

山东省食用植物油加工行业 VOCs 排放特征、环境影响及其健康风险评估

南艺婷¹, 张鑫¹, 龚安保², 解欢², 李皎³, 陈姝芮², 李丽⁴, 管旭², 张庆竹^{1*}, 王文兴¹

(1.山东大学环境研究院, 山东 青岛 266237; 2.山东省生态环境规划研究院国家环境保护陆海统筹生态治理与系统调控重点实验室, 山东 济南 250101; 3.山东天为工程技术有限公司, 山东 淄博 255000; 4.山东金熙环保科技有限公司, 山东 济南 250014)

摘要:为研究山东省食用植物油加工行业挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)排放特征及其健康风险,选取山东省1家大豆油加工企业A和1家牡丹籽油加工企业B,共布设9个采样点位,分析VOCs质量浓度、组分特征、臭氧生成潜势(ozone formation potential, OFP),评价生产车间的人体健康风险。结果表明:A企业浸出工艺段蒸脱废气VOCs质量浓度最高(178.98 mg/m³),VOCs组分均以烷烃为主,A企业的优势物种为正己烷及其同分异构体(2,3-二甲基丁烷、3-甲基戊烷等),B企业的优势物种为正丁烷和异丁烷。2家企业臭氧生成潜势分别为166.40、2.72 mg/m³,其中A企业对OFP贡献最大的组分是含氧VOCs(oxygenated volatile organic compounds, OVOCs),B企业对OFP贡献最大的组分是烷烃,其次是OVOCs。B企业原料库、萃取车间、包装车间VOCs质量浓度存在非致癌风险;致癌风险评估中,B企业成品库中三氯甲烷对人体致癌均存在确定风险,萃取车间中三氯甲烷存在大概率致癌风险;A企业浸出车间和B企业成品库、包装车间甲醛对人体致癌存在大概率风险,其余车间甲醛存在小概率致癌风险。

关键词:食用植物油加工;VOCs;排放特征;OFP;健康风险评估

中图分类号:X511 **文献标志码:**A

引用格式:南艺婷,张鑫,龚安保,等.山东省食用植物油加工行业VOCs排放特征、环境影响及其健康风险评估[J].山东大学学报(工学版),2025,55(1):125-137.

NAN Yiting, ZHANG Xin, GONG Anbao, et al. VOCs emissions in the edible vegetable oil processing industry: characterization, environmental impacts and health risks[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2025, 55(1):125-137.

VOCs emissions in the edible vegetable oil processing industry: characterization, environmental impacts and health risks

NAN Yiting¹, ZHANG Xin¹, GONG Anbao², XIE Huan², LI Jiao³, CHEN Shurui², LI Li⁴, GUAN Xu², ZHANG Qingzhu^{1*}, WANG Wenxing¹

(1. Institute of Environmental Research, Shandong University, Qingdao 266237, Shandong, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory of Land and Sea Ecological Governance and Systematic Regulation, Shandong Academy for Environmental Planning, Jinan 250101, Shandong, China; 3. Shandong Tianwei Engineering Technology Co., Ltd., Zibo 255000, Shandong, China; 4. Shandong Jinxi Environmental Protection Technology Co., Ltd., Jinan 250014, Shandong, China)

Abstract: In order to study the emission characteristics of volatile organic compounds (VOCs) and their health risks in the edible vegetable oil processing industry in Shandong Province, one soybean oil processing enterprise (A) and one peony seed oil processing enterprise (B) were selected in Shandong Province, with a total of nine sampling sites, to analyze the mass concentration of VOCs, the characteristics of the components, the ozone formation potential (OFP), and the human health risk of the production workshops was also evaluated. The results showed that the highest mass concentration of VOCs (178.98 mg/m³) was found in the evaporation off-gas from the leaching process section of the A enterprise. The VOCs components were all dominated by alkanes, with n-hexane and its isomers (2,3-dimethylbutane, 3-methylpentane, etc.) as the dominant species in the A enterprise and n-butane and isobutane in the B enterprise. The OFP values of the two enterprises were 166.40 mg/m³ and 2.72 mg/m³,

收稿日期:2023-12-21

基金项目:山东省泰山学者特聘专家资助计划(ts201712003)

第一作者简介:南艺婷(1999—),女,山西运城人,硕士研究生,主要研究方向为大气环境化学。E-mail:yitingnan@126.com

*通信作者简介:张庆竹(1970—),女,山东日照人,教授,博士生导师,博士,主要研究方向为大气环境化学。E-mail:zqz@sdu.edu.cn

respectively, where the component contributing most to OFP in the A enterprise was oxygenated VOCs (OVOCs), and the component contributing most to OFP in the B enterprise was alkanes, followed by OVOCs. There was a non-carcinogenic risk of VOCs mass concentration in raw material storage, extraction workshop, and packaging workshop of the B enterprise. In the evaluation of carcinogenic risk, there was a definite risk of trichloromethane to human carcinogenicity in the finished product warehouse of the B enterprise, and there was a high probability of carcinogenicity risk of trichloromethane in the extraction workshop. There was a high probability of formaldehyde carcinogenicity risk to human carcinogenicity in the leaching workshop of the A enterprise, the finished product warehouse, and the packaging workshop of the B enterprise, and there was a small probability of formaldehyde carcinogenicity risk to human carcinogenicity in the rest of the workshops.

Keywords: edible vegetable oil processing; VOCs; emission characteristics; OFP; health risk assessment

0 引言

近年来,我国空气质量明显改善,但是臭氧(O_3)污染问题逐渐凸显,引发越来越多学者的关注^[1-4]。2013—2020年山东省臭氧浓度呈逐年上升趋势,臭氧污染日趋严重^[5]。挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)为地面 O_3 和 $PM_{2.5}$ 形成的重要前体物,VOCs的治理已成为我国大气环境治理的瓶颈,是 O_3 和 $PM_{2.5}$ 协同控制的关键^[6-8]。直接接触VOCs可能会对呼吸系统、造血系统和神经系统产生急性或慢性影响,包括感觉刺激、过敏、哮喘甚至白血病^[9-13]。2010—2017年,工业源VOCs排放量大幅增加,其他来源的排放量(例如:移动源、天然源等)逐渐减少^[14],根据2010年工业源VOCs排放清单对全国范围内臭氧生成潜势(ozone formation potential, OFP)进行分析,发现山东省VOCs的OFP位居全国首位^[15],文献[16]运用排放因子法估算2020年工业源VOCs排放量,发现山东省是全国前四大排放省份之一。山东省作为京津冀周边的重工业省份,同时也是“2+26”城市中的重要省份,其空气质量状况对全国空气质量改善至关重要。VOCs源成分谱研究是空气污染防治源头治理的基础^[17],因此开展山东省本地化源成分谱研究,有助于掌握本地精细化VOCs排放特征及关键活性组分,可以为VOCs的减排管控、健康风险防控提供科学依据,从而为山东省实现精准治污提供科学依据和参考。

食用植物油加工过程中采用正己烷等有机溶剂为浸出溶剂,因此食用植物油加工行业是一类重要的VOCs排放源。据国家统计局统计,2021年我国精制食用植物油产量达4 973.11万t,其中山东省产量为558.9万t,占总产量的11.23%,是食用植物油生产大省之一,2019年山东省食用植物油加工行业VOCs排放贡献量最大^[18],但是当前该行业VOCs治理、管控等工作起步较晚,研究较少^[19]。文献[18]通过对菜

籽油和大豆油加工企业浸出装置VOCs废气进行采集分析,得到浸出工艺段成分谱,并获取了排放系数,核算了全国食用植物油行业VOCs排放量;文献[20]对2家大型大豆油加工企业浸出工艺、精炼工艺、污水处理厂的有组织和无组织废气进行采集分析,得到浸出工艺段和浸出+精炼工艺段源成分谱,并提出该行业控制对策与建议;文献[21]对大豆油加工和大豆油+菜籽油加工企业VOCs主要排放环节进行分析,并对无组织车间进行健康风险评价。以上研究表明正己烷及其同分异构体是该行业特征物种。由于不同地区VOCs削减政策不同,企业使用尾气治理装置不同,以上研究并不能代表山东省本地食用植物油加工行业源成分谱。

随着消费需求的增长和消费能力的提高,大豆油代替菜籽油成为我国食用植物油的最主要消费品种^[22]。另外,牡丹籽油作为山东省的特色高端油,生产工艺与大豆油加工企业的浸出法不同,使用的有机溶剂也不同,但是鲜有人对牡丹籽油生产行业VOCs排放特征进行研究。近年来,随着我国食用油加工行业废气排放要求的不断加严,当前食用植物油VOCs排放特征发生较大变化,大豆油制造行业VOCs排放特征也需要进一步更新。本研究选取山东省1家大豆油加工企业和1家牡丹籽油加工企业,通过企业调研与现场采样、实验室分析,对该行业主要生产工艺环节VOCs排放质量浓度、组分构成及OFP进行研究,分析该行业无组织排放点位VOCs质量浓度对人体的健康风险,以期为山东省建立食用植物油加工行业本地化、精细化源成分谱提供重要的数据支撑,同时为该行业健康风险防控提供科学依据,从而为山东省实现精准治污提供科学依据和参考。

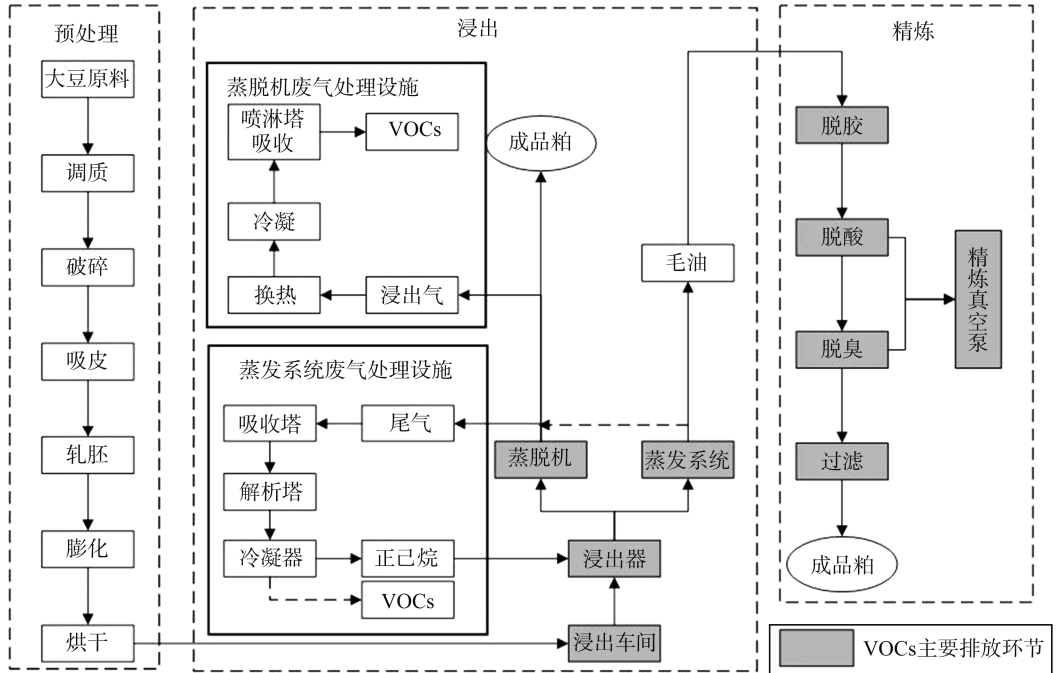
1 材料与方法

1.1 研究对象和加工工艺

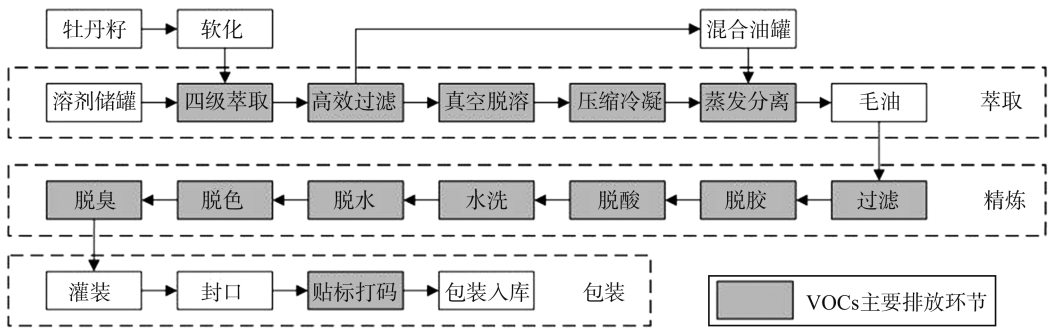
大豆油是我国产量最大的食用油,也是山东省

主要生产的食用油,本研究选取山东省大豆油生产大型企业作为研究对象,该企业生产工艺为浸出法,通过冷凝回收利用有机溶剂,采用喷淋方法处理排气筒尾气,大豆油生产工艺流程及 VOCs 排放环节如图 1(a)所示。牡丹籽油是山东省的特色食用油,生产规模相对较小,选取菏泽(牡丹籽油的产

地)一家企业作为研究对象,该企业采用亚临界低温萃取工艺,生产车间有机废气直接逸散,未安装尾气处理装置,牡丹籽油生产工艺流程及 VOCs 排放环节如图 1(b)所示。2 家企业调研情况如表 1 所示。



(a) 大豆油加工企业生产工艺流程图及 VOCs 排放环节



(b) 牡丹籽油加工企业生产工艺流程图及 VOCs 排放环节

图 1 大豆油和牡丹籽油加工企业生产工艺流程图及 VOCs 排放环节

Fig.1 Production process flow chart and VOCs emission link of soybean oil and peony seed oil processing enterprises

表 1 典型食用植物油加工企业基本情况

Table 1 Typical process flow chart and sewage link for edible vegetable oil processing

企业代码	主要原料	年原料用量/t	主要产品	产品年产量/t	生产工艺
A	大豆	806 430	大豆油	240 000	浸出法
			豆粕	990 300	
			脂肪酸	384	
			皂角	28 800	
B	牡丹籽	1 000	牡丹籽油	175	亚临界低温萃取

1.2 样品采集

2022 年 10 月,在山东省选取大豆油加工企业 A 和牡丹籽油加工企业 B 为研究对象,对企业集中排放的排气筒(有组织排放)或半敞开式的生产

车间(无组织排放)进行采样,样品采集均在企业生产设备正常运行且开工率不低于 70% 的情况下进行,共在 9 个点位采集样品,具体采样点位信息见表 2。

表 2 样品采集具体信息
Table 2 Specific information of sampling

企业代码	采样点	工艺环节	排放环节	采样点位	VOCs 处理技术
A	a_1	浸出工艺段	排气筒	蒸发系统(有组织)	冷凝
	a_2	浸出工艺段	排气筒	蒸脱机(有组织)	冷凝-喷淋
	a_3	浸出工艺段	设备和管道组件泄露	车间内(无组织)	
	a_4	污水处理厂	液面逸散	排气筒(有组织)	化学喷淋
	a_5	罐区	储罐呼吸阀泄露	仓库内(无组织)	
B	b_1	成品库	设备和管道组件泄露	仓库内(无组织)	
	b_2	原料库	设备和管道组件泄露	仓库内(无组织)	
	b_3	萃取工艺段	设备和管道组件泄露	车间内(无组织)	
	b_4	包装工艺段	油墨挥发	车间内(无组织)	

现场有组织点位采样依据文献[23],采样前需观察、确保气袋无破损,由于气袋对样品保存时间短,所有样品均在 24 h 内完成测定^[24];无组织点位采样方法依据文献[25],使用 3.2 L 不锈钢内表面硅烷化处理 SUMMA 罐进行采集,去除颗粒物和 水,过滤头和采样罐之间采用特氟龙管连接,采样前后分别使用压力表测试真空度^[26]。采样时间约为 20 min,每个采样点位采集 1 个样品。

醛酮类物质采样方法参照文献[27],使用 DNPH 管采集醛酮类化合物样品,采样流量为 0.2 L/min,有组织点位采样时间约为 10 min,无组织点位采样时间约为 20 min,采气体积为 2~4 L。

1.3 样品分析

参照文献[25]和美国环保署推荐的 TO-15 方法,采用大气浓缩仪-气相色谱质谱法分析 VOCs。气体样品首先使用 Entech 7200 三级冷阱预浓缩仪进行前处理,将去除水和二氧化碳后的 VOCs 捕集在第三级冷阱,此时迅速升温利用氦气将样品以极快的速度转移到色谱柱进行分离,并利用 GC/MS 系统(Agilent 8890B—5977B)对样品进行分析。

醛酮类化合物样品分析参照文献[27]规定的采样方法,采用超高效液相色谱仪(UHPLC, Ultimate 3000, Thermo Scientific, USA)对醛酮类化合物样品进行分析。该研究检测 VOCs 和醛酮类化合物合计共 119 种。

1.4 质量保证与质量控制

SUMMA 罐参照 TO-15 提供的方法进行清洗,每批清洗 10~20 个采样罐不等,并从中随机选取 1~2 个采样罐进行清洗空白检验;在利用有组织源

采样系统进行采样前,先将与烟气或废气接触的管路用纯净空气反复吹洗,去除管路内表面可能存在的杂质;分别制备实验室空白、全程序空白、运输空白进行实验室检测;为保证 GC-MS 检测数据的有效性和可靠性,在实验室的日常分析过程中,在正式建立工作曲线和每批样品分析前进行 GC-MS 系统运行检查,每日对工作曲线中 1 个浓度水平、每月对 4 个浓度水平的混合标准样品进行测定,定量结果与配气理论质量浓度偏差范围<30%(美国 EPA TO-15 方法)。

1.5 臭氧生成潜势计算

使用最大增量反应活性(maximum incremental reactivity, MIR)结合 VOCs 物种排放质量浓度计算臭氧生成潜势,计算公式为

$$P_{OF} = \sum M_i \times [C_i] \quad (1)$$

式中: P_{OF} 为臭氧生成潜势, mg/m^3 ; M_i 为第 i 种 VOC 物种的最大增量反应活性,本研究 M_i 取值参考文献[28-30]; C_i 为第 i 种 VOC 的质量浓度, mg/m^3 。

1.6 健康风险评估

摄入、皮肤摄取和吸入均是人体接触污染的重要途径,该研究仅对吸入途径对人体造成的健康风险进行评价^[31]。采取 2009 年美国环保署提出的针对特定场所吸入途径污染物的健康风险评估方法(EPA-540-R-070-002)评估无组织采样车间有毒有害 VOCs 对人体的影响。该方法将污染物对人体健康影响分为致癌风险和非致癌风险,分别利用危险指数 H_1 和终身癌症风险 R_{isk} 评估 VOCs 的非致癌和致癌风险^[21,32-34]。

计算污染物的暴露质量浓度

$$C_E = \frac{C \times T_E \times F_E \times T_{ED}}{T_A \times 365 \times 24}, \quad (2)$$

式中: C_E 为污染物暴露质量浓度, mg/m^3 ; C 为污染物在空气中的质量浓度, mg/m^3 ; T_E 为暴露时间, 每天取 8 h; F_E 为暴露频率, 每年取 260 d; T_{ED} 为暴露持续时间, 取 30 a; T_A 为平均时间, 致癌风险取 70 a, 非致癌风险取 30 a。

非致癌风险伤害熵值为

$$H_Q = \frac{C_E}{R_{fc} \times 1000}, \quad (3)$$

$$H_1 = \sum H_Q, \quad (4)$$

式中: H_Q 为非致癌风险伤害熵值, 无量纲; R_{fc} 为参考质量浓度, mg/m^3 ; H_1 为多种物质危害熵值的总和, 无量纲, 当 $H_1 > 1$ 时存在非致癌风险^[21]。

终身致癌风险为

$$R_{isk} = C_E \times R_{IU}, \quad (5)$$

式中: R_{isk} 为终身致癌风险, 无量纲; R_{IU} 为单位吸入致癌风险, $\text{m}^3/\mu\text{g}$ 。

当 $R_{isk} \geq 1 \times 10^{-4}$ 时存在确定致癌风险, $1 \times 10^{-5} \leq R_{isk} < 1 \times 10^{-4}$ 时存在大概率致癌风险, $1 \times 10^{-6} \leq R_{isk} < 1 \times 10^{-5}$ 时存在大概率致癌风险^[35]。

2 结果与讨论

2.1 不同采样点位 VOCs 排放质量浓度

2家食用植物油加工企业各采样点位的 VOCs 质量浓度水平如表 3 所示, 其中 a_1 、 a_2 、 a_4 为有组织采样点, a_3 、 a_5 、 b_1 、 b_2 、 b_3 、 b_4 为无组织采样点。

表 3 2家企业各采样点 VOCs 质量浓度

Table 3 Levels of VOCs mass concentration at sampling points of two enterprises

采样点	C_i
a_1	1.22
a_2	178.98
a_3	2.71
a_4	13.29
a_5	0.66
b_1	0.49
b_2	4.86
b_3	1.94
b_4	0.35

由表 3 可知, 大豆油加工企业浸出工艺段蒸脱废气(采样点 a_2) VOCs 排放质量浓度明显高于其他工艺段, 而牡丹籽油加工企业由于规模较小, 未开

展 VOCs 废气收集处理工作, 因此采样均为无组织采样, 质量浓度均较低 ($0.35 \sim 4.86 \text{ mg}/\text{m}^3$), 其中原料存储车间 VOCs 质量浓度最高 ($4.86 \text{ mg}/\text{m}^3$), 萃取车间次之 ($1.94 \text{ mg}/\text{m}^3$)。2家企业采样处的 VOCs 质量浓度为 $0.35 \sim 178.98 \text{ mg}/\text{m}^3$, 其中采样点 a_2 的 VOCs 排放质量浓度 ($178.98 \text{ mg}/\text{m}^3$) 较高, 这可能是由于 a_2 排气筒风量、采样点位截面积相比其他有组织点位均较小。无组织排放点的监测结果显示两家企业无组织排放质量浓度均较低。

2.2 不同采样点 VOCs 组分构成

2家企业各采样点 VOCs 类别占比如图 2 所示。

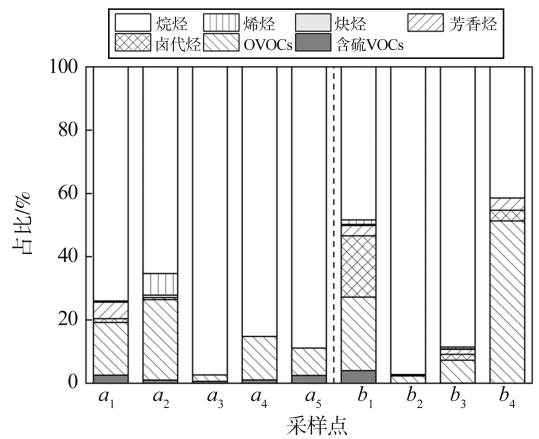


图 2 2家企业各采样点位 VOCs 组分类别占比
Fig.2 VOCs component category proportion at sampling points of two enterprise

由图 2 可知, 2家企业采样点处 VOCs 组分均以烷烃为主, 占比分别为 $65.34\% \sim 97.36\%$ 和 $41.45\% \sim 97.22\%$ 。研究表明, 烷烃中占比较高的组分与企业所使用的溶剂有关^[20], 大豆油加工企业采用正己烷作为浸出溶剂, 牡丹籽油加工企业使用的主要有机溶剂是正丁烷, 2家采用的浸出溶剂不同, 因此主要 VOCs 组分具有差异性, 各采样点主要 VOCs 组分及质量分数如表 4 所示。

表 4 各采样点位主要 VOCs 质量分数

Table 4 Mass fraction of main VOCs at each sample

采样点	主要 VOCs 组分	质量分数/%
a_1	2,3-二甲基丁烷	52.35
	丙酮	7.45
	甲基环戊烷	5.88
	乙醛	5.26
	正十二烷	4.87
	正戊烷	3.50
	丙烷	2.32
	间,对-二甲苯	2.07
	甲硫醚	2.05
	正十一烷	1.74

表4(续)

采样点	主要 VOCs 组分	质量分数/%
a_2	乙烷	25.71
	正戊烷	23.57
	乙醛	21.95
	丙烷	7.59
	丙醇	2.95
	异戊二烯	1.96
	1-戊烯	1.79
	2,2-二甲基丁烷	1.57
a_3	乙烷	1.39
	正己烷	49.56
	2,4-二甲基戊烷	19.18
	3-甲基戊烷	12.82
	2-甲基戊烷	9.50
	环戊烷	4.83
	异丙醇	1.29
	正戊烷	1.21
	甲硫醇	0.59
	甲醛	0.33
乙醛	0.21	
a_4	正己烷	44.20
	2,4-二甲基戊烷	17.52
	3-甲基戊烷	12.08
	2-甲基戊烷	10.11
	乙醛	6.71
	丙酮	2.53
	2-己酮	1.73
	异丙醇	1.42
	4-甲基-2-戊酮	0.84
甲硫醚	0.71	
a_5	正己烷	41.53
	2,4-二甲基戊烷	19.11
	3-甲基戊烷	15.75
	2-甲基戊烷	12.03
	异丙醇	6.44
	甲硫醇	2.46
	甲醛	0.82
	乙醛	0.65
	正十二烷	0.46
丙酮	0.46	
b_1	正己烷	13.40
	氯仿	9.87
	二氯甲烷	9.07
	正戊烷	8.70
	异戊烷	8.27
	正丁烷	7.69
	丙烷	5.72
	乙酸乙酯	4.81
	二硫化碳	3.99
	异丙醇	3.99

表4(续)

采样点	主要 VOCs 组分	质量分数/%
b_2	正丁烷	87.97
	异丁烷	7.23
	丙烷	1.02
	乙醛	0.57
	异丙醇	0.50
	正戊烷	0.46
	异戊烷	0.37
	丙醛	0.30
b_3	乙酸乙酯	0.30
	反式-2-丁烯	0.24
	正丁烷	77.51
	异丁烷	4.37
	正戊烷	2.07
	异戊烷	1.93
	乙醛	1.75
	二氯甲烷	1.61
	丙烷	1.07
	萘	0.96
b_4	异丙醇	0.89
	己醛	0.79
	正丁烷	34.20
	四氢呋喃	12.57
	甲乙酮	9.94
	乙醛	8.27
	甲基丙烯酸甲酯	4.80
	己醛	4.29
	正戊烷	3.89
甲苯	3.84	
甲醛	3.43	
二氯甲烷	3.38	

由表4可知,大豆油加工企业中除 a_2 采样点外其余采样点占比较高的组分为正己烷及其同分异构体(2,3-二甲基丁烷、3-甲基戊烷、2-甲基戊烷等),这与其他学者的研究结果一致^[18,20-21,36],能够作为该行业VOCs排放特征物种。 a_2 采样点最主要的VOCs组分为乙烷、正戊烷、乙醛等,占比分别为25.71%、23.57%、21.95%,这主要是因为浸出车间蒸脱机有机废气经过第一次处理由 a_1 排气筒排放后剩余小分子气体继续向上逸散,经过处理后由 a_2 排气筒排放。牡丹籽油加工企业采样点中占比较高的组分为正丁烷和异丁烷,可作为该行业VOCs排放特征物种。此外, b_4 采样点另一主要VOCs组分为OVOCs,这主要是来源于印刷过程中挥发的油墨^[37-41]。

2.3 VOCs成分谱及臭氧生成潜势

大豆油加工企业 a_3 、 a_5 无组织排放点VOCs质量浓度较低,可忽略不计,因此采用有组织排放点

位(a_1 、 a_2 、 a_4) VOCs 排放平均质量浓度代表该企业 VOCs 排放质量浓度从而得到 VOCs 成分谱,牡丹籽油加工企业采用 4 个采样点位 VOCs 的平均质量

浓度代表该企业 VOCs 排放质量浓度从而得到 VOCs 成分谱,并根据 M_i 计算 P_{OF} , 2 家企业 VOCs 成分谱及其各物种的 C_i 与 P_{OF} 如表 5 所示。

表 5 2 家企业 VOCs 成分谱与 OFP
Table 5 VOCs component spectrum and OFP of the two enterprises 单位:(mg/m^3)

序号	物种	大豆油加工企业		牡丹籽油加工企业	
		C_i	P_{OF}	C_i	P_{OF}
1	正丁烷	3.08	3.55	1.49	1.71
2	异丁烷	0.14	0.17	0.11	0.14
3	正戊烷	14.09	18.46	0.03	0.04
4	异戊烷	0.11	0.16	0.02	0.04
5	正己烷	1.96	2.43	0.02	0.03
6	丙烷	4.54	2.22	0.02	0.01
7	2-甲基戊烷	0.45	0.67	0	0
8	3-甲基戊烷	0.54	0.96	0	0
9	环戊烷	0.01	0.03	0	0
10	乙烷	15.34	4.29	0	0
11	正十二烷	0.03	0.01	0	0
12	2,2-二甲基丁烷	0.94	1.10	—	—
13	2,3-二甲基丁烷	0.21	0.21	—	—
14	甲基环戊烷	0.16	0.35	—	—
15	2,4-二甲基戊烷	0.78	1.20	—	—
16	2-甲基己烷	—	—	—	—
17	环己烷	—	—	—	—
18	3-甲基己烷	—	—	—	—
19	2,3-二甲基戊烷	0.68	0.91	—	—
20	2,2,4-三甲基戊烷	—	—	—	—
21	正庚烷	—	—	—	—
22	甲基环己烷	—	—	—	—
23	2,3,4-三甲基戊烷	—	—	—	—
24	2-甲基庚烷	—	—	—	—
25	3-甲基庚烷	—	—	—	—
26	正辛烷	—	—	—	—
27	正壬烷	—	—	—	—
28	正癸烷	0	0	—	—
29	正十一烷	0.01	0	—	—
30	反式-2-丁烯	—	0	0	0.04
31	乙烯	0.83	7.44	0	0.04
32	丙烯	0.17	2.01	0	0
33	异戊二烯	1.17	12.40	0	0
34	1-丁烯	0.60	5.87	—	—
35	丁二烯	—	—	—	—
36	顺式-2-丁烯	—	—	—	—
37	1-戊烯	1.07	7.71	—	—
38	反式-2-戊烯	0.03	0.30	—	—
39	顺式-2-戊烯	0.22	2.28	—	—
40	1-己烯	—	—	—	—
41	乙炔	0.45	0.43	0	0
42	甲苯	0	0	0.01	0.04
43	萘	0	0.01	0	0.02
44	苯	—	—	—	—
45	乙苯	0	0.01	—	—

表 5(续)

序号	物种	大豆油加工企业		牡丹籽油加工企业	
		C_i	P_{OF}	C_i	P_{OF}
46	间,对-二甲苯	0.01	0.07	—	—
47	邻二甲苯	0	0.02	—	—
48	苯乙烯	0	0	—	—
49	异丙基苯	—	—	—	—
50	正丙苯	—	—	—	—
51	间-乙基甲苯	0	0	—	—
52	4-乙基甲苯	—	—	—	—
53	1,3,5-三甲苯	—	—	—	—
54	邻-乙基甲苯	—	—	—	—
55	1,2,4-三甲苯	0	0	—	—
56	1,2,3-三甲基苯	0	0	—	—
57	间-二乙基苯	—	—	—	—
58	对-二乙基苯	0	0	—	—
59	二氯甲烷	0	0	0.02	0
60	三氯甲烷	—	—	0.01	0
61	一氯甲烷	0.39	0.02	0	0
62	1,4-二氯苯	0	0	0	0
63	二氟二氯甲烷	0	0	—	—
64	1,1,2,2-四氟-1,2-二氯乙烷	—	—	—	—
65	氯乙烯	—	—	—	—
66	一溴甲烷	—	—	—	—
67	氯乙烷	—	—	—	—
68	一氟三氯甲烷	—	—	—	—
69	1,1-二氯乙烷	—	—	—	—
70	1,2,2-三氟-1,1,2-三氯乙烷	—	—	—	—
71	顺 1,2-二氯乙烷	—	—	—	—
72	亚乙基二氯(1,1-二氯乙烷)	—	—	—	—
73	反 1,2-二氯乙烷	—	—	—	—
74	1,1,1-三氯乙烷	—	—	—	—
75	四氯化碳	—	—	—	—
76	1,2-二氯乙烷	—	—	—	—
77	三氯乙烯	—	—	—	—
78	1,2-二氯丙烷	—	—	—	—
79	一溴二氯甲烷	—	—	—	—
80	顺式-1,3-二氯-1-丙烯	—	—	—	—
81	反式-1,3-二氯-1-丙烯	0	0	—	—
82	1,1,2-三氯乙烷	—	—	—	—
83	四氯乙烯	—	—	—	—
84	二溴一氯甲烷	—	—	—	—
85	1,2-二溴乙烷	—	—	—	—
86	氯苯	—	—	—	—
87	三溴甲烷	—	—	—	—
88	四氯乙烷	—	—	—	—
89	1,3-二氯苯	—	—	—	—
90	氯代甲苯	—	—	—	—
91	1,2-二氯苯	—	—	—	—
92	1,2,4-三氯苯	—	—	—	—
93	1,1,2,3,4,4-六氟-1,3-丁二烯	—	—	—	—

续表

序号	物种	大豆油加工企业		牡丹籽油加工企业	
		C_i	P_{OF}	C_i	P_{OF}
94	乙醛	13.41	87.72	0.02	0.16
95	甲基丙烯酸甲酯	—	0	0.01	0.12
96	甲醛	0.01	0.08	0.01	0.10
97	四氢呋喃	—	—	0.02	0.07
98	丙醛	0.19	1.37	0.01	0.06
99	己醛	0.01	0.03	0.01	0.04
100	甲乙酮	0.01	0.01	0.01	0.02
101	正戊醛	0	0.02	0	0.01
102	乙酸乙酯	—	—	0.02	0.01
103	异丙醇	1.82	1.11	0.02	0.01
104	2-甲氧基-甲基丙烷	—	—	0.01	0.01
105	巴豆醛	0	0	0	0
106	甲基丙烯醛	0	0.01	0	0
107	丙酮	0.16	0.06	0.01	0
108	乙酸乙烯酯	—	—	—	—
109	1,4-二噁烷	—	—	—	—
110	4-甲基-2-戊酮	0.04	0.14	—	—
111	2-己酮	0.16	0.50	—	—
112	丙烯醛	—	—	—	—
113	丁醛	0	0	—	—
114	对甲苯醛	—	—	0	0
115	苯甲醛	0	0	0	0
116	二硫化碳	0.10	0.02	0.01	0
117	甲硫醇	0.20	0	—	—
118	甲硫醚	0.34	0	—	—
119	二甲二硫醚	0.02	0	—	—

注：“—”表示未检出。

由表 5 可知,大豆油加工企业 VOCs 成分谱排列前 10 的特征物种为乙烷、正戊烷、乙醛、丙烷、正丁烷、正己烷、异丙醇、异戊二烯、1-戊烯、2,2-二甲基丁烷,质量浓度为 0.94~15.34 mg/m³。然而其他学者研究表明食用植物油加工行业 VOCs 特征物种为正己烷及其同分异构体,这说明同一行业不同企业 VOCs 成分谱有所差异,但是特征物种没有变化,均是 VOCs 成分谱排列前 10 的组分。牡丹籽油加工企业 VOCs 成分谱排列前 10 的特征物种为正丁烷、异丁烷、正戊烷、异戊烷、丙烷、二氯甲烷、乙醛、正己烷、四氢呋喃、异丙醇,质量浓度为 0.02~1.49 mg/m³,食用植物油加工行业 VOCs 主要排放源是浸出溶剂的损耗^[20],牡丹籽油加工过程使用的浸出溶剂为正丁烷,这与该企业 VOCs 成分谱特征物种一致。根据 VOCs 成分谱及其各物种的 M_i 估算出大豆油加工企业 P_{OF} 为 166.40 mg/m³、牡丹籽油加工企业 P_{OF} 为 2.72 mg/m³。2 家企业 VOCs 质

量浓度占比与 OFP 贡献情况如图 3 所示。

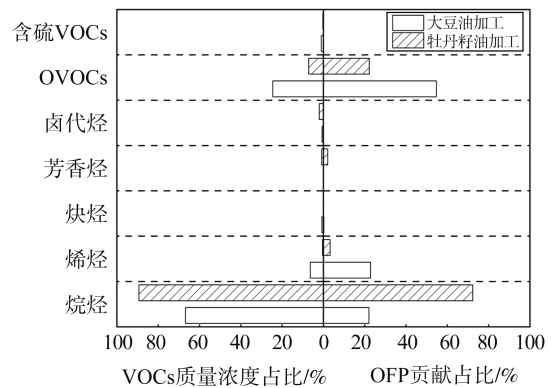


图 3 2 家企业 VOCs 质量浓度占比与 OFP 贡献情况
Fig.3 Contribution of VOCs mass concentration and OFP for two enterprises

由图 3 可看出,大豆油加工企业 VOCs 组分类别对 OFP 贡献最大的物种是 OVOCs,占比达到 54.73%,其次是烷烃和烯烃,占比分别为 22.08%和 22.84%,这与文献[20]的研究结果不一致,原因可

能是浸出工艺蒸脱废气(采样点 a_2) 的 VOCs 质量浓度最高,很大程度上决定了 VOCs 成分谱。牡丹籽油加工企业 VOCs 组分类别对 OFP 贡献最大的物种是烷烃,其次是 OVOCs,占比分别为 72.33% 和 22.20%,正丁烷、异丁烷是 OFP 主要贡献物种。2 家企业烯烃和 OVOCs 对 OFP 的贡献占比与质量浓度占比相比较有所提高,但是烷烃和卤代烃有所降

低,这主要是因为烯烃和 OVOCs 各物种的 M_i 较高,烷烃和卤代烃各物种 M_i 较低。芳香烃、含硫 VOCs 和炔烃由于其质量浓度占比极小,所以变化不明显。

2.4 健康风险评价

该研究对 2 家食用植物油加工企业共 6 个车间无组织 VOCs 质量浓度对人体的健康风险进行评价,结果如表 6、7 所示。

表 6 企业各车间非致癌风险评价
Table 6 Assessment of non-carcinogenic risk of each workshop in the enterprises

VOCs 物种	a_3		a_5		b_1		b_2		b_3		b_4	
	H_Q	H_I	H_Q	H_I	H_Q	H_I	H_Q	H_I	H_Q	H_I	H_Q	H_I
甲苯	0		0		7.46×10^{-4}		0		5.89×10^{-4}		6.41×10^{-4}	
正戊烷	7.76×10^{-3}		0		0.01		5.27×10^{-3}		9.52×10^{-3}		3.25×10^{-3}	
正己烷	0.46		0.09		0.02		1.46×10^{-3}		4.21×10^{-3}		0	
丙烯	0		0		0		0		3.17×10^{-5}		0	
乙醛	0.15		0.11		0.13		0.73		0.9		0.77	
二硫化碳	0		0		6.58×10^{-3}		0		5.09×10^{-4}		0	
1,4-二氯苯	0	0.63	0	0.22	2.37×10^{-4}	0.23	0	1.18	0	2.71	0	1.07
二氯甲烷	0		0		0.02		3.44×10^{-3}		0.01		4.71×10^{-3}	
甲基乙基酮	2.26×10^{-5}		1.12×10^{-5}		1.03×10^{-4}		1.14×10^{-4}		1.94×10^{-4}		1.66×10^{-3}	
甲基丙烯酸甲酯	0		0		4.34×10^{-3}		0		0		5.73×10^{-3}	
萘	0		0		0		0		1.48		0	
丙醛	0.02		0.01		0.04		0.44		0.31		0.29	
四氢呋喃	0		0		7.24×10^{-4}		5.94×10^{-4}		8.90×10^{-4}		5.25×10^{-3}	

表 7 企业各车间致癌风险评价
Table 7 Carcinogenic risk of each workshop in the enterprises

VOCs 物种	R_{isk}					
	a_3	a_5	b_1	b_2	b_3	b_4
二氯甲烷	0	0	3.59×10^{-7}	7.08×10^{-8}	2.55×10^{-7}	9.69×10^{-8}
三氯甲烷	0	0	1.12×10^{-3}	0	7.02×10^{-5}	0
甲醛	0.12×10^{-4}	7.11×10^{-5}	0.23×10^{-4}	8.37×10^{-5}	6.48×10^{-5}	0.16×10^{-4}

非致癌风险评价中,牡丹籽油加工企业原料库(b_2)、萃取车间(b_3)、包装车间(b_4)参与分析各物种非致癌风险熵值分别为 $1.14 \times 10^{-4} \sim 0.44$ 、 $3.17 \times 10^{-5} \sim 1.48$ 、 $6.41 \times 10^{-4} \sim 0.77$,总危害指数分别为 1.18、2.71、1.07,均超过了美国国家环保局标准要求的临界值 1.00,说明 b_2 、 b_3 、 b_4 车间参与分析的 VOCs 组分存在非致癌风险。其余参与评价的 3 个车间总危害指数分别为 0.63、0.22、0.23,均小于 1.00,说明这 3 个车间参与分析的 VOCs 组分不存在非致癌风险。

致癌风险评价中,二氯甲烷在 6 个车间的致癌风险分别为 0、0、 3.59×10^{-7} 、 7.08×10^{-8} 、 2.55×10^{-7} 、 9.69×10^{-8} ,均小于美国国家环保局标准要求的临界值 1.00×10^{-6} ,说明二氯甲烷在 6 个车间均不存在致癌风险;三氯甲烷在牡丹籽油加工企业成品库(b_1)、萃取车间(b_3)的致癌风险分别为 1.12×10^{-3} 、

7.02×10^{-5} ,所以三氯甲烷在成品库(b_1)对人体致癌均存在确定风险,在萃取车间(b_3)对人体致癌存在大概率风险,其余 4 个车间的致癌风险均为 0,不存在致癌风险;甲醛在大豆油加工企业浸出车间(a_3)和牡丹籽油加工企业成品库(b_1)、包装车间(b_4)的致癌风险分别为 0.12×10^{-4} 、 0.23×10^{-4} 、 0.16×10^{-4} ,说明这 3 个车间甲醛对人体致癌存在大概率风险,甲醛在大豆油加工企业罐区(a_5)和牡丹籽油加工企业原料库(b_2)、萃取车间(b_3)的致癌风险分别为 7.11×10^{-5} 、 8.37×10^{-5} 、 6.48×10^{-5} ,说明这 3 个车间甲醛对人体致癌存在小概率风险。

3 结论

选取山东省 2 家食用植物油加工企业,分别为大豆油加工企业和牡丹籽油加工企业,共布设 9 个

采样点,研究其 VOCs 排放质量浓度、组分构成及 OFP,并分析该行业 VOCs 无组织排放质量浓度对人体的健康风险,得出如下结论。

(1)该研究大豆油加工企业有组织排放点位 VOCs 质量浓度为 1.22 ~ 178.98 mg/m³,平均质量浓度为 64.50 mg/m³,其中 VOCs 质量浓度最高点位在浸出工艺蒸脱废气排口;食用植物油加工企业无组织排放点位 VOCs 质量浓度为 0.35 ~ 4.86 mg/m³,平均质量浓度为 1.84 mg/m³。

(2)食用植物油加工企业 VOCs 排放大类均以烷烃为主,占比分别为 65.34%~97.36%和 41.45%~97.22%,烷烃的主要成分与食用油加工过程中使用的有机溶剂有关。大豆油加工企业除浸出工艺蒸脱废气采样点外,其余采样点占比较高的组分为正己烷及其同分异构体(2,3-二甲基丁烷、3-甲基戊烷、2-甲基戊烷等),可作为该行业 VOCs 排放特征物种。浸出工艺蒸脱废气采样点最主要的 VOCs 组分为乙烷、正戊烷、乙醛等,占比分别为 25.71%、23.57%、21.95%。牡丹籽油加工企业采样点中占比较高的组分为正丁烷和异丁烷,可作为该行业 VOCs 排放特征物种,此外,包装车间 OVOCs 的贡献同样突出。

(3)大豆油加工行业(浸出法) VOCs 特征物种为正己烷及其同分异构体, P_{OF} 为 166.40 mg/m³,对 OFP 贡献最大的组分是 OVOCs,占比达到 54.73%,其次是烷烃和烯烃,占比分别为 22.08%和 22.84%,冷凝、喷淋末端治理设施相比于石蜡油吸收能够更好地抑制 O₃ 生成;牡丹籽油加工行业(亚临界低温萃取工艺) VOCs 特征物种为正丁烷和异丁烷, P_{OF} 为 2.72 mg/m³,对 OFP 贡献最大的组分是烷烃,其次是 OVOCs,占比分别为 72.33%和 22.20%,正丁烷、异丁烷是 OFP 主要贡献物种。

(4)对 2 家食用植物油加工企业共 6 个车间无组织 VOCs 质量浓度开展人体健康风险评估。非致癌风险评估中,牡丹籽油加工企业原料库、萃取车间、包装车间参与分析各物种的总危害指数分别为 1.18、2.71、1.07,均超过了美国国家环保局标准要求的临界值 1.00,存在非致癌风险;其余参与评价的 3 个车间总危害指数均小于 1.00,无非致癌风险。致癌风险评估中,6 个车间二氯甲烷致癌风险均小于临界值 1.00×10^{-6} ,均不存在致癌风险;牡丹籽油加工企业成品库中三氯甲烷对人体致癌均存在确定风险,萃取车间(b_3)中三氯甲烷存在大概率致癌风险,其余 4 个车间中三氯甲烷不存在致癌风险;大豆油加工企业浸出车间和牡丹籽油加工企业成品库、

包装车间甲醛对人体致癌存在大概率风险,其余车间甲醛对人体致癌存在小概率风险。

参考文献:

- [1] WANG P F, GUO H, HU J L, et al. Responses of PM_{2.5} and O₃ concentrations to changes of meteorology and emissions in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 662: 297-306.
- [2] XIAO Q Y, GENG G N, XUE T, et al. Tracking PM_{2.5} and O₃ pollution and the related health burden in China 2013—2020[J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 56(11): 6922-6932.
- [3] XUE L K, WANG T, GAO J, et al. Ground-level ozone in four Chinese cities: precursors, regional transport and heterogeneous processes[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, 14(23): 13175-13188.
- [4] LU K D, GUO S, TAN Z F, et al. Exploring atmospheric free-radical chemistry in China: the self-cleansing capacity and the formation of secondary air pollution[J]. *National Science Review*, 2019, 6(3): 579-594.
- [5] 刘义, 陈乐奇, 高飞, 等. 基于空间自相关的山东省臭氧浓度时空特征分析[J]. *中南农业科技*, 2023, 44(7): 112-117.
LIU Yi, CHEN Leqi, GAO Fei, et al. Spatial and temporal characteristics of ozone concentration in Shandong Province based on spatial autocorrelation[J]. *South-Central Agricultural Science and Technology*, 2023, 44(7): 112-117.
- [6] MOZAFFAR A, ZHANG Y L. Atmospheric volatile organic compounds (VOCs) in China: a review[J]. *Current Pollution Reports*, 2020, 6(3): 250-263.
- [7] HE Z M, LIU P F, ZHAO X X, et al. Responses of surface O₃ and PM_{2.5} trends to changes of anthropogenic emissions in summer over Beijing during 2014-2019: a study based on multiple linear regression and WRF-Chem[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 807: 150792.
- [8] DONG Z X, XING J, ZHANG F F, et al. Synergetic PM_{2.5} and O₃ control strategy for the Yangtze River Delta, China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2023, 123: 281-291.
- [9] TONG R P, ZHANG L, YANG X Y, et al. Emission characteristics and probabilistic health risk of volatile organic compounds from solvents in wooden furniture manufacturing[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 208: 1096-1108.
- [10] SONI V, SINGH P, SHREE V, et al. Effects of VOCs on human health[C]// 1st International Conference on Sustainable Energy and Environmental Challenges

- (SEEC). Mohali, India; Springer, 2017: 119-142.
- [11] DAI H B, HUANG G Q, WANG J J, et al. Regional VOCs gathering situation intelligent sensing method based on spatial-temporal feature selection [J]. *Atmosphere*, 2022, 13(3): 483.
- [12] TAGIYEVA N, SHEIKH A. Domestic exposure to volatile organic compounds in relation to asthma and allergy in children and adults [J]. *Expert Review of Clinical Immunology*, 2014, 10(12): 1611-1639.
- [13] ZHOU Y F, ZHANG S Z, LI Z, et al. Maternal benzene exposure during pregnancy and risk of childhood acute lymphoblastic leukemia: a meta-analysis of epidemiologic studies [J]. *PLoS One*, 2014, 9(10): e110466.
- [14] SIMAYI M, SHI Y Q, XI Z Y, et al. Emission trends of industrial VOCs in China since the clean air action and future reduction perspectives [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 826: 153994.
- [15] LIANG X M, CHEN X F, ZHANG J N, et al. Reactivity-based industrial volatile organic compounds emission inventory and its implications for ozone control strategies in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, 162: 115-126.
- [16] 钟美芳, 李智博, 黄皓旻, 等. “双碳”背景下工业源 VOCs 排放特征与减排潜力研究 [J]. *环境科学学报*, 2022, 42(10): 12-25.
ZHONG Meifang, LI Zhibo, HUANG Haowen, et al. Research on the emission characteristics and reduction potential of volatile organic compounds from industrial sources under the background of "Carbon Peak and Carbon Neutrality" [J]. *Acta Science Circumstantiae*, 2022, 42(10): 12-25.
- [17] 李清雅, 李晟, 王蕾, 等. 长沙市汽车制造和包装印刷企业有组织挥发性有机物源成分谱 [J]. *环境污染与防治*, 2023, 45(8): 1132-1137.
LI Qingya, LI Sheng, WANG Lei, et al. Source profile of organized volatile organic compounds from automobile manufacturing and packaging and printing enterprises in Changsha [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2023, 45(8): 1132-1137.
- [18] 孙西勃, 梁小明, 廖程浩, 等. 食用植物油加工 VOCs 排放特征 [J]. *中国环境科学*, 2022, 42(8): 3610-3615.
SUN Xibo, LIANG Xiaoming, LIAO Chenghao, et al. Characteristics of VOCs emissions from edible vegetable oil processing [J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(8): 3610-3615.
- [19] 秦卫国, 万辉, 周人楷. 植物油厂有机废气的排放与控制措施 [J]. *粮食与食品工业*, 2013, 20(4): 23-25.
QIN Weiguo, WAN Hui, ZHOU Renkai. VOCs emissions and control measures in vegetable oil plants [J]. *Cereal and Food Industry*, 2013, 20(4): 23-25.
- [20] 姚震, 吴宇峰, 杜展霞, 等. 大豆油加工行业 VOCs 排放特征及管控对策 [J]. *环境科学研究*, 2022, 35(6): 1388-1397.
YAO Zhen, WU Yufeng, DU Zhanxia, et al. VOCs emission characteristics and control strategy for edible soybean oil production industry [J]. *Research of Environmental Science*, 2022, 35(6): 1388-1397.
- [21] 林启鉴, 张哲, 吴少林, 等. 食用植物油加工行业 VOCs 排放特征及健康风险评估 [J]. *环境科学与技术*, 2022, 45(11): 228-236.
LIN Qijian, ZHANG Zhe, WU Shaolin, et al. VOCs emission characteristics and health risk assessment of edible vegetable oil processing industry [J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 45(11): 228-236.
- [22] 张婧好, 许本波, 郑家喜. 我国食用植物油消费变化分析及改革对策 [J]. *中国油脂*, 2022, 47(3): 5-10.
ZHANG Jingyu, XU Benbo, ZHENG Jiayi. Analysis on consumption changes and reform countermeasures of edible vegetable oil in China [J]. *China Oils and Fats*, 2022, 47(3): 5-10.
- [23] 上海市环境监测中心, 中国环境监测总站, 江苏省南京环境监测中心. 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.
- [24] 王素梅, 刘春. 挥发性有机物样品采集方法概述 [J]. *稀土信息*, 2020(2): 34-36.
WANG Sumei, LIU Chun. An overview of volatile organic compounds sampling methods [J]. *Rare Earth Information*, 2020(2): 34-36.
- [25] 江苏省环境监测中心. 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 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2015.
- [26] 周子航, 邓也, 周小玲, 等. 成都市工业挥发性有机物排源成分谱 [J]. *环境科学*, 2020, 41(7): 3042-3055.
ZHOU Zihang, DENG Ye, ZHOU Xiaoling, et al. Source profiles of industrial emission-based VOCs in Chengdu [J]. *Environmental Science*, 2020, 41(7): 3042-3055.
- [27] 中国环境监测总站, 江苏省环境监测中心. 空气醛、酮类化合物的高效液相色谱测定法: HJ 683—2014 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2014.
- [28] CATER W P L. Development of the SAPRC-07 chemical mechanism [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, 44(40): 5324-5335.
- [29] MELLOUKI A, WALLINGTON T J, CHEN J. Atmospheric chemistry of oxygenated volatile organic compounds: impacts on air quality and climate [J].

- Chemical Reviews, 2015, 115(10): 3984-4014.
- [30] ZHANG Y N, XUE L K, DONG C, et al. Gaseous carbonyls in China's atmosphere: tempo-spatial distributions, sources, photochemical formation, and impact on air quality [J]. Atmospheric Environment, 2019, 214: 116863.
- [31] 朱轲欣. 大连市沙河口区大气 VOCs 反应活性、源解析及健康风险评价 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2022.
- ZHU Kexin. Reactive activity, source analysis and health risk assessment of VOCs in ambient air of Shahekou District, Dalian [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2022.
- [32] LIU J W, ZHENG G D. Emission of volatile organic compounds from a small-scale municipal solid waste transfer station: ozone-formation potential and health risk assessment [J]. Waste Management, 2020, 106: 193-202.
- [33] PAN Q, LIU Q Y, ZHENG J, et al. Volatile and semi-volatile organic compounds in landfill gas: composition characteristics and health risks [J]. Environment International, 2023: 174.
- [34] 刘杨, 孙晓艳, 代雪静, 等. 济南市大气苯系物污染特征及健康风险评价 [J]. 环境科学与技术, 2022, 45(12): 164-173.
- LIU Yang, SUN Xiaoyan, DAI Xuejing, et al. Pollution characteristics and health risk assessment of atmospheric benzene homologues in Jinan [J]. Environmental Science & Technology, 2022, 45(12): 164-173.
- [35] SEXTON K, LINDER S H, MARKO D, et al. Comparative assessment of air pollution-related health risks in Houston [J]. Environmental Health Perspectives, 2007, 115(10): 1388-1393.
- [36] WU R R, XIE S D. Spatial distribution of ozone formation in China derived from emissions of speciated volatile organic compounds [J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51(5): 2574-2583.
- [37] YOU G Y, LIU H F, SUN R, et al. Characterizing VOCs emissions of five packaging and printing enterprises in China and the emission reduction potential of this industry [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 420: 138445.
- [38] GU X, CHEN K T, CAI M, et al. Study on the fingerprint and atmospheric activity of volatile organic compounds from typical industrial emissions [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2023, 20(4): 3517.
- [39] LIU G X, XI W L, YOU X Y, et al. VOCs emission from an important industrial park in Tianjin, China [C]// 3rd International Conference on Energy Engineering and Environmental Protection (EEEP). Sanya, China: IOP Publishing, 2019, 227: 062037.
- [40] LIU Z Y, CAO Z Q, ZHAO J R, et al. Characteristics of VOCs emission components in typical solvents source industries in Tianjin [C]// 5th International Symposium on Resource Exploration and Environmental Science. Ordos, China: IOP Publishing, 2021, 781: 032010.
- [41] 王家德, 吕建璋, 李文娟, 等. 浙江省包装印刷行业挥发性有机物排放特征及排放系数 [J]. 环境科学, 2018, 39(8): 3552-3556.
- WANG Jiade, LÜ Jianzhang, LI Wenjuan, et al. Pollution characteristics and emission coefficients of volatile organic compounds from the packaging and printing industry in Zhejiang Province [J]. Environmental Science, 2018, 39(8): 3552-3556.
- (编辑:郭少华)
- (上接第 124 页)
- [22] XIAO Y, LIU H, NAN B, et al. Gradation-dependent thermal conductivity of sands [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2018, 144(9): 60-68.
- [23] MO RTENSEN B M, HABE R M J, DEJONG J T, et al. Effects of environmental factors on microbial induced calcium carbonate precipitation [J]. Journal of Applied Microbiology, 2011, 111(2): 338-349.
- [24] 赵茜. 微生物诱导碳酸钙沉淀 (MICP) 固化土壤实验研究 [D]. 北京: 中国地质大学, 2014.
- ZHAO Qian. An experimental study on soil solidification by microbial-induced calcium carbonate precipitation (MICP) [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2014.
- [25] OKWADHA G D O, LI J. Optimum conditions for microbial carbonate precipitation [J]. Chemosphere, 2010, 81(9): 1143-1148.
- [26] 孙潇昊, 缪林昌, 童天志, 等. 微生物沉积碳酸钙固化砂土试验研究 [J]. 岩土力学, 2017, 38(11): 3225-3230.
- SUN Xiaohao, MIAO Linchang, TONG Tianzhi, et al. Experimental study on microbial deposition of calcium carbonate solidified sand [J]. Geotechnical Mechanics, 2017, 38(11): 3225-3230.
- [27] LIN H, SULEIMAN M T, BROWN D G. Investigation of pore-scale CaCO₃ distributions and their effects on stiffness and permeability of sands treated by microbially induced carbonate precipitation (MICP) [J]. Soils and Foundations, 2020, 60(4): 944-961.
- (编辑:郭少华)