

基于文献计量分析群体感应在颗粒污泥领域的应用

张世龙¹, 殷秀海², 吕晶晶^{1*}, 芦珂毅¹, 梁曦爰¹, 窦艳艳¹, 李 扬¹, 陈旭东¹, 常步云¹

¹中原工学院智慧能源与环境学院, 河南 郑州

²中冶京诚工程技术有限公司, 北京

收稿日期: 2026年6月19日; 录用日期: 2026年7月18日; 发布日期: 2026年7月28日

摘 要

为明确群体感应在颗粒污泥领域的研究现状与趋势, 基于Web of Science核心合集183篇和中国知网246篇(2006年1月至2025年5月)的文献开展可视化分析。结果表明: 发文量持续增长, 2016年后显著加速。中国在WOS的发文量124篇(占总量的68%), 居全球首位, 并与澳大利亚、加拿大等国形成紧密合作网络。研究热点集中于三方面: 厌氧氨氧化中通过信号分子优化工艺提升脱氮效率; 在好氧颗粒污泥中促进颗粒化并抑制解体, 但关键机制待明; 信号分子调控胞外聚合物(EPS)分泌促进细胞聚集的颗粒化协同机制。高频关键词与期刊分析表明, 该领域研究正由机制认识向颗粒化调控、脱氮强化和稳定运行拓展; 同时, 中国学者已形成稳定团队并产出高影响力成果。未来需深化信号分子精准调控、群落协同演化机制及低能耗工艺开发。本研究为深入探索群体感应在颗粒污泥领域的研究和工程应用提供系统的文献计量学依据。

关键词

群体感应, 颗粒污泥, 文献计量分析, 信号分子, 污水处理

A Bibliometric Analysis of the Application of Quorum Sensing in the Field of Granular Sludge

Shilong Zhang¹, Xiuhai Yin², Jingjing Lyu^{1*}, Keyi Lu¹, Xishu Liang¹, Yanyan Dou¹, Yang Li¹, Xudong Chen¹, Buyun Chang¹

¹School of Smart Energy and Environment, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou Henan

²Capital Engineering & Research Incorporation Limited, Beijing

*通讯作者。

文章引用: 张世龙, 殷秀海, 吕晶晶, 芦珂毅, 梁曦爰, 窦艳艳, 李扬, 陈旭东, 常步云. 基于文献计量分析群体感应在颗粒污泥领域的应用[J]. 环境保护前沿, 2026, 16(7): 1272-1284. DOI: 10.12677/aep.2026.167128

Received: June 19, 2026; accepted: July 18, 2026; published: July 28, 2026

Abstract

To clarify the current status and trends in research on quorum sensing in the field of granular sludge, a visualization analysis was conducted based on 183 articles from the Web of Science Core Collection and 246 articles from China National Knowledge Infrastructure (CNKI) (January 2006 to May 2025). The results show that the number of publications has continued to grow, with a significant acceleration after 2016. China ranked first globally with 124 publications in the Web of Science (accounting for 68% of the total) and has formed a close collaborative network with countries such as Australia and Canada. Research hotspots are concentrated in three areas: optimizing processes through signaling molecules to enhance denitrification efficiency in anaerobic ammonium oxidation; promoting granulation and inhibiting disintegration in aerobic granular sludge, although the key mechanisms remain to be elucidated; the synergistic mechanism by which signaling molecules regulate extracellular polymeric substance (EPS) secretion to promote cell aggregation and granulation. Analysis of high-frequency keywords and journals indicates that research in this field is expanding from mechanistic understanding toward granulation regulation, denitrification enhancement, and stable operation; simultaneously, Chinese scholars have formed stable research teams and produced high-impact results. Future research should focus on deepening the understanding of precise regulation by signaling molecules, the mechanisms of community co-evolution, and the development of low-energy-consumption processes. This study provides a systematic bibliometric basis for further exploration of the research and engineering applications of quorum sensing in the field of granular sludge.

Keywords

Quorum Sensing, Granular Sludge, Bibliometric Analysis, Signal Molecules, Wastewater Treatment

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. 引言

颗粒污泥的形成是一个集物理、化学与生物作用于一体的复杂过程，其生长与聚集依赖于微生物细胞代谢产生的能量[1]。目前，该技术已经被广泛地应用在高浓度有机废水、含毒性污染物或重金属废水、印染废水以及生活污水的处理[1][2]。好氧颗粒污泥作为一种新兴污水生物处理技术，在好氧条件下通过细胞间的自固定而逐渐颗粒化，对部分废水的处理效果远超传统活性污泥法，因而备受关注[3]。

群体感应是一种由信号分子介导的细胞间的通讯系统，已被证实对生物膜法、颗粒污泥法等污水生物处理过程具有重要影响[4]-[6]。可调节污泥的多种生理功能，包括细胞分化、运动及调节生物膜结构形成，其中群体感应能够调节细胞分泌速度[7]。通过文献年代分析发现，最早从 2006 年就有群体感应在颗粒污泥方面的研究[8]，2012 年后发文量逐年递增，2017 年至今呈爆发式增长趋势。近年来，随着分子生物学的发展，群体感应在颗粒污泥中的调控机制研究不断深化。2020 年后的多项高影响力研究进一步揭示了信号分子在颗粒污泥形成、结构稳定与功能强化中的关键作用。有研究表明第二信使系统可协同促进 AHLs 介导的群体感应，提升储存后好氧颗粒污泥的恢复效率[9]，回流策略也被验证可促进好氧污泥

颗粒化,为工程调控提供了新思路[10]。此外,关于 AHLs 对生物膜形成、污泥特性及菌群结构调控效应的系统阐述,夯实了信号分子在污泥聚集中的理论基础。鉴于该领域研究日益活跃但缺乏系统性梳理,因此有必要采用文献计量学方法进行系统分析,以明确其研究脉络与发展趋势。

文献计量法作为一种数学和统计学交叉的计量分析方法,基于文献数量和质量,借助 VOSviewer 进行可视化图像分析,可揭示领域研究趋势、研究方向和热点[11][12]。目前,国内外对颗粒污泥中群体感应的研究日益活跃,国际上聚焦机制前沿探索,而国内在追踪国际前沿的同时,更侧重解决实际工程问题,满足污水处理实践需求。然而,该领域的研究方向和进展尚缺乏统计学的量化分析[13]。为此,本研究结合文献计量可视化工具,以 WOS 核心合集和 CNKI 数据库为数据源,分析 2006~2025 年颗粒污泥中群体感应的研究文献。具体内容包括:分析发文量年度趋势、关键词及高被引文献;考察国家/地区发文分布与国际合作网络;揭示研究热点与发展趋势,从而填补相关定量证据空白。

2. 数据来源与处理

2.1. 数据收集

本研究通过 WOS 核心合集进行文献检索,所用检索式为: TS = (“granular sludge” or “granulation” or “granular”) AND TS = (“quorum sensing” or “bacterial communication” or “AHL” OR “Quorum Quenching” or “cell communication” or “signal molecule”)数据库选择: Web of Science 核心合集,引文索引设置(SCI-EXPANDED)。设定检索语种为“English”,文献检索类型为研究型论文。检索截止时间为 2025 年 5 月 6 日。初步检索到 226 条记录,经排除医学等不相关领域文献后,筛选获得 183 条有效记录。在 CNKI 数据库进行检索,于高级搜索页面设置检索式如下:(全文:颗粒污泥 + 颗粒化)AND(全文:群体感应 + 细菌通讯 + AHL + 信号分子 + 群体淬灭)。限定文献类型为期刊论文,检索截止日期为 2025 年 5 月 6 日。共检索到 388 条记录,排除了学位论文,会议、新闻、报纸、科技成果等来源成果。筛选后收集到 246 条有效记录。

2.2. 研究方法

本研究采用量化分析与质性分析相结合的策略,从发文量、作者关键词、研究热点及引文等多个维度,系统分析群体感应在颗粒污泥中的研究进展。具体研究方法如下:首先,运用 Excel 软件统计并绘制发文量的年度分布图及主要发文期刊趋势图;其次,利用 VOSviewer 软件绘制作者合作网络图与关键词共现网络图,并基于此分析合作网络结构、学者影响力、热点关键词分布及引文关系;最后,采用 Origin 软件绘制其他基础性图表。

在可视化工具的选择上,目前存在如 CiteSpace 等其他主流文献计量软件,但鉴于本研究旨在直观展现科研力量的空间合作网络与研究热点的聚类特征,而 VOSviewer 在共现网络解析及热点密度视图的呈现上具有更高的适配性,故本研究最终选用 VOSviewer 软件,用以分析学者影响力及关键词分布规律。

本研究方法尚存局限:一是高度依赖原数据,难以替代全文深度挖掘;二是共现分析仅表征统计关联,无法揭示深层语义逻辑(如协同或拮抗机制)。未来探究底层微生态机制时,仍需结合传统系统综述予以弥补。

3. 结果与分析

3.1. 发文量

在文献计量学领域,发文量是衡量科研产出、体现学术影响力、反映学科发展态势和为科研评价提供参考的重要指标[14]。它能直观展现科研主体的成果数量,成果大量发表利于提升知名度与影响力,其

变化趋势可反映学科发展状况,也是科研评价常用标准。基于 WOS 核心合集,通过文献计量学的方式统计年总发文量趋势如图 1(a)所示。

如图 1 所示,从 2006 年 1 月至 2025 年 5 月,群体感应颗粒污泥领域的发文量呈逐渐递增趋势。2006~2012 年为起步阶段,2012~2016 年为稳步发展阶段,2016~2024 年为快步发展阶段。尽管 2024~2025 年数据不够完整,但根据趋势推测,2025 年发文量将持续增长。

各国发文量是衡量科研实力、创新能力和学术影响力的重要指标。对 WOS 核心合集中 183 篇文献的分析结果显示,这些研究成果分布于 28 个国家/地区。国家/地区发文量排名前十位如图 1(b)所示。其中,中国以 124 篇的发文量高居榜首,占总发文量的 68.5%。表明中国学者在该研究领域表现出较高的研究活跃度与较高的发文贡献占比。加拿大,澳大利亚,新加坡的发文量紧跟其后,表明该领域已引起国际广泛关注。

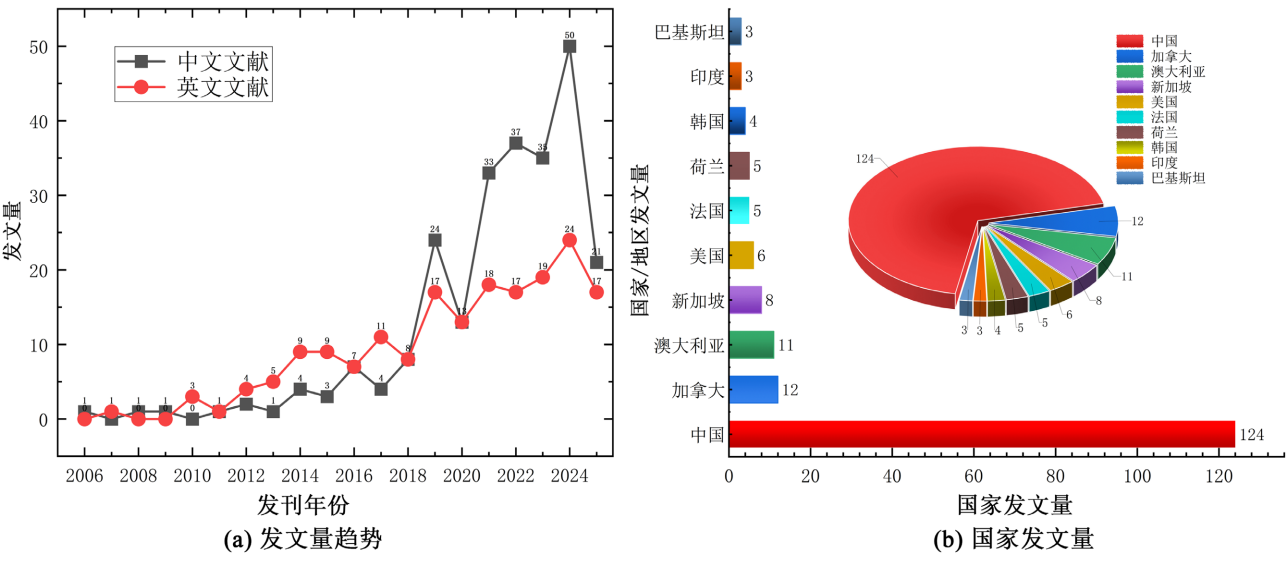


Figure 1. Annual publication volume statistics of quorum sensing in the field of granular sludge (Year 2006~2025)
图 1. 群体感应颗粒污泥领域年度发文量统计(2006~2025 年)

3.2. 研究关键词

3.2.1. 高频关键词

关键词不仅能体现单篇文献的研究主题,通过分析其高频分布,更能洞悉整个学科领域热点的集中体现。从 WOS 核心合集和 CNKI 数据库中发文分别收集到关键词,将 2006 年 1 月至 2025 年 5 月的关键词按使用频率进行分析,并将使用频率前十的关键词呈现出来。由表 1 可见, WOS 核心合集中排名前三的高频关键词为 Quorum sensing、EPS 和 Microbial community,表明该领域国际研究对微生物群落结构及胞外聚合物(EPS)的作用高度关注[15]。从 2006 年起,群体感应颗粒污泥的研究逐渐兴起[8]。CNKI 数据库中厌氧氨氧化、好氧颗粒污泥、群体感应、信号分子等关键词高频出现[16][17],表明中国学者重点关注群体感应在好氧颗粒污泥中的应用,推动该方向成为国内研究热点[18]。其中厌氧氨氧化与好氧颗粒污泥的研究呈现并行发展的态势[19]-[21]。

进一步基于 VOSviewer 的关键词共现与聚类分析(图 2),可将该领域的研究热点以数据驱动的方式划分为以下三个核心聚类群:

- (1) 聚类一: 厌氧氨氧化与脱氮工艺优化。该聚类群以“厌氧氨氧化”(在 CNKI 数据库中位列高频

姓名	性别	年龄	职业	住址	联系电话	电子邮箱	其他信息
张三	男	35	教师	北京市朝阳区	13901234567	zhangsan@163.com	
李四	女	28	医生	北京市海淀区	13801234567	lisi@163.com	
王五	男	42	工程师	上海市浦东新区	13701234567	wangwu@163.com	
赵六	女	31	会计	广州市天河区	13601234567	zhaoliu@163.com	
孙七	男	25	学生	深圳市南山区	13501234567	sunqi@163.com	
周八	女	38	公务员	武汉市江汉区	13401234567	zhouba@163.com	
吴九	男	45	企业家	杭州市西湖区	13301234567	wujiu@163.com	
郑十	女	33	设计师	南京市鼓楼区	13201234567	zhengshi@163.com	
陈十一	男	29	程序员	成都市高新区	13101234567	chen11@163.com	
冯十二	女	36	律师	昆明市五华区	13001234567	feng12@163.com	
马十三	男	41	销售经理	海口市龙华区	12901234567	ma13@163.com	
朱十四	女	34	人力资源	贵阳市南明区	12801234567	zhu14@163.com	
徐十五	男	27	产品经理	长春市朝阳区	12701234567	xu15@163.com	
高十六	女	39	财务总监	沈阳市和平区	12601234567	gao16@163.com	
周十七	男	43	项目经理	大连市沙河口区	12501234567	zhou17@163.com	
吴十八	女	32	市场专员	青岛市市南区	12401234567	wu18@163.com	
郑十九	男	40	运营经理	郑州市金水区	12301234567	zheng19@163.com	
陈二十	女	37	行政助理	海口市秀英区	12201234567	chen20@163.com	
冯二十一	男	26	数据分析师	贵阳市观山湖区	12101234567	feng21@163.com	
马二十二	女	35	产品经理	长春市宽城区	12001234567	ma22@163.com	
朱二十三	男	44	销售经理	沈阳市铁西区	11901234567	zhu23@163.com	
徐二十四	女	33	人力资源	大连市金州区	11801234567	xu24@163.com	
高二十五	男	28	程序员	青岛市李沧区	11701234567	gao25@163.com	
周二十六	女	36	设计师	昆明市官渡区	11601234567	zhou26@163.com	
吴二十七	男	42	工程师	海口市琼山区	11501234567	wu27@163.com	
郑二十八	女	31	会计	贵阳市云岩区	11401234567	zheng28@163.com	
陈二十九	男	29	学生	长春市南关区	11301234567	chen29@163.com	
冯三十	女	38	公务员	沈阳市皇姑区	11201234567	feng30@163.com	
马三十一	男	46	企业家	大连市中山区	11101234567	ma31@163.com	
朱三十二	女	34	人力资源	青岛市市北区	11001234567	zhu32@163.com	
徐三十三	男	27	产品经理	昆明市西山区	10901234567	xu33@163.com	
高三十四	女	39	财务总监	海口市龙华区	10801234567	gao34@163.com	
周三十五	男	43	项目经理	贵阳市南明区	10701234567	zhou35@163.com	
吴三十六	女	32	市场专员	长春市朝阳区	10601234567	wu36@163.com	
郑三十七	男	40	运营经理	沈阳市和平区	10501234567	zheng37@163.com	
陈三十八	女	37	行政助理	大连市沙河口区	10401234567	chen38@163.com	
冯三十九	男	26	数据分析师	青岛市市南区	10301234567	feng39@163.com	
马四十	女	35	产品经理	昆明市五华区	10201234567	ma40@163.com	
朱四十一	男	44	销售经理	海口市秀英区	10101234567	zhu41@163.com	
徐四十二	女	33	人力资源	贵阳市观山湖区	10001234567	xu42@163.com	
高三十三	男	28	程序员	长春市宽城区	09901234567	gao43@163.com	
周四十四	女	36	设计师	沈阳市铁西区	09801234567	zhou44@163.com	
吴四十五	男	42	工程师	大连市金州区	09701234567	wu45@163.com	
郑四十六	女	31	会计	青岛市李沧区	09601234567	zheng46@163.com	
陈四十七	男	29	学生	昆明市官渡区	09501234567	chen47@163.com	
冯四十八	女	38	公务员	海口市琼山区	09401234567	feng48@163.com	
马四十九	男	46	企业家	贵阳市云岩区	09301234567	ma49@163.com	
朱五十	女	34	人力资源	长春市南关区	09201234567	zhu50@163.com	
徐五十一	男	27	产品经理	沈阳市皇姑区			



用地效率不足等问题提供新思路 and 途径[24]-[26]。然而，当前研究仍存在局限性，如部分关键信号分子的作用机制尚未完全明晰，微生物群落与群体感应的复杂交互网络有待深入解析。

(3) 聚类三：信号分子调控的颗粒化微生态协同机制。该聚类群主要由中英文文献中的“信号分子”(中文位列第四，45 次)、“signal molecules”、“AHLs”、“EPS”和“granulation”等高频词共现形成。图 2 中，这些关键词形成明显的共现聚类区域，印证了信号分子通过调控 EPS 分泌促进污泥颗粒化的协同机制。其信号分子对颗粒污泥造粒的影响主要在于 EPS 的分泌、ATP 以及污泥沉降性能的影响[10][27][28]。研究表明，信号分子通过调节 EPS 的浓度来加速细菌聚集与颗粒化进程[29]。在颗粒化初始阶段，群体感应促使微生物分泌 EPS (胞外聚合物)作为“黏合剂”，促进细胞聚集；随着颗粒生长，群体感应产生信号分子进一步调节微生物代谢与功能，优化内部结构，从而提升颗粒的稳定性和活性。同时，颗粒化形成的特殊微环境也为信号分子的积累和作用提供了理想条件。这种信号分子-EPS-颗粒微环境之间的相互促进与强化，共同驱动了高效稳定颗粒污泥体系的构建。

3.2.2. 突现关键词

相对于传统高频主题词，爆发词能够揭示研究领域的趋势，清晰显示某一主题在特定时间段内的关注度，通过关键词检索，对 2006 年 1 月至 2025 年 5 月群体感应在颗粒污泥研究领域重点关键词进行突现分析，根据突现年限对爆发词进行排序(如表 2)，红色区域表现为突发关键词最为显著的时间段[30]。

Table 2. Emergent keywords of quorum sensing in the field of granular sludge in Chinese and English literatures
表 2. 群体感应在颗粒污泥领域中英文文献突现关键词

关键词	年份	强度	开始	结束	2006~2025
Quorum Sensing	2010	4.35	2010	2020	
Biofilm formation	2011	3.81	2011	2016	
Homoserine lactones	2013	3.26	2013	2017	
Sequencing batch reactor	2015	2.74	2015	2018	
Waste Water Treatment	2014	4.49	2017	2019	
Signal molecules	2018	3.06	2018	2019	
Membrane bioreactor	2019	3.29	2019	2021	
Granulation	2014	2.79	2019	2022	
Aggregation	2022	2.82	2022	2025	
Nitrogen removal	2021	3.62	2023	2025	
自诱导物	2006	1.97	2006	2012	
群体感应	2008	3.04	2008	2015	
细菌	2009	1.35	2009	2012	
废水处理	2014	1.53	2014	2018	
菌胶团	2016	1.28	2016	2017	
脱氮性能	2019	2.11	2019	2020	
群落结构	2019	1.60	2019	2021	
膜污染	2020	1.48	2020	2021	
稳定性	2021	2.12	2021	2023	
生物脱氮	2014	2.21	2022	2023	

近 25 年该领域的研究大致可分为两个方面：

第一方面为研究主题的时序性，国际研究(WOS)与国内研究(CNKI)均呈现从微生物机制探索向工程应用转化的明显趋势。早期(2006~2013 年)：中英文文献共同聚焦群体感应(QS)基础机制，如 CNKI 的“自诱导物”(2006)和 WOS 的“Quorum Sensing”(2010)、“Homoserine lactones”(2013)，揭示信号分子在微生物通讯中的核心地位。中期(2014~2018 年)：研究转向废水处理工艺，WOS 中“Waste Water Treatment”(2014，强度 4.49)与“Sequencing batch reactor”(2015)突现，CNKI 同步出现“废水处理”(2014)和“菌胶团”(2016)，体现微生物机制与工程实践的初步结合。近期(2019~2025 年)：双方共同关注系统稳定性与效能优化，WOS 突出“Membrane bioreactor”(2019)、“Nitrogen removal”(2021)，CNKI 聚焦“膜污染”(2020)、“稳定性”(2021)，反映工艺化调控需求[31] [32]。

第二方面在于前沿方向与区域侧重不同：2020 年后新兴主题呈现分化：WOS 前沿集中于生物聚集过程优化(Granulation、Aggregation)和脱氮效能提升(Nitrogen removal)，体现对微生物群落空间结构调控的重视；CNKI 前沿更关注系统运行稳定性(2021~2023)和工艺泛化应用(“生物脱氮”2022~2023)，反映工程落地的实际需求。

3.3. 研究力量和期刊分布

3.3.1. 国家合作网络

国家合作网络是推动研究领域科学进步与创新的强大引擎，它打破国界限制，整合各国科研资源、人才与技术优势，实现跨学科、跨地域的深度协作。图 3 展示了 WOS 核心合集中不同国家之间的合作

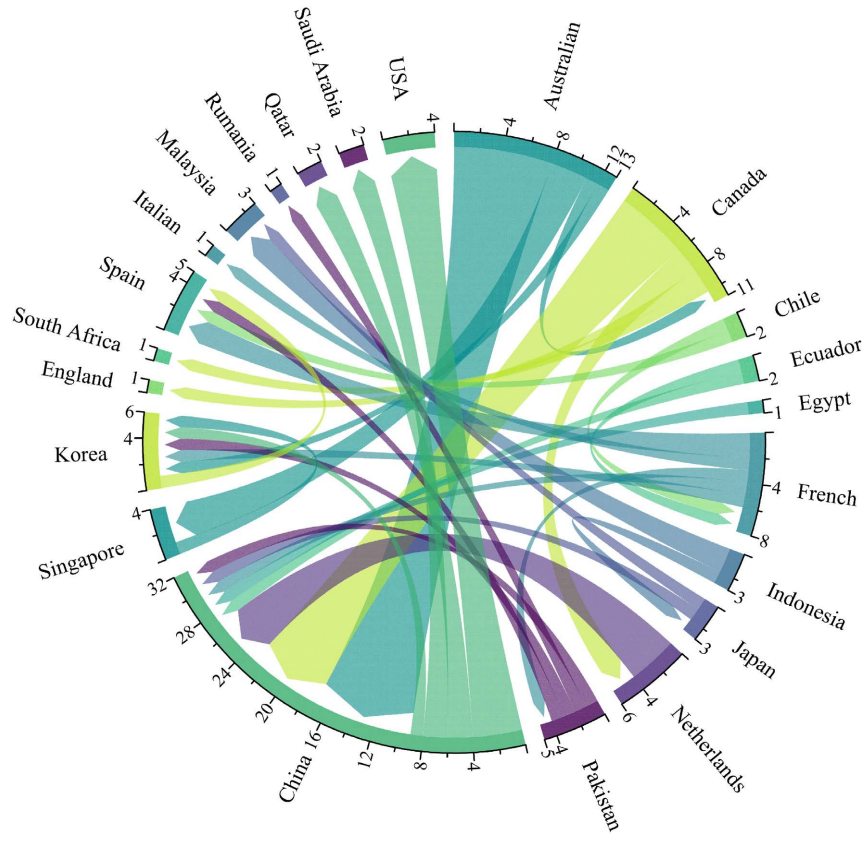


Figure 3. Network diagram of international cooperative relations among countries based on WOS
图 3. 基于 WOS 的国家间国际合作关系网络图

关系网络，节点代表国家实体，连边权重通过双边合作频次量化(采用频次计数法：权重值 = 合作事件发生次数)。节点规模与其加权重值成正比，即该国所有关联边权重之和，用以衡量其在全球合作网络中的综合影响力；连边粗细直接映射连接权重，表征对特定国家的合作强度。合作网络分析表明，已形成以中国、澳大利亚、加拿大及法国为核心节点的国际合作网络结构。例如，澳大利亚与中国间的连边权重为 8 (强连接)，而与加拿大的连边权重为 1 (弱连接)。

通过 VOSviewer 软件进行中心度计算，中心度计算基于合作权重矩阵的加权特征向量中心度算法，其计算中心度数学表达式参见公式(1) [33]：

$$C_i = \frac{1}{\lambda} \sum_{j \in N(i)} w_{ij} \cdot C_j \tag{1}$$

式中： λ 为网络邻接矩阵的最大特征值(由 VOSviewer 自动计算)； $N(i)$ ：与国家 i 直接合作的所有邻居节点集合； w_{ij} ：国家 i 与国家 j 的合作权重(即双边合作论文数量，如中澳合作权重 $w_{中澳} = 8$)； C_j ：邻居国家 j 的中心度(迭代计算得出)，最后每轮标准化并重复至收敛(残差 $< 10^{-5}$)。得到中国中心度值 0.83 (由高合作广度与强连接伙伴决定)。

中国与澳大利亚、加拿大等国合作尤为紧密。这种广泛的国际合作网络有助于整合全球研究资源与优势，共同推进该领域的研究进程。中国通过广泛的国际合作网络，及技术辐射与能力建设，推动发展中国家融入全球科研体系，为污水处理领域的可持续发展提供了重要支撑[34]。

3.3.2. 期刊分析

基于 WOS 核心合集和 CNKI 数据库，分别从 2006 年 1 月至 2025 年 5 月期间收集到有关“颗粒污泥在群体感应中的应用与研究”为 183 篇和 246 篇，分别发布在不同的期刊上，其中发文量排前 5 位的期刊如图 4 所示。

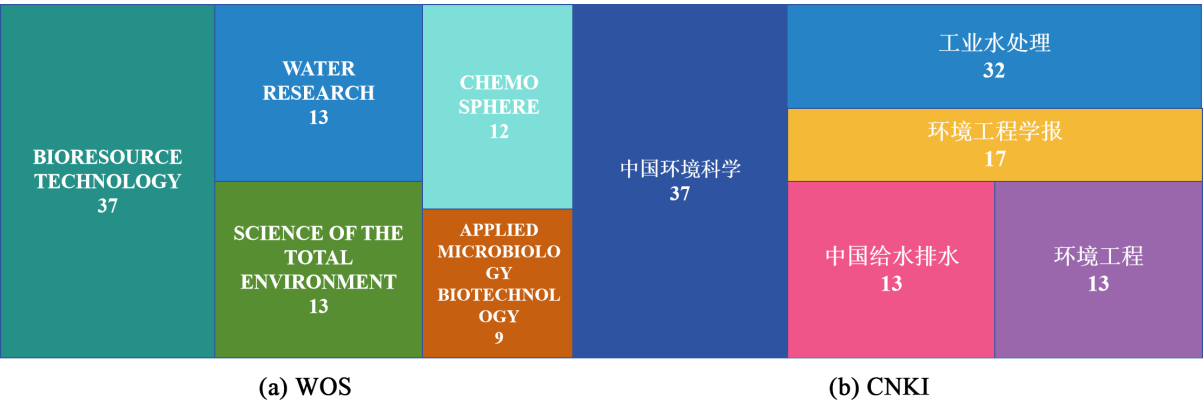


Figure 4. The top 5 journals in terms of publication volume in the research field
图 4. 研究领域中文发表量排名前 5 位的期刊

从 WOS 核心合集中看，《Bioresource Technology》以 37 篇发文量位居首位。《Water Research》和《Science of the Total Environment》均发文 13 篇，并列第二。《Chemosphere》发文 12 篇，位列第四。而相关研究成果已引起国际顶刊《Water Research》的重视，说明该领域已成为全球水研究领域的热点之一。CNKI 数据库中《中国环境科学》以发文量 37 篇排名第一，体现了该刊在环境工程与水处理有一定的影响力。《工业水处理》以发文量 32 篇排名第二，《环境工程学报》以发文量 17 篇次之。总体而言，WOS 与 CNKI 数据库中的相关研究主要集中发表在环境科学、污水处理和生物处理领域期刊[35] [36]。

说明群体感应颗粒污泥中的应用已成为该领域的重要研究方向。

3.4. 研究作者

开展一项研究的工作者越多，表明该研究受关注程度越高[37]。VOSviewer 软件分析到 WOS 核心合集和 CNKI 数据库中检索到发文量排名前 10 位的作者信息详见表 3。在 WOS 核心合集中，Li, Yaochen (西南石油大学)发文量最高(7 篇)。Guo, Jianbo (台州大学)和 Li, Haibo (天津城建大学)亦各发表 7 篇，并列其后。中国知网 CNKI 检索发表论文中李激共发表 12 篇排名第一，王硕发表相关论文 11 篇排名第二，刘文如发表 6 篇排名其后。由此可见，中国学者在该研究领域表现最为活跃，是推动该领域发展的重要研究力量之一。

Table 3. Top 10 authors and their publication volumes in WOS core collection and CNKI database
表 3. WOS 核心合集和 CNKI 数据库发文量前 10 位作者及其发文量

作者	WOS 发文量	作者	CNKI 发文量
Yaochen LI	7	李激	12
Jianbo GUO	7	王硕	11
Haibo LI	7	刘文如	6
Jianrong ZHU	7	支丽玲	5
Dongsheng SHEN	6	赵峰德	5
Junping LYU	6	肖飞	5
Yi HAN	6	王玉莹	5
Jun LI	6	王少坡	5
Guangming ZHANG	6	宋志伟	5
Huajun FENG	6	时文歆	5

稳定而高水平的学术团队，为该领域的持续产出与深入探索提供了核心支撑，是推动其发展的原动力。WOS 核心合集和 CNKI 数据库中 2006 年 1 月至 2025 年 5 月学者合作关系网络图如图 5 所示。整体而言，作者聚类结果在宏观层面印证了该领域高度依赖合作的研究模式。具体来看，基于 WOS 的合作网络交织紧密，关系复杂；反观 CNKI，其合作团体则更为集中且相对独立。如图 5 所示，CNKI 数据揭示了以刘文如、支丽玲等学者为核心的稳定合作团队，这些学者在团队中占据关键位置，彰显其在该合作网络中的核心节点作用[38]-[40]。WOS 核心合集的分析同样表明，以 Shi Wenxin(时文歆)、Li Ji(李激)、Peng Yongzhen(彭永臻)等人为代表的研究团队也具有较高的合作集中度。值得注意的是，在颗粒污泥群体感应领域发文量居前的作者多为中国学者。稳定的团队建设，是中国学者在该领域既能保持最高发文量，也能成为最活跃合作主体的重要成因，这一点在 CNKI 数据库中得到了进一步印证。

对文献作者进行主要发文作者分析，可获悉该研究领域的主要学者和核心研究力量。著名学者 Price 指出，在相同主题下，约一半的论文由一小部分高产作者撰写，而这些作者的数量大约等于所有作者总数的平方根[41] [42]。参见公式(2)：

$$m = 0.749 \times \sqrt{n_{\max}} \tag{2}$$

其中： $n_{\max}$ 为该领域内最高产作者的论文数(通过 VOSviewer 统计可知， $n_{\max} = 12$)， m 为核心作者的最低发文量。根据公式计算得出 $m = 2.6$ ，因此将发文量 3 篇及以上的作者视为该领域的核心作者，可得李激、

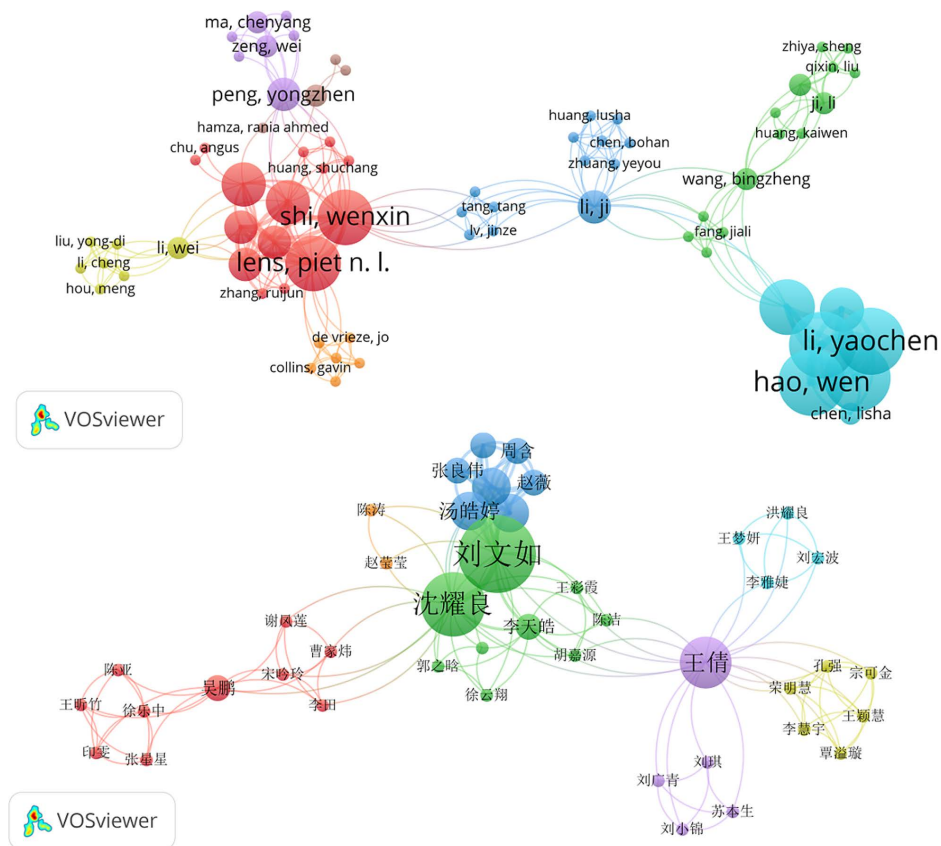


Figure 5. Shows the network diagram of scholars' cooperative relationships in the field of granular sludge through quorum sensing
图 5. 群体感应颗粒污泥领域学者合作关系网络图

王硕、LI Yaochen 等高产作者，共计 25 名核心作者，共计发文 118 篇，占总发文量的 27.5%。

3.5. 引文分析

WOS 中被引次数排名前 10 的文献信息见表 4。其中 3 篇文献第一作者来自中国机构，反映出中国学者的部分研究成果获得了国际同行的较多关注。中国学者史亚慧(Shi Yahui)专注于膜法水处理技术及装置材料研发，其综述论文《Exploiting extracellular polymeric substances (EPS) controlling strategies for performance enhancement of biological wastewater treatments: An overview》被引 389 次，是该领域的重要标志性成果[43]。此外，来自 Nanyang Technological University 学者 Chuan Hao Tan 的论文《The role of quorum sensing signalling in EPS production and the assembly of a sludge community into aerobic granules》被引 349 次，进一步佐证了该国在该领域的研究实力[44]。

Table 4. Information of the top ten cited documents in the WOS core collection
表 4. WOS 核心合集中引文次数前十文献信息

序号	第一作者	年份	被引次数	机构	国家
1	Yahui Shi	2017	389	Hunan University	中国
2	Chuan Hao Tan	2014	349	Nanyang Technological University	新加坡
3	Joshua D. Shrout	2012	274	University of Notre Dame	美国

续表

4	Jinhui Huang	2016	210	Hunan University	中国
5	Zhiji Ding	2015	182	University of Cassino	意大利
6	Saurabh Jyoti Sarma	2017	155	University of Calgary	加拿大
7	Naga Raju Maddela	2019	150	Sun Yat-Sen University	厄尔多瓜
8	Chuan Hao Tan	2015	142	Nanyang Technological University	新加坡
9	Xi Tang	2015	135	Peking University	中国
10	Oliver Terna Iorhemen	2017	122	University of Calgary	加拿大

4. 结论与展望

本研究借助文献可视化工具 VOSviewer 软件，对 WOS 核心合集和 CNKI 数据库中 2006~2025 年关于群体感应颗粒污泥中的研究文献进行了计量统计与热点分析，主要结论如下：

(1) 2016~2024 年间群体感应在颗粒污泥领域进入快速发展期，中国学者贡献了约 68.5% 的核心文献，是该领域高度活跃的研究群体，并构建了多个稳定的合作网络。同时，以中国(合作中心度 0.83)、澳大利亚、加拿大、新加坡及韩国为核心节点的成熟国际合作网络业已形成。

(2) 期刊分布与关键词分析表明：群体感应在颗粒污泥领域具有较明确的学科属性。相关成果主要发表在《Bioresource Technology》《Water Research》以及《中国环境科学》和《工业水处理》等环境科学类期刊。研究重点正由对信号分子、EPS 和微生物群落等作用机制的认识，逐步扩展至颗粒化调控、脱氮效能提升等领域。未来应强化关键机制与运行调控的衔接，提升群体感应调控策略的工程适用性。

(3) 关键词分析得到研究热点聚集于厌氧氨氧化工艺优化、好氧颗粒污泥稳定性提升、颗粒化协同机制。未来研究应着重以下关键方向：① 阐明核心机制：深入了解 AHLs/AI-2 等群体感应信号分子在微生物协同演化中的代谢调控机制；② 开发低能耗技术：创新基于群体淬灭原理的节能策略；③ 突破工程瓶颈：重点解决颗粒污泥结构稳定性和出水 COD 持续波动等瓶颈、推动基础研究成果向高效低耗工艺转化。

基金项目

中原工学院研究生科研创新计划项目(YKY2026ZK46)；河南省省级科技研发计划联合基金，(252103810259)；河南省自然科学基金面上项目(262300420009)；河南省科技厅科技攻关项目，(252102320105)；中原工学院科研团队发展项目(自然科学类)，K2025TD005。

参考文献

[1] de Celis, M., Modin, O., Arregui, L., Persson, F., Santos, A., Belda, I., et al. (2024) Community Successional Patterns and Inter-Kingdom Interactions during Granular Biofilm Development. *npj Biofilms and Microbiomes*, **10**, 109-112. <https://doi.org/10.1038/s41522-024-00581-x>

[2] Shi, L., Li, R., Bu, Y., Wei, Y., Cai, W., Huang, Z., et al. (2023) Hybrid Granule-Floc Sludge Distribution and Its Potential for Upgrading a Tropical Continuous-Flow Wastewater Treatment Plant. *Journal of Water Process Engineering*, **55**, Article 104178. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104178>

[3] Wang, X., Yi, K., Pang, H., Liu, Z., Li, X., Zhang, W., et al. (2024) An Overview of Quorum Sensing in Shaping Activated Sludge Forms: Mechanisms, Applications and Challenges. *Science of the Total Environment*, **927**, Article 171886. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171886>

[4] Gao, P., Li, J., Zhang, J., Zhao, A., Tang, P., Zhang, X., et al. (2024) Application and Mechanism of Quorum Sensing in Biological Wastewater Treatment Systems: Current State and Future Prospects. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **12**, Article 113453. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.113453>

- [5] 庞悦, 吴宗林, 安彤, 等. 污水生物处理中信号分子 AHL 介导的群体感应[J]. 水处理技术, 2020, 46(11): 1-15.
- [6] 何航, 赵健, 孙宁, 等. 好氧颗粒膜生物污水处理技术研究进展[J]. 环境工程技术学报, 2021, 11(1): 163-172.
- [7] Moreno-Gómez, S., Hochberg, M.E. and van Doorn, G.S. (2023) Quorum Sensing as a Mechanism to Harness the Wisdom of the Crowds. *Nature Communications*, **14**, Article No. 3415. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37950-7>
- [8] 齐枝花, 于鑫, 余萍, 等. 生物法中细菌群感效应所需自诱导物的存在证明[J]. 中国给水排水, 2006(13): 18-21+25.
- [9] Lv, Y., Huang, X. and Lee, D. (2024) The Second Messenger (Cyclic Diguanylate and Autoinducer-2) Promotes N-Acylated-Homoserine Lactones-Based Quorum Sensing for Enhanced Recovery of Stored Aerobic Granular Sludge. *Bioresource Technology*, **398**, Article 130479. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.130479>.
- [10] Ji, Y.T., Yu, H.T., Cao, R.J., et al. (2022) Promoting the Granulation Process of Aerobic Sludge via a Sustainable Strategy of Effluent Reflux in View of AHLs-Mediated Quorum Sensing. *Journal of Environmental Management*, **303**, Article 114091. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114091>
- [11] 杨早, 毛萍, 何奕忻, 等. 基于 VOSviewer 的公园城市计量特征、热点与趋势[J]. 应用与环境生物学报, 2022, 28(4): 84-93.
- [12] 付全升, 黄先寒, 申仕康, 等. 基于数据库的植物功能性状研究现状文献计量学分析[J]. 应用与环境生物学报, 2021, 27(1): 228-240.
- [13] Zheng, T.L., Li, P.Y., Wu, W.J., et al. (2018) State of the Art on Granular Sludge by Using Bibliometric Analysis. *Applied Microbiology and Biotechnology*, **102**, 3453-3473. <https://doi.org/10.1007/s00253-018-8844-5>
- [14] 索传军, 于淼, 牌艳欣, 等. 数据驱动的学术评价理论框架研究[J]. 图书情报工作, 2024, 68(1): 5-12.
- [15] Sarma, S.J., Tay, J.H. and Chu, A. (2017) Finding Knowledge Gaps in Aerobic Granulation Technology. *Trends in Biotechnology*, **35**, 66-78. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2016.07.003>
- [16] 李杰, 王少坡, 李亚静, 等. 好氧颗粒污泥污水处理技术研究现状与发展[J]. 环境科学与技术, 2021, 44(11): 176-183.
- [17] 刘莎莎, 梁家豪, 李晋, 等. 信号分子在好氧污泥颗粒化中的作用及其控制策略[J]. 工业水处理, 2021, 41(1): 25-29.
- [18] 赵敏娟, 李雨季, 王佳彤, 等. 好氧颗粒污泥处理低 C/N 生活污水的新策略探究[J]. 水处理技术, 2021, 47(12): 112-115+119.
- [19] Zhao, R., Zhang, X., Jin, D., Zhu, X., Ji, L., Gao, B., et al. (2025) Anammox Sludge Granulation and Synergy with Comammox: A Critical Review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **13**, Article 115300. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.115300>
- [20] 曹宇浩, 管锡珺, 陈计洋, 等. 不同粒径厌氧颗粒污泥产气作用对沉降性能的影响[J]. 中国给水排水, 2024, 40(5): 82-86.
- [21] 肖飞, 杨紫海, 王世民, 等. 优化双搅拌策略修复耐盐好氧颗粒污泥脱氮除磷及结构稳定性研究[J]. 水处理技术, 2025, 51(4): 92-98+112.
- [22] Zhang, X.N., Zhu, Z.X., Zhang, X.X., et al. (2025) Deciphering Intricate Associations between Vigorous Development and Novel Metabolic Preferences of Partial Denitrification/Anammox Granular Consortia within Mainstream Municipal Wastewater. *Bioresource Technology*, **419**, Article 132074. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2025.132074>
- [23] Gao, M.J., Zou, X., Dang, H.Y., et al. (2024) Enhancing Anammox Process at Moderate Temperature via Employing Anammox Granular Sludge Reactor Effluent Addition. *Process Safety and Environmental Protection*, **182**, 894-902. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.12.014>
- [24] 王亚军, 秦楚桐, 李肇隆, 等. 好氧颗粒污泥结构稳定强化策略研究评述[J]. 生态环境学报, 2024, 33(3): 478-486.
- [25] Jang, E., Min, K.J., Lee, E., Choi, H. and Park, K.Y. (2023) Acceleration of Aerobic Granulation in Sidestream Treatment with Exogenous Autoinducer. *Water*, **15**, Article 2173. <https://doi.org/10.3390/w15122173>
- [26] 明婕, 黄子萌, 董清林, 等. 好氧颗粒污泥的性质及形成机制[J]. 水处理技术, 2019, 45(7): 1-5+23.
- [27] 赵生娟, 刘莎莎, 宋佳宇, 等. 颗粒污泥中群体感应的环境影响因素及其对 EPS 的调控机制[J]. 工业水处理, 2025, 45(11): 8-18.
- [28] Xiong, F.Z., Zhao, X.X., Wen, D.H., et al. (2020) Effects of N-Acyl-Homoserine Lactones-Based Quorum Sensing on Biofilm Formation, Sludge Characteristics, and Bacterial Community during the Start-Up of Bioaugmented Reactors. *Science of the Total Environment*, **735**, Article 139449. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139449>
- [29] 谭煜, 付丽亚, 周鉴, 等. 胞外聚合物(EPS)对污水处理影响的研究进展[J]. 环境工程技术学报, 2021, 11(2): 307-313.

- [30] 唐婧, 李威潭, 杨佳豪. 基于 CiteSpace 的污水处理厂生命周期碳排放评价领域研究热点[J]. 应用与环境生物学报, 2024, 30(3): 633-641.
- [31] 徐佳杰, 张妮, 谢周云, 等. 好氧颗粒污泥耐受 PFOS 的结构稳定性及微生物响应[J]. 中国环境科学, 2022, 42(11): 5117-5127.
- [32] Li, T.L., Guo, F., Lin, Y., *et al.* (2019) Metagenomic Analysis of Quorum Sensing Systems in Activated Sludge and Membrane Biofilm of a Full-Scale Membrane Bioreactor. *Journal of Water Process Engineering*, **32**, Article 100952. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.100952>
- [33] Perianes-Rodriguez, A., Waltman, L. and van Eck, N.J. (2016) Constructing Bibliometric Networks: A Comparison between Full and Fractional Counting. *Journal of Informetrics*, **10**, 1178-1195. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2016.10.006>
- [34] 王洪臣. 坚持和发展中国特色城市治水路线[J]. 给水排水, 2025, 61(1): 1-12.
- [35] Li, Y.S., Li, B.B., Tian, T., *et al.* (2023) Quorum Sensing Unveils the Sludge Floccule-Assisted Stabilization of Aerobic Granules in Granule-Dominated Sequencing Batch Reactors. *Biotechnology and Bioengineering*, **120**, 444-455. <https://doi.org/10.1002/bit.28275>
- [36] 卢之琪, 唐俊, 李洪静. 污水生物处理领域“群体感应”应用研究进展[J]. 复旦学报(自然科学版), 2024, 63(3): 306-319.
- [37] Guan, W. and Ling, W. (2020) Analysis of Visual Knowledge Mapping of Digital Twin Research Based on Bibliometrics. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, **26**, 18-27.
- [38] 支丽玲, 王玉莹, 马鑫欣, 等. c-di-GMP 在低温好氧颗粒污泥形成过程中的作用[J]. 中国环境科学, 2019, 39(4): 1560-1577.
- [39] 汤皓婷, 隆静, 蒋宽胜, 等. 好氧颗粒污泥失稳机理及改善策略之研究进展[J]. 环境工程, 2023, 41(9): 96-106.
- [40] 刘文如, 阴方芳, 丁玲玲, 等. 选择性排泥改善颗粒污泥亚硝化性能的研究[J]. 中国环境科学, 2014, 34(2): 396-402.
- [41] de Solla Price, D.J. (1963) *Little Science, Big Science*. Columbia University Press.
- [42] 文丹, 李蕾, 史昱翔, 等. 机械力化学在环境领域的研究及应用: 基于球磨方法的文献计量分析[J]. 应用化工, 2025, 54(2): 439-445+451.
- [43] Shi, Y.H., Huang, J.H., Zeng, G.M., *et al.* (2017) Exploiting Extracellular Polymeric Substances (EPS) Controlling Strategies for Performance Enhancement of Biological Wastewater Treatments: An Overview. *Chemosphere*, **180**, 396-411. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.04.042>
- [44] Tan, C.H., Koh, K.S., Xie, C., *et al.* (2014) The Role of Quorum Sensing Signalling in EPS Production and the Assembly of a Sludge Community into Aerobic Granules. *The ISME Journal*, **8**, 1186-1197. <https://doi.org/10.1038/ismej.2013.240>