王炳鹏,杨文雨,王文雨,等.渗滤液处理过程中微生物气溶胶污染分布特征及健康风险 [J]. 中国环境科学, 2025,45(10):5367-5377.
Wang B P, Yang W Y, Wang W Y, et al. Characterization of microbial aerosol pollution distribution and health risk during leachate treatment process [J]. China Environmental Science, 2025,45(10):5367-5377.

# 渗滤液处理过程中微生物气溶胶污染分布特征及健康风险

王炳鹏,杨文雨,王文雨,李雅慧,王亚楠*,王华伟,孙英杰,陈列骏 (青岛理工大学环境与市政工程学院,青岛市固体废物污染控制与资源化工程研究中心,山东 青岛 266520)

**摘要**：为明确渗滤液处理过程中生物气溶胶的污染特征与潜在健康风险,研究了渗滤液典型处理工艺(两级 A/O+MBR 膜处理+DTRO 深度处理)各处理单元可培养微生物气溶胶的浓度与粒径分布特征及微生物群落组成,并评估了渗滤液处理过程中释放的气溶胶及典型气载致病菌对职业暴露人员的健康风险.结果表明:渗滤液处理过程中,可培养微生物气溶胶浓度整体呈现出随着渗滤液处理工序的进行(COD 浓度不断降低)生物气溶胶浓度降低的趋势,即调节池>生化车间>MBR 车间>DTRO 车间.全厂处理单元中粒径为 0.65~2.1μm 的细菌和真菌气溶胶分别占比 26%~57%和 11%~59%,具有下呼吸道侵入风险.随渗滤液处理工序进行,气溶胶中 *Bacillus* 丰度显著增加,*Pseudomonas* 丰度显著降低.*Bacillus* 极易气溶胶化,在生化车间、综合水池车间等区域占绝对优势,且主要分布在 3.3~4.7μm 和>7.0μm 粒径范围.*Alternaria* 是优势真菌属,在各单元丰度分布相对均匀,主要分布在>4.7μm 的粒径范围.气载 *E. coli* 浓度在涉及渗滤液处理的点位显著高于办公区,且主要分布在 1.1~2.1μm 粒径范围内.气载 *S. aureus* 的浓度在各点位差异性较大,但浓度整体低于 *E. coli*.气载 *S. aureus* 在除调节池以外的各点位年感染风险和疾病负担均超过基准值,对厂区工作人员的健康造成较大威胁.

**关键词**：渗滤液处理；生物气溶胶；群落组成；定量微生物风险评估
**中图分类号**：X503 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)10-5367-11

**Characterization of microbial aerosol pollution distribution and health risk during leachate treatment process.** WANG Bing-peng, YANG Wen-yu, WANG Wen-yu, LI Ya-hui, WANG Ya-nan*, WANG Hua-wei, SUN Ying-jie, CHEN Lie-jun (Qingdao Engineering Research Center for Solid Waste Pollution Control and Resource Utilization, College of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China). *China Environmental Science*, 2025,45(10)：5367~5377

**Abstract**：In order to clarify the pollution characteristics and potential health risks of bioaerosols during leachate treatment, the concentration and particle size distribution characteristics of culturable microbial aerosols and the microbial community composition of each treatment unit of a typical leachate treatment process (two-stage A/O+MBR membrane treatment+DTRO deep treatment) were investigated and the health risks of aerosols and typical pathogen aerosols released in the leachate treatment process on occupationally exposed personnel were evaluated. The results showed that: During leachate treatment, the overall trend of aerosol concentration of culturable microorganisms showed a decrease in bioaerosol concentration with leachate treatment process (COD concentration decreasing), i.e. regulation tank > biochemical workshop > MBR workshop > DTRO workshop. The bacterial and fungal aerosols with particle sizes of 0.65~2.1μm in the whole plant treatment unit accounted for 26%~57% and 11%~59%, respectively, which had an invasion risk to the lower respiratory tract. With the leachate treatment process, the abundance of *Bacillus* in the aerosol increased significantly, and the abundance of *Pseudomonas* decreased significantly. *Bacillus* was very easy to aerosolize, and it was absolutely advantage in the biochemical workshop, comprehensive pool workshop, etc., and it was mainly distributed in the range of particle sizes from 3.3 to 4.7μm and>7.0μm. *Alternaria* was the dominant fungal genus, with a relatively uniform distribution in all units, mainly distributed in the particle size of>4.7μm. The aerosol concentration of *E. coli* at the points involving leachate treatment was significantly higher than that in the office area, and it was mainly distributed in the particle size of 1.1~2.1μm. The aerosol concentration of *S. aureus* was more variable among different points, but its concentration was overall lower than that of *E. coli*. The annual infection risk and disease burden of *S. aureus* aerosol exceeded the baseline values at all sites except the regulation tank, posing a greater threat to the health of plant workers.

**Key words**：leachate treatment；bioaerosols；community composition；quantitative microbial risk assessment

近年来,微生物气溶胶污染引发的流行性呼吸系统疾病已成为全球公共卫生领域的研究热点.微生物气溶胶是由微生物及其代谢产物、细胞碎片及其他生物源性物质等组成的复杂悬浮体系,粒径范

**收稿日期**：2025-03-05
**基金项目**：山东省自然科学基金资助项目(ZR2023ME042);国家自然科学基金资助项目(52370173);山东省泰山学者项目专项基金资助项目(tsqn202408218)
* 责任作者, 副教授, wangyanan1005@yeah.net

围一般在 10nm~100μm,能够在空气中短时或长期悬浮,并通过气流传播[1].微生物气溶胶来源涵盖自然生态系统的水体、土壤等环境介质,以及工农业生产、废物处理等人为活动[2],其中废物处理源微生物气溶胶携带多种致病因子(如病原菌、内毒素、耐药基因等)及致敏性物质,可诱发呼吸道感染、过敏反应甚至肺部疾病,受到高度关注[3].

随着固体废物产生量的激增,填埋、焚烧、厌氧消化等处理处置系统所产生的垃圾渗滤液的高效处理已成为环境领域的治理重点[4].渗滤液处理目前主要采用预处理+生化处理+膜深度处理工艺,渗滤液处理过程中,曝气、搅拌、污泥脱水等工艺环节易导致微生物及其代谢产物形成生物气溶胶并释放到外环境中,通过呼吸暴露对职业暴露人员构成潜在健康威胁[5].相关研究表明,渗滤液特有的高浓度有机物和复杂微生物群落,导致渗滤液中含有多种类型致病菌,如 *Bordetella*、*Escherichia* 和 *Streptococcus* 等,且渗滤液中微生物携带多重耐药基因、毒力基因等高风险致病因子[6].然而,现有研究多聚焦于渗滤液处理工艺优化及渗滤液中污染物去除效果研究[7],渗滤液处理过程中微生物气溶胶的污染分布特征(如浓度分布、粒径分布及微生物群落结构)及其健康风险的评估仍存在不足.

目前主要采用双轨评估体系评价微生物气溶胶的暴露风险,即非致癌风险指数法(HI)和定量微生物风险评估法(QMRA)[8].非致癌风险评估法适用于总菌群暴露场景,通过危害商数(HQ)表征风险水平,该方法在评估填埋场及污水处理厂人员暴露风险方面广泛应用[9].QMRA 法主要针对特定病原体,结合暴露参数和剂量-反应关系模型进行精准预测,可精确评估特定病原体的靶向风险.相关研究表明,污水处理厂中条件致病菌(如大肠杆菌(*Escherichia coli*)和金黄色葡萄球菌(*Staphylococcus aureus*))对职业暴露人员存在较大的健康风险[10].生活垃圾中含有人类及动物粪便等污染物,此类污染物中常含有病原体微生物,在卫生焚烧及填埋过程中病原体进入渗滤液中,渗滤处理过程中水体中的病原菌不可避免暴露至各车间环境中,从而对工作人员造成健康风险.然而,渗滤液处理过程中典型条件致病菌引发的疾病负担及健康风险未见系统报道.

基于此,采用 Andersen 六级生物采样器对渗滤液处理全流程进行分区采样,结合高通量测序技术与 QMRA 模型,解析渗滤液处理过程中微生物气溶胶的动态演化规律;明确关键致病菌(*E. coli* 和 *S. aureus*)对职业暴露人群的疾病负担及健康风险.研究结果将为渗滤液处理系统微生物气溶胶防控标准建立及人员防护策略优化提供关键科学依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 采样点位

选取山东省青岛市某渗滤液处理厂为研究对象,该厂渗滤液处理规模为 1700t/d,主要处理园区内填埋场、厨余厂及焚烧厂产生的渗滤液.渗滤液处理工艺流程为:预处理系统(调节池+预沉池)+MBR 系统(两级 A/O+超滤膜)+膜深度处理系统(DTRO);DTRO 系统产生的浓缩液采用 MVR 蒸发工艺,MBR 系统产生的污泥采用浓缩与板框脱水结合的处理工艺(图 1(a)).

结合渗滤液处理工艺流程,设置了 12 个采样点位(涵盖调节池、生化车间、MBR 车间、DTRO 车间、蒸发车间、污泥脱水车间及办公区)采集细菌和真菌气溶胶样品.在此基础上,根据细菌和真菌气溶胶浓度分布特征,选取浓度较高的 8 个点位进行典型致病菌(*E. coli* 和 *S. aureus*)样品采集.具体采样点位布设和点位说明如图 1(b)和图 1(c)所示.

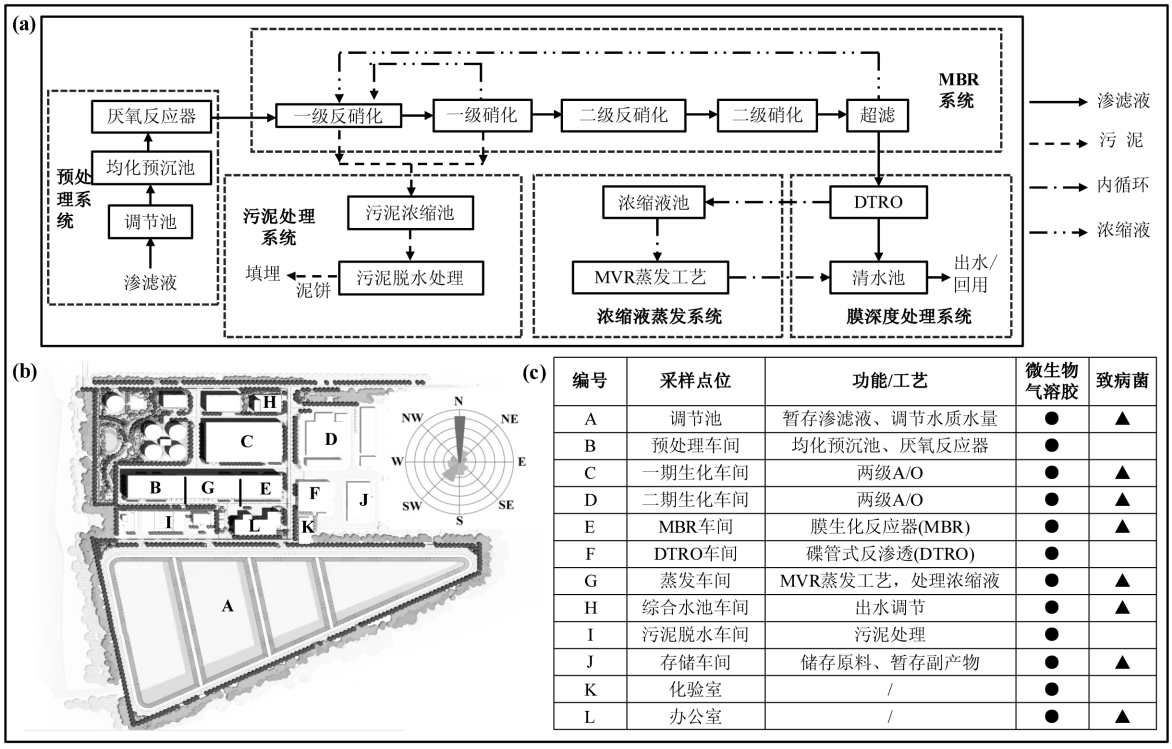
### 1.2 样品采集

**1.2.1 可培养微生物气溶胶样品采集与培养** 采用 Andersen 6 级空气微生物采样器对渗滤液处理厂内的细菌和真菌气溶胶进行样品采集,L1~L6 层级捕获的气溶胶的空气动力学直径范围依次为:>7.0μm,4.7~7.0μm,3.3~4.7μm,2.1~3.3μm,1.1~2.1μm 及 0.65~1.1μm,分别对应人体呼吸系统的口腔与鼻腔、咽部、气管与主支气管、次级支气管、终末支气管及肺泡[11].

可培养微生物气溶胶采样时间为 2023 年 9 月 22~23 日,采样期间环境温度为 23.6~24.8°C,除调节池外,其余点位均在室内采样(车间以密闭为主). 12 个点位按照编号顺序采集,每个点位同时采集细菌和真菌气溶胶,所有平行样均第 2d 重复采集,共采集 2 组平行样.

细菌和真菌气溶胶的采集分别选用灭菌的营养琼脂培养基平板和查氏培养基平板.采样前,用

75%的乙醇仔细彻底擦拭每级采样器,并使其干燥.采样器进气口位于 1.5m 人体呼吸带高度,冲击器以 28.3L/min 的流速工作,细菌和真菌的采样时间分别为 5 和 15min.采样结束后,逐级取出培养皿,现场用封口膜密封,并低温保存送回实验室培养.细菌和真菌的培养条件分别为 37°C、48h 和 28°C、72h.培养后平板置于−80°C 保存用于分析微生物群落组成.




| 编号 | 采样点位 | 功能/工艺 | 微生物气溶胶 | 致病菌 |
|---|---|---|---|---|
| A | 调节池 | 暂存渗滤液、调节水质水量 | ● | ▲ |
| B | 预处理车间 | 均化预沉池、厌氧反应器 | ● | |
| C | 一期生化车间 | 两级A/O | ● | ▲ |
| D | 二期生化车间 | 两级A/O | ● | ▲ |
| E | MBR车间 | 膜生化反应器(MBR) | ● | ▲ |
| F | DTRO车间 | 碟管式反渗透(DTRO) | ● | |
| G | 蒸发车间 | MVR蒸发工艺，处理浓缩液 | ● | ▲ |
| H | 综合水池车间 | 出水调节 | ● | ▲ |
| I | 污泥脱水车间 | 污泥处理 | ● | |
| J | 存储车间 | 储存原料、暂存副产物 | ● | ▲ |
| K | 化验室 | / | ● | |
| L | 办公室 | / | ● | ▲ |

图 1　渗滤液处理工艺流程及各处理单元微生物气溶胶和典型致病菌采样点位

Fig.1　The leachate treatment process and the sampling points of microbial aerosols and typical pathogenic bacteria in each treatment unit

1.2.2　致病菌气溶胶样品采集与培养　*E. coli* 和 *S. aureus* 所引发的感染病例风险很高,且在污水处理系统中常作为“哨兵微生物”[12-13].因此,对 *E. coli* 和 *S. aureus* 气溶胶样品进行采集.采样时间为 2023 年 9 月 28 日~29 日,采样期间温度范围为 25.6~26.1°C,除调节池外,其余点位均在室内采样.8 个点位按照编号顺序采集,两种致病菌同步采集,所有点位的平行样均第 2d 采集,共采集 2 组平行样.

*E. coli* 和 *S. aureus* 的采集分别选用伊红美蓝和 Baird−Parker 培养基平板,采集方法与可培养微生物气溶胶采集方法一致,采集时间分别为 30 和 15min.采样结束后,均在 37°C 培养箱中培养 48h.

1.3　分析方法

1.3.1　气溶胶浓度　对培养后每层培养皿中存在的菌落进行计数.在已知空气采样体积的情况下,按式(1)计算各级微生物浓度,即每立方米空气的菌落数(CFU/m$^3$),微生物气溶胶总浓度为六级微生物浓度之和[14].

$$C=\frac{N\cdot 1000}{Q\cdot T} \tag{1}$$

式中:$C$ 表示微生物浓度,CFU/m$^3$;$N$ 表示菌落数,CFU;$Q$ 表示气体流量,L/min;$T$ 表示采样时间,min.

1.3.2　微生物群落组成分析　结合渗滤液处理工艺和可培养微生物气溶胶浓度分布情况,选取调节池(A)、一期生化车间(C)、二期生化车间(D)、MBR 车间(E)、蒸发车间(G)、综合水池车间(H)、存储车间(J)和办公室(L)共 8 个采样点位样品进行高通量测序.将每个点位不同层级培养皿中的所有菌落分别富集到 5mL 离心管中离心浓缩,使用 DNeasy® PowerSoil® Pro Kit 试剂盒(QIAGEN)对浓缩后的样品进行 DNA 提取,提取步骤按照试剂盒操作步骤进行,提取后 DNA 采用微量分光光度计(UNano−1000)

测定浓度和纯度.将提取的 DNA 样品委托生工生物工程(上海)股份有限公司进行测序.

1.3.3 健康风险评估 根据美国环保署推荐的人体暴露风险评价方法,渗滤液处理中的细菌和真菌气溶胶的暴露风险采用 HI 法进行评估[15],致病菌气溶胶的暴露风险采用 QMRA 法评估,模型计算公式及参数选取如表 1 和表 2 所示.

1.3.4 数据分析 图表均为使用 Origin 2021 及 Microsoft Office 2024 软件绘制.数据统计分析使用 IBM SPSS Statistics 27.0 中的差异性分析.

**表 1 气溶胶暴露风险评估模型及参数设置**

Table 1 Aerosol exposure risk assessment models and parameters

| 模型 | | 计算式 | | |
|---|---|---|---|---|
| 非致癌风险指数法(HI) | 日平均暴露剂量 | $ADD_{呼吸}=\frac{c\cdot IR\cdot EF\cdot ED_{吸入}}{BW\text{-}AT}$ | (2) | $ADD_{呼吸}$表示呼吸平均日暴露量,CFU/(d·kg);<br>$c$ 为微生物气溶胶浓度,CFU/m$^3$;<br>IR 为呼吸速率,m$^3$/d,成年男性取值 17.7,成年女性取值 15.5;<br>EF 为暴露频率,d/a,取值 250;<br>$ED_{吸入}$为呼吸吸入途径的暴露年限,a,取值 24;<br>BW 为人体质量,kg,成年男性取值 66.1,成年女性取值 57.8;<br>AT 为预期寿命,以平均寿命计,$a$,成年男性取值 74,成年女性取值 79; |
| | 暴露风险 | $HQ_i=\frac{ADD_i}{RfD_i}$ | (3) | $HQ_i$ 表示经由 $i$ 途径暴露对人体的健康风险;<br>$ADD_i$ 为经由 $i$ 途径暴露的日平均暴露量;<br>$R_fD_i$ 为经由 $i$ 途径的日暴露健康风险参考剂量,取值 500CFU/m$^3$[16];<br>HI 为各种途径的微生物气溶胶中微生物的暴露对人体健康的总风险. |
| | | $HI=\sum HQ_i$ | (4) | |

**表 2 条件致病菌暴露风险评估模型及参数设置**

Table 2 Conditionally pathogenic bacteria exposure risk assessment models and parameters

| 模型 | | 计算公式 | | |
|---|---|---|---|---|
| 定量微生物风险评估法(QMRA) | 呼吸暴露剂量 | $D_{ose}=\frac{EC\cdot BR\cdot T\cdot AG\cdot RR}{1000}$ | (5) | $D_{ose}$ 表示条件致病菌的暴露剂量;<br>EC 为条件致病菌浓度,CFU/m$^3$;<br>BR 为呼吸速率,取值范围为 9.8~13.0L/min;<br>$T$ 为暴露时间,min;<br>AG 为微生物气溶胶摄入率;<br>RR 为使用防护面罩后的呼吸摄取率. |
| | 剂量-反应关系模型 | *E. coli*: $P_{(d)inf}=1-\left[1+\left(\frac{D_{ose}}{N_{20}}\right)\times\left(2^{\frac{1}{2}}-1\right)\right]^{-\alpha}$ | (6) | $P_{(d)inf}$ 为每日感染概率;<br>$\alpha$ 和 $N_{50}$ 为模型参数,$\alpha$ 取值为 $1.55\times10^{-1}$,$N_{50}$ 取值为 $2.11\times10^{6}$;<br>$K$ 为模型参数,最大值取 $1.00\times10^{-7}$,最小值为 $6.46\times10^{-8}$[17]. |
| | | *S. aureus*: $xp(-k\cdot D_{ose})$ | (7) | |
| | 年感染概率 | $P_{(a)inf}=1-(1-P_{(d)inf})$ | (8) | $P_{(a)inf}$ 为每年的感染概率,pppy;<br>$n$ 为每年暴露的天数或者暴露次数,取值为 255d/a. |
| | 疾病负担 | $DB=HB\cdot P_{(a)ill}$ | (9) | DB 为疾病负担,DALYs pppy;<br>HB 为健康负担,DALYs/case,取值为 0.0455;<br>$P_{(a)ill}$ 为年致病概率,假设感染概率与致病概率相当,即 $P_{ill/inf}$=1. |
| | | $P_{(a)ill}=P_{(a)inf}\cdot P_{ill/inf}$ | (10) | |

## 2 结果与讨论

### 2.1 渗滤液处理各单元微生物气溶胶污染分布特征

2.1.1 浓度分布特征 渗滤液处理各单元可培养微生物气溶胶浓度分布如表 3 所示.细菌气溶胶浓度整体表现为调节池(2534±364) CFU/m$^3$>二期生化车间(1463±254) CFU/m$^3$>MBR 车间(1413±253) CFU/m$^3$>DTRO 车间(557±25) CFU/m$^3$ 的趋势,即随着渗滤液处理工序,COD 浓度不断降低,生物气溶胶浓度整体呈下降的趋势.

Li 等[18]研究表明,生物气溶胶浓度与废水中 COD 浓度呈显著正相关性.李沅津等[19]对某污水处理厂采样分析发现细菌气溶胶浓度范围为(378~20234) CFU/m$^3$,且呈现出格栅间>曝气沉砂池>生物池的分布趋势,这与本文的研究结果类似,即随着污水中有机物浓度降低,细菌气溶胶浓度整体呈降低趋势.

真菌气溶胶浓度在调节池最高(1557±147)

CFU/m$^3$,其余单元浓度分布相对均衡(231±135)~(789±89) CFU/m$^3$,真菌气溶胶浓度未表现出随渗滤液处理工序进行而降低的趋势,主要是因为渗滤液中微生物群落组成以细菌为主,各采样点位的真菌主要来源于空气环境,而不是渗滤液水体.机械扰动是微生物气溶胶形成的关键因素,如生化池曝气与搅拌、膜车间反冲洗、污泥压滤等机械作业促使渗滤液和污泥中的微生物雾化形成气溶胶[20].此外,气流外泄(如取样、检修或打开人孔)、液体喷射(如进料、反冲洗、排泥)、气体释放(反应产生的 $CH_4$ 等气体携带微生物颗粒)等途径会造成生物气溶胶释放到外环境中[21],导致空气中微生物负荷增加.微生物气溶胶浓度最高点位出现在调节池,主要归因于初始渗滤液中较高的 COD 负荷为微生物生长繁殖提供了丰富的营养基质,调节池内产生的气体(如 $CH_4$、$H_2S$ 等)可携带微生物颗粒通过排气系统释放到大气中.此外,浓缩液处理单元中,蒸发车间细菌气溶胶浓度为(2074±498) CFU/m$^3$,显著高于生化处理单元,主要是因为机械蒸发过程中液体飞溅和气泡破裂导致生物气溶胶大量释放到外环境中.

**表 3　渗滤液处理各单元可培养微生物浓度**

Table 3　Culturable microbial concentration in each unit during leachate treatment

| 编号 | 采样地点 | 可培养细菌浓度(CFU/m$^3$) | 可培养真菌浓度(CFU/m$^3$) | COD* (mg/L) |
|---|---|---|---|---|
| A | 调节池 | 2534±364 | 1557±147 | 20000~50000 |
| B | 预处理车间 | 829±78 | 714±56 | 15000~40000 |
| C | 一期生化车间 | 861±122 | 575±78 | 3000~5000 |
| D | 二期生化车间 | 1463±254 | 602±49 | 3000~5000 |
| E | MBR 车间 | 1413±253 | 535±36 | 300~800 |
| F | DTRO 车间 | 557±25 | 679±36 | 20~95 |
| G | 蒸发车间 | 2074±498 | 789±89 | 300~2500 |
| H | 综合水池车间 | 1649±375 | 722±81 | 20~50 |
| I | 污泥脱水车间 | 711±98 | 363±16 | / |
| J | 存储车间 | 674±113 | 518±39 | / |
| K | 化验室 | 648±103 | 420±41 | / |
| L | 办公室 | 937±152 | 231±135 | / |

*注: 渗滤液COD浓度为2023年度不同季节浓度变化值,由厂区提供; “/”为未检测数据.

此外,Han 等[22]测得污水处理厂气溶胶样品中细菌和真菌最高浓度分别为(4249±257),(2296±198) CFU/m$^3$,其浓度显著高于渗滤液处理系统.主要是因为污水处理厂各单元多为敞开式,其释放的生物气溶胶更容易进入环境空气中;而渗滤液厂各单元多为封闭式反应装置,生物气溶胶释放主要受设备密封性、人员操作、排气系统等因素的影响,导致微生物气溶胶浓度较污水处理厂低.

2.1.2　粒径分布特征　微生物气溶胶的健康与环境风险不仅与其浓度有关,还与粒径分布密切相关.渗滤液处理厂各单元细菌和真菌气溶胶粒径分布如图 2 所示.对于细菌气溶胶而言,调节池、生化车间、MBR 车间及办公区各粒径段细菌分布差异性较小,主要以<2.1μm 为主;DTRO 车间细菌气溶胶主要富集于>7.0μm(38%,沉积上呼吸道)和 0.65~1.1μm(42%,可至肺泡).采用 MVR 蒸发工艺的蒸发车间,在液体蒸发过程中通过机械方式使蒸汽重新加热并压缩,水分蒸发会导致微粒粒径减小,较强的气流运动和气流速度使得较小粒径的气溶胶更容易被带出并释放到环境中[23],导致约 56%的细菌气溶胶分布于 1.1~2.1μm(可深入终末支气管).全厂处理单元 0.65~2.1μm 的细菌占比 26%~57%,存在较高的下呼吸道暴露风险.

对于真菌气溶胶而言,各点位真菌粒径分布差异较小,但综合水池车间与污泥脱水车间>7.0μm 粒径占比高于其他点位,主要是由于综合水池和污泥脱水车间湿度较高,更容易凝结成较大的颗粒,且污泥压滤、泵送等操作会产生较强的空气气流和机械扰动,导致水体和污泥中的大颗粒被带出[24].全厂处理单元(除办公区)0.65~2.1μm 的真菌占比 11%~59%,同样存在下呼吸道暴露风险.类似研究同样表明,填埋场渗滤液处理区粒径为 0.65~2.1μm 的细菌气溶胶占总细菌气溶胶浓度的 46%,可吸入真菌浓度占比为 55%[25].

2.1.3　微生物群落结构特征　渗滤液处理厂各单元可培养微生物气溶胶在属水平群落组成如图 3 所示.对于细菌而言,*Bacillus*(芽孢杆菌属)、*Acinetobacter*(不动杆菌属)、*Staphylococcus*(葡萄球菌属)和 *Pseudomonas*(假单胞菌属)是主要菌属.*Bacillus* 具备较强的环境抗逆性,在渗滤液处理过程中易气溶胶化,其在二期生化车间、综合水池车间等相对丰度达 44%~55%,远高于调节池、一期生化车间、MBR 车间和蒸发车间.*Acinetobacter* 富集于二期生化车间和污泥脱水车间,相对丰度分别为 16%和 32%.*Staphylococcus* 在蒸发车间和办公室占比较高,相对丰度分别为 21%和 19%,部分菌种(如 *S.*

*aureus*)具有致病性[26].此外,*Pseudomonas* 和 *Pantoea* 在调节池、MBR 车间均具有较高的丰度,它们常见于污染环境并与感染相关[27].

对真菌而言,*Alternaria*(交链孢霉属)和 *Penicillium*(青霉属)为主要菌属,其相对丰度分别为 26%~52%和 2%~28%,它们广泛参与有机质分解及物质循环,在污水处理、抗生素和工业用酶等方面发挥重要作用.*NeurosPora*(脉孢菌属)在二期生化车间和综合水池的相对丰度较高,分别为 13%和 23%. *Sarocladium* (帚霉属)在 MBR 车间的相对丰度为 19%,明显高于其他点位.*Talaromyces*(篮状菌属)在综合水池车间中被大量检出,相对丰度为 13%,部分菌属,如 *T. marneffei*(马尔尼菲篮状菌),是一种条件致病菌[28].

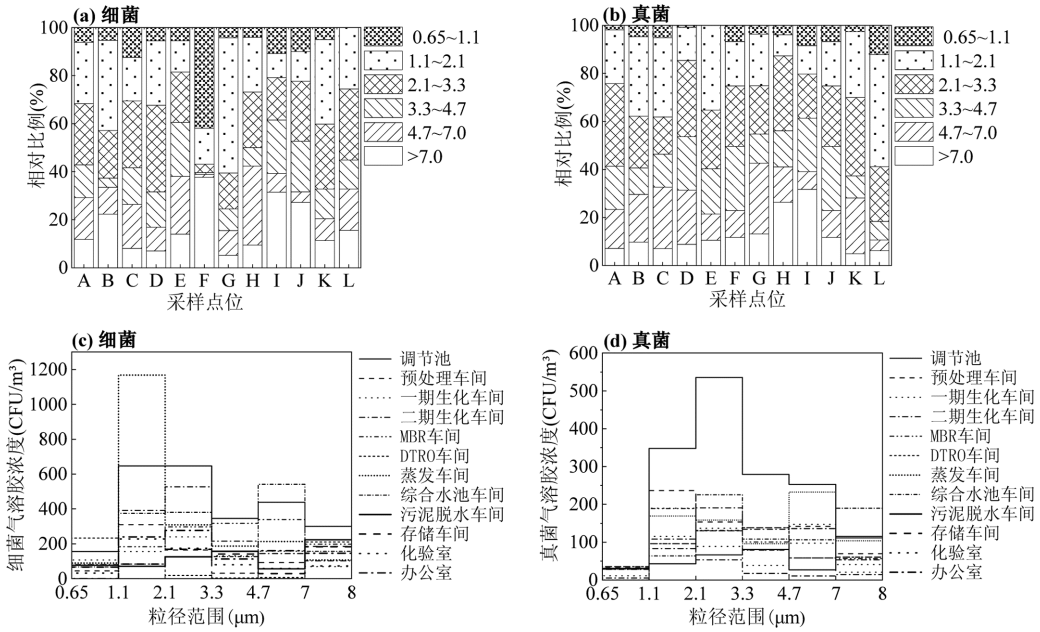



图 2 渗滤液处理过程中不同单元可培养微生物粒径分布特征

Fig.2 Particle size distribution characteristics of culturable microorganisms in different units during leachate treatment

不同点位的微生物群落结构与处理工艺密切相关.调节池点位细菌气溶胶中主要优势菌属丰度差异性较小;而经两级 A/O 工艺处理后,*Bacillus* 丰度显著增加,*Pseudomonas* 丰度显著降低.相关研究发现,当渗滤液中在可降解有机物浓度较高时, *Pseudomonas* 具有较高的丰度,而随着有机物的不断降解及腐殖化程度的增加,*Pseudomonas* 丰度会显著降低,且能够降解难降解有机物的 *Bacillus* 丰度增加[29-30],因此,生物气溶胶样品中的 *Bacillus* 在生化处理车间具有较高的占比.MVR 蒸发工艺使得耐受中高温的微生物(如 *Bacillus*、*Staphylococcus*)在蒸发车间占主导地位.综合水池车间、存储车间、办公室区域的细菌气溶胶中 *Bacillus* 丰度均>40%,这主要是因为 *Bacillus* 具有较强的环境抗逆性,在营养物质缺乏条件下也具有较高的活性,气溶胶化能力强[31,33].

为明确微生物气溶胶对人体呼吸系统的侵入风险,进一步分析了优势气载菌属的粒径分布特征.对细菌而言,*Bacillus* 主要分布在 3.3~4.7μm 和>7.0 μm 粒径范围,*Bacillus* 是常见的致病菌属,小粒径的气溶胶更容易侵染气管与主支气管.*Acinetobacter* 的粒径分布相对均匀,丰度在 2.1~4.7μm 范围较高约为 61%[34];*Pseudomonas* 主要分布在 3.3~4.7μm 范围内,相对丰度为 56%;该粒径段气溶胶会进入主支气管和次级支气管[35].*Staphylococcus* 在<2.1μm 粒径范围内丰度为 58%,*Streptomyces* 在 0.65~1.1μm 粒径范围内占 76%,此粒径段气溶胶会进入终末支气管,引起肺炎、脓胸和肺脓肿等疾病.

对真菌而言,*Alternaria* 主要分布在>4.7μm 的粒径范围,约占 59%,会引起人体上呼吸道(鼻咽喉)感染,通常与过敏反应、哮喘、过敏性鼻炎相关. *Fusarium* 和 *Aspergillus* 主要分布在 1.1~3.3μm 内,主要沉积在次级支气管和终末支气管.*Penicillium*

和 *Talaromyces* 在 0.65~1.1μm 范围丰度较高,分别为 51%和 52%,会对下呼吸道产生侵害,引起肺部感染.

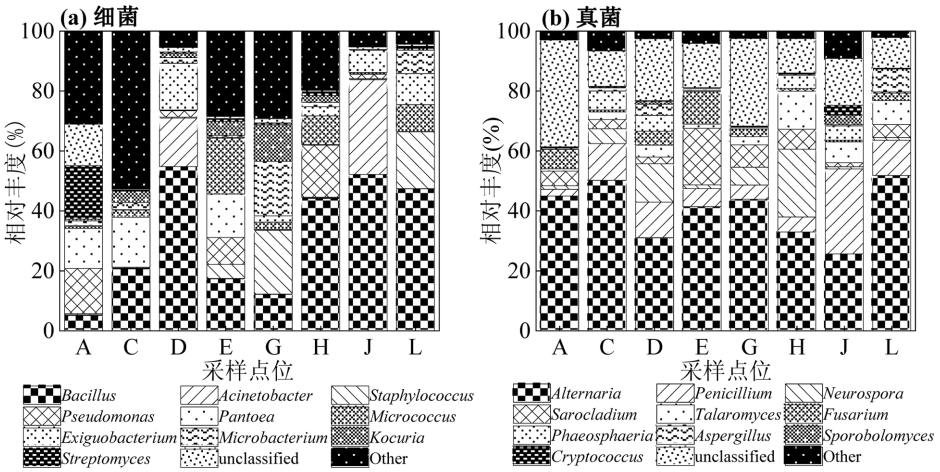



图 3　属水平上可培养生物气溶胶群落组成

Fig.3　The community composition of culturable microorganism aerosols at the genus level

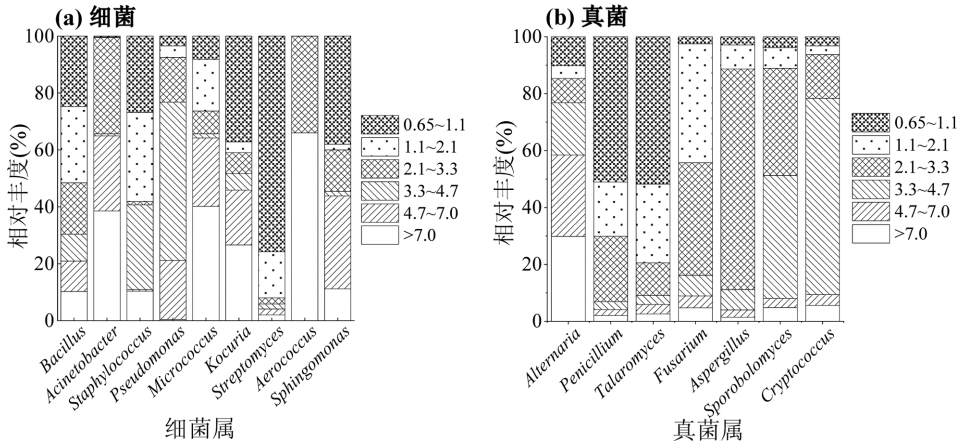



图 4　可培养生物气溶胶中优势菌属的粒径分布特征

Fig.4　The particle size distribution characteristics of the dominant bacterial and fungal in the cultivated bioaerosols

总体而言,细菌气溶胶浓度整体表现为调节池>二期生化车间>MBR 车间>DTRO 车间的趋势,即随着渗滤液处理工序,COD 浓度不断降低,细菌气溶胶浓度整体呈下降的趋势,而真菌气溶胶并未呈现类似的趋势.全厂处理单元中粒径为 0.65~2.1μm 的细菌和真菌气溶胶分别占比 26%~57%和 11%~59%.随渗滤液处理工序进行,*Bacillus* 丰度显著增加,*Pseudomonas* 丰度显著降低.*Bacillus* 是各点位样品中的优势细菌属,且主要分布在 3.3~4.7μm 和>7.0μm 粒径范围;*Alternaria* 是优势真菌属,在各单元丰度分布相对均匀,主要分布在>4.7μm 的粒径范围.

## 2.2　典型条件致病菌气溶胶空间分布特征

渗滤液处理各单元 *E. coli* 和 *S. aureus* 的浓度和粒径分布如图 5 所示.渗滤液处理各单元均检测出一定浓度的气载 *E. coli* 和 *S. aureus*.气载 *E. coli* 在二期生化车间的浓度最高,为(696±9)CFU/m$^3$,与其他点位具有显著差异;涉及渗滤液处理的点位(A、C、D、E、G 和 H)显著高于办公区(J,L).*E. coli* 主要分布在 1.1~2.1μm 范围内(约 50%),该粒径的大肠杆菌会进入人体次级支气管并导致支气管炎等呼吸道疾病.气载 *S. aureus* 的浓度在各点位差异性较大,其在一期生化车间、综合水池车间及办公室的浓度分别为(73±1),(91±2),(120±6) CFU/m$^3$,其中办公室的浓度显著高于其他点位,主要是由于办公室采样点靠近卫生间导致.*S. aureus* 浓度较低粒径分布特征不明显,但值得注意的是在调节池中 *S. aureus* 只在 4.7~7μm 被检出.Chen 等[36]报道污水处理厂也存在较高浓度的 *E. coli* 和 *S. aureus* 气溶胶,其相对丰度

最高可达 11.55%和 12.50%.

*E. coli* 和 *S. aureus* 的浓度具有较大的差异.*E. coli* 作为一种常见的肠道细菌,通常能够适应不同的环境条件,对某些环境条件的变化(如湿度、温度或营养物质)比 *S. aureus* 更加耐受,且当环境中同时存在 *E. coli* 和 *S. aureus* 时,*S. aureus* 生长量显著降低,*E. coli* 具有更强的竞争优势[37-38].因此 *E. coli* 在气溶胶样品中的浓度较高.

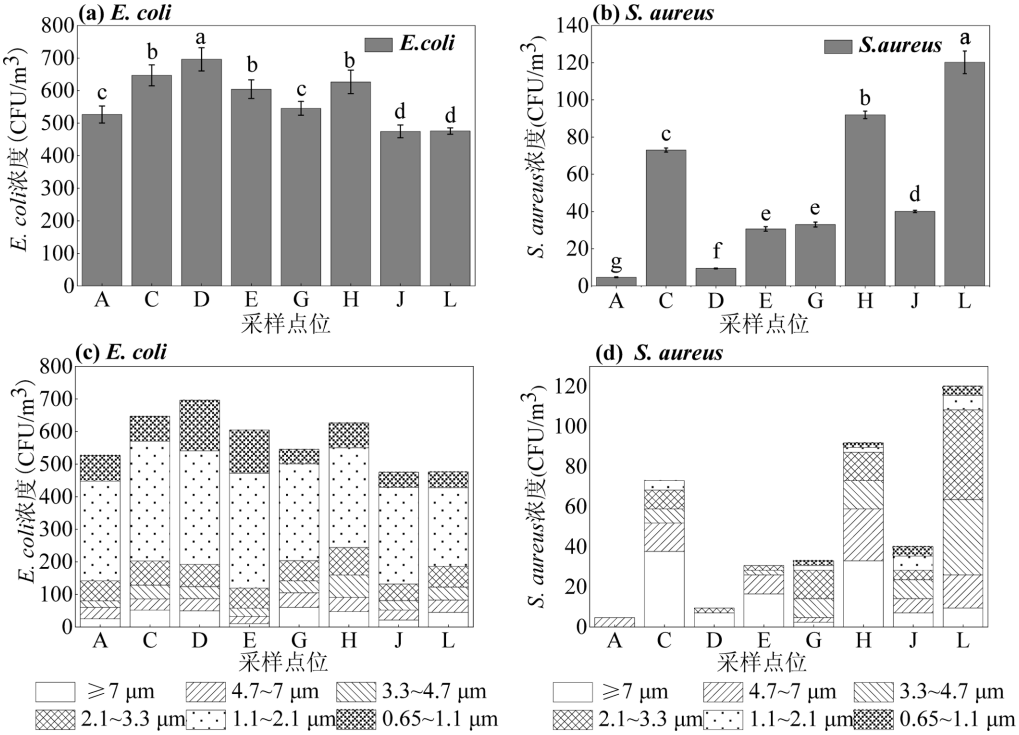



图 5 致病菌气溶胶浓度及粒径分布特征

Fig.5 Characteristics of concentration and particle size distribution of pathogenic bacterial aerosols

## 2.3 渗滤液处理中微生物气溶胶暴露风险评估

**2.3.1 细菌和真菌气溶胶暴露风险评估** 渗滤液处理各单元细菌和真菌气溶胶的暴露风险商如图 6 所示.渗滤液处理厂中细菌气溶胶对成年男性和女性的总暴露风险商分别为 0.066~0.301 和 0.058~0.264,真菌气溶胶对成年男性和女性的总暴露风险商分别为 0.043~0.185 和 0.037~0.162,且成年男性的暴露风险高于成年女性.从暴露场所来看,暴露风险高的单元主要为调节池、蒸发车间、综合水池、生化车间等,这些处理单元存在搅拌、曝气等机械扰动是造成气溶胶释放的主要原因.总体上,渗滤液各处理单元的细菌和真菌气溶胶暴露风险商均小于 1.0,在不考虑致病微生物的条件下,其对人体的健康危害可以忽略.

**2.3.2 条件致病菌气溶胶暴露风险评估** 不同处理单元条件气溶胶致病菌的年感染风险和疾病负担如图 7 所示.对 *E. coli* 而言,在未采取防护措施时,其在各点位的年感染风险和疾病负担低于基准值,但仍接近临界值.对 *S. aureus* 而言,在未采取防护措施的情况下,除调节池和二期生化车间外其他点位的年感染风险均超过美国环保署提出的可接受年感染风险基准(U.S. EPA benchmark⩽$10^{-4}$pppy),在各点位(调节池除外)的疾病负担均超过世界卫生组织基准值(WHO benchmark⩽$10^{-6}$DALYs pppy).值得注意的是,尽管 *E. coli* 的浓度显著高于 *S. aureus*,但 *S. aureus* 的年感染概率和疾病负担在各点位均高于 *E. coli*,主要是由于两者的剂量-反应模型不同,*E. coli* 采用的是 Beta-Poisson 模型,该模型具有显著的阈值效应,即低剂量下感染概率极低,需要较高剂量才能触发风险[39];而 *S. aureus* 采用的是指数模型,该模型假设单个病原体即可引发感染,低剂量下风险随剂量指数性增长[40],从而导致 *S. aureus* 在较低的浓度水平下产生较高的健康风险.

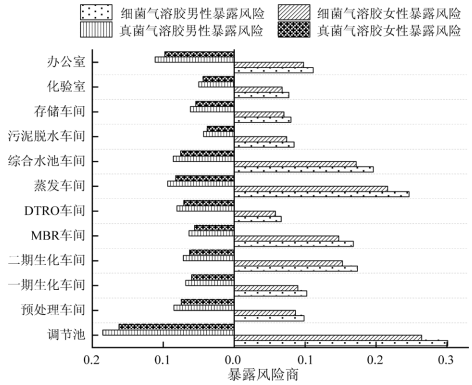



图 6　不同处理单元细菌及真菌气溶胶的暴露风险

Fig.6　Exposure risk of bacterial and fungal aerosols in different treatment units

Yan 等[41]评估了城市污水处理厂不同曝气模式下暴露于 *S. aureus* 的健康风险,发现在不佩戴个人防护设备的情况下,工人的年感染概率超过基准值.Wajid 等[42]研究了不同通风条件下室内厕所冲水后金黄色葡萄球菌气溶胶的排放特征,发现通风不良的情况下,室内湿度较高,气溶胶浓度高达(855±84)CFU/m$^3$,其年感染风险和疾病负担也超过基准值.因此,渗滤液处理厂的员工在进入车间作业时必须佩戴防护用具(口罩、护目镜等),加强车间通风与消毒操作,避免长时间在受污染的车间环境中作业.

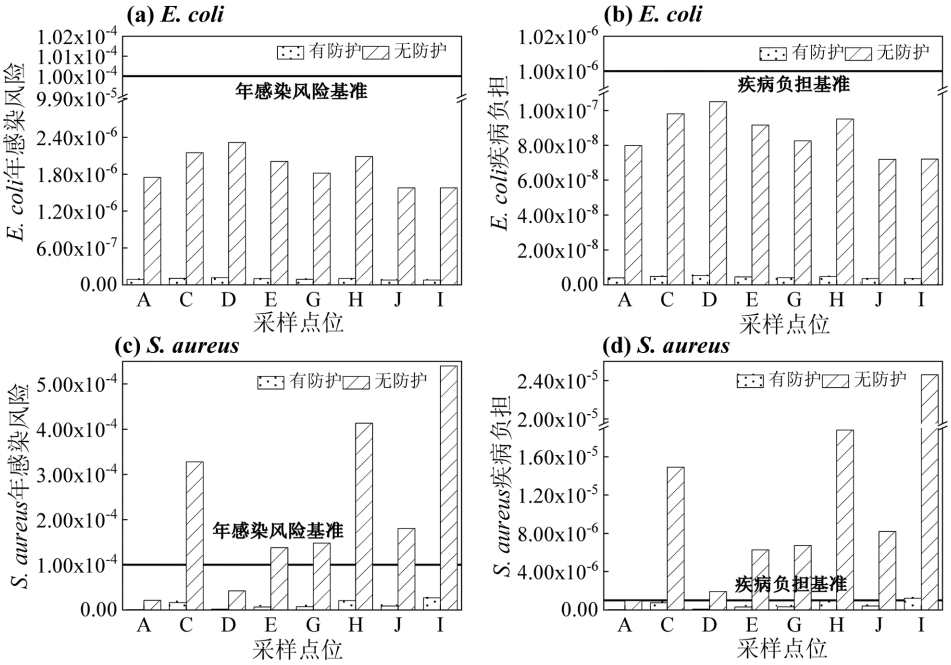



图 7　不同处理单元致病菌年感染风险及疾病负担

Fig.7　Annual infection risk and disease burden of pathogens in different treatment units

## 3　结论

3.1　渗滤液处理过程中,细菌气溶胶浓度整体表现为调节池>二期生化车间>MBR 车间>DTRO 车间的趋势,而真菌气溶胶并未呈现类似的趋势.全厂处理单元中粒径为 0.65~2.1μm 的细菌和真菌气溶胶分别占比 26%~57%和 11%~59%,具有下呼吸道侵入风险.

3.2　随渗滤液处理工序进行,*Bacillus* 丰度显著增加,*Pseudomonas* 丰度显著降低.*Bacillus* 是极易气溶胶化的细菌属,在生化车间、综合水池车间等区域占绝对优势,主要分布在 3.3~4.7μm 和>7.0μm 粒径范围.*Alternaria* 是优势真菌属,在各单元丰度分布相对均匀,主要分布在>4.7μm 的粒径范围.

3.3　气载 *E. coli* 浓度在涉及渗滤液处理的点位显著高于办公区,主要分布在 1.1~2.1μm 粒径范围.气载*S. aureus*的浓度显著低于*E. coli*,且在各点位差异较大.

3.4　*S. aureus* 的年感染概率和疾病负担在各处理点位均高于 *E. coli*.*S. aureus* 在低浓度下具有较高的健康风险,对厂区工作人员的健康造成较大威胁.

**参考文献：**

[1]　Iqbal M A, Siddiqua S A, Faruk M O, et al. Systematic review and

meta-analysis of the potential threats to respiratory health from microbial Bioaerosol exposures [J]. Environmental Pollution, 2024, 341:122972.

[2] Han Y P, Li L, Wang Y, et al. Composition, dispersion, and health risks of bioaerosols in wastewater treatment plants: A review [J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2020,15(3):38-54.

[3] Salambanga F R, Wingert L, Valois I, et al. Microbial contamination and metabolite exposure assessment during waste and recyclable material collection [J]. Environmental Research, 2022,212:113597.

[4] Nath A, Debnath A. A short review on landfill leachate treatment technologies [J]. Materials Today: Proceedings, 2022,67:1290-1297.

[5] 杨 唐,惠晓亮,王振兴,等.污水处理厂生物气溶胶抗生素抗性污染特征 [J]. 中国环境科学, 2022,42(12):5626-5632.
Yang T, Hui X L, Wang Z X, et al. Pollution characteristics of antibiotics resistance associated with bioaerosols from a wastewater treatment plant. [J]. China Environmental Science, 2022,42(12):5626-5632.

[6] Wang Y N, Wang Q Z, Li Y H, et al. Insights into bioaerosol contamination in the process of mineralized refuse mining: Microbial aerosolization behavior and potential pathogenicity [J]. Journal of Hazardous Materials, 2024,480:136142.

[7] Ilmasari D, Kamyab H, Yuzir A, et al. A review of the biological treatment of leachate: Available technologies and future requirements for the circular economy implementation [J]. Biochemical Engineering Journal, 2022,187:108605.

[8] Usepa. Risk assessment guidance for superfund. Volume I: human health evaluation manual, Part E, supplemental guidance for dermal risk assessment [R]. United States Environmental Protection Agency, Washington, Dc Epa/540/r/99.

[9] Heida A, Maal-bared R, Veillette M, et al. Quantitative microbial risk assessment (QMRA) tool for modelling pathogen infection risk to wastewater treatment plant workers [J]. Water Research, 2024,260: 121858.

[10] Carducci A, Donzelli G, Cioni L, et al. Quantitative microbial risk assessment in occupational settings applied to the airborne human adenovirus infection [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2016,13:733-752.

[11] 王彦杰,李 琳,许光素,等.微生物气溶胶采集技术的特点及应用 [J]. 微生物学通报, 2017,(3):701-709.
Wang Y J, Li L, Xu G S, et al. The application and characteristics of technologies for bioaerosols collection [J]. Microbiology China, 2017, (3):701-709.

[12] Chantapakul T, Lv R, Wang W J, et al. Manothermosonication: Inactivation of *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* [J]. Journal of Food Engineering, 2019,246:16-24.

[13] Das S, Ranjana N, Misra A J, et al. Disinfection of the water borne pathogens *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* by solar photocatalysis using sonochemically synthesized reusable Ag@ZnO core-shell nanoparticles [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2017,14:747-763.

[14] Liu Y, Zhang Y Y, Shi Y T, et al. Characterization of fungal aerosol in a landfill and an incineration plants in Guangzhou, Southern China: The link to potential impacts [J]. Science of the Total Environment, 2021,764:142908.

[15] 姚 萱,杨红刚,陈必群,等.基于博弈论组合赋权-云模型的河流型水源地环境风险评价研究 [J]. 环境科学学报, 2025,45(2):177-189.
Yao X, Yang H G, Chen B Q, et al. Research on environmental risk assessment of river-type water sources based on game theorycombination weighting method and cloud model [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2025,(2):177-189.

[16] Yang K X, Li L, Xue S, et al. Influence factors and health risk assessment of bioaerosols emitted from an industrial-scale thermophilic biofilter for off gas treatment [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2019,129:55-62.

[17] 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, 2019,8:253-265.

[18] Li Y J, Hu Z H, Liu X H, et al. Characteristics of bioaerosol emissions from a municipal wastewater treatment plant: Health risk assessment and microbial composition [J]. Science of the Total Environment, 2024,934:173096.

[19] 李沅津,杨 庆,赵茹涵,等.$A^2O$ 工艺污水处理厂微生物气溶胶逸散特征及暴露风险评价 [J]. 环境科学学报, 2021,(9):3457-3463.
Li Y J, Yang Q, Zhao R H, et al. Emission characteristics and exposure risk assessment of microbial aerosols from WWTP with $A^2O$ treatment process [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021,(9):3457-3463.

[20] Sajjad B, Hussain S, Rasool K, et al.Comprehensive insights into advances in ambient bioaerosols sampling, analysis and factors influencing bioaerosols composition [J]. Environmental Pollution, 2023,336:122473.

[21] Nie C L, Qiu Y Q, Pei T X, et al. Specific sources exert influence on the community structures of bioaerosols [J]. Aerobiology, 2024,2: 72-84.

[22] Han Y P, Yang T, Xu G S, et al. Characteristics and interactions of bioaerosol microorganisms from wastewater treatment plants [J]. Journal of Hazardous Materials, 2020,391:122256.

[23] Johnston J D, Cowger A E, Weber K S. Bioaerosol and microbial exposures from residential evaporative coolers and their potential health outcomes: A review [J]. Indoor Air, 2022,32(9):e13082.

[24] Wang Y, Fu Y, Wang C, et al. Dissimilar emission characteristics between bioaerosol and suspended particles from gaseous biofilters and bioaerosol health risk evaluation [J]. Aerosol and Air Quality Research, 2018,18:1874-1885.

[25] 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,(1):222-233.
Wang Y, Han Y P, Li L. Emission and potential risks of bioaerosols in sanitary landfill [J]. Microbiology China, 2020,(1):222-233.

[26] Howden B P, Giulieri S G, Wong fok lung T, et al. Staphylococcus aureus host interactions and adaptation [J]. Nature Reviews Microbiology, 2023,21:380-395.

[27] Kirk A, Stavrinides J. Distribution and comparative genomic analysis of antimicrobial gene clusters found in Pantoea [J]. Frontiers in Microbiology, 2024,15:1416674.

[28] Wang F, Han R H, Chen S. An overlooked and underrated endemic mycosis—talaromycosis and the pathogenic fungus *Talaromyces marneffei* [J]. Clinical Microbiology Reviews, 2023,36(1):e0005122.

[29] Chen Y W, Lan S H, Wang L H, et al. A review: Driving factors and regulation strategies of microbial community structure and dynamics in wastewater treatment systems [J]. Chemosphere, 2017,174:173−182.

[30] Zhang L, Shen Z, Fang W K, et al. Composition of bacterial communities in municipal wastewater treatment plant [J]. Science of the Total Environment, 2019,689:1181−1191.

[31] Kowalski M, Wolany J, Pastuszka J S, et al. Characteristics of airborne bacteria and fungi in some polish wastewater treatment plants [J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2017, 14:2181−2192.

[32] Cho W, Chung M. Bacillus spores: a review of their properties and inactivation processing technologies [J]. Food Science and Biotechnology, 2020,29:1447−1461.

[33] 王玉婧,吕　凡,张倚马,等.生活垃圾渗滤液处理设施气相污染物释放和控制 [J]. 中国环境科学, 2023,43(7):3387−3395.
Wang Y J, Lü F, Zhang Y M, et al. Gaseous pollutant emissions and control in the municipal waste leachate treatment facility [J]. China Environmental Science, 2023,43(7):3387−3395.

[34] Cavallo I, Oliva A, Pages R, et al. Acinetobacter baumannii in the critically ill: Complex infections get complicated [J]. Frontiers in Microbiology, 2023,14:1196774.

[35] Krell T, Matilla M A. *Pseudomonas aeruginosa* [J]. Trends in Microbiology, 2024,32:216−218.

[36] Chen Y H, Yan C, Yang Y F, et al. Quantitative microbial risk assessment and sensitivity analysis for workers exposed to pathogenic bacterial bioaerosols under various aeration modes in two wastewater treatment plants [J]. Science of the Total Environment, 2021,755: 142615.

[37] Liang Y J, Li B B, Zhang Q, et al. Interaction analyses based on growth parameters of GWAS between *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* [J]. Amb. Express, 2021,11:1−9.

[38] Li C, Yin L, He X, et al. Competition−cooperation mechanism between *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* based on systems mapping [J]. Frontiers in Microbiology, 2023,14:1192574.

[39] Hilton J, Hall I. A beta−Poisson model for infectious disease transmission [J]. Plos Computational Biology, 2024,20:e1011856.

[40] Lee H, Kim K, Choi K, et al. Quantitative microbial risk assessment for Staphylococcus aureus in natural and processed cheese in Korea [J]. Journal of Dairy Science, 2015,98:5931−5945.

[41] Yan X, Ma J H, Chen X Q, et al. Characteristics of airborne bacterial communities and antibiotic resistance genes under different air quality levels [J]. Environment International, 2022,161:107127.

[42] Wajid A, Yang Y F, Gong L, et al. Emission characteristics and quantitative health risk assessment of bioaerosols in an indoor toilet after flushing under various ventilation scenarios [J]. Building and Environment, 2022,207:108463.

**作者简介：**王炳鹏(2000−),男,山东诸城人,青岛理工大学硕士研究生,主要研究方向为固体废物处理与资源化.发表论文 1 篇.940923570@qq.com.

# 2025 年度《中国环境科学》青年编委会名单

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 安　东 | 安俊琳 | 安立会 | 班巧英 | 伯　鑫 | 蔡子颖 | 曾现来 | 昌　盛 | 陈操操 | 陈　丹 |
| 陈多宏 | 陈　欢 | 陈建新 | 陈　洁 | 陈菁泉 | 陈庆彩 | 陈重军 | 成小翔 | 程　凯 | 程志鹏 |
| 代　伟 | 邓启红 | 丁光辉 | 董战峰 | 董志文 | 樊　程 | 樊　琦 | 房德琳 | 冯　颖 | 付　杰 |
| 高艳珊 | 高　阳 | 龚小波 | 官冬杰 | 韩东飞 | 韩红桂 | 韩永和 | 何红弟 | 何秋来 | 何文天 |
| 贺维鹏 | 侯赟璐 | 胡建林 | 胡鹏博 | 黄　凯 | 黄少丹 | 解玉磊 | 金仁村 | 金小伟 | 李　超 |
| 李　凯 | 李荣华 | 李　祥 | 李英杰 | 刘　成 | 刘桂林 | 刘洪涛 | 刘沙沙 | 刘世梁 | 刘双星 |
| 刘维涛 | 刘义青 | 刘永泽 | 刘　喆 | 刘智峰 | 卢少勇 | 鲁　仙 | 罗　笠 | 吕　凡 | 马　本 |
| 马　杰 | 马　群 | 毛熙彦 | 聂　玮 | 欧阳少虎 | 潘　峰 | 潘月鹏 | 祁承都 | 乔　玮 | 秦昌波 |
| 秦传玉 | 曲　蛟 | 任宏宇 | 任强强 | 孙广义 | 孙士权 | 孙兆彬 | 谈云志 | 唐崇俭 | 唐　欢 |
| 汪俊峰 | 王　刚 | 王　好 | 王华伟 | 王丽娜 | 王启元 | 王树宾 | 王学佳 | 王　莹 | 卫皇曌 |
| 温　维 | 吴起鑫 | 武　君 | 武云飞 | 向　垒 | 谢　旻 | 邢建伟 | 徐　江 | 徐湘博 | 薛丽坤 |
| 薛文博 | 薛英文 | 杨　斌 | 姚彦坡 | 印红玲 | 于　磊 | 虞先玉 | 袁自冰 | 张　冰 | 张　根 |
| 张海涵 | 张　建 | 张　静 | 张可佳 | 张利飞 | 赵海明 | 赵中华 | 钟　华 | 周　鑫 | 朱联东 |
| 朱曙鹏 | 朱小萤 | | | | | | | | |