

微生物絮凝剂研究及在污水领域的应用现状

章沙沙^{1,2}, 柳增善¹, 周红梅², 徐健峰²

(1. 吉林大学 动物医学学院, 吉林 长春 130062;

2. 盘锦检验检测中心, 辽宁 盘锦 124010)

摘要:近年来, 微生物絮凝剂对人体的安全性和环境友好性的种种优势, 引起了人们的密切关注。文章归纳了微生物絮凝剂产生菌的种类, 阐述了微生物絮凝剂絮凝作用影响因素, 列举了微生物絮凝剂在各种类型污水处理中的广泛应用, 并针对应用中的问题提出了未来的研究方向。

关键词:絮凝剂产生菌; 微生物絮凝剂; 污水处理

中图分类号: X703.3

文献标志码: A

DOI: 10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2022.01.13

Research of microbial flocculants and its application in sewage treatment

ZHANG Shasha^{1,2}, LIU Zengshan¹, ZHOU Hongmei², XU Jianfeng²

(1. Jilin University College of Animal Medicine, Changchun 130062, China;

2. Panjin Center for inspection and testing, Panjin 124010, China)

Abstract: In recent years, the safety and environmental friendliness of microbial flocculants to the human body have been attracted more attention. This paper summarized the types of the microbial flocculant-producing bacteria, classified and explained the factors affecting the flocculation performances. This study also reviewed the wide application of the microbial flocculants in various types of the sewage treatment, and proposed the future research and development for the application problems.

Keywords: flocculant-producing bacteria; microbial flocculant; water treatment

CLC number: X703.3

水是人类生命的源泉。预计到 2025 年世界 2/3 的人口将可能生活在水资源匮乏的环境中, 随着我国人口的不断增长和城市化的发展, 对水资源需求量越来越大, 水污染问题日渐突出, 污水处理已经成为急需解决的重大问题。我国每年排放的工业废水和生活污水量约 1 000 亿吨, 有的污水未经处理直接排入江河湖海中^[1]。污水处理的一个主要困难是分散在水中的颗粒由于其固化稳定性和沉降稳定性而不能得到有效分离。为了破坏其稳定性, 对水中的颗粒常采用絮凝沉降的方法。大多数污水处理厂, 水箱中的水流经第一个隔室一般是加入絮凝剂来优先处理其中较大颗粒。然后污水流到沉淀池, 沉淀池内发生絮凝过程, 悬浮颗粒沉淀在池底, 澄清上层水流。该阶段的澄清水经过过

滤过程, 然后进行消毒等后续过程^[2]。传统的无机和有机絮凝剂在污水处理中起着关键作用, 以聚合氯化铝、硫酸铝等为代表的无机絮凝剂使用后会对环境产生二次污染, 大量的铝蓄积到人体内易致老年痴呆。以聚丙烯酰胺、磺化聚乙烯苯等为代表的有机高分子絮凝剂使用后分解的单体具有较强的神经毒性, 美国等发达国家在许多领域已限量或禁止使用^[3]。而微生物絮凝剂则能够克服这些商业絮凝剂固有缺陷, 有望成为传统絮凝剂更安全的替代品。微生物絮凝剂(microbial flocculant, MBF)是一类具有絮凝活性的微生物代谢产物, 能凝聚沉淀液体中不易降解的固体悬浮颗粒和胶体颗粒, 是一种高效、无毒和无二次污染, 具有生物分解性, 安全性的绿色水处理剂。目前, 微生物絮凝剂在很

收稿日期: 2020-12-10

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目(2018YFD0500504); 盘锦市自然科学基金计划(202101005)

作者简介: 章沙沙(1984-), 女, 博士、高级工程师。研究方向: 微生物检测与应用。E-mail: 250456075@qq.com

通信作者: 徐健峰(1969-), 男, 硕士、主任医师。研究方向: 实验室检验技术。E-mail: xujianfeng69@163.com

引用格式: 章沙沙, 柳增善, 周红梅, 等. 微生物絮凝剂研究及在污水领域的应用现状[J]. 环境保护科学, 2022, 48(1): 74-80.

多发达国家已实现工业化生产及应用,在日本和美国已有多种牌号的微生物絮凝剂销售用于废水处理^[4]。我国微生物絮凝剂研发尚处于起步阶段,但我国每年污水产量巨大,随着国家对企业环境影响评价要求越来越严格的情况下,微生物絮凝剂的应用将成为必然趋势,在废水处理中具有广阔的应用前景。

1 微生物絮凝剂产生菌的种类

根据絮凝剂制备和组成来源的不同,可将微生物絮凝剂分为 4 大类^[5]。直接利用微生物菌体作为絮凝剂;利用微生物菌体提取物作为絮凝剂,如细胞壁内含有的葡聚糖、蛋白、甘露聚糖和 N-乙酰葡萄糖胺等组分;利用菌体代谢产物,主要来自细菌的荚膜、粘液、多糖、多肽和蛋白质等代谢成分;通

过基因克隆技术获得的微生物絮凝剂。根据化学成分不同,微生物絮凝剂可分为 3 大类:蛋白质和多肽类物质,此类絮凝剂产生菌以芽孢杆菌、红平红球菌和酵母菌等为主;多糖类物质,目前发现的微生物絮凝剂有效成分为多糖类占 2/3 以上;脂类物质,已发现唯一脂类絮凝剂是红城红球菌制备的微生物絮凝剂,分别由海藻糖二霉菌酸酯、葡萄糖单霉菌酸酯和海藻糖单霉菌酸酯 3 种组分组成。

研究微生物絮凝剂的最终目的是将其用于实际的生产生活实践中。不同废水由于其来源不同,组成成分也相差很大。处理这些废水所需的微生物絮凝剂功能也千差万别。微生物絮凝剂产生菌广泛分布于空气、土壤、矿石、污水、污泥和动物体内等环境中,种类繁多,包括真菌、细菌和放线菌等,见表 1。

表 1 废水中使用的微生物絮凝剂产生菌、主要成分及应用范围

微生物种类	菌种中英文名称	絮凝剂主要成分	应用范围
细菌	红平红球菌 (<i>Rhodococcus erythropolis</i>)	蛋白质、多肽、脂质	畜产废水,砖场生产废水,膨胀污泥,造纸废水、细煤废水
细菌	铜绿假单胞菌 (<i>Pseudomonas aeruginosa</i>)	酸性蛋白、酸性多糖	石油污水
细菌	枯草芽孢杆菌 (<i>Bacillus subtilis</i>)	蛋白质(谷氨酸)、总糖,糖醛酸	煤泥废水、食品和发酵工业下游加工
细菌	烃类甲基杆菌 (<i>HydrocarboncalastusMethylobacterium</i>)	蛋白质,聚多糖	含重金属污水
细菌	产碱杆菌属 (<i>Alcaligenes cupids</i>)	糖、半乳糖、葡糖醛酸、乙酸	偶氮染料废水
细菌	荧光假单胞菌 (<i>Pseudomonas fluorescens</i>)	酸性蛋白,少量半乳糖、半乳糖醛酸、葡萄糖	有机废水
细菌	暹罗芽孢杆菌 (<i>Bacillus siamensis</i>)	多糖类和蛋白质	酿酒废水
细菌	动胶菌属 (<i>Zoology</i>)	多糖	泥浆、味精废水、酸性湖蓝 A 染料废水
细菌	根癌土壤杆菌 (<i>Agrobacterium tumefaciens</i>)	半乳糖,甘露糖,鼠李糖和葡萄糖	城市污水处理厂
细菌	土杆菌属 (<i>Agrobacterium sp.</i>)	多糖	啤酒厂、去除重金属废水、乳及肉制品生产厂废水
细菌	黄孢原毛平革菌 (<i>Phanerochaete chrysosporium</i>)	多糖	去除水中重金属、低阶煤泥水
细菌	罗尔斯通氏菌(<i>Ralstonia sp.</i>)	多糖	染料脱色,去除重金属离子和提高污泥活性
细菌	假单胞菌属 (<i>Pseudomonas sp.</i>)	酸性蛋白、酸性多糖	含石油污水生活污水、泥浆水、墨汁和黑色素溶液
细菌	纤维微细菌属 (<i>Cellulosimicrobiiums sp.</i>)	多糖,蛋白,多肽	家禽家畜废水,食品厂废水,城市生活污水,收集小球藻
细菌	海洋光合细菌 (<i>Rhodovulum sp.</i>)	多糖聚合物	食品加工厂废水
细菌	多角海洋杆菌 (<i>Oceanobacillu spolygoni</i>)	多糖和蛋白质	制革废水
细菌	盐藻芽孢杆菌属 (<i>Bacillus salmalaya</i>)	多糖和蛋白质	工业废水
细菌	根瘤菌 (<i>Rhizomonas sp.</i>)	多糖、蛋白质	垃圾渗滤液
细菌	肺炎克雷伯菌 (<i>Klebsiella pneumoniae</i>)	蛋白质、多糖	沉淀蓝藻、城市污水

续表 1

微生物种类	菌种中英文名称	絮凝剂主要成分	应用范围
细菌	地衣芽孢杆菌 (<i>Bacillus</i> sp.)	多聚糖	淀粉废水、含泥河水、硫化染料废水和淀粉黄浆废水
细菌	气单胞菌 (<i>Aeromonas</i> sp.)	糖蛋白	染料脱色、实际排污河水除藻
细菌	纤维单胞菌属 (<i>Cellulomonas</i> sp.)	多糖, 蛋白, 多肽	家禽家畜废水, 食品厂废水, 城市生活污水, 收集小球藻
细菌	肠杆菌属 (<i>Enterobacter</i> sp.)	半乳糖醛酸、葡萄糖、半乳糖、戊醛糖	NG
真菌	黑酵母 (<i>Black yeast</i>)	多糖类	高浓度味精废水
真菌	白腐菌 (<i>Trametes versicolor</i>)	多糖、蛋白质	生物乙醇厂废水
真菌	红曲霉 (<i>Monascus anka</i>)	聚半乳糖胺	酱油废水
真菌	酱油曲霉 (<i>Aspergillus sojae</i>)	半乳糖、葡糖胺、酮葡萄糖、蛋白质	城市污水厂浓缩污泥、洗毛废水、煤泥水
真菌	寄生曲霉 (<i>Aspergillus parasiticus</i>)	半乳糖胺多糖类	淀粉厂黄浆废水、泥河水、硫化染料废水
真菌	拟青霉菌属 (<i>Paecilomyces</i> sp.)	半乳糖胺、乙酰基、甲酰基, 淡化半乳糖胺	食品废水, 煤浆废水、纺织废水
真菌	椭圆酿酒酵母 (<i>Saccharomyces cerevisiae</i>)	核糖体蛋白	蘑菇工业废水、酒精发酵
真菌	拟盘多毛孢属 (<i>Pestalotiopsis</i> sp.)	葡萄糖、葡(萄)糖胺等多聚糖	染料废水脱色
真菌	扣囊复膜酵母菌 (<i>Saccharomycopsis fibuligera</i>)	蛋白质	红薯淀粉废水
放线菌	灰色链霉菌 (<i>Streptomyces griseus</i>)	多糖、蛋白及糖蛋白	印染污水、炼油污水、处理生物工程发酵液
放线菌	红色链霉菌 (<i>Streptomyces vinaceus</i>)	蛋白质、多糖	处理含Pb ²⁺ 废水
海藻类	墨西哥衣藻 (<i>Chlamydomonas mexicana</i>)	亚麻酸, 亚油酸、棕榈酸	畜牧养殖场废水
海藻类	环圈拟鱼腥蓝细菌 (<i>Anabaenopsis circularis</i>)	丙酮酸、蛋白质、脂肪酸	NG
海藻类	草螺旋藻 (<i>Herbaspirillum</i> sp.)	NG	污水中重金属离子 (Cr ²⁺ 和Ni ²⁺)
海藻类	席藻 (<i>Phorimidium</i> sp.)	磺酸异多糖、脂肪酸、蛋白质	纺织染料污水

注: NG表示未提及。

2 对絮凝作用的影响因素

2.1 温度

微生物絮凝剂一般在常温 (20 ~ 30 ℃) 下使用, 絮凝剂的成分与温度关系密切, 与多糖类成分的絮凝剂相比, 温度对蛋白质类的絮凝剂絮凝效果影响更大。如枯草芽胞杆菌 DYU1 生产的絮凝剂加热到 120 ℃ 时, 由于谷氨酸结构被破坏而完全失去活性^[6]。这是因为聚酰胺因温度升高而发生变性, 进而引起絮凝剂分子链断裂等结构变化, 导致絮凝剂活性下降。

2.2 pH

影响絮凝效率的最重要参数之一是污水的 pH 值。酸碱度的改变可能会影响微生物絮凝剂的带电状态和悬浮颗粒的表面特性, 高效的絮凝效果

需要特定类型的絮凝剂^[7]。QIAO et al^[8] 筛选到一株拟青霉 M2-1, pH 值为较宽范围 (2 ~ 11) 絮凝活性可到达 77% 以上。LI et al^[9] 发现一株帕氏芽胞杆菌 B69 生产的絮凝剂在较为广泛 pH(3 ~ 11) 范围内具有 80% 以上的絮凝活性, 表明这些絮凝剂可广泛应用于城市废水、农业废水和工业废水中。

2.3 微生物絮凝剂的添加剂量

对絮凝过程影响的重要因素之一是絮凝剂的浓度。絮凝剂用量一般有一个最佳值, 在较低的浓度范围内, 絮凝效果随絮凝剂浓度的增加而增强。但达到最佳浓度后, 继续投加絮凝剂, 絮凝效率会下降。也就是说, 浓度不足和太高都会使絮凝效果不一样, 浓度过高会浪费资源, 效率不高。出于产品成本控制等因素考虑, 絮凝剂添加量以絮凝效果最佳且用量最少为宜。此外, 微生物絮凝剂的搅拌

速率、培养体积、絮凝时间和通气量等也会对絮凝效果产生略微影响。

2.4 助凝剂的影响

常见的助凝剂通常为二价金属离子如 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Fe^{3+} 和 Al^{3+} 等,金属离子能增强微生物絮凝剂的中和作用和桥联作用,大多数微生物絮凝剂以 Ca^{2+} 作为助凝剂,也有少部分絮凝剂不需要使用助凝剂^[10]。如胡筱敏等^[11]从土壤中分离得到一株芽胞杆菌 A-9,在不需添加 Ca^{2+} 、 Al^{3+} 等助凝剂的情况下处理含淀粉厂黄浆废水,悬浮物和 COD 的去除率明显高于传统微生物絮凝剂。

3 微生物絮凝剂在废水处理中的应用现状

3.1 畜牧畜禽养殖废水处理

家禽家畜养殖业废水中的氨氮、BOD 和固体悬浮物含量较高,氮磷超标会造成水体富营养化,采用有机和无机絮凝剂处理效果都不理想,而且易产生二次污染,微生物絮凝剂能有效降低废水中的 COD、TOC、AN 和 TN 等指标。宋永庆等^[12]从污泥样品中筛选出一株絮凝剂产生菌 M-3,该菌在最佳培养条件下处理屠宰场废水后絮凝率达 78.0%,COD 去除率为 34.6%,絮凝剂最佳投加比为 10~20 mL/L,助絮剂 1% CaCl_2 最佳投加比例为 30~40 mL/L。本实验室从反刍动物体内分离出一株纤维单胞菌 P40-2 和一株纤维化微细菌 P71-1,在最佳培养条件下制备微生物絮凝剂 MBF-P40 和 MBF-P71,处理猪养殖场废水,絮凝率分别为 96.07% 和 93.63%,COD 去除率分别为 71.05% 和 88.32%,总氮去除率分别为 43.75% 和 38.50%,氨氮去除率分别为 40.22% 和 40.63%,絮凝剂最佳投加比为 10 mL/L,助絮剂 10% CaCl_2 最佳投加例为 5 mL/L^[13-14]。

3.2 城市生活污水处理

城市生活污水中含大量的有机污染物,周明罗等^[15]以白酒酿造废水替代常规培养基,培养假中间苍白杆菌,添加量为 60 mL/L 时处理生活污水,絮凝率高达 86.8%,悬浮物去除率为 92.5%。张超等^[16]研究了 6 种絮凝剂对生活污水进行处理,选用絮凝剂 LF-Tou2 优化絮凝效果可使生活污水中的 COD 和 SS 去除率分别达到 92.9% 和 100%。NIE et al^[17]从污水处理厂分离筛选到一株肺炎克雷伯菌 NY1,在投加量为 44 mg/L 时,MNXY1 去除城市废水中总悬浮物的 72%,使原废水中的 BOD 和

COD 分别从 100% 降低到 89% 和 84%。本实验室制备絮凝剂 MBF-P40 在添加量为 10 mL/L, pH 为 6.0~8.0 时,处理城市生活污水絮凝率达到 50.76%,COD 去除率为 10%,氨氮去除率为 23.08%。

3.3 水产养殖废水处理

水产养殖废水具有碳、氮、磷等营养物质含量较高,COD、BOD₅ 及悬浮物等相对含量较低的特点。利用微生物絮凝剂进行净化是改善水质、缓解氮污染的研究热点。微生物絮凝剂能促进生物絮团在水池塘中形成,以改善池塘水环境,降低饲料投入比例、促进水产动物生长等作用。以色列养殖专家 AVNIMELECH^[18]发现了一种即实用又经济的方法来减少池塘中无机氮积累,他利用微生物吸收池塘中无机氮,其优点是即降低饲料消耗且减少养殖污水排放,一举两得。目前,水产养殖污水处理应用最广的絮凝菌是硝化细菌和反硝化细菌^[19],近年来,假单胞菌属、产碱杆菌属和脱氮副球菌属等好氧反硝化细菌备受研究学者的关注^[20-21]。好氧反硝化细菌不仅缩短工艺流程,而且能充分利用水体中碳源进行自身代谢,充分满足水产养殖富氧需求。

3.4 染料废水脱色

印染废水是指毛、棉、麻及其纺织品在印染过程中产生的废水。印染废水成分复杂,化学需氧量高,有机污染物含量高,碱度高,甚至含有有毒有害物质,如 Cr^{6+} 、苯胺染料等,是当前环境下较难处理的工业废水之一^[22]。微生物絮凝剂具有脱色效果良好、减少废水中的固形物等优点。TAO et al^[23]研究发现微生物絮凝剂 MBF-gP 桥接作用在处理偶氮染料废水中起着至关重要的作用。MBF-gP 上的官能团起到吸附中心的作用,氨基上发生了接枝共聚,形成了大而致密的絮凝物。GAO et al^[24]报道了从菲律宾分离出一株细菌 ZHT4-13 产生的絮凝剂 MBF4-13,对蓝色和紫色染料具有较强的脱色效率,使亚甲基蓝、结晶紫和孔雀石绿的去除效率分别为 86.11%、97.84% 和 99.49%,而对红色、粉红色和橙色染料的脱色能力较低。相反,邓述波等^[25]发现寄生曲霉分泌的微生物絮凝剂对活性蓝和酸性黄的去除效果优于碱性蓝 B。

3.5 含重金属废水处理

重金属废水中含有有毒的 Cd、Ni、Hg 和 Zn 等离子,易在生物链中积累,大量排放会危害人体健康。由于重金属离子不能被分解破坏,只能通

过转移位置和物理、化学形态来降低废水中的浓度。研究表明,氨基、羧基和羟基等官能团丰富的微生物絮凝剂能有效富集重金属离子,适合处理金属废水。红球菌属、假单胞菌属、芽胞杆菌属、脱硫弧菌属和希瓦氏菌属絮凝剂对于重金属离子的吸附量可以达到几十甚至几百 mg/g。周焱^[26]采用微生物絮凝剂 MBFGA1 处理含金属镍的污水,实验结果表明,去除率高达 99.21%。LIN et al^[27]利用草螺旋藻 CH7、类芽胞杆菌 CH11、CH15 和中度嗜盐菌产生的微生物絮凝剂处理工业废水,结果表明,Cr²⁺的去除率高达 95%,Ni²⁺去除率高达 94%。陈婷^[28]利用微生物絮凝剂吸附废水中 84.55% 的 Ni²⁺、99.13% 的 Pb²⁺和 94.44% 的 Cd²⁺。

3.6 食品工业废水处理

食品工业是工业生产中废水产生量最大的行业之一,其废水成分复杂,含有大量的有机物和悬浮物,直接排放到环境中会消耗水中大量的氧气,严重造成水体恶化,破坏环境。若采用有机和无机絮凝剂处理,絮凝回收率不易降低。微生物絮凝剂能有效去除食品加工废水中 COD、SS 和浊度。杨琳等^[29]利用 EH-5 生产的絮凝剂处理乳品废水和啤酒废水, COD 去除率分别达到 74.79% 和 64.15%, 浊度去除率分别为 93.78% 和 95.51%, 色度去除率分别为 75.00% 和 69.57%。宋清生^[30]利用活性炭吸附固定微生物絮凝剂对淀粉废水进行处理,在最佳温度和 pH 值条件下,淀粉废水的浊度去除率高达 97.7%。ZHANG et al^[31]分离得到一株地衣芽孢杆菌,用糖蜜为碳源制备微生物絮凝剂对甘蔗汁进行澄清,清汁的浊度和色值分别达到 206 NTU 和 1 267 IU,处理结果与聚丙烯酰胺处理后结果基本一致。QIAO et al^[8]研究获得絮凝剂 MBF2-1 分别去除大豆炼油废水中 55% 的 COD 和 53% 的油含量,表明 MBF2-1 处理含有高浓度 COD 和脂质的大豆炼油厂废水具有潜在的应用价值。本实验室利用絮凝剂 MBF-P40 和 MBF-P71 处理面包厂废水,絮凝率分别达到 58.68% 和 87.62%, COD 去除率为 10.63% 和 8.4%。

3.7 造纸废水处理

造纸行业发展与环境保护之间的矛盾由来已久,造纸过程中产生的废水排放量大,难降解,是一种高污染的有机废水。造纸废水仅仅通过普通污水处理方式处理并不能达到国家排放标准,主要残

留污染物中的 COD > 100 mg/L^[32]。微生物絮凝剂作为新一代绿色水处理剂,已逐渐应用于造纸废水处理中。芦艳等^[33]利用菌株 M-3 提取的絮凝剂处理造纸废水,在最佳条件下,絮凝率高达 98%,氨氮去除率高达 96%,具有很好的净化效果。周英勃等^[34]选用廉价的白醋废水作为微生物絮凝剂产生菌 W-2 的原料处理造纸厂废水,絮凝率高达 96.77%, COD 去除率为 56.13%, 色度去除率为 95.60%, 具有较好去除效果。李文鹏等^[35]向造纸厂剩余污泥中投加药剂制备微生物絮凝剂 LBF,处理造纸废水 COD 去除率达 39%, SS 去除率达 87%,较传统聚合氯化铝絮凝剂效果更佳,并且,实现了造纸废物的合理利用,有效降低处理成本。

3.8 化工工业废水处理

化工厂排放的废水具有水体的量大,成分复杂、污染物含量高、COD 值高、有毒有害物质多、色度高和气味重等特点,这类废水的处理已成为当今环保领域的难题。与常规絮凝剂相比,微生物絮凝剂已被证实絮凝过程中产生较小的絮凝基团,固液分离相对迅速,且絮凝后物质无毒害作用,更适合于一些低浓度工业废水处理。吴大付等^[36]从某化工厂周围土壤中分离筛选出 1 株高产絮凝剂的细菌菌株,经优化发酵条件发现其对化工厂污水中悬浮物的去除效果很强,对高浓度染料废水的脱色也有一定作用。本实验利用絮凝剂 MBF-P40 和 MBF-P71 处理某大型化工集团废水,总氮去除率分别为 80.62% 和 40.71%,具有潜在的应用前景。

3.9 制药废水处理

制药废水具有有毒有害物质多、可生物降解物质多和抗生素残留量大等特点。利用微生物絮凝剂的优点和特性处理制药废水,已引起了众多学者的关注。石春芳等^[37]分离筛选到一株对制药废水有较强絮凝作用的絮凝剂产生菌 G13,处理某制药厂废水时,臭度由 5 级变为 3 级, COD 去除率为 35.19%, 浊度去除率为 59%, 色度去除率为 75%。

4 微生物絮凝剂研发方向

微生物絮凝剂是近年来备受关注的一种绿色水处理剂,潜在的社会效益和环境效益使得其在污水处理领域具有广阔的应用前景。但就目前研究开发现状来看,微生物絮凝剂还没有广泛应用于工业实际生产中。我国微生物絮凝剂研究工作多数

集中在絮凝剂产生菌的分离筛选方面,研究文献很多,真正实现转化应用的少之又少。综合国内外研究进展,对微生物絮凝剂应用面临的问题归纳如下。

(1)目前国内科研人员仍在致力于从植物或较罕见的动物中获得微生物絮凝剂,由于微生物培养基成本较高,实验室培养过程中酵母提取物、蛋白胨等的使用量大,成本过高,不利于大规模生产和应用。单一微生物菌种絮凝剂产率低、絮凝能力有限,实际应用中缺乏可行性。

(2)微生物絮凝剂作为第三代絮凝剂,缺乏相应安全性评价体系和国家产品标准。

(3)由于微生物絮凝剂是天然高分子物质,存在稳定性差、运输贮存困难和防腐保质期短等缺点,这些都增加了应用的难度,在工业实践中尚未实现大规模应用。

基于上述现状和问题,思考微生物絮凝剂未来研发方向主要包括以下3点。

(1)今后的研究重点应侧重于使用可生物降解的、易获得、安全的生物聚合物,或利用廉价原料或废物作为常规实验室培养基的替代品。猪场粪水、食品工业废水及其他废水可用为微生物提供能量,同时减少氮等有机物的排放。通过分子生物学手段加强絮凝剂产生菌絮凝基因的研究,对高效絮凝剂产生菌进行诱变,增加参与絮凝核苷酸基因的表达量,实现絮凝基因的异源表达,选择应用更高效率更高的絮凝剂产生菌,逐步构建高效工程菌体系。利用纳米纤维素、葡聚糖、木质素、果胶、单宁和秋葵等为原料,开发新型生物絮凝剂^[38-40]。新型生物絮凝剂的潜在来源范围每年都在增长。可以预期新来源的絮凝剂及其改性技术的开发,将很快替代传统絮凝剂。

(2)建立一套完整的微生物絮凝剂产品评价体系,逐步制定微生物絮凝剂国家产品标准,并将产品推广应用到不同行业污水处理中,参照国家标准《污水综合排放标准:GB 8978—1996》及各行业污水排放标准,评估污染物排放限值是否达标。建立产品安全性评价体系,通过急性毒性试验计算小鼠半数致死量(LD₅₀);对小鼠灌胃或腹腔注射微生物絮凝剂14天,开展慢性毒性试验,评价产品的安全性,为絮凝剂产品工业化生产提供卫生学依据。

(3)优化微生物絮凝剂产品的提取方法和贮存

技术;研究与传统絮凝剂复配的复合型微生物絮凝剂,或获取新的生物材料及其改性方法,如与聚合物纳米复合材料联用,开拓絮凝剂的应用范围,更好地在废水处理工业中发挥作用。

参考文献

- [1] 徐伟. 强化微电解-Fenton 氧化联合工艺处理石化废水的试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- [2] JARVIS P, SHARP E, PIDOU M, et al. Comparison of coagulation performance and floc properties using a novel zirconium coagulant against traditional ferric and alum coagulants[J]. *Water Research*, 2012, 46(13): 4179–4187.
- [3] 朱喆, 李登新, 陈文渊. 一种微生物絮凝剂絮凝特性的研究[J]. *环境保护科学*, 2008, 34(5): 36–37.
- [4] YOKOI H, MORI S H J, HAYASHI S, et al. Biopolymer flocculant produced by an *Enterobacter* sp.[J]. *Biotechnology Letters*, 1996, 19(6): 569–573.
- [5] 房亚玲. 煤化工废水的微生物絮凝剂研究及其廉价制备[D]. 太原: 中北大学, 2016.
- [6] WU J Y, YE H F. Characterization and flocculating properties of an extracellular biopolymer produced from a *Bacillus subtilis* DYU1 isolate[J]. *Process Biochemistry*, 2007, 42(7): 1114–1123.
- [7] SUN Y, ZHU C, ZHENG H, et al. Characterization and coagulation behavior of polymeric aluminum ferric silicate for high-concentration oily wastewater treatment[J]. *Chemical Engineering Research & Design Transactions of the Institution of Chemical Engineers*, 2017, 119: 23–32.
- [8] QIAO N, GAO M, ZHANG X, et al. *Trichosporon fermentans* biomass flocculation from soybean oil refinery wastewater using bioflocculant produced from *Paecilomyces* sp. M2-1[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2019, 103(6): 2821–2831.
- [9] LI O, LU C, LIU A, et al. Optimization and characterization of polysaccharide-based bioflocculant produced by *Paenibacillus elgii* B69 and its application in wastewater treatment. [J]. *Bioresource Technology*, 2013, 134(9): 87–93.
- [10] 张晶, 王战勇, 苏婷婷, 等. 微生物絮凝剂的研究及应用前景[J]. *环境保护科学*, 2006, 32(4): 17–18.
- [11] 胡筱敏, 邓述波, 牛力东, 等. 一株芽孢杆菌所产絮凝剂的研究[J]. *环境科学研究*, 2001(01): 36–40.
- [12] 宋永庆, 张龙, 李南华, 等. 絮凝菌的筛选、培养条件优化及对屠宰场废水的处理[J]. *安全与环境学报*, 2016, 16(3): 211–215.
- [13] 章沙沙, 徐健峰, 柳增善. 微生物絮凝剂产生菌筛选及其对猪场污水絮凝效果分析[J]. *黑龙江畜牧兽医*, 2021(13): 10–16.
- [14] ZHANG S S, XU J F, SUN X L, et al. *Cellulomonas taurus* sp. nov., a novel bacteria with multiple hydrolase activity isolated from livestock, and potential application in wastewater treatment[J]. *Antonie Van Leeuwenhoek*. 2021, 114(5): 527–538.
- [15] 周明罗, 陈杰, 游玲, 等. 白酒酿造废水制备微生物絮凝剂的研究[J]. *中国酿造*, 2018, 11(37): 86–90.
- [16] 张超, 栾兴社, 陈文兵, 等. 新型生物絮凝剂处理生活污水的实验研究[J]. *工业水处理*, 2013, 33(9): 31–33.

- [17] NIE M, YIN X, JIA J, et al. Production of a novel bioflocculant MNXY1 by *Klebsiella pneumoniae* strain NY1 and application in precipitation of cyanobacteria and municipal wastewater treatment[J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2011, 111(3): 547–558.
- [18] AVNIMELECH Y. Carbon/nitrogen ratio as a control element in aquaculture systems[J]. *Aquaculture*, 1999, 176(3): 227–235.
- [19] 刘毅, 袁月华. 固定化光合细菌净化养殖水质研究[J]. *水利渔业*, 2008(2): 86–88.
- [20] 徐晨岚, 刘振鸿, 薛罡, 等. 产碱杆菌属 H5 对蓝藻的溶藻及脱氮效果的研究[J]. *环境工程*, 2018, 36(5): 26–30.
- [21] 司圆圆, 陈兴汉, 许瑞雯, 等. 好氧反硝化细菌脱氮研究进展[J]. *山东化工*, 2018, 47(4): 157–158.
- [22] LI H, WU S, DU C, et al. Preparation, performances, and mechanisms of microbial flocculants for wastewater treatment[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(4): 1360.
- [23] TAO W A, XTA B, SZ B, et al. Roles of functional microbial flocculant in dyeing wastewater treatment: Bridging and adsorption - ScienceDirect[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 15,384: 121506.
- [24] GAO Q., ZHU X H, MU J, et al. Using *Ruditapes philippinarum* conglutination mud to produce bioflocculant and its applications in wastewater treatment[J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(21): 4996–5001.
- [25] 邓述波, 余刚, 蒋展鹏, 等. 微生物絮凝剂在给水处理中的应用研究[J]. *中国给水排水*, 2001, 2(17): 5–7.
- [26] 周焱. 微生物絮凝剂 MBFGA1 去除水中 Ni(II) 的优化及机理研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
- [27] LIN J, HARICHUND C. Industrial effluent treatments using heavy-metal removing bacterial bioflocculants[J]. *Water SA*, 2011, 37: 265–270.
- [28] 陈婷. 多糖型微生物絮凝剂去除水中重金属离子的效能及机制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [29] 杨琳, 朱丹, 胡洲, 等. 微生物絮凝剂对乳品及啤酒废水的絮凝研究[J]. *大理学院学报*, 2014, 13(6): 63–65.
- [30] 宋清生, 薛美瑛. 活性炭吸附固定微生物絮凝剂处理淀粉废水的实验条件优化[J]. *山西科技*, 2020, 2(35): 105–109.
- [31] ZHANG X L, WANG Y P, LI Q B, et al. The production of bioflocculants by *Bacillus licheniformis* using molasses and its application in the sugarcane industry[J]. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 2012, 17(5): 1041–1047.
- [32] 李志萍, 刘千钧, 林亲铁, 等. 造纸废水深度处理技术的应用研究进展[J]. *中国造纸学报*, 2010(1): 102–107.
- [33] 芦艳, 孟丽丽, 乔富珍, 等. 高效微生物絮凝剂对造纸废水的应用研究[J]. *水处理技术*, 2009, 35(7): 9–12.
- [34] 周英勃, 柴涛, 段婉君, 等. 白醋废水制备微生物絮凝剂的响应面法优化及其对造纸废水的处理[J]. *环境工程学报*, 2016, 10(10): 5658–5664.
- [35] 李文鹏, 任晓莉, 项学敏, 等. 微生物絮凝剂对造纸废水的处理效果研究[J]. *工业水处理*, 2013, 11(33): 13–16.
- [36] 吴大付, 李东方, 任秀娟, 等. 微生物絮凝剂的生产工艺及絮凝效果研究[J]. *广东农业科学*, 2010(1): 88–91.
- [37] 石春芳, 冷小云, 等. 微生物絮凝剂在制药废水处理中的应用研究[J]. *现代化工*, 2015, 35(9): 85–89.
- [38] JUMADI J., KAMARI A., HARGREAVES J. S. J., et al. A review on nano-based materials used as flocculants[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2020, 17: 3571–3594.
- [39] BUENANO B., VERA E, ALDAS M B. Study of coagulating/flocculating characteristics of organic polymers extracted from biowaste for water treatment[J]. *Ingenieria e Investigacion*, 2019, 39(1): 24–35.
- [40] YM A, RM A, CHAI S, et al. Investigating the influence of pectin content and structure on its functionality in bio-flocculant extracted from okra[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 241: 116414.

(上接第 41 页)

晰,使日常环境管理工作记录更加便捷,也提供了对第三方机构管理和监督的有效手段。

4 总结与展望

随着全国生态环境大保护及小水电清理整改工作的推进,新建水电站项目越来越少,但在运行水电站数量众多,而中小型水电站环境管理水平相对薄弱,运行期的环境管理更是亟待加强。以大渡河安谷水电站为案例,从生态环境知识中心建设、环境管控提升内容研究、管理规程与制度建设和信息化平台开发等方面入手,探索安谷水电站运行期环境管控提升途径,既可为提升安谷水电站运行期环境管理水平提供工具,也可为其他在运行水电站

开展运行期环境管控提升工作提供借鉴,助力水电行业绿色健康发展。

参考文献

- [1] 司源. 水利水电工程对生态环境的影响及保护对策[J]. *人民黄河*, 2012, 34(2): 3.
- [2] 程为. 水电运行期环境管理亟待加强[N]. *中国环境报*, 2013-06-06(002).
- [3] 曹晓红, 步青云. 环境评估在加强水电建设项目生态保护中的作用——以安谷水电站为例[J]. *中国水能及电气化*, 2011(12): 17–19.
- [4] 芮建良, 盛晟, 白福青, 等. 安谷水电站鱼类栖息地生态保护与修复实践[J]. *环境影响评价*, 2015, 37(3): 18–21.
- [5] 陈一平, 王胜, 黄晋, 等. 业主视角下重大水利工程生态环境精益管理模式研究[J]. *项目管理技术*, 2015, 13(8): 120–123.