

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

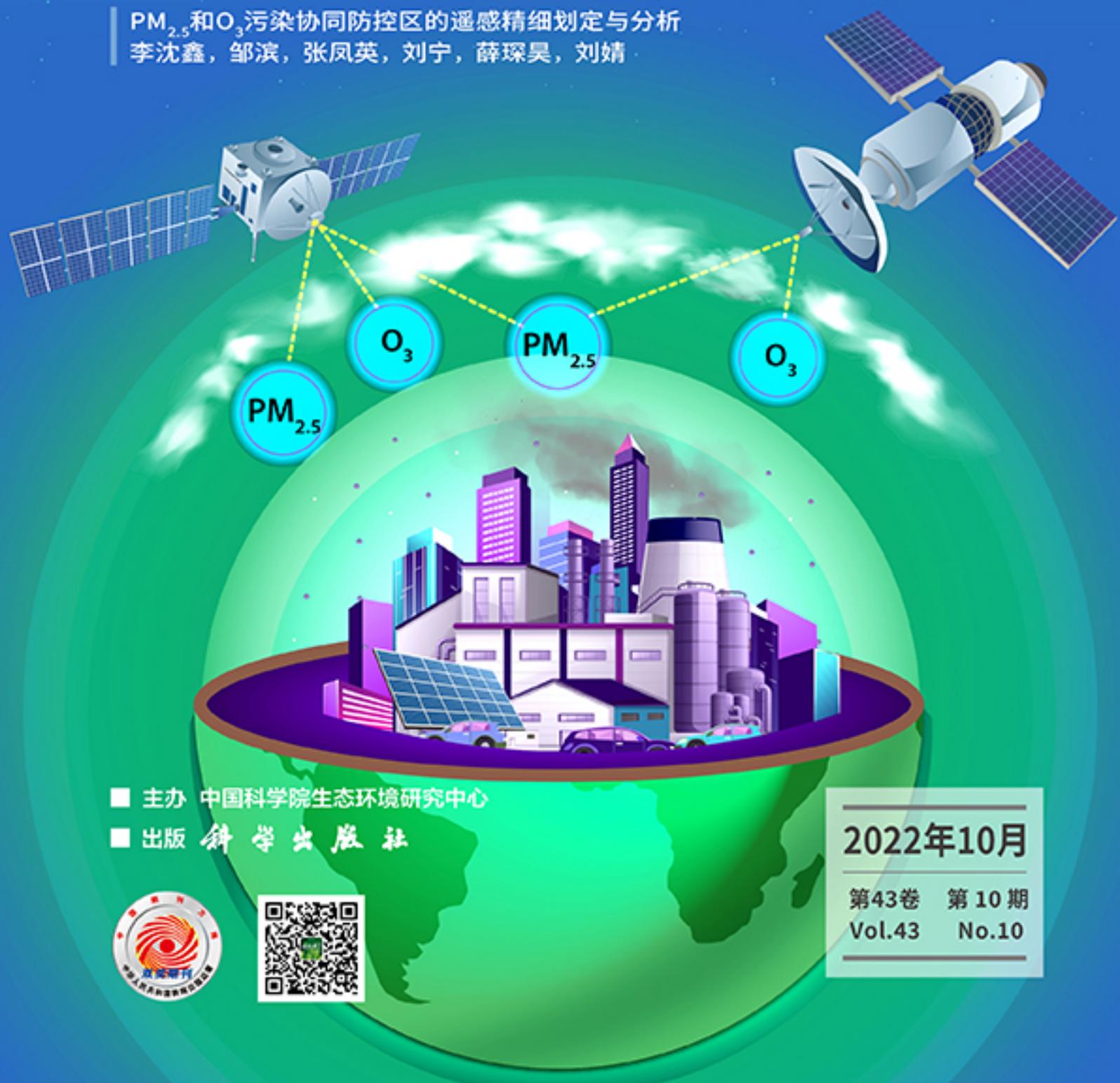
# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>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<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>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 ..... 王雨吻, 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, 张坤锋, 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, 王樞潼, 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, 马立锋, 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 ..... 陈王玉, 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, 卢焯桢, 黄海, 朱芸烟, 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<sub>2</sub>/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, 韦菊烟, 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, 季剑虹, 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 ..... 李玮琳, 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)

# 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<sup>1</sup>, 张翔<sup>1</sup>, 王川<sup>2</sup>, 邵俊<sup>2</sup>, 李丹<sup>1\*</sup>

(1. 复旦大学环境科学与工程系, 上海市大气颗粒物污染防治重点实验室, 上海 200433; 2. 上海市环境工程设计科学研究院有限公司, 上海 200085)

**摘要:** 空气传播病原微生物受到越来越多的关注, 生活垃圾携带大量病原菌, 垃圾房可能会对周围环境及人群健康造成影响。以上海市某别墅区垃圾房、某校园垃圾房和周边某居民区垃圾房作为研究对象, 分析垃圾房内和周边环境空气中可培养细菌的浓度、粒径和种群分布特征, 解析环境因素与空气中可培养细菌污染的关系。结果表明, 5个采样点(某别墅区垃圾房、其下风向、某校园垃圾房、某办公楼顶和某居民区垃圾房)的可培养细菌浓度分别为:  $(1\ 254 \pm 92)$ 、 $(280 \pm 123)$ 、 $(172 \pm 47)$ 、 $(84 \pm 18)$  和  $(175 \pm 174)$   $\text{CFU} \cdot \text{m}^{-3}$ , 别墅区垃圾房内生物气溶胶浓度显著高于其他采样点, 主要原因是该垃圾房内存在湿垃圾就地处理生化处理设施。别墅区垃圾房内生物气溶胶可培养细菌粒径主要分布在  $1.1 \sim 4.7 \mu\text{m}$ , 而其余4个采样点的细菌粒径主要为  $>7 \mu\text{m}$ , 少数细菌粒径范围为  $1.1 \sim 2.1 \mu\text{m}$ 。本研究5个采样点可培养细菌中优势门分别为变形菌门(Proteobacteria)和厚壁菌门(Firmicutes), 优势菌属分别为棒状杆菌属(*Corynebacterium*)和芽孢杆菌属(*Bacillus*), 同时检出棒状杆菌属(*Corynebacterium*)、葡萄球菌属(*Staphylococcus*)和不动杆菌属(*Acinetobacter*)等机会致病菌。某别墅区垃圾房内生物气溶胶的浓度与温度、相对湿度、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 $\text{PM}_{10}$ 相关性较高, 空气中微小杆菌属(*Exiguobacterium*)与 $\text{PM}_{10}$ 、温度和相对湿度都具有较高的相关性。5个采样点的健康危险系数(HQ)值均小于1, 但微生物定量风险评价结果表明, 3个垃圾房的男性与女性工作人员健康风险均高于相应的基准值。研究结果揭示了生活垃圾房对周围环境气溶胶微生物组成的影响, 为评价垃圾房内和周边空气质量提供参考。

**关键词:** 生活垃圾房; 可培养细菌; 粒径分布; 群落结构; 健康风险

中图分类号: X172; X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)10-4367-13 DOI: 10.13227/j.hjxx.202112088

## Concentrations and Community Structures of Culturable Bacteria in Aerosols of Household Garbage Stations in Shanghai

LU Bing-jie<sup>1</sup>, ZHANG Xiang<sup>1</sup>, WANG Chuan<sup>2</sup>, TAI Jun<sup>2</sup>, LI Dan<sup>1\*</sup>

(1. Shanghai Key Laboratory of Atmospheric Particle Pollution and Prevention, Department of Environmental Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China; 2. Shanghai Institute for Design and Research on Environmental Engineering, Shanghai 200085, China)

**Abstract:** The airborne microorganism has attracted increasing attention, and household garbage carries various pathogenic bacteria that affect the surrounding environment and public health. In this study, the culturable bacteria in the air were collected by using a six-level Anderson sampler, and the temperature, relative humidity,  $\text{PM}_{2.5}$ , and  $\text{PM}_{10}$  in the garbage stations and their surrounding environment were recorded. The relationships between environmental factors and culturable bacterial pollution in the air were also analyzed. The results showed that the culturable bacterial concentrations in five sampling sites (the garbage station of a villa and the area downwind, the garbage station of a campus, the roof of an office building, and the garbage station of a residential area) were  $(1\ 254 \pm 92)$ ,  $(280 \pm 123)$ ,  $(172 \pm 47)$ ,  $(84 \pm 18)$ , and  $(175 \pm 174)$   $\text{CFU} \cdot \text{m}^{-3}$ , respectively. The concentrations of the culturable bacteria in the garbage station of the villa were significantly higher than those of other sampling sites, mainly because there were biochemical treatment facilities for the on-site treatment of wet garbage in the garbage house. The sizes of the culturable bacteria in the garbage station of the villa mainly ranged from  $1.1 \sim 4.7 \mu\text{m}$ , and the bacterial sizes at the other four sampling sites were primarily larger than  $7 \mu\text{m}$ , with a few bacteria ranging from  $1.1 \sim 2.1 \mu\text{m}$ . In this study, Proteobacteria and Firmicutes were the dominant phyla, and *Corynebacterium* and *Bacillus* were the dominant genera. More importantly, some opportunistic pathogens such as *Corynebacterium*, *Staphylococcus*, and *Acinetobacter* were also detected. The concentrations of the culturable bacteria in the garbage station of the villa were highly correlated with temperature, relative humidity,  $\text{PM}_{2.5}$ , and  $\text{PM}_{10}$ . *Exiguobacterium* in the air was highly correlated with  $\text{PM}_{10}$ , temperature, and relative humidity. The health hazard quotient (HQ) values of the five sampling sites were all less than 1; however, the results of microbial quantitative risk assessment showed that the health risks of the male and female staff in the three garbage houses were all higher than the corresponding reference values. This study revealed the influence of garbage stations on the bioaerosol in the surrounding environment and provided references for the evaluation of air quality in and around garbage stations.

**Key words:** household garbage stations; culturable bacteria; size distribution; community structure; health risk

空气污染是影响人类健康的重要原因<sup>[1]</sup>。生物气溶胶通常是指空气动力学直径小于  $100 \mu\text{m}$  且含有微生物或来源于生物性物质的空气悬浮物, 包括细菌、真菌、病毒颗粒和花粉等多种微生物颗粒<sup>[2]</sup>。自然活动和人类活动, 如土壤、海洋、植被、动物粪便、人类皮肤、废水处理厂和堆肥设施等都

是生物气溶胶的重要来源<sup>[3]</sup>。近年来, 由于气溶胶

收稿日期: 2021-12-08; 修订日期: 2022-02-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(92043301, 91843301); 上海市自然科学基金项目(20ZR1404300); 上海市科委科技创新计划项目(19DZ1204602)

作者简介: 卢冰洁(1997~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为生物气溶胶及其健康效应, E-mail: 19210740035@fudan.edu.cn

\* 通信作者, E-mail: lidanfudan@fudan.edu.cn

传播致病微生物而引发的传染病已成为全球关注的重要问题,当传染性病原微生物的粒径足够小时,可在空气中停留较长时间并且进行远距离传播,通过皮肤损伤、呼吸道和消化道等途径引发人类呼吸道感染、心血管疾病等,对人类健康造成巨大威胁和重大的公共卫生风险<sup>[4-6]</sup>,如严重急性呼吸综合征(SARS)、甲型 H1N1 流感和目前正在全球范围内流行的新型冠状病毒(SARS-CoV-2)<sup>[7]</sup>.因此,了解生活环境中的微生物组成情况,评估环境质量和生物气溶胶健康效应具有重要意义.

生活垃圾是指日常生活所产生的固体废弃物和法律法规所规定的视为生活垃圾的固体废物<sup>[8]</sup>,城市生活垃圾的管理问题日趋严重.2019年7月1日,上海市正式实行新版“上海城市生活垃圾管理条例”,将垃圾按照可回收垃圾、有害垃圾、干垃圾和湿垃圾进行分类处理.作为全国首个开展城市垃圾分类的城市,上海市目前采用卫生填埋、生化处理和临时堆放等方式进行处置,生活垃圾无害化处理已达100%<sup>[8]</sup>.根据上海市绿化市容局的统计结果得知,2020年5月上海湿垃圾分出量为9 796 t·d<sup>-1</sup>,干垃圾处置量为15 351 t·d<sup>-1</sup>,可回收物回收量为6 266 t·d<sup>-1</sup>,全年上海市新增湿垃圾集中处置能力1 450 t·d<sup>-1</sup>、就地处理能力500 t·d<sup>-1</sup>,总能力达到7 000 t·d<sup>-1</sup>.由于大部分居民区垃圾房属于生活垃圾临时堆放点,垃圾废物的收集、运输、卸货、分类和最终处置基本由工人体力劳动完成,机械化程度低<sup>[9]</sup>.生活垃圾中含有大量的病原微生物,附着在垃圾表面的微生物会逸散到周围环境中产生不良影响<sup>[10]</sup>.垃圾的不同处理过程中,微生物气溶胶污染程度也会有所不同,有研究发现城市固体废弃物综合处理厂的不同功能区微生物气溶胶浓度分布存在差异,生活垃圾集料间浓度明显高于分离区、预处理区,这种现象很大程度上和空间相对狭小、空气流动性差等条件有关<sup>[11]</sup>,对法国一家垃圾分检厂不同功能区产生的生物气溶胶的研究发现,不同功能区的真菌和细菌菌属分布存在明显差异<sup>[12]</sup>.

目前研究微生物气溶胶的方法包括培养法、基因扩增(包括高通量测序法)、光学检测技术<sup>[13]</sup>、基因芯片技术<sup>[14]</sup>、染色荧光显微镜法<sup>[15]</sup>和表面增强拉曼光谱(SERS)<sup>[16]</sup>等.传统的培养法通过分离纯化可以得到具有关键功能的微生物<sup>[17]</sup>,是一种简单且经济成本低的检测方法,通过单菌落计数来检测空气中可培养微生物的浓度<sup>[18]</sup>.培养法同时也是病原菌临床诊断的标准方法之一,环境气溶胶中含有大量病原菌,可引起呼吸道感染和心血管疾病等<sup>[19,20]</sup>,如流感嗜血菌、肺炎链球菌、金黄色葡萄

球菌和肺炎支原体等多种菌群,可通过巧克力平板和血琼脂平板等培养分离得到<sup>[21,22]</sup>.因此,微生物培养技术是探究气溶胶细菌污染与人体健康必不可少的研究方法<sup>[23]</sup>,也是充分认识气溶胶复杂微生物体系关键技术支撑<sup>[24]</sup>.但培养法也存在一定的弊端,由于采样过程中很难保存生物活性,在实际情况中只有不到1%的细菌可以在实验室中培养<sup>[25]</sup>,很容易低估生物气溶胶的浓度及其对健康的影响,但有研究表明空气中微生物数量与沉降的尘埃中观察到的微生物数量有很强的相关性( $R^2$ : 0.70 ~ 0.94)<sup>[26]</sup>.免于培养的高通量测序技术可以更加完整地分析空气中微生物的多样性<sup>[27]</sup>,优点是可以在短时间内测数百万个DNA序列<sup>[28]</sup>,并且能够在不同环境中获得了更加完整的DNA<sup>[29]</sup>,但该技术无法认识和获取其中可培养的微生物资源<sup>[30]</sup>,因此被广泛用来研究空气中非可培养微生物的群落结构<sup>[17,31,32]</sup>.

国内外已有大量研究分析垃圾填埋场和固废处理厂微生物气溶胶污染现状<sup>[3,12,33-36]</sup>,但缺乏对城市生活垃圾房的研究,因此本文以上海市某别墅区生活垃圾房、某校园垃圾房和周边某居民区垃圾房为研究对象,利用安德森六级空气微生物采样器,检测垃圾房内和其周边环境空气中可培养细菌的污染状况,利用16S rDNA测序分析可培养细菌的种群分布特征,同时探讨温度、湿度、PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>等环境因素对生物气溶胶浓度及菌属分布的影响,评估垃圾房释放生物气溶胶的健康危害,以期了解城市生活垃圾房生物气溶胶的污染特征、影响因素及健康风险提供一定的科学依据和数据支撑.

## 1 材料与方法

### 1.1 采样点设置和样品采集

目前上海市的垃圾房分布非常广泛,包括别墅区、办公大楼、老旧小区、菜市场 and 农村等.本文选择了3种不同类型的垃圾房作为研究对象,分别是某别墅区垃圾房、某校园垃圾房和周边某普通住宅区垃圾房,分析不同生活环境和生活方式的垃圾房及周边空气中可培养细菌的分布特征.别墅区地处远郊区,占地面积400 000 m<sup>2</sup>,建筑面积只有36 000 m<sup>2</sup>,共36幢别墅,住户分布非常分散,生活垃圾是通过工作人员统一在每户门前收集运至垃圾房进行分类,垃圾房内存在一台湿垃圾就地处理生化机;普通住宅区占地面积176 000 m<sup>2</sup>,建筑面积有280 000 m<sup>2</sup>,约2 800户,分布较为紧密,住户需自行将垃圾分类好带至垃圾房,该垃圾房靠近马路,人流量及车辆来往较多;校园占地面积约为1.07

km<sup>2</sup> (约1 600亩),垃圾房主要承担校区食堂、教学楼等生活垃圾的临时堆放,不包括生活区,由工作人员统一收集送至垃圾房. 采样点设置如图1所示,在某校园垃圾房(J)、周边某居民区垃圾房(X)和两个采样点间的某办公楼顶(O)进行采样,该办公建筑楼顶距地面高21 m,采样高度为楼顶上1.5 m,用于采集实际大气环境样品,受人为影响因素较

小<sup>[4]</sup>. 校园垃圾房(J)距离楼顶采样点直线距离812 m,周边某居民区垃圾房(X)是普通住宅区,距楼顶采样点直线距离387 m,3个采样点于2021年1~4月每隔两周采样1次,共采样8次. 2021年5月在上海某别墅小区垃圾房内(S)和下风向处(W)设置采样点,两个采样点直线距离20 m,每周采样1次,共4次采样.

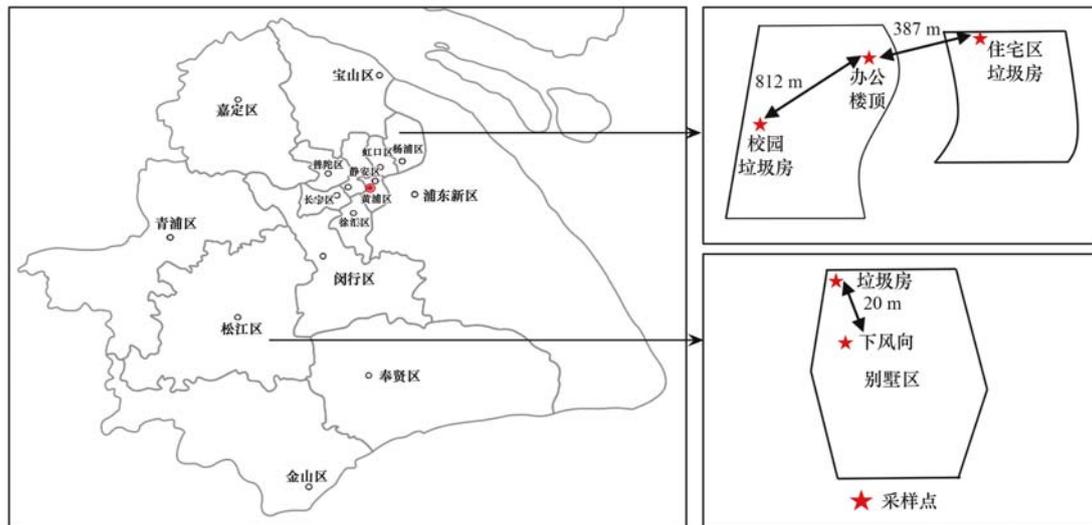


图1 不同采样点示意

Fig. 1 Map of the different sampling sites

采样设备选择安德森六级空气微生物采样器(ZR-2000,青岛众瑞,中国)收集环境空气中可培养细菌. 安德森六级空气微生物采样器根据不同粒径大小分为六级,该采样器每级孔的直径逐渐降低,模拟人体呼吸道分为六级,每一级截获粒径、孔径和到达人体的呼吸器官分布如表1所示<sup>[37]</sup>. 在采样器每一级放置1个直径90 mm的血琼脂培养皿(BA). BA配方如下:琼脂15~20 g·L<sup>-1</sup>,氯化钠5 g·L<sup>-1</sup>,蛋白胨10 g·L<sup>-1</sup>,牛肉膏3 g·L<sup>-1</sup>,溶解于去离子水中,调节pH至7.4~7.6,在121℃,103.4 kPa高压蒸汽灭菌锅中灭菌20 min. 温度冷却至50~60℃时加入无菌脱纤维羊血50~100 mL·L<sup>-1</sup>,缓慢摇晃均匀后在超净台中倒入90 mm培养皿中,待培养基冷凝后使用封口膜封存备用. 采样时将安德森六级采样头安装在三脚架上,距离地面约1.5 m处,相当于人类呼吸高度范围. 每次取样时间为09:00~12:00,采样流量设置为28.3 L·min<sup>-1</sup>,采样时间为20 min,采样结束后,依次取出培养皿,标记密封后放入样品箱中带回实验室培养. 每换一次培养基前,使用75%的酒精对采样仪器进行消毒. 使用便携式检测仪测定采样时的温度(temperature, *T*)、相对湿度(relative humidity, RH)、PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>浓度.

表1 ZR-2000 安德森六级空气微生物采样器孔径分布<sup>[37]</sup>

Table 1 Pore size distribution of ZR-2000 Anderson six air microbial sampler

采样器层级	截获粒径 / $\mu\text{m}$	孔径 /mm	可到达人体呼吸器官
第1级	>7.0	1.18	鼻和头部
第2级	4.7~7.0	0.91	咽喉
第3级	3.3~4.7	0.71	气管和第一支气管
第4级	2.1~3.3	0.53	二级支气管
第5级	1.1~2.1	0.34	三级支气管
第6级	0.65~1.1	0.25	肺泡

## 1.2 空气微生物培养及相关计算

### 1.2.1 空气中可培养菌落总浓度计算

将培养皿带回实验室倒置于37℃恒温培养箱中培养36~48 h后,对每一级上捕获的菌落数(CFU)进行统计. 采用Positive hole method方法对菌落数进行相应校正<sup>[33]</sup>,根据公式(1)计算出可培养空气微生物的浓度(CFU·m<sup>-3</sup>)<sup>[38]</sup>:

$$C = [(N_1 + N_2 + \dots + N_n) / (Q \times t)] \times 1000 \quad (1)$$

式中,*C*为环境气溶胶中可培养总菌落浓度(CFU·m<sup>-3</sup>); *N<sub>n</sub>*为第*n*级上统计的可培养菌落数(CFU); *Q*为采样流量(L·min<sup>-1</sup>); *t*为采样时间(min).

### 1.2.2 各级可培养菌落数占比计算

根据公式(2)计算每一级培养皿不同粒径可培养菌落数占比情况:

$$P = (n/S) \times 100\% \quad (2)$$

式中,  $P$  为某一级可培养菌落数占比(%);  $n$  为第  $n$  级上可培养菌落数(CFU);  $S$  为各级可培养菌落数之和(CFU).

### 1.3 微生物测序及数据分析

收集培养皿上可培养的总菌落,使用 QIAGEN 提取试剂盒提取 DNA,并使用 Thermo Qubit 检测 DNA 浓度和 OD260/280. 扩增区域选择 16S rDNA V3-V4 区,PCR 反应引物(5'-3'): CCTACGGGN GGCWGCAG (F) 和 GGACTACNVGGGTATCTAAT (R). 使用 Illumina MiSeq PE300 进行高通量测序获得原始序列 raw reads,通过 QIIME-1.9.1 将原始序列去杂后得到 clean tags 进行后续分析. 以 97% 的相似度作为可操作单元(operational taxonomic units, OTUs)进行 OTUs 划分.  $t$  检验当  $P < 0.05$  时,表示在 95% 置信区间内有统计意义,采用 Excel、Origin 2021 和 GraphPad Prism 8 等软件统计画图.

### 1.4 人群暴露气溶胶微生物健康风险评价

本研究分别对垃圾房气溶胶可培养细菌和典型致病菌属(葡萄球菌属)的健康风险进行评价. 气溶胶中的微生物,只有少数菌种具有致病风险,因此可认为微生物整体为非致癌物,针对所有可培养细菌,利用非致癌物健康风险评价方法进行评价<sup>[31]</sup>. 基于美国环境保护署建议的平均日剂量率(ADD)对人体暴露风险进行评估,根据文献[39]获取成年人的暴露参数,使用公式(3)评估成人吸入的平均日剂量率 ADD,利用公式(4)计算健康危险系数 HQ:

$$ADD = (C \times IR \times EF \times ED) / (BW \times AT) \quad (3)$$

$$HQ = ADD / RFD \quad (4)$$

式中, ADD 为呼吸系统平均暴露值 [ $CFU \cdot (kg \cdot d)^{-1}$ ];  $C$  为环境气溶胶中可培养的总菌落浓度 ( $CFU \cdot m^{-3}$ );  $IR$  为呼吸速率 ( $m^3 \cdot d^{-1}$ );  $EF$  为暴露频率 ( $d \cdot a^{-1}$ );  $ED$  为暴露年限 (a);  $BW$  为人体体重 (kg);  $AT$  为平均暴露时间 (d);  $HQ$  为人体暴露健康风险系数;  $RFD$  为暴露健康风险参考剂量,代表最大每日可接受剂量,通常采用  $500 CFU \cdot m^{-3}$ ; 风险评估标准为:当  $HQ < 1$ ,风险较小,可以忽略;当  $HQ > 1$  时,风险较高. 所有的参数取值见表 2<sup>[31]</sup>.

以致病微生物菌属葡萄球菌属为特定危害物质,利用微生物定量风险评估方法,评价生活垃圾房生物气溶胶的健康风险<sup>[40]</sup>. 微生物定量风险评估通过 4 个步骤完成:危害物质识别、暴露评估、剂量-

表 2 用于风险评估的速率剂量参数<sup>[31]</sup>

参数	单位	取值
$C$	$CFU \cdot m^{-3}$	实验获取
$IR$	$m^3 \cdot d^{-1}$	19.02(成年男性); 17.7(成年女性)
$ED$	a	24
$EF$	$d \cdot a^{-1}$	250
$BW$	kg	62.7(成年男性); 54.4(成年女性)
$AT$	d	$69.6 \times 365$ (成年男性); $73.3 \times 365$ (成年女性)

响应模型和定量风险表征<sup>[41]</sup>,根据上述步骤计算得到暴露人群的年感染风险( $P_y$ )和疾病负担(disease burden, DB). 针对不同类别人群(垃圾房工作人员和周边居民)的暴露情况如表 3 所示,基于垃圾房气溶胶可培养细菌浓度和测序后菌属在群落中的比例,利用公式(5)计算气溶胶中葡萄球菌属(*Staphylococcus*)的浓度:

$$M = C \times F \quad (5)$$

式中,  $M$  为环境气溶胶中可培养的特定危害物种浓度 ( $CFU \cdot m^{-3}$ );  $C$  为环境气溶胶中可培养的总菌落浓度 ( $CFU \cdot m^{-3}$ );  $F$  为测序数据中菌属在总可培养菌落属的占比(%).

表 3 工人及周边居民的暴露情景

类别	暴露情景
工人	工作时间, $8 h \cdot d^{-1}$
周边居民	倾倒垃圾可能的暴露时间, $0.5 h \cdot d^{-1}$

使用公式(6)计算定量风险评估的暴露剂量<sup>[42]</sup>:

$$d = M \times BR \times t \times AG \quad (6)$$

式中,  $d$  为日暴露剂量 ( $CFU$ );  $M$  为环境气溶胶中可培养的特定危害物种浓度 ( $CFU \cdot m^{-3}$ );  $BR$  表示呼吸速率 ( $m^3 \cdot h^{-1}$ ),成年男性和成年女性分别取值  $18.65 m^3 \cdot h^{-1}$  和  $14.80 m^3 \cdot h^{-1}$ ;  $t$  为日暴露时间 (h);  $AG$  为摄入率(%),工人摄入率取 10%,周边居民摄入率取 1%<sup>[40]</sup>.

使用公式(7)计算日感染风险( $P_i$ ),公式(8)计算年感染风险( $P_y$ )

$$P_i = 1 - e^{-\gamma d} \quad (7)$$

$$P_y = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i) \quad (8)$$

式中,  $P_i$  为日感染风险 ( $d$ );  $\gamma$  为指数模型参数,  $\gamma = 8.05 \times 10^{-8}$ <sup>[43]</sup>;  $d$  为日暴露剂量 ( $CFU$ );  $P_y$  为暴露时间 1 a 后被感染的风险 (a),即年感染风险;  $n$  为暴露发生的事件数,取  $n = 251 d$ .

使用公式(9)进行风险表征:

$$DB = P_y \times HB \quad (9)$$

式中, DB 为疾病负担, 用伤残调整寿命年 (DALY) 指标来表示; HB 为健康负担, 取  $HB = 2.6 \times 10^{-3}$ .

## 2 结果与讨论

### 2.1 可培养细菌浓度分布特征

5 个采样点气溶胶中可培养细菌浓度如图 2 所示, 某别墅小区垃圾房内 (S) 和其下风向 (W) 采样点空气中可培养细菌浓度范围分别在  $1\,121 \sim 1\,374 \text{ CFU} \cdot \text{m}^{-3}$  和  $144 \sim 482 \text{ CFU} \cdot \text{m}^{-3}$ , 垃圾房内的细菌浓度明显高于 20 m 外的下风向 [图 2(a)]. 有研究表明某大学校园的室内微生物浓度平均值为  $111 \text{ CFU} \cdot \text{m}^{-3}$  [44], 本研究发现校园垃圾房微生物的浓度范围为  $56 \sim 428 \text{ CFU} \cdot \text{m}^{-3}$ . 办公楼顶 (O) 的浓度为  $81 \sim 174 \text{ CFU} \cdot \text{m}^{-3}$ , 居民区垃圾房采样点 (X) 的浓度为  $51 \sim 422 \text{ CFU} \cdot \text{m}^{-3}$ , 两个垃圾房的生物气溶胶浓度较为接近, 均明显高于某办公楼顶 (O). 结果表明生活垃圾处理过程中, 附着在垃圾上的微生物会进入到周围空气中形成生物气溶胶 [38]. 先前研究的对象主要是垃圾填埋场或固废处理厂, 例如卫生填埋场作业区的空气可培养细菌浓度最高可以达到  $8\,051 \text{ CFU} \cdot \text{m}^{-3}$  [33], 西安某生活垃圾填埋场堆放区浓度平均值为  $4\,103 \text{ CFU} \cdot \text{m}^{-3}$  [34], 主要分析对工人的健康危害. 本研究聚焦于与居民生活息息相关的生活垃圾房, 结果显示城市生活垃圾房环境空气中可培养细菌浓度远低于垃圾填埋场, 但更能反映城市居民日常生活中可能受到微生物气溶胶的影响. 我国室内空气质量标准 (GB/T 18883-2002) 菌落总数限定值为  $2\,500 \text{ CFU} \cdot \text{m}^{-3}$ , 别墅区垃圾房的可培养细菌浓度虽未达到我国限值, 但浓度超过了美国职业安全与健康管理局 (OSHA) 规定的  $1\,000 \text{ CFU} \cdot \text{m}^{-3}$  [45], 显著高于普通住宅区垃圾房内. 目前上海市郊区村镇在生活垃圾处理时会单独建设湿垃圾生物处理厂 [46], 将湿垃圾单独处理, 普通居民垃圾房内基本不会配备生化处理设施, 本研究中别墅区垃圾房内存在一台湿垃圾就地处理生化机, 单独处理湿垃圾的过程中会导致垃圾房内生物气溶胶浓度较高, 可能会造成空气健康危害.

### 2.2 可培养细菌粒径分布特征

可吸入颗粒物的粒径范围很宽, 从  $10^{-3} \sim 10^2 \mu\text{m}$ , 真菌孢子的典型粒径在  $1 \sim 30 \mu\text{m}$ , 细菌的典型粒径在  $0.25 \sim 8 \mu\text{m}$ , 而病毒的粒径则小于  $0.3 \mu\text{m}$  [16]. 不同粒径的微生物粒子对人体健康的影响程度不同,  $6 \sim 10 \mu\text{m}$  的微生物粒子可以沉着在小支气管内, 可吸入颗粒指的是空气动力学直径小于  $4.7 \mu\text{m}$  的粒子, 即所谓的可呼吸部分, 能够穿透肺

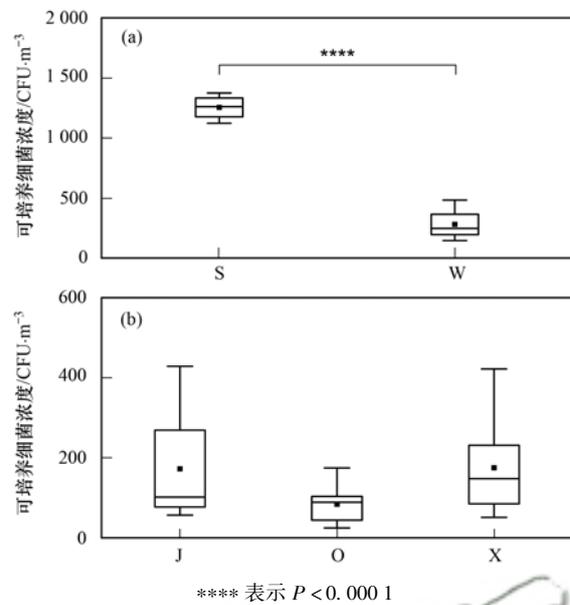


图 2 不同采样点气溶胶中可培养细菌浓度  
Fig. 2 Concentration of culturable bacteria in aerosol at different sampling sites

泡导致过敏性肺炎炎和其他严重的疾病 [47], 对应本研究中使用的安德森六级空气微生物采样器的 3 ~ 6 级.

5 个采样点空气可培养细菌粒径分布如图 3 所示, 不同地点间存在着明显差异. 从某别墅区垃圾房内 (S) 收集到的细菌, 粒径分布主要在第 3 至第 5 级 ( $1.1 \sim 4.7 \mu\text{m}$ ), 这 3 级的占比分别为 20.25%、27.46% 和 25.18%, 其下风向采样点 (W) 的细菌粒径主要分布在第 1 级 ( $>7 \mu\text{m}$ ) 和第 5 级 ( $1.1 \sim 2.1 \mu\text{m}$ ), 占比分别为 34.91% 和 22.28%. 孙强等 [48] 对兰州某小区垃圾房内微生物气溶胶粒径分布的研究发现, 细菌粒径主要集中在  $2.1 \sim 4.7 \mu\text{m}$ , 与本文别墅区垃圾房内细菌粒径分布研究结果相近. 对某校园垃圾房和办公楼顶采集到的细菌粒径分布进行分析, 结果表明校园垃圾房采样点 (J) 的可培养细菌主要分布在第 1 级 ( $>7 \mu\text{m}$ ) 和第 3 级 ( $3.3 \sim 4.7 \mu\text{m}$ ), 分别占比 37.30% 和 15.42%; 在办公楼顶采

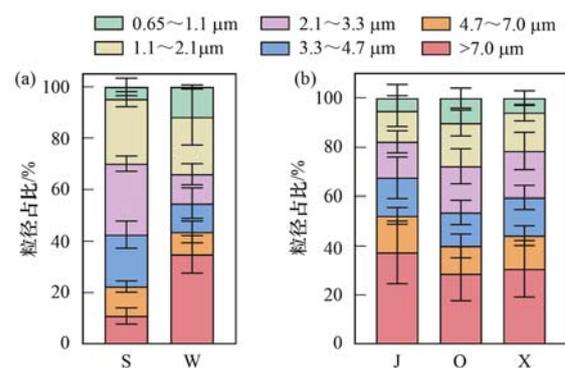


图 3 气溶胶可培养细菌粒径分布情况

Fig. 3 Particle size distribution of culturable bacteria in aerosol

样点(O)采集到可培养细菌粒径主要分布于第1级( $>7\ \mu\text{m}$ )和第4级( $2.1\sim 3.3\ \mu\text{m}$ ),占比分别为28.54%和18.59%;居民垃圾房采样点(X)与楼顶(O)分布规律类似,粒径在第1级( $>7\ \mu\text{m}$ )占比最高,为30.61%,其次为第4级( $2.1\sim 3.3\ \mu\text{m}$ ),占比18.84%.许鹏程等<sup>[49]</sup>发现某大学校园内细菌气溶胶粒径主要分布在第1级( $>7\ \mu\text{m}$ ),其次为第4级( $2.1\sim 3.3\ \mu\text{m}$ ),与本研究校园内垃圾房细菌粒径分布较为相似.由此可见,存在生化处理设施的别墅区垃圾房内的可培养细菌粒径较小,更容易到达人体下呼吸道,对人体造成一定的健康危害,垃圾房内的员工暴露风险需多加关注.

## 2.3 垃圾房内及下风口可培养微生物群落特征

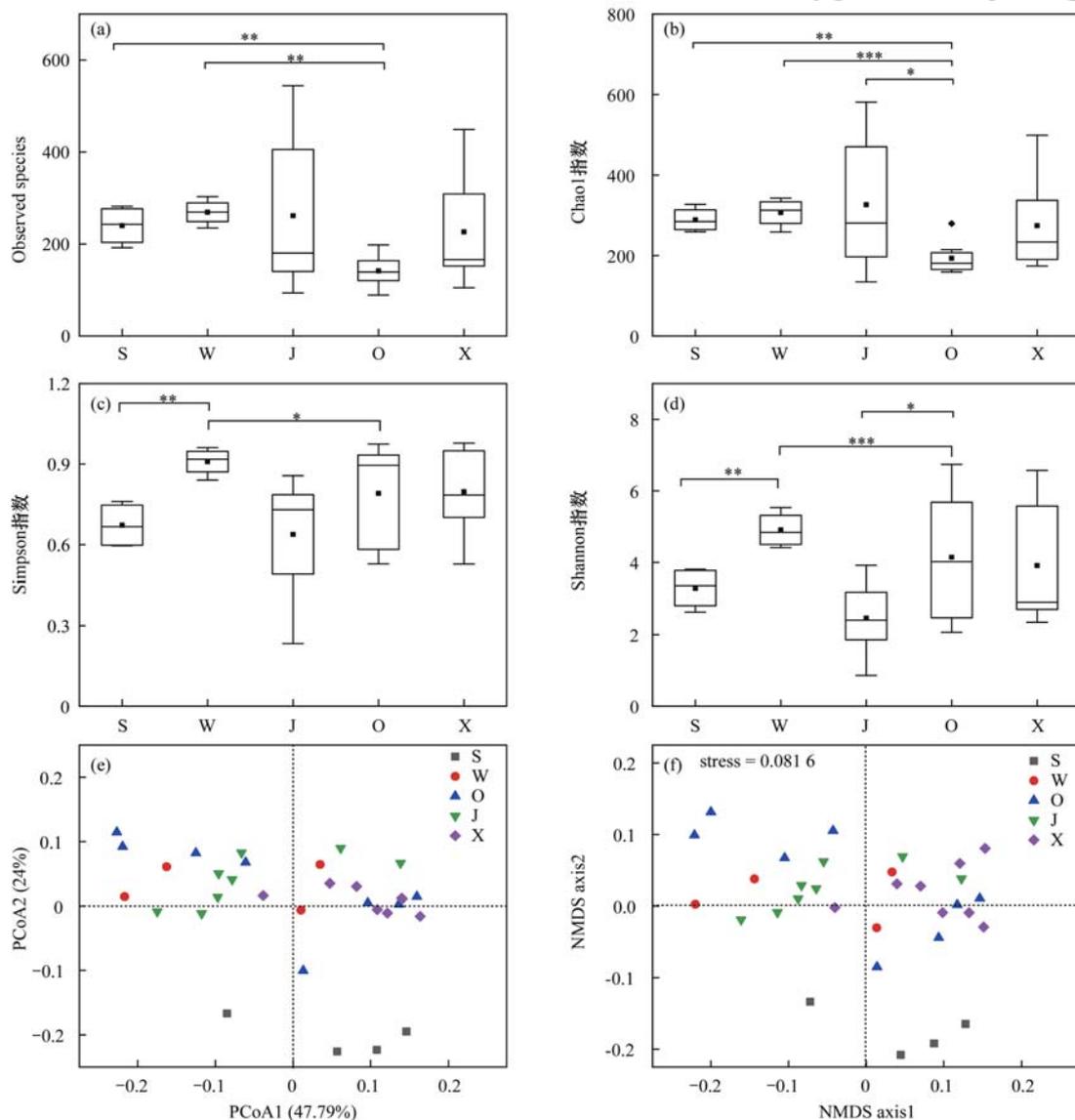
### 2.3.1 OTUs 聚类分析

通过16S rDNA高通量测序分析得到共32个样

本对应的有效序列,在97%的相似标准下进行聚类分析,分别得到这32个样本的OTUs数量.5个采样点(S、W、J、O和X)采集到的可培养细菌OTUs数量分别为437、458、688、471和608个,5个采样点采集到的细菌共有201个OTUs.某别墅区垃圾房采样点(S)和下风向区(W)共有340个OTUs,下风向区(W)OTUs数量略高于垃圾房内.某校园垃圾房(J)OTUs数量最高,办公楼顶(O)采集到的室外大气细菌OTUs数量低于J和X两个垃圾房.

### 2.3.2 气溶胶中可培养细菌群落结构多样性分析

利用QIIME-1.9.1软件计算得到不同地点样品的 $\alpha$ 多样性指数值, $\alpha$ 多样性指数可以反映单个样品中微生物群落的多样性,Observed species和Chao1指数表示群落中含有的OTU数量和丰富度(图4),用Simpson指数和Shannon指数来衡量微生



\* 表示  $P < 0.05$ , \*\* 表示  $P < 0.01$ , \*\*\* 表示  $P < 0.001$

图4 可培养细菌群落多样性分析

Fig. 4 Analysis of culturable bacterial community diversity

物群落的多样性,指数越大,反映群落的多样性越高<sup>[50]</sup>。如图4(a)和4(b)所示,某别墅区垃圾房内和下风向两个采样点的 Observed species 和 Chao1 指数相似,但下风向的 Simpson 指数和 Shannon 指数高于垃圾房内,指数范围在 0.84 ~ 0.96 和 4.4 ~ 5.5,表示可培养菌落种类较多,多样性较高[图4(c)和4(d)].由此可以看出某别墅区垃圾房内和下风向的可培养菌群 OTUs 数目相似,但是菌落的多样性存在一定的差异.某校园、办公楼和某居民区垃圾房这3个采样点的细菌群落多样性分析可以看出,总体上两个垃圾房采样点(J和X)的 Observed species 和 Chao1 指数高于办公楼顶大气的细菌群落,表明垃圾房菌落 OTUs 数量较高于环境大气,但楼顶采集到的可培养细菌群落的 Simpson 指数和 Shannon 指数高于两个垃圾房.综合分析两个不同区的垃圾房及下风向的群落,可以发现垃圾房内的可培养细菌浓度和 OTUs 数目都高于室外,但室外环境中的细菌群落多样性较高.某别墅区垃圾房下风向采样点(W)的细菌丰度与多样性都高于其他两个垃圾房采样点(J和X),分析其原因是离垃圾房距离较近,受到了一定的影响. $\beta$ 多样性分析用来比较多组样品在物种多样性方面存在的差异大小,基于加权的 Unifrac 距离进行主坐标分析(principal coordinates analysis, PCoA)和非度量多维尺度分析(nonmetric multidimensional scaling, NMDS)分析,观察5个不同地点样品间的微生物的相似性.由图4(e)可知,主坐标 PC1 和 PC2 的贡献率分别为 47.79% 和 24%,结合 NMDS 分析图可以得出结论[图4(f)]:别墅区垃圾房采样点(S)的样品单独聚类,可

培养细菌微生物群落与其他采样点差异较大,其他4个采样点的细菌群落组成较为相似.

### 2.3.3 生物气溶胶可培养细菌群落结构分析

5个采样点的气溶胶中可培养细菌的群落结构组成如图5所示.可以看出在门水平上,不同的采样点群落结构有较高的相似性,但相对丰度的差异较大,主要由厚壁菌门(Firmicutes)、变形菌门(Proteobacteria)和放线菌门(Actinobacteria)构成[图5(a)].某别墅区垃圾房内(S)物种结构差异较大,放线菌门(Actinobacteria)占主导地位,约为 57.60%,其他4个采样点(W、O、J和X)均以厚壁菌门(Firmicutes)为优势门,占比依次为:72.49%、64.28%、67.61%和 85.59%.有研究显示,在英国东部的绿色堆肥厂和法国一家废物分拣厂微生物都以放线菌门(Actinobacteria)为主<sup>[12,51]</sup>.图5(b)为不同采样点优势菌属的分布,从结果可以看出,不同采样点之间的优势菌属存在一定的差异.某别墅区垃圾房采样点(S)以棒状杆菌属(*Corynebacterium*)为优势菌属,占比为 57.28%,其他4个采样点(W、O、J和X)均以芽孢杆菌属(*Bacillus*)为优势菌属,占比依次为:49.05%、31.56%、54.97%和 29.09%.别墅区垃圾房下风向采样点(W)还检测到微小杆菌属(*Exiguobacterium*),在办公楼顶(O)和周边居民区垃圾房采样点(X)检测到一定占比的赖氨酸芽孢杆菌属(*Lysinibacillus*)和葡萄球菌属(*Staphylococcus*),而在校园垃圾房采样点(J)检测到泛菌属(*Pantoea*).不同采样点的菌属结构和相对丰度存在一定的差异,说明地理位置和周边环境会对空气中的微生物群落结构产生影响.

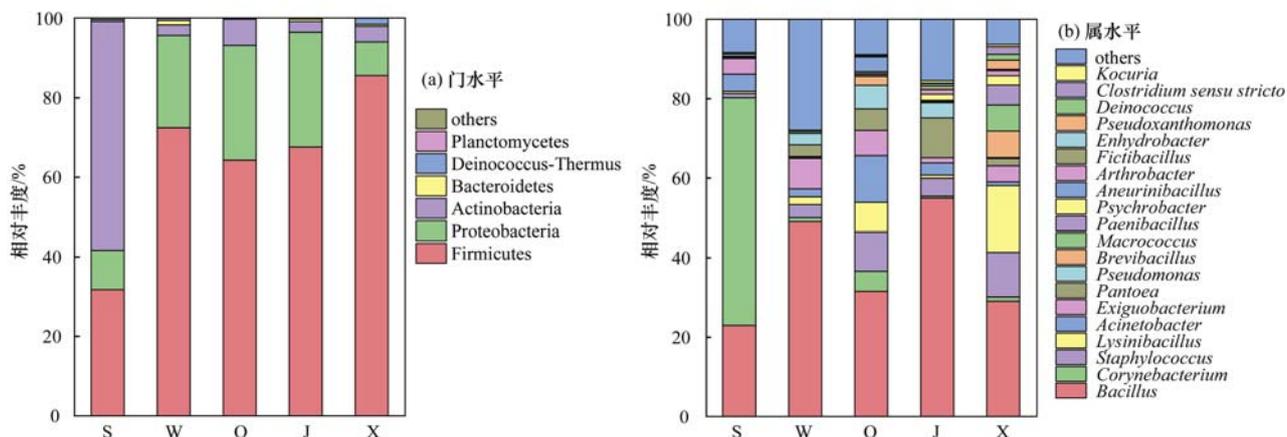


图5 不同采样点细菌门和属水平分布

Fig. 5 Horizontal distribution of phyla and genera at different sampling sites

空气中除了自然的微生物,还存在各种呼吸系统感染的病原体微生物,这些病原微生物可以通过空气传播.根据颗粒物的粒径和空气动力学特性,生物颗粒物在大气中的停留时间平均值不同,与大颗

颗粒物相比,较小颗粒物( $PM_{2.5}$ )在空气中停留的时间会更长一些,在人和动物的呼吸系统中沉积得更深,从而导致更严重的健康风险<sup>[52]</sup>.有研究在垃圾分类厂的室内空气中发现了大量的大肠杆菌和粪肠球

菌等,这对工作人员来说是一种潜在的健康危害<sup>[53]</sup>.在本研究中,在生活垃圾房采样点收集到的可培养细菌中检测到一些有潜在致病性的细菌.在某别墅区垃圾房内占主导地位的棒状杆菌属(*Corynebacterium*),该菌属与呼吸道疾病(气管炎、咽炎、支气管炎等)相关,会通过空气飞沫传播造成健康危害<sup>[54]</sup>.葡萄球菌属(*Staphylococcus*)是一种革兰氏阳性菌,其中金黄色葡萄球菌能够分泌大量的外毒素,可能会引发人体局部化脓性感染等病症<sup>[55]</sup>.其中在5个采样点均检测到假单胞菌属(*Pseudomonas*)、不动杆菌属(*Acinetobacter*)和泛菌属(*Pantoea*)等条件致病菌属,易引发呼吸道感染等疾病.其中不动杆菌属(*Acinetobacter*)是肺部感染的致病菌,广泛分布于土壤和水中<sup>[56,57]</sup>,本研究在生

活环境空气中检测到该菌属.5个采样点的可培养细菌浓度虽均未达到我国室内空气质量标准的阈值,但某别墅区垃圾房内浓度最高,约1400 CFU·m<sup>-3</sup>,可能会对垃圾房工作人员和周边居民造成多种健康风险.在国外某垃圾填埋场调查的53名垃圾填埋场工人和居民中,大部分人都患有皮肤感染、咳嗽感冒、鼻炎和尿路感染等临床诊断的复发性疾病<sup>[5]</sup>.吸入是现场工作人员接触空气传播细菌的主要途径,由于这些条件致病菌的存在,垃圾处理方面应该采取严格的控制措施,以降低感染风险.

2.3.4 生物气溶胶细菌群落差异物种的显著性分析

通过 LDA EffectSize (LEfSe) 分析找出对样品划分产生显著性差异影响的物种(图6).LDA 得分结果显示,某别墅区垃圾房内(S)有12个差异物种,

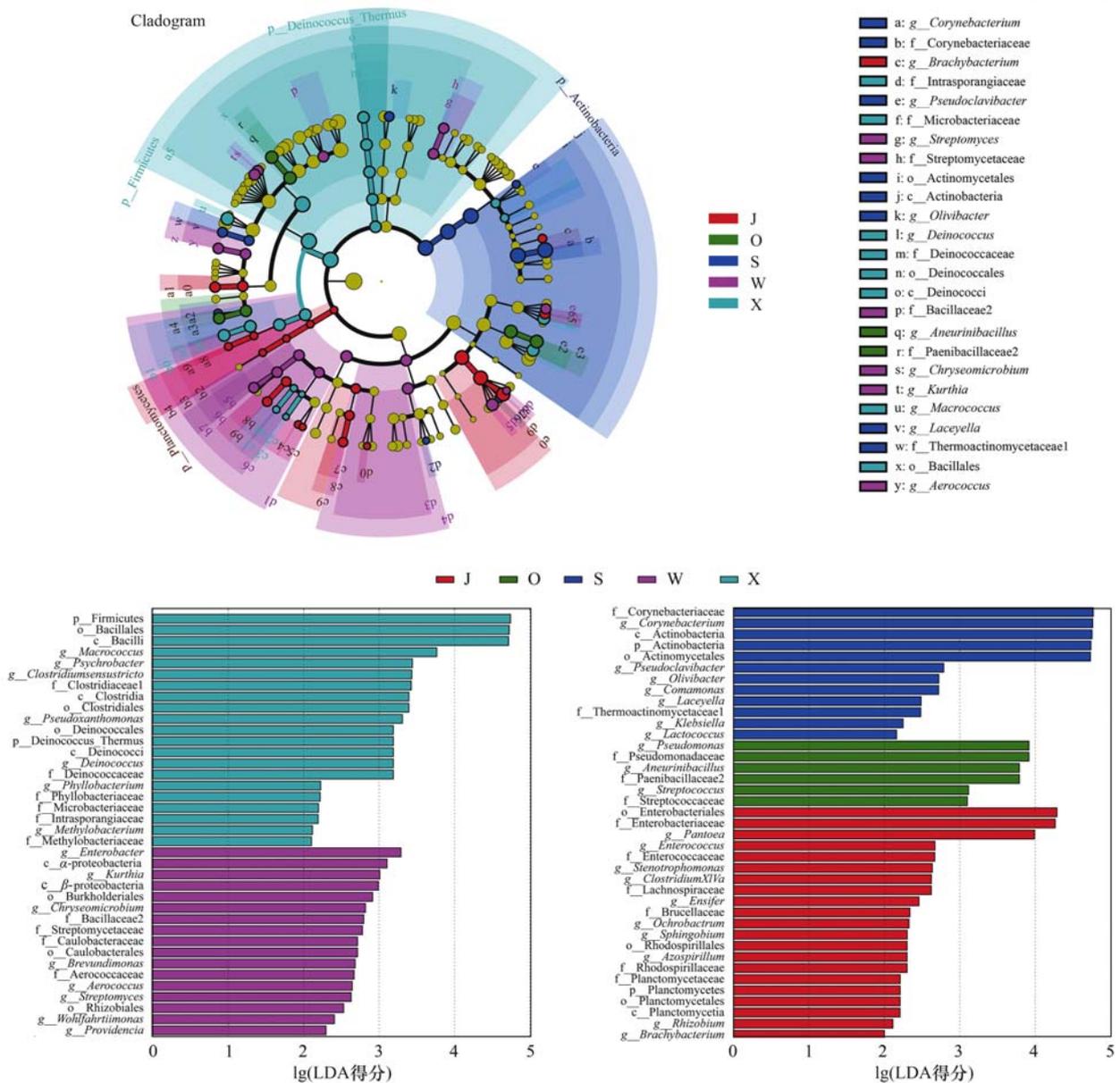


图6 可培养细菌物种 LEfSe 分析  
Fig. 6 LEfSe analysis of culturable bacterial species

LDA 得分较高,对不同分组有较高显著性差异的物种有:放线菌门(Actinobacteria)、放线菌目(Actinomycetales)、棒状杆菌科(Corynebacteriaceae)和棒状杆菌属(*Corynebacterium*);垃圾房下风向采样点(W)有15个差异物种,显著性较高的为:甲型变形菌纲( $\alpha$ -proteobacteria)和肠杆菌属(*Enterobacter*);某校园垃圾房(J)有21个差异物种,其中显著性较高的为:肠杆菌目(Enterobacteriales)和肠杆菌科(Enterobacteriales);办公楼顶采样点有7个差异物种,假单胞菌科(Pseudomonadaceae)、假单胞菌属(*Pseudomonas*)在分组中显著性最高;居民区垃圾房采样点(X)有22个差异物种,显著性较高的为:厚壁菌门(Firmicutes)、杆菌纲(Bacilli)和芽孢杆菌目(Bacillales)。

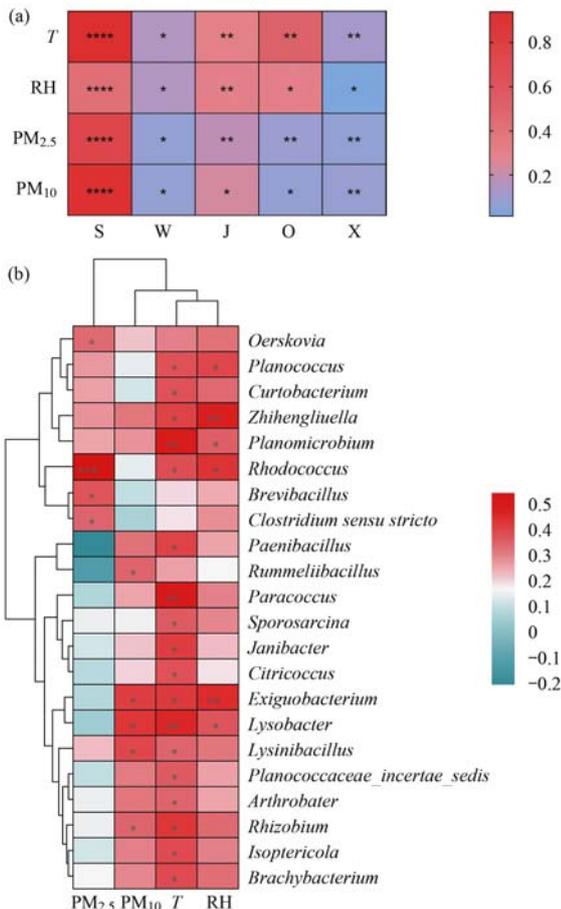
#### 2.4 环境因素对生物气溶胶的影响

对采样点的温度、相对湿度、PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>和可培养细菌浓度做相关性分析,空气中可培养细菌浓度与环境因素有一定的关联(图7)。某别墅区垃圾

房(S)可培养细菌浓度与PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>、温度和相对湿度呈正相关关系,而下风向附近环境空气中细菌浓度与三者无较大关联。这可能是因为在下风向区域,携带细菌的小颗粒在风的影响下加速扩散,风速和风向对空气中的细菌浓度产生了一定的影响。有研究表明环境空气中的微生物浓度会随着风速的增加逐渐升高,当风速达到 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,浓度开始逐渐降低<sup>[58]</sup>。图7(a)显示,某办公楼楼顶(O)的生物气溶胶浓度与4种环境因素存在一定的相关性,某校园垃圾房(J)可培养细菌浓度与温度、湿度有关联,而某居民住宅区垃圾房(X)则与这4种环境因素未呈现显著关联。分析其原因在于居民住宅区垃圾房采样点接近马路边,人员和车辆的流动性较大,容易导致灰尘和微生物释放到空气中<sup>[11]</sup>,对细菌浓度影响更大。对环境因素如PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>、温度和相对湿度与生物气溶胶菌属之间的关系进行相关性分析并绘制热图,结果如图7(b)所示。PM<sub>2.5</sub>与红球菌属(*Rhodococcus*)相关性较高;PM<sub>10</sub>与溶杆菌属(*Lysobacter*)、微小杆菌属(*Exiguobacterium*)和芽孢杆菌属(*Lysinibacillus*)有较高的相关性;与温度(T)因素有较高相关性的菌属有:游动球菌属(*Planococcus*)、副球菌属(*Paracoccus*)和溶杆菌属(*Lysobacter*)等;与相对湿度(RH)具有较高相关性的菌属包括Zihengliuella菌属(*Zihengliuella*)、微小杆菌属(*Exiguobacterium*)和红球菌属(*Rhodococcus*),大部分菌属浓度水平与温度和相对湿度呈正相关性<sup>[59]</sup>。

#### 2.5 健康风险评估

根据人体对环境生物气溶胶和条件致病菌的摄入量,需要评估空气中微生物的吸入风险,健康风险评估指的是在特定时间和环境条件下,有害因素对特定人群或生态系统潜在影响的评估过程<sup>[60]</sup>。近年来室内空气质量也越来越受到关注,暴露于室内空气污染的健康风险可能大于与室外污染相关的健康风险,因为人们1d中约有80%~90%的时间是在室内环境中度过的,其中约25%是在工作中度过的<sup>[46]</sup>,在工作环境中接触较差的环境空气会对健康产生严重影响。根据上述健康风险评估方法计算得出5个采样点的健康风险系数值如图8所示。5个采样点的健康风险系数HQ均小于1,表示细菌气溶胶的风险较小或者可以忽略。通过健康风险系数可以看出,5个采样点的暴露风险:某别墅区垃圾房>其下风向>某居民区垃圾房>某校园垃圾房>某办公楼顶,成年女性的暴露风险略高于成年男性,但差距不大。在印度露天垃圾场的研究结果表明,女性因暴露于生物气溶胶而引起的呼吸系统疾病的病



\* 表示  $P < 0.05$ , \*\* 表示  $P < 0.01$ , \*\*\* 表示  $P < 0.001$ ,

\*\*\*\* 表示  $P < 0.0001$ ; 色柱颜色表示  $R^2$  的数值

图7 可培养细菌浓度、菌属和环境因素的分析

Fig. 7 Analysis of culturable bacteria concentration, genus, and environmental factors

例较多于男性<sup>[61]</sup>. 尽管微生物气溶胶暴露风险较小 ( $HQ < 1$ ), 但培养法会低估实际环境中细菌浓度, 对于长期工作在垃圾房内的工作人员, 污染物的累计会增加暴露风险<sup>[62]</sup>, 可通过佩戴口罩来降低自身的暴露风险.

对垃圾房工人及周边居民人体健康定量风险评价的结果计算如表 4 所示, 与美国环护署 (US EPA) 的年感染风险限基准值 ( $P_y \leq 10^{-4} a$ ) 和世界卫生组织 (WHO) 的疾病负担基准值 ( $DB \leq 10^{-6}$ )<sup>[40]</sup> 进行对比分析, 以评估该暴露人群的健康风险大小. 结果表明 3 个垃圾房的男性与女性工作人员健康风险均高于相应的基准值, 男性人体健康风险高于成年女性, 表明垃圾房内工作人员需要在工作时间佩戴好口罩, 做好自身防护. 周边居民的人体健康定量风险

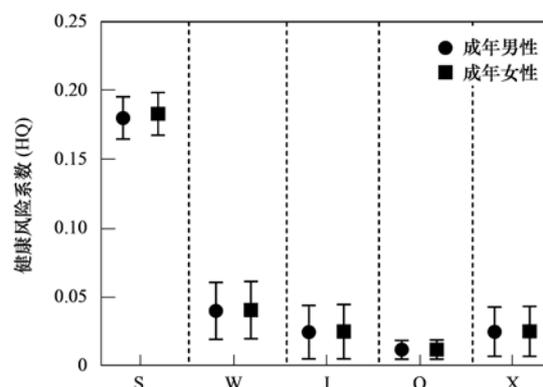


图 8 不同采样点的暴露风险系数

Fig. 8 Exposure risk coefficients at different sampling sites

还未超过基准值, 但仍需在垃圾房倾倒垃圾时做好防护, 降低暴露风险.

表 4 垃圾房工人及周边居民人体健康定量风险评价

Table 4 Quantitative risk assessment of human health for workers of garbage houses and surrounding residents

项目	别墅区垃圾房(S)				校园垃圾房(J)				小区垃圾房(X)			
	工作人员		周边居民		工作人员		周边居民		工作人员		周边居民	
	男	女	男	女	男	女	男	女	男	女	男	女
暴露剂量/CFU	198.23	157.33	1.23	0.85	117.04	92.88	0.73	0.58	293.50	232.91	1.83	1.45
日感染风险( $P_d$ )/d	$1.60 \times 10^{-5}$	$1.27 \times 10^{-5}$	$9.97 \times 10^{-8}$	$1.27 \times 10^{-5}$	$9.42 \times 10^{-6}$	$7.48 \times 10^{-6}$	$5.89 \times 10^{-8}$	$7.48 \times 10^{-6}$	$2.36 \times 10^{-5}$	$1.87 \times 10^{-5}$	$1.48 \times 10^{-7}$	$1.87 \times 10^{-5}$
年感染风险( $P_y$ )/a	$4.01 \times 10^{-3}$	$3.18 \times 10^{-3}$	$2.50 \times 10^{-5}$	$1.99 \times 10^{-5}$	$2.37 \times 10^{-3}$	$1.88 \times 10^{-3}$	$1.48 \times 10^{-5}$	$1.77 \times 10^{-5}$	$5.93 \times 10^{-3}$	$4.71 \times 10^{-3}$	$3.71 \times 10^{-5}$	$2.94 \times 10^{-5}$
疾病负担(DB)	$1.04 \times 10^{-5}$	$8.27 \times 10^{-6}$	$6.51 \times 10^{-8}$	$5.17 \times 10^{-8}$	$6.15 \times 10^{-6}$	$4.88 \times 10^{-6}$	$3.84 \times 10^{-8}$	$3.05 \times 10^{-8}$	$1.54 \times 10^{-5}$	$1.22 \times 10^{-5}$	$9.64 \times 10^{-8}$	$7.65 \times 10^{-8}$

### 3 结论

(1) 不同采样点(S、W、J、O和X)空气中可培养细菌浓度分别为: 1 254、280、172、84和175 CFU·m<sup>-3</sup>, 别墅区垃圾房内(S)细菌浓度明显高于其他4个采样点.

(2) 不同采样点可培养细菌粒径分布有所不同, 别墅区垃圾房内(S)细菌粒径主要分布在1.1~4.7 μm, 而其余4个采样点的细菌粒径主要分布在>7 μm范围, 少数细菌粒径范围为1.1~2.1 μm. 空气中存在大量的可吸入细菌(空气动力学直径<4.7 μm), 会对垃圾房工作人员及周边居民产生较大的影响, 存在潜在的健康风险.

(3) 通过对可培养细菌群落结构多样性分析发现, 别墅区下风向(W)和办公楼顶室外大气(O)的物种多样性较高. 检出了棒状杆菌属(*Corynebacterium*)、葡萄球菌属(*Staphylococcus*)和不动杆菌属(*Acinetobacter*)等存在潜在致病性的细菌, 可能会引发多种传染性疾病.

(4) 某别墅区垃圾房内(S)可培养细菌浓度与温度、相对湿度、PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>相关性较高; 空气中微小杆菌属(*Exiguobacterium*)与PM<sub>10</sub>、温度和相对湿度都具有较高的相关性.

(5) 虽然5个采样点的健康风险系数(HQ)均小于1, 但3个垃圾房的工作人员人体健康定量风险评价超出基准值, 工作人员和周边的居民们都应该做好个人防护, 减少暴露在生物气溶胶内, 降低感染疾病的风险.

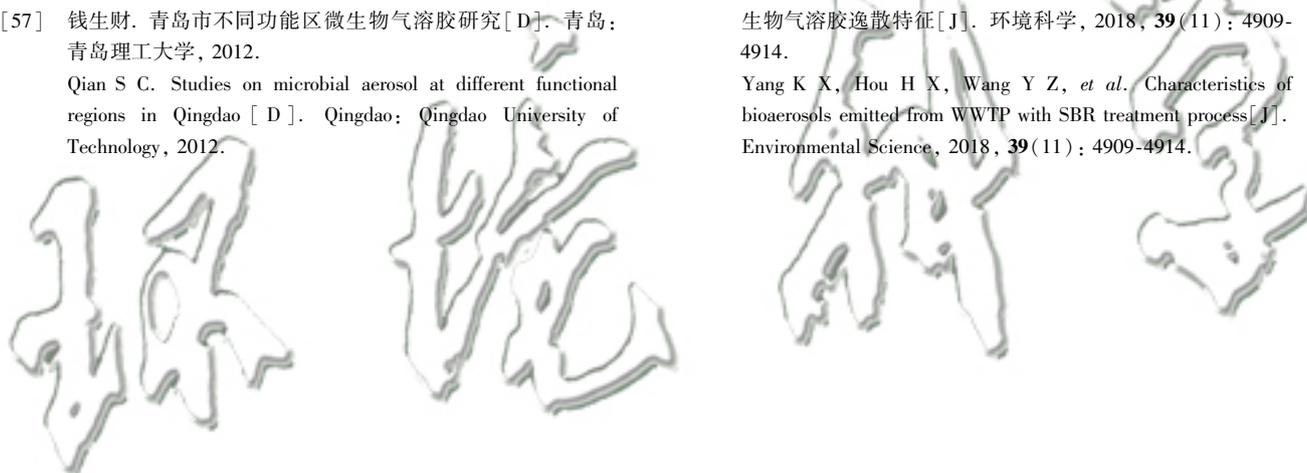
### 参考文献:

- [1] Almetwally A A, Bin-Jumah M, Allam A A. Ambient air pollution and its influence on human health and welfare: an overview [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2020, 27(20): 24815-24830.
- [2] 谢雯文, 路瑞, 慕鹏飞, 等. 西安市秋冬季市区与山区微生物气溶胶组成特征及来源[J]. 环境科学, 2020, 41(5): 2044-2049.
- Xie W W, Lu R, Mu F F, et al. Characteristics and sources of microbial aerosols in urban and mountainous areas in autumn and winter in Xi'an, China [J]. Environmental Science, 2020, 41(5): 2044-2049.
- [3] Tanaka D, Fujiyoshi S, Maruyama F, et al. Size resolved characteristics of urban and suburban bacterial bioaerosols in Japan as assessed by 16S rRNA amplicon sequencing [J]. Scientific Reports, 2020, 10(1), doi: 10.1038/s41598-020-68933-z.
- [4] 李婉欣, 路瑞, 谢铮胜, 等. 西安市秋冬季不同空气质量下可培养微生物气溶胶浓度和粒径分布[J]. 环境科学, 2017, 38(11): 4494-4500.
- Li W X, Lu R, Xie Z S, et al. Concentration and size distribution characteristics of culturable bioaerosols at various air quality levels during fall and winter in Xi'an, China [J]. Environmental Science, 2017, 38(11): 4494-4500.

- [ 5 ] Jahne M A, Rogers S W, Holsen T M, *et al.* Emission and dispersion of bioaerosols from dairy manure application sites: human health risk assessment [ J ]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(16): 9842-9849.
- [ 6 ] 李彦鹏, 刘鹏霞, 谢铮胜, 等. 霾污染天气大气微生物气溶胶特性的研究进展 [ J ]. *科学通报*, 2018, **63**(10): 940-953. Li Y P, Liu P X, Xie Z S, *et al.* Recent research progress and perspective of characteristics of ambient bioaerosols during hazy pollution in China [ J ]. *Chinese Science Bulletin*, 2018, **63**(10): 940-953.
- [ 7 ] Song L, Zhou J F, Wang C, *et al.* Airborne pathogenic microorganisms and air cleaning technology development: a review [ J ]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, **424**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.127429.
- [ 8 ] 褚旭. 上海市城市生活垃圾分类政策实施效果的评价研究 [ D ]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2020. Chu X. Evaluation research on the implementation effect of the current municipal household waste classification policy in Shanghai [ D ]. Harbin: Harbin Engineering University, 2020.
- [ 9 ] Szulc J, Okrasa M, Majchrzycka K, *et al.* Microbiological and toxicological hazard assessment in a waste sorting plant and proper respiratory protection [ J ]. *Journal of Environmental Management*, 2022, **303**, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.114257.
- [ 10 ] Madsen A M, Alwan T, Ørberg A, *et al.* Waste workers' exposure to airborne fungal and bacterial species in the truck cab and during waste collection [ J ]. *The Annals of Occupational Hygiene*, 2016, **60**(6): 651-668.
- [ 11 ] 张俊超, 刘建伟, 马文林, 等. 城市固体废弃物综合处理厂微生物气溶胶污染特性 [ J ]. *环境工程学报*, 2012, **6**(8): 2825-2829. Zhang J C, Liu J W, Ma W L, *et al.* Characteristics of microbial aerosol pollution in urban solid waste comprehensive treatment plant [ J ]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2012, **6**(8): 2825-2829.
- [ 12 ] Degois J, Simon X, Clerc F, *et al.* One-year follow-up of microbial diversity in bioaerosols emitted in a waste sorting plant in France [ J ]. *Waste Management*, 2021, **120**: 257-268.
- [ 13 ] Tian J H, Yan C, Nasir Z A, *et al.* Real time detection and characterisation of bioaerosol emissions from wastewater treatment plants [ J ]. *Science of the Total Environment*, 2020, **721**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137629.
- [ 14 ] 卢慧, 赵珩, 盛玉钰, 等. 基于功能基因芯片技术的高寒草甸土壤微生物功能基因研究 [ J ]. *生态学杂志*, 2018, **37**(10): 3031-3037. Lu H, Zhao H, Sheng Y Y, *et al.* Research on soil microbial functional genes in alpine meadow based on GeoChip technique [ J ]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, **37**(10): 3031-3037.
- [ 15 ] 宫静, 祁建华, 李鸿涛. 青岛近海生物气溶胶中总微生物的分布特征 [ J ]. *环境科学*, 2019, **40**(8): 3477-3488. Gong J, Qi J H, Li H T. Distribution of total microbes in atmospheric bioaerosols in the coastal region of Qingdao [ J ]. *Environmental Science*, 2019, **40**(8): 3477-3488.
- [ 16 ] 郑云昊, 李菁, 陈灏轩, 等. 生物气溶胶的昨天、今天和明天 [ J ]. *科学通报*, 2018, **63**(10): 878-894. Zheng Y H, Li J, Chen H X, *et al.* Bioaerosol research: yesterday, today and tomorrow [ J ]. *Chinese Science Bulletin*, 2018, **63**(10): 878-894.
- [ 17 ] 黄婷, 方源, 冯舟, 等. 高通量测序技术解析中学校园细菌群落的特征组成 [ J ]. *生物技术通报*, 2020, **36**(8): 96-103. Huang T, Fang Y, Feng Z, *et al.* Bacterial communities in a middle school campus assessed by high-throughput sequencing [ J ]. *Biotechnology Bulletin*, 2020, **36**(8): 96-103.
- [ 18 ] Das S, Bernasconi E, Koutsokera A, *et al.* A prevalent and culturable microbiota links ecological balance to clinical stability of the human lung after transplantation [ J ]. *Nature Communications*, 2021, **12**, doi: 10.1038/s41467-021-22344-4.
- [ 19 ] 夏库拉·巴拉克特亚尔, 林青, 刘珍珠, 等. 塔克拉玛干沙尘暴源区空气可培养细菌多样性 [ J ]. *西南农业学报*, 2020, **33**(12): 2933-2942. Bahetiyaer X, Lin Q, Liu Z Z, *et al.* Diversity of culturable bacteria in air of dust storm source area in Taklamakan [ J ]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2020, **33**(12): 2933-2942.
- [ 20 ] 李宗良, 赖春颜, 梁敏锋, 等. 葡萄球菌属的临床分布与耐药性分析 [ J ]. *中华医院感染学杂志*, 2015, **25**(12): 2684-2686. Li Z L, Lai C Y, Liang M F, *et al.* Clinical distribution and drug resistance analysis of *Staphylococcus* [ J ]. *Chinese Journal of Nosocomiology*, 2015, **25**(12): 2684-2686.
- [ 21 ] 李兆娜, 王萍, 寇晨, 等. 677 例新生儿咽拭子细菌培养及病原菌的耐药性分析 [ J ]. *微生物与感染*, 2017, **12**(5): 294-298. Li Z N, Wang P, Kou C, *et al.* Bacterial culture of pharyngeal swab specimens from 677 newborns and analysis of bacterial drug resistance [ J ]. *Journal of Microbes and Infections*, 2017, **12**(5): 294-298.
- [ 22 ] 刘金荣, 刘立雍, 赵顺英, 等. 咽拭子与支气管肺泡灌洗液荧光定量 PCR 检测儿童肺炎支原体感染分析 [ J ]. *疾病监测*, 2019, **34**(5): 389-393. Liu J R, Liu L Y, Zhao S Y, *et al.* Mycoplasma pneumoniae detection in throat swabs and bronchoalveolar lavage fluid in children with mycoplasmal pneumonia by real-time PCR and culture [ J ]. *Disease Surveillance*, 2019, **34**(5): 389-393.
- [ 23 ] 刘月姣, 李俭杰, 孙一凡, 等. 利用培养组学技术分离培养肺部微生物群研究 [ J ]. *微生物学报*, 2022, **62**(3): 1110-1118. Liu Y J, Li J J, Sun Y F, *et al.* Isolation and cultivation of lung microbiota with culturomics [ J ]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2022, **62**(3): 1110-1118.
- [ 24 ] 任爱容, 黄永光, 涂华彬. 茅台镇酱香型白酒酿造大曲及环境中可培养细菌多样性及功能分析 [ J ]. *食品科学*, 2020, **41**(14): 195-202. Ren A R, Huang Y G, Tu H B. Diversity and function of culturable bacteria in Daqu and brewing environment of Moutai-Flavor Baijiu in Maotai Town [ J ]. *Food Science*, 2020, **41**(14): 195-202.
- [ 25 ] Qiu G Y, Yue Y, Tang J K, *et al.* Total bioaerosol detection by a Succinimidyl-Ester-Functionalized plasmonic biosensor to reveal different characteristics at three locations in Switzerland [ J ]. *Environmental Science & Technology*, 2020, **54**(3): 1353-1362.
- [ 26 ] 夏库拉·巴拉克特亚尔. 南疆沙尘暴空气微生物多样性研究 [ D ]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2020. Bahetiyaer K. A study on the airborne microbial diversity of sandstorms in Southern Xinjiang [ D ]. Urumqi: Xinjiang University, 2020.
- [ 27 ] 艾铄, 张丽杰, 肖芑颖, 等. 高通量测序技术在环境微生物领域的应用与进展 [ J ]. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2018, **32**(9): 111-121. Ai S, Zhang L J, Xiao P Y, *et al.* Application and progress of

- high-throughput sequencing technology in the field of environmental microorganisms [J]. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2018, **32**(9): 111-121.
- [28] 蒋思峡. 传统与机械化酱香大曲的菌群结构分析[D]. 贵阳: 贵州大学, 2017.  
Jiang S X. The analysis of microfloras on traditional and mechanized mao-tai flavor Daqu [D]. Guiyang: Guizhou University, 2017.
- [29] Hewitt K M, Gerba C P, Maxwell S L, *et al.* Office space bacterial abundance and diversity in three metropolitan areas[J]. *PLoS One*, 2012, **7**(5), doi: 10.1371/journal.pone.0037849.
- [30] Kembel S W, Jones E, Kline J, *et al.* Architectural design influences the diversity and structure of the built environment microbiome[J]. *The ISME Journal*, 2012, **6**(8): 1469-1479.
- [31] 夏宇翔, 孙霞, 陶瑞东, 等. 武汉市某居民区典型场所微生物气溶胶调查及健康风险评估[J]. *环境科学研究*, 2021, **34**(10): 2509-2516.  
Xia Y X, Sun X, Tao R D, *et al.* Microbial aerosol investigation and health risk assessment of residential area in Wuhan City[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, **34**(10): 2509-2516.
- [32] 马嘉伟, 杨凯雄, 柴风光, 等. 生活垃圾填埋场细菌气溶胶粒径分布及种群特征[J]. *环境科学*, 2019, **40**(8): 3470-3476.  
Ma J W, Yang K X, Chai F G, *et al.* Particle size distribution and population characteristics of airborne bacteria emitted from a sanitary landfill site[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(8): 3470-3476.
- [33] 刘盈盈, 张崇森, 张少华, 等. 生活垃圾填埋场细菌气溶胶分布及职业暴露风险评估[J]. *环境科学学报*, 2021, **41**(11): 4459-4466.  
Liu Y Y, Zhang C M, Zhang S H, *et al.* Distribution and occupational exposure risk assessment of bacterial aerosols at a sanitary landfill site[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(11): 4459-4466.
- [34] 王莹, 韩云平, 李琳. 卫生填埋场微生物气溶胶的逸散及潜在风险[J]. *微生物学通报*, 2020, **47**(1): 222-233.  
Wang Y, Han Y P, Li L. Emission and potential risks of bioaerosols in sanitary landfill[J]. *Microbiology China*, 2020, **47**(1): 222-233.
- [35] Li L Y, Wang Q, Bi W J, *et al.* Municipal solid waste treatment system increases ambient airborne bacteria and antibiotic resistance genes [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, **54**(7): 3900-3908.
- [36] Macher J M. Positive-Hole correction of multiple-jet impactors for collecting viable microorganisms [J]. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 1989, **50**(11): 561-568.
- [37] Liang Z S, Yu Y, Ye Z K, *et al.* Pollution profiles of antibiotic resistance genes associated with airborne opportunistic pathogens from typical area, Pearl River Estuary and their exposure risk to human [J]. *Environment International*, 2020, **143**, doi: 10.1016/j.envint.2020.105934.
- [38] Yang K X, Li L, Wang Y J, *et al.* Airborne bacteria in a wastewater treatment plant: emission characterization, source analysis and health risk assessment[J]. *Water Research*, 2019, **149**: 596-606.
- [39] Wikuats C F H, Duarte E H, Prates K V M C, *et al.* Assessment of airborne particles and bioaerosols concentrations in a waste recycling environment in Brazil[J]. *Scientific Reports*, 2020, **10**(1), doi: 10.1038/s41598-020-71787-0.
- [40] 杨亚飞, Wajid A, 张蒙蒙, 等. 某市政污水处理厂的微生物气溶胶排放特征及其定量风险评估研究[J]. *给水排水*, 2021, **47**(S1): 104-109.  
Yang Y F, Wajid A, Zhang M M, *et al.* Characterization of microbial aerosol emission from a municipal wastewater treatment plant and quantitative microbiological risk assessment[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2021, **47**(S1): 104-109.
- [41] 肖国生, 王兆丹, 陈林, 等. 微生物定量风险评估[J]. *环境科学与技术*, 2013, **36**(8): 59-64.  
Xiao G S, Wang Z D, Chen L, *et al.* Overview of quantitative microbial risk assessment [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **36**(8): 59-64.
- [42] Dungan R S. Estimation of infectious risks in residential populations exposed to airborne pathogens during center pivot irrigation of dairy wastewaters [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(9): 5033-5042.
- [43] Esfahanian E, Adhikari U, Dolan K, *et al.* Construction of a new dose-response model for *Staphylococcus aureus* considering growth and decay kinetics on skin[J]. *Pathogens*, 2019, **8**(4), doi: 10.3390/pathogens8040253.
- [44] 孙帆, 钱华, 叶瑾, 等. 南京市校园室内空气微生物特征[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(12): 4982-4988.  
Sun F, Qian H, Ye J, *et al.* Characteristics of airborne microorganisms in school classrooms in Nanjing [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(12): 4982-4988.
- [45] Kamal A, Cincinelli A, Martellini T, *et al.* Health and carcinogenic risk evaluation for cohorts exposed to PAHs in petrochemical workplaces in Rawalpindi city (Pakistan) [J]. *International Journal of Environmental Health Research*, 2016, **26**(1): 37-57.
- [46] 谭和平, 胡建平, 吴冰思, 等. 上海村镇生活垃圾分类收集模式与配套设施设置初探[J]. *环境卫生工程*, 2015, **23**(5): 57-59, 62.  
Tan H P, Hu J P, Wu B S, *et al.* Domestic waste classification collection mode and supporting facilities in Shanghai rural area [J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2015, **23**(5): 57-59, 62.
- [47] Ferguson R M W, Neath C E E, Nasir Z A, *et al.* Size fractionation of bioaerosol emissions from green-waste composting [J]. *Environment International*, 2021, **147**, doi: 10.1016/j.envint.2020.106327.
- [48] 孙强, 李杰, 赵炜, 等. 兰州某居民区大气微生物气溶胶分布特征研究[J]. *环境监测管理与技术*, 2019, **31**(4): 13-17.  
Sun Q, Li J, Zhao W, *et al.* Study on distribution characteristics of atmospheric microbial aerosol in a residential area of Lanzhou [J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2019, **31**(4): 13-17.
- [49] 许鹏程, 张崇森, 袁琳, 等. 西安市典型场所微生物气溶胶的分布特征[J]. *安全与环境学报*, 2017, **17**(6): 2410-2414.  
Xu P C, Zhang C M, Yuan L, *et al.* Particular features of the microbial aerosols in the typical spaces in Xi'an Municipality[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2017, **17**(6): 2410-2414.
- [50] 赵炜, 李杰, 谢慧娜, 等. 兰州市春季微生物气溶胶浓度、粒径及细菌群落结构分布特性[J]. *环境科学*, 2021, **42**(4): 1668-1678.  
Zhao W, Li J, Xie H N, *et al.* Concentration and particle size distribution characteristics of microbial aerosol and bacterial community structure during spring in Lanzhou city, China [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(4): 1668-1678.

- [51] Zhao Y, Richardson B, Takle E, *et al.* Airborne transmission may have played a role in the spread of 2015 highly pathogenic avian influenza outbreaks in the United States [J]. *Scientific Reports*, 2019, **9**, doi: 10.1038/s41598-019-47788-z.
- [52] Bragoszewska E, Biedroń I, Hryb W. Microbiological air quality and drug resistance in airborne bacteria isolated from a waste sorting plant located in Poland—a case study [J]. *Microorganisms*, 2020, **8**(2), doi: 10.3390/microorganisms8020202.
- [53] Mangutov E O, Kharseeva G G, Alutina E L. *Corynebacterium* spp. —problematic pathogens of the human respiratory tract (review of literature) [J]. *Klinicheskaia Laboratornaia Diagnostika*, 2021, **66**(8): 502-508.
- [54] 姚蕾. 金黄色葡萄球菌致病毒素的研究进展 [J]. *国际检验医学杂志*, 2014, **35**(22): 3080-3082.
- [55] Noto M J, Boyd K L, Burns W J, *et al.* Toll-like receptor 9 contributes to defense against *Acinetobacter baumannii* infection [J]. *Infection and Immunity*, 2015, **83**(10): 4134-4141.
- [56] Naim H, Rizvi M, Gupta R, *et al.* Drug resistance and molecular epidemiology of carbapenem resistant gram-negative bacilli isolates [J]. *Journal of Global Infectious Diseases*, 2018, **10**(3): 133-139.
- [57] 钱生财. 青岛市不同功能区微生物气溶胶研究 [D]. 青岛: 青岛理工大学, 2012.  
Qian S C. Studies on microbial aerosol at different functional regions in Qingdao [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2012.
- [58] 李彦鹏, 马天峰, 杜胜利, 等. 大气生物气溶胶的源排放与源解析研究进展 [J]. *地球科学与环境学报*, 2021, **43**(2): 315-331.  
Li Y P, Ma T F, Du S L, *et al.* Review on source emission and source identification of bioaerosols in the atmosphere [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2021, **43**(2): 315-331.
- [59] Zheng W, Reponen T, Grinshpun S A, *et al.* Effect of sampling time and air humidity on the bioefficiency of filter samplers for bioaerosol collection [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2001, **32**(5): 661-674.
- [60] 张宝莹, 刘凡, 白雪涛. 病原微生物气溶胶对人群健康风险评估研究进展 [J]. *环境卫生学杂志*, 2015, **5**(3): 287-292.  
Zhang B Y, Liu F, Bai X T. Progress on health risk assessment of pathogenic microorganism aerosol [J]. *Journal of Environmental Hygiene*, 2015, **5**(3): 287-292.
- [61] Madhwal S, Prabhu V, Sundriyal S, *et al.* Distribution, characterization and health risk assessment of size fractionated bioaerosols at an open landfill site in Dehradun, India [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2020, **11**(1): 156-169.
- [62] 杨凯雄, 侯红勋, 王颖哲, 等. SBR 工艺城市污水处理厂微生物气溶胶逸散特征 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(11): 4909-4914.  
Yang K X, Hou H X, Wang Y Z, *et al.* Characteristics of bioaerosols emitted from WWTP with SBR treatment process [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(11): 4909-4914.



## CONTENTS

Regionalization and Analysis of PM <sub>2.5</sub> and O <sub>3</sub> 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 Wuhan 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-tong, 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>Koeleruteria paniculata</i> .....	XIE Tian-zhi, CHEN Yong-hua, SU Rong-kui, <i>et al.</i> (4687)
Phosphorus Enrichment Efficiency of CaO <sub>2</sub> @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 Fluvo-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 Fluvo-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)