

附件7

《环境空气 颗粒物来源解析 基于受体模型法的源解析技术规范（征求意见稿）》
编制说明

《环境空气 颗粒物来源解析 基于受体模型法的源解析技术规范》

标准编制组

二〇二二年十月

目 录

1 项目背景.....	1
1.1 任务来源	1
1.2 工作过程	1
2 标准制订的必要性分析	2
3 国内外源解析相关进展	3
3.1 国内源解析工作业务化发展.....	3
3.2 源解析标准体系进展	5
3.3 典型城市源解析工作情况.....	8
4 标准制订的基本原则和技术路线	15
4.1 标准制订的基本原则	15
4.2 标准制订的技术路线	16
5 研究报告	16
5.1 适用范围	16
5.2 规范性引用文件	17
5.3 术语和定义	17
5.4 基本原则和工作内容	17
5.5 源解析工作方案制定	20
5.6 基本情况调查	20
5.7 污染源和环境空气质量调查.....	21
5.8 环境受体和污染源颗粒物监测.....	21
5.9 环境受体成分库和源成分谱库的构建分析.....	30
5.10 模型计算	35
5.11 综合解析评估.....	37
5.12 报告编制	40
5.13 质量保证和质量控制 (QA/QC)	40
5.14 附录	41
6 与开题报告的差异说明	42
7 参考文献	42

《环境空气 颗粒物来源解析 基于受体模型法的源解析技术规范》编制说明

1 项目背景

1.1 任务来源

2021年，生态环境部办公厅印发《关于开展2021年度国家生态环境标准项目实施工作的通知》（环办法规函〔2021〕312号），下达了编制《环境空气 颗粒物来源解析 基于受体模型法的源解析技术规范》的任务。项目统一编号：2021-76。项目承担单位为中国环境监测总站（简称“监测总站”）。

1.2 工作过程

1.2.1 前期工作

2020年，中国环境监测总站承担了生态环境部大气环境管理司的专项工作“大气环境质量管理”项目，开展《环境空气 颗粒物来源解析 基于受体模型法的源解析技术规范》技术文件编写。编制组调研源解析业务化开展情况、源解析标准体系、典型城市源解析工作情况、国内外基于受体模型法的源解析标准情况，总结已有的工作经验和研究成果，编写《环境空气 颗粒物来源解析 基于受体模型法的源解析技术规范》及编制说明。经过1次技术研讨会和1次技术审查会，编制组对技术文件修改完善，提交至大气司。

1.2.2 成立标准编制小组

2021年，接到标准制修订任务后，成立《环境空气 颗粒物来源解析 基于受体模型法的源解析技术规范》编制组，由中国环境监测总站、山东省济南生态环境监测中心、福建省福州环境监测中心站、南开大学相关技术人员组成。

1.2.3 编写标准开题报告

2021年1月~3月，编制组在前期工作的基础上，进一步调研和总结已有的工作经验、研究成果，编写《国家环境保护标准制修订项目开题论证报告》和《环境空气 颗粒物来源解析 基于受体模型法的源解析技术规范（草案）》。2021年3月8日，监测总站科技处组织召开内部开题论证会，通过该标准的开题论证审查，形成如下意见：（1）该标准可为源解析工作业务化提供重要技术支撑，编写方案可行、技术路线合理、工作思路清晰，（2）建议进一步开展文献调研，补充完善监测的质量保证和质量控制。根据专家意见，编制组进行修改完善。

2021年4月20日，生态环境部大气环境司组织召开了标准开题论证会，邀请上海市环境监测中心、中国环境科学研究院等9名专家对标准开题报告和标准草案进行论证，通过该标准的开题论证审查，形成如下意见：（1）标准主编单位提供的材料齐全、内容完整、格式规范，制订的标准具有科学性、适用性和可操作性；（2）建议明确和完善本规范的适用范围，补充与其他方法和标准的关系说明，进一步明确来源的分类和表述。

1.2.4 编写标准征求意见稿和编制说明

2021年5月~11月,编制组根据标准开题论证会的专家意见,继续开展文献资料调研,并且对全国地级及以上337个城市和全国环境监测系统开展源解析工作情况进行调查,在此基础上形成标准征求意见稿和编制说明。

2021年12月2日,监测总站科技处组织召开内部征求意见稿审议会,通过该标准征求意见稿的技术审查,形成如下审查意见:(1)建议加快该标准的制修订工作并尽快发布,为各地源解析工作提供支撑;(2)注意本标准和其他相关标准(含正在制订标准)衔接;(3)明确源解析排放源分类;将“对策建议”并入“综合解析评估”,不用单独列出。根据专家意见,编制组进行修改完善。

2022年3月22日,生态环境部大气环境司组织召开了标准征求意见稿技术审查会,邀请北京大学、中国环境科学研究院等9名专家对标准征求意见稿及编制说明进行审查。专家组一致通过该标准征求意见稿的技术审查,形成如下审查意见:(1)标准主编单位提供的材料齐全、内容完整、格式规范,制订的标准具有科学性、适用性和可操作性;(2)与相关颗粒物源解析标准的术语和定义保持一致;(3)进一步补充颗粒物排放源分类及标识组分;(4)对文本进行规范性修改和完善。根据专家意见,编制组进一步修改完善。

2 标准制订的必要性分析

环境空气颗粒物源解析工作(以下简称“源解析”)是开展大气颗粒物污染防治的前提和基础。通过源解析工作,可以确定颗粒物的主要来源,为大气颗粒物污染防治指明了方向,同时评估大气颗粒物污染防治效果。2014年,针对当时环境空气颗粒物污染防治工作的迫切需求,原环保部办公厅发布《关于开展第一阶段大气颗粒物来源解析研究工作的通知》(环办〔2014〕7号),要求全国直辖市、省会城市(除拉萨外)、计划单列市需要开展环境空气颗粒物来源解析研究工作。自2014年起,各城市相继开展并陆续完成第一阶段环境空气颗粒物源解析工作,为环境空气颗粒物污染防治工作提供重要技术支持。

由于大气颗粒物污染防治的艰巨性和长期性,持续推动源解析工作的业务化和常态化开展是颗粒物污染防治工作中的重点工作之一,成为生态环境监测体系与监测能力建设的重要发展方向。2018年6月27日,《打赢蓝天保卫战三年行动计划》(国发〔2018〕22号)要求常态化开展重点区域和城市源排放清单编制、源解析等工作,形成污染动态溯源的基础能力。

《关于推进生态环境监测体系与监测能力现代化的若干意见》(环办函〔2020〕9号)要求“提升环境污染溯源解析与风险监控能力”。《生态环境监测规划纲要(2020-2035年)》要求到2025年,“针对突出环境问题或重点区域的污染溯源解析、热点监控网络加速形成”。

虽然各地通过开展源解析工作,积累了不少经验,但是从各城市开展颗粒物源解析工作的现状看,源解析工作尚处于业务化初级阶段,离真正的业务化运行还有一定的差距。源解析技术方法体系是源解析业务化的基础之一,可以为科学规范地开展源解析研究工作提供重要支持,推动源解析工作的业务化。经过过去几年的努力,初步构建了源解析技术方法体系,包含技术路线、技术指南、标准方法和技术文件等,覆盖现有主要源解析方法的主要源类采样、环境空气颗粒物采样、颗粒物及组分分析、源解析模型计算等过程。

与常规的监测工作不同,源解析工作涉及环节众多,技术要求复杂,对系统性要求较高。

国内目前还没有出台对整个源解析工作进行全面系统的规定。现有的标准只是规定了源解析某一个工作环节，而且主要集中在监测工作。对于部分重要的技术环节，比如区域基本情况调查、源解析模型计算、区域污染源和环境空气质量调查等，还没有标准规范进行统一要求。如果缺少对整体源解析工作的统一规定，势必会影响各地源解析工作结果的可比性。此外，各地环保业务部门的源解析工作能力参差不齐，对源解析的认识水平与业务化开展有一定的差距。由于整体源解析工作相关的规范尚未制订，各地环保部门普遍缺乏对源解析工作的整体认识，难以有效地开展源解析工作。因此有必要编写源解析工作技术规范，对源解析工作主要的环节进行规定，从而更好地指导各地开展源解析工作，推动全国源解析工作的业务化开展。

3 国内外源解析相关进展

3.1 国内源解析工作业务化发展

在 2014 年之前，全国颗粒物来源解析工作尚未开展业务化，主要为各高校研究所牵头开展的研究性工作。仅少数环保业务部门（如北京市环境保护监测中心、济南市环境监测站等）因为较早开展源解析工作，积累了比较多的经验，具备一定的业务化工作经验。

2014 年，原环保部办公厅发布《关于开展第一阶段大气颗粒物来源解析研究工作的通知》（环办〔2014〕7 号），第一次在全国范围内开启了源解析的业务化进程。2014 年长三角和珠三角等地区 9 个重点城市完成源解析工作，2015 年 22 个城市陆续完成源解析工作，2016 年最后剩余的 4 个城市完成了源解析工作。在三年时间中，许多环保业务部门，尤其是监测站，不断克服困难，探索创新，圆满完成第一阶段源解析工作任务，同时在实践中研究解决了源解析难点和疑点问题，培养了源解析专业技术人才，开展了源解析相关的软硬件建设，为源解析业务化推广积累了经验，奠定了基础。由于大气颗粒物污染防治的长期性和艰巨性，要求源解析工作能定期更新颗粒物来源状况，所以许多城市在完成 2014 年的源解析工作任务后，继续定期开展源解析工作，为大气颗粒物污染防治提供支持。

总结各地 2014-2016 年间开展的第一阶段源解析工作，主要通过四种工作模式开展：

（1）环保业务部门承担源解析全部工作。这种工作模式对于环保业务部门的技术能力要求极高，需要有源解析各个工作环节的软硬件基础和人才。所以采用此种工作模式的城市非常少。

（2）环保业务部门牵头开展，高校、科研院所参与协作。这种模式主要是所在城市的环保业务部门有开展过源解析工作的经历，熟悉源解析工作流程，已具备可以满足源解析工作的主要软硬件基础和人才。采用这种工作模式的城市相对不多。

（3）高校、科研院所牵头开展，环保业务部门参与协作。这种模式主要是所在城市的环保业务部门没有开展过源解析工作，不熟悉源解析工作流程，但是可开展源解析工作所需的源和受体采样、颗粒物组分分析工作，可承担相关的监测工作。此阶段的源解析工作中，较多城市采用这种工作模式。通过这种模式，各地环保业务部门可逐渐学习和介入源解析工作，直到最后转为主导开展此项工作。

（4）高校、科研院所承担源解析全部工作。部分城市不具备参与源解析工作的软硬条件，无法在规定时间内完成第一阶段的源解析工作，因此采用了这种工作模式。但是由于颗

颗粒物污染防治工作的长期性，为了保持源解析工作的延续性，环保业务部门有必要参与此项工作。

2018年5月，中国环境监测总站对全国366个地级及以上城市监测站进行了调查，共获得有效反馈326份。调查发现各地的监测站在源解析工作发挥了重要作用，有106个监测站开展过源解析工作，直辖市站、省（区、兵团）站、省会城市站、计划单列市站和一般地级市站开展比例分别为75%、43%、81%、100%和25%；在开展过源解析工作的监测站中，有65个监测站牵头负责，占61%。其中，直辖市站、省（区、兵团）站、省会城市站、计划单列市站和一般地级市站牵头负责的比例分别为100%、92%、71%、80%和49%；在原环保部明确发文要求开展源解析工作的34个城市（直辖市、省会城市、计划单列市，拉萨除外）中，监测站参与开展的数量为29个，比例为85%，牵头开展的数量为22个，比例为65%，其余工作均由大专院校和科研机构实施。

表1 全国监测系统开展大气颗粒物源解析的情况

监测站	反馈数量	开展		牵头	
		数量	占比	数量	占比**
直辖市站	4	3	75%	3	100%
省（区、兵团）站	28	12	43%	11	92%
省会城市站	26	21	81%	15	71%
计划单列市站	5	5	100%	4	80%
一般地级市站*	263	65	25%	32	49%
总计	326	106	33%	65	61%

注*：原环保部未发文要求地级市开展源解析工作，注**：已开展源解析工作的监测站中牵头的占比。

2021年8月，中国环境监测总站对全国337个地级及以上城市的源解析情况进行调查（简称“2021年源解析调查”）。此次调查共发放问卷337份，获得有效问卷295份，总体上反馈比例为88%，其中直辖市、省会城市、计划单列市的反馈比例达100%，其他城市反馈比例为86%。调查结果（表2）显示总体上有136个城市开展过源解析工作，开展比例为46%，其中直辖市、省会城市、计划单列市开展比例均为100%，其他城市开展比例为39%。对136个城市开展PM_{2.5}源解析情况进行总结分析，结果见“5 研究报告”。

表2 全国337个地级及以上城市开展大气颗粒物源解析的情况

城市类型	城市个数	反馈个数	反馈比例	开展源解析个数	开展比例*
直辖市	4	4	100%	4	100%
省会城市	27	27	100%	27	100%
计划单列市	5	5	100%	5	100%
其他城市	301	258	86%	100	39%
合计	337	294	87%	136	46%

注*：开展比例为开展源解析城市个数除以有效反馈城市个数。

通过第一阶段的源解析工作，以及后续持续开展，全国各城市环保业务部门，尤其是环境监测部门逐渐熟悉源解析工作，开展源解析相关的仪器设备、模型等软硬件建设，培养了

源解析专业人才,积累了源解析工作经验,为该工作的业务化开展奠定了坚实的基础。因此,编写并推广基于受体模型法的源解析技术规范已比较成熟。

3.2 源解析标准体系进展

3.2.1 总体情况

构建源解析标准体系是推进源解析业务化的重要基础。在《关于开展第一阶段大气颗粒物来源解析研究工作的通知》(环办〔2014〕7号)中,原环保部要求中国环境监测总站开展源解析技术体系构建,编写相应的技术路线、指南、标准规范等。自2014年以来,根据生态环境部的源解析专项工作要求,总站持续为全国源解析工作提供技术支持,其中一项重要的工作是开展源解析技术体系框架和业务化途径研究,组织编写源解析相关技术文件,促进源解析监测标准体系的建立和完善。

目前,生态环境部通过颁布标准和下发技术文件,已初步形成了一套围绕各地广泛应用的受体模型解析法的源解析监测标准体系,可满足源解析工作的基本需求。已有的源解析监测标准体系包括源解析工作总体技术路线和指南、环境空气颗粒物采样和质量浓度分析、颗粒物无机元素和阴阳离子分析等。为进一步满足源解析业务化需求,源解析监测标准体系仍需要不断完善。首先亟待解决的是试行多年的技术指南等尽快上升为标准的问题,比如PMF和CMB模型计算技术指南、固定源和开放源等污染源采样技术文件等一系列技术文件应尽快上升为标准;其次,根据源解析业务化的需求,及时制定新的标准规范,对已有的源解析标准体系进行补充完善,比如制订源解析工作全过程的技术规范、模型计算数据处理计算规范等。

3.2.2 现阶段源解析技术方法

根据《环境空气颗粒物来源解析技术路线(试行)》(环办函[2015]191号),源解析技术方法主要包括现场采样-实验室分析-受体模型法、现场调查-统计分析-源清单法、污染源监测-模拟分析-源模型法等。现阶段各地采用的源解析技术方法主要为现场采样-实验室化学分析-受体模型法,其他源解析方法往往作为配合或辅助方法,以进一步解决细化源类、二次颗粒物的一次排放、区域传输的问题。

因此,本技术规范重点针对现阶段的主要源解析方法,即现场采样-实验室分析-受体模型法,涵盖该方法的主要环节,适当涉及二次颗粒物解析和区域传输解析。关于二次颗粒物解析和区域传输解析,可以另行编制相应的标准方法。同时,全国不同城市的污染源、环境受体、气象条件等存在差异,各城市源解析工作需求与实施情况也相应存在差异。本技术规范的编制应尽可能结合典型地区的源解析需求,提供相应的技术指导。比如颗粒物污染较重和较轻的城市、存在冬季采暖的城市、受季节性生物质燃烧源影响的城市、扬尘污染影响显著的城市等。

现场采样-实验室分析-受体模型法的主要环节(见图1)如下:

(1)对城市的自然条件、经济社会发展情况进行调研,收集污染源排放清单和环境空气质量相关数据,并进行分析。

(2)根据源排放清单,识别本地区的主要污染源,选择代表性的污染源(固定源、移动源、无组织排放源等),进行污染源样品采集。

(3) 根据环境空气和气象的季节变化特征、污染源排放特征确定受体采样时间；根据城市功能区分布、空气自动监测站分布等确定受体采样点位，进行环境受体样品采集。

(4) 在实验室中分别对源样品和受体样品进行颗粒物化学组分分析，包括无机元素、阴阳离子、元素碳/有机碳等，用于构建源成分谱和受体化学组成。

(5) 采用 CMB、PMF 等受体模型进行模拟计算，得到受体模型法源解析结果，包括主要排放源的贡献值和分担率，进行不同模型相互验证，初步分析源解析结果合理性。

(6) 结合研究区域自然禀赋、经济社会发展情况、污染源排放特征等，对源解析结果进一步评估和验证。

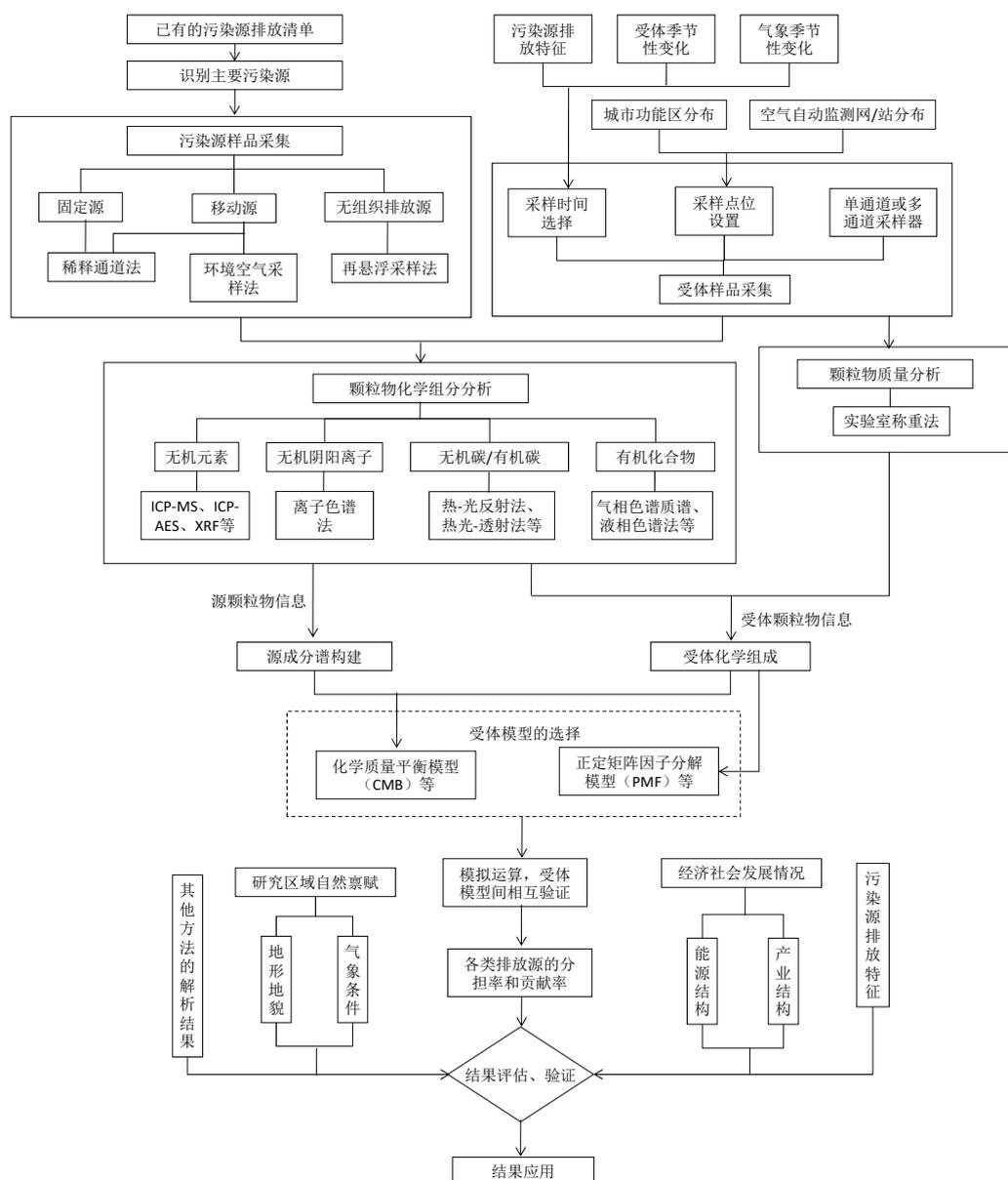


图1 现场采样-实验室分析-受体模型法内容

3.2.3 国内外标准情况

国外开展源解析工作起步较早，相关的标准规范主要集中于源解析中颗粒物组分的监测

标准。美国环保署环境空气监测技术信息中心（Ambient Monitoring Technology Information Center, AMTIC）提供了大气污染物监测标准方法：空气中无机污染物监测方法（IO 系列方法）^[1]、有机污染物监测方法（TO 系列方法）^[2]，涵盖颗粒物质量以及元素、离子和有机组分的监测方法。对于专门的颗粒物监测网络，比如化学组分监测网（Chemical Speciation Network, CSN）、IMPROVE 网，分别出台了一系列颗粒物质量、元素、离子和碳组分等操作规程（SOP），规范颗粒物监测工作^[3]。此外，美国环保署还推荐了用于源解析工作的受体模型软件，包括 PMF、CMB 模型等，发布了相应的模型计算操作手册《EPA Positive Matrix Factorization (PMF) 5.0 Fundamentals and User Guide》《EPA-CMB8.2 User's Manual》^[4-5]。但是目前还没有发布基于受体模型法的源解析技术规范，以涵盖源解析工作的主要技术环节。

欧盟基于“欧洲监测和评价项目”（European Monitoring and Evaluation Programme, 即 EMEP）在欧洲组织开展大范围的颗粒物监测。EMEP 的化学协调中心（Chemical Co-ordinating Centre）提供了颗粒物采样以及组分（如元素、离子和碳组分）的系列操作规程，统一颗粒物监测方法^[6]。欧盟的联合研究中心（Joint Research Centre）在 2014 年发布受体模型计算指南《European Guide on Air Pollution Source Apportionment with Receptor Models》用于规范和统一欧洲基于受体模型法的源解析工作^[7]。

国内发布不少与源解析相关的颗粒物监测标准、监测标准方法或技术文件等，已初步构建了基于受体模型法的源解析技术体系，用于规范受体模型法源解析的主要技术环节，但是目前还没有制订基于受体模型法的源解析技术规范，规范全过程的受体模型法源解析工作。现有的源解析标准和技术文件情况如下：

（1）关于源解析相关技术文件有：《环境空气颗粒物来源解析技术路线（试行）》《大气颗粒物来源解析技术指南（试行）》《环境空气颗粒物来源解析监测技术方法指南》等^[8-10]。

（2）关于空气布点采样标准规范有：《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 93）《环境空气质量手工监测技术规范》（HJ 194）《环境空气 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 的测定重量法》（HJ 618）《环境空气颗粒物（PM_{2.5}）手工监测方法（重量法）技术规范》（HJ 656）《环境空气质量监测点位布设技术规范（试行）》（HJ 664）等^[11-15]。

（3）关于污染源采样标准规范有：《柴油车污染物排放限值及测量方法（自由加速法及加载减速法）》（GB 3847）《汽油车污染物排放限值及测量方法（双怠速法及简易工况法）》（GB 18285）《轻型汽车污染物排放限值及测量方法（中国第六阶段）》（GB 18352.6）《固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法》（GB/T 16157）《大气污染物无组织排放监测技术导则》（HJ/T 55）《防治城市扬尘污染技术规范》（HJ/T 393）^[16-21]，及技术文件《环境空气颗粒物来源解析开放源扬尘采样技术规范（试行）（报批稿）》《环境空气颗粒物来源解析固定污染源废气颗粒物（PM_{2.5} 和 PM₁₀）稀释通道采样技术导则（试行）》《环境空气颗粒物来源解析开放源颗粒物（PM_{2.5} 和 PM₁₀）再悬浮采样技术导则（试行）》等。

（4）关于颗粒物组分分析标准规范或技术文件有：《空气和废气颗粒物中铅等金属元素的测定电感耦合等离子体质谱法》（HJ 657）《空气和废气颗粒物中金属元素的测定电感耦合等离子体发射光谱法》（HJ 777）《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》（HJ 829）《环境空气颗粒物中无机元素的测定波长色散 X 射线荧光光谱法》（HJ 8

30)《环境空气颗粒物中水溶性阴离子(F⁻、Cl⁻、Br⁻、NO₂⁻、NO₃⁻、PO₄³⁻、SO₃²⁻、SO₄²⁻)的测定离子色谱法》(HJ 799)《环境空气颗粒物中水溶性阳离子(Li⁺、Na⁺、NH₄⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺)的测定离子色谱法》(HJ 800)《环境空气和废气气相和颗粒物中多环芳烃的测定气相色谱-质谱法》(HJ 646)《环境空气和废气气相和颗粒物中多环芳烃的测定高效液相色谱法》(HJ 647)^[22-29],以及技术文件《环境空气颗粒物来源解析颗粒物滤膜自动称量技术规范(试行)(报批稿)》《环境空气颗粒物来源解析颗粒物中左旋葡聚糖、甘露聚糖和半乳聚糖的测定离子色谱法(试行)(报批稿)》《环境空气颗粒物来源解析颗粒物中左旋葡聚糖、甘露聚糖和半乳聚糖的测定衍生化气相色谱-质谱法(试行)(报批稿)》等。

(5)关于受体模型计算的技术文件有:《环境空气颗粒物来源解析正定矩阵因子分解(PMF)模型计算技术指南(试行)》《环境空气颗粒物来源解析化学质量平衡(CMB)模型计算技术指南(试行)》等。

国内外标准与本标准的关系。国外的源解析监测及模型计算的标准、技术规范或操作手册可以给本标准中相关技术环节的编写提供一定参考。对于国内已有的源解析相关标准规范,本标准直接进行引用,并列上关键的技术参数。对于没有标准规定的重要技术环节,本标准根据研究成果和工作经验进行规定。本标准与国内其他源解析标准规范共同组成源解析技术体系,为各地源解析工作的业务化和规范化提供支持。

3.3 典型城市源解析工作情况

3.3.1 济南源解析工作情况

(1) 工作目标和方案的制订

分析济南市2019年大气颗粒物PM₁₀和PM_{2.5}年均值和2019年要达到的目标值关系,确定颗粒物对济南市空气质量改善起着重要的作用,尤其是采暖季的PM_{2.5}是影响济南市优良率的首要污染物,结合2020年济南市大气颗粒物污染防治目标值和长期观测PM_{2.5}组分含量,需加强PM_{2.5}二次转化组分的来源解析,参考2019年颗粒物来源解析的受体和污染源采样点位,结合济南市生态环境局支持的源解析项目经费180万元,2020年源解析工作重点加强了非道路移动机械、国控点位周边污染源的采样,合理制订了2020年颗粒物源解析的工作目标和工作方案。源解析技术路线见下图。

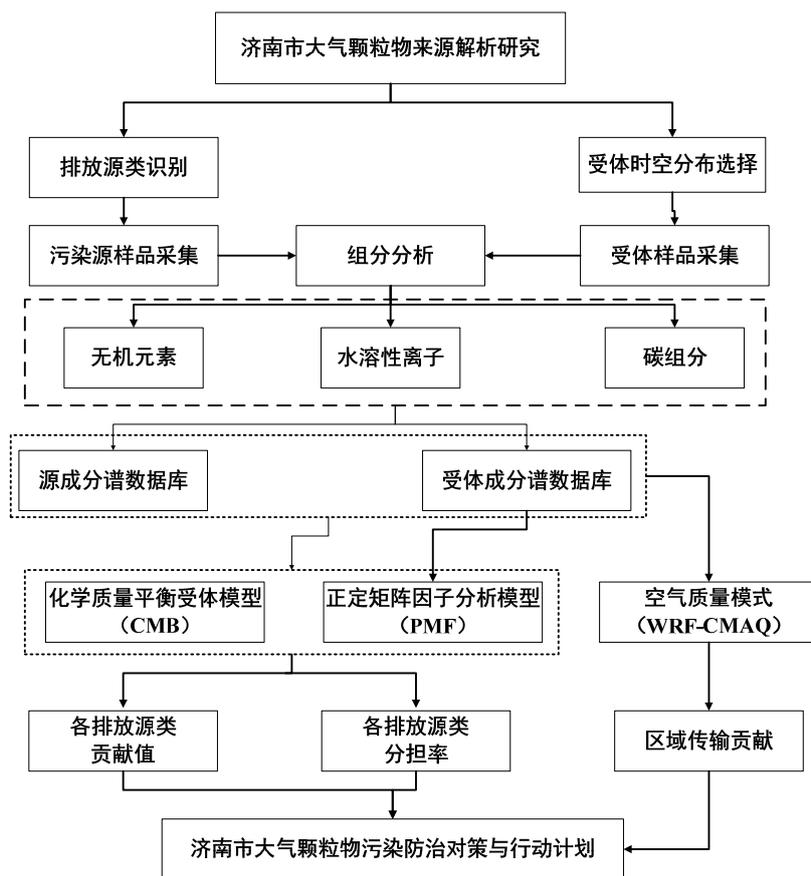


图2 济南市源解析工作的技术路线

(2) 采样点位及采样时间的确定

主要考虑以下几个方面：

1) 本研究充分考虑济南市季风气候、南高北低的盆地地形等风向、气候、地理条件、污染源等复杂因素对空气颗粒物污染水平的综合影响。

2) 既考虑城区分布及城区国控点位环境质量的代表性，又着重考虑济南市区代表综合功能区，点位重点考虑位于城市的建成区内有环境空气在线监测的国、省控站点，便于颗粒物及 SO_2 、 NO_2 等常规污染物和气象参数的获取和参考；

3) 点位数量根据研究的目的、城市功能区的划分、人口密度、环境敏感程度以及经费情况等方面综合考虑来确定。

4) 考虑近三年源解析采样点位的连续性以及长期变化规律的跟踪研究，主要参考 2019 年源解析采样方案。

根据济南市 11 个国控点的分布，3 个在莱芜区，7 个在济南市区，且结合济南市大气排放源清单中工艺过程源中的钢铁、焦化、石化等重点污染源主要位于济南市区和莱芜典型区，因此，将研究区域确定为济南市区以及莱芜典型区，且 2019 年空气质量较差的国控点位主要为机床二厂、市监测站等，根据在线环境空气监测点位布设 7 个采样点位（见表 3）。7 个点位的的情况如下：济南市区东部建工学院（1）为石化区，中间市监测站（2）为受交通和人

为活动影响的综合区域，西部机床二厂（3）为机加工喷涂区域，市区西北药山点位（4）为城乡结合部，莱芜典型区的技术学院（5）为市区受交通影响和人为活动影响，莱钢点位（6）为钢铁行业集聚区，跑马岭（7）作为济南市空气质量的清洁对照点，位于山顶上，海拔为300米，济南市颗粒物除夏季外，其余季节均较高，参考2019年颗粒物源解析采样方案，2020年源解析采样时间为春季（4月）、秋季（10月）、采暖季（12月）。

表3 济南市环境受体采样点位统计表

序号	代表区域	点位名称	经度 (°E)	纬度 (°N)	采样高度 /m
1	清洁对照点	跑马岭	117.2231	36.4325	山顶
2	城乡结合部	药山街道	116.9641	36.7078	18
3	城市市区	市监测站	117.0494	36.6627	18
4	城市市区	机床二厂（周围有喷涂行业）	116.952	36.6459	12
5	典型工业区	技术学院	117.6862	36.2171	18
6	典型工业区	莱钢（钢铁企业）	117.8568	36.0948	20
7	城市市区	建工学院（周围有石化行业）	117.1851	36.6753	18

（3）环境受体和污染源样品的采集

1）环境受体采样

采暖季连续手工采样22天，秋季、春季连续手工采样10天，建工学院点位加采平行样作为质控方式。使用的采样器均为符合欧标的德国生产的颗粒物自动换膜采样器（DERENDAPNS），分别使用PM₁₀、PM_{2.5}切割头，用于采集空气中的PM₁₀、PM_{2.5}不同粒径大小的颗粒物。采样流量为16.7 L/min。分别采集石英滤膜（47 mm，Whatman公司）、Teflon有机滤膜（47 mm，Whatman公司）。滤膜在样品采集后，首先进行恒温恒湿箱平衡称量。共采集总计1418张滤膜。

2）污染源样品采样

根据大气排放源清单以及采样点位周边重要的污染源，结合2019年源解析采集的钢铁不同生产工序，2020年工业污染源主要采集石灰窑、涂装行业、石化行业以及玻璃炉窑等，燃煤电厂3个，主要采集以石灰石脱硫为主的大、中和小型发电机组以及除尘器下载灰，采集城市东南西北四个方向距城市建成区10~20 km的土壤尘、采样点位周围的城市二次扬尘、主次干道的道路尘、建筑尘主要采集水泥行业产品等。

热电厂以及工业污染源用稀释通道设备采样烟气，每根排气筒每个粒径需采集3个平行样品，每个样品采集24小时以上。城市扬尘和道路尘采用吸尘器或毛刷进行采样，每个季节每个点位采样扬尘给出相对固定的区域，保证每个季节的城市扬尘具有代表性。

土壤尘、道路尘、下载灰、水泥、城市二次扬尘等粉末样品经实验室晾晒、筛分后，采用再悬浮方法把粉末样品采集到无机和石英滤膜上，用于PM_{2.5}和PM₁₀源样品分析。

根据济南市统计数据，2020年全市机动车保有量中，轿车在总数中占比最高为90%以

上，大型客车保有量占 0.47%，重型货车保有量占 1.71%，选择不同重型、大型和小型等不同车型、汽油和柴油等不同燃料的道路移动源进行采样，同时选择挖掘机、推土机和破碎机等非道路移动机械进行采样，均采用稀释通道设备采样。机动车在年检线采样，汽油车连续采样 4 小时 10 台左右的车辆后更换滤膜，柴油车每次采样就采集一辆车。非道路移动机械选定济南市区采样点位附近 3 个工地进行现场施工作业时采样。采样情况见表 4。

表4 济南市机动车尾气尘采集情况

序号	车辆类型	移动源类型	燃料类型
1	小型	载客车	汽油
2	中型	载客车	柴油
3	大型	载客车	柴油
4	小型	载货车	柴油
5	中型	载货车	柴油
6	重型	载货车	柴油
7	重型	工程机械（挖掘机）	柴油
8	重型	工程机械（锤头破碎机）	柴油

（4）样品分析和成分谱构建

对受体、污染源样品进行颗粒物浓度、碳组分分析、水溶性离子分析和金属元素分析。先利用恒温恒湿自动称重天平系统测定颗粒物浓度。结合在线颗粒物浓度以及手工采样颗粒物浓度对比，采用 4d 法对采集的颗粒物样品进行首先剔除，挑选浓度相差在 20% 以内的样品进行样品分析。

对于挑选的样品，利用等离子体原子发射光谱仪（ICP-AES）和电感耦合等离子体质谱法（ICP-MS）测定样品中 33 种元素，包括 Si、Al、Ca、Mg、Fe、Ti、Ba、Sr、Zr、Li、Be、Na、P、K、Sc、V、Cr、Mn、Co、Ni、Cu、Zn、As、Rb、Y、Mo、Cd、Sn、Sb、Cs、Tl、Pb、Bi。利用离子色谱法分析水溶性离子 F⁻、Cl⁻、NO₃⁻、SO₄²⁻和 Na⁺、NH₄⁺、K⁺、Mg²⁺、Ca²⁺。利用热光法分析 TC、OC 和 EC。本项目未开展颗粒物中多环芳烃、左旋葡聚糖、正构烷烃等有机物测试。具体见表 5。

表5 济南市颗粒物分析方法

监测项目	分析方法	所用仪器	具体组分
颗粒物浓度	重量法	恒温恒湿自动称重天平系统	浓度
无机元素	离子体原子发射光谱法/质谱法	ICP-AES/ ICP-MS	33 种元素
水溶性离子	离子色谱法	离子色谱仪	11 种元素
碳组分	热光法	碳分析仪	OC、EC、TC

对于化学组分分析得到的滤膜各种组分，采用质量重构公式，地壳物质

=1.93[Mg]+2.2[Al]+2.49 [Si]+ 1.63[Ca]+1.94[Ti]+2.42[Fe]，硫酸铵 (SO_4^{2-}) 为 1.375 倍、硝酸铵 (NO_3^-) 为 1.29 倍和铵盐 (NH_4^+) 等，TE 为其他被测的金属元素，重构后环境受体样品各组分之和介于 80%~120%之内符合要求。污染源样品各组分质量百分比之和在 80~100%内符合要求，否则要剔除。环境受体样品的质量浓度采用有机膜和石英膜求平均，作为折算浓度，并分别换算有机膜和石英膜组分含量成一张膜上的质量浓度。

将全部有效的受体点位样品数据平均，得到济南市全市全年化学组分的平均质量浓度和百分比含量。

对于机动车源谱，根据 2020 年济南市机动车保有量类型及占比，构建济南市机动车源成分谱。

(5) CMB 模式模拟及清单法二次分配源解析结果

根据构建的受体和源成分谱，采用 CMB 模式进行济南市 2020 年大气颗粒物 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 源解析。根据 CMB 模型的数学诊断指标 (T-统计 (TSTAT)、拟合优度回归系数 (R^2)、残差平方和 (chi 或 χ^2)、百分质量 (PM) 以及灵敏度矩阵 (MPIN)、计算组分/测量浓度比 (C/M) 等)，结合济南市空气污染特征、气象条件、当地工业特征、机动车保有量、建筑施工情况、燃煤量情况等，并参考 2019 年颗粒物源解析，筛选确定合理的 2020 年源解析结果。

对于 CMB 结果中的硫酸铵、硝酸铵以及 SOC 等二次组分，需要结合大气排放源清单中各种组分对硫酸铵、硝酸铵以及 SOC 等二次组分的贡献率，计算 CMB 中二次转化对应的一次排放源，结合 CMB 中扬尘、燃煤、机动车等一次来源贡献，结合济南市 2020 年大气排放源清单，根据历年源解析结果、大气排放源中各组分占比等，综合评价解析结果，获得济南市 2020 年三个季节、7 个点位及全年的源解析结果。

3.3.2 福州源解析工作情况

(1) 工作目标和工作内容

2014 年 10 月，根据环境保护部《关于开展第一阶段大气颗粒物来源解析研究工作的通知》(环办[2014]7 号)要求，福州环境监测中心站开展第一轮福州市大气颗粒物来源解析研究工作，研究结论和对策建议为福州市“十三五” $\text{PM}_{2.5}$ 大气污染防治提供了有力支撑。经过多年来的努力，福州市的大气环境污染防治工作取得显著成效，城市环境空气质量长期居于全国省会城市前列。为了解福州市 $\text{PM}_{2.5}$ 来源贡献的变化情况，福州环境监测中心站于 2019 年开展了新一轮 $\text{PM}_{2.5}$ 来源解析工作。本轮福州市 $\text{PM}_{2.5}$ 来源解析工作主要参照中国环境监测总站《环境空气 颗粒物来源解析 基于受体模型法的源解析技术规范(试行)》(征求意见稿)的有关规定实施，并在实践中进行验证。

本项目主要工作内容包括：区域基本情况、污染源和环境空气质量调查、环境空气颗粒物监测、环境空气颗粒物化学组成的构建和分析、源解析模型计算、综合解析评估和对策建议等。本项目研究区域为福州市中心城区，实施时间为 2019 年-2020 年。本项目主要采用现场采样-实验室分析-受体模型法(简称受体模型法)，相应的技术路线见下图。

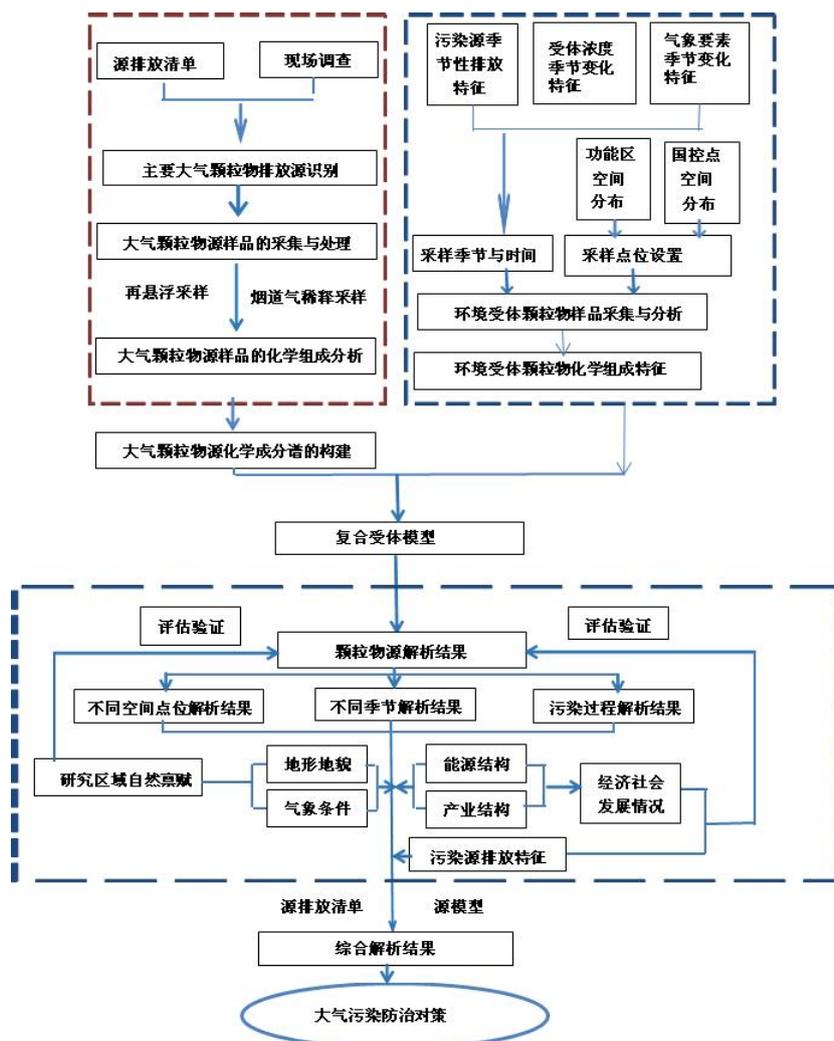


图3 福州市大气颗粒物源解析工作的技术路线

(2) 区域基本情况调查

调查城市的自然条件，收集近 5 年的气象条件、经济社会、能源消费历史数据，综合分析自然因素对城市大气环境质量的影响，分析气象条件的总体变化趋势、季节性变化等特点，分析经济发展、机动车保有情况、城市建设、能源消费的变化趋势。

(3) 污染源和环境空气质量调查

以 2017 年福州市排放清单为基准，并根据近两年情况进行更新。调查范围覆盖福州全市化石燃料固定燃烧源、工艺过程源、溶剂使用源、移动源、扬尘源、农业源、生物质燃烧源、储存运输源、废弃物处理源和餐饮源十大类。统计城市大气污染物（包括 SO₂、NO_x、PM₁₀、PM_{2.5}、VOCs 和 NH₃ 等）的排放量，计算不同污染物中主要一次排放源的排放分担率，分析各类污染源不同污染物在城市的不同区县中分布情况。

收集城市近 5 年首要污染物等空气质量相关的历史数据，评价 2019 年福州市环境空气质量，分析近 5 年空气质量总体变化趋势和时空变化特征。

(4) 环境受体颗粒物监测

1) 环境受体布点采样

本次受体采样点位设于晋安区金鸡山路 32 号环保大楼 9 层楼顶，距地面约 30m 左右，

周围为居民楼和企事业单位、学校，无明显局地污染源。该点为福州市大气颗粒物组分长期跟踪监测点位。

根据福州气象条件较显著的季节差异特点，本次环境受体采样工作分为春、夏、秋、冬四个季节进行，分别于 2019 年的 4~5 月，7~8 月，9~11 月和 12 月~2020 年 1 月开展四个阶段采样。在采样当天下午 4:30—次日下午 3:30，选择连续采集 23 小时。各点同步采样，采样期间记录当时气温、气压、相对湿度、风速、风向等气象参数。

采样仪器采用美国 Thermo 公司生产的四通道颗粒物采样器(型号：2300)，切割粒径为 2.5 μm 或 10 μm ，可同时采集 4 张 47 mm 滤膜。采样滤膜选择直径为 47 mm 的特氟龙滤膜及石英滤膜（美国 Whatman 公司生产）。每台采样器的 A、B 通道采集特氟龙滤膜，用于称重和离子、金属元素分析；C、D 通道采集石英滤膜。用于 EC/OC、有机物分析。

参照《环境空气 颗粒物来源解析 基于受体模型法的源解析技术规范》，本验证针对现场采样、滤膜称重、滤膜交接、滤膜保存等环节实行全过程质控。2019 年共采集颗粒物样品 158 个，有效样品 141 个。有效样品的采集数量符合 PMF 受体模型计算需求（不少于 100 个）。

2) 实验室颗粒物分析

分析项目包括 28 种无机元素 9 种水溶性离子和有机碳、元素碳，分析方法参照《环境空气颗粒物来源解析监测技术方法指南》（监测函[2020]8 号），见表 6。

表6 福州市化学组分分析及项目

分析项目	分析方法	仪器型号及名称
PM _{2.5} 质量浓度	重量法	METTLER TOLEDO XA105 百万分之一天平
OC、EC	热光反射法	DRI 2015 热光碳分析仪
SO ₄ ²⁻ 、NO ₃ ⁻ 、Cl ⁻ 、F ⁻ 、NH ₄ ⁺ K ⁺ 、Ca ²⁺ 、Mg ²⁺ 、Na ⁺	离子色谱法	Dionex ICS 1500 离子色谱仪
B、Na、Mg、Al、K、Ca、V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、As、Se、Sr、Cd、Ba、Pb	电感耦合等离子体质谱法	Thermo 公司 iCAP TQ 电感耦合等离子体质谱仪
Cr、Mn、Fe、Sn、Na、Mg、Al、Si、P、S、Cl、K、Ca、Sc、Ti、V、Co、Ni、Cu、Zn、Ga、As、Se、Sr、Cd、Sb、Ba、Pb	波长色散 X 射线荧光光谱法	布鲁克公司 S8 Tiger 波长色散 X 射线荧光光谱仪

质控措施包括空白样品、全程序空白、有证标准样品、加标回收、平行样品测定与多种实验室方法检测比对等措施，确保检验结果的可靠性。

(5) 环境受体成分谱的构建和分析

根据环境受体中颗粒物组成规律，结合统计检验，对异常值（可疑值）进行取舍。通过手工称量与自动监测数据比对、阴阳离子平衡分析、化学组分质量重构分析，检验分析结果的可靠性。根据 130 对 PM_{2.5} 样本组分分析结果的质量重构浓度与采样称量的质量浓度相关性分析，两者具有较强的一致性和显著的相关性，相关系数 R 值 0.8486，重构结果较为满意。

根据福州第一阶段环境空气颗粒物来源解析研究成果，构建了福州市的本地化源谱。各

源类根据各自不同特点采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谱。

通过颗粒物质量重构方法，将化学组成为有机物、元素碳、硫酸盐、硝酸盐、铵盐、地壳物质（矿物尘）、微量元素及其他，分析福州市颗粒物化学组分的全年及各季节构成占比情况。并通过颗粒物特定化学组分的比值（OC/EC、NO₃⁻/SO₄²⁻），进一步分析颗粒物污染的特征。

（6）源解析模型计算

参照《环境空气 颗粒物来源解析 基于受体模型法的源解析技术规范》，本验证利用美国 EPA PMF5.0 软件，对福州市2019年观测期间PM_{2.5}的来源进行解析。在进行数据来源解析之前，进行了严格的数据质量审核。综合考虑元素的源示踪性和浓度水平、不确定性等因素，筛选了共143组环境样本纳入分析，参与分析的化学组分包括 OC、EC、SO₄²⁻、NO₃⁻、NH₄⁺、Cl⁻、K、Ca、Na、Mg、Al、Mn、Fe、Ni、Cu、Zn、Cd、Ba、Pb、Ti、V、Cr、Co、As、Se、Si等26种，各组分输入模型的数据不确定性结合采样与分析过程中的总误差确定。

通过分析不同组分时间变化情况、不同组分之间相关性等，对输入的数据进行初步检验，并对异常值进行剔除，剔除可疑数据后输入模型的有效数据量为115组。综合考虑元素的源示踪性和浓度水平、不确定性等因素，调整各指标权重设置情况。

模型计算采用尝试法以确定解析因子数，从因子数为 5-11 逐步尝试，以确保每个来源能够有效分离，且每个独立源不被拆成多个因子为最佳选择。经过反复试算，根据 PMF 模型计算结果，得出 7 类因子的源廓线。基于主要源类示踪物种、各因子的化学组分及相对贡献率，识别各因子的来源。结合分析主要源贡献的时间序列变化特征，判断解析结果的合理性。

（7）综合解析评估和对策建议

利用受体模型解析得到二次气溶胶是本市 PM_{2.5}中的最大贡献源，但由于该解析手段无法进一步对二次气溶胶的具体排放源落地，因此本研究结合福州本地的污染源排放清单，对颗粒物污染进行综合来源解析，以完善福州本地排放源的 PM_{2.5}解析结果。

福州环境空气中 PM_{2.5}来源以本地为主，二次污染物占比较高。造成福州市环境空气细颗粒物的污染成因主要为：1、机动车增长、工业生产、城市化建设等人为活动导致大气污染物排放持续增加。2、盆地地形、城市布局的局限影响城区环境空气中污染物的扩散。3、特殊气象条件对污染物传输、转化的影响加剧市区空气质量异常变化。

福州市环境空气细颗粒物浓度水平总体不高，但呈现出污染物来源多样、相互作用明显的复合型污染特征。为全面提升福州市环境空气质量，保障公众健康，促进福州社会经济的全面均衡可持续发展，根据福州市细颗粒物来源解析研究成果，综合考虑福州市经济发展特点和大气污染状况，制定了以细颗粒物（PM_{2.5}）为重点控制对象的空气质量提升战略。

4 标准制订的基本原则和技术路线

4.1 标准制订的基本原则

科学性原则 所制订的标准能够满足源解析工作的特定技术需求，所选择的技术方法要科学合理。

适用性原则 所制订的标准要能够在不同地区的源解析工作中使用，在技术上可行，具有可操作性。

规范性原则 所制订的标准要对源解析工作整体上进行统一规定，提高源解析结果的可比性。

4.2 标准制订的技术路线

通过调研国内源解析工作业务化进展、国内外相关源解析标准、典型城市源解析工作情况，确定标准主要内容。针对源解析工作的主要环节，包括基本情况调查、污染源和环境质量调查、环境受体和污染源颗粒物监测、源谱库和环境受体成分库构建及特征分析、受体模型计算、综合解析评估，开展技术研究，确定相应的技术要求，形成标准文本及编制说明初稿。选择典型城市开展标准规范的应用验证，在北方地区和南方地区分别选择济南、福州，在实际应用中检验标准文本的适用性，对标准进行修改完善。具体技术路线见图 4 所示。

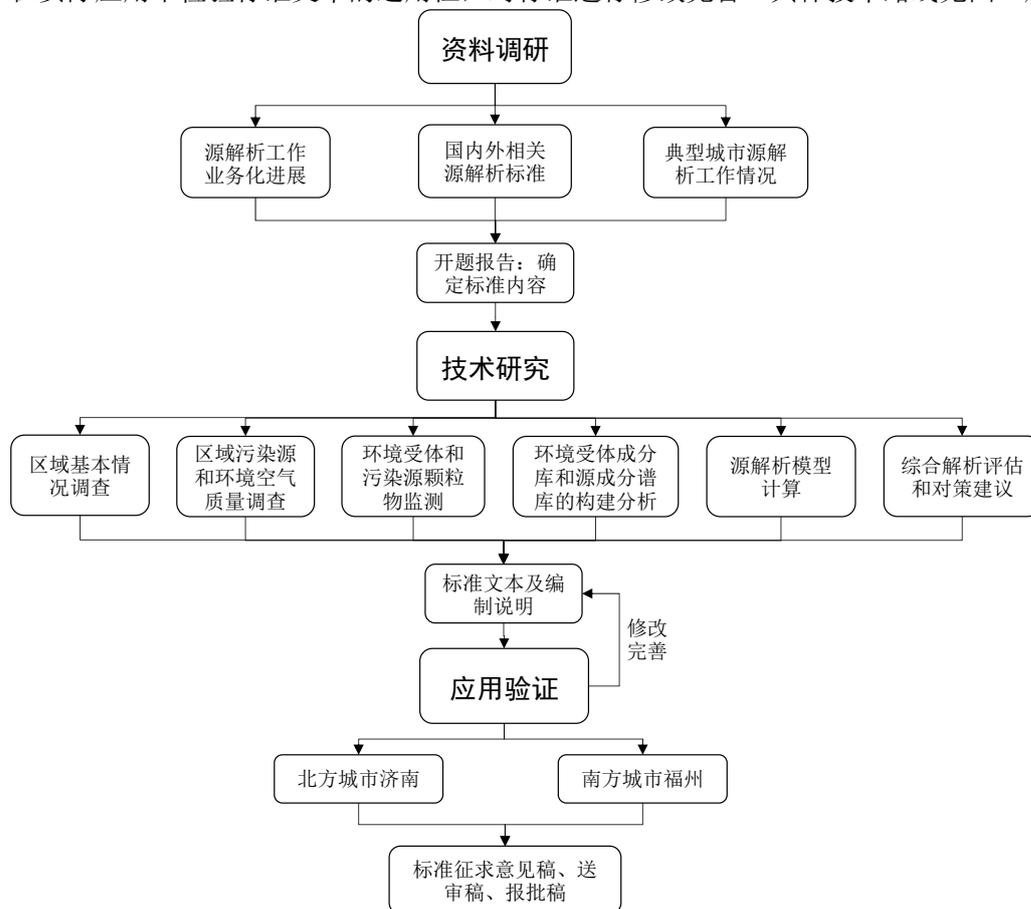


图4 标准制修订技术路线

5 研究报告

5.1 适用范围

目前各地采用的常规源解析方法主要为现场采样-实验室化学分析-受体模型法（简称“受体模型法”）该方法在实际源解析工作中应用广泛，而且业务化开展较为成熟。因此本

标准规定了基于受体模型法的环境空气颗粒物来源解析（简称“颗粒物源解析”）主要环节的技术要求，包括方案制定、基本情况调查、污染源和环境质量调查、环境受体和污染源颗粒物监测、源成分谱库和环境受体成分库构建及特征分析、受体模型计算、综合解析评估等。

本标准适用于城市基于受体模型法的环境空气颗粒物来源解析工作。

5.2 规范性引用文件

本标准主要引用了污染源和环境空气采样相关标准规范、颗粒物组分相关的分析测试标准、生态环境部发布的源解析相关技术文件，此外，还列上将要发布以及正在制修订的标准规范。

5.3 术语和定义

本标准涉及到“环境受体”、“颗粒物排放源”、“污染源标识组分”、“一次颗粒物”、“二次颗粒物”、“颗粒物源成分谱”、“环境空气颗粒物来源解析”、“正定矩阵因子分解模型”、“化学质量平衡模型”术语和定义。

“环境受体”、“颗粒物排放源”定义参考了《大气颗粒物来源解析技术指南（试行）》（环发[2013]92号）；“一次颗粒物”、“二次颗粒物”、“环境空气颗粒物来源解析”定义参考了《环境空气颗粒物来源解析技术路线（试行）》（环办函[2015]191号）；“污染源标识组分”、“颗粒物源成分谱”、“正定矩阵因子分解模型”、“化学质量平衡模型”主要是参考文献资料并总结工作经验而来。

5.4 基本原则和工作内容

5.4.1 基本原则

总结各地颗粒物来源解析工作经验，从工作目的、技术方法、工作内容、工作发展等方面，确定源解析工作的4大基本原则，分别为：科学性原则、实用性原则、可行性原则和前瞻性原则。

（1）科学性原则。开展颗粒物来源解析工作是“科学治污”的重要体现。颗粒物来源解析工作是一项技术性很强的工作，需要从头到尾贯彻科学性，确保解析结果对污染防治进行有效支撑。科学性原则包括：一是指颗粒物来源解析工作要选择科学的技术方法体系，二是指源解析结果能够科学客观地反映当地环境空气颗粒物的主要来源及其时空变化的特征和规律。

（2）实用性原则。一个城市的颗粒物来源解析结果应该是该城市采取各类措施，治理颗粒物污染的出发点。城市颗粒物来源解析工作是城市颗粒物污染防治工作的重要组成部分。因此，不能将城市颗粒物来源解析工作和颗粒物污染防治工作割裂开来，需要将其有机融合。颗粒物来源解析工作一开始就要从当地环境管理的迫切需求出发，紧密围绕颗粒物污染防治目标，制定工作目标和方案，优先解决当地大气污染防治方向亟需解答的重大问题。

（3）可行性原则。颗粒物来源解析工作涉及到的技术环节众多，各有不同层次的技术要求。比如基于CMB模型和PMF模型的源解析工作对每个技术环节的要求有一定差异，源解析工作有基本要求和进阶要求。因此，各地开展颗粒物来源解析工作要从当地工作基础和实际能力出发，选择切实可行的颗粒物来源解析技术方法，制定合理的源解析工作方案，

使颗粒物来源解析工作在经济上合理，技术上可行，具有可操作性。

(4) 前瞻性原则。颗粒物来源解析工作不仅是颗粒物污染防治的基础，而且应该要做到先行一步，根据污染防治的规律提前做技术准备。这就要求颗粒物来源解析工作既要围绕当前环境保护的工作目标，又要结合环境保护的发展战略。另外，颗粒物来源解析工作既要考虑当地颗粒物来源解析工作的现状和技术水平，又要考虑未来源解析技术发展，不断利用相对成熟的新技术，提高解析结果的精准度。

5.4.2 工作程序

总结典型城市颗粒物源解析工作情况，确定基于受体模型法的源解析工作的工作程序，即根据城市颗粒物源解析需求和城市软硬件条件，制定颗粒物源解析工作方案，在开展基本情况调查、污染源和环境质量调查、环境受体和污染源颗粒物监测、源成分谱库和环境受体成分库构建及特征分析、受体模型计算等工作的基础上，进行颗粒物来源综合解析，提出颗粒物污染防治对策和建议，最终编制源解析报告。源解析工作程序图见下图。

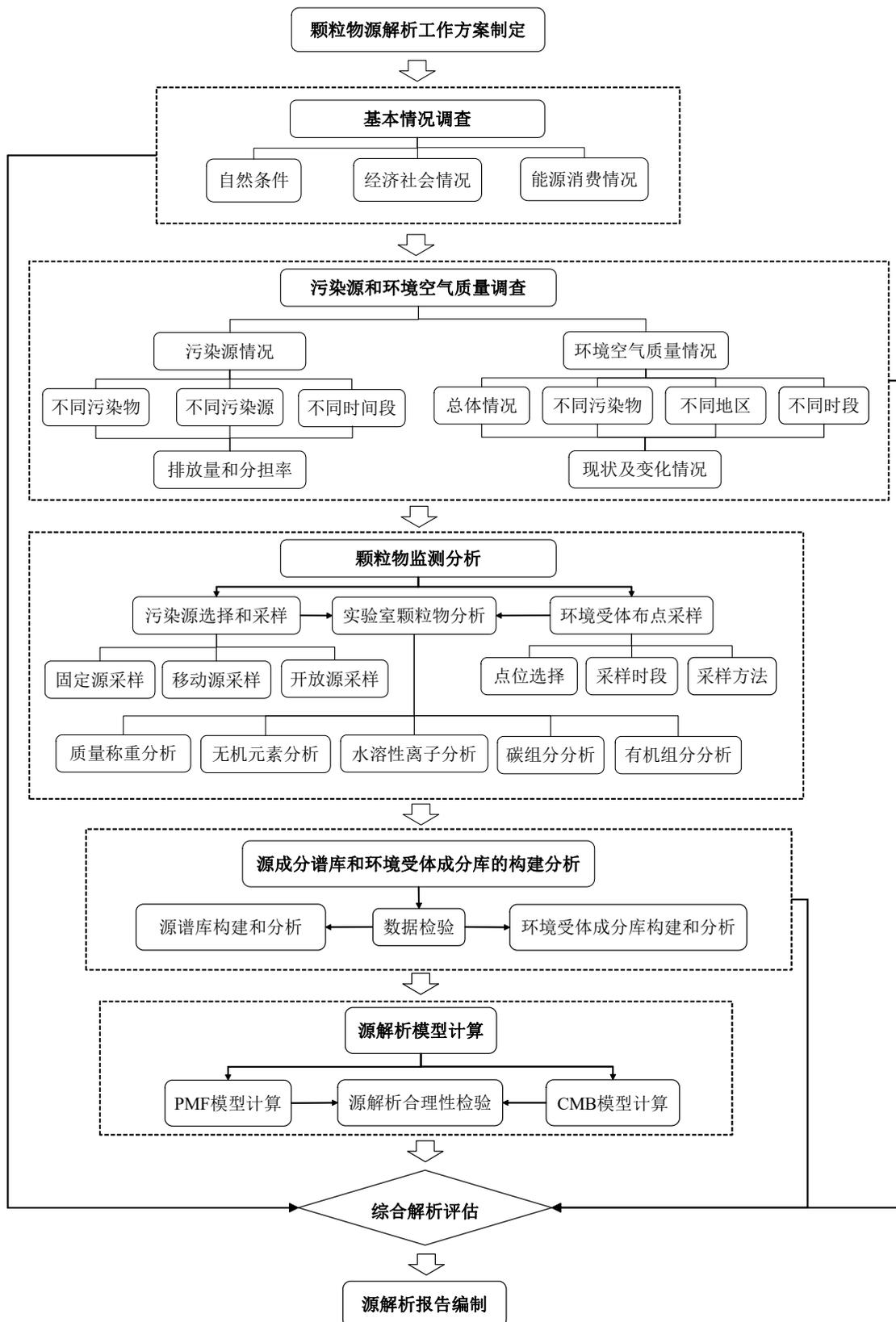


图5 颗粒物源解析工作程序

5.5 源解析工作方案制定

开展源解析工作首先需要因地制宜地制定源解析工作方案。源解析工作目标需要围绕当地环境空气颗粒物污染防治目标而确定。根据当地环境空气颗粒物污染防治需求、源解析工作条件以及经费情况等，选择适合的技术路线，制定科学可行的源解析工作方案。

环境空气颗粒物来源解析工作方案是颗粒物来源解析各项工作环境的详细说明和安排，一般应包括：任务背景、技术路线、工作内容及技术方法、组织形式与人员分工、项目进度及预期成果、质量保证和质量控制、经费预算。颗粒物来源解析工作方案的编制要求见附录 A。源解析工作涉及到大量的监测工作，包括采集各类污染源排放颗粒物，采集一年（涵盖四季）的环境受体颗粒物样品，对颗粒物及其化学组分进行分析。而这些监测工作得到的大量数据被直接用于受体模型计算得到初始源解析结果。环境监测工作是整个源解析工作的关键部分。因此，源解析工作方案中对于监测工作安排需要科学可行，以保证监测数据满足源解析工作需求。

5.6 基本情况调查

5.6.1 自然条件

自然条件是影响城市环境空气质量的重要因素，包括地理位置及地貌特点、气象条件等。总结各地的源解析工作开展情况，一般需要调查收集上述相关的自然条件数据，其中气象条件包括气温、湿度、风向、风速、降水量、大气能见度、大气边界层厚度等数据。收集空间范围是以目标城市为主，对于地理位置及地貌特点，还需要收集相邻区域的情况。收集的时间范围是近 5 年。对于收集数据进行总结，综合分析自然因素对城市环境空气质量的影响，为源解析工作中受体点位布设、采样、结果评估等环节提供关键基础信息。

5.6.2 经济社会情况

经济社会情况直接影响环境空气颗粒物相关的各类污染源分布情况。总结源解析工作经验，一般需要收集城市近 5 年的经济社会情况相关数据，包括人口数据、经济数据、机动车保有量数据、城镇化率、城市建成区绿化覆盖率、森林覆盖率、裸露土地面积、城市建设面积、道路面积及房屋建筑施工面积数据等，分别从人口情况、产业情况、机动车情况以及城市建设情况初步分析当地可能的污染来源，为源解析工作中源样品采集及源谱构建、模型拟合提供先验信息。

5.6.3 能源消费情况

能源消费情况直接关系到各类污染物的排放情况。总结各地的源解析工作开展情况，一般需要收集城市近 5 年的各类能源消耗数据（包括煤炭、天然气、汽油、柴油等）、单位 GDP 能耗数据、工业能源消费和民用生活能源消费数据等，分析能源消费结构、能源利用效率、高能耗行业，为源解析工作中源谱构建、结果评估提供当地实际信息。

5.7 污染源和环境空气质量调查

5.7.1 污染源调查

通过污染源调查,收集城市的大气污染源排放清单,了解城市内各类污染源排放各类污染物的情况,具体污染物包括 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 一次排放源情况,以及与颗粒物二次生成相关的气态污染物(SO_2 、 NO_x 、VOCs等)排放源情况,为识别污染源提供基础信息。由于构建大气污染源排放清单是与受体模型源解析相平行的另一项工作,而且已有相关的技术指南,因此在本标准并不对源清单编制进行具体规定,要求在已有的源排放清单的基础上进行分析,以验证受体模型法得到的源解析结果,同时将源解析结果进一步细化。因此,总结源解析工作经验,要求需要收集城市最新的大气污染源排放清单,分析城市内的大气污染排放情况,以及时空分布特点。主要包括以下三方面的工作:

(1) 统计分析城市大气污染物(包括 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_x 、VOCs和 NH_3 等)的排放量,计算不同污染物中主要一次排放源和二次排放源的排放分担率。

(2) 统计分析各类污染源不同污染物在城市不同区县中的分布情况,确定每个区县的主要污染源及污染物。统计分析城市中国、省控重点污染源的分布情况,按照污染物,分别确定各重点源的排放量和分担率。

(3) 重点统计分析特定时间段(环境受体采样的代表性时段)颗粒物相关污染物的排放情况;特定污染源的不同污染物及细分污染源(如机动车的柴油车和汽油车)排放情况。

5.7.2 环境空气质量调查

在源解析工作中,需要了解城市环境空气质量情况,分析环境空气质量总体状况、大气污染物的浓度水平、时空变化以及初步来源情况,总结城市的空气污染特征。尤其是颗粒物污染物,需要深入分析不同粒径($PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 等)颗粒物污染状况、季节性变化特征等。总结各地的源解析工作开展情况,需要开展以下三方面的工作:

(1) 收集城市近5年首要污染物等空气质量相关的历史数据,评价空气质量的现状,分析空气质量总体变化趋势和首要污染物分布情况。

(2) 收集城市近5年的常规监测历史数据,包括6项污染物(SO_2 、 NO_2 、 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 、 O_3 和CO)、降尘、降水中阴阳离子(SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- 、 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 NH_4^+ 等)等,分析时空变化特征。

(3) 计算近5年主要污染物浓度之间的比值(如, SO_2/NO_2 、 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 等),分析不同污染物相关性,总结变化趋势特征,初步分析不同污染时段的主要污染源类。

5.8 环境受体和污染源颗粒物监测

5.8.1 环境受体布点和采样

(1) 基本要求

受体模型法源解析结果的科学性首先在于环境受体布点采样是否科学。源解析工作首先要从源解析结果科学性角度,兼顾工作经济可行,开展环境受体布点采样。因此,根据当地颗粒物污染状况、自然条件和工作条件等,结合所采用的源解析技术要求,综合制定环境受体采样方案。

由于各城市产业结构、经济社会发展程度以及自然条件不一样，我国城市颗粒物污染处于煤烟型污染、混合型污染、复合型污染并存的局面，对应的首要颗粒物分别为总悬浮微粒（TSP）、可吸入颗粒（PM₁₀）、细颗粒（PM_{2.5}），因此颗粒物防治工作比较复杂。全国各城市中，由环境管理部门组织开展的城市源解析工作涉及颗粒物类型情况见图 6。2021 年调查结果显示在全国开展过颗粒物源解析的城市中，主要开展的颗粒物类型为 PM_{2.5}、PM₁₀，比例分别为 97.79%和 45.59%，小部分城市开展了 TSP 和 PM_{1.0}，比例分别为 8.09%和 2.21%。说明 PM_{2.5}、PM₁₀ 是全国城市源解析工作主要关注的颗粒物类型，各地的管理需求存在一定的差异。源解析工作应该因地制宜，围绕城市的污染特点以及防治需求进行，源解析关注的颗粒物至少要包括城市的首要颗粒物。此外采集的样品要具有城市代表性，以及足够的颗粒物污染信息。

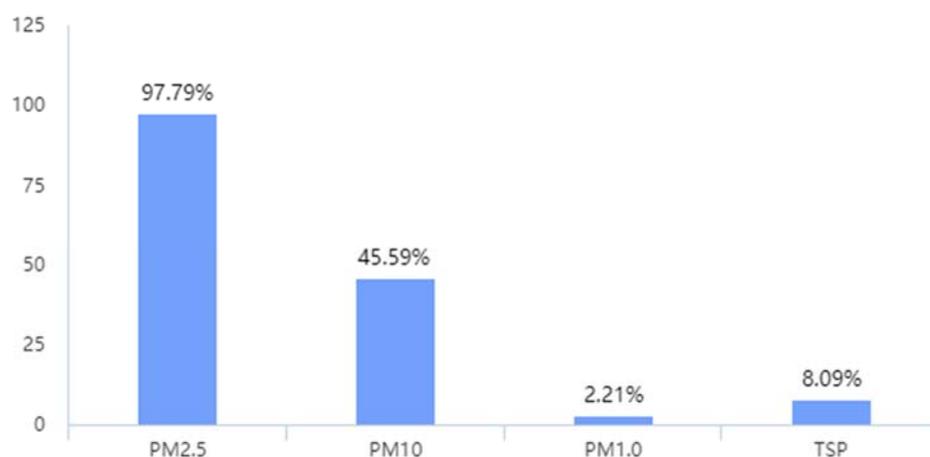


图6 全国城市的源解析工作中涉及的颗粒物类型

(2) 采样点位布设

a) HJ 664 列出了不同城市的布点要求，用于城市环境空气质量的监测评估。本标准原则上按照 HJ 664 进行环境受体样品监测点位的布设。然而，城市环境空气质量监测是以自动监测为主，而源解析工作中监测环节以手工分析为主，工作量巨大。所以，环境受体监测点位数量的上限要求不能完全参照 HJ 664 的要求。为了提高源解析工作的效率，应选择能搞代表城市不同区域颗粒物排放情况的点位。因此，在现有的监测点位中，有必要筛选分析。通过比较近 2 年 6 项污染物在线监测数据，经专家论证，合并其中相似度高的监测点位，确定有代表性的环境受体采样点位。为了保证城市环境受体采样的代表性，本标准规定了点位数量的下限要求，一般不少于 3 个。

表7 HJ 664 中对于城市环境空气质量评价点位设置数量要求

建成区城市人口（万人）	建成区面积（km ² ）	最少监测点数
<25	<20	1
25-50	20-50	2
50-100	50-100	4
100-200	100-200	6
200-300	200-400	8
>300	>400	按每 50-60 km ² 建成区面积设 1 个监测点，并且不少于 10 个点

b) 总结源解析工作经验，采样点位的具体设立需要综合考虑工作目的、城市面积、城市功能区划分、人口密度、环境敏感程度、主导风向上下游以及经费情况等，同时与城市环境空气质量监测评估尽量保持一致，环境受体采样点位需要在城市环境空气质量监测点位的基础上，优先在国家、省和市级环境空气监测点选择，兼顾清洁对照点、区域传输点等设置。

(3) 采样时间

a) 在一年四季中，自然条件（如气温、光照强度等）和人类生活生产活动有一定的季节性变化规律，从而对环境空气中颗粒物排放产生影响。因此，常规的源解析工作是有必要覆盖一年四季的时段。2021 年源解析调查显示开展源解析工作的 136 个城市大部分会选择一年四个季节采样，春、夏、秋、冬的选择比例分别为 78%、84%、93%、90%。

样品的采集数量应符合受体模型计算要求，如对于 PMF 模型，在同一点位采集的有效受体样品数量不少于 100 个。因此规定每个点位在每个季节采集的有效样品数量不少于 25 个，最终可以得到 100 个样品，满足 PMF 模型计算需要。

b) 常见的采样模式有均匀间隔采样或持续采样。2021 年源解析调查（图 7）显示在采样的模式上，136 个城市中分别有 54%、21%和 10%的城市选择按季节每日连续采样、全年均匀间隔采样、按月份每日连续采样的采样模式，除此之外有 15%城市选择其他方式，包括全年持续采样、按采暖季和非采暖季连续采样等。除了常规采样，对于不同污染程度天气（图 8），有 31.62%的城市开展了加密采样，68.38%的城市未开展加密采样。关于常规的采样模式，各地广泛采用的均匀间隔或连续采样能提高源解析的代表性。对于不同污染程度天气，有必要根据当地源解析工作的需要进行加密采样，为各地削减特定污染程度天气，尤其是重污染天气提供支持。

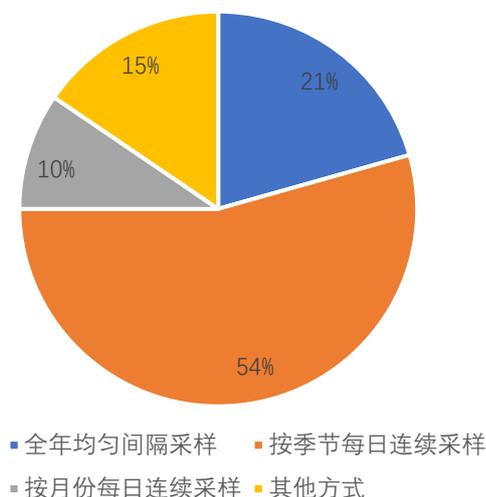


图7 常规采样中所采用的模式

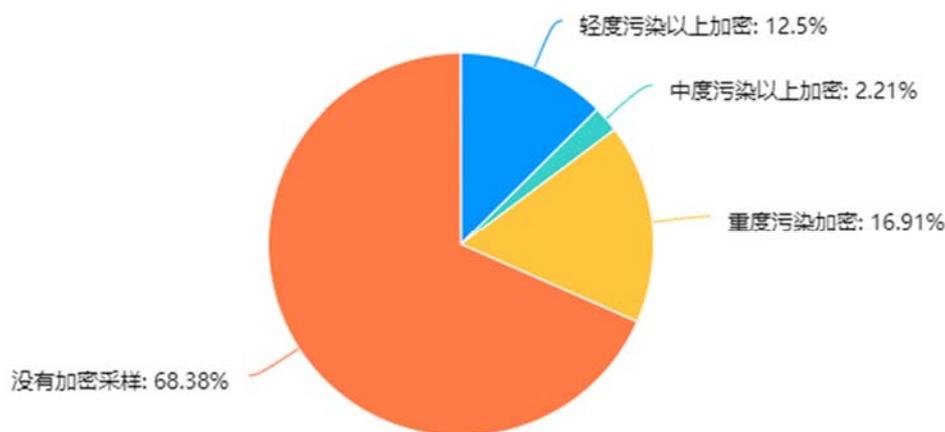


图8 污染时段加密采样情况

因此，本标准确定，选择春、夏、秋、冬四季进行连续（比如每个季节连续采样 1 个月）/均匀（比如全年每 3 天采样 1 次）常规采样方法和污染时段加密方法结合方式。各地根据实际情况以及采用的受体模型，选择其中一种常规采样方法。从受体模型的计算原理角度出发，相比而言，CMB 模型源解析方法宜采用连续采样方式（比如每个季节连续采样 1 个月），PMF 模型源解析方法宜采用均匀采样方法（比如全年每 3 天采样 1 次）。

c) 削减重污染天数是各地大气污染防治的一个重要目标。源解析需要针对性地提供技术支撑，重点关注颗粒物重污染的来源分析。因此，对预报为中度及以上污染天气的，监测频次按每天采样 1 次；对采暖、风沙、生物质燃烧等特殊影响时期，在这些时段监测频次按每天采样 1 次。

d) 从环境受体样品的代表性上，要求考虑当地颗粒物浓度、排放源的季节性变化特征及气象条件等，根据颗粒物监测的历史数据规律分析（7.1.2）确定采样时段，应覆盖颗粒物质量浓度变化的波峰和波谷。

(4) 采样方法

a) 目前已有相关标准方法，可直接参照执行。本标准规定为保证可比性，采样方法需要参照 HJ 656、HJ 194、《环境空气颗粒物来源解析监测技术方法指南》标准规范要求进行。

b) 考虑受体模型的要求以及手工采样分析的可行性，确定受体样品的采集以日为单位。由于手工采样换膜需要时间，无法采满 24 小时，因此确定每日采样时间一般不少于 22 小时。目前颗粒物自动监测可得到小时值的颗粒物质量浓度，而且起止时间都是整点时间。为了保证与颗粒物自动检测的可比性，本标准要求手动采样的起止时间为整点时间。

c) 各地可根据颗粒物浓度等因素，适当调整每次采样时长或每日采样数量，如碰到重污染过程，考虑到滤膜过负荷，可调整每次采样时长或每日采样数量。当颗粒物浓度过低时，可连续采集 2 日作为 1 个样品；当颗粒物浓度过高时，每日可分别采集昼间和夜间 2 个样品。

5.8.2 污染源选择和采样

(1) 基本要求

采用当地城市的本地化的污染源谱可提高源解析结果的精准性。而本地化源谱的获得需要通过实际采样分析。根据当地污染源调查情况和工作条件等，结合所采用的源解析方法，确定污染源采样方案。污染源颗粒物采样需采集污染源排放到空气中较稳定存在的颗粒物，必要时利用特定装置（稀释通道采样装置、再悬浮采样装置等）进行采样。采集的样品要具有污染源排放的代表性，满足颗粒物组分分析要求。按照颗粒物分析要求，不同的分析项目对采样滤膜要求不同，因此污染源采样需要分别采集颗粒物的石英滤膜和有机滤膜样品。

(2) 污染源分类

根据环境管理需求和污染程度，参考7.1.1中源清单的污染源分类方式，在满足受体模型解析方法的前提下，本标准对城市的一次颗粒物排放源进行统一分类，为颗粒物排放源的颗粒物采样分析，构建相应的污染源谱提供支持。

2014年8月和2014年12月，原生态环境部发布了《大气细颗粒物一次源排放清单编制技术指南（试行）》《大气可吸入颗粒物一次源排放清单编制技术指南（试行）》^[30,31]等技术指南。上述两批大气污染物源排放清单编制技术指南是分别按照污染物种类和污染源源类两个方向分别出发编制的，涉及大气细颗粒物、挥发性有机物、氨、可吸入颗粒物、道路机动车、非道路移动源、生物质燃烧源、扬尘颗粒物等方面。后面随着清单编制工作的开展，原生态环境部总结形成综合性的城市排放清单编制技术指导手册《城市大气污染源排放清单编制技术手册》，全面指导城市层面排放清单的编制。目前，城市排放清单编制技术将我国人为大气污染源分为化石燃料固定燃烧源、工艺过程源、移动源、溶剂使用源、农业源、扬尘源、生物质燃烧源、储存运输、废弃物处理源和其它排放源十大类。与一次颗粒物相关的排放源相关的主要污染源包括化石燃料固定燃烧源、工艺过程源、移动源、扬尘源、生物质燃烧源等。

在受体模型源解析工作中，参考现有的一次源排放清单编制技术，结合各地的实践经验，总结颗粒物一次排放源一般分为燃煤、移动源、扬尘、工业工艺过程源、其他源等。参考源清单编制方法中各排放源的定义，确定源解析中主要各排放源的定义。参考化石燃料固定燃烧源的定义，确定燃煤源的定义。燃煤源是指利用煤炭燃烧时产生热量，为发电、工业生产和生活提供热能和动力的燃烧设备。移动源是指由发动机牵引、能够移动的各种客运、货运交通设施和机械设备。扬尘是指在自然力或人力作用下各种不经过排气筒、无组织、无规则排放地表松散颗粒物质的颗粒物排放源。工业工艺过程源是指工业生产和加工过程中，以对工业原料进行物理和化学转化为目的的工业活动。其他源是指上述源分类未涵盖的颗粒物排放源集合，比如餐饮源、生物质燃烧源等。

根据行业划分将一次源类分为二级污染源类。对于燃煤源，根据燃煤用途及设备不同，燃煤源可以分为电厂燃煤源、供热燃煤源、工业锅炉源、民用燃煤源、其他燃煤等二级源类。对于移动源，根据应用场景和使用的燃料不同，移动源可以分为汽油车源、柴油车源、其他道路移动源等，工程机械源、农用机械源、船舶源、飞机源等非道路移动源等二级源类。对于扬尘，根据扬尘颗粒的来源，分为土壤扬尘、道路扬尘、施工扬尘和堆场扬尘等二级源类。对于工业工艺过程源，根据行业不同，可分为钢铁源、有色冶金源、建材源、石油化工源、

其他工业工艺过程源等。

总结受体模型法源解析工作和源清单工作，确定本标准中一次源的一级源类和二级源类，见表8。在标准正文的附录中，提供该表作为资料性附录供参考使用。

表8 一次颗粒物排放源分类

一级源类	二级源类
燃煤源	电厂燃煤源
	供热燃煤源
	工业燃煤源
	民用燃煤源
	其他燃煤源
移动源	汽油车源
	柴油车源
	其他道路移动源
	工程机械源
	农用机械源
	船舶源
其他非道路移动源	
扬尘	道路扬尘
	施工扬尘
	土壤扬尘
	其他扬尘
工业工艺过程源	钢铁源
	有色冶金源
	建材源
	石油化工源
	其他工业工艺过程源
其他源	生物质燃烧源
	餐饮源
	海盐粒子
	其他

(3) 固定源采样

关于固定源的选择。为保证采样的代表性，根据二级污染源类划分，选择2个有代表性并在源清单（7.1.1）中该子源排放量占比大于60%的二级污染源进行采样，当2个有代表性的二级污染源的排放量占比小于60%时，应适当增加同类污染源的采样。

关于固定源的采样频次。每个污染源需采集3组有效样品；对于燃料或生产工艺等存在显著季节性变化的污染源，需要按季节分别采样。

关于固定源的采样工况要求，为了采集有代表性的颗粒物样品，需要保证污染源应处于

正常工况条件（即日常生产保持稳定的工况条件）。

关于固定源的采样方法。固定污染源颗粒物采样比较复杂，直接采样法采集的样品是固定源条件下（比如高温高湿）的颗粒物，即可捕集颗粒物。但是该颗粒物样品与污染源最终排放到环境中的颗粒物是不同的。固定源排放到大气的过程中，随着温度和湿度降低，会生成大量的颗粒物。这部分颗粒物在烟道中烟气温度下为气态的挥发和半挥发性物质，当排放进入大气环境后稀释降温，会经均相和非均相成核形成的颗粒物，即可凝结颗粒物。通过稀释通道法可采集可捕集颗粒物和可凝结颗粒物，因而可以更好反映固定源实际排放颗粒物的样品。

2021年源解析调查显示136个开展过源解析工作的城市中，有79个城市开展固定源的燃煤源采样(图9)，主要的采样方法包括稀释通道法(63.29%)、下载灰+再悬浮法(31.65%)和烟道直接采样法(12.66%)。说明稀释通道法用于固定源采样已比较普遍。因此，在本标准中优先选择稀释通道法。对于受现场条件或设备条件限制，也可采用烟道直接采样方法或再悬浮采样方法。相关方法参照GB/T 16157以及《环境空气颗粒物来源解析监测技术方法指南》。

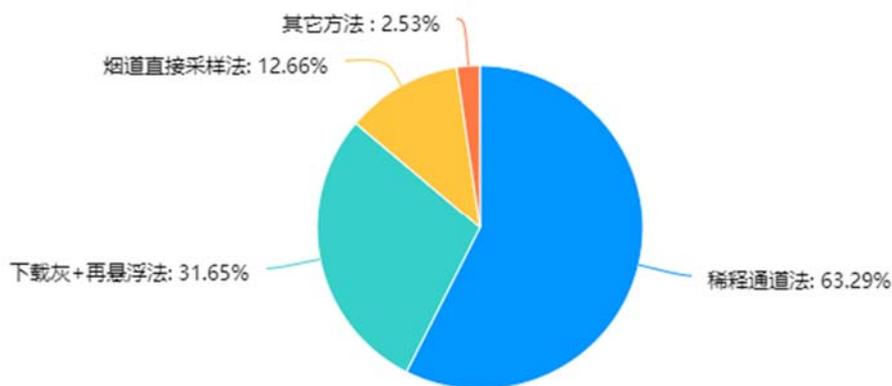


图9 固定源的燃煤源颗粒物采样方法

(4) 开放源

关于开放源分类。在颗粒物源解析工作中涉及的开放源主要为各类扬尘，如土壤扬尘、道路扬尘、施工扬尘、堆场扬尘。根据城市的扬尘源清单，参照HJ/T 393的有关要求，对产生扬尘的场所和活动进行调查，识别与本地区颗粒物来源相关的主要扬尘类别。

关于采样点位设置。参照《环境空气颗粒物来源解析监测技术方法指南》以及正在制订的标准（HJ××× 环境空气 颗粒物来源解析 开放源扬尘采样技术规范（试行）），确定土壤扬尘、道路扬尘、施工扬尘、堆场扬尘、二次扬尘的点位布设要求。

关于采样技术方法选择。目前各地采用较多的采样方法为现场采集全粒径颗粒样品-实验室再悬浮采样。2021年源解析调查中，开展扬尘源采样的87个城市中，有92%的城市采用现场采集-实验室再悬浮采样方法。该方法可有效采集不同粒径的扬尘样品，因此在本标准优先选择。相关方法参照《环境空气颗粒物来源解析监测技术方法指南》。现场采样和实验室采样应远离其他污染源或其他扬尘子源，减少不同源类的交叉影响。在实验室再悬浮采

样过程中，要防止不同扬尘之间的交叉污染。对于不同子源样品，甚至更细分的源类样品，采样中谨慎对待样品的混合。

(5) 移动源

关于移动源分类。因为各地源解析中贡献大的移动源主要为机动车，所以本标准规定了机动车排放源的采样。对机动车的分类，先根据所用燃料种类，可以分为汽油车、柴油车、其他机动车等子源，然后再根据应用场景，可进一步为重型、中型、小型的卡车和客车，摩托车等。根据城市的移动源清单，识别与本地区颗粒物来源相关的主要移动源类别。

关于移动源采样。2021年源解析调查中，136个开展源解析城市中，只有57个城市开展移动源采样，采用的采样方法见图10。结果显示有68.4%城市采用稀释通道采样方法，31.6%城市采用隧道法。本标准规定对于机动车，采用隧道法或稀释通道法进行采样，相关方法参照《环境空气颗粒物来源解析监测技术方法指南》。其中稀释通道法采样根据实际情况，可选择在机动车排放检验机构、实际道路开展。根据当地城市的实际情况，必要时，可进行工程机械、农用机械、船舶等非道路移动源的采样。比如，涵盖港口的城市有条件可进行船舶源的采样。

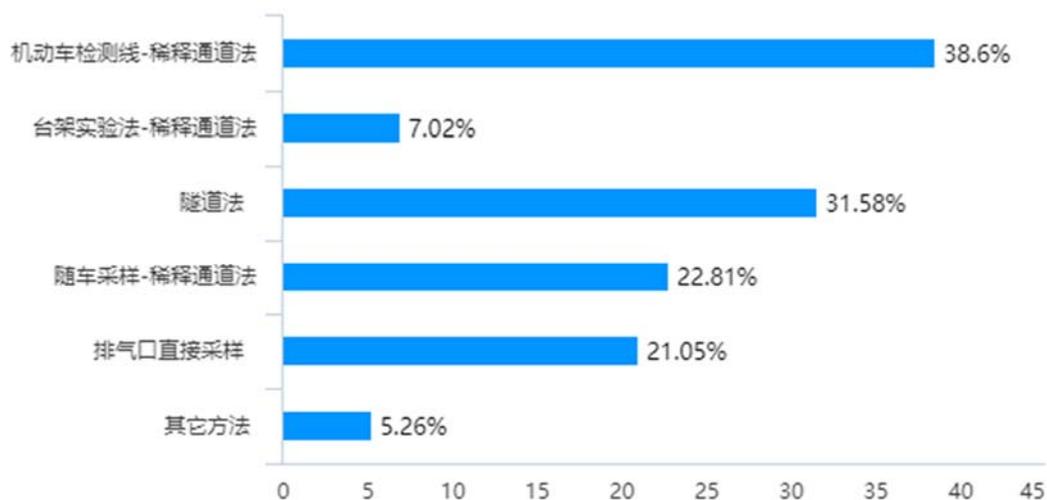


图10 移动源采样方法情况

关于机动车源工况要求。台架实验法可以很好模拟机动车的工况，但是该方法成本较高，因此本标准未做具体规定。在机动车排放检验机构或实际道路开展采样相对可行和普遍。因此本标准规定了在机动车排放检验机构或实际道路开展时采样的要求。在机动车排放检验机构采样，参照GB 3847、GB 18285、GB 18352.6规定的工况要求进行采样。在实际道路采样，选择接近于车辆正常使用时的道路运行路况分别进行采样。

5.8.3 实验室颗粒物分析

(1) 基本要求

各地根据所采用的源解析方法对颗粒物组分的分析测试需求，以及当地污染源颗粒物组分特征，结合实际具备的监测分析条件，科学选择监测项目和分析方法。根据颗粒物分析项目的要求，颗粒物样品包括石英滤膜和有机滤膜样品。这两种样品均需要进行颗粒物质量浓

度，石英滤膜样品用于碳组分、有机物等分析，有机滤膜用于无机元素、可溶性阴阳离子等分析。

(2) 颗粒物分析项目

考虑各地源解析技术条件的差异，将颗粒物分析项目分为必测项目和选测项目。必测项目提供了源解析工作的基本数据需求，可以用于受体模型计算得到源解析结果。必测项目包括颗粒物质量浓度、颗粒物无机元素质量浓度、颗粒物可溶性阴阳离子质量浓度、颗粒物碳组分质量浓度。选测项目并非开展源解析工作必备的项目，但是可以用来提高源解析的精准度。因为选测项目对监测技术水平要求较高，所以在本标准中并不做强制要求。常用的选测项目包括多环芳烃、左旋葡聚糖、正构烷烃等。

根据源解析的需求，颗粒物质量浓度项目包括当地首要颗粒物（如 PM_{2.5} 或 PM₁₀），颗粒物无机元素项目包括 Si、Al、Ca、Mg、Ti、Fe、Zn、Mn、Ba、Ni、Pb、Se、As、V、Cu 等，颗粒物可溶性阴阳离子项目包括 SO₄²⁻、NO₃⁻、NH₄⁺、Cl⁻、K⁺、Na⁺、Mg²⁺、Ca²⁺ 等，颗粒物碳组分包括有机碳（OC）和元素碳（EC）等。选测的颗粒物项目包括各类有机物等，比如多环芳烃、左旋葡聚糖、正构烷烃、水溶性有机碳、有机酸、脂肪酸、甾醇类等。

(3) 颗粒物分析方法

为提高各地颗粒物监测数据的可比性，规定了分析方法的要求。

对于必测项目的分析方法，采用现行国家标准方法和《环境空气颗粒物来源解析监测技术方法指南》方法，参见表 9。在标准中作为资料性附录，供参考使用。选测项目采用国家标准分析及 ISO 等国际标方法，以及经过验证的文献方法。

根据模型计算的要求，污染源样品和环境受体样品中化学组分的分析方法应保持一致，在使用时需预先考察分析方法的性能和适用性。

表9 颗粒物分析项目及分析方法

分析项目		标准（文件）名称	标准（文件）编号	
必测项目	颗粒物质量	环境空气 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 的测定 重量法	HJ 618	
		环境空气颗粒物（PM _{2.5} ）手工监测方法（重量法）技术规范	HJ 656	
	无机元素 (Si、Al、 Ca、Mg、Ti、 Fe、Zn、Mn、 Ba、Ni、Pb、 Se、As、V、 Cu 等)	空气和废气 颗粒物中铅等金属元素的测定 电感耦合等离子体质谱法	HJ 657	
		空气和废气 颗粒物中金属元素的测定 电感耦合等离子体发射光谱法	HJ 777	
		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	HJ 829	
	水溶性阴阳离子 (SO ₄ ²⁻ 、 NO ₃ ⁻ 、NH ₄ ⁺ 、	环境空气 颗粒物中水溶性阴离子 (F ⁻ 、Cl ⁻ 、Br ⁻ 、NO ₂ ⁻ 、NO ₃ ⁻ 、PO ₄ ³⁻ 、SO ₃ ²⁻ 、SO ₄ ²⁻) 的测定 离子色谱法	环境空气 颗粒物中无机元素的测定 波长色散 X 射线荧光光谱法	HJ 830
				环境空气 颗粒物中水溶性阳离子 (Li ⁺ 、Na ⁺ 、NH ₄ ⁺ 、K ⁺ 、Ca ²⁺ 、Mg ²⁺) 的测定 离子色谱法

分析项目		标准（文件）名称	标准（文件）编号
	K ⁺ 、Na ⁺ 、Cl ⁻ 等)		
	碳组分（有机碳、元素碳）	环境空气颗粒物来源解析监测技术方法指南	监测函[2020]8号
选测项目*	多环芳烃	环境空气和废气 气相和颗粒物中多环芳烃的测定 气相色谱-质谱法	HJ 646
		环境空气和废气 气相和颗粒物中多环芳烃的测定 高效液相色谱法	HJ 647
	左旋葡聚糖	环境空气颗粒物来源解析监测技术方法指南	监测函[2020]8号
	正构烷烃		
	水溶性有机碳		
	有机酸		
	脂肪酸		
	甾醇类		

5.9 环境受体成分库和源成分谱库的构建分析

5.9.1 数据检验

源解析涉及的数据量大，为了保证数据分析和模型计算等过程所用数据的质量，需要进行数据检验。数据检验可参照标准 HJ×××（环境空气 颗粒物来源解析 受体模型法监测数据处理与检验技术规范）。

源标识组分对于数据分析和模型计算比较关键，因此每个颗粒物样品的源标识组分不能缺失。对于非标识组分，比如痕量金属元素，可能未检出的情况，可用 1/2 检出限代替。

参照《环境空气颗粒物来源解析技术路线（试行）》，采用统计学方法（如 4d 法、Q 检验法），以及根据污染源和环境受体中颗粒物组成规律，对数据进行检验分析。

颗粒物质量重构检验。具体方法是将颗粒物组成为硫酸根、硝酸根、铵根、有机物（OM）、元素碳（EC）、地壳物质等，对相关组分进行转化计算，得到颗粒物化学组分重构结果。该结果与实际分析得到的颗粒物质量浓度的偏差一般应小于 20%。

颗粒物电荷平衡检验。具体方法是将颗粒物阴离子（NO₃⁻、SO₄²⁻、F⁻、Cl⁻、Br⁻、NO₂⁻、PO₄³⁻、SO₃²⁻等）和阳离子（NH₄⁺、K⁺、Ca²⁺、Na⁺、Mg²⁺、Li⁺等）转换为电荷摩尔数，分别得到阴离子总电荷和阳离子总电荷。颗粒物中阴离子总电荷和阳离子总电荷的偏差一般应小于 20%。

异常值处理。对于每一个异常的数据，需要仔细查找原因，不能武断舍去。先仔细核查样品采集和测试过程中的原始记录，查找可能的原因。如有必要，可对留存的样品重新检测分析，经过再次检验仍为异常值，则可舍去。

5.9.2 环境受体成分库的构建和分析

环境受体成分库是由每个环境受体颗粒物样品的分析结果组成。环境受体成分库数据格

式可参考表10，在标准中作为资料性附录。根据环境受体的变化情况，源解析工作中需要定期补充更新环境受体成分库。

除了模型计算得到源解析结果，环境受体成分库的分析为确定颗粒物来源提供重要信息。常见的分析包括主要物质构成分析、时空分布特征分析以及特定组分比值分析。

通过颗粒物质量重构方法，分析颗粒物主要物质的构成，具体是将颗粒物化学组成为有机物、元素碳、硫酸盐、硝酸盐、铵盐、地壳物质（矿物尘）、微量元素及其他，分析研究区域主要物质的构成占比情况。

关于颗粒物化学组分的时间分布特征分析，总结各地的源解析经验，主要从①全年平均化学组成和②季节及特定污染过程化学组成两大方面进行分析。

关于颗粒物化学组分的空间分布特征分析，可比较颗粒物各化学组分、物质构成在不同采样点位以及特定污染过程的质量浓度和百分含量，分析与采样点位的源排放之间的关系。

关于颗粒物化学组分的比值特征分析，可通过颗粒物特定化学组分的比值，可进一步分析颗粒物污染的特征，比如采用OC/EC的比值判断二次有机气溶胶的生成特征， $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$ 的比值判断固定源（如燃煤源）和移动源之间相对贡献大小。

表10 环境受体成分数据的参考示例 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) *

日期	Al	Si	K	Ca	Cr	Mn	Fe	Zn	OC	EC	NH ₄ ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
2020/5/22	0.4864	0.9483	0.1126	0.1557	0.0429	0.0297	0.2482	0.6795	4.9543	2.0194	1.2518	0.6649	3.1421	3.6590
2020/5/23	0.3287	0.7596	0.0678	0.0788	0.0406	0.0466	0.1784	0.3283	6.8348	2.9964	0.8168	0.6253	2.8873	3.2841
2020/5/24	0.2972	0.7324	0.0578	0.0639	0.0336	0.0351	0.1375	0.2604	9.5681	3.7934	0.9007	0.5876	2.7058	3.3278
2020/5/25	0.2969	0.7315	0.0443	0.0583	0.0442	0.0109	0.2096	0.2916	4.1730	1.1161	0.7730	0.5817	2.8005	3.3187
2020/5/26	0.4782	0.8903	0.0494	0.0742	0.0533	0.0599	0.3497	0.3264	4.2305	1.1436	1.4074	0.5918	3.3676	3.7970
2020/5/27	0.6369	1.0909	0.0748	0.0856	0.0462	0.0402	0.4645	0.4941	3.7071	1.2043	1.3761	0.6040	3.4873	4.3349
2020/5/28	0.5342	1.1792	0.1021	0.0828	0.0332	0.0249	0.2555	0.6496	3.5460	1.2702	1.3194	0.5647	3.5381	4.4325
2020/5/29	0.5683	0.9701	0.1010	0.0857	0.0269	0.0394	0.2203	0.7171	3.1090	1.3673	1.6452	0.5671	3.6985	4.5629
2020/5/30	0.6486	0.9902	0.0826	0.0823	0.0298	0.0782	0.3092	0.5142	2.7296	1.0645	2.0430	0.5704	3.9182	4.9718
2020/5/31	0.6573	1.0480	0.0856	0.0937	0.0321	0.0768	0.3232	0.6198	6.2191	2.2405	2.2427	0.6141	4.0362	5.1514
2020/6/1	0.5792	1.1982	0.0927	0.1265	0.0651	0.2930	0.4161	0.8429	9.1706	4.2705	2.1409	0.5560	4.6790	5.2700
2020/6/2	0.5651	1.5325	0.1180	0.0848	0.0550	0.1710	0.3753	0.8611	10.2851	3.9319	2.1257	0.5876	5.6202	6.4934
2020/6/3	0.5101	1.6875	0.0174	0.0670	0.0547	0.1478	0.2794	0.1738	10.1153	2.7142	1.8978	0.5894	5.1857	6.3928
2020/6/4	0.6419	1.5389	0.0126	0.0926	0.1280	0.2126	0.4140	0.0813	4.7453	1.7760	2.5436	0.5857	4.8918	6.4168
2020/6/5	0.7431	1.4310	0.0115	0.1056	0.1298	0.2744	0.6362	0.0923	4.8501	1.7797	3.2897	0.5895	5.1014	6.7160
2020/6/6	0.6512	1.5899	0.0186	0.1397	0.1101	0.3142	0.5824	0.0920	3.0854	1.2993	2.9045	0.5865	5.6701	6.4968
2020/6/7	0.5719	1.8797	0.0283	0.0912	0.1136	0.2738	0.4995	0.2575	3.1677	1.1757	2.3133	0.5898	6.0878	6.8329

*注：本表仅作为格式参考，表中的化学组分种类和数值大小不具参考意义

5.9.3 源谱库构建和分析

在源解析工作中，无论是采用PMF模型，还是CMB模型，都需要建立本地化源谱库，并且对各类源谱进行定期动态更新。源谱库由当地主要排放源类的源谱构成。如果某一类污染源类中存在明显不同的子源，应分别构建子源类的源谱。

源谱库涵盖的源谱需要包括颗粒物的一次排放源（简称一次源）和二次颗粒物（简称二次源），其中颗粒物一次源分别与“污染源分类”对应，二次源包括二次硫酸盐、二次硝酸盐、二次有机物等。

关于源谱库的内容，源谱构建时需要尽可能涵盖各类主要排放源的标识组分。源谱中的标识组分，是某类源区别于其它源的重要标志。颗粒物主要排放源类的标识组分可参考表11，在标准附录中作为资料性附录。

表11 颗粒物主要排放源类的参考标识组分

一级源类	二级源类	无机特征组分	有机特征组分
燃煤源	/	EC、Ca（或Ca ²⁺ ）、 SO ₄ ²⁻ 、Cl ⁻	OC、藿烷、甾烷、烷基芘、多环芳烃
移动源	机动车源	EC、Zn	OC、藿烷、甾烷、晕苯、荧蒽、芘
扬尘	二次扬尘	Si、Al、Ca（或Ca ²⁺ ）	/
	建筑扬尘	Ca（或Ca ²⁺ ）	/
	土壤扬尘	Si	/
工业工艺过程源	钢铁源	Fe、Mn、Cr、Ni	/
其他一次源	生物质燃烧源	K（或K ⁺ ）	左旋葡聚糖、植物甾醇、萜类物质
	餐饮源	/	胆固醇、十六烷酸、十八烷酸、豆甾醇、β-谷甾醇、壬醛、9-十六烯酸
二次源	二次硫酸盐	SO ₄ ²⁻	/
	二次硝酸盐	NO ₃ ⁻	/
	二次有机物		OC

关于源谱的构建方法，参照《大气颗粒物来源解析技术指南》，采用排放源的颗粒物排放量加权平均（如燃煤源、移动源、工业源等）或算数平均（如扬尘源、生物质燃烧源等）的方法构建颗粒物源谱，具体包括各成分的含量（g/g）及标准偏差等信息；硫酸盐和硝酸盐等二次无机源类比较特殊，可直接使用纯硫酸铵（(NH₄)₂SO₄）和纯硝酸铵（NH₄NO₃）的化学组成分子量占比作为其源成分谱（偏差取10%）。颗粒物排放源谱库的示例见表11，在标准中作为资料性附录。

关于源谱的合理性检验：根据以往源谱以及文献数据，对源谱数据进行合理性检验，避免异常值的干扰。对于不同子源谱，需要分析特征组分情况，确定是否进行源谱合并。

对于不同源谱需要做比较分析，可结合往年构建的源谱和文献中源谱，比较分析不同源类的特征组分。

表12 颗粒物排放源成分谱库的参考示例 (%)

排放源	Al		Si		K		Ca		Cr		Mn		Fe		Zn		OC		EC		NH ₄ ⁺		Cl ⁻		NO ₃ ⁻		SO ₄ ²⁻	
	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差
燃煤源	5.70	3.68	10.90	2.13	0.95	1.05	4.03	1.17	0.04	0.00	0.03	0.02	0.55	0.53	0.62	1.10	10.26	12.00	4.32	3.57	3.22	0.47	4.85	0.49	1.47	0.32	16.67	17.37
扬尘	6.16	2.74	13.80	1.51	0.49	0.19	7.70	2.92	0.28	0.15	0.05	0.02	2.36	0.88	0.11	0.07	8.84	2.60	3.20	0.94	0.08	0.02	1.06	0.73	1.89	0.39	5.11	2.79
机动车源	0.30	0.28	0.62	0.06	0.01	0.00	0.43	0.04	0.02	0.00	0.25	0.03	0.24	0.02	0.25	0.03	52.54	4.88	32.45	3.61	2.12	1.56	3.06	1.54	3.47	1.89	3.27	1.47
钢铁源	4.27	0.22	2.49	0.62	0.83	0.33	2.73	1.38	0.20	3.45	2.84	2.23	6.70	13.63	1.17	0.79	11.60	0.01	2.70	0.01	7.10	1.30	11.10	0.03	2.03	0.02	9.73	1.81
生物质燃烧源	0.94	0.99	0.73	0.49	12.02	4.62	1.86	1.85	0.00	0.01	0.00	0.01	0.22	0.16	0.03	0.05	31.15	9.39	6.45	4.99	2.65	1.68	9.38	5.99	0.11	0.07	0.19	0.06
二次硫酸	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	27.30	2.73	0.00	0.00	0.00	0.00	72.70	7.27
二次硝酸	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	22.50	2.25	0.00	0.00	77.50	7.75	0.00	0.00

*注：本表仅作为格式参考，表中的化学组分种类和数值大小不具参考意义

5.10 模型计算

5.10.1 基本要求

受体模型法无需追踪颗粒物的传输过程，不依赖于排放源的排放条件、地形、气象等数据^[32,33]。此外，受体模型不必调查各种污染源的排放因子和活动水平，直接对环境大气进行测定^[34]。PMF模型是在因子分析方法基础上发展起来的新的分析方法，通过误差估计，更为合理的处理数据中的缺失值和异常值，从而实现数据的最大化利用^[35,36]。PMF分解矩阵中因子载荷以及因子得分均做非负约束，可以减少矩阵旋转时产生的不确定性^[37]。CMB模型则是由一组线性方程构成，每种示踪物种的受体浓度等于源成分谱中该物种质量分数和源贡献浓度值乘积的线性和。从模型计算原理上看，PMF模型和CMB模型的区别在于，CMB模型需要输入观测受体的化学物种浓度和污染源中化学物种的质量分数，而PMF只需要输入观测受体的化学物种浓度^[38,39]。即CMB模型需要输入本地化源谱信息，而PMF不受此限制，但需较多的受体样本观测数据^[38]。

根据文献调研，不同时期中国颗粒物源解析研究的数量见表13^[39]。在2000年之前，仅有少量的来源解析研究。2010年以来，我国对颗粒物源解析的研究呈爆炸式增长。这些研究中使用的源解析方法在表13中进行了总结和列出。有些研究采用了多种方法，所以方法的总数可能大于研究的总数。在中国应用的方法主要包括正定矩阵因子分解法(positive matrix factorization, PMF)和化学质量平衡模型法(chemical mass balance, CMB)^[40,41]。

表13 中国颗粒物源解析研究方法分布^[39]

时间	研究总数	CMB	PMF	EF	PCA	FA	AQM	其他
1980-1994	5	4	0	0	0	1	0	0
1995-1999	4	3	1	0	0	0	0	0
2000-2004	39	19	8	2	4	2	7	4
2005-2009	57	15	18	11	19	10	2	9
2010-2016	145	33	57	12	30	13	12	27

2021年源解析调查中全国城市采用的受体模型情况见表。结果显示，在136个开展源解析工作的城市中，CMB和PMF模型是主要采用的受体模型，其中有51%的城市单独采用CMB或PMF模型，有34%的城市同时采用CMB和PMF。

表14 城市源解析中采用的受体模型情况

受体模型	城市个数	占比
CMB	32	24%
PMF	40	29%
CMB(为主)+PMF	39	29%
PMF(为主)+CMB	10	7%
其他	15	11%
合计	136	100%

总结模型计算要求，本标准规定采用CMB模型计算时，必须将构建的本地化源谱数据输入到模型中进行计算；采用PMF模型计算时，虽无需往模型中输入构建的源谱，但需使用源谱与模型计算得到因子进行比较，用于判断因子对应的具体源类。

为保持源分类的一致性，本标准规定受体模型解析的颗粒物来源与颗粒物排放源分类、构建的源谱类别需对应，一般包括燃煤源、移动源、扬尘、工业工艺过程源等一次来源和二次硫酸盐、二次硝酸盐、二次有机物等二次来源。颗粒物来源解析基础较好的，可进一步细分颗粒物来源。

根据PMF模型和CMB模型计算原理的特点和要求，本标准规定对于环境受体如采用四个季节持续采样方式，优先使用CMB模型计算；采用全年均匀间隔采样方式，则优先使用PMF模型计算。对于受体采样数据量较大的城市，宜采用PMF模型计算源解析；对于已经有本地化源谱，受体点位数据量较少的城市，宜采用CMB模型计算源解析。

同时采用PMF模型和CMB模型进行来源解析，相互印证以提高源解析结果的可靠性。因此对于受体模型源解析工作基础好的城市，推荐共同使用两个模型来识别污染源的变化趋势，在识别污染源的变化趋势、确定主要污染源的贡献顺序等方面进行相互印证。

5.10.2 PMF 模型计算

总结源解析工作经验，确定PMF模型计算的主要内容，包括数据输入、数据检验、基础模型计算、旋转计算、模拟计算结果评价、源解析结果处理以及源解析结果合理性分析和确定。

(1) 数据输入：根据PMF模型需要，输入至少100个有效样品的环境空气颗粒物质量浓度、化学组分浓度数据以及相应的不确定度。根据颗粒物数据种类、不确定度大小等，确定相应的计算权重。对于污染源标识组分，或者不确定度小的组分，应选择较高的计算权重，可提高模型计算的准确度。

(2) 数据检验：通过分析不同组分时间变化情况、不同组分之间相关性等，对输入的数据进一步检验，对于异常值进行剔除或降低计算权重。

(3) 模型基础计算：采用基础模型计算，得到初步结果。通过分析计算得到的“因子谱”，识别出污染源类。通过分析“因子贡献”矩阵，得到相应源类的贡献。通过“残差分析”、“预测值与观测值对比分析”等评估结果误差，判断源解析结果的优劣程度。

(4) 旋转计算：当模型基础计算得到的“因子谱”难以有效识别为实际源类时，可使用旋转计算，使计算结果进行优化：比如使因子谱中标识组分的占比更加突出，更符合实际源谱特征，从而更利于识别为具体源类。

(5) 模拟计算结果评价：通过分析模型的模拟值与实测值差异、主要组分或标识组分的残差大小、Q计算值与Q理论值差异等，判断模型模拟结果的好坏。如果模拟值与实测值越接近、组分残差越小、Q计算值与Q理论值越接近，则表明模拟计算结果更合理。

(6) 源解析结果处理：对于城市多个受体采样点位数据，分别按照采样时间全部输入至PMF模型，通过选择单个点位数据进行模型计算，先得到单个点位的源解析结果，再进行平均得到城市的源解析结果。

(7) 源解析结果合理性分析和确定：通过分析解析的因子谱特征及其源贡献等，判断

解析结果的合理性，包括对比解析的因子谱与实测源谱、平均源贡献与 CMB 解析结果，分析源贡献变化趋势及其日变化趋势等来评估模型计算结果的合理性。结合城市的污染特征、气象条件、当地工业特征、机动车保有量、建筑施工情况、燃煤量情况等，筛选确定合理的源解析结果。

5.10.3 CMB 模型计算

总结源解析工作经验，确定CMB模型计算的主要内容，包括数据处理、数据输入、源类的选择、计算组分的选择、共线性源类解析、源解析结果分析。

(1)关于数据处理:通过算数平均法或按采样时段加权平均法处理环境受体成分数据,得到CMB模型所需的各化学组成的质量浓度($\mu\text{g}/\text{m}^3$)及标准偏差等。如只要求得到城市全年颗粒物源解析结果,则将城市全部点位的组分和颗粒物浓度进行平均,同时计算出标准偏差(加权平均),作为输入数据。如要求得到城市整体和每个点位源解析结果,则先将城市单个点位的组分和颗粒物浓度进行平均,同时计算出标准偏差,将其输入CMB模型进行计算单个点位源解析结果,然后对所有点位源解析结果进行平均,得到城市整体源解析结果。

(2)关于数据输入:在CMB模型中输入受体浓度数据及标准偏差数据、源成分谱数据。输入的受体组分的数量要等于或大于源的数量。

(3)关于源类的选择:根据当地实际情况,以排放源清单和污染源调查情况为基础,选择参与计算的源类。一般包括移动源、燃煤源、土壤扬尘、施工扬尘、工业工艺过程源等一次来源以及二次硫酸盐、二次硝酸盐、二次有机物等二次来源。二次有机物难以直接使用CMB模型得到,可使用OC/EC比值法或CMB-Iteration模型^[42]计算得到。CMB-Iteration法,也称之为“扣碳法”,是一种基于EPACMB8.2模型用于估算环境颗粒物中POC和SOC浓度及源贡献的改进方法。该模型不需要将SOC源成分谱引入模型中,通过在平衡方程式中扣除SOC建立原始受体和源的关系,可以直接估计SOC的浓度。

(4)关于参与计算组分的选择,原则上挑选典型源类的标识组分,标识组分在该源成分谱的含量较其他源类为高,不同源类的标识组分可能有重合,主要污染源的标识组分可参考表1。

(5)关于共线性源类:对于道路扬尘、城市扬尘等共线性源类,可采用二重源解析技术或NCP-CRCMB模型进行解析^[42,43]。

(6)关于源解析结果分析:根据CMB模型的数学诊断指标(T-统计(TSTAT)、拟合优度回归系数(R^2)、残差平方和(chi或 χ^2)、自由度(n)、百分质量(PM)以及灵敏度矩阵(MPIN)、计算组分/测量浓度比(C/M)等),结合城市的污染特征、气象条件、当地工业特征、机动车保有量、建筑施工情况、燃煤量情况等,筛选确定合理的源解析结果。

5.11 综合解析评估

受体模型法得到的源解析结果还需要进一步评估,包括多种模型解析印证,将二次源类进一步解析到具体行业来源,结合调查结果进行印证分析等。

(1)当源解析工作应用多种模型进行解析时,不同模型解析结果中各主要源类贡献的相对关系应一致,结果能相互印证。

(2)关于二次源类的解析。通过PMF或CMB模型解析,可得到颗粒物的二次来源情况。

现阶段，二次源类是我国城市颗粒物的重要来源^[44]。由于二次源类无法直接对应于具体的颗粒物一次排放源，因此在源解析中需要对二次源类进一步再解析，将其分解为具体行业的污染源。二次源类的解析可大大提高源解析工作对环境管理的支撑作用。二次源包括二次硫酸盐、二次硝酸盐和二次有机物。二次有机物可用二次有机碳（SOC）来表征。常用OC/EC的比值定性判断二次有机气溶胶（SOA）的生成。当OC/EC值大于2时，一般可认为存在二次有机物污染^[45]。有研究发现燃烧源排放颗粒物中OC/EC比值在多数情况下远大于2，因而利用OC/EC判断大气二次有机气溶胶的存在要慎重^[46]。

关于二次有机碳（SOC）的定量分析，目前尚无直接测定SOC的方法，国内外研究者们常采用一些间接方法来估算SOC，最常用的方法为OC/EC 最小比值法。1999年Castro等提出用 OC/EC 最小比值法来估算样品中的SOC^[47]。具体方法：假定在采样期内，得到的含有最小OC/EC 的样品中 SOC 浓度可以忽略不计，其他样品中的SOC可以按下式估算：

$$OC_{sec} = OC_{tot} - (OC/EC)_{min} \cdot EC \quad (1)$$

式中：OC_{sec}是计算得到的SOC浓度；

OC_{tot}是实际测量的OC质量浓度；

(OC/EC)_{min}是采样期内观测到的OC/EC的最小值。

与其他方法相比，OC/EC最小比值法计算简单，所需参数容易获得，得到了广泛的应用。国内部分城市采用该方法计算PM_{2.5}中一次有机碳(POC)和SOC的结果见表15^[48-53]。国内城市SOC具有显著的季节变化特征，冬季SOC往往高于其他季节，SOC在PM_{2.5}的占比从0.7%到18.5%。

表15 国内部分城市 PM_{2.5} 中 POC 和 SOC 分布情况

序号	城市名称	年份	季节	PM _{2.5} (μg/m ³)	SOC (μg/m ³)	POC (μg/m ³)	SOC/PM _{2.5} (%)	POC/PM _{2.5} (%)
1	邯郸市	2017	春季	66.52	6.71	4.74	10.1	7.1
			夏季	41.1	7.59	3.33	18.5	8.1
			秋季	93.62	5.56	5.91	5.9	6.3
			冬季	153.94	21.9	15.19	14.2	9.9
			全年	88.87	10.05	7.15	11.3	8.0
2	盘锦市	2016.7	夏季	46.14	4.65	/	10.1	/
		2017.1	冬季	91.01	8.42	/	9.3	/
3	太原市	2014.3	春季	/	2.8	/	1.7	/
		2014.5	夏季	/	1	/	1.0	/
		2014.8	秋季	/	0.5	/	0.7	/
		2014.12	冬季	/	3.6	/	2.3	/
			全年	/	3.4	/	1.4	/
4	天津市	2009.4	春季	136.3	3.74	/	2.7	/
			夏季	160.45	2.75	/	1.7	/
			秋季	152.21	7.45	/	4.9	/
			冬季	116.7	7.28	/	6.2	/

序号	城市名称	年份	季节	PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	SOC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	POC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	SOC/PM _{2.5} (%)	POC/PM _{2.5} (%)
			全年	141.47	5.35	/	3.8	/
5	宜宾市	2017	春季	60	4.54	/	7.6	/
			夏季	45	1.27	/	2.8	/
			秋季	78	4.76	/	6.1	/
			冬季	110	8.11	/	7.4	/
			全年	75.2	4.7	/	6.3	/
6	保定市	2017	夏季	48	1.97	/	4.1	/
			冬季	175	24.03	/	13.7	/
7	贵阳市	2013	秋季	82.9	6.89	/	8.3	/
			冬季	107	8.29	/	7.7	/
8	济南市	2020	全年	61.94	6.63	/	9.11	/

当采用受体模型进行颗粒物来源解析时，解析结果中的二次硫酸盐、二次硝酸盐和SOC不能直接给出有效排放源贡献率，因此通过构建一种结合污染源清单分配的化学质量平衡 (Inventory-Chemical Mass Balance, I-CMB)^[54]，即将CMB模型获得的二次硫酸盐、二次硝酸盐和SOC结果，根据颗粒物中硫酸盐和硝酸盐存在形态，确定其分子式，根据铵根离子、硫酸根离子、硝酸根离子分别在硫酸盐和硝酸盐中的摩尔占比，分别计算这三种离子在CMB运算结果中二次硫酸盐、二次硝酸盐中的比例，CMB结果中的SOC可以认为均来自挥发性有机物VOCs的二次转化，然后根据计算得到的铵根离子、硫酸根离子、硝酸根离子和SOC各自比例，结合获得的包括燃煤源、工业源、机动车、餐饮、生物质源、农业源等在内的包含SO₂、NO_x、氨气、VOCs等气体污染物的大气排放源清单，进行拆分，具体做法为：将CMB等受体模型结果中硫酸铵和硝酸铵二次组分，分别折算成硫酸根、硝酸根和铵根对应的比例，然后分别对应着大气排放源清单中的二氧化硫、氮氧化物和氨气拆分成具体的燃煤、工业、机动车等排放源，有机碳SOC直接对应着清单中的VOCs进行拆分成具体的涉VOCs排放源，汇总求和即可得到受体模型的二次硫酸盐、二次硝酸盐和SOC的精细化来源解析。

此外，使用空气质量模型WRF-CMAQ-ISAM或WRF-CAMx-PSAT源追踪模型^[55,56]，对CMB或PMF等受体模型运行得到的二次硫酸盐、硝酸盐和铵盐进行溯源分析，将燃煤、工业、农业、餐饮油烟、机动车等在内的包含PM_{2.5}、PM₁₀、NO_x、SO₂、VOCs、CO和NH₃等物种的大气排放源清单带入空气质量模型，ISAM模块会将不同行业、不同种类的污染物进行标记，从而可以计算得到来自不同行业的硫酸盐、硝酸盐和铵盐占比，然后汇总相加，得到各个行业二次无机组分对应的排放源。由于ISAM目前仅能标记无机二次组分，不能标记的二次有机碳SOC，可以采用将源清单中VOC直接拆分的方法计算SOC来源。

2021年源解析调查中，开展源解析的136个城市中，只有65%的城市开展了二次源解析（见表16）。有38%的城市采用源清单拆分方法进行了二次源解析。此外还有城市采用源模型拆分（18%）、源清单+源模型拆分（2%）方法。因此，本标准规定要开展二次源类的解析，并且提供了源模型拆分方法：可通过二次组分和排放清单组合拆分法进行分解，即将颗粒物中硫酸根、硝酸根、铵根和二次有机碳通过一次源清单的相应气态污染物排放比例进行拆分组合，获得不同行业对二次颗粒物的初步排放贡献。

表16 城市源解析中开展二次源解析情况

二次源解析方法	城市个数	占比
源清单拆分	52	38%
源模型拆分	25	18%
源清单+源模型拆分	3	2%
其他方法	8	6%
未解析	48	35%
合计	136	100%

(3) 为保证不同城市源解析结果相互比较, 本标准总结源解析经验, 统一规定源解析的污染物类别。综合解析得到的颗粒物来源类别要求分为燃煤源、移动源、工业工艺过程源、扬尘源、其他等。根据源清单, 进一步细化颗粒物来源解析结果的源类, 比如柴油车、汽油车、道路扬尘、施工扬尘、餐饮油烟等。

(4) 将源解析结果与前面的城市自然条件、经济社会情况、能源消费情况、大气污染源排放量和排放分担率、颗粒物及气态污染物的时空变化特征等调查结果进行综合分析, 要求相互印证, 从宏观上评估颗粒物源解析结果的合理性。

(5) 源解析结果需要得到充分和广泛的论证。邀请相关专家对源解析研究工作关键技术环节的科学性和规范性进行评估, 并咨询环境管理部门对源解析结果的意见。

(6) 本次颗粒物来源解析结果需要与以往的颗粒物来源解析结果进行比较分析, 评估各项环保措施及效果, 与管理部门会商, 提出因地制宜、切实可行的大气污染防治对策建议。

5.12 报告编制

通过总结源解析工作经验, 确定源解析报告编制主要内容要求。源解析报告应包括但不限于以下内容: 任务来源、工作目标、工作区域、工作内容、技术路线、自然条件分析、经济社会发展分析、污染源调查分析、环境空气质量特征分析、颗粒物及组分监测分析方法, 模型计算方法、源解析结果、大气污染防治对策建议等。

5.13 质量保证和质量控制 (QA/QC)

源解析工作涉及的技术环节众多, 需要安排专门质控人员进行监督检查和质量审核。核实相关质控记录是否完善, 是否符合源解析质控要求。此外, 需要邀请相关专家对颗粒物来源解析工作关键技术环节的科学性和规范性进行论证。

基本情况调查 QA/QC。数据来源的可靠性直接影响区域基本情况调查的结果真实性。因此, 收集的数据要求来源于官方公开发布的数据, 比如国民经济和社会发展统计年鉴。在数据收集过程中, 还涉及到数据录入过程。由于数据比较多, 在录入中可能会出现错误。因此, 在录入时需要进行严格审核以及随机抽查核对, 确保数据准确。

污染源和环境空气质量调查 QA/QC。数据来源的可靠性直接影响区域污染源和环境空气质量调查结果。收集的数据要求来源于环保部门审核后的数据, 需要与管理部门公开发布的数据保持一致。区域污染源数据为进行动态更新后的数据, 能得到最新的污染源信息。选择的优先顺序是城市大气污染物排放清单编制数据、全国污染源普查数据、环境统计数据。环境空气质量数据为经过生态环境监测部门审核入库的数据, 需要进行随机抽查核对。

环境空气和污染源颗粒物样品采集 QA/QC。参照相应的标准方法开展采样的 QA/QC 工作。目前有部分相关的标准正在编制或等待发布，这些标准的 QA/QC 内容对于采样具有重要参照价值，因为列入本标准中。环境空气颗粒物采样参照 HJ 656、HJ 618 和《环境空气颗粒物来源解析监测技术方法指南》要求。污染源颗粒物样品采集参照 HJ×××（环境空气 颗粒物来源解析 固定污染源废气颗粒物（PM_{2.5} 和 PM₁₀）稀释通道采样技术导则）、HJ×××（环境空气 颗粒物来源解析 开放源颗粒物（PM_{2.5} 和 PM₁₀）再悬浮采样技术导则）、HJ×××（环境空气 颗粒物来源解析 开放源扬尘采样技术规范（试行））、HJ/T 397、HJ 836、HJ/T393、HJ/T166 和《环境空气颗粒物来源解析监测技术方法指南》等要求。

颗粒物分析 QA/QC。参照相应的标准方法开展采样的 QA/QC 工作。参照 HJ 618、HJ 656、HJ 657、HJ 777、HJ 829、HJ 830、HJ 799、HJ 800、HJ 646、HJ 647、HJ×××（环境空气 颗粒物来源解析 颗粒物滤膜自动称量技术规范（试行））、HJ×××（环境空气 颗粒物来源解析 颗粒物中左旋葡聚糖、甘露聚糖和半乳聚糖的测定 离子色谱法（试行））、HJ×××（环境空气 颗粒物来源解析 颗粒物中左旋葡聚糖、甘露聚糖和半乳聚糖的测定 衍生化气相色谱-质谱法（试行））和《环境空气颗粒物来源解析监测技术方法指南》等要求。

标准方法中在校准曲线、空白样品、平行双样、加标样或质控样等方面都有严格的技术要求，本标准符合要求这些标准规定的技术要求。一般的分析方法标准中，对于分析的 QA/QC 要求如下：a) 每批样品均做校准曲线，每20个样品进行1次中间校准点测试，相对偏差不得超过20%，否则重做校准曲线；b) 每批或20个样品至少分析1个实验室空白样，分析结果应小于检出限；c) 每批或20个样品至少分析1组实验室平行双样，相对偏差应小于20%；d) 每批或20个样品至少分析1个加标样或质控样，回收率或相对偏差满足对应标准方法的要求。此外，统一采用国家环保标准，可以使监测数据可以相互比较。因此，颗粒物分析方法优先选用国家环保标准方法，并且同一项目的分析方法需保持一致。

环境受体成分库和源成分谱库的构建 QA/QC。参照 HJ×××（环境空气 颗粒物来源解析 受体模型法监测数据处理与检验技术规范）要求。对于疑似异常数据，需查明原因，如有必要可重新分析，经确认后再决定取舍并填写相应的记录。

模型计算 QA/QC。参照 HJ×××（环境空气 颗粒物来源解析 正定矩阵因子分解（PMF）模型计算技术指南）、HJ×××（环境空气颗粒物来源解析 化学质量平衡（CMB）模型计算技术指南）要求。为了保证模型结果的重现性和稳定性，模型计算中需安排不同人员进行验算，保证计算结果的可靠性。对于模型计算结果，需要对模型计算过程，结合实际情况等进行合理性检验。模型计算结果需要进行模型计算过程和实际情况等合理性检验。

综合解析评估中如采用多种受体模型计算，其解析结果应能相互印证，主要源类贡献大小排名、污染源类的变化趋势应基本一致，对存在的差异应有合理解释；综合解析结果需与城市基本情况、源排放和环境质量特征等自洽。

5.14 附录

在附录中提供相关的资料性附录供参考。在附录 A 中提供了环境空气颗粒物来源解析工作方案编制要求；在附录 B 中提供一次颗粒物排放源分类；在附录 C 中提供了颗粒物分析项目及标准方法；在附录 D 中分别提供了环境受体成分库参考示例、颗粒物源成分谱库

参考示例、颗粒物主要源类的参考标识组分。

6 与开题报告的差异说明

本标准的主要技术内容与开题报告中的计划之间无差异。

7 参考文献

- [1] Ambient Monitoring Technology Information Center (AMTIC). Compendium of Methods for the Determination of Inorganic Compounds in Ambient Air[EB/OL]. [2021-5-25].
<https://www.epa.gov/amtic/compendium-methods-determination-inorganic-compounds-ambient-air>.
- [2] Ambient Monitoring Technology Information Center (AMTIC). Compendium of Methods for the Determination of Toxic Organic Compounds in Ambient Air[EB/OL]. [2021-5-25].
<https://www.epa.gov/amtic/compendium-methods-determination-toxic-organic-compounds-ambient-air>
- [3] IMPROVE network. Standard Operating Procedures[EB/OL]. [2020-11-27].
<https://vista.cira.colostate.edu/Improve/sops/>.
- [4] US. Environmental Protection Agency Office of Air Quality Planning & Standards Emissions. EPA-CMB8.2 Users Manual [EB/OL]. [2020-10-20]. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2020-10/documents/epa-cmb82manual.pdf>.
- [5] U.S. Environmental Protection Agency Office of Research and Development. EPA Positive Matrix Factorization (PMF) 5.0 Fundamentals and User Guide[EB/OL]. [2021-5-25].
https://cfpub.epa.gov/si/si_public_file_download.cfm?p_download_id=523318.
- [6] EMEP. Standard Operating Procedures[EB/OL]. [2020-11-27].<https://ebas-submit.nilu.no/Standard-Operating-Procedures>.
- [7] European Commission Joint Research Centre Institute for Environment and Sustainability. European Guide on Air Pollution Source Apportionment with Receptor Models[EB/OL]. [2021-5-25]. https://source-apportionment.jrc.ec.europa.eu/Docu/EU_guide_on_SA.pdf.
- [8] 《环境空气颗粒物来源解析监测技术方法指南》（监测函[2020]8号）。 [EB/OL]. [2022-4-8].
<https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/sthjbs/202005/W020200514318605389760.pdf>.
- [9] 《大气颗粒物来源解析技术指南（试行）》（环发[2013]92号）。 [EB/OL]. [2022-4-8].
https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/sthjbs/202005/t20200514_779089.html
- [10] 《环境空气颗粒物来源解析技术路线（试行）》（环办函[2015]191号）。
- [11] HJ 93 环境空气颗粒物（PM₁₀和PM_{2.5}）采样器技术要求及检测方法[S]. 北京: 2013.
- [12] HJ 194 环境空气质量手工监测技术规范[S]. 北京: 2017.
- [13] HJ 618 环境空气 PM₁₀和PM_{2.5}的测定 重量法[S] 北京: 2011.
- [14] HJ 656 环境空气颗粒物（PM_{2.5}）手工监测方法（重量法）技术规范[S]. 北京: 2013.
- [15] HJ 664 环境空气质量监测点位布设技术规范（试行）[S]. 北京: 2013.
- [16] GB 3847 柴油车污染物排放限值及测量方法（自由加速法及加载减速法）[S]. 北京: 2018.
- [17] GB 18285 汽油车污染物排放限值及测量方法（双怠速法及简易工况法）[S]. 北京: 2018.

- [18] GB 18352.6 轻型汽车污染物排放限值及测量方法（中国第六阶段）[S]. 北京: 2016.
- [19] GB/T 16157 固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法[S]. 北京: 1996.
- [20] HJ/T 55 大气污染物无组织排放监测技术导则[S]. 北京: 2000.
- [21] HJ/T 393 防治城市扬尘污染技术规范[S]. 北京: 2007.
- [22] HJ 657 空气和废气 颗粒物中铅等金属元素的测定 电感耦合等离子体质谱法[S]. 北京: 2013.
- [23] HJ 777 空气和废气 颗粒物中金属元素的测定 电感耦合等离子体发射光谱法[S]. 北京: 2015.
- [24] HJ 799 环境空气 颗粒物中水溶性阴离子（F⁻、Cl⁻、Br⁻、NO₂⁻、NO₃⁻、PO₄³⁻、SO₃²⁻、SO₄²⁻）的测定 离子色谱法[S]. 北京: 2016.
- [25] HJ 800 环境空气 颗粒物中水溶性阳离子（Li⁺、Na⁺、NH₄⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺）的测定 离子色谱法[S]. 北京: 2016.
- [26] HJ 829 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[S]. 北京: 2017.
- [27] HJ 830 环境空气 颗粒物中无机元素的测定 波长色散 X 射线荧光光谱法[S]. 北京: 2017.
- [28] HJ 646 环境空气和废气 气相和颗粒物中多环芳烃的测定 气相色谱-质谱法[S]. 北京: 2013.
- [29] HJ 647 环境空气和废气 气相和颗粒物中多环芳烃的测定 高效液相色谱法[S]. 北京: 2013.
- [30] 《大气细颗粒物一次源排放清单编制技术指南（试行）》（环境保护部公告 2014年第55号）. [EB/OL]. [2022-4-8]. https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201408/t20140828_288364.htm
- [31] 《大气可吸入颗粒物一次源排放清单编制技术指南（试行）》（环境保护部公告 2014年第92号）. [EB/OL]. [2022-4-8]. https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201501/t20150107_293955.htm
- [32] Hopke PK. Recent developments in receptor modeling. *Journal of Chemometrics* [J]. 2003,17: 255-265.
- [33] Hopke PK. Review of receptor modeling methods for source apportionment. *Journal of the Air & Waste Management Association* [J]. 2016, 66: 237-259.
- [34] 郑玫, 张延君, 闫才青, 等. 中国PM_{2.5}来源解析方法综述[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2014, 50: 1141-1154.
- [35] Eatough DJ, Grover BD, Woolwine WR, et al. Source apportionment of 1h semi-continuous data during the 2005 Study of Organic Aerosols in Riverside (SOAR) using positive matrix factorization [J]. *Atmospheric Environment* 2008; 42: 2706-2719.
- [36] Wu XF, Vu TV, Shi ZB, et al. Characterization and source apportionment of carbonaceous PM_{2.5} particles in China-A review [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, 189: 187-212.
- [37] Peng X, Liu XX, Shi XR, et al. Source apportionment using receptor model based on aerosol mass spectra and 1 h resolution chemical dataset in Tianjin, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, 198: 387-397.
- [38] Lee S, Liu W, Wang Y, et al. Source apportionment of PM_{2.5}: Comparing PMF and CMB results for four ambient monitoring sites in the southeastern United States [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42: 4126-4137.
- [39] Zhu YH, Huang L, Li JY, et al. Sources of particulate matter in China: Insights from source apportionment studies published in 1987-2017 [J]. *Environment International*, 2018, 115: 343-357.
- [40] Zhao ZP, Lv S, Zhang YH, et al. Characteristics and source apportionment of PM_{2.5} in Jiaying, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26: 7497-7511.
- [41] Zheng M, Yan CQ, Wang SX, et al. Understanding PM_{2.5} sources in China: challenges and perspectives [J]. *National Science Review*, 2017, 4: 801-803.

- [42] 朱坦, 冯银厂. 大气颗粒物来源解析: 原理、技术及应用[M]. 北京: 科学出版社. 2012.
- [43] 史国良. 大气颗粒物来源解析复合受体模型的研究和应用[D]. 南开大学. 2010.
- [44] Huang, R.J., Zhang, Y.L., Bozzetti, C., et al. High secondary aerosol contribution to particulate pollution during haze events in China. *Nature*, 2014, 514: 218-222.
- [45] Chow J C, Watson J G, Lu Z Q, et al. Descriptive analysis of PM_{2.5} and PM₁₀ at regionally representative locations during SJVAQS/AUSPEX[J]. *Atmospheric Environment*, 1996, 30 (12): 2079-2112
- [46] 孔少飞. 大气污染源排放颗粒物组成、有害组分风险评价及清单构建研究[D], 南开大学, 2012.
- [47] Castro L M, Pio C A, Harrison R M, et al. Carbonaceous aerosol in urban and rural European atmospheres: estimation of secondary organic carbon concentrations [J]. *Atmospheric Environment*, 1999, 33(17): 2771-2781.
- [48] 薛凡利, 牛红亚, 武振晓, 等. 邯郸市 PM_{2.5} 中碳组分的污染特征及来源分析[J]. *中国环境科学*, 2020,40(5): 1885-1894.
- [49] 张大宇, 刘效峰, 彭林, 等. 太原市 PM_{2.5} 中含碳气溶胶特征分析[J]. *环境化学*, 2019, 38(12) : 2719-2727.
- [50] 吴琳, 冯银厂, 戴莉等, 天津市大气中 PM₁₀、PM_{2.5} 及其碳组分污染特征分析[J]. *中国环境科学* 2009, 29(11): 1134-1139.
- [51] 王慧杰, 孟晓郁, 王静, 等. 保定市空气 PM_{2.5} 中碳组分污染特征及来源分析[J]. *环境科学与技术*, 2020, 43(9): 163-169.
- [52] 尹寒梅, 陈军辉, 冯小琼, 等. 宜宾市 PM_{2.5} 中碳组分的污染特性及来源分析[J]. *环境化学*, 2019, 38(4) : 738-745.
- [53] 王珍, 郭军, 陈卓. 贵阳市秋、冬季 PM_{2.5} 中碳组分污染特征及来源分析[J]. *地球与环境*, 2015,43(3): 285-289.
- [54] 张玉梅, 张卫东, 王军玲. 大气 PM_{2.5} 源解析“源清单化学质量平衡法(I - CMB)”模型的建立与应用[J], *大气科学学报*, 2015, 38(2): 279-284.
- [55] Zhang C, Jing DJ, Wu CZ, et al. Integrating Chemical Mass Balance and the Community Multiscale Air Quality models for source identification and apportionment of PM_{2.5} Process Safety and Environmental Protection, 2021, 149: 665-675.
- [56] Lv LL, Wei P, Hu JN, et al. Source apportionment and regional transport of PM_{2.5} during haze episodes in Beijing combined with multiple models. *Atmospheric Research*, 2022, 266: 105957.