



# 中华人民共和国国家环境保护标准

HJ 829-2017

## 环境空气 颗粒物中无机元素的测定 能量色散 X 射线荧光光谱法

Ambient air -Determination of inorganic elements in ambient  
particle matter- Energy dispersive X-ray fluorescence spectroscopy

(ED-XRF) method

(发布稿)

本电子版为发布稿。请以中国环境出版社出版的正式标准文本为准。

2017-05-02发布

2017-07-01实施

环 境 保 护 部 发布

# 目 次

前 言.....	ii
1 适用范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 方法原理.....	1
4 干扰和消除.....	1
5 试剂和材料.....	1
6 仪器和设备.....	2
7 样品.....	2
8 分析步骤.....	3
9 结果计算与表示.....	3
10 精密度和准确度.....	4
11 质量保证和质量控制.....	4
12 注意事项.....	5
附录 A（规范性附录） 方法检出限和测定下限.....	6
附录 B（资料性附录） ED-XRF 测量条件示例.....	7
附录 C（资料性附录） 方法精密度和方法准确度.....	13

## 前 言

为贯彻《中华人民共和国环境保护法》和《中华人民共和国大气污染防治法》，保护环境，保障人体健康，规范环境空气和无组织排放颗粒物中无机元素的测定方法，制定本标准。

本标准规定了测定环境空气和无组织排放颗粒物中无机元素的能量色散 X 射线荧光光谱（ED-XRF）分析方法。

本标准首次发布。

本标准附录 A 为规范性附录，附录 B 和附录 C 均为资料性附录。

本标准由环境保护部环境监测司和科技标准司组织制订。

本标准主要起草单位：中日友好环境保护中心（国家环境分析测试中心）。

参加本标准方法验证的单位有：中国科学院地球环境研究所、上海市环境科学研究院、江苏天瑞仪器股份有限公司、上海思百吉仪器系统有限公司（帕纳科业务部）、岛津企业管理（中国）有限公司、湖南省环境监测中心站、北京市环境保护监测中心、天津市环境监测中心、布鲁克（北京）科技有限公司和环境保护部标准样品研究所。

本标准环境保护部 2017 年 5 月 2 日批准。

本标准自 2017 年 7 月 1 日起实施。

本标准由环境保护部解释。

# 环境空气 颗粒物中无机元素的测定 能量色散 X 射线荧光光谱法

## 1 适用范围

本标准规定了测定环境空气和无组织排放颗粒物中无机元素的能量色散 X 射线荧光光谱法。

本标准适用于利用滤膜采集的环境空气和无组织排放颗粒物中钠 (Na)、镁 (Mg)、铝 (Al)、硅 (Si)、磷 (P)、硫 (S)、氯 (Cl)、钾 (K)、钙 (Ca)、钪 (Sc)、钛 (Ti)、钒 (V)、铬 (Cr)、锰 (Mn)、铁 (Fe)、钴 (Co)、镍 (Ni)、铜 (Cu)、锌 (Zn)、砷 (As)、硒 (Se)、锶 (Sr)、溴 (Br)、镉 (Cd)、钡 (Ba)、铅 (Pb)、锡 (Sn)、锑 (Sb) 等元素的测定。本标准也适用于经方法验证能够达到准确度和精密度要求的其他无机元素。

在本标准推荐的各元素特征谱线条件下, 方法检出限及测定下限见附录A。

## 2 规范性引用文件

本标准引用了下列文件中的条款。凡是不注明日期的引用文件, 其有效版本适用于本标准。

HJ 93	环境空气颗粒物 (PM <sub>10</sub> 和PM <sub>2.5</sub> ) 采样器技术要求及检测方法
HJ 664	环境空气质量监测点位布设技术规范 (试行)
HJ/T 55	大气污染物无组织排放监测技术导则
HJ/T 194	环境空气质量手工监测技术规范
HJ/T 374	总悬浮颗粒物采样器技术要求及检测方法

## 3 方法原理

X 射线管产生的初级 X 射线照射到平整、均匀的颗粒物样品表面上时, 被测元素释放出特征 X 射线荧光直接进入检测器。经电子学系统处理得到不同能量 (元素) 的 X 射线荧光能谱。采用全谱图拟合或特定峰面积积分的方式获取特征 X 射线荧光强度。颗粒物负载量在一定范围内, 采用薄样品分析技术, 被测元素特征谱峰强度与其含量成正比。

## 4 干扰和消除

通常采用全谱图拟合或特定峰面积积分两种方式获取强度。元素含量较低且无干扰时, 可选某区间特定谱峰净面积方式获取强度。存在干扰时, 应采用全谱图拟合方法对重叠谱峰进行解析, 扣除干扰峰的影响, 得到目标元素特征谱峰强度。干扰元素拟合解析示例参见附录 B 表 B.4。

## 5 试剂和材料

5.1 负载在聚酯膜 (Mylar film) 或聚碳酸酯核孔膜 (Nuclepore polycarbonate membranes) 上

的单元素或化合物标准样品，(0.5~50)  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ，以单元素含量计。

注：负载有元素的薄膜面在支撑环下面的为 A 模式，在支撑环上面的为 B 模式。建议采用 B 模式（参见 12）。

5.2 金属纯元素或无机化合物样品，纯度大于 99.9%。

5.3 负载在聚碳酸酯核孔膜上的混合元素标准样品或模拟  $\text{PM}_{2.5}$  标准样品，有证标准物质。

5.4 石英滤膜，特氟龙、聚丙烯等有机滤膜。

注：用 XRF 测量环境空气颗粒物中无机元素时，特氟龙滤膜比石英滤膜更合适。

## 6 仪器和设备

6.1 颗粒物采样器。其性能和技术指标应符合 HJ/T 374 和 HJ 93 的规定。

6.2 能量色散 X 射线荧光光谱仪。根据轻元素测定需要，可配备氦气置换或抽真空功能。

6.3 颗粒物滤膜裁剪圆刀，直径 47mm。或陶瓷剪刀。

6.4 镊子（镊子头为非金属材料）。

6.5 带盖样品盒，聚氯乙烯材质，直径 47mm、90mm。

6.6 包装用锡纸。

6.7 XRF 专用聚丙烯膜（Prolene thin film 4.0  $\mu\text{m}$ ）。

## 7 样品

### 7.1 样品采集

#### 7.1.1 样品负载量

采集在滤膜上的颗粒物负载量原则上不宜超过 100  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ，负载的颗粒物要均匀分布在直径至少为 30mm 的范围。可以通过控制采样时间调控滤膜上颗粒物负载量。

注：颗粒物负载量过多会导致样品基体效应，偏离薄样品假设，影响分析结果的准确性。

#### 7.1.2 环境空气颗粒物样品

环境空气采样点的设置应符合 HJ 664 相关要求。采样过程按照 HJ/T 194 中颗粒物采样的要求执行。当目标元素含量较低或采集  $\text{PM}_{10}$  ( $\text{PM}_{2.5}$ ) 样品时，可适当增加采样体积。采样时应详细记录采样环境条件。

#### 7.1.3 无组织排放颗粒物样品

无组织排放颗粒物样品采集按照 HJ/T 55 中相关要求设置监测点位，其它同环境空气样品采集要求。

### 7.2 样品保存

采样结束后，用镊子将滤膜取出，放入干燥洁净、已编号的样品盒（6.5）中，大流量采样器采集的石英滤膜样品可对折后用包装用锡纸（6.6）包好，并按采样要求做好记录。样品在干燥、洁净、室温环境下于硅胶干燥器中保存。

### 7.3 样品处理

小流量采样器采集的颗粒物样品可直接放入样品杯。大、中流量采样器采集的石英滤膜颗粒物样品需用直径为47 mm圆刀（6.3）裁剪成直径为47 mm的滤膜圆片，待测。上述操作应避免样品测量面被沾污。

## 8 分析步骤

### 8.1 仪器测量条件

根据仪器操作手册，选择合适的测量条件建立方法。需要优化的主要测量参数有：待测元素的分组；特征谱线及测量时间；滤光片（或二次靶）；X射线管电压及电流；干扰元素及其干扰系数的测定等。仪器测量参数示例见附录 B。

### 8.2 标准样品及纯元素样品测量

根据所用仪器操作手册，在仪器软件相关界面上建立标准样品数据表。输入空白薄膜和薄膜标准样品（5.1）中各元素的标准值。按照优化后的测量条件（8.1）测量系列标准样品。薄膜标准样品的个数根据实验室条件可在 2~4 个之间选取（不包括空白滤膜），标样含量大致范围如下：0.5~2  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 、3~8  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 、15~25  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 、40~60  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 。

在相同测量条件下测量纯元素（5.2）的特征谱线扫描谱图。所有标准样品中相关元素强度及纯元素谱图应在同一批次测试中完成。

根据所用仪器提供的线性回归校正模型和程序对标准空白滤膜、系列薄膜标样的含量和强度进行回归分析，建立校准曲线，求出回归方程斜率并存储于计算机中。

### 8.3 样品测量

按照与标准样品相同的条件（8.2）测量空白滤膜和样品滤膜。通常采用全谱图拟合或特定峰面积积分两种方式获取强度。元素含量较低且无干扰时，可选区间谱峰净面积方式获取强度。目标元素存在干扰时，应采用全谱图拟合方法对重叠谱峰进行解析，扣除干扰峰的影响，得到目标元素特征谱峰强度。根据样品滤膜和空白滤膜中目标元素的强度和校准曲线的斜率计算滤膜样品中目标元素含量。

## 9 结果计算与表示

### 9.1 结果计算

颗粒物样品中元素含量按式（1）计算：

$$\rho = \frac{(I - I_0) \times A}{b \times V} \quad (1)$$

式中：

$A$  —滤膜上负载有颗粒物的面积（ $\text{cm}^2$ ）；

$I$  —样品滤膜中目标元素 X 射线荧光强度（cps 或 cps/mA）；

$I_0$  —空白滤膜中目标元素 X 射线荧光强度（cps 或 cps/mA）；

$b$  —校准曲线斜率 [ $\text{cps}/(\mu\text{g}/\text{cm}^2)$  或  $(\text{cps}/\text{mA})/(\mu\text{g}/\text{cm}^2)$ ]；

$V$  —标准状态下（273 K，101.325 Pa）采样体积（ $\text{m}^3$ ）；

$\rho$  —颗粒物样品中目标元素含量 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )。

## 9.2 结果表示

各元素测定结果小数点后的数字保留位数与方法检出限保持一致，测定结果最多保留 3 位有效数字。颗粒物样品检测结果也可以用  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$  表示。

## 10 精密度和准确度

10家实验室对统一提供的大气颗粒物标样、滤膜质控样品、具有不同颗粒物负载量的3个TSP样品（石英滤膜）、3个PM<sub>2.5</sub>样品（聚丙烯滤膜）和2个无组织排放颗粒物样品（石英滤膜），用X射线荧光光谱法测量。对测定结果进行数理统计，得到方法精密度（包括各元素测定值的实验室内相对标准偏差范围、实验室间相对标准偏差、重复性限和再现性限）和方法准确度（各元素测定值的相对误差范围和相对误差最终值），详见附录C。

## 11 质量保证和质量控制

### 11.1 滤膜空白

每批样品应至少分析 2 个与采样用滤膜同批次购得的空白滤膜试样。用于采集无组织排放颗粒物的滤膜空白试样中目标元素测定值不得大于目标元素排放标准限值的十分之一。否则，应适当增加采样量，使颗粒物中目标元素测定值明显高于滤膜空白值。用于采集环境空气颗粒物的空白滤膜中目标元素测定值应小于方法测定下限。

### 11.2 校准曲线

建立分析方法时的校准曲线可长期使用。每批样品测定前应核对校准曲线。以接近校准曲线中间含量的实验室质控样（或不同来源滤膜标样）进行分析确认，其相对误差应满足表 1 要求。否则，应重新建立校准曲线或校准偏移度。

表 1 质控样品中各元素实验室内测试准确度要求

元素	相对误差范围 (%)
Al、Si、K、Ca、Cr、Mn、Cu、Se、Sr、Ti、Fe、Ni、Zn、Co、Ba、Pb、Cl	-10~10
Na、Mg、As、Cd、Sn、Sb、S、P、V、Sc、Br	-20~20

### 11.3 精密度

如果颗粒物滤膜样品可重复测定（如石英滤膜样品、聚丙烯滤膜样品），每批样品应抽取 10% 的样品进行重复测定。样品数量少于 10 个时，应至少测定 1 个。当元素含量高于测定下限时，平行样测定结果相对偏差应满足表 2 要求。

表 2 各元素平行样测定精密度要求

元 素	相对偏差 (%)
Al、P、S、K、Ca、Zn	≤ 5
Mg、Si、Cl、Ti、Ni、Cr、Mn、Fe、Cu、Pb、As	≤ 10
Na、Co、Se、Sr、Cd、Sn、Sb、Sc、V、Br、Ba	≤ 20

#### 11.4 准确度

使用本方法标准时应通过分析薄膜标准样品进行方法验证。如果测量误差超过允许范围，则停止分析样品，查找原因。有条件时，可采用有证大气颗粒物标准样品进行验证。验证结果满足要求以后，才能继续进行分析。以后分析测定每批实际样品时可同时分析实验室质控样品（或不同来源滤膜标样），当元素含量高于测定下限时，实验室质控样品室内测试准确度应达到表 1 要求。

对混合元素薄膜标准样品（含 Al、Si、Fe、Pb、Cu、Zn、Ni、Mn、Cr 等元素）的测定可在每批样品测量前或全部样品完成测量后进行。其测定值与标准示值的相对误差应小于 10%。此标样和实验室质控样系列测定值均可用于绘制质控图并计算期间精密度。期间精密度数值乘以 2 可用于评估测量结果扩展不确定度。

如果实验室条件所限，可以考虑采用仪器厂家提供的标准样品进行验证。

#### 12 注意事项

ED-XRF 测定过程中，对于下照式仪器，为了防止颗粒物掉落在仪器内，有时需要在其滤膜样品表面覆盖一层 XRF 专用聚丙烯膜（6.7）保护仪器。如果在测定样品时有上述考虑，建立校准曲线测定标准样品强度时需采取上述同样措施，两者测量条件应保持一致。

薄膜标样根据支撑环的位置有两种模式可以选择。建议选择与实际样品测量面保持一致的模式，即 B 模式（5.1 注）。如果薄膜标样是 A 模式，应在实际滤膜样品表面上放一个与薄膜标样支撑环厚度一致的圆环。如果仪器是下照式，在样品杯内放入圆环后再放入滤膜样品，测量面向下；对于上照式，则在样品杯上先放入滤膜样品，测量面朝上，再放入圆环后固定，使实际样品与薄膜标样受 X 射线照射的距离保持一致。



附录 A  
(规范性附录)  
方法检出限和测定下限

表 A.1 各元素特征谱线、方法检出限和测定下限

元素	分析谱线	石英滤膜				聚丙烯滤膜			
		检出限		测定下限		检出限		测定下限	
		$\mu\text{g}/\text{cm}^2$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{cm}^2$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{cm}^2$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{cm}^2$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
Na	K $\alpha$	0.23	0.17	0.92	0.67	0.12	0.084	0.46	0.34
Mg	K $\alpha$	0.052	0.038	0.21	0.15	0.085	0.061	0.34	0.25
Al	K $\alpha$	0.063	0.046	0.25	0.18	0.043	0.031	0.17	0.12
Si	K $\alpha$	—	—	—	—	0.068	0.049	0.27	0.20
P	K $\alpha$	0.042	0.030	0.17	0.12	0.019	0.014	0.076	0.055
S	K $\alpha$	0.027	0.020	0.11	0.078	0.017	0.012	0.068	0.049
Cl	K $\alpha$	0.033	0.024	0.13	0.10	0.040	0.029	0.16	0.12
K	K $\alpha$	0.006	0.004	0.024	0.017	0.040	0.029	0.16	0.12
Ca	K $\alpha$	0.019	0.014	0.076	0.055	0.022	0.016	0.088	0.064
Sc	K $\alpha$	0.006	0.004	0.024	0.017	0.010	0.007	0.040	0.029
Ti	K $\alpha$	0.037	0.027	0.15	0.11	0.017	0.012	0.068	0.049
V	K $\alpha$	0.014	0.010	0.056	0.040	0.012	0.009	0.048	0.035
Cr	K $\alpha$	0.013	0.009	0.052	0.038	0.005	0.004	0.020	0.014
Mn	K $\alpha$	0.031	0.022	0.12	0.090	0.016	0.012	0.064	0.046
Fe	K $\alpha$	0.042	0.030	0.17	0.12	0.019	0.014	0.076	0.055
Co	K $\alpha$	0.020	0.014	0.080	0.058	0.008	0.006	0.032	0.023
Ni	K $\alpha$	0.015	0.011	0.060	0.043	0.004	0.003	0.016	0.012
Cu	K $\alpha$	0.012	0.009	0.048	0.035	0.010	0.007	0.040	0.029
Zn	K $\alpha$	0.024	0.017	0.10	0.069	0.006	0.004	0.024	0.017
As	K $\alpha$	0.023	0.017	0.092	0.066	0.032	0.023	0.13	0.093
Se	K $\alpha$	0.019	0.014	0.076	0.055	0.011	0.008	0.044	0.032
Br	K $\alpha$	0.007	0.005	0.028	0.020	0.012	0.009	0.048	0.035
Sr	K $\alpha$	0.050	0.036	0.20	0.14	0.026	0.019	0.10	0.075
Cd	L $\alpha$	0.51	0.37	2.0	1.5	0.063	0.046	0.25	0.18
Ba	L $\alpha$	0.043	0.031	0.17	0.12	0.031	0.022	0.12	0.090
Pb	L $\beta$ 1	0.041	0.030	0.16	0.12	0.029	0.021	0.12	0.084
Sn	L $\alpha$	0.028	0.020	0.11	0.081	0.14	0.10	0.55	0.40
Sb	L $\alpha$	0.097	0.070	0.39	0.28	0.13	0.10	0.53	0.39

注：以 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 表示的数据按滤膜上负载有颗粒物的圆直径为47mm、采样体积为 $24\text{m}^3$ 计算。

附录 B  
(资料性附录)  
ED-XRF 测量条件示例

表 B.1 ED-XRF 测量条件示例 1

元素	分组条件 编号	组条件 名称	X 射线管电压 及电流		二次靶	特定峰 (keV) 或谱图拟合			探测器	分析活时间 (秒)
			kV	mA		左边界	右边界	背景扣除		
Na	1	Mg	25	24	Al	0.991	1.090	Yes	高分辨	400
Mg	1	Mg	25	24	Al	1.203	1.304	Yes	高分辨	400
Al	2	Ca-Sc	40	15	Ti	谱图拟合			高分辨	200
Si	2	Ca-Sc	40	15	Ti	1.684	1.795	Yes	高分辨	200
P	2	Ca-Sc	40	15	Ti	谱图拟合			高分辨	200
S	2	Ca-Sc	40	15	Ti	谱图拟合			高分辨	200
Cl	2	Ca-Sc	40	15	Ti	谱图拟合			高分辨	200
K	2	Ca-Sc	40	15	Ti	谱图拟合			高分辨	200
Ca	2	Ca-Sc	40	15	Ti	谱图拟合			标准	200
Sc	2	Ca-Sc	40	15	Ti	谱图拟合			标准	200
Ti	3	Ti-Cr	40	15	Fe	谱图拟合			标准	200
V	3	Ti-Cr	40	15	Fe	4.863	5.035	Yes	标准	200
Cr	3	Ti-Cr	40	15	Fe	谱图拟合			标准	200
Mn	4	Cu-Zn	75	8	Ge	谱图拟合			标准	200
Fe	4	Cu-Zn	75	8	Ge	谱图拟合			标准	200
Co	4	Cu-Zn	75	8	Ge	6.824	7.022	Yes	标准	200
Ni	4	Cu-Zn	75	8	Ge	7.369	7.574	Yes	标准	200
Cu	4	Cu-Zn	75	8	Ge	谱图拟合			标准	200
Zn	4	Cu-Zn	75	8	Ge	谱图拟合			标准	200
Ga	5	Ga-As	90	6	KBr	谱图拟合			高强度	300
As	5	Ga-As	90	6	KBr	10.402	10.649	Yes	高强度	300
Se	6	Rb_Re-Tl	90	6	Zr	11.075	11.332	Yes	高强度	300
Br	6	Rb_Re-Tl	90	6	Zr	11.767	12.035	Yes	高强度	300
Sr	7	Xe-La	90	6	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.956	14.307	Yes	高强度	200
Ag	9	Pd-In	90	6	CsI	21.826	22.327	Yes	高强度	300
Cd	9	Pd-In	90	6	CsI	22.818	23.34	Yes	高强度	300
Sn	7	Xe-La	90	6	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24.873	25.443	Yes	高强度	200
Sb	7	Xe-La	90	6	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	25.937	26.534	Yes	高强度	200
Ba	7	Xe-La	90	6	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	31.63	32.382	Yes	高强度	200
Pb	6	Rb_Re-Tl	90	6	Zr	12.501	12.727	Yes	高强度	300

注：X 光管电流全自动调节；死时间 50%；特征谱线：Pb L<sub>β</sub>；其他元素均为 K<sub>α</sub>。

表 B.2 ED-XRF 测量条件示例 2

元素	分组条件名称	X 射线管电压及电流		测量时间 (s)	二次靶	特定峰 (keV) 或谱图拟合			探测器	最大能量 (keV)
		kV	mA			左边界	右边界	背景扣除		
Na	Mg	25	24	300	Al	0.993	1.088	Yes	高分辨	20
Mg	Si-K	40	15	300	CaF <sub>2</sub>	谱图拟合			高分辨	20
Al	Si-K	40	15	300	CaF <sub>2</sub>	谱图拟合			高分辨	20
Si	Si-K	40	15	300	CaF <sub>2</sub>	1.686	1.793	Yes	高分辨	20
P	Si-K	40	15	300	CaF <sub>2</sub>	谱图拟合			高分辨	20
S	Si-K	40	15	300	CaF <sub>2</sub>	2.204	2.394	Yes	高分辨	20
Cl	Si-K	40	15	300	CaF <sub>2</sub>	2.534	2.704	Yes	高分辨	20
K	Si-K	40	15	300	CaF <sub>2</sub>	3.200	3.400	Yes	高分辨	20
Ca	Ti-Cr	75	8	350	Fe	3.613	3.768	Yes	标准	20
Ti	Ti-Cr	75	8	350	Fe	谱图拟合			标准	20
V	Ti-Cr	75	8	350	Fe	谱图拟合			标准	20
Cr	Ti-Cr	75	8	350	Fe	谱图拟合			标准	20
Mn	Fe-Co	75	8	300	Cu	谱图拟合			标准	20
Fe	Fe-Co	75	8	300	Cu	谱图拟合			标准	20
Co	Fe-Co	75	8	300	Cu	谱图拟合			标准	20
Ni	Cu-Zn	75	8	300	Ge	谱图拟合			标准	20
Cu	Cu-Zn	75	8	300	Ge	7.899	8.173	Yes	标准	20
Zn	Cu-Zn	75	8	300	Ge	谱图拟合			标准	20
Ga	Ga-As	90	6	350	KBr	谱图拟合			高强度	20
As	Ga-As	90	6	350	KBr	谱图拟合			高强度	20
Se	Rb_Re-Tl	90	6	400	Zr	谱图拟合			高强度	20
Br	Rb_Re-Tl	90	6	400	Zr	谱图拟合			高强度	20
Rb	Rb_Re-Tl	90	6	400	Zr	谱图拟合			高强度	20
Sr	Xe-La	90	6	400	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	谱图拟合			高强度	80
Mo	Xe-La	90	6	400	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	谱图拟合			高强度	80
Cd	Xe-La	90	6	400	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	谱图拟合			高强度	80
Sb	Xe-La	90	6	400	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	谱图拟合			高强度	80
Te	Xe-La	90	6	400	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	谱图拟合			高强度	80
Cs	Xe-La	90	6	400	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	谱图拟合			高强度	80
Ba	Xe-La	90	6	400	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	谱图拟合			高强度	80
Pb	Xe-La	90	6	400	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.478	12.75	Yes	高强度	80

注：X 光管电流全自动调节；死时间 50%；特征谱线：Pb L<sub>β</sub>；其他元素均为 K<sub>α</sub>。

表 B.3 ED-XRF 测量条件示例 3

元素	X 射线管电压 及电流		滤光片	最大能量 (keV)	特定峰区间 (keV)	测量活时间 (秒)	死时间 (%)
	kV	μA					
Na	15	100-Auto		0-20	0.84~1.24	99	30
Mg	15	100-Auto		0-20	1.05~1.45	99	30
Al	15	100-Auto		0-20	1.29~1.69	99	30
Si	15	100-Auto		0-20	1.54~1.94	99	30
P	15	100-Auto		0-20	1/81~2.21	99	30
S	15	100-Auto		0-20	2.11~2.51	99	30
Cl	15	100-Auto	2#	0-20	2.42~2.82	99	30
K	15	100-Auto	2#	0-20	3.11~3.51	99	30
Ca	15	100-Auto	2#	0-20	3.49~3.89	99	30
Ti	50	100-Auto		0-40	4.30~4.70	99	30
V	50	100-Auto		0-40	4.74~5.14	99	30
Cr	50	100-Auto		0-40	5.22~5.62	99	30
Mn	50	100-Auto		0-40	5.70~6.10	99	30
Fe	50	100-Auto		0-40	6.20~6.60	99	30
Co	50	100-Auto		0-40	6.72~7.12	99	30
Ni	50	100-Auto	4#	0-40	7.28~7.68	99	30
Cu	50	100-Auto	4#	0-40	7.84~8.24	99	30
Zn	50	100-Auto	4#	0-40	8.44~8.84	99	30
As	50	100-Auto	4#	0-40	10.30~10.80	99	30
Se	50	100-Auto	4#	0-40	10.96~11.46	99	30
Sr	50	100-Auto	4#	0-40	13.90~14.40	99	30
Cd	50	100-Auto	1#	0-40	22.72~23.52	99	30
Ba	50	100-Auto	1#	0-40	31.54~32.54	99	30
Pb	50	100-Auto	4#	0-40	12.38~12.88	99	30
Sn	50	100-Auto	1#	0-40	24.80~25.60	99	30
Sb	50	100-Auto	1#	0-40	25.88~26.68	99	30

表 B.4 ED-XRF 测量条件示例 4

元素	X 射线管电压及电流		滤光片	测量活 时间(s)	特定峰区间 (keV)		强度计算 方法	用于谱图拟 合纯元素
	kV	μA			左边界	右边界		
Cl	25	1000	0.3mm 铝片	200	2.52	2.72	净面积	
K	25	1000	0.3mm 铝片	200	3.21	3.39	纯元素拟合	Ar、K
Ca	25	1000	0.3mm 铝片	200	3.60	3.79	净面积	
Sc	25	1000	0.3mm 铝片	200	4.00	4.20	净面积	
Ti	25	1000	0.3mm 铝片	200	4.41	4.62	纯元素拟合	Sc、Ti、Ba
V	25	1000	0.3mm 铝片	200	4.85	5.07	纯元素拟合	Ti、V、Ba
Cr	25	1000	0.3mm 铝片	200	5.31	5.56	纯元素拟合	V、Cr
Mn	25	1000	0.3mm 铝片	200	5.80	6.00	纯元素拟合	Cr、Mn
Fe	25	1000	0.3mm 铝片	200	6.30	6.51	纯元素拟合	Mn、Fe
Co	48	1000	0.1mm 银片	200	6.82	7.04	纯元素拟合	Fe、Co
Ni	48	1000	0.1mm 银片	200	7.36	7.59	净面积	
Cu	48	1000	0.1mm 银片	200	7.93	8.16	净面积	
Zn	48	1000	0.1mm 银片	200	8.51	8.75	净面积	
Ga	48	1000	0.1mm 银片	200	9.12	9.37	净面积	
As	48	1000	0.1mm 银片	200	11.57	11.86	纯元素拟合	As、Br、Hg、Pb
Se	48	1000	0.1mm 银片	200	11.07	11.33	净面积	
Br	48	1000	0.1mm 银片	200	11.76	12.03	纯元素拟合	As、Br、Hg
Sr	48	1000	0.1mm 银片	200	13.97	14.28	净面积	
Mo	48	1000	0.1mm 银片	200	17.24	17.60	净面积	
Pd	48	1000	0.3mm 铜片	200	20.88	21.30	净面积	
Ag	48	1000	0.3mm 铜片	200	21.84	22.29	净面积	
Cd	48	1000	0.3mm 铜片	200	22.84	23.29	净面积	
Sn	48	1000	0.3mm 铜片	200	24.88	25.40	净面积	
Sb	48	1000	0.3mm 铜片	200	25.93	26.51	净面积	
Te	48	1000	0.3mm 铜片	200	27.00	27.63	净面积	
Cs	25	1000	0.3mm 铝片	200	4.19	4.39	净面积	
Ba	25	1000	0.3mm 铝片	200	4.75	4.97	纯元素拟合	Ti、Ba
Hg	48	1000	0.1mm 银片	200	9.85	10.10	净面积	
Tl	48	1000	0.1mm 银片	200	10.12	10.38	纯元素拟合	As、Tl、Pb
Pb	48	1000	0.1mm 银片	200	12.47	12.75	净面积	

表 B.5 ED-XRF 测量条件示例 5

元素	特征谱线	分组条件编号	X 射线管电压 (kV)	滤光片	测量活时间 (s)
Na	K $\alpha$	1	20		200
Mg	K $\alpha$	1	20		200
Al	K $\alpha$	1	20		200
Si	K $\alpha$	1	20		200
P	K $\alpha$	1	20		200
S	K $\alpha$	1	20		200
Cl	K $\alpha$	1	20		200
K	K $\alpha$	2	50	25 $\mu$ m Ti	200
Ca	K $\alpha$	2	50	25 $\mu$ m Ti	200
Sc	K $\alpha$	2	50	25 $\mu$ m Ti	200
Ti	K $\alpha$	2	50	25 $\mu$ m Ti	200
V	K $\alpha$	2	50	25 $\mu$ m Ti	200
Cr	K $\alpha$	2	50	25 $\mu$ m Ti	200
Mn	K $\alpha$	2	50	25 $\mu$ m Ti	200
Fe	K $\alpha$	2	50	25 $\mu$ m Ti	200
Co	K $\alpha$	2	50	25 $\mu$ m Ti	200
Ni	K $\alpha$	2	50	25 $\mu$ m Ti	200
Cu	K $\alpha$	2	50	25 $\mu$ m Ti	200
Zn	K $\alpha$	3	50	500 $\mu$ m Al	200
Ga	K $\alpha$	3	50	500 $\mu$ m Al	200
As	K $\alpha$	3	50	500 $\mu$ m Al	200
Se	K $\alpha$	3	50	500 $\mu$ m Al	200
Sr	K $\alpha$	3	50	500 $\mu$ m Al	200
Cd	L $\alpha$	2	50	25 $\mu$ m Ti	200
Ba	L $\alpha$	2	50	25 $\mu$ m Ti	200
Pb	L $\beta_1$	3	50	500 $\mu$ m Al	200
Sn	L $\alpha$	2	50	25 $\mu$ m Ti	200
Sb	L $\alpha$	2	50	25 $\mu$ m Ti	200

注：自动调节 X 射线管电流，以达到总计数率为 100 kcps。

表 B.6 ED-XRF 测量条件示例 6

元素及分组	特征谱线	X 射线管电压(kV)	滤光片	测量活时间 (s)
Cl	K $\alpha$	8	0.1mm Al	200
K、Ca、Sc、Ti、V、Cr	K $\alpha$	20	0.4mm Al	200
Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、Ga、As、Se、Br、Sr、Mo	K $\alpha$	35	0.4mm Ti	100
I、Ba、Hg、Tl、Bi	L $\alpha$			
Pb	L $\beta_1$			
Pd、Ag、Cd、Sn、Sb	K $\alpha$	50	3.0mm Ti	400

注：风冷端窗 Mo 靶，薄铍窗 X 射线管，最大管电压 50kV，最大管电流 2000 $\mu$ A 可调，最大功率 50W，探测器死时间<30%，滤光片包括 0.1mm Al、0.4mm Al、0.4mm Ti、3.0mm Ti 四种。

表 B.7 ED-XRF 测量条件示例 7

元素及分组	组名	X 射线管		滤光片	介质	探测器	测量活时间 (s)
		电压(kV)	电流( $\mu$ A)				
Na、Mg	<F-Si>	5	3000		氦气	高分辨	300
Al、Si、P、S、Cl	<P-Cl>	9	1660	Ti	氦气	高分辨	300
K、Ca、Sc、Ti、V、Cr、Co、Fe、Mn、Ba	<Cr-Co>	16	930	Al-50	空气	标准	300
Cu、Ni、Zn、Pb、Se、Sr、Br、As	<Ni-Mo>	50	300	Ag	空气	标准	300
Cd、Sn、Sb	<Tc-Sb>	50	300	Cu-500	空气	标准	300

注：Pb L $\beta$ ；其他元素均为 K $\alpha$ 。

## 附录 C

(资料性附录)

## 方法精密度和方法准确度

表 C.1 方法精密度汇总表 ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ )

元素	样品编号	平均值	测定下限	实验室内相对标准偏差范围 (%)	实验室内相对标准偏差 (%)	重复性限 $r$	再现性限 $R$
Na	TSP 1#	1.28	0.92	0.34~9.2	18	0.16	0.67
	TSP 5#	1.72		0.91~7.2	7.7	0.16	0.41
	TSP 13#	0.69		0.61~13	19	0.13	0.40
	TSP H6#	1.15		0.32~6.9	15	0.11	0.51
	TSP 154#	1.01		0.71~8.9	25	0.13	0.73
Mg	TSP 1#	4.08	0.21	0.22~5.4	10	0.29	1.2
	TSP 5#	4.42		0.53~7.3	15	0.26	1.8
	TSP 13#	2.26		0.41~6.2	3.9	0.22	0.34
	TSP H6#	2.66		0.36~10	26	0.29	2.0
	TSP 154#	1.37		0.40~3.7	19	0.07	0.72
Al	TSP 1#	11.7	0.25	0.16~4.6	9.5	0.6	3.1
	TSP 5#	12.6		0.39~5.5	14	0.3	4.9
	TSP 13#	7.83		0.13~1.1	12	0.11	2.7
	TSP H6#	12.8		0.14~3.5	11	0.6	3.9
	TSP 154#	6.13		0.11~1.0	26	0.12	4.5
Si	PM <sub>2.5</sub> 2#	6.94	0.27	0.45~5.7	5.6	0.45	1.2
	PM <sub>2.5</sub> 9#	1.70		0.23~2.1	12	0.07	0.57
	PM <sub>2.5</sub> 14#	0.794		0.49~5.4	14	0.048	0.31
P	TSP 1#	0.423	0.17	0.60~9.4	42	0.019	0.51
	TSP 5#	0.399		0.65~1.5	31	0.015	0.55
	TSP 13#	0.198		0.51~1.4	27	0.006	0.15
	TSP H6#	0.839		0.55~1.3	31	0.020	0.74
	TSP 154#	0.270		0.55~1.6	22	0.008	0.21
S	TSP 1#	2.92	0.11	0.08~0.81	7.5	0.04	0.62
	TSP 5#	20.3		0.14~1.1	5.4	0.3	3.1
	TSP 13#	1.90		0.22~1.3	5.0	0.04	0.27
	TSP H6#	19.2		0.06~1.8	13	0.4	7.3
	TSP 154#	9.50		0.10~0.88	5.0	0.10	1.3
Cl	TSP 1#	4.49	0.13	0.32~2.4	12	0.14	1.6
	TSP 5#	11.6		0.18~0.94	10	0.2	3.4
	TSP 13#	0.527		0.21~8.3	9.6	0.050	0.15
	TSP H6#	5.99		0.22~0.82	6.5	0.09	1.1
	TSP 154#	5.69		0.24~2.1	7.6	0.16	1.2
K	TSP 1#	8.47	0.024	0.15~1.7	11	0.16	3.0
	TSP 5#	17.5		0.09~1.5	6.8	0.4	3.4
	TSP 13#	4.32		0.22~1.2	8.4	0.07	1.0
	TSP H6#	27.9		0.10~0.49	4.7	0.2	3.7



元素	样品编号	平均值	测定下限	实验室内相对标准偏差范围 (%)	实验室间相对标准偏差 (%)	重复性限 $r$	再现性限 $R$
	TSP 154#	26.6		0.12~1.2	4.1	0.4	3.1
Ca	TSP 1#	44.4	0.076	0.24~1.7	5.7	1.0	7.3
	TSP 5#	75.0		0.06~1.1	4.6	1.2	9.8
	TSP 13#	21.0		0.10~1.3	4.5	0.4	2.7
	TSP H6#	72.7		0.09~1.1	5.2	1.1	11
	TSP 154#	42.9		0.09~0.89	11	0.6	13
Sc	TSP 1#	0.021	0.024	10~245	—	0.061	0.14
	TSP 5#	0.028		6.6~171	—	0.016	0.14
	TSP 13#	0.010		27~80	—	0.052	0.082
	TSP H6#	0.034		4.6~37	—	0.059	0.16
	TSP 154#	0.019		20~59	—	0.055	0.10
Ti	TSP 1#	1.97	0.15	0.35~1.6	7.8	0.06	0.44
	TSP 5#	2.88		0.28~1.4	11	0.06	0.73
	TSP 13#	1.07		0.67~3.0	10	0.04	0.42
	TSP H6#	1.86		0.56~2.2	13	0.06	0.67
	TSP 154#	0.603		0.80~5.1	31	0.038	0.53
V	TSP 1#	0.058	0.056	7.2~23	11	0.023	0.030
	TSP 5#	0.153		2.5~11	11	0.027	0.057
	TSP 13#	0.026		9.7~64	—	0.021	0.038
	TSP H6#	0.066		3.9~34	21	0.027	0.048
	TSP 154#	0.034		12~47	—	0.028	0.044
Cr	TSP 1#	0.090	0.052	0.65~16	14	0.023	0.034
	TSP 5#	0.274		1.2~5.2	7.3	0.024	0.064
	TSP 13#	0.037		6.1~37	21	0.019	0.029
	TSP H6#	0.058		3.7~21	23	0.023	0.044
	TSP 154#	0.020		6.6~84	29	0.023	0.028
Mn	TSP 1#	0.747	0.12	0.43~2.8	6.6	0.040	0.15
	TSP 5#	1.55		0.67~2.5	4.0	0.06	0.17
	TSP 13#	0.332		1.0~3.1	5.6	0.021	0.053
	TSP H6#	0.800		0.36~1.6	7.0	0.027	0.16
	TSP 154#	0.311		1.2~5.8	15	0.025	0.13
Fe	TSP 1#	24.3	0.17	0.15~1.0	8.5	0.4	6.2
	TSP 5#	57.0		0.11~1.0	7.1	1.7	12
	TSP 13#	12.1		0.15~5.4	7.8	0.7	2.7
	TSP H6#	26.5		0.11~2.5	9.8	0.7	7.3
	TSP 154#	8.30		0.14~3.0	16	0.24	3.6
Co	TSP 1#	0.032	0.080	8.3~140	—	0.028	0.057
	TSP 5#	0.068		3.1~27	—	0.027	0.14
	TSP 13#	0.014		3.8~182	—	0.015	0.032
	TSP H6#	0.039		4.1~33	—	0.024	0.097
	TSP 154#	0.007		9.1~245	—	0.008	0.030
Ni	TSP 1#	0.053	0.060	3.2~15	11	0.013	0.020
	TSP 5#	0.180		1.4~4.4	8.6	0.015	0.047
	TSP 13#	0.036		4.4~25	16	0.015	0.022

元素	样品编号	平均值	测定下限	实验室内相对标准偏差范围 (%)	实验室间相对标准偏差 (%)	重复性限 $r$	再现性限 $R$
	TSP H6#	0.040		6.0~34	23	0.015	0.030
	TSP 154#	0.018		5.2~52	—	0.013	0.026
Cu	TSP 1#	0.202	0.048	1.2~12	6.1	0.027	0.044
	TSP 5#	0.390		0.53~5.3	6.3	0.027	0.075
	TSP 13#	0.076		0~5.7	11	0.009	0.026
	TSP H6#	9.56		0.07~0.73	5.1	0.091	1.4
	TSP 154#	1.41		0.17~1.9	8.6	0.04	0.35
Zn	TSP 1#	0.891	0.10	0.32~2.6	7.3	0.038	0.19
	TSP 5#	6.06		0.23~1.3	2.6	0.12	0.46
	TSP 13#	0.110		2.2~24	9.5	0.030	0.042
	TSP H6#	7.27		0.11~1.2	5.2	0.14	1.05
	TSP 154#	3.74		0.27~1.3	5.2	0.071	0.55
As	TSP 1#	0.017	0.092	12~85	—	0.041	0.048
	TSP 5#	0.059		4.0~28	12	0.035	0.040
	TSP 13#	0.009		17~245	—	0.035	0.042
	TSP H6#	1.73		0.49~5.5	21	0.14	1.0
	TSP 154#	1.31		0.57~6.0	24	0.09	0.89
Se	TSP 1#	0.005	0.076	46~180	—	0.013	0.014
	TSP 5#	0.073		3.9~9.5	—	0.015	0.030
	TSP 13#	0.004		77~310	—	0.006	0.008
	TSP H6#	0.094		2.1~16	—	0.035	0.17
	TSP 154#	0.022		14~115	—	0.031	0.031
Br	TSP 1#	0.047	0.028	4.1~14	8.5	0.015	0.019
	TSP 5#	0.231		2.0~6.1	11	0.023	0.074
	TSP 13#	0.014		12~94	6.9	0.016	0.017
	TSP H6#	0.310		1.8~3.0	36	0.021	0.32
	TSP 154#	0.130		2.3~5.0	—	0.019	0.20
Sr	TSP 1#	0.265	0.20	1.6~14	14	0.048	0.11
	TSP 5#	0.419		1.1~11	9.1	0.063	0.13
	TSP 13#	0.111		4.9~17	15	0.031	0.055
	TSP H6#	0.294		1.5~15	16	0.069	0.15
	TSP 154#	0.091		5.1~35	15	0.049	0.063
Cd	TSP 1#	0.01	2.0	41~245	—	0.03	0.04
	TSP 5#	0.04		12~245	—	0.07	0.10
	TSP 13#	0.01		33~245	—	0.02	0.03
	TSP H6#	0.88		0.79~13	47	0.19	1.2
	TSP 154#	0.03		16~172	—	0.05	0.06
Ba	TSP 1#	0.38	0.17	3.2~12	10	0.06	0.13
	TSP 5#	0.53		2.0~9.3	12	0.08	0.20
	TSP 13#	0.13		8.1~24	23	0.06	0.10
	TSP H6#	0.24		0~20	14	0.08	0.12
	TSP 154#	0.07		16~47	17	0.05	0.06
Pb	TSP 1#	0.240	0.16	3.1~10	8.6	0.038	0.070
	TSP 5#	3.04		0.50~2.9	7.3	0.11	0.64

元素	样品编号	平均值	测定下限	实验室内相对标准偏差范围 (%)	实验室间相对标准偏差 (%)	重复性限 $r$	再现性限 $R$
	TSP 13#	0.045		12~51	16	0.041	0.047
	TSP H6#	58.1		0.19~1.9	4.4	1.2	7.2
	TSP 154#	5.94		0.23~3.7	8.2	0.20	1.4
Sn	TSP 1#	0.016	0.11	18~321	—	0.039	0.046
	TSP 5#	0.032		6.1~161	—	0.090	0.097
	TSP 13#	0.006		34~245	—	0.028	0.029
	TSP H6#	0.12		5.5~77	—	0.17	0.25
	TSP 154#	0.013		13~181	—	0.029	0.035
Sb	TSP 1#	0.082	0.39	1.2~126	—	0.093	0.24
	TSP 5#	0.15		1.6~155	—	0.22	0.42
	TSP 13#	0.042		6.1~185	—	0.094	0.15
	TSP H6#	1.48		0.88~21	26	0.36	1.2
	TSP 154#	1.42		0.93~20	17	0.38	0.79

注：样品 1#、5#、13#、2#、9#、14#为环境空气颗粒物样品，H6#、154#为无组织排放颗粒物样品。元素 Si 测试数据基于采集在聚丙烯滤膜的环境空气 PM<sub>2.5</sub> 样品，其他元素为石英滤膜上的 TSP 样品测试数据。

表 C.2 方法准确度汇总表 ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ )

元素	标样类型	标准值	测定下限	测定结果 平均值	相对误差平均值及范围(%)		
					$\overline{RE}$	$\pm 2S_{RE}$	范围
Na	SRM 2783	0.187±0.010	0.46	0.154	-15	80	-50~59
Mg	SRM 2783	0.865±0.052	0.34	0.698	-24	37	-50~0.2
	NIOH 滤膜标样	0.851±0.040		0.653	-23	28	-39~1.3
Al	SRM 2783	2.33±0.05	0.17	2.14	-9.2	37	-31~36
Si	SRM 2783	5.88±0.16	0.27	5.16	-11	21	-27~1.4
S	SRM 2783	0.105±0.026	0.068	0.116	15	61	-23~70
K	SRM 2783	0.530±0.052	0.16	0.504	-4.8	12	-18~6.2
Ca	SRM 2783	1.33±0.17	0.088	1.24	2.1	41	-31~53
Sc	SRM 2783	0.000±0.000	0.040	0.001	—	—	—
Ti	SRM 2783	0.150±0.024	0.068	0.159	5.9	41	-20~47
	NIOH 滤膜标样	4.13±0.02		3.70	-10	38	-39~25
V	SRM 2783	0.005±0.001	0.048	0.006	—	—	—
	NIOH 滤膜标样	3.82±0.01		2.10	-45	16	-55~-32
Cr	SRM 2783	0.014±0.003	0.020	0.017	19	123	-50~150
	NIOH 滤膜标样	5.33±0.03		5.22	-2.0	47	-31~58
Mn	SRM 2783	0.032±0.001	0.064	0.026	-15	76	—
	NIOH 滤膜标样	16.7±0.1		16.6	-0.5	28	-19~32
Fe	SRM 2783	2.66±0.16	0.076	2.64	-2.3	14	-10~14
	NIOH 滤膜标样	58.2±0.3		52.4	-9.9	29	-36~13
Co	SRM 2783	0.001±0.000	0.032	0.002	—	—	—
	NIOH 滤膜标样	4.16±0.02		3.85	-7.5	20	-21~7.0
Ni	SRM 2783	0.007±0.001	0.016	0.008	—	—	—
	NIOH 滤膜标样	6.73±0.03		6.35	-5.7	20	-15~12
Cu	SRM 2783	0.041±0.004	0.040	0.039	4.6	64	-34~61
	NIOH 滤膜标样	8.36±0.04		7.94	-5.0	28	-20~29
Zn	SRM 2783	0.180±0.013	0.024	0.188	7.3	32	-6.7~48
	NIOH 滤膜标样	25.2±0.1		24.9	-1.3	16	-11~12
As	SRM 2783	0.001±0.000	0.13	0.004	—	—	—
	NIOH 滤膜标样	0.851±0.000		0.674	-21	56	-55~32
Sr	NIOH 滤膜标样	3.93±0.02	0.10	4.06	3.3	11	-4.1~13
Cd	NIOH 滤膜标样	1.67±0.01	0.25	1.36	-18	56	-50~28
Ba	SRM 2783	0.034±0.005	0.12	0.028	-23	110	—
	NIOH 滤膜标样	4.18±0.00		3.88	-7.3	29	-28~14
Pb	SRM 2783	0.032±0.005	0.12	0.034	2.3	58	—
	NIOH 滤膜标样	4.12±0.02		4.44	7.8	30	-12~43
Sn	NIOH 滤膜标样	4.21±0.02	0.55	3.38	-20	39	-40~3.1
Sb	SRM 2783	0.007±0.000	0.53	0.010	—	—	—
	NIOH 滤膜标样	4.18±0.02		3.50	-16	58	-50~19

注：大气颗粒物标样（SRM 2783）、NIOH 滤膜标样分别由美国标准研究院（NIST）和美国职业健康研究所（NIOH）提供。