



DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20240133

网络首发日期: 2025-05-06; 网络首发地址: <http://link.cnki.net/urlid/12.1355.n.20250506.1339.002>

天津工业区 PM_{2.5} 中 SVOCs 的污染特征及溯源分析

赵伊琳¹, 刘永全¹, 刘欢², 刘金玉³, 降升平³

(1. 天津科技大学理学院, 天津 300457; 2. 中国石化销售股份有限公司广东韶关石油分公司, 韶关 512000;
3. 天津科技大学现代分析技术研究中心, 天津 300457)

摘要: 2021年7月至2022年6月在天津科技大学逸夫楼北侧收集细颗粒物(PM_{2.5})样品,采用热脱附-气相色谱质谱法分析其中的半挥发性有机物(SVOCs),研究其污染特征,使用多环芳烃(PAHs)比值法溯源,并对SVOCs工业来源进行分析。结果表明:观测期间SVOCs平均质量浓度为(71.40±60.44)ng/m³,2022年1月达到峰值。主要污染物包括含氮化合物、多环芳烃(PAHs)及其衍生物和邻苯二甲酸酯(PAEs)。不同物质出现浓度峰值的时间不同。含氮化合物在2022年1月污染最严重,PAHs及其衍生物在2022年5月污染最严重,而PAEs的质量浓度在2021年10月达到高峰。燃烧、机动车尾气和化石燃料的挥发均会增加PAHs的浓度。工业来源分析发现PAHs及其衍生物与石油和天然气产量呈正相关。酚类化合物浓度与汽油、乙烯、化学纤维及电子元件产量呈正相关。卤代烃浓度与乙烯产量显著相关。应加强相关产业的排放管控。

关键词: 细颗粒物(PM_{2.5}); 半挥发性有机物(SVOCs); 污染特征; PAHs比值分析; 工业源分析

中图分类号: X513 文献标志码: A 文章编号: 1672-6510(2026)01-0044-07

Pollution Characteristics and Source Apportionment of SVOCs in PM_{2.5} from Tianjin Industrial Area

ZHAO Yilin¹, LIU Yongquan¹, LIU Huan², LIU Jinyu³, JIANG Shengping³

(1. College of Science, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China;

2. Sinopec Sales Corporation Guangdong Shaoguan Petroleum Branch, Shaoguan 512000, China;

3. Research Center of Modern Analysis Technology, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China)

Abstract: Samples of fine particulate matter (PM_{2.5}) were collected from July 2021 to June 2022 on the north side of the Tianjin University of Science and Technology's Yifu Building. The analysis of semi-volatile organic compounds (SVOCs) in these samples was conducted using the thermal desorption-gas chromatography-mass spectrometry method to investigate the pollution characteristics of these compounds. Source tracing was performed using the polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) ratio method, and the industrial sources of SVOCs were analyzed. The results of the study showed during the observation period, the average mass concentration of SVOCs was (71.40 ± 60.44) ng/m³, with a peak value observed in January 2022. The primary pollutants included nitrogen-containing compounds, PAHs and their derivatives, and phthalate esters (PAEs). The temporal occurrence of peak concentrations exhibited variability among different substances. Nitrogen-containing compounds exhibited the most severe pollution in January 2022, PAHs and their derivatives peaked in May 2022, while the mass concentration of PAEs reached its maximum in October 2021. Combustion, motor vehicle exhaust, and the volatilization of fossil fuels were found to contribute to increased PAHs concentration. Industrial source analysis revealed a positive correlation between PAHs and their derivatives and oil and natural gas production. The concentration of phenolic compounds was positively correlated with the production of gasoline, ethylene, chemical fibers, and electronic components. The concentration of halogenated hydrocarbons was significantly correlated with ethylene production. These findings suggest

收稿日期: 2024-06-25; 修回日期: 2025-03-07

基金项目: 天津市自然科学基金资助项目(18JCYBJC91200)

作者简介: 赵伊琳(1999—),女,河北石家庄人,硕士研究生;通信作者: 降升平,高级实验师,jiangshengping@tust.edu.cn

that emission control in related industries needs to be enhanced.

Key words: fine particulate matter (PM_{2.5}); semi-volatile organic compounds (SVOCs); pollution characteristics; PAHs ratio analysis; industrial source analysis

引文格式:

赵伊琳,刘永全,刘欢,等. 天津工业区 PM_{2.5} 中 SVOCs 的污染特征及溯源分析[J]. 天津科技大学学报, 2026, 41 (1): 44-50.

ZHAO Y L, LIU Y Q, LIU H, et al. Pollution characteristics and source apportionment of SVOCs in PM_{2.5} from Tianjin industrial area[J]. Journal of Tianjin university of science and technology, 2026, 41 (1): 44-50.

细颗粒物 (PM_{2.5}) 是空气动力学直径小于等于 2.5 μm 的粒子的统称^[1], 有机物是其重要组成部分, 约占其质量的 20% ~ 60%^[2], 其中的半挥发性有机物 (SVOCs) 会随着 PM_{2.5} 一同进入人体, 进而对人体造成负面影响^[3]. 因此, 对 PM_{2.5} 中 SVOCs 的污染特征及来源进行分析具有重要意义。

PM_{2.5} 中 SVOCs 的研究主要集中在多环芳烃 (PAHs)^[4-5] 和邻苯二甲酸酯 (PAEs)^[6], 且研究点多位于城市中心^[7] 及背景点^[8]. 大气中的 SVOCs 浓度水平在不同地区、不同季节存在显著差异, 其主要来源有燃烧源、机动车尾气以及工业排放等, 且不同的工业分布会影响 SVOCs 的组成和浓度。本研究的采样点位于天津经济技术开发区, 该区域内分布有制药、化工、食品、汽车等多个产业, 且紧邻港口, 货物运输业发达。目前该区域的 SVOCs 研究工作比较欠缺, 且多类型的工业布局及交通对 PM_{2.5} 中 SVOCs 的影响尚不明确, 因此开展相关监测和研究工作具有实际应用价值。

本研究结合该地区的工业特点, 在 PAHs 和 PAEs 基础之上, 增加了含氮化合物、卤代烃、酚类、酮类化合物, 对 58 种 SVOCs 进行监测, 以期获得更多的污染物信息, 用 PAHs 比值法进行溯源, 并对各个典型行业的工业品产量与 SVOCs 进行相关性分析, 为该地区制定有针对性的污染防控措施提供依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

采样点位于天津科技大学滨海校区逸夫楼北侧 (117.71°E, 39.08°N), 采样点周边工业类型多样化, 具有明显的工业特征。自 2021 年 7 月至 2022 年 6 月使用 KB-6120 型综合大气采样器进行采样, 采样流量设定为 100 L/min, 从 15:00 开始持续采集 20 h。采样遵循 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》。样品按季节划分:

2021 年 7、8 月及 2022 年 6 月为夏季, 2021 年 9 月至 11 月为秋季, 2021 年 12 月至 2022 年 1 月为冬季, 2022 年 3 月至 5 月为春季。采样结束后, 将承载样品的玻璃纤维滤膜裁下四分之一装填至空的吸附管 (PerkinElmer) 中, 吸附管两端填入玻璃棉后, 上机测试。

1.2 样品分析

PM_{2.5} 中的 58 种 SVOCs 采用热脱附-气相色谱-质谱 (TD-GC-MS) 法进行测定, 使用内标法定量。58 种 SVOCs 中包括 18 种 PAHs 及其衍生物、9 种酚类化合物、11 种含氮化合物、6 种 PAEs、13 种卤代烃以及 1 种酮类物质。

1.2.1 实验仪器

TD-30 型热脱附仪、TQ8050 型气相色谱-质谱联用仪、SH-Rxi-5Sil MS 型色谱柱 (30 m × 0.25 mm × 0.25 μm), 日本岛津公司。

1.2.2 实验条件

热脱附仪条件: 管流量 60 mL/min, 阀门温度 250 °C, 传输线温度 250 °C, 冷阱捕集温度 -20 °C, 解析温度 280 °C, 解析时间 5 min。气相色谱升温程序: 初始 60 °C, 保持 5 min, 5 °C/min 升至 200 °C, 10 °C/min 升至 300 °C, 保持 15 min, 分流比 10:1。质谱扫描方式为选择离子监测 (SIM) 扫描, 传输线温度 250 °C, 离子源温度 230 °C。

1.3 质量保证与质量控制

热脱附空管使用超纯水超声清洗 3 次后放入烘箱中烘干, 确保空白实验目标物含量低于检出限。目标化合物的相对标准偏差 (RSD) 为 0.73% ~ 18.28%。每天考察方法的回收率, 确保回收率在 70% ~ 130% 之间, 如超出范围, 则重新建立标准曲线。

2 结果与分析

2.1 PM_{2.5} 中 SVOCs 浓度水平

观测期间 PM_{2.5} 和 SVOCs 的年度质量浓度分布

如图 1 所示。由图 1 可知,观测期间 PM_{2.5} 和 SVOCs 的质量浓度变化趋势一致。SVOCs 均值为 (71.40 ± 60.44) ng/m³, 中位数为 52.41 ng/m³。最高和最低的月份分别为 2022 年 1 月和 2021 年 8 月, 均值分别为 (181.35 ± 158.83) ng/m³、(18.23 ± 5.74) ng/m³, 中位数分别为 109.58 ng/m³、17.28 ng/m³。2022 年 1 月该地区天气寒冷, 处于采暖期, 大气边界层趋于稳定, 这有利于 SVOCs 的积累, 使其维持在高浓度水平。此外, 受强风、降雪等气象因素的影响, 该月份 SVOCs 的质量浓度波动幅度大, 波动范围为 40.89 ng/m³ ~ 445.89 ng/m³, 最大值已经超过最小值的 10 倍。而 2021 年 8 月, SVOCs 浓度的降低与同期 PM_{2.5} 浓度降低有关。

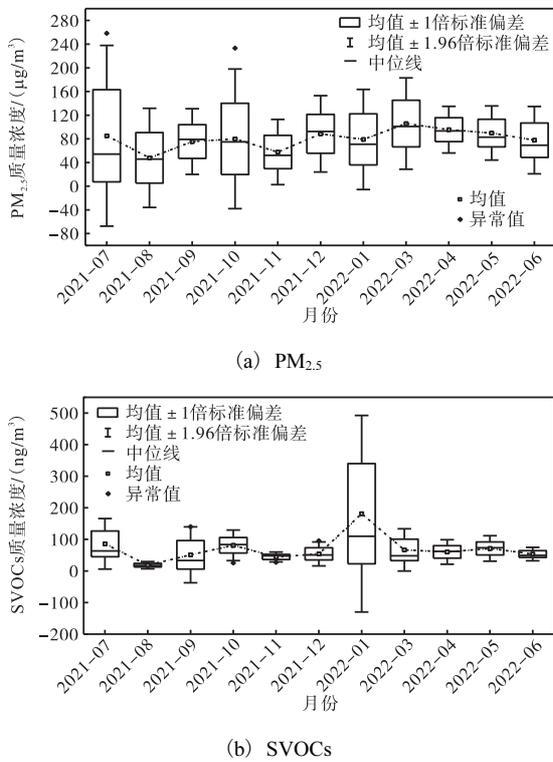


图 1 PM_{2.5}和 SVOCs 的年度质量浓度分布

Fig. 1 Annual mass concentration distribution of PM_{2.5} and SVOCs

2.2 各类污染物分布

4 个季节中 SVOCs 中污染物的占比如图 2 所示。不同季节中 SVOCs 组分表现出明显的季节差异, 总体而言, 含氮化合物、PAEs 以及 PAHs 及其衍生物是主要组成部分, 且在春、夏、秋、冬 4 个季节中占比之和均在 90% 以上, 分别为 99.60%、95.16%、90.59% 和 98.31%。卤代烃、酮类化合物、酚类化合物占比较低, 属于次要组成部分, 在春、夏、秋、冬 4 个季节中占比之和分别为 0.40%、4.84%、9.41%、

1.69%。污染物的季节性差异表明, SVOCs 浓度受到多种因素影响, 包括气象条件以及工业活动等。

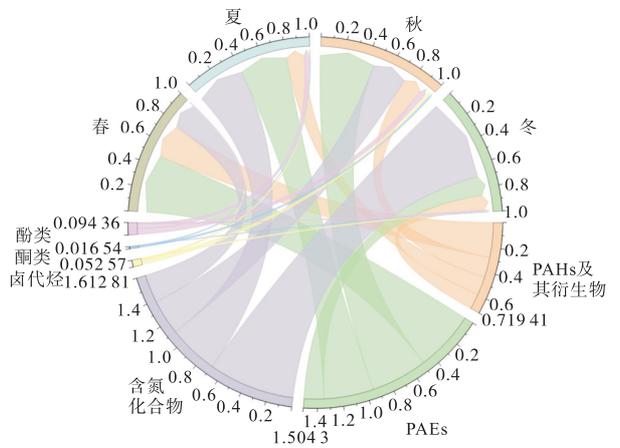


图 2 4 个季节中 SVOCs 中污染物的占比

Fig. 2 Proportions of pollutants in SVOCs in four seasons

2.2.1 含氮化合物的污染特征

含氮化合物的年度质量浓度分布如图 3 所示。含氮化合物是 SVOCs 的主要组成之一。观测期间, 含氮化合物的月度变化趋势与 SVOCs 变化基本一致。2022 年 1 月, 含氮化合物质量浓度达到峰值, 中位数为 97.75 ng/m³, 均值为 (155.57 ± 155.30) ng/m³, 在 SVOCs 中占比达到 85.79%。2021 年 8 月含氮化合物质量浓度最低, 中位数为 4.89 ng/m³, 均值为 (5.44 ± 2.54) ng/m³, 在 SVOCs 中占比达 29.85%。

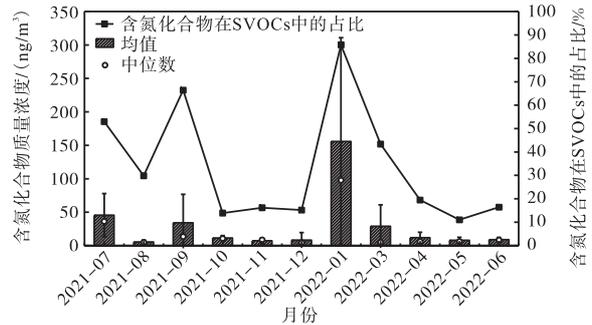


图 3 含氮化合物的年度质量浓度分布

Fig. 3 Annual mass concentration distribution of nitrogenous compounds

N-亚硝基二甲胺 (NDMA) 是含氮化合物的主要组成部分, 其年度质量浓度分布如图 4 所示。和含氮化合物一样, 2022 年 1 月是 NDMA 质量浓度最高的月份, 质量浓度中位数为 96.79 ng/m³, 均值为 (154.58 ± 154.79) ng/m³, 在含氮化合物中的占比为 99.36%。NDMA 属于 N-亚硝胺类化合物, 具有基因毒性和高致癌风险^[9]。NDMA 的来源主要有两种: 一种是直接

排放, 比如皮革和橡胶工厂的排放^[10]、烹饪过程^[11]等; 另一种是大气中烷基胺和亚硝化剂反应生成^[12], 该过程受温度、湿度、光照等气象因素的影响。2022 年 1 月天气寒冷, 气候条件不利于污染物扩散, 使得 NDMA 在大气中积累。同时与 2021 年 7 月相比, 2021 年 8 月的 NDMA 出现了显著下降, 中位数从 35.14 ng/m³ 降至 3.84 ng/m³, 均值从 (42.38 ± 31.64) ng/m³ 降至 (4.36 ± 2.42) ng/m³, 这与同期 PM_{2.5} 质量浓度的降低有关 [图 1(a)]。

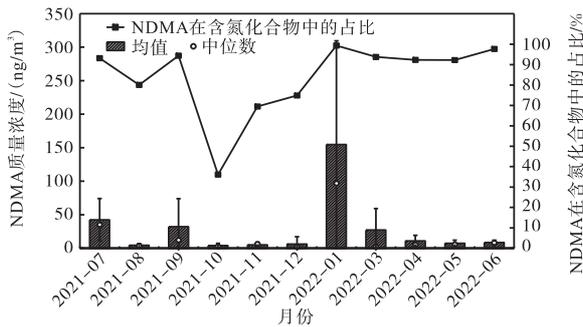


图 4 NDMA 的年度质量浓度分布

Fig. 4 Annual mass concentration distribution of NDMA

2.2.2 PAEs 的污染特征

PAEs 的年度质量浓度分布如图 5 所示。与 SVOCs 质量浓度变化趋势相比, PAEs 的月均值显示出较小的波动, 这与其来源广泛有关。即使某些来源的质量浓度发生变化, 其他来源的 PAEs 仍能保持相对稳定的释放, 从而使整体质量浓度波动不大。PAEs 质量浓度中位数为 26.82 ng/m³, 均值为 (26.90 ± 13.86) ng/m³。2021 年 10 月和 2022 年 1 月是 PAEs 质量浓度最高和最低的月份, 中位数分别为 45.09 ng/m³、8.75 ng/m³, 均值分别为 (41.70 ± 17.01) ng/m³、(9.62 ± 3.01) ng/m³, 在 SVOCs 中的占比分别为 51.30%、5.31%。

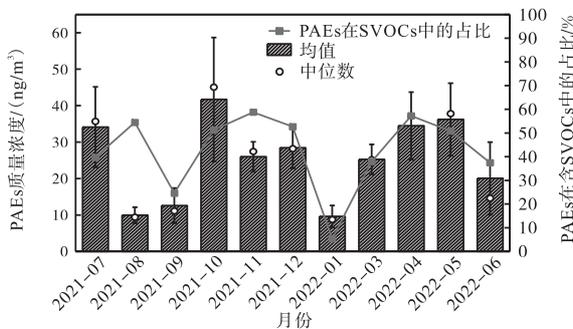


图 5 PAEs 的年度质量浓度分布

Fig. 5 Annual mass concentration distribution of PAEs

邻苯二甲酸二丁酯 (DBP) 和邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯 (DEHP) 是 PAEs 中的主要化合物, 邻苯二

甲酸二甲酯 (DMP)、邻苯二甲酸二乙酯 (DEP)、邻苯二甲酸丁苄酯 (BBP) 和邻苯二甲酸二正辛酯 (DNOP) 的分布较少 (图 6)。这一现象与文献 [13] 的研究结果一致。DBP 和 DEHP 广泛存在于各种塑料制品中, 它们容易逃逸至大气中并被细颗粒物吸附, 致使其在大气中有较高的浓度^[14]。在 PAEs 污染最严重的 2021 年 10 月, 6 种 PAEs 的质量浓度与上月相比均呈现增加趋势。

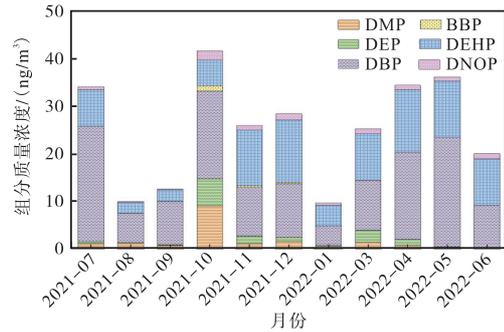
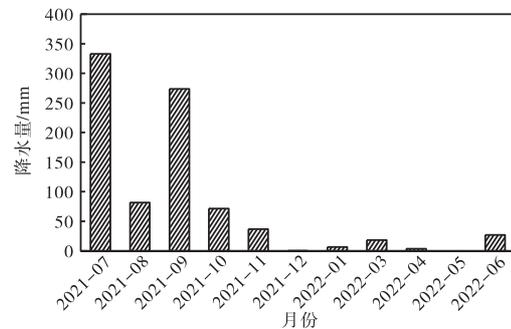


图 6 PAEs 的年度质量浓度分布

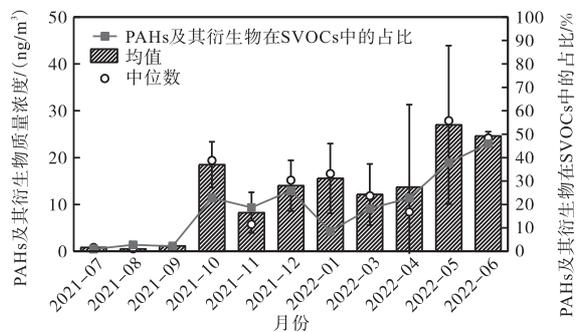
Fig. 6 Annual mass concentration distribution of PAEs

2.2.3 PAHs 及其衍生物的污染特征

降水量和 PAHs 及其衍生物质量浓度的年度分布如图 7 所示。



(a) 降水量



(b) PAHs 及其衍生物质量浓度

图 7 降水量和 PAHs 及其衍生物质量浓度的年度分布
Fig. 7 Annual distribution of precipitation and mass concentration of PAHs and their derivatives

观测期间, PAHs 及其衍生物的质量浓度均值为 $(12.89 \pm 11.92) \text{ ng/m}^3$, 明显高于背景点均值 $(0.97 \text{ ng/m}^3)^{[15]}$, 说明该地区明显受到了污染源的影响。工业源, 特别是焦化和石化工业, 是环境中 PAHs 的重要排放源之一^[16]。观测期间, PAHs 及其衍生物质量浓度呈现明显差异, 与降水量(数据源自 <https://www.qweather.com>) 呈现相反的变化趋势。降水量高时, PAHs 及其衍生物的质量浓度低, 说明降水可对其进行有效清除。

观测期间, PAHs 及其衍生物中浓度较高的物质分别是苯并[b]荧蒽、苯并[a]芘、苯并[k]荧蒽, 质量浓度中位数分别为 0.32 ng/m^3 、 0.52 ng/m^3 、 0.48 ng/m^3 , 均值分别为 $(4.99 \pm 8.68) \text{ ng/m}^3$ 、 $(1.51 \pm 3.16) \text{ ng/m}^3$ 、 $(1.28 \pm 2.08) \text{ ng/m}^3$ (图 8)。苯并[a]芘是一种具有代表性的 PAHs, 被列为 1 级致癌物。苯并[a]芘污染最严重的月份为 2022 年 1 月, 质量浓度中位数为 7.17 ng/m^3 , 均值为 $(6.66 \pm 6.91) \text{ ng/m}^3$ (图 9)。

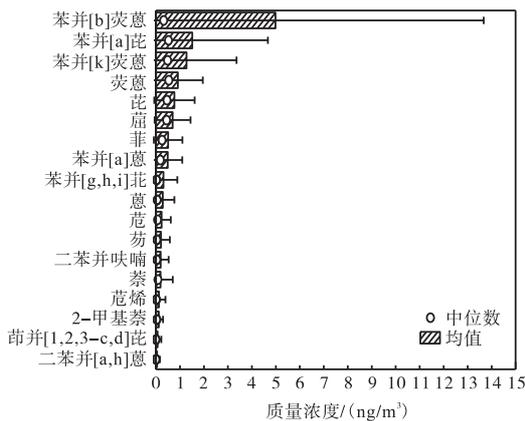


图 8 SVOCs 中 PAHs 及其衍生物组成

Fig. 8 Composition of PAHs and their derivatives in SVOCs

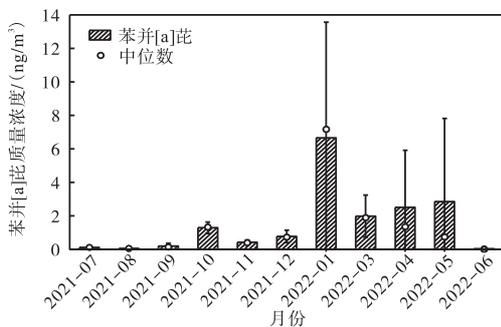


图 9 苯并[a]芘的年度质量浓度分布

Fig. 9 Annual mass concentration distribution of benzo[a]pyrene

2.2.4 次要组成的污染特征

次要组成包括酚类、卤代烃以及酮类化合物, 它们的主要来源是工业废气、废水、溶剂等^[17-19]。观测

期间, 酚类、卤代烃以及酮类化合物质量浓度中位数分别为 1.04 ng/m^3 、 0.67 ng/m^3 、 0.06 ng/m^3 , 均值依次为 $(1.69 \pm 2.29) \text{ ng/m}^3$ 、 $(1.02 \pm 1.31) \text{ ng/m}^3$ 、 $(0.33 \pm 0.62) \text{ ng/m}^3$ (图 10)。次要组成污染最严重的月份出现在 2021 年 10 月, 质量浓度中位数为 10.72 ng/m^3 , 均值为 $(9.79 \pm 2.64) \text{ ng/m}^3$ (图 11)。

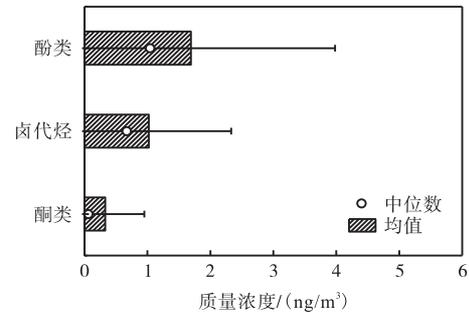


图 10 SVOCs 的次要组成部分的组成

Fig. 10 Composition of minor components of SVOCs

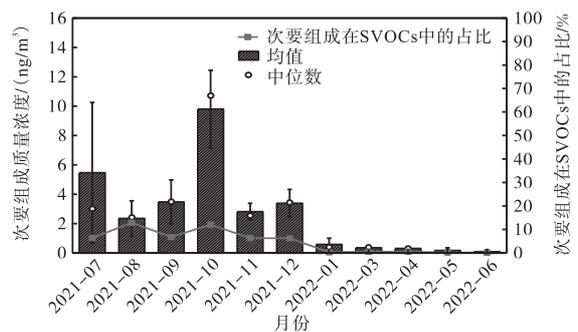


图 11 次要组成部分的年度质量浓度分布

Fig. 11 Annual mass concentration distribution of subsidiary components

2.3 有机污染物溯源分析

2.3.1 PAHs 比值法

PAHs 比值法是一种经典的溯源方法。同分异构体具有相似的理化性质和环境分配行为, 因此同一起来源的同分异构体在环境中也有同样的比值。PAHs 的特征质量浓度比值, 包括蒽/(蒽+菲) $[\text{Ant}/(\text{Ant}+\text{Phe})]$ 、芴/(芴+芘) $[\text{Flu}/(\text{Flu}+\text{Pyr})]$ 、苯并[a]蒽/(苯并[a]蒽+蒾) $[\text{BaA}/(\text{BaA}+\text{Chr})]$ 、茚并[1, 2, 3-c, d]芘/(茚并[1, 2, 3-c, d]芘+苯并[g, h, i]芘) $[\text{IcdP}/(\text{IcdP}+\text{BghiP})]$, 可用于识别污染源类型^[20-22]。天津工业区 $\text{PM}_{2.5}$ 中 PAHs 特征比值见表 1。在春、夏、秋、冬 4 个季节中 $\text{Ant}/(\text{Ant}+\text{Phe})$ 比值均大于 0.1, 依据参考值判定 PAHs 来源于燃烧源。 $\text{Flu}/(\text{Flu}+\text{Pyr})$ 在 4 个季节的比值均小于 0.5, 表明 PAHs 还有汽油源的贡献。 $\text{BaA}/(\text{BaA}+\text{Chr})$ 、 $\text{IcdP}/(\text{IcdP}+\text{BghiP})$ 比值指出春季和冬季 PAHs 来自

燃烧源和石油燃烧源,夏季来自机动车排放和石油燃烧源,秋季来自机动车排放和石油挥发源。不同季节污染来源不同,因此可针对季节差异制定更精细化的治理方案,可以通过在不同的季节对不同的污染源采取相应措施改善大气环境。

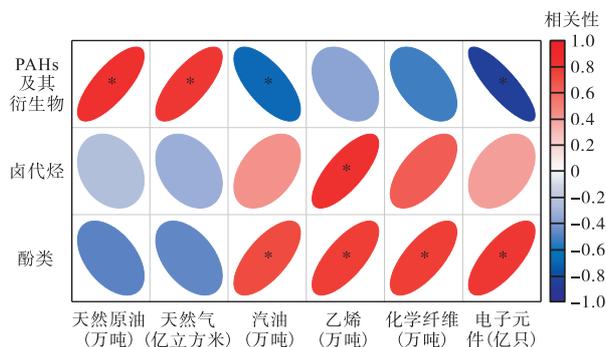
表1 天津工业区PM_{2.5}中PAHs特征比值

Tab. 1 Characteristic ratios of PAHs in PM_{2.5} in Tianjin industrial area

项目	数值				参考值	来源
	春	夏	秋	冬		
Ant/(Ant+Phe)					<0.1	石油挥发源
	0.21	0.22	0.34	0.23	>0.1	石油挥发/燃烧转变点 燃烧源
Flu/(Flu+Pyr)					>0.5	柴油源
	0.06	0.04	0.23	0.06	<0.5	汽油源
BaA/(BaA+Chr)	0.34		0.34	0.2~0.35	<0.2	石油挥发源 燃烧源
		0.39	0.37	>0.35		机动车排放
IcdP/(IcdP+BghiP)			0.14	<0.2		石油挥发源
	0.44	0.33	0.25	0.2~0.5		石油燃烧源 煤和生物质 燃烧混合源
				>0.5		

2.3.2 SVOCs的工业来源分析

不同的工业生产排放的SVOCs具有差异性,并且工业产品的产量影响SVOCs的质量浓度,这为污染防治提供了重要的数据支持。为了更进一步精细化分析SVOCs的来源,采用皮尔逊相关系数分析天津市各类工业产品产量的月度数据(<https://stats.tj.gov.cn/>)与每类有机污染物月平均质量浓度,结果如图12所示。



注:*表示 $P \leq 0.05$ 。

图12 天津各类工业产量与SVOCs质量浓度的相关性

Fig. 12 Correlation between industrial output and SVOCs in Tianjin

由图12可知,PAHs及其衍生物与天然原油的产量具有显著正相关关系,相关系数 R 为0.76, $P \leq 0.05$,与比值法分析PAHs及其衍生物来源为石油结

果相符。PAHs及其衍生物还与天然气产量存在显著正相关, R 为0.74,由此初步判断PAHs及其衍生物与石化产业有紧密关联,加强该产业的排放管控将有助于PAHs及其衍生物含量的降低。酚类化合物与汽油、乙烯、化学纤维及电子元件等多个工业产品产量呈显著正相关,说明了酚类物质在上述相关工业领域中应用广泛,导致其来源多样化。与酚类化合物相比,在工业中同样有广泛应用的卤代烃仅与乙烯呈现显著正相关。加强石化、电子、纤维等产业的排放管控将更有效地降低PM_{2.5}中酚类化合物和卤代烃的质量浓度。

3 结论

(1)2021年7月至2022年6月SVOCs质量浓度中位数为52.41 ng/m³,均值为(71.40 ± 60.44) ng/m³,质量浓度最高的月份为2022年1月。

(2)含氮化合物、PAHs及其衍生物和PAEs是SVOCs的主要组成。含氮化合物污染最严重的月份为2022年1月;PAHs在2022年5月污染最严重;PAEs的污染高峰出现在2021年10月。NDMA是含氮化合物的主要成分;DBP和DEHP为PAEs的关键成分;而PAHs及其衍生物以苯并[b]荧蒽、苯并[k]荧蒽、苯并[a]芘为主。

(3)PAHs比值法显示其主要来源为燃烧源。不同季节污染的来源不同,但与石油密切相关。

(4)工业来源分析表明,PAHs及其衍生物除了与天然原油产量呈正相关外,还与天然气产量呈正相关。酚类化合物质量浓度与汽油、乙烯、化学纤维及电子元件的产量呈正相关。卤代烃质量浓度与乙烯产量呈显著正相关。加强相关产业的排放管控,有利于改善大气环境。

参考文献:

- [1] 荆俊山,张仁健,陶俊.北京郊区夏季PM_{2.5}和黑碳气溶胶的观测资料分析[J].气象科学,2011,31(4):510-515.
- [2] 邢佳莉,曹芳,王谦,等.广西十万大山背景点PM_{2.5}中非极性有机气溶胶组成及来源解析[J].环境科学,2022,43(6):2895-2905.
- [3] 刘欢,刘永全,赵伊琳,等.天津工业区冬春季大气PM_{2.5}的组成特征及来源分析[J].环境污染与防治,2023,45(10):1422-1431.
- [4] 孙英,苏益娴,谢非,等.PM_{2.5}中多环芳烃的地球化学

- 特征及健康风险:以呼和浩特市、包头市、巴彦淖尔市为例[J]. 环境化学, 2024, 43(12): 4275-4291.
- [5] 张轲, 吴灿, 陆晔宇, 等. 华山山腰和山脚点大气 PM_{2.5} 中非极性有机化合物污染特征及来源[J]. 环境科学学报, 2024, 44(3): 299-309.
- [6] 朱振宇, 姬亚芹, 张诗建, 等. 1月天津市大气 PM_{2.5} 中邻苯二甲酸酯污染特征及暴露分析[J]. 环境化学, 2015, 34(7): 1371-1373.
- [7] 曾晓龙, 周杰, 胡雪郢, 等. 重庆市某中心城区空气细颗粒物中多环芳烃污染特征及其来源分析[J]. 预防医学论坛, 2023, 29(7): 524-528.
- [8] 吴长流, 曹芳, 贾小芳, 等. 长三角背景大气 PM_{2.5} 中非极性有机化合物组成特征及来源[J]. 环境科学, 2023, 44(2): 646-657.
- [9] 笄艳楠, 商少华, 陈宁, 等. 液液萃取/GC-MS法测定硫酸软骨素钠原料中的基因毒杂质 N-亚硝基二甲胺与 N-亚硝基二甲胺[J]. 药物分析杂志, 2024, 44(3): 462-467.
- [10] HUTCHINGS J W, ERVENS B, STRAUB D, et al. N-nitrosodimethylamine occurrence, formation and cycling in clouds and fogs[J]. Environmental science & technology, 2010, 44(21): 8128-8133.
- [11] KIM H, TCHA J, SHIM M, et al. Dry-heat cooking of meats as a source of airborne N-nitrosodimethylamine (NDMA) [J]. Atmosphere, 2019, 10(2): 91.
- [12] HANST P L, SPENCE J W, MILLER M. Atmospheric chemistry of N-nitroso dimethylamine[J]. Environmental science & technology, 1977, 11(4): 403-405.
- [13] LI X, AN Z J, SHEN Y C, et al. Dynamic variations of phthalate esters in PM_{2.5} during a pollution episode[J]. Science of the total environment, 2022, 810: 152269.
- [14] 林宇. 天津市大气中 PAEs 的污染特征, 气粒分配及健康风险评估研究[D]. 天津: 南开大学, 2022.
- [15] ZHANG N N, CAO J J, WANG Q Y, et al. Biomass burning influences determination based on PM_{2.5} chemical composition combined with fire counts at southeastern Tibetan Plateau during pre-monsoon period[J]. Atmospheric research, 2018, 206: 108-116.
- [16] BI S Q, CAO H B, ZHANG B H, et al. PM_{2.5}-bound PAHs near a typical industrial park: determining health risks associated with specific industrial sources[J]. Atmospheric environment, 2023, 302: 119715.
- [17] 崔转青. 无组织废气中酚类化合物测定的比较实验[J]. 山西化工, 2021, 41(5): 68-70.
- [18] 阙建磊, 王冠宇, 寇丽红, 等. 煤化工含酚废水脱酚技术研究进展[J]. 煤质技术, 2024, 39(5): 18-26.
- [19] 沈朝辉, 温忆敏. 检测工作场所空气中异佛尔酮的溶剂解吸气相色谱法的改进[J]. 环境与职业医学, 2015, 32(2): 164-167.
- [20] 唐大镜, 孙成瑶, 陈风格, 等. 石家庄市采暖期与非采暖期 PM_{2.5} 中多环芳烃的来源解析及健康风险评估[J]. 气象学报, 2022, 80(3): 410-420.
- [21] RAVINDRA K, SOKHI R, GRIEKEN R V. Atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons: source attribution, emission factors and regulation[J]. Atmospheric environment, 2008, 42(13): 2895-2921.
- [22] CHEN C T, LIN T, SUN X, et al. Spatiotemporal distribution and particle-water partitioning of polycyclic aromatic hydrocarbons in Bohai Sea, China[J]. Water research, 2023, 244: 120440.

责任编辑: 周建军