

沥青路面铺设 VOCs 排放特征及风险评估

李婷婷^{1,2}, 郭送军^{1*}, 黄礼海³, 陈 锋³, 陆海涛², 刘 明², 梁小明², 陈来国^{2*} (1.广西大学资源环境与材料学院, 广西南宁 530004; 2.生态环境部华南环境科学研究所, 国家环境保护城市生态环境模拟与保护重点实验室, 广东 广州 510655; 3. 连州市环境监测站, 广东 清远 513400)

摘要: 为探究沥青路面铺设 VOCs 的排放特征、气味效应及毒性作用, 分别对沥青路面不同铺设阶段排放的 VOCs 进行监测. 结果显示, 沥青路面铺设排放的 VOCs 组成以烷烃、烯烃和芳香烃为主, 检出的 65 种 VOCs 浓度范围为 46.69~2179 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 按照铺路流程依次降低, 为路面摊铺>路面压实>路面冷却>路面常温服役, 其特征 VOCs 为十一烷、正戊烷、丙烯、甲苯、邻二甲苯、间二甲苯、对二甲苯、甲基丙烯酸甲酯、乙酸正丁酯; 芳香烃是影响沥青路面铺设臭气指数的主要污染物; 沥青路面铺设 VOCs 致癌风险指数范围为 1.89×10^{-6} ~ 5.35×10^{-5} , 主要贡献物为苯、乙苯 2 种致癌组分, 存在较大的潜在致癌风险.

关键词: 沥青铺路; VOCs; 排放特征; 风险评估

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2021)01-0073-08

Emission characteristics and health risk assessment of VOCs from asphalt pavement construction. LI Ting-ting^{1,2}, GUO Song-jun^{1*}, HUANG Li-hai³, CHEN Feng³, LU Hai-tao², LIU Ming², LIANG Xiao-ming², CHEN Lai-guo^{2*} (1.School of Resources, Environment and Materials, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2.State Environmental Protection Key Laboratory of Urban Ecological Environment Simulation and Protection, South China Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, Guangzhou 510655, China; 3.Environmental Monitoring Station of Lianzhou City, Qingyuan 513400, China). *China Environmental Science*, 2021,41(1): 73~80

Abstract: Volatile organic compounds (VOCs) at different stages of asphalt pavement construction were monitored for the sake of studying its emission characteristics, odor effect and toxicity. The results showed that 65 kinds of VOCs concentration ranged from 46.69 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ to 2179 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, the characteristic components of which were alkanes, alkenes and aromatics. The VOCs concentration was in a gradual decrease in the asphalt pavement construction process which was arranged in the following order: pavement paving > pavement compaction > pavement cooling > pavement in use at normal temperature. And the characteristic components comprised undecane, n-pentane, propylene, toluene, o-xylene, m-xylene, p-xylene, methyl methacrylate, n-butyl acetate. Aromatics contributed mainly to the odor of asphalt pavement construction. Besides, there was a large potential cancer risk for benzene and ethylbenzene, whose lifetime cancer risk (LCR) values ranged from 1.89×10^{-6} ~ 5.35×10^{-5} .

Key words: asphalt pavement construction; VOCs; emission characteristics; risk assessment

随着交通等基建项目的发展,我国新建道路逐年增加.根据交通运输部行业发展统计公报^[1]相关数据显示,截止 2019 年底,我国公路总里程 501.25 万 km,其中 90%以上为沥青路面.沥青在路面铺设过程处于高温状态,不仅会形成沥青烟,也会释放大量的挥发性有机物(VOCs).此外,沥青路面在常温常压服役期间,由于光照、气象、交通荷载等影响因素,同样会挥发少量 VOCs.VOCs 是导致臭氧生成的重要前体物^[2-6],对大气环境造成的影响和对施工人员造成的健康危害都不容忽视.

沥青 VOCs 成分复杂、种类繁多,主要由烷烃、芳香烃、多环芳烃、含硫化合物、杂环化合物等物质组成^[7].基于沥青路面施工烟气实测,结果表明沥

青 VOCs 含有烷烃类、酯类、酮类和醇类物质^[8];基于实验室自制沥青烟气产生、富集装置及沥青铺路模拟实验,结果表明沥青烟 VOCs 主要由烷烃类物质、芳香烃类物质、含硫化合物和杂环化合物组成^[9],且浓度随着温度、时间和空速的增加而增加,其中芳香烃类物质和杂环类物质占比上升,烷烃类物质占比降低^[10-11].目前国内对于沥青铺路 VOCs 污染特征的实测研究较少,南京市研究表明沥青铺路 VOCs

收稿日期: 2020-06-02

基金项目: 国家环保专项(第二次全国污染源普查);国家重点研发计划项目(2017YFC0212606);国家自然科学基金资助面上项目(41773130, 41573123);中央公益性科研院所业务专项(PM-zx703-201904-081)

* 责任作者, 郭送军, 教授, guosj@gxu.edu.cn; 陈来国, 研究员, chenlaiguo@scies.org

排放量大,是郊区 PM_{2.5} 与 O₃ 污染严重的成因之一^[12];抑烟沥青混凝土路面研究表明常见的低烟沥青排放的气态烃类物质相对较多^[13].对沥青铺路过程中排放 VOCs 的浓度组分、挥发规律和环境风险的相关研究还不够深入.

本研究通过实地调研沥青道路铺设施工现场,利用苏玛罐和特氟龙气袋采集不同阶段的气体样品,采用 GC-MS 分析对沥青排放的 VOCs 进行定性和定量分析,探究沥青道路铺设过程中 VOCs 的排放特征,评价其气味属性和环境风险,以期为国家开展沥青道路铺设 VOCs 污染防治工作提供科学依据和技术支持.

1 实验及方法

1.1 样品采集

本研究选取某市沿江路热拌 70 号石油沥青混合料路面铺设工程作为研究对象,铺设道路双向四车道,总长 1km,总宽 15m,总厚度 20cm.沥青在路面铺设过程中主要有 4 个环节,分别为热拌沥青混合料运输车卸料兼摊铺机摊铺过程、热拌沥青混合料压实成型过程、热拌沥青混合料高温冷却过程、沥青路面常温服役过程.

空气样品采集参考《环境空气挥发性有机物的

测定 罐采样气相色谱-质谱法》(HJ 759-2015)^[14]和《固定污染源废气挥发性有机物的采样 气袋法》(HJ 732-2014)^[15],常温服役沥青路面和环境背景点利用加装 2h 限流阀的苏玛罐(Entech,3.2L)进行采样,其中常温服役沥青路面处于可开放交通状态但未投入使用,环境背景点依据风向设置于采样区域上风向;沥青路面摊铺、沥青路面压实、沥青路面冷却 3 个阶段利用气袋(Teflon,3L)进行采样,采样前用待测气体清洗采样袋 3 次以上,以减小采样袋本底值对采样结果产生的影响.每个铺路阶段收集 3 个气袋平行样品,研究共采集 11 个样品包括 9 个气袋样品和 2 个苏玛罐样品.采样时间为 2019 年 9 月 25 日上午 09:00~14:00,采样期间风向为北风,风速为 1m/s,湿度范围为 30%~46%,气温范围为 28~32℃,受高温低湿静稳天气影响,大气污染物扩散条件一般.

沥青路面摊铺阶段采样位置距离摊铺机摊铺沥青混合料位置 1m,沥青路面压实阶段采样位置距离压路机压实位置 1m,采样高度均与成年人呼吸带高度一致,约为 1.5m.沥青路面冷却阶段、常温服役沥青路面和环境背景点采样位置高度与成年人呼吸带高度一致,约为 1.5m,以有效评估沥青铺路 VOCs 排放特征、恶臭影响及致癌风险.采样位置如图 1 所示.



图 1 沥青路面铺设采样点

Fig.1 The monitoring sites of the asphalt pavement construction

1.2 样品分析

本研究共检测了 65 种 VOCs,其中包括 29 种烷烃、10 种烯烃、1 种炔烃、17 种芳香烃和 8 种酯类物质,采用抽真空硅烷化不锈钢罐-预浓缩仪-气相色谱质谱法(GC-FID/MSD,Agilent 7890A-5975C)分析气体样品.利用预浓缩仪(Entech 7100)对样品进行前处理,通过快速接头进入自动进样系统(Entech 7032),稳定控制流量抽取 300mL 气体样品,完成 3 次浓缩后迅速升温将吸附的 VOCs 解析,由高

纯氦气(99.9%)注入色谱柱进行分离,并采用气质联用仪定性定量分析,具体分析方法详见文献[16].

1.3 质量保证

采用动态稀释法用高纯氦气将标样稀释成不同的浓度(5.00×10^{-9} , 10.0×10^{-9} , 20.0×10^{-9} , 50.0×10^{-9} , 100×10^{-9}),基于相应校准标准样品的保留时间和峰面积对烃类、酯类化合物进行定性和定量,标准曲线相关系数 R^2 均大于 0.900,线性关系良好.实验室空白样品目标化合物未检出或低于检出限,平行样分

析中 2 次检测目标化合物浓度的相对标准偏差小于 15%。

1.4 恶臭指数评估

在沥青路面铺设过程中,以阈稀释倍数作为衡量 VOCs 对于沥青臭气强度的指标^[17-18],计算公式如下:

$$M_i = C_i / u_i \quad (2)$$

式中: M_i 为 VOCs 组分 i 的阈稀释倍数; C_i 为 VOCs 组分 i 的浓度, $\times 10^{-9}$; u_i 为 VOCs 组分 i 的嗅阈值, $\times 10^{-9}$ 。

1.5 致癌风险评估

参考美国环境保护署(EPA)的综合风险信息系系统(IRIS),致癌表征指标可分为终生致癌风险(LCR)、潜在剂量评估职业慢性暴露慢性摄入量(CDI)和非致癌风险评估危害指数(HI)。致癌风险值 LCR 通过人体长期实际暴露浓度与致癌斜率因子的乘积来表示^[19-20],计算公式如下:

$$LCR_j = CDI_j \times SF_j \quad (3)$$

式中: LCR_j 为 VOCs 组分 j 的终生致癌风险,无量纲; CDI_j 为 VOCs 组分 j 的长期日摄入量, $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{d})$; SF_j 为 VOCs 组分 j 的致癌斜率因子, $(\text{kg}\cdot\text{d})/\mu\text{g}$ 。

VOCs 主要通过呼吸途径进入人体,鉴于沥青路面铺设受影响人群为成年职业人员且主要在夏秋两季施工,因此慢性暴露慢性摄入量 CDI 计算公式如下:

$$CDI_j = \frac{C_j \times IR \times ED \times EF}{365 \times BW \times AT} \quad (4)$$

式中: C_j 为 VOCs 组分 j 的质量浓度, $\mu\text{g}/\text{m}^3$; IR 为成人吸收速率,取 $19\text{m}^3/\text{d}$; ED 为暴露时间,取 25a; EF 为暴露频率,取 180d/a; BW 为成人平均体重,取 65kg; AT 为平均寿命,致癌风险评估取 70a,非致癌风险评估取 25a。

非致癌风险值 HI 通过长期日摄入量与非致癌参考剂量的比值来表示,计算公式如下:

$$HI_j = CDI_j / \text{Rfd}_j \quad (5)$$

式中: HI_j 为 VOCs 组分 j 的非致癌危害指数,无量纲; CDI_j 为 VOCs 组分 j 的长期日摄入量, $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{d})$; Rfd_j 为 VOCs 组分 j 的参考剂量, $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{d})$ 。

1.6 不确定性定性分析

本研究 VOCs 排放特征、风险评估结果与结论存在一定的不确定性,主要包括:(1)采集样品数量相

对较少;(2)沥青标号不同(如 70 号、90 号和 110 号),其 VOCs 排放浓度和特征组分可能存在差异;(3)沥青种类不同(如石油沥青、改性沥青和乳化沥青),其 VOCs 排放浓度和特征组分可能存在差异;(4)道路类型不同(如高速公路、城市道路等),单位沥青使用量不同,其 VOCs 排放浓度存在差异。本研究通过筛选确定以石油沥青铺设城市道路为主要研究对象,确保其定量定性分析能够基本代表大部分沥青路面铺设的 VOCs 排放特征及风险评估。采用平均相对响应因子进行定量计算。

定性定量分析中,以样品中目标物的相对保留时间、辅助定性离子和定量离子间的丰度比与标准中目标物对比进行定性。样品中目标化合物的定量计算公式如下:

$$\rho = \frac{A_x}{A_{is}} \times \frac{\varphi_{is}}{\text{RRF}} \times \frac{M}{22.4} \times f \quad (6)$$

式中: ρ 为样品中目标物的质量浓度, $\mu\text{g}/\text{m}^3$; A_x 为样品中目标物的定量离子峰面积; A_{is} 为样品中内标物的定量离子峰面积; φ_{is} 为样品中内标物的摩尔分数, nmol/mol ; RRF 为样品中目标物的平均相对响应因子,无量纲; f 为稀释倍数,无量纲; M 为样品中目标物的摩尔质量, g/mol ; 22.4 为标态状态下(273.15K, 101.325kPa 下)气体的摩尔体积, L/mol 。

2 结果与讨论

2.1 沥青路面铺设 VOCs 的排放特征

2.1.1 VOCs 的浓度特征 本研究沥青路面铺设过程 VOCs 浓度与环境背景点 VOCs 浓度对比结果表明,在摊铺阶段浓度上升至背景值的 13.24 倍,浓度最低的常温服役阶段也是背景值的 1.26 倍,表明沥青路面铺设过程可向环境排放大量 VOCs。扣除背景值影响,沥青路面铺设过程质量浓度范围为 46.69~2179 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, VOCs 浓度最高的阶段为沥青混合料摊铺,高达 2179 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,其次为沥青混合料压实, VOCs 浓度为 313.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,再次为沥青混合料冷却, VOCs 浓度为 89.46 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,最后为常温服役沥青路面, VOCs 浓度为 46.69 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。不同采样点位 VOCs 浓度如图 2 所示,可以看出,沥青路面铺设 VOCs 排放浓度按照摊铺流程依次降低,为路面摊铺>路面压实>路面冷却>路面常温服役。从其它沥青摊铺研究来看^[13],隧道施工沥青摊铺机周边空气中非甲烷总烃浓

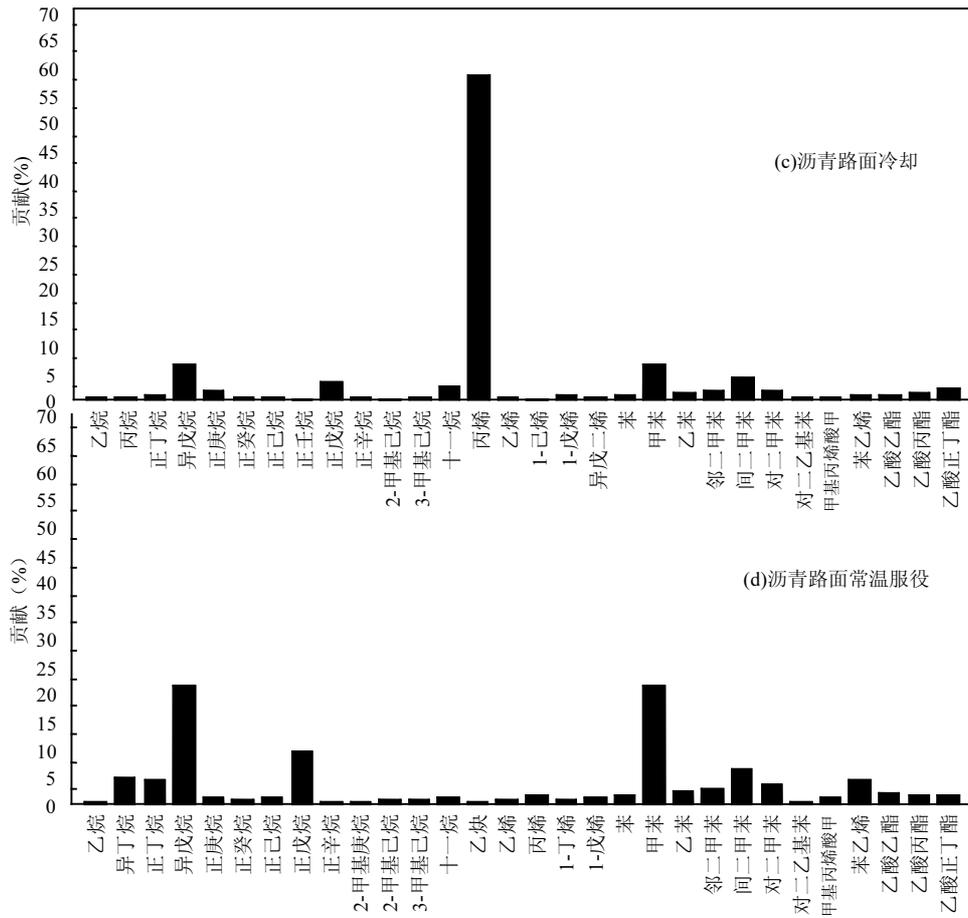


图 3 沥青路面不同铺设阶段 VOCs 浓度排名前 30 的组分及占比

Fig.3 Compositions and proportions of VOCs in the top 30 at different stages of the asphalt pavement construction

沥青路面铺设浓度排名前 30 的 VOCs 组分如图 3 所示,可以看出沥青路面摊铺阶段浓度高贡献组分为十一烷、乙酸正丁酯、正癸烷、正戊烷、正壬烷、间二甲苯、正庚烷、1,2,3-三甲苯、正辛烷、2-甲基庚烷,占比总和高达 63.1%。压实阶段浓度高贡献组分为十一烷、丙烯、正癸烷、对二乙基苯、1,2,3-三甲苯、甲基丙烯酸甲酯、1,2,4-三甲苯、乙酸正丁酯、正己烷,占比总和高达 91.8%。冷却阶段浓度高贡献组分为丙烯、异戊烷、甲苯、间二甲苯、正戊烷、十一烷、乙酸正丁酯、正庚烷、对二甲苯、邻二甲苯,占比总和高达 87.0%。常温服役阶段浓度高贡献组分为异戊烷、甲苯、乙苯、正戊烷、间二甲苯、异丁烷、正丁烷、甲基丙烯酸甲酯、对二甲苯、邻二甲苯、乙苯,占比总和高达 79.4%。

综合来看,沥青路面铺设各个阶段 VOCs 组成相似,特征组分为十一烷、正戊烷、丙烯、甲苯、邻二甲苯、间二甲苯、对二甲苯、甲基丙烯酸甲酯、乙酸正丁酯,占比总和均超过 49.2%。

2.2 沥青路面铺设 VOCs 恶臭指数评估

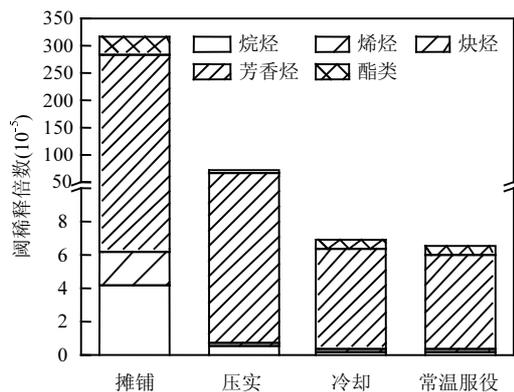


图 4 沥青路面不同铺设阶段 VOCs 的阈稀释倍数

Fig.4 Odor index of VOCs at different stages of the asphalt pavement construction

恶臭问题是近年来遭受居民投诉最多的环境问题之一,沥青在铺设施工过程中通常对人体嗅觉感官产生刺激作用,恶臭指数的升高会导致职业人员、周边居民等暴露人群厌恶指数的升高。本

研究根据我国典型恶臭物质嗅阈值数据,基于沥青路面铺设不同阶段 VOCs 臭气浓度,计算阈稀释倍数以确切地评价单一化合物对整体气味的贡献作用.由图 4 可知,芳香烃是影响沥青路面铺设不同阶段臭气指数的主要污染物,贡献占比均超过 80.0%,其中以间二甲苯、对二甲苯、邻二甲苯、苯乙烯、异丙苯、正丙苯、间乙基甲苯、对乙基甲苯等物质影响最大.除此之外,烷烃臭气指数以正戊烷、正庚烷、甲基环己烷、2-甲基庚烷、正癸烷、十一烷为主,烯烃以 1-丁烯、1-戊烯、异戊二烯、1-己烯为主,酯类物质以乙酸正丁酯、乙酸丙酯为主.

2.3 沥青路面铺设 VOCs 健康风险评估

参考美国环保署(US EPA)制定的大气有毒污染物名单^[23],苯系物通常具有慢性毒副作用和致癌风险,通过皮肤吸收或者呼吸道吸入,发生造血系统的损伤和机体器官的病变,导致急性和慢性中毒^[24],造成职业人员的健康危害.本研究检出的 65 种 VOCs 中存在健康风险有以下 5 类,包括苯、甲苯、乙苯、二甲苯(邻二甲苯、间二甲苯和对二甲苯)和乙酸乙酯.表 1 为沥青路面铺设不同阶段 VOCs 的致癌风险和非致癌风险评估值,可以算得致癌风险指数处于 $1.89 \times 10^{-6} \sim 5.35 \times 10^{-5}$ 之间,该范围不仅远远高于瑞典环境保护局、荷兰建设和环境部规定的最大可接受水平限值 $1.00 \times 10^{-6} a^{-1}$,也高于国际辐射

防护委员会规定的最大可接受水平限值 $5.00 \times 10^{-5} a^{-1}$ ^[25-26],表明沥青路面铺设存在较大的潜在致癌性.沥青路面铺设致癌风险和非致癌风险由高至低依次为沥青路面摊铺>沥青路面压实>沥青路面冷却>沥青路面常温服役.摊铺阶段 VOCs 非致癌危害指数之和为 1.02,大于 1,表明其非致癌健康风险超过可接受程度;而压实阶段、冷却阶段、常温服役阶段 VOCs 非致癌危害指数之和分别为 0.09、0.05 和 0.05,远远小于 1,表明其非致癌健康风险在可接受范围内.从致癌风险值的贡献来看,主要来源于苯,占比在 72.1%~86.9%之间;从非致癌风险值的贡献来看,同样主要来源于苯,占比在 53.8%~75.5%之间.结合致癌风险值及非致癌风险值,结果显示苯、乙苯这 2 种致癌物对长期从事沥青路面施工的职业暴露人群健康产生严重危害,应在今后建立的沥青道路铺设标准中加以严格控制.

其它工作环境的 VOCs 致癌风险评估研究结果显示,垃圾堆肥厂致癌风险值范围为 $1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-6}$ ^[27],制药厂致癌风险值范围为 $1.87 \times 10^{-9} \sim 2.54 \times 10^{-7}$ ^[19],污水处理厂致癌风险值为 1×10^{-6} ^[28],家具制造过程致癌风险值范围为 $3.70 \times 10^{-6} \sim 8.21 \times 10^{-6}$ ^[29],典型电子工业喷涂加工车间致癌风险值范围为 1.61×10^{-5} ^[30],比较可知沥青路面铺设职业人群比其它工作环境员工遭受的致癌风险更大,应当加以重视并做好职业健康防护.

表 1 沥青路面不同铺设阶段 VOCs 致癌风险值

Table 1 Health risk of VOCs at different stages of the asphalt pavement construction

VOCs	LARC	RFD	SF	摊铺		压实		冷却		常温服役	
				LCR	HI	LCR	HI	LCR	HI	LCR	HI
苯	1类	4	3.50×10^{-5}	3.86×10^{-5}	7.73×10^{-1}	3.22×10^{-6}	6.44×10^{-2}	1.59×10^{-6}	3.18×10^{-2}	1.38×10^{-6}	2.75×10^{-2}
甲苯	3类	80			6.38×10^{-2}		1.90×10^{-2}		1.04×10^{-3}		1.76×10^{-2}
乙苯	2B类	100	8.70×10^{-6}	1.49×10^{-5}	4.80×10^{-2}	4.86×10^{-7}	1.56×10^{-3}	4.68×10^{-7}	1.51×10^{-3}	5.11×10^{-7}	1.64×10^{-3}
二甲苯	3类	200			1.38×10^{-1}		6.20×10^{-3}		4.37×10^{-3}		4.15×10^{-3}
乙酸乙酯		900			1.08×10^{-4}		5.35×10^{-5}		1.09×10^{-4}		1.55×10^{-4}

注:1类:对人体致癌;2B类:可能对人体致癌;3类:对人体致癌性尚未归类的物质或混合物;RFD:参考剂量, $\mu g/(kg \cdot d)$;SF:致癌斜率因子, $kg \cdot d/\mu g$;LCR:致癌风险值,无量纲;HI:非致癌风险值,无量纲.

3 结论

3.1 沥青路面铺设 VOCs 浓度范围为 46.69~2179 $\mu g/m^3$,组成以烷烃、烯烃和芳香烃为主,特征 VOCs 为十一烷、正戊烷、丙烯、甲苯、邻二甲苯、间二

甲苯、对二甲苯、甲基丙烯酸甲酯、乙酸正丁酯.

3.2 芳香烃是影响沥青路面铺设臭气指数的主要污染物,贡献占比超过 80.0%.

3.3 沥青路面铺设 VOCs 致癌风险指数范围为 $1.89 \times 10^{-6} \sim 5.35 \times 10^{-5}$,超过可接受水平,存在较大的潜

在风险. 结合致癌风险值与非致癌风险值, 苯、乙苯是主要致癌和非致癌有害物质.

参考文献:

- [1] 中华人民共和国交通运输部. 2019 年交通运输行业发展统计公报 [EB/OL]. http://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202006/t20200630_3321335.html, 2020-05-12.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Statistical bulletin on the development of the transportation industry in 2019 [EB/OL]. http://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202006/t20200630_3321335.html, 2020-05-12.
- [2] 贾海鹰, 尹 婷, 瞿 霞, 等. 2015 年北京及周边地区臭氧浓度特征及来源模拟 [J]. 中国环境科学, 2017, 37(4): 1231-1238.
Jia H Y, Yin T, Qu X, et al. Characteristics and source simulation of ozone in Beijing and its surrounding areas in 2015 [J]. China Environmental Science, 2017, 37(4): 1231-1238.
- [3] 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.
Wang Q, Liu B X, Zhang D W, et al. Temporal and spatial distribution of VOCs and their role in chemical reactivity in Beijing [J]. China Environmental Science, 2017, 37(10): 3636-3646.
- [4] 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): 2140-2148.
Zhu S F, Huang X F, He L Y, et al. Variation characteristics and chemical reactivity of ambient VOCs in Shenzhen [J]. China Environmental Science, 2012, 32(12): 2140-2148.
- [5] 虞小芳, 程 鹏, 古颖纲, 等. 广州市夏季 VOCs 对臭氧及 SOA 生成潜力的研究 [J]. 中国环境科学, 2018, 38(3): 830-837.
Yu X F, Cheng P, Gu Y G, et al. Formation potential of ozone and secondary organic aerosol from VOCs oxidation in summer in Guangzhou, China [J]. China Environmental Science, 2018, 38(3): 830-837.
- [6] 何 丽, 罗萌萌, 潘 巍, 等. 成都秋季大气污染过程 VOCs 特征及 SOA 生成潜力 [J]. 中国环境科学, 2018, 38(8): 2840-2845.
He L, Luo M M, Pan W, et al. Characteristics and forming potential of secondary organic aerosols of volatile organic compounds during an air pollution episode in autumn Chengdu [J]. China Environmental Science, 2018, 38(8): 2840-2845.
- [7] 吴少鹏, 余 嫻, 陈美祝. 沥青挥发物的研究进展 [J]. 石油沥青, 2011, 25(3): 1-6.
Wu S P, Yu M, Chen M Z, et al. Research progress of asphalt volatiles [J]. Petroleum Asphalt, 2011, 25(3): 1-6.
- [8] 叶 伟, 杨 波, 吴 谨, 等. 基于隧道沥青路面温拌施工工艺产生沥青烟尘综合评价试验研究 [J]. 安全与环境学报, 2018, 18(4): 1503-1508.
Ye W, Yang B, Wu J, et al. Experimental assessment of the asphalt smoke based on the warm mixture technology of the tunnel asphalt pavement [J]. Journal of Safety and Environment, 2018, 18(4): 1503-1508.
- [9] Liang M, Ren S S, Fan W Y, et al. Characterization of fume composition and rheological properties of asphalt with crumb rubber activated by microwave and TOR [J]. Construction and Building Materials, 2017, 154: 310-322.
- [10] 才洪美. 沥青使用过程中对环境的影响研究 [D]. 青岛: 中国石油大学, 2010.
Cai H M. Research on the effect of asphalt components to environment in the course of using [D]. Qingdao: China University Of Petroleum, 2010.
- [11] 杨延梅, 谢 真, 杨玉飞, 等. 垃圾焚烧飞灰添加对沥青铺路烟气苯系物释放的影响 [J]. 环境污染与防治, 2019, 41(7): 777-782.
Yang Y M, Xie Z, Yang Y F, et al. Study on benzene series release in municipal solid waste incineration fly ash addition for asphalt pavement [J]. Environmental Pollution and Control, 2019, 41(7): 777-782.
- [12] 赵胜豪. 南京市沥青铺路 VOCs 排放现状及其控制对策 [J]. 中国环境管理干部学院学报, 2018, 28(2): 91-93.
Zhao S H. The status of asphalt paving vocs emissions and countermeasures for Nanjing [J]. Journal of the Environmental Management College of China, 2018, 28(2): 91-93.
- [13] 张新雨. 低烟气环保路用沥青及其混合料性能试验研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2011.
Zhang X Y. Green road with low flue gas asphalt and mixture experimental research [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2011.
- [14] HJ 759-2015 环境空气挥发性有机物的测定 罐采样气相色谱-质谱法 [S].
HJ 759-2015 Ambient air-Determination of volatile organic compounds- Collected by specially-prepared canisters and analyzed by gas chromatography. mass spectrometry [S].
- [15] HJ 732-2014 固定污染源废气挥发性有机物的采样气袋法 [S].
HJ 732-2014 Emission from stationary sources-Sampling of volatile organic compounds-Bags method [S].
- [16] 王晓婷. 太原市大气挥发性有机化合物特征与来源 [D]. 太原: 太原科技大学, 2016.
Wang X T. Characterization and sources of volatile organic compounds in atmospheric environment, Taiyuan [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2016.
- [17] 王秀艳, 高 爽, 周家岐, 等. 餐饮油烟中挥发性有机物风险评估 [J]. 环境科学研究, 2012, 25(12): 1359-1363.
Wang X Y, Gao S, Zhou J Q, et al. Risk assessment of vocs from cooking fumes [J]. Research of Environmental Sciences, 2012, 25(12): 1359-1363.
- [18] 王 亘, 翟增秀, 耿 静, 等. 40 种典型恶臭物质嗅阈值测定 [J]. 安全与环境学报, 2015, 15(6): 348-351.
Wang G, Qu Z X, Geng J, et al. Testing and determination of the olfactory thresholds of the 40 kinds of typical malodorous substances [J]. Journal of Safety and Environment, 2015, 15(6): 348-351.
- [19] 徐志荣, 王浙明, 许明珠, 等. 浙江省制药行业典型挥发性有机物臭氧产生潜力分析及健康风险评估 [J]. 环境科学, 2013, 34(5): 1864-1870.
Xu Z R, Wang Z M, Xu M Z, et al. Health risk assessment and ozone formation potentials of volatile organic compounds from pharmaceutical industry in Zhejiang province [J]. Environmental Science, 2013, 34(5): 1864-1870.
- [20] 王叶晴, 段小丽, 李天昕, 等. 空气污染健康风险评估中暴露参数的研

- 究进展 [J]. 环境与健康杂志, 2012,29(2):104-108.
- Wang Y Q, Duan X L, Li T X, et al. Inhalation exposure factors in health risk assessment [J]. *Journal of Environment and Health*, 2012,29(2):104-108.
- [21] 余 嫔. 沥青挥发性有机化合物(VOC)的释放及其对沥青性能的影响 [D]. 武汉:武汉理工大学, 2012.
- Yu M. The release of volatile organic compounds in asphalts and its influences on asphalt performances [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012.
- [22] 崔培强. 沥青 VOC 分析技术及抑制方法研究 [D]. 武汉:武汉理工大学, 2015.
- Cui P Q. Research methodologies on the VOC emissions from bituminous materials and its inhibitor [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2015.
- [23] EPA/630/P-03/001A, NCEA-F-0644A. Draft final guidelines for carcinogen risk assessment [S].
- [24] 王 超, 杨旭东, 关 军, 等. 飞机座舱挥发性有机化合物健康风险评估研究 [J]. 暖通空调, 2015,45(5):77-81.
- Wang C, Yang X D, Guan J, et al. Health risk assessment of volatile organic compounds in aircraft cabin [J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2015,45(5):77-81.
- [25] 孟宪林, 王晓红, 姜曼曼. 某煤炭资源型城市大气污染物健康风险评估 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012,44(6):41-43.
- Meng X L, Wang X H, Jian M M. Health risk assessment of air pollution for some coal resource-based city [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2012,44(6):41-43.
- [26] 胡冠九, 穆 肃, 张祥志, 等. 空气中挥发性有机物污染状况及健康风险评估 [J]. 环境监控与预警, 2010,2(1):5-8.
- Hu G J, Mu S, Zhang X Z, et al. Current situation with volatile organic compounds pollution in air and health risk assessment [J]. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2010,2(1):5-8.
- [27] 李海青, 祁光霞, 刘欣艳, 等. 夏季有机生活垃圾堆肥过程恶臭排放特征及健康风险评估 [J]. 环境科学研究, 2020,33(4):868-875.
- Li H Q, Deng G X, Liu X Y, et al. Emission characteristics and health risk assessment of odorous pollutants from organic fraction of municipal solid waste compost in summer [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020,33(4):868-875.
- [28] 黄岑彦, 林佳梅, 佟 磊, 等. 污水处理厂的挥发性有机物排放特征及健康风险评估 [J]. 环境污染与防治, 2018,40(6):704-709.
- Huang C Y, Lin J M, Tong L, et al. Emission characteristics and health risk assessment of volatile organic compounds from a sewage treatment plant [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2018,40(6):704-709.
- [29] 佟瑞鹏, 张 磊, 杨校毅, 等. 家具制造过程中 VOCs 的来源分析及环境健康风险评估 [J]. 环境科学, 2018,39(2):672-683.
- Tong R P, Zhang L, Yang X Y, et al. Source analysis and environmental health risk assessment of vocs in furniture manufacturing [J]. *Environmental Science*, 2018,39(2):672-683.
- [30] 何梦林, 王 旒, 陈扬达, 等. 广东省典型电子工业企业挥发性有机物排放特征研究 [J]. 环境科学学报, 2016,36(5):1581-1588.
- He M L, Wang N, Chen Y D, et al. Emission characteristics of volatile organic compounds (VOCs) from electronic manufacturing factory of Guangdong Province [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016,36(5):1581-1588.

作者简介: 李婷婷(1995-),女,广西北海人,硕士,主要研究方向为大气污染.发表论文 1 篇.