

光合细菌-纳米复合体调控水产养殖微生态的作用机制与应用效能研究进展

陈宴希¹ 蓝春梅¹ 姜红辛¹ 冯颖¹ 莫婷婷¹ 黄诗言¹ 廖艳娟¹ 陈万林^{2*}

1.广西民族大学海洋与生物技术学院, 广西 南宁 530005

2.博白县新田镇农业服务中心, 广西 玉林 537606

[摘要]水产养殖业的可持续发展面临养殖环境恶化、动物病害频发等问题的严峻挑战,亟需开发高效、绿色的微生态调控技术以替代抗生素等传统手段。光合细菌-纳米复合体作为一种新兴的微生态调控剂,因其能够协同光合细菌的生态功能与纳米材料的独特性能,在水质改良和动物健康促进方面展现出巨大潜力,已成为当前研究热点。本文系统综述该领域的最新进展,首先概述了光合细菌与各类纳米材料构建功能化复合体的主要策略;其次,重点阐述了该复合体通过改善水体环境与调控养殖动物肠道菌群平衡的双重作用机制;最后,对复合体在实际应用中的效能评估方法、关键影响因素进行了分析,并展望了其未来的发展方向,以期开发高效、稳定的水产养殖微生态调控产品提供坚实的理论依据和技术参考。

[关键词]光合细菌; 纳米材料; 复合体; 水产养殖; 微生态调控

DOI: 10.33142/nsr.v3i1.19386

中图分类号: S9

文献标识码: A

Research Progress on the Mechanism and Application Efficiency of Photosynthetic Bacteria Nanocomposite in Regulating the Microecology of Aquaculture

CHEN Yanxi¹, LAN Chunmei¹, JIANG Hongxin¹, FENG Ying¹, MO Tingting¹, HUANG Shiyan¹, LIAO Yanjuan¹, CHEN Wanlin^{2*}

1. College of Marine and Biotechnology, Guangxi Minzu University, Nanning, Guangxi, 530005, China

2. Bobai County Xintian Town Agricultural Service Center, Yulin, Guangxi, 537606, China

Abstract: The sustainable development of aquaculture industry is facing severe challenges such as deteriorating aquaculture environment and frequent occurrence of animal diseases. It is urgent to develop efficient and green micro ecological regulation technologies to replace traditional methods such as antibiotics. As an emerging microecological regulator, photosynthetic bacteria nano composites have shown great potential in water quality improvement and animal health promotion due to their ability to synergistically regulate the ecological functions of photosynthetic bacteria and the unique properties of nanomaterials. They have become a current research hotspot. This article provides a systematic review of the latest developments in this field, first outlining the main strategies for constructing functional complexes between photosynthetic bacteria and various nanomaterials; Secondly, the dual mechanism of the complex in improving water environment and regulating the balance of gut microbiota in farmed animals was emphasized; Finally, the effectiveness evaluation methods and key influencing factors of the composite in practical applications were analyzed, and its future development direction was discussed, in order to provide a solid theoretical basis and technical reference for the development of efficient and stable aquaculture microecological regulation products.

Keywords: photosynthetic bacteria; nanometer material; composite; aquaculture; microecological regulation

引言

水产养殖业的集约化发展在提升产量的同时,也带来了水质恶化、病害频发等严峻挑战,这使得微生态调控成为实现绿色健康养殖的关键策略。光合细菌作为一类具有光合作用、固氮、脱硫等多重功能的微生物,在水质净化与益生功能方面展现出巨大潜力。例如,在受污染的亚穆纳河沉积物中,光合细菌如沼泽红假单胞菌

(*Rhodospseudomonas Palustris*)被鉴定为关键的有机物还原菌群,其存在与水体有机质含量密切相关,这凸显了其在自然水体修复中的重要作用^[1]。然而,光合细菌在实际应用中存在定植能力弱、环境抗逆性差等局限性,限制了其效能的稳定发挥。

纳米技术的兴起为解决这些问题提供了新思路。通过构建光合细菌-纳米复合体,可显著增强其稳定性、功能

活性及靶向递送效率。有研究提出了一种“自上而下”的方法，利用原核生物（如细菌）的膜来制备非常规脂质体（PD-脂质体），这种载体系统不仅与细菌膜具有更高的亲和力，还能作为抗生素等活性物质的有效递送载体，其装载青霉素 G 后对大肠杆菌的最小抑菌浓度可比游离青霉素 G 降低多达 16 倍^[2]，这为构建基于细菌自身组分的纳米载体以增强光合细菌功能提供了重要借鉴。此外，将纳米材料与光合细菌进行超分子组装，可以调控其能量与电荷转移过程。例如，将二氧化钛纳米颗粒与光合细菌天线复合体 LH2 进行组装，通过飞秒时间分辨光谱研究证实，TiO₂纳米颗粒可以部分装入 LH2 蛋白的空腔中，并与细菌叶绿素发生长程电荷转移，这揭示了纳米材料与光合细菌功能蛋白相互作用的物理机制^[3]。这种复合不仅可能增强光合细菌的光能捕获与转化效率，还可能赋予其新的光电催化特性，为水质净化提供新途径。

近年来，该领域研究日益深入，但对其系统性的作用机制梳理与综合性的应用效能评估仍显不足。一方面，需要深入理解复合体如何协同调控养殖水体的微生态，包括对氮、硫等关键元素循环（如反硝化、硫酸盐还原）相关微生物群落的影响^[4]另一方面，也需要评估其对宿主（如养殖动物）肠道微生态的益生作用及靶向递送效率^[5]本文将围绕光合细菌-纳米复合体的构建、其对水产养殖微生态（包括水体环境与宿主肠道）的调控机制，以及应用效能的科学评估体系展开全面综述，以期为该技术的理论深化与产业化应用提供指导。

1 光合细菌-纳米复合体的构建策略与特性

1.1 常用纳米载体材料及其特性

在构建光合细菌-纳米复合体的过程中，选择合适的纳米载体材料至关重要。无机纳米材料因其独特的物理化学性质而被广泛应用。例如，二氧化钛（TiO₂）纳米颗粒因其优异的光催化性能，可与光合细菌天线复合体（如 LH2）组装，形成能够进行长程电荷转移的超分子系统^[6,7]。此外，碳纳米管（CNT）也被证明是有效的载体，其高比表面积和导电性使其能够与银改性二氧化钛（Ag-TiO₂）结合，形成复合光催化剂，用于构建紧密耦合的光催化-生物降解系统^[8,9]。这些无机材料通常具有良好的机械强度和易于表面修饰的特性，便于负载或吸附光合细菌^[10]。有机或高分子纳米材料则以其良好的生物相容性和可降解性见长^[11]。海藻酸钠（SA）作为一种天然多糖，常被用作包埋基质，与光合细菌和光催化剂

共同构建复合凝胶珠，为微生物提供保护性微环境^[12]。壳聚糖也是一种常用的生物高分子，其阳离子特性使其易于与带负电的细胞表面结合，并可被用于修饰电极或作为固定化介质^[13]这类材料通常能够实现营养物质的缓释，并增强细菌对不良环境（如重金属胁迫）的抵抗力^[14]。为了结合无机与有机材料的优势，复合纳米材料应运而生。例如，将磁性氧化铁（Fe₃O₄）纳米颗粒与还原氧化石墨烯（rGO）结合形成的纳米复合材料，可以修饰在碳毡电极上，不仅提高了导电性和比表面积，其磁性组分还便于后续的分选回收^[15]。同样，将 Fe₃O₄纳米颗粒直接作为催化剂添加，可以显著促进光合细菌对废食用油等复杂基质的利用，并增强其对共污染重金属的耐受性。这些复合设计旨在同时实现高效载菌、环境响应和操作便利性。

1.2 复合体的构建方法与结构表征

光合细菌-纳米复合体的构建方法多样，需根据应用需求选择。物理吸附法是一种相对简单的方法，主要依赖于静电作用、范德华力等非共价相互作用。例如，通过聚-L-赖氨酸涂层修饰载玻片，可以增强细菌样本的附着，便于后续的显微观察。然而，这种方法形成的结合力较弱，对环境因素（如 pH、离子强度）较为敏感。包埋或封装法则能提供更强的物理保护，通常利用凝胶化技术将细菌包裹在纳米级或微米级的高分子基质中。研究显示，将沼泽红假单胞菌与碳纳米管-银-二氧化钛光催化剂共同包埋于海藻酸钠凝胶中，形成的复合体显著提高了对染料废水的降解效率。类似地，使用海藻酸钠/聚乙烯醇/卡拉胶复合凝胶颗粒固定化沼泽红假单胞菌 CQK 01，构建了高效的固定化细胞光生物反应器用于产氢。这种方法能有效隔离外界不利条件，增强细菌的存活率和活性。化学交联法则通过共价键将细菌固定在功能化的纳米材料表面，结合更为牢固。例如，将含有铜的亚硝酸还原酶与紫精修饰的壳聚糖共固定于玻碳电极上，用于构建电化学生物传感器。虽然结合力强，但化学交联过程可能对细菌细胞壁造成损伤，影响其代谢活性，因此需谨慎优化反应条件。为了精确评估复合体的构建效果，需要综合运用多种结构表征技术。扫描电镜和透射电镜是观察复合体形貌、纳米颗粒分布以及细菌与材料界面相互关系的直接手段，例如用于观察细菌合成的硫化镉纳米颗粒的形貌与尺寸。Zeta 电位和粒径分析仪可用于测定复合体在水相中的表面电荷和流体力学

尺寸, 评估其胶体稳定性。傅里叶变换红外光谱则能分析复合体形成过程中化学基团的变化, 例如检测蛋白质等生物分子在纳米颗粒表面的包覆情况。这些表征技术的联用, 为理解和优化光合细菌-纳米复合体的构建提供了全面的信息基础。

2 复合体对养殖水体微生态的调控作用机制

2.1 强化水质净化与氮磷循环

光合细菌-纳米复合体通过其独特的结构, 显著强化了对养殖水体中污染物的去除与氮磷循环过程。纳米材料作为载体, 为光合细菌提供了高密度的附着位点, 有助于形成稳定的生物膜状结构, 从而大幅提升光合细菌在水体悬浮物及底泥界面的定植能力和生物量。这种增强的定植能力使得复合体能够更有效地富集于污染界面, 为后续的生物转化过程奠定基础。在污染物去除方面, 光合细菌与纳米材料展现出协同增效作用。光合细菌能够利用其光合作用同化水体中的氨氮、硫化氢等有害物质, 而某些纳米材料(如二氧化钛)在光照下可产生光催化作用, 进一步降解有机污染物[PHDQEA7X8]。这种物理化学与生物过程的结合, 使得复合体对化学需氧量(COD)等污染指标的去除效率显著提高。此外, 复合体的引入如同“生态位工程师”, 通过竞争性排斥和提供附着基质等方式, 能够有效抑制蓝藻等有害藻类的过度繁殖, 同时促进硝化细菌等有益微生物的生长, 从而优化水体的菌藻群落结构, 建立更健康、稳定的微生态系统。

2.2 抑制病原菌与改善水体微生物平衡

光合细菌-纳米复合体通过多种机制抑制水产养殖中的病原菌, 从而改善水体微生物平衡。首先, 某些纳米材料本身具有广谱抗菌性, 例如银纳米颗粒或氧化锌纳米颗粒, 它们与光合细菌产生的抑菌代谢产物(如细菌素、酶类)可产生联合效应, 对病原菌形成直接抑制。其次, 复合体通过生态竞争间接抑制病原菌。复合体在水中快速占据生态位并高效消耗营养物质, 剥夺了诸如弧菌、气单胞菌等常见水产病原菌的生存资源, 从而通过营养竞争抑制其增殖。这种竞争排斥作用对于维持水体微生物群落的健康至关重要。再者, 研究表明, 一些纳米材料和光合细菌的代谢物能够干扰病原菌的群体感应系统。群体感应是细菌协调群体行为(如毒力因子表达和生物被膜形成)的关键通讯机制。通过淬灭这一系统, 复合体可以降低病原菌的毒力, 并阻碍其形成难以清除的生物被膜, 从而从根

源上削弱其致病潜力, 为养殖生物创造一个更为安全的微环境。

3 复合体对养殖动物肠道微生态的调控作用机制

3.1 靶向递送与肠道定植增强

纳米载体的应用为光合细菌(PSB)在水产养殖中的益生功效提供了关键的技术保障。通过纳米包埋技术, 可以构建一个保护性外壳, 使光合细菌在通过养殖动物胃部时免受胃酸和胆汁盐的破坏, 从而显著提高活菌到达肠道后端的存活率和数量。这种靶向递送策略对于发挥光合细菌的益生作用至关重要, 因为只有足够数量的活菌到达肠道定植位点, 才能有效调节肠道微生态。例如, 研究表明, 将海洋紫色非硫细菌(PNSB)如 *Rhodovulum sulfidophilum* 以低至 1×10^3 CFU/mL 的浓度添加于养殖水体, 即可有效促进对虾的生长和免疫, 这暗示了其在肠道环境中的有效定植与存活。此外, 经特定纳米材料修饰后, 光合细菌的表面特性可能发生改变, 使其更易与肠道黏膜层的黏蛋白等成分结合。这种增强的黏附能力可以延长光合细菌在肠道内的滞留时间, 为其在肠道内增殖并形成稳定的益生菌群创造条件, 从而为后续的微生态调控奠定基础。

3.2 调节肠道菌群结构与屏障功能

摄入的光合细菌及其复合体能够作为有效的益生元或益生菌, 直接干预并优化养殖动物的肠道菌群结构。研究表明, 紫色非硫细菌(PNSB)作为益生菌在水产养殖中的应用已显示出积极效果, 它们能够促进肠道内有益菌的生长, 并可能抑制潜在病原菌的丰度, 从而增加肠道微生物的多样性。这种对菌群组成的优化是维持肠道健康的第一道防线。在增强肠道物理屏障方面, 光合细菌的代谢产物发挥着核心作用。例如, 它们代谢产生的短链脂肪酸(SCFAs)可为肠上皮细胞提供能量, 是维持肠道上皮完整性的关键物质。这些代谢产物能够促进肠上皮细胞间紧密连接蛋白(如 Occludin、ZO-1)的表达, 从而降低肠道通透性, 有效阻止有害物质和病原体的易位。此外, 光合细菌复合体还能通过调节肠道免疫系统功能来强化化学与免疫屏障。它们可以调节巨噬细胞、T 细胞等免疫细胞的功能, 促进分泌型免疫球蛋白 A (sIgA) 的分泌, 并可能诱导抗菌肽的表达。这些免疫调节作用共同构建了一个多层次的肠道防御体系, 增强了宿主对病原感染的抵抗力。

4 光合细菌-纳米复合体的应用效能评估体系

4.1 体外评估指标与方法

体外评估是衡量光合细菌-纳米复合体性能与安全性的基础。在活性与稳定性评估方面,关键指标包括复合体中光合细菌的存活率及其在不同环境胁迫下的耐受性。例如,研究显示,向光合细菌培养体系中添加铁基纳米材料(如 Fe_3O_4 纳米颗粒)可以显著增强细菌对重金属(如 Pb、Ni、Co、Zn)的耐受性,并促进其生长。这为评估复合体在模拟恶劣环境(如高胆盐、酸性胃肠液)中的稳定性提供了参考。在功能活性评估上,需测定复合体的核心代谢功能。相关研究通过测量细菌的生物量、蛋白质及类胡萝卜素等有价值产物的产量来间接评估其代谢活性,发现 Fe_3O_4 纳米颗粒的加入能使这些产物的产量提升 57.2% 至 70.78%。此外,通过飞秒时间分辨光谱技术,可以深入研究复合体中光合细菌天线色素(如细菌叶绿素 B850)与纳米材料(如 TiO_2)之间的光致电荷转移效率,这为评估其光能转化与电子传递等核心功能提供了高精度方法。安全性初步评估不可或缺,需通过细胞毒性试验考察纳米材料溶出离子的潜在风险。虽然直接针对鱼类细胞系的毒性数据在现有文献中有限,但相关研究通过分析纳米材料促进微生物生长和代谢物(如胞外聚合物 EPS)产生的作用,间接提示了其在适宜浓度下对生物体系的友好性,为后续系统的毒理学评估奠定了基础。

4.2 养殖现场应用效能评估

养殖现场的应用效能评估是验证光合细菌-纳米复合体实际效果的关键环节。水质指标监测是首要任务,需定期检测氨氮、亚硝酸盐等关键理化参数的变化。研究表明,负载了铁铝双金属氧化物纳米材料(Fe-Al-NBMO)的基质在构建湿地系统中对 Cr(VI)表现出高达 988.43mg/kg 的吸附容量,其引入能有效降低出水 Cr(VI)浓度,确保其符合排放标准。这提示类似的光合细菌-纳米复合体在养殖水体中可能通过增强对氮、磷等污染物的吸附与转化,来改善水质。养殖动物生长与健康指标方面,需系统记录增重率、饲料系数等生产性能,并分析血清免疫与抗氧化指标。纳米材料的添加被证实能促进特定功能微生物(如 *Rhodospseudomonas*)的生长并增加代谢产物。这有望通过改善肠道健康或系统免疫,最终提升养殖动物的生长性能和抗应激能力。微生物群落分析通过高通量测序技术,能深入揭示复合体对微生态的调控机制。研究发现在引入 Fe-Al-NBMO 纳米材料后,系统中具有污染物去除功能的

微生物(如 *Rhodospseudomonas* 和 *Hyphomicrobium*)丰度增加,同时与还原代谢相关的功能基因(如 *nuoB*, *nuoC* 等)表达上调。这为解析复合体通过调控微生物群落结构及其功能来净化水体的机制提供了直接证据。抗病力评估则通过攻毒实验完成,需记录累积死亡率并分析免疫相关基因表达。虽然现有文献未直接报道此类实验,但纳米材料增强微生物功能、促进有益代谢物产生的特性。理论上可为养殖动物构建更健康的微生态环境,从而可能间接提升其对病原感染的抵抗力,这有待后续研究验证。

5 挑战、优化策略与发展前景

5.1 面临的主要挑战与风险

尽管光合细菌-纳米复合体展现出调控水产养殖微生态的巨大潜力,但其实际应用仍面临多重挑战与风险。首先,纳米材料的环境归趋与长期生态风险是核心关切。纳米颗粒在复杂多变的水体环境中可能发生迁移、转化与生物积累,其对非靶标水生生物(如浮游动物、底栖生物)乃至整个生态系统的潜在毒性影响尚不明确,缺乏长期、系统的生态毒理学数据支持。其次,复合体的规模化生产成本与工艺是制约其产业化的瓶颈。目前,高纯度、粒径均一且功能稳定的纳米材料制备成本高昂,而将光合细菌与纳米材料高效、稳定复合的大规模生产工艺尚不成熟,难以保证产品批次间的稳定性和标准化。最后,相关的法规与安全性评价标准严重缺失。目前全球范围内均缺乏专门针对用于水产养殖的微生物-纳米复合产品的监管法规和全面的安全性评价标准体系,这为产品的市场准入和规范应用带来了不确定性。

5.2 复合体的性能优化策略

为应对上述挑战,研究者们提出了多种性能优化策略。开发智能响应型复合体是提升其靶向性和效率的关键方向。通过设计对 pH 值、特定酶或光照敏感的纳米载体,可以实现光合细菌在目标微环境(如水产动物肠道、水体污染富集区)的精准、可控释放,从而减少无效损耗并增强局部调控效果。其次,构建多功能协同复合体是增强综合调控能力的有效途径。将光合细菌与特定的酶制剂、噬菌体或益生元等其他功能活性成分共同负载于纳米载体上,形成“鸡尾酒”疗法,有望实现对水产养殖环境或宿主肠道中病原菌、有害代谢物等多靶点的协同干预,提升微生态调控的广谱性和稳健性。此外,利用废弃物合成绿色纳米材料是降低成本并提升环境友好性的重要策略。探索利用农业废弃物(如稻壳)或水产加工废弃物(如虾蟹

壳)合成生物炭、几丁质纳米纤维等生物基纳米材料,不仅能够实现资源循环利用、降低原材料成本,还能赋予复合体更好的生物相容性和可降解性。

5.3 未来研究方向与应用前景

展望未来,光合细菌-纳米复合体技术的研究与应用前景广阔,但需在多个方向深化探索。首先,需要深入机制研究。未来应广泛应用宏基因组学、代谢组学、转录组学等多组学技术,在分子和系统水平上全面解析复合体介入后,对宿主肠道及养殖水体中微生物群落结构、功能基因表达、代谢网络通路的深层影响,从而揭示其调控微生物生态的复杂网络机制。其次,开发实时监测与评估技术至关重要。结合先进的传感器技术,开发能够原位、实时监测复合体在水体或生物体内的分布、浓度变化及其对关键环境或生理指标(如氨氮、溶解氧、菌群丰度)影响效能的工具,将为精准评估和优化应用方案提供数据支持。最后,推动标准化与产业化是技术落地的最终保障。这需要加强材料科学、微生物学、水产养殖学及环境工程等领域的跨学科合作,建立从实验室基础研究、中试放大到规模化生产的完整技术链条,并同步推动产品制备、质量控制和安全性评价等相关行业或国家标准的制定,以促进该技术安全、高效、规范地应用于现代水产养殖业。

6 结论

光合细菌-纳米复合体技术代表了水产微生态调控从粗放投菌向精准、智能材料学干预的重要范式转变。它通过“外净水质、内调菌群”的双重协同机制,为绿色健康养殖提供了创新解决方案。当前研究已证实其原理可行性,但将其转化为稳定、可靠、可负担的养殖实践,仍需跨越机制认知、安全评估与产业化标准等多重鸿沟。未来的成功将取决于能否开展长期的生态安全监测、建立严格的标准化体系,并实现跨学科的深度协同创新。唯有如此,这项颇具潜力的技术方能稳健地推动水产养殖业走向真正的可持续发展。

基金资助:2024年大学生创新创业训练计划项目国家级项目(项目编号:202410608013)。

[参考文献]

[1]Xing SF, Tian HF, Yan Z, et al. Stability and biomineralization of cadmium sulfide nanoparticles biosynthesized by the bacterium *Rhodospseudomonas palustris* under light[J]. *J Hazard Mater*,2025(458):131937.
 [2] Viana de Freitas T, Karmakar U, Vasconcelos AG, et al.

Release of immunomodulatory peptides at bacterial membrane interfaces as a novel strategy to fight microorganisms[J]. *J Biol Chem*,2023,299(4):103056.

[3] Marek PL, Sieger H, Scherer T, et al. Self-assembled chromophores within mesoporous nanocrystalline TiO₂: towards biomimetic solar cells[J]. *J Nanosci Nanotechnol*,2009,9(6):3708-13.

[4] Linares DM, Ross P, Stanton C. Beneficial Microbes: The pharmacy in the gut[J]. *Bioengineered*,2016,7(1):11-20.

[5] Alvanou MV, Feidantsis K, Staikou A, et al. Probiotics, Prebiotics, and Synbiotics Utilization in Crayfish Aquaculture and Factors Affecting Gut Microbiota[J]. *Microorganisms*,2023,11(5).

[6] Chen XH, Zhang L, Weng YX, et al. Protein structural deformation induced lifetime shortening of photosynthetic bacteria light-harvesting complex LH2 excited state[J]. *Biophys J*,2005,88(6):4262-73.

[7] Ze Y, Liu C, Wang L, et al. The regulation of TiO₂ nanoparticles on the expression of light-harvesting complex II and photosynthesis of chloroplasts of *Arabidopsis thaliana*[J]. *Biol Trace Elem Res*,2011,143(2):1131-41.

[8] Yang Y, Liu K, Sun F, et al. Enhanced performance of photocatalytic treatment of Congo red wastewater by CNTs-Ag-modified TiO₂ under visible light[J]. *Environ Sci Pollut Res Int*,2022,29(11):15516-15525.

[9]Dasagiri CS, Araga R. Synthesis and preliminary evaluation of Ag-TiO₂/CNT hybrid nanocomposite for the degradation of polystyrene microplastics under solar irradiation[J]. *Environ Sci Pollut Res Int*,2024,31(22):32863-32874.

[10] Liu K, Yang Y, Sun F, et al. Rapid degradation of Congo red wastewater by *Rhodospseudomonas palustris* intimately coupled carbon nanotube - Silver modified titanium dioxide photocatalytic composite with sodium alginate[J]. *Chemosphere*,2025(299):134417.

[11] Zhou D, Tabassum S, Li J, et al. In situ remediation of eutrophic Wolong Lake sediments using novel PVA-SA-biochar and PVA-SA-zeolite embedded immobilized indigenous microorganisms: a pilot study[J]. *Environ Sci Process Impacts*,2025,27(3):597-622.

[12] Xing D, Cheng J, Song X, et al. Study on modified SA-H₃BO₃ immobilization microorganism method for wastewater treatment in seawater recirculating aquaculture system[J]. Environ Res,2025(226):115636.

[13] Iimaa T, Batmunkh M, Dulguun B, et al. Bacterial Heavy Metal Resistance in Contaminated Soil[J]. J Microbiol Biotechnol,2025(35):2411073.

[14] Kulakovskaya T. Inorganic polyphosphates and heavy metal resistance in microorganisms[J].World J Microbiol Biotechnol,2018,34(9):139.

[15] Nies DH. Microbial heavy-metal resistance[J]. Appl Microbiol Biotechnol,1999,51(6):730-50.

作者简介：陈万林^{*}，男，汉族，广西博白，本科，兽医师，研究方向：畜牧兽医。