



## 卫生填埋场微生物气溶胶的逸散及潜在风险

王莹<sup>1,2</sup> 韩云平<sup>\*1,2</sup> 李琳<sup>1,2</sup>

1 中国科学院生态环境研究中心 环境水质学国家重点实验室 北京 100085

2 中国科学院大学 北京 100049

**摘要:** 随着对微生物气溶胶认识的提高,其产生、来源、扩散及风险研究获得了越来越多的关注。卫生填埋场是微生物气溶胶的重要产生源之一。本文阐述了卫生填埋场气溶胶颗粒中微生物的浓度水平、粒径分布、种群结构,解析了微生物气溶胶的逸散特征及影响因素,介绍了微生物气溶胶对人体健康的潜在风险及评价方法,并展望了未来卫生填埋场逸散微生物的研究趋势及方向,为卫生填埋场微生物气溶胶的控制与削减提供了科学依据和参考。

**关键词:** 卫生填埋场, 气溶胶颗粒, 微生物, 逸散特征, 潜在风险

## Emission and potential risks of bioaerosols in sanitary landfill

WANG Ying<sup>1,2</sup> HAN Yun-Ping<sup>\*1,2</sup> LI Lin<sup>1,2</sup>

1 State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** With the improvement of the bioaerosol understanding, more and more attention has been paid to their sources, pollution characteristics and health risks. Sanitary landfill is one of the main sources of bioaerosol. This paper explains the concentration level, particle size distribution and microbial population structure of microorganisms in aerosol particles of sanitary landfill, analyses the pollution characteristics, influencing factors and potential risks, and prospects the future hot spot and the main direction of microbial emissions of sanitary landfill. This paper will supply scientific basis and reference for the control and reduction of bioaerosols in sanitary landfill.

**Keywords:** Sanitary landfill, Aerosol particles, Microorganisms, Emission characteristics, Potential risks

卫生填埋是实现城市生活垃圾无害化、减量化、资源化的有效途径之一,该方法由于处理能力大、操作简便、运行成本低等优点,已成为目前城市生活垃圾最重要的处置方式之一<sup>[1-2]</sup>。生活垃圾中富含大量有机质,在适宜条件下,细菌、真菌、

病毒等微生物将会大量繁殖<sup>[3]</sup>。当生活垃圾受到扰动后,这些微生物就会逸散到空气中气溶胶化,形成微生物气溶胶。微生物气溶胶是指在1–100 μm粒径范围内,其中包含细菌、古生菌、真菌孢子、花粉、病毒、活性生物分泌的有机物质以及植物或

**Foundation item:** National Key Research and Development Program of China (2018YFD1100600)

**\*Corresponding author:** E-mail: yphan@rcees.ac.cn

**Received:** 25-06-2019; **Accepted:** 24-09-2019; **Published online:** 17-10-2019

**基金项目:** 国家重点研发计划(2018YFD1100600)

**\*通信作者:** E-mail: yphan@rcees.ac.cn

**收稿日期:** 2019-06-25; **接受日期:** 2019-09-24; **网络首发日期:** 2019-10-17

动物碎片和碎屑的颗粒物,是悬浮在空气中的微生物所形成的胶体体系。卫生填埋场主要包括垃圾填埋区、渗滤液处理区和废气收集处理区,垃圾填埋区和渗滤液处理区是微生物气溶胶的主要逸散源。垃圾填埋区是生活垃圾的集中堆放地,在作业机器的翻动下,大量微生物逸出形成微生物气溶胶,而渗滤液处理区的生化反应单元通常设有曝气器,曝气或搅拌使渗滤液中的微生物以气溶胶的形式逸出。这些微生物气溶胶通过呼吸道、消化道、皮肤和黏膜侵入人体后,极有可能引起呼吸道感染和其他疾病。基于此,卫生填埋场微生物气溶胶对场内职工及周边居民人体健康存在极大的危害风险<sup>[4]</sup>。

因此,掌握卫生填埋场微生物气溶胶的污染特征、影响因素及潜在风险对于控制空气污染、改善区域环境质量具有重要的意义。本文论述了卫生填埋场微生物气溶胶的浓度、粒径分布、微生物种群结构及其影响因素和潜在的风险,为卫生填埋场微生物气溶胶的源头减排及过程控制技术研发提供科学依据。

## 1 卫生填埋场微生物气溶胶的逸散特征

卫生填埋场微生物气溶胶的逸散特征主要包括不同功能区的浓度水平、粒径分布及微生物种群结构特征。

### 1.1 卫生填埋场不同功能区微生物气溶胶的浓度水平

研究发现,卫生填埋场不同功能区的微生物气溶胶浓度存在明显差异,以总空气微生物浓度计,填埋区最高浓度可达 6 000 CFU/m<sup>3</sup> 以上,渗滤液处理区浓度通常为 5 000–6 000 CFU/m<sup>3</sup>,略低于填埋区,生活区浓度约为 3 500 CFU/m<sup>3</sup><sup>[5]</sup>。已封场填埋区的微生物气溶胶浓度在各功能区中最低,约为 136–863 CFU/m<sup>3</sup><sup>[6]</sup>。

以空气细菌和真菌浓度计,填埋区的浓度高于填埋场内其他功能区。空气细菌在填埋区的浓度变化范围为 500–21 312 CFU/m<sup>3</sup>,在渗滤液处理区的浓度变化范围为 100–9 460 CFU/m<sup>3</sup>,在已封场填埋区的浓度变化范围为 300–2 707 CFU/m<sup>3</sup>,在生

活区的浓度变化范围为 333–1 100 CFU/m<sup>3</sup> (图 1)。许鸿飞等<sup>[6]</sup>在填埋区检测到空气细菌的浓度为 3 720 CFU/m<sup>3</sup>,高于渗滤液处理区(754 CFU/m<sup>3</sup>)和已封场区(429 CFU/m<sup>3</sup>)的空气细菌浓度值,这与其他研究所得结果一致<sup>[7-8]</sup>。但马嘉伟等<sup>[9]</sup>研究显示填埋场中空气细菌浓度最高的功能区是渗滤液处理区,浓度为 9 046 CFU/m<sup>3</sup>,高于填埋区(5 437 CFU/m<sup>3</sup>)、已封场区(2 707 CFU/m<sup>3</sup>)和生活区(720 CFU/m<sup>3</sup>)的浓度值,这可能与渗滤液处理单元的工艺选取及操作环境有关。空气真菌在填埋区的浓度也高于其他功能区。对某卫生填埋场空气真菌浓度进行检测时发现,填埋区空气真菌浓度的变化范围在(100.59±50.04)–(1 830.38±971.28) CFU/m<sup>3</sup>,渗滤液处理区的浓度变化范围在(131.91±48.10)–(800.94±318.59) CFU/m<sup>3</sup>,已封场区的浓度变化范围在(73.02±26.75)–(876.32±207.12) CFU/m<sup>3</sup><sup>[10]</sup>。Buczyńska 等<sup>[8]</sup>也在填埋区检测到最高真菌浓度为 480 CFU/m<sup>3</sup>,高于渗滤液处理区(360 CFU/m<sup>3</sup>)。Cyprowski 等<sup>[11]</sup>和 Frączek 等<sup>[12]</sup>的研究也报道了类似的结果。

此外,在同一填埋场中,各功能区细菌气溶胶的浓度高于真菌气溶胶的浓度。在北京某卫生填埋场,填埋区和渗滤液处理区的空气细菌浓度为 2 000 CFU/m<sup>3</sup>,略高于空气真菌浓度(1 750 CFU/m<sup>3</sup>)<sup>[13]</sup>。在波兰某卫生填埋场,空气中的

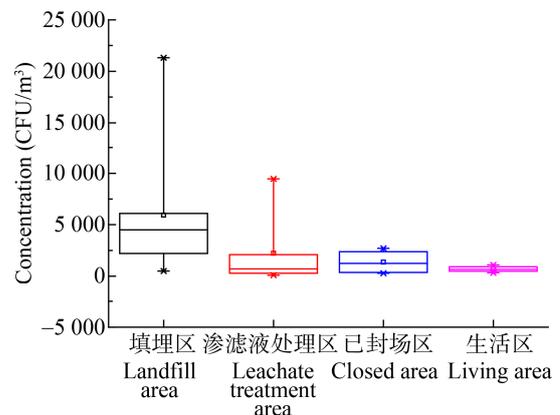


图 1 卫生填埋场不同功能区空气细菌浓度  
Figure 1 Concentration of bacterial bioaerosols in different function areas of sanitary landfill

细菌浓度变化范围为 1 688–53 800 CFU/m<sup>3</sup>, 真菌浓度变化范围为 370–14 650 CFU/m<sup>3</sup>[14]。已封场填埋区的微生物气溶胶浓度也符合这一分布规律, 空气细菌浓度为 429 CFU/m<sup>3</sup>, 空气真菌微生物浓度为 71 CFU/m<sup>3</sup>[6]。但不同的是, Małecka-Adamowicz 等[15]发现了填埋场中空气真菌浓度高于细菌浓度的现象, 研究发现, 这与垃圾组分、采样环境及采样季节有关。在更适宜的条件下, 真菌生长繁殖速度加快, 从而导致空气真菌浓度高于空气细菌浓度。

从几个功能区的微生物气溶胶浓度来看, 填埋区的微生物浓度最高, 是卫生填埋场微生物气溶胶的主要逸散源。填埋区通常植被覆盖少, 垃圾普遍暴露于空气中。随着垃圾运送车辆、作业机器的扰动, 使得微生物气溶胶向空气传播。渗滤液处理区多采用厌氧+好氧生化处理工艺处理垃圾渗滤液[16-18], 其中好氧处理单元设有曝气系统, 为活性污泥中的微生物供氧, 曝气时搅拌污水, 使污水中的气泡破裂形成液滴, 微生物即随液滴进入大气环境, 形成微生物气溶胶。而已封场填埋区由于表面有覆土覆盖, 且封场时间较长, 表面形成植被覆盖, 能有效防止扬尘。生活区远离填埋区和渗滤液处理区, 植被多, 环境相对清洁, 因此微生物气溶胶浓度低。

## 1.2 卫生填埋场微生物气溶胶的粒径分布

卫生填埋场微生物气溶胶的粒径分布主要采用微生物气溶胶采样器进行测定, 常用的采样器有安德森采样器、FA-I 型采样器、ETW-6 型采样器

及总悬浮颗粒物(total suspended particulate, TSP)采样器等[19], 这些采样器在卫生填埋场、污水处理厂微生物气溶胶监测中已经得到了广泛应用[20-22]。

卫生填埋场微生物气溶胶的粒径分布特征与其所在功能区密切相关。空气细菌在不同功能区的粒径分布情况有所差异(图 2), 填埋区细菌粒子的粒径相对较大, 主要分布在大于 4.7 μm 的范围内[11], 渗滤液处理区和已封场区的空气细菌粒子相对较小, 主要分布在小于 3.3 μm 的范围内[6]。在采用 FA-I 型采样器对某卫生填埋场进行采样分析后发现, 填埋区细菌粒子主要分布在第 I 级(>8.2 μm), 约占 32.0%, 渗滤液处理区细菌粒子主要分布在 IV–VI 级(0.65–2.0 μm), 约占 46.2%[23]。在采用 ETW-6 型采样器进行采样时也发现, 填埋区细菌粒子的粒径大于渗滤液处理区和已封场区, 填埋区细菌粒子主要分布在第 II 级(4.7–7.0 μm), 约占 46.4%, 渗滤液处理区细菌粒子主要分布在 V–VI 级(0.65–2.1 μm), 约占 57.5%, 已封场区细菌粒子主要分布在 IV–VI 级(0.65–3.3 μm), 约占 61.1%[6]。空气真菌和放线菌在填埋场各功能区的粒径分布情况相似。空气真菌粒子集中分布在粒径较小的范围内, 采用六级安德森采样器对填埋场的真菌粒子进行研究时发现, 真菌粒子在 III–V 级(0.65–3.0 μm) 分布比例最高, 约占总数的 75%。放线菌粒子则主要分布在第 IV 级(2.0–3.0 μm), 约占总数的 30%[24]。粒径小于 5 μm 的颗粒物为可吸入颗粒物, 会经呼吸沉积在人体的下呼吸道如气管、支气管和肺泡

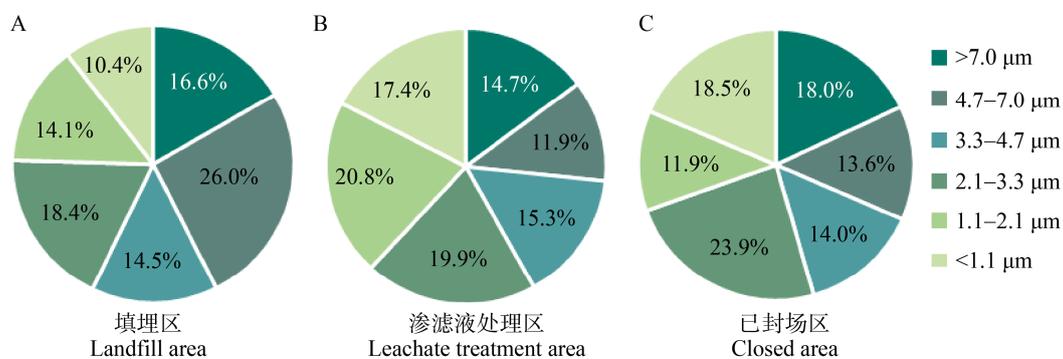


图 2 卫生填埋场不同功能区空气细菌粒径分布

Figure 2 Size distribution of bacterial bioaerosols in different function areas of sanitary landfill

中,造成呼吸系统疾病<sup>[25]</sup>。从填埋场微生物气溶胶粒径分布的总体情况来看,可吸入微生物气溶胶颗粒在总微生物气溶胶中占到 80%以上<sup>[23]</sup>,这表明卫生填埋场空气中的大部分微生物都容易通过呼吸系统进入人体,引发健康问题。空气微生物的中值直径也是衡量其粒径大小的重要标准。中值直径(count median diameter, CMD),即样品的累积粒度分布百分数达到 50%时所对应的粒径。不同功能区空气微生物粒子的中值直径不同,在北京市某卫生填埋场检测到填埋区和生活区空气细菌的中值直径最大,约为 5.5  $\mu\text{m}$ ,渗滤液处理区的空气细菌的中值直径约为 4.0  $\mu\text{m}$ <sup>[24]</sup>。此外,不同种类微生物的中值粒径也有所差异,空气真菌和放线菌的中值直径约为 3.0  $\mu\text{m}$ ,显著小于空气细菌<sup>[23]</sup>。李婉欣等<sup>[26]</sup>对西安市秋冬季不同空气质量下的微生物气溶胶进行监测,也发现空气细菌的中值直径显著大于其他空气微生物,青岛<sup>[27]</sup>、北京<sup>[28]</sup>等地的研究也发现了同样的粒径分布规律。研究表明,空气细菌会吸附在颗粒物表面形成集合体,致使微生物的粒径随颗粒物粒径的增大而增大<sup>[11]</sup>,而空气真菌和放线菌则以单个孢子形式存在于空气环境中,由此可能导致细菌的中值直径大于真菌和放线菌。

### 1.3 卫生填埋场微生物气溶胶中微生物种群结构特征

微生物种群多样性的分析方法主要包括基于生物化学的方法和基于现代分子生物学技术的方法<sup>[29]</sup>。生物化学方法包括平板计数法、荧光染色法、磷脂脂肪酸(phospholipid fatty acid, PLFA)谱图分析法和 Biolog 微量分析法等。现代分子生物学方法包括荧光原位杂交法、DGGE、温度梯度凝胶电泳及基因组测序技术等,目前,这些方法在微生物气溶胶微生物种群特征研究中已得到了广泛应用<sup>[30-32]</sup>。经检测,卫生填埋场微生物气溶胶中的优势微生物为细菌和真菌。

#### 1.3.1 细菌

细菌在卫生填埋场微生物气溶胶中占绝对优势,约占总空气微生物的 59.1%–72.3%<sup>[33]</sup>。填埋

场不同功能区的细菌气溶胶多样性有所差异,渗滤液处理区的细菌丰富度最高<sup>[6]</sup>。革兰氏阳性菌在空气细菌中占优势,约占空气细菌总数的 54%–78%,显著多于革兰氏阴性菌<sup>[34]</sup>。球菌和杆菌是革兰氏阳性菌的主要存在形态,约占总空气微生物的 40%和 22%<sup>[14]</sup>。经鉴定发现,革兰氏阳性杆菌中占主导地位的是芽孢杆菌属(*Bacillus*),约占 61.8%,其中枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)、短小芽孢杆菌(*Bacillus pumilus*)和金黄节杆菌(*Arthrobacter aureus*)出现频率最高<sup>[35]</sup>。其他革兰氏阳性菌,例如葡萄球菌属(*Staphylococcus*)、考克氏菌属(*Kocuria*)和微球菌属(*Micrococcus*)也在卫生填埋场微生物气溶胶中广泛检出<sup>[8-9]</sup>。革兰氏阴性菌中占优势的主要则是假单胞菌属(*Pseudomonas*)<sup>[36]</sup>。在这些细菌中,葡萄球菌是最常见的化脓性球菌,特别是金黄色葡萄球菌能分泌大量的外毒素,引起人体的局部化脓性感染等疾病<sup>[37]</sup>。部分假单胞菌属具有致病性,可通过口、呼吸道或伤口引发感染,这些具有潜在致病性的细菌及其代谢产物逸散到空气中,极有可能会造成环境污染并给人体带来健康问题。

#### 1.3.2 真菌

空气真菌的种类与采样环境、采样时间等多种因素有关。在北京市某卫生填埋场夏季的空气微生物中,微生物气溶胶中的优势菌属依次为枝孢属(*Cladosporium*)、曲霉属(*Aspergillus*)、青霉属(*Penicillium*)、无孢菌群(non-sporing)、交链孢属(*Alternaria*)和尾孢菌属(*Cerospora*),其中枝孢属和曲霉属占绝对优势<sup>[24]</sup>。另外,不同功能区的优势菌属及浓度水平也有所差异,填埋区真菌种类最多,曲霉属在渗滤液处理区的比例高于填埋区和生活区,青霉属在填埋区的比例高于渗滤液处理区和生活区<sup>[13]</sup>。对芬兰某卫生填埋场的微生物气溶胶进行检测时也发现,枝孢属仍然是最具优势的真菌,其次是青霉属、曲霉属和拟青霉属<sup>[38]</sup>。不同地区的检测结果也存在一定差异。加利福尼亚某城市卫生填埋场的检测结果表明,填埋场微生物气溶胶中曲霉是优势真菌属,其中黑曲霉所占浓度百分

比最高,其次是青霉属、根霉属(*Rhizopus*)和菌核霉属(*Sclerotinia*)<sup>[39]</sup>。而梁英梅等<sup>[35]</sup>的研究发现,填埋场微生物气溶胶中青霉检出的频率最高,达到42.6%,其次是曲霉和交链孢属,分别为18.0%和13.1%。以上研究表明填埋场空气真菌的种群结构可能与采样地点、采样时间、采样环境、垃圾组分等多种因素相关<sup>[33,40]</sup>。

真菌在特定环境下具有细胞毒性,并能够产生真菌毒素,对人体具有毒性作用。引起呼吸道感染和过敏反应的空气传播真菌包括青霉属、曲霉属、枝孢属等<sup>[41]</sup>,长期暴露在含有致病真菌的环境下会增加人们的患病风险。

## 2 卫生填埋场微生物气溶胶分布的影响因素

微生物从固体废弃物逸散进入空气的过程中受到很多环境因素的影响。在高温、低湿、太阳辐射过强的环境下,微生物会很快死亡,只有对不利环境的抵抗能力和适应能力相对较强的微生物才能存活下来,并在空气中长期地保持活性。

影响微生物气溶胶逸散的环境因素主要包括地域条件、气象条件(温度、相对湿度、风速、风向、紫外强度)及其他。

### 2.1 地域

地域条件的不同对卫生填埋场微生物气溶胶的浓度和逸散特征有显著影响。在我国北方地区某卫生填埋场检测到,空气细菌浓度变化范围为535–18 045 CFU/m<sup>3</sup><sup>[42]</sup>,空气真菌浓度变化范围为300–5 000 CFU/m<sup>3</sup><sup>[13]</sup>;在东部沿海地区某卫生填埋场检测到空气细菌浓度在171.4–1 630.7 CFU/m<sup>3</sup>,空气真菌浓度在100.7–1 413.4 CFU/m<sup>3</sup><sup>[43]</sup>,小于北方地区。在波兰北部某卫生填埋场(52°45'N, 18°15'E)检测到空气细菌浓度变化范围为134–53 800 CFU/m<sup>3</sup>,空气真菌浓度变化范围为121–18 290 CFU/m<sup>3</sup><sup>[14]</sup>。在印度德里某卫生填埋场(28°36'N, 77°13'E)发现空气细菌浓度为 $8.3 \times 10^5$ – $1.8 \times 10^7$  CFU/m<sup>3</sup>,空气真菌浓度为 $1.2 \times 10^3$ –

$2.5 \times 10^5$  CFU/m<sup>3</sup><sup>[34]</sup>。此外,填埋场微生物气溶胶的种群特征也有所差异,我国北方地区某卫生填埋场微生物气溶胶中,空气真菌的优势菌属为枝孢属<sup>[24]</sup>,而其他地区填埋场微生物气溶胶中,空气真菌则以青霉属<sup>[36]</sup>或曲霉属<sup>[39]</sup>为优势菌属。这与不同卫生填埋场所处的地理位置及气候条件密切相关,不同的地理位置决定了不同的环境温度、湿度、风速和太阳辐射等多种气象条件,对微生物的生存和繁殖有显著影响,致使不同地域卫生填埋场微生物气溶胶的浓度和逸散特征存在差异。

## 2.2 气象条件

### 2.2.1 温度

温度是影响微生物生存和繁殖的最重要因素之一。低温可降低微生物机体的代谢活力,使生长和繁殖受到抑制,但存活时间相对延长;高温一方面可能使微生物体内的蛋白质和核酸变性失活,破坏细胞结构并导致微生物死亡,另一方面也会加快微生物细胞的干燥脱水,不利于微生物的存活。不同微生物的最适生长温度不同,但一般情况下,微生物的最适生长温度约为25 °C。卫生填埋场空气微生物的研究结果表明,最高的微生物浓度普遍出现在一年中较为温暖的春季和夏季<sup>[36,39]</sup>。当环境温度为20 °C左右时,空气微生物浓度最高,大于8 000 CFU/m<sup>3</sup>,当温度超过25 °C时,微生物浓度随温度增加而逐渐降低<sup>[24]</sup>。温度对空气细菌和空气真菌的影响程度也有所不同<sup>[44]</sup>,相比细菌,温度对真菌浓度的影响更大<sup>[45]</sup>。如Frączek等<sup>[12]</sup>的研究表明,最高的真菌气溶胶浓度出现在夏季(平均气温17–19 °C),为1 439–16 445 CFU/m<sup>3</sup>,明显高于秋季(172–3 567 CFU/m<sup>3</sup>)、冬季(112–2 531 CFU/m<sup>3</sup>)和春季(245–1 939 CFU/m<sup>3</sup>)。

### 2.2.2 相对湿度

相对湿度也是影响微生物生存和繁殖的重要因素。水分是微生物维持正常生命活动的必要条件,大气中所含的水分影响微生物体内酶的活性,从而间接影响微生物的生长活性。空气细菌浓度与相对湿度呈正相关<sup>[44,46]</sup>。研究表明,在平均温度相

同的条件下,当相对湿度为70%时,检测到填埋场空气细菌浓度为6 495 CFU/m<sup>3</sup>,当相对湿度小于70%时,空气细菌浓度为1 364 CFU/m<sup>3</sup>[47]。空气真菌浓度与相对湿度呈负相关,但相关性较弱。有研究在相对较低的湿度条件下检测到了更高的真菌孢子数量[48-49],这可能是由于真菌菌落在低湿条件下更易于产生孢子,空气中真菌气溶胶的浓度也因此升高。

### 2.2.3 风速和风向

风主要影响微生物气溶胶的扩散和传播。在低风速条件下,细菌和真菌繁殖体的传输受到限制,使其只能在产生源附近进行传播,并且低气流可将地面粒径较小的微生物粒子吹入大气中,因此微生物气溶胶浓度相对较高,周围居民更容易暴露在微生物风险中[50]。当风速较高时,有利于微生物气溶胶在水平方向和垂直方向上扩散,从而使空气微生物浓度被稀释并呈现降低趋势[51]。研究表明,当风速小于2 m/s时,环境中总空气微生物浓度随风速的增加逐渐升高;当风速大于2 m/s时,浓度随风速的增加逐渐降低[43]。

另外,风向也是影响微生物气溶胶扩散的重要因素,填埋场顺风风向上的微生物气溶胶浓度高于逆风风向上的浓度[52-53]。研究发现,在距离卫生填埋场1 000 m和1 250 m(位于填埋场顺风风向)检测到的微生物气溶胶浓度显著高于距离卫生填埋场450 m(位于填埋场逆风风向)采样点的检测值。Schlosser等[54]的检测结果表明,位于填埋场顺风风向各采样点的烟曲霉浓度值均高于逆风方向各采样点的浓度值。

### 2.2.4 紫外强度

不同强度的太阳辐射会影响环境中温度和相对湿度的变化,因此对微生物生存和繁殖的影响机制也较为复杂。在高辐射强度下,紫外线对微生物具有损害和杀伤作用[55],另外,高温也会使微生物的生长繁殖受到抑制甚至导致死亡,由此降低空气中微生物的浓度;在低辐射强度下,环境中适宜的温度和湿度可能导致微生物孢子的释放,进而提

高空气中的微生物浓度水平[45]。

## 2.3 其他

卫生填埋场周边的植被、绿化、雨水等也会对微生物气溶胶特征产生影响,其中植被对空气微生物的影响最大。植被对卫生填埋场的空气微生物有两种作用,一方面植被分泌的挥发性物质能够有效杀灭空气中细菌,从而隔离卫生填埋场并阻碍污染物的迁移[56];但另一方面,植被同时也能为空气中的真菌生长提供基质,使空气中的真菌孢子附着在叶面上,继而继续繁殖或回到大气中[57]。

此外,降雨和降雪也能对微生物产生冲刷和净化作用,从而降低空气中微生物气溶胶的浓度,且微生物气溶胶粒径越大,对微生物粒子的清除效果越好[58]。

## 3 卫生填埋场微生物气溶胶的潜在风险

卫生填埋场产生的微生物气溶胶组分包括细菌、真菌、病毒、原生动物及这些微生物排泄的化合物,如:内毒素、外毒素、葡聚糖、真菌代谢产物、真菌毒素、过敏原等,是许多细菌、病毒或霉菌疾病的潜在来源。这些潜在致病源不仅会危害填埋场工人的身体健康,也会随空气远距离传输,对填埋场附近的居民产生负面影响。

### 3.1 卫生填埋场微生物气溶胶扩散特征研究

微生物气溶胶具有迁移特性,极易在空气中扩散和传播。区域范围内微生物气溶胶浓度的模拟主要针对一些气载传播的病毒和细菌,Gloster等[59]于1982年最早提出基于高斯烟羽扩散模式的扩散模型,模拟了近距离(10-20 km)致病气溶胶的扩散分布。对于微生物气溶胶扩散研究采用的模式主要有NAME、VetMet、NARAC、PDEMS、AIWM、MLCD和ALOHA等[60],这些模式最初用于核事故、火山灰和一些突发性污染泄露的扩散模拟和紧急响应,对其进行简单修改后用于模拟致病气溶胶的传播和扩散。

微生物气溶胶在三维空间内的扩散分布规律通常基于高斯扩散模型进行计算。由于微生物气溶

胶在扩散过程中会受到重力沉降、源衰减、生物衰减、气象因素等其他因素的影响,因此对高斯模型进行修正并运用到实际中。邱雄辉<sup>[61]</sup>利用修正后的高斯模型对污水厂内细菌气溶胶的空间传输特征进行模拟,模拟得到的气溶胶浓度值与实测值基本吻合。经修正后的高斯模型能快速获得空间任意点微生物气溶胶的模拟浓度值,并为健康风险评估提供依据。但目前关于卫生填埋场微生物气溶胶污染扩散模型的研究还比较缺乏。

### 3.2 卫生填埋场微生物气溶胶健康风险评估

微生物气溶胶的主要传播途径为人的呼吸吸入和皮肤接触,其引起的潜在危害与特定微生物的致病性、环境条件、暴露途径和宿主的免疫应答有关<sup>[62]</sup>。卫生填埋场的员工和邻近地区的居民最容易接触到有害的微生物气溶胶,受到健康威胁的程度主要取决于收集的废物数量和特征,废物堆放的类型,填埋时间、填埋技术以及气象因素等<sup>[63]</sup>。长期暴露在含有高浓度致病微生物的环境中,会导致人体产生多种疾病,如呼吸系统疾病、传染性疾病甚至癌症。细菌气溶胶可在上呼吸道和肺泡中积聚,刺激和感染鼻和喉部,引起填埋场工人和周围居民的过敏性肺炎反应。真菌气溶胶对人体健康的威胁则在于其产生的真菌孢子和挥发性真菌毒素,当环境中的真菌孢子浓度达到  $10^3-10^6$  CFU/m<sup>3</sup> 时,人体长时间暴露其中会造成外源性过敏性肺炎、过敏性鼻炎以及哮喘等疾病<sup>[64]</sup>。有研究报道,90%以上的肺部真菌疾病由烟曲霉引起,烟曲霉的小粒径分生孢子能在人体的呼吸系统中传播,从而引发肺部疾病<sup>[65]</sup>。具有致毒性的黑曲霉菌、镰刀菌属、青霉属等可能对其他生物产生细胞毒性、神经毒性、致畸或致癌作用。不仅如此,由于微生物气溶胶粒子在空气中的存活时间较长,且可以在风媒的作用下向周边环境扩散。因此,微生物气溶胶也被看作是加速传染性疾病传播的重要媒介之一,尤其是呼吸道传染病<sup>[66]</sup>。常见的呼吸道传染病包括流感、肺结核、白喉、麻疹、哮喘等,病人呼出的气流中包含大量携带病原体的飞沫和飞沫核等,病原体通过微生物气溶胶传播给易感染人群并造

成感染,2003年暴发的急性呼吸综合征(SARS)就是微生物气溶胶交叉传播的典型事件<sup>[67]</sup>。

#### 3.2.1 评估模型

微生物气溶胶主要通过皮肤接触和呼吸系统两种途径影响人体健康,因此采用微生物暴露评价方法对城市垃圾卫生填埋场空气中的微生物进行健康风险评估。健康风险评估包括危害鉴定、暴露评价、剂量-反应关系评价和风险表征<sup>[68]</sup>,其中暴露评价需结合各项暴露因子参数,如暴露剂量、人群特征等进行具体数值分析。许多国家已参考美国《暴露参数手册》编制了各国的暴露参数手册,我国也在2013年制定了适合中国国情的《中国人群暴露参数手册(成人卷)》<sup>[69-70]</sup>,为环境健康风险评估提供了保障,并已在环境微生物暴露风险评估中得到了广泛应用<sup>[71-72]</sup>。

在已报道的城市垃圾卫生填埋场空气微生物气溶胶中,只有少数菌种具有致癌风险且浓度较低,因此认为微生物整体为非致癌物,进入人体的暴露途径主要为呼吸系统吸入和皮肤接触吸收2种途径。根据美国环保署(United States Environmental Protection Agency, USEPA)制定的人体暴露风险评估方法<sup>[73]</sup>,对卫生填埋场微生物气溶胶的暴露风险建立剂量-反应关系评价模型。主要包括以下2种类型:呼吸系统吸入日平均暴露量:

$$ADD_{\text{呼吸}} = \frac{c \times IR \times EF \times ED_{\text{吸入}}}{BW \times AT} \quad (1)$$

皮肤接触日平均暴露量:

$$ADD_{\text{皮肤}} = \frac{c \times S_A \times P_C \times ED_{\text{皮肤}} \times 24}{BW \times AT} \quad (2)$$

式中:  $ADD_{\text{呼吸}}$  为呼吸系统平均暴露量, CFU/(d·kg);  $c$  为生物气溶胶的浓度, CFU/m<sup>3</sup>;  $IR$  为呼吸速率, m<sup>3</sup>/d;  $EF$  为暴露频率, d/a;  $ED_{\text{吸入}}$  为呼吸吸入途径的暴露年限, a;  $ADD_{\text{皮肤}}$  为皮肤接触途径平均暴露量, CFU/(d·kg);  $S_A$  为接触皮肤表面积, m<sup>2</sup>;  $P_C$  为皮肤渗透率, m/h;  $ED_{\text{皮肤}}$  为皮肤接触途径的暴露时间, a;  $BW$  为人体质量, kg;  $AT$  为预期寿命,以平均寿命计, d。暴露因子参数根据《中国人群暴露参数手册(成人卷)》进行选取,参数值见表1。

表 1 暴露量计算参数

Table 1 Calculating parameters of exposure

暴露参数 Exposure parameter	成年男性 Adult male	成年女性 Adult female
呼吸频率 Inhalation rate ( <i>IR</i> ) (m <sup>3</sup> /d)	19.02	14.17
暴露年限 Exposure duration ( <i>ED</i> ) (a)	24	
暴露频率 Exposure frequency ( <i>EF</i> ) (d/a)	250	
皮肤接触表面积 Skin contact area ( <i>S<sub>A</sub></i> ) (m <sup>2</sup> )	0.215	
皮肤渗透率 Permeability coefficient ( <i>P<sub>C</sub></i> ) (m/h)	0.001	
人体质量 Body weight ( <i>BW</i> ) (kg)	62.7	54.4
平均寿命 Average lifetime ( <i>AT</i> ) (d)	69.6×365	73.3×365

风险评价是在危害鉴定、暴露评价、剂量反应关系评价模型的基础上,计算暴露人群在不同接触条件下可能产生某种健康危害效应的发生概率。对微生物气溶胶中非致癌物对人体的健康风险(hazard quotient, *HQ*)采用非致癌风险指数法(hazard index, *HI*),即暴露剂量(average daily doses, *ADD<sub>i</sub>*)与参考剂量(reference doses, *RfD<sub>i</sub>*)相比较的方法进行评价,评估模型如下:

$$HQ_i = \frac{ADD_i}{RfD_i} \quad (3)$$

$$HI = \sum HQ_i \quad (4)$$

式中:*HQ<sub>i</sub>*为经由*i*途径暴露对人体的健康风险;*ADD<sub>i</sub>*为经由*i*途径暴露的日平均暴露量;*RfD<sub>i</sub>*为经由*i*途径的日暴露健康风险参考剂量,表示每天每千克人体摄取的微生物气溶胶中微生物不会引起人体不良反应的最大量;*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。

风险评估标准为:根据健康风险评估模型,当*HQ*<1或*HI*<1时,认为风险较小或可以忽略;当*HQ*>1或*HI*>1时,认为该条件下的微生物气溶胶对人体有非致癌风险。

### 3.2.2 风险评估

卫生填埋场微生物气溶胶的非致癌风险通过

计算暴露人群在两种暴露途径(呼吸系统吸入和皮肤接触吸收)下的风险商及总风险商获得。因为缺乏广泛使用的微生物浓度阈值或参考值,因此采用波兰部门委员会生物制剂专家组(EGBA)建议的职业暴露细菌和真菌微生物的浓度限值 5 000 CFU/m<sup>3</sup>计算 *RfD* 值<sup>[74]</sup>,以评估填埋场工人在微生物暴露下的健康风险。由于卫生填埋场中填埋区的微生物气溶胶浓度最高,因此计算中采用的微生物暴露浓度为各卫生填埋场填埋区空气细菌和真菌浓度的平均值,分别为 6 000 CFU/m<sup>3</sup>和 1 500 CFU/m<sup>3</sup><sup>[6,11,36]</sup>。

基于以上平均浓度值,采用健康风险评估模型对不同途径的暴露风险商进行计算的结果表明,不同暴露途径的风险商有所不同,经呼吸途径的风险商远大于经皮肤接触途径的风险商。空气细菌和真菌经呼吸系统吸入暴露的风险商是 0.018–0.086,经皮肤接触的暴露风险商是 2.34×10<sup>-8</sup>–1.02×10<sup>-7</sup>。不同暴露人群的风险商也有所差异,空气细菌和真菌经呼吸系统途径的风险商从大到小为成年男性、成年女性,分别为 0.086、0.021 和 0.070、0.018,经皮肤接触途径的风险商从大到小为成年女性、成年男性,分别为 1.02×10<sup>-7</sup>、2.55×10<sup>-8</sup>和 9.36×10<sup>-8</sup>、2.34×10<sup>-8</sup>。因此,从暴露人群来看,成年男性经呼吸途径的风险商大于成年女性,成年女性经皮肤接触途径的风险商大于成年男性,这与其他研究中的结果一致<sup>[75-76]</sup>。此外,暴露风险商还与暴露场所、暴露频率、环境条件等因素相关。

卫生填埋场微生物气溶胶经呼吸系统吸入和皮肤接触吸收两种途径暴露的总风险商 *HI* 约等于呼吸途径的风险商 *HQ*<sub>呼吸</sub>,由于不同暴露人群在不同暴露途径下的暴露风险商均小于 1,因此认为填埋场工人对卫生填埋场微生物气溶胶的暴露风险较小。但由于研究中使用中国居民体质统计资料对工人的暴露风险进行评价,所采用的暴露参数与不同地区填埋场工人的实际情况存在一定的偏差,即评价参数的不适用性影响了风险评价的结果。并且微生物气溶胶的潜在致病性不容忽视,因此卫生填埋场的工人仍需要做好防护工作,尤其在填埋作业

区或渗滤液处理区等微生物浓度较高的工作区域,工人应佩戴防护工具,以减少致病菌的暴露。

#### 4 卫生填埋场微生物气溶胶的研究展望

虽然目前对卫生填埋场微生物气溶胶的污染特征及潜在风险已经有了一定的认识,但对其产生机制、逸散过程及途径、潜在致病性物质及致病性风险评估、控制策略等的认识还比较有限。下述问题将是今后进一步研究的重点:(1) 卫生填埋场微生物气溶胶的源、汇及转化。卫生填埋场不同功能区微生物气溶胶的产生过程、传播途径与该区域的作业特点、微生物气溶胶自身特征密切相关,阐明微生物气溶胶的产生机制及逸散规律,对后续源头削减及过程控制技术的研发具有重要意义。(2) 卫生填埋场微生物气溶胶的污染扩散模型及预测。目前关于卫生填埋场微生物气溶胶污染扩散模型的研究还比较缺乏。微生物气溶胶扩散模型能够模拟致病气溶胶的传播和扩散,以快速获得微生物气溶胶在空间中的模拟浓度值,为卫生填埋场微生物气溶胶的健康风险研究提供基础。(3) 卫生填埋场微生物气溶胶的健康风险及评价体系。目前关于卫生填埋场微生物气溶胶中的致病因素及允许暴露水平的相关标准还比较缺乏。深入研究其中的致病物质,建立风险评价体系,对于全面、系统评价卫生填埋场微生物气溶胶对区域环境及人体健康的影响是非常必要的。(4) 卫生填埋场微生物气溶胶的控制策略研究。目前还没有关于卫生填埋场微生物气溶胶的相关控制标准,也没有针对性的控制技术。建立控制指标体系,形成控制标准,研发适宜的控制技术,将是卫生填埋场微生物气溶胶污染控制的重要目标。

#### REFERENCES

- [1] Guo MS, Liu HY. Discussion on municipal waste sanitary landfill site processing design[J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2003, 11(3): 137-140 (in Chinese)  
郭茂盛, 刘海云. 浅谈城市垃圾卫生填埋的工艺设计[J]. *环境卫生工程*, 2003, 11(3): 137-140
- [2] Jin HQ. Study on design principle and scheme of municipal solid waste landfill[D]. Xi'an: Master's Thesis of Chang'an University, 2010 (in Chinese)  
靳红强. 城市生活垃圾卫生填埋场设计原理与设计方案的探讨[D]. 西安: 长安大学硕士学位论文, 2010
- [3] Liang J, Xia LJ. Health risks of microbial aerosols in urban domestic waste landfills[A]//Annual Academic Conference of Chinese Society of Environmental Sciences in 2009[C]. Wuhan: Chinese Society of Environmental Sciences, 2009: 5 (in Chinese)  
梁嘉, 夏立江. 城市生活垃圾堆填区微生物气溶胶的健康风险[A]//中国环境科学学会 2009 年学术年会论文集(第二卷)[C]. 武汉: 中国环境科学学会, 2009: 5
- [4] Douwes J, Thorne P, Pearce N, et al. Bioaerosol health effects and exposure assessment: progress and prospects[J]. *The Annals of Occupational Hygiene*, 2003, 47(3): 187-200
- [5] Zhang J, Xia LJ, Du WL, et al. Time-space distribution characteristics of airborne microbes' concentration in a municipal landfill site[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(6): 1332-1336 (in Chinese)  
张婧, 夏立江, 杜文利, 等. 垃圾填埋场空气微生物浓度的时空分布特征[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(6): 1332-1336
- [6] Xu HF, Liu T, Li L, et al. Concentration and size distribution of bioaerosols in a closed landfill[J]. *Environmental Science and Technology*, 2016, 39(12): 124-127,143 (in Chinese)  
许鸿飞, 刘婷, 李露, 等. 封场后垃圾填埋场的生物气溶胶浓度及粒径分布[J]. *环境科学与技术*, 2016, 39(12): 124-127,143
- [7] Frączek K, Różycki H, Ropek D. Statistical analyses of bioaerosol concentration at municipal landfill site[J]. *Ecological Chemistry and Engineering S*, 2014, 21(2): 229-243
- [8] Buczyńska A, Cyprowski M, Szadkowska-Stańczyk I. Biological hazards in air at municipal waste landfills[J]. *Medycyna Pracy*, 2006, 57(6): 531-535
- [9] Ma JW, Yang KX, Chai FG, 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 (in Chinese)  
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
- [10] Morgado Gamero WB, Ramírez MC, Parody A, et al. Concentrations and size distributions of fungal bioaerosols in a municipal landfill[A]//Proceedings of the 3rd International Conference on Data Mining and Big Data[C]. Shanghai, China: Springer, 2018: 244-253
- [11] Cyprowski M, Ławniczek-Wałczyk A, Gołofit-Szymczak M, et al. Bacterial aerosols in a municipal landfill environment[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 660: 288-296

- [12] Frączek K, Kozdrój J, Górny RL, et al. Fungal air contamination in distinct sites within a municipal landfill area[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2017, 14(12): 2637-2648
- [13] Zhang J, Xia LJ, Du WL, et al. Community structure and time-space distribution characteristic of airborne fungi in a municipal landfill site[J]. *Environmental Science*, 2009, 30(11): 3184-3189 (in Chinese)  
张婧, 夏立江, 杜文利, 等. 垃圾填埋场空气真菌群落结构和时空分布特征[J]. *环境科学*, 2009, 30(11): 3184-3189
- [14] 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
- [15] Małecką-Adamowicz M, Kaczanowska J, Donderski W. The impact of a landfill site in Żółwin-Wypaleniska on the microbiological quality of the air[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2007, 16(1): 101-107
- [16] Meng L, Xiong XY, Ma J. Recent status of refuse yard leachate in this country[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2003, 29(10): 26-29 (in Chinese)  
孟了, 熊向隰, 马箭. 我国垃圾渗滤液处理现状及存在问题[J]. *给水排水*, 2003, 29(10): 26-29
- [17] Wu LN, Tu NN, Cheng JK, et al. Research of the characteristics and treatment technology of landfill leachate[J]. *Science Technology and Engineering*, 2014, 14(31): 136-143 (in Chinese)  
吴莉娜, 涂楠楠, 程继坤, 等. 垃圾渗滤液水质特性和处理技术研究[J]. *科学技术与工程*, 2014, 14(31): 136-143
- [18] Renou S, Givaudan JG, Poulain S, et al. Landfill leachate treatment: review and opportunity[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 150(3): 468-493
- [19] Wang YJ, Li L, Xu GS, et al. The application and characteristics of technologies for bioaerosols collection[J]. *Microbiology China*, 2017, 44(3): 701-709 (in Chinese)  
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, 44(3): 701-709
- [20] Xu GS, Han YP, Li L, et al. Characterization and source analysis of indoor/outdoor culturable airborne bacteria in a municipal wastewater treatment plant[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2018, 74: 71-78
- [21] Han YP, Wang YJ, Li L, et al. Bacterial population and chemicals in bioaerosols from indoor environment: sludge dewatering houses in nine municipal wastewater treatment plants[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 618: 469-478
- [22] Li L, Han YP, Liu JX. Assessing genetic structure, diversity of bacterial aerosol from aeration system in an oxidation ditch wastewater treatment plant by culture methods and bio-molecular tools[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, 185(1): 603-613
- [23] Zhang J, Xia LJ, Du WL, et al. An investigation on microbe aerosol size distribution in a waste sanitary landfill site[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2009, 3(9): 1620-1624 (in Chinese)  
张婧, 夏立江, 杜文利, 等. 垃圾填埋场微生物气溶胶粒径分布研究[J]. *环境工程学报*, 2009, 3(9): 1620-1624
- [24] Zhang J. Characteristics and distribution of airborne microbial contamination in landfills[D]. Beijing: Master's Thesis of China Agricultural University, 2007 (in Chinese)  
张婧. 垃圾填埋场空气微生物污染特性及分布规律[D]. 北京: 中国农业大学硕士学位论文, 2007
- [25] Löndahl J, Pagels J, Swietlicki E, et al. A set-up for field studies of respiratory tract deposition of fine and ultrafine particles in humans[J]. *Journal of Aerosol Science*, 2006, 37(9): 1152-1163
- [26] Li WX, Lu R, Xie ZS, 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 (in Chinese)  
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
- [27] Han C, Xie MC, Qi JH, et al. Size distribution characteristics of culturable bioaerosols in relation to air quality levels in Qingdao[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, 29(9): 1264-1271 (in Chinese)  
韩晨, 谢绵测, 祁建华, 等. 青岛市不同空气质量下可培养生物气溶胶分布特征及影响因素[J]. *环境科学研究*, 2016, 29(9): 1264-1271
- [28] Xu ZQ, Yao MS. Monitoring of bioaerosol inhalation risks in different environments using a six-stage Andersen sampler and the PCR-DGGE method[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, 185(5): 3993-4003
- [29] Xu WT, Guo X, Luo YB, et al. Research progress on analysis methods of diversity of microbial flora[J]. *Food Science*, 2009, 30(7): 258-265 (in Chinese)  
许文涛, 郭星, 罗云波, 等. 微生物菌群多样性分析方法的研究进展[J]. *食品科学*, 2009, 30(7): 258-265
- [30] Han YP, Zhang MZ, Li L, et al. Microbial population structure in near-ground aerosols during fog-haze days in northern China[J]. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 2017, 10(9): 1113-1121
- [31] Han YP, Li L, Liu JX. Characterization of the airborne bacteria community at different distances from the rotating brushes in a wastewater treatment plant by 16S rRNA gene clone libraries[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, 25(1): 5-15
- [32] Han YP, Li L, Liu JX, et al. Microbial structure and chemical components of aerosols caused by rotating brushes in a wastewater treatment plant[J]. *Environmental Science*

- and Pollution Research, 2012, 19(9): 4097-4108
- [33] Yue B, Xia LJ, Du WL, et al. Airborne microorganism pollution in certain municipal landfill in Beijing[J]. China Environmental Science, 2006, 26(S1): 102-105 (in Chinese)  
岳冰, 夏立江, 杜文利, 等. 北京某垃圾填埋场空气微生物污染状况[J]. 中国环境科学, 2006, 26(S1): 102-105
- [34] Agarwal S, Mandal P, Srivastava A. Quantification and characterization of size-segregated bioaerosols at municipal solid waste dumping site in Delhi[J]. Procedia Environmental Sciences, 2016, 35: 400-407
- [35] Liang YM, Zhang LQ, Wang YC, et al. Airborne microorganism pollution and its assessment in certain municipal solid waste landfill[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(5): 1073-1077 (in Chinese)  
梁英梅, 张立秋, 王跃超, 等. 垃圾填埋场空气微生物污染及评价[J]. 生态环境学报, 2010, 19(5): 1073-1077
- [36] Kalwasińska A, Burkowska A, Swiontek Brzezinska M. Exposure of workers of municipal landfill site to bacterial and fungal aerosol[J]. Clean-Soil, Air, Water, 2014, 42(10): 1337-1343
- [37] Yao L. Advances in research on pathogenic toxins of *Staphylococcus aureus*[J]. International Journal of Laboratory Medicine, 2014, 35(22): 3080-3082 (in Chinese)  
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
- [38] Kaarakainen P, Meklin T, Rintala H, et al. Seasonal variation in airborne microbial concentrations and diversity at landfill, urban and rural sites[J]. Clean-Soil, Air, Water, 2008, 36(7): 556-563
- [39] Breza-Boruta B. Bioaerosols of the municipal waste landfill site as a source of microbiological air pollution and health hazard[J]. Ecological Chemistry and Engineering. A, 2012, 19(8): 851-862
- [40] Gladding TL, Coggins PC. Exposure to microorganisms and health effects of working in UK materials recovery facilities — a preliminary report[J]. Annals of Agricultural and Environmental Medicine, 1997, 4(1): 137-141
- [41] Kanaani H, Hargreaves M, Ristovski Z, et al. Deposition rates of fungal spores in indoor environments, factors effecting them and comparison with non-biological aerosols[J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(30): 7141-7154
- [42] Ji SS, Xia LJ, Du WL, 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 (in Chinese)  
纪思思, 夏立江, 杜文利, 等. 北京某垃圾填埋场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
- [43] Qian SC. Studies on microbial aerosol at different functional regions in Qingdao[D]. Qingdao: Master's Thesis of Qingdao University of Technology, 2012 (in Chinese)  
钱生财. 青岛市不同功能区微生物气溶胶研究[D]. 青岛: 青岛理工大学硕士学位论文, 2012
- [44] Song ZW, Wang L, Ren J, et al. Concentration distribution and characteristics of airborne microbes in spring and summer in Qingdao[J]. Journal of Qingdao Technological University, 2014, 35(3): 1-6,23 (in Chinese)  
宋志文, 王琳, 任杰, 等. 青岛市区春、夏季生物气溶胶浓度分布及特征[J]. 青岛理工大学学报, 2014, 35(3): 1-6,23
- [45] Chen MX, Jin LS, Sun ZH, et al. Effects of bioaerosol concentration, flux and environmental factors[J]. Progress in Natural Science, 2001, 11(9): 939-944 (in Chinese)  
陈铭夏, 金龙山, 孙振海, 等. 生物气溶胶浓度、通量及环境因素的影响[J]. 自然科学进展, 2001, 11(9): 939-944
- [46] Reinthaler FF, Marth E, Eibel U, et al. The assessment of airborne microorganisms in large-scale composting facilities and their immediate surroundings[J]. Aerobiologia, 1997, 13(3): 167-175
- [47] Huang CY, Lee CC, Li FC, et al. The seasonal distribution of bioaerosols in municipal landfill sites: a 3-yr study[J]. Atmospheric Environment, 2002, 36(27): 4385-4395
- [48] Pasanen AL, Pasanen P, Jantunen MJ, et al. Significance of air humidity and air velocity for fungal spore release into the air[J]. Atmospheric Environment. Part A. General Topics, 1991, 25(2): 459-462
- [49] Li DW, Kendrick B. Functional relationships between airborne fungal spores and environmental factors in Kitchener-Waterloo, Ontario, as detected by canonical correspondence analysis[J]. Grana, 1994, 33(3): 166-176
- [50] Nielsen BH, Nielsen EM, Breum NO. Seasonal variation in bioaerosol exposure during biowaste collection and measurements of leaked percolate[J]. Waste Management & Research, 2000, 18(1): 64-72
- [51] Song S. Study on distribution characteristics of atmospheric microbial aerosols in different functional areas and key polluted areas in Lanzhou city[D]. Lanzhou: Master's Thesis of Lanzhou Jiaotong University, 2017 (in Chinese)  
宋森. 兰州不同功能区及重点污染区大气微生物气溶胶分布特征研究[D]. 兰州: 兰州交通大学硕士学位论文, 2017
- [52] Mansour FA, El-Dohlob SM, Abdel Hameed AA, et al. Microorganisms in the air over a bio-solid waste landfill in Egypt[J]. Journal of American Science, 2012, 8(4): 573-579
- [53] Pankhurst LJ, Deacon LJ, Liu J, et al. Spatial variations in airborne microorganism and endotoxin concentrations at green waste composting facilities[J]. International Journal of Hygiene and Environmental Health, 2011, 214(5): 376-383
- [54] Schlosser O, Robert S, Debeaupuis C. *Aspergillus fumigatus* and mesophilic moulds in air in the surrounding environment downwind of non-hazardous waste landfill sites[J]. International Journal of Hygiene and Environmental Health, 2016, 219(3): 239-251
- [55] Tong YY, Lighthart B. Effect of simulated solar radiation

- on mixed outdoor atmospheric bacterial populations[J]. FEMS Microbiology Ecology, 1998, 26(4): 311-316
- [56] Roodbari A, Naddafi K, Javid A. Measurements of bioaerosols in the air around the facilities of waste collection and disposal[J]. Environment Protection Engineering, 2013, 39(4): 105-112
- [57] Levetin E, Dorsey K. Contribution of leaf surface fungi to the air spora[J]. Aerobiologia, 2006, 22(1): 3-12
- [58] Hu QX, Che FX, Li JB. Effect of rain on concentration and distribution of in bacterial particules atmosphere[J]. Chinese Journal of Public Health, 1991, 10(3): 138-140 (in Chinese)  
胡庆轩, 车凤翔, 李军保. 降雨对大气细菌粒子浓度及浓度分布的影响[J]. 中国公共卫生学报, 1991, 10(3): 138-140
- [59] Gloster J, Sellers RF, Donaldson AL. Long distance transport of foot-and-mouth disease virus over the sea[J]. The Veterinary Record, 1982, 110(3): 47-52
- [60] Liu L, Wang TJ, Jiang ZQ, et al. Numerical study on bioaerosol dispersion over southeast coast of China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(11): 2670-2683 (in Chinese)  
刘丽, 王体健, 蒋自强, 等. 东南沿海生物气溶胶的扩散模拟研究[J]. 环境科学学报, 2012, 32(11): 2670-2683
- [61] Qiu XH. Emission and diffusion characteristic, health risk assessment of microbial aerosols generated by wastewater treatment plant (WWTP)[D]. Xi'an: Master's Thesis of Chang'an University, 2012 (in Chinese)  
邱雄辉. 污水厂微生物气溶胶的逸散特征、传输特征及健康风险研究[D]. 西安: 长安大学硕士学位论文, 2012
- [62] Kummer V, Thiel WR. Bioaerosols — sources and control measures[J]. International Journal of Hygiene and Environmental Health, 2008, 211(3/4): 299-307
- [63] Marchand G, Lavoie J, Lazure L. Evaluation of bioaerosols in a municipal solid waste recycling and composting plant[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 1995, 45(10): 778-781
- [64] Tolvanen OK, Hänninen KI. Occupational hygiene in a waste incineration plant[J]. Waste Management, 2005, 25(5): 519-529
- [65] Latgé JP. The pathobiology of *Aspergillus fumigatus*[J]. Trends in Microbiology, 2001, 8(9): 382-389
- [66] Qian H, Zhang CY, Zheng XH. The function of aerosols in transmitting and infecting of respiratory infectious diseases and its risk prediction[J]. Chinese Science Bulletin, 2018, 63(10): 931-939 (in Chinese)  
钱华, 章重洋, 郑晓红. 呼吸道传染病气溶胶传染致病机理及预测方法[J]. 科学通报, 2018, 63(10): 931-939
- [67] Zhong NS, Zheng BJ, Li YM, et al. Epidemiology and cause of severe acute respiratory syndrome (SARS) in Guangdong, People's Republic of China, in February, 2003[J]. The Lancet, 2003, 362(9393): 1353-1358
- [68] Zhang L, Wang WY, Liao YF. Research progress on urban air quality health risk assessment[J]. Progress in Geography, 2006, 25(3): 39-47 (in Chinese)  
张莉, 王五一, 廖永丰. 城市空气质量健康风险评估研究进展[J]. 地理科学进展, 2006, 25(3): 39-47
- [69] Ministry of Environmental Protection. Exposure Factors Handbook of Chinese Population (Adults)[M]. Beijing: China Environmental Press, 2013 (in Chinese)  
环境保护部. 中国人群暴露参数手册(成人卷)[M]. 北京: 中国环境出版社, 2013
- [70] Zhao XG, Duan XL. Highlights of the Chinese Exposure Factors Handbook (Adults)[M]. Beijing: China Environmental Press, 2014 (in Chinese)  
赵秀阁, 段小丽. 中国人群暴露参数手册(成人卷)概要[M]. 北京: 中国环境出版社, 2014
- [71] Han YP, Yang KX, Yang T, et al. Bioaerosols emission and exposure risk of a wastewater treatment plant with A<sup>2</sup>O treatment process[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, 169: 161-168
- [72] Yang T, Han YP, Liu JX, et al. Aerosols from a wastewater treatment plant using oxidation ditch process: characteristics, source apportionment, and exposure risks[J]. Environmental Pollution, 2019, 250: 627-638
- [73] United States Environmental Protection Agency. Risk assessment guidance for superfund volume I: human health evaluation manual (Part A)[R]. Washington, DC: Office of Emergency and Remedial Response, U.S. Environmental Protection Agency, 1989: 236-322
- [74] Górny R, Cyprowski M, Ławniczek-Wałczyk A, et al. Biohazards in the indoor environment—a role for threshold limit values in exposure assessment[A]//Dudzińska MR. Management of Indoor Air Quality[M]. Boca Raton: CRC Press, 2011: 1-20
- [75] Qiu XH, Li YP, Zhang YR, et al. Exposure hazard assessment of microbial aerosol generated in sewage treatment plant[J]. Journal of Safety and Environment, 2012, 12(3): 89-92 (in Chinese)  
邱雄辉, 李彦鹏, 张燕茹, 等. 污水处理厂微生物气溶胶的暴露风险评价[J]. 安全与环境学报, 2012, 12(3): 89-92
- [76] Wen NJ. Study on exposure risk assessment and control of bioaerosol and endotoxin in campus environment[D]. Tianjin: Master's Thesis of Tianjin University, 2017 (in Chinese)  
温暖家. 校园环境生物气溶胶与内毒素的暴露风险评价及控制研究[D]. 天津: 天津大学硕士学位论文, 2017