

化工企业废气 BTEX 排放及周边居民区空气暴露健康风险分析

单阳¹, 张涛^{1*}, 胡冠九¹, 张宗祥²

(1. 江苏省环境监测中心, 国家环境保护地表水有机分析重点实验室, 江苏 南京 210019; 2. 江苏省泰州环境监测中心, 江苏 泰州 225300)

摘要:采用气相色谱-质谱法,于2016年9月和12月对江苏省某化工企业与苯系物排放相关的废气排放口和周边居民区环境空气中苯、甲苯、邻二甲苯、间/对二甲苯、乙苯等5种典型苯系物(BTEX)的排放和区域污染特征进行分析,并开展BTEX来源分析及人体健康风险评估研究。结果表明,化工企业有机废气排放口苯质量浓度最高,超过《化学工业挥发性有机物排放标准》(DB32/3151—2016)限值,超标率达26.4%;环境空气中BTEX平均质量浓度为 $47.31 \mu\text{g}/\text{m}^3$,BTEX检出率均超过80%,秋季和冬季BTEX质量浓度分别为 72.5 和 $22.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$,各组分质量浓度大小排序为:苯>甲苯>乙苯>间/对-二甲苯>邻-二甲苯,与废气排放口浓度大小顺序一致;与其他城市和地区进行比较,BTEX质量浓度处于中等水平。比值分析法研究BTEX来源结果表明,本地排放源是化工企业周边环境空气BTEX主要来源,一定程度上也受交通排放、化石燃料燃烧等污染源的影响。人体健康风险评估结果表明,BTEX单组分非致癌风险值(HQ)在安全范围之内,各监测点位BTEX的HQ均<1,非致癌风险可以忽略不计;苯的致癌风险值(R)为 $7.33 \times 10^{-6} \sim 7.49 \times 10^{-5}$,均超过 10^{-6} ,有一定的致癌风险,且苯是I类致癌物质,应采取源头控制措施避免健康风险。

关键词:苯系物;化工企业;环境空气;居民区;健康风险

中图分类号:X823

文献标志码:B

文章编号:1674-6732(2022)05-0107-07

Analysis of BTEX Emission from Chemical Enterprises and Health Risk of Air Exposure in Surrounding Residential Areas

SHAN Yang¹, ZHANG Tao^{1*}, HU Guan-jiu¹, ZHANG Zong-xiang²

(1. Jiangsu Provincial Environmental Monitoring Center, National Key Laboratory for Organic Analysis of Surface Water for Environmental Protection, Nanjing, Jiangsu 210019, China; 2. Jiangsu Taizhou Environmental Monitoring Center, Taizhou, Jiangsu 225300, China)

Abstract: Taking a chemical enterprise in Jiangsu as the research object, organic exhaust gas samples and ambient air samples from surrounding residential areas were collected in September and December 2016, and gas chromatography-mass spectrometry was used to study the emission and regional pollution characteristics of BTEX (Benzene, Toluene, O-xylene, M/P-xylene and Ethylbenzene), and their health risks to human body were evaluated. The results showed that the mass concentration of benzene at the outlet of organic waste gas of chemical enterprises was the highest, exceeding the limit of emission standard of volatile organic compounds in chemical industry (DB32/3151—2016), and the exceeding rate was 26.4%. The detection rate of BTEX at the air monitoring points around the enterprise exceeded 80%. The mass concentrations of BTEX in autumn and winter were $72.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ and $22.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectively, which met the requirements of relevant standards. The mass concentrations of each component from high to low were as follows: Benzene > Toluene > Ethylbenzene > M/P-xylene > O-xylene, which was consistent with the concentration at the exhaust outlet. The average mass concentration of BTEX during the monitoring period was $47.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Compared with other cities and regions, the concentration of BTEX in the ambient air of the study area was at a medium level. The

收稿日期:2022-06-08;修订日期:2022-06-23

基金项目:江苏省环保科研课题基金资助项目(2018001)

作者简介:单阳(1970—),男,硕士,主要从事环境监测及环境监测管理等工作。

* 通讯作者:张涛 E-mail: zt@jshb.gov.cn

source of BTEX was studied by ratio analysis, which showed that the ambient air BTEX around chemical enterprises mainly came from local emission sources, and also came from the impact of traffic emissions, fossil fuel combustion and other pollution sources. The non-carcinogenic risk value of single component of BTEX was within the safety range, and the non-carcinogenic risk value of BTEX at each sampling point was far less than 1, indicating that the non-carcinogenic risk of BTEX in the ambient air around the chemical enterprise during the monitoring period was negligible. The carcinogenic risk value of benzene was in the range of $7.33 \times 10^{-6} \sim 7.49 \times 10^{-5}$, more than 10^{-6} , exhibiting a certain risk of cancer. Benzene is a class 1 carcinogen, and source control measures should be taken to avoid health risks.

Key words: BTEX; Chemical Enterprises; Ambient Air; Residence Community; Health Risk

苯系物是苯及其衍生物的总称,其中苯(Benzene)、甲苯(Toluene)、乙苯(Ethylbenzene)、二甲苯(Xylene)为苯系物中的代表性物种,简称为BTEX。苯系物具有较强的毒性和致癌性,国际癌症研究中心(IARC)将苯分类为I类致癌物,乙苯分类为II类致癌物,环境空气中的BTEX通过呼吸道和皮肤进入人体,对人体健康影响较大。大气中的BTEX主要来源是机动车尾气、化石燃料燃烧、化工生产、工业试剂和涂料溶剂的使用等^[1-2]。

国内有学者分别对企业苯系物排放特征和苯系物健康影响评价开展研究。邵弈欣等^[3]研究制药行业生产线不同环节挥发性有机物(VOCs)排放特征,检测了BTEX等有机废气排放浓度,并核算排放量。崔如等^[4]研究某大型电子产品加工制造企业VOCs排放特征,发现涂装过程中车间内VOCs物种以苯系物及酮类物质为主。何秋生等^[5]研究了土法炼焦烟气和机械炼焦厂外大气中VOCs分布,得出炼焦废气VOCs以苯系物为主,高浓度的苯系物将对周边居民的健康构成威胁。张玉欣等^[6]对南京市北郊冬季大气苯系物进行健康风险评价,发现苯的致癌风险中汽车尾气排放高于美国环保署(US EPA)规定的安全阈值。杨婷等^[7]对北京市典型城区环境空气中苯系物的健康风险评价,认为苯系物对暴露人群尚不存在非致癌性风险,而苯在夏、秋和冬季对研究区暴露人群存在潜在的致癌性风险。邹宇等^[8]对广州市大气中苯系物进行健康风险评价,结论为苯系物对人群健康存在非致癌风险,苯的致癌风险超过了US EPA的建议值,会对人体健康造成潜在危害。陈若楠等^[9]对西南某化工园区周边区域环境空气中苯系物健康风险进行研究,苯系物致癌和非致癌风险均为成人大于儿童,成人和儿童的非致癌风险处于可接受水平,致癌风险处于不可接受水平。

目前,国内学者多侧重于研究企业废气中BTEX排放特征,或者开展环境空气中BTEX的来

源分析和健康风险评价研究。结合污染企业废气中BTEX排放情况,开展周边居民区环境空气暴露水平的健康风险评价的研究还较少见。现以江苏某化工企业作为研究对象,该企业是大型有机化工和精细化工生产基地,以苯为原料的苯化工产品(苯胺、硝基苯、环己胺、环己酮、氯苯等)和橡胶化学品是其主营业务,企业厂界外至周边3 km范围内有较密集的人群居住,考虑其污染特点和人群分布,选择该企业开展BTEX污染与健康影响研究具有一定的代表性。为了解该化工企业排放的BTEX污染特征、周边人群暴露状况、人群健康风险及所造成的健康影响,于2016年开展了该化工企业及周边区域调查,选取废气排放口和空气采样点进行BTEX的监测,并评估其健康风险,为BTEX污染防控提供依据。

1 研究方法

1.1 废气排放监测点位及频次

该化工企业与苯系物排放相关的废气排放口主要有2个:一是以苯为原料生产苯胺、硝基苯、氯化苯等有机化工产品的废气排放口;二是生产以橡胶助剂(防老剂、促进剂)为主体的精细化工产品的废气排放口。通过对企业实地调研,选择企业2个废气排放口(W1、W2)作为采样点,分别于2016年9月(秋季)、12月(冬季)开展监测,每季采集3 d,每天采样3次。

1.2 环境空气监测点位及频次

研究区域主导风向为东略偏南风,企业厂界下风向居民较多,周边居民投诉反映其废气污染较重,环境空气调查点位布设以主导风下风向人口聚居区为主,采样区域分布于企业周边偏西北区域的2 km范围内的社区,共布设4个空气采样点位(Q1、Q2、Q3、Q4),为研究污染物的关联度,采样点距离企业300~2 000 m不等。采样时间与废气监测时间基本一致,每季连续监测5 d。

1.3 采样和分析方法

废气苯系物样品用抽气泵、真空箱等设备采集到聚氟乙烯 (Tedlar) 袋中^[10], 于避光保温容器中保存, 8 h 之内通过液氮低温浓缩-气相色谱/质谱联用仪 (GC/MS) 进行分析, GC/MS 分析条件参考《挥发性有机物的测定 罐采样/气相色谱-质谱法》(HJ 759—2015)^[11], 全扫描方式、内标法定量。VOCs 混合标准气体也配至 Tedlar 气袋中, 按浓度从低到高进样分析, 从而绘制校准曲线。

环境空气中苯系物用恒定流量采样方式, 采集于预先清洗、抽真空的苏玛罐中, 于常温下保存, 20 d 内按照《HJ 759—2015》进行分析^[11], 全扫描方式、内标法定量。

1.4 质量控制

经检测, 气袋和苏玛罐全程序空白中目标苯系物浓度均低于方法定量检测下限; 废气中苯系物加标 10×10^{-9} 的回收率控制在 77.8% ~ 101%, 精密度相对标准偏差 (RSD) 为 10.7% ~ 27%。环境空气中苯系物加标 10×10^{-9} 的回收率控制在 81.9% ~ 104%, RSD 为 11% ~ 22.9%。

1.5 健康风险评估方法

研究采用 2009 年 US EPA 提出的健康风险评估方法计算苯系物浓度对暴露于该环境中的人群健康风险, 对各 BTEX 组分采用非致癌化合物风险危害商 (HQ) 进行评价, 苯和乙苯计算其致癌风险 (R)。具体计算公式如下^[12]:

经呼吸道吸入环境空气暴露浓度计算公式如下:

$$EC = \frac{C_a \times ET \times EF \times ED}{AT} \quad (1)$$

式中: EC——呼吸暴露浓度, $\mu\text{g}/\text{m}^3$; C_a ——空气中污染物浓度, $\mu\text{g}/\text{m}^3$; ET——暴露时间, 取值 4 h/d; EF——暴露频率, 取值 350 d/a; ED——暴露持续时间, 终生暴露赋值 76 a; AT——平均暴露

时间, 取 $350 \times 76 \times 4 = 106\,400$; 参数取值参照《中国人群暴露参数手册 (成人卷)》^[13]。

致癌风险值 (R) 计算公式如下:

$$R = EC \times IUR \quad (2)$$

式中: IUR——污染物暴露的吸入单位风险因子, $(\mu\text{g}/\text{m}^3)^{-1}$ 。US EPA 定义的致癌物质风险值 $R < 10^{-6}$ 时, 表明不存在致癌风险; 当 $R > 10^{-4}$ 时, 表明存在较高致癌风险; 当 R 为 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 时, 表明致癌风险在可接受范围内^[14]。

非致癌风险危害商值 (HQ) 计算公式如下:

$$HQ = \frac{EC}{Rfc \times 1\,000} \quad (3)$$

式中: Rfc——吸入参考浓度, $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。当 $HQ > 1$ 时, 表明特征污染物对人体具有非致癌性危害, 存在健康风险^[12]。

2 结果与讨论

2.1 监测结果

2.1.1 废气排放情况

废气排口苯系物各组分检出率达 98.6% ~ 100%, 废气中苯系物排放情况见表 1。由表 1 可见, 5 种苯系物中, 苯排放浓度最高, 平均质量浓度为 $17.245 \text{ mg}/\text{m}^3$, 甲苯次之, 平均质量浓度为 $2.522 \text{ mg}/\text{m}^3$, 间/对-二甲苯、邻-二甲苯、乙苯质量浓度平均值为 $0.008 \sim 0.023 \text{ mg}/\text{m}^3$ 。参照《化学工业挥发性有机物排放标准》(DB32/3151—2016) 中有组织排放限值评价, 苯超过该标准, 超标率为 26.4%, 超标倍数为 1.9 倍, 甲苯、二甲苯未超标。

2 个废气排放口 (W1、W2) BTEX 平均质量浓度分别为 $39.355, 0.275 \text{ mg}/\text{m}^3$, 生产橡胶助剂的车间废气排口 (W1) BTEX 浓度较高, 苯排放浓度在秋季和冬季均超标, 超标率分别为 30.6%, 22.2%, 以苯为原料生产有机产品的废气排口 (W2) 浓度较低, 秋季、冬季各项指标均未超标。

表 1 废气中苯系物排放情况

表 1 废气中苯系物排放情况								mg/m ³
组分	平均值	秋、冬季平均值		秋季		冬季		标准限值 ^①
		W1	W2	W1	W2	W1	W2	
苯	17.245	34.271	0.219	56.425	0.045	12.118	0.393	6
甲苯	2.522	4.999	0.045	9.446	0.023	0.552	0.066	25
间/对－二甲苯	0.018	0.031	0.004	0.046	0.004	0.016	0.004	40
邻－二甲苯	0.008	0.013	0.003	0.015	0.002	0.010	0.004	40
乙苯	0.023	0.041	0.005	0.020	0.005	0.062	0.005	
BTEX	19.815	39.355	0.275	65.952	0.078	12.759	0.472	

①《化学工业挥发性有机物排放标准》(DB32/3151—2016) 有组织排放限值。

由于秋季 W1 排口 BETX 质量浓度明显高于冬季, 总体秋季 BETX 质量浓度是冬季的 5.0 倍,W1 排口是 BETX 排放主要污染源,需要重点关注并进行治理。

2.1.2 环境空气中 BTEX

环境空气中苯系物检出率及质量浓度见表 2。由表 2 可见,4 个环境空气监测点位苯系物平均检出率均超过 80%,其中秋季检出率较高,达 95% 以上,冬季相对较低,检出率在 70% ~ 100%。监测

期间 BTEX 平均质量浓度为 47.31 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,各单组分质量浓度从高到低为:苯 > 甲苯 > 乙苯 > 间/对 - 二甲苯 > 邻 - 二甲苯,这与废气污染物排放浓度高低顺序一致。BTEX 秋季平均质量浓度是冬季的 3.3 倍,秋季浓度明显高于冬季,秋季和冬季 BTEX 5 种单组分质量浓度范围分别为 2.76 ~ 49.93,1.15 ~ 11.15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,除秋季和冬季气候因素变化对空气苯系物浓度影响外,与企业季节性排放有较大关联。

表 2 环境空气中苯系物检出率及质量浓度 ^①								
组分	秋、冬季		秋季			冬季		
	检出率/%	平均值	检出率/%	平均值	范围	检出率%	平均值	范围
苯	98.5	30.5	100	49.93	1.90 ~ 279	95	11.15	ND ~ 72.1
甲苯	100	8.88	100	11.69	3.61 ~ 20.7	100	6.07	0.686 ~ 13.5
间/对 - 二甲苯	87.5	2.52	100	3.42	0.710 ~ 7.52	75	1.63	ND ~ 4.45
邻 - 二甲苯	82.5	1.95	95	2.76	ND ~ 6.86	70	1.15	ND ~ 2.70
乙苯	90	3.46	100	4.72	1.47 ~ 7.71	80	2.19	ND ~ 5.49
BTEX		47.31		72.52			22.19	

①ND 代表未检出。

我国环境空气质量中没有对 BTEX 的评价标准,对照《大气污染物综合排放标准》(GB 16297—1996)中无组织排放监控浓度限值和《室内空气质量标准》(GB/T 18883—2002),苯、甲苯、二甲苯均达标准要求。目前已有较多文献对 BTEX 浓度进行报道,将其与其他城市和地区进行比较(表 3),由表 3 可见,与城市环境空气相比,本研究环境空气中 BTEX 质量浓度明显高于北京、广州、兰州等

城市;与工业园区周边等区域环境空气相比,本研究 BTEX 质量浓度高于宁波石化工业区和西南某化工园区周边,低于杭州湾上虞工业园区和重庆市某有机污染区域,与郑州市工业、交通、商业混杂区域相当。由于受监测时间、地点、实验环境等因素影响,数据比较有不确定性,总体来看研究区域环境空气中 BTEX 质量浓度处于中等水平。

表 3 有关文献中城市和地区苯系物污染情况								
城市/地区	监测时间	ρ (苯)	ρ (甲苯)	ρ (乙苯)	ρ (间/对 - 二甲苯)	ρ (邻 - 二甲苯)	ρ (BTEX)	文献
北京市	2014 年 2 月—2015 年 1 月	3.75	6.03	2.58	5.44	1.47	19.27	[7]
北京市	2012 年 8—9 月	1.72	5.41	1.19	2.09	0.53	10.94	[15]
广州市	2011 年 6 月—2012 年 5 月	3.48	15.72	5.79	7.60		32.59	[8]
兰州市	2017 年 12 月—2018 年 6 月	2.42	2.50	0.79	0.72	0.93	6.43	[16]
郑州市	2003 年冬季	17.23	16.34	3.79	8.26	2.41	48.03	[17]
重庆市某有机污染区域	2009—2010 年	14.76	50.79	14.20	23.49	7.89	111.13	[1]
杭州湾上虞工业园区		56.10	73.10	14.80	31.20	31.3	206.5	[18]
宁波石化工业区周边	2015 年 1—12 月	3.06	9.26	0.96	2.37	1.50	17.15	[19]
西南某化工园区周边	2020 年 8—11 月	4.37	11.19	4.14	7.69	4.20	31.59	[9]

2.2 苯系物的空间分布

环境空气 4 个监测点位中 Q1、Q2 为企业下风向且距厂界最近的社区监测点位,距离污染源约 300 和 500 m;Q3、Q4 分别为企业下风向厂界西北边 1 和 2 km 的社区监测点位。环境空气各监测点位

BTEX 各组分质量浓度见图 1。由图 1 可见,秋季 Q1 点位 BTEX 质量浓度明显高于其他点位,各点位 BTEX 质量浓度高低顺序为 Q1 (173.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) > Q2 (50.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) > Q3 (41.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) > Q4 (24.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$),这与距离化工企业远近显著相关,

其中苯的质量浓度从高至低变化是对 BTEX 浓度变化的关键因素,化工企业有机废气排放对近距离环境空气中 BTEX 浓度影响较为明显。冬季 Q3 点位 BTEX 质量浓度较高,各点位 BTEX 质量浓度高低顺序为 Q3 ($29.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > Q1 ($23.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > Q2 ($18.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > Q4 ($18.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$),这与距离化工企业远近相关性不明显。与冬天研究区域偏北风较多,监测期间采样点位没有处于下风向有关,另外与冬天监测期间废气排口 BTEX 浓度排放相比较小,对周边区域环境质量影响较小也有关。

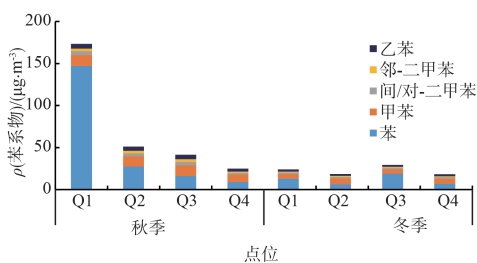


图 1 环境空气各监测点位 BTEX 各组分质量浓度

2.3 BTEX 来源分析

不同苯系物组分来源不同,含苯系物在内的 VOCs 来源识别方法有很多,许多学者运用比值分析法定性研究 VOCs 的来源,常用的有甲苯/苯(T/B)、苯/苯系物(B/BTEX)、乙苯/二甲苯(E/X)等。国内外研究表明,苯与甲苯的比值在 0.5 左右时,认为机动车排放是其主要污染源,若比值偏小则说明大气中 VOCs 主要来自石油化工和涂料使用;若 T/B 值较高则认为可能受生物质燃料和木炭燃烧的影响;T/B > 1 则主要受燃煤影响。各点位苯系物构成比值分析见表 4。由表 4 可见,环境空气 T/B 平均值为 0.63,秋季和冬季 T/B 比值范围分别在 0.09 ~ 0.96, 0.29 ~ 1.13,表明该化工企业周边社区空气除有石化企业影响外,一定程度上也受到交通排放源和燃烧源的影响。

BTEX 的大气光化学反应活性不同,其中苯的光化学活性最低,各点位 BTEX 单个组分浓度占比见图 2。由图 2 可见,各点位苯系物中苯的占比最高,并呈现距离化工企业越近,苯的占比越高的趋势,分析 B/BTEX 可在一定程度上反映废气排放对周边区域苯系物组分的影响。根据文献中 BTEX 质量浓度数据计算苯和苯系物比值,研究结果为:

表 4 各点位苯系物构成比值分析

季节	点位	甲苯/苯	间/对-二甲苯/乙苯	苯/苯系物
秋季	W1	0.09	0.77	0.85
	W2	0.45	0.72	0.54
	W3	0.79	0.76	0.39
	W4	0.96	0.59	0.37
	均值	0.57	0.71	0.54
冬季	W1	0.42	0.73	0.54
	W2	1.13	0.77	0.34
	W3	0.29	0.76	0.64
	W4	0.94	0.78	0.36
	均值	0.70	0.76	0.47
秋、冬季均值		0.63	0.73	0.50

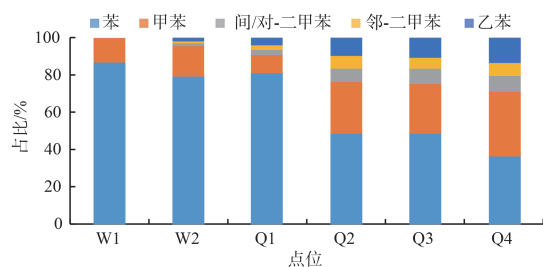


图 2 各点位 BTEX 各组分浓度占比

重庆市城区 2009—2010 年冬季和夏季 B/BTEX 分别为 0.15 和 0.05^[1];2011—2012 年广州市大气中 B/BTEX 为 0.11^[8];2017 年 12 月—2018 年 6 月兰州市大气中 B/BTEX 为 0.33^[16];天津城区污染过程中 2019 年 7 月监测数据 B/BTEX 为 0.45, 2020 年 1 月为 0.40^[20];本研究的 B/BTEX 比值均值为 0.50,范围在 0.36 ~ 0.86,相对其他城市较高,这可能与废气排口苯排放较高有直接关联。

间/对-二甲苯与乙苯的比值可作为光化学反应活性的指示,较高和较低的 X/E(二甲苯/乙苯)比值表明分别为本地来源和外源输送^[16],文献[1]、[6]、[8]、[16]、[20—22]中 X/E 比值范围为 0.91 ~ 2.47,本研究化工企业周边区域 X/E 为 0.73,比值范围在 0.59 ~ 0.78,各点位比值相对较低且差别不大,表明各点位监测期间 BTEX 排放源基本一致,主要受本地排放源的影响。

2.4 健康风险评估

环境空气 4 个监测点位苯系物的 HQ 和 R 值见表 5。由表 5 可见,监测期间 4 个点位 BTEX 的 HQ 范围为 $8.60 \times 10^{-5} \sim 3.94 \times 10^{-4}$,单个苯系物组分 HQ 的范围为 $5.99 \times 10^{-6} \sim 3.20 \times 10^{-4}$,其中苯的 HQ 最高,其次为甲苯、乙苯、二甲苯,苯系物的 HQ 均远 < 1,表明研究区域苯系物非致癌风险

在安全阈值范围内,4 个监测点位非致癌风险水平可以忽略不计。

苯系物(苯和乙苯)的 R 值范围为 $8.18 \times 10^{-6} \sim 7.61 \times 10^{-5}$,认为虽存在致癌风险但在可接受范围内,各点位致癌风险水平从高至低依次为 $Q1 > Q3 > Q2 > Q4$ 。苯各点位 R 值范围为 $7.33 \times$

$10^{-6} \sim 7.49 \times 10^{-5}$,乙苯各点位 R 值范围为 $8.45 \times 10^{-7} \sim 1.20 \times 10^{-6}$,除 $Q4$ 点位外,乙苯其余几个点位的 R 值均 $>10^{-6}$,有一定的致癌风险,致癌风险属于可接受范围内。苯的 R 值远高于乙苯,苯是该化工企业周边环境空气苯系物的致癌风险主要贡献污染物,应引起足够重视。

表 5 各点位环境空气中苯系物的非致癌风险(HQ)和致癌风险值(R)^①

污染物	HQ				R				Rfc/ ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	IUR/ ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) ⁻¹
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4		
苯	3.20×10^{-4}	6.72×10^{-5}	6.98×10^{-5}	3.13×10^{-5}	7.49×10^{-5}	1.57×10^{-5}	1.63×10^{-5}	7.33×10^{-6}	30	7.8×10^{-6}
甲苯	3.70×10^{-5}	3.86×10^{-5}	3.64×10^{-5}	2.99×10^{-5}					5 000	
间/对-二甲苯	1.21×10^{-5}	1.01×10^{-5}	1.13×10^{-5}	7.51×10^{-6}					100	
邻-二甲苯	8.83×10^{-6}	8.75×10^{-6}	8.59×10^{-6}	5.99×10^{-6}					100	
乙苯	1.60×10^{-5}	1.37×10^{-5}	1.48×10^{-5}	1.13×10^{-5}	1.20×10^{-6}	1.03×10^{-6}	1.11×10^{-6}	8.45×10^{-7}	1 000	2.5×10^{-6}
BTEX	3.94×10^{-4}	1.38×10^{-4}	1.41×10^{-4}	8.60×10^{-5}	7.61×10^{-5}	1.67×10^{-5}	1.74×10^{-5}	8.18×10^{-6}		

①Rfc 和 IUR 采用《污染场地风险评估技术导则》(HJ 25.3—2014)^[23] 污染物参数推荐值。

3 结论

(1)该化工企业 2 个有机废气排口 BTEX 平均质量浓度分别为 $39.355, 0.275 \text{ mg/m}^3$,5 个组分中苯质量浓度最高,超过《DB32/3151—2016》限值,超率达 26.4%。生产橡胶助剂的车间废气排口(W1)是 BTEX 排放主要污染源。秋、冬季监测期间该排口苯均超标,应重点关注。

(2)企业周边环境空气监测点位 BTEX 检出率均超过 80%,BTEX 秋季和冬季质量浓度分别为 72.52 和 $22.19 \mu\text{g/m}^3$,各组分质量浓度从高到低为:苯>甲苯>乙苯>间/对-二甲苯>邻-二甲苯,与废气排放口浓度高低顺序一致。秋季采样点呈现离化工企业越近 BTEX 质量浓度越高的趋势,化工企业有机废气排放对近距离环境空气 BTEX 质量浓度影响较为明显。与其他城市和地区进行比较,研究区域环境空气中 BTEX 平均质量浓度($47.31 \mu\text{g/m}^3$)处于中等水平。

(3)运用比值分析法定性研究 BTEX 来源,T/B、B/BTEX、X/E 平均比值分别为 0.63,0.50,0.73。T/B 值表明化工企业周边环境空气 BTEX 除受石化企业有机废气排放影响外,一定程度上也受交通排放、化石燃料燃烧等污染源的影响。B/BTEX、X/E 比值结果显示,BTEX 主要来源于本地的排放源,化工企业废气排放对苯的贡献较大。

(4)BTEX 单组分非致癌风险值在安全范围内,各点位 BTEX 非致癌风险值均 <1 ,说明监测期间该化工企业周边环境空气 BTEX 非致癌风险可以忽略不计。苯的致癌风险值范围在 $7.33 \times 10^{-6} \sim 7.49 \times 10^{-5}$,超过 10^{-6} ,有一定的致癌风险,且苯是 I 类致癌物质,应采取源头控制措施避免健康风险。

[参考文献]

- [1] 吴莉萍,周志恩,翟崇治,等.重庆市代表性城区冬季和夏季苯系物来源解析[J].中国环境监测,2014,30(5):26-30.
- [2] 王鸣,项萍,牛其恺,等.南阳市冬春交替期大气 VOCs 污染特征及来源解析[J].环境科学学报,2018,38(6):2233-2241.
- [3] 邵奕欣,陆燕,楼振纲,等.制药行业 VOCs 排放组分特征及其排放因子研究[J].环境科学学报,2020,40(11):4145-4155.
- [4] 崔如,马永亮.电子产品加工制造企业挥发性有机物(VOCs)排放特征[J].环境科学,2013,34(12):4585-4591.
- [5] 何秋生,王新明,赵利容,等.炼焦过程中挥发性有机物成分谱特征初步研究[J].中国环境监测,2005,21(1):61-64.
- [6] 张玉欣,安俊琳,林旭,等.南京北郊冬季挥发性有机物来源解析及苯系物健康评估[J].环境科学,2017,38(1):1-12.
- [7] 杨婷,李丹丹,单玄龙,等.北京市典型城区环境空气中苯系物的污染特征、来源分析与健康风险评价[J].生态毒理学报,2017,12(5):79-97.

- [8] 邹宇, 邓雪娇, 李菲. 广州市大气中苯系物健康风险评估[J]. 环境与健康杂志, 2014, 31(12): 1079-1081.
- [9] 陈若楠, 李廷真, 黄承桃, 等. 西南某化工园区周边区域环境空气中苯系物和卤代烃的污染特征及健康风险评估[J]. 环境监控与预警, 2021, 13(5): 80-86.
- [10] 环境保护部. 固定污染源废气 挥发性有机物的采样 气袋法: HJ 732—2014[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2014.
- [11] 环境保护部. 挥发性有机物的测定 罐采样/气相色谱-质谱法: HJ 759—2015[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2015.
- [12] 国家卫生健康委员会. 大气污染人群健康风险评估技术规范: WS/T 666—2019[S/OL]. [2019-07-22]. <http://www.nhc.gov.cn/wjw/pgw/202003/fb4c325cb7a0491db7723fa91f6b9387/files/fd4bd51002584fa0b33185e3733b27ec.pdf>.
- [13] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册(成人卷)[M]. 北京: 中国环境出版社, 2013.
- [14] 张涛, 穆肃, 范清华. 某大型化工企业周边居民区积尘中多环芳烃调查及健康风险评估[J]. 中国环境监测, 2019, 35(5): 79-86.
- [15] LI L, LI H, ZHANG X M, et al. Pollution characteristics and health risk assessment of benzene homologues in ambient air in the northeastern urban area of Beijing[J]. Journal of Environmental Sciences, 2014, 26(1): 214-223.
- [16] 管贤贤, 齐安安, 雷春妮, 等. 兰州市大气苯系物的化学活性特征与健康风险评估[J]. 环境科学学报, 2020, 40(2): 459-468.
- [17] 王玲玲, 王潇磊, 南淑清, 等. 郑州市环境空气中挥发性有机物的组成及分布特点[J]. 中国环境监测, 2008, 24(4): 66-69.
- [18] 袁合金, 许君意, 吕国军, 等. 杭州湾上虞工业园区环境空气中苯系物的调查及其特征[J]. 中国环境监测, 2012, 28(2): 15-17.
- [19] 章勤, 黄西腊, 王曙兴, 等. 宁波石化工业区周边环境空气中苯系物的分布特征和健康风险评估[J]. 环境与健康杂志, 2020, 37(4): 340-343.
- [20] 韩婷婷, 李颖若, 蒲维维, 等. 天津城区夏冬季典型污染过程中 BTEX 变化特征及其健康风险评估[J]. 环境科学, 2021, 42(11): 5210-5218.
- [21] 吴方垫, 王跃思, 安俊琳, 等. 北京奥运时段 VOCs 浓度变化、臭氧产生潜势及来源分析研究[J]. 环境科学, 2010, 31(1): 10-16.
- [22] 王东方, 邱海杰, 柳华斌, 等. 随州市环境空气中苯系物的污染特征[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(2): 94-98.
- [23] 环境保护部. 污染场地风险评估技术导则: HJ 25.3—2014[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2014.

(上接第106页)

- [25] POPE L E., MARCELLETTI J F., LEE R K, et al. The anti-herpes simplex virus activity of n-docosanol includes inhibition of the viral entry process[J]. Antiviral Research, 1998, 40(1-2): 85-94.
- [26] 姜铨, 何玲, 李卫东. 多取代烯丙基硅化合物的立体选择性合成研究[J]. 有机化学, 2019, 39(12): 3454-3459.
- [27] 刘晓丹. 异辛酸的市场前景及发展趋势[J]. 化工管理, 2021(31): 3-4.
- [28] BENJAMIN L, FRANCESCA M. Valorization of a saturated fatty acid to enantioenriched (S)-8-decalactone[J]. Synfacts, 2019, 15(6): 1661.
- [29] CHOWDHURY S K, DTTA T, CHATTOPADHYAY A P. Isolation of antimicrobial tridecanoic acid from bacillus sp. LBF-01 and its potentialization through silver nanoparticles synthesis: a combined experimental and theoretical studies[J]. 2021. 11(4): 573-587.
- [30] MURPHY C C., MURPHY E J., GOLOVKO M Y. Erucic acid is differentially taken up and metabolized in rat liver and heart[J]. Lipids, 2008, 43(5): 391-400.
- [31] 佚名. 芥酸的新用途[J]. 化学世界, 1985(8): 32.
- [32] 尚国锋. 苯叉丙酮在电镀中的应用[J]. 电镀与涂饰, 2013, 32(7): 21-23.
- [33] 程敏, 林伟斌, 谭丽容. 香精中丙烯酸乙酯、反-2-庚烯醛、苯叉丙酮和对叔丁基苯酚的测定方法研究[J]. 香料香精化妆品, 2019, 2(1): 33-36.
- [34] 孙晓波, 任珂, 栾向海, 等. 磷酸钨催化合成戊二酸二丁酯的研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2006, 12(4): 36-38.
- [35] 王芳, 马政生, 侯玉霞. 马来酸二乙基己酯的气相色谱分析[J]. 石油化工, 2012, 41(4): 461-464.
- [36] 万玉保, 古绪鹏, 曹春香. 粉煤灰复合型固体酸催化合成马来酸二异辛酯[J]. 石油化工, 2008, 37(2): 166-168.
- [37] 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. 食品安全国家标准 食品用香料通则: GB 29938—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [38] 孙玉泉, 张丽华. 3-甲基吡啶的合成与应用[J]. 天津化工, 2006, 20(4): 50-52.
- [39] 周琼. 浅析南京市中水回用现状及前景[J]. 智能城市, 2020(22): 2.
- [40] 邵锡斌. 颗粒态陆源有机物在长江口及其邻近海域的分布和迁移[D]. 上海: 华东师范大学, 2014.
- [41] 胡烨. 长江重点江段水体中 PPCPs 的分布特征和生态风险评估[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2021.
- [42] ZHA D P, LI Y, YANG C M, et al. Assessment of organophosphate flame retardants in surface water and sediment from a freshwater environment (Yangtze River, China) [J]. Environmental monitoring and assessment, 2018, 190(4): 222.
- [43] XING L Q, TAO M, ZHANG Q, et al. Occurrence, spatial distribution and risk assessment of organophosphate esters in surface water from the lower Yangtze River Basin [J]. Science of the Total Environment, 2020, 734: 139380.