

文章编号:2095-6134(2019)02-0169-09

# 济南市区大气中 VOCs 的浓度、来源及健康风险评价

桑 博<sup>1†</sup>, 魏凤霞<sup>2</sup>

(1 山东省冶金设计院股份有限公司, 济南 250101; 2 济钢集团国际工程技术有限公司, 济南 250101)

(2017 年 12 月 12 日收稿; 2018 年 3 月 29 日收修改稿)

Sang B, Wei F X. Investigation on the concentration, source, and health risk assessment of atmospheric VOCs in urban Jinan[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2019, 36(2): 169-177.

**摘 要** 分析 2010—2016 年济南市区大气 VOCs 的浓度、组成特征、来源及健康风险。结果表明, 2010、2011、2015 和 2016 这 4 年总 VOCs 的平均浓度水平相当, 2012—2014 年总 VOCs 浓度较上述 4 年偏低。每年烷烃、烯烃和芳香烃的组分特征存在较大差异。利用主因子分析法对 VOCs 的来源进行探讨, 结果表明所研究的 7 年间济南市大气 VOCs 的主要来源种类一致, 都是机动车尾气、工业排放、涂料溶剂使用和油气挥发。健康风险评价结果表明, 济南市区大气 VOCs 在所研究 7 年均不存在致癌风险, 但部分年份接近致癌风险水平, 应引起重视, 加以管控。

**关键词** VOCs; 来源解析; 健康风险评价

**中图分类号:** X511    **文献标志码:** A    **doi:** 10. 7523/j. issn. 2095-6134. 2019. 02. 004

## Investigation on the concentration, source, and health risk assessment of atmospheric VOCs in urban Jinan

SANG Bo<sup>1</sup>, WEI Fengxia<sup>2</sup>

(1 Shandong Province Metallurgical Engineering Co. Ltd, Jinan 250101, China;

2 Jigang International Engineering & Technology Co. Ltd, Jinan 250101, China)

**Abstract** Atmospheric VOCs samples were collected to investigate the concentrations, compositions, sources, and health risk of atmospheric VOCs in urban Jinan. Results showed that the total VOCs concentrations were comparable in 2010, 2011, 2015, and 2016, while the total VOCs concentration were lower in 2012, 2013, and 2014. Significant differences in the compositional characteristics were found among alkanes, olefins, and aromatics for each year. Main sources of atmospheric VOCs in urban Jinan during the period of the studied 7 years were determined to be motor vehicle exhaust, industrial emissions, paint and solvent using, and oil evaporation by principal factor analysis (PCA). Health risk assessment of atmospheric VOCs was carried out. The results showed that there was no presence of non-carcinogenic risks during the period of the studied 7 years, while lifetime cancer risks were close to the level of carcinogenic risks in some of the years.

† 通信作者, E-mail: hbsb@sdmecl.com

Attentions should be paid and measures should be taken.

**Keywords** VOCs; source analysis; health risk assessment

挥发性有机物 (VOCs, volatile organic compounds) 是空气中一类重要的污染物质,能够产生光化学烟雾,对环境造成危害<sup>[1]</sup>。VOCs 对人体健康危害也极大,会对器官及系统造成损伤,还具有胚胎毒性,能导致孕期接触高浓度 VOCs 的妇女流产率、胎儿畸形率大大提高<sup>[2-3]</sup>,因此研究其健康风险尤为重要。大气中 VOCs 来源广泛,机动车尾气排放、化石燃料燃烧、溶剂挥发、工业过程等均能造成其含量增加<sup>[1,4-6]</sup>。了解济南市区大气 VOCs 的来源对于减少 VOCs 排放、降低 VOCs 污染具有重要意义。目前研究者对 VOCs 进行来源分析时通常使用受体模型法,在缺少源成分谱及相关气象参数时,通常采用主因子分析法 (PCA, principal component analysis) 以及正交矩阵因数分解法 (PMF, positive matrix factorization)<sup>[7-8]</sup>。

近年来国内外研究者们对不同环境 (城市、郊区、背景站点、室内环境等) 中的 VOCs 进行研究分析。国内研究者对 VOCs 展开的研究主要集中在北京、上海、广州等人口密集的城市<sup>[9-11]</sup>,研究内容主要包括几个方面: VOCs 浓度及时空分布、光化学反应活性、健康风险评价以及来源解析等<sup>[12-15]</sup>。随着经济社会发展,大气 VOCs 的污染特征也在发生变化,而过往研究大多针对不同环境中 VOCs 的垂直空间分布差异、季节变化规律等,对同一采样点连续几年的年际变化规律研究尚不够深入。

为掌握济南市区大气 VOCs 污染特征的一年变化规律,本研究采集 2010—2016 年济南市区的空气样品,分析 VOCs 的浓度水平、组成特征,利用主因子分析法分析 VOCs 的主要来源,并对济南市区大气 VOCs 进行健康风险评价,为减轻济南市大气中 VOCs 污染、改善城市环境空气质量提供重要的基础数据。

1 实验部分

1.1 采样地点

从 2010 年 1 月至 2016 年 12 月在济南市区连续每日测定环境空气中挥发性有机物的浓度 (本文所提浓度均指质量浓度)。济南市区采样

点设在泉城广场,泉城广场靠近济南市主要的交通干道,与污染源距离适中,人口密集,能够代表济南市区的大气污染情况。

1.2 样品采集和分析方法

本研究采用在线气相色谱-氢离子火焰监测法 (GC-FID) 对 VOCs 进行实时测定,时间分辨率为 30 min。VOCs 在线分析仪是法国 CHROMATO-SUD 公司生成的 Airmozone 气相色谱分析系统,该系统包括两套独立的分析仪,分别用来分析低碳 (C2~C6) VOCs 和高碳 (C6~C12) VOCs,两台分析仪的检测器均为 FID,可检测 56 种 VOCs,具体方法见文献<sup>[16]</sup>。VOCs 在线分析仪自带内部校准系统,每天运行 1 次。

2 结果与讨论

2.1 济南市区大气中 VOCs 的浓度水平

2010 年 1 月—2016 年 12 月,济南市区大气中 VOCs 的浓度水平状况见表 1。从总 VOCs 浓度水平来看,2010、2011、2015、2016 这 4 年的平均浓度水平相当,分别为 60.09、71.83、72.18、68.69  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,2012—2014 年总 VOCs 浓度较这 4 年偏低,分别为 21.10、35.14、20.91  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,可能与采样点附近大气扩散条件有关,2012 年—2014 年下半年大气扩散条件良好,因此下半年 VOCs 浓度偏低。2010—2016 年,烷烃的浓度范围跨度较大,这与不同季节全社会排放水平、大气扩散条件等存在差异有关<sup>[17]</sup>。同总 VOCs 浓度水平状况类似,2012—2014 年烷烃、烯烃、芳香烃浓度较监测期间其他年份偏低。

从不同年份烷烃、烯烃、芳香烃对总 VOCs 的浓度贡献大小来看,2010—2016 年,烷烃是对 VOCs 浓度贡献最大的组分,浓度贡献比例分别为 60.4%、49.5%、55.0%、54.6%、40.6%、49.6% 和 53.7%。烯烃与芳香烃对 VOCs 浓度的贡献比例处于差不多的水平,2010—2016 年烯烃对总 VOCs 浓度的贡献比例分别为 17.6%、25.6%、18.6%、27.2%、28.3%、24.8% 和 18.3%,2010—2016 年芳香烃对总 VOCs 浓度的贡献比例分别为 22.0%、24.9%、26.4%、18.2%、31.1%、25.6% 和 28.0%。

表 1 2010—2016 年济南市区大气 VOCs 浓度水平

Table 1 Concentrations of atmospheric VOCs in urban Jinan from 2010 to 2016

$\mu\text{g}/\text{m}^3$

		2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
烷烃	最低浓度	5.47	6.49	2.79	3.86	2.92	2.82	8.81
	最高浓度	99.20	97.73	31.27	39.38	14.83	91.96	94.57
	平均浓度	36.29	35.58	11.61	19.17	8.50	35.81	36.86
烯烃	最低浓度	0.65	1.31	0.41	1.00	1.49	1.19	1.96
	最高浓度	44.82	85.31	14.62	38.34	23.68	63.51	56.54
	平均浓度	10.56	18.38	3.92	9.57	5.91	17.88	12.57
芳香烃	最低浓度	0.34	0.69	1.04	1.40	0.47	0.99	2.37
	最高浓度	88.12	72.61	29.78	34.37	42.92	74.81	73.06
	平均浓度	13.24	17.87	5.57	6.40	6.50	18.49	19.27
总 VOCs	平均浓度	60.09	71.83	21.10	35.14	20.91	72.18	68.69

表 2 为济南和国内外一些站点几种 VOCs 物种浓度的比较。由表 2 可见,不同站点的 VOCs 浓度水平相差较大,组成特征也各不相同。济南市异戊烷浓度低于上海、北京、深圳、厦门,与首尔处于差不多的水平,但高于东京。济南市丙烯浓度低于北京、深圳、上海,高于首尔、厦门;异戊二烯浓度低于北京、深圳,高于上海、首尔;顺-2-丁

烯浓度高于上海、深圳、厦门以及首尔。济南市甲苯浓度在几个站点中处于较低水平;苯浓度低于北京、深圳、上海、厦门、首尔,但高于东京;乙苯浓度处于较低水平,与首尔浓度相当;对/间-二甲苯浓度低于所列站点。总体来看,除顺-2-丁烯、反-2-丁烯外,济南市这几种 VOCs 物种浓度处于中等水平。

表 2 济南市区与国内外观测站点 VOCs 浓度比较

Table 2 Concentration comparison of VOCs between urban Jinan and other sites

$\mu\text{g}/\text{m}^3$

物种	济南	上海	东京	北京	深圳	首尔	厦门
异戊烷	2.55	11.07	0.39	46.67	6.59	2.89	3.38
丙烯	1.14	2.63	—	8.48	3.38	0.80	0.96
异戊二烯	0.71	0.58	—	3.76	2.13	0.21	—
顺-2-丁烯	2.28	0.8	—	—	0.88	0.01	0.64
甲苯	1.76	20.31	2.67	101.78	42.71	10.88	7.48
苯	1.27	6.47	0.56	41.37	7.77	1.39	2.23
乙苯	1.34	6.5	—	31.56	13.06	1.66	3.12
对/间-二甲苯	1.33	6.14	—	31.61	16.14	2.25	2.18
文献	本研究	[18]	[19]	[20]	[21]	[22]	[23]

### 2.1.1 烷烃的组成特征

本研究对烷烃的 11 种主要组分对烷烃的浓度贡献进行讨论,这 11 种主要组分分别为乙烷、环戊烷、异戊烷、正己烷、丙烷、异丁烷、正丁烷、正戊烷、环己烷、正壬烷和正癸烷,具体见图 1。2010—2016 年,烷烃中各组分浓度贡献情况差异较大,2012、2014、2015、2016 年烷烃中浓度最高的都是乙烷,分别为 2.60、2.02、4.90 和 5.52  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,次之为丙烷、环戊烷、异戊烷和正丁烷,分别为 1.02、0.81、4.15 和 4.28  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。2010 年对烷烃浓度贡献最大的两种烷烃是环戊烷和乙烷,分别为 7.93 和 4.76  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,2011 年对烷烃浓度贡献最大的两种烷烃是异戊烷、异丁烷,分别为 4.79 和 4.48  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,2013 年对烷烃浓度贡献最大的两种烷烃是丙烷、正丁烷,分别为 2.61 和 2.06  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

### 2.1.2 烯烃的组成特征

本研究对包括乙炔在内的烯烃的 10 种主要组分对烯烃的浓度贡献进行讨论,这 10 种主要的烯烃组分分别是乙烯、丙烯、1-丁烯、顺-2-丁烯、反-2-戊烯、1-戊烯、顺-2-戊烯、异戊二烯、2-甲基-1-戊烯以及乙炔,具体见图 2。2010—2016 年,烯烃中各组分浓度贡献情况也存在很大差异。2013、2014 年各主要烯烃组分的浓度贡献比例较为均匀,而其他年份贡献比例相差较大。2012、2016 年烯烃中浓度最高的都是乙炔,分别为 1.56 和 5.13  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,浓度次之的都是顺-2-丁烯,分别为 0.51 和 1.18  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。2010、2013、2015 年烯烃中浓度最高的都是乙炔,分别为 2.80、1.41 和 10.10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,浓度次之的分别为丙烯、2-甲基-1-戊烯、乙炔,分别为 2.77、1.21 和 2.93  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

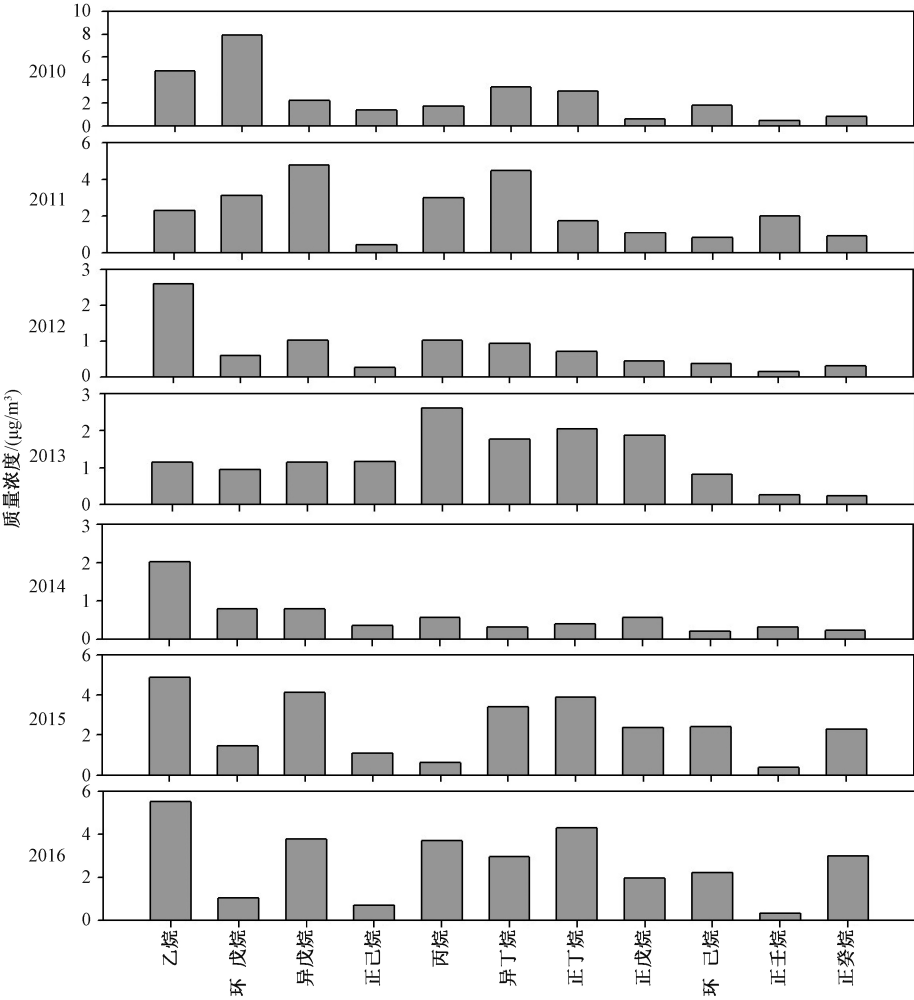


图 1 2010—2016 年济南市区大气 VOCs 中烷烃组成  
Fig.1 Compositions of alkanes in atmospheric VOCs in urban Jinan from 2010 to 2016

2011 年对烯烃浓度贡献最大的是顺-2-丁烯,为  $11.42\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,其次是乙烯,为  $1.51\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。2014 年对烯烃浓度贡献最大的两种烯烃是顺-2-戊烯和丙烯,分别为  $0.77$  和  $0.73\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

2.1.3 芳香烃的组成特征

本研究还对芳香烃的 9 种主要组分对芳香烃的浓度贡献进行讨论,这 9 种主要的芳香烃组分分别是苯、甲苯、乙基苯、间/对二甲苯、苯乙烯、邻二甲苯、邻乙基甲苯、1,2,4-三甲基苯以及 1,2,3-三甲基苯,具体见图 3。2010—2016 年芳香烃组成特征明显不同。2010、2014 年芳香烃中浓度最高的都是苯,分别是  $2.43$  和  $0.92\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,浓度次之的分别为间/对二甲苯和甲苯,分别为  $1.95$  和  $0.73\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。2011、2012 年对芳香烃浓度贡献最大的两种芳香烃都是甲苯和苯,2011 年分别为  $3.13$  和  $2.39\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,2012 年分别为  $1.18$  和  $0.52\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。2013 年对芳香烃浓度贡献最大的

两种芳香烃是甲苯和邻二甲苯,分别是  $2.52$  和  $0.47\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。2015 年对芳香烃浓度贡献最大的两种芳香烃组分分别是 1,2,3-三甲基苯和乙基苯,分别是  $3.12$  和  $3.08\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,2016 年对芳香烃浓度贡献最大的两种芳香烃组分分别是乙基苯和甲苯,分别是  $2.96$  和  $2.83\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

2.2 济南市区大气中 VOCs 的来源

2010—2016 年济南市区大气中 VOCs 烷烃、烯烃、芳香烃组成各不相同,这表明济南这 7 年 VOCs 的来源可能存在差异<sup>[24]</sup>,因此我们对这 7 年大气中 VOCs 的来源分别进行分析研究。

研究者通常使用多元统计方法分析污染源,主因子分析法是一种多元统计方法,其思路是降维的思想,即把一组具有复杂相关关系的数据分类为几个互不相关的综合因子,根据因子中的主要组成成分判断污染源种类<sup>[25]</sup>。通常我们认为荷载高于 0.6 的物质是反映该因子特征

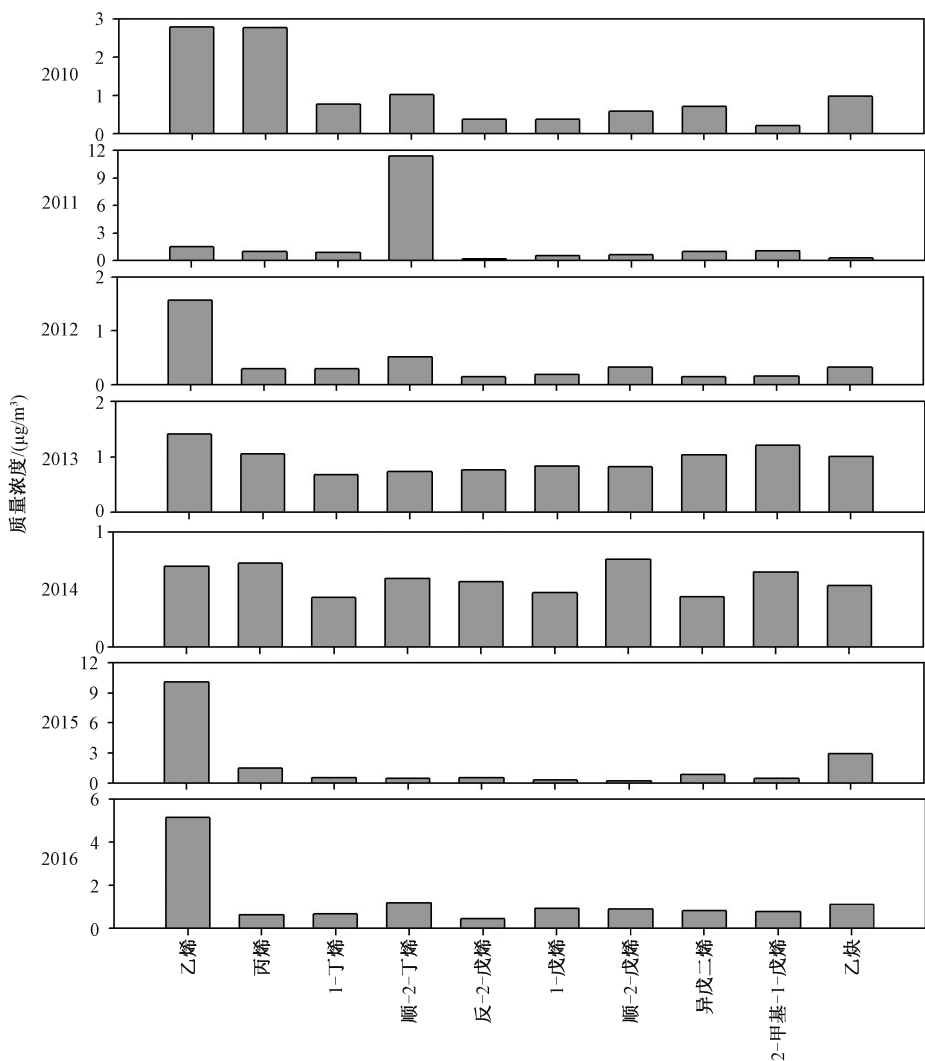


图 2 2010—2016 年济南市区大气 VOCs 中烯烃组成

Fig.2 Compositions of olefins in atmospheric VOCs in urban Jinan from 2010 to 2016

的主要组成成分。本研究使用 SPSS 19.0 软件对 2010—2016 年济南市大气中 VOCs 的来源进行解析。

源解析结果表明,2010—2016 年的来源贡献比例不同,但济南市区大气中 VOCs 的来源主要包括 4 种,以 2011 年的来源为例进行探讨。本研究对济南市区 2011 年大气中的 VOCs 进行来源解析,共解析出 4 个因子,能解释 86% 的变量,具体解析结果见表 3。

因子 1 能够解释 28% 的变量,C2~C4 类物质显著,丙烯对其有贡献,同时乙基苯、1,2,4-三甲苯具有较高的正荷载,研究表明,机动车尾气排放是芳香烃和饱和烃类的主要来源<sup>[26]</sup>,因此因子 1 具有机动车尾气排放源的污染特征,可认为是机动车排放源。

因子 2 能够解释 27% 的变量,主要是芳香烃

类物质有显著贡献,乙烷、乙烯的荷载也较高,有研究表明芳香烃主要来源是涂料溶剂使用<sup>[27]</sup>,因此因子 2 可判断是涂料溶剂使用来源。

因子 3 能够解释 22% 的变量,2-甲基-庚烷、正壬烷等 C7 以上烷烃贡献较大,体现工业排放来源的污染特征<sup>[28]</sup>,可认为是工业排放源。

因子 4 能够解释 9% 的变量,主要荷载物质是环戊烷以及 3-甲基-戊烷,戊烷是油气挥发源的标志性污染物质<sup>[29]</sup>,因此可判断该因子是油气挥发源。

所研究的 7 年间济南市区大气 VOCs 的来源比例如图 4 所示。

总体来看,从 2010 年到 2016 年,VOCs 的来源中,工业排放源所占的比例减少,而机动车尾气源所占比例增加,这是由于济南市这几年产业结构发生变化,且机动车数量在逐年增加,因此控制

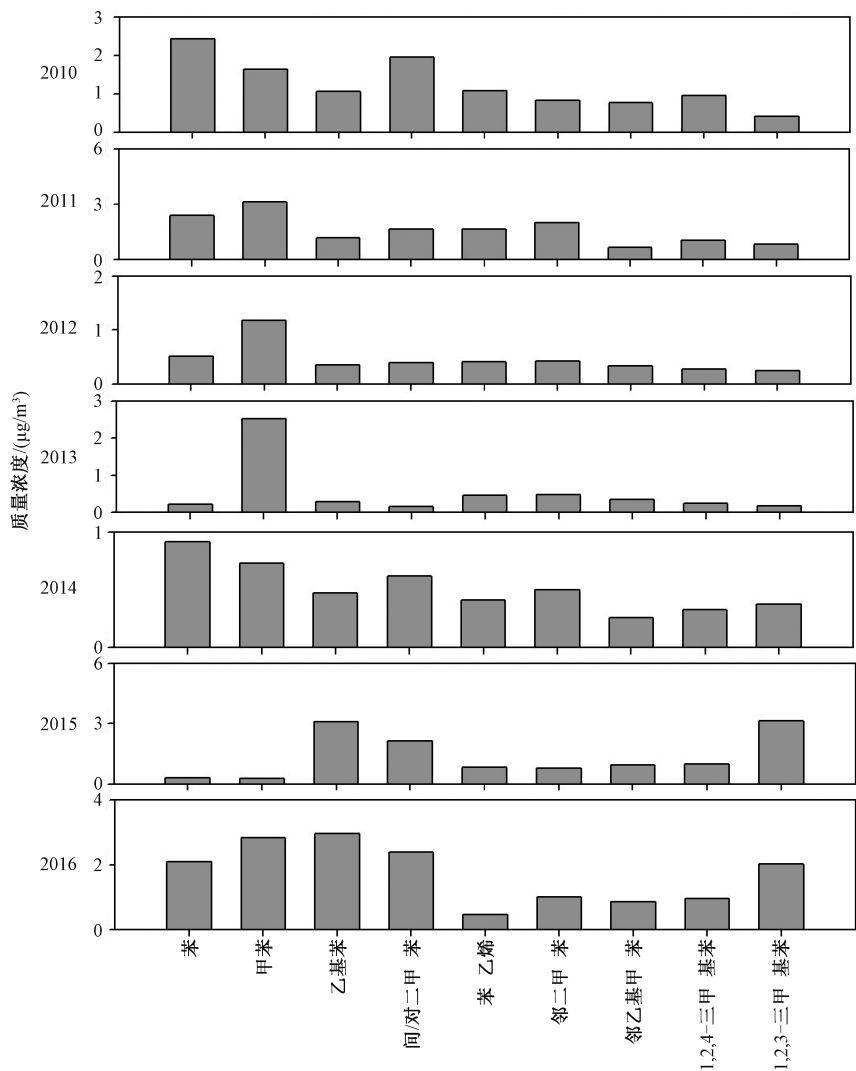


图 3 2010—2016 年济南市区大气 VOCs 中芳香烃组成

Fig.3 Compositions of aromatic hydrocarbons in atmospheric VOCs in urban Jinan from 2010 to 2016

机动车上路数对减少 VOCs 排放作用很大。

2.3 健康风险评价

根据某种污染物是否具有致癌性,可将该物质的风险评估分为两种:非致癌风险评价和致癌风险评价<sup>[30]</sup>。1989 年提出的针对特定场所吸入途径污染物的健康风险评价方法要求以参考人体呼吸速率和体重计算得到的吸入摄入量作为评价指标的参数,2009 年美国环境保护署(US EPA)对这一方法进行改进,采用化学物质在空气中的质量浓度作为暴露量<sup>[31]</sup>。本研究通过计算暴露风险值评估非致癌风险,通过计算终身致癌风险评估致癌风险。具体评价方法如下,相关参数采用美国环境保护署综合风险信息数据库中的推荐值。

EC 是暴露浓度,其计算公式如下

$$EC = (C \times ET \times EF \times ED) / AT. \quad (1)$$

式中: $C$  是污染物的环境浓度 ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ); $ET$  是暴露时间 ( $\text{h}/\text{d}$ ),本研究采用数值为 24; $EF$  是暴露频率 ( $\text{d}/\text{a}$ ),本研究采用数值为 365; $ED$  是暴露年限 ( $\text{a}$ ),本研究采用数值为 70; $AT$  是平均暴露时间 ( $\text{d}$ ),本研究中采用  $365 \times 70$ 。

非致癌风险危害指数 (HI) 指暴露引起的长期摄入的量与参考剂量之间的比值,其计算方法如下

$$HQ = EC / (RFC \times 1\,000), \quad (2)$$

$$HI = \sum HQ_i. \quad (3)$$

终身致癌风险计算公式如下

$$\text{Risk} = EC \times IUR. \quad (4)$$

式中: $IUR$  为单位吸入致癌风险。在检测出的 56 种 VOCs 物种中,根据污染物浓度及美国 EPA 公

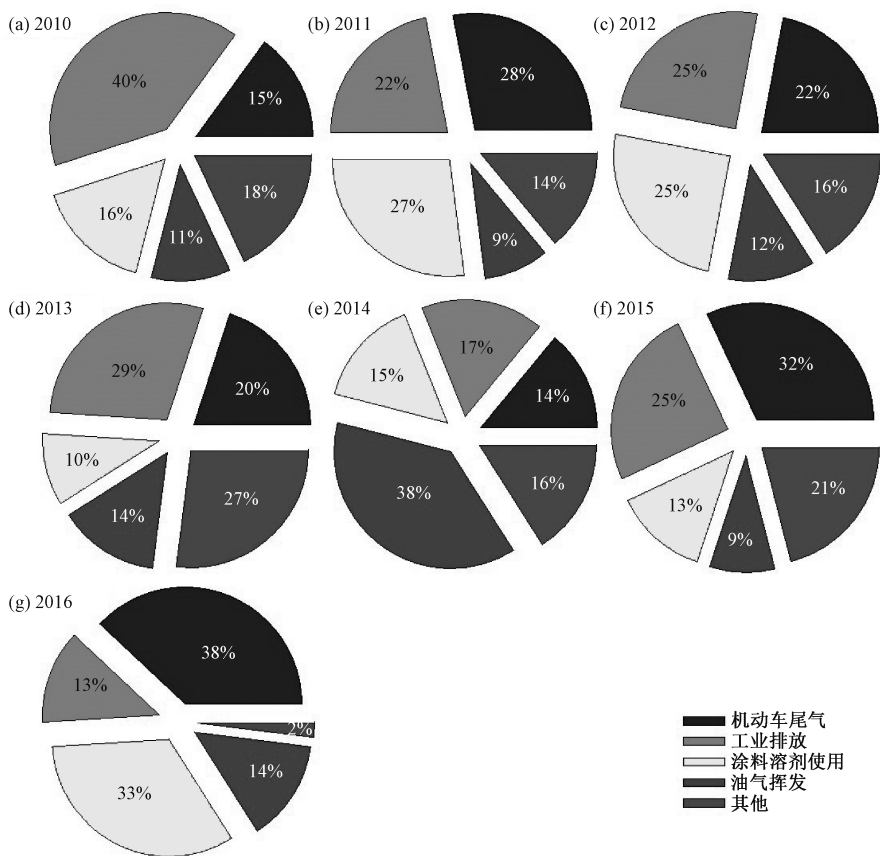


图 4 2010—2016 年济南市区大气 VOCs 来源组成

Fig.4 Sources of atmospheric VOCs in urban Jinan from 2010 to 2016

表 3 2011 年济南市区大气 VOCs 源解析结果

Table 3 Source analysis results of atmospheric VOCs in urban Jinan in 2011

物种	因子			
	1	2	3	4
乙烷	-0.09	0.94	-0.06	0.19
环戊烷	-0.17	0.43	0.14	0.75
异戊烷	0.96	0.20	0.01	0.10
3-甲基-戊烷	0.18	-0.08	0.25	0.83
丙烷	0.71	0.29	-0.18	0.04
异丁烷	0.85	-0.10	0.37	0.14
正丁烷	0.91	0.26	-0.09	-0.02
2-甲基-庚烷	-0.06	-0.07	0.82	0.29
正壬烷	-0.07	-0.11	0.88	0.26
乙烯	0.14	0.95	-0.15	0.08
丙烯	0.64	0.14	0.43	-0.29
顺-2-丁烯	-0.10	-0.33	0.79	0.19
苯	0.43	0.86	-0.11	-0.02
甲苯	0.49	0.82	-0.08	-0.08
乙基苯	0.67	0.62	-0.02	-0.17
间/对二甲苯	0.47	0.84	0.10	0.05
苯乙烯	0.51	0.10	0.81	-0.04
邻二甲苯	0.16	0.11	0.93	-0.15
1,2,4-三甲基苯	0.67	0.50	0.18	-0.09
能够解释的变量比例/%	28	27	22	9

取 6 种 VOCs 物种作为风险评价目标化合物,对济南市环境空气中 VOCs 进行健康风险评价。此 6 种 VOCs 物种分别为:正己烷、苯、甲苯、乙苯、对/间二甲苯、邻二甲苯。济南市大气 VOCs 非致癌风险评价结果见表 4。

通常我们认为当 HI 大于 1 时,存在非致癌风险;当 HI 小于 1 时,不存在非致癌风险<sup>[31]</sup>。从计算结果来看,2010—2016 年期间,HI 均小于 1,即不存在非致癌风险。

此 6 种 VOCs 中仅苯具有致癌性,计算所得每年的终身致癌风险如表 5 所示,2010—2016 年的终身致癌风险分别为: $4.54\times10^{-7}$ , $4.48\times10^{-7}$ , $9.71\times10^{-8}$ , $4.23\times10^{-8}$ , $1.72\times10^{-7}$ , $5.51\times10^{-8}$ 以及 $3.94\times10^{-7}$ 。当 Risk 高于  $10^{-6}$  时,认为存在致癌风险;当 Risk 低于  $10^{-6}$  时,认为不存在致癌风险<sup>[31]</sup>。从济南市计算结果来看,本研究中的 7 年均不存在致癌风险,但 2010、2011 和 2016 年终身致癌风险已接近  $10^{-6}$ ,所以应当引起足够重视,采取积极的控制措施,避免济南市区 VOCs 未来产生致癌风险。

布优先控制的有害空气污染物名单进行筛选,选

表 4 济南市区大气中 VOCs 非致癌风险评价结果(置信度 95%)

物种	RFC	IUR	HQ						
			2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
正己烷	$7.00\times10^{-1}$		$(4.57\pm1.78)\times10^{-5}$	$(1.48\pm0.50)\times10^{-5}$	$(8.91\pm2.71)\times10^{-6}$	$(4.03\pm1.09)\times10^{-5}$	$(1.25\pm0.44)\times10^{-5}$	$(3.78\pm0.92)\times10^{-5}$	$(2.42\pm0.53)\times10^{-5}$
苯	$3.00\times10^{-2}$	$7.80\times10^{-6}$	$(1.94\pm0.50)\times10^{-3}$	$(1.92\pm0.37)\times10^{-3}$	$(4.15\pm1.12)\times10^{-4}$	$(1.81\pm0.67)\times10^{-4}$	$(7.37\pm2.74)\times10^{-4}$	$(2.36\pm0.95)\times10^{-4}$	$(1.68\pm0.26)\times10^{-3}$
甲苯	5.00		$(7.83\pm4.16)\times10^{-6}$	$(1.50\pm0.36)\times10^{-5}$	$(5.66\pm2.60)\times10^{-6}$	$(1.21\pm0.37)\times10^{-5}$	$(3.51\pm1.72)\times10^{-6}$	$(1.30\pm0.32)\times10^{-6}$	$(1.36\pm0.27)\times10^{-5}$
乙苯	1.00		$(2.51\pm0.75)\times10^{-5}$	$(2.87\pm0.69)\times10^{-5}$	$(8.51\pm2.80)\times10^{-6}$	$(6.66\pm2.82)\times10^{-6}$	$(1.12\pm0.63)\times10^{-5}$	$(7.38\pm1.70)\times10^{-5}$	$(7.09\pm1.28)\times10^{-5}$
对/间二甲苯	$1.00\times10^{-1}$		$(4.68\pm1.45)\times10^{-4}$	$(4.00\pm0.66)\times10^{-4}$	$(9.61\pm2.71)\times10^{-5}$	$(3.61\pm0.81)\times10^{-5}$	$(1.48\pm0.69)\times10^{-4}$	$(5.11\pm1.66)\times10^{-4}$	$(5.76\pm1.03)\times10^{-4}$
邻二甲苯	$1.00\times10^{-1}$		$(1.99\pm0.53)\times10^{-4}$	$(4.80\pm0.93)\times10^{-4}$	$(1.02\pm0.34)\times10^{-4}$	$(1.13\pm0.30)\times10^{-4}$	$(1.19\pm0.34)\times10^{-4}$	$(1.83\pm0.51)\times10^{-4}$	$(2.43\pm0.21)\times10^{-4}$
	HI		$(2.69\pm0.64)\times10^{-3}$	$(2.85\pm0.43)\times10^{-3}$	$(6.36\pm1.54)\times10^{-4}$	$(3.89\pm0.88)\times10^{-4}$	$(1.03\pm0.33)\times10^{-3}$	$(1.04\pm0.24)\times10^{-3}$	$(2.61\pm0.37)\times10^{-3}$

表 5 济南市区大气中 VOCs 致癌风险评价结果(置信度 95%)

年份	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Risk	$(4.54\pm1.16)\times10^{-7}$	$(4.48\pm0.86)\times10^{-7}$	$(9.71\pm2.61)\times10^{-8}$	$(4.23\pm1.58)\times10^{-8}$	$(1.72\pm0.64)\times10^{-7}$	$(5.51\pm2.21)\times10^{-8}$	$(3.94\pm0.62)\times10^{-7}$

3 结论

从总 VOCs 浓度水平来看,2010、2011、2015、2016 这 4 年的平均浓度水平相当,分别为 60.09、71.83、72.18、68.69  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,2012—2014 年总 VOCs 浓度较这 4 年偏低,分别为 21.10、35.14、20.91  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。从不同年份烷烃、烯烃、芳香烃对总 VOCs 的浓度贡献大小来看,2010—2016 年,烷烃是对 VOCs 浓度贡献最大的组分,浓度贡献比例大约为 50%,烯烃与芳香烃对 VOCs 浓度的贡献处于差不多的水平。每年烷烃、烯烃、芳香烃的组分特征存在较大差异。所研究的 7 年间济南市区大气 VOCs 的主要来源是机动车尾气、工业排放、涂料溶剂使用、油气挥发。总体来看,从 2010 到 2016 年,VOCs 的来源中,工业排放源所占的比例减少,而机动车尾气源所占比例增加,这是由于济南市机动车数量在逐年增加,控制机动车上路数对减少 VOCs 排放十分必要。健康风险评价结果表明,济南市区大气 VOCs 在所研究 7 年均不存在致癌风险,但 2010、2011 和 2016 年已接近致癌风险水平,应引起重视,加以管控,避免达到致癌风险水平。

参考文献

[1] 苏雷燕,赵明,李岩,等. 环境空气中挥发性有机物(VOCs)光化学行为的研究进展[J]. 绿色科技,2013(11):178-182.

[2] 陈清,余刚,张彭义. 室内空气中挥发性有机物的污染及其控制[J]. 上海环境科学,2001,20(12):616-620.

[3] 薛璐,马俊杰. 室内空气中挥发性有机物研究进展[J]. 河北工业科技,2013,30(5):371-376.

[4] 陆思华,白郁华,张广山,等. 大气中挥发性有机化合物(VOCs)的人为来源研究[J]. 环境科学学报,2006,26(5):757-763.

[5] 张桂芹,姜德超,李曼,等. 城市大气挥发性有机物排放源及来源解析[J]. 环境科学与技术,2014,37(S2):195-200.

[6] 朱丽波,徐能斌,应红梅,等. 宁波市环境空气中 VOCs 污染状况及变化趋势分析[J]. 中国环境监测,2012(5):24-28.

[7] 邹宇,邓雪娇,王伯光,等. 广州大气中挥发性有机物的变化特征及来源分析[C]//中国气象学会. 第 29 届中国气象学会年会论文集. 沈阳:中国气象学会,2012:1-12.

[8] 高松,崔虎雄,伏晴艳,等. 某化工区典型高污染过程 VOCs 污染特征及来源解析[J]. 环境科学,2016,37(11):4094-4102.

[9] 王琴,刘保献,张大伟,等. 北京市大气 VOCs 的时空分布特征及化学反应活性[J]. 中国环境科学,2017,37(10):3636-3646.

[10] 高爽,张坤,高松,等. 上海城郊地区冬季霾污染事件反应性 VOCs 物种特征[J]. 环境科学,2017,38(3):855-866.

[11] 周炎,岳玎利,张涛. 春季广州城区空气中 VOCs 来源解析[J]. 环境监控与预警,2017,9(1):42-47.

[12] 钟雪芬,陈峰,丁晖,等. 福州清洁地区夏季和秋季 VOCs 浓度特征及化学反应活性[J]. 环境科学学报,2016,36(4):1393-1401.

[13] 安俊琳,朱彬,王红磊,等. 南京北郊大气 VOCs 变化特征及来源解析[J]. 环境科学,2014,35(12):4454-4464.

[14] Saeaw N, Thepanondh S. Source apportionment analysis of airborne VOCs using positive matrix factorization in industrial and urban areas in Thailand[J]. Atmospheric Pollution Research,2015,6(4):644-650.

[15] Kim E K, Song H B, Park M S, et al. The concentrations of ambient VOCs at industrial complex area in Daegu city[J]. Journal of Korean Society of Environmental Engineers,2014,36(7):498-505.



- [16] 王红丽,陈长虹,黄成,等. 上海市城区春节和“五一”节期间大气挥发性有机物的组成特征 [J]. 环境科学学报, 2010,30(9):1 749-1 757.
- [17] 曹军骥. 中国大气  $PM_{2.5}$  污染的主要成因与控制对策 [J]. 科技导报, 2016,34(20):74-80.
- [18] 蔡长杰,耿福海,俞琼,等. 上海中心城区夏季挥发性有机物 (VOCs) 的源解析 [J]. 环境科学学报, 2010,30(5): 926-934.
- [19] Morino Y, Ohara T, Yokouchi Y, et al. Comprehensive source apportionment of volatile organic compounds using observational data, two receptor models, and an emission inventory in Tokyo metropolitan area [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2011,116(D02311):1-14.
- [20] 孙杰,王跃思,吴方堃,等. 唐山市和北京市夏秋季节大气 VOCs 组成及浓度变化 [J]. 环境科学, 2010,31(7): 1 438-1 443.
- [21] 朱少峰,黄晓锋,何凌燕,等. 深圳大气 VOCs 浓度的变化特征与化学反应活性 [J]. 中国环境科学, 2012,32(12): 2 140-2 148.
- [22] Kim K H, Chun H H, Jo W K. Multi-year evaluation of ambient volatile organic compounds: temporal variation, ozone formation, meteorological parameters, and sources [J]. Environmental monitoring and assessment, 2015,187(2):1-12.
- [23] 徐慧,张晗,邢振雨,等. 厦门冬春季大气 VOCs 的污染特征及臭氧生成潜势 [J]. 环境科学, 2015,36(1):11-17.
- [24] 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.
- [25] Harrison R M, Smith D J T, Luhana L. Source apportionment of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons collected from an urban location in Birmingham, UK [J]. Environmental Science & Technology, 1996,30(3):825-832.
- [26] Scheff P A, Wadden R A. Receptor modeling of volatile organic compounds. 1. Emission inventory and validation [J]. Environmental Science & Technology, 1993,27(4):617-625.
- [27] 王红丽,陈长虹,黄海英,等. 世博会期间上海市大气挥发性有机物排放强度及污染来源研究 [J]. 环境科学, 2012,33(12):4 151-4 158.
- [28] Liu Y, Shao M, Fu L, et al. Source profiles of volatile organic compounds (VOCs) measured in China: Part I [J]. Atmospheric Environment, 2008,42(25):6 247-6 260.
- [29] Barletta B, Meinardi S, Rowland F S, et al. Volatile organic compounds in 43 Chinese cities [J]. Atmospheric Environment, 2005,39(32):5 979-5 990.
- [30] 许海萍,张建英,张志剑,等. 致癌和非致癌环境健康风险的预期寿命损失评价法 [J]. 环境科学, 2007,28(9): 2 148-2 152.
- [31] EPA ABD. Risk assessment guidance for superfund. Volume I: Human health evaluation manual (Part A) [R]. EPA/540/1-89/002, 1989.