

前瞻与评论

基于文献计量学分析微生物浸出的热点主题和前沿演进

席燕鹏¹, 黎梦姣¹, 刘亚利¹, 蔺妍妍¹, 毛爱红², 唐德平^{*1}¹ 兰州交通大学 生物与制药工程学院, 甘肃 兰州 730070² 甘肃省医学科学研究院 医学分子生物学研究中心, 甘肃 兰州 730050

席燕鹏, 黎梦姣, 刘亚利, 蔺妍妍, 毛爱红, 唐德平. 基于文献计量学分析微生物浸出的热点主题和前沿演进[J]. 微生物学通报, 2025, 52(6): 2867-2882.

XI Yanpeng, LI Mengjiao, LIU Yali, LIN Yanyan, MAO Aihong, TANG Deping. Bibliometric analysis of hot topics and frontiers in bioleaching[J]. Microbiology China, 2025, 52(6): 2867-2882.

摘要: 【背景】微生物浸出是处理尾矿、废弃矿石、低品位矿、难处理矿的有效浸出手段; 相较于传统的浸出技术, 其具有环境友好、收益好、冶金效率高等优点。【目的】深入探讨微生物浸出在全球范围内的发展趋势和学术影响, 并协助研究人员确定研究方向, 开展相关研究, 了解该领域最相关的课题。【方法】基于 Web of Science 核心合集数据库对 2011–2023 年全球微生物浸出的文献进行检索和分析。【结果】年发文趋势揭示微生物浸出领域的研究热度有所下降。高被引文献的研究表明, 除了文献本身的质量外, 另一个重要因素是国家政策支持和资金的可用性。全球共有 80 个国家包括 1 546 个机构开展研究, 共发表在 580 种期刊上。中国、伊朗、印度和澳大利亚进行了大量的研究, 集成了冶金工程、环境科学生态学、采矿工程和生物技术与应用微生物学等多学科。聚类分析确定了 4 个经常出现的关键词: 黄铜矿、废旧电路板、重金属和浸出, 这为研究人员提供了新的检索词。【结论】目前对微生物浸出的研究主要集中在单个菌株, 而混合菌株与矿物的吸附和耐受机理是未来发展所向。

关键词: 文献计量学; 微生物浸出; 发文趋势; 聚类分析; 热点主题

资助项目: 国家自然科学基金(32160025); 甘肃省自然科学基金(20JR10RA224); 甘肃省高等学校创新基金(2020A-041)
This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (32160025), the Natural Science Foundation of Gansu Province (20JR10RA224), and the Higher Education Institutions Innovation Fund of Gansu Province (2020A-041).

*Corresponding author. E-mail: tangdp@mail.lzjtu.cn

Received: 2024-09-19; Accepted: 2024-12-04; Published online: 2025-01-13

Bibliometric analysis of hot topics and frontiers in bioleaching

XI Yanpeng¹, LI Mengjiao¹, LIU Yali¹, LIN Yanyan¹, MAO Aihong², TANG Deping^{*1}

¹ School of Biological and Pharmaceutical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China

² Medical Molecular Biology Research Center, Gansu Provincial Academic Institute for Medical Research, Lanzhou 730050, Gansu, China

Abstract: [Background] Bioleaching is an effective leaching method for treating tailings, waste ore, low-grade ore, refractory ore. Compared with traditional leaching technologies, bioleaching has the advantages of environmental friendliness, high returns, and high efficiency. [Objective] To gain insights into the research trends and the academic influences of bioleaching on a global scale, and to assist researchers in identifying research directions, conducting relevant studies, and understanding the most pertinent topics in this field. [Methods] The articles about bioleaching were retrieved from the Web of Science Core Collection within the period spanning 2011 to 2023 and systematically analyzed. [Results] A decline presented in the number of annual publications in the field of bioleaching in recent years. The analysis of highly cited articles indicated that in addition to the intrinsic quality of the literature, a substantial contributing factor in attaining this status was the accessibility of national policy support and funding resources. A total of 80 countries conducted research in this field, involving 1 546 institutions, with the articles being published in 580 journals. A substantial corpus of research has been undertaken in China, Iran, India, and Australia, involving multiple disciplines such as metallurgical engineering, environmental science and ecology, mining engineering and biotechnology, and applied microbiology. A cluster analysis identified four keywords that appeared frequently, which were chalcopyrite, printed circuit boards, heavy metals, and leaching. The presence of these keywords offers new avenues for researchers to pursue in their search for knowledge in this field. [Conclusion] The current research on bioleaching mainly focuses on single strains, and the adsorption of mixed strains on minerals and the tolerance mechanisms of mixed strains to metal ions are the future research directions.

Keywords: bibliometrics; bioleaching; publication trends; cluster analysis; hot topics

微生物浸出旨在利用嗜酸微生物从矿石和废物中提取金属(Co、Cu、Ni 和 Zn 等)^[1]。相较于传统的浸出技术,微生物浸出具有成本低,收益好,冶金效率高等特点。微生物浸出常用于低品位硫化矿物的溶解和重金属的回收利用^[2]。目前该领域研究较为成熟的菌株有硫氧化酸硫杆菌(*Acidithiobacillus thiooxidans*)、亚铁氧化酸硫杆菌(*Acidithiobacillus ferrooxidans*)和氧化铁钩端螺菌(*Leptospirillum ferrooxidans*)。

A. thiooxidans 由 Waksman 等^[3]于 1922 年分离。利用 *A. thiooxidans* 能提高 Cu/Zn 的提取率^[4]。1947 年, Colmer 和 Hinkle 首次从煤矿排水中分离出 *A. ferrooxidans*^[5]。利用硫杆菌可以将云母中锂的浸出率从 16% 提高到 45%^[6]。将 *A. ferrooxidans* 菌株用于 Maiduk 铜矿堆能改善微生物的浸出过程^[7]。*A. ferrooxidans* 在含铜和锌的金属溶解过程中浸出率分别达 54.5% 和 49.5%^[8]。洪娴静等^[9]利用铁氧化微生物 *L. ferrooxidans* 促进了

菌体中铁元素循环,增加了附着细胞数目从而有效地改善浸出微环境并提高效率。将硫酸浸出、微生物浸出和生物氧化相结合发现,三步工艺中铜、锌和金的总回收率分别提高至 79%、96%、96%^[10]。Gao 等^[11]报道了微生物典型的群体感应系统 AfeI/R 可以调控胞外聚合物 (extracellular polymeric substance, EPS) 的合成。EPS 和生物膜的形成^[12]可以影响微生物与底物的相互作用和浸出效率。于苗苗^[13]利用荧光原位杂交技术研究了浸出微生物的数量、种类和空间定位。由于该技术的高特异性和高灵敏性,将会联合其他技术广泛应用到微生物浸出领域^[14]。国内外学者通过优化微生物浸出条件和开发高效浸出的微生物来提高浸出效率。如此洞见,利用微生物从低品位矿石中浸出有价金属和提高金属回收率,在矿冶工程领域具有良好的发展前景。

本文通过分析国家间的发文量、文献被引频次、期刊分布、国家合作、作者合作和机构合作等快速捕捉微生物浸出的热点主题和前沿演进,有助于明晰科学研究思路。

1 检索方式和数据来源

选择 Web of Science (<http://web of knowledge.com/>) 中的核心合集数据库作为数据源^[15],以下简称为 WOS 核心。利用关键词结合主题对相关文献进行检索,检索式确定如下:主题为 bioleaching, acidophilic microorganisms, 为进一步贴合主题,精进检索结果页面,添加一下关键词 biohydrometallurgy, biomining, heap bioleaching, *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Acidithiobacillus thiooxidans*, *Leptospirillum ferrooxidans*。时间选 20110101–20231231, 数据库为 WOS 核心合集; WOS 索引来源于 Science Citation Index Expanded (SCI-EXPANDED)。删除了不匹配的会议、报纸、综述、书籍和重复的研究文献,进一步精简了检索结果,从 WOS 核心合集数据库中选出 2 170 篇文献进行分析。

2 软件及在线分析平台

使用 Microsoft Excel 2021 软件分析文章发布数量的趋势,得到过去 13 年文章发布数量的发展。使用 Origin Pro 2021 对国家的每年发表文献数量作图,详细地表明微生物浸出领域逐年发展趋势;利用文献计量学在线分析平台 (<https://bibliometric.com/>) 分析国家间年发文数量,以揭示微生物浸出领域的研究量;利用 CiteSpace R. v.6.3 (basic) 软件分析检索到的文献的作者和关键词共现网络,以揭示该领域的研究热点和趋势。数据分析基于 R 语言 (v4.1.2) 环境,结合开源的文献计量分析工具包 bibliometrix 进行综合处理^[16]。

3 结果与分析

3.1 发文趋势

学术研究论文数量是衡量该领域研究规模和发展的重要指标^[17]。图 1 显示了 WOS 核心合集中每年的发文量。通过论文数量可以分析微生物浸出领域的发文趋势。从图 1 可以看出,除了个别年份前后略有波动外,发文数量呈上升-下降趋势。就整个年发文趋势来看,

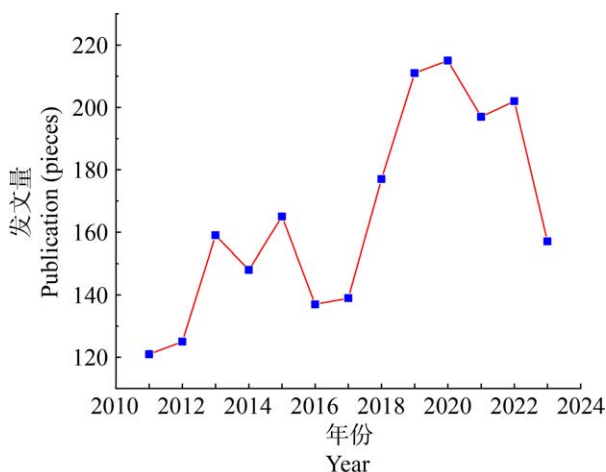


图 1 2011–2023 年微生物浸出领域在 WOS 核心合集中年发文量

Figure 1 Annual publication volume of bioleaching in the WOS core collection from 2011 to 2023.

2016–2017 年该领域的研究进入瓶颈期, 在此之后, 文献研究数量不断上升。两大上升期分别是 2011–2013 年和 2016–2020 年, 达到最高为 215 篇, 其次是 2019 年发文 211 篇, 上升幅度分别为 24%、36%; 2015–2016 年和 2022–2023 年是该领域研究的两大下降期, 分别下降了 17% 和 22%。揭示微生物浸出领域的研究热度有所下降。

3.2 国家的文献数量分布

全球范围内对微生物浸出的文献进行研究, 有利于拓展国际视野和深入对比各国文献数量分布。图 2 是全球范围内微生物浸出领域发文数量由高到低排名前 10 的国家。其中发文数量最多的国家是中国。伊朗微生物浸出相关论文发表 203 篇, 排名仅次于中国。这与该国的矿产资源丰厚和国家政策扶持密不可分。而智利是铜储量最高、铜矿开采活动最多的国家^[18],

相应地, 发文数量 96 篇, 位于国家排名第七。将中国和伊朗两国的年发文进行对比发现, 中国的年发文上升区间与全球国家的发文上升期相对应。

3.3 文献被引频次分析

被引频次是引文分析用于科技评价中最具代表性的科学计量指标^[19]。表 1 列出了 WOS 核心中高被引排名前 10 的文献信息。被引次数最高的是 Horeh 等^[20]在 2013 年发表在 *Journal of Power Sources* 上的文章, 总被引次数 272 次, 年平均被引 38.86 次。其中高被引文献前 10 中有 6 篇产出于上升期(2016–2020 年)。有 8 篇文献发表在 1 区的期刊。2016 年中国政府投资了一项长达 14 年的重大项目, 用于改进微生物浸出的技术和设备, 重点研究铜、金、铀矿的地质勘探和原位浸出^[30], 同年高被引文献中国学者贡献 2 篇^[21–29]。由此说明, 该领域的文献研究不

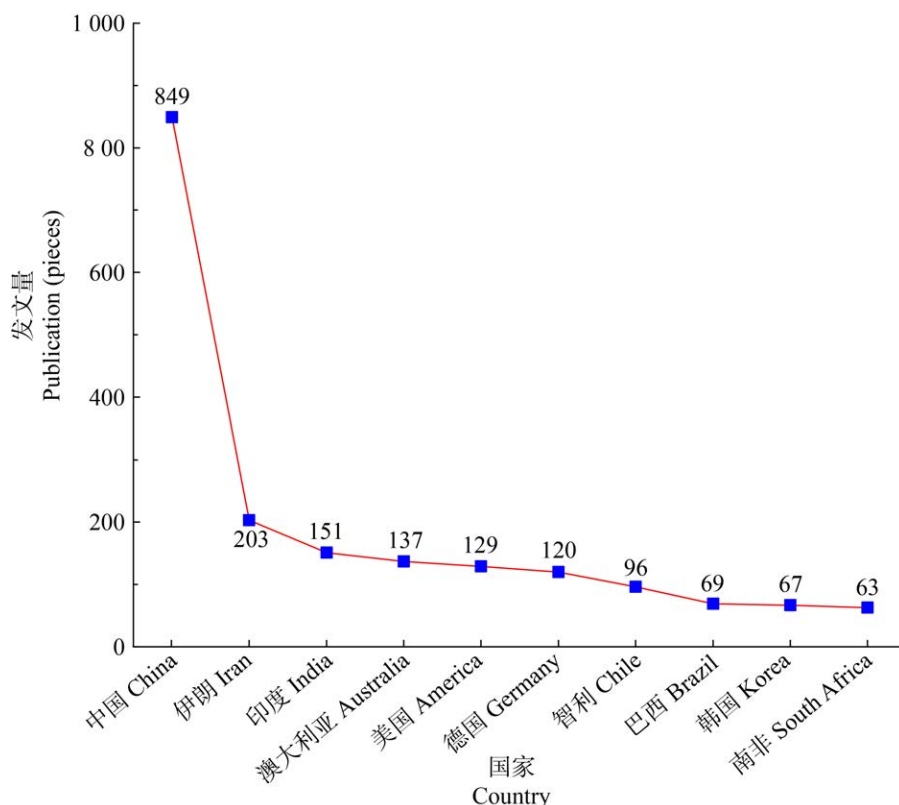


图 2 2011–2023 年发文前 10 的国家

Figure 2 Top 10 countries for publication from 2011 to 2023.

表 1 WOS 核心合集中的高被引文献

Table 1 Highly cited literature in the WOS core collection

序号 No.	作者 Author	篇名 Title	期刊来源(分区) Source journal (Division)	被引次数 Number of citation	年均 被引 Average annual citation	年份 Year	参考文献 Reference
1	HOREH NB, MOUSAVI SM, SHOJAOSADATI SA	Bioleaching of valuable metals from spent lithium-ion mobile phone batteries using <i>Aspergillus niger</i>	<i>Journal of Power Sources</i> (Q1)	272	38.86	2016	[20]
2	XIN YY, GUO XM, CHEN S, WANG J, WU F, XIN BP	Bioleaching of valuable metals Li, Co, Ni and Mn from spent electric vehicle Li-ion batteries for the purpose of recovery	<i>Journal of Cleaner Production</i> (Q1)	223	31.86	2016	[21]
3	FALAGÁN C, GAIL BM, JOHNSON DB	New approaches for extracting and recovering metals from mine tailings	<i>Minerals Engineering</i> (Q2)	203	33.83	2017	[22]
4	QU Y, LIAN B	Bioleaching of rare earth and radioactive elements from red mud using <i>Penicillium tricolor</i> RM-10	<i>Bioresource Technology</i> (Q1)	194	19.40	2013	[23]
5	SCHIPPERS A, HEDRICH S, VASTERS J, DROBE M, SAND W, WILLSCHEER S	Biomining: metal recovery from ores with microorganisms	<i>Geobioscience</i> 171 <i>I: metal-related issues</i> (Q3)	171	19.00	2014	[24]
6	ZHU NW, XIANG Y, ZHANG T, WU PX, DANG Z, LI P, WU JH	Bioleaching of metal concentrates of waste printed circuit boards by mixed culture of acidophilic bacteria	<i>Journal of Hazardous Materials</i> (Q1)	170	14.17	2011	[25]
7	BAHALOO-HOREH N, MOUSAVI SM	Enhanced recovery of valuable metals from spent lithium-ion batteries through optimization of organic acids produced by <i>Aspergillus niger</i>	<i>Waste Management</i> (Q1)	164	27.33	2017	[26]
8	ISILDAR A, van de VOSENBERG J, RENE ER, van HULLEBUSCH ED, LENS NNL	Two-step bioleaching of copper and gold from discarded printed circuit boards (PCB)	<i>Waste Management</i> (Q1)	155	22.14	2016	[27]
9	ZENG GS, DENG XR, LUO SL, LUO XB, ZOU JP	A copper-catalyzed bioleaching process for enhancement of cobalt dissolution from spent lithium-ion batteries	<i>Journal of Hazardous materials</i> (Q1)	143	13.00	2012	[28]
10	YANG ZH, ZHANG Z, CHAI LY, WANG Y, LIU Y, XIAO RY	Bioleaching remediation of heavy metal-contaminated soils using <i>Burkholderia</i> sp. Z-90	<i>Journal of Hazardous Materials</i> (Q1)	137	19.57	2016	[29]

仅是与时代背景相吻合,也与文献内容的质量相匹配。

3.4 期刊分布和学科类别

3.4.1 期刊分布

学术期刊是科研成果展示的重要平台。复合影响因子即期刊前 2 年内的可被引论文在统计年份的被引用次数与 2 年内发表论文总数的比值,其数值越高,说明该期刊的影响力越大^[31]。 H 指数即某期刊发表全部论文中有 H 篇文章的被引用次数不低于 H 次^[31]。 H 指数还与期刊传播因子呈正相关^[32]。期刊分区可以有效量化评价不同期刊的优劣^[33]。表 2 中列出了 WOS 核心合集中收录数排名前 10 的期刊。其中,微生物浸出领域影响因子最高的期刊为 *Journal of Hazardous Materials* (12.2),载文量排第一的期刊为 *Hydrometallurgy*, 占总论文数量的 10.37%。 H 指数最高的期刊是 *Bioresource Technology*, 发文量排名第 4, 该期刊因高传播因子和影响力被同行所认可。在投稿和期刊选择时可优先考虑上述期刊。相关成果收录在 580 种期刊上。

3.4.2 学科类别分析

WOS 核心期刊文献主要分布在 84 个学科

门类中,覆盖面最广、分布最多的 4 个门类是冶金工程(48%)、环境科学生态学(24%)、采矿工程(14%)和生物技术与应用微生物学(13%)。这说明国内外文献发表侧重冶金工程、采矿工程的应用研究,这与浸出技术多用于金属冶炼和提取加工密切相关,也从侧面揭示了微生物浸出是一个多学科交叉的领域。通过对文献期刊和学科分类的整体分析,有助于学者选择该领域的重点期刊进行投稿和阅读。学科领域间的知识交流是跨学科研究形成的前提和基础,所以,探索学科领域之间的知识交流发展情况对揭示跨学科研究的发展进程与促进跨学科研究的进一步发展具有重大意义^[34]。

3.5 文献发表机构分布

机构间合作进行比较,以分析与世界著名研究机构之间合作的广度。对各机构发文量排名前 10 位的核心科学家进行作者合作分析,以确定核心科学家的合作模式^[35]。表 3 列出了 WOS 核心合集数据库中论文数量最多的 10 家研究机构。中国有 4 个机构进入排名,以中南大学为首,文章贡献量占比 13.5%,并列出了发文最多的作者邱冠周、刘学端、尹华群、夏金兰等。足见中国学者在该领域的研究活跃度

表 2 WOS 核心合集中收录数排名前 10 的期刊

Table 2 Top 10 journals with the highest number of entries in the WOS core collection

序号 No.	来源期刊 Source journal	收录 Records	占比 Proportion (%)	复合影响因子 Composite influencing factor	中国科学院分区 Division of Chinese Academy of Sciences	H 指数 H index
1	<i>Hydrometallurgy</i>	225	10.37	4.8	Q2	95
2	<i>Minerals Engineering</i>	165	7.60	4.9	Q2	88
3	<i>Minerals</i>	81	3.73	2.2	Q4	21
4	<i>Bioresource Technology</i>	69	3.18	9.7	Q1	251
5	<i>Transactions of Nonferrous Metals Society of China</i>	62	2.86	4.7	Q1	54
6	<i>Frontiers in Microbiology</i>	49	2.26	4.0	Q2	88
7	<i>Journal of Environmental Management</i>	48	2.21	8.0	Q2	146
8	<i>Chemosphere</i>	42	1.94	8.1	Q2	212
9	<i>Journal of Cleaner Production</i>	42	1.94	9.7	Q1	150
10	<i>Journal of Hazardous Materials</i>	41	1.89	12.2	Q1	235

和影响力,这与图 1 中国位于全球第一文献发表国相一致,体现了中国(工业大国)庞大的发文章量和强大的研究影响力。当然这与中国在铜、金、稀土等多种金属的生产量和消费量均位居全球首位密切相关^[36]。伊朗的 2 个机构塔比阿特莫达勒斯大学和德黑兰大学总文章贡献量占比 5.44%,其作者 Mousavi, Mohammad 论文的贡献度最大, Abdollahi, Hadi 贡献 25 篇,次于前者及做出同等贡献的其他作者。

3.6 国家合作分析

3.6.1 国家合作关系

WOS 核心合集数据库的国家合作网络不

仅体现了各国在微生物浸出领域的密切合作,而且通过不同国家和机构之间的合作促进了科学研究的发展。检索结果显示,全球共有 80 个国家发表了微生物浸出领域的相关文献,涉及 1 546 家机构。在 WOS 数据库下选择引文 SCIE 导出文本格式的全部文献,运行 R-Studio 下的 Bibliometrix R-package,生成如图 3 的合作关系图,已标明按照研究体量排列的 71 个国家(未建立合作关系国家并未呈现),线条数量代表国家间的合作关系紧密程度。发现世界各国之间存在着密切的合作和学术交流。在微生物浸出领域,中国因研究量最多而突出,并与其他

表 3 WOS 核心合集中文献数的主要机构分布

Table 3 The main distribution of Chinese literature in the WOS core collection

序号 No.	隶属机构 Affiliated institution	国家 Country	收录 Record	占比 Proportion (%)	主要作者(发文数) Main author (number of reference)
1	中南大学 Central South University	中国 China	293	13.50	QIU Guanzhou (122), LIU Xueduan (55), YIN Huaqun (45)
2	中国科学院 Chinese Academy of Sciences	中国 China	125	5.76	XIA Jinlan (25)
3	教育部 Ministry of Education	中国 China	110	5.07	ZENG WEIMING (23), ZHAO HONGBO (22), LIANG YILI; WANG JUN (20), SHEN LI (17)
4	英联邦科学工业研究组织 Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CRISO)	澳大利亚 Australia	80	3.69	KAKSONEN, ANNA HENRIKKA; CHEN MIAO (26), ZENG WEIMING (20), ZHANG WENXIAO (13)
5	塔比阿特莫达勒斯大学 Tabiatmodalus University	伊朗 Iran	75	3.46	MOUSAVI, MOHAMMAD (65), POURHOSSEIN, FATEMEH (12), SHOJAOSADATI, SEYED ABBAS (11)
6	北京科技大学 University of Science and Technology Beijing	中国 China	50	2.30	YIN SHENGHUA (15), DONG YINGBO; LIN HAI (14), WU AIXIANG (12)
7	开普敦大学 University of Cape Town	南非 South Africa	46	2.12	HARRISON, SUE THERESE (33), PETERSEN, JOCHEN (12), BRYAN, CHRISTOPHER (10)
8	智利大学 University of Chile	智利 Chile	43	1.98	MAASS, ALEJANDRO E; ORELLANA, OMAR (10)
9	德黑兰大学 Tehran University	伊朗 Iran	43	1.98	ABDOLLAHI, HADI (25), NOAPARAST, MOHAMMAD (13)
10	印度科学工业研究委员会 Indian Council for Scientific and Industrial Research	印度 India	42	1.94	PRADHAN, NILOTPALA (14), SUKLA, LALA BEHARI BEHARI (13), PANDA, SANDEEP (12), MISHRA, BARADA KANTA (10)

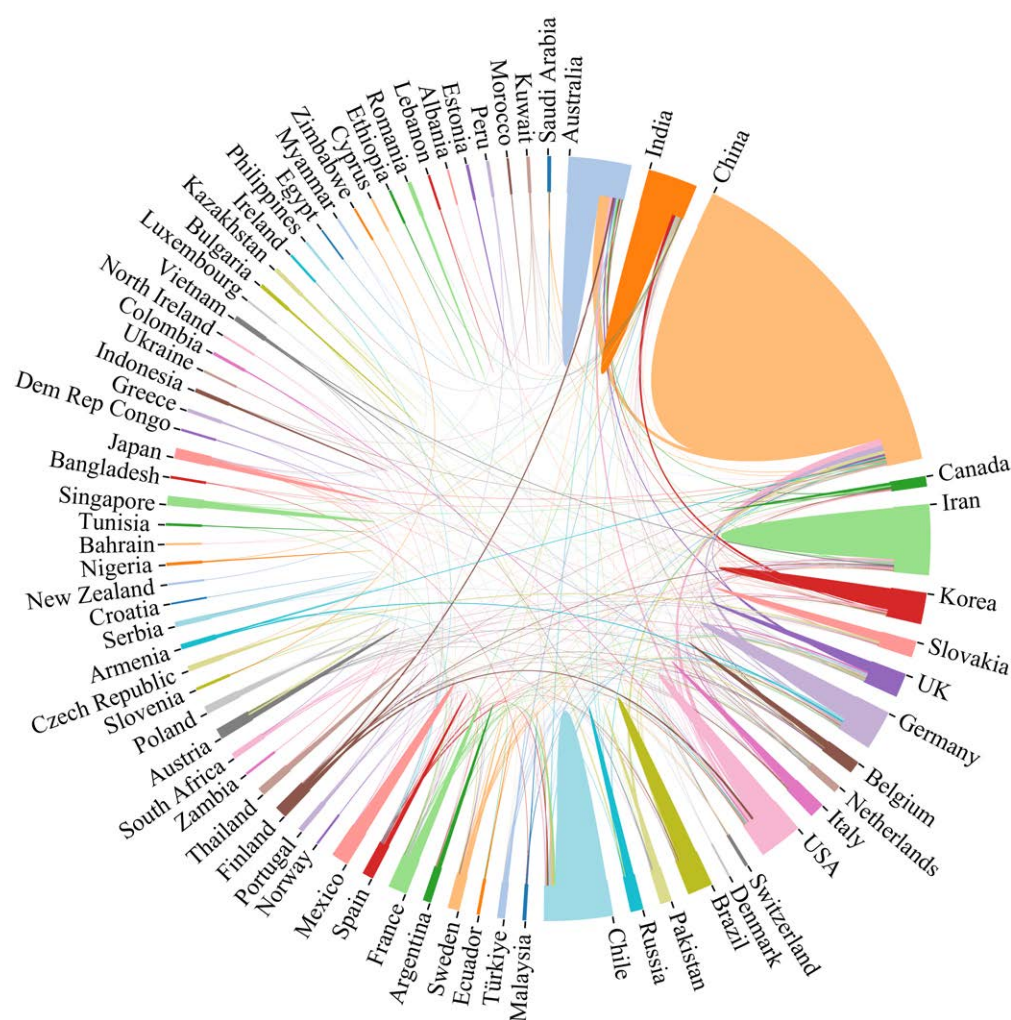


图3 微生物浸出方面的国家(地区)合作关系图谱

Figure 3 A map of national and regional cooperative relations in microbial leaching.

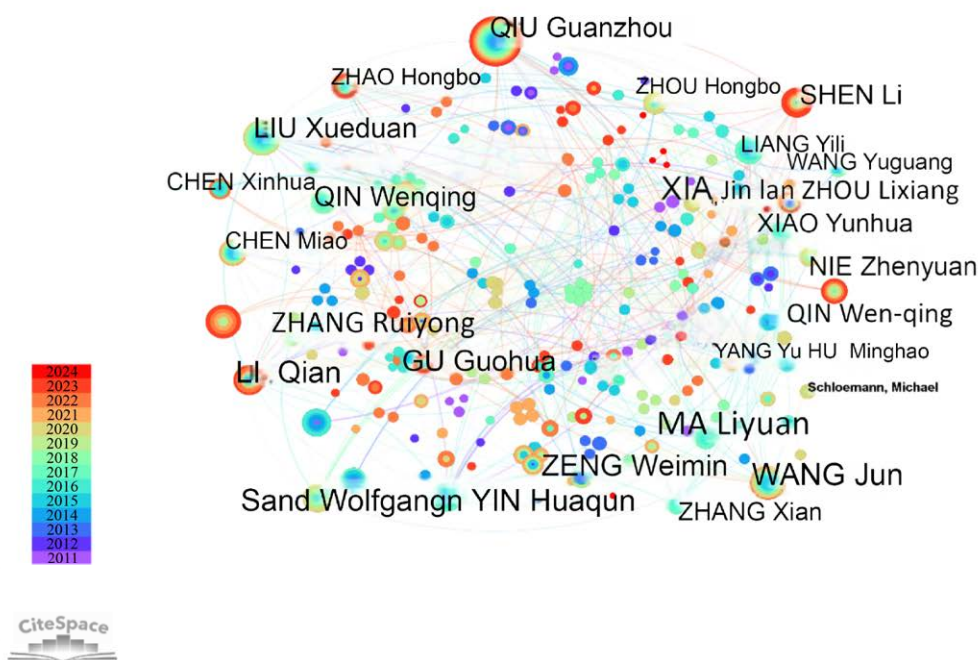
国家有着广泛的沟通与合作关系,体现了跨区域合作的特点。中国、英国、澳大利亚、伊朗、德国、智利、德国、美国等国研究量大,合作密切,学术交流频繁。结合图2和表3国家与机构的发文量及合作关系表明,中国的中南大学在该行业的影响力最突出。多学科的交叉和跨区域的合作,将助力微生物浸出过程的全面理解和综合应用。

3.6.2 作者、机构合作关系

根据图4中参数信息可知,图4A中共有189个节点,318条连线,网络密度为0.0179。每个圆圈代表一个作者,圆圈大小按照作者论

文研究体量划分,线条数量代表合作关系。共有5357位作者参与微生物浸出方面的研究。邱冠周、刘学端、尹华群、李倩、王军、顾帼华、Sand Wolfgang、赵洪波、梁伊丽、申丽、马丽媛等是发表论文数量多的作者。中南大学邱冠周教授是该领域内发表文章最多的学者,该团队的研究涵盖了浸出微生物鉴定和优化浸出工艺条件来提高浸出效率,通过开展高通量测序对微生物多样性进行研究,探索微生物群落结构,揭示微生物菌群提高浸出效率的机理。图4B中共有141个节点,230条连线,网络密度为0.0233。中南大学、中国科学院、塔比阿

A



B

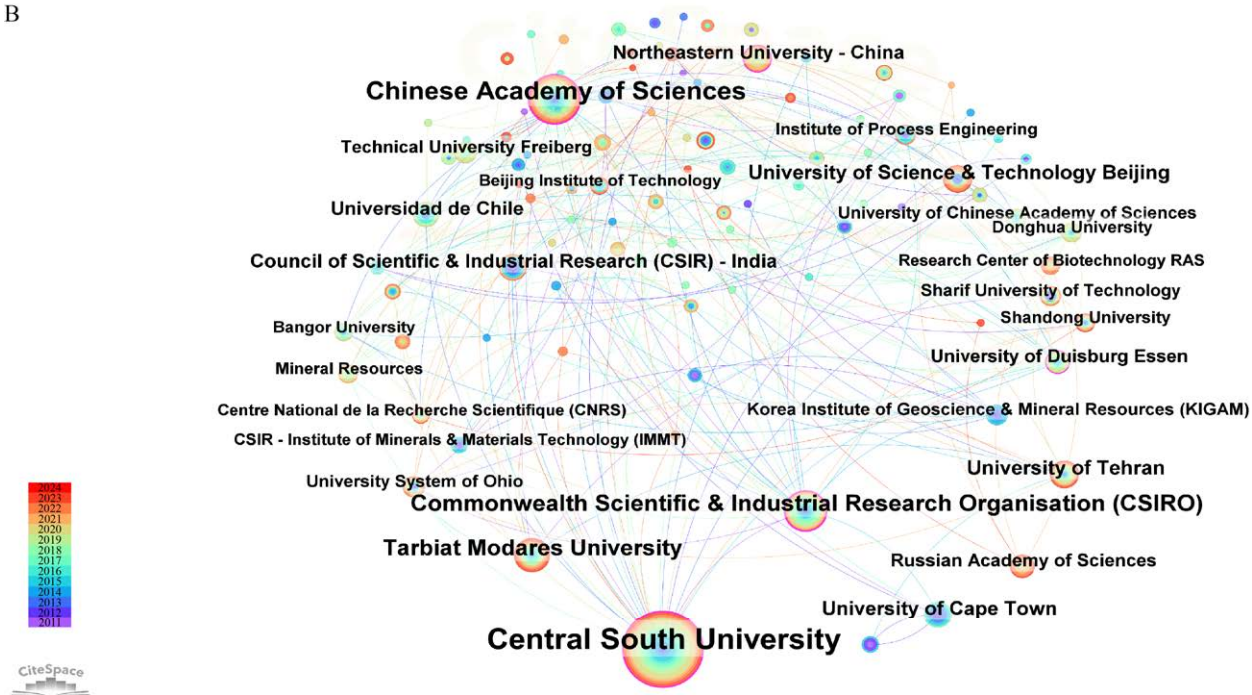


图 4 作者聚类图(A)和机构聚类图(B)

Figure 4 Author cluster diagram (A) and institution cluster diagram (B).

特莫达勒斯大学、德黑兰大学、智利大学、开普敦大学、杜伊斯堡-埃森大学、北京科技大学、Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CRISO)、俄罗斯科学院为代表的

研究机构，形成了最为密切的合作网络。虽然中国的研究机构主要以国内合作伙伴为主，但也与澳大利亚、美国、印度、伊朗、英国等国密切合作，形成了以中南大学为代表，与东华

大学、东北大学、山东大学生物技术研究中心、班戈大学等数十家机构形成密切的合作网络。图 4A 和 4B 的合作网络与高被引作者、机构基本相一致,并且研究量最多的国家基本包含高被引的作者和机构。

3.7 微生物浸出的热点主题

WOS 核心合集数据库中的文献关键词包括作者关键词和扩展关键词。作者关键词提供了研究人员比较感兴趣的信息。在总体上了解微生物浸出领域高频被引文献和高学科分布的基础上,运行 CiteSpace R. v.6.3 (basic)软件生成微生物浸出领域高频关键词的聚类图(图 5A)和时间线图(图 5B)。根据图 5 中参数信息可知,图谱中共有 165 个节点,1 553 条连线形成四大聚类。网络密度为 0.114 8, Q 值即模块值 0.398 1 大于临界点 0.3, S 值即平均轮廓值 0.721 4 大于临界点 0.5,分别表示网络结构显著和聚类结构合理^[40]。而关键词中介中心性反映出研究主题在这一段时间的前沿热点和整个关键词在共现网络中的核心力度,也是衡量节点在网络中重要性的一个指标,中介中心性超过 0.1 的节点称为关键节点^[37]。图 5B 显示每个聚类里关键词的展开情况。其中每一个节点环绕的圆圈大小与关键词出现的频数相对应,每个时间段表示该关键词首次出现的年份。起始于 2011 年按中心性排名第一的项目是聚类#1 中的“回收”,中心度为 0.12,出现 317 次。说明“回收”这一关键词处于重要的地位,并与其他关键词之间有最直接和密切的关系存在。其他关键词依次是聚类#0 中的“细菌”,中心度为 0.11,出现了 255 次;聚类#0 中的“*Acidithiobacillus ferrooxidans*”,中心度为 0.10,该关键词出现次数为 348 次。*A. ferrooxidans* 的早期阶段吸附行为揭示底物对其的重要影响^[38]。陈福星等^[39]研究了在工业上使用 *A. ferrooxidans* 和 *A. thiooxidans* 为主要的浸出菌种,并且已经浸出铜、铀、锰等金属。酸硫杆菌属(*Acidithiobacillus*)被认为是浸出过程中最重要的微生物^[40]。因此,相关研究较多,

为学者深度理解微生物浸出机理和极端微生物适应环境奠定理论基础。正如 Brierley 等^[41]所述,富含金属的残留物包括来自废物或煤炭燃烧的粉煤灰、炉渣、污泥、废催化剂和电子废料,如废旧电路板(printed circuit board, PCB)和废电池等通过微生物浸出技术处理。溴化阻燃剂、多溴联苯、四溴双酚 A 和多溴二苯醚是电子废弃物中的有害和有毒污染物^[42]。多数情况下,废多氯联苯中的金属品位低于矿石,尤其是针对金、铜等常见金属。仅在特定混合型固废(如含重金属的电子废弃物)中,可能局部出现金属富集,导致废多氯联苯中的金属品位高于矿石^[43],因此从废品中回收这些金属具有直接的环境效益,同时也能提供重要的经济激励^[44]。鉴于人们对从 PCB 等这类金属废物的浸出中回收铜的兴趣稳步增加^[45],相关的解决方案也相当复杂。目前,电子废物的处理主要选择再利用、制造、回收、焚烧和填埋^[43]。虽然关于通过生物冶金工艺从电子废物中回收金属的研究很少,但还有其他领域涉及类似的过程,例如矿物加工中从金矿石中回收金属,以及废水^[46]和污泥中重金属的生物吸附。微生物对重金属的吸附主要有胞外、细胞表面吸附及胞内累积^[47]。Zhang 等^[48]指出 *A. ferrooxidans* 具有抵抗和代谢有毒物质(如重金属和有机溶剂)的遗传潜力。这为极端微生物的种间代谢差异和环境适应提供更深入的理解。

3.7.1 多重对应分析

为了确定主题之间的关系,通过多重对应分析(multiple correspondence analysis, MCA)进行验证^[49]。该分析使用降维技术绘制了微生物浸出领域中不同颜色聚类的概念结构图,以显示具有相似共同概念与已发布主题之间的关联。图 6 是 50 个关键词的概念结构图, MCA 包含了微生物浸出领域被引用次数最多的 10 篇文章和关键词聚类。红色聚类占据一、四象限,与主题相似的关键词聚类最多,开展的相关研究也较多。绿色聚类占据二、三象限,以煤矿、粉煤灰、黑曲霉、优化、提取、有价金属为相

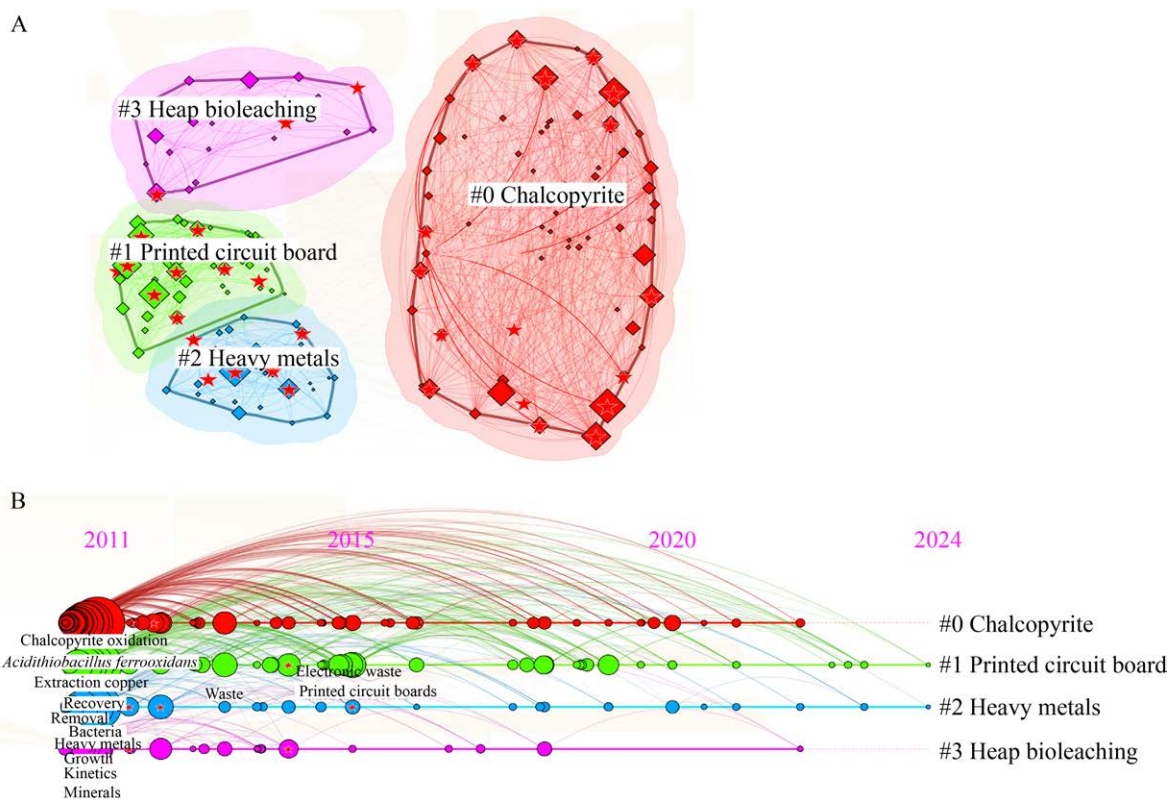


图 5 关键词分析 A: 关键词聚类图; B: 关键词时间线图。

Figure 5 Keyword analysis. A: Keyword clustering diagram; B: Keyword timeline chart.

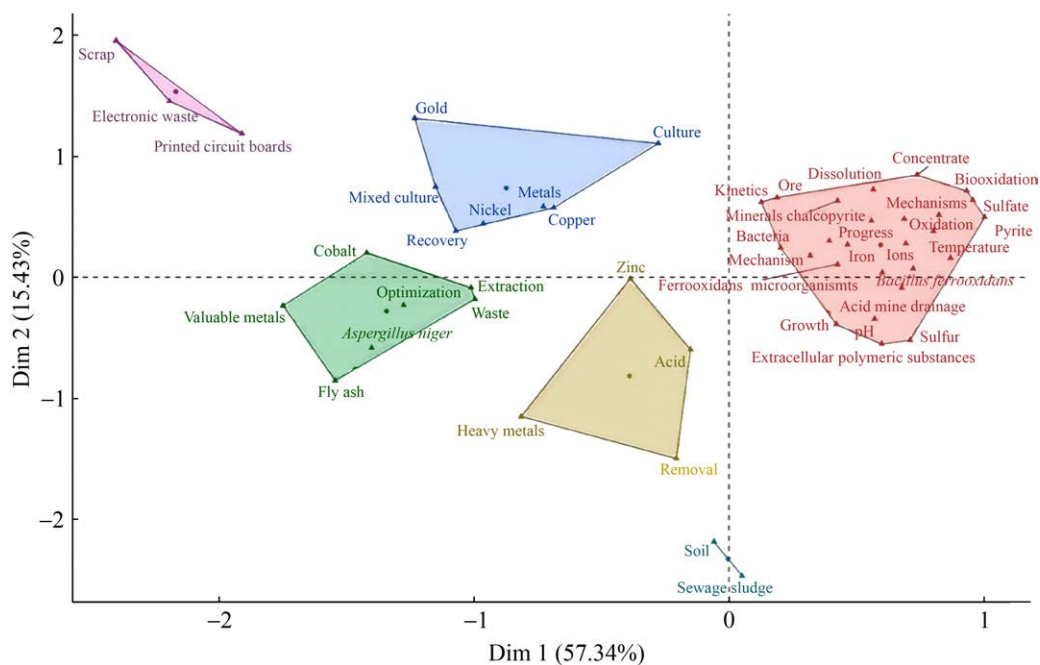


图 6 关键词的概念结构图

Figure 6 Conceptual structure diagram of keywords.

关概念词。蓝色聚类与绿色聚类距离相近,以纯培养、混合培养、回收金属、金、镍、铜等词与主题相近。总的来说,绿色聚类拓展了浸出金属的场景,蓝色聚类研究微生物浸出的基础理论知识。粉色聚类位于第二象限,并与其他聚类相距较远,以废料、电子废弃物、印刷电路板为最相关的词,词数较少。尽管拓宽了微生物浸出的维度,但开展的文献研究有限。此外, MCA 的聚类结果与图 5A 的聚类结果和图 5B 的关键词时间线图相对应。综上,微生物浸出技术从最初应用于矿石中金属离子的二次回收利用,逐渐扩展到从其他固体废弃物中金属的提取与回收,如污泥、废旧电路板、粉煤灰、煤矿等,以实现金属资源的高效回收。

3.7.2 关键词突现分析前沿演进

图 7 可以看到 *Thiobacillus ferrooxidans*、

sulfur、ferrous iron 是早期受到学者关注的词。对单一菌株的研究较多,时间跨度较长。在浸出微生物的分离鉴定、系统发育关系上做了大量工作。Hofmann 等^[50]从印度尼西亚热水池中分离到一种新的嗜热古细菌,可以在适宜 pH 累积酪氨酸。Khaleque 等^[51]就菌株的耐受、耐盐特性作了研究,表明嗜酸微生物的耐酸需要一定的盐离子浓度,其有助于微生物浸出。Yu 等^[52]揭示细胞上 EPS 的存在是黄铁矿-细菌黏附的重要因素。Yi 等^[53]发现 *Acidithiobacillus* 在处理铁尾矿时形成“cell-EPS-mineral”复合结构单元,从而促进细菌定殖和矿物转化。Díaz 等^[54]首次揭示酰基高丝氨酸内酯(acyl-homoserine-lactone, AHL)正向调控 *pel* 基因,并参与 *A. thiooxidans* 胞外多糖生物合成的分子网络。Yue 等^[55]提供了一种用于测定铁浓度方法的替代方案。 Fe^{3+} 与

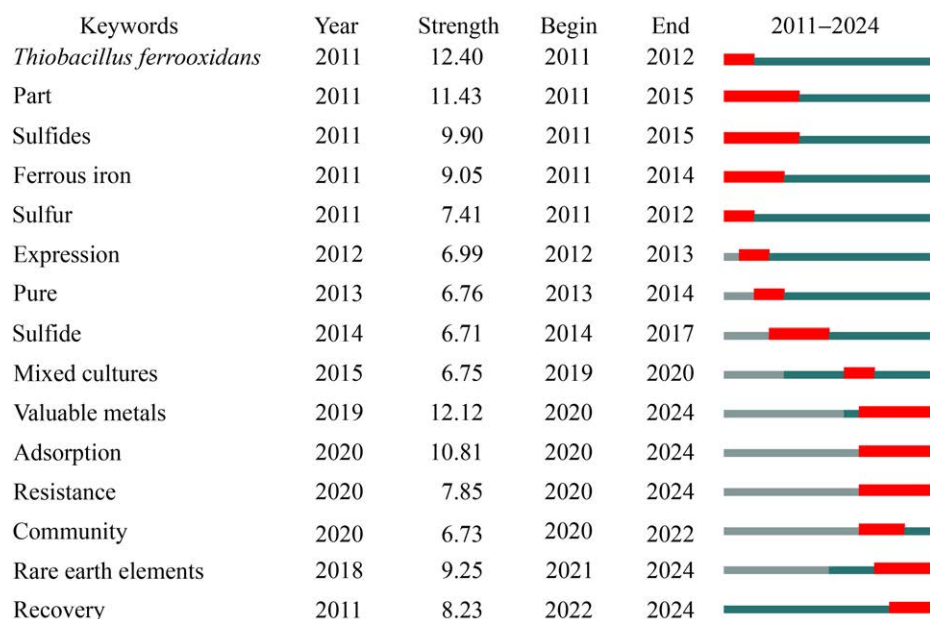


图 7 WOS 核心关键词突现分析 Year 表示该关键词第 1 次出现的年份, Begin 和 End 表示该关键词作为前沿的起始和终止年份, Strength 表示的是突现强度。红色线条代表该关键词成为学术研究热点的具体历时阶段, 浅灰色代表节点还未出现, 深绿色表示节点开始出现。

Figure 7 Analysis of core keyword emergence in CNKI and WOS. Year indicates the year when the keyword first appeared, Begin and End represent the starting and ending years when the keyword was at the forefront, and Strength indicates the emergent strength. The red lines represent the specific historical stage when the keyword became a hot topic in academic research. The light gray indicates that the node has not yet emerged, and the dark green indicates that the node has begun to emerge.

Fe^{2+} 可以通过氧化还原电位(oxidation-reduction potential, ORP)测得,再用表达式了解这些溶液中的铁化学成分,特别是以亚铁为主的溶液中。Singer 等^[56]指出钩端螺菌属(*Leptospirillum*) Group II 随着生物膜的成熟,ORP 也会发生变化,2 种单血红素 C 型细胞色素序列变体的表达也取决于生物膜的发育。Pure、mixed cultures、expression 等词出现在 2012–2019 年。以微生物的纯培养和混合培养拓展了微生物浸出的机理。Quatrini 等^[57]指出与单一培养物相比,混合菌株的生物膜形成了互惠、协同、对抗和强竞争关系,因而具有稳定性和高活力。黏附和生物膜的形成在金属硫化矿物的溶解中起着重要作用,可以引发溶解并增强微生物浸出^[58–59]。Wang 等^[60]对 3 种浸出微生物进行分离和群落组装,从种群调控方面对 *L. ferriphilum* 和 *A. ferrooxidans* 分别改变渗滤液的 ORP 和 pH 值来促进铜的浸出,提供了一种提高微生物浸出效率的新途径。Okibe 等^[61]对浸出金属的微生物进行首次定量研究,使用固体培养来观察微生物种群的变化,发现混合培养对矿石的氧化速率高于纯培养。研究发现,混合培养微生物可以改善微生物的性能,从而达到高效浸出金属的目的^[62]。Giachino 等^[63]指出化能自养生物 *Acidithiobacillus* 是生物浸出最常见的底盘生物,将在合成生物学中开辟新的可能。2019 年后,持续突现的词是 valuable metals、adsorption、resistance、rare earth elements 和 recovery。可见随着对微生物工业技术的突破,浸出所带来的环境问题日益加剧。相关研究也表明,在浸出过程中,由于氧化剂的大量使用给环境造成了影响,如何改善环境又能提高浸出效率的研究成为浸出领域主要攻克的难题^[64]。2022 年,张启军等^[65]开发出以硫酸镁作为浸出剂的绿色新工艺并验证其可行性。“回收”一词至今保持较高热度,不管是微生物浸出还是废旧电路板中回收有价金属,说明回收利用是一项长期坚守的工作。同年“群落”一词不再突现,这有可能揭示未来

开展的研究热点将集中在混合菌株的微生物浸出与矿物的吸附和耐受微生物的研究,特别是有价金属的回收作为稀缺资源的重要补充方式。

4 讨论

本文综述了 WOS 核心合集数据库中微生物浸出领域近 13 年的发展动态,分析了该领域关键词、高被引文献、高收录数期刊、国家、机构和作者间的合作关系。主要结果如下。

(1) WOS 核心合集数据库检索到 2 170 篇文献,年发文数量呈波动上升-下降趋势。共有 580 种期刊收录相关文献,载文量最多的期刊是 *Hydrometallurgy*, 影响因子最高的期刊是 *Journal of Hazardous Materials*。

(2) 中国在该领域全球发文数量最多。全球共有 80 个国家发表相关文献,涉及 1 546 家机构,合作关系紧密相连。可利用资源短缺,这是一个全球性问题,单一的国家很难应对;中国、伊朗、印度、澳大利亚、美国和德国具有同等程度的研究水平和文献影响力,同时受到同行的高度关注;中南大学、中国科学院、CRISO、塔比阿特莫达勒斯大学、开普敦大学、北京科技大学是全球研究微生物浸出领域较多的机构;邱冠周、刘学端、尹华群、申丽、王军、梁伊丽、张洪波、张瑞永、Sand, Wolfgang 等学者对该领域做出巨大的学术贡献。共有 5 357 位作者参与合作。

(3) 微生物浸出在采矿/矿产/环境领域的研究热点有高效浸出微生物、浸出机理、微生物多样性、群落结构、耐受性、*A. ferrooxidans*、黄铜矿的氧化、提取工艺、重金属、动力学、吸附、硫化矿、混合菌株及硫片附着;在生物/医药/生物技术领域的研究热点包括生物被膜、数学模型、微生物燃料电池、生物电化学、e-waste、PCBs、EPS、分子探针。无论是微生物浸出在采矿与环境领域的相互联系还是生物技术与医药领域的相互渗透,其彼此都是相互促进的。但是微生物浸出仍有一些遗留问题,

微生物与矿物的界面作用甚至这种微生物有效的浸出机制尚不完全明确,微生物种类与微生物浸出效率之间的相关性研究少有报道,并且有个突出的特点是该领域的研究广范而分散。建议在明确研究方向的基础上应用多组学技术深度挖掘微生物适应浸矿环境的特性和机制,国家和机构间深度合作,以建立长期的合作伙伴关系,实现新的突破。

5 结论

混合微生物浸出和微生物与矿物的吸附作用以及微生物耐受金属离子的分子机制是未来研究的重点。本综述的目的是展示这一令人兴奋的微生物浸出领域的一些关键进展,并对该领域的发表文献数量进行统计,总结研究热点,为学者了解该领域的发展趋势、启发科研思路提供帮助和参考。

作者贡献声明

席燕鹏:提出概念、撰写文章;黎梦娇:执行调研;刘亚利:执行调研、数据收集与监管;蔺妍妍:方法论;毛爱红:执行调研、获取基金;唐德平:获取基金、提供资源。

作者利益冲突公开声明

作者声明绝无任何可能会影响本文所报告工作的已知经济利益或个人关系。

REFERENCES

- [1] FALAGÁN C, SBAFFI T, WILLIAMS GB, BARGIELA R, DEW DW, HUDSON-EDWARDS KA. Nutrient optimization in bioleaching: are we overdosing?[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2024, 15: 1359991.
- [2] ZHANG MT, ZHAO HB, ZHANG YS, LV X, ZHANG LY, SHEN L, HU L, WEN JK, SHEN LY, LUO XP. Oxidative dissolution process of sphalerite in $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3\text{-O}_3$ system: implications for heavy metals removal and recovery[J]. *Toxics*, 2024, 12(4): 275.
- [3] WAKSMAN SA, JOFFE JS. Microorganisms concerned in the oxidation of sulfur in the soil: II. *Thiobacillus thiooxidans*, a new sulfur-oxidizing organism isolated from the soil[J]. *Journal of Bacteriology*, 1922, 7(2): 239-256.
- [4] LIZAMA HM, SUZUKI I. Bacterial leaching of a sulfide ore by *Thiobacillus ferrooxidans* and *Thiobacillus thiooxidans* part II: column leaching studies[J]. *Hydrometallurgy*, 1989, 22(3): 301-310.
- [5] COLMER AR, TEMPLE KL, HINKLE ME. An iron-oxidizing bacterium from the acid drainage of some bituminous coal mines[J]. *Journal of Bacteriology*, 1950, 59(3): 317-328.
- [6] 师舒岚, 陈婷, 陈航超, 张艺扬, 潘金禾, 周伟光, 周长春. 硅酸盐矿及含硅酸盐矿资源生物浸出研究进展[J]. *中国有色金属学报*, 2024, 34(11): 3802-3821. SHI SL, CHEN T, CHEN HC, ZHANG YY, PAN JH, ZHOU WG, ZHOU CC. Advances in bioleaching of silicate minerals and resources containing silicate[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2024, 34(11): 3802-3821 (in Chinese).
- [7] HASSANSHAHIAN M, GHOBANI S. Isolation and characterization of iron and sulfur-oxidizing bacteria from mauduk copper mine at shahrbabk province in Iran[J]. *Geomicrobiology Journal*, 2018, 35(4): 261-265.
- [8] SAJJAD W, ZHENG GD, MA XX, RAFIQ M, IRFAN M, XU W, ALI B. Culture-dependent hunt and characterization of iron-oxidizing bacteria in Baiyin Copper Mine, China, and their application in metals extraction[J]. *Journal of Basic Microbiology*, 2019, 59(3): 323-336.
- [9] 洪娴静, 冯守帅, 全艳军, 杨海麟. 基于铁氧化/还原菌改善黄铁矿-水草酸解液体系下低品位辉铜矿生物浸出过程[J]. *微生物学通报*, 2021, 48(11): 3971-3984. HONG XJ, FENG SS, TONG YJ, YANG HL. Improvement of low-grade chalcocite bioleaching process under the pyrite-aquatic weed acid hydrolysate system based on iron-oxidizing and iron-reducing bacteria[J]. *Microbiology China*, 2021, 48(11): 3971-3984 (in Chinese).
- [10] MURAVYOV MI, FOMCHENKO NV. Biohydrometallurgical treatment of old flotation tailings of sulfide ores containing non-ferrous metals and gold[J]. *Minerals Engineering*, 2018, 122: 267-276.
- [11] GAO XY, LIU XJ, FU CG, GU XF, LIN JQ, LIU XM, PANG X, LIN JQ, CHEN LX. Novel strategy for improvement of the bioleaching efficiency of *Acidithiobacillus ferrooxidans* based on the AfeI/R quorum sensing system[J]. *Minerals*, 2020, 10(3): 222.
- [12] SHEN L, CHENG JJ, WANG JJ, ZHANG YJ, ZHOU H, WU XL, LI JK, ZENG WM. Biofilm formation and development during the pyrite bioleaching of moderately thermophilic microorganisms[J]. *Hydrometallurgy*, 2023, 222: 106183.
- [13] 于苗苗. FISH 和 Q-PCR 技术在生物地浸样品分析中的应用[D]. 抚州: 东华理工大学, 2016. YU MM. The application of FISH and Q-PCR technology in the *in-situ* biological sample analysis[D]. Fuzhou: East China Institute of Technology, 2016 (in Chinese).
- [14] 王利沙, 李平, 赵洪侠. FISH 技术在生物冶金中的应用[J]. *科技资讯*, 2022, 20(10): 61-63. WANG LS, LI P, ZHAO HX. Application of fish technology in bio metallurgy[J]. *Science & Technology Information*, 2022, 20(10): 61-63 (in Chinese).
- [15] 任海伟, 孙一帆, 任雨薇, 郭晓鹏, 潘立超, 张丙云, 李金平. 基于文献计量的青贮添加剂研究进展[J]. *生物技术通报*, 2022, 38(8): 261-274. REN HW, SUN YF, REN YW, GUO XP, PAN LC, ZHANG BY, LI JP. Research progress of silage additives based on bibliometrics[J]. *Biotechnology*

- Bulletin, 2022, 38(8): 261-274 (in Chinese).
- [16] ARIA M, CUCCURULLO C. Bibliometrix: an R-tool for comprehensive science mapping analysis[J]. Journal of Informetrics, 2017, 11(4): 959-975.
- [17] 顾海, 奉子岚, 吴迪, 杨妮超. 我国远程医疗研究现状及趋势: 基于 CiteSpace 的文献量化分析[J]. 信息资源管理学报, 2020, 10(4): 119-129.
- GU H, FENG ZL, WU D, YANG NC. Research status and trends of telemedicine in China: quantitative analysis based on CiteSpace[J]. Journal of Information Resources Management, 2020, 10(4): 119-129 (in Chinese).
- [18] ZHANG RY, SCHIPPERS A. Stirred-tank bioleaching of copper and cobalt from mine tailings in Chile[J]. Minerals Engineering, 2022, 180: 107514.
- [19] 陈仕吉, 江文森, 康温和, 邱均平. 论文被引频次的影响因素研究[J]. 情报杂志, 2020, 39(5): 83-88.
- CHEN SJ, JIANG WS, KANG WH, QIU JP. The study on influential factors of citation impact[J]. Journal of Intelligence, 2020, 39(5): 83-88 (in Chinese).
- [20] HOREH NB, MOUSAVI SM, SHOJAOSADATI SA. Bioleaching of valuable metals from spent lithium-ion mobile phone batteries using *Aspergillus niger*[J]. Journal of Power Sources, 2016, 320: 257-266.
- [21] XIN YY, GUO XM, CHEN S, WANG J, WU F, XIN BP. Bioleaching of valuable metals Li, Co, Ni and Mn from spent electric vehicle Li-ion batteries for the purpose of recovery[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 116: 249-258.
- [22] FALAGÁN C, GRAIL BM, JOHNSON DB. New approaches for extracting and recovering metals from mine tailings[J]. Minerals Engineering, 2017, 106: 71-78.
- [23] QU Y, LIAN B. Bioleaching of rare earth and radioactive elements from red mud using *Penicillium tricolor* RM-10[J]. Bioresource Technology, 2013, 136: 16-23.
- [24] SCHIPPERS A, HEDRICH S, VASTERS J, DROBE M, SAND W, WILLSCHER S. Biomining: metal recovery from ores with microorganisms[J]. Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology, 2014, 141: 1-47.
- [25] ZHU NW, XIANG Y, ZHANG T, WU PX, DANG Z, LI P, WU JH. Bioleaching of metal concentrates of waste printed circuit boards by mixed culture of acidophilic bacteria[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 192(2): 614-619.
- [26] BAHALOO-HOREH N, MOUSAVI SM. Enhanced recovery of valuable metals from spent lithium-ion batteries through optimization of organic acids produced by *Aspergillus niger*[J]. Waste Management, 2017, 60: 666-679.
- [27] İŞİLDAR A, van de VOSSENBERG J, RENE ER, van HULLEBUSCH ED, LENS PNL. Two-step bioleaching of copper and gold from discarded printed circuit boards (PCB)[J]. Waste Management, 2016, 57: 149-157.
- [28] ZENG GS, DENG XR, LUO SL, LUO XB, ZOU JP. A copper-catalyzed bioleaching process for enhancement of cobalt dissolution from spent lithium-ion batteries[J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 199: 164-169.
- [29] YANG ZH, ZHANG Z, CHAI LY, WANG Y, LIU Y, XIAO RY. Bioleaching remediation of heavy metal-contaminated soils using *Burkholderia* sp. Z-90[J]. Journal of Hazardous Materials, 2016, 301: 145-152.
- [30] YIN SH, WANG LM, KABWE E, CHEN X, YAN RF, AN K, ZHANG L, WU AX. Copper bioleaching in China: review and prospect[J]. Minerals, 2018, 8(2): 32.
- [31] 盖天赋. h 指数和复合影响因子导向下的图书情报类期刊集团排序分析[J]. 无线互联科技, 2020, 17(19): 159-160.
- GAI TF. Analysis on group ranking of library and information periodicals guided by h index and compound influence factor[J]. Wireless Internet Technology, 2020, 17(19): 159-160 (in Chinese).
- [32] 俞立平, 庞如超, 周娟美. 学术期刊学术传播水平评价: 期刊传播因子[J]. 信息资源管理学报, 2021, 11(4): 133-140.
- YU LP, PANG RC, ZHOU JM. Evaluation of academic communication level of academic journals: journal communication factors[J]. Journal of Information Resources Management, 2021, 11(4): 133-140 (in Chinese).
- [33] 王凌峰, 焦蝶, 梁鑫雨, 梁富雪. 不同期刊分区方法技术合理性定量比较: 规则集与应用[J]. 图书情报导刊, 2023, 8(8): 43-52.
- WANG LF, JIAO D, LIANG XY, LIANG FX. Quantitative comparison on technical rationality of journal partitioning methods: rule sets and applications[J]. Journal of Library and Information Science, 2023, 8(8): 43-52 (in Chinese).
- [34] 关智远, 陈仕吉. 跨学科知识交流研究综述[J]. 情报杂志, 2016, 35(3): 153-158.
- GUAN ZY, CHEN SJ. Review on interdisciplinary knowledge communication[J]. Journal of Intelligence, 2016, 35(3): 153-158 (in Chinese).
- [35] 吕凤先, 刘小平, 赵建. 基于文献计量的凝聚态物理理论重要研究机构分析[J]. 世界科技研究与发展, 2021, 43(3): 344-355.
- LV FX, LIU XP, ZHAO J. Analysis on important research institutions of condensed matter physics theory based on bibliometrics[J]. World Sci-Tech R & D, 2021, 43(3): 344-355 (in Chinese).
- [36] YIN SH, CHEN W, FAN XL, LIU JM, WU LB. Review and prospects of bioleaching in the Chinese mining industry[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2021, 28(9): 1397-1412.
- [37] 陶冰玥, 施生旭. 我国技术治理研究领域文献计量分析[J]. 科学观察, 2022, 17(5): 11-23.
- TAO BY, SHI SX. Bibliometric analysis of technical governance research in China[J]. Science Focus, 2022, 17(5): 11-23 (in Chinese).
- [38] TAN SN, CHEN M. Early stage adsorption behaviour of *Acidithiobacillus ferrooxidans* on minerals I: an experimental approach[J]. Hydrometallurgy, 2012, 119: 87-94.
- [39] 陈福星, 邱文芳, 郑美珠. 微生物浸矿[J]. 湖南冶金, 1980, 8(1): 23-27, 22.
- CHEN FX, QIU WF, ZHENG MZ. Microbial leaching[J]. Hunan Metallurgy, 1980, 8(1): 23-27, 22 (in Chinese).
- [40] ZHANG RY, NEU TR, BLANCHARD V, VERA M, SAND W. Biofilm dynamics and EPS production of a thermoacidophilic bioleaching archaeon[J]. New Biotechnology, 2019, 51: 21-30.
- [41] BRIERLEY CL, BRIERLEY JA. Progress in bioleaching: part B: applications of microbial processes by the minerals industries[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2013, 97(17): 7543-7552.
- [42] VARDANYAN A, VARDANYAN N, GAYDARDZHIEV

- S. Biological extraction of Cu and Ni from printed circuit boards via redoxolysis with concomitant material characterization[J]. *Hydrometallurgy*, 2023, 221: 106145.
- [43] CUI JR, ZHANG LF. Metallurgical recovery of metals from electronic waste: a review[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 158(2/3): 228-256.
- [44] POKHREL P, LIN SL, TSAI CT. Environmental and economic performance analysis of recycling waste printed circuit boards using life cycle assessment[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 276: 111276.
- [45] BRAR KK, MAGDOULI S, ETTEIEB S, ZOLFAGHARI M, FATHOLLAHZADEH H, CALUGARU L, KOMTCHOU SP, TANABENE R, BRAR SK. Integrated bioleaching-electrometallurgy for copper recovery: a critical review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 291: 125257.
- [46] MACK C, WILHELM B, DUNCAN JR, BURGESS JE. Biosorption of precious metals[J]. *Biotechnology Advances*, 2007, 25(3): 264-271.
- [47] 刘洵, 赖潘民旺, 张敏, 张超, 郭军康. 微生物-矿物相互作用: 机制与重金属固定效应[J]. *环境化学*, 2024, 43(2): 377-392.
- LIU X, LAI P, ZHANG M, ZHANG C, GUO JK. Microbe-mineral interactions: Mechanisms and immobilization effect toward heavy metals[J]. *Environmental Chemistry*, 2024, 43(2): 377-392 (in Chinese).
- [48] ZHANG X, SHE SY, DONG WL, NIU JJ, XIAO YH, LIANG YL, LIU XD, ZHANG XX, FAN FL, YIN HQ. Comparative genomics unravels metabolic differences at the species and/or strain level and extremely acidic environmental adaptation of ten bacteria belonging to the genus *Acidithiobacillus*[J]. *Systematic and Applied Microbiology*, 2016, 39(8): 493-502.
- [49] MUSA HH, MUSA TH. A systematic and thematic analysis of the top 100 cited articles on mRNA vaccine indexed in Scopus database[J]. *Human Vaccines & Immunotherapeutics*, 2022, 18(6): 2135927.
- [50] HOFMANN M, NORRIS PR, MALIK L, SCHIPPERS A, SCHMIDT G, WOLF J, NEUMANN-SCHAAL M, HEDRICH S. *Metallosphaera javensis* sp. nov., a novel species of thermoacidophilic Archaea, isolated from a volcanic area[J/OL]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2022. DOI: 10.1099/ijsem.0.005536.
- [51] KHALEQUE HN, GONZÁLEZ C, JOHNSON DB, KAKSONEN AH, HOLMES DS, WATKIN ELJ. Genome-based classification of *Acidihalobacter prosperus* F5 (=DSM 105917=JCM 32255) as *Acidihalobacter yilgarnensis* sp. nov.[J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2020, 70(12): 6226-6234.
- [52] YU RL, OU Y, TAN JX, WU FD, SUN J, MIAO L, ZHONG DL. Effect of EPS on adhesion of *Acidithiobacillus ferrooxidans* on chalcopryrite and pyrite mineral surfaces[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2011, 21(2): 407-412.
- [53] YI Q, WU SL, SOUTHAM G, ROBERTSON L, YOU F, LIU YJ, WANG SC, SAHA N, WEBB R, WYKES J, CHAN TS, LU YR, HUANG LB. Acidophilic iron- and sulfur-oxidizing bacteria, *Acidithiobacillus ferrooxidans*, drives alkaline pH neutralization and mineral weathering in Fe ore tailings[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(12): 8020-8034.
- [54] DÍAZ M, SAN MARTIN D, CASTRO M, VERA M, GUILIANI N. Quorum sensing signaling molecules positively regulate c-di-GMP effector PelD encoding gene and PEL exopolysaccharide biosynthesis in extremophile bacterium *Acidithiobacillus thiooxidans*[J]. *Genes*, 2021, 12(1): 69.
- [55] YUE GK, GUEZENNEC AG, ASSELIN E. Extended validation of an expression to predict ORP and iron chemistry: application to complex solutions generated during the acidic leaching or bioleaching of printed circuit boards[J]. *Hydrometallurgy*, 2016, 164: 334-342.
- [56] SINGER SW, ERICKSON BK, VerBERKMOES NC, HWANG M, SHAH MB, HETTICH RL, BANFIELD JF, THELEN MP. Posttranslational modification and sequence variation of redox-active proteins correlate with biofilm life cycle in natural microbial communities[J]. *The ISME Journal*, 2010, 4(11): 1398-1409.
- [57] QUATRINI R, JOHNSON DB. Microbiomes in extremely acidic environments: functionalities and interactions that allow survival and growth of prokaryotes at low pH[J]. *Current Opinion in Microbiology*, 2018, 43: 139-147.
- [58] SU GR, LI SZ, HE ZG, ZHONG H, SUN W. Insights into the effect of ethyl xanthate on the adhesion and biofilm formation by *Acidianus manzaensis* on chalcopryrite[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2023, 11(6): 111509.
- [59] LI Q, YANG BJ, ZHU JY, JIANG H, LI JK, ZHANG RY, SAND W. Comparative analysis of attachment to chalcopryrite of three mesophilic iron and/or sulfur-oxidizing acidophiles[J]. *Minerals*, 2018, 8(9): 406.
- [60] WANG XJ, MA LY, WU JJ, XIAO YH, TAO JM, LIU XD. Effective bioleaching of low-grade copper ores: insights from microbial cross experiments[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 308: 123273.
- [61] OKIBE N, GERICKE M, HALLBERG KB, JOHNSON DB. Enumeration and characterization of acidophilic microorganisms isolated from a pilot plant stirred-tank bioleaching operation[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2003, 69(4): 1936-1943.
- [62] DONG YB, ZAN JY, LIN H. Bioleaching of heavy metals from metal tailings utilizing bacteria and fungi: mechanisms, strengthen measures, and development prospect[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 344: 118511.
- [63] GIACHINO A, FOCARELLI F, MARLES-WRIGHT J, WALDRON KJ. Synthetic biology approaches to copper remediation: bioleaching, accumulation and recycling[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2021, 97(2): fiae249.
- [64] GHASSA S, BORUOMAND Z, MORADIAN M, ABDOLLAHI H, AKCIL A. Microbial dissolution of Zn-Pb sulfide minerals using mesophilic iron and sulfur-oxidizing acidophiles[J]. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 2015, 36(2): 112-122.
- [65] 张启军, 王旭, 任锋. 离子型稀土矿山无铵绿色开采对植物和土壤微生物的影响[J]. *有色冶金节能*, 2022, 38(3): 74-77.
- ZHANG QJ, WANG X, REN F. Influence of ammonium-free mining of ion-absorbed rare earth mines on plants and soil microbes[J]. *Energy Saving of Nonferrous Metallurgy*, 2022, 38(3): 74-77 (in Chinese).