

进样口热脱附-全二维气相色谱质谱法分析 PM_{2.5} 有机组分

白玉¹, 王希希², 宁欣¹, 侯雯倩¹, 骆春迎¹, 王炼¹, 文君^{*1}

(1. 成都市疾病预防控制中心(成都市卫生监督所), 四川 成都 610041; 2. 成都海关技术中心, 四川 成都 610041)

摘要: 大气细颗粒物(PM_{2.5})中有机组分的精细表征对于解析污染成因具有重要意义。针对传统分析方法前处理耗时久、分离能力不足等问题, 研究建立了一种基于进样口直接热脱附与全二维气相色谱-质谱(GC×GC-MS)联用的方法, 实现了PM_{2.5}有机组分的快速分析。在优化热脱附温度和时间等参数后, 将该方法应用于三个不同功能区采样点的PM_{2.5}样品分析, 共识别275种有机化合物, 主要涵盖脂肪族含氧化合物、长链烃与脂类、芳香烃、芳香含氧化合物、含氮有机物、萜类及其氧化物、糖类及其衍生物等8个类别。主成分分析(PCA)结果表明, 3组样本呈现清晰的空间聚类特征。进一步聚类分析初步揭示了不同功能区PM_{2.5}的污染来源差异: 新兴城区受餐饮油烟及商业排放影响明显; 核心商业区受建筑涂料及日化用品等挥发性化学产品的排放影响较大; 城乡接合部则主要受生物质燃烧、植被散发和工业排放的叠加影响。结果表明, 该方法能有效提取复杂有机组分的数据特征, 具备识别不同功能区污染来源差异的分析潜力, 为探究区域大气污染特征和开展精细化源解析提供了一种高效便捷的分析手段。

关键词: PM_{2.5}; 全二维气相色谱质谱; 热脱附; 有机气溶胶; 主成分分析

中图分类号: O65 文献标识码: A 文章编号: 0258-3283 (2026) --

DOI:10.13822/j.cnki.hxsj.2026.0096

Analysis of Organic Components in PM_{2.5} via Inlet Thermal Desorption Coupled with Comprehensive Two-Dimensional Gas Chromatography-Mass Spectrometry BAI Yu¹, WANG Xi-xi², NING Xin¹, HOU Wen-qian¹, LUO Chun-ying¹, WANG Lian¹, WEN Jun^{*1} (1. Chengdu Center for Disease Control and Prevention (Chengdu Institute of Health Supervision), Chengdu 610041, China; 2. Technology Center of Chengdu Customs, Chengdu 610041, China)

Abstract: Detailed characterization of the organic components of fine particulate matter (PM_{2.5}) is important to elucidate air-pollution sources and formation mechanisms. To address the limitations of conventional analytical methods, such as time-consuming sample pretreatment and insufficient separation capacity, in this study, a rapid analytical method for PM_{2.5} organic components was developed by coupling direct inlet thermal desorption with comprehensive two-dimensional gas chromatography-mass spectrometry. First, the key thermal desorption parameters, including the desorption temperature and desorption time, were optimized. Then, the proposed method was applied to the analysis of PM_{2.5} samples collected from three sites representing different functional areas: an emerging urban area, a core commercial area, and an urban-rural fringe. A total of 275 organic compounds were identified, which primarily spanned eight categories: aliphatic oxygenated compounds, long-chain hydrocarbons and lipids, aromatic hydrocarbons, aromatic oxygenated compounds, nitrogen-containing organic compounds, terpenes and their oxidation products, and carbohydrates and their derivatives. Principal component analysis revealed clear spatial clustering among the three sample groups. Further clustering analysis revealed distinct differences in the PM_{2.5} pollution sources among the functional areas: the emerging urban area was strongly influenced by cooking emissions and secondary transformation of traffic exhaust; the core commercial area was more strongly affected by emissions from construction paint and volatile chemical products (i.e., chemical products in daily use); and the urban-rural fringe was primarily influenced by the combined contributions of industrial emissions, residential coal combustion, and biomass burning. Thus, the proposed method can effectively extract characteristic information from complex organic components and identify differences in pollution sources among functional areas. Therefore, this technique constitutes an efficient and convenient analytical method for investigating regional atmospheric pollution characteristics and refined source distribution.

Key words: PM_{2.5}; comprehensive two-dimensional gas chromatography-mass spectrometry (GC×GC-MS); thermal desorption; organic aerosol; principal component analysis (PCA)

收稿日期: 2026-04-16; 修回日期: 2026-06-09; 接受日期: 2026-06-10

基金项目: 成都市医学科研课题项目(2023214); 成都市疾病预防控制中心科研项目(20230205)。

作者简介: 白玉(1985-), 女, 四川成都人, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为卫生理化检验。

通讯作者: 文君, E-mail: 943194392@qq.com。

大气细颗粒物(PM_{2.5})作为雾霾等大气复合污染的核心组分,具有粒径小、比表面积大、化学组成复杂以及易于富集有毒有害物质等特征,对生态环境质量和人类健康具有显著的不利影响,因而受到广泛关注^[1]。有机气溶胶作为PM_{2.5}的重要组成部分,通常占颗粒物总质量的20%~90%^[2]。相较于无机组分,PM_{2.5}中有机物的化学构成极其复杂,涵盖了多环芳烃、正构烷烃、有机酸、糖类以及各类含杂原子化合物等众多类别。因此,全面表征这些有机组分的化学特征,对于理解区域大气污染成因、制定大气污染防治政策以及评估健康风险具有重要的科学意义。

由于PM_{2.5}中有机化合物组成复杂、种类繁多且极性跨度大、化学性质及浓度水平差异显著,实现其全面、准确的表征一直是大气环境化学领域的难点。目前尚无单一分析技术能够覆盖PM_{2.5}中全部有机化合物,不同分析方法通常仅对特定类型组分具有相对优势。气相色谱-质谱联用技术(GC-MS)凭借较高的分离效率和较成熟的谱库检索优势常用于挥发性、半挥发性及热稳定有机化合物的分离鉴定,近年来,在PM_{2.5}有机组分的识别与源解析研究中得到了广泛应用并取得了诸多进展。例如,Wang等^[3]使用气相色谱-轨道阱质谱探究了我国西北地区PM_{2.5}中的有机组成,其鉴定出的同分异构体和低浓度分子数量约为传统GC-MS的1.6倍。邓钰雯等^[4]采用气相色谱-三重四极杆质谱建立了测定PM_{2.5}中15种有机紫外线吸收剂的定量方法。苏广宁等^[5]则将超声波萃取与气相色谱-串联质谱法联用实现了PM_{2.5}中18种多氯联苯化合物的同时测定。

为应对传统GC-MS对未分辨复杂混合物分离能力不足的问题,全二维气相色谱-质谱(GC×GC-MS)技术逐渐被引入PM_{2.5}分析领域,通过二维分离显著提升峰容量,被广泛应用于复杂有机组分的筛查与半定量分析^[6,7]。汪睿等^[8]建立了基于热脱附-气流调制的GC×GC-MS方法,实现对环境大气中中等挥发性有机物的高效分离和识别。此外,传统的色谱分析中多依赖繁琐的溶剂萃取等前处理过程^[9,10],耗时较长且不便,为此,本研究采用基于进样口直接热脱附与全二维GC×GC-MS联用的分析方式,将PM_{2.5}采样膜在进样口热脱附后,经全二维气相色谱分析检测,旨在实现对不同采样点的PM_{2.5}中挥发性和半挥发性有机成分的快速分析并

探讨区域间潜在的组成差异和来源特征。

1 实验部分

1.1 主要仪器与试剂

8890-7250 型气相色谱-四级杆串联飞行时间质谱联用仪(GC-QToF MS)、一维色谱柱 HP 5MS (30 m×0.25 mm×0.25 μm, 美国安捷伦科技有限公司); SSM 1800 型固态调制器、二维色谱柱 W17-1825 (1.2 m×0.18 mm×0.18 μm)、HV 系列调制柱 (1.2 m×0.25 mm) (雪景电子科技(上海)有限公司); OPTIC-4 多功能气相色谱进样模块(日本 GL Sciences 公司); PAL RTC 型全自动进样器(瑞士思特斯分析仪器有限公司)。

正构烷烃混合标样溶液(C₉~C₃₃, 100~200 μg/mL, 坛墨质检科技股份有限公司)。

1.2 实验方法

1.2.1 样品采集

参照国标 HJ 656-2013《环境空气颗粒物(PM_{2.5})手工监测方法(重量法)技术规范》进行采样,用玻璃纤维滤膜采集空气中的PM_{2.5},采样流量 100 L/min,采集时间 24 h。采样结束后于-18 °C 冰箱避光保存。在西南地区某城市选取了 3 个不同功能区的采样点同步采样,每个采样点(组别)共进行 3 次采样,每次 3 个平行样。3 组地理特征如下:G 组采样点位于新兴城区,地处成熟的商住混合区域,周边分布有大型商业综合体和居住区。Q 组采样点位于核心老城区,地处城市核心商务区,建筑密度高,处于典型的街道峡谷地带。P 组采样点位于郊区,地处城乡接合过渡地带,邻近区域分布大型工业园区。3 处直线距离为 16~53 km。

1.2.2 分析方法

样品通过进样口热脱附-全二维 GC-QToF MS 系统进行分析,使用 OPTIC-4 多功能气相色谱进样模块完成直接热脱附及进样过程。以进样口内衬管作为样品载体,准确截取 0.25 cm² (0.5 cm×0.5 cm) 的 PM_{2.5} 滤膜样品放入钝化处理后的衬管中,由全自动进样器将装有样品的衬管装载至气相色谱进样口内进行热脱附。进样口初始温度设定为 50 °C,衬管插入后,用氦气吹扫 30 s,随后进样口迅速加热至 300 °C,使采样膜上的分析物完成热脱附并进入气相色谱柱。

色谱条件:流速 1.5 mL/min,升温程序为:初温 50 °C,保持 2 min,以 6 °C/min 升至 280 °C,保

持 2 min。调制周期 5 s。质谱条件：EI 标准模式，70 eV 电子能量，离子源温度 230 °C，传输线温度 280 °C，全扫描模式， m/z 范围为 40~500，扫描速率 50 谱/s。

1.2.3 数据处理与分析

采用 Canvas 全二维色谱软件解析质谱数据，设定检测阈值为信噪比 (S/N) > 30，经过峰检测、去除柱流失等无效峰、手动合并个别拖尾峰后，使用 NIST20 数据库进行检索匹配，并利用相同条件下正构烷烃保留时间计算化合物的保留指数 (RI)，与参考值进行比对确认。使用 Canvas 内嵌 Album 模块将多组样品结果进行峰对齐，去除因含量过低等原因导致组内一致性不够的峰，选择正反向匹配度均大于 700 的组分生成待分析化合物峰列表。采用峰面积归一化法，以样品中分析组分的峰面积占样品中各组分的峰面积之和的比例来表示样品中各组分的相对丰度。使用安捷伦 Mass Profiler Professional (MPP) 软件进行后续统计分析。

2 结果与讨论

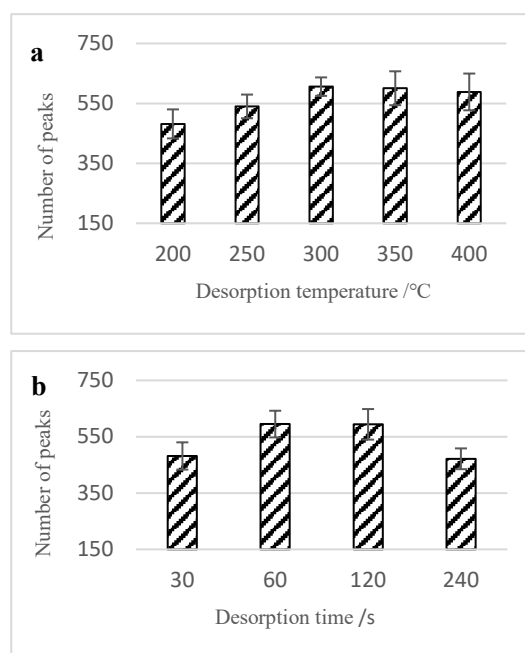
2.1 进样口热脱附条件优化

实验考察了进样口热脱附的脱附温度和脱附时间对检测效果的影响。以全二维检出的有效峰数量作为评价指标 (设定检测阈值信噪比 (S/N) > 30，合并拖尾峰，扣除色谱柱流失等无效峰)。优化结果如图 1 所示。

首先对 200~400 °C 范围内脱附温度的影响进行了考察。由图 1a 可知，当脱附温度升高至 300 °C 以上时，系统检出的有效峰数量显著增多，因为较高的温度能够促进高沸点或强吸附的化合物更好地解吸。但当温度升高至 350 °C 以上时，有效峰数量出现了较大的波动，这可能在于过高温度的增大了部分热不稳定化合物发生降解的概率^[1]。因此，最终选定 300 °C 作为优化后的脱附温度。

进一步在 30~240 s 范围内对脱附时间进行了考察。由图 1b 可知，当脱附时间在 60~120 s 之间时，检出的有效峰数量最多，显示 60 s 的时间已能使大多数分析物完成传质过程。当脱附时间长于 120 s 后，有效峰数量并未进一步增加。这可能是由于一方面，在 120 s 内已可以使绝大部分有机化合物解吸完全，继续延长时间无法进一步提高解吸率；另一方面，过长的脱附时间可能导致进入色谱柱的样品产生谱带展宽效应，降低峰的分度，也

导致检出峰的信噪比降低，不利于对部分含量较低的化合物检出。基于对效率和重现性的综合考量，选择 60 s 作为优化后的脱附时间。



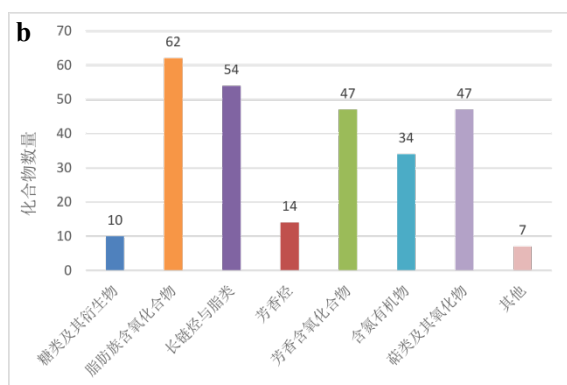
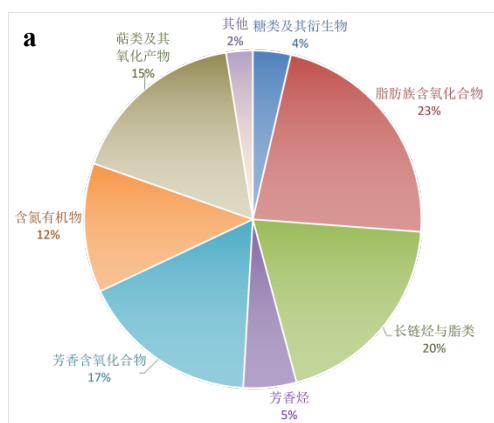
a. 脱附温度对检出有效峰的影响; b. 脱附时间对检出有效峰的影响

图 1 不同热脱附条件对检出有效峰的影响

Fig.1 Influence of different thermal desorption conditions on detected effective peaks

2.2 样品的有机组分构成与分类情况

使用优化后的热脱附条件完成对 3 组采样点的样品分析。为了便于比较 3 组 PM_{2.5} 样品的有机组分构成，依据各化合物的主体骨架结构及其主要的环境意义，将检出的有机物主要分为以下 8 个类别：脂肪族含氧化合物、长链烃与脂类、芳香烃、芳香含氧化合物、含氮有机物、萜类及其氧化物、糖类及其衍生物和其他。对于兼具多种结构特征的化合物，采用主体结构和环境意义优先的原则进行单一归类，避免重复统计。需要指出的是，这 275 种化合物在 3 组样本中均有广泛检出。



a. 检出化合物分类占比分布图; b. 检出化合物分类数量统计表

图2 检出化合物分类情况统计图

Fig.2 Chart of classification statistics for detected compounds

图2是3组样品中检出的化合物分类占比及数量统计图。糖类及其衍生物如脱水糖等是重要的生物质燃烧示踪物,是PM_{2.5}中判断焚烧影响的重要类别^[12]。脂肪族含氧化合物如内酯、呋喃酮、醛酮酸醇等,可能来自烹饪源、植物源脂肪酸裂解、或与二次有机气溶胶形成有关,是判断颗粒物氧化程度和老化过程的重要依据。长链烃与脂类如油酸、硬脂酸、长链烷烃、长链醇等常来源于植物表皮蜡质、土壤有机质、餐饮油烟等,是一次排放颗粒相的重要组成^[12,13]。芳香烃如蒎、萜、蒎烯等是典型的燃烧源标志物,多与机动车尾气、燃煤、工业燃

烧等有关,是识别化石燃料燃烧和高温热解过程的重要类别。芳香含氧化合物如苯酚类、芳香酮类、香兰素类等,与生物质燃烧密切相关,也常是芳香烃二次氧化产物^[14]。含氮有机物如吡啶类、吡咯类、烟碱类等,可来源于烟草烟雾、机动车排放、生物质燃烧等,是判断生活源、燃烧源及有机氮气溶胶的重要辅助证据。萜类及其氧化物如单萜、倍半萜、二萜及其衍生物等是主要来源于植物排放、生物质燃烧,是植物源二次有机气溶胶的重要组成^[15]。

结果显示,在用于分析的275种有机化合物中,脂肪族含氧化合物(62种)、长链烃与脂类(54种)、芳香含氧化合物(47种)和萜类及其氧化产物(47种)占比较高,说明样品的有机组成受一次排放源、生物源输入及大气氧化老化过程等因素的影响作用较明显。

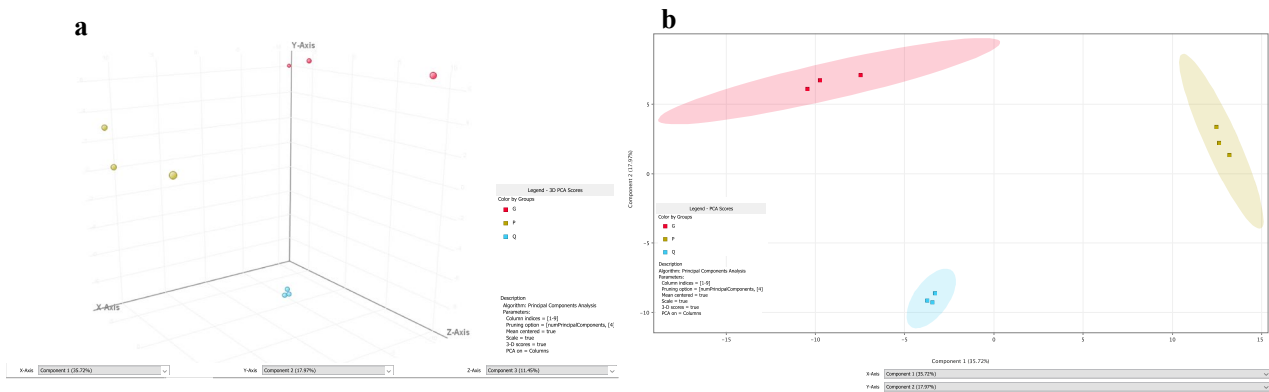
2.3 有机组分的多元统计及组间差异特征

2.3.1 基于PCA模型的样本空间分布特征

使用PCA分析考察3组PM_{2.5}样品中有机组分的整体空间分布特征,实现可视化聚类区分。图3a(3D PCA)和图3b(2D PCA)展示了3组采样点样品的主成分分析结果。

图3a(3D PCA)显示3个主成分(PC1、PC2和PC3)分别解释了样品方差的35.72%、17.97%和11.45%,累计解释率达65%,对于成分复杂、影响因素多的环境大气样品而言,这是一个较理想的解释率,说明提取的前三维能较好反映原始数据的主要信息,样本分布特征可通过该空间有效表征。

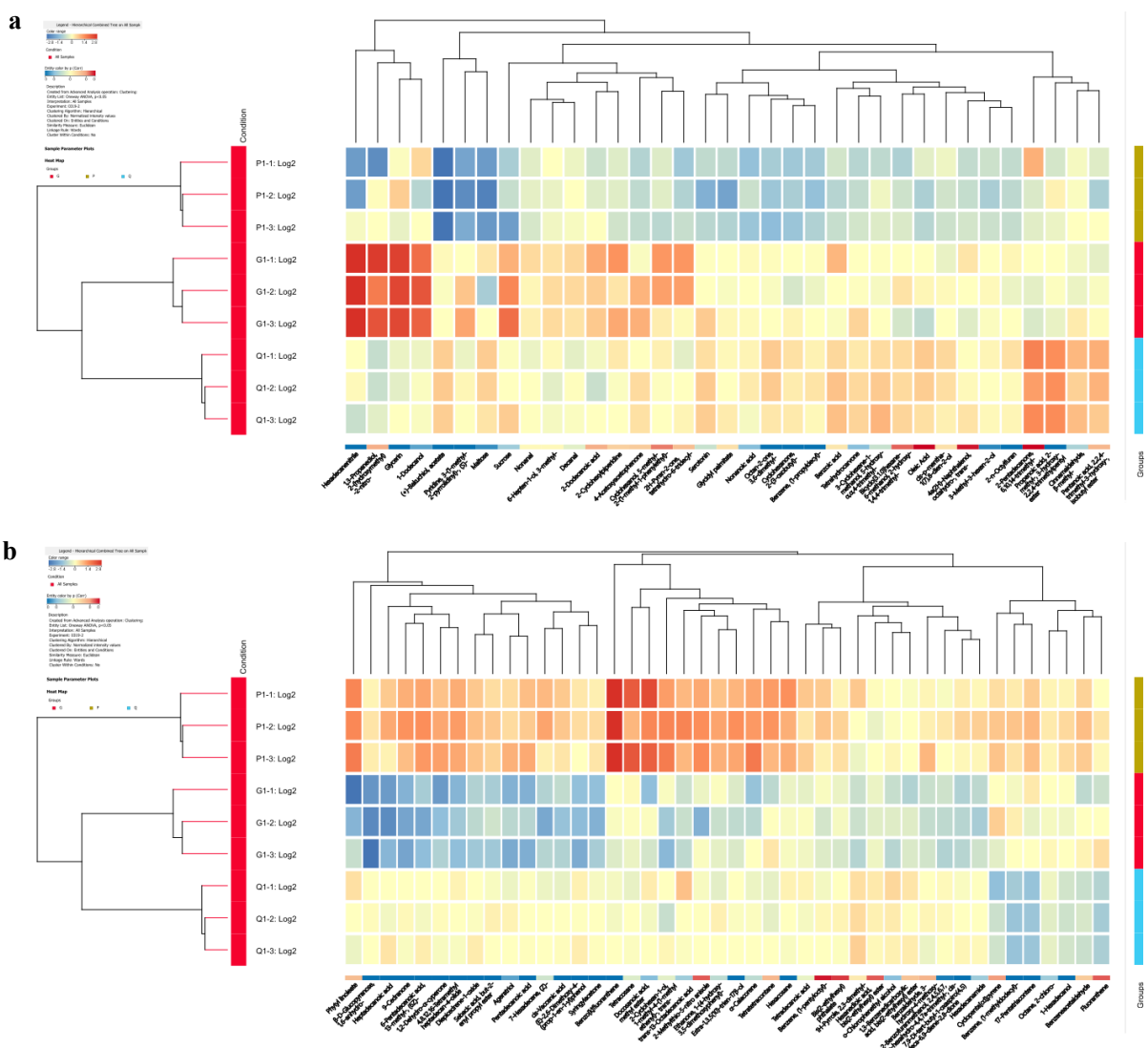
从图3b(2D PCA)的95%置信椭圆可以看出,3组采样样本在空间上形成相对独立、无重叠的聚类;G、P、Q各组分布于得分图不同象限,组间区分明晰。这在一定程度上显示出3组采样点PM_{2.5}有机组分构成存在各自的组成特点,也展示出本实验采用的检测分析方式能较好地识别复杂有机成分中潜在的组分差异。



a. 样品的3D PCA分析结果; b. 样品的2D PCA分析结果

图3 3组样品有机组分的PCA分析结果

Fig.3 PCA analysis results of organic components in three groups of sample



a. 差异化合物分层聚类热图（第一部分）； b. 差异化合物分层聚类热图（第二部分）

图4 3组样品中差异化合物的聚类分析结果图

Fig.4 Hierarchical Clustering Heatmap of Differential Compounds in three groups of samples

2.3.2 3组PM_{2.5}样品有机组分聚类特征

结合PCA分析及统计检验结果选择具有显著差异($p < 0.05$)的化合物进行聚类分析,结果如图4所示。可以看出,不同有机化合物在3组PM_{2.5}样品中的相对丰度存在一定差异,呈现出不同的相对富集特征。

例如,在G组样品中,表现出相对富集的化合物主要为脂肪族含氧化合物和糖类。其中,以甘油、癸醛、2-十二碳烯酸为代表的脂肪族含氧化合物呈现高富集,它们源于动植物油脂在高温下的热解,是餐饮油烟的典型成分,体现了该区域受明显的局部餐饮排放影响^[13]。1-十二醇则与洗涤剂、个人护理等挥发性化学产品消耗相关,反映了高人口密度特征;蔗糖的富集符合成熟绿化社区的生物气溶胶(如花粉、植物碎屑)扬尘特征。另外,工业杀菌剂2-(羟甲基)-2-硝基-1,3-丙二醇的富集,可能来自大型商业体中央空调冷却系统处理水的气溶胶排放^[16]。这与该采样点位于新兴城区,周边分布密集商业中心和居住区,城市生活和商业排放交织的地理特点较为一致。

Q组样品的特征则表现出不同的来源倾向,出现了涂料成膜助剂(3-羟基-2,2,4-三甲基戊基-2-甲基丙酸酯及其类似物2,2,4-三甲基-3-羟基戊酸异丁酯)和合成香料芳香含氧化合物(α -甲基肉桂醛)富集的现象,表明其更可能受到城市建筑涂料喷涂^[17]和日化香精等挥发性化学产品使用^[18]的影响。因为Q组位于核心商业区且周边建筑密度高,这一特征可能显示了周边建筑施工和密集人流活动产生的排放贡献。

相比之下,P组样品中芳香含氧化合物、长链烃与脂类、萜类及其氧化物、芳香烃和含氮有机物等组分相对富集,如生物质燃烧标志物(1-(4-羟基-3,5-二甲氧基苯基)乙酮)、植物表面蜡质扬尘(二十四烷、二十六烷)、植被散发萜烯类物质及其氧化物(α -卡拉烯、反式-1-甲基-4-(1-甲基乙烯基)-2-环己烯-1-醇)、化工产业的常见排放化合物((1-甲基十二烷基)苯、二十二烷酸甲酯、反式-13-十八碳烯酸、2-甲硫基-5-硝基苯甲醚)。考虑到P组采样点位于城乡接合部,周边为农田和工业区混合布局,因此其PM_{2.5}有机组分受生物质燃烧、植被散发和工业排放等的综合影响^[19]更为明显。

3 结论

本工作建立了一种基于进样口热脱附与全二维气相色谱-飞行时间质谱联用的分析方法,实现了对PM_{2.5}采样膜中复杂有机组分的直接、快速定性分析。利用优化后的方法对3处采样点的PM_{2.5}样品进行检测,识别出的275种有机化合物主要以脂肪族氧化产物、长链烃与脂类、含氮化合物、芳香含氧化合物和萜类及其氧化产物为主,表明采样点的大气颗粒物受一次排放、生物源输入及二次氧化老化过程的综合影响。主成分分析(PCA)在空间上实现了3组样本的清晰聚类与区分,证实该分析方法能有效获取复杂有机成分的数据特征。进一步的聚类分析揭示了3处样品在各类别化合物上不同的富集特征,这些特征与各采样点功能区的实际污染源较为契合,有效验证了该方法对复杂环境样品差异组分的分辨潜力。

综上所述,本研究所建立的PM_{2.5}中挥发性和半挥发性有机组分快速分析技术避免了繁琐的样品前处理过程,能有效地识别不同来源样品中复杂有机成分的组成差异,可作为大气细颗粒物中微量有机分子筛查的高效分析手段。需要指出的是,受限于实验中环境样品的采集数量与观测周期,加之环境大气PM_{2.5}的化学体系组成复杂,存在时空异质性,因此本研究尚未对不同功能区的特异性特征污染物进行深度的统计学挖掘与最终确证。以此为基础,基于更大样本量、覆盖更长观测周期的后续研究在持续推进中。

参考文献:

- [1] Cai S Y, Ma Q, Wang S X, Zhao B, Brauer M, Cohen A, Martin R V, Zhang Q Q, Li Q B, Wang Y X, Hao J M, Frostad J, Forouzanfar M H, Burnett R T. *J. Environ. Manag.*, 2018, **227**: 124-133.
- [2] Kanakidou M, Seinfeld J H, Pandis S N, Barnes I, Dentener F J, Facchini M C, Van D R, Ervens B, Nenes A, Nielsen C J, Swietlicki E, Putaud J P, Balkanski Y, Fuzzi S, Horth J, Moortgat G K, Winterhalter R, Myhre C E L, Tsigaridis K, Vignati E, Stephanou E G, Wilson J. *Atmos. Chem. Phys.*, 2005, **5**(4): 1053-1123.
- [3] Wang T, Huang R J, Jing M, Che J S, Xing J T, Yang L, Yuan W, Wang Y, Guo J, Zhong H B, Huang D D, Huang C, Xu W. *Environ. Sci. Technol.*, 2024, **58**(41): 18264-18272.
- [4] Deng Y W, Yang Q L, Gao L R, Liu Y, Xu M, Zhao B, Zheng M H. *J. Instrumental Anal.*, 2025, **44**(8): 1651-1658.

- 邓钰雯, 杨倩玲, 高丽荣, 刘寅, 徐明, 赵斌, 郑明辉. 分析测试学报, 2025, **44(8)**: 1651-1658.
- [5] Su G N, Wang Q, Zhu H Y, Deng J, Lu L, Zhu P, Zhong X H, Liang S T, Luo Z B, Long C Y, Yu S B. *J. Environ. Hyg.*, 2024, **14(12)**: 1012-1019.
- 苏广宁, 王秦, 朱海燕, 邓靖, 鲁琳, 朱盼, 钟秀华, 梁少婷, 罗志彬, 龙朝阳, 余胜兵. 环境卫生学杂志, 2024, **14(12)**: 1012-1019.
- [6] Alam M S, Mcgregor L A, Harrison R M. *Trac Trends Anal. Chem.*, 2024, **175**: 117718.
- [7] Ma J Y, Han Y F, Ge J F, Wen L, Ma C, Qi Y L, Volmer D A. *Rapid Commun. Mass Spectrom.*, 2025, **39(13)**: e10034.
- [8] Wang R, Li Y J, Wang J H, Ma C W, Jiang J K. *J. Chromatogr. A*, 2026, **44(4)**: 453-466.
- 汪睿, 李英杰, 王佳华, 马长文, 蒋家奎. 色谱, 2026, **44(4)**: 453-466.
- [9] Zhang Y, Wang C, Xin Y, Xu J Z, Wang M. *Chin. J. Anal. Chem.*, 2023, **51(10)**: 1641-1650.
- 张宇, 王椿, 辛悦, 徐建中, 王美. 分析化学, 2023, **51(10)**: 1641-1650.
- [10] Xu H R, Bai H W, Han K, Liu D P, Shi J, Yang X Q, Guo J, Xia Y. *Phys. Test. Chem. Anal. B*, 2026, <https://link.cnki.net/urlid/31.1337.tb.20260120.1627.002>.
- 许红睿, 拜慧雯, 韩可, 刘登平, 施静, 杨星琦, 郭洁丽, 夏瑜. 理化检验 - 化学分册, 2026, <https://link.cnki.net/urlid/31.1337.tb.20260120.1627.002>.
- [11] Li Y J. *Chin. J. Chromatogr.*, 2025, **43(12)**: 1397-1403.
- [12] Simoneit B R T. *Appl. Geochem.*, 2002, **17(3)**: 129-162.
- [13] Huang X F, Chen D L, Lan Z J, Feng N, He L Y, Yu G H, Luan S J. *Atmos. Res.*, 2012, **114/115**: 28-37.
- [14] Al-naïema I M, Offenbergl J H, Madler C J, Lewandowski M, Kettler J, Fang T, Stone E A. *Atmos. Environ.*, 2020, **223**: 117227.
- [15] Tan S K, Huang X J, Dai Y, Cai Y T, Li J Y, Zhang C L, Wang B G. *Acta Sci. Circumstantiae*, 2024, **44(1)**: 135-145.
- 谭劭康, 黄晓俊, 戴燕, 蔡艺婷, 李将永, 张春林, 王伯光. 环境科学学报, 2024, **44(1)**: 135-145.
- [16] Gu X B, Xie X B. *Gongye Shajinji Yingyong Jishu*. Beijing: Chemical Industry Press, 2021.
- 顾学斌, 谢小保. 工业杀菌剂应用技术. 北京: 化学工业出版社, 2021.
- [17] Liang X M, Sun X B, Su Y H, Huang L H, Chen F, Ren L, Lu Q, Lai J Y, Chen P L, Chen L G. *Environ. Sci.*, 2020, **41(12)**: 5345-5351.
- 梁小明, 孙西勃, 苏燕花, 黄礼海, 陈锋, 任璐, 卢清, 赖君怡, 陈朋龙, 陈来国. 环境科学, 2020, **41(12)**: 5345-5351.
- [18] She Y L. Simulation Study on the Impact of Volatile Organic Compound Emissions from Daily Chemical Products on Air Quality in the Yangtze River Delta region. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2024.
- 余泳良. 长三角地区日化用品挥发性有机物排放对空气质量影响的模拟研究. 南京: 南京信息工程大学, 2024.
- [19] Shen J, Cao F, Wu C L, Zhang Y X, Jia X F, Zhang Y L, Mei Y T, Jiang J L. *Geochimica*, 2026, **55(3)**: 562-576.
- 沈杰, 曹芳, 吴长流, 张煜娴, 贾小芳, 章炎麟, 梅雨婷, 江俊林. 地球化学, 2026, **55(3)**: 562-576.