

附件 3

《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
(征求意见稿)》
编制说明

《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》标准编制组

二〇二四年一月

项目名称：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 PM_{10}) 稀释通道采样技术导则

项目统一编号：2021-80

承担单位：中国环境监测总站、西安市环境监测站、上海市环境监测中心、南开大学

编制组主要成员：王超 张霖琳 宋文斌 裴冰 杨乃旺 袁懋 冯银厂等

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 国内外相关进展	4
3.1 国内外稀释通道采样设备	4
3.2 国内外标准方法情况	8
3.3 国内稀释通道采样业务化应用情况	10
4 标准制订的基本原则和技术路线	12
4.1 标准制订的基本原则	12
4.2 标准制订的技术路线	12
5 方法研究报告	13
5.1 适用范围	13
5.2 规范性引用文件	13
5.3 术语和定义	14
5.4 采样原理及技术要求	14
5.5 设备与材料	17
5.6 采样方案的制定	18
5.7 点位布设	19
5.8 采样程序	20
5.9 质量保证和质量控制	23
5.10 附录	23
6 方法现场验证	23
7 标准实施建议	25
8 参考文献	25

《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 (征求意见稿)》

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 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》的任务。项目统一编号:2021-80。承担单位为中国环境监测总站。

1.2 工作过程

1.2.1 前期工作

2016年中国环境监测总站承担了原环境保护部监测司“环境空气颗粒物来源解析技术体系设计研究”专项,开展固定污染源废气颗粒物稀释通道采样技术研究,编写《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》及编制说明。

2018年4月20日,按照生态环境部大气环境司要求,为进一步完善该技术文件,中国环境监测总站组织进行了专家函审,邀请来自清华大学、南开大学、华北电力大学、北京工业大学、中国环境科学研究院的5位专家对技术导则进行审查。根据专家函审意见,编制组对技术导则及编制说明进行了修改完善。

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 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》编制组,由中国环境监测总站、西安市环境监测站、上海市环境监测中心、南开大学相关技术人员组成。

1.2.3 编写标准征求意见稿和编制说明

2021年10月~2022年4月,编制组根据标准制修订要求,对技术导则及编制说明进行了修改完善,形成了《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》及编制说明的征求意见稿。

1.2.4 标准征求意见稿技术审查

2022年5月18日,中国环境监测总站召开标准内审会,邀请南开大学、复旦大学、山东省生态环境监测中心等4位专家对技术导则进行审查。根据专家意见,编制组进一步修改完善技术导则及编制说明。2022年10月14日,生态环境部大气环境司相关负责人组织召开标准征求意见稿技术审查会,邀请来自天津市生态环境监测中心、北京大学、清华

大学、中国环境科学研究院等单位的 9 位专家进行审查。专家委员一致通过该标准征求意见稿技术审查，对该标准的征求意见稿提出以下修改意见：（1）建议修改英文题目、术语和定义；（2）建议进一步根据现场验证及调研资料，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技术导则及编制说明。

2 标准制订的必要性分析

环境空气颗粒物来源解析工作（简称“源解析工作”）是环境空气颗粒物污染防治的基础和前提。2014 年，原环境保护部办公厅《关于开展第一阶段大气颗粒物来源解析研究工作的通知》，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，各城市相继开展颗粒物源解析工作，至 2016 年全部完成。由于环境空气颗粒物污染防治的长期性，以及颗粒物来源的变化，各地有必要继续开展源解析工作，为颗粒物污染防治提供支撑。如，根据《京津冀及周边地区 2017 年大气污染防治工作方案》，京津冀及周边地区“2+26”重点城市需开展环境空气颗粒物来源解析研究工作。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，具备污染动态溯源的基础能力。常态化开展源解析工作已成为颗粒物污染防治工作中的重点工作之一。然而，根据各城市颗粒物源解析工作的开展情况，源解析工作尚处于业务化研究阶段，离业务化运行还有一定的差距。

目前亟需建立一套源解析监测技术方法体系，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。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）以及各地开展源解析工作调查，常规模式的源解析工作主要采用“实验室分析-现场采样-受体模型法”技术方法。该技术方法体系包括固定源、移动源和开放源等主要源类采样技术、环境空气颗粒物采样技术、颗粒物及组分（无机元素、水溶性离子和元素碳/有机碳（EC/OC）等）分析方法、源解析模型计算方法等。关于环境空气颗粒物采样技术、颗粒物化学组分分析方法，已有并陆续出台标准方法，相对较为完善。其他技术环节缺少相应的标准方法。对于固定污染源颗粒物采样，虽然已有《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）标准方法，但是该标准采用直接采样方法，采集的是在固定源排气管道高温/高湿环境下的废气颗粒物样品。直接采样方法只能得到烟道环境条件下的可捕集颗粒物（filterable PM），无法采集可凝结颗粒物（condensable PM），不能代表固定污染源实际排放至空气中稳定存在的颗粒物样品，因而无法有效满足颗粒物源解析工作的需求。

应用受体模型法解析环境空气颗粒物来源时，采集固定源颗粒物样品主要用于构建各类固定源的颗粒物源谱。对于固定源样品的采集，根据源解析工作的要求，需要遵循以下三个原则。一、代表性。在采样前需通过深入的污染源调查，参考本地区已有的固定污染源清单，识别与本地区颗粒物来源相关的各种固定污染源类别，并保证选择采样的污染源能分别代表本地区各类固定源颗粒物排放源。在采样中，应合理布点，保证样品在空间和时间上的代表性，采样时固定污染源应处于正常工况条件。二、真实性。应采集固定污染源排放到空气中较稳定存在的颗粒物，必要时可利用特殊装置（稀释通道采样装置、再悬

浮采样装置等)模拟颗粒物进入到环境受体的真实过程。三、独特性。采样中应尽可能远离其他类别的污染源,减少不同源类之间的交叉影响,提高样品的独特性。对于同一源类不同子源样品,甚至更细分的源类样品,采样中谨慎对待样品的混合。

固定污染源排气中的一次颗粒物是环境空气颗粒物的重要组成部分。固定污染源排气一次颗粒物由两部分组成:一次可捕集颗粒物和一次可凝结颗粒物。一次可捕集颗粒物是指在烟道中烟气温度下可用滤膜或滤筒捕集到的颗粒物,而可凝结颗粒物是指在烟道中烟气温度下为气态的挥发和半挥发性物质在排放进入大气环境后稀释降温,经均相和非均相成核形成的颗粒物。根据颗粒物源解析要求,用于构建固定源源谱的颗粒物应尽可能反映固定污染源排放至环境空气的真实情况,从而提高受体模型法计算的准确性。因此,采集的固定污染源颗粒物需要包括一次可捕集颗粒物和一次可凝结颗粒物。

固定污染源采样所选用的方法直接关系到所采集颗粒物样品能否满足源解析的需求。在源解析工作中,涉及的固定污染源颗粒物样品采集方法主要有稀释通道采样法、烟道直接采样法、下载灰再悬浮采样法等方法。烟道直接采样法是通过预测流速,选择采样嘴等速抽取烟道内气体,在切割器切割流量下分离烟气中特定粒径的颗粒物,由相应材质滤膜进行捕集。

烟道直接采样法主要用于各种锅炉、工业窑炉烟尘排放浓度及其他烟气参数的测量。有研究机构尝试将该方法应用于环境颗粒物来源解析中固定污染源的采样。但是该方法存在以下问题限制其在源解析中的应用。第一,燃烧源排放的热烟气中气态物质难以迅速冷却成为颗粒态,直接采样可能会因气相比比例过大而导致颗粒物膜采样的负偏差。第二,燃烧源释放出的一些有机气体在大气扩散过程中经过一段时间冷却凝结、凝聚后会反应生成一次可凝结颗粒物,直接采样无法采集一次可凝结颗粒物,从而低估了燃烧源排放的颗粒物。第三,有机化合物同时存在于气相和颗粒相中,并在两相中随大气温度、稀释程度的变化而变化。由于烟道中的温度很高,在常温下以颗粒态存在的许多有机化合物在烟道中以气态存在,直接采样会导致采集到的颗粒物化学成分与实际释放到大气中的颗粒物成分不同。

此外,有部分不具备烟道直接采样条件的研究机构采用下载灰再悬浮采样法。该方法是通过收集固定污染源各种除尘设备中的下载灰,再采用再悬浮装置悬浮于空气中,通过一定切割粒径的采样器采集颗粒物样品。该方法存在的问题是采集的下载灰并不是该固定源实际排放的颗粒物,而且受除尘设备影响,下载灰中颗粒物化学组成和实际排放颗粒物存在较大差异。

为了克服上述烟尘采样技术的缺点,在20世纪80~90年代美国的研究者率先开发了烟气稀释通道采样方法。初期,稀释采样方法被用于研究燃烧源排放颗粒物的质量浓度,而后考虑到颗粒物的健康效应,才研究燃烧源排放颗粒物的粒径和化学组成。随着环境空气颗粒物来源解析研究兴起,为构建更加真实的固定污染源排放颗粒物源谱,愈来愈多的科学家采用稀释通道采样方法采集固定污染源颗粒物样品。

烟气稀释通道采样方法的原理是将高温烟气在稀释通道内用洁净空气进行稀释,并冷却至大气环境温度,稀释冷却后的混合气体进入采样舱,停留一段时间后颗粒物被采样器按一定粒度捕集。稀释通道采样方法模拟烟气排放到大气中几秒到几分钟内的稀释、冷却、

凝结、成核等过程，捕集的颗粒物可近似认为是燃烧源排放的一次颗粒物，包括一次过滤颗粒物和一次凝结颗粒物。稀释采样由于消除了烟气温度高、湿度大、颗粒物浓度高和其他气体的影响，使得燃烧源采样方法得以简化，同时扩大了滤膜的使用范围，均可以用尼龙（Nylon）和聚四氟乙烯（PTFE）滤膜采样，也扩大了化学物种的测量范围。因此相比其他方法，该方法被认为是用于采集固定污染源颗粒物样品较为理想的方法。

基于受体模型法的源解析工作要求采集固定污染源排放到环境空气中稳定存在的颗粒物，需要采用稀释通道采样方法。在全国源解析工作中，城市固定污染源颗粒物采样方法不统一，有一部分城市由于条件所限采用直接采样方法，而另外一部分城市采用稀释通道采样方法采集固定污染源颗粒物样品。对于已开展的稀释通道采样工作，由于缺少固定污染源废气颗粒物稀释通道采样标准方法进行统一规定，各地在采样设备性能参数、采样技术要求、质量保证和质量控制等方面不统一，直接影响城市源解析工作的规范性和源解析结果的可比性。综上，亟需制定固定污染源颗粒物稀释通道采样的标准方法。

3 国内外相关进展

3.1 国内外稀释通道采样设备

固定源稀释通道采样设备是 20 世纪 70 年代由国外最早研制而出，早期的稀释采样器多采用较长的停留时间，停留室体积大，且混合段长度较长，导致稀释采样器庞大笨重，不适合在污染源进行现场采样，限制了该方法的推广应用^[1]。20 世纪 70 年代至 90 年代稀释通道存在的主要问题是稀释通道普遍采用塑料做主体材料，由于塑料的耐温性及其在采样过程中向系统释放有机物，而导致采集过程中污染样品^[2]；20 世纪 90 年代后，Hildemann 等人设计出了以不锈钢为主体材料的固定污染源稀释通道用于有机颗粒物的样品采集并基于 GC/MS 分析有机组分^[3]；Schauer 等在 90 年代中后期将稀释采样方法用于源解析和受体模型研究中的源成分谱采样^[4]。国外研发的稀释通道采样系统比如 Desert Research Institute（DRI）稀释采样系统^[5]、Paprican 稀释采样系统^[6]、Southern Research Institute(SRI)稀释采样系统^[7]、California Air Resources Board（CARB）稀释采样系统^[8]、Carnegie-Mellon University（CMU）稀释采样系统^[9]等。国外研发的采样设备大部分在烟道内采用旋风采样头去除粒径大于 PM₁₀ 或 PM_{2.5}，然后通过稀释通道进行稀释冷却，再利用旋风切割器分离采集 PM_{2.5} 或 PM₁₀ 颗粒物。

国内已有几家单位研制开发了稀释通道采样设备，包括南开大学^[10]、北京大学^[11]、清华大学^[12]等。部分国内研发的设备与国外研发的设备不同，并没有在烟道内采用旋风采样头去除粒径大于 PM₁₀ 或 PM_{2.5}，而是直接对烟气进行稀释冷却，然后采用切割器分离采集 PM_{2.5} 或 PM₁₀ 颗粒物。

国内外稀释通道采样设备及相关方法的试验研究较多，但由于采样系统结构的复杂性、现场使用的便携性、固定源的多样性等，以小型化科研试用为主，产业化产品较少。国外产业化产品比如美国 ES 公司生产的稀释通道 FPM 型设备、芬兰 dehati FPS-4000 型稀释通道采样系统。前者是将 FPM 和 CPM 分别采集后加总得到总 PM，设备前端设置切割器采集可捕集颗粒物，后端设置冷阱采集可凝结颗粒物，设备较为简单，控制系统较好。后者

采用二级稀释，利用大的空压机提供洁净空气，可对稀释气进行加热冷却控制，最大可提供 200:1 的稀释比率，采取射流混合方式，控制精度高，但由于末端提供每路 10 L/min 的混合气流，与目前市面上流行的 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 切割器难以匹配，限制了其适用范围。国内产业化产品比如天津华翼科技 H320 型稀释通道采样器、陕西正大环保科技生产的 ZDA-PDSI 型稀释通道采样器、上海贝瑟环保科技生产的 MFD25 型稀释通道采样器等。H320 型稀释通道采样器采用零空气发生器作为一级稀释气源直接与烟气样品混合，采用文丘里泵一级稀释采样，利用稀释空气的动能转化将烟气抽取，是一种恒流取样方式；采用现场空气作为二级稀释气使用。ZDA-PDSI 型稀释通道采样器采用二级稀释设计，最大可提供 100:1 的稀释比率，并且在一级稀释装置后设置旁路保持体系的压力平衡和提高设备精度，颗粒物采样采用撞击式切割器，4 通道设计。MFD25 型稀释通道采样器可提供 10:1 的稀释比率，采样方式中 PM₁₀ 采用撞击式切割器，PM_{2.5} 采用旋风切割器。在上述五种成品设备中，流量监控方面，部分设备采用压力信号及压力差值反馈调整流量，部分设备采用质量流量计来监控流量，个别设备采用体积流量计来监控流量。

调研相关文献以及商品化产品，总结国内外稀释通道设备参考性能指标，见表 1 所示。稀释采样设备最关键的部分为稀释通道。稀释通道主要的参数包括稀释比、停留时间和混合段雷诺数。稀释通道原理相对简单，各国学者根据需要设计了各种各样的稀释通道，如正压稀释、负压稀释。为保证烟气与稀释气充分混合，稀释通道多采用湍流混合方式。稀释过程是挥发和半挥发物质与颗粒物以及颗粒物与颗粒物相互作用的动力学过程，包括成核、凝结和聚并，须有足够的停留时间才能保证颗粒物粒径分布达到稳定。国内外研制的烟气稀释通道采样器，尺寸大小、可达到的稀释比、停留时间、混合段雷诺数、通道材料等存在差异。

表 1 国内外部分稀释通道采样器性能参数^[10-17]

研制单位	通道直径/cm	有效混合长度/cm	停留时间/s	稀释比	混合段雷诺数	停留室直径/cm	通道材料	是否便携
Carpenter	30	12~15	1.3	8~25	47000	/	不锈钢	否
NEA	10	29	1~3	>20	11000~23000	/	PVC	是
SRI	21	6	6.2	25	2800	/	塑料玻璃和 Teflon	是
CIT	15	10	2~180	25~100	10000	46	不锈钢和 Teflon	/
URG	8	8	5~40	20~40	/	8	内涂 Teflon 的玻璃和铝	是
CARB	15	12	1~5	10~50	10000	/	内涂 Teflon 的不锈钢	否
DRI	15	18	80	25~50	9000	46	不锈钢	否
EER	20	1	10	10~40	5500	20	不锈钢	否
CMU	15	15	0~720	20~200	3000~13000	76	不锈钢	否
CANMET1	6	25	20~80	25~100	7500	/	内涂 Teflon 的铝	/
CANMET3	5	40	10~40	25~80	13000	30	内涂 Teflon 的不锈钢	/
EPA	14	3.2	1	20~40	/	/	内涂 Teflon 的不锈钢和铝	/
CMU	15	6	2.5	20~350	10000	10	不锈钢	/
PAPRICAN	14.5	18	90	25~40	11000	27	内涂 Teflon 的不锈钢	/
Hildemann	15	10	20~180	40	10000	/	不锈钢	是
南开大学	12	10	/	3~18	/	/	不锈钢	是
北京大学	12.7	130	90	20~110	10000	50	不锈钢	否
清华大学	20	30	10	5~20	/	20	不锈钢	是
天津市环境监测站	/	/	60	8~12	/	/	不锈钢	否
黑龙江八一农垦大学	/	/	90	10~30	/	/	不锈钢	否
DEKATI	/	/	/	20~200	/	/	不锈钢	否

研制单位	通道直径/cm	有效混合长度/cm	停留时间/s	稀释比	混合段雷诺数	停留室直径/cm	通道材料	是否便携
ES	/	/	0.5~10	10~40	/	/	不锈钢	是
贝瑟	/	/	/	10	/	/	不锈钢	是
ZDA	10	27~74	15~70	10~100	6500~15000	25~40	内涂 Teflon 的航空铝	是
华翼	/	/	30~120	30	/	/	不锈钢	是

3.2 国内外标准方法情况

3.2.1 国外标准方法情况

目前国外关于烟道稀释采样的标准方法主要有 ISO 在 2013 年发布的 ISO 25597^[19]、美国 EPA 在 2004 年发布的 CTM-039^[20]和 2018 年发布的 OTM37^[21]等。总体而言，美国 EPA 标准和 ISO 标准并非完全一样，它们在采样设备结构、采样技术参数等存在一定的差异。

CTM-039 在 Method 201A 和 202 的基础上，采用一个混合和停留装置对烟气进行稀释采样（温度小于 29.4℃，相对湿度小于 50%），采样装置示意图见图 1。CTM-039 是专门用于采集颗粒物样品以构建源颗粒物成分谱的标准方法。由于 CTM-039 在烟囱内旋风式采样头后未加滤膜，因此采集的颗粒物样品包括了一次可捕集颗粒物和一次可凝结颗粒物样品。在 EPA CTM-039 标准方法中，烟气以预先确定的恒定流速通过 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 旋风式采样头，分离空气动力学直径小于等于 2.5 μm 的颗粒物，通过加热的采样枪和加热的样品文丘里管，在混合锥（mixing cone）和停留仓中混合停留，最后被滤膜所捕获。关于稀释比例，CTM-039 要求稀释比例为 10:1 到 40:1 之间，以达到接近环境空气的条件。合适的稀释比例可以将烟气样品冷却至接近环境空气的温度，模拟烟气排放至空气过程中的 PM_{2.5} 形成，此外还可以避免水汽在混合锥或停留仓的凝结。

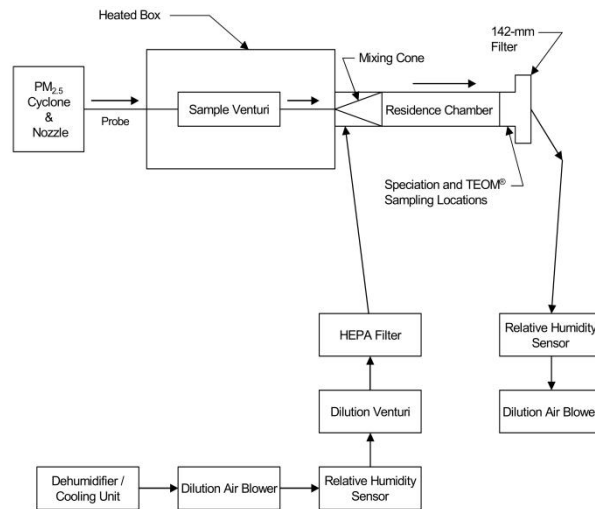


图 1 EPA CTM-039 稀释通道采样装置示意图^[19]

ISO 25597 标准提供了直接采样法和稀释通道采样方法，其中稀释通道采样方法是烟气以等速采样的方式在烟道内经过 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 旋风式采样头，通过加热的采样枪，引入混合室中与洁净稀释气进行充分混合，在停留室进行老化，最后通过 PM_{2.5} 旋风式采样头分离 PM_{2.5}，被滤膜所采集。采样示意图见图 2。与 CTM-039 不同，ISO 25597 在收集颗粒物的滤膜前加上旋风采样头，相比之下采集的样品更加准确。关于等速采样要求，PM_{2.5} 和 PM₁₀ 采样的流速变化区间分别为 80%~120%和 90%~115%。ISO 25597 要求稀释比大于等于 20:1，停留时间大于等于 10 s，稀释后气体温度小于等于 42℃，相对湿度小于 70%。

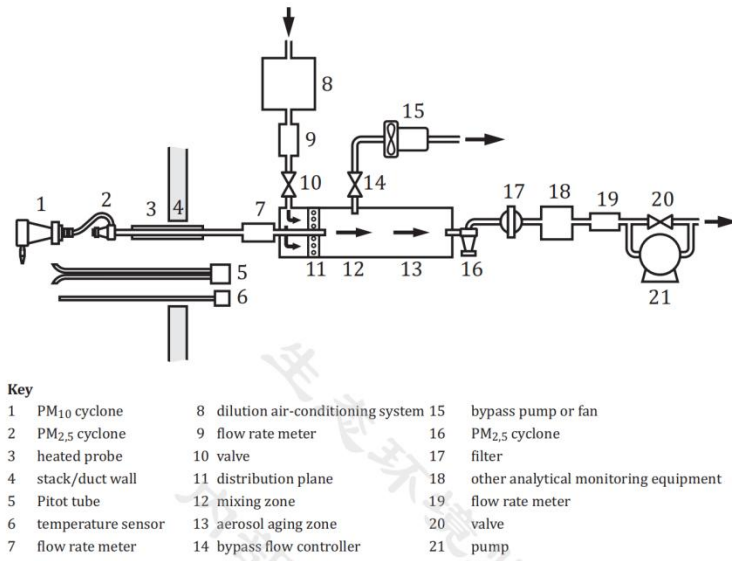


图 2 ISO 25597 稀释通道采样装置示意图^[20]

2018年发布的 OTM-37 是在 CTM-039 和 ISO 25597 的基础上编制的。OTM-37 延续 CTM-039 方法，改进了采样和分析方法，提高了方法检测灵敏度，因而可适用于低浓度 PM_{2.5}/PM₁₀ 采样。与 ISO 25597 不同，OTM-37 只提供了稀释通道采样方法，未提供直接采样方法，因此该标准无法区分可捕集颗粒物和可凝结颗粒物。采样装置的示意图见图 3。OTM-37 在最后使用滤膜捕集颗粒物前并未使用切割器，认为采集的滤膜样品即烟道内旋风采样器得到的特定粒径的颗粒物。等速采样中流速变化区间未对 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 分别要求，统一规定为 80%~120%。OTM-37 要求的稀释比率为 10:1 到 40:1 之间，稀释后的气体温度小于等于 29℃，相对湿度小于等于 50%。

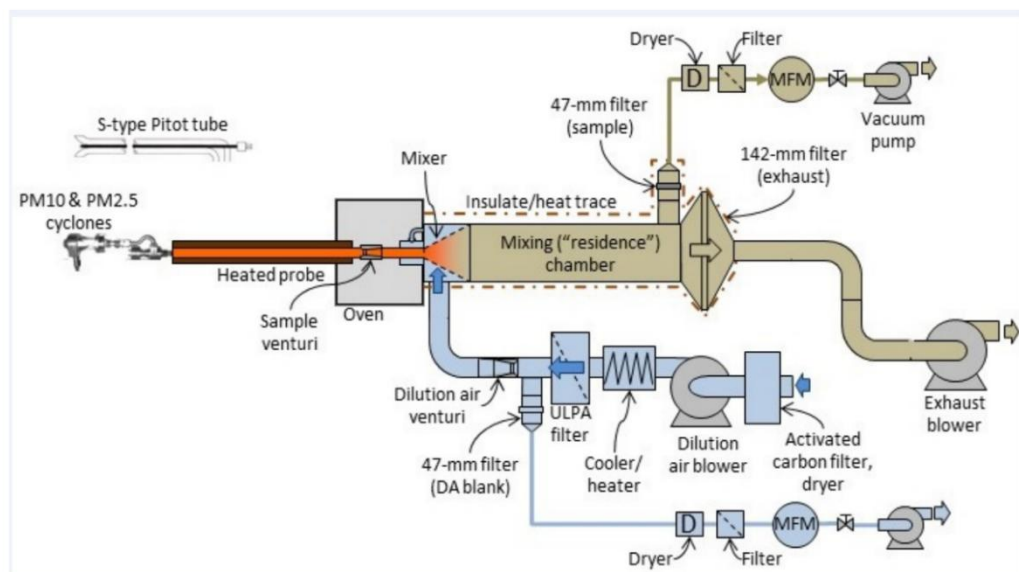


图 3 OTM-37 稀释通道采样装置示意图^[21]

3.2.2 国内标准方法情况

目前，国内关于固定污染源采样标准方法主要是直接采样法，主要包括《固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法》（GB/T16157-1996）及《固定污染源废气 低浓度颗粒物的测定 重量法》（HJ836-2017），尚无针对污染源中 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的采样以及关于污染源稀释通道采样的标准方法。

2014 年，原环境保护部发布《环境空气颗粒物来源解析监测技术方法指南（试行）》技术文件，该技术指南包含了固定源稀释通道采样方法，为各地在环境空气颗粒物来源解析工作中开展的采样工作提供了重要参考。2020 年，经过各地 6 年实践应用检验，由中国环境监测总站组织对《环境空气颗粒物来源解析监测技术方法指南（试行）》进行修订，在总结实践经验及研究成果的基础上，编写并由生态环境部发布技术文件《环境空气颗粒物来源解析监测技术方法指南》^[22]。经过修订的指南对固定源稀释通道采样方法进行了系统完善，内容包括适用范围、采样布点、方法原理、采样系统和装置、采样步骤、质量控制，提高了固定污染源稀释通道采样的科学性和可操作性。

3.3 国内稀释通道采样业务化应用情况

在基于受体模型法的源解析工作中，开展固定污染源采样分析的目的是取得固定污染源排放颗粒物的化学组分特征，即源颗粒物成分谱。源颗粒物成分谱为各化学组分在颗粒物中的占比情况，主要是要求采集颗粒物样品要具有代表性，不要求准确测定固定污染源实际排放颗粒物质量浓度。

2021 年，中国环境监测总站开展全国地级及以上 337 个城市颗粒物来源解析工作开展情况及监测站（中心）源解析能力调查，总体情况见表 2。关于城市源解析情况问卷共发放 337 份，回收 294 份有效问卷，回收比例为 87%，其中直辖市、省会城市、计划单列市的回收比例为 100%，其他城市为 86%。在反馈的城市中，所有直辖市、省会城市、计划单列市开展源解析比例均为 100%，其他城市的比例为 39%。

表 2 2021 年全国地级及以上城市颗粒物源解析调查总体情况

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%

在开展源解析的 136 个城市中，有 79 个城市开展了燃煤源样品的采集，涵盖电厂燃煤、工业燃煤、供热燃煤、民用燃煤等。50 个城市采用了稀释通道法，占比 63.3%，采样设备有北京大学自研稀释通道采样器、芬兰 Dekati FPS-4000、陕西正大 ZDA-PDSI-V3.0 等。

各地稀释通道法的主要采样参数情况见图4。其中反馈的38个城市稀释通道法的采样流量主要为10~20 L/min；反馈的22个城市稀释通道法的稀释倍数在几倍到几十倍之间；反馈的40个城市的采样时长主要在1~10 h之间；反馈的19个城市稀释通道法的停留时间在几秒~几十秒之间。反馈的21个城市稀释通道法的稀释后温度在25℃到50℃之间。

调查结果显示全国城市在源解析工作已逐渐开始采用稀释通道法采集固定源颗粒物，但是由于缺少相应的标准方法进行规范，各地实际采样参数（稀释倍数、停留时间、采样时间和流量、稀释后温度）不统一，直接影响监测结果的可比性。

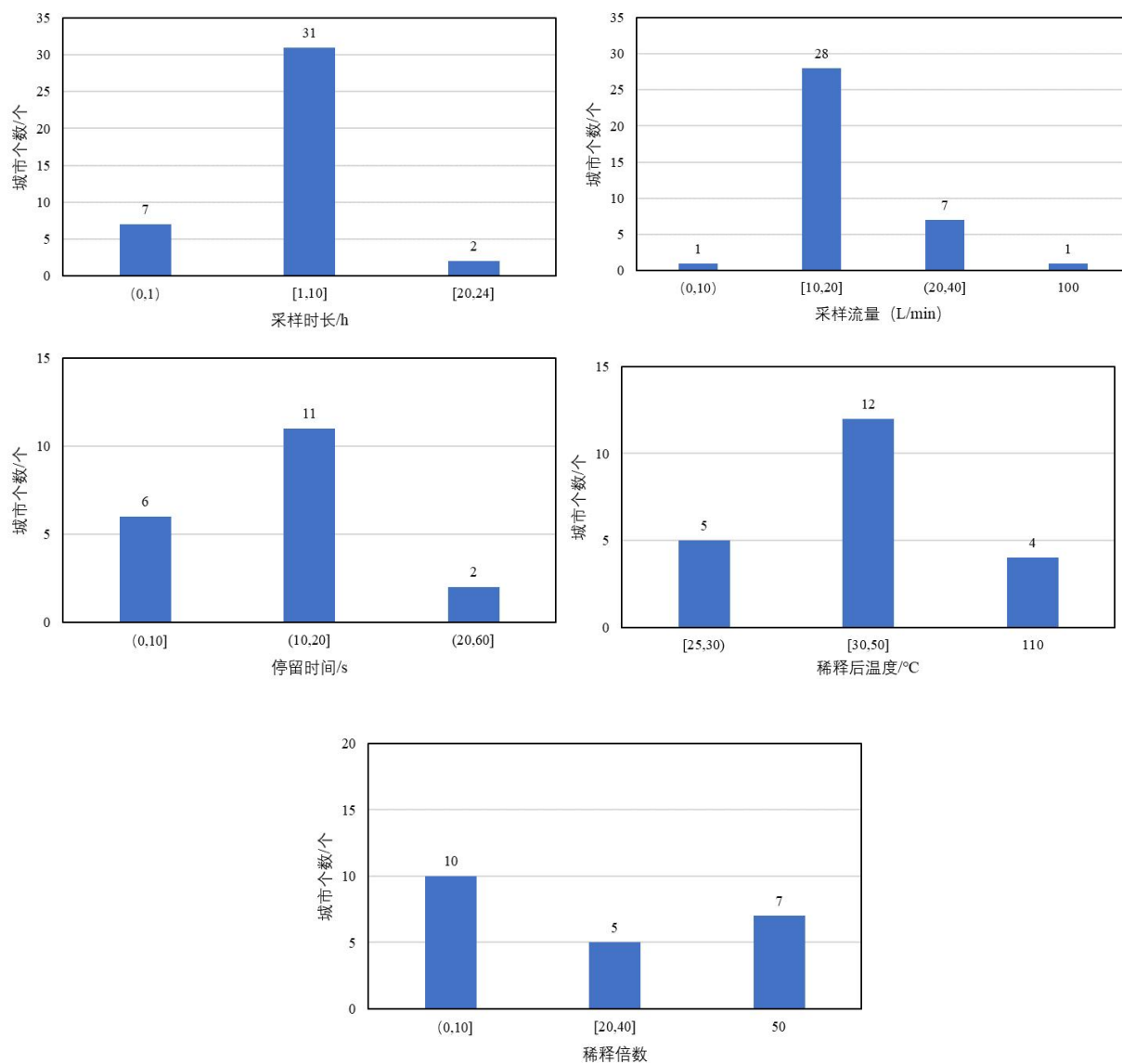


图4 全国城市燃煤源稀释通道法采样情况

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

本着科学性、规范性和适用性为原则，参考 ISO、美国 EPA、国内现有稀释采样技术资料，结合我国部分单位的实际使用情况和当前研究进展，制定本标准。

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。

规范性原则 所制订的标准要对源解析工作关键技术参数进行统一规定，提高源解析结果的可比性。

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。

4.2 标准制订的技术路线

本标准制订的技术路线见图5。通过对国内外有关固定污染源稀释通道采样方法标准及资料调研，国内外稀释通道采样技术应用调研、技术特点、实际使用情况以及用户意见与需求、征求仪器厂商代表意见等的充分调研、分析，重点转化国外已有的标准，结合国内稀释通道法采样的实践经验，针对关键的技术参数，开展研究，结合验证试验，制定标准文本和编制说明。

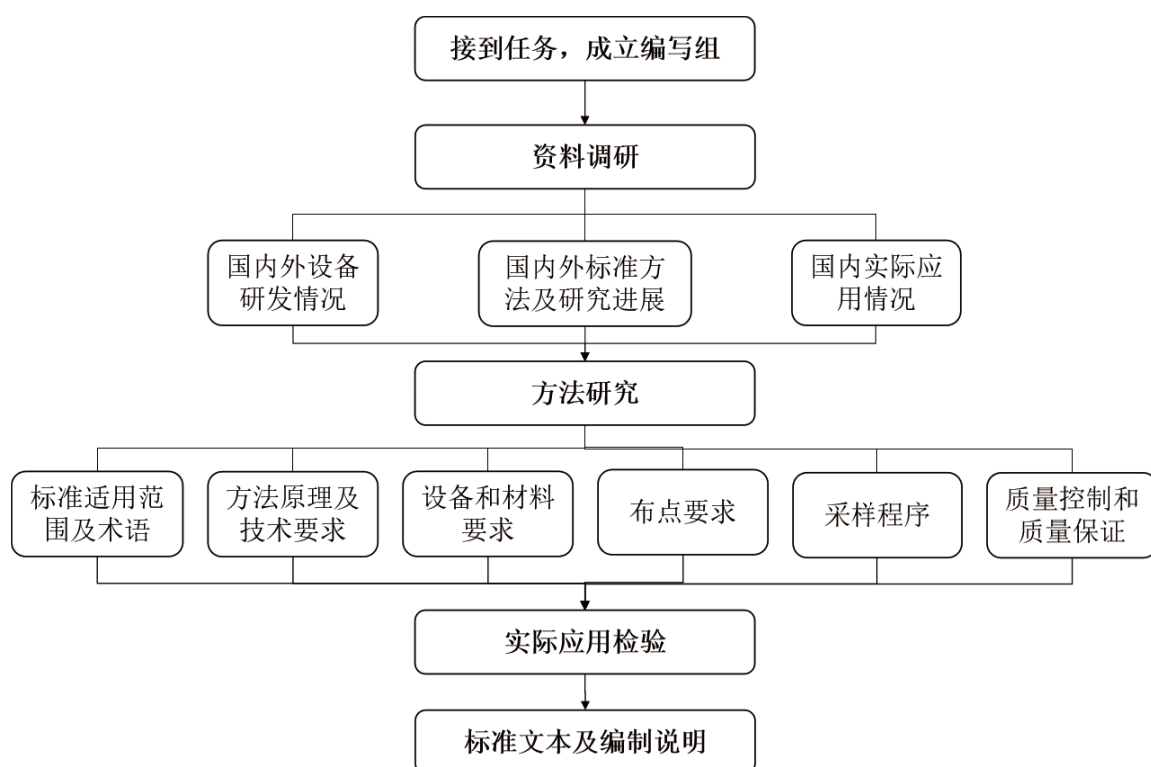


图5 标准制订的技术路线

5 方法研究报告

5.1 适用范围

本标准是在《环境空气颗粒物来源解析监测技术方法指南》、《大气颗粒物来源解析技术指南（试行）》的基础上，参考国外已有的稀释通道标准方法，总结全国各城市源解析工作中稀释通道采样情况，对采样原理及技术要求、设备与材料、点位布设、采样程序、质量控制与质量保证等做了相应的要求。

本标准的编制可规范生态环境部门和相关科研部门在环境空气颗粒物来源解析中为构建固定源排放颗粒物源谱而进行的固定污染源废气的PM_{2.5}和PM₁₀稀释通道采样工作。在基于受体模型法的环境空气颗粒物来源解析中，开展固定污染源废气的PM_{2.5}和PM₁₀稀释通道采样是为了构建固定污染源颗粒物的源谱，即各化学组分在颗粒物中的占比情况（如g/g），并非具体浓度大小。因而，本标准采用单点采样方式，得到的样品可用于构建固定源颗粒物源谱。

ISO 25597和美国EPA CTM-039规定了不适用含明显肉眼可见液滴的固定源烟气采样。烟气中存在的液滴可能包含实际排放到环境空气后水汽蒸发形成的PM_{2.5}或PM₁₀，而实际采样中这部分颗粒物会被切割器去除而无法采集，使采集的颗粒物无法代表固定源排放的颗粒物。此外，ISO 25597和美国EPA CTM-039还规定不适用高真空、高压、烟温高于260℃烟道气的固定源，工况不稳定的固定源，烟气混合不均匀出现分层的固定源，以及不适用采集粒径小于0.1 μm的超细颗粒物。其中，烟温高于260℃会对旋风采样器的连接造成损伤。通过使用改进后的连接方式，OTM-37可适用于高温烟气采样。本标准没有规定在烟道中使用切割器，所以不对烟温要求进行规定。参考国外标准，结合实践经验，本标准规定不适用于工况不稳定的固定污染源采样。

5.2 规范性引用文件

本标准共引用《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 16157-1996）、《固定源废气监测技术规范》（HJ/T 397-2007）、《固定污染源监测质量保证与质量控制技术规范（试行）》（HJ/T 373-2007）、《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 93-2013）、《环境空气颗粒物（PM_{2.5}）手工监测方法（重量法）技术规范》（HJ 656-2013）、《环境空气中PM₁₀和PM_{2.5}的测定 重量法》（HJ 618-2011）、《环境空气颗粒物来源解析监测技术方法指南（试行）》、《大气颗粒物来源解析技术指南（试行）》。具体引用的情况如下：

部分术语和定义引用和参考了《固定源废气监测技术规范》（HJ/T 397-2007）、《环境空气中PM₁₀和PM_{2.5}的测定重量法》（HJ 618-2011）、《环境空气颗粒物来源解析监测技术方法指南》和《大气颗粒物来源解析技术指南（试行）》中的内容。

样品采集中的采样位置和采样点、采样原理及方法、排气参数测定、采样步骤等内容引用了《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 16157-1996）、《固定源废气监测技术规范》（HJ/T 397-2007）中的内容。

采样时间及频次参考了《环境空气颗粒物来源解析监测技术方法指南》中的内容。

采样装置参考了《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 16157-1996）、《环境空气颗粒物来源解析监测技术方法指南》和《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 93-2013）中的内容。

质量保证中的仪器检定、校准部分引用了《固定源废气监测技术规范》（HJ/T 397-2007）、《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 93-2013）、《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 93-2013）、《环境空气颗粒物（PM_{2.5}）手工监测方法(重量法)技术规范》（HJ 656-2013）中的内容；现场质量保证措施引用了《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 16157-1996）、《固定源废气监测技术规范》（HJ/T 397-2007）、《固定污染源监测质量保证与质量控制技术规范（试行）》（HJ/T373-2007）中的内容。

5.3 术语和定义

本标准共引用 10 条术语。其中固定源、等速采样定义与 HJ/T 397-2007 相同；PM_{2.5}、PM₁₀定义参考了 HJ 618-2011；稀释空气、稀释比率参考了 ISO 25597、EPA CTM-039；烟气样品、稀释采样设备、停留时间、稀释采样空白参考了《固定源废气监测技术规范》（HJ/T 397-2007）、《环境空气颗粒物来源解析监测技术方法指南》和《大气颗粒物来源解析技术指南（试行）》、EPA method 202 及 ISO 25597。

5.4 采样原理及技术要求

5.4.1 采样原理

采样原理主要根据 HJ/T 397 中 7.2 部分和《环境空气颗粒物来源解析监测方法指南》修改而来。

5.4.2 采样技术要求

（1）烟气采样方法

GB/T 16157、HJ 836、HJ/T 397等规定对于固定污染源颗粒物直接采样，要求采样等速采样方法，采样流速为烟道流速的90%~110%。ISO分别规定了PM_{2.5}和PM₁₀等速采样的流速变化区间分别为80%~120%和90%~115%。OTM-37规定了等速采样中流速变化区间统一规定为80%~120%。鉴于稀释通道采样实现等速采样的难度明显大于直接采样且技术尚未实现自动跟踪，本标准参考国外标准结合工作实践，规定稀释通道采样采用等速采样方法，采样流速应为烟气流速的80%~120%。

（2）稀释比率

对于稀释采样来讲，稀释比越高，停留时间越长，则模拟效果越好，但是较高的稀释比和停留时间会带来控制系统不确定性（洁净空气流量计及混合气体流量计自身的示值误差）以及系统较大的体积和重量（稀释比越高，抽气泵及供气泵的体积及重量越大），造成系统稀释比存在较大的误差以及系统过于笨重，无法携带至污染源采样现场，因此，固定污染源稀释采样设备存在一个最低的稀释比，以达到模拟效果、流量控制以及便携性之间的平衡。在学术研究方面，Chang 等使用一套中试装置（160 kW/h）的锅炉及较早期的一套稀释采样设备，利用 SMPS 测试 420 nm 以下颗粒物在不同停留时间和稀释比状况下的模拟效果，得出结论称需要的最小停留时间为 10 s，稀释比为 20^[23]。该研究结论为 ISO

25597 所参考引用。上述研究只是针对 420 nm 以下的颗粒物。国内有采用稀释通道采样研究我国商用大型污染源（燃煤发电锅炉等）排气中 $PM_{2.5}$ 的情况。该研究使用经过改造定制的 DRI-b 稀释系统，选取某污染源 A 及污染源 B 进行现场实验。采样期间要求污染源燃烧条件、燃料种类、负荷、污染物去除设施保持稳定，DRI-b 在最大停留时间（40 s）及不同稀释比条件下进行稀释法烟气 $PM_{2.5}$ 测试，考虑到质量浓度是颗粒物的综合表征，以不同条件下基于滤膜增重、采样体积计算出的质量浓度来评估其模拟效果，结果见图 6^[24]。实验过程中通过调节洁净空气的供气流量和混合气的抽气流量来改变稀释比。随着稀释比的增加，颗粒物浓度水平较低时（污染源 A）约在 5:1~7:1 稀释比后质量浓度趋于稳定，颗粒物浓度水平较高时（污染源 B）约在 10:1 稀释比以后趋于稳定。

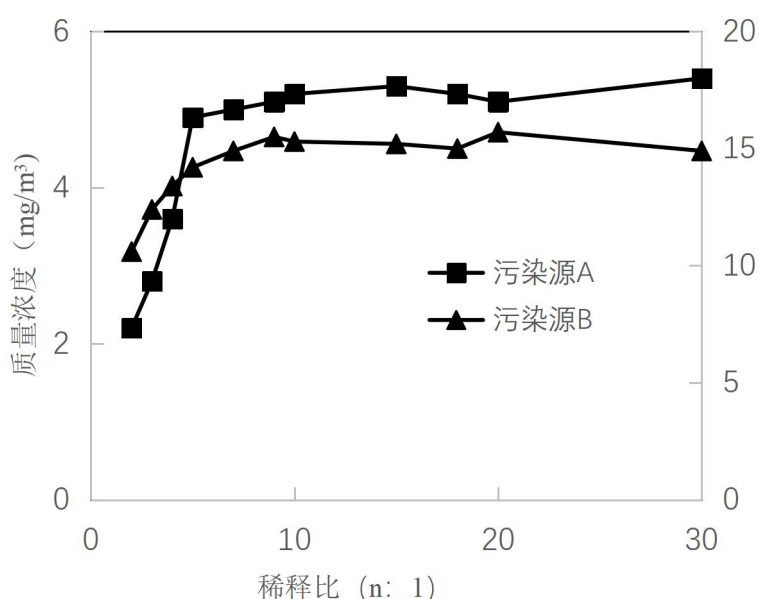


图 6 不同稀释比条件下的 $PM_{2.5}$ 质量浓度（40 s 停留时间）^[24]

在标准方面，美国 CTM-039 和 OTM-37 要求稀释比率为 10:1 到 40:1 之间以达到接近环境空气的条件，而 ISO 25597 要求稀释比大于等于“20:1”（实际为 21:1）。本标准参考国内外的研究成果和标准，结合操作可行性，确定稀释比率至少需要达到 10:1。

（3）停留时间

停留时间定义为稀释停留腔的容积（L）与混合气流量（L/s）的比值。停留时间越长，则混合气中气、液、固三相应越趋于稳定，欲得到较长的停留时间，从理论上讲，一方面可以减少混合气的流量，另一方面则为增加停留腔的容积，但实际上，由于稀释采样设备中 $PM_{2.5}$ 或 PM_{10} 等粒径切割器的工作流量是确定的，因此在设计时采取的措施多为改变停留腔的容积。较长的停留时间固然可以确保模拟效果，但也会造成设备便携性不足，因此存在着最小停留时间。国外研究认为需要的最小停留时间为 10 s^[23]。国内有研究使用

DRI-b 稀释采样设备，在 10:1 的稀释比条件下于污染源 A 和污染源 B 开展现场实验，以不同停留时间状况下的质量浓度评估模拟效果。实验过程中通过更换不同的稀释停留腔以改变停留时间，结果如图 7 所示^[24]。随着停留时间的增加，不同颗粒物浓度水平下（污染源 A、污染源 B）PM_{2.5} 质量浓度随之增加，在 10 s 处趋于稳定。该研究建议稀释采样设备的最小停留时间为 10 s。在标准方面，美国 CTM-039 和 OTM-37 未做明确规定，而 ISO 25597 规定停留时间至少需要 10 s。本标准参考 ISO 25597，结合国内外研究成果，确定停留时间至少需要达到 10 s。

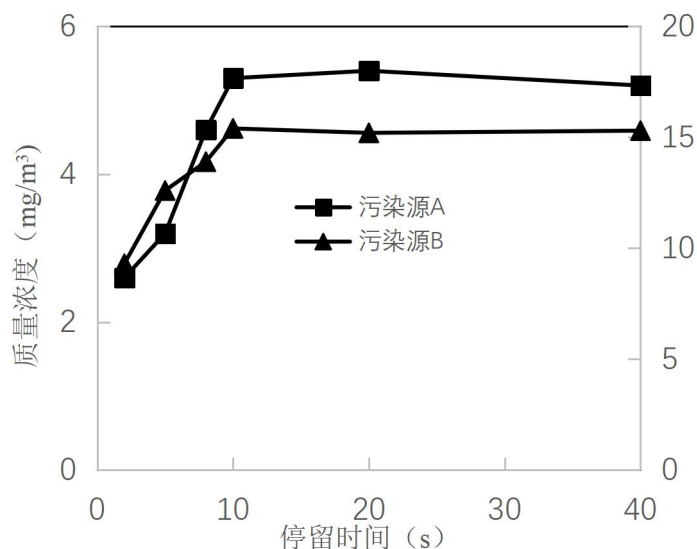


图 7 不同停留时间下的 PM_{2.5} 质量浓度（稀释比 10:1）^[24]

（4）稀释后气体温度和湿度

CTM-039 和 OTM-37 要求通过调整稀释比率使稀释后的烟气冷却，接近环境空气的温度，稀释后气体温度小于 29℃，相对湿度小于 50%。而 ISO 25597 规定稀释后烟气温度要求小于等于 42℃，相对湿度小于 70%。ISO 25597 认为当相对湿度大于 70%时，湿度对于颗粒物生成有显著影响，可能会造成部分颗粒物粒径增加值大于 2.5 μm 或 10 μm，而在稀释采样中被去掉，引起采集颗粒物的偏差。此外，还需要考虑聚四氟乙烯（PTFE）滤膜的耐热性及采样过程中不结露两个要求。42℃的要求是一方面尽可能降低温度至环境条件，增加可凝结颗粒物，另一方面需要结合各类污染源稀释采样可达到的温度情况。稀释后烟气温度和湿度大小与稀释通道采样是否达到预期效果直接相关。考虑目前设备和固定源的差异，本标准参考 ISO 25597 要求，加之目前技术可及性和实际可操作性，确定稀释后烟气温度要求小于等于 42℃，相对湿度小于 70%。

5.5 设备与材料

5.5.1 稀释通道采样设备

参考 ISO 25597 和美国 EPA CTM-039, 以及国内外稀释通道采样装置研究成果, 规定了稀释通道采样装置的主要组成, 应包括烟气采集单元、稀释空气发生单元、稀释混合单元、停留仓、PM_{2.5}/PM₁₀ 采样单元 5 个部分。对于每个组成部分的主要性能要求, 进行了具体规定。

关于稀释通道采样器结构示意图。按照国外内的仪器现状, 说明了稀释通道采样器设备的基本结构及示意图。本标准提供的结构示意图用于展示稀释通道采样设备的主要组成, 不同厂家的设计可能存在一定的差别。

关于烟气采集单元。烟气采集单元由采样嘴、烟气温度压力传感器、采样管及文丘里流量计、温控装置、烟气传输管等组成。除了采样管的滤筒及相关部件外, 烟气采集单元相关技术要求参照 GBT 16157、HJ 836、HJ/T 48。例如, 采样嘴材质使用 316 不锈钢或者聚四氟乙烯镀层不锈钢, 加工偏差应不大于±0.1 mm, 入口边缘厚度应不大于 0.2 mm, 锥角不大于 45°。根据烟气流速的变化, 可以更换不同的规格采样嘴, 实现等速采样 (80%至 120%等速)。烟尘采集单元的相关传感器测试精度要求检测精度为±2℃以内。为减少颗粒物受传输管中的静电吸附、水凝结等影响而损失, 要求烟气传输管采用可导电的不锈钢或其它材质制成, 须作保温处理, 应尽量缩短尺寸, 长度参考 ISO 25597, 建议不宜超过 1.0 m, 避免流向发生急剧变化, 减小静电、流向变化及管路吸附等造成的颗粒物损失。此外, 规定了温度和压力传感器的精度要求。

关于稀释空气发生单元。由稀释泵或空压机、水分分离及干燥装置、颗粒物过滤装置、有机物去除装置、稀释气加热/冷却器、质量流量计量及控制装置、温度传感器、湿度传感器和压力传感器等部件组成。参考 ISO 25597, 对稀释空气发生器做了相关性能参数规定, 要求对粒径为 0.3 μm 的颗粒物去除效率不小于 99.97%。此外, 规定了质量流量计及控制装置、温度、相对湿度和压力传感器的精度要求。

关于稀释混合单元。稀释混合单元的稀释比率要求可调, 通过调节能达到最低的采样要求 (10:1)。同时为避免出现冷凝水, 需设置加热或保温装置。在稀释混合单元中, 稀释空气与烟气必须迅速混合均匀, 混合方式可使用射流、多孔板或文丘里等。

关于停留仓单元。参考 ISO 25597, 规定停留仓的性能要求, 包括内表面均匀光滑、耐腐蚀、不易吸附颗粒物、易清洁、气密性良好, 设置加热或保温装置。此外, 规定了停留仓气体出口处设置的温度、相对湿度和压力传感器的精度要求。

关于 PM_{2.5}/PM₁₀ 采样单元。一般由 PM_{2.5}/PM₁₀ 切割器、换膜装置、流量计量装置 (可实施跟踪并自动调节)、压力传感器、采样泵及附属管路组成, PM_{2.5}/PM₁₀ 切割器的切割性能要求、各通道流量要求、各通道之间质量浓度对比结果等相关技术要求参照 HJ 93。固定源源谱至少需要包括无机元素、水溶性离子和有机碳/元素碳 3 大类组分。根据这些组分的分析需要, 需要石英滤膜和有机滤膜两种样品, 因此规定采样单元对一种颗粒物类型至少提供两通道同时采样, 可满足两种滤膜样品的同时采集。各通道采集的颗粒物样品质量浓度平行性参考 HJ653 要求, 取值小于等于 15%。计算公式 (1) 如下:

$$Re = \frac{x_i - \bar{x}}{\bar{x}} \times 100\% \quad (1)$$

式中：

Re 表示各通道采集的颗粒物样品质量浓度的相对误差，%；

x_i 表示第 i 通道采集的颗粒物样品质量浓度；

\bar{x} 表示所有通道采集的颗粒物样品质量浓度的平均值。

5.5.2 辅助设备材料

(1) 分析天平

参照 HJ 618 要求，确定分析天平感量小于等于 0.01 mg。

(2) 恒温恒湿箱（室）

参照 HJ 618 的 5.5 条款，规定箱（室）内空气温度在（15~30）℃范围内可调，控温精度±1℃；箱（室）内空气湿度在（50±5）%范围内可调，恒温恒湿箱（室）可连续工作。有条件可采用全自动恒温恒湿称重系统。

(3) 滤膜

圆形，直径大于等于 47 mm。根据滤膜分析要求进行选择，规定一般用于有机组分分析、碳组分分析的采用石英滤膜，无机元素采用聚四氟乙烯等有机滤膜。参照 HJ 618 要求，规定滤膜对 0.3 μm 标准粒子的截留效率不低于 99%。

(4) 其他材料

本标准规定了采样中涉及到的试剂和材料，包括丙酮、酒精、硅胶、无尘纸、洗瓶、手套、镊子、刷子、聚四氟乙烯胶带等。除非另有说明，采样时均使用符合国家标准的分析纯试剂，实验用水满足《分析实验室用水规格和试验方法》（GB/T 6682）三级水规格要求。部分材料要求如下：

丙酮为试剂级，残余量小于 0.001%，玻璃瓶储存，清洗稀释采样设备用。酒精为试剂级，玻璃瓶储存，清洗稀释采样设备用。

硅胶为 6 目至 16 目硅胶；如果硅胶重复使用，则需在 175℃烘干 2 小时；用于稀释采样设备除湿。无尘纸要求低起毛、无腐蚀性，用于稀释采样设备清洗后擦拭用。洗瓶要求是聚四氟乙烯，或同类材质，清洗稀释采样设备用。

手套为隔热手套，耐高温，用于烟气采样使用；更换滤膜环节使用乙烯基无粉手套。

镊子为光滑、无锯齿、有特殊涂层（如聚四氟乙烯）的镊子；使用前，用酒精和不起毛的抹布清洁镊子，风干。聚四氟乙烯胶带用于稀释采样设备连接件间的密封用。

5.6 采样方案的制定

由于稀释通道采样相对比较复杂，因此有必要在开展采样前制定相应的采样方案。采样方案需要围绕采样目的，根据资料调查等确定。采样方案内容需要至少包括污染源概况、选取原则、采样内容、采样频次及采样时间、采样方法、质量控制和保证措施等。对于经常性重复的采样任务，方案可适当简化。

5.7 点位布设

5.7.1 固定污染源的选择

围绕环境空气颗粒物来源解析工作的要求，参考《环境空气颗粒物来源解析监测方法指南》，结合工作实践确定布点要求。在选择固定源过程中，应充分考虑源的代表性。

在固定源选择时，首先需要参考当地已有的环境统计数据或者污染源清单来获取固定源基本数据，通过数据分析和深入调研，初步识别出当地主要的颗粒物源类以及其中的固定源类别。在环境空气颗粒物来源解析工作中，一般将一次颗粒物排放源分为燃煤源、移动源、扬尘、工业工艺过程源、其他源等一级源类。其中涉及到的固定源包括了各类燃煤源（如电厂燃煤源、供热燃煤源、工业燃煤源、民用燃煤源）、工业工艺过程源（如钢铁源、有色冶金源、建材源、石油化工源）、其他源（如生物质燃烧源、餐饮源）等。这些污染源在构建相应源谱时均需要采用稀释通道采样方法。

环境空气颗粒物来源解析工作涉及的固定源可通过以下方式进行分类：通过吨位、污染物产生方式（燃烧源、工艺排放等，燃烧源包括链条炉、往复炉、煤粉炉等）、污染物治理工艺（如静电除尘、湿法除尘、湿法脱硫、选择性催化还原脱硝等）及燃料种类等进行污染源分类。将识别的主要固定源类划分为子源类，如必要可进一步细分子源类。在细分与主要颗粒物来源相关的固定源类的基础上，选取运行稳定的主要子源或更加细分的源类作为代表性固定源进行采集。对于每种源类，选择2个有代表性并在源清单中该源排放量占比大于60%的污染源进行采样。当2个有代表性的2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。

对于燃料或生产工艺等存在显著季节性变化的污染源，其排放颗粒物很可能存在季节性变化特征，因此有必要按照季节分别进行采样。

5.7.2 采样点位

采样点的布设要求参照GB/T 16157、HJ/T 397的相关规定，不在本标准中重复。例如：

采样位置选择在垂直管段，避开烟道弯头和断面急剧变化的部位。采样位置应设置在距弯头、阀门、变径管下游方向不小于6倍直径，和距上述部件上游方向不小于3倍直径处。对矩形烟道，其当量直径 $D=2AB/(A+B)$ ，式中A，B为边长。采样断面的气流速度在5 m/s以上。测试现场空间有限，难以满足上述要求时，可选择比较适宜的管段采样，采样断面与弯头等距离至少是烟道直径的1.5倍。

采样点位应避免对采样人员操作有危险的场所。采样点位所在的平台应有足够的工作面积使采样人员能安全、方便地操作。平台面积不小于2.0 m²，并设有1.1 m高的护栏和不低于10 cm的挡脚板，采样平台的承重不小于200 kg/m²，采样孔距平台面高度约为1.2~1.3 m。

此外，参照HJ 836，规定采样孔内径应不小于80 mm，宜选用90~120 mm内径的采样孔。

5.7.3 采样时间及频次

采样时间需要综合各方面要求确定。采样时间要使采集的样品具有一定的代表性，满足称重及组分分析最低要求，因此不能过短。同时，采样时间还需使采集样品不超过滤膜的最大载荷，保证采样的可操作性，因此亦不能过长。此外，对于相同的烟气样品，采集仪器的性能不同会影响采集的颗粒物浓度，从而影响采样时间。主要影响因素为：停留仓

容积的不同、稀释比的可调节范围等会导致颗粒物老化、冷凝、凝结过程的差异；不同的切割器如旋风切割器和撞击式切割器的差异；仪器壁面光洁程度、管路长短、管径变化以及烟气混合样品中含水量的不同等也会导致颗粒物损失情况的差异。

因此，本标准规定采样时间的确定可根据烟道内颗粒物浓度（可参考烟气自动监控系统（CEMS）的历史或实测数据）、PM_{2.5}和PM₁₀占总颗粒物的比例、采样的稀释比、采样流量等确定。具体时间需通过采集一段时间后暂停采样泵取出采样滤膜，依经验来初步判断负载量是否满足需求。根据实际测试经验，一般单组样品采样时间为20~900 min。当烟尘浓度在20~100 mg/m³时，采样时间在2~8 h左右为宜；当烟尘浓度小于20 mg/m³时，采样时间应适当延长。上述采样时间仅作为参考，除与污染源烟尘浓度相关外，采样时间的长短与设备设计结构、性能也有很大关系。

采样频次参照《环境空气颗粒物来源解析监测方法指南》确定。对于每个点位，颗粒物样品需连续采集3组样品及1组稀释采样空白。样品采集和稀释采样空白的采集时间应保持一致。当采集颗粒物粒径发生改变时（如PM₁₀和PM_{2.5}），对应稀释比和采样时间可能发生改变，扣除空白时会出现较大的误差，特别是对超低浓度排放的固定源。以西安市固定源PM_{2.5}稀释通道采样（采样设备为上海贝瑟MFD25）为例，相关的烟尘排放浓度与采样时间统计见表3所示。

表3 西安市固定源烟尘排放浓度与采样时间统计

采样点编号	炉型	除尘方式	排放浓度/mg/m ³	单组样品采样时间/min	稀释比率
1	链条炉	布袋	14	700	10:1
2	链条炉	多管陶瓷	49	40	10:1
3	链条炉	布袋	24	900	10:1
4	链条炉	多管陶瓷	43	15	10:1
5	流化床	四级静电	26	480	10:1
6	链条炉	布袋	20	800	10:1
7	链条炉	——	80	40	10:1
8	流化床	布袋	29	320	10:1
9	煤粉炉	静电+湿电	12	300	10:1
10	煤粉炉	一电四袋	8	400	10:1

5.8 采样程序

5.8.1 采样准备

5.8.1.1 稀释通道采样器的准备

为防止颗粒物堵塞采样嘴和减少颗粒物在管道中的损失，参考EPA中CTM-039、M201A和M202等标准中有关清洗方法，结合工作经验，采样前需对稀释通道采样装置进行全面清洗，尤其是采样嘴、采样管、稀释混合单元、停留仓及采样管线重要部件。依次

使用丙酮（或酒精）、蒸馏水、丙酮（或酒精）涮洗或冲洗后，自然风干或用吹风机吹干。如采集不同类型污染源，每次采样前需对各部件全面清洗，以防止前次采样产生干扰；如采样对象均为同种类型的源，可适当简化。

稀释空气发生单元的空气干燥器和其它过滤器直接关系到产生的稀释气是否符合要求。因此，采样前需检查稀释空气干燥器中是否有硅胶，若硅胶变色超过一半需要更换，其它如颗粒物过滤器、有机物去除装置等的填料是否完好及备品是否充足；检查稀释空气发生单元的过滤器是否完好有效。

在实验室内，连接好稀释通道采样设备，开机检查确认可正常运行，检查或校准稀释空气的流量、采样单元各个通道的流量等关键参数。

5.8.1.2 采样滤膜及其他准备

在颗粒物源解析中，对于采集的固定源颗粒物样品需要进行称重和化学组分分析，获得颗粒物质量浓度以及颗粒物中各化学组分质量浓度。需要分析的颗粒物化学组分至少包括无机元素、水溶性阴阳离子、OC/EC，有条件的还需要分析多环芳烃、正构烷烃、左旋葡聚糖等有机化合物。有机滤膜（比如聚四氟乙烯滤膜）样品一般用于无机元素、可溶性阴阳离子分析，石英滤膜一般用于 OC/EC 以及有机化合物分析。因此，需要分别准备石英滤膜、有机滤膜（如聚四氟乙烯滤膜）等。对于滤膜需要提前进行平衡称重，方法参照 HJ 618。用于 OC/EC 及其它有机物分析的石英滤膜需先置于马弗炉以 500℃烘烤 4 h，去除有机杂质，待石英膜自然冷却后再进行平衡称重。

此外还需要准备采样所需的记录表格、化学试剂、材料、器具和安全防护用品等。

5.8.2 采样步骤

5.8.2.1 现场勘查

通过现场勘查进一步了解固定污染源的情况，包括生产设备、治理设施的运行工况，燃料类型、能耗量等信息。对近期的主要产品产量、主要原材料或燃料消耗量进行调查统计，以及与相应设计指标进行比较，核算生产设备的实际运行负荷和负荷率，进行记录。这些信息可用于后续辅助分析该固定源的源谱。

了解固定污染源的排气情况，包括排气筒的位置和数目，废气输送管道的布置及断面的形状、尺寸，废气输送管道周围的环境状况，废气的去向及排气筒高度等，参照 GB 16157，确定烟道采样位置和采样点，避开涡流段。

5.8.2.2 烟气参数获取

对于固定源稀释通道采样，需要预先测定排气参数，测定烟道内烟气的流速、烟温、水分含量等，以便选择采样嘴、明确稀释比及估算采样时间等。烟气排气参数的测定方法参照 GB 16157 和 HJ/T 397，可采用满足 HJ/T 48 技术要求的成品设备。

此外，通过参考烟气在线监测系统（CEMS）在线数据和历史监测数据（如有），预估颗粒物浓度，必要时进行实测，用于确定所需采样时间。

5.8.2.3 稀释通道采样

（1）采样设备的气密性好坏直接影响到采样质量。在采样平台连接稀释通道采样器各部件，放入采样滤膜，进行采样设备气密性检查，确认气密性良好。参考 HJ 93，进行气密性检查，要求负压显示大于等于 20kPa 的任一点，30 s 内变化小于等于 7 kPa。气密性检

查方法以资料性附录提供。如采样器的气密性未达到要求，则查找原因并进行调整，直至合格。

(2) 根据预采样获取的排气参数等相关信息，计算等速采样相关的平均流速及采样嘴直径等参数。按照 HJ/T 397 中 7.4.1 方法，移动采样法是计算各采样点的流速并选择相应的采样嘴，在各采样点处移动采样，各点采样时间需相同，采集一个混合样。移动采样要求各采样点采样时间相同，但在稀释通道采样中，采样前往往不能准确预估采样时间；加之目前的稀释通道采样仪器尚无法实现流速的自动跟踪，所以移动采样法受到了一定的限制，移动采样法在目前的设备和技术条件下，稀释通道采样中可操作性不强。相比而言，平均流速定点等速采样的操作性强。该方法是在烟道内，用流速测量装置测定各个测点的流速及压力，计算平均流速，再找到平均流速点并标记位置，根据平均流速，计算根据采样设备的输入参数要求计算在平均流速对应测点处等速采样，用平均流速点特征代表该截面处采样点信息。

本标准是用于构建受体模型法源解析中源谱构建，即采集的样品用于化学组分分析，得到各化学组分在颗粒物中的占比情况（如 g/g），而不是各组分的浓度值（如 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ）。单点采样可以获得准确的固定源排放颗粒物各组分的占比信息。此外，对于粒径较小的颗粒物，单点采样可以获得固定源颗粒物排放浓度信息。ISO 25597 规定对于采集颗粒物的平均粒径小于 $5\ \mu\text{m}$ ，可以采用单点采样。因此，单点采样得到的 $\text{PM}_{2.5}$ 样品可用于准确计算固定源的实际排放浓度，因此可通过该方法监测固定污染源排放的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度。综合考虑，本标准选择平均流速定点等速采样法。

(3) 稀释通道采样相对较复杂，采样人员需具备一定的固定污染源采样基础，采样条件需要反复调试确认。首先要设置采样管的伴热温度以避免水汽在采样管上凝结。参考 CTM-039、ISO 25597、OTM-37，确定采样管的伴热温度需高于烟道烟气温度 5°C 。待采样管加热至伴热温度后，将采样管伸入烟道内确定的采样点处，封闭采样孔，使采样嘴对准气流方向（其与气流方向偏差不得大于 10° ）进行采样，调节烟气样品流量控制器，使流量示值达到计算流量值。开启稀释空气发生单元，调节稀释空气的流量控制器，使其满足计算流量值，按照计算的流量要求提供稀释空气，同时开启 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 采样单元。待设备稳定后，查看停留仓出口气体的温度和湿度。如果仅温度未达到要求，则调节稀释气加热或冷却装置。如均未达到要求或出现水冷凝现象，则提高稀释比，更换采样嘴，反复试验直至符合要求。此外针对低温采样条件下停留仓出现的水冷凝现象，采样管、采样导管、停留仓需要采取保温措施；此外可采取对稀释气体进行加热措施或增大稀释比等措施。

(4) 确认稀释采样满足要求后，更换采样滤膜，进行正式采样。待采集一段时间后，可暂停采样泵取出采样滤膜，根据经验初步判断负载量是否满足需求。为保证采样的代表性，每个点位至少连续采集三组样品。此外，还需要采集一组稀释采样空白样品。稀释采样空白样品采集时，需将烟道气体入口封闭，仅有稀释空气通过，采用相同的采样条件，得到稀释采样空白。采样期间定期对流速进行检查，维持流速在要求范围内；采样期间安排专人负责查看工况，确认处于正常或有代表性的工况负荷，工况稳定无异常。

(5) 采样结束后关闭采样泵，取下滤膜，立即放入便携式冰箱内冷藏保存，运回实验室进行滤膜称重以及颗粒物化学组分分析等。滤膜需要进行冷藏保存，以防止颗粒物化学

组分的损失，尤其是有机组分。将滤膜样品记录采样体积、滤膜编号、采样流量、温度、湿度、采样时间及稀释比率等，同时应记录采样的固定污染源相关信息，包括工况负荷、燃料类型、废气处理设施及其运行状况等信息。具体的采样记录表以资料性附录提供。

5.9 质量保证和质量控制

本标准在质量控制和质量保证（QA/QC）中的要求参考《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 93-2013）、《固定污染源监测质量保证与质量控制技术规范》（HJ/T 373-2007）、《固定源废气监测技术规范》（HJ/T 397-2007）、GB 16157、HJ 618、HJ 656中的相关条款以及国外ISO、美国EPA标准，并结合监测实践确定。包括监测人员、监测仪器和设备、样品采集、样品运输和保存等关键环节的QA/QC。

5.10 附录

分别提供了附录 A 气密性检查方法和附录 B 稀释通道现场采样记录表，作为资料性附录。

6 方法现场验证

为进一步提高本标准的科学性、可操作性及适用性，2022年9月编制组在西安市开展了持续12天的现场验证测试。编制组首先在全国范围公开征集参与现场验证测试的单位，筛选确定3家参与验证的单位，包括1家高校和2家企业。结合西安市固定源常年实际排放特征，选择1家典型的生活垃圾焚烧发电企业和1家典型的燃煤发电企业作为代表性固定污染源开展现场验证。生活垃圾焚烧发电企业的烟气排放参数为：流速16 m/s，烟温136℃，水分含量26%；燃煤发电企业的烟气排放参数为：流速9~11 m/s，烟温75~80℃，水分含量11%~15%。现场验证情况见图8所示。

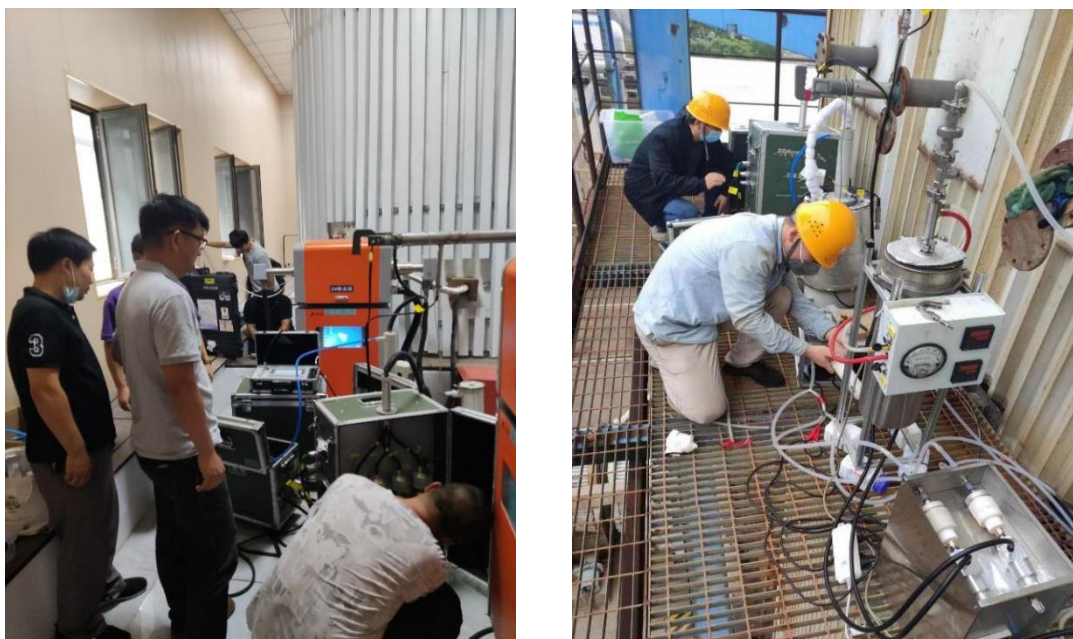


图8 现场验证情况（左：垃圾焚烧企业采样现场，右：燃煤发电企业采样现场）

3家参与验证单位按照编制组要求，分别采集不同条件下的颗粒物样品，包括不同材质滤膜（石英和聚四氟乙烯）、不同稀释比（10:1、20:1、5:1）、不同切割粒径（PM_{2.5}和PM₁₀），共采集168张滤膜样品。在现场验证过程中，除对文本方法的技术关键指标如稀释比、停留时间等验证外，也对气密性检查方法进行了验证；此外为了防止采样过程中形成的水冷凝现象，重点关注了稀释后停留仓出口的温度湿度状况及持续稳定采样情况。现场验证测试结果见表4。

表4 现场验证测试结果

点位	验证单位	稀释比	烟温/伴热温度(°C)	停留仓温度/相对湿度	采集时间(h)	采集量(µg)
垃圾焚烧企业	单位1	10:1	136/140	30°C/62%~64%	2	170~360(Q膜) 50~105(T膜)
		20:1	136/140	30.1°C/61%	8	395~625(T膜)
		5:1	136/140	32.8°C/85.1%	1	15~70(T膜)
	单位2	10:1	136/140	40.5°C/28%	6	510~580(Q膜) 130~310(T膜)
		20:1	136/140	38.6°C/18.1%	13	160~330(Q膜)
	单位3	10:1	136/120	34°C/57%	9	160~330(T膜) 360~460(Q膜)
		20:1	136/120	28.4°C/54%	14	220~330(T膜)
	燃煤发电企业	单位1	10:1	78/80	26.3°C/37.7%	3
20:1			78/80	25°C/33%	5	450~465(T膜) 550~630(Q膜)
5:1			78/80	27.6°C/67.7%	1.5	490~610(T膜) 790~810(Q膜)
单位2		10:1	78/80	28.3°C/35.9%	5~6	1080~1450(Q膜) 770~930(T膜)
		20:1	78/80	35°C/40%	10	960~970(T膜)
		5:1	78/80	37.4°C/56%	3	1190~1550(T膜)

备注：单位3由于设备故障，未完成燃煤发电企业样品采集

总体上，现场验证工作显示本标准可用于规范固定污染源的稀释通道采样工作，具有较强的科学性、可操作性及适用性。验证的主要结果如下：

(1) 对进入稀释通道采样设备的烟气流量需采取合理、可靠的直接计量方法。相比于较大的洁净空气流量，烟气流量较小。通过流量平衡的方法对烟气样品流量折算，易受制于其它流量计量准确性的影响、采样泵的动力大小及烟道气流速大小、正负压影响，当稀

释比较大时这种影响将被放大。文丘里流量计是比较常用的烟气流量计。因此，有必要规定采用文丘里流量计测定烟气样品流量。

(2) 对于采样中可能出现的冷凝水，在与洁净空气混合前，对烟气采取伴热保温措施的同时，缩短传输管路和对洁净空气采取较为完全的净化干燥措施，可以有效避免采样中出现冷凝水。

(3) 对于超低超净排放的固定源，10:1 的稀释比较为合理，采样时间相对可行，采样量也较为满意，稀释后的烟气能满足技术文本中温度小于等于 42℃，湿度小于 70%的技术要求。

(4) 对于稀释空气发生单元，至少需要涵盖水分去除、颗粒物过滤、有机物去除功能的装置，视情况可适当增加颗粒物过滤装置，同时要加强填充料的更换频率，确保采样期间有效。

(5) 末端颗粒物采样器流量会随着采样滤膜负载量的变化而波动，为使采样设备更加稳定运行，需采用带有自动跟踪的流量计量方法。

编制组根据现场验证结果，进一步修改完善了标准文本和编制说明。

7 标准实施建议

本标准发布实施后，可用于规范环境空气颗粒物来源解析工作中固定污染源废气颗粒物（PM_{2.5}和 PM₁₀）稀释通道采样，进一步提高源解析工作规范性和结果可比性。同时建议随着源解析技术的不断发展和环境空气颗粒物污染防治要求的变化，对本标准进行适时修订。

8 参考文献

- [1] Bradway R M, Cass R W. Fractional efficiency of a utility boiler baghouse, Nucla Generating Plant[R]. 1975.
- [2] Cooper J, R Peltier, Simultaneous particulate and vapor-phase stack sampling for toxic species using plume simulating dilution sampling with zero background air[R]. 1992.
- [3] Hildemann L M, Cass G R, Markowski G R. A dilution stack sampler for collection of organic aerosol emissions: design, characterization and field tests[J]. Aerosol Science and Technology, 1989, 10(1):193-204.
- [4] Schauer J J, Rogge W F, Hildemann L M, et al., Source apportionment of airborne particulate matter using organic compounds as tracers[J]. Atmospheric Environment, 1996, 30(22): 3837-3855.
- [5] Wang X L, Watson J G, Kohl S D, et al. Measurement of real-world stack emissions with a dilution sampling system[J]. Developments in Environmental Science, 2012, 11: 171-192.
- [6] Chang O M C, England G C. Development of Fine Particulate Emission Factors and Speciation Profiles for Oil and Gas-fired Combustion Systems, Update: Critical Review of

- Source Sampling and Analysis Methodologies for Characterizing Organic Aerosol and Fine Particulate Source Emission Profiles[R]. 2004.
- [7] U.S. Department of Energy. Characterizing toxic emissions from a coal-fired power plant demonstrating the AFGD ICCT Project and a plant utilizing a dry scrubber/baghouse system[R]. Final report[R].1994.
- [8] Wall S M. Improved methods for PAH combustion source sampling, Final Report[R]. 1996.
- [9] Lipsky E, Stainer C O, Pandis S N, et al. Effects of sampling conditions on the size distribution of fine particulate matter emitted from a pilot-scale pulverized coal combustor[J]. Energy and Fuel, 2002, 16, 302-310.
- [10] 朱坦, 郭光焕, 白志鹏, 等. 烟道稀释混合湍流分级采样器[P]. 中国, 发明专利, 2005. ZL03119498.2,2005-02-02.
- [11] 周楠, 曾立民, 于雪娜, 等. 固定源稀释通道的设计和现场测试研究[J]. 环境科学学报, 2006, 26(5): 764-772.
- [12] 于雪娜. 固定源稀释通道采样系统的研制及其应用[D]. 北京: 北京大学, 2004, 20-28.
- [13] 李兴华, 段雷, 郝吉明, 等. 固定燃烧源颗粒物稀释采样系统的研制与应用[J]. 环境科学学报, 2008, 28(3): 458-463.
- [14] 孔少飞, 白志鹏, 陆炳, 等. 固定源排放颗粒物采样方法的研究进展[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(12): 88-94.
- [15] 姚宗路, 吴同杰, 赵立欣, 等. 生物质固定燃烧源烟气稀释采样装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(03): 174-178.
- [16] 朱玲, 田秀华, 王同健. 固定源烟气颗粒物稀释采样器的设计及应用[J]. 环境污染与防治, 2014, 36(06): 51-54.
- [17] 晁良俊, 董凡, 张健, 等. 新型污染源废气排放采样装置的研究与应用[J]. 分析仪器, 2019, (02): 14-18.
- [18] 张晓博, 周胜, 王伟, 等. 一种便携式大气颗粒物稀释通道采样器及采样方法[P]. 中国专利: CN201610285136.0, 2016-07-27.
- [19] ISO. ISO 25597:2013 Stationary source emissions — Test method for determining PM_{2.5} and PM₁₀ mass in stack gases using cyclone samplers and sample dilution[S]. 2013.
- [20] US EPA. CTM-039 Measurement of PM_{2.5} and PM₁₀ emissions by dilution sampling (Constant Sampling Rate Procedure)[S]. 2004.
- [21] US EPA. OTM-37 Measurement of direct PM_{2.5} and PM₁₀ emissions at low concentrations by dilution sampling (Constant Sampling Rate Procedure)[S]. 2018.
- [22] 生态环境部. 《环境空气颗粒物来源解析监测技术方法指南》 [EB/OL] [2022-5-6]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/sthjbs/202005/t20200514_779089.html.
- [23] Chang M C O, Chow J C, Watson J G et al. Measurement of ultrafine particle size distributions from coal-, oil-, and gas- fired stationary combustion sources[J]. Journal of Air & Waste Management Association, 2004, 54(12), 1494-1505.
- [24] 裴冰. 污染源颗粒物测定技术研究及应用[D]. 上海交通大学博士论文, 2017.