



专论与综述

微生物在恶臭污染治理中的研究及应用

余鹏举^{1,2} 曹先贺^{1,2} 王宏志³ 李少杰^{*1,2}

1 中国科学院微生物研究所 北京 100101

2 中国科学院大学 北京 101408

3 新疆河润水业有限责任公司 新疆 乌鲁木齐 830000

摘 要: 近年来, 随着人们对恶臭污染重视程度的不断提高, 针对恶臭气体控制和治理的研究也逐渐增多, 其中微生物脱臭因其成本低、处理设备要求简易、基本无二次污染等较物理除臭和化学除臭无可比拟的优点, 成为研究人员的关注热点。本文概述了微生物脱臭的过程和机理, 主要介绍微生物脱臭技术分类和优缺点比较, 以及微生物脱臭在恶臭污染治理中的研究与应用现状, 重点介绍了生物洗涤法、生物过滤法、生物滴滤法和生物菌剂法 4 种微生物脱臭技术在畜禽养殖、垃圾处理 and 污水处理引起的恶臭污染治理中的研究与应用现状, 最后对微生物脱臭的发展方向提出建议: 加大对高效脱臭微生物资源的深度挖掘及选育工作的投入; 加深对微生物在除臭过程中菌群结构的时空演变规律和对恶臭物质代谢原理及降解动力学研究; 加强对当前微生物脱臭技术及工艺的改进和创新。

关键词: 微生物脱臭, 恶臭污染, 除臭技术, 养殖业, 垃圾处理, 污水处理

Microbial deodorization: mechanisms and application

YU Pengju^{1,2} CAO Xianhe^{1,2} WANG Hongzhi³ LI Shaojie^{*1,2}

1 Institute of Microbiology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China

3 Xinjiang Herun Water Industry Limited Company, Urumqi, Xinjiang 830000, China

Abstract: In recent years, with the increasing attention to odor pollution, the research on the control of malodorous gas has become a hot field. Compared with physical deodorization and chemical deodorization, microbial deodorization has many advantages, such as low input cost, simple equipment and less secondary pollution. Microbial deodorization has been widely in livestock farms, landfill, and sewage-treatment plant. Four main microbial deodorization techniques, including biological washing, biofiltration, biotrickling filtration and microbial agent addition, are currently used. However, each of these techniques has its own advantages and disadvantages. The processes and mechanisms of microbial deodorization have been intensively studied but the knowledge on them is still limited. Future research in

Foundation items: National Key Research and Development Program of China (2018YFD0500202); Major Scientific and Technological Innovation Projects in Shandong Province (2019JZZY010712)

***Corresponding author:** Tel: 86-10-64806094; E-mail: lisj@im.ac.cn

Received: 01-04-2020; **Accepted:** 24-06-2020; **Published online:** 29-10-2020

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFD0500202); 山东省重大科技创新工程项目(2019JZZY010712)

***通信作者:** Tel: 010-64806094; E-mail: lisj@im.ac.cn

收稿日期: 2020-04-01; **接受日期:** 2020-06-24; **网络首发日期:** 2020-10-29

microbial deodorization might focus on: 1) screening microorganisms with high-efficiency deodorizing performance; 2) investigating the spatial and temporal dynamics of microbial community in the deodorization process and the metabolism and degradation kinetics of odorous substances; 3) improving techniques of microbial deodorization.

Keywords: microbial deodorization, odor pollution, deodorization technology, animal feeding industry, refuse disposal, sewage treatment

恶臭污染是指由恶臭气体排放引起的对嗅觉器官产生刺激,进而导致人体产生不愉快的反应甚至身心受损以及破坏生活环境质量的现象^[1-2]。随着人们环保意识的提高,对恶臭引起的污染问题也越来越重视,根据生态环境部通报的 2019 年度全国“12369”环保举报情况来看,大气污染举报高居首位,占有所有污染举报的 50.8%,其中恶臭异味举报又占涉气举报的 41.0%,排在涉气举报的首位(http://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk15/202005/t20200513_779050.html)。相关研究表明,畜禽养殖、垃圾处理和污水处理已成为恶臭污染投诉的三大主要来源^[3-6]。对某市污水处理厂全部工作人员的问卷调查显示:约有 85%的受访工人存在心理健康问题,另有 42.2%的受访工人存在呼吸道粘膜刺激症状^[7]。由此可见,恶臭污染已不仅是困扰居民生活的突出环境问题,而且严重影响恶臭污染高发行业工作人员的健康。

早在 20 世纪 50 年代,发达国家就开始了恶臭污染治理与控制的研究,取得了较为丰富的经验,其中以日本、德国和美国效果最为显著^[8-9]。我国在恶臭污染物治理和控制方面起步较晚,1993 年才制定了第一部国家层面的《恶臭污染物排放标准》(GB14554-1993)^[10],但随着人民群众对美好生活环境的要求越来越高,该标准受控物质少、排放限值不合理、监测技术方法落后等问题逐步显现,已无法满足环境管理需求。目前针对臭气处理的常用方法主要分为三大类,分别是活性炭吸附、稀释扩散等为代表的物理法,以催化燃烧、化学洗涤吸收等为代表的化学法,以微生物吸收降解为代表的生物法^[11-13]。其中,微生物脱臭法因其成本低、处理效率高、设备简单、

基本没有二次污染等优点^[14-15],在恶臭污染治理中表现出良好的应用前景。本文概述微生物脱臭的过程、机理以及主要的微生物脱臭技术类别与各自的优缺点,重点介绍生物洗涤法、生物过滤法、生物滴滤法和生物菌剂法 4 种微生物脱臭技术在由畜禽养殖、垃圾处理和污水处理引起的恶臭污染治理中的研究与应用现状(全文梗概如图 1 所示),最后对微生物脱臭的发展方向提出建议。

1 微生物脱臭的过程、机理及主要技术

1.1 微生物脱臭的过程和机理

微生物脱臭,即应用自然界中存在或经过人工驯育、改造的微生物,通过从源头上抑制恶臭物质的产生或将恶臭物质代谢成无臭无害的产物,以达到脱臭的目的。微生物脱臭是一个由气体扩散和生化反应综合作用的结果。水溶性恶臭气体物质的脱臭过程主要可分为 3 个阶段:第 1 阶段,恶臭气体与水接触并溶于水,完成由气相到液相的扩散;第 2 阶段,溶于水的恶臭成分在浓度梯度差推动作用和微生物的吸附作用下被吸收进入微生物细胞;第 3 阶段,微生物将恶臭成分作为营养或能源物质进行代谢利用,进而消除恶臭成分,达到脱臭目的^[13,16]。对于疏水性的恶臭气体物质,或直接由气相转移至生物膜相,或先经由一个中间相(如有机相、固相)再被微生物吸收进入细胞内,继而被代谢去除^[17-18]。

目前,微生物脱臭的机理研究主要是针对氨气、硫化氢和部分挥发性有机恶臭物质(Volatile Organic Compounds, VOCs)如含硫有机恶臭物质,其中氨气和硫化氢是国家生态环境部规定的 8 种恶臭污染物中的 2 种,而挥发性有机恶臭物质虽然

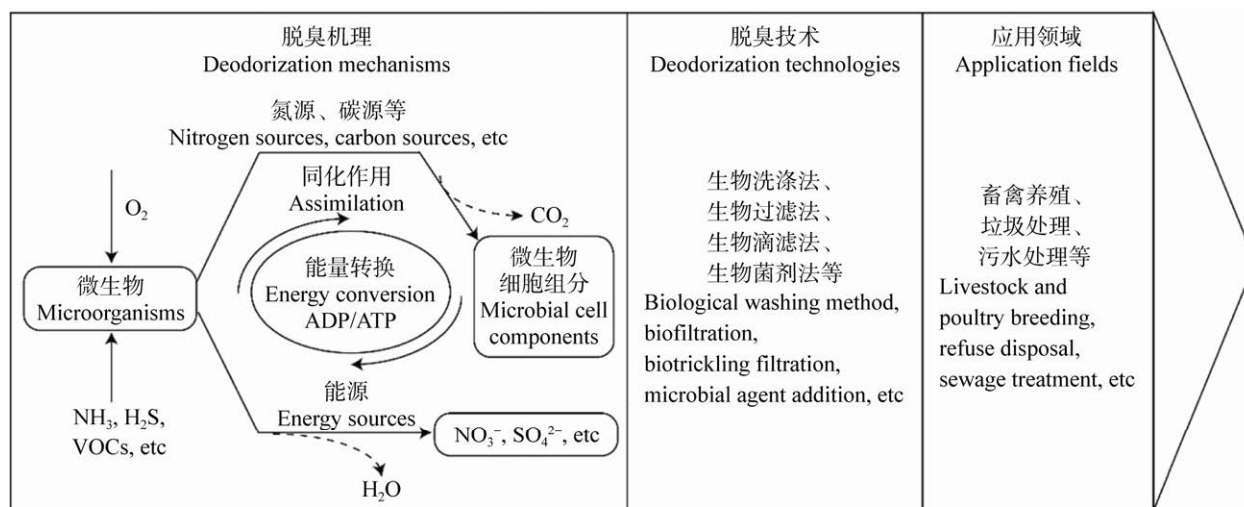


图 1 微生物脱臭的机理、技术及应用领域

Figure 1 The mechanisms, technologies and application fields of microbial deodorization

通常浓度较低却对恶臭强度贡献很大, 尤其含硫有机恶臭物质是 VOCs 中重要的致臭因子。氨气的去除, 一方面可经过微生物的氨同化作用、硝化作用将氨转化成有机氮或硝态氮的形式, 该机制最常用于以保氮为目的的堆肥除臭过程中^[19]; 另一方面, 也可经过微生物的生化作用最终转化成气态氮^[20]。依据传统理论, 氨气转化成氮气一般涉及 3 个步骤: (1) 氨氧化细菌阶段, 氨气在氨单加氧酶和羟胺氧化酶的作用下转化为亚硝酸盐; (2) 亚硝酸盐氧化细菌阶段, 亚硝酸盐在亚硝酸盐氧化还原酶催化下氧化为硝酸盐; (3) 反硝化细菌阶段, 硝酸盐依次在硝酸盐还原酶、亚硝酸盐还原酶、一氧化氮还原酶和一氧化二氮还原酶的作用下最终异化还原为氮气。这 3 个步骤分别由氨氧化细菌 (Ammonia-Oxidizing Bacteria)、亚硝酸盐氧化细菌 (Nitrite-Oxidizing Bacteria) 和反硝化细菌 (Denitrifying Bacteria) 完成。近年来, 随着异养硝化-好氧反硝化菌 (Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrifying Bacteria)、厌氧氨氧化菌 (Anaerobic Ammonia-Oxidizing Bacteria) 和完全氨氧化菌

(Complete Ammonia-Oxidizing Bacteria) 等新型脱氮微生物的不断发现, 氨气转化成氮气的过程也变得更加复杂和多样。硫化氢、甲硫醚和甲硫醇等含硫恶臭物质的去除, 根据相关研究报道归纳出了一个常见含硫恶臭气体的微生物代谢途径网, 如图 2 所示。含硫恶臭物质中硫元素的走向是硫酸盐, 总体可分为 3 个途径: (1) 经硫化氢, 然后在硫氧化菌 (Sulfur-Oxidizing Bacteria) 的作用下通过无机硫生物代谢途径 ($S^{2-} \rightarrow S^0 \rightarrow SO_3^{2-}$) 到硫酸盐^[21-22]; (2) 经甲硫醚, 然后在假单胞菌 (*Pseudomonas* spp.) 等有机 C₁-硫化合物降解菌的作用下被脱氢酶或单加氧酶依次催化氧化为二甲基亚砷、二甲基砷、甲磺酸, 最终到硫酸盐^[22-23]; (3) 经由二甲基三硫这个中间体, 并最终转变为硫酸盐^[24-25], 该途径是依据中间代谢产物检测和同位素追踪的结果提出的, 其中具体代谢通路等仍需进一步探究。总的来说, 这 3 个硫元素的微生物代谢途径其实都是将有机硫恶臭物质通过脱硫等作用转化成硫酸盐的形式, 从而达到了除臭的效果。硫酸盐也可再通过同化硫酸盐还原过程被微生物利用, 进而转化为生物体有机硫^[26]。

表 1 微生物脱臭主要工艺技术及优缺点
Table 1 Main microbial deodorization technologies and their advantages and disadvantages

技术(常见工艺) Techniques (main processes)	原理 Principle	优势 Advantages	劣势 Disadvantages
生物洗涤法 (生物洗涤塔、 生物涤气器) Biological washing method (biological washing tower, bioscrubber)	臭气从洗涤吸收单元底部进入, 被从顶部喷淋下的生物洗涤液吸收, 然后随生物洗涤液回流至再生反应池中被微生物进一步降解 The odor enters from the bottom of the washing absorption unit, is absorbed by the biological washing liquid sprayed from the top, and is removed by microorganisms in the regeneration reaction tank	可以处理大流量气体, 抗冲击负荷能力强, 填料不易堵塞, 处理单元易于控制 Large capacity of air treatment; strong impact load resistance; not easy to be plugged; easy to control	只对水溶解性好的臭气有较高去除效率, 需处理剩余污泥, 投资和运行费用相对较高 Only effective for water soluble odors; needs to dispose excess sludge; high investment and operation cost
生物过滤法 (生物滤池、 生物覆盖物) Biofiltration method (biological filter, biocover)	臭气从滤床底部由下往上穿过滤床, 恶臭物质从气相转移至生物层, 被附着生长在滤料上的微生物通过代谢去除 Stink air passes through the filter bed and the odor substances are metabolized by microorganisms attached to the filter materials	除臭效率高, 设备简单, 运行费用低, 不需要外加营养物 High efficiency; simple equipment; low operating cost; no need for nutrient addition	反应条件不易控制, 占地面积大, 生物滤池的填料易堵塞且需定期更换 Reaction conditions are not easy to control; the equipment occupies a large area; the packing of biofilter is easily blocked and needs to be regularly replaced
生物滴滤法 (生物滴滤塔、 生物滴滤器) Biotrickling filtration method (biological drip filter tower, biotrickling filter)	臭气从反应器的填料区底部进入, 被填料上附着生长的微生物代谢去除, 微生物所需的营养通过一个液体喷淋循环系统提供 The odor is removed during passing through packing materials attached with microbes. Nutrients are supplied by a liquid circulation system with a spray on the reactor top	可承受较大污染负荷, 除臭效果好, 不用更换滤料 Can withstand large pollution load; good deodorization effect; no need to replace filter material	需要一定气体停留时间, 需外加营养物, 运行维护费用相对较高 A certain gas residence time is required; nutrient addition is required; the operation and maintenance cost is relatively high
生物菌剂法 (微生物菌剂、 饲料添加剂) Microbial agent method (microbial agent, feed additive)	将除臭微生物直接施用或与特定载体或填充物制备成菌剂后向恶臭源头施放, 进行原位除臭 Microorganisms with or without certain carriers are applied to the odor source for <i>in-situ</i> deodorization	应用范围广, 操作简单, 一次性投入成本低 Wide range of applications; easy to operate; low cost of one-time input	稳定多效的复合型菌剂较少 Few microbial agents have stable multi-effects

鸡排泄物中大肠杆菌的数量和氨气、硫化氢以及总硫醇的释放量均随益生菌添加量的增大呈线性下降, 而其中的乳酸菌数量却呈线性增加, 推测这可能是由于益生菌的添加调节了肉鸡肠道菌群的结构, 使其对饲料的营养利用率提高, 进而使氨气、硫化氢和总硫醇的释放量显著减少^[33]。类似的情况也出现在仔猪饲养过程中, 相比于基础饮食的仔猪, 在饲料中添加 0.1% 的复合益生菌[由

凝结芽孢杆菌(*Bacillus coagulance*)、地衣芽孢杆菌(*B. lichenformis*)、枯草芽孢杆菌(*B. subtilis*)和酪酸梭菌(*Clostridium butyricum*)组成], 不但能有效改善仔猪的生长性能、营养消化率和肠道菌群平衡, 而且还明显降低了仔猪粪便氨气和硫化氢等臭气的排放量^[34]。

近年来, 由于抗生素在畜禽养殖业的大量使用甚至误用、滥用, 由之引起的药物残留、抗药性、

内源性感染等问题也愈加受到重视,而益生菌添加剂的出现和使用在增强动物免疫力、提高饲料利用率以及减少臭气排放等方面都表现出了很好的效果,再加上益生菌添加剂所具有的无公害、经济安全等优点,使其有望成为抗生素的有效替代品,必将会受到越来越多研究学者的青睐。

当然,除了上述使用益生菌添加剂的途径,直接使用脱臭微生物作为除臭剂或发酵剂对畜禽粪便进行原位除臭是畜禽养殖业恶臭源头治理的另一重要途径。张家才等从蚯蚓腔内容物中筛选出一株能显著降低羊粪便恶臭强度的菌株 W-7,用其处理羊粪后对乙酸、吡啶、粪臭素等恶臭物质均有一定去除效果,最大去除率分别可达 33.9%、28.2% 和 21%,而且羊粪便发酵过程中不产生异丁酸、异戊酸、对甲酚等恶臭物质^[35]。Chen 等通过对牛粪中微生物的富集筛选,得到一个遗传稳定的除臭菌群,将其施加到牛粪中进行堆肥,接种 20 d 后检测发现氨气释放量减少了 60.7%,随后从除臭菌群中分离获得 3 株脱臭微生物,分别为鞘氨醇单胞菌(*Sphingomonas* sp.)、沙雷氏菌(*Serratia* sp.)和产碱杆菌(*Alcaligenes* sp.),可作为生物除臭的有用资源^[36]。堆肥是现阶段畜禽粪便无害化、资源化利用的重要处理方式。目前已经有一些微生物作为商品腐熟剂被广泛用于禽畜粪便堆肥过程中,虽然其中有些微生物并没有直接脱臭效果,但可以有效促进易分解有机物分解转化为腐殖酸等稳定的有机物,降低碳氮比和氮素损失以及加快堆肥进程^[37-38],从而减少恶臭气体的释放。当前用于堆肥发酵的微生物物种数量并不多,主要是木霉属及曲霉属的真菌和芽孢杆菌属的细菌,如绿色木霉(*Trichoderma viride*)、康宁木霉(*Trichoderma koningii*)、黑曲霉(*Aspergillus niger*)、枯草芽孢杆菌(*B. subtilis*)、地衣芽孢杆菌(*B. licheniformis*)、莫海威芽孢杆菌(*B. mojavensis*)和解淀粉芽孢杆菌(*B. amyloliquefaciens*)等^[39-43]。

生物过滤器、生物滴滤器等恶臭异位治理技术

主要用于大规模的畜禽养殖厂。Hansen 等使用生物过滤器对猪舍排出空气进行除臭,其中硫化氢去除率高约 75%,进一步研究发现,硫化氢的高效去除与生物过滤器中的真菌有关,而且硫化氢去除率与生物膜中真菌菌丝表面积之间存在着正相关,生物过滤器有真菌的时期硫化氢的去除率(64%)明显高于无真菌的时期(18%),推测这可能是由于真菌的存在增加了生物膜中活性表面积所致^[44]。高改凤利用自制的一套生物滴滤塔对养殖场的臭气进行除臭,在营养液喷淋量 60 mL/min、反应温度 25 °C、进气量 0.20 m³/h、初始 pH 7.0、进口氨气浓度和硫化氢浓度为 200 mg/m³ 和 70 mg/m³ 时,生物滴滤塔到达最佳运行状态,氨气和硫化氢去除率均在 95% 以上,同时总氮和二价硫转化率也都超过 90%^[45]。与生物过滤器、生物滴滤器等恶臭异位治理技术相比,施用微生物制剂进行源头治理具有投入成本低、操作简单、无需特殊设备等优点,在中小规模畜禽养殖厂中使用更加广泛,但目前市场上的微生物除臭剂产品性能差异较大。Choi 等以猪粪为测试对象对市场上 4 种微生物除臭添加剂进行效果验证,发现仅有 2 种微生物除臭添加剂能有效除臭,添加后经过 80 d 储存期,猪粪的恶臭指数降低 70% 以上,挥发性脂肪酸减少 50% 以上,而另外 2 种微生物制剂则对猪粪臭气并没有减排效果^[46],这一研究也表明,用户在市场上选购微生物除臭剂时要进行适当筛选并保持一定的警惕性。

2.2 在垃圾处理中的研究与应用

随着城镇化程度的不断提高,人们产生的城市生活垃圾越来越多。当复杂多样、量大面广的垃圾在环境中堆放时,由之引起的恶臭污染也备受关注。垃圾从源头收集、转运到最终得到处理,任何一个阶段都可能发生恶臭污染,其中垃圾处理场和垃圾转运站是垃圾处理系统的重要组成部分,也是最容易发生恶臭污染的环节。垃圾的恶臭污染主要是由于垃圾中的各类易分解的有机成分如蛋白质、

脂肪和碳水化合物等在好氧或厌氧条件下氧化分解形成的恶臭气体所引起^[47-48]。

垃圾填埋场是垃圾处理系统的核心组成部分。在我国有70%以上的城市固体垃圾是通过垃圾填埋场处理,造成了大量的环境问题,其中臭气污染是最严重的问题之一^[49]。因此,近些年不少研究学者致力于通过生物脱臭法解决垃圾填埋场的恶臭问题。

Yun 等将蚯蚓排泄物和土壤混合物覆盖到卫生填埋场的垃圾表面,发现其对卫生填埋场臭气强度贡献最大的含硫气体(硫化氢、甲硫醇、甲硫醚和二甲基二硫)的去除效率均大于 91%,细菌群落分析表明,甲基杆菌属(*Methylobacter*)、节杆菌属(*Arthrobacter*)、不动杆菌属(*Acinetobacter*)、罗思河小杆菌属(*Rhodanobacter*)和土地杆菌属(*Pedobacter*)是该生物覆盖物的优势属^[50]。另有学者研发出了一种填埋场覆盖土的替代品,即一种新型生物复合纺织物(Biocomplex Textile),该覆盖物是由非织造布和微生物固定化载体组成,与土壤覆盖物相比具有良好的脱臭效果和稳定的脱臭性能^[51-52]。有研究对比了生物复合纺织覆盖物和土壤覆盖物在垃圾填埋场的使用效果,在整个操作期间,生物复合纺织覆盖物上的复合气味强度平均值为 55 ODR (Odor Dilution Ratio; 中位数为 18 ODR),这仅是土壤覆盖物上平均复合气味强度的 1/77 (4 204 ODR; 中位数为 3 000 ODR)^[52]。

除了上述生物覆盖物的研究,除臭菌剂、生物滤池等生物脱臭法也被探究用于解决垃圾填埋场的恶臭问题。吴义诚等从固废垃圾填埋场的垃圾渗滤液中分离获得 3 株脱臭菌株并制成复合微生物除臭剂,该制剂对垃圾填埋场生活垃圾所产生的氨气、硫化氢及芳香类恶臭气体具有显著的去臭能力,结果表明:使用复配除臭菌剂对新鲜垃圾处理 10 min,氨气和硫化氢的去除率分别达 91.4%和 90.3%;此外对二甲基二硫、异丁烯、甲苯、硫酸

二甲酯 4 种臭气物质也有很好的脱除效果,去除率分别为 76.5%、81.0%、90.3%和 71.3%^[53]。Li 等则采用生物滤池对卫生填埋场渗滤液均衡池中排放的硫化氢进行处理,在稳定状态下,夏季硫化氢总去除率在 90%以上,冬季硫化氢总去除率在 80%以上,进一步研究表明硫化氢的主要降解产物为硫酸盐^[54]。

垃圾填埋场等垃圾终端处理场所大都地处偏僻,从实际情况来看,对居民生活环境更容易造成恶臭污染的是起着垃圾中转作用的垃圾转运站。城区内的垃圾转运站分散在大街小巷,各种垃圾混杂产生的强烈恶臭,给周边居民的工作与生活带来不少影响^[55]。刘辉等针对城市垃圾中转站设计了 3 种除臭方案,即气水混合式喷雾、高压喷雾、气水和高压混合式喷雾,这 3 种处理方式通过利用喷雾系统将微生物除臭剂与水按比例配好的混合物经雾化喷出,形成水雾,有效吸收空气中的恶臭气体,从而净化空气^[56]。邵俊等以生活垃圾转运站集装箱为研究对象,考察了微生物除臭剂喷洒后对臭气浓度及挥发性有机物 VOCs 组分和浓度变化的影响,研究发现,喷洒除臭剂后 24 h 和 48 h 时段的转运站集装箱中实验组的臭气浓度均较空白组有明显的降低,其中喷洒除臭剂后 48 h 时段对转运站集装箱中甲硫醇、甲硫醚等含硫化合物的浓度降低效果较为明显^[57]。

目前针对垃圾恶臭问题的生物除臭研究多关注于垃圾填埋场,而垃圾转运站作为垃圾处理系统的中间枢纽环节,其生物除臭方面的研究相对较少,加强对转运过程中臭气污染物快速减排以及符合垃圾转运站运作场景的新型除臭设施等研究是十分必要的。此外,随着我国垃圾分类条例的逐步推广,针对高水分、高油脂并且易腐发臭的生活垃圾,研发通过生物除臭法有效切断臭气源以及实现臭气减量减排的技术,已经变得非常迫切。

2.3 在污水处理中的应用

除了畜禽养殖、垃圾处理,恶臭污染的另一重要来源是污水处理。同垃圾处理情况相似,伴随着城市化进程的加快,我国城镇污水的处理规模也不断扩增,根据《住房和城乡建设部关于2017年第四季度全国城镇污水处理设施建设和运行情况的通报》可知,截止2017年12月底,全国城镇累计建成运行污水处理厂已超过4100座,城镇污水处理厂的恶臭污染问题也逐渐暴露出来(http://www.jhjsj.gov.cn/xwzx/tzgg/201804/t20180404_2191675_1.html)。污水处理过程中恶臭气体的来源主要包括2个方面:(1)从污水中直接挥发出来的气体,例如工业废水和其他废水中包含的有机溶剂、衍生物及其他挥发性的臭气组分;(2)微生物菌群通过生物化学应对污水中有机物进行降解而产生的恶臭物质^[58-59],这是餐饮污水和畜禽养殖污水恶臭的主要成因。

目前在污水处理厂除臭工艺中,主要采取对臭气进行末端收集后集中处理的方式,即将各处理单元进行密封,通过管道将臭气集中输送至处理系统内,然后根据臭气的组分、浓度等情况选择合适的除臭方式进行处理^[60],生物过滤法和生物滴滤法是污水处理厂现阶段应用较多的生物除臭技术^[59]。杨泽茹采用了生物过滤反应器处理城市污水厂恶臭气体,通过使用有机和无机相结合的混合填料(树皮、多孔空心球和活性炭6:2:1)以及活性污泥接种的方法改进除臭工艺,15 d之后硫化氢的去除率最高可达99.2%,氨气的去除率最高可达97.5%^[61]。孙事昊等研究了以聚丙烯环为填料的生物滴滤塔去除市政污水处理厂产生的硫化氢的性能及生物滴滤塔内微生物群落演变情况,发现该生物滴滤塔对硫化氢的平均去除率为91.8%,最高去除负荷达到78.37 g/(m³·h),高通量测序表明,运行后的生物滴滤塔内的微生物群落多样性降低,但假单胞菌属(*Pseudomonas*)和硫杆菌属(*Thiobacillus*)等功能菌属得到了富集^[62]。Kasperczyk等在污水处理厂

对一种紧凑的生物滴滤床反应器的除臭效果进行了测试,当气体流量在2.0–30.0 g/(m³·h)之间并且对于特定污染物的负荷高达20 g/(m³·h)时,硫化氢和挥发性有机物的去除率均大于95%^[63]。此外,一些新的微生物脱臭工艺也被发现,如Liu等采用一个由微生物悬浮生长的悬浮区和微生物附着生长的固定区组成的综合生物反应器处理污水处理厂排放的臭气,结果表明集成生物反应器能有效脱除硫化氢和氨气,大部分硫化氢在固定区被氧化成硫酸盐,但在悬浮区溶解成液相,而大量的氨气在悬浮区被硝化转化为亚硝酸盐和硝酸盐,只有少量的氨气通过在固定区的吸收或化学中和转移到水相中^[64]。

当然,污水处理厂的除臭,最重要还是要从源头上减少恶臭气体的产生,换言之,也就是利用微生物处理污水,将污水中各种形态的氮元素和硫元素等从污水中脱除,从而减少恶臭气体的排放。筛选适合污水处理的微生物是当前非常活跃的一个研究领域,其中针对污水生物脱氮的研究更是该领域的热点^[65-68]。Zhang等从深海沉积物中分离获得一种异养硝化-好氧反硝化的假单胞菌(*Pseudomonas bauzanensis*) DN13-1,经测定DN13-1具有高效的脱氮能力,对亚硝态氮、硝态氮和铵态氮的去除率分别达98.82%、65.87%和98.89%,可应用于污水处理过程^[69]。卢伟强等测定脱氮副球菌(*Paracoccus acridae*)去除污水中总氮(Total Nitrogen, TN)的效果,结果表明,在8 h内,脱氮副球菌使污水中TN的含量由100 mg/L降低至20 mg/L以下,显著提高了污水中TN的去除效率^[70]。另有研究表明,脱氮副球菌除了具有去除氨氮的能力,对化学需氧量和总磷也有明显的降解作用^[71]。李少杰等发现了一株畜禽养殖污水化学需氧量和氨氮协同降解的中间苍白杆菌(*Ochrobactrum intermedium*),通过对猪场采集的污水好氧处理3 d,污水中化学需氧量降解率和氨氮去除率分别为66%和84%^[72]。

利用微生物原位处理污水虽然可以从源头上解决臭气排放问题,还能极大地减少臭气异位治理的费用,但就现阶段而言,应用微生物(菌剂)处理污水更多关注的是使用菌剂后出水水质及污泥减量的效果,臭气减排则更多是附带效果。因此,采用生物过滤法等臭气异位处理技术仍是当前污水处理厂解决恶臭污染问题的主要方法。然而污水处理厂不同污水处理工艺(如间歇式活性污泥法即 SBR 工艺、厌氧-缺氧-好氧生物脱氮除磷工艺即 A²/O 工艺、吸附-生物降解法即 AB 工艺等)、不同污水处理单元(如格栅、沉砂池、生物反应池、污泥处理单元等)以及不同污水来源(如生活污水、养殖污水、工业废水等)都能导致污水处理厂的臭气在组成和含量上有很大差异,这也就对生物过滤器等臭气异位处理工艺的性能提出了严峻的挑战。

3 结语及展望

恶臭污染作为一种特殊的大气污染,其组成成分复杂、形成原因多样,具有季节性、复杂性和个体耐受差异等特点。生物洗涤法、生物过滤法和生物滴滤法这 3 种微生物异位脱臭技术虽然可以大流量处理恶臭气体,但都属于臭气的末端治理,并没有从源头上减少臭气的释放。此外,这 3 种微生物脱臭技术往往仅对特定几种恶臭气体成分或具有水溶性偏好的恶臭气体成分具有较好的脱除效果;但面对复杂的臭气组分,想要在未来达到国家更严格的恶臭污染物排放标准以及居民更高的生活环境质量期望,其脱臭性能也必须提高。原位脱臭的生物菌剂法因其操作简单、成本低廉等优点,被更广泛地应用于恶臭污染的治理中,而我国具有自主知识产权的功能性高效微生物除臭剂产品却比较少,而且在实际应用中存在适应性差、效果不佳、作用单一等缺点^[73]。

微生物脱臭法较物理法脱臭和化学法脱臭具有无可比拟的优越性和安全性,但现阶段微生物脱臭仍存在着诸多不足,需要进一步发展优化,今后的发展重点考虑应放在以下几方面:

(1) 加大对高效脱臭微生物资源的深度挖掘及选育工作的投入。无论是生物洗涤法还是生物滤池法,又或是生物滴滤法和生物菌剂法,决定脱臭效果最核心的因素是微生物的脱臭能力。目前广泛应用的高效脱臭微生物大多为除氨气微生物和除硫化氢微生物(表 2),而恶臭气体组成复杂多样。有研究表明,仅从养猪设施来源的臭气中被鉴定的挥发性有机物就至少有 512 种^[88],因此,想要进一步提高微生物脱臭技术的性能,就需要深度挖掘并筛选和驯育更多能降解特定恶臭气体的微生物菌种甚至菌群,而微孔板式反应器、微流控芯片等菌种高通量筛选技术的发展和成熟^[89-91],为该方面工作的开展提供了更多的便捷和可能性。

(2) 加深对微生物在除臭过程中菌群结构的时空演变规律和对恶臭物质代谢原理及降解动力学的研究。在生物除臭过程中,恶臭气体成分的脱除是通过多种微生物协同促进或共代谢的作用实现的,利用当前宏测序技术以及各种组学技术,理清这些微生物菌群的时空演变规律及其对恶臭物质的代谢原理和降解动力学,有助于针对性地改善生物反应器的性能,从而研发出更高效、使用成本低廉的微生物脱臭工艺和技术。

(3) 加强对当前微生物脱臭技术及工艺的改进和创新。传统的微生物脱臭技术大多为单独使用,抗冲击负荷能力有限,将两种或多种微生物脱臭技术联合使用,或与物理法、化学法脱臭技术组合形成复合工艺将是下一阶段的一个重要发展方向。另一方面,也要推动新型微生物脱臭技术尽快从实验研究阶段投入到实际应用,如膜生物膜反应器、转鼓生物过滤器^[92-93]等。此外,现有微生物脱臭技术需要进行工艺上的改进,如高效填料研发、结构设计改进、运行条件优化等^[94-96],其中填料作为脱臭微生物附着生长的场所,也是决定微生物在实际应用中脱臭效果的重要因素,在今后的研究中应该着重研发一些具有微生物亲和性强、孔隙率大、稳定性佳等优点的新型填料和复合填料。

表 2 具有脱臭功效的微生物

Table 2 Microorganisms with deodorization function

脱臭菌株 Deodorant strains	微生物类型 Microbial type	作用底物 Substrates	所应用的工艺类型 Type of process	参考文献 References
<i>Pseudomonas anguilliseptica</i> , <i>Pseudomonas alcaligenes</i> , <i>Sphingobium</i> <i>yanoikuyae</i> , <i>Enhydrobacter aerosaccus</i>	细菌 Bacterium	硫化氢 Hydrogen sulfide	生物涤气器 Bioscrubber	[74]
<i>Thiobacillus thiooxidans</i>	细菌 Bacterium	硫化氢 Hydrogen sulfide	生物反应器 Bioreactor	[64]
<i>Comamonas</i> sp., <i>Diaphorobacter</i> sp., <i>Pseudomonas</i> sp., <i>Thiobacillus</i> sp., <i>Brevundimonas</i> sp.	细菌 Bacterium	氨气、硫化氢、苯乙烯等挥发性有机物 Ammonia, hydrogen sulfide, styrene and other VOCs	生物过滤器 Biofilter	[75]
<i>Thiobacillus</i> spp., <i>Methylobacter</i> spp.	细菌 Bacterium	甲硫醇 Methanethiol	生物过滤器 Biofilter	[76]
<i>Brevibacillus borstelensis</i> GIGAN1	细菌 Bacterium	苯甲硫醚 Thioanisole	生物滴滤器 Biotrickling filter	[77]
<i>Thiothrix</i> spp., <i>Acidithiobacillus</i> <i>thiooxidans</i> , <i>Acidithiobacillus</i> <i>ferrooxidans</i> , <i>Thiomonas intermedia</i>	细菌 Bacterium	硫化氢 Hydrogen sulfide	生物滴滤器 Biotrickling filter	[78]
<i>Bacillus cereus</i> GIGAN2	细菌 Bacterium	二甲基二硫醚 Dimethyl disulfide	生物滴滤器 Biotrickling filter	[79]
<i>Aminobacter aminovorans</i>	细菌 Bacterium	三甲胺 Trimethylamine	生物滴滤器 Biotrickling filter	[80]
<i>Bacillus amyloliquefaciens</i>	细菌 Bacterium	氨气、硫化氢 Ammonia, hydrogen sulfide	饲料添加剂 Feed additive	[81]
<i>Enterococcus faecium</i> SLB120	细菌 Bacterium	氨气、硫化氢、总硫醇 Ammonia, hydrogen sulfide, total mercaptans	饲料添加剂 Feed additive	[33]
<i>Bacillus coagulance</i> , <i>Bacillus</i> <i>lichenformis</i> , <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Clostridium butyricum</i>	细菌 Bacterium	氨气、硫化氢、总硫醇 Ammonia, hydrogen sulfide, total mercaptans	饲料添加剂 Feed additive	[34]
<i>Sphingomonas</i> sp., <i>Serratia</i> sp., <i>Alcaligenes</i> sp.	细菌 Bacterium	氨气 Ammonia	微生物菌剂 Microbial preparation	[36]
<i>Cryptococcus laurentii</i> , <i>Bacillus</i> <i>safensis</i> , <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Lactobacillus</i> <i>fermentum</i> , <i>Rhodopseudomonas</i> <i>palustris</i> , <i>Mucor circinelloides</i>	细菌、真菌 Bacterium, Fungus	氨气、硫化氢、总挥发性有机物 Ammonia, hydrogen sulfide, VOCs	微生物菌剂 Microbial preparation	[82]
<i>Pseudomonas fluorescens</i> , <i>Enterococcus</i> <i>faecium</i> , <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Bacillus</i> <i>megaterium</i> , <i>Leuconostoc</i> <i>mesenteroides</i> , <i>Lactobacillus plantarum</i>	细菌 Bacterium	氨气、硫化氢 Ammonia, hydrogen sulfide	微生物菌剂 Microbial preparation	[83]
<i>Pediococcus acidilactici</i> , <i>Bacillus</i> <i>amyloliquefaciens</i> , <i>Cryptococcus</i> <i>laurentii</i>	细菌、真菌 Bacterium, Fungus	氨气 Ammonia	微生物菌剂 Microbial preparation	[84]
<i>Klebsiella</i> sp., <i>Bacillus velezensis</i> , <i>Candida utilis</i> , <i>Lactobacillus casei</i>	细菌、真菌 Bacterium, Fungus	吲哚 Indole	微生物菌剂 Microbial preparation	[85]
<i>Streptomyces</i> spp., <i>Promicromonospora</i> spp., <i>Paracoccus</i> spp., <i>Lysobacter</i> spp., <i>Sphingopyxis</i> spp.	细菌 Bacterium	氨气、硫化氢、甲硫醚等臭气 Ammonia, hydrogen sulfide, dimethyl sulfide, etc	微生物菌剂 Microbial preparation	[86]
<i>Aliibacillus thermotolerans</i> BM62, <i>Bacillus cereus</i> A531, <i>Bacillus albus</i> C631	细菌 Bacterium	氨气 Ammonia	微生物菌剂 Microbial preparation	[87]

REFERENCES

- [1] Zarra T, Galang MG, Ballesteros Jr F, Belgiorno V, Naddeo V. Environmental odour management by artificial neural network: a review[J]. *Environment International*, 2019, 133: 105189
- [2] Brancher M, Griffiths KD, Franco D, de Melo Lisboa H. A review of odour impact criteria in selected countries around the world[J]. *Chemosphere*, 2017, 168: 1531-1570
- [3] Lewkowska P, Cieřlik B, Dymerski T, Konieczka P, Namieřnik J. Characteristics of odors emitted from municipal wastewater treatment plant and methods for their identification and deodorization techniques[J]. *Environmental Research*, 2016, 151: 573-586
- [4] Abdul-Wahab S, Al-Rawas G, Charabi Y, Al-Wardy M, Fadlallah S. A study to investigate the key sources of odors in Al-Multaqa Village, Sultanate of Oman[J]. *Environmental Forensics*, 2017, 18(1): 15-35
- [5] Keck M, Mager K, Weber K, Keller M, Frei M, Steiner B, Schrade S. Odour impact from farms with animal husbandry and biogas facilities[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 645: 1432-1443
- [6] Wang G, Meng J, Shang XB, Yang WH, Zhai YC. The enlightenment of foreign odor management approaches for its establishment in China[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, 31(8): 1337-1345 (in Chinese)
王亘, 孟洁, 商细彬, 杨伟华, 翟友存. 国外恶臭污染管理办法对我国管理体系构建的启示[J]. *环境科学研究*, 2018, 31(8): 1337-1345
- [7] Abdou MH. Health impacts on workers in wastewater treatment plants in Jeddah city, Saudi Arabia[J]. *The Journal of the Egyptian Public Health Association*, 2007, 82(5/6): 405-417
- [8] Barbusinski K, Kalembe K, Kasperczyk D, Urbaniec K, Kozik V. Biological methods for odor treatment: a review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 152: 223-241
- [9] Li YX, Guo B, Liu S. Recent progress and perspectives in biological treatment for gaseous pollutants[J]. *Microbiology China*, 2019, 46(12): 3475-3482 (in Chinese)
李远啸, 郭斌, 刘烁. 微生物生物技术处理气态污染物的研究进展[J]. *微生物学通报*, 2019, 46(12): 3475-3482
- [10] State Environmental Protection Administration, The State Bureau of Quality and Technical Supervision. GB 14554-1993 Emission standards for odor pollutants[S]. Beijing: Standards Press of China, 1994 (in Chinese)
国家环境保护局, 国家技术监督局. GB 14554-1993 恶臭污染物排放标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1994
- [11] Wysocka I, Gebicki J, Namieřnik J. Technologies for deodorization of malodorous gases[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(10): 9409-9434
- [12] Ni LH, Zhou DT. Application of biological deodorization technology in odor treatment of waste water treatment station[J]. *Cereal & Food Industry*, 2018, 25(5): 13-15 (in Chinese)
倪立华, 周大同. 生物除臭技术在污水处理站臭气处理中的应用[J]. *粮食与食品工业*, 2018, 25(5): 13-15
- [13] Zhao YZ. Harmfulness of malodorous gas and its treatment technology[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2014, 41(13): 170-171 (in Chinese)
赵银宇. 恶臭气体危害及其处理技术[J]. *广东化工*, 2014, 41(13): 170-171
- [14] Yang KX, Li L, Liu JX. Review on biological techniques for treatment of VOCs and odors[J]. *Environmental Engineering*, 2016, 34(3): 107-111, 179 (in Chinese)
杨凯雄, 李琳, 刘俊新. 挥发性有机污染物及恶臭生物处理技术综述[J]. *环境工程*, 2016, 34(3): 107-111, 179
- [15] Li L, Zhang JY, Lin J, Liu JX. Biological technologies for the removal of sulfur containing compounds from waste streams: Bioreactors and microbial characteristics[J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2015, 31(10): 1501-1515
- [16] Ma XY. Application status and prospects of microbial deodorant[J]. *Journal of Animal Science and Veterinary Medicine*, 2019, 38(3): 37-39 (in Chinese)
马晓宇. 微生物除臭剂的应用现状与前景[J]. *畜牧兽医杂志*, 2019, 38(3): 37-39
- [17] Chou MS, Lu SL. Treatment of 1,3-butadiene in an air stream by a biotrickling filter and a biofilter[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 1998, 48(8): 711-720
- [18] Muñoz R, Villaverde S, Guieysse B, Revah S. Two-phase partitioning bioreactors for treatment of volatile organic compounds[J]. *Biotechnology Advances*, 2007, 25(4): 410-422
- [19] Li MX. Preparation of microbial compound agent for nitrogen-retaining during livestock and poultry waste composting[D]. Chengdu: Master's Thesis of Southwest Jiaotong University, 2019 (in Chinese)
李明星. 畜禽废弃物堆肥保氮复合菌剂的研制[D]. 成都: 西南交通大学硕士学位论文, 2019
- [20] Takai K. The nitrogen cycle: a large, fast, and mystifying cycle[J]. *Microbes and Environments*, 2019, 34(3): 223-225
- [21] Koch T, Dahl C. A novel bacterial sulfur oxidation pathway provides a new link between the cycles of organic and inorganic sulfur compounds[J]. *The ISME Journal*, 2018, 12(10): 2479-2491
- [22] Schäfer H, Myronova N, Boden R. Microbial degradation of dimethylsulphide and related C₁-sulphur compounds: organisms and pathways controlling fluxes of sulphur in the biosphere[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2010, 61(2): 315-334
- [23] Lundgren BR, Sarwar Z, Feldman KS, Shoytush JM, Nomura CT. SfnR2 regulates dimethyl sulfide-related

- utilization in *Pseudomonas aeruginosa* PAO1[J]. Journal of Bacteriology, 2019, 201(4): e00606-18
- [24] Liang ZS, An TC, Li GY, Zhang ZY. Aerobic biodegradation of odorous dimethyl disulfide in aqueous medium by isolated *Bacillus cereus* GIGAN2 and identification of transformation intermediates[J]. Bioresource Technology, 2015, 175: 563-568
- [25] Sun YM, Qiu JG, Chen DZ, Ye JX, Chen JM. Characterization of the novel dimethyl sulfide-degrading bacterium *Alcaligenes* sp. SY1 and its biochemical degradation pathway[J]. Journal of Hazardous Materials, 2016, 304: 543-552
- [26] Linder T. ATP sulfurylase is essential for the utilization of sulfamate as a sulfur source in the yeast *Komagataella pastoris* (syn. *Pichia pastoris*)[J]. Current Microbiology, 2017, 74(9): 1021-1025
- [27] Rybarczyk P, Szulczyński B, Gębicki J, Hupka J. Treatment of malodorous air in biotrickling filters: a review[J]. Biochemical Engineering Journal, 2019, 141: 146-162
- [28] Yang ZH. Application study on removal of odor and VOCs by bio-trickling filter[D]. Beijing: Doctoral Dissertation of Beijing University of Technology, 2018 (in Chinese)
杨竹慧. 生物滴滤法净化恶臭及 VOCs 的应用研究[D]. 北京: 北京工业大学博士学位论文, 2018
- [29] Liu YH, Zhao P, Zhang ZL, Lian XF, Zhang ZH. Research status of microbial deodorization technology[A]//The 12th Annual Conference of the Chinese Society of Bioengineering[C]. Changsha: Chinese Society of Bioengineering, 2018 (in Chinese)
刘裕慧, 赵萍, 张子亮, 连小峰, 张子豪. 微生物除臭技术的研究现状[A]//中国生物工程学会第十二届学术年会暨 2018 年全国生物技术大会论文集[C]. 长沙: 中国生物工程学会, 2018
- [30] Guffanti P, Pifferi V, Falciola L, Ferrante V. Analyses of odours from concentrated animal feeding operations: a review[J]. Atmospheric Environment, 2018, 175: 100-108
- [31] Hu YA, Cheng HF, Tao S. Environmental and human health challenges of industrial livestock and poultry farming in China and their mitigation[J]. Environment International, 2017, 107: 111-130
- [32] Wang AL, Jin JG, Wang KY. Research progress on microbial deodorization technologies in livestock farms[J]. Chinese Journal of Animal Science, 2019, 55(1): 18-21, 28 (in Chinese)
王艾伦, 金敬岗, 汪开英. 畜禽场微生物除臭技术的研究进展[J]. 中国畜牧杂志, 2019, 55(1): 18-21, 28
- [33] Lan RX, Lee SI, Kim IH. Effects of *Enterococcus faecium* SLB 120 on growth performance, blood parameters, relative organ weight, breast muscle meat quality, excreta microbiota shedding, and noxious gas emission in broilers[J]. Poultry Science, 2017, 96(9): 3246-3253
- [34] Lan RX, Lee SI, Kim IH. Effects of multistrain probiotics on growth performance, nutrient digestibility, blood profiles, faecal microbial shedding, faecal score and noxious gas emission in weaning pigs[J]. Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition, 2016, 100(6): 1130-1138
- [35] Zhang JC, Gao X, Zhu LY, Qi DS. Screening of a deodorizing microorganism and its deodorizing effect[A]//2016 Annual Conference of Animal and Environmental Hygiene Branch of China Animal Husbandry and Veterinary Society[C]. Changsha: Chinese Society of Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2016 (in Chinese)
张家才, 高鑫, 朱洛毅, 齐德生. 一株除臭微生物的筛选及其除臭效果的研究[A]//中国畜牧兽医学会家畜环境卫生学分会 2016 学术年会[C]. 长沙: 中国畜牧兽医学会, 2016
- [36] Chen WH, Yan L, Gao YM, Bao J, Wang YJ, Sun ZY, Wang WD. The removal characteristics and diversity of a microbial community capable of ammonia removal from compost[J]. Annals of Microbiology, 2016, 66(2): 635-642
- [37] Cai R, Xu CC. Research progress on microorganisms commonly used in composting and their effects[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2019(5): 1-7 (in Chinese)
蔡瑞, 徐春城. 堆肥用微生物及其效果研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2019(5): 1-7
- [38] Wang JC, Zhu RS, Liu XH, Sun SL, Wang HZ, Tang Q, Qi B, Huang BH. Effects of microbial agents on bacterial community composition during swine manure composting[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(7): 2449-2456 (in Chinese)
王建才, 朱荣生, 刘兴华, 孙守礼, 王怀中, 唐茜, 齐波, 黄保华. 微生物菌剂对猪粪堆肥中细菌群落结构的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(7): 2449-2456
- [39] Wu JX, Zhao PF, Zhang HY. Optimization of conditions of improving organic nitrogen content of fermented cow manure[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2016, 45(3): 78-81 (in Chinese)
武金霞, 赵朋飞, 张贺迎. 提高发酵牛粪有机肥有机氮含量的条件优化[J]. 河南农业科学, 2016, 45(3): 78-81
- [40] Song KC, Hua HF, Xu LM, Yan H. Low-temperature composting fermentation fungicide: CN, 108892548A[P]. 2018-11-27 (in Chinese)
宋克超, 华怀峰, 徐立明, 闫华. 一种低温堆肥发酵菌剂: 中国, 108892548A[P]. 2018-11-27
- [41] Zhao ZJ, Zou GB, Shi JP, Liu L, Chen XJ, Wang ZJ. High-temperature compost bacteria complex microbial inoculant and application thereof: CN, 108486010A[P]. 2018-09-04 (in Chinese)
赵志军, 邹广彬, 史吉平, 刘莉, 陈泉嘉, 王昭君. 一种高温堆肥细菌复合菌剂及其应用: 中国, 108486010A[P].

2018-09-04

- [42] Sun XY, Zhao BH, Li SJ, Zhang ZY. *Bacillus mojavensis* B282 and application thereof: CN, 110484463A[P]. 2019-11-22 (in Chinese)
孙宪响, 赵彬涵, 李少杰, 张振颖. 一株莫海威芽孢杆菌 B282 及其应用: 中国, 110484463A[P]. 2019-11-22
- [43] Sun XY, Zhao BH, Li SJ, Zhang ZY. *Bacillus amyloliquefaciens* B4216 and application thereof: CN, 110452859A[P]. 2019-11-15 (in Chinese)
孙宪响, 赵彬涵, 李少杰, 张振颖. 一株解淀粉芽孢杆菌 B4216 及其应用: 中国, 110452859A[P]. 2019-11-15
- [44] Hansen MJ, Pedersen CL, Jensen LHS, Guldberg LB, Feilberg A, Nielsen LP. Removal of hydrogen sulphide from pig house using biofilter with fungi[J]. Biosystems Engineering, 2018, 167: 32-39
- [45] Gao GF. Biological removal of NH_3 and H_2S derived from the livestock using a biofilter[D]. Taiyuan: Master's Thesis of Taiyuan University of Technology, 2013 (in Chinese)
高改凤. 生物滴滤塔降解养殖场臭气中的氨气和硫化氢[D]. 太原: 太原理工大学硕士学位论文, 2013
- [46] Choi E, Kim J, Choi I, Ahn H, Dong JI, Kim H. Microbial additives in controlling odors from stored swine slurry[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2015, 226(4): 104
- [47] Conti C, Guarino M, Bacenetti J. Measurements techniques and models to assess odor annoyance: a review[J]. Environment International, 2020, 134: 105261
- [48] Fu DD, Zhao YZ, Han WB, Liu J, Xu X. Odor control for municipal domestic waste treatment[J]. Environmental Sanitation Engineering, 2014, 22(2): 4-6 (in Chinese)
付丹丹, 赵玉柱, 韩文彪, 刘佳, 徐霞. 城市生活垃圾处理过程中的恶臭防治[J]. 环境卫生工程, 2014, 22(2): 4-6
- [49] Dai ZN, Zeng FS, Liu J, Yang AL, Fu HY. Application of deodorant in odor control of municipal solid waste[A]//Proceedings of the 2nd International Conference on Power and Energy Engineering[C]. England: IOP, 2018: 192
- [50] Yun J, Jung H, Ryu HW, Oh KC, Jeon JM, Cho KS. Odor mitigation and bacterial community dynamics in on-site biocovers at a sanitary landfill in South Korea[J]. Environmental Research, 2018, 166: 516-528
- [51] Choi H, Ryu HW, Cho KS. Biocomplex textile as an alternative daily cover for the simultaneous mitigation of methane and malodorous compounds[J]. Waste Management, 2018, 72: 339-348
- [52] Yun J, Jung H, Choi H, Oh KC, Jeon JM, Ryu HW, Cho KS. Performance evaluation of an on-site biocomplex textile as an alternative daily cover in a sanitary landfill, South Korea[J]. Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy, 2018, 36(12): 1137-1145
- [53] Wu YC, Du YB, Fu HY, Gao PF, Dai ZN. Treatment of microbial deodorant and its deodorization performance evaluation[J]. Journal of Xiamen University of Technology, 2016, 24(5): 109-112 (in Chinese)
吴义诚, 杜闫彬, 傅海燕, 高攀峰, 代智能. 除臭微生物的复配及其性能评价[J]. 厦门理工学院学报, 2016, 24(5): 109-112
- [54] Li L, Han YP, Liu JX. Performance and bacterial community diversity of a full-scale biofilter treating leachate odor in a sanitary landfill site[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2012, 223(9): 5599-5611
- [55] Wang YJ, Zhang H, Lü F, Zhang YM, Shao LM, He PJ. Current status and problems of odour pollution control in transfer station of municipal solid waste[J]. Environmental Sanitation Engineering, 2019, 27(1): 1-8,13 (in Chinese)
王玉婧, 章骅, 吕凡, 张倚马, 邵立明, 何晶晶. 生活垃圾转运站恶臭污染控制现状与问题思考[J]. 环境卫生工程, 2019, 27(1): 1-8,13
- [56] Liu H, Yang LP, Wen Q, Yang ZY. Deodorization scheme design of urban waste transfer station[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2019, 37(7): 159-161 (in Chinese)
刘辉, 杨利平, 文清, 杨志远. 城市垃圾中转站的除臭方案设计[J]. 中国资源综合利用, 2019, 37(7): 159-161
- [57] Tai J, Yu ZH, Cheng J, Jin NB. Evaluation of odor control by microbial deodorizer in containerization process of municipal solid waste[J]. Environment and Sustainable Development, 2017, 42(6): 91-95 (in Chinese)
邵俊, 余召辉, 程炬, 金宁奔. 微生物除臭剂对生活垃圾集装化转运过程中的恶臭控制效果评估[J]. 环境与可持续发展, 2017, 42(6): 91-95
- [58] Zheng SY, Yang YM. Control overview on malodorous gas from sewage treatment plant[J]. Water & Wastewater Engineering, 2015, 41(S1): 109-114 (in Chinese)
郑斯宇, 杨延梅. 污水处理厂恶臭气体控制综述[J]. 给水排水, 2015, 41(S1): 109-114
- [59] Ren BM, Zhao YQ, Lyczko N, Nzihou A. Current status and outlook of odor removal technologies in wastewater treatment plant[J]. Waste and Biomass Valorization, 2019, 10(6): 1443-1458
- [60] Yang Q, Li Y, Cui B, Yang ZQ, Liu ZB, Peng YZ. Research advances of odor released from municipal wastewater treatment process[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 39(7): 2079-2087 (in Chinese)
杨庆, 李洋, 崔斌, 杨忠启, 刘智斌, 彭永臻. 城市污水处理过程中恶臭气体释放的研究进展[J]. 环境科学学报, 2019, 39(7): 2079-2087
- [61] Yang ZR. Operation practice and improvement of biofilter treatment for malodorous gas in municipal sewage plant[D]. Baotou: Master's Thesis of Inner Mongolia University of Science & Technology, 2019 (in Chinese)

- 杨泽茹. 生物滤池法处理城市污水厂恶臭气体的运行实践及改进[D]. 包头: 内蒙古科技大学硕士学位论文, 2019
- [62] Sun SH, Jia TP, Chen KQ, Peng YZ, Zhang L. Removal of hydrogen sulfide produced in a municipal WWTP using a biotrickling filter with polypropylene rings as the packing material and microbial community analysis[J]. Environmental Science, 2019, 40(10): 4585-4593 (in Chinese)
孙事昊, 贾体沛, 陈凯琦, 彭永臻, 张亮. 聚丙烯环生物滴滤塔去除实际市政污水厂硫化氢性能及微生物群落分析[J]. 环境科学, 2019, 40(10): 4585-4593
- [63] Kasperczyk D, Urbaniec K, Barbusinski K, Rene ER, Colmenares-Quintero RF. Application of a compact trickle-bed bioreactor for the removal of odor and volatile organic compounds emitted from a wastewater treatment plant[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 236: 413-419
- [64] Liu JW, Yang KX, Li L, Zhang JY. A full-scale integrated-bioreactor with two zones treating odours from sludge thickening tank and dewatering house: performance and microbial characteristics[J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2017, 11(4): 6
- [65] Ren Y, Ngo HH, Guo WS, Wang DB, Peng L, Ni BJ, Wei W, Liu YW. New perspectives on microbial communities and biological nitrogen removal processes in wastewater treatment systems[J]. Bioresource Technology, 2020, 297: 122491
- [66] Feng L, Yang JX, Ma F, Pi SS, Xing LL, Li A. Characterisation of *Pseudomonas stutzeri* T13 for aerobic denitrification: Stoichiometry and reaction kinetics[J]. Science of the Total Environment, 2020, 717: 135181
- [67] Liu T, Hu SH, Guo JH. Enhancing mainstream nitrogen removal by employing nitrate/nitrite-dependent anaerobic methane oxidation processes[J]. Critical Reviews in Biotechnology, 2019, 39(5): 732-745
- [68] Holmes DE, Dang Y, Smith JA. Nitrogen cycling during wastewater treatment[J]. Advances in Applied Microbiology, 2019, 106: 113-192
- [69] Zhang MX, Li AZ, Yao Q, Wu QP, Zhu HH. Nitrogen removal characteristics of a versatile heterotrophic nitrifying-aerobic denitrifying bacterium, *Pseudomonas bauzanensis* DN13-1, isolated from deep-sea sediment[J]. Bioresource Technology, 2020, 305: 122626
- [70] Lu WQ, Mao Y, Li GH, Deng Y, Zhao YY. Efficient removal of total nitrogen from sewage by *Paracoccus denitrificans* DYT-1[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(9): 55-60 (in Chinese)
卢伟强, 毛银, 李国辉, 邓禹, 赵运英. 脱氮副球菌 DYT-1 高效去除污水中的总氮[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(9): 55-60
- [71] Li SJ, Cao XH, Sun XY, Zhang ZY. *Paracoccus acridae* B54 and application thereof: CN, 110452858A[P]. 2019-11-15 (in Chinese)
李少杰, 曹先贺, 孙宪昀, 张振颖. 一株副球菌 B54 及其应用: 中国, 110452858A[P]. 2019-11-15
- [72] Li SJ, Cao XH, Sun XY, Zhang ZY. *Ochrobactrum intermedium* B522 and application thereof: CN, 110387339A[P]. 2019-10-29 (in Chinese)
李少杰, 曹先贺, 孙宪昀, 张振颖. 一株中间苍白杆菌 B522 及其应用: 中国, 110387339A[P]. 2019-10-29
- [73] Zhang SW, Huang WZ, Yao T, Yang QL, Wang PF, Li SG, Yan ZQ, Gun SB. Effects of efficient microbial deodorizer in livestock manure composting and its deodorizing mechanism[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2016, 25(9): 142-151 (in Chinese)
张生伟, 黄旺洲, 姚拓, 杨巧丽, 王鹏飞, 李生贵, 闫尊强, 滚双宝. 高效微生物除臭剂在畜禽粪便堆制中的应用效果及其除臭机理研究[J]. 草业学报, 2016, 25(9): 142-151
- [74] Haosagul S, Prommeenate P, Hobbs G, Pisutpaisal N. Sulfur-oxidizing bacteria in full-scale biogas cleanup system of ethanol industry[J]. Renewable Energy, 2020, 150: 965-972
- [75] Yang KX, Li L, Ding WJ, Liu JX, Xue S. A full-scale thermophilic biofilter in the treatment of sludge drying exhaust: performance, microbial characteristics and bioaerosol emission[J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2018, 93(8): 2216-2225
- [76] Yao XZ, Chu YX, Wang C, Li HJ, Kang YR, He R. Enhanced removal of methanethiol and its conversion products in the presence of methane in biofilters[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 215: 75-83
- [77] Li GY, Liang ZS, An TC, Zhang ZY, Chen XQ. Efficient bio-deodorization of thioanisole by a novel bacterium *Brevibacillus borstelensis* GIGAN1 immobilized onto different packing materials in twin biotrickling filter[J]. Bioresource Technology, 2015, 182: 82-88
- [78] Zhou QY, Liang H, Yang SL, Jiang X. The removal of hydrogen sulfide from biogas in a microaerobic biotrickling filter using polypropylene carrier as packing material[J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2015, 175(8): 3763-3777
- [79] Chen XQ, Liang ZS, An TC, Li GY. Comparative elimination of dimethyl disulfide by maifanite and ceramic-packed biotrickling filters and their response to microbial community[J]. Bioresource Technology, 2016, 202: 76-83
- [80] Aguirre A, Bernal P, Maureira D, Ramos N, Vásquez J, Urrutia H, Gentina JC, Aroca G. Biofiltration of trimethylamine in biotrickling filter inoculated with *Aminobacter aminovorans*[J]. Electronic Journal of Biotechnology, 2018, 33: 63-67
- [81] Ahmed ST, Islam MM, Mun HS, Sim HJ, Kim YJ, Yang CJ.

- Effects of *Bacillus amyloliquefaciens* as a probiotic strain on growth performance, cecal microflora, and fecal noxious gas emissions of broiler chickens[J]. *Poultry Science*, 2014, 93(8): 1963-1971
- [82] Chen JB, Lan SH, Li XD, Xie YF, Pang X, Yi J. Development of complex microbial agent for deodorization in pigsty[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2016(23): 172-174,184 (in Chinese)
陈进斌, 兰书焕, 李旭东, 谢翼飞, 庞霞, 易静. 养猪场圈舍除臭复合菌剂的研制[J]. *现代农业科技*, 2016(23): 172-174,184
- [83] Borowski S, Matusiak K, Powalowski S, Pielech-Przybylska K, Makowski K, Nowak A, Rosowski M, Komorowski P, Gutarowska B. A novel microbial-mineral preparation for the removal of offensive odors from poultry manure[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2017, 119: 299-308
- [84] Han BA, Ling C, Li Y, Bao DL, Zhao HT, Hu ZQ, Zhao HQ. Selection of pig manure deodorant, compound and optimization of culture conditions[J]. *Acta Ecologiae Animalis Domastici*, 2017, 38(12): 55-61,72 (in Chinese)
韩保安, 凌超, 李扬, 鲍大林, 赵鸿涛, 胡子全, 赵海泉. 猪粪除臭菌的筛选、复配以及培养条件的优化[J]. *家畜生态学报*, 2017, 38(12): 55-61,72
- [85] Shao S, Chang J, Wang P, Yin QQ, Liu CQ, Dang XW, Gao TZ, Lu FS. Development of a multi-microbial preparation and its application in degrading indole in pig manure[J]. *Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2019, 51(8): 30-36 (in Chinese)
邵栓, 常娟, 王平, 尹清强, 刘超齐, 党晓伟, 高天增, 卢富山. 复合微生物制剂的研制及对猪粪便中吲哚的降解作用[J]. *畜牧与兽医*, 2019, 51(8): 30-36
- [86] Lee YY, Hong S, Cho KS. Design and shelf stability assessment of bacterial agents for simultaneous removal of methane and odors[J]. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 2019, 54(9): 906-913
- [87] Xu J, Xu XH, Men MQ, Xing GR, Gu M, Yang Y, Yang RY, Bian XY. Research and application of multifunctional agent for warming and deodorizing in livestock manure composting[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2019(5): 200-206 (in Chinese)
徐杰, 许修宏, 门梦琪, 行国瑞, 谷猛, 杨阳, 杨荣艺, 边鑫雨. 畜禽粪便堆肥快速升温除臭多功能复合菌剂及其应用[J]. *中国土壤与肥料*, 2019(5): 200-206
- [88] Ni JQ, Robarge WP, Xiao CH, Heber AJ. Volatile organic compounds at swine facilities: a critical review[J]. *Chemosphere*, 2012, 89(7): 769-788
- [89] Zhu XD. Construction and application of high-throughput screening platforms for development of industrial microorganism based on microplate technology and microfluidic technology[D]. Shanghai: Doctoral Dissertation of East China University of Science and Technology, 2018 (in Chinese)
朱旭东. 基于微孔板技术及微流控技术的工业微生物高通量筛选平台构建及应用研究[D]. 上海: 华东理工大学博士学位论文, 2018
- [90] He RL, Ding RH, Heyman JA, Zhang DY, Tu R. Ultra-high-throughput picoliter-droplet microfluidics screening of the industrial cellulase-producing filamentous fungus *Trichoderma reesei*[J]. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 2019, 46(11): 1603-1610
- [91] Monge EC, Levi M, Forbin JN, Legesse MD, Udo BA, DeCarvalho TN, Gardner JG. High-throughput screening of environmental polysaccharide-degrading bacteria using biomass containment and complex insoluble substrates[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2020, 104(8): 3379-3389
- [92] Wang ZW. Study on performance of the membrane biofiltration for degradation of volatile organic compounds in industrial waste gas[D]. Shanghai: Doctoral Dissertation of East China University of Science and Technology, 2014 (in Chinese)
王震文. 膜生物过滤技术净化工业废气中挥发性有机化合物性能研究[D]. 上海: 华东理工大学博士学位论文, 2014
- [93] Chen J, Gu SY, Zheng J, Chen JM. Simultaneous removal of SO₂ and NO in a rotating drum biofilter coupled with complexing absorption by Fe^{II} (EDTA)[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2016, 114: 87-93
- [94] Pu SH, Liu ZH, Yang FY, Long DB, Liu W, Wang H, Huang KP, Huang X. Comparative study on the removal efficiency of hydrogen sulfide (H₂S) using three different packings[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2018, 68(9): 900-908
- [95] Ordaz A, Figueroa-González I, San-Valero P, Gabaldón C, Quijano G. Effect of the height-to-diameter ratio on the mass transfer and mixing performance of a biotrickling filter[J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2018, 93(1): 121-126
- [96] Febrisantosa A, Choi HL, Renggaman A, Sudiarto SIA, Lee J. The investigation of combined ventilation-biofilter systems using recycled treated wastewater on odor reduction efficiency[J]. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 2020, 33(7): 1209-1216