

# 基于微生物菌群调控的畜牧养殖废水高效生物处理技术研究

殷德霖

黑龙江大学

DOI:10.12238/eep.v8i3.2580

**[摘要]** 本研究聚焦于基于微生物菌群调控的畜牧养殖废水高效生物处理技术。通过分析畜牧养殖废水的特点及处理现状,探讨微生物菌群在废水处理中的作用机制,提出基于微生物菌群调控的废水处理策略,包括菌群优化选择、培养条件调控等,旨在提高畜牧养殖废水的处理效率与效果,实现废水的资源化利用,为畜牧养殖业的可持续发展提供技术支持。

**[关键词]** 微生物菌群调控; 畜牧养殖废水; 高效生物处理技术

**中图分类号:** X703 **文献标识码:** A

## Study on efficient biological treatment technology of livestock and poultry wastewater based on microbial flora regulation

Delin Yin

Heilongjiang University

**[Abstract]** This study focuses on the efficient biological treatment of livestock and poultry wastewater using microbial community regulation. By analyzing the characteristics and current treatment status of such wastewater, the study explores the mechanisms by which microbial communities play a role in wastewater treatment. It proposes wastewater treatment strategies based on microbial community regulation, including the optimization of microbial community selection and the adjustment of cultivation conditions. The aim is to enhance the efficiency and effectiveness of wastewater treatment, promote the resource utilization of wastewater, and provide technical support for the sustainable development of the livestock and poultry industry.

**[Key words]** Microbial regulation; Livestock and poultry wastewater; Efficient biological treatment technology

在畜牧养殖业大规模发展的背景下,养殖废水的排放量与日俱增,对环境造成极大的压力,而生物处理技术因具有环保、经济、可持续的优点,被广泛用于畜牧养殖废水处理。但以微生物菌群为核心的生物处理技术在处理废水过程中的种类、数量以及活性等,都直接关系到废水的处理效果。因此,开展以微生物菌群调控为基础的畜牧养殖废水高效生物处理技术的研究具有一定的实际意义。

### 1 畜牧养殖废水的特点和处理现状的分析

#### 1.1 特点

畜牧养殖废水由于理化性质复杂和污染特性显著,给生态环境治理带来了特殊的挑战,在成分构成上,此类废水中含有丰富的高浓度有机物、氮磷化合物和微生物菌群。在这其中,化学需氧量(COD)和生化需氧量(BOD)的数值明显高于传统的生活污水,这些主要是由动物的排泄物、残留的饲料以及冲洗废水中的碳水化合物、蛋白质和脂肪等有机成分所导致的<sup>[1]</sup>。氮元素主要以氨氮和有机氮两种形态并存,而磷元素大多以正磷酸盐和聚磷酸盐两种形态存在,两者的超标排放容易诱发受纳水体发

生富营养化。另外,污水中存在抗生素、重金属离子和其他痕量污染物,来自养殖期间疫病防治和饲料添加剂等的应用,潜在的生态毒性也不可忽视,从物理特性上看,畜牧养殖废水表现出高悬浮物和高浊度等特点。固体悬浮物多由未消化饲料残渣、动物毛发和粪便颗粒等组成,粒径分布广,自然沉降困难。废水浊度较高不仅会对后续处理工艺效率造成影响,而且会对处理设备造成堵塞,提高运行维护成本。同时,废水的酸碱度波动显著,受养殖动物种类、饲料配方及处理工艺影响,pH值可在5-10区间浮动,这种不稳定性对处理系统中微生物的活性与代谢功能构成直接威胁。

#### 1.2 现状

现有的畜牧养殖废水处理技术体系涉及物理、化学及生物处理的各种方式,但是在实践中仍然具有明显的局限性,尽管物理处理技术,如沉淀和过滤,可以有效地去除部分悬浮物和大颗粒的污染物,但它们在降低溶解性有机物和氮磷含量方面仍然存在困难,生物处理技术以其经济性和环境友好性,已成为处理的主流。传统活性污泥法和生物膜法都是利用微生物代谢来降

解有机物,但是面对浓度较高、水质波动较大的养殖废水,系统缺乏稳定性,容易产生污泥膨胀和微生物活性抑制。厌氧处理技术,例如厌氧消化池和UASB(升流式厌氧污泥床),在处理高浓度的有机废水上显示出了明显的优越性,并能有效地回收能源,但是存在着启动周期长、对环境条件较为敏感、氮磷去除作用受限的问题。尽管好氧处理技术可以高效地去除有机物和氨氮,但其高能耗和大量的污泥产出限制了其更广泛的应用,就目前行业应用情况而言,小型养殖场由于受到资金和技术限制,大多使用简易氧化塘和化粪池进行治疗,治理效率低,渗漏风险大。规模化养殖场虽然装备了比较完善的处理设施,但是一些企业为了减少运行成本出现了处理工艺简化和设备闲置现象,造成出水很难稳定达标排放。

## 2 基于微生物菌群调控的畜牧养殖废水高效生物处理技术

### 2.1 菌群的结构解析和功能挖掘

微生物菌群结构解析为实现养殖废水有效治理提供了依据,基于高通量测序技术可以系统地揭示废水处理系统微生物群落种类组成、丰度分布和功能基因特征。利用16S rRNA基因测序和宏基因组学分析可以鉴定优势菌属和代谢功能,例如产甲烷菌驱动厌氧环境下有机物的分解和甲烷的产生,以及硝化细菌和反硝化细菌共同作用完成氮素的转化等<sup>[2]</sup>。这样的分析不仅有助于深入了解微生物社群的生态作用,还能识别出具备特定代谢功能的菌种,例如能够降解抗生素的菌种和能够耐受重金属的微生物等,功能挖掘需要综合运用代谢组学和蛋白质组学技术在分子水平上揭示微生物的代谢机制,通过对微生物代谢产物和酶活性变化的分析可以阐明不同菌群降解污染物的协同作用机理。比如厌氧阶段水解酸化菌把复杂的有机物分解成小分子脂肪酸,给产甲烷菌作为底物;在好氧阶段,聚磷菌以摄入过多的磷来达到水体除磷的目的。对这些代谢途径的深入探讨可以为菌群结构的定向调控提供一定的理论依据。

### 2.2 高效降解菌群的筛选与培养

筛选和培养高效降解菌群,是提高处理效能最核心的步骤,筛选过程中需要模拟真实的废水处理环境并建立选择性培养基,对目标功能菌群进行富集,对于有机物降解而言,可以通过逐渐增加底物浓度来筛选耐受性好和降解效率高的菌株;对氮和磷的去除需要构建以氨氮、亚硝酸盐或者磷酸盐作为唯一氮源和磷源,并分离出有特定转化功能微生物的培养基<sup>[3]</sup>。筛选得到的单菌株经过生理生化特性鉴定,并采用混合培养的方法构建了功能互补复合菌群,以提高降解复杂污染物能力,菌群培育过程中需要对营养条件和环境参数进行优化,采用响应面分析法对碳氮比和微量元素添加量这两个关键营养因子进行测定,在调节温度、pH值和溶解氧这三个环境条件下促进目标菌群生长和繁殖。定向驯化技术可以进一步提高菌群适应污染物的能力,例如通过逐渐提高抗生素浓度来培养抗生素降解能力强的微生物菌群等,利用基因工程手段可以改造微生物代谢途径以提高微生物降解特定污染物能力,但是需要对基因改造菌株进行全

面的生态安全性评价,在筛选和培育高效降解菌群方面,采用高通量筛选技术可以显著提高菌株挖掘效率。利用微流控芯片和自动化培养系统可以对大规模菌株进行快速分离和活性评估,定向进化技术还可以模拟自然进化压力,并通过连续传代培养和人工诱变等手段加快微生物代谢途径优化速度。

### 2.3 环境因子的协同调控技术

环境因子的协同调控对保持微生物活性和处理系统稳定性至关重要,温度作为微生物代谢速率变化的核心要素,需要针对不同的处理工艺和微生物特性精准调控。厌氧处理中在中温(30-35°C)和高温(50-55°C)下微生物代谢途径不同,需要综合考虑处理对象选择合适的温度范围;为了确保硝化和反硝化菌群的活跃性,好氧处理的温度需要保持在25-35°C之间。调节pH值需要考虑到不同微生物对酸碱的耐受能力,例如厌氧产甲烷阶段合适的pH是6.8-7.2,硝化过程则需要保持7.5-8.5,溶解氧浓度决定了微生物的代谢途径,厌氧-好氧组合处理工艺需要通过曝气强度和曝气时间的准确控制来实现厌氧区和好氧区功能分区。溶解氧不足可使硝化不彻底,过多对反硝化过程产生抑制作用。氧化还原电位(ORP)是一个综合性的指标,用于描述系统的氧化还原状况,它可以指导厌氧区的操作调节,并保持产甲烷菌的代谢活跃性。另外,水力停留时间和污泥龄等运行参数需要与环境因子进行协同优化,并通过动态调控才能使处理系统高效平稳地运行。

环境因子协同调控需要多参数耦合动态响应机制,实际操作过程中温度、pH值和溶解氧并不是单独起作用的,是以交互影响的方式使微生物群落结构和代谢活性发生变化。如温度变化可以影响微生物酶促反应速率,从而改变微生物对pH值的忍受范围;通过改变氧化还原电位,溶解氧浓度的波动有可能对厌氧微生物的电子传递链功能产生影响。为此,需要构建以机器学习为核心的调控模型,并通过实时监测和数据反馈来实现多因子协同优化。另外,还需要将环境因子时空分布特性考虑在内,例如多级处理单元内针对不同功能需求建立差异化环境参数,梯度调控推进微生物功能分区以提高整体处理效能等。

### 2.4 厌氧-好氧组合处理工艺

厌氧-好氧联合处理工艺以功能分区和优势互补的方式达到污染物高效去除和能源回收的目的。厌氧阶段通过产酸菌、产氢产乙酸菌和产甲烷菌协同作用使大分子有机物分解成甲烷和二氧化碳,废水中有机物浓度下降。这一阶段既降低了后续好氧处理的负荷,又生产了可再生能源沼气。好氧阶段是利用活性污泥或者生物膜内硝化细菌和反硝化细菌将氨氮转化成硝态氮,最后还原成氮气达到彻底去除氮素。好氧条件下聚磷菌对磷的摄入过多,并通过排出剩余污泥达到除磷的目的,工艺优化需要处理厌氧和好氧单元之间的连接,通过建立水解酸化预处理单元可以改善废水可生化性,并创造厌氧处理的良好条件。厌氧出水需要经过水质调节和pH值及碳氮比的调控以适应好氧处理的需要。联合工艺方面,通过分段进水和内回流的技术手段实现了碳源分配和电子传递效率的优化,促进了脱氮除磷。此外,通过

引入膜分离技术(如MBR)强化固液分离,可提高污泥浓度与微生物停留时间,增强系统抗冲击能力,厌氧-好氧联合处理工艺效能的提高,有赖于对单元之间物质流和能量流进行精细化管理,从物质传递层面上看,需对厌氧出水预处理流程进行优化,并通过调整碳氮比和酸碱度为好氧脱氮除磷提供理想的基质条件。对于厌氧阶段生产的沼气可以发展能源回收和再利用的系统,例如利用沼气对厌氧反应器进行加热,使其温度保持稳定,从而达到能量自给。工艺衔接方面,通过分点进水和循环回流的方式避免了好氧单元碳源的缺乏,增强了反硝化的效率。另外,引入动态监测设备和智能控制系统来实时调节厌氧和好氧处理的时间比例,可以有效地应对水质水量的波动,保证系统的平稳运行。

## 2.5 菌群固定化载体的创新

菌群固定化载体的创新是针对悬浮态微生物容易丢失和活性衰减的问题而提出的,选择载体材料需要综合考虑生物相容性、机械强度和传质性能等,活性炭、陶粒等无机材料化学稳定性和吸附性能好,能有效地富集微生物和脱除某些污染物;聚氨酯、聚乙烯醇等有机高分子材料的高孔隙率和柔韧性有利于微生物附着生长。复合载体采用无机和有机材料相结合的方式,可以同时具备二者的优点,例如活性炭-聚氨酯复合载体在提供吸附位点的同时还可以确保微生物的活性,载体结构设计是影响固定化效果的关键因素,通过构筑多孔结构和梯度孔隙分布可以提高载体比表面积,并促进底物和代谢产物之间传质。仿生设计理念的提出使得载体表面能够模拟自然生物膜微环境,并优化微生物生长形态和代谢活性。另外,表面改性技术例如纳米涂层和接枝共聚也可以使载体具有特定的功能,例如抗生物污染和促进微生物附着。固定化方法创新主要有包埋法、吸附法和交联法,需要结合微生物特性和处理工艺来选择合适的固定化方式,以达到保持菌群活性和提高处理效能的双目的,菌群固定化载体创新需走向功能集成化,新型载体除了要满足微生物附着和防护的需要之外,还需要具有污染物吸附和酶促反应增

强的多重作用。比如将纳米级金属氧化物负载到载体上,就可以利用它们的催化活性来促进难降解有机物氧化分解;嵌入导电材料中制备得到的导电载体可以电刺激提高微生物代谢活性和胞外电子传递效率。载体形态设计中,利用3D打印技术可以对载体结构进行个性化定制,并通过仿生多孔网络的构建来优化微生物和底物之间的接触面积。与此同时,载体可持续性设计也成为了一种新潮流,研发可降解、易回收环保型载体材料有利于降低处理成本和减小二次污染风险。

## 3 结束语

在微生物菌群调控基础上,发展畜牧养殖废水高效生物处理技术,为解决畜牧养殖废水的污染提供一种有效途径。通过改善微生物菌群结构,调节培养条件和应用固定化技术,可显著提高废水处理效率,实现废水达标排放或者资源化利用。今后,应对其生态学特性及调控机制进行进一步研究,发展更有效和更稳定的技术,以促进畜牧养殖业和环境保护协调发展。

## [基金项目]

本文系2024年度黑龙江省生态环境保护科研项目“生物法处理养殖废水的应用研究”(项目编号:HST2024S014)的研究成果之一。

## [参考文献]

- [1]高成康,朱素龙,张帅兵.城市食物-能源-水系统的关联关系研究:以广州市为例[J].北京师范大学学报(自然科学版),2021,57(05):709-717.
- [2]潘芳伟.畜牧养殖污水处理的自动控制系统设计[J].中国畜牧业,2021(19):46.
- [3]黄玲.北票市粪污整治工作综合治理规划[J].北方牧业,2023(19):8.

## 作者简介:

殷德霖(1987--),男,黑龙江省富锦市人,硕士研究生,黑龙江大学,高级工程师,水污染防治。