25	2.0 ± 0.25	2.2 ± 0.25	2.5 ± 0.25	2.8 ± 0.25	3.0 ± 0.25	3.5 ± 0.25	4.0 ± 0.50

6.2.3 气溶胶测量装置

气溶胶测量装置主要由气溶胶发生装置和气溶胶粒径谱仪等组成，装置示意图详见附录 D。

a) 校准 PM_{10} 切割器用气溶胶发生装置：可发生粒径为 $(2.0\sim 18.0)\mu m$ 的多分散或单分散固态气溶胶颗粒，稳定性为 2 h 内浓度变化不大于 8%；

b) 校准 $PM_{2.5}$ 切割器用气溶胶发生装置：可发生粒径为 $(1.0\sim 5.0)\mu m$ 的单分散固态气溶胶颗粒，稳定性为 2 h 内浓度变化不大于 8%；

c) 校准 PM_{10} 切割器用气溶胶粒径谱仪：粒径测量范围为 $(1.0\sim 20.0)\mu m$ ；

d) 校准 $PM_{2.5}$ 切割器用气溶胶粒径谱仪：粒径测量范围为 $(0.5\sim 10.0)\mu m$ ；

e) 流量计：量程为 $(0\sim 40)$ L/min，准确度等级不低于 1.5 级。

7 校准项目和校准方法

7.1 将 PM_{10} 或 $PM_{2.5}$ 切割器以垂直于水平面的状态安装在气溶胶测量装置中。

7.2 由气溶胶发生装置发生表 2 中 $3.0\mu m$ (PM_{10} 切割器) 或表 3 中 $1.5\mu m$ ($PM_{2.5}$ 切割器) 粒径的单分散气溶胶，使用气溶胶粒径谱仪分别测量输入至切割器上游的气溶胶浓度和切割器输出的下游气溶胶浓度，不少于 30 s 采集一次数据，重复操作三次 ($j=1, 2,$

3), 分别记录为 C_{ulj} 和 C_{dlj} , 按公式 (3) 计算得到该粒径捕集效率, 并按公式 (4) 计算出平均捕集效率;

$$\eta_{i,j} = \frac{C_{dlj}}{C_{ulj}} \times 100 \quad (3)$$

$$\bar{\eta}_i = \frac{\sum_{j=1}^3 \eta_{ij}}{3} \quad (4)$$

式中:

i ——粒径序号 ($i=1, 2, \dots, 8$);

j ——测量次数 ($j=1, 2, 3$);

C_{ulj} ——切割器上游的单分散固态气溶胶颗粒浓度;

C_{dlj} ——切割器下游的单分散固态气溶胶颗粒浓度;

$\eta_{i,j}$ ——第 i 个粒径点第 j 次测量的捕集效率, 单位: %;

$\bar{\eta}_i$ ——第 i 个粒径点捕集效率的平均值, ($i=1, 2, \dots, 8$), 单位: %。

7.3 按表2 (PM₁₀切割器) 或表3 (PM_{2.5}切割器) 依次对其他7种粒径进行测量, 重复7.2, 按公式 (3) (4) 计算8组24个捕集效率的数值以及各粒径所对应的平均捕集效率 $\bar{\eta}_i$ 。

7.4 校准 PM₁₀ 切割器, 也可由发生 ISO 12103-1 A2 精细试验粉尘或 ISO 12103-1 A3 中级试验粉尘代替发生单分散粒子有证标物, 仍然使用气溶胶粒径谱仪对照表 2 中的 8 种特征粒径分别测量输入至切割器上游的气溶胶浓度和切割器输出的下游气溶胶浓度, 不少于 30 s 采集一次数据, 重复操作三次 ($j=1, 2, 3$), 分别记录为 C_{ulj} 和 C_{dlj} , 按公式 (3) 计算得到该粒径捕集效率, 并按公式 (4) 计算出平均捕集效率。

7.5 采用极差法按公式 (5) 计算每个粒径点的捕集效率相对标准差 C_{vi} 。当第 i 粒径点的 $C_{vi} > 10\%$ 时, 则该粒径点的捕集效率需重新进行测量。

$$C_{vi} = \frac{\max(\eta_{i,1}, \eta_{i,2}, \eta_{i,3}) - \min(\eta_{i,1}, \eta_{i,2}, \eta_{i,3})}{\bar{\eta}_i \times 1.69} \times 100\% \quad (5)$$

式中:

$\max(\eta_{i,1}, \eta_{i,2}, \eta_{i,3})$ ——第 i 个粒径点捕集效率3次重复测量中的最大值, 单位: %;

$\min(\eta_{i,1}, \eta_{i,2}, \eta_{i,3})$ ——第 i 个粒径点捕集效率3次重复测量中的最小值, 单位: %;

1.69 ——测量次数为3次时的极差系数;

C_{vi} ——第*i*个粒径点捕集效率的相对标准偏差 ($i=1, 2, \dots, 8$)。

7.6 将由公式 (4) 计算所得到的 $\bar{\eta}_i$ 与所对应的 D_{ai} 分别代入公式 (6)，将所得到的8个方程式通过软件计算出拟合参数 a 、 b 、 c 、 d 、 e 。

$$\bar{\eta}_i = a + b \left\{ 1 - [1 + \exp(\frac{(D_{ai} + d \ln(2^{\frac{1}{e}} - 1) - c)}{d})]^{-e} \right\} \quad (6)$$

式中：

D_{ai} ——标准粒子的空气动力学等效直径 ($i=1, 2, \dots, 8$)；

$\bar{\eta}_i$ ——实验获得的第*i*个粒径点平均捕集效率 ($i=1, 2, \dots, 8$)，单位：%；

a 、 b 、 c 、 d 、 e ——拟合参数。

通过式 (7) 计算捕集效率分别为16%、50%和84%所对应的切割粒径 D_{a16} 、 D_{a50} 和 D_{a84} 。由公式 (1)、(2) 计算得到捕集效率的几何标准差 σ_{g16} 和 σ_{g84} 。

$$D_a = c + d \left\{ \ln \left[\left(\frac{b}{a + b - \eta} \right)^{\frac{1}{e}} - 1 \right] - \ln \left(2^{\frac{1}{e}} - 1 \right) \right\} \quad (7)$$

式中：

D_a ——计算得到的切割粒径；

η ——捕集效率，单位：%；

a 、 b 、 c 、 d 、 e ——拟合参数。

8 校准结果表达

8.1 校准记录

校准记录格式参考附录 A。

8.2 校准结果的处理

校准结果应在校准证书或校准报告上反映，校准证书或报告至少包括以下信息：

- a) 标题，如“校准证书”或“校准报告”；
- b) 实验室名称和地址；
- c) 进行校准的地点（如果不在实验室内进行校准）；

- d) 证书或报告的惟一性标识（如编号），每页及总页数的标识；
- e) 送校单位的名称和地址；
- f) 被校对象的描述和明确标识；
- g) 进行校准的日期，如果与校准结果的有效性和应用有关时，应说明被校对象的接受日期；
- h) 如果与校准结果的有效性和应用有关时，应对抽样程序进行说明。校准环境的描述；
- i) 对校准所依据的技术规范的标识，包括名称及代码；
- j) 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明；
- k) 校准环境的描述；
- e) 校准结果及测量不确定度的说明；
- f) 校准证书或校准报告签发人的签名、职务或等效标识、以及签发日期；
- g) 校准结果仅对被校对象有效的声明；
- h) 未经实验室书面批准，不得部分复制证书或报告的声明。

9 复校时间间隔

仪器复校时间间隔由使用者根据仪器的使用情况、仪器本身性能等因素决定，推荐复校时间间隔不超过 1 年。在相邻两次校准期间，如对仪器的检测数据有怀疑或仪器更换主要部件及修理后，应对仪器重新校准。

附录 A

PM₁₀ 和 PM_{2.5} 切割器校准原始记录（推荐）

送校单位：_____

仪器型号：_____仪器编号：_____制造厂商：_____

测量原理：_____

校准环境温度：_____℃ 湿度：_____ %RH

校准用标准物质：

标物名称	标物型号	标物不确定度	证书编号	有效日期

50%切割粒径（ D_{a50} ）及切割器捕集效率的几何标准差（ σ_g ）

	测量值							
等效直径段 (选一种) (μm)	3.0±0.5	5.0±0.5	7.0±0.5	9.0±0.5	11.0±1.0	13.0±1.0	15.0±1.0	17.0±1.0
	1.5±0.25	2.0±0.25	2.2±0.25	2.5±0.25	2.8±0.25	3.0±0.25	3.5±0.25	4.0±0.5
C _{u<i>ij</i>} /C _{d<i>ij</i>}								
η _{<i>ij</i>} (%)								
— η _{<i>i</i>} (%)								
C _{<i>vi</i>} (%)								
— η (%)								
D _{<i>a16</i>}			D _{<i>a50</i>}			D _{<i>a84</i>}		
σ _{g16}					σ _{g84}			
<i>a</i>			<i>b</i>			<i>c</i>		

校准员：_____

核验员：_____

日期：_____

日期：_____

附录 B

PM₁₀ 和 PM_{2.5} 切割器校准证书内页

证书编号：×××××-×××××			
校准结果			
校准项目		技术要求	校准结果
50%切割粒径(D_{a50})		(10±0.5) μm / (2.5±0.2) μm	
切割器捕集效率的几何标准差	σ_{g84}	1.5±0.1/ 1.2±0.1	
	σ_{g16}		

附录 C

PM₁₀ 和 PM_{2.5} 切割器切割效率--粒径的校准曲线拟合示例

使用标准粒子及气溶胶测量装置对某型号的PM₁₀或PM_{2.5}切割器（流量为16.7 L/min）进行校准。按7所规定的校准方法，将气溶胶粒径谱仪所测得的8个粒径（ D_{ai} ）气溶胶在PM₁₀或PM_{2.5}切割器上游、下游浓度 C_{uij} 和 C_{dij} ，按公式（3）和（4）计算出对应的平均捕集效率（ $\bar{\eta}_i$ ）。将由公式（4）计算所得到的 $\bar{\eta}_i$ 与所对应的 D_{ai} 分别代入公式（6），形成由8个方程式组成的方程组，通过软件计算出拟合参数 a 、 b 、 c 、 d 、 e 。

公式（6）与 Table Curve 2D（Jandel Scientific Software, San Rafael, CA）计算机软件中的代码 8092 的方程相一致，为方便计算推荐采用 Table Curve 2D 计算机软件进行实验数据的拟合并得出拟合参数 a 、 b 、 c 、 d 、 e 。

在 Table Curve 2D 软件的 8092 方程界面输入 x （即标准粒子的空气动力学等效直径 D_{ai} ）与 y （即实验获得的每个粒径点捕集效率的平均值 $\bar{\eta}_i$ ），采用反向非对称 S 形方程进行拟合，可以得到拟合参数 a 、 b 、 c 、 d 、 e 。图 C1 为拟合结果的示例图。

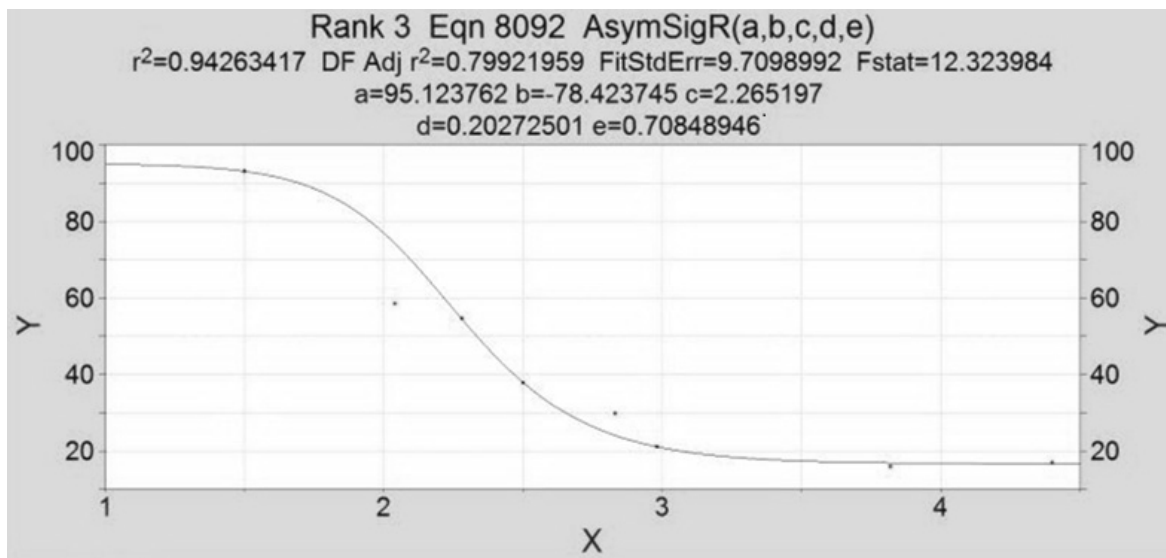
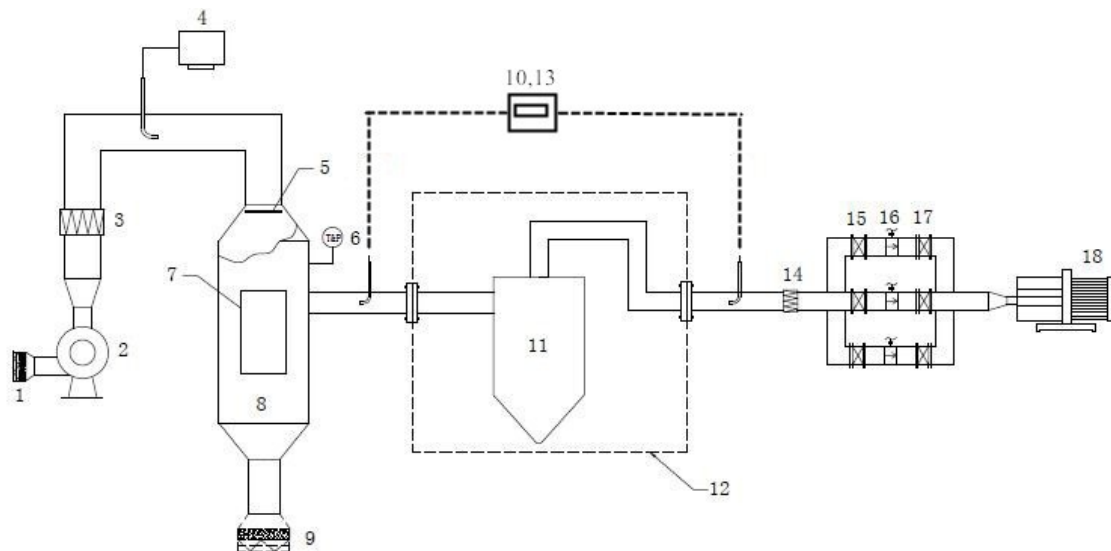


图 C1 切割效率-粒径的校准曲线

附录 D

气溶胶测量装置示意图及稳定性考察示例

D 1 气溶胶测量装置示意图

图 D1 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 切割器气溶胶测量装置示意图

图中：1-中效过滤器，2-风机，3-高效过滤器，4-单分散性气溶胶发生装置，5-均流板，6-温湿度计，7-观察窗，8-气溶胶混匀舱，9-中高效过滤器，10-气溶胶粒径谱仪，11- PM₁₀ 或 PM_{2.5} 切割器，12-支架，13-气溶胶粒径谱仪（与 10 为同一台，两个气路），14-高效过滤器，15-阀门，16-流量计，17-阀门，18-恒流泵

D 2 气溶胶测量装置稳定性考察示例

根据 6.2.2 的要求，气溶胶发生装置的稳定性为 2 h 内浓度变化不大于 8%，采用以下方法进行稳定性考察：

正常开启气溶胶测量装置，发生空气动力学直径为 3.0 μm 的气溶胶粒子。运行 20 分钟后，通过气溶胶动力学粒径谱仪记录上游 3.0 μm 粒子浓度 C_{u1} 。随后每间隔 30 分钟记录上游浓度 C_{ui} ($i=1、2、3、4、5$)。根据公式 (D.1) 计算稳定性。

$$S = \frac{\max(C_{u1}, C_{u2}, \dots, C_{u5}) - \min(C_{u1}, C_{u2}, \dots, C_{u5})}{C_{u1}} \times 100\% \quad (D.1)$$

例如，实验获取 5 组浓度数据分别为：166、160、167、169、162，根据式 (D.1) 得到： $S=5.5\%$ ，符合规范对测量装置的稳定性要求，可继续开展切割器校准工作。

附录 E

PM_{2.5} 切割器 50%切割粒径 (D_{a50}) 测量结果的不确定度评定示例

E 1 概述

PM_{2.5} 切割器的主要技术参数是 50%切割粒径 (D_{a50})。本规范测量 D_{a50} 是采用美国环保总署 (EPA) 推荐的经验公式---反向非对称 S 形方程 (A Reverse Asymmetric Sigmoid Equation) 求得, 该测量模型是呈现明显的非线性, 适合采用蒙特卡洛法 (MCM 法) 评定 50%切割粒径 (D_{a50}) 测量结果的不确定度。因此, 本示例采用 MCM 法评定了 PM_{2.5} 切割器的 50%切割粒径 D_{a50} 的不确定度。

E 2 方法分析和评定模型

本方法是建立在测量模型 (EPA 推荐经验公式) 的基础上, 通过程序运行, 对 10^6 次模拟计算得到的结果进行分析, 获得测量结果的分布及不确定度。

首先, 根据输出量的概率密度函数 (PDF) 假设 10^6 组输出量 ($y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6, y_7, y_8$), 其所对应的输入量 ($x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8$) 为恒定, 通过采用最小二乘法原理设计的程序可以按公式 (E.1) 计算得到 10^6 组 a, b, c, d, e 。

$$y = a + b \left\{ 1 - \left[1 + \exp\left(\frac{(x + d \ln(2^{\frac{1}{e}} - 1) - c)}{d}\right) \right]^{-e} \right\} \quad (\text{E.1})$$

式中:

x ——切割粒径, 单位 μm ;

y ——每个粒径点的捕集效率, 单位 %;

a, b, c, d, e ——最优解公式对应的拟合参数。

其次, 通过 (E.1) 的反函数, 即:

$$x = c + d \left\{ \ln \left[\left(\frac{b}{a + b - y} \right)^{\frac{1}{e}} - 1 \right] - \ln \frac{1}{2} \right\} \quad (\text{E.2})$$

将 $y=50$ 代入确定的 10^6 组 a, b, c, d, e 式 (E.2), 可求出 10^6 个 x , 其平均值为

D_{a50} ，计算结果的分布区间为 D_{a50} 的不确定度分布区间。

式 (E.1) 或者其反函数式 (E.2) 即评定的测量模型。

E 3 输入与评定过程

E 3.1 确定输入量 $y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6, y_7, y_8$ 的概率分布

首先,通过大量试验获得的 $(x_i, y_i) (i=1, \dots, 8)$ 确定捕集效率 $y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6, y_7, y_8$ 数据的分布特征如表 E-1 所示。

表 E-1 试验获得的粒径与对应切割效率的分布特征

i	x_i -常数	y_i -极小	y_i -极大	y_i -均值	y_i 的概率分布形态
1	1.491	92.5%	97.5%	95.0%	矩形分布
2	1.837	85.0%	90.0%	87.5%	矩形分布
3	2.217	62.5%	67.5%	65.0%	矩形分布
4	2.505	47.5%	52.5%	50.0%	矩形分布
5	2.813	13.5%	16.5%	15.0%	矩形分布
6	3.216	4.0%	6.0%	5.0%	矩形分布
7	3.748	0.4%	0.6%	0.5%	矩形分布
8	4.220	0.1%	0.2%	0.1%	矩形分布

E 3.2 通过程序运算获得 a, b, c, d, e

根据表 E-1 中的 PDF 假设 10^6 组 $(y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6, y_7, y_8)$ 。基于最小二乘法原理,通过程序运算分别对每组 $(y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6, y_7, y_8)$ 求出对应的 (a, b, c, d, e) , 得到 10^6 组 (a, b, c, d, e) 。

E 3.3 通过程序运算获得 50%切割效率对应粒径 D_{a50}

根据 E 3.2 中得到的 a, b, c, d, e 参数, 确定式 (E.2) 的表达式, 令 $y=50$, 求得 50%切割效率对应的粒径 D_{a50} 。通过程序运算, 分别将这 10^6 组 (a, b, c, d, e) 和 $y=50$ 代入 (E.2), 得到 10^6 个输出量 D_{a50} 。

E 3.4 计算算数平均值与最小包含区间

将 10^6 组结果从小到大依次排列, 记为 $D_{a50(r)}$ ($r=1, 2, \dots, 10^6$), 求得算数平均

值 x_{50} ，在 $r=1, 2, \dots, 5000$ 中选出满足 $D_{a50(r^*+95000)} - D_{a50(r^*)} = \min(D_{a50(r+95000)} - D_{a50(r)})$ ($r=1, 2, \dots, 5000$) 的 r^* ，求得最短包含区间 $[D_{a50(r^*)}, D_{a50(r^*+95000)}]$ 。

E 4 输出测量结果

通过上述拟合程序迭代，在 95%包含概率条件内，得到如表 E-2 所示的 50%切割粒径结果。

表 E-2 经过 MCM 法得到的 50%切割粒径 (X) 统计特征

均值	2.477	75 分位点	2.497	众数	2.477
最大值	2.519	25 分位点	2.458		
最小值	2.429	中数	2.475		

结果显示，50%切割粒径数值呈现在 2.429 至 2.519 间分布。其中，最短包含区间是根据《JJF 1059.2-2012 用蒙特卡洛法评定测量不确定度》中 4.7.4 条进行计算得到，结果为[2.437,2.498]，最小差值为 0.061（即最短包含区间）。

E 5 不确定度的报告

基于 MCM 法，参照《JJF 1059.2-2012 用蒙特卡洛法评定测量不确定度》中对该类方法评定不确定度的表达方式，最后计算出的 50%切割效率对应的粒径不确定度表达为：

$$x_{50}=2.477 \mu\text{m}, U=0.12 \mu\text{m} (k=2)。$$