

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.8
第40卷 第8期

目次

2016年京津冀地区红色预警时段PM_{2.5}污染特征与浓度控制效果 张冲, 郎建奎, 程水源, 王晓琦 (3397)

北京地区秋冬季大气污染特征及成因分析 徐冉, 张恒德, 杨孝文, 程水源, 张天航, 江琪 (3405)

合肥市PM_{2.5}和PM₁₀中元素组成特征及重污染成因分析 刘可可, 张红, 刘桂建 (3415)

濮阳市秋冬季大气细颗粒物污染特征及来源解析 陈楚, 王体健, 李源昊, 马红磊, 陈璞琬, 王德羿, 张元勋, 乔琦, 李光明, 王文红 (3421)

关中地区细颗粒物碳组分特征及来源解析 康宝荣, 刘立志, 刘焕武, 李养养, 艾双双, 曹宁, 雷颖 (3431)

长春季细颗粒物中有机气溶胶组成特征及来源 吴瑕, 曹芳, 翟晓瑶, 范美益, 张世春, 章炎麟 (3438)

中国城市扩张及空间特征变化对PM_{2.5}污染的影响 王桂林, 张炜 (3447)

不同湿法脱硫工艺对燃煤电厂PM_{2.5}排放的影响 邓建国, 马子珍, 李振, 段雷, 蒋靖坤 (3457)

浙江省合成革行业挥发性有机物污染特征及排放系数 徐佳琦, 王浙明, 宋爽, 徐志荣, 姚轶 (3463)

生活垃圾填埋场细菌气溶胶粒径分布及种群特征 马嘉伟, 杨凯雄, 柴风光, 王莹, 郭雪松, 李琳 (3470)

青岛近海生物气溶胶中总微生物的分布特征 官静, 祁建华, 李鸿涛 (3477)

广州饮用水水源地多环芳烃分布、来源及人体健康风险评价 宋玉梅, 王畅, 刘爽, 潘佳钊, 郭鹏然 (3489)

截污调水后滇池表层沉积物中16种PAHs的分布特征 胡昕怡, 高冰丽, 陈坦, 王洪涛, 金军, 饶竹, 朱雪芹, 王雪郡, 魏抱楷, 战楠, 刘彦廷, 戚敏 (3501)

黄河三角洲石油开采区盐渍化农田土壤多环芳烃的分布特征与源解析 邱慧, 刘月仙, 解小凡, 张萌, 王伟 (3509)

风场对太湖梅梁湾水华及营养盐空间分布的影响 余茂蕾, 洪国喜, 朱广伟, 权秋梅, 许海, 朱梦圆, 丁文浩, 李未, 吴挺峰 (3519)

向家坝水库营养盐时空分布特征及滞留效应 王耀耀, 吕林鹏, 纪道斌, 方海涛, 朱晓声, 张庆文, 霍静, 何金艳 (3530)

外源输入对底泥疏浚新生表层磷恢复及迁移的影响 李鑫, 耿雪, 王洪伟, 龚琬晴, 文帅龙, 钟继承, 李大鹏 (3539)

新疆喀什三角洲地下水SO₄²⁻化学特征及来源 魏兴, 周金龙, 乃尉华, 曾妍妍, 范薇, 李斌 (3550)

黄土区洛川塬地下水化学特征及影响因素分析 李洲, 李晨曦, 华琨, 李志 (3559)

北京市河流秋季浮游动物群落特征分析 王海邻, 刘玉飞, 任玉芬, 贺玉晓, 王思琪, 张红星, 王效科, 李紫鑫 (3568)

三峡水库干流底栖硅藻群落组成及其与环境因子的关系 刘黎, 贺新宇, 付君珂, 杨燕君, 米文梅, 施军琼, 吴忠兴 (3577)

渭河流域水体细菌群落的环境响应及生态功能预测 万甜, 何梦夏, 任杰辉, 闫幸幸, 程文 (3588)

汾河下游水体nirS型反硝化细菌群落组成与无机氮关系 汪银龙, 冯民权, 董向前 (3596)

饮用水快速砂滤池优势微生物群落的代谢功能解析 胡万超, 赵琛, 王巧娟, 刘锐平, 柏耀辉 (3604)

基于污水厂污泥资源化利用的粗放型绿色屋顶水质控制效果 彭航宇, 李田, 齐悦, 何云鹏, 黄楚玉, 张卓然 (3612)

植被对绿色屋顶径流量和水质影响 章孙逊, 张守红, 张英, 吴思婷 (3618)

光催化/活性炭/纳滤组合工艺处理二级出水及对膜污染的控制 范科文, 李星, 杨艳玲, 周志伟 (3626)

多种材料对水中氨氮的吸附特性 焦巨龙, 杨苏文, 谢宇, 金位栋, 闫玉红, 徐彬 (3633)

不同氨氮浓度对4株常见藻株生长及酶活性的影响 常婷, 许智慧, 程鹏飞, 徐继林, 周成旭 (3642)

3种基质材料对高浓度养殖废水处理效果及降解过程 刘铭羽, 夏梦华, 李远航, 陈坤, 赵聪芳, 李希, 李裕元, 吴金水 (3650)

铝污泥酸化提取液改性沸石的除磷特性及机制 韩芸, 胡玉洁, 连洁, 杨思哲, 齐泽宁 (3660)

缺氧MBBR耦合部分厌氧氨氧化强化城市生活污水深度脱氮 杨岚, 彭永臻, 李健伟, 高锐涛, 王茗, 李夕耀 (3668)

连续流系统中好氧段及沉淀段对污泥及其缺氧段脱氮能力的影响 薛欢婷, 袁林江, 刘小博, 孙恒锐 (3675)

FeS自养反硝化与厌氧氨氧化的耦合脱氮机制 马景德, 潘建新, 李泽敏, 王一显, 吴海珍, 韦朝海 (3683)

ANAMMOX体系中氨与硫酸盐的同步转化条件 董石语, 毕贞, 张文静, 黄勇 (3691)

全国城市污水处理厂中微生物群落的溯源分析 张冰, 吴林蔚, 文湘华 (3699)

不同溶解氧浓度下硝化工艺中微生物种群结构对比 刘文如, 顾广发, 宋小康, 杨殿海 (3706)

异养硝化细菌Acinetobacter junii NP1的同步脱氮除磷特性及动力学分析 杨奎, 陈宁, 任勇翔, 崔坤, 汪旭晖, 肖倩, 郭淋凯 (3713)

Type 0092丝状菌污泥微膨胀在短程硝化中的实现 高春娣, 安冉, 韩徽, 张娜, 任浩, 赵楠, 焦二龙, 彭永臻 (3722)

高盐高碱环境下硝化反硝化过程及N₂O产生特征 代伟, 赵剑强, 丁家志, 刘双 (3730)

生物炭对盐碱土壤氨挥发影响 王一宇, 王圣森, 戴九兰 (3738)

两种土壤增效剂对稻田氨挥发排放的影响 周玉玲, 侯朋福, 李刚华, 王绍华, 杨林章, 薛利红, 丁艳锋 (3746)

承德市滦河流域土壤重金属地球化学基线厘定及其累积特征 孙厚云, 卫晓锋, 甘凤伟, 王恒, 何泽新, 贾凤超, 张竞 (3753)

厦门某旱地土壤垂直剖面中重金属迁移规律及来源解析 张炜华, 于瑞莲, 杨玉杰, 胡恭任, 崔建勇, 颜妍, 黄华斌 (3764)

宝鸡市区土壤重金属污染影响因子探测及其源解析 张军, 董洁, 梁青芳, 杨宁宁, 耿雅妮 (3774)

铁铈氧化物对土壤As(V)和P的稳定化效果 林龙勇, 阎秀兰, 杨硕 (3785)

铁锰氧化物在不同水分条件下对土壤As的稳定化作用 周海燕, 邓一荣, 林龙勇, 曹梦华, 钟立荣 (3792)

生物质炭对双季稻水稻土微生物生物量碳、氮及可溶性有机碳氮的影响 刘杰云, 邱虎森, 汤宏, 沈健林, 吴金水 (3799)

有机物料对紫色土微生物量碳、氮及氮素供应的影响 汪月, 张名豪, 赵秀兰 (3808)

土地利用方式对土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响 罗晓虹, 王子芳, 陆畅, 黄容, 王富华, 高明 (3816)

宁南山区退耕还林还草对土壤氮素组成及其转化酶活的影响 高涵, 肖礼, 牛丹, 倪银霞, 黄懿梅 (3825)

不同浸提剂条件下生物炭溶解性有机物的浸出规律 何晶晶, 张昊昊, 仇俊杰, 邵立明, 吕凡 (3833)

基于成组生物毒性测试的PM_{2.5}毒性 江晓栋, 薛银刚, 魏永, 许霞, 刘菲, 薛柯, 施昕澜, 顾铭 (3840)

《环境科学》征订启事(3587) 《环境科学》征稿简则(3595) 信息(3611, 3705, 3745)

生活垃圾填埋场细菌气溶胶粒径分布及种群特征

马嘉伟^{1,2}, 杨凯雄^{1,2}, 柴风光^{1,2}, 王莹^{1,2}, 郭雪松^{1,2}, 李琳^{1,2*}

(1. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 卫生填埋是一种常用的生活垃圾处置方法. 在倾倒、堆放、推平和压实等垃圾填埋过程中, 有大量带有致病菌的微生物气溶胶逸散, 污染空气, 危害人体健康. 本研究在华北地区某生活垃圾卫生填埋场设置采样点, 采集空气中的细菌气溶胶, 解析细菌气溶胶的浓度、粒径分布和种群特征, 研究空气温度、相对湿度以及风速对细菌气溶胶逸散的影响. 结果表明, 作业区和覆盖区空气细菌浓度分别为 $(5\,437 \pm 572)$ CFU·m⁻³和 $(2\,707 \pm 396)$ CFU·m⁻³. 垃圾渗滤液处理区空气中的细菌气溶胶浓度最高, 平均为 $9\,460$ CFU·m⁻³. 细菌气溶胶的浓度呈现明显的季节变化, 夏季浓度明显高于其他季节. 冗余分析(RDA)显示, 气象参数如相对湿度、温度和风速, 显著影响细菌气溶胶在空气中的数量. 作业区和覆盖区空气细菌粒径分布高峰分别在 $2.1 \sim 4.7 \mu\text{m}$ 和 $0.65 \sim 2.1 \mu\text{m}$. 渗滤液处理逸散的细菌气溶胶大部分大于 $4.7 \mu\text{m}$. *Moraxellaceae*, *Bacillus aerius*, *Arcobacter* 以及 *Aeromonas* 是垃圾填埋场细菌气溶胶中检出潜在或机会致病菌.

关键词: 细菌气溶胶; 垃圾填埋场; 粒径分布; 种群特征; 影响因素

中图分类号: X172; X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)08-3470-07 DOI: 10.13227/j.hjkk.201901078

Particle Size Distribution and Population Characteristics of Airborne Bacteria Emitted from a Sanitary Landfill Site

MA Jia-wei^{1,2}, YANG Kai-xiong^{1,2}, CHAI Feng-guang^{1,2}, WANG Ying^{1,2}, GUO Xue-song^{1,2}, LI Lin^{1,2*}

(1. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Sanitary landfill is a commonly-used method for solid waste disposal. In the process of landfilling, e. g. dumping, stacking, pushing, and compacting, a large number of bioaerosols with pathogenic bacteria will be generated. That can result in air pollution and significant harm to human health if these pathogens are released into the air. Sampling sites were set up in a domestic waste sanitary landfill in North China to collect airborne bacteria in the air. Airborne bacteria, particle size distributions, and populations were analyzed, and the influence of meteorological parameters (temperature, relative humidity (RH), and wind speed (WS)) on the emission of airborne bacteria was also investigated. Results showed that the concentrations of airborne bacteria in the working area and the coverage area were $(5\,437 \pm 572)$ CFU·m⁻³ and $(2\,707 \pm 396)$ CFU·m⁻³, respectively. The emission level in the leachate treatment area was the highest, with an average of $9\,460$ CFU·m⁻³. The concentration of airborne bacteria showed clear seasonal variation, being much higher in summer than that in the other seasons. Redundancy analysis (RDA) demonstrated that RH, temperature, and WS affected the number of airborne bacteria in the air. The peaks in the airborne particle size distribution were $2.1\text{--}4.7 \mu\text{m}$ in the working area and $0.65\text{--}2.1 \mu\text{m}$ in the coverage area. Most of the airborne bacteria released from the leachate treatment processes were larger than $4.7 \mu\text{m}$. *Moraxellaceae*, *Bacillus aerius*, *Arcobacter*, and *Aeromonas* were potential or opportunistic pathogens detected from the airborne bacteria samples. Effective measures should be taken to reduce the amount of bacterial aerosol emitted to the air in landfill working areas and in the leachate of treatment areas. Operators of landfill machinery and leachate treatment facilities should consider personal protection measures and should reduce their exposure to microbial aerosols in order to prevent disease.

Key words: airborne bacteria; sanitary landfill site; particle size distribution; population characteristics; influencing factors

垃圾填埋场是采用卫生填埋方式的垃圾集中堆放场地, 垃圾卫生填埋因成本低、卫生程度好、管理方便等优点成为处理处置生活垃圾常用和有效的方法, 在国内被广泛应用. 发达国家如美国的垃圾填埋率为61%, 法国为60%, 中国垃圾填埋率超过85%. 生活垃圾的主要组分包括: 以厨余为主的可生物降解有机物; 塑料、废纸等可燃有机物以及砖瓦、煤渣、玻璃等无机物. 其中可生物降解的有机物占比最高, 超过50%.

生活垃圾带有大量对人和动物有害的致病菌、病毒和寄生虫, 在垃圾填埋过程中, 附着在垃圾表

面的微生物进入到垃圾堆填区周围空气中形成微生物气溶胶. Breza-Boruta^[1]对波兰北部的城市垃圾处理场微生物气溶胶研究结果显示, 嗜温细菌、丝状真菌和放线菌的总数达到了高达 10^4 CFU·m⁻³的值, 大肠杆菌杆的数量保持在约 10^2 CFU·m⁻³的低水平. Agarwal^[2]研究印度首都新德里垃圾填埋量为 $1\,200 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ 的 Okhla 垃圾填埋场的微生物气溶

收稿日期: 2019-01-08; 修订日期: 2019-03-05

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD1100604)

作者简介: 马嘉伟(1992~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为污泥、生活垃圾处理, E-mail: jwma_st@rcees.ac.cn

* 通信作者, E-mail: leel@rcees.ac.cn

胶, 监测到微生物气溶胶浓度高达 $(3.6 \times 10^6 \pm 3.1 \times 10^6)$ CFU·m⁻³. 北京市某垃圾填埋场作业区和覆盖区的空气细菌气溶胶浓度分别为2 000 ~ 18 045 CFU·m⁻³和535 ~ 4 068 CFU·m⁻³, 作业区空气细菌浓度较高, 且四季变化特征较覆盖区显著^[3]. 微生物气溶胶是含有生物性粒子的气溶胶, 包括细菌、病毒以及致敏花粉、霉菌孢子、蕈类孢子和寄生虫卵等, 除具有一般气溶胶的特性以外, 还具有传染性和致敏性^[4-6]. 悬浮在空气中的微生物及其有害代谢产物逸散到周围空气中, 造成垃圾填埋场的环境污染, 危害作业工人的身体健康^[7].

本研究分析了华北地区某生活垃圾卫生填埋场空气中的细菌气溶胶的浓度、粒径分布和种群结构, 比较作业区、覆盖区以及垃圾渗滤液处理区的细菌气溶胶的逸散特征, 探讨环境温度、相对湿度、风速等气象参数对细菌气溶胶的逸散水平、粒径分布的影响及相关性, 以期为有效削减和控制生活垃圾填埋过程产生的微生物气溶胶提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 填埋场概况及采样点布设

本研究在华北地区某生活垃圾卫生填埋场进行. 该生活垃圾填埋场的填埋面积约30 000 m². 每日生活垃圾填埋量为150 ~ 200 t. 为了防止恶臭物质扩散和便于雨水分离, 对暂时不填埋的区域覆盖黏土层, 在黏土层上再覆盖2 mm厚的强度高、防渗性能好的高密度聚乙烯膜(HDPE). 垃圾渗滤液采用升流式厌氧污泥反应器+膜生物反应器的工艺处理, 处理量约为30 m³·d⁻¹. 在垃圾填埋场的作业区、覆盖区和垃圾渗滤液处理区分别设置5个采样点(SL-1 ~ SL-5), 在上风向办公区也设置采样点SL-0, 采样点分布如图1所示.

1.2 空气微生物采集和培养方法

采样分别于春季(4月)、夏季(8月)、秋季(10月)和冬季(12月)这4个季节进行, 每个季节取样2 d, 取样时间为09:00 ~ 11:00, 每个采样点每次采集2组平行样品. 2个安德森六级撞击式空气微生物采样器(228-9530K, SKC Gulf Coast Inc., 美国)同时工作, 收集填埋场空气中的生物气溶胶颗粒. 该种采样器共有6级, 每级装有不锈筛板, 每个筛板布设400个精密加工的射流孔, 孔的直径逐级减少, 第一级直径>7.0 μm, 第六级直径>0.65 ~ 1.1 μm(表1)^[8]. 每级筛板下面放置1个直径为90 mm、带有LB培养基(分析纯, 北京奥博星生物技术有限责任公司)的玻璃培养皿. 抽吸泵将流量为

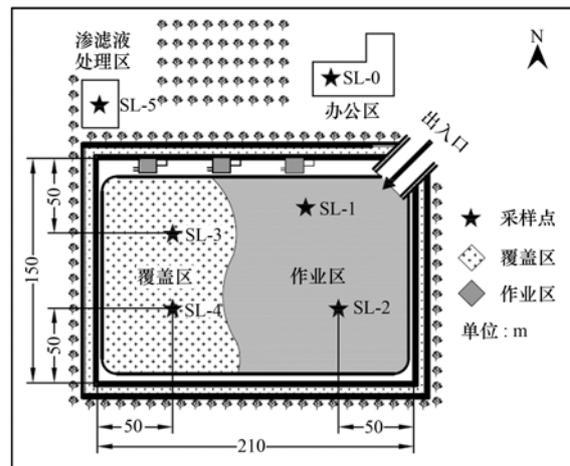


图1 采样点示意

Fig. 1 Diagram of the sampling points

28.3 L·min⁻¹的气流泵送至各级, 空气流速逐级增大, 从而把空气中的带菌粒子按粒径的大小, 分别捕获到各级培养皿上. 空气微生物采样器均安装在带有适配器的三脚架上, 距离地面1.5 m(人体呼吸高度). 每次取样3 min, 当吸入的空气量达到所需值时, 逐级取出培养皿, 迅速密封, 放入样品箱以防止污染. 在采集样品的同时, 使用风速仪(HD2303.0/DELTAOHM, 意大利)和温湿度计(JWSK-SC, 中国)监测并记录采样时的风速、温度和空气相对湿度.

表1 安德森六级撞击式微生物采样器各级特性

Table 1 Level characteristics of the Anderson six-stage viable cascade impactor sampler

级数	捕获范围/ μm	孔径/mm	空气流速/ m·s ⁻¹
第1级	>7.0	1.18	1.08
第2级	4.7 ~ 7.0	0.91	1.79
第3级	3.3 ~ 4.7	0.71	2.97
第4级	2.1 ~ 3.3	0.53	5.28
第5级	1.1 ~ 2.1	0.34	12.77
第6级	0.65 ~ 1.1	0.25	23.29

1.3 微生物分析方法

捕获微生物粒子的培养皿均放置在37℃恒温箱中培养48 h; 分别计数捕获的菌落数(CFU), 按式1计算空气微生物浓度(CFU·m⁻³). 采用Positive hole method方法对菌落数进行相应校正^[9].

$$c = \frac{N_1 + N_2 + \dots + N_6}{Q \cdot t} \times 1000 \quad (1)$$

式中, c : 空气微生物浓度(CFU·m⁻³); N_n : 采样器第 n 级捕获的菌落数; Q : 空气流量(L·min⁻¹); t : 采样时间(min).

收集培养皿上生长的菌落, 使用PowerSoil® DNA分离试剂盒(MoBio, USA)提取空气微生物DNA, 并用1%琼脂糖凝胶电泳(120 V, 15 min)检

测 DNA 提取质量. 利用引物 515F 和 907R 对细菌 16S rRNA 的 V3-V4 区进行 PCR 扩增, 每份样品扩增 3 份. PCR 产物经提取、纯化、混合, 然后利用高通量测序 (Illumina, MiSeq PE300, USA) 将纯化后的扩增片段构建 PE 2×300 的文库, PCR 的条件和操作步骤与以往研究的描述相同^[10]. 原始测序序列去杂后, 利用 QIIME (version 1.9.1) 软件计算空气微生物群落丰度^[11].

1.4 数据统计分析

利用 RDA 线性模型 (Canoco5.0) 分析细菌气溶胶浓度与环境参数 (如温度、相对湿度和风速) 的典型相关性 (Monte Carlo permutation test). 相关性用 P 值表示. 当 P 值小于 0.05 时, 表明在 95% 的置信区间内具有统计学意义上的显著差异.

2 结果与讨论

2.1 垃圾填埋场空气中生物气溶胶的浓度

各采样点空气中细菌气溶胶的浓度如图 2 所示. 各个采样点均有生物气溶胶检出, 浓度 $(513 \pm 79) \sim (13\,888 \pm 1\,756) \text{ CFU} \cdot \text{m}^{-3}$. 其中, 垃圾填埋作业区的浓度达到 $(3\,179 \pm 299) \sim (8\,051 \pm 919) \text{ CFU} \cdot \text{m}^{-3}$, 明显高于覆盖区 $(931 \pm 124) \sim (3\,835 \pm 385) \text{ CFU} \cdot \text{m}^{-3}$, 平均值大约是对照点 [位于上风向的办公区 $(513 \pm 79) \sim (720 \pm 109) \text{ CFU} \cdot \text{m}^{-3}$] 的 9 倍, 大约是覆盖区的 2 倍.

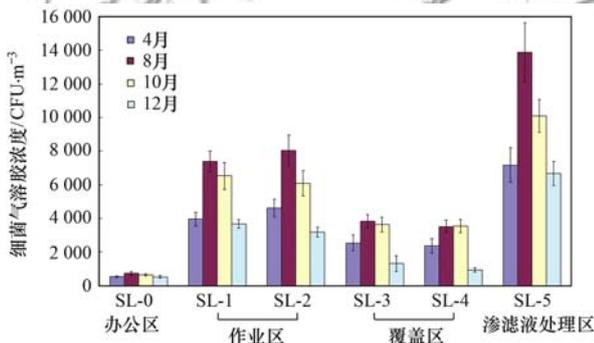


图 2 细菌气溶胶浓度

Fig. 2 Concentrations of airborne bacteria at each individual sampling point

以往的研究显示, 北京某垃圾填埋场作业区的空气细菌浓度最高可以达到 $18\,045 \text{ CFU} \cdot \text{m}^{-3}$ ^[3]. 这项研究是在一年中的四个季节中进行的, 作业区四季空气细菌浓度均高于覆盖区. 研究和比较台湾南部即将封场和已经封场的生活垃圾填埋场空气中的生物气溶胶逸散特征时, 也发现了类似的现象, 覆盖区与未覆盖区空气中生物气溶胶含量差异显著, 未覆盖区生物气溶胶含量较高, 平均 $3\,769 \text{ CFU} \cdot \text{m}^{-3}$, 是覆盖区的 2 ~ 3 倍^[12]. 本研究的生活

垃圾填埋场采用卫生填埋的方式, 即倾倒一层生活垃圾 (大约 0.5 m 厚), 将其推平压实, 再在其上覆盖 0.2 m 厚的黏土. 在垃圾填埋场的作业区, 倾倒在场内的大量新鲜生活垃圾暴露于空气中; 推平压实过程中, 填埋作业机械对垃圾的搅动和翻动使其中大量微生物随细小颗粒物、灰尘、气体等逸散到周围空气中, 形成生物气溶胶. 与其他环境逸散的微生物气溶胶相比^[13, 14], 垃圾填埋场的释放量高, 是微生物气溶胶的重要排放源之一.

在覆盖区, 覆盖层由黏土层和 HDPE 膜组成, HDPE 膜为高密度聚乙烯膜, 气密性较强, 膜内空间与外界空气交换受到阻碍, 黏土层及土层之下的垃圾产生的微生物、气体、灰尘等难以扩散到空气中, 因此, 对于已封场和暂时不填埋的区域, 在覆土层之上, 再覆盖 HDPE 膜, 避免垃圾暴露, 有效减少垃圾渗滤液和控制垃圾填埋气体污染的同时, 还能防止生活垃圾产生的生物源性污染物如生物气溶胶的排放.

与其它采样点相比, 垃圾渗滤液处理区生物气溶胶的浓度最高, 平均为 $9\,460 \text{ CFU} \cdot \text{m}^{-3}$. 垃圾渗滤液污水处理采用曝气生化处理工艺. 曝气生化处理工艺段是污水处理生物气溶胶的主要逸散源之一^[15]. Fathi 等^[16]在生化池附近检测到大量的细菌气溶胶 ($741 \sim 2\,817 \text{ CFU} \cdot \text{m}^{-3}$). 在 A^2/O 工艺污水处理厂的空气中, 监测到有 $257 \sim 4\,878 \text{ CFU} \cdot \text{m}^{-3}$ 细菌生物气溶胶的排放^[11]. 垃圾渗滤液处理过程中, 生化反应池设置曝气装置, 为渗滤液中有机的生物转化提供充足的氧. 充氧产生的细小气泡到达水面后会破裂成小碎片或小液滴, 渗滤液中的细菌、真菌、病毒、原动物等活性微生物随小碎片或小液滴逸散到大气中, 气溶胶化后形成生物气溶胶. 与生活污水相比, 垃圾渗滤液的有机质含量高, COD 超过 $20\,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 产生的细菌气溶胶的量高于生活污水处理过程的产生量. 另外, 垃圾渗滤液的处理设施均建在处理间内, 空间相对密闭, 通风性较差, 构筑物的外墙和房顶阻碍或减缓生物气溶胶的扩散, 造成大量生物气溶胶在处理间内的积累. 垃圾渗滤液处理区空气中的细菌气溶胶的浓度远远超过国家室内空气质量标准 (GB/T 18883-2002) 的限定值 $2\,500 \text{ CFU} \cdot \text{m}^{-3}$. 因此, 渗滤液处理区在处理垃圾渗滤液的同时, 还应重视细菌气溶胶的削减和控制, 以防空气细菌引起的各类呼吸道疾病的发生.

2.2 生物气溶胶粒径分布

垃圾填埋场不同区域空气生物气溶胶的粒径分布有明显差异 (图 3). 从作业区 SL-1 和 SL-2 采集的空气细菌, 其粒径主要分布在第 3 级和第 4 级,

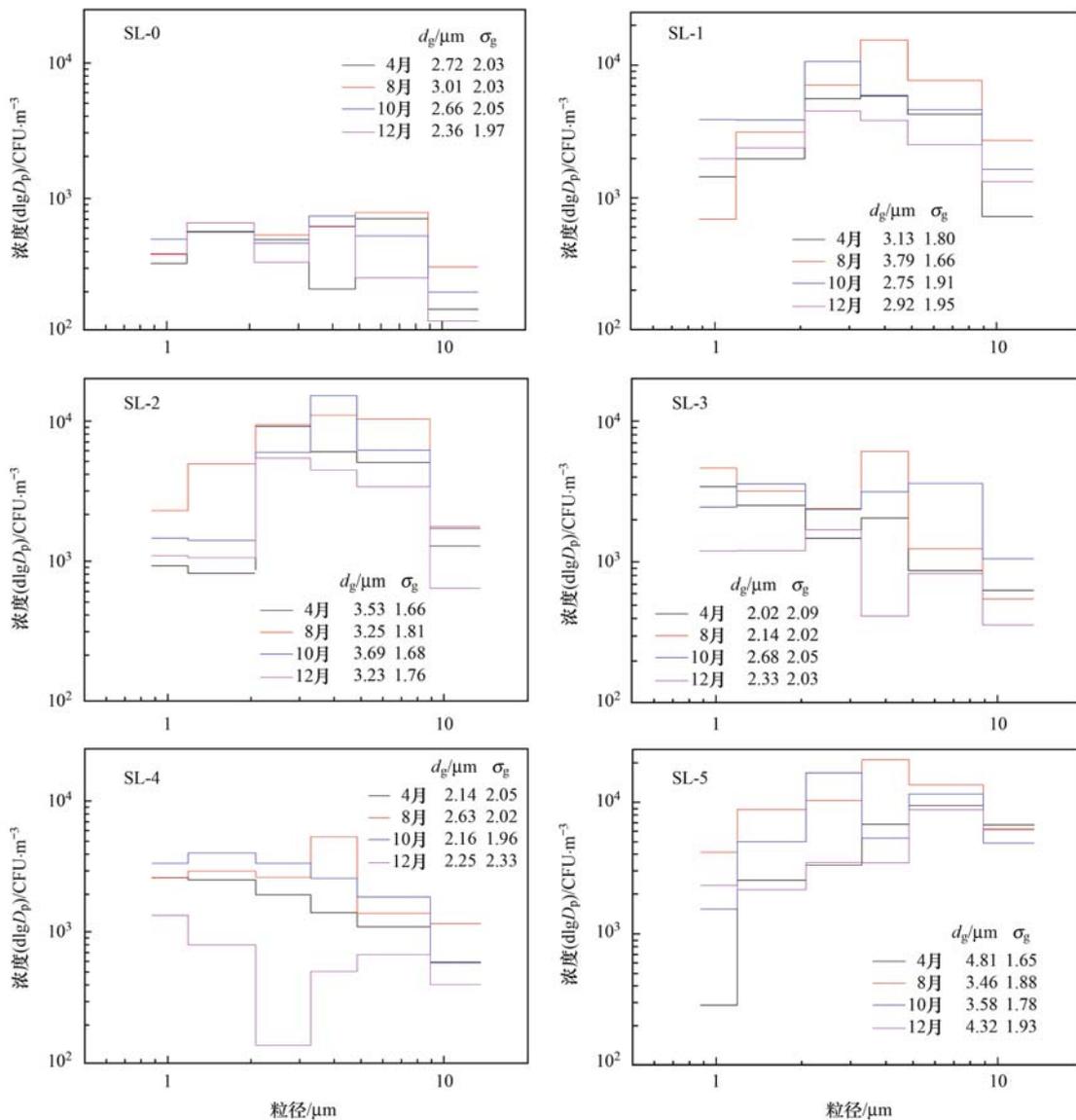


图3 不同区域细菌气溶胶粒径分布

Fig. 3 Particle size distributions of airborne bacteria

粒径范围为 2.1 ~ 4.7 μm , 在总细菌中所占比例分别为 47.15% 和 53.98%。覆盖区空气中的细菌气溶胶粒子尺寸较小, 大约 50% 的细菌气溶胶 (SL-3 为 49.93%; SL-4 为 51.51%) 的粒径处于 0.65 ~ 2.1 μm 的范围, 分布在第 5 级和第 6 级。办公区空气中的细菌气溶胶粒径分布与覆盖区的类似, 具有 0.65 ~ 2.1 μm 粒径的细菌粒子比例较高, 占总数的 42.77%。

相比之下, 在渗滤液处理区空气动力学直径大于 4.7 μm 的细菌气溶胶比例较高, 为 52.38%。垃圾渗滤液处理过程中, 渗滤液中的微生物飞溅到空气中, 水中的颗粒物如无机悬浮固体和微小的污泥颗粒, 可以作为细菌细胞的附着介质, 一同逸散到空气中。另外, 不同于从土壤或非水表面 (如垃圾等固体废弃物) 排放的细菌气溶胶, 液相产生的生物气溶胶表面通常有一层薄薄的水膜^[17, 18]。因此,

废液处理过程检测到的微生物气溶胶的粒径通常大于从其他环境中检测到的微生物气溶胶。

已经发现暴露于生物气溶胶的风险不仅与其浓度相关, 而且与其粒径也有关。空气中微生物的空气动力学直径决定了它们将沉积在人类呼吸道中的位置^[19]。小颗粒 (< 1 ~ 3 μm) 容易进入肺部, 而大颗粒 (> 8 μm) 由于其惯性可沉积在上呼吸道 (鼻道和小支气管)。一般而言, 呼吸道各处均可吸收细菌气溶胶, 但能够进入肺深部的小粒子吸收更快, 致病力更强。大粒子气溶胶含有微生物较多, 其作用也不可忽视^[20]。

2.3 生物气溶胶的微生物种群特征

微生物种群分析表明, 垃圾填埋场的作业区、覆盖区以及渗滤液处理区空气中的细菌种群与办公区有显著差异 (图 4)。在办公区, *Kocuria* (12.90%)、*Cyanobacteria_norank* (7.26%)、

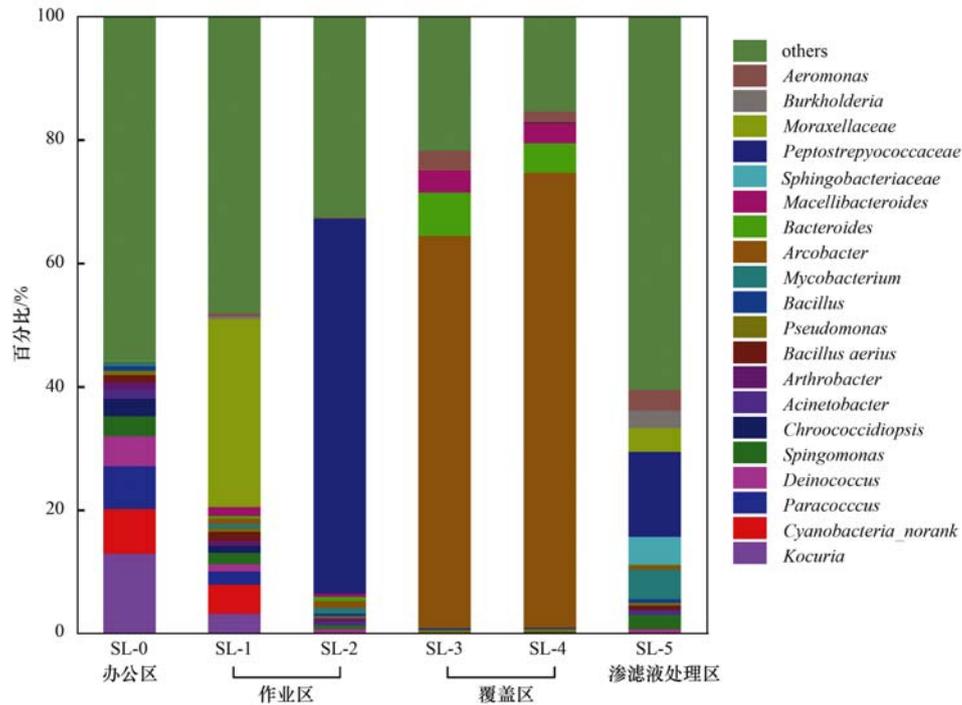


图4 垃圾填埋场细菌气溶胶的主要种群

Fig. 4 Populations of main airborne bacteria at the landfill site

Paracoccus (6.96%) 及 *Deinococcus* (4.85%) 这 4 种细菌在总细菌中的占比超过 30%。垃圾填埋场作业区细菌气溶胶以 *Peptostreptococcaceae* 和 *Moraxellaceae* 为主, 分别占 60.82% 和 30.50%。在覆盖区, 这些细菌的百分比明显下降, 其他细菌, 如 *Arcobacter*、*Bacteroides* 和 *Macellibacteroides* 的百分比增加, 是覆盖区空气微生物的主要种群。垃圾渗滤液处理区空气中 *Peptostreptococcaceae*、*Mycobacterium* 和 *Sphingobacteriaceae* 为优势菌, 百分比分别为 13.79%、4.75% 和 4.47%。

在检测到的细菌中, 有一些属于潜在致病菌或机会致病菌。 *Moraxellaceae*、*Bacillus aerius*、*Arcobacter* 以及 *Aeromonas* 存在于填埋场空气中, *Mycobacterium*、*Moraxellaceae* 和 *Burkholderia* 在垃圾渗滤液处理区被检出。其中, *Burkholderia*、*Moraxellaceae* 和 *Aeromonas* 在上风向办公区未检出或占比较低, 说明这些菌很有可能是在垃圾填埋或垃圾渗滤液处理过程中产生的。这些细菌分别隶属于 *Proteobacteria* (*Moraxellaceae*、*Aeromonadaceae*、*Pseudomonadaceae*、*Xanthomonadaceae*、*Enterobacteriaceae*)、*Firmicute* (*Bacillaceae*、*Staphylococcaceae*) 和 *Actinobacteria* (*Micrococcaceae*)。这些病原体包括常见呼吸系统致病菌, 例如 *Staphylococcus* sp.、*Burkholderia* sp.^[21]、*Moraxella* sp.^[22]、*Escherichia-Shigella*^[23] 以及具有抗生素耐受性的致病细菌, 如 *Aeromonas* sp.^[24]。由于空气的传

播, 垃圾填埋场的生物性污染, 会引起过敏反应, 诱发鼻炎、气喘等病症。国内外研究结果显示, 垃圾填埋场作业工人慢性咽炎患病率、肺功能轻度下降比例高于行政管理等对照人员。垃圾填埋场附近人群癌症发病率较非暴露地区明显升高^[25]。

2.4 垃圾填埋场气象参数对细菌气溶胶的影响

垃圾填埋场周围空气中的细菌气溶胶的浓度呈现季节性变化。夏季空气细菌总数最高, 作业区和覆盖区分别为 $6313.5 \text{ CFU} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $3580.5 \text{ CFU} \cdot \text{m}^{-3}$ 。春季和秋季空气细菌总数次之, 也呈现较高的浓度水平。冬季空气中细菌的最低浓度为 $3426 \text{ CFU} \cdot \text{m}^{-3}$ (作业区) 和 $1122.5 \text{ CFU} \cdot \text{m}^{-3}$ (覆盖区), 见图 2。垃圾渗滤液处理区空气中细菌浓度也呈现类似的季节变化。

冗余分析 (redundancy analysis, RDA) 研究气象参数, 如温度、相对湿度和风速, 对细菌气溶胶逸散的影响。结果显示, 空气中细菌气溶胶的浓度与温度 ($P=0.02$)、相对湿度 ($P=0.004$) 呈正相关, 与风速 ($P=0.002$) 呈负相关 (图 5)。垃圾填埋场的环境温度、相对湿度以及风速随季节发生明显的变化 (表 2)。夏季的空气温度和相对湿度平均为 31.7°C 和 63.54% , 明显高于其他季节。有研究发现生物气溶胶存活的适宜温度为 $20 \sim 37^\circ\text{C}$ ^[26], 相对湿度为 $40\% \sim 60\%$ 。细菌适于在水中或潮湿的环境中生长。其生长温度在 $5 \sim 35^\circ\text{C}$ 之间, 最适温度一般为 35°C 。当相对湿度在 $20\% \sim 95\%$ 范围内时,

空气中的细菌从大气中吸收水分以保持其活性^[27]。适宜的温度和较高的相对湿度有利于微生物在空气中生存。垃圾中含有大量可被微生物利用的有机物,在高温、高湿的环境中,微生物利用有机物大量生长繁殖,导致更多的微生物逸散到周围空气中。因此,细菌气溶胶在夏季的逸散浓度最高。

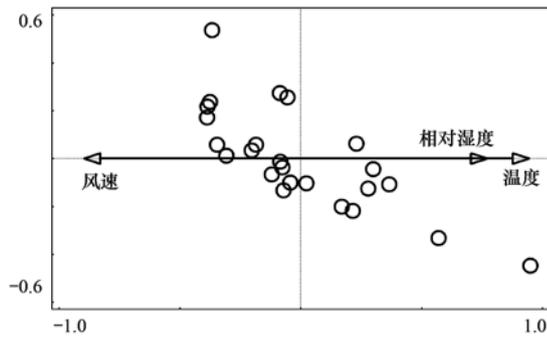


图5 气象参数和细菌气溶胶浓度 RDA 分析

Fig. 5 RDA of meteorological parameters and airborne bacteria concentrations

对于位于室外的位点(作业区和覆盖区),除了温度和湿度,风速也是影响垃圾填埋场周围空气中细菌气溶胶浓度的重要因素之一^[28]。逸散到空气中的微生物粒子会发生从高浓度区域向低浓度区域转移的自然扩散现象。风可以携带质轻的小颗粒,加速扩散,降低空气中的微生物气溶胶的浓度。风速越大,扩散越快。与其他季节相比,冬季风速最高,平均 $4.9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。并且北方的冬季室外温度较低,平均 3.4°C (表2)。温度低,不利于空气中的微生物的生存。因此,低温和风的稀释作用导致填埋场作业区和覆盖区冬季细菌气溶胶浓度较低。

垃圾填埋场春季与秋季的环境温度、相对湿度以及风速等气象条件相近,但是,无论是作业区还是覆盖区,秋季空气微生物的浓度均高于春季的浓度(图2),大约是春季的1.5倍。在检测期间,该垃圾填埋场一直在运行。4~10月期间,填埋场消纳的垃圾总量增加了30000 t。填埋龄和填埋量不同,垃圾中的有机质含量和组成差异明显,垃圾中的生物量相应发生变化。这可能是导致填埋场秋季细菌气溶胶浓度较高的原因。

3 结论

(1)生活垃圾填埋场的作业区、覆盖区以及垃圾渗滤液处理区的空气中有大量的细菌气溶胶,垃圾渗滤液处理区和作业区为主要逸散源。潜在或机会致病菌 *Moraxellaceae*、*Arcobacter* 以及 *Aeromonas* 存在于填埋场空气中, *Mycobacterium*、*Moraxellaceae* 和 *Burkholderia* 在垃圾渗滤液处理区有检出,可能诱发多种疾病风险。

表2 垃圾填埋场各个季节气象参数

Table 2 Meteorological parameters of landfill during different seasons		采样点环境条件(平均值)			
月份	季节	采样点	温度/ $^\circ\text{C}$	相对湿度/%	风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
4	春季	SL-0	18.5	21.87	2.7
		SL-1	20.4	29.07	4.3
		SL-2	19.5	29.12	3.2
		SL-3	22.7	26.82	3.1
		SL-4	21.3	23.99	3.6
8	夏季	SL-5	20.5	35.62	0
		SL-0	30.7	59.73	0.2
		SL-1	33.3	67.37	1.7
		SL-2	32.1	68.01	2.0
		SL-3	31.6	60.80	0.8
10	秋季	SL-4	30.6	61.78	1.1
		SL-5	35.2	76.62	0
		SL-0	18.2	21.84	2.1
		SL-1	17.4	25.72	1.9
		SL-2	17.6	27.24	2.5
12	冬季	SL-3	18.5	23.93	2.9
		SL-4	18.3	21.81	2.3
		SL-5	26.1	42.15	0
		SL-0	3.5	21.50	3.9
		SL-1	3.8	23.78	5.1
		SL-2	3.3	23.36	4.5
		SL-3	3.6	20.20	5.7
		SL-4	3.0	19.31	5.3
		SL-5	10.1	58.67	0

(2)细菌气溶胶的逸散受到温度、相对湿度、风速等气象条件的显著影响。因适宜的温度、较高的湿度以及较低的风速,夏季填埋场空气细菌气溶胶逸散水平明显高于其他季节。

(3)垃圾填埋场的作业区、覆盖区和垃圾渗滤液处理区的细菌气溶胶主要分布在 $2.1 \sim 4.7 \mu\text{m}$ 、 $0.65 \sim 2.1 \mu\text{m}$ 和 $>4.7 \mu\text{m}$ 的范围内。空气中大量传播的可呼吸细菌(空气动力学直径 $<3.3 \mu\text{m}$)可能给填埋场作业人员造成潜在的健康风险。

(4)垃圾填埋场应采取有效措施减少作业区和渗滤液处理区空气中的细菌气溶胶数量。场区内的填埋机械和渗滤液处理设施的操作人员应注意个人防护,减少微生物气溶胶的暴露,预防疾病的发生。

参考文献:

- [1] Breza-Boruta B. The assessment of airborne bacterial and fungal contamination emitted by a municipal landfill site in Northern Poland[J]. Atmospheric Pollution Research, 2016, 7(6): 1043-1052.
- [2] Agarwal S. Seasonal variability in size-segregated airborne bacterial particles and their characterization at different source-sites[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24(15): 13519-13527.
- [3] 纪思思,夏立江,杜文利,等.北京某垃圾填埋区空气细菌浓度及粒径分布特征[J].中国环境监测,2009,25(6): 67-

70.
Ji S S, Xia L J, Du W L, *et al.* The concentration and particle distribution characteristics of airborne bacteria in certain municipal landfill site in Beijing[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2009, **25**(6): 67-70.
- [4] 于玺华. 现代空气微生物学[M]. 北京: 人民军医出版社, 2002.
- [5] Park D U, Ryu S H, Kim S B, *et al.* An assessment of dust, endotoxin, and microorganism exposure during waste collection and sorting [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2011, **61**(4): 461-468.
- [6] 杜睿. 大气生物气溶胶的研究进展[J]. *气候与环境研究*, 2006, **11**(4): 546-552.
Du R. The progress of atmospheric bioaerosol research [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2006, **11**(4): 546-552.
- [7] 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.
- [8] Andersen A A. New sampler for the collection, sizing, and enumeration of viable airborne particles [J]. *Journal of Bacteriology*, 1958, **76**(5): 471-484.
- [9] 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.
- [10] Wang Y J, Li L, Han Y P, *et al.* Intestinal bacteria in bioaerosols and factors affecting their survival in two oxidation ditch process municipal wastewater treatment plants located in different regions[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, **154**: 162-170.
- [11] 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.
- [12] Huang C Y, Lee C C, Li F C, *et al.* The seasonal distribution of bioaerosols in municipal landfill sites; a 3-yr study [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**(27): 4385-4395.
- [13] 胡庆轩, 车凤翔, 张松乐, 等. 京、津地区大气微生物的浓度[J]. *环境科学*, 1989, **10**(5): 30-35.
Hu Q X, Che F X, Zhang S L, *et al.* A study on concentrations of microorgan-isms in the atmosphere of Beijing and Tianjin areas [J]. *Environmental Science*, 1989, **10**(5): 30-35.
- [14] 方治国, 欧阳志云, 胡利锋, 等. 北京市夏季空气微生物粒度分布特征[J]. *环境科学*, 2004, **25**(6): 1-5.
Fang Z G, Ouyang Z Y, Hu L F, *et al.* Granularity distribution of airborne microbes in summer in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2004, **25**(6): 1-5.
- [15] 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.
- [16] Fathi S, Hajizadeh Y, Nikaeen M, *et al.* Assessment of microbial aerosol emissions in an urban wastewater treatment plant operated with activated sludge process [J]. *Aerobiologia*, 2017, **33**(4): 507-515.
- [17] Wickman H H. Deposition, adhesion, and release of bioaerosols [A]. In: Lighthart B, Mohr A J (Eds.). *Atmospheric Microbial Aerosols* [M]. Boston: Springer, 1994. 99-165.
- [18] Lighthart B, Mohr A J. *Atmospheric microbial aerosols* [M]. Boston: Springer, 1994.
- [19] Sturm R. Modeling the deposition of bioaerosols with variable size and shape in the human respiratory tract-A review [J]. *Journal of Advanced Research*, 2012, **3**(4): 295-304.
- [20] Wang Y F, Wang C H, Hu K L. Size and seasonal distributions of airborne bioaerosols in commuting trains [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(35): 4331-4338.
- [21] 于文凯, 徐星澈, 袁晓鹏, 等. 呼吸道菌群与呼吸系统疾病研究进展[J]. *重庆医学*, 2014, **43**(28): 3802-3805.
- [22] Rafiq I, Parthasarathy H, Tremlett C, *et al.* Infective endocarditis caused by *Moraxella nonliquefaciens* in a percutaneous aortic valve replacement [J]. *Cardiovascular Revascularization Medicine*, 2011, **12**(3): 184-186.
- [23] Leung J M, Gallant C V. Infections due to *Escherichia* and *Shigella* [A]. Cohen A A, Holmes D J (Eds.). *Reference Module in Biomedical Sciences*. Amsterdam: Elsevier, 2014.
- [24] 王闻卿, 朱林英, 郝莉鹏, 等. 气单胞菌研究概况[J]. *疾病监测*, 2016, **31**(7): 591-597.
Wang W Q, Zhu L Y, Hao L P, *et al.* Progress in research of *Aeromonas* [J]. *Disease Surveillance*, 2016, **31**(7): 591-597.
- [25] 史廷明, 王松松, 刘跃伟, 等. 固体废弃物填埋作业及其职业有害因素[J]. *中华劳动卫生职业病杂志*, 2011, **29**(7): 557-559.
Shi T M, Wang S S, Liu Y W, *et al.* Solid waste landfill and its occupational hazards [J]. *Chinese Journal of Industrial Hygiene and Occupational Diseases*, 2011, **29**(7): 557-559.
- [26] Szyłak-Szydłowski M, Kulig A, Miaskiewicz-Pęska E. Seasonal changes in the concentrations of airborne bacteria emitted from a large wastewater treatment plant [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2016, **115**: 11-16.
- [27] Peccia J, Werth H M, Miller S, *et al.* Effects of relative humidity on the ultraviolet induced inactivation of airborne bacteria [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2001, **35**(3): 728-740.
- [28] 胡庆轩, 车凤翔, 陈振生, 等. 大风对大气细菌粒子浓度和粒度分布的影响[J]. *中国环境监测*, 1991, **7**(6): 5-8.

CONTENTS

Characteristics of PM _{2.5} Pollution and the Efficiency of Concentration Control During a Red Alert in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, 2016	ZHANG Chong, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (3397)
Concentration Characteristics of PM _{2.5} and the Causes of Heavy Air Pollution Events in Beijing During Autumn and Winter	XU Ran, ZHANG Heng-de, YANG Xiao-wen, <i>et al.</i> (3405)
Elemental Composition Characteristics of PM _{2.5} and PM ₁₀ , and Heavy Pollution Analysis in Hefei	LIU Ke-ke, ZHANG Hong, LIU Gui-jian (3415)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Fine Particulate Matter in Autumn and Winter in Puyang, China	CHEN Chu, WANG Ti-jian, LI Yuan-hao, <i>et al.</i> (3421)
Pollution Characteristics and Sources of Carbonaceous Components in PM _{2.5} in the Guanzhong Area	KANG Bao-rong, LIU Li-zhong, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (3431)
Molecular Composition and Source Apportionment of Fine Organic Aerosols in Autumn in Changchun	WU Xia, CAO Fang, ZHAI Xiao-yao, <i>et al.</i> (3438)
Effects of Urban Expansion and Changes in Urban Characteristics on PM _{2.5} Pollution in China	WANG Gui-lin, ZHANG Wei (3447)
Effect of a Wet Flue Gas Desulphurization System on the Emission of PM _{2.5} from Coal-Fired Power Plants	DENG Jian-guo, MA Zi-zhen, LI Zhen, <i>et al.</i> (3457)
Pollution Characteristics and Emission Coefficients for Volatile Organic Compounds from the Synthetic Leather Industry in Zhejiang Province	XU Jia-qí, WANG Zhe-míng, SONG Shuang, <i>et al.</i> (3463)
Particle Size Distribution and Population Characteristics of Airborne Bacteria Emitted from a Sanitary Landfill Site	MA Jia-wei, YANG Kai-xiong, CHAI Feng-guang, <i>et al.</i> (3470)
Distribution of Total Microbes in Atmospheric Bioaerosols in the Coastal Region of Qingdao	GONG Jing, QI Jian-hua, LI Hong-tao (3477)
Distribution, Sources, and Health Risk Assessment of PAHs in Water Supply Source Regions of Guangzhou	SONG Yu-mei, WANG Chang, LIU Shang, <i>et al.</i> (3489)
Distribution of 16 Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Dianchi Lake Surface Sediments After the Integrated Water Environment Control Project	HU Xin-yi, GAO Bing-li, CHEN Tan, <i>et al.</i> (3501)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Salinized Farmland Soil from the Oil Mining Area of the Yellow River Delta	QIU Hui, LIU Yue-xian, XIE Xiao-fan, <i>et al.</i> (3509)
Wind Field Influences on the Spatial Distribution of Cyanobacterial Blooms and Nutrients in Meiliang Bay of Lake Taihu, China	YU Mao-lei, HONG Guo-xi, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i> (3519)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics and the Retention Effects of Nutrients in Xiangjiaba Reservoir	WANG Yao-yao, LÜ Lin-peng, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (3530)
Effects of Exogenous Inputs on Phosphorus Recovery and Transport in Newborn Surface Layers from Sediment Dredging	LI Xin, GENG Xue, WANG Hong-wei, <i>et al.</i> (3539)
Chemical Characteristics and Sources of Groundwater Sulfate in the Kashgar Delta, Xinjiang	WEI Xing, ZHOU Jin-long, NAI Wei-hua, <i>et al.</i> (3550)
Groundwater Chemistry Characteristics and the Analysis of Influence Factors in the Luochuan Loess Tablelands	LI Zhou, LI Chen-xi, HUA Kun, <i>et al.</i> (3559)
Analysis of River Zooplankton Community Characteristics in Autumn in Beijing	WANG Hai-lin, LIU Yu-fei, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (3568)
Benthic Diatom Communities in the Main Stream of Three Gorges Reservoir Area and Its Relationship with Environmental Factors	LIU Li, HE Xin-yu, FU Jun-ke, <i>et al.</i> (3577)
Environmental Response and Ecological Function Prediction of Aquatic Bacterial Communities in the Weihe River Basin	WAN Tian, HE Meng-xia, REN Jie-hui, <i>et al.</i> (3588)
Community Composition of <i>nirS</i> -type Denitrifying Bacteria in the Waters of the Lower Reaches of the Fenne River and Its Relationship with Inorganic Nitrogen	WANG Yin-long, FENG Min-quan, DONG Xiang-qian (3596)
Metabolic Functional Analysis of Dominant Microbial Communities in the Rapid Sand Filters for Drinking Water	HU Wan-chao, ZHAO Chen, WANG Qiao-juan, <i>et al.</i> (3604)
Control Measure Effects on the Effluent Quality from Extensive Green Roofs Based on Stabilized Sludge Recycling	PENG Hang-yu, LI Tian, QI Yue, <i>et al.</i> (3612)
Impacts of Vegetation on Quantity and Quality of Runoff from Green Roofs	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3618)
Organic Matter Removal and Membrane Fouling Control of Secondary Effluents Using a Combined Nanofiltration Process	FAN Ke-wen, LI Xing, YANG Yan-ling, <i>et al.</i> (3626)
Adsorption Properties of Ammonia Nitrogen in Aqueous Solution by Various Materials	JIAO Ju-long, YANG Su-wen, XIE Yu, <i>et al.</i> (3633)
Effects of Different Concentrations of Ammonia Nitrogen on the Growth and Enzyme Activity of Four Common Algae Strains	CHANG Ting, XU Zhi-hui, CHENG Peng-fei, <i>et al.</i> (3642)
Treatment of Highly Concentrated Swine Wastewater and Its Degradation Processes Using Three Matrix Materials	LIU Ming-yu, XIA Meng-hua, LI Yuan-hang, <i>et al.</i> (3650)
Phosphorus Removal Performance and Mechanism of Modified Zeolite Using Alum Sludge Acidified Extraction Liquid	HAN Yun, HU Yu-jie, LIAN Jie, <i>et al.</i> (3660)
Advanced Denitrification of Municipal Wastewater Achieved via Partial ANAMMOX in Anoxic MBBR	YANG Lan, PENG Yong-zhen, LI Jian-wei, <i>et al.</i> (3668)
Effect of an Aerobic Unit and a Sedimentation Unit on Sludge and Nitrogen Removal in an Anoxic Unit in a Continuous-flow System	XUE Huan-ting, YUAN Lin-jiang, LIU Xiao-bo, <i>et al.</i> (3675)
Performance and Mechanisms of Advanced Nitrogen Removal via FeS-driven Autotrophic Denitrification Coupled with ANAMMOX	MA Jing-de, PAN Jian-xin, LI Ze-min, <i>et al.</i> (3683)
Simultaneous Conversion Conditions of Ammonia and Sulfate in ANAMMOX Systems	DONG Shi-yu, BI Zhen, ZHANG Wen-jing, <i>et al.</i> (3691)
Potential Source Environments for Microbial Communities in Wastewater Treatment Plants (WWTPs) in China	ZHANG Bing, WU Lin-wei, WEN Xiang-hua (3699)
Comparison of the Microbial Community Structure in Nitrifying Processes Operating with Different Dissolved Oxygen Concentrations	LIU Wen-ru, GU Guang-fa, SONG Xiao-kang, <i>et al.</i> (3706)
Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal and Kinetics by the Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Acinetobacter junii</i> NPI	YANG Lei, CHEN Ning, REN Yong-xiang, <i>et al.</i> (3713)
Realization of Limited Filamentous Bulking with Type 0092 Filamentous Bacteria as the Dominant Filamentous Bacteria in Shortcut Nitrification	GAO Chun-di, AN Ran, HAN Hui, <i>et al.</i> (3722)
Nitrification, Denitrification, and N ₂ O Production Under Saline and Alkaline Conditions	DAI Wei, ZHAO Jian-qiang, DING Jia-zhi, <i>et al.</i> (3730)
Effect of Biochar on Ammonia Volatilization in Saline-Alkali Soil	WANG Yi-yu, WANG Sheng-sen, DAI Jiu-lan (3738)
Effect of Two Soil Synergists on Ammonia Volatilization in Paddy Fields	ZHOU Yu-ling, HOU Peng-fu, LI Gang-hua, <i>et al.</i> (3746)
Determination of Heavy Metal Geochemical Baseline Values and Its Accumulation in Soils of the Luanhe River Basin, Chengde	SUN Hou-yun, WEI Xiao-feng, GAN Feng-wei, <i>et al.</i> (3753)
Migration and Source Analysis of Heavy Metals in Vertical Soil Profiles of the Drylands of Xiamen City	ZHANG Wei-hua, YU Rui-lian, YANG Yu-jie, <i>et al.</i> (3764)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Influencing Factors in Baoji Urban Soils	ZHANG Jun, DONG Jie, LIANG Qing-fang, <i>et al.</i> (3774)
Stabilizing Effects of Fe-Ce Oxide on Soil As(V) and P	LIN Long-yong, YAN Xiu-lan, YANG Shuo (3785)
Stabilization of Arsenic-Contaminated Soils Using Fe-Mn Oxide Under Different Water Conditions	ZHOU Hai-yan, DENG Yi-rong, LIN Long-yong, <i>et al.</i> (3792)
Effects of Biochar Amendment on Soil Microbial Biomass Carbon, Nitrogen and Dissolved Organic Carbon, Nitrogen in Paddy Soils	LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, TANG Hong, <i>et al.</i> (3799)
Effects of Organic Amendments on Microbial Biomass Carbon and Nitrogen Uptake by Corn Seedlings Grown in Two Purple Soils	WANG Yue, ZHANG Ming-hao, ZHAO Xiu-lan (3808)
Effects of Land Use Type on the Content and Stability of Organic Carbon in Soil Aggregates	LUO Xiao-hong, WANG Zi-fang, LU Chang, <i>et al.</i> (3816)
Effects of Converting Farmland into Forest and Grassland on Soil Nitrogen Component and Conversion Enzyme Activity in the Mountainous Area of Southern Ningxia	GAO Han, XIAO Li, NIU Dan, <i>et al.</i> (3825)
Leaching Behavior of Dissolved Organic Matter in Biochar with Different Extracting Agents	HE Pin-jing, ZHANG Hao-hao, QIU Jun-jie, <i>et al.</i> (3833)
Toxicity of PM _{2.5} Based on a Battery of Bioassays	JIANG Xiao-dong, XUE Yin-gang, WEI Yong, <i>et al.</i> (3840)