



DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20200209

数字出版日期: 2021-06-07; 数字出版网址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1355.N.20210604.1551.002.html>

## 天津滨海新区冬季环境空气中挥发性有机物的 污染特征及溯源分析

刘金玉<sup>1</sup>, 李丛舒<sup>2</sup>, 秦润<sup>3</sup>, 刘欢<sup>2</sup>, 韩越<sup>3</sup>, 降升平<sup>1</sup>

(1. 天津科技大学现代分析技术研究中心, 天津 300457; 2. 天津科技大学理学院, 天津 300457;  
3. 天津科技大学食品科学与工程学院, 天津 300457)

**摘要:** 采用热脱附-气相色谱质谱法, 对天津科技大学滨海校区逸夫楼北侧冬季环境空气中的挥发性有机物(VOCs)进行分析. 建立空气中挥发性有机物的分离及识别各类化合物的方法. 研究不同空气质量指数(AQI)下挥发性有机物的变化规律. 探讨空气中挥发性有机物的溯源方法及过程. 结果表明: SH-Rxi-624Si MS 色谱柱对低沸点挥发性有机物、芳香烃和烷烃类的物质表现出良好的分离效果. 空气质量为优时, 羧酸和醛类物质是主要污染物, 分别占比26.9%和18.5%. 而当空气质量为良、轻度、中度和重度污染时, 主要污染物是芳香烃和烷烃, 依次占比34.1%和20.9%、32.9%和16.0%、38.6%和17.1%、40.9%和18.4%. 随着AQI的增加, VOCs的物质种类、峰强度和峰面积也增加. 通过特征比值法溯源分析,  $\rho_{\text{甲苯}}$ 与 $\rho_{\text{苯}}$ 的比值在1.0~2.4, 芳香烃和烷烃主要是机动车尾气排放造成, 而羧酸类和醛类物质可能来源于监测站位周围植物的天然排放.

**关键词:** 热脱附-气相色谱质谱法; 挥发性有机物; 空气质量指数; 来源解析

中图分类号: O656.31

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510(2021)06-0055-05

## Pollution Characteristics and Trace Analysis of Volatile Organic Compounds in Ambient Air of Tianjin Binhai New Area in Winter

LIU Jinyu<sup>1</sup>, LI Congshu<sup>2</sup>, QIN Run<sup>3</sup>, LIU Huan<sup>2</sup>, HAN Yue<sup>3</sup>, JIANG Shengping<sup>1</sup>

(1. Research Center of Modern Analysis Technology, Tianjin University of Science & Technology,  
Tianjin 300457, China;

2. College of Sciences, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China;

3. College of Food Science and Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China)

**Abstract:** In this study the volatile organic compounds (VOCs) in winter air in the north of Yifu Building, Binhai campus of Tianjin University of Science and Technology were analyzed by thermal desorption gas chromatography-mass spectrometry. A method for the separation and identification of volatile organic compounds in air was established. The variation of volatile organic compounds under different air quality index (AQI) was studied. The traceability method and process of volatile organic compounds in air were discussed. The results of the study showed that the SH-Rxi-624Si MS column demonstrated good separation effect for low boiling point volatile organic compounds, aromatic and alkane substances. When the air quality was excellent, carboxylic acids and aldehydes were the main pollutants, accounting for 26.9% and 18.5%, respectively. When the air quality was good, light, moderate and heavy pollution, the main pollutants were aromatic hydrocarbons and alkanes, accounting for 34.1% and 20.9%, 32.9% and 16.0%, 38.6% and 17.1%, 40.9% and 18.4%, respectively. With the increase of AQI index, the substance type, peak intensity and peak area of VOCs were increasing. According to the traceabil-

收稿日期: 2020-12-09; 修回日期: 2021-03-22

基金项目: 天津科技大学大学生实验室创新基金资助项目(1931A202)

作者简介: 刘金玉(1987—), 天津人, 工程师, liujy@tust.edu.cn

ity analysis by characteristic ratio method, the ratio of toluene/benzene was between 1.0 and 2.4. Aromatic hydrocarbons and alkanes are mainly caused by vehicle exhaust emissions, while carboxylic acids and aldehydes may come from the natural emissions of plants around the monitoring point.

**Key words:** thermal desorption-gas chromatography mass spectrometry; volatile organic compounds; air quality index; source apportionment

挥发性有机物(VOCs)是除颗粒物外第二大分布广泛且种类繁多的气体排放物,是大气对流层中非常重要的痕量组分<sup>[1]</sup>。随着城市的快速发展,大量化石燃料的消耗及逐渐扩大的交通网络<sup>[2-4]</sup>使得大气中VOCs的浓度升高,由此引起研究人员和环境管理人员对VOCs的广泛关注。VOCs与氮氧化物(NO<sub>x</sub>)在光照条件下经过一系列化学反应可形成臭氧(O<sub>3</sub>);VOCs参与大气二次有机气溶胶(SOAs)的形成,对大气颗粒物污染有影响<sup>[5-6]</sup>;部分VOCs还会影响人体健康,如损害人体神经系统、免疫系统、内分泌系统,具有“三致”作用<sup>[7]</sup>。因此,建立一种全面、快捷的分析大气中挥发性有机物的方法并且对其进行溯源分析是十分必要的,对大气环境保护具有重要意义。

现阶段VOCs的化学组分、污染特征、主要来源<sup>[8]</sup>和对人类健康的影响均为研究热点。张靖等<sup>[9]</sup>用苏码罐采样使用GC/MS方法分析了北京市大气中VOCs的组成,共检测出108种,其主要成分是饱和烷烃(33%)、芳香烃(21%)、烯烃(16%)、卤代烷烃(20%)、卤代烯烃(9%)和卤代芳香烃(1%)。Mozaffar等<sup>[10]</sup>于2018年夏季对中国南京郊区环境空气中VOCs浓度进行研究,连续监测了89种VOCs以及臭氧(O<sub>3</sub>)、氮氧化物(NO<sub>x</sub>)、一氧化碳(CO)和二氧化硫(SO<sub>2</sub>)等大气微量气体每小时的浓度。

本研究以天津科技大学滨海校区逸夫楼北侧为监测站位,利用热脱附-气相色谱质谱法,选取SH-Rxi-624Sil MS色谱柱和Rtx-5 MS色谱柱,对该站位环境空气中的VOCs进行分析,比较了不同色谱柱的分离效果,并研究在不同环境空气质量条件(优、良、轻度、中度和重度污染)下该监测点VOCs的污染特征及溯源分析。

## 1 材料与方法

### 1.1 仪器和试剂

TQ8050型气相色谱-质谱联用仪、SH-Rxi-624Sil MS色谱柱、Rtx-5 MS色谱柱、TD-30型热脱附仪、1003-74102型吸附管(填料TENAX TA 60/80),日本岛津公司;JCH-2110型挥发性有机物采样器,青岛聚创环保设备有限公司;苯系物标准品,

美国o2si公司。

### 1.2 观测地点的选择

观测地点位于天津科技大学滨海中校区逸夫楼北侧(117.72°E, 39.09°N);该站位东侧30 m是黄海北路,东侧200 m是工业区,北侧1 km为北塘生活区,西侧是天津科技大学中校区,南侧3 km内分布有多个工厂,因此该站位综合反映了生活区、居住区、道路交通、工业区的排放要素,基本符合滨海新区的功能分布,其环境空气质量基本代表了滨海新区的污染状况,符合研究要求。

### 1.3 样品的采集和保存

该研究对2019年11月至2020年1月的环境空气进行采样,采样流量为500 mL/min,采样时间为1 h,并记录空气质量指数(AQI)。采样结束后,立即用密封帽密封吸附管,直接上机检测。

吸附管按规定的老化参数于热脱附仪中老化。老化后立即密封两端,直接进行采样。并且定期进行空白实验,以避免杂质干扰,老化好的吸附管直接上机进行空白分析。

### 1.4 热脱附条件

吸附管脱附温度280 °C,吸附管脱附时间5 min,吹扫流量60 mL/min;传输线温度250 °C;阀温度250 °C;冷阱捕集温度-20 °C,解析温度280 °C,解析时间5 min。

### 1.5 气相色谱-质谱条件

色谱条件:SH-Rxi-624Sil MS色谱柱(60 m × 0.32 mm × 1.80 μm)、Rtx-5 MS色谱柱(30 m × 0.25 mm × 0.25 μm);载气为氦气,Rtx-5 MS色谱柱流量1 mL/min,SH-Rxi-624Sil MS色谱柱流量2 mL/min;初始温度35 °C,保持5 min,然后以5 °C/min升至150 °C,再以10 °C/min升温至250 °C。

质谱条件:离子源温度230 °C,传输线温度280 °C,扫描方式为全扫描,扫描范围为质荷比35~500;检索谱库为NIST17。

### 1.6 定量方法

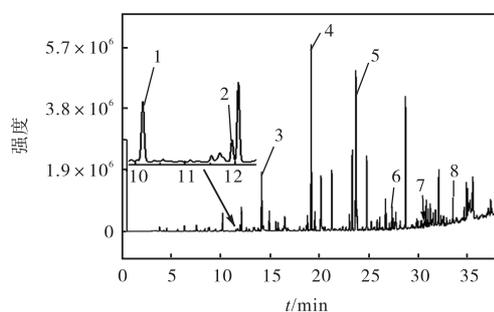
将1000 mg/L的苯系物标准品配制成质量浓度为10、20、50、100、200 mg/L的苯系物系列标准溶液,用微量注射器移取1 μL标准溶液注射到吸附管中进行解析。绘制标准曲线,外标法对苯和甲苯进行

定量分析.

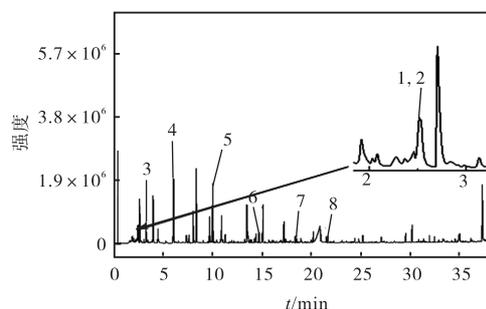
## 2 结果与讨论

### 2.1 色谱柱的选择

按照 1.3 节中介绍的采样方法,取 2 支老化好的吸附管同时开始采样,采样时空气质量为良.采样后分别用 Rtx-5 MS 色谱柱、SH-Rxi-624Sil MS 色谱柱进行分离,总离子流图比较如图 1 所示.经质谱图解析,Rtx-5 MS 色谱柱分离出 154 种 VOCs,SH-Rxi-624SilMS 色谱柱分离出 171 种 VOCs,将这些物质进行分类,发现主要有烷烃、芳香烃、酯、酮类等物质.



(a) SH-Rxi-624Sil MS



(b) Rtx-5 MS

1. 正己烷; 2. 2-丁酮; 3. 苯; 4. 甲苯; 5. 二甲苯; 6. 癸烷;  
7. 十一烷; 8. 十二烷

图 1 不同色谱柱时 VOCs 的总离子流图

Fig. 1 Total ion chromatogram of VOCs with different chromatographic columns

由于 SH-Rxi-624Sil MS 色谱柱更长,液膜更厚,在苯的保留时间之前可以分离出更多的低沸点挥发性有机物如正己烷和 2-丁酮(图 1(a)中 1、2 号物质),并且对沸点相对较高的苯系物和烷烃类,如苯、甲苯、二甲苯、癸烷、十一烷、十二烷(图 1(a)中 3—8 号物质)等也有好的分离效果;而苯在 Rtx-5 MS 色谱柱的保留时间很短,对先于苯的保留时间出峰的低沸点挥发性有机物保留行为较弱,分离效果差(图 1(b)中 1、2 号物质),主要还是对沸点较高的如苯系物和烷烃类等(如图 1(b)中 3—8 号物质)有较好的分离

效果.综合考虑,选择 SH-Rxi-624Sil MS 色谱柱作为后续工作的分离柱.

### 2.2 监测站位的挥发性有机物识别

在不同空气质量条件下采集 VOCs,经 SH-Rxi-624Sil MS 色谱柱分离,发现重度污染时 VOCs 的数目高于其他空气质量时的数目.为了更全面研究 VOCs 的污染特征,选取了重度污染时的 VOCs 种类进行识别,共测得 192 种 VOCs,其中包括烷烃 64 种、芳香烃 33 种、酮 12 种、酯 10 种、醇 16 种、卤代烃 12 种、醛 11 种、烯炔 7 种、羧酸 4 种和其他类 23 种,具体物质见表 1.

表 1 192 种挥发性有机物

Tab. 1 192 volatile organic compounds

种类	物质
烷烃	丁烷、2-甲基丁烷、乙基环丙烷、戊烷、2-甲基戊烷、3-甲基戊烷、正己烷、甲基环戊烷、2-甲基己烷、环己烷、2,3-二甲基戊烷、3-甲基己烷、2,2,3,3-四甲基丁烷、1,3-二甲基环戊烷、顺式-1,2-二甲基环戊烷、庚烷、2,3,4-三甲基戊烷、2,3,3-三甲基戊烷、2-甲基己烷、2-甲基庚烷、3-甲基庚烷、反式-1,3-二甲基环己烷、顺式-1-乙基-2-甲基环戊烷、顺式-1,2-二甲基环己烷、辛烷、顺式-1,3-二甲基环己烷、2-甲基辛烷、3,5-二甲基庚烷、乙基环己烷、1,1,3-三甲基环己烷、2-甲基辛烷、3-甲基辛烷、壬烷、顺式-1-乙基-3-甲基环己烷、2,4-二甲基己烷、1-甲基-3-(1-甲基乙基)-环己烷、2-甲基癸烷、顺式双环[4.3.0]壬烷、2-甲基壬烷、癸烷、2,5,5-三甲基庚烷、2,4-二甲基癸烷、3,7-二甲基壬烷、3-甲基癸烷、丁基环己烷、2,5-二甲基壬烷、3,5-二甲基辛烷、5-(2-甲基丙基)壬烷、十一烷、戊基环己烷、2-甲基十一烷、十二烷、4-甲基十二烷、2,7,10-三甲基十二烷、十三烷、5-乙基-5-甲基癸烷、5-(1-甲基丙基)壬烷、2-甲基十三烷、2,6,10-三甲基十二烷、十四烷、十氢化萘、2,6-二甲基十氢化萘、2,3-二甲基十氢化萘、反-2-甲基十氢化萘
芳香烃	苯、甲苯、乙苯、1,3-二甲基苯、1,4-二甲基苯、邻二甲苯、苯乙烯、丙基苯、1-乙基-2-甲基苯、1-乙基-3-甲基苯、均三甲苯、1-乙基-4-甲基苯、2-甲基苯乙烯、1,2,4-三甲基苯、反式-β-甲基苯乙烯、3-丙基甲苯、1,4-二乙基苯、1-丙炔基苯、2-乙基-1,4-二甲基苯、间异丙基甲苯、邻异丙基甲苯、5-乙基间二甲苯苯、1,2,3,4-四甲基苯、1,2,4,5-四甲基苯、2-乙基-1,3-二甲基苯、1-甲基-4-(1-甲基丙基)苯、四氢萘、1-乙基-4-异丙基苯、五甲基苯、萘、1-环丙基甲基-4-(1-甲基乙基)苯、2-甲基萘、1-甲基萘
酮类	2-丁酮、2-戊酮、5-乙基-4-甲基-3-庚酮、甲基异丁基酮、4-羟基-4-甲基-2-戊酮、1-(乙酰氧基)-2-丙酮、2-庚酮、环己酮、1-甲基-2-吡咯烷酮、苯乙酮、4,7,7-三甲基-双环[4.1.0]庚烷-3-酮、异亚硝基苯乙酮
酯类	乙酸甲酯、乙酸乙烯酯、碳酸二甲酯、乙酸丁酯、2-甲基丙酸丁酯、乙酸-2-乙基-己基酯、乙酸乙酯、乙酸正丙酯、醋酸正丁酯、环己烷羧酸环己基酯
醇类	乙醇、丙二醇、正丙醇、1,1'-氧双-2-丙醇、4-甲基-2-戊醇、2-甲基-1-戊醇、3-乙基-2,5-二醇、2-甲氧基-1-丙醇、R(-)-1,2-丙二醇、1,3-丁二醇、E-10-戊癸醇、2-乙基-1-己醇、2-(2-甲氧基乙氧基)-乙醇、2-甲基-6-亚甲基-7-辛-2-醇、2-亚苄基-1-庚醇、2-咪唑甲醇
卤代烃	2-氯戊烷、二氯甲烷、1,1-二氯乙烷、2-氯己烷、1-氯-3-甲基-丁烷、三氯甲烷、1,2-二氯乙烷、三氯乙烯、1,2-二氯丙烷、1,1,2-三氯乙烷、四氯乙烯、氯苯

续表

种类	物质
醛类	乙醛、2-丙烯醛、丙醛、甲基丙烯醛、6-甲基吡啶乙醛、庚醛、苯乙醛、2-羟基苯甲醛、壬醛、癸醛、2-羟基丁醛
烯烃	1,3-丁二烯、2-戊烯、4-甲基-1-戊烯、 $\alpha$ -蒎烯、4-萜烯、d-柠檬烯、1,4-戊二烯
羧酸	醋酸、丙酸、苯丙酸、苯甲酸
其他	甲缩醛、3-氧代丁腈、硝基-甲烷、1-甲氧基-2-甲基丁烷、1,2-二甲氧基-丙烷、2-乙基-4-甲基-1,3-二氧戊环、甲氧基乙烯、2-烯丙基腈、三环[3.1.0.0(2,4)]六-3-烯-3-碳腈、苯酚、4-甲基-2-硝基苯酚、3-甲基吡咯烷、乙烯基甲醚、2-硝基苯酚-2-甲基丙基醚、二氧化硫、乙腈、2,3-二氢咪唑、2-甲基咪唑、2-甲基吡啶、N,N-二甲基甲酰胺、N,N-二甲基乙酰胺、苯并咪唑、乙基吡嗪

### 2.3 不同 AQI 下挥发性有机物的比较

根据国家环境标准及相关文献<sup>[11-12]</sup>, AQI 在 0~50 之间, 空气质量指数类别为优; AQI 在 51~100 之间, 空气质量指数类别为良; AQI 在 101~150 之间, 空气质量指数类别为轻度污染; AQI 在 151~200 之间, 空气质量指数类别为中度污染; AQI 在 201~300 之间, 空气质量指数类别为重度污染; AQI 在 300 以上, 空气质量指数类别为严重污染. 不同 AQI 下测得 VOCs 的总离子流如图 2 所示.

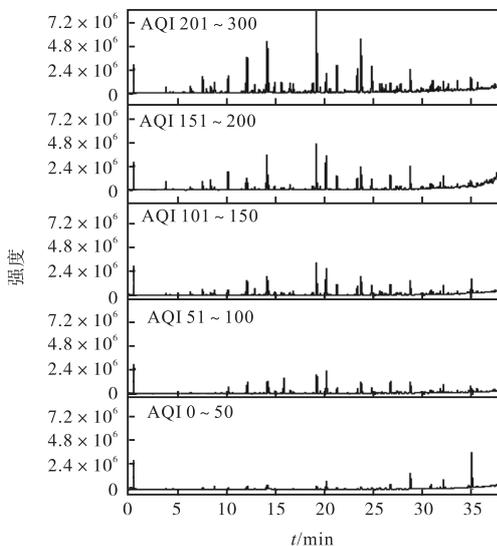


图 2 不同 AQI 下 VOCs 的总离子流图

Fig. 2 Total ion chromatogram of VOCs under different AQI

根据 1.3 节中介绍的采样方法, 选取 SH-Rxi-624Sil MS 色谱柱, 通过热脱附-气相色谱质谱方法分析. 在空气质量为优、良、轻度污染、中度污染和重度污染的条件下采样, 实验测得的 VOCs 数目分别为 83 种、113 种、142 种、171 种和 192 种. 说明随着空气质量的变化, VOCs 的数目也随之变化, 当空气污染不断加重时, VOCs 的种类逐渐增加. 随着

AQI 的增加, 各类物质的峰强度也呈逐渐增高的趋势.

为了研究不同 AQI 下的挥发性有机物, 对不同 AQI 下各类物质的峰面积占总峰面积的百分比进行比较, 结果见表 2.

表 2 不同 AQI 各类 VOCs 的峰面积百分比

Tab. 2 Peak area percentages of various VOCs under different AQI

物质种类	峰面积百分比/%				
	0~50	51~100	101~150	151~200	201~300
烷烃	7.5	20.9	16.0	17.1	18.4
芳香烃	14.6	34.1	32.9	38.6	40.9
酯	10.5	10.4	12.4	12.0	12.2
羧酸	26.9	1.1	5.1	1.7	1.3
卤代烃	5.3	6.0	7.5	5.1	5.8
醛	18.5	7.1	11.6	9.4	3.5
酮	9.9	5.7	4.4	7.6	3.9
醇	5.9	1.6	3.1	2.7	3.8
烯烃	0	0.8	1.6	0.8	1.6

空气质量为优时, 羧酸和醛类物质是主要污染物, 分别占 26.9% 和 18.5%. 而当空气质量为良、轻度污染、中度污染和重度污染时, 主要的污染物都是芳香烃和烷烃, 依次占比 34.1% 和 20.9%、32.9% 和 16.0%、38.6% 和 17.1%、40.9% 和 18.4%.

为了研究不同空气质量下挥发性有机物种类的变化趋势, 对比了不同 AQI 下各物质种类的峰面积, 如图 3 所示.

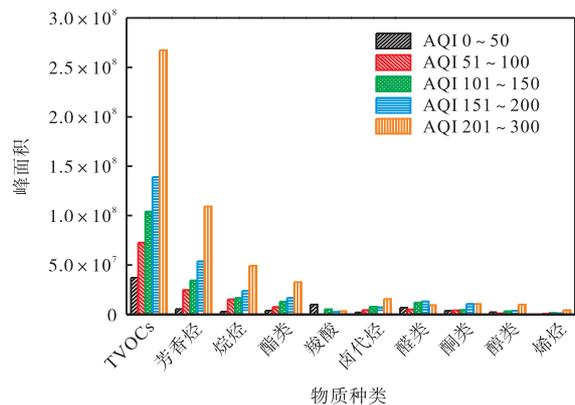


图 3 不同 AQI 下主要 VOCs 种类的峰面积

Fig. 3 Peak area of main VOCs under different AQI

随着 AQI 的增加, 总挥发性有机物 (TVOCs) 的峰面积会增加, 其中的主要污染物芳香烃和烷烃类物质的峰面积也增加, 其他污染物变化趋势不明显. 以甲苯计, 计算各个 AQI 下 TVOCs 的绝对含量, 随着 AQI 的增加, 不同空气质量下 TVOCs 含量分别为 20.96、41.51、59.83、79.40、152.99  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 说明随着污

染加重,空气中TVOCs也逐渐增加。

#### 2.4 不同AQI下挥发性有机物的溯源分析

根据上述结果和讨论,该监测站位环境空气中的VOCs种类主要有芳香烃、烷烃、羧酸类、醛类等。在空气质量为优时,羧酸类和醛类是主要污染物,目前鲜有文献报道这两类物质的来源,结合采样点的周围环境,分析其可能的原因有可能是来自站位周边较多的树木和绿化带,有些植物本身会释放出羧酸和醛类物质,其中有可能含有苯甲酸<sup>[13]</sup>以及苯甲醛<sup>[14]</sup>。因此,当空气质量为优时,采集到的VOCs中检测出的羧酸和醛类物质,其排放源可能是天然植物本身释放出来的。当AQI增加时,一般天气处于静稳状态,不利于污染物的扩散,并且污染物的排放量超过环境容量,其中芳香烃和烷烃含量明显升高,变为主要污染物。

不同AQI下 $\rho_{\text{甲苯}}$ 与 $\rho_{\text{苯}}$ 的线性关系如图4所示,可见,不同AQI对应的天气下,二者的相关系数 $r^2$ 为0.67~0.97,说明 $\rho_{\text{甲苯}}$ 与 $\rho_{\text{苯}}$ 之间具有良好的相关性,可能来源于同一个污染源。不同的排放源有其特定的VOCs成分谱,一些研究者比较环境空气中某些特定污染物的含量比值,以识别VOCs的排放源。本文选择了环境空气中甲苯和苯的含量比值作为本研究的初步溯源分析。据报道,Zavala等<sup>[15]</sup>发现典型墨西哥车队排放物 $\rho_{\text{甲苯}}$ 与 $\rho_{\text{苯}}$ 比值为2.1;Gelencser等<sup>[16]</sup>发现 $\rho_{\text{甲苯}}$ 与 $\rho_{\text{苯}}$ 比值接近1都被认为是交通排放源, $\rho_{\text{甲苯}}$ 与 $\rho_{\text{苯}}$ 比值远大于1表示存在另一种甲苯来源,这些来源可能包括清洗、喷漆和印刷过程中的溶剂蒸发,以及黏合剂、染料和油墨的应用。该监测站位的 $\rho_{\text{甲苯}}$ 与 $\rho_{\text{苯}}$ 比值为1.0~2.4,初步判断主要的排放源是机动车排放,主要污染物是芳香烃和烷烃。

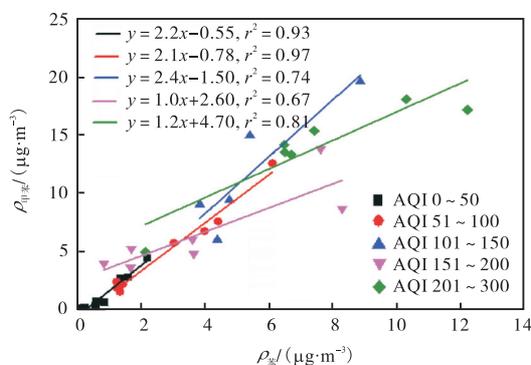


图4 不同AQI下 $\rho_{\text{甲苯}}$ 与 $\rho_{\text{苯}}$ 的线性关系

Fig. 4 Linear relationship between toluene and benzene under different air quality index

### 3 结论

(1)采用热脱附-气相色谱质谱法对挥发性有机物进行分析时,SH-Rxi-624Sil MS 色谱柱较 Rtx-5 MS 色谱柱能分离出更多的挥发性有机物,SH-Rxi-624Sil MS 色谱柱因其柱长和极性的优势,对低沸点挥发性有机物、芳香烃和烷烃类物质表现出良好的分离效果。

(2)随着AQI的增加,VOCs的物质种类、峰强度和峰面积增加,其中主要污染物芳香烃和烷烃类物质的峰面积增加趋势明显。空气质量为优时,羧酸和醛类物质是主要污染物,分别占比26.9%和18.5%;而当空气质量为良、轻度、中度和重度污染时,主要的污染物都是芳香烃和烷烃,依次占比34.1%和20.9%、32.9%和16.0%、38.6%和17.1%、40.9%和18.4%。

(3)通过特征比值法溯源分析, $\rho_{\text{甲苯}}$ 与 $\rho_{\text{苯}}$ 比值为1.0~2.4,主要排放源是机动车尾气排放,主要污染物是芳香烃和烷烃。而羧酸类和醛类物质可能来源于监测站位周围植物的天然排放。

#### 参考文献:

- [1] 张翼翔,尹沙沙,袁明浩,等.郑州市春季大气挥发性有机物污染特征及源解析[J].环境科学,2019(10):4372-4381.
- [2] 乔月珍,王红丽,黄成,等.机动车尾气排放VOCs源成分谱及其大气反应活性[J].环境科学,2012,33(4):1071-1079.
- [3] 莫梓伟,陆思华,李悦,等.北京市典型溶剂使用企业VOCs排放成分特征[J].中国环境科学,2015,35(2):374-380.
- [4] 区家敏,冯小琼,刘郁葱,等.珠江三角洲机动车挥发性有机物排放化学成分谱研究[J].环境科学学报,2014,34(4):826-834.
- [5] ATKINSON R. Atmospheric chemistry of VOCs and NO<sub>x</sub> [J]. Atmospheric environment, 2000, 34: 2063-2101.
- [6] 戈云飞.晋城市环境空气中挥发性有机物的污染特征及来源分析[D].北京:华北电力大学,2018.
- [7] 冯丽丽,胡晓芳,于晓娟,等.热脱附-气相色谱-三重四极杆串联质谱法测定环境空气中的挥发性有机物[J].色谱,2016,34(2):209-214.
- [8] GARZON J P, HUERTAS J I, MAGANA M, et al. Vola-

(下转第74页)

- derivative with sulfated  $\beta$ -cyclodextrin[J]. *Langmuir*, 2019, 35(45): 14628–14638.
- [53] ALTINBASAK I, ARSLAN M, SANYAL R, et al. Pyridyl disulfide-based thiol-disulfide exchange reaction: shaping the design of redox-responsive polymeric materials[J]. *Polymer chemistry*, 2020, 11(48): 7603–7624.
- [54] LIANG Y, GAO Y, WANG W, et al. Fabrication of smart stimuli-responsive mesoporous organosilica nano-vehicles for targeted pesticide delivery[J]. *Journal of hazardous materials*, 2020, 389: 122075.
- [55] YIN Y, YANG M, XI J, et al. A sodium alginate-based nano-pesticide delivery system for enhanced in vitro photostability and insecticidal efficacy of phloxine B[J]. *Carbohydrate polymers*, 2020, 247: 116677.

责任编辑:周建军

(上接第 59 页)

- tile organic compounds in the atmosphere of Mexico City[J]. *Atmospheric environment*, 2015, 119: 415–429.
- [9] 张靖, 邵敏, 苏芳. 北京市大气中挥发性有机物的组成特征[J]. *环境科学研究*, 2004, 17(5): 1–5.
- [10] MOZAFFAR A, ZHANG Y, FAN M, et al. Characteristics of summertime ambient VOCs and their contributions to O<sub>3</sub> and SOA formation in a suburban area of Nanjing, China[J]. *Atmospheric research*, 2020, 240: 104923.
- [11] 环境保护部. 环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行): HJ 633—2012[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [12] 李小飞, 张明军, 王圣杰, 等. 中国空气污染指数变化特征及影响因素分析[J]. *环境科学*, 2012, 33(6): 1936–1943.
- [13] 田家顺, 温弟如, 刘倩, 等. 苯甲酸对植物病原菌的离体抗菌活性研究[J]. *农药科学与管理*, 2011, 32(5): 26–31.
- [14] 孙宝国. 香料与香精[M]. 北京: 中国石化出版社, 2000: 38.
- [15] ZAVALA M, HERNDON S C, SLOTT R S, et al. Characterization of on-road vehicle emissions in the Mexico City Metropolitan Area using a mobile laboratory in chase and fleet average measurement modes during the MCMA-2003 field campaign[J]. *Atmospheric chemistry physics*, 2006(6): 5129–5142.
- [16] GELENCSEK A, SISZLER K, HLAVAY J. Toluene-benzene concentration ratio as a tool for characterizing the distance from vehicular emission sources[J]. *Environmental science & technology*, 1997, 31(10): 2869–2872.

责任编辑:周建军