

# 大气颗粒物来源解析技术指南

(试 行)

## 第一章 总 则

### 1.1 编制目的

为贯彻落实《国务院关于加强环境保护重点工作的意见》和《大气污染防治行动计划》，推进我国大气污染防治工作的进程，增强大气颗粒物污染防治工作的科学性、针对性和有效性，根据《中华人民共和国环境保护法》、《中华人民共和国大气污染防治法》、《环境空气质量标准》（GB 3095-2012）及相关法律、法规、标准、文件，编制《大气颗粒物来源解析技术指南（试行）》（以下简称“指南”）。

### 1.2 适用范围

1.2.1 本指南适用于指导城市、城市群及区域开展大气颗粒物（ $PM_{10}$ 和 $PM_{2.5}$ ）来源解析工作。

1.2.2 本指南内容包括开展大气颗粒物来源解析工作的主要技术方法、技术流程、工作内容、技术要求、质量管理等方面。

### 1.3 编制依据

《中华人民共和国环境保护法》

《中华人民共和国大气污染防治法》

《国务院办公厅转发环境保护部等部门关于推进大气污染联防

联控工作改善区域空气质量的指导意见的通知》

《重点区域大气污染防治“十二五”规划》

GB 3095-2012 环境空气质量标准

GB/T 14506.30-2010 硅酸盐岩石化学分析方法 第30部分：44个元素量测定

GB/T 14506.28-2010 硅酸盐岩石化学分析方法 第28部分：16个主次成分量测定

国家环境保护总局公告2007年第4号 关于发布《环境空气质量监测规范》（试行）的公告

HJ 618-2011 环境空气PM<sub>10</sub>和PM<sub>2.5</sub>的测定 重量法

HJ/T 194-2005 环境空气质量手工监测技术规范

HJ/T 393-2007 防治城市扬尘污染技术规范

当上述标准和文件被修订时，使用其最新版本。

#### 1.4 术语与定义

下列术语和定义适用于本指南。

**颗粒物污染源：**向大气环境中排放固态颗粒污染物的排放源统称颗粒物污染源。

**环境受体：**受到大气污染物污染的环境空气统称环境受体，简称受体。

**大气颗粒物来源解析：**通过化学、物理学、数学等方法定性或定量识别环境受体中大气颗粒物污染的来源。

**大气颗粒物来源解析技术方法：**用于开展大气颗粒物来源解析的技术方法，主要包括源清单法、源模型法和受体模型法。

**源清单法：**根据排放因子及活动水平估算污染物排放量，据此排放量识别对环境空气中颗粒物有贡献的主要排放源。

**源模型法：**以不同尺度数值模式方法定量描述大气污染物从源到受体所经历的物理化学过程，定量估算不同地区和不同类别污染源排放对环境空气中颗粒物的贡献。

**受体模型法：**从受体出发，根据源和受体颗粒物的化学、物理特征等信息，利用数学方法定量解析各污染源类对环境空气中颗粒物的贡献。

**颗粒物源成分谱：**污染源排放特定粒径段颗粒物的化学组成特征。

**共线性源：**化学成分谱相似的颗粒物排放源。

**颗粒物开放源：**各种不经过燃烧或其它工艺过程、无组织、无规则排放的颗粒物源，具有源强不确定、排放随机等特点，比如扬尘。

## 1.5 指导原则

(1) 科学实用性原则：在确保大气颗粒物来源解析工作科学性与规范性的同时，应注重颗粒物污染来源与成因的精细化诊断，增强为污染防治决策服务的针对性和可操作性；

(2) 标本兼治原则：既要满足城市与区域环境空气质量达标的长期需求，又要服务于重污染事件的源识别、预警与应急控制措施制定。以大气颗粒物来源解析常态化工作为重点，同时加强对重污染过程污染来源的解析；

(3) 因地制宜与循序渐进原则：各地根据自身污染特征、基本条件和污染防治目标，结合社会发展水平与技术可行性，科学选择适合当地实际的源解析技术方法；随着源解析技术进步与环境信息

资料的完备，不断完善和更新源解析结果。

## 1.6 组织编制单位

本指南由环境保护部科技标准司组织，南开大学、中国环境科学研究院、中国科学院大气物理研究所、北京工业大学、北京大学等单位起草编制。

## 第二章 大气颗粒物来源解析技术方法的适用性

制定环境空气质量达标规划和重污染天气应急方案，要以颗粒物来源解析结果为依据。各地应根据“标本兼治”、“因地制宜与循序渐进”原则，结合环境管理目标、需求，以及开展颗粒物来源解析工作所需的基础条件（基础数据、技术能力等），选择适合实际情况的大气颗粒物来源解析技术方法。

目前大气颗粒物来源解析技术方法主要包括源清单法、源模型法和受体模型法。大气颗粒物来源解析技术方法的适用性见表1。

表1 主要大气颗粒物来源解析技术方法的适用性

技术方法	优势和局限性	必备条件	可达目标
源清单法	方法简单、易操作，定性或半定量识别有组织污染源	收集统计基准年研究区域各污染源污染物排放量	得到排放源清单及重点排放区域和重点排放源的污染物排放量
源模型法	定量识别污染的本地和区域来源，可预测；解析源强未知的源类尤其是颗粒物开放源贡献困难	建立与源模型要求相适应的高时间和高空空间分辨率的排放源清单、气象要素场	定量解析本地和区域各类源的贡献；针对具有可靠排放源清单的点源，定量给出贡献值与分担率；对于面源和线源，定量解析各源类的贡献

技术方法	优势和局限性	必备条件	可达目标
受体模型法	可有效解析开放源贡献；定量解析污染源类，不依赖详细的源强信息和气象场；不可预测	采集颗粒物样品，分析颗粒物化学组成	定量解析各污染源类，尤其是源强难以确定的各颗粒物开放源类的贡献值与分担率，识别主要排放源类的来向
源模型与受体模型联用	定量解析污染源的贡献；工作量大，成本高	建立高分辨率的排放源清单和气象要素场；采集颗粒物样品	定量给出污染源贡献值与分担率，定量解析出本地和区域各类源的贡献

解析常态污染下颗粒物的来源，为制定长期颗粒物污染防治方案提供支撑，建议使用受体模型；细颗粒物（PM<sub>2.5</sub>）污染突出的城市或区域，建议受体模型和源模型联用。

解析重污染天气下颗粒物污染的来源，为颗粒物重污染应急响应决策提供支撑，建议受体模型和源模型联用；同时基于在线高时间分辨率的监测和模拟技术，开展快速源识别。

评估颗粒物污染的长期变化趋势和控制效果，建议使用受体模型。

评估多污染物协同控制的环境效益，建议使用源模型。

对于大气污染防治工作基础较好的重点区域，如京津冀地区等，建议在动态更新污染源清单的基础上，采用源模型和受体模型联用解析本地和区域的颗粒物来源；其他城市或区域根据自身条件，以受体模型为基础开展颗粒物来源解析工作，并逐步建立颗粒物源成分谱、详细的动态源排放清单和模型联用的方法体系。

### 第三章 大气颗粒物来源解析技术方法

大气颗粒物来源解析技术方法主要包括源清单法、源模型法和

受体模型法（图 1）。

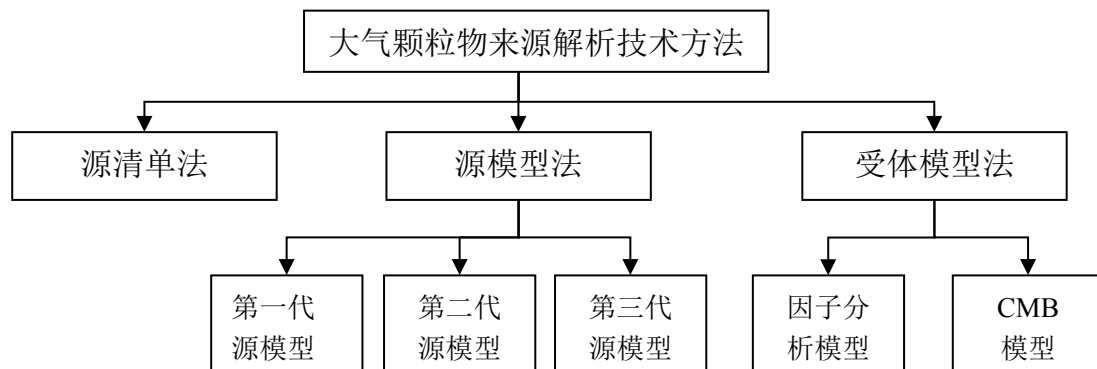


图 1 大气颗粒物来源解析技术方法

### 3.1 源清单技术方法

源清单技术方法的技术流程（附图 1）包括：

#### （1）颗粒物排放源分类

应按照环境管理需求对颗粒物排放源进行分类。一般可将颗粒物排放源分为固定燃烧源、生物质开放燃烧源、工业工艺过程源、移动源。其中，固定燃烧源包括电力、工业和民用等，以及煤炭、柴油、煤油、燃料油、液化石油气、煤气、天然气等燃料类型。工业工艺过程源包括冶金、建材、化工等行业。

#### （2）颗粒物排放源清单的建立

调查各类颗粒物源的排放特征（包括位置、排放高度、燃料消耗、工况、控制措施等），根据排放因子和活动水平确定颗粒物排放源的排放量，建立颗粒物排放源清单。颗粒物排放因子应通过实测或文献调研获取，可参考《工业污染物产生和排放系数手册》及常用的国内实测排放因子数据。

### **(3) 定性或半定量识别主要颗粒物排放源**

根据颗粒物源排放清单，统计颗粒物排放总量及各区域、各行业、各类颗粒物排放量，计算重点排放区域、重点排放源对当地颗粒物排放总量的分担率。

## **3.2 源模型技术方法**

源模型技术方法的技术流程（附图 2）包括：

### **(1) 选择空气质量模型**

利用源模型进行来源解析，应根据模式的适用范围、对模型参数的要求及环境管理的需求进行合理选择。建议依据拟进行源解析的地域范围选择适合的空气质量模型，小尺度采用简易模型，城市和区域尺度采用复杂模型。

简易模型：模拟的物理过程较为简单，对于颗粒物，仅可粗略模拟一次污染源排放的颗粒物的扩散和干湿沉降，建议采用《环境影响评价技术导则 大气环境》（HJ 2.2—2008）推荐的模型：AERMOD、ADMS、CALPUFF。

复杂模型：为第三代空气质量模型，在各污染源排放量（或排放强度）确定的前提下，此类模型包含了污染源追踪模块，可较好模拟颗粒物在大气中的扩散、生成、转化、清除等过程。代表性模式有 Models-3/CMAQ、NAQPMS、CAMx、WRF-chem 等。

### **(2) 建立高分辨率的排放源清单**

简易模型排放源清单的编制参照《环境影响评价技术导则 大气环境》（HJ 2.2—2008）空气质量模型使用说明中有关排放清单的编制要求。

复杂模型应建立多化学组份（包括  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{NH}_3$ 、 $\text{BC}$ 、 $\text{OC}$ 、 $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{VOCs}$  等，其中  $\text{VOCs}$  依据复杂模型所采用的化学反应机制进行物种分配）、高空间分辨率（水平嵌套网格内层分辨率不低于  $3\text{km} \times 3\text{km}$ ）、高时间分辨率（反映各类排放源季、月、日、小时变化规律）的排放源清单。

### **(3) 空气质量模型的模拟计算**

根据选定的空气质量模型要求，输入相应分辨率的地形高程、下垫面特征及环境参数。利用 MM5、WRF 等气象模式为空气质量模型系统提供三维气象要素场（水平方向嵌套网格内层分辨率不低于  $3\text{km} \times 3\text{km}$ ，垂直方向边界层内分层不少于 10 层）。利用大气污染物环境背景值或实际监测资料作为模型运算初始条件，模型外层网格污染物浓度模拟结果作为内层网格的边界条件。收集模拟区域内各类监测数据进行模型结果校验。采用复杂模型内置的敏感性评估模块、源追踪模块、源开关法等，模拟建立颗粒物源排放与受体之间的对应关系，获得各地区各类污染源排放对环境浓度的贡献。

## **3.3 受体模型技术方法**

受体模型主要包括化学质量平衡模型（CMB）和因子分析类模型（PMF、PCA/MLR、UNMIX、ME2 等）。国内外广泛应用的是 CMB 模型和 PMF 模型。

### **3.3.1 化学质量平衡模型（CMB）模型**

化学质量平衡模型（CMB）不依赖详细的排放源强信息和气象资料，能够定量解析源强难以确定的源类比如扬尘源类的贡献，解析



结果具有明确物理意义。CMB 模型的技术流程见附图 3。

### 3.3.1.1 颗粒物源类调查、识别及主要排放源类的确定

调查固定源、移动源、开放源、餐饮油烟源、生物质燃烧源以及二次粒子的前体物排放源等，建立颗粒物污染源类排放基础数据库，识别颗粒物污染的主要排放源类，确定需要采集和分析的源类样品种类、点位和数量。

### 3.3.1.2 颗粒物源类和受体样品的采集及化学分析

#### (1) 颗粒物源样品采集

采集固定源、移动源、开放源、餐饮源与生物质燃烧源等源类样品，其中具有明显地域特点的颗粒物源类（扬尘源、土壤尘源、当地特殊行业源等）必须采集，其他源类可根据各地实际情况确定是否采集或应用已有颗粒物源谱。

所采集样品的种类和数量能代表研究区域污染源排放的时空分布特征。扬尘采样布点结合受体采样点的空间分布，每个受体采样点周边采集不少于 3 个样品；土壤尘采样根据城市建成区及周边 10km 范围内裸土类型的分布布点，一般不少于 10 个样品；道路尘根据《防治城市扬尘污染技术规范》的要求采集；燃煤尘的采集应涵盖研究区域内不同燃烧方式、不同除尘方式、不同煤质等的燃煤源，每种不同方式不少于 3 个样品；其他源类每类不少于 5 个样品。

采集的颗粒物样品能够反映由源向环境受体排放时的物理过程，能够与环境受体颗粒物的特定粒径段相匹配。

源样品采样方法主要包括：

**开放源再悬浮采样法** 对于土壤尘、城市扬尘等开放源类，可利

用再悬浮采样器进行特定粒径源样品的采集。

**固定源稀释通道采样法** 对于固定燃煤源燃烧产生的颗粒物推荐采用烟道气稀释通道进行采样。

**移动源采样法** 对于机动车源样品可通过隧道采样。在足够长的交通隧道（不少于 1000m）内，在隧道中段位置设置大气颗粒物采样器，使用与受体采样相同的方式进行滤膜采样；或选取具有代表性的车型（包括汽油车、柴油车、各类非道路移动源等），使用随车采样器、稀释采样器或通过台架实验对机动车排放的样品进行采集。

**生物质燃烧源采样法** 在实验室的模拟环境中进行燃烧，使用大气颗粒物采样器获取生物质燃烧源样品；或在露天环境中进行燃烧，在下风向采集颗粒物样品，同时在上风向采集环境对照样品。

**餐饮源采样法** 根据餐饮源排烟口情况，因地制宜地参照固定源的采样方法采集。

## （2）环境受体中颗粒物样品的采集

依据《环境空气质量监测规范》（试行）的相关要求布设受体采样点，优先选择若干国家环境空气质量监测点；同时综合考虑功能分布、人口密度、环境敏感程度等因素，适当增加受体采样点位。受体采样时间与频次依据颗粒物浓度、排放源的季节性变化特征及气象因素确定，典型污染过程加密采样频次。样品采集的数量要符合受体模型的要求。

单日累积采样时间要满足样品分析检出限要求，且避免滤膜负荷过载，一般为 24 小时，污染较重时可将每日采样时间分为两段，每段 12 小时。

按照《环境空气 PM<sub>10</sub>和 PM<sub>2.5</sub>的测定 重量法》的要求使用进行颗粒物样品的采集，也可根据源解析工作的具体需要选择适当的采样仪器。

根据滤膜本身特性和后续化学分析的需要确定采样滤膜。分析无机元素采用有机滤膜，如聚四氟乙烯、聚丙烯、醋酸纤维酯等；分析碳组分（有机碳 OC、元素碳 EC）和有机物（如多环芳烃、烷烃等）采用石英滤膜；分析水溶性离子采用聚四氟乙烯或石英滤膜等。

### （3）样品化学成分分析

应分析的化学成分包括：无机元素（Na、Mg、Al、Si、K、Ca、Ti、V、Cr、Mn、Fe、Ni、Cu、Zn、Pb、As、Hg、Cd 等）、碳组分（OC、EC），水溶性离子（NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Cl<sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>等）。各地也可根据颗粒物排放源的实际情况，增加多环芳烃、烷烃等化学成分。

无机元素使用电感耦合等离子体原子发射光谱法（ICP-AES）、电感耦合等离子体质谱分析法（ICP-MS）或 X 射线荧光光谱（XRF）法进行分析。ICP 法的样品前处理采用微波消解或加热板消解法，具体方法参考 GB/T 14506.30-2010；XRF 法参考 GB/T 14506.28-2010。

OC 和 EC 的分析使用热光分析法。

水溶性离子的分析使用离子色谱方法。

多环芳烃、烷烃等有机物的分析使用 GC-MS 方法。

#### 3.3.1.3 颗粒物源类和受体化学成分谱的构建

各地应逐步建立颗粒物源类成分谱。使用颗粒物排放量加权平均或算数平均的方法构建颗粒物源类成分谱，包括各成分的含量（g/g）及标准偏差等信息。

对于硫酸盐和硝酸盐等通过化学转化而来的二次源类，使用纯

硫酸铵 ( $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ) 和纯硝酸铵 ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) 的化学组成来代替其源成分谱, 偏差取 10% 左右; 使用最小比值扣除法或其它方法确定二次有机物的浓度。

颗粒物受体化学组成通过算数平均法构建, 给出各化学组成的质量浓度 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 及标准偏差等信息。

#### 3.3.1.4 CMB 模型软件及使用

可选用的 CMB 模型软件有 NKCMB2.0 软件和 CMB8.2 模型软件。

根据源识别的结果, 选择参与拟合的源类;

根据颗粒物源类化学组成特征选择参与拟合的化学成分, 必选组分包括 Si、Ca、OC、EC、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$ , 所选拟合计算的化学成分数量不少于源类数量;

拟合结果必须满足模型要求的各项诊断指标;

对于扬尘污染问题突出的城市, 共线性源类的存在导致解析结果出现负值, 应采用二重源解析技术; 对于复合污染特征明显的城市, 应考虑二次颗粒物的影响, 采用 CMB-嵌套迭代模型或结合源模型技术方法进行解析。

### 3.3.2 正定矩阵因子分解 (PMF) 模型

PMF 模型法根据长时间序列的受体化学组分数据集进行源解析, 不需要源类样品采集, 提取的因子是数学意义的指标, 需要通过源类特征的化学组成信息进一步识别实际的颗粒物源类。PMF 模型法的技术流程见附图 4。

#### 3.3.2.1 颗粒物受体样品的采集及化学分析

PMF 模型法颗粒物受体样品的采集及分析过程的要求与 CMB 模型

源解析技术基本相同。重要区别在于，PMF 模型法中受体样品应在同一点位进行采集，有效受体样品量不少于 80 个。

### 3.3.2.2 PMF 模型法软件

可选用的模型有 PMF3.0 软件等。

所有有效分析的化学成分，要纳入模型进行拟合；低于分析方法检出限的化学成分，采用 1/2 检出限作为输入参数。

根据模型要求的诊断指标，确定因子数目、旋转程度等参数。

对于扬尘污染问题突出的城市，可采用因子分析-CMB 复合受体模型技术解析扬尘、土壤尘和煤烟尘等共线性源类的贡献。

### 3.3.3 源模型与受体模型联用法

对复合污染特征较为明显的城市或区域，可使用源模型与受体模型联用法对颗粒物来源进行详细解析。

使用受体模型计算各源类对受体的贡献值与分担率，利用源模型模拟计算各污染源排放气态前体物的环境浓度分担率，解析二次粒子的来源。对于受体模型解析结果，使用源模型进一步解析具有可靠排放源清单的点源贡献。

针对重污染过程，应基于在线高时间分辨率的监测和模拟技术，发展快速源识别和解析方法。

## 第四章 源解析结果评估与应用

### 4.1 源解析结果评估和验证

(1) 使用受体模型、源模型或受体模型与源模型联用方法进行

颗粒物来源解析，解析结果需满足相应模型要求的各项诊断指标。

(2) 采用多种模型进行解析，不同模型解析结果中各源类贡献的相对关系应一致，结果能相互印证。

(3) 颗粒物来源解析结果应能够反映当地颗粒物污染的时空变化规律，利用例行监测结果，评估不同季节颗粒物来源解析结果的合理性。

(4) 应对解析结果进行不确定性分析，给出每种源贡献的范围和平均贡献的相对偏差。

## **4.2 源解析结果应用**

### **4.2.1 源清单法解析结果的应用**

得到颗粒物排放源清单和重点排放区域、重点排放源对当地颗粒物排放总量的分担率。排放源清单是环境管理必须的基础数据库。

### **4.2.2 源模型法解析结果的应用**

(1) 阐明颗粒物浓度的时空分布，结合源强变化和主要污染源分布情况分析颗粒物污染的时空演变。

(2) 定量给出污染源贡献值与分担率，预测已知源强源类的颗粒物污染防治措施的环境效益。

(3) 估算典型污染过程中各主要颗粒物排放源对环境空气颗粒物的贡献值，诊断典型污染过程的成因。

(4) 估算本地和外来不同类别源对颗粒物环境浓度的贡献。

### **4.2.3 受体模型法结果的应用**

(1) 阐明环境空气中颗粒物化学组成的时空分布特征，用于判断颗粒物污染类型。

(2) 明确颗粒物排放源谱特征。用于识别环境空气颗粒物中有毒有害成分的主要来源；根据不同颗粒物排放源粒径分布，确定细颗粒物排放因子。

(3) 定量获得各颗粒物排放源类对不同季节、不同点位环境空气颗粒物的贡献值与分担率。用于明确颗粒物污染防治的方向，评估污染防治效果。

(4) 定量获得典型污染过程中各颗粒物排放源类对环境空气颗粒物的贡献值与分担率。用于诊断典型污染过程的成因。

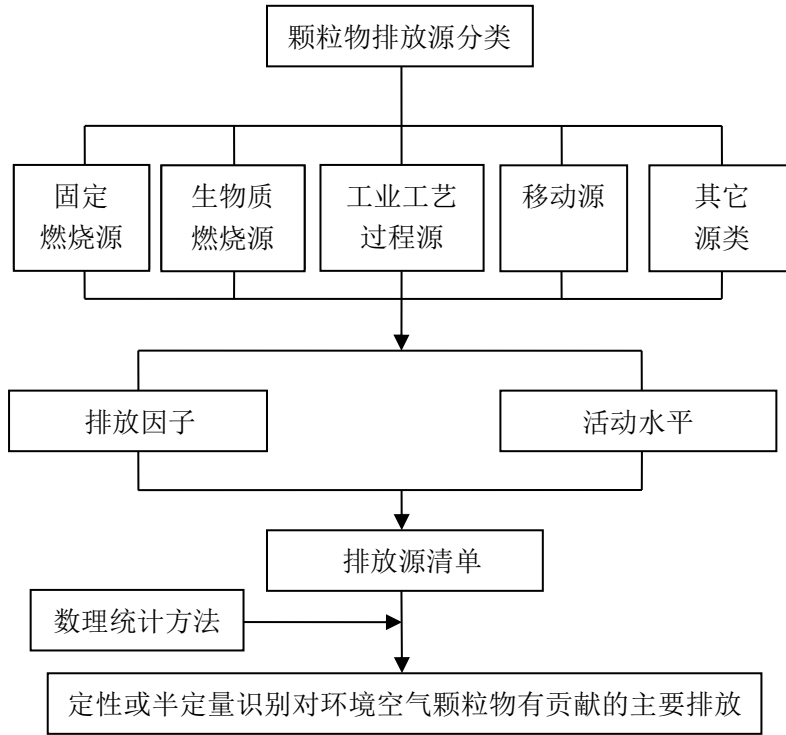
(5) 把颗粒物开放源、有组织排放源和二次粒子纳入颗粒物目标容量总量控制，根据各颗粒物排放源类对不同季节环境空气颗粒物的贡献值与分担率，确定各颗粒物排放源类的控制目标。

#### **4.3 源解析工作的评估机制**

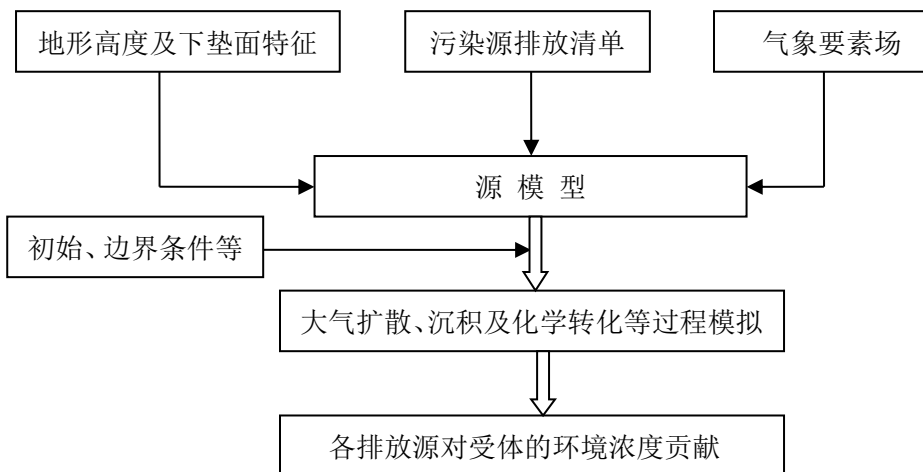
建议开展颗粒物来源解析工作的城市或地区成立包括环保、气象等技术领域的专家委员会，由专家委员会对源解析工作关键技术环节的科学性和规范性进行评估，并与管理部门会商源解析结果。

# 附录

## 一、主要大气颗粒物来源解析技术流程

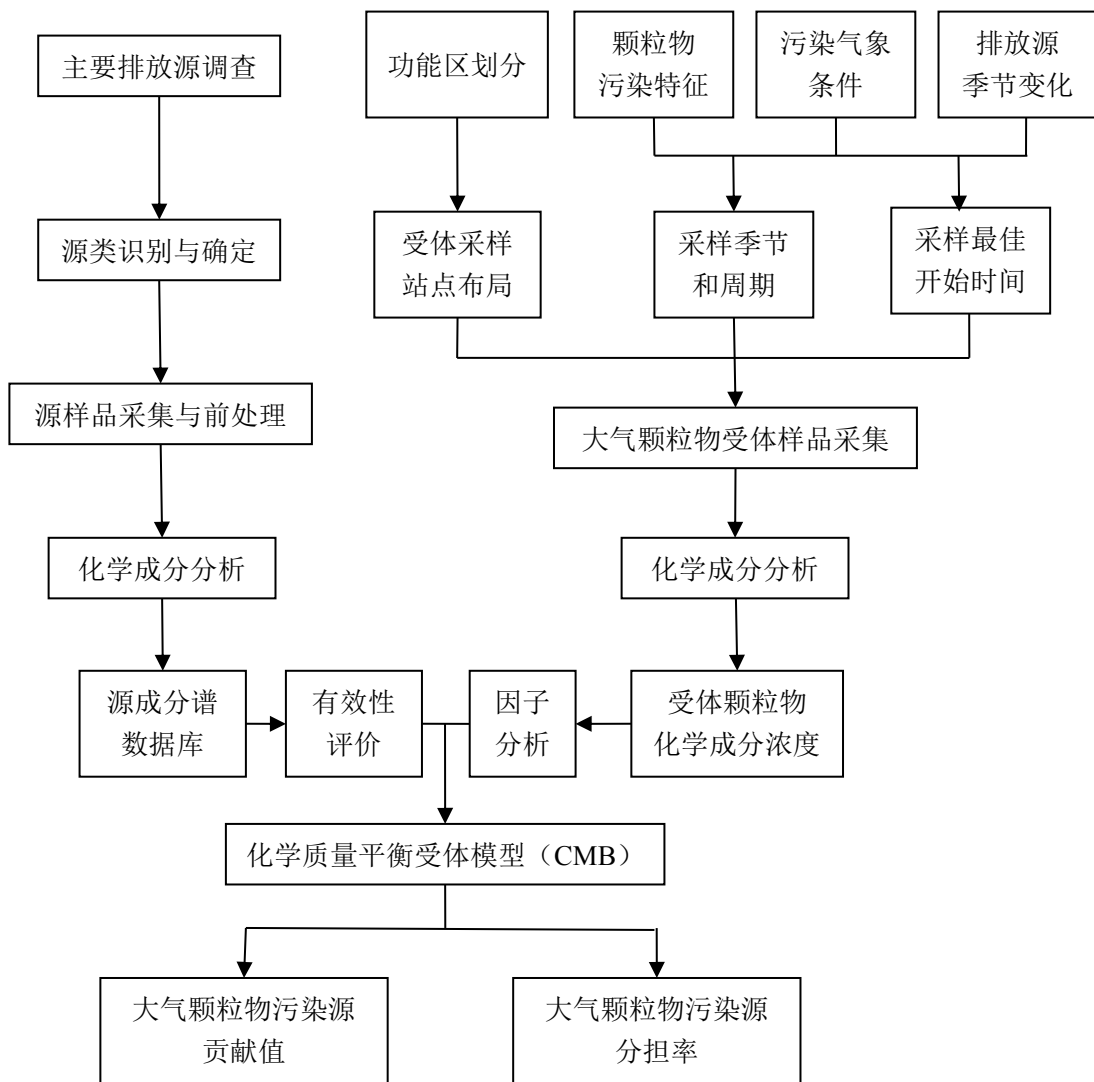


附图 1 源清单法技术流程

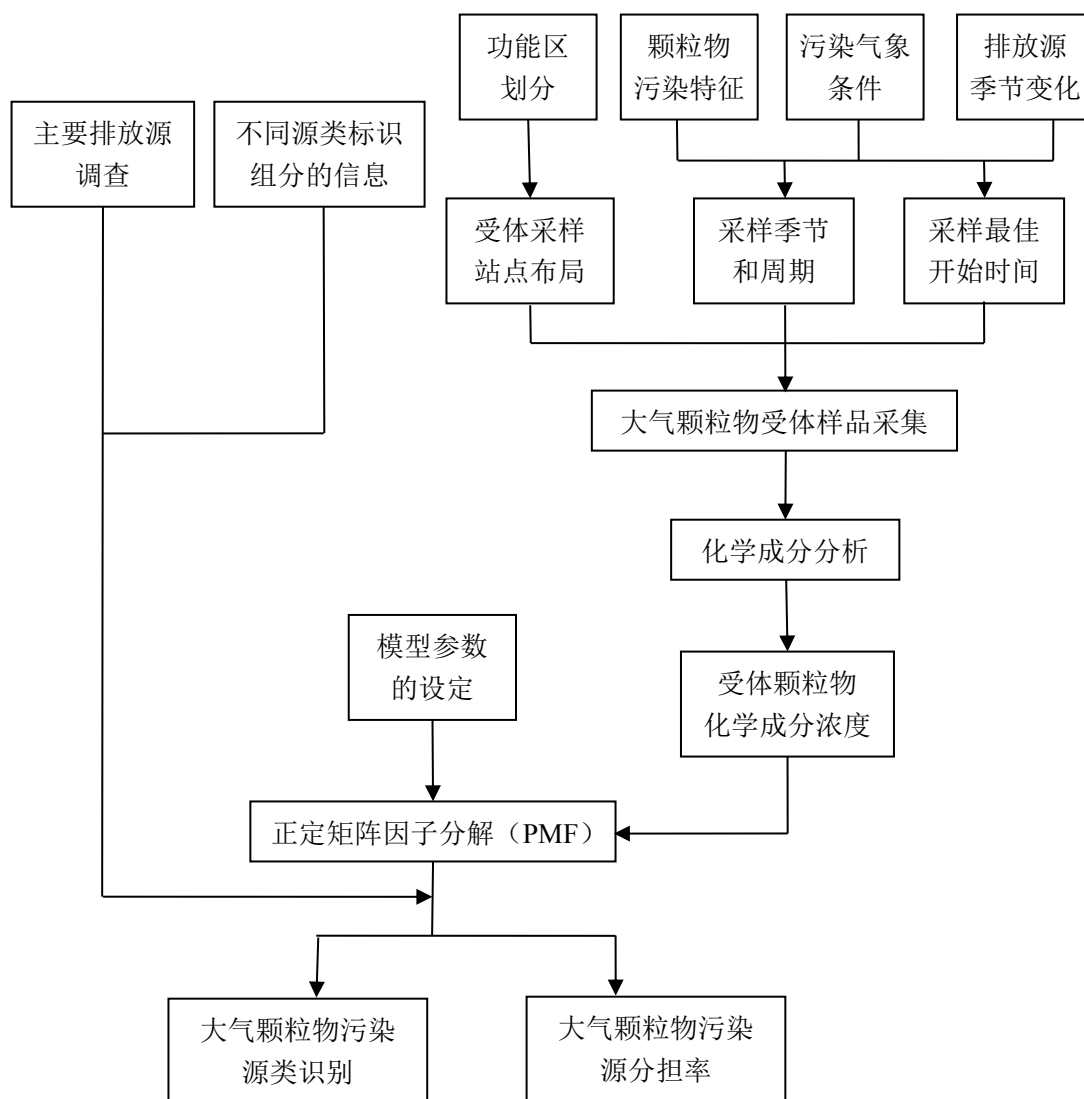


附图 2 源模型法技术流程





附图3 化学质量平衡模型（CMB）技术流程



附图 4 正定矩阵因子分解 (PMF) 模型法技术流程

## 二、相关资料

(1) 模型软件与操作手册：NKCMB2.0、二重源解析技术、CMB-嵌套迭代模型软件和操作手册、PMF3.0 模型软件和操作手册、颗粒物源成分谱、源模型软件与操作手册可从环境保护部科技标准司网站下载。

(2) 受体模型参考资料：《大气颗粒物来源解析技术、原理及应用》，科学出版社，2012.5。