

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

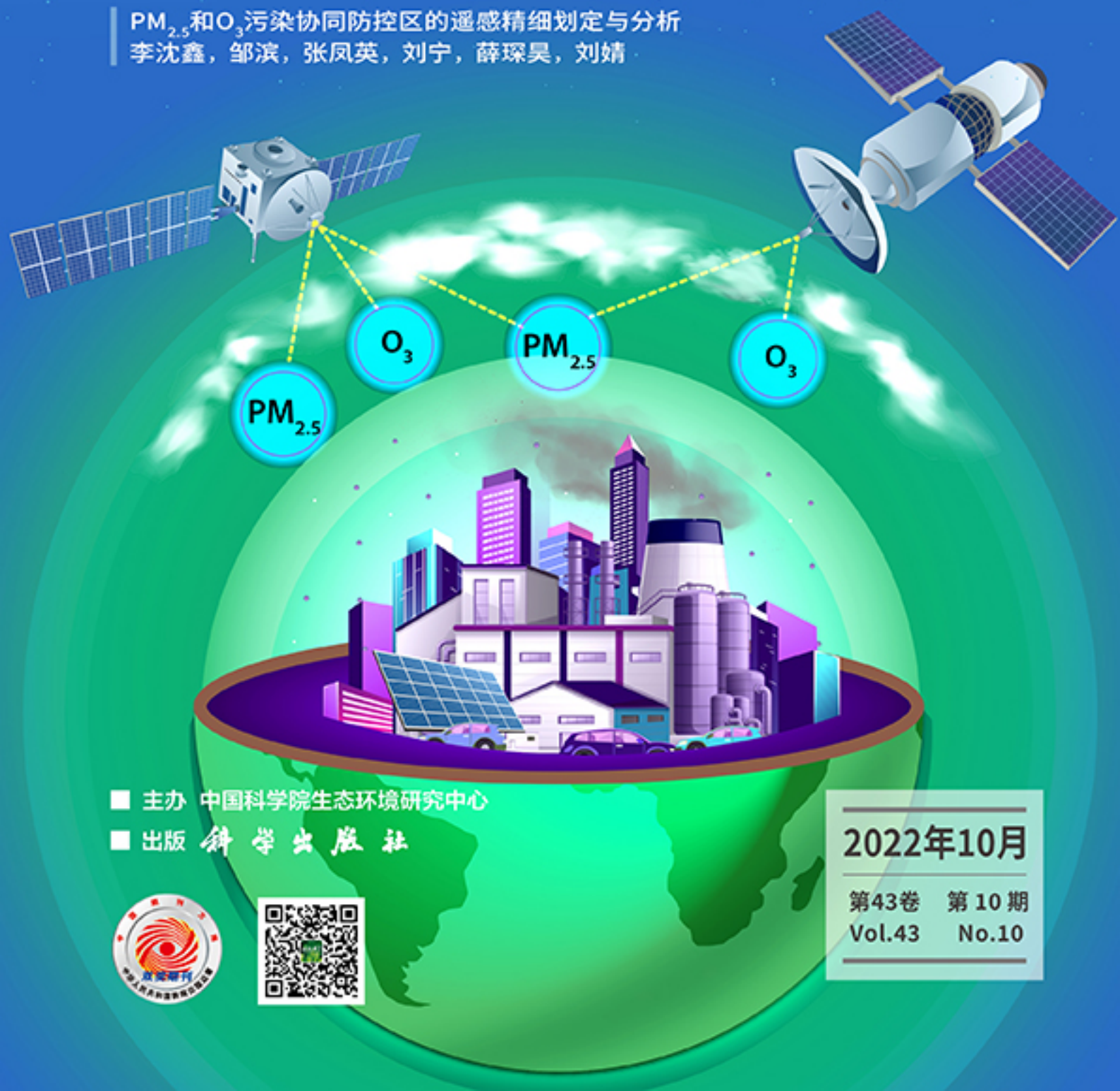
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

PM_{2.5}和O₃污染协同防控区的遥感精细划定与分析
李沈鑫, 邹滨, 张凤英, 刘宁, 薛琛昊, 刘婧



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年10月

第43卷 第10期
Vol.43 No.10

目次

PM _{2.5} 和O ₃ 污染协同防控区的遥感精细划定与分析	李沈鑫, 邹滨, 张凤英, 刘宁, 薛琛昊, 刘婧 (4293)
广州市冬季一次典型臭氧污染过程分析	裴成磊, 谢雨彤, 陈希, 张涛, 邱晓暖, 王瑜, 王在华, 李梅 (4305)
佛山臭氧浓度预报方程的建立与应用	陈辰, 洪莹莹, 谭浩波, 司徒淑婷, 程银琳, 步巧利, 吴蒙, 潘巧英 (4316)
乌海市高分辨率大气污染源排放清单构建及其在臭氧污染成因探究中的应用	张瑞欣, 楚波, 尚春林, 曹喜萍, 李光耀, 朱玉凡, 刘晓, 夏佳琦, 陈强 (4327)
结合在线监测和自动识别系统分析东海沿岸船舶排放特征	邱浩, 刘丹彤, 吴杨周, 李思远, 丁朔, 胡康, 张家乐, 陈梅汀 (4338)
机动车制动磨损颗粒物及挥发性有机物的组分特征	门正宇, 刘笃优, 郭全有, 张静, 彭剑飞, 吴琳, 毛洪钧 (4348)
笼养鸡舍冬季挥发性有机物排放特征	曹甜甜, 郑云昊, 张羽, 王悦, 丛群欣, 王源昊, 董红敏 (4357)
上海市生活垃圾房气溶胶中可培养细菌污染状况及种群特征	卢冰洁, 张翔, 王川, 邱俊, 李丹 (4367)
浙江省2008~2018年人为源氨排放清单及分布特征	方利江, 杨一群, 叶观琼 (4380)
“双碳”目标下钢铁行业控煤降碳路线图	薛英岚, 张静, 刘宇, 陈瑜, 孙健, 蒋洪强, 张伟, 曹东 (4392)
空间关联网络结构特征的减排效应: 基于城市群视角	郑航, 叶阿忠 (4401)
中国对外直接投资的减污降碳效应及其实现机制	白梓函, 吕连宏, 赵明轩, 张楠, 罗宏 (4408)
近年全国地表水水质变化特征	嵇晓燕, 侯欢欢, 王姗姗, 杨凯 (4419)
湟水河流域地表水体微塑料分布、风险及影响因素	范梦苑, 黄懿梅, 张海鑫, 李好好, 黄倩 (4430)
汾河流域地表水化学同位素特征及其影响因素	赵春红, 申豪勇, 王志恒, 梁永平, 赵一, 谢浩, 唐春雷 (4440)
城镇化进程中珠江三角洲高锰地下水赋存特征及成因	吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 朱亮, 李海军 (4449)
喀什噶尔河下游平原区地下水咸化特征及成因分析	鲁涵, 曾妍妍, 周金龙, 孙英 (4459)
重庆市老龙洞地下河流域硝酸盐来源和生物地球化学过程的识别	王雨畅, 杨平恒, 张洁茹 (4470)
蓝藻水华过程中优势种群演替模式、效应及驱动因子分析	欧阳添, 赵璐, 纪璐璐, 杨宋琪, 郑保海, 杜雨欣, 李佳欣, 李玉鑫, 施军琼, 吴忠兴 (4480)
珠海市磨刀门水道输水水源水库群浮游植物群落特征及其环境驱动因子	张茉莉, 王思瑞, 昌盛, 王山军, 金德才, 樊月婷, 张坤峰, 谢琼, 付青 (4489)
营养物质对铜绿微囊藻生长和藻际细菌的影响	吕萍, 李慧莉, 徐勇, 郑效旭, 黄振华, 王聪, 徐圣君, 庄绪亮 (4502)
老化作用对微塑料吸附四环素的影响及其机制	王林, 王姝歆, 曾祥英, 何杨, 黄雯, 郑世界, 张建强 (4511)
沉积物和土壤中胶体对氯霉素吸附行为的影响	晏彩霞, 罗燕清, 聂明华, 周旋, 丁明军 (4522)
历史抗生素胁迫改变磺胺甲噁唑和甲氧苄啶对活性污泥的影响: ARGs及其潜在宿主	张忠兴, 樊晓燕, 李星, 高玉玺, 赵君如 (4536)
阳朔典型铅锌矿区流域土壤重金属空间分布特征及来源解析	陈盟, 潘泳兴, 黄奕翔, 王耀耀, 张睿东 (4545)
白洋淀及周边土壤重金属的分布特征及生态风险评估	郑飞, 郭欣, 汤名扬, 朱冬, 董四君, 康乐, 陈兵 (4556)
基于地理探测器的镇域尺度土壤重金属含量空间分异及其影响因素分析	龚仓, 王亮, 王顺祥, 张志翔, 董航, 刘玖芬, 王德伟, 严步青, 陈映 (4566)
燃煤电厂重金属排放与周边土壤中重金属污染特征及健康风险	车凯, 陈崇明, 郑庆宇, 范辉, 魏明磊, 罗蓬, 郁金星 (4578)
海南岛半干旱区农用地土壤重金属富集因素、健康风险及来源识别	杨剑洲, 龚晶晶, 王振亮, 高健翁, 杨建坤, 胡树起, 唐世新 (4590)
九龙江口红树林表层沉积物重金属赋存形态及污染评价	张华兰, 于瑞莲, 万瑞安, 胡恭任, 黄华斌, 吴雅清 (4601)
我国茶叶主产区有机肥重金属含量现状	伊晓云, 方丽, 杨向德, 马立峰, 刘美雅, 张群峰, 倪康, 石元值 (4613)
甘肃省农业土壤邻苯二甲酸酯累积特征及来源分析	陈玉玉, 张光全, 张杨, 李明凯, 郝佳欣, 熊有才, 李崇霄, 曹靖 (4622)
三峡库区澎溪河不同高程消落带土壤磷形态及磷酸酶活性分布特征	高艺伦, 方芳, 唐子超, 张蕊, 蒋艳雪, 郭劲松 (4630)
塔里木盆地北缘绿洲不同连作年限棉田土壤有机碳组分特征及其与理化因子的相关性	李昕竹, 贡璐, 唐军虎, 罗艳, 丁肇龙, 朱海强, 张涵, 李蕊希 (4639)
黄土丘陵区柠条人工林不同深度土壤呼吸速率对土壤湿度的响应	孙亚荣, 王亚娟, 赵敏, 薛文艳, 梁思琦, 刘乐, 刘超, 陈云明 (4648)
基于Meta-analysis的生物炭对土壤硝态氮淋失和磷酸盐固持影响	姜志翔, 崔爽, 张鑫, 郝敏, 孙德茂 (4658)
低分子有机酸强化植物修复重金属污染土壤的作用与机制	方治国, 谢俊婷, 杨青, 卢烨桢, 黄海, 朱芸娟, 尹思敏, 吴鑫涛, 都韶婷 (4669)
无机钝化剂对镉污染酸性水稻土的修复效果及其机制	张剑, 孔繁艺, 卢升高 (4679)
改良铅锌矿渣对栎树幼苗铅锌富集与耐性机制	谢天志, 陈永华, 苏荣葵, 刘慧, 姚海松 (4687)
CaO ₂ /FA复合材料富集磷效能及其回收物对土壤改良作用	岳薇, 李大鹏, 吴玲予, 王璐, 汤尧禹, 朱企, 黄勇 (4697)
早稻秸秆还田和减钾对晚稻产量和土壤肥力的影响	黄巧义, 黄建凤, 黄旭, 吴永沛, 李苹, 付弘婷, 唐拴虎, 刘一峰, 徐培智 (4706)
秸秆连续还田配施化肥对稻-油轮作土壤碳库及作物产量的影响	蔡影, 付思伟, 张博睿, 胡宏祥, 刘文雯, 俞金涛, 贾临东, 刘运峰 (4716)
化肥减量配施秸秆对双季稻田固氮微生物群落的影响	陈凯鹏, 韦菊娟, 陈丹, 王聪, 沈健林, 李勇, 吴金水 (4725)
化肥减量与有机物料添加对华北潮土微生物氮循环功能基因丰度和氮转化遗传潜力的影响	李胜君, 胡荷, 李刚, 王蕊, 赵建宁, 张贵龙, 修伟明 (4735)
长期覆膜条件下农田土壤微生物群落的响应特征	胡志娥, 肖谋良, 丁济娜, 李剑虹, 陈剑平, 葛体达, 鲁顺保 (4745)
长期秸秆还田对潮土真菌群落、酶活性和小麦产量的影响	马垒, 李燕, 魏建林, 李子双, 周晓琳, 郑福丽, 吴小宾, 王利, 刘兆辉, 谭德水 (4755)
土壤改良剂对再生水滴灌根际土壤菌群多样性及病原菌和抗生素抗性基因丰度的影响	崔丙健, 崔二革, 刘春成, 胡超, 樊向阳, 李中阳, 高峰 (4765)
氮素对苜蓿植物修复垃圾堆场镉-多环芳烃复合污染土壤及土壤细菌群落结构的影响	李怡佳, 马俊伟, 李玉倩, 肖琛, 沈心怡, 牛云, 陈家军 (4779)
抗生素降解剂对猪粪堆肥腐熟和细菌群落演替的影响	李琳琳, 张昕, 马军伟, 孙万春, 成琪璐, 林辉 (4789)
《环境科学》征订启事 (4337) 《环境科学》征稿简则 (4407) 信息 (4521, 4705, 4800)	

笼养肉鸡舍冬季挥发性有机物排放特征

曹甜甜¹, 郑云昊^{1*}, 张羽¹, 王悦¹, 丛群欣¹, 王源昊², 董红敏¹

(1. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 农业农村部设施农业节能与废弃物处理重点实验室, 北京 100081;

2. 中国农业科学院饲料研究所, 北京 100081)

摘要: 畜禽养殖过程产生的挥发性有机物 (VOCs) 会影响周围环境质量和人畜健康. 针对肉鸡养殖过程挥发性有机物排放特征研究较少, 主要致臭物质及致癌、非致癌健康风险影响评价不明确、臭氧生成潜力分析不足等问题, 开展了对肉鸡舍内挥发性有机物的现场监测试验, 在肉鸡舍采用苏玛罐采样结合气相色谱-质谱法分析了冬季肉鸡生长前期、生长中期和生长后期 VOCs 的排放特征. 结果表明, 肉鸡生长过程中共检测出 77 种 VOCs, 包括 16 种卤代烃、21 种烷烃、5 种烯烃、12 种芳香烃、15 种含氧 VOCs (OVOCs) 和 8 种含硫化物. 整个生长阶段舍内卤代烃、烷烃、烯烃、芳香烃和 OVOCs 浓度变化不大, 但是随着肉鸡的生长, 含硫氨基酸摄入量和粪便排污系数增加, 舍内排放的 VOCs 逐渐转为硫化物为主. 含硫 VOCs 浓度在生长前期和中期呈现不断升高趋势, 但是生长后期舍内通风量增加导致含硫 VOCs 浓度降低. 肉鸡生长过程中监测到的 VOCs 中主要致臭物质为羰、乙酸乙酯、乙醛、二硫化碳、二甲基二硫、甲硫醇、甲硫醚和噻吩, 其中甲硫醇的恶臭指数最高, 范围为 2 172.4 ~ 19 090.9; 生长前期和生长中期存在可能致癌健康风险, 终生癌症风险 (LCR) 值分别为 7.7×10^{-6} 和 4.5×10^{-6} . 舍内 VOCs 臭氧生成潜势 (OFP) 平均值为 $(1458.9 \pm 787.4) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. 结果明确了肉鸡生长过程中 VOCs 的排放特征, 摸清了致臭物质、健康风险和臭氧生成潜势, 可为肉鸡养殖过程中污染气体减排策略的制定提供科学依据.

关键词: 肉鸡舍; 挥发性有机物 (VOCs); 主要致臭物质; 健康风险评估; 臭氧生成潜势 (OFP)

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)10-4357-10 DOI: 10.13227/j.hjlx.202112225

Characterization of VOCs Emissions from Caged Broiler House in Winter

CAO Tian-tian¹, ZHENG Yun-hao^{1*}, ZHANG Yu¹, WANG Yue¹, CONG Qun-xin¹, WANG Yuan-hao², DONG Hong-min¹

(1. Key Laboratory of Energy Conservation and Waste Management in Agricultural Structures (MARA), Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2. Institute of Feed Research, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Volatile organic compound (VOCs) emissions from poultry and livestock facilities affect the surrounding environmental quality and human health. However, VOCs emissions from broiler houses have been less characterized, and studies of related dominant odorants, carcinogenic risk, and ozone formation potential are still lacking. To fill this research gap, VOCs pollutants emitted from a broiler house were investigated in this study. The VOCs emission characteristics of the broiler house during three different periods of broiler growth (early, middle, and later) were analyzed using gas chromatography-mass spectrometry. The results showed that 77 types of VOCs were detected, including 16 types of halogenated hydrocarbons, 21 types of alkanes, 5 types of olefins, 12 types of aromatic hydrocarbons, 15 types of oxygenated volatile organic compounds (OVOCs), and 8 types of sulfides. During the entire 42-day growth period, the concentrations of halogenated hydrocarbons, alkanes, olefin, aromatic hydrocarbons, and OVOCs in the broiler house showed few changes. However, with the growth of broilers, the intake of sulfur-containing amino acids and the fecal emission coefficient increased, resulting in the gradual conversion of the VOCs to sulfide. Therefore, emissions of sulfur-containing VOCs increased in the early and middle growth periods. Moreover, the increase in ventilation in the house during the later growth period resulted in a decrease in the sulfur-containing VOCs concentrations. The dominant odorants in the broiler house were naphthalene, ethyl acetate, acetaldehyde, carbon disulfide, dimethyl disulfide, methanethiol, methanethiol, and thiophene. Methanethiol had the highest odorous values, ranging from 2 172.4 to 19 090.9. Meanwhile, there were acceptable levels of carcinogenic risk in the early and middle growth periods, with a lifetime cancer risk (LCR) of 7.7×10^{-6} and 4.5×10^{-6} , respectively. The average ozone formation potential (OFP) was $(1458.9 \pm 787.4) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. The results of this study can provide a scientific basis for the monitoring of malodorous substances and formulation of emission reduction strategies in broiler production.

Key words: broiler house; volatile organic compounds (VOCs); dominant odorants; health risk assessment; ozone formation potential (OFP)

畜牧业的发展促进了地区经济的发展,但是养殖过程排放大量的含致臭物质在内的挥发性有机物 (volatile organic compounds, VOCs), 是制约畜禽养殖企业发展的重要障碍之一^[1,2]. 恶臭/异味投诉举报问题是当前公众投诉最强烈的环境问题之一, 2020 年恶臭/异味投诉占全部环境问题投诉举报件数的 22.1%, 其中畜牧业投诉占比 12.7%, 居行业首位^[3]. VOCs 的大量排放不仅对周围大气环境造成气味污染, 还会危害人畜呼吸系统和神经系统健康^[4,5]. 与此同时, 一些挥发性有机化合物可在紫外线辐射下与羟基自由基等高活性物质发生反应, 形

成具有强氧化性的臭氧有害气体^[6~10].

近年来, 全球养殖业规模化发展迅速, 据 FAO 统计, 2019 年我国鸡出栏量为 52.5 亿只, 鸡肉产量 1 514.7 万 t^[11]. 养殖管理模式不同, VOCs 排放的种类、浓度及主要致臭物质组分不尽相同. 排放种类

收稿日期: 2021-12-22; 修订日期: 2022-03-21

基金项目: 中国农业科学院科技创新工程项目 (CAAS-ASTIP); 财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系项目 (CARS-35-10B); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (BSRF202003)

作者简介: 曹甜甜 (1997 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为畜禽舍气体污染控制, E-mail: 1784349164@qq.com

* 通信作者, E-mail: zhengyunhao@caas.cn

上,Yao 等^[12]在具有垫料系统的商业肉鸡舍中检测 9 种 C2 ~ C6 VOCs 排放情况,得出舍内主要挥发性有机物是甲醇、乙醇和丙酮. 浓度范围上,Tanaka 等^[13]研究了日本蛋鸡舍 4 个季节 34 种 VOCs 浓度变化范围是 150 ~ 427 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; Nie 等^[14]研究安徽商业猪场在春季、夏季和秋季检测到的 28 种 $\rho(\text{VOCs})$ 平均值分别为 125.5、1 504.7 和 1 698.5 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 主要致臭组分分析上, Murphy 等^[15]在以木屑为垫料的商业机械通风肉鸡舍,肉鸡生长期为 32 ~ 36 d 时,检出可以表征臭气浓度和臭气变化特征的 8 种挥发性有机物组分为:二甲基硫醚、二甲基三硫、2-3 丁二酮、3-甲基丁醛、1-丁醇、3-甲基-1-丁醇、3-羟基丁酮和 2-丁酮. Svihus 等^[16]的研究得出肉鸡产生的恶臭挥发性脂肪酸包括:乙酸、丙酸、丁酸、异丁酸和异戊酸. 此外,也有研究报道了垫料中化学添加剂有无、不同季节和饲料成分等条件下主要 VOCs 成分及 VOCs 浓度排放情况^[15,17]; 由于管理模式不同,测定的 VOCs 种类不同,相应地研究结果也存在差异. 在臭氧生成潜势方面,主要集中于城区环境、工业环境和生活垃圾堆肥等^[18~21],邵珠泽等^[21]采用最大增量活性法计算生活垃圾堆肥产生 VOCs 的臭氧生成潜势 (ozone formation potential, OFP) 为 455.8 ~ 26 979.3 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,但目前尚未有研究关注畜禽舍内 VOCs 的臭氧生成潜势. 在应对大气污染防治的迫切需求下,摸清畜禽养殖实际生长过程中 VOCs 的排放情况,甄别鸡舍内主要致臭物质及有毒有害物质,估算臭氧生成潜势,进而有针对性地选择减排措施尤为重要,但是国内鲜有关于肉鸡舍 VOCs 排放特性及臭氧生成潜势的系统研究.

因此,本研究选取北京市某试验肉鸡舍,在 42 d 的饲养期内定量分析肉鸡生长前期、生长中期和生长后期这 3 个阶段产生的 VOCs,明确 VOCs 排放清单和主要致臭物质,评估致癌及非致癌健康风险,计算臭氧生成潜势,以期摸清肉鸡生长过程中 VOCs 排放特征及减排策略的制定提供数据支撑.

1 材料与方法

1.1 试验肉鸡舍

本试验于 2020 年 11 ~ 12 月在中国农业科学院某试验肉鸡舍开展. 鸡舍采用 3 层阶梯式笼养,尺寸为 16 m × 7.5 m × 2.5 m (长度 × 宽度 × 檐高),饲养约 1 200 只白羽肉鸡. 肉鸡生长分为生长前期 (日龄: 0 ~ 21 d)、生长中期 (日龄: 21 ~ 35 d) 和生长后期 (日龄: 35 ~ 42 d) 3 个阶段. 采用人工喂养饲料,每天喂料 2 次; 饮水为自动饮水系统. 整个生长周期内,在鸡龄为 10、14、21、24、28、31、34 和 39 d 时

进行舍内清粪,清粪方式为传送带式清粪,清粪后装袋称重. 鸡舍入口一侧安装有 2 块湿帘和 4 个窗户,出口一侧安装有 4 个风机和 4 个窗户.

1.2 肉鸡舍采样点和采样时间

在肉鸡舍内 (图 1) 悬挂 HOBO 温湿度计 (Pro v2 型,美国 Onset Hobo 公司) 测定舍内的温度和相对湿度,悬挂高度距离地面 1.5 m.

本试验期间为冬季,舍外环境温度较低,鸡舍的风机及湿帘装置未运行,只有一台酸洗涤装置对舍内空气间歇抽气. 生长前期通风方式主要是密闭或自然通风,生长中期以自然通风为主,辅以机械通风,生长后期通风方式主要为机械通风. 在舍内进行气体采样期间,关闭酸洗涤装置,舍内通风方式为自然通风.

根据舍内通风方式,在舍内中心位置 (B1) 进行 VOCs 样品采样,上风向位置 (B2) 为环境本底值采样点. 试验肉鸡生长周期为 42 d,在鸡龄为 19 d (生长前期,监测日期: 2020-11-08)、26 d (生长中期,监测日期: 2020-11-15)、31 d (生长中期,监测日期: 2020-11-20) 和 40 d (生长后期,监测日期: 2020-11-29) 时进行采样. 将 1 d 分为 4 个时间段 (08:00 ~ 10:00、12:00 ~ 14:00、16:00 ~ 18:00 和 20:00 ~ 22:00) 采集舍内 VOCs 气体样品; 舍外环境本底值于当日 10:00 进行采样一次.

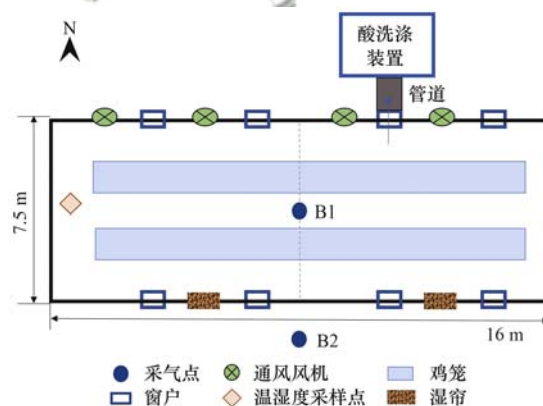


图1 肉鸡舍监测和采样点位置分布示意

Fig. 1 Schematic of measuring and sampling points in the broiler house

1.3 气体样品采集及测定

VOCs 样品的采集,利用 3.2 L 苏玛罐 (FSL 型,美国 Entech 公司) 于采样点在每个时间段采集一次,使用气体限流阀 (CS100E 型,美国 Entech 公司) 设定每个样品的采样时间为 1 h,采集结束后送往实验室进行 VOCs 组分与浓度检测. 本研究中检测了 117 种 VOCs 成分,检测方法参照文献^[22],其中原非甲烷碳氢化合物 (PAMS) 清单中的 57 种 VOCs 和 13 种醛酮类成分参照《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)^[23], TO15 成分参照 EPA METHOD TO15^[24]; 另外检测 8 种含硫有机物(噻吩、乙醛、二甲基二硫、甲硫醇、甲硫醚、甲乙硫醚、乙硫醇和乙硫醚), 成分和方法参照文献[25]. 采集的气体样品经过 ENTECH 7200 冷阱预浓缩仪浓缩, 脱除水蒸气、CO₂、N₂ 和 O₂ 后, 进入气相色谱-质谱仪系统(7890-5977B 型, 美国 Agilent 公司)进行分析测定. 使用含有 117 种 VOCs 和 8 种含硫挥发性有机物的混合标准气体(美国 Spectra Gases 公司)绘制标准曲线. VOCs 成分通过保留时间和特征离子进行定性分析, 采用内标法进行定量分析. 由于方法的局限性, 部分挥发性脂肪酸、醛类、酯类、醚类和有机胺等组分未测定分析.

1.4 质量保证和质量控制

样品在采集、运输和分析时参照《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)的方法, 使用清罐仪(3100D 型, 美国 Entech 公司)对苏玛罐进行 2 次清洗循环, 最后抽取真空. 清洁后的苏玛罐在 2 d 内采用恒定流量采集样品, 并在样品分析前, 进行仪器空白试验确保分析系统无污染. 样品送至实验室后, 10 d 内完成样品分析. 气相色谱-质谱仪器使用前需要进行调谐与评估、绘制标准曲线、重复性考察及检出限等系统运行状态检查.

1.5 健康风险评价及臭氧生成潜势估算方法

1.5.1 VOCs 健康风险评价

采用美国环保署规定的危险指数(hazard index, HI)和终生癌症风险(lifetime cancer risk, LCR)来评估 VOCs 物质对人的非致癌性和致癌性风险, 计算公式为:

$$HI = \frac{c_i \times ET \times EF \times ED}{365 \times AT_{nea} \times 24 \times RfC} \quad (1)$$

$$LCR = \frac{c_i \times ET \times EF \times ED \times IUR}{365 \times AT_{ca} \times 24} \quad (2)$$

式中, c_i 为物质 i 的浓度, $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; ET 为日暴露时间, h(取 ET = 8); EF 为暴露频率, d(取 EF = 250); ED 为持续暴露时间, a(取 ED = 20); AT_{nea} 和 AT_{ca} 分别为非致癌平均作用时间和致癌平均作用时间, a(取 AT_{nea} = 25, AT_{ca} = 70); RfC 和 IUR 分别为参考浓度和单位吸入致癌风险, $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $\text{m}^3 \cdot \mu\text{g}^{-1}$ (RfC 和 IUR 值引自文献[26, 27]).

1.5.2 臭氧生成潜势估算方法

臭氧生成潜势代表 VOCs 物种在最佳反应条件下对臭氧生成的最大贡献, 本研究采用最大增量反应法(MIR 法)^[28], 计算公式为:

$$OFP_i = c_i \times MIR_i \quad (3)$$

式中, OFP_i 是物质 i 的臭氧产生潜势, $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; c_i 为物质 i 的浓度, $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; MIR_i 为物质 i 的最大增量反应活性系数, MIR 值引自文献[29].

1.6 数据统计分析

数据统计分析处理使用 IBM SPSS Statistics 25 和 Excel 2019, 使用 Origin Pro 2021 软件作图.

2 结果与讨论

2.1 VOCs 排放特征

本试验在舍内肉鸡生长不同阶段进行 VOCs 取样测定, 共检测出 VOCs 77 种(表 1), 根据 VOCs 组分特性, 分为: 卤代烃化合物(16 种)、烷烃化合物(21 种)、烯烃化合物(5 种)、芳香烃化合物(12 种)、含氧化合物(oxygenated volatile organic compounds, OVOCs, 15 种)和含硫化合物(8 种)共六大类. 大部分 VOCs 排放主要来自饲料和粪便中蛋白质、尿酸等物质的降解^[30], 且 VOCs 浓度与肉鸡日龄、活动和饲料摄入以及通风和清粪方式、频率有关.

图 2 和图 3 是肉鸡生长 3 个阶段舍内 VOCs 排放浓度和组分特征变化. 肉鸡生长前期、中期和后期舍内 $\rho(\text{VOCs})$ 范围分别为 0 ~ 75.8、0 ~ 5 446.1 和 0 ~ 1 120.0 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. 从肉鸡生长前期到生长中期, 舍内通风量低, 肉鸡体重和粪便排泄系数不断增加(由 45.4 $\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$ 增加到 125.7 $\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$), 导致舍内 VOCs 浓度呈现升高趋势; 在生长后期舍内通风量增加, 导致 VOCs 浓度降低. 排放种类方面, 肉鸡不同生长阶段产生的 VOCs 不尽相同, 生长前期以 2-甲基戊烷和乙烷等烷烃类与乙酸乙烯酯和乙醛等 OVOCs 为主, 生长中期以甲硫醚和甲硫醇等含硫 VOCs 为主, 生长后期以噻吩和二硫化碳等含硫 VOCs 为主.

整个监测期间舍内卤代烃、烷烃、烯烃、芳香烃和 OVOCs 浓度变化不大, 但是随着肉鸡生长, 舍内排放的 VOCs 逐渐转为以硫化物为主, 含硫 VOCs 浓度在生长前期和中期呈现不断升高趋势(图 2). 蛋氨酸(甲硫氨酸)是动物生长必须的氨基酸之一, 自身无法合成, 需要从饲料中获取^[31]. 肉鸡肠道内含硫氨基酸的酶降解^[32]和粪便中含硫氨基酸的厌氧降解^[33], 都会直接导致含硫化合物的排放. 肉鸡从生长前期到生长后期每日采食量不断增加^[34], 促使摄入含有含硫氨基酸的饲料量增加, 同时肉鸡排污系数不断增加(由 45.4 $\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$ 增加到 136.0 $\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$), 导致肉鸡舍内含硫化 VOCs 排放增加. 此外, 肉鸡生长中期与生长后期每日采食量差异不大,

表 1 肉鸡舍 VOCs 组分和浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ Table 1 Compositions and concentrations of VOCs emitted from the broiler houses/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

化合物种类	组分	19 d	26 d	31 d	40 d	嗅阈值
卤代烃	1,1-二氯乙烯	— ¹⁾	—	25.902 ± 15.102	26.953 ± 0.925	/ ²⁾
	反-1,3-二氯-1-丙烯	8.549 ± 0.005	2.851 ± 2.016	2.138 ± 2.138	1.424 ± 2.014	/
	氯乙烷	1.935 ± 1.935	1.982 ± 0.03	1.978 ± 0.054	1.943 ± 0.01	/
	氯乙烯 ^{*3)}	—	1.606 ± 0.078	1.153 ± 0.667	0.499 ± 0.705	/
	三氯乙烯*	2.341 ± 0.051	1.139 ± 0.039	1.071 ± 0.037	0.891 ± 0.02	22 794.528
	三溴甲烷	7.179 ± 0.033	3.610 ± 0.009	3.564 ± 0.003	2.365 ± 1.672	/
	四氯乙烯*	2.38 ± 2.382	2.295 ± 0.388	3.334 ± 0.954	1.706 ± 0.733	/
	一氟三氯甲烷	1.852 ± 3.207	9.209 ± 8.656	0.613 ± 1.061	—	/
	一氯甲烷*	3.333 ± 2.199	6.553 ± 2.765	5.711 ± 0.651	2.87 ± 0.517	/
	一溴二氯甲烷	1.991 ± 0.013	1.005 ± 0.014	1.006 ± 0.014	0.972 ± 0.004	/
	一溴甲烷	1.498 ± 1.498	0.498 ± 0.704	0.752 ± 0.752	0.498 ± 0.704	/
	对-二氯苯	10.299 ± 0.088	5.154 ± 0.009	5.134 ± 0.017	5.091 ± 0.02	/
	间-二氯苯	14.748 ± 0.086	7.383 ± 0.012	7.353 ± 0.005	7.302 ± 0.021	/
	氯苯*	3.437 ± 0.055	1.494 ± 0.011	1.435 ± 0.015	1.332 ± 0.022	6 500
	氯代甲苯	14.174 ± 8.183	9.5 ± 0.02	9.55 ± 0.051	9.495 ± 0.043	/
	邻-二氯苯	10.42 ± 0.105	5.254 ± 0.008	5.228 ± 0.011	5.17 ± 0.02	/
烷烃	2,3,4-三甲基戊烷	3.496 ± 2.023	2.369 ± 0.055	2.523 ± 0.086	1.532 ± 1.084	3 403.647 7
	2,3-二甲基丁烷	5.120 ± 7.839	6.225 ± 2.683	64.907 ± 34.615	6.346 ± 6.757	1 610.124 6
	2,4-二甲基戊烷	0.177 ± 0.306	0.085 ± 0.069	0.709 ± 0.574	—	4 189.857 7
	2-甲基戊烷	54.092 ± 68.76	22.298 ± 19.135	147.47 ± 122.519	6.04 ± 5.518	/
	3-甲基庚烷	3.258 ± 1.899	2.262 ± 0.219	3.171 ± 0.757	1.463 ± 1.035	7 622.108 5
	3-甲基己烷	1.285 ± 1.286	1.491 ± 0.047	1.475 ± 0.047	1.283 ± 0.009	3 744.128 1
	3-甲基戊烷	2.109 ± 2.554	0.023 ± 0.032	0.316 ± 0.458	—	/
	丙烷	5.763 ± 5.774	14.143 ± 7.657	1.329 ± 1.341	—	24 334.52
	乙烷	46.026 ± 44.592	91.106 ± 68.484	35.863 ± 28.283	—	/
	异丁烷	11.133 ± 7.607	5.732 ± 3.895	6.322 ± 4.345	—	3 102 491.1
	正庚烷	3.151 ± 1.821	2.035 ± 0.117	1.589 ± 0.102	1.348 ± 0.033	/
	正己烷*	43.001 ± 40.88	11.327 ± 5.916	33.185 ± 28.922	—	700
	正壬烷	1.897 ± 0.757	1.198 ± 0.53	0.744 ± 0.09	0.739 ± 0.269	/
	正戊烷	4.909 ± 4.185	2.012 ± 0.613	10.035 ± 7.451	—	4493.3274
	正辛烷	3.205 ± 1.851	1.829 ± 0.061	1.742 ± 0.047	1.554 ± 0.025	/
	环己烷*	1.699 ± 0.113	—	78.680 ± 136.278	243.824 ± 14.008	/
	环戊烷	2.485 ± 1.608	1.767 ± 0.201	2.394 ± 1.065	1.313 ± 0.123	/
	甲基环己烷	3.550 ± 0.037	1.580 ± 0.028	1.386 ± 0.041	1.296 ± 0.008	/
	甲基环戊烷	1.322 ± 1.435	0.054 ± 0.076	—	—	1 385.195 7
	十二烷	11.978 ± 0.279	6.233 ± 0.147	6.286 ± 0.157	6.074 ± 0.219	833.709 96
	十一烷	3.619 ± 3.635	3.94 ± 0.231	5.151 ± 1.373	2.416 ± 1.71	/
烯烃	1-丁烯	10.372 ± 10.036	4.939 ± 1.582	22.583 ± 14.57	2.213 ± 2.174	898.558 72
	1-己烯	3.990 ± 5.194	3.476 ± 0.841	11.510 ± 6.943	1.689 ± 1.267	524.128 11
	乙炔	11.75 ± 18.688	8.827 ± 6.498	7.045 ± 11.835	—	/
	乙烯	2.978 ± 5.159	17.795 ± 15.34	3.749 ± 4.417	0.307 ± 0.434	/
	异戊二烯	5.828 ± 3.403	4.147 ± 3.279	2.121 ± 0.305	1.457 ± 0.14	/
芳香烃	正丙苯	3.273 ± 0.051	1.614 ± 0.048	1.656 ± 0.045	1.621 ± 0.015	/
	苯乙烯	7.821 ± 0.494	4.423 ± 0.242	4.848 ± 0.324	3.995 ± 0.287	202
	对-二乙基苯	—	4.364 ± 0.039	4.51 ± 0.02	4.402 ± 0.031	2.328 549 8
	间-对二甲苯*	2.418 ± 0.267	1.350 ± 0.102	2.293 ± 0.514	1.293 ± 0.286	30
	间-二乙基苯	7.685 ± 0.052	2.405 ± 0.004	2.418 ± 0.025	2.389 ± 0.042	417.944 84
	间-甲基苯甲醛	11.851 ± 0.041	5.956 ± 0.008	6.050 ± 0.016	5.968 ± 0.023	/
	间-乙基甲苯	5.112 ± 0.038	2.647 ± 0.017	2.652 ± 0.035	2.606 ± 0.013	/
	邻-二甲苯*	2.475 ± 0.176	1.492 ± 0.054	3.262 ± 0.38	1.840 ± 0.202	700
	邻-乙基甲苯	2.826 ± 0.058	1.506 ± 0.017	1.532 ± 0.07	1.413 ± 0.021	/
	乙苯*	3.776 ± 0.243	1.785 ± 0.121	2.129 ± 0.41	1.330 ± 0.092	260
	异丙苯	2.630 ± 0.088	1.391 ± 0.031	1.394 ± 0.022	1.358 ± 0.087	/
	萘*	16.933 ± 0.113	8.552 ± 0.017	8.508 ± 0.007	8.507 ± 0.131	3
OVOCs	1,4-二氧六环	—	—	4.727 ± 0.113	4.627 ± 0.096	/
	2-丁酮	2.404 ± 3.449	2.908 ± 1.73	10.338 ± 7.455	1.279 ± 1.809	1 410

续表 1

化合物种类	组分	19 d	26 d	31 d	40 d	嗅阈值
OVOCs	2-己酮*	4.230 ± 2.445	3.552 ± 0.568	3.006 ± 0.154	2.733 ± 0.034	/
	丙醛*	1.55 ± 1.795	—	0.405 ± 0.702	—	8
	丙酮*	17.006 ± 19.591	1.727 ± 2.442	0.077 ± 0.133	—	20 000
	丁烯醛	4.17 ± 2.407	2.806 ± 0.015	2.812 ± 0.015	1.855 ± 1.312	/
	甲基丙烯酸甲酯	3.986 ± 2.302	2.708 ± 0.011	2.857 ± 0.084	2.832 ± 0.009	/
	甲基叔丁基醚	1.131 ± 0.656	0.019 ± 0.027	—	—	/
	苯甲醛	13.733 ± 7.929	9.426 ± 0.212	9.218 ± 0.061	6.089 ± 4.306	/
	四氢呋喃	9.179 ± 6.709	2.035 ± 1.303	1.389 ± 0.347	1.245 ± 0.107	/
	戊醛	1.757 ± 0.477	0.675 ± 0.113	0.894 ± 0.273	0.434 ± 0.098	/
	乙醛*	53.980 ± 34.158	21.201 ± 4.237	46.579 ± 13.197	6.909 ± 9.434	9
	乙酸乙烯酯	75.825 ± 92.683	30.662 ± 26.908	158.253 ± 128.881	10.427 ± 10.689	/
	乙酸乙酯	—	—	—	104.251 ± 125.633	8.7
硫化物	异丙醇	9.832 ± 7.872	10.065 ± 2.09	20.157 ± 7.742	6.214 ± 4.018	3 900
	二硫化碳	12.063 ± 8.681	875.376 ± 86.809	883.907 ± 8.879	1 075.628 ± 409.924	700
	二甲基二硫	3.799 ± 4.575	696.429 ± 70.166	699.997 ± 7.177	854.609 ± 331.334	0.1
	甲硫醇	—	1 377.545 ± 439.555	2 672.73 ± 83.162	304.132 ± 97.277	0.143 358 5
	甲硫醚	—	2 681.098 ± 941.428	5 446.08 ± 183.279	253.013 ± 105.446	8.291 370 1
	甲乙硫醚	—	582.778 ± 31.852	624.515 ± 11.093	759.753 ± 250.27	/
	噻吩	—	785.905 ± 122.567	915.353 ± 7.081	1 119.958 ± 354.269	2.096 014 2
	乙硫醇	—	699.741 ± 63.895	764.331 ± 4.68	931.560 ± 296.688	/
	乙硫醚	—	793.071 ± 44.108	849.629 ± 5.489	1 026.410 ± 321.426	/

1) “—”表示该组分浓度低于仪器的检出限; 2) “/”表示未查到该物质的嗅阈值; 3) “*”表示美国 EPA 重点控制有毒有害空气污染物

明显高于生长前期,而生长中期、生长后期饲料中蛋氨酸的含量高于生长前期 0.08% (未发表数据),导致生长中期舍内含硫 VOCs 浓度明显升高.随着肉鸡的生长,肉鸡舍换气量增加,到生长后期(40 d)时,舍内开始通过机械通风增加通风量,导致含硫 VOCs 浓度降低.此外,31 d 处于清粪后的第 3 d,当日舍内粪便量为 380 kg,而在 40 d 处于清粪后的第 1 d,舍内粪便量较低为 136 kg,粪便量较低也会导致舍内含硫 VOCs 低浓度排放.

在肉鸡生长中期,甲硫醇和甲硫醚组分浓度较高(图 3),可能原因是粪便含水率高促使蛋氨酸水解转化为甲硫醇^[35],同时甲硫醇还通过甲基化过程转化甲硫醚物质,促使甲硫醚物质的排放^[36].与 Sharma 等^[37]在进行 32 d 基础饮食喂养方式的试验研究结果接近,在生长中期(采样时间:24 d)肉鸡舍内甲硫醇浓度最高.在整个肉鸡生长过程中,乙酸乙酯、甲硫醚、甲硫醇、噻吩和二硫化碳等浓度较高,需要重点关注.

2.2 主要致臭组分分析

根据生态环境部规定的恶臭污染物排放标准^[38],本研究中鸡舍内共检测出 5 种恶臭污染物,分别是二硫化碳、二甲基二硫、苯乙烯、甲硫醇和甲硫醚.此外,采用感官评价法^[39~41],用恶臭指数表

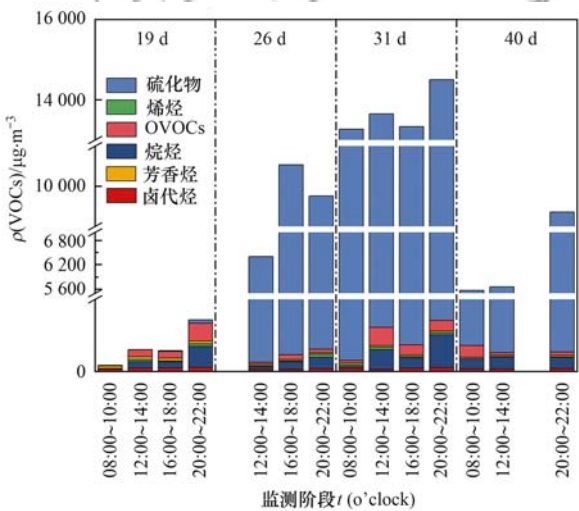


图 2 肉鸡不同生长阶段 VOCs 总浓度

Fig. 2 Concentration of VOCs in the broiler house at different broiler growth periods

示单个物质浓度与其嗅阈值的比值^[42],进行恶臭气体的筛选.综合分析结果表明,在检测到的 77 种 VOCs 中,苯、乙酸乙酯、乙醛、二硫化碳、二甲基二硫、甲硫醇、甲硫醚和噻吩均超过各自的嗅阈值,因此这 8 种组分是肉鸡养殖过程排放 VOCs 中的主要致臭组分.

在肉鸡生长 3 个阶段排放的 8 种主要恶臭

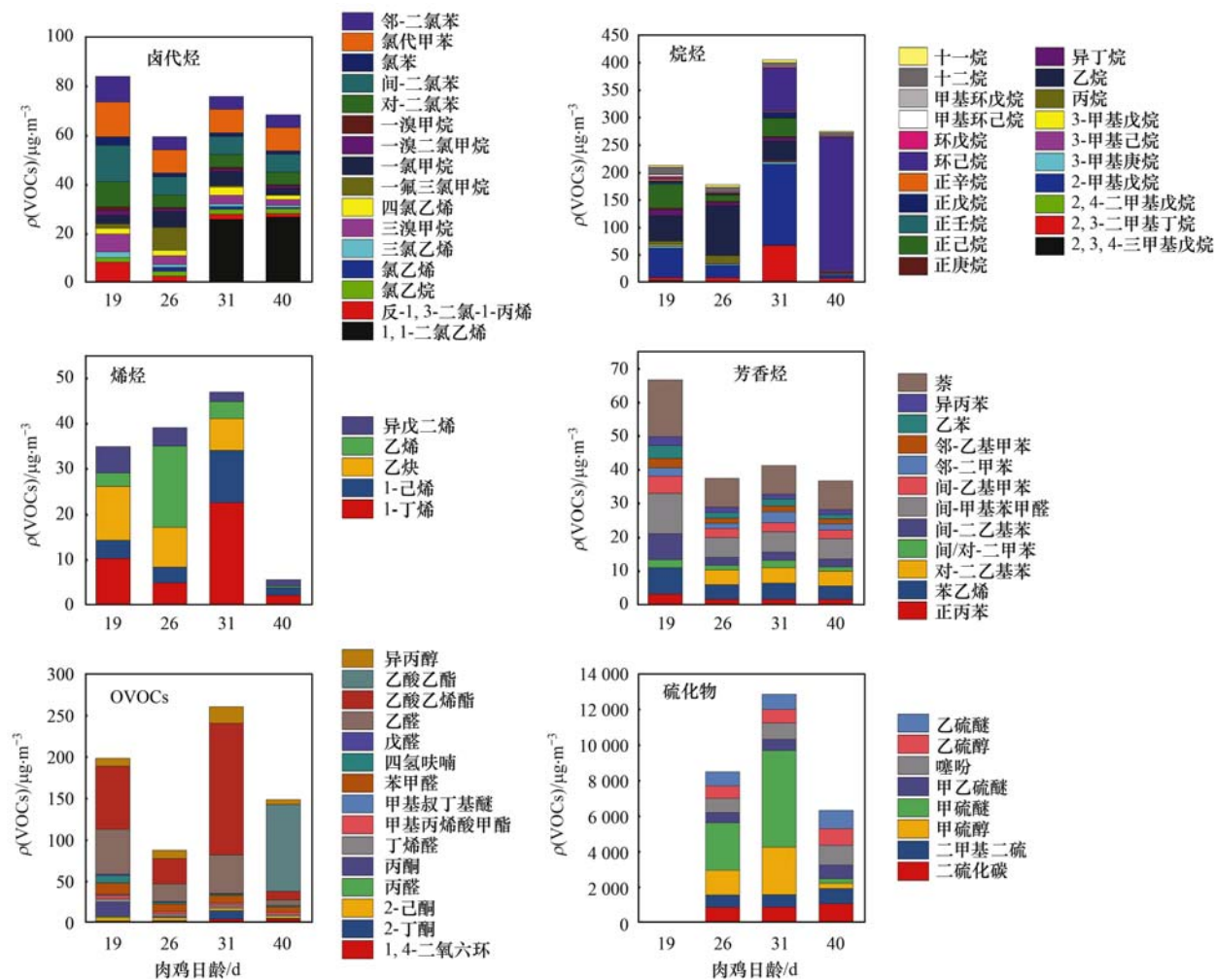


图3 鸡舍不同生长阶段 VOCs 组分浓度
Fig. 3 Concentrations of different components of VOCs in the broiler house at different growth periods

VOCs 组分中,硫化物恶臭指数高,贡献率大. 甲硫醇、噻吩和甲硫醚只出现在肉鸡生长中期和后期, 萘、乙醛、二硫化碳和二甲基二硫在肉鸡生长 3 个阶段都有出现. 其中,甲硫醇、甲硫醚、二甲基二硫和噻吩恶臭指数较高,分别为2 172. 4 ~ 19 090. 9、30. 5 ~ 656. 2、38. 0 ~ 8 546. 1 和 374. 2 ~ 533. 3; 二硫化碳、萘和乙醛恶臭指数较低,分别为 0. 02 ~ 1. 5、2. 8 ~ 5. 7 和 0. 8 ~ 6. 0. 与本研究类似, Saksrithai 等^[43]测定英国蛋鸡舍排放的恶臭 VOCs 组分主要是含硫化物. Jiang 等^[44]的研究表明肉鸡养殖场排放的主要含硫恶臭物质是:甲硫醇、乙硫醇、丙硫醇、二甲基硫、二甲基二硫、二甲基三硫化物、羰基硫化物、二硫化碳和硫化氢,这也与本研究结论类似.

2.3 健康风险评估

本研究在肉鸡生长过程中共监测到 16 种属于美国 EPA 规定的重点控制有毒有害空气污染物^[26], 有毒有害 $\rho(\text{VOCs})$ 范围在 0 ~ 243. 8 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间(表 1). 本研究中有 10 种非致癌 VOCs 和 1 种

致癌 VOCs(乙醛)可采用美国 EPA 规定的危险指数 (HI) 和终生癌症风险 (LCR), 评估暴露于 VOCs 对肉鸡饲养人员的非致癌和致癌风险.

图 4 为肉鸡生长 3 个阶段的 HI 值,当 HI 大于 1 认为存在非致癌健康风险,并且 HI 值越大发生风险越大^[4]. 在整个监测期间,生长前期和生长中期 HI 指数分别为 2. 2 和 1. 1,此阶段非致癌健康风险水平最高,主要受乙醛和萘影响. 通过分析不同生长阶段组分 HI 值,乙醛和萘在生长前期 HI 指数大于 1,表明乙醛和萘组分会带来较低的非致癌健康风险. 本研究发现这两种物质在肉鸡生长 3 个阶段持续出现,表明这些有毒有害组分具有持续排放的特性,肉鸡饲养人员长时间暴露于此,会增加其患呼吸系统疾病和致癌风险. 已有的畜禽养殖场研究中, VOCs 组分不同,HI 值存在一定差异,安徽商业养猪场舍内 HI 值范围为 0. 29 ~ 1. 1^[14],家禽屠宰场所监测到的 VOCs 组分 HI 值均高于 1^[45].

通过评价肉鸡舍排放 VOCs 的致癌风险 LCR 值,本研究生长前期、中期和后期 LCR 值分别为

7.7×10^{-6} 、 4.5×10^{-6} 和 7.4×10^{-7} . 其中,生长前期和生长中期的 LCR 值介于 $1 \times 10^{-6} < 1 \times 10^{-5}$ 之间^[42],认为肉鸡生长前期和中期存在可能致癌风险. 结合 HI 分析,肉鸡生长前期和生长后期存在可能致癌风险. 目前针对畜牧业 VOCs 的研究主要集中在恶臭污染物,然而人们所接触的环境不是单一的化合物,而是混合物. 减少恶臭气体排放并不意味着降低健康风险,因此应加强对不同 VOCs 所带来的潜在健康风险较为系统和完善的分类和评估方法研究,进而针对性地选择改善空气环境质量、降低健康风险的控制措施.

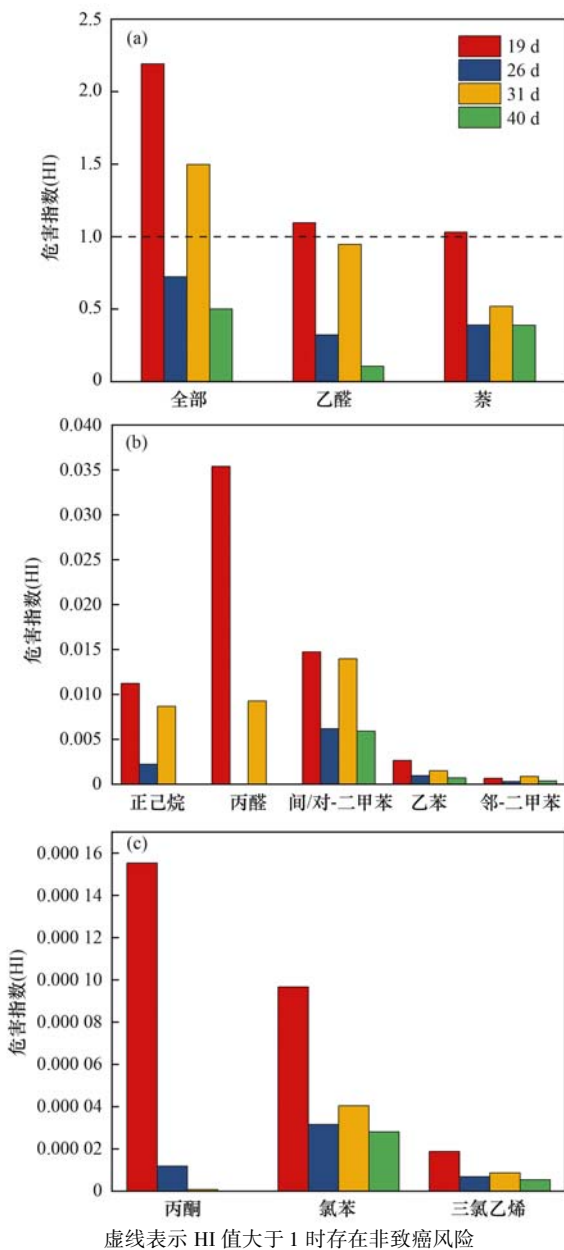


图4 肉鸡舍不同生长日期非致癌 VOCs 组分的 HI 值变化
Fig. 4 Changes in HI value of non-carcinogenic VOCs in the broiler house at different growth periods

2.4 臭氧生成潜势分析

进一步地本研究采用 MIR 方法,计算分析了肉

鸡舍 3 个阶段 VOCs 臭氧生成潜势. 结果表明,鸡龄为 19、26、31 和 40 d 的 VOCs 臭氧生成潜势分别为 $(1\,233.4 \pm 814.9)$ 、 (973.5 ± 242.9) 、 $(2\,240.5 \pm 740.6)$ 和 $(1\,202.8 \pm 183.2) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,舍内 VOCs 臭氧生成潜势平均值为 $(1\,458.9 \pm 787.4) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ (图 5). 某些含硫化合物和 OVOCs 等组分 MIR 系数尚无研究,因此计算臭氧生成潜势时忽略这些组分. 在相同 MIR 系数下,随着舍内 VOCs 浓度变化(图 2),臭氧生成潜势不断升高并在生长中期达到最大值,随后降低. 其中在 26d 时候臭氧生成潜势低于 19 d,主要原因与部分硫化物缺少 MIR 值有关. 我国 2020 年臭氧日最大 8 h 平均第 90 百分位浓度平均为 $120 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ^[46],肉鸡舍臭氧生成潜势是正常情况的 2 ~ 29 倍,可能是重要的臭氧生成源,值得关注. 与 Shi 等^[47]关于生活垃圾臭氧生成潜势的研究结果 $(1\,020 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$ 相近.

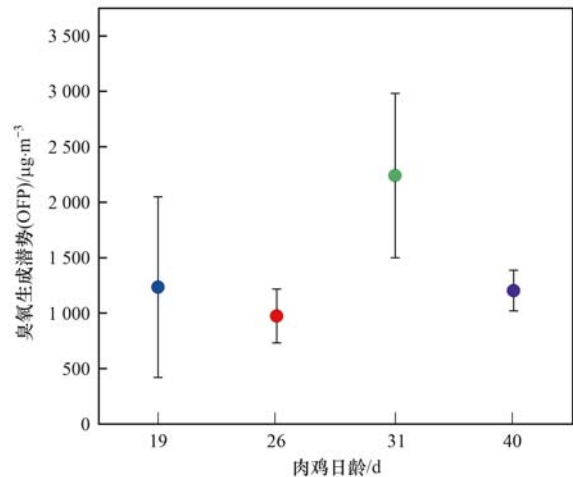


图5 肉鸡舍不同生长阶段 VOCs 臭氧生成潜势
Fig. 5 Ozone formation potential of VOCs in the broiler house at different growth periods

乙醛、二硫化碳、乙酸乙烯酯和 1,1-二氯乙烯分别是肉鸡鸡龄 19、26、31 和 40 d 对臭氧生成潜势贡献较大的组分(图 6). 乙醛和乙酸乙烯酯属于含氧 VOCs,在整个肉鸡生长阶段均属于臭氧生成潜势贡献较大的组分. 与此同时,随着肉鸡生长乙醛和乙酸乙烯酯的臭氧生成潜势逐渐降低,这主要与舍内温度降低有关^[48]. 二硫化碳和 1,1-二氯乙烯的变化趋势与乙醛和乙酸乙烯酯相反,主要原因是生长中后期二硫化碳和 1,1-二氯乙烯浓度增加较快. 而 1,1-二氯乙烯在后期成为最大的臭氧生成潜势贡献组分,主要与 MIR 值高有关. 李昊等^[49]采用 MIR 法研究发现,填埋厂作业面的臭氧生成潜势约为 $10\,000 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,乙醇与柠檬烯是对臭氧生成潜势贡献较大的组分. Liu 等^[50]对小型城市固体垃圾转运站挥发性有机化合物的排放研究得出,含氧 VOCs

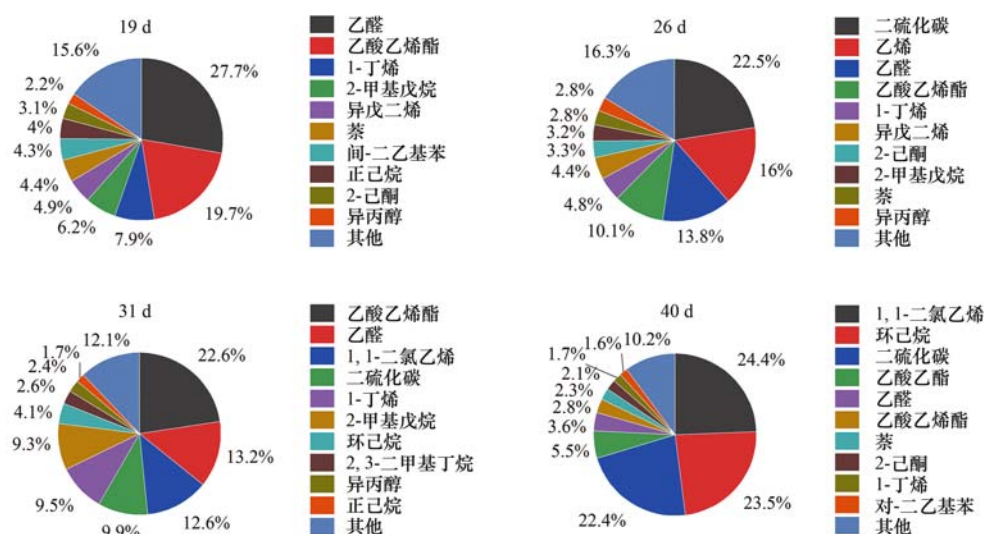


图6 肉鸡舍 10 种重要 VOCs 臭氧生成潜势比例

Fig. 6 Ozone formation potential ratios of ten important VOCs in the broiler house

是主要臭氧生成潜势组成. 可以看出, 与填埋厂作业面和垃圾转运站相比, 发酵材料和管理方式不同, 对臭氧生成潜势贡献较大的组分不同.

3 结论

(1) 肉鸡生长过程中共检测出 77 种 VOCs, 包括 16 种卤代烃、21 种烷烃、5 种烯烃、12 种芳香烃、15 种 OVOCs 和 8 种硫化物. 卤代烃、烷烃、烯烃、芳香烃和 OVOCs 浓度在整个肉鸡生长期间变化不大; 含硫氨基酸的饲料摄入量和肉鸡排污系数增加, 使含硫 VOCs 浓度在生长前期和中期呈现不断升高趋势.

(2) 肉鸡生长过程中主要致臭 VOCs 组分是萘、乙酸乙酯、乙醛、二硫化碳、二甲基二硫、甲硫醇、甲硫醚和噻吩这 8 种, 需重点关注的是 3 个生长阶段臭气指数均较高的萘、乙醛、二硫化碳和二甲基二硫组分.

(3) 健康风险评价方面, 生长前期和生长中期存在可能致癌健康风险, 引起致癌风险的 VOCs 组分是乙醛.

(4) 由于肉鸡生长中期具有的 VOCs 浓度高, 导致肉鸡生长中期臭氧生成潜势最高达到 $(1458.9 \pm 787.4) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 贡献较大的物质是二硫化碳和乙酸乙酯.

参考文献:

[1] Orzi V, Riva C, Scaglia B, *et al.* Anaerobic digestion coupled with digestate injection reduced odour emissions from soil during manure distribution [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **621**: 168-176.

[2] Kaikiti K, Stylianou M, Agapiou A. Use of biochar for the sorption of volatile organic compounds (VOCs) emitted from cattle manure [J]. *Environmental Science and Pollution*

Research, 2021, **28**(42): 59141-59149.

[3] 生态环境部. 关于印发《2018-2020 年全国恶臭/异味污染投诉情况分析》报告的函[EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/sthjbjsh/202108/t20210802_853623.html, 2021-11-05.

[4] Jia H H, Gao S, Duan Y S, *et al.* Investigation of health risk assessment and odor pollution of volatile organic compounds from industrial activities in the Yangtze River Delta region, China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, **208**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.111474.

[5] 罗达通, 张青梅, 刘湛, 等. 长株潭城区 8 月 VOCs 污染特征及来源分析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(7): 3463-3472.

Luo D T, Zhang Q M, Liu Z, *et al.* Characteristics and source apportionment of volatile organic compounds in August, Chang-Zhu-Tan urban area[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(7): 3463-3472.

[6] Li J H, Deng S X, Li G H, *et al.* VOCs characteristics and their ozone and SOA formation potentials in autumn and winter at Weinan, China[J]. *Environmental Research*, 2022, **203**, doi: 10.1016/j.envres.2021.111821.

[7] 姚青, 韩素芹, 张裕芬, 等. 天津夏季郊区 VOCs 对臭氧生成的影响[J]. *环境科学*, 2020, **41**(4): 1573-1581.

Yao Q, Han S Q, Zhang Y F, *et al.* Effects of VOCs on ozone formation in the Tianjin suburbs in summer[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(4): 1573-1581.

[8] 刘文文, 方莉, 郭秀锐, 等. 京津冀地区典型印刷企业 VOCs 排放特征及臭氧生成潜势分析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(9): 3942-3948.

Liu W W, Fang L, Guo X R, *et al.* Emission characteristics and ozone formation potential of VOCs in printing enterprises in Beijing-Tianjin-Hebei[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(9): 3942-3948.

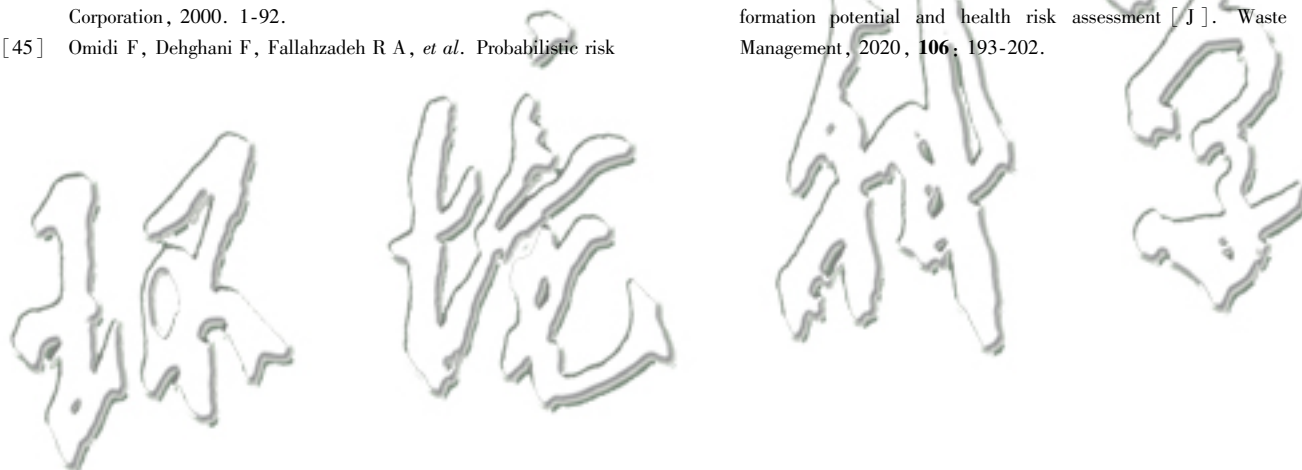
[9] 栗泽苑, 杨雷峰, 华道柱, 等. 2013—2018 年中国近地面臭氧浓度空间分布特征及其与气象因子的关系[J]. *环境科学研究*, 2021, **34**(9): 2094-2104.

Li Z Y, Yang L F, Hua D Z, *et al.* Spatial pattern of surface ozone and its relationship with meteorological variables in China during 2013-2018 [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, **34**(9): 2094-2104.

[10] 周谈龙, 尚斌, 董红敏, 等. 中试规模猪粪堆肥挥发性有机

- 物排放特征[J]. 农业工程学报, 2017, **33**(6): 192-198.
- Zhou T L, Shang B, Dong H M, *et al.* Emission characteristics of volatile organic compounds during pilot swine manure composting [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, **33**(6): 192-198.
- [11] FAO. Crops and livestock products [EB/OL]. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>, 2021-12-08.
- [12] Yao Q, Torrents A, Li H, *et al.* Using a vegetative environmental buffer to reduce the concentrations of volatile organic compounds in poultry-house atmospheric emissions [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, **66**(31): 8231-8236.
- [13] Tanaka N, Moriyama K, Ohtsu M, *et al.* Emissions of volatile organic compounds from a dairy cattle shed in Japan [J]. Asian Journal of Atmospheric Environment, 2019, **13**(3): 171-185.
- [14] Nie E Q, Zheng G D, Ma C. Characterization of odorous pollution and health risk assessment of volatile organic compound emissions in swine facilities [J]. Atmospheric Environment, 2020, **223**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.117233.
- [15] Murphy K R, Parcsi G, Stuetz R M. Non-methane volatile organic compounds predict odor emitted from five tunnel ventilated broiler sheds [J]. Chemosphere, 2014, **95**: 423-432.
- [16] Svihus B, Choct M, Classen H L. Function and nutritional roles of the avian caeca: a review [J]. World's Poultry Science Journal, 2013, **69**(2): 249-264.
- [17] Sharma N K, Choct M, Wu S, *et al.* Nutritional effects on odour emissions in broiler production [J]. World's Poultry Science Journal, 2017, **73**(2): 257-280.
- [18] 刘新军, 王淑娟, 刘程, 等. COVID-19 疫情期间雄安新区 VOCs 的变化特征、臭氧生成潜势及来源解析 [J]. 环境科学, 2022, **43**(3): 1268-1276.
- Liu X J, Wang S J, Liu C, *et al.* Characteristics, ozone formation potential and source apportionment of VOCs during COVID-19 epidemic in Xiong'an [J]. Environmental Science, 2022, **43**(3): 1268-1276.
- [19] Yuan C S, Cheng W H, Huang H Y. Spatiotemporal distribution characteristics and potential sources of VOCs at an industrial harbor city in southern Taiwan: Three-year VOCs monitoring data analysis [J]. Journal of Environmental Management, 2022, **303**, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.114259.
- [20] 库盈盈, 任万辉, 苏枫枫, 等. 沈阳市不同功能区挥发性有机物分布特征及臭氧生成潜势 [J]. 环境科学, 2021, **42**(11): 5201-5209.
- Ku Y Y, Ren W H, Su C C, *et al.* Pollution characteristics and ozone formation potential of ambient VOCs in different functional zones of Shenyang, China [J]. Environmental Science, 2021, **42**(11): 5201-5209.
- [21] 邵珠泽, 郑国砥, 王元刚, 等. 生活垃圾堆肥设施 VOCs 排放特征及臭氧生成潜势分析 [J]. 环境科学, 2017, **38**(5): 1783-1791.
- Shao Z Z, Zheng G D, Wang Y G, *et al.* Emission characteristics and ozone formation potential of VOCs from a municipal solid waste composting plant [J]. Environmental Science, 2017, **38**(5): 1783-1791.
- [22] 生态环境部. 关于印发《2020 年挥发性有机物治理攻坚方案》的通知 [EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk03/202006/t20200624_785827.html, 2021-11-05.
- [23] 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].
- [24] EPA. Compendium of methods for the determination of toxic organic compounds in ambient air; Method TO-15 [R]. Cincinnati: EPA, 1999.
- [25] HJ 1078-2019, 固定污染源废气 甲硫醇等 8 种含硫有机化合物的测定 气袋采样-预浓缩/气相色谱-质谱法 [S].
- [26] EPA. Initial list of hazardous air pollutants with modifications [EB/OL]. <https://www.epa.gov/haps/initial-list-hazardous-air-pollutants-modifications>, 2021-10-25.
- [27] EPA. Dose-Response assessment for assessing health risks associated with exposure to hazardous air pollutants [EB/OL]. <https://www.epa.gov/fera/dose-response-assessment-assessing-health-risks-associated-exposure-hazardous-air-pollutants>, 2021-10-25.
- [28] Ma Y R, Fu S Q, Gao S, *et al.* Update on volatile organic compound (VOC) source profiles and ozone formation potential in synthetic resins industry in China [J]. Environmental Pollution, 2021, **291**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.118253.
- [29] Zhang X M, Wang D, Liu Y, *et al.* Characteristics and ozone formation potential of volatile organic compounds in emissions from a typical Chinese coking plant [J]. Journal of Environmental Sciences, 2020, **95**: 183-189.
- [30] Chmielowiec-Korzeniowska A, Tymczyńska L, Pyrz M, *et al.* Occupational exposure level of pig facility workers to chemical and biological pollutants [J]. Annals of Agricultural and Environmental Medicine, 2018, **25**(2): 262-267.
- [31] 林泽铃, 蒋守群. 家禽蛋氨酸营养研究新进展 [J]. 广东畜牧兽医科技, 2021, **46**(4): 1-6, 19.
- Lin Z L, Jiang S Q. New progress of methionine nutrition in poultry [J]. Guangdong Journal of Animal and Veterinary Science, 2021, **46**(4): 1-6, 19.
- [32] 钟智康, 王燕, 吴银宝, 等. 单胃动物肠道细菌群落及其产臭机制研究进展 [J]. 家畜生态学报, 2018, **39**(6): 5-11.
- Zhong Z K, Wang Y, Wu Y B, *et al.* Effect of intestinal bacteria community and its mechanism on odor production in monogastric animals [J]. Acta Ecologica Animalis Domastici, 2018, **39**(6): 5-11.
- [33] Li Y C, Ma J, Yong X Y, *et al.* Effect of biochar combined with a biotrickling filter on deodorization, nitrogen retention, and microbial community succession during chicken manure composting [J]. Bioresource Technology, 2022, **343**, doi: 10.1016/j.biortech.2021.126137.
- [34] 余亲平, 黄静宇, 张翠萍, 等. 大麦虫粉对黄羽肉鸡生产性能、肠道结构和菌群组成的影响 [J]. 中国畜牧兽医, 2022, **49**(2): 548-558.
- Yu Q P, Huang J Y, Zhang C P, *et al.* Effects of barley worm meal on growth performance, intestinal structure and microflora composition of yellow-feathered broilers [J]. China Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2022, **49**(2): 548-558.
- [35] Clanton C J, Schmidt D R. Sulfur compounds in gases emitted from stored manure [J]. Transactions of the ASAE, 2000, **43**(5): 1229-1239.
- [36] Zang B, Li S Y, Michel F Jr, *et al.* Effects of mix ratio, moisture content and aeration rate on sulfur odor emissions during pig manure composting [J]. Waste Management, 2016, **56**: 498-505.
- [37] Sharma N K, Choct M, Wu S B, *et al.* Dietary composition affects odour emissions from meat chickens [J]. Animal Nutrition, 2015, **1**(1): 24-29.
- [38] GB 14554-1993, 恶臭污染物排放标准 [S].
- [39] EPA. Reference guide to odor thresholds for hazardous air pollutants listed in the clean air act amendments of 1990 [EB/OL]. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=2000BHG5.txt>, 2021-09-08.

- [40] 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, Zhai 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.
- [41] Nagata Y, Takeuchi N. Measurement of odor threshold by triangle odor bag method[J]. Odor Measurement Review, 2003, **118**: 118-127.
- [42] 张雪驰, 沙青娥, 陆梦华, 等. 珠三角某石化园区 VOCs 排放特征及影响评价[J]. 环境科学, 2022, **43**(4): 1766-1776.
Zhang X C, Sha Q E, Lu M H, *et al.* Volatile organic compounds emission characteristics and influences assessment of a petrochemical industrial park in the pearl river delta region[J]. Environmental Science, 2022, **43**(4): 1766-1776.
- [43] Saksrithai K, King A J. Controlling hydrogen sulfide emissions during poultry productions[J]. Journal of Animal Research and Nutrition, 2018, **3**(1), doi: 10.21767/2572-5459.100040.
- [44] Jiang J K, Sands J R. Odour and ammonia emission from broiler farms[R]. Sydney: Rural Industries Research and Development Corporation, 2000. 1-92.
- [45] Omidi F, Dehghani F, Fallahzadeh R A, *et al.* Probabilistic risk assessment of occupational exposure to volatile organic compounds in the rendering plant of a poultry slaughterhouse [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, **176**: 132-136.
- [46] 中国环境监测总站. 空气质量状况报告[EB/OL]. <http://www.cnemc.cn/jcbg/kqzlzkbq/>, 2021-12-01.
- [47] Shi X X, Zheng G D, Shao Z Z, *et al.* Effect of source-classified and mixed collection from residential household waste bins on the emission characteristics of volatile organic compounds [J]. Science of the Total Environment, 2020, **707**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135478.
- [48] Tan H B, Zhao Y, Ling Y, *et al.* Emission characteristics and variation of volatile odorous compounds in the initial decomposition stage of municipal solid waste [J]. Waste Management, 2017, **68**: 677-687.
- [49] 李昊, 刘彦君, 陈坦, 等. 填埋场作业面 NMOCs 臭氧生成潜势及高贡献物质[J]. 环境科学, 2018, **39**(9): 4070-4077.
Li H, Liu Y J, Chen T, *et al.* Ozone generation potential and highly contributing substances of NMOCs from landfill working face[J]. Environmental Science, 2018, **39**(9): 4070-4077.
- [50] 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.



CONTENTS

Regionalization and Analysis of PM _{2.5} and O ₃ Synergetic Prevention and Control Areas Based on Remote Sensing Data	LI Shen-xin, ZOU Bin, ZHANG Feng-ying, <i>et al.</i>	(4293)
Analysis of a Typical Ozone Pollution Process in Guangzhou in Winter	PEI Cheng-lei, XIE Yu-tong, CHEN Xi, <i>et al.</i>	(4305)
Establishment and Application of Foshan Ozone Concentration Forecast Equation	CHEN Chen, HONG Ying-ying, TAN Hao-bo, <i>et al.</i>	(4316)
Establishment of High-Resolution Emissions Inventory in Wuhai and Its Application in Exploring the Causes of Ozone Pollution	ZHANG Rui-xin, CHU Bo, SHANG Chun-lin, <i>et al.</i>	(4327)
Investigating the Pollutants of Marine Shipping Emissions Along the East China Sea by Combining in-situ Measurements and Automatic Identification System	QIU Hao, LIU Dan-long, WU Yang-zhou, <i>et al.</i>	(4338)
Chemical Component of Particulate Matters and VOCs Characteristics During Vehicle Brake Processes	MEN Zheng-yu, LIU Du-you, GUO Quan-you, <i>et al.</i>	(4348)
Characterization of VOCs Emissions from Caged Broiler House in Winter	CAO Tian-tian, ZHENG Yun-hao, ZHANG Yu, <i>et al.</i>	(4357)
Concentrations and Community Structures of Culturable Bacteria in Aerosols of Household Garbage Stations in Shanghai	LU Bing-jie, ZHANG Xiang, WANG Chuan, <i>et al.</i>	(4367)
Inventory and Distribution Characteristics of Anthropogenic Ammonia Emissions in Zhejiang Province from 2008 to 2018	FANG Li-jiang, YANG Yi-qun, YE Guan-qiong	(4380)
Roadmap of Coal Control and Carbon Reduction in the Steel Industry Under the Carbon Peak and Neutralization Target	XUE Ying-lan, ZHANG Jing, LIU Yu, <i>et al.</i>	(4392)
Carbon Emission Reduction Effect of Spatial Correlation Network Structure Characteristics: From the Perspective of Urban Agglomeration	ZHENG Hang, YE A-zhong	(4401)
Pollution and Carbon Reduction Effect of OFDI in China and Its Mechanism	BAI Zi-han, LÜ Lian-hong, ZHAO Ming-xuan, <i>et al.</i>	(4408)
Variation Characteristics of Surface Water Quality in China in Recent Years	JI Xiao-yan, HOU Huan-huan, WANG Shan-shan, <i>et al.</i>	(4419)
Distribution, Risk, and Influencing Factors of Microplastics in Surface Water of Huangshui River Basin	FAN Meng-yuan, HUANG Yi-mei, ZHANG Hai-xin, <i>et al.</i>	(4430)
Hydrochemical and Isotopic Characteristics in the Surface Water of the Fenhe River Basin and Influence Factors	ZHAO Chun-hong, SHEN Hao-yong, WANG Zhi-heng, <i>et al.</i>	(4440)
Characteristics and Causes of High-manganese Groundwater in Pearl River Delta During Urbanization	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i>	(4449)
Characteristics and Causes of Groundwater Salinization in the Plain Area of the Lower Kashgar River	LU Han, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i>	(4459)
Sources and Biogeochemical Processes of Nitrate in the Laolongdong Karst Underground River Basin, Chongqing	WANG Yu-yang, YANG Ping-heng, ZHANG Jie-ru	(4470)
Succession Pattern and Consequences of the Dominant Species During Cyanobacterial Bloom and Its Influencing Factors	OUYANG Tian, ZHAO Lu, JI Lu-lu, <i>et al.</i>	(4480)
Structural Characteristics of Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in a Group of Drinking Water Reservoirs by Water Transmission from Modaomen Waterway in Zhuhai	ZHANG Mo-li, WANG En-rui, CHANG Sheng, <i>et al.</i>	(4489)
Effects of Nutrients on the Growth of <i>Microcystis aeruginosa</i> and Bacteria in the Phycosphere	LÜ Ping, LI Hui-li, XU Yong, <i>et al.</i>	(4502)
Effect of Aging on Adsorption of Tetracycline by Microplastics and the Mechanisms	WANG Lin, WANG Shu-xin, ZENG Xiang-ying, <i>et al.</i>	(4511)
Effect of Colloids in Sediment and Soil on Their Sorption Behavior of Chloramphenicol	YAN Cai-xia, LUO Yan-qing, NIE Ming-hua, <i>et al.</i>	(4522)
Historical Antibiotic Stress Changed the Effects of Sulfamethoxazole and Trimethoprim on Activated Sludge: ARGs and Potential Hosts	ZHANG Zhong-xing, FAN Xiao-yan, LI Xing, <i>et al.</i>	(4536)
Spatial Distribution and Sources of Heavy Metals in Soil of a Typical Lead-Zinc Mining Area, Yangshuo	CHEN Meng, PAN Yong-xing, HUANG Yi-xiang, <i>et al.</i>	(4545)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Baiyangdian Lake	ZHENG Fei, GUO Xin, TANG Ming-yang, <i>et al.</i>	(4556)
Spatial Differentiation and Influencing Factor Analysis of Soil Heavy Metal Content at Town Level Based on Geographic Detector	GONG Cang, WANG Liang, WANG Shun-xiang, <i>et al.</i>	(4566)
Heavy Metal Emissions from Coal-fired Power Plants and Heavy Metal Pollution Characteristics and Health Risks in Surrounding Soils	CHE Kai, CHEN Chong-ming, ZHENG Qing-yu, <i>et al.</i>	(4578)
Enrichment Factors, Health Risk, and Source Identification of Heavy Metals in Agricultural Soils in Semi-arid Region of Hainan Island	YANG Jian-zhou, GONG Jing-jing, WANG Zhen-liang, <i>et al.</i>	(4590)
Speciation and Pollution Assessment of Heavy Metals in Mangrove Surface Sediments in Jiulong River Estuary	ZHANG Hua-lan, YU Rui-lian, WAN Rui-an, <i>et al.</i>	(4601)
Status of Heavy Metal in Organic Fertilizers in Main Tea Growing Regions of China	YI Xiao-yun, FANG Li, YANG Xiang-de, <i>et al.</i>	(4613)
Accumulation Characteristics and Sources of PAEs in Agricultural Soils in Gansu Province	CHEN Yu-yu, ZHANG Guang-quan, ZHANG Yang, <i>et al.</i>	(4622)
Distribution Characteristics of Soil Phosphorus Forms and Phosphatase Activity at Different Altitudes in the Soil of Water-Level-Fluctuation Zone in Pengxi River, Three Gorges Reservoir	GAO Yi-lun, FANG Fang, TANG Zi-chao, <i>et al.</i>	(4630)
Characteristics of Soil Organic Carbon Components and Their Correlation with Other Soil Physical and Chemical Factors in Cotton Fields with Different Continuous Cropping Years in the Oasis on the Northern Edge of Tarim Basin	LI Xin-zhu, GONG Lu, TANG Jun-hu, <i>et al.</i>	(4639)
Response of Soil Respiration Rates to Soil Temperature and Moisture at Different Soil Depths of <i>Caragana korshinskii</i> Plantation in the Loess-Hilly Region	SUN Ya-rong, WANG Ya-juan, ZHAO Min, <i>et al.</i>	(4648)
Influence of Biochar Application on Soil Nitrate Leaching and Phosphate Retention: A Synthetic Meta-analysis	JIANG Zhi-xiang, CUI Shuang, ZHANG Xin, <i>et al.</i>	(4658)
Role and Mechanism of Low Molecular-Weight-Organic Acids in Enhanced Phytoremediation of Heavy Metal Contaminated Soil	FANG Zhi-guo, XIE Jun-ting, YANG Qing, <i>et al.</i>	(4669)
Remediation Effect and Mechanism of Inorganic Passivators on Cadmium Contaminated Acidic Paddy Soil	ZHANG Jian, KONG Fan-yi, LU Sheng-gao	(4679)
Mechanism of Lead-zinc Enrichment and Resistance of Spent Mushroom Compost to Lead-Zinc Slag in <i>Koeleria paniculata</i>	XIE Tian-zhi, CHEN Yong-hua, SU Rong-kui, <i>et al.</i>	(4687)
Phosphorus Enrichment Efficiency of CaO ₂ @FA Composites and the Effect of Its Recovered Material on Soil Improvement	YUE Wei, LI Da-peng, WU Ling-yu, <i>et al.</i>	(4697)
Effects of Early Rice Straw Returning with Reducing Potassium Fertilizer on Late Rice Yield and Soil Fertility	HUANG Qiao-yi, HUANG Jian-feng, HUANG Xu, <i>et al.</i>	(4706)
Effects of Continuous Straw Returning with Chemical Fertilizer on the Carbon Pool and Crop Yield of Rice-Rape Rotation Soils	CAI Ying, FU Si-wei, ZHANG Bo-rui, <i>et al.</i>	(4716)
Effects of Chemical Fertilizer Reduction Combined with Straw Application on Diazotrophic Communities in a Double Rice Cropping System	CHEN Kai-peng, WEI Ju-xian, CHEN Dan, <i>et al.</i>	(4725)
Impacts of Co-application of Chemical Fertilizer Reduction and Organic Material Amendment on Fluvio-aquic Soil Microbial N-cycling Functional Gene Abundances and N-converting Genetic Potentials in Northern China	LI Sheng-jun, HU He, LI Gang, <i>et al.</i>	(4735)
Response Characteristics of Soil Microbial Community Under Long-term Film Mulching	HU Zhi-e, XIAO Mou-liang, DING Ji-na, <i>et al.</i>	(4745)
Effects of Long-term Straw Returning on Fungal Community, Enzyme Activity and Wheat Yield in Fluvio-aquic Soil	MA Lei, LI Yan, WEI Jian-lin, <i>et al.</i>	(4755)
Effects of Soil Amendments on the Bacterial Diversity and Abundances of Pathogens and Antibiotic Resistance Genes in Rhizosphere Soil Under Drip Irrigation with Reclaimed Water	CUI Bing-jian, CUI Er-ping, LIU Chun-cheng, <i>et al.</i>	(4765)
Effect of Nitrogen on the Phytoremediation of Cd-PAHs Co-contaminated Dumpsite Soil by Alfalfa (<i>Medicago sativa</i> L.) and on the Soil Bacterial Community Structure	LI Yi-jia, MA Jun-wei, LI Yu-qian, <i>et al.</i>	(4779)
Effect of Antibiotic-Degrading Bacteria on Maturity and Bacterial Community Succession During Pig Manure Composting	LI Wei-lin, ZHANG Xin, MA Jun-wei, <i>et al.</i>	(4789)