

细菌来源生物絮凝剂的研究进展

杨胜辉, 赵越, 李宇晴, 张林林*

山东科技大学安全与环境工程学院, 山东 青岛

收稿日期: 2026年3月3日; 录用日期: 2026年4月10日; 发布日期: 2026年4月24日

摘要

微生物絮凝剂因具有生物相容性好、可降解且适用范围广等显著优势, 在各类废水处理领域备受关注。尽管细菌是生物絮凝剂的重要来源, 但目前尚缺乏对其合成途径的系统性阐述。本文系统梳理了产絮凝剂细菌的主要类群, 详细阐述了不同类群菌株产物的成分差异与絮凝特性。同时, 本文深入解析了生物絮凝剂核心成分(包括胞外多糖、 γ -聚谷氨酸、糖蛋白及脂肽)的生物合成途径与关键调控基因, 并总结了当前用于提升絮凝剂产量与活性的调控策略。针对目前生物絮凝剂在实际应用中面临的环境适应性受限及生产成本高昂等瓶颈问题进行了分析, 本文提出了相应的解决策略: 包括借助微流控、基因工程及合成生物学等前沿技术获取高产菌株; 利用廉价农工业废弃物(水)作为底物以降低发酵成本; 以及融合人工智能技术以解析基因功能并优化生产工艺。本文旨在为生物絮凝剂的高效开发及其产业化应用提供坚实的理论支撑。

关键词

微生物絮凝剂, 生物合成途径, 胞外多糖, 调控策略, 人工智能

Research Progress on Bacterial-Derived Biofloculants

Shenghui Yang, Yue Zhao, Yuqing Li, Linlin Zhang*

School of Safety and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao Shandong

Received: March 3, 2026; accepted: April 10, 2026; published: April 24, 2026

Abstract

Microbial flocculants have garnered widespread attention in various wastewater treatment applications due to their exceptional biocompatibility, biodegradability, and broad applicability. Although

*通讯作者。

bacteria serve as a crucial source of these bioflocculants, a systematic elaboration of their synthetic pathways remains lacking. This review systematically categorizes the major groups of flocculant-producing bacteria and details the structural components and flocculation characteristics of their respective strains. Furthermore, we elucidate the biosynthetic pathways and key regulatory genes of core bioflocculant components—including extracellular polysaccharides, γ -polyglutamic acid, glycoproteins, and lipopeptides—and summarize current regulatory strategies employed to enhance their yield and activity. By analyzing existing bottlenecks such as limited environmental adaptability and prohibitive production costs, we propose targeted prospective solutions. These include utilizing microfluidics, genetic engineering, and synthetic biology to develop high-yield strains; exploiting low-cost industrial or agricultural waste to reduce production expenses; and integrating artificial intelligence to decode gene functions and optimize production processes. Ultimately, this review provides a solid theoretical foundation for the efficient development and industrial-scale application of microbial flocculants.

Keywords

Microbial Flocculants, Biosynthetic Pathways, Exopolysaccharides, Regulation Strategies, Artificial Intelligence

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

絮凝剂是水处理及废水净化过程中用于促进悬浮颗粒、胶体及有机物聚集沉降的关键物质，其通过电荷中和、颗粒间桥连、网捕卷扫等机制实现体系的固液分离。传统絮凝剂主要分为无机絮凝剂(如铝盐、铁盐)和有机絮凝剂(如聚丙烯酰胺) [1] [2]。无机絮凝剂凭借成本低、效率高的特点被广泛应用，但易残留金属离子，可能引发二次污染[3]。有机絮凝剂虽絮凝效率高，但单体(如聚丙烯酰胺)具有致癌性，其生物毒性和环境持久性限制了在饮用水处理中的应用[4]。生物絮凝剂作为新型环境友好型絮凝材料，是由微生物(细菌、真菌、藻类等)代谢产生的胞外生物聚合物，主要成分为多糖、蛋白质、核酸或其复合物，其分子量一般在 10^5 Da 以上[5] [6]。与传统化学絮凝剂相比，生物絮凝剂具有以下显著优势：一是生物相容性好，无毒性残留，对人体和生态系统安全；二是可生物降解，不会在环境中累积，降低污泥处理压力；三是适用范围广，对温度、pH 等环境因素适应性强，可处理复杂基质的废水[7] [8]。

目前生物絮凝剂的研究已覆盖市政污水、工业废水、饮用水净化及污泥脱水等多个领域。在市政污水处理中，生物絮凝剂可有效去除悬浮固体(TSS)、浊度及部分有机污染物(COD)。在工业废水处理中，针对纺织废水的色度、食品加工废水的油脂，生物絮凝剂展现出独特优势，如利用芽孢杆菌产生的絮凝剂处理印染废水，经优化后，在 DB-14 染料浓度为 68.78 ppm、添加 1 g 蔗糖且接种物添加量为 2.5% 的条件下，该菌株 72 小时后的生物降解率可达 92.76% [9]。在饮用水净化中，生物絮凝剂可减少传统铝盐带来的健康风险，例如，在培养时间 72 小时、絮凝剂投加量 3.2 g/L、pH 5.0 时，米曲霉对高岭土悬浊液的絮凝效率达 91.09%，且在 pH (4.0~9.0) 范围内效率均超 85% [10]。

细菌是自然界中分布最为广泛、适应能力最强的生物之一，也是生物絮凝剂的重要来源。目前发现的可产絮凝剂细菌涵盖变形菌门、厚壁菌门、拟杆菌门和放线菌门等常见门类，主要种属包括 *Bacillus*、*Klebsiella*、*Enterococcus*、*Proteus*、*Serratia* 及 *Corynebacterium* 等。例如，从土壤中分离的 *Bacillus licheniformis* CGMCC 2876 所分泌的絮凝剂含 89% 碳水化合物与 11% 蛋白质，碳水化合物中中性糖、氨基糖、糖醛酸

质量比为 7.9:4:1, 最高絮凝活性可达 700 U/mL, 且在 80°C 下处理 30 分钟仍能保留 90% 以上活性, 兼具高产性与耐热性[11]。从假单胞菌(*Pseudomonas* sp.)中分离的絮凝剂则能通过电荷中和作用降低水体浊度[12][13]。*Klebsiella pneumoniae* 的絮凝剂产物以多糖为主(占比 96.8%), 具有阳离子独立性, 无需额外添加 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 即可实现絮凝, 对棘阿米巴包囊去除率达 79.4% [14]。从活性污泥中分离的 *Serratia ficaria* 絮凝剂的活性达 95.4%, 可有效处理河水(COD 去除率 87.1%)、啤酒废水、肉类加工废水等多种实际废水, 处理纸浆废水时色度去除率 99.9%、COD 去除率 72.1%, 整体效果优于传统化学絮凝剂[15]。

目前, 已有多篇综述总结了生物絮凝剂的来源、分类、作用机制及应用[2] [16]-[18], 但仍多侧重于宏观性能与应用, 有关生物絮凝剂相关成分的合成途径和调控方式还缺乏系统阐述。本综述旨在整合近年来生物絮凝剂研究中的相关成果, 通过分析细菌产生生物絮凝剂合成的种类、合成途径、关键基因及调控方式, 探讨获取高产絮凝剂菌株的途径, 降低生产成本的方式以及人工智能技术在此领域的应用前景, 为生物絮凝剂的高效开发与产业化提供理论参考。

2. 生物絮凝剂研究的常用方法学

生物絮凝剂的研发涉及从菌株筛选到产物解析的多个环节, 建立标准化的方法学体系是推动该领域发展的基础。

2.1. 产生菌的高效筛选与鉴定

传统的筛选多依赖于观察培养基底物的粘稠度或高岭土悬浊液的沉降速率。近年来, 基于微流控的单细胞培养技术与高通量微孔板筛选模型相结合, 大幅提升了从复杂环境样本(如活性污泥、深海沉积物)中分离罕见高产菌株的效率。在菌株鉴定方面, 16S rRNA 基因测序结合全基因组测序(WGS)已成为确定其分类地位和挖掘潜在合成基因簇的标配手段。

2.2. 絮凝活性与效果的标准化评价

目前最普遍的评价模型是测定高岭土悬浊液的浊度去除率。然而, 实际废水的成分远比高岭土复杂。因此, 引入 Zeta 电位分析(测定表面电荷中和程度)、激光粒度仪(动态监测絮体粒径分布与生长动力学)以及三维荧光光谱(EEM, 评估溶解性有机物去除效果), 能够更全面地揭示絮凝剂的实际应用潜力。

2.3. 成分与化学结构解析技术

明确生物絮凝剂的构效关系依赖于精准的结构解析。通常采用凝胶渗透色谱(GPC)测定其绝对分子量及分布; 利用傅里叶变换红外光谱(FTIR)识别关键官能团(如-OH、-COOH、-NH₂); 通过核磁共振(NMR, 包括 ¹H、¹³C 及二维谱)解析多糖的糖苷键构型与重复单元; 利用高效液相色谱(HPLC)或液质联用(LC-MS)分析其单糖组成或氨基酸序列。

2.4. 发酵工艺优化与放大策略

生物絮凝剂的产量极易受碳氮源比例、pH、温度等影响。通常采用单因素实验结合响应面法(RSM)或正交实验进行统计学优化。在向发酵罐放大生产时, 由于高分子量絮凝剂的积累会导致发酵液粘度剧增, 因此对溶氧(DO)传递速率和搅拌剪切力的流体力学控制是实现工业化量产的核心考量。

3. 细菌来源的生物絮凝剂种类和合成途径

3.1. 主要产生菌种类及特性

目前已经发现产生生物絮凝剂的细菌来源广泛, 可从活性污泥、河湖底泥、养殖场污水、海洋、污水

厂废水、土壤等环境获得[19][20]。根据目前的研究。常见的分泌生物絮凝剂细菌在纲水平上主要包括芽孢杆菌纲、 γ -变形菌纲、 α -变形菌纲和放线菌纲等。

3.1.1. 芽孢杆菌纲

目前芽孢杆菌纲中能产絮凝剂的种属包括芽孢杆菌(*Bacillus*)、类芽孢杆菌(*Paenibacillus*)、嗜盐芽孢杆菌(*Halobacillus*)、枝芽孢杆菌属(*Virgibacillus*)和大洋芽孢杆菌(*Oceanobacillus*)等种属。作为最常见和最知名的菌属之一，芽孢杆菌也是革兰氏阳性菌中研究最深入的生物絮凝剂产生菌，其所产生生物絮凝剂的成分主要为多糖、 γ -聚谷氨酸(γ -PGA)、糖蛋白和脂肽等物质。除了常见的芽孢杆菌外，近年来发现的一些稀有细菌，如 *Bacillus mojavensis*、*Bacillus safensis* 和 *Bacillus aryabhatai* 等也具备产絮凝剂的能力，产物以多糖或者糖蛋白较为常见，这些细菌多分离自恶劣环境，对环境具有较强的适应能力[21]-[24]。例如，*Bacillus aryabhatai* strain PSK1 所产絮凝剂为糖蛋白，包含 76.67%葡萄糖、23.24%鼠李糖成分，通过 3 L 分批发酵后，24 h 产量达 6 g/L，18 h 时絮凝活性达最大值为 91.5% [23]。该种属细菌最早分离自印度海德拉巴国家科学气球设施发射的气球搭载低温采样器中，能耐受较广的温度(15°C~45°C)和 pH (5.0~9.0)范围显示出极强的环境适应性[22][23]。此外，通过对已经公开的基因组分析后发现 *B. aryabhatai* 还含有与藻酸盐合成相关的基因，而藻酸盐一般常见于革兰氏阴性菌中。

类芽孢杆菌(*Paenibacillus*)是另一种常见的产絮凝剂细菌，其模式菌为多粘类芽孢杆菌(*Paenibacillus polymyxa*)，因产多粘菌素而得名，其由 1 个多阳离子七肽环连接到酰基化三肽的 10 个氨基酸和 1 个 N-末端修饰的脂肪酸构成。类芽孢杆菌同样可以产多糖类生物絮凝剂，一些含有葡萄糖醛酸等新物质。例如，*Paenibacillus elgii* B69 的生物絮凝剂由葡萄糖、葡萄糖醛酸、甘露糖和木糖组成，无蛋白质和核酸杂质，对高岭土(去除率 87%)、阳离子染料(亚甲蓝 65%、阳离子红 X-GRL 72%)及实际废水(COD 68%、浊度 83%、色度 88%)均表现出高效去除能力[25]。*Paenibacillus* sp. M21629 所产絮凝剂的胞外多糖成分中富含羧基，命名为“絮凝糖酸(floccuronic acid)”，其分子量高达 2.38×10^8 Da。包含一个六糖重复单元结构，在 0.5~1 ppm 浓度下对高岭土悬浮液、煤炭废水和高浊度饮用水的浊度去除效率分别可达 99.8%、98.8%和 89.2% [26]。尽管芽孢杆菌在分泌多糖和 γ -PGA 方面展现出巨大潜力，但野生菌株的碳源转化率往往受限于胞内前体物质(如核苷酸糖)的供应瓶颈，以及副产物途径的竞争性碳消耗。这提示我们，未来突破产率天花板的关键在于利用合成生物学手段重塑其底层代谢网络(表 1)。

Table 1. Types and characteristics of bacterial bio-flocculators

表 1. 细菌产生物絮凝剂种类及特性

名称	分子量	结构组成	培养条件	絮凝效果	参考文献
<i>Bacillus subtilis</i> IFO3336	1.0×10^7 Da	γ -PGA (D-谷氨酸 50%~80%、 L-谷氨酸 20%~50%)	需 Mg^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Mn^{2+} 等 金属离子	-	[27]
<i>Bacillus salmalaya</i> 139SI-7(QZ-7)	5.13×10^5 Da	79.08%碳水化合物、 15.4%蛋白质	35.5°C培养 72 h、 pH 7 ± 0.2 、接种量 5%	废水 BOD 去除率 92.4%	[1]
<i>Paenibacillus</i> sp. M21629	2.38×10^8 Da	多糖“絮凝糖酸” (富含羧基)	蔗糖、28°C、pH 7.0	高岭土 99.8%、 煤炭废水 98.8%	[26]
<i>Halobacillus</i> Mvuyo	-	糖蛋白	葡萄糖、氯化铵， 中性 pH，需 Ca^{2+}	啤酒废水 COD 99.7%、 乳制品废水 COD 99.9%	[28]

续表

<i>Enterococcus faecalis</i>	-	MBF-21 (含羧基、羟基、酰胺基)	初始 pH 7、葡萄糖、牛肉膏	絮凝率 > 90%	[29]
<i>Staphylococcus cohnii</i> ssp.	-	-	40℃培养 2 天, Ca ²⁺ 和 Al ³⁺ 促进絮凝	1.2 mg/L + Al ³⁺ 活性 88.9%	[30]
<i>Pseudomonas veronii</i> L918	2.477 × 10 ⁴ Da	多糖(77.14%)、蛋白质(4.84%)	花生壳水解液	电厂冲灰水絮凝效率 92.51%	[31]
<i>Pseudomonas</i> sp. GXUN74702	-	总糖 78.90% (甘露糖、葡萄糖、盐酸葡萄糖胺)、蛋白质 6.78%	葡萄糖、尿素, pH 7.0, 30℃、180 rpm 振荡 36 h	絮凝率 92.5%	[32]
<i>Alteromonas</i> sp. CGMCC 10612	3.94 × 10 ⁵ Da	糖蛋白 (碳水化合物 69.61%、蛋白质 21.56%)	30 g/L 葡萄糖、1.5 g/L 小麦粉	刚果红(98.5%)、直接黑(97.9%)	[33]
<i>Citrobacter youngae</i> GTC 01314	大于 1.66 × 10 ⁶ Da	壳聚糖样, 含-OH、-CONH-、-NH ₂	乙酸、pH (2~8)、10℃~95℃	高岭土絮凝率 > 95%	[34]
<i>Agrobacterium</i> sp. M-503	8.1 × 10 ⁴ Da	中性糖、糖醛酸、氨基糖、蛋白质	蔗糖(产量 14.9 g/L, 转化率 74.5%)	-	[35]
<i>Achromobacter xylosoxidans</i> TERI L1	-	75%总糖、11.5%蛋白质	酵母粉、蛋白胨、蔗糖、NH ₄ Cl	高岭土絮凝率 87.65%	[36]
<i>Streptomyces</i> sp.	5.5 × 10 ⁴ Da	总糖(86.9%)、蛋白(12.8%)	-	微拟球藻絮凝率 99.18%	[37]
<i>Rhodococcus erythropolis</i>	-	多糖(91.2%)、蛋白质(7.6%)、DNA (1.2%)	廉价培养基 (污泥和畜禽废水)	絮凝率 > 98%	[38]
<i>Chryseobacterium daeguense</i> W6	-	蛋白质(32.4%)、多糖(13.1%)、核酸(6.8%)	投加量 1.2 mg/L、pH 5.6、15℃	高岭土絮凝率 96.9%	[39]
<i>Cloacibacterium normanense</i>	-	主要为蛋白质	污水污泥和粗甘油	95.3% ± 0.5%	[40]

3.1.2. γ -变形菌纲

目前在 γ -变形菌纲中发现的产生物絮凝剂菌包括: 假单胞菌(*Pseudomonas*)、克雷伯菌(*Klebsiella*)、交替单胞菌属(*Alteromonas*)、柠檬酸杆菌属(*Citrobacter*)和肠杆菌属(*Enterobacter*)等, 且以多糖和糖蛋白为核心活性组分。其中, 假单胞菌是 γ -变形菌纲最常见的细菌之一, 也是目前报道最多的产生物絮凝剂的阴性菌之一。*Pseudomonas aeruginosa* ATCC-10145 所产絮凝剂主要为糖蛋白衍生物, 蛋白质含 27%, 碳水化合物含 89%, 碳水化合物主要包括中性糖、糖醛酸和氨基糖, Ca²⁺、K⁺、Na⁺、Zn²⁺、Mg²⁺和 Cu²⁺可提高絮凝活性, 而 Fe³⁺和 Al³⁺则会抑制絮凝活性, 在仅投加 1%(质量体积比)即可使高岭土悬浊液的絮凝率达 80.50%。此外, 该生物絮凝剂具有热稳定性, 在 100℃加热 60 分钟后, 其活性仅降至 60.16% [41]。目前在克雷伯菌(*Klebsiella*)中发现了多种新型成分的絮凝剂。例如, 克雷伯菌所产新型生物絮凝剂 M-C11 由 91.2%的糖类、4.6%的蛋白质和 3.9%的核酸组成, 采用响应面法优化得到最佳絮凝条件时絮凝活性可达 92.37%, 可使污泥比阻(SRF)从 11.6 × 10¹² m/kg 降至 4.7 × 10¹² m/kg [42]。海洋细菌交替单胞菌属

(*Alteromonas* sp. CGMCC 10612)所产生生物絮凝剂为糖蛋白(碳水化合物 69.61%、蛋白质 21.56%),在 2 L 发酵罐中,絮凝活性和产率分别达 2575.4 U/mL 和 11.18 g/L,对刚果红、直接黑和亚甲基蓝的去除率分别为 98.5%、97.9%和 72.3% [33]。

值得注意的是,柠檬酸杆菌属(*Citrobacter*)和肠杆菌属(*Enterobacter*)的部分菌株可利用乙酸产生几丁质/壳聚糖样的新型生物絮凝剂。通过对 36 株柠檬酸杆菌属测定其培养上清液的絮凝活性,发现 21 株菌株具有絮凝活性,该絮凝能力仅在菌株以乙酸为碳源生长时才具备[43]。杨氏柠檬酸杆菌(*Citrobacter youngae*) GTC 01314 所产一种新型可溶性壳聚糖样生物絮凝剂 BF01314,存在特征性的羟基、酰胺基和氨基,与壳聚糖相似,其对高岭土悬浮液的絮凝活性均超过 95%,其在高岭土悬浮液和活性污泥中的絮凝机制均由静电电荷修补和架桥作用主导[34]。

3.1.3. α -变形菌纲

目前 α -变形菌纲中发现的产絮凝剂种属包括农杆菌属(*Agrobacterium*)、西氏无色杆菌(*Ochrobactium ciceri*)、根瘤菌(*Rhizobium*)等。*Agrobacterium* M-503 所产絮凝剂中包括中性糖、糖醛酸、氨基糖和蛋白质,质量比为 85.0:9.9:2.1:3.0,分子量为 8.1×10^4 Da。以蔗糖为碳源时的分批培养过程中所产絮凝剂产量可达 14.9 g/L,且具有良好的温度和碱性稳定性[35]。西氏无色杆菌(*Ochrobactium ciceri* W2)可利用玉米秸秆水解液合成生物絮凝剂,其成分主要由多糖和蛋白质组成,在 30℃、pH (1.0~10.0)范围对 0.5% (w/w) 高岭土悬浮液仍能保持絮凝活性[44]。放射形根瘤菌(*Rhizobium radiobacter*) F2 与球形芽孢杆菌(*Bacillus sphaericus*) F6 混合培养产生的复合生物絮凝剂 CBF-F26 为多糖类生物絮凝剂,由鼠李糖、甘露糖、葡萄糖和半乳糖组成,其摩尔比为 1.3:2.1:10.0:1.0。在 pH 8.0、浓度为 8~24 mg/L 的范围内,絮凝活性可达 90% 以上。 Ca^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Al^{3+} 和 Fe^{3+} 等阳离子可促进其絮凝作用[45]。

3.1.4. 放线菌纲

放线菌纲中可产絮凝剂的种类包括链霉菌属(*Streptomyces*)、棒状杆菌属(*Corynebacterium*)、红球菌(*Rhodococcus*)等,其成分以多糖或者糖蛋白为主。应用最成功的微生物絮凝剂产品是日本开发的红平红球菌(*Rhodococcus erythropolis*)产生的 NOC-1 蛋白型生物絮凝剂[46]。利用污泥与畜禽废水为成分制备廉价培养基来生产生物絮凝剂,红平红球菌在 pH (2.0~12.0)范围内絮凝率均高于 98%,采用冷乙醇提取可获得 1.6 g/L 的粗生物絮凝剂,对直接染料和分散染料溶液的脱色率可达 80% [38]。*Streptomyces* sp. *Gansen* 所产生生物絮凝剂的由三种组分组成,其中碳水化合物为 78%、蛋白质为 22%,中性糖、氨基糖与糖醛酸的质量比为 4.6:2.4:3。最佳碳源、氮源和阳离子分别为葡萄糖(絮凝活性 89%)、硫酸铵(絮凝活性 76%)和氯化镁(MgCl_2) [37]。*Corynebacterium* 是一类革兰氏阳性、需氧或兼性厌氧的杆菌,因细菌形态多呈棒状(两端钝圆、中间膨大)而得名。与其他菌株不同的是,*Corynebacterium* 所产的新型絮凝剂中常含糖醛酸物质。例如,研究人员从土壤来源的 *Corynebacterium glutamicum* 中纯化得到一种新型生物絮凝剂 REA-11 以半乳糖醛酸为结构单元,还含有少量蛋白质,其分子量约为 10^5 Da,粗品对高岭土悬浮液的絮凝效率显著优于化学絮凝剂,还能在 0.5%糖蜜废水中实现 48.9%的脱色率[47] [48]。*Corynebacterium glutamicum* Cg1-P30 产生的新型生物絮凝剂成分为 37.50%中性糖、10.03%糖醛酸、6.32%氨基糖和 16.51%蛋白质,絮凝活性高达 91.92%。该絮凝剂无需调节 pH 即可处理湖南湘潭铁矿酸性废水,使 pH 从 3.04 升至 6.86,絮凝活性达 96.39%,并高效去除 Fe、Al、Zn、Pb 等金属离子(去除率超 70%) [49]。以红球菌为代表的放线菌虽然能利用廉价底物发酵,但粗提物成分复杂,分离纯化成本居高不下。如何通过基因工程敲除冗余的胞外聚合物合成途径,实现单一高效絮凝剂的定制化生产,是降低工业化成本的必由之路。

3.1.5. 其他细菌

除了上述细菌之外, β -变形菌纲无色杆菌属(*Achromobacter* sp.)以及拟杆菌门的 *Chryseobacterium*、

Diaphorobacter 也可产生生物絮凝剂。例如, 从炼油厂废弃物的活性污泥样品中分离得到 *Achromobacter* sp. TERI-IASST N 所产絮凝剂由 57% 的总糖和 13% 的蛋白质组成, 通过优化培养基 pH, 并添加尿素作为氮源, 其絮凝活性提升至 84% (pH 为 6 时), 而且该菌株利用蔗糖时的絮凝活性最高(90%)。此外, 对锌 (430 mg/L) 和铅 (30 mg/L) 具有显著的生物吸附能力, 其生物絮凝剂产量为 10.5 g/L [50]。硝基还原无色杆菌 (*Diaphorobacter nitroreducens*) R9 可分泌木质素酶和纤维素酶, 同时通过转化苕麻生物质产生生物絮凝剂 (MBF-9), 当 MBF-9 投加量为 831.57 mg/L 时, 对制浆废水的浊度去除率达 96.2%、化学需氧量(COD)去除率达 79.5%、木质素去除率达 59.2%、糖去除率达 63.1% [51]。以韩国大邱金黄杆菌 (*Chryseobacterium daeguense*) W6 所产不依赖阳离子的生物絮凝剂 MBF-W6 主要由 32.4% 的蛋白质、13.1% 的多糖和 6.8% 的核酸组成, 其最高絮凝率可达 96.9%, 高岭土颗粒的沉淀并非由电荷中和作用引起, 且阳离子介导的架桥作用在其絮凝过程中不发挥主要作用, 而是可能通过直接发生吸附和架桥作用[39] [52]。

3.2. 不同类型生物絮凝剂的特性对比与构效关系

通过对不同细菌类群所产絮凝剂的系统梳理, 可以发现其化学结构特征直接决定了其宏观絮凝效能与应用场景(见表 2)。构效关系(Structure-Activity Relationship)的一般规律表明, 生物絮凝剂的效能高度依赖于其分子量大小与官能团的协同作用。

Table 2. Comparison of multidimensional properties and structure-activity relationships of representative biofloculants
表 2. 代表性生物絮凝剂的多维特性与构效关系对比

絮凝剂核心类型	代表菌株来源	核心结构组成与特征	絮凝环境耐受性	离子依赖性	核心絮凝机理
糖蛋白衍生物	铜绿假单胞菌	碳水化合物 89%, 蛋白质 27%, 含氨基糖	质 27%, 含氨基糖 极高热稳定性 (100°C/60min 保留 60%活性)	高度依赖阳离子 (促进剂: Ca ²⁺ , Mg ²⁺ 等)	电荷中和与 阳离子架桥协同
富含羧基多糖	类芽孢杆菌	絮凝糖酸分子量达 2.38 × 10 ⁸ Da, 富含羧基	适宜中性 pH (pH 7.0)	视目标水体而定	强网捕卷扫与 空间吸附架桥
壳聚糖样聚合物	杨氏柠檬酸 杆菌	含特征性羟基、 酰胺基和氨基	极广 pH 耐受 (2.0~8.0)及宽温域	阳离子独立 (不依赖外源 金属离子)	静电电荷 修补为主导, 吸附架桥为辅
非离子介导复合物	韩国大邱 金黄杆菌	蛋白质(32.4%)、 多糖(13.1%)、 核酸(6.8%)	弱酸性偏好 (pH 5.6, 15°C)	阳离子独立, 加离子不发挥 主导作用	直接物理吸附 与网捕架桥

一方面, 极高的分子量(通常>10⁵ Da, 部分甚至可达 10⁸ Da)赋予了高分子链在水相中充分舒展的空间构象, 这是实现“网捕卷扫”和“长距离吸附架桥”的物理基础。另一方面, 分子表面的极性官能团(如羧基、羟基、氨基)决定了其电荷特性与絮凝触发机制。例如, 富含糖醛酸的多糖带有大量负电荷, 通常需要外加二价阳离子(如 Ca²⁺、Mg²⁺)作为“桥梁”, 以克服其与带负电胶体颗粒间的静电排斥; 而带有氨基或酰胺基的絮凝剂(如壳聚糖样产物)则表现出阳离子特性, 无需额外添加金属离子即可直接通过“静电电荷修补”快速失稳并絮凝。

4. 核心生物絮凝剂的生物合成途径与分子调控

尽管不同细菌分泌的生物絮凝剂成分各异, 但其核心活性物质(如胞外多糖、氨基酸聚合物等)的生物

合成过程通常由保守的基因簇(operon)精细调控。深入解析这些合成途径,是利用代谢工程进行菌株改造的前提。

4.1. 胞外多糖(EPS)及藻酸盐的合成机制

细菌胞外多糖的合成通常包括前体合成、跨膜转运与胞外聚合三个阶段。以常见的 Wzx/Wzy 依赖型途径为例,多糖的重复单元首先在细胞质内由糖基转移酶合成,随后通过翻转酶(Wzx)跨膜转运至周质空间,最后由聚合酶(Wzy)组装成高分子量多糖。在革兰氏阴性菌(如假单胞菌和部分固氮菌)中,藻酸盐(由 β -D-甘露糖醛酸及其差向异构体 α -L-古洛糖醛酸组成的线性多糖)的合成由高度保守的 alg 基因簇主导。其转录受环境信号(如渗透压、高氧)激活,主要由核心调控因子 AlgU (一种替代性 σ 因子)启动整个合成级联反应。

4.2. γ -聚谷氨酸(γ -PGA)的聚合与调控网络

γ -PGA 是芽孢杆菌属分泌的重要蛋白类絮凝剂前体。其合成不依赖于核糖体,而是由膜结合的 γ -PGA 合成酶复合体催化完成。该复合体通常由 cap 或 pgs 操纵子(包含 B、C、A、E 四个核心基因)编码。其中, CapB 和 CapC 构成催化核心,负责 L-或 D-谷氨酸单体的 ATP 依赖性缩合; CapA 和 CapE 则参与聚合物的链延伸与胞外分泌。该通路受双组分信号传导系统(如 DegS/DegU)的严密监控,高浓度的 DegU~P 可显著上调 cap 操纵子的转录水平,从而响应外界营养限制压力。

4.3. 脂肽类与糖蛋白复合物的合成

脂肽类生物絮凝剂(如表面活性素)主要通过非核糖体肽合成酶(NRPS)途径合成。NRPS 是一个巨型多模块酶系统,每个模块负责识别、活化并掺入一个特定的氨基酸残基,最后由硫酯酶(TE)结构域催化环化或释放。对于糖蛋白类絮凝剂,其合成不仅涉及肽链的核糖体翻译,还需要特定的糖基转移酶在内质网或高尔基体同源结构中进行 O-连或 N-连糖基化修饰,赋予分子复杂的空间构象与丰富的极性基团。

5. 总结与展望

细菌是生物絮凝剂的重要来源,并且与传统絮凝剂相比,具有絮凝效能高、环境友好、易降解等优点,可用于废水处理、饮用水净化和有害藻类去除等,具有非常好的应用潜力。目前生物絮凝剂的研究已从早期的菌株筛选、性能优化进入分子机制解析的新阶段,但仍然存在易受环境影响、生产成本高等一系列问题,限制了其的推广应用。因此,笔者建议可从如下几方面进行研究:1) 制备高产生物絮凝剂菌种。获得可高产生物絮凝剂的菌种是推动其从实验室走向工业应用的核心前提,在传统方法(如培养基筛选和诱变育种法)的基础上,一方面可以采用微流控与单细胞培养、培养组学、单细胞拉曼等新技术来获得高产的野生菌株。另一方面使用基因工程育种技术,即通过克隆、敲除或过表达与生物絮凝剂合成相关的关键基因,定向提升产率或优化性能,或者通过合成生物学改造现有菌株,即通过设计并重构微生物的代谢网络,构建“定制化”高产菌株,提高絮凝剂的产量。2) 降低生物絮凝剂的生产成本。可优先选择来源广、价格低的农业废弃物或工业副产物,无需复杂预处理即可作为碳氮源。例如用玉米秸秆水解液、啤酒废水、糖蜜、豆制品废水等代替实验室成本高的葡萄糖、蔗糖和酵母提取物等物质。同时,针对部分野生菌株难以利用这些物质的特点,可以通过基因工程技术将可利用相关底物的基因导入目标菌株中,使其具有这些底物的能力。此外,在生产过程中可通过优化发酵工艺,采用补料分批发酵或响应面法等方法进一步提高原料利用率和产量。3) 与人工智能技术深度融合。利用 AI 模型分析产生物絮凝剂菌株的全基因组、转录组和代谢组数据,识别与絮凝剂合成直接相关的基因簇。构建 AI 驱动

流平衡模型, 识别限制产量提高的瓶颈和基因, 针对性进行代谢流调控。在絮凝剂生产过程中, 采用智能监测、算法控制等人工智能技术对生产和应用环节进行控制和优化, 提高智能化技术和降低生产成本。

参考文献

- [1] Abu Tawila, Z.M., Ismail, S., Dadrasnia, A. and Usman, M.M. (2018) Production and Characterization of a Biofloculant Produced by *Bacillus Salmalaya* 139SI-7 and Its Applications in Wastewater Treatment. *Molecules*, **23**, Article 689. <https://doi.org/10.3390/molecules23102689>
- [2] Abu Bakar, S.N.H., Abu Hasan, H., Abdullah, S.R.S., Kasan, N.A., Muhamad, M.H. and Kurniawan, S.B. (2021) A Review of the Production Process of Bacteria-Based Polymeric Flocculants. *Journal of Water Process Engineering*, **40**, Article 101915. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.101915>
- [3] Elrasoul, E.A. and Yong, E.L. (2025) A Systematic Review on the Application of Bacteria-Based Biofloculants in Wastewater Treatment: Trends and Future Advances. *Water, Air, & Soil Pollution*, **236**, Article No. 276. <https://doi.org/10.1007/s11270-025-07902-6>
- [4] Agunbiade, M.O., Pohl, C., Heerden, E.V., Oyekola, O. and Ashafa, A. (2019) Evaluation of Fresh Water Actinomycete Biofloculant and Its Biotechnological Applications in Wastewaters Treatment and Removal of Heavy Metals. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **16**, Article 3337. <https://doi.org/10.3390/ijerph16183337>
- [5] Salehizadeh, H. and Yan, N. (2014) Recent Advances in Extracellular Biopolymer Flocculants. *Biotechnology Advances*, **32**, 1506-1522. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2014.10.004>
- [6] Mnif, W. and Ben Rebah, F. (2023) Biofloculants as Alternative to Synthetic Polymers to Enhance Wastewater Sludge Dewaterability: A Review. *Energies*, **16**, Article 3392. <https://doi.org/10.3390/en16083392>
- [7] Yang, Y., Guo, W., Ngo, H.H., Zhang, X., Liang, S., Deng, L., et al. (2024) Biofloculants in Anaerobic Membrane Bioreactors: A Review on Membrane Fouling Mitigation Strategies. *Chemical Engineering Journal*, **486**, Article 150260. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.150260>
- [8] 覃思绮. 微生物絮凝剂产生菌的分离、鉴定及其絮凝性能的研究[D]: [硕士学位论文]. 南宁: 广西民族大学, 2024.
- [9] Neetha, J., Sandesh, K., Girish Kumar, K., et al. (2019) Optimization of Direct Blue-14 Dye Degradation by *Bacillus fermus* (Kx898362) an Alkaliphilic Plant Endophyte and Assessment of Degraded Metabolite Toxicity. *Journal of Hazardous Materials*, **364**, 742-751.
- [10] Nie, Y., Wang, Z., Zhang, R., Ma, J., Zhang, H., Li, S., et al. (2021) *Aspergillus Oryzae*, a Novel Eco-Friendly Fungal Biofloculant for Turbid Drinking Water Treatment. *Separation and Purification Technology*, **279**, Article 119669. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.119669>
- [11] Xiong, Y., Wang, Y., Yu, Y., Li, Q., Wang, H., Chen, R., et al. (2010) Production and Characterization of a Novel Biofloculant from *Bacillus licheniformis*. *Applied and Environmental Microbiology*, **76**, 2778-2782. <https://doi.org/10.1128/aem.02558-09>
- [12] Gupta, A., Kumar, M., Sharma, R., Tripathi, R., Kumar, V. and Thakur, I.S. (2023) Screening and Characterization of Biofloculant Isolated from Thermotolerant *Bacillus* Sp. ISTVK1 and Its Application in Wastewater Treatment. *Environmental Technology & Innovation*, **30**, Article 103135. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103135>
- [13] Chen, L., Zhao, B., An, Q., Qiu Guo, Z. and Huang, C. (2024) The Characteristics and Flocculation Mechanisms of SMP and B-EPS from a Biofloculant-Producing Bacterium *Pseudomonas* Sp. XD-3 and the Application for Sludge Dewatering. *Chemical Engineering Journal*, **479**, Article 147584. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.147584>
- [14] Zhao, H., Liu, H. and Zhou, J. (2013) Characterization of a Biofloculant MBF-5 by *Klebsiella Pneumoniae* and Its Application in *Acanthamoeba* Cysts Removal. *Bioresource Technology*, **137**, 226-232. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.03.079>
- [15] Gong, W., Wang, S., Sun, X., Liu, X., Yue, Q. and Gao, B. (2008) Biofloculant Production by Culture of *Serratia Ficaria* and Its Application in Wastewater Treatment. *Bioresource Technology*, **99**, 4668-4674. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.09.077>
- [16] Salehizadeh, H., Yan, N. and Farnood, R. (2018) Recent Advances in Polysaccharide Bio-Based Flocculants. *Biotechnology Advances*, **36**, 92-119. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2017.10.002>
- [17] Kurniawan, S., Abdullah, S., Imron, M., Said, N., Ismail, N., Hasan, H., et al. (2020) Challenges and Opportunities of Biocoagulant/Biofloculant Application for Drinking Water and Wastewater Treatment and Its Potential for Sludge Recovery. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **17**, Article 9312. <https://doi.org/10.3390/ijerph17249312>
- [18] Wang, Y., Pushiri, H., Looi, L.J. and Zulkeflee, Z. (2022) Applications of Biofloculants for Heavy Metals Removal: A Systematic Review. *International Journal of Environmental Research*, **16**, Article No. 73.

- <https://doi.org/10.1007/s41742-022-00456-z>
- [19] Al-Khafaji, A.M., Almansoori, A.F. and Alyousif, N.A. (2023) Isolation, Screening and Molecular Identification of Biofloculants-Producing Bacteria. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, **24**, 4410-4417. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d240822>
- [20] Kurniawan, S.B., Abdullah, S.R.S., Othman, A.R., Purwanti, I.F., Imron, M.F., *et al.* (2021) Isolation and Characterisation of Biofloculant-Producing Bacteria from Aquaculture Effluent and Its Performance in Treating High Turbid Water. *Journal of Water Process Engineering*, **42**, Article 102194. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102194>
- [21] Satomi, M., La Duc, M.T. and Venkateswaran, K. (2006) *Bacillus Safensis* Sp. Nov., Isolated from Spacecraft and Assembly-Facility Surfaces. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, **56**, 1735-1740. <https://doi.org/10.1099/ijs.0.64189-0>
- [22] Shivaji, S., Chaturvedi, P., Begum, Z., Pindi, P.K., Manorama, R., Padmanaban, D.A., *et al.* (2009) *Janibacter hoylei* sp. Nov., *Bacillus isronensis* sp. Nov. and *Bacillus aryabhatai* sp. Nov., Isolated from Cryotubes Used for Collecting Air from the Upper Atmosphere. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, **59**, 2977-2986. <https://doi.org/10.1099/ijs.0.002527-0>
- [23] Abd El-Salam, A.E., Abd-El-Haleem, D., Youssef, A.S., Zaki, S., Abu-Elreesh, G. and El-Assar, S.A. (2017) Isolation, Characterization, Immobilization and Batch Fermentation of Biofloculant Produced by *Bacillus Aryabhatai* Strain PSK1. *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*, **15**, 335-344. <https://doi.org/10.1016/j.jgeb.2017.07.002>
- [24] Elkady, M.F., Farag, S., Zaki, S., Abu-Elreesh, G. and Abd-El-Haleem, D. (2011) *Bacillus Mojavensis* Strain 32A, a Biofloculant-Producing Bacterium Isolated from an Egyptian Salt Production Pond. *Bioresource Technology*, **102**, 8143-8151. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.05.090>
- [25] Li, O., Lu, C., Liu, A., Zhu, L., Wang, P., Qian, C., *et al.* (2013) Optimization and Characterization of Polysaccharide-Based Biofloculant Produced by *Paenibacillus Elgii* B69 and Its Application in Wastewater Treatment. *Bioresource Technology*, **134**, 87-93. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.02.013>
- [26] Chen, S., Cheng, R., Xu, X., Kong, C., Wang, L., Fu, R., *et al.* (2022) The Structure and Flocculation Characteristics of a Novel Exopolysaccharide from a *Paenibacillus* Isolate. *Carbohydrate Polymers*, **291**, Article 119561. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119561>
- [27] Ashiuchi, M., Tani, K., Soda, K. and Misono, H. (1998) Properties of Glutamate Racemase from *Bacillus Subtilis* IFO 3336 Producing Poly-Glutamate. *Journal of Biochemistry*, **123**, 1156-1163. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.jbchem.a022055>
- [28] Cosa, S., Mabinya, L.V., Olaniran, A.O. and Okoh, A.I. (2012) Production and Characterization of Biofloculant Produced by *Halobacillus* sp. Mvuyo Isolated from Bottom Sediment of Algoa Bay. *Environmental Technology*, **33**, 967-973. <https://doi.org/10.1080/09593330.2011.603755>
- [29] Xu, L., Ma, R., Sun, C. and Sun, D. (2018) *Enterococcus Faecalis* Biofloculant Enhances Recovery of Graphene Oxide from Water. *Polish Journal of Environmental Studies*, **27**, 2811-2820. <https://doi.org/10.15244/pjoes/81267>
- [30] Wong, Y.S., Ong, S., Teng, T., Aminah, L.N. and Kumaran, K. (2012) Production of Biofloculant by *Staphylococcus Cohnii* Ssp. from Palm Oil Mill Effluent (POME). *Water, Air, & Soil Pollution*, **223**, 3775-3781. <https://doi.org/10.1007/s11270-012-1147-z>
- [31] Liu, W., Hao, Y., Jiang, J., Zhu, A., Zhu, J. and Dong, Z. (2016) Production of a Biofloculant from *Pseudomonas Veronii* L918 Using the Hydrolyzate of Peanut Hull and Its Application in the Treatment of Ash-Flushing Wastewater Generated from Coal Fired Power Plant. *Bioresource Technology*, **218**, 318-325. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.06.108>
- [32] Qin, S., Li, Q., Wu, L., Tian, H., Man, Y. and Liu, G. (2025) A Novel *Pseudomonas* sp. Strain with High Flocculation Efficiency for Aquaculture Wastewater Treatment. *Scientific Reports*, **15**, Article No. 23577. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-08584-0>
- [33] Chen, Z., Li, Z., Liu, P., Liu, Y., Wang, Y., Li, Q., *et al.* (2017) Characterization of a Novel Biofloculant from a Marine Bacterium and Its Application in Dye Wastewater Treatment. *BMC Biotechnology*, **17**, Article No. 84. <https://doi.org/10.1186/s12896-017-0404-z>
- [34] Mohamed Hatta, N.S., Lau, S.W., Takeo, M., Chua, H.B., Baranwal, P., Mubarak, N.M., *et al.* (2021) Novel Cationic Chitosan-Like Biofloculant from *Citrobacter Youngae* GTC 01314 for the Treatment of Kaolin Suspension and Activated Sludge. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **9**, Article 105297. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105297>
- [35] Li, Q., Liu, H., Qi, Q., Wang, F. and Zhang, Y. (2010) Isolation and Characterization of Temperature and Alkaline Stable Biofloculant from *Agrobacterium* sp. M-503. *New Biotechnology*, **27**, 789-794. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2010.09.002>

- [36] Subudhi, S., Bisht, V., Batta, N., Pathak, M., Devi, A. and Lal, B. (2016) Purification and Characterization of Exopolysaccharide Bioflocculant Produced by Heavy Metal Resistant *Achromobacter xylosoxidans*. *Carbohydrate Polymers*, **137**, 441-451. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.10.066>
- [37] Nwodo, U.U., Agunbiade, M.O., Green, E., Mabinya, L.V. and Okoh, A.I. (2012) A Freshwater Streptomyces, Isolated from Tyume River, Produces a Predominantly Extracellular Glycoprotein Bioflocculant. *International Journal of Molecular Sciences*, **13**, 8679-8695. <https://doi.org/10.3390/ijms13078679>
- [38] Peng, L., Yang, C., Zeng, G., Wang, L., Dai, C., Long, Z., et al. (2014) Characterization and Application of Bioflocculant Prepared by Rhodococcus Erythropolis Using Sludge and Livestock Wastewater as Cheap Culture Media. *Applied Microbiology and Biotechnology*, **98**, 6847-6858. <https://doi.org/10.1007/s00253-014-5725-4>
- [39] Liu, W., Wang, K., Li, B., Yuan, H. and Yang, J. (2010) Production and Characterization of an Intracellular Bioflocculant by *Chryseobacterium Daeguense* W6 Cultured in Low Nutrition Medium. *Bioresource Technology*, **101**, 1044-1048. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.08.108>
- [40] Nouha, K., Kumar, R.S. and Tyagi, R.D. (2016) Heavy Metals Removal from Wastewater Using Extracellular Polymeric Substances Produced by *Cloacibacterium Normanense* in Wastewater Sludge Supplemented with Crude Glycerol and Study of Extracellular Polymeric Substances Extraction by Different Methods. *Bioresource Technology*, **212**, 120-129. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.04.021>
- [41] Zakaria, G.E. (2012) Production and Characteristics of a Heavy Metals Removing Bioflocculant Produced by *Pseudomonas Aeruginosa*. *Polish Journal of Microbiology*, **61**, 281-289.
- [42] Liu, J., Ma, J., Liu, Y., Yang, Y., Yue, D. and Wang, H. (2014) Optimized Production of a Novel Bioflocculant M-C11 by *Klebsiella* sp. and Its Application in Sludge Dewatering. *Journal of Environmental Sciences*, **26**, 2076-2083. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2014.08.007>
- [43] Kimura, K., Inoue, T., Kato, D., Negoro, S., Ike, M. and Takeo, M. (2013) Distribution of Chitin/Chitosan-Like Bioflocculant-Producing Potential in the Genus *Citrobacter*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, **97**, 9569-9577. <https://doi.org/10.1007/s00253-012-4668-x>
- [44] Wang, L., Ma, F., Lee, D., Wang, A. and Ren, N. (2013) Bioflocculants from Hydrolysates of Corn Stover Using Isolated Strain *Ochrobactium Ciceri* W2. *Bioresource Technology*, **145**, 259-263. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.11.020>
- [45] Wang, L., Ma, F., Qu, Y., Sun, D., Li, A., Guo, J., et al. (2011) Characterization of a Compound Bioflocculant Produced by Mixed Culture of *Rhizobium Radiobacter* F2 and *Bacillus Sphaecus* F6. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, **27**, 2559-2565. <https://doi.org/10.1007/s11274-011-0726-2>
- [46] Takeda, M., Kurane, R., Koizumi, J. and Nakamura, I. (1991) A Protein Bioflocculant Produced by *Rhodococcus Erythropolis*. *Agricultural and Biological Chemistry*, **55**, 2663-2664. <https://doi.org/10.1271/bbb1961.55.2663>
- [47] He, N. (2004) Production of a Novel Polygalacturonic Acid Bioflocculant REA-11 by *Corynebacterium Glutamicum*. *Bioresource Technology*, **94**, 99-105. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2003.11.013>
- [48] Li, Y., He, N., Guan, H., Du, G. and Chen, J. (2003) A Novel Polygalacturonic Acid Bioflocculant REA-11 Produced by *Corynebacterium Glutamicum*: A Proposed Biosynthetic Pathway and Experimental Confirmation. *Applied Microbiology and Biotechnology*, **63**, 200-206. <https://doi.org/10.1007/s00253-003-1365-9>
- [49] Liu, Y., Zeng, Y., Yang, J., Chen, P., Sun, Y., Wang, M., et al. (2023) A Bioflocculant from *Corynebacterium Glutamicum* and Its Application in Acid Mine Wastewater Treatment. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, **11**, Article 1136473. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1136473>
- [50] Subudhi, S., Batta, N., Pathak, M., Bisht, V., Devi, A., Lal, B., et al. (2014) Bioflocculant Production and Biosorption of Zinc and Lead by a Novel Bacterial Species, *Achromobacter* sp. TERI-IASST N, Isolated from Oil Refinery Waste. *Chemosphere*, **113**, 116-124. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.04.050>
- [51] Zhong, C., Sun, S., Zhang, D., Liu, L., Zhou, S. and Zhou, J. (2020) Production of a Bioflocculant from Ramie Biodegumming Wastewater Using a Biomass-Degrading Strain and Its Application in the Treatment of Pulping Wastewater. *Chemosphere*, **253**, Article 126727. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126727>
- [52] Liu, W., Cong, L., Yuan, H. and Yang, J. (2015) The Mechanism of Kaolin Clay Flocculation by a Cation-Independent Bioflocculant Produced by *Chryseobacterium daeguense* W6. *AIMS Environmental Science*, **2**, 169-179. <https://doi.org/10.3934/environsci.2015.2.169>