



硫酸盐还原菌在废水处理领域发展态势分析

刘力源,沈旭,王璐,樊笑,谢鸿观
(成都理工大学生态环境学院,四川成都 610059)

[摘要] 在 Web of Science 数据库和 CNKI 数据库中进行主题检索,将文献导入至 VOSviewer(1.6.15)中,对文献规模、发文量趋势、发表国家机构、重点研究方向等进行可视化分析,并绘制知识科学图谱,探究硫酸盐还原菌(SRB)在废水处理领域的研究现状、热点问题以及发展趋势。分析表明:关于 SRB 在废水处理领域的研究,我国起步较早,并逐渐将重点转移到发表外文文章;Web of Science 上我国机构发文量最多,但篇均引用量偏低,论文国际影响力不大,荷兰、西班牙和澳大利亚等国家发文量虽然不多,但论文质量较高;目前此领域的研究主要围绕作用机理、生物反应器、电子供体等方面展开,未来的研究重点将放在对 SRB 与其他微生物间竞争关系的探究、新型处理工艺的设计、新型气态供体的开发等方面。

[关键词] 文献计量;硫酸盐还原菌;废水处理;VOSviewer;可视化分析

[中图分类号] X703 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2022)07-0033-11

Situation analyses of wastewater treatment by sulfate-reducing bacteria

LIU Liyuan, SHEN Xu, WANG Lu, FAN Xiao, XIE Hongguan

(College of Ecology and Environment, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: Subject retrieval was carried out in Web of Science and CNKI database, and the results were imported into VOSviewer(1.6.15) to conduct visual analysis for literature scale, trends in publication volume, publication states and institutions, key research directions, etc. Then the research status, hot issues and development trend of sulfate-reducing bacteria (SRB) in the wastewater treatment were explored by drawing map. The results showed that the research of SRB in the wastewater treatment in China started earlier, and the proportion of English paper in publication was gradually rising. China contributed most article on Web of Science but with fewer citations per document. On the contrary, limited paper published in Netherlands, Spain and Australia had more citations. At present, researchers mainly focused on the mechanism in treatment, bioreactor, electronic donors. Future research would focus on the competitive relationship between SRB and other microorganisms, the design of new treatment processes, the development of new gas donors and so on.

Key words: bibliometrics; sulfate-reducing bacteria; wastewater treatment; VOSviewer; visualization analysis

当今水体的污染现象主要与矿山、冶金、电镀及其他工业活动中排放的废水有关,这些废水大多呈酸性并含有锌、铜、铅、镉等重金属离子,经过食物链的积累会导致人体慢性中毒,对人体和生态环境造成极大危害,因此废水治理关乎人类健康和生态环境。处理废水的常用方法有化学沉淀法、离子交换法、反渗透法等,这些方法处理效果较好,但存在成本昂贵、产生大量剩余污泥等缺点^[1]。而以利用硫

酸盐还原菌(Sulfate-reducing bacteria, SRB)为代表的微生物处理技术则无需消耗大量试剂,具有相对安全且可实现资源回收等优点。

SRB是一种具有多样形态特征的厌氧细菌,在有机基质存在的厌氧条件下,SRB的异化硫酸盐作用可以将硫酸盐还原为 H_2S , H_2S 与溶解在废水中的某些金属离子(如铜、铁和锌)反应,通过产生金属硫化物沉淀介导金属去除,同时产生碱性物质提高

[基金项目] 四川省灾后重建遗产保护恢复专项(5132202019000128);国家环境保护水土污染协同控制与联合修复重点实验室开放基金资助项目(GHBK-2020-018)

pH。它是目前处理含重金属离子废水、酸性矿山废水以及含硫酸盐废水的代表性微生物之一。

文献计量学是通过对一个领域的特定文章进行定量分析,用应用数学和统计学方法来研究文献学的交叉科学。文献计量学分析的要素可以是书籍、专著、报告、论文、会议文章。文献计量学可以识别指定学科及相关学科内发文量较多的作者、机构、国家和期刊,通过分析研究文献发文量的趋势、作者之间的交流和机构合作、期刊的影响因子、高被引文献等来确定研究主题和未来方向以及热点,也可以在评估有关研究成果中发挥重要作用。文献计量学几乎适用于任何科学领域,如医学^[2]、教育^[3]、海洋渔业^[4]、石油天然气^[5]等。

在中国知网 CNKI 中以“废水”、“文献计量学”作为主题进行检索,经过人工筛选,发现截止到 2020 年底,国内只有 3 篇北大核心的文章通过文献计量学方式对废水处理领域文献进行分析^[6-8],但尚未有对 SRB 处理废水这个领域进行文献计量学分析的文章。笔者借助 Web of Science、CNKI 数据库和 VOSviewer 软件对 SRB 在废水处理领域的研究进行文献计量学的分析,期望能为以后的学者提供更多的研究思路 and 方向。

1 数据与方法

1.1 数据来源

选择 Web of Science 和中国知网 CNKI 作为检索数据库,分别进行文献检索。

Web of Science 检索式: TS=(SRB OR Sulfate-reducing \$ bacteria) AND TS=(waste \$ water OR effluent OR sewage OR discharg* OR liquid \$ waste OR outlet \$ water) AND TS=(treat* OR degrad* OR remov*)。检索数据库为 Science Citation Index Expanded(简称 SCI-E),时间跨度为 1985—2020 年,文献类型为“article”和“review”。

CNKI 检索式: 主题=(硫酸盐还原菌+SRB) AND 主题=废水 AND 主题=(处理+去除+应用)。发表时间为 1981-01-01—2020-12-31,来源类别为 EI 期刊、北大核心、CSSCI,文献类型为“中文”。

因 SCI-E 只能从 1985 年开始检索,而 CNKI 第 1 篇文献发表于 1981 年,因此各自的检索时间跨度设定不同。经过人工筛选,最终得到 SCI-E 期刊 451 篇、CNKI 学术期刊 241 篇作为分析文献。

1.2 研究方法

通过 CNKI 和 Web of Science 平台进行简单的统计数据分析,例如对每年的发文数量、发文期刊和研究学科分布进行统计,得到的数据用 VOSviewer 软件(1.6.15)进行分析。VOSviewer 主要生成共现网络地图,其中包括关键词共现,以及来源和引文网络等^[9],这些项目在可视化中以标签和圆圈或框架的形式显示,其大小取决于每个术语的重要性。在对术语进行共现分析时,应重新标记同义的单个词和同类词,以实现更好的文献计量分析。根据软件手册,在调整程序中的参数后即可生成映射。

2 结果分析

2.1 文献规模及发文趋势

逐年的发文量和趋势图可以直观地反映 SRB 在废水处理领域的发展研究状况。CNKI 在此领域的研究始于 1981 年^[10],但第 1 篇被核心期刊收录的文章写于 1992 年^[11],随后本领域研究人员在处理酸性矿山废水、重金属废水、硫酸盐废水以及 SRB 的固定化领域等方面开展研究。而 SCI-E 则是从 1995 年开始收录该类文章。自 1995 年开始到 2020 年,关于 SRB 在废水处理领域逐年的发文量和趋势见图 1。

由图 1 可知,自 2005 年起,CNKI 中 SRB 在废水处理领域的研究进入平稳发展的阶段,发文量没有发生大幅度波动,而 SCI-E 自 1995 年至今,大体可以将文章发展趋势分为 3 个阶段:第 1 阶段为 1995—2005 年,这时期关于 SRB 处理废水的研究正缓慢起步,第 1 篇收录的文章为 1995 年 E. COLLERAN 等^[12]有关含硫酸盐废水厌氧处理的综述,共被引用 196 次;第 2 阶段为 2006—2014 年,此领域的研究在这段时期内发展平缓,发文量呈总体上升的趋势,SRB 在微生物燃料电池废水处理系统中的应用是此阶段的讨论热点^[13],相较而言,同时期 CNKI 上的发文量并没有上升,分析可能是由于我国学者逐渐将发文重心转移到外文期刊;第 3 阶段为 2015 年至今,关于 SRB 在废水处理领域应用研究的文献数量骤升。由此可见,将 SRB 应用于废水处理在国际上受到学者们愈来愈强烈的关注。

2.2 文献发表国家及机构

在 SCI-E 中收录的关于 SRB 应用在废水处理领域的文献有 451 篇,其发文机构来自于 52 个国家或地区(中国包括中国台湾、中国香港;英国包括英格

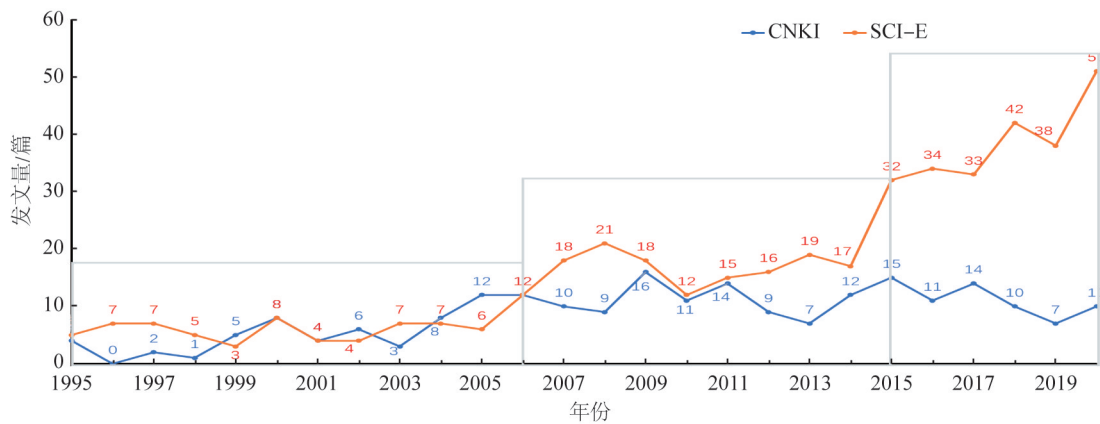


图1 SRB在废水处理领域的逐年发文量及趋势

Fig.1 The trend and numbers of published papers about SRB in the field of wastewater treatment

兰、爱尔兰、苏格兰、威尔士),表1为发文量排名前10国家的发文量、h指数、篇平均引用次数的比较,用以分析评价这些国家的科研实力和国际影响力。h指数的意义为有h篇文献被引用至少h次,巧妙地将发文量和被引量合成一个单项指标,在科学评价里具有高质量的主导作用^[14-16]。据检索,2006年前,我国只在该领域发表了2篇文章,但在这之后发文量呈指数型上升,h指数和发文量都最高。

表1 SCI-E中SRB在废水处理领域发文量前10的国家/地区分布(TOP 10)

Table 1 The distribution of the top ten countries/regions in the number of papers about SRB in the field of wastewater treatment in SCI-E (TOP 10)

国家	发文量	文献占比/%	h指数	篇平均引用次数
中国	172	38.1	31	17.02
美国	51	11.3	16	14.57
印度	32	7.1	17	17.11
荷兰	28	6.2	15	40.71
巴西	25	5.5	11	15.56
南非	25	5.5	9	10.80
西班牙	24	5.3	10	19.33
日本	21	4.6	10	13.62
韩国	21	4.6	12	18.90
澳大利亚	16	3.5	9	19.44

表2为CNKI和SCI-E中SRB在废水处理领域发文量排名前5的国内外机构,可以看出,国内的辽宁工程技术大学和哈尔滨工业大学在此领域的研究实力较强,为国内的研究作出重大贡献,而外文发文数前4名均为中国机构,由中山大学和中国科学院为代表的我国机构在此领域有雄厚的科研实力。结合表1分析,荷兰、西班牙、澳大利亚虽然发文量不

高,但其篇均引用或h指数都很高,体现出这3个国家在此领域具有一定的国际学术影响力。

表2 CNKI和SCI-E中SRB在废水处理领域发文量前5的国内外机构(TOP 5)

Table 2 Top 5 domestic and foreign institutions in the number of papers about SRB in the field of wastewater treatment in CNKI and SCI-E (TOP 5)

排名	CNKI		SCI-E	
	发文机构	发文量/篇	发文机构	发文量/篇
1	辽宁工程技术大学	21	HONG KONG UNIV SCI TECHNOL	33
2	哈尔滨工业大学	12	CHINESE ACAD SCI	27
3	太原理工大学	9	SUN YAT SEN UNIV	20
4	中国科学院成都生物研究所	9	HARBIN INST TECHNOL	15
5	南华大学	7	DELFT UNIV TECHNOL	13

用VOSviewer软件绘制国家/地区合作知识图谱,结果见图2。图2中,连线的粗细代表了合作强度,节点大小代表了国家发文数量。可看出中国和多个国家建立了合作,和美国、南非的合作最为密切。

2.3 重点研究方向

关键词是文献的检索标记,它们可以简单、直接、全面地概括论文的核心研究内容。文章中的关键词越常见,相关研究的文章就越多,研究内容的重点就越突出,越能反映该领域研究的热点问题^[17]。对文献中的关键词进行整理,主要包括去除一些无分析意义的关键词,如“硫酸盐还原菌”、“处理”、“废水”等词的中英文拼写及单复数、全称与缩写、同义词等,其中出现频次前20位的关键词分布见表3。

运用VOSviewer软件根据处理得到的数据结果

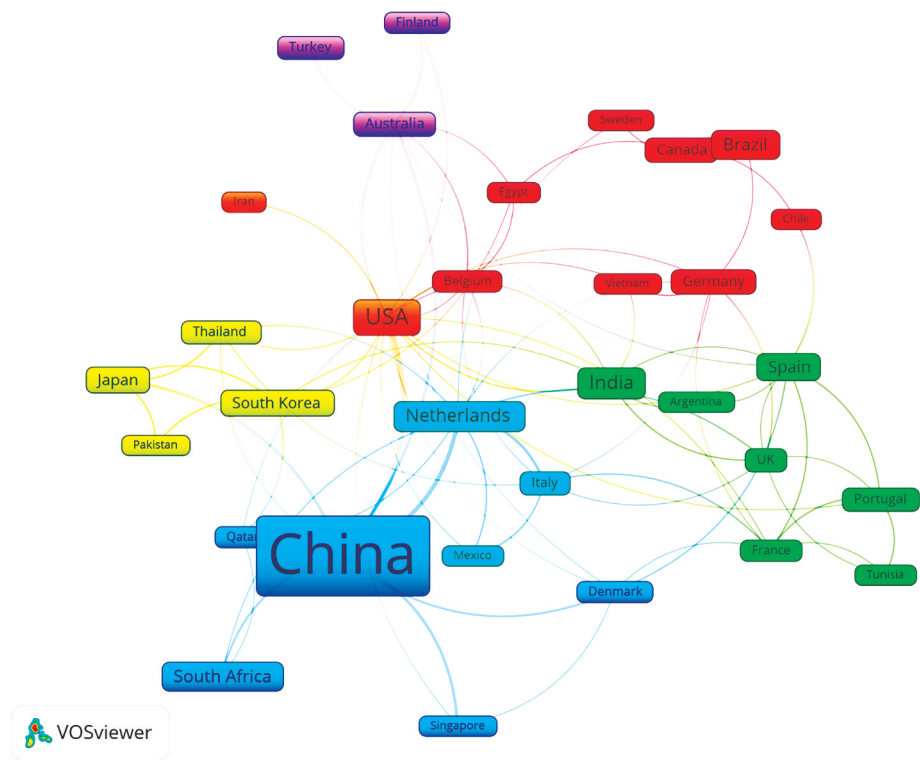


图2 SRB在废水处理领域相关研究的国家合作网络图谱

Fig. 2 National cooperative network map of SRB research in the field of wastewater treatment

表3 SRB在废水处理领域相关研究的高频关键词(TOP 20)

Table 3 High frequency keywords of SRB research in the field of wastewater treatment (TOP 20)				
排名	CNKI		SCI-E	
	关键词	频次	关键词	频次
1	酸性矿山废水	41	Acid mine drainage	107
2	硫酸盐	19	Sulfate	83
3	硫酸盐废水	19	Sulfate reduction	70
4	硫酸盐还原	13	Performance	56
5	产甲烷菌	11	Heavy metals	54
6	厌氧处理	11	Bioremediation	53
7	重金属废水	10	Reactors	52
8	重金属	9	Degradation	51
9	厌氧反应器	8	Reducing bacteria	50
10	含铬废水	7	Wastewater treatment	48
11	麦饭石	7	Bacterial	43
12	颗粒污泥	6	Methanogens	38
13	零价铁	6	Microbial communities	36
14	厌氧消化	6	Bioreactors	34
15	生物处理	5	Sludge	33
16	固定化颗粒	5	Sulphate-reducing bacteria	33
17	固定化	5	Activated-sludge	32
18	二氧化氯	4	Oxidation	32
19	碳源	4	Anaerobic-digestion	31
20	含锌废水	4	Carbon source	28

绘制关键词共现知识网络图谱,包括关键词聚类图(见图3、图4)、高频关键词密度图(见图5)和时间叠

加图(见图6)。

结合图3、图4关键词共现聚类进行分析,可将关键词归纳为硫酸盐还原菌的作用机理、生物反应器、电子供体3大方面。通过表3,可以发现该领域中酸性矿山废水是热点关键词,在CNKI中出现频次为41,Web of Science出现107次,均排第一。而图5的高频关键词密度图从冷色调(蓝色)到暖色调(黄色)表示关键词周围元素、密度、出现频率都越来越高,即研究热度越来越高,可知酸性矿山废水、重金属、微生物群落、生物修复、产甲烷菌、厌氧消化为此领域的热点研究。根据图6的时间聚类图发现重金属、生物修复、反应器、麦饭石、零价铁、重金属等关键词在CNKI中为近5a研究重点,主要涉及到SRB应用于处理酸性矿山废水的研究现状以及生产工艺^[18-21],产甲烷菌、生物修复、生物反应器、微生物群落等关键词为Web of Science近5a研究重点,其更为关注SRB的厌氧生物处理技术^[22-24]以及SRB和产甲烷菌之间的竞争关系^[25]。

2.3.1 处理机理

结合表3以及关键词知识图谱可知,SRB能够处理的典型污染水体种类为酸性矿山废水(AMD)、硫酸

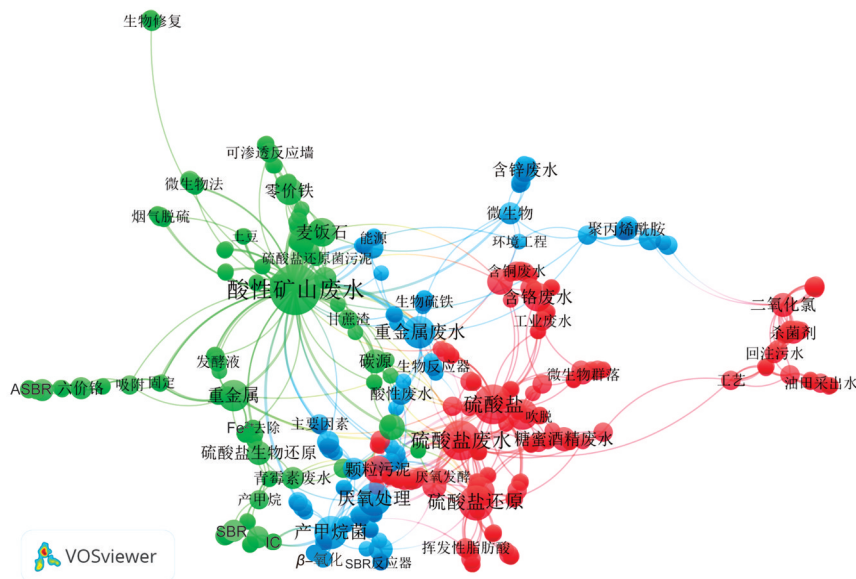


图3 CNKI中SRB在废水处理领域相关研究的高频关键词聚类共现图谱

Fig. 3 Cluster co-occurrence map of high frequency keywords of SRB research in the field of wastewater treatment in CNKI

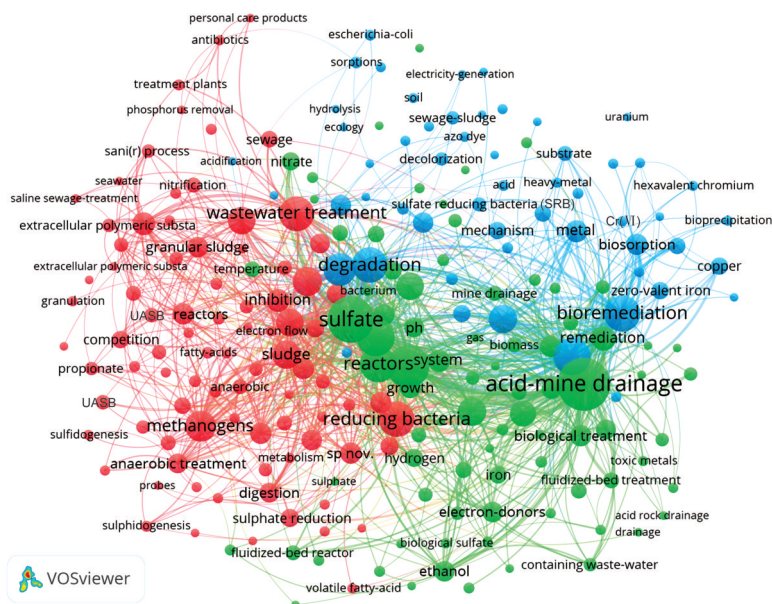


图4 SCI-E中SRB在废水处理领域相关研究的高频关键词聚类共现图谱

Fig. 4 Cluster co-occurrence map of high frequency keywords of SRB research in the field of wastewater treatment in SCI-E

盐废水和重金属离子废水3类,尤其是对AMD的处理最为广泛。开采和加工含硫矿物会产生大量的AMD,当金属硫化物矿物(主要为黄铁矿)在天然存在的硫氧化细菌(如氧化铁硫杆菌)作为生物催化剂的条件下与氧气和水接触时,就会生成AMD,其典型特征是pH低,约为1.5~2.0,另外其硫酸盐浓度高、无机盐含量高^[26]且含有毒重金属离子。矿井中AMD的过度释放可能会污染周围的水环境,对陆地和水生生态系统具有破

环境性影响。因此,许多国家禁止将 AMD 直接排放到环境中,要求采用高效、可靠的方法对其进行处理。目前处理 AMD 的方法有离子交换、反渗透、膜过滤、电渗析等^[27]。这几种方法的运行成本高,而且处理效率相对较低^[28]。生物处理中最常用的有生物反应器和人工湿地^[29-31]2 种方法,但人工湿地成本高,需要定期维护,并且依赖于大面积的土地。SRB 对 AMD 的微生物修复是一种很有前途的方法,作为一类耐低氧的厌氧原

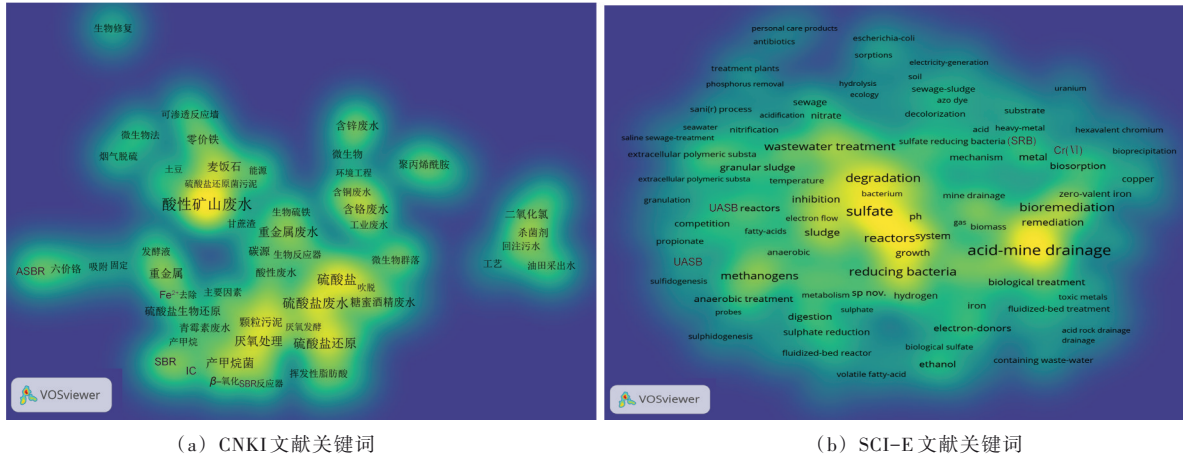


图5 SRB在废水处理领域相关研究的高频关键词密度图

Fig. 5 Density map of high frequency keywords of SRB research in the field of wastewater treatment

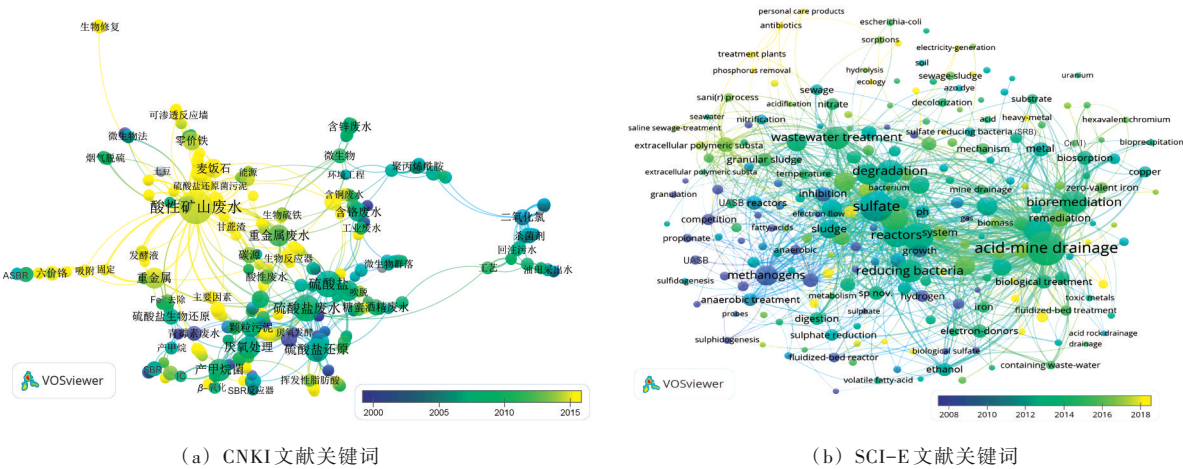
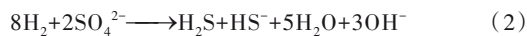
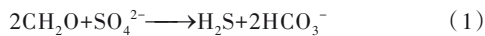


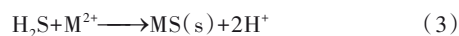
图6 SRB在废水处理领域相关研究的关键词时间叠加聚类图

Fig. 6 Time superposition cluster diagram of keywords of SRB research in the field of SRB wastewater treatment

核生物,其广泛存在于湖泊、沼泽、地下管线、水田、工业废水、石油矿床等缺氧环境中。该工艺主要基于SRB产生硫化氢和碱度的能力,其反应见式(1)、式(2)。



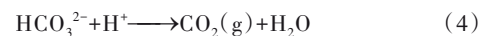
在式(1)、式(2)中,电子供体分别为 CH_2O 、 H_2 。反应生成的硫化氢以低溶解度硫化物的形式沉淀溶解的金属离子,例如 Zn^{2+} [32]、 Cu^{2+} [33]、 Ni^{2+} [34]、 Fe^{2+} [35]等,其反应见式(3),式中 M^{2+} 表示二价金属离子。



SRB引起的有效沉淀发生在广泛的pH范围内,且在金属离子浓度较低的情况下,SRB工艺比其他工

艺具有更高的重金属沉淀效率,而且更容易从废水中分离出金属离子,因为其硫化物溶解度比氢氧化物低几个数量级^[36]。此外,金属硫化物密度高,具有良好的脱水和沉降性能,从沉淀的硫化物中可以回收有价值的金属。

金属离子的沉淀反应会释放酸性质子,从而增加水的酸度。而式(1)、式(2)中产生的碱性碳酸氢盐或氢氧化物能够中和水的酸性^[37],其反应见式(4)、式(5)。



将硫酸盐还原微生物应用在采矿工业中的工艺早在20世纪60年代末就已经提出^[38],并且此后还

开发出了一系列基于SRB的被动处理系统和主动生物反应器用于治理AMD。最新对硫酸盐还原微生物的应用已经扩展到与水滑石结合以最大程度地去除AMD中的硫酸盐^[39]。这种生物处理方法运行成本低,需要的维护很少,而且可以大规模使用^[40]。与基于碳循环的传统处理技术相比,应用SRB技术可以在提高pH并去除溶解金属离子的同时,产生最少的污泥量,且其温室气体排放量也较低^[41]。

2.3.2 生物反应器

用于SRB处理废水的生物反应器可根据其去除废水中金属的生物或化学机制加以区分,并进一步分类为主动式的(过程中持续地投入资源)和被动式的(过程中资源投入相对较少)SRB处理工艺^[42]。以被动式SRB为基础的处理废水污染的应用包括渗透反应墙系统^[43-44]、渗透床^[45]、缺氧池^[46]和湿地系统^[47]等。被动式处理系统需要相对较少的人工成本,且运行和维护

成本也相对较低。然而,被动处理系统也存在一些缺点,如需要的处理面积较大、过程不易控制和性能不可预测等。相对而言,以厌氧硫酸盐还原工艺为代表的主动式处理系统所需处理面积小、易于回收金属、有良好的过程控制和良好的性能预测性^[42],并可显著降低硫酸盐浓度,但其处理重金属污染废水的过程受硫酸盐浓度、重金属形态及其浓度、pH、温度、电子供体等多种因素的影响。表4总结了各种用于处理硫酸盐和金属废水的基于SRB的主动式硫化反应器及其优缺点、目标废水、碳源、水力停留时间、硫酸盐和金属去除效率,并且所有这些硫化生物反应器的应用都已完成从实验室到野外规模的金属去除和回收,可知采用主动式处理方法作为硫酸盐生物反应器来去除重金属比采用被动处理系统更受欢迎^[42]。然而虽然SRB法与其他物理化学方法相比成本较低,但因其大多是以乙醇、乳酸等试剂为碳源,这在实际工程应用中仍是一笔巨大的开销^[56]。

表4 各类基于SRB的主动式硫化反应器处理系统

Table 4 Various active SRB-based sulfidogenic reactor systems

反应器类型	优点	缺点	碳源	目标废水	HRT	金属去除率	硫酸盐去除率
厌氧滤池反应器(AFR) ^[48]	污泥停留时间长、剪切力小	剪切力会造成沟槽效应;压力梯度较大	葡萄糖	含高浓度硫酸盐废水	2 h	—	70.9%~98.1%
上流式厌氧污泥床反应器(UASBR) ^[49]	无导流和污泥压实;不需要生物载体;无堵塞;处理率更高	在运行过程中生物容易冲出;与AFR相比更容易受到进水水质变化的影响	奶酪乳清废水	含Fe ²⁺ 、Cu ²⁺ 、Zn ²⁺ 和硫酸盐的矿山废水	—	99%	74%
流化床反应器(FBR) ^[39]	形成生物膜的表面积较大;生物量保留率高;传质速率大;压降小;无堵塞	载体的流态化需要能量;剪切力造成生物量损失;由于载体的惰性,与UASBR相比,生物质可获得的体积更小	乙醇	含金属离子和硫酸盐的矿山废水	0.8~1.6 d	99%	10%
厌氧折流板反应器(ABR) ^[50]	不需要生物载体;具有更高的水力和有机负荷率	—	乙醇	硫酸盐废水和生活污水	2 d	—	93%
厌氧复合反应器(AHR) ^[51]	不容易堵塞;更容易清除污泥;生物量保留率更高	—	乳酸	含钼、镍、钴、钒的炼油厂废催化剂浸出液	5 d	钼(36%~72%)、镍(20%)、钴(21%)、钒(81%)	20%~50%
连续搅拌釜式反应器(CSTR) ^[52]	高性能;具有快速的平衡条件	生物量的保留很低效	乙醇	含硫酸盐废水	4 d	—	64%
厌氧接触法(ACP) ^[53]	与CSTR相比,生物量保留能力更强	絮体和污泥在剪切力作用下会破裂	乙醇	酸性矿山废水	7 d	—	99%
气升式反应器(GLR) ^[54]	有效的混合和传质	供应气体基质时需要克服水柱高压降	氢	含铅的硫酸盐废水	—	铅 99%	—
膜生物反应器(MBR) ^[55]	更好的生物量保留	由于有可能造成膜污染(微生物或金属沉淀物),需要反冲洗	乙醇	含高浓度硫酸盐废水	9.5 h	90%	68%

2.3.3 电子供体

利用生物法处理含硫酸盐废水的理想电子供体

应成本低、易得且无毒^[42]。有机电子供体支持异养硫酸盐还原,同时也会为SRB提供碳源,而无机电

子供体(如 H_2)则需要补充适量碳源,可以是二氧化碳,也可以是有机基质中的碳。一些含高浓度硫酸盐的废水,如制浆造纸工业^[57]、食品加工业^[58]和食用油生产工业^[59]的废水含有高浓度的有机物,SRB 可以利用这些有机物进行硫酸盐还原。相比之下,AMD 中通常不含有机物,因此使得生物法处理具有一定的挑战性。如糖(葡萄糖和蔗糖)、醇(乙醇和甲醇)或短链脂肪酸(乳酸、醋酸盐和丁酸盐)等各种有机物先前已被添加到 AMD 中以支持生物硫酸盐还原^[60],这些有机物由于其高昂的成本大多不适合用于处理 AMD。也有研究对包括粪便^[61]、铁屑^[62]、秸秆^[63]和农业及生活废水^[64]等其他低成本材料进行了探索,但它们的主要缺点是会造成二次污染。因此如氢气、一氧化碳、甲烷及其混合气体(CO 、 H_2 和 CO_2 的混合物)等气态电子供体具有极强吸引力。使用气态电子供体的主要优点是硫酸盐还原率通常很高(特别是氢气),而且它们不会因为废水中剩余未利用的底物而造成二次污染问题^[65],还可以通过不同的生化或热化学途径从废弃底物中产生而进一步降低成本,并便于 AMD 的现场治理。尽管如此,以往发表的有关 AMD 治理的综述仍大多集中在可溶性有机底物上^[66],而通过生物硫酸盐还原原来治理 AMD 的气态电子供体在文献中还没有被很好地报道。尽管气态底物在生物硫酸盐还原方面优于可溶性有机底物,但微生物的选择性富集对于气态电子供体处理系统的设计和运行至关重要,因为并不是所有的微生物都能够利用这种底物作为电子供体,在某些情况下,它们对微生物甚至是有毒的。另外,选择合适的生物反应器系统是决定工艺效率的关键,目前气态底物生物还原硫酸盐最常用的生物反应器系统是气升式生物膜反应器。

3 结论

笔者借助 Excel 统计和 VOSviewer 软件对 SRB 在废水处理领域的研究进行文献计量学的分析,通过对此领域 CNKI 数据库中的 241 篇和 Web of Science 数据库中的 451 篇期刊文章进行可视化分析,揭示了 SRB 在废水处理应用领域的研究现状和重点,展望了未来发展趋势。

(1)我国对于 SRB 用于废水处理领域的研究起步较早,且近 20 a 的发文量平稳。近些年我国学者更注重提升我国在此领域的国际传播力,在 Web of Science 中,我国机构发文量稳居第一,远超第二,但 h 指数和均被引量不高,与国际顶尖水平仍然存在差距,需要进一步对文章质量进行把关,提高行业影响力。

(2)我国在 SRB 处理废水领域主导研究的机构是辽宁工程技术大学、哈尔滨工业大学、太原理工大学等,而最具国际影响力的机构有香港科技大学、中国科学院、中山大学、哈尔滨工业大学和代尔夫特理工大学等,未来应该加强各学者以及高校机构之间的学术交流合作,进一步提升该领域在我国的研究热度和我国在该研究领域的国际地位。

(3)未来 SRB 处理废水的研究主要围绕 3 个方面展开:一是利用现代分子生物学技术进行模拟实验,采用基因测序并对微生物群落进行分离筛选,了解微生物间的竞争作用,了解废水的处理机理;二是以厌氧硫酸盐还原工艺为代表的主动式处理系统是处理工艺里的研究热门,其处理效果显著且易于控制,未来该技术的研发热点应当是新碳源的开发;三是开发新型电子供体,气态电子供体发展前景巨大,但这方面研究不多,是此领域的难点和未来发展的重点。

参考文献

- [1] 曹晓磊,盛宇星.生物法处理含硫酸盐重金属废水的研究进展[J].环境科学与技术,2015,38(S2):181-185.
CAO Xiaolei, SHENG Yuxing. Recent advances in research of treating sulfate-, heavy metals-containing wastewater by anaerobic biotreatment method[J]. Environmental Science & Technology, 2015, 38(S2):181-185.
- [2] 王雨,林志健,姜卓希,等.生物信息技术预警乌头类中药抗乳腺癌用药风险[J].中国药物警戒,2021,18(7):655-662.
WANG Yu, LIN Zhijian, JIANG Zhuoxi, et al. Early warning of aconitum herbs in breast cancer therapy by bibliometric and bioinformatics[J]. Chinese Journal of Pharmacovigilance, 2021, 18(7):655-662.
- [3] 王义娜.改革开放 30 年我国民办高等教育研究:基于文献计量学的分析[J].浙江树人大学学报:人文社会科学版,2009,9(2):26-32.
WANG Yina. Study on China's non-governmental higher education in 30 years since the reform and opening-up: Based on literature bibliometrical analysis[J]. Journal of Zhejiang Shuren University: Humanities and Social Sciences, 2009, 9(2):26-32.

- [4] 杨怀宇,马一鸣. 基于文献计量学的海洋捕捞业研究热点与前沿趋势分析[J]. 中国渔业经济, 2020, 38(6): 7-17.
YANG Huaiyu, MA Yiming. Analysis of research hotspots and frontier trends of marine fishing industry based on bibliometrics [J]. Chinese Fisheries Economics, 2020, 38(6): 7-17.
- [5] 段凯鑫,郭红光,成雅彤. 生物煤层气的文献计量与发展综述[J]. 煤矿安全, 2020, 51(8): 206-212.
DUAN Kaixin, GUO Hongguang, CHENG Yatong. A review of bibliometrics and development of biological coalbed methane [J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(8): 206-212.
- [6] 张石磊,江旭佳,洪国良,等. 电絮凝技术在水处理中的应用[J]. 工业水处理, 2013, 33(1): 10-14.
ZHANG Shilei, JIANG Xujia, HONG Guoliang, et al. Application of electrocoagulation technology to water treatment [J]. Industrial Water Treatment, 2013, 33(1): 10-14.
- [7] 杨晓秋,吴寅嵩,闫金定,等. 基于文献计量学的微藻生物技术的发展趋势[J]. 生物工程学报, 2015, 31(10): 1415-1436.
YANG Xiaoliu, WU Yinsong, YAN Jinding, et al. Trends of microalgal biotechnology: A view from bibliometrics [J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2015, 31(10): 1415-1436.
- [8] 成璐瑶,李娟,王良杰,等. 基于文献计量的废水生物强化处理领域发展态势分析[J]. 环境工程, 2021, 39(3): 40-47.
CHENG Luyao, LI Juan, WANG Liangjie, et al. Development trend analysis of bioaugmentation technology for wastewater treatment based on bibliometric [J]. Environmental Engineering, 2021, 39(3): 40-47.
- [9] VAN ECK N J, WALTMAN L. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping [J]. Scientometrics, 2010, 84(2): 523-538.
- [10] 蒋立人. 对《废水的活性污泥法设计》一文的几点看法[J]. 化工给排水设计, 1981, 12(1): 62-71.
JIANG Liren. Some views on the paper design of activated sludge process for wastewater [J]. Design of Water Supply and Drainage in Chemical Industry, 1981, 12(1): 62-71.
- [11] 徐洪峰,姜文,车培枝,等. 硫酸盐对高浓度有机废水厌氧处理的影响[J]. 水处理技术, 1992, 18(4): 50-53.
XU Hongfeng, JIANG Wen, CHE Peizhi, et al. The effect of sulphate on anaerobic treatment of high strength organic wastewater [J]. Technology of Water Treatment, 1992, 18(4): 50-53.
- [12] COLLERAN E. Anaerobic treatment of sulfate-containing waste streams [J]. Antonie Van Leeuwenhoek, 1995, 67(1): 29-46.
- [13] WANG Zhongjiang, LI Yang, JIANG Lianzhou, et al. Relationship between secondary structure and surface hydrophobicity of soybean protein isolate subjected to heat treatment [J]. Journal of Chemistry, 2014, 2014: 475389.
- [14] 王兰敬. h指数在学术评价领域的应用研究进展[J]. 情报科学, 2011, 29(4): 624-627.
WANG Lanjing. Review of applied research on h-index in research evaluation [J]. Information Science, 2011, 29(4): 624-627.
- [15] 万锦堃,花平寰,孙秀坤. 期刊论文被引用及其 Web 全文下载的文献计量分析[J]. 现代图书情报技术, 2005(4): 58-62.
WAN Jinkun, HUA Pinghuan, SUN Xiukun. Bibliometrics analysis on cited frequency and downloaded frequency of journal papers [J]. New Technology of Library and Information Service, 2005(4): 58-62.
- [16] HIRSCH J E. An index to quantify an individual's scientific research output that takes into account the effect of multiple coauthorship [J]. Scientometrics, 2010, 85(3): 741-754.
- [17] 李长玲,支岭,纪雪梅,等. 我国情报学研究进展: 基于期刊论文关键词的统计分析[J]. 图书情报工作, 2010, 54(24): 31-36.
LI Changling, ZHI Ling, JI Xuemei, et al. Trend analysis of information science based on keyword statistics [J]. Library and Information Service, 2010, 54(24): 31-36.
- [18] 冯新慧,李昀,张婷,等. 大孔微生物载体固定硫酸盐还原菌用于硫酸盐废水处理的研究[J]. 现代化工, 2020, 40(10): 178-183.
FENG Xinhui, LI Yun, ZHANG Ting, et al. Application of macroporous microbial support immobilized SRB in treatment of sulfates-containing wastewater [J]. Modern Chemical Industry, 2020, 40(10): 178-183.
- [19] 王继勇,黄品源,何伟. 土豆为缓释碳源负载 SRB 处理模拟含铜酸性废水[J]. 华中师范大学学报: 自然科学版, 2021, 55(2): 244-249.
WANG Jiyong, HUANG Pinyuan, HE Wei. Potato as a slow-release carbon source to treat simulated acid mine drainage [J]. Journal of Central China Normal University: Natural Sciences, 2021, 55(2): 244-249.
- [20] 张杰,龙琦,李彦成,等. 酸性矿山废水与选矿废水协同生化处理研究[J]. 水处理技术, 2020, 46(7): 94-98.
ZHANG Jie, LONG Qi, LI Yancheng, et al. The co-treatment of acid mine drainage and mineral processing wastewater by biological remediation [J]. Technology of Water Treatment, 2020, 46(7): 94-98.
- [21] 邓奇根,王颖南,吴喜发,等. 硫酸盐还原菌处理煤矿酸性废水的研究及其影响因素[J]. 水处理技术, 2020, 46(5): 8-11.
DENG Qigen, WANG Yingnan, WU Xifa, et al. Study on the treatment of acid coal mine drainage by sulfate reducing bacteria and its influence factors [J]. Technology of Water Treatment, 2020, 46(5): 8-11.
- [22] RODRIGUES C, NÚÑEZ-GÓMEZ D, FOLLMANN H V D M, et al. Biostimulation of sulfate-reducing bacteria and metallic ions removal from coal mine-impacted water (MIW) using shrimp shell as treatment agent [J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 398: 122893.
- [23] MAGOWO W E, SHERIDAN C, RUMBOLD K. Bioremediation of acid mine drainage using Fischer-Tropsch waste water as a feedstock for dissimilatory sulfate reduction [J]. Journal of Water Pro-

- cess Engineering, 2020, 35: 101229.
- [24] XI Yanni, LAN Shiming, LI Xin, et al. Bioremediation of antimony from wastewater by sulfate-reducing bacteria: Effect of the coexisting ferrous ion [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2020, 148: 104912.
- [25] JANTHARADEJ K, MHUANTONG W, LIMPIYAKORN T, et al. Identification of sulfate-reducing and methanogenic microbial taxa in anaerobic bioreactors from industrial wastewater treatment plants using next-generation sequencing and gene clone library analyses [J]. Journal of Environmental Science and Health: Part A, 2020, 55(11): 1283–1293.
- [26] ALTUN M, SAHINKAYA E, DURUKAN I, et al. Arsenic removal in a sulfidogenic fixed-bed column bioreactor [J]. Journal of Hazardous Materials, 2014, 269: 31–37.
- [27] MADZIVIRE G, PETRIK L F, GITARI W M, et al. Application of coal fly ash to circumneutral mine waters for the removal of sulphates as gypsum and ettringite [J]. Minerals Engineering, 2010, 23(3): 252–257.
- [28] LUPTAKOVA A, KUSNIEROVA M. Bioremediation of acid mine drainage contaminated by SRB [J]. Hydrometallurgy, 2005, 77(1/2): 97–102.
- [29] SINGH S, CHAKRABORTY S. Performance of organic substrate amended constructed wetland treating acid mine drainage (AMD) of North-Eastern India [J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 397: 122719.
- [30] GUPTA V, COURTEMACHE J, GUNN J, et al. Shallow floating treatment wetland capable of sulfate reduction in acid mine drainage impacted waters in a northern climate [J]. Journal of Environmental Management, 2020, 263: 110351.
- [31] KATO T, KAWASAKI Y, KADOKURA M, et al. Application of GETFLOWS coupled with chemical reactions to arsenic removal through ferrihydrite coprecipitation in an artificial wetland of a Japanese closed mine [J]. Minerals, 2020, 10(5): 475.
- [32] ALVAREZ M T, CRESPO C, MATTIASSON B. Precipitation of Zn(II), Cu(II) and Pb(II) at bench-scale using biogenic hydrogen sulfide from the utilization of volatile fatty acids [J]. Chemosphere, 2007, 66(9): 1677–1683.
- [33] UCAR D, BEKMEZCI O K, KAKSONEN A H, et al. Sequential precipitation of Cu and Fe using a three-stage sulfidogenic fluidized-bed reactor system [J]. Minerals Engineering, 2011, 24(11): 1100–1105.
- [34] QIAN Junwei, ZHU Xiaoyu, TAO Yong, et al. Promotion of Ni²⁺ removal by masking toxicity to sulfate-reducing bacteria: Addition of citrate [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2015, 16(4): 7932–7943.
- [35] DONG Yanrong, DI Junzhen, YANG Zhenhua, et al. Study on the effectiveness of sulfate-reducing bacteria combined with coal gangue in repairing acid mine drainage containing Fe and Mn [J]. Energies, 2020, 13(4): 995.
- [36] KIKOT P, VIERA M, MIGNONE C, et al. Study of the effect of pH and dissolved heavy metals on the growth of sulfate-reducing bacteria by a fractional factorial design [J]. Hydrometallurgy, 2010, 104(3/4): 494–500.
- [37] CHRISTENSEN B, LAAKE M, LIEN T. Treatment of acid mine water by sulfate-reducing bacteria; Results from a bench scale experiment [J]. Water Research, 1996, 30(7): 1617–1624.
- [38] TUTTLE J H, DUGAN P R, RANGLES C I. Microbial sulfate reduction and its potential utility as an acid mine water pollution abatement procedure [J]. Applied Microbiology, 1969, 17(2): 297–302.
- [39] YAN Su, CHENG Kayu, MORRIS C, et al. Sequential hydrotalcite precipitation and biological sulfate reduction for acid mine drainage treatment [J]. Chemosphere, 2020, 252: 126570.
- [40] COSTA J M, DE CASTRO K C, RODRIGUEZ R P, et al. Anaerobic reactors for the treatment of sulphate and metal-rich wastewater: A review [J]. International Journal of Environmental Analytical Chemistry, 2022, 102(4): 923–934.
- [41] PAGNANELLI F, DE MICHELIS I, MUZIO S D, et al. Bioassessment of a combined chemical–biological treatment for synthetic acid mine drainage [J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 159(2/3): 567–573.
- [42] KIRAN M G, PAKSHIRAJAN K, DAS G. An overview of sulfidogenic biological reactors for the simultaneous treatment of sulfate and heavy metal rich wastewater [J]. Chemical Engineering Science, 2017, 158: 606–620.
- [43] AMOS P W, YOUNGER P L. Substrate characterisation for a subsurface reactive barrier to treat colliery spoil leachate [J]. Water Research, 2003, 37(1): 108–120.
- [44] HILLER-BITTROLF K, FOREMAN K, BULSECO-MCKIM A N, et al. Effects of mercury addition on microbial community composition and nitrate removal inside permeable reactive barriers [J]. Environmental Pollution, 2018, 242: 797–806.
- [45] VELASCO A, RAMÍREZ M, VOLKE-SEPÚLVEDA T, et al. Evaluation of feed COD/sulfate ratio as a control criterion for the biological hydrogen sulfide production and lead precipitation [J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 151(2/3): 407–413.
- [46] PARK N, LEE J, CHON K, et al. Investigating microbial activities of constructed wetlands with respect to nitrate and sulfate reduction [J]. Desalination and Water Treatment, 2009, 1(1/2/3): 172–179.
- [47] CHEN Yi, WEN Yue, ZHOU Junwei, et al. Effects of cattail biomass on sulfate removal and carbon sources competition in subsurface-flow constructed wetlands treating secondary effluent [J]. Water Research,

- 2014, 59: 1-10.
- [48] KUO W C, SHU T Y. Biological pre-treatment of wastewater containing sulfate using anaerobic immobilized cells [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2004, 113(1/2/3): 147-155.
- [49] SAMPAIO G F, DOS SANTOS A M, DA COSTA P R, et al. High rate of biological removal of sulfate, organic matter, and metals in UASB reactor to treat synthetic acid mine drainage and cheese whey wastewater as carbon source [J]. *Water Environment Research: A Research Publication of the Water Environment Federation*, 2020, 92(2): 245-254.
- [50] OZDEMIR S, CIRIK K, AKMAN D, et al. Treatment of azo dye-containing synthetic textile dye effluent using sulfidogenic anaerobic baffled reactor [J]. *Bioresource Technology*, 2013, 146: 135-143.
- [51] CIBATI A, CHENG Kayu, MORRIS C, et al. Selective precipitation of metals from synthetic spent refinery catalyst leach liquor with biogenic H_2S produced in a lactate-fed anaerobic baffled reactor [J]. *Hydrometallurgy*, 2013, 139: 154-161.
- [52] HESSLER T, HARRISON S T L, HUDDY R J. Stratification of microbial communities throughout a biological sulphate reducing up-flow anaerobic packed bed reactor, revealed through 16S metagenomics [J]. *Research in Microbiology*, 2018, 169(10): 543-551.
- [53] VITOR G, PALMA T C, VIEIRA B, et al. Start-up, adjustment and long-term performance of a two-stage bioremediation process, treating real acid mine drainage, coupled with biosynthesis of ZnS nanoparticles and ZnS/TiO_2 nanocomposites [J]. *Minerals Engineering*, 2015, 75: 85-93.
- [54] TEEKAYUTTASAKUL P, ANNACHHATRE A P. Lead removal and toxicity reduction from industrial wastewater through biological sulfate reduction process [J]. *Journal of Environmental Science and Health: Part A*, 2008, 43(12): 1424-1430.
- [55] VALLERO M V G, LETTINGA G, LENS P N L. High rate sulfate reduction in a submerged anaerobic membrane bioreactor (SAMBaR) at high salinity [J]. *Journal of Membrane Science*, 2005, 253(1/2): 217-232.
- [56] KAKSONEN A H, PUHAKKA J A. Sulfate reduction based bioprocesses for the treatment of acid mine drainage and the recovery of metals [J]. *Engineering in Life Sciences*, 2007, 7(6): 541-564.
- [57] KAMALI M, KHODAPARAST Z. Review on recent developments on pulp and paper mill wastewater treatment [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015, 114: 326-342.
- [58] CHITAPORN PAN S, CHIEMCHAI SRI C, CHIEMCHAI SRI W, et al. Organic carbon recovery and photosynthetic bacteria population in an anaerobic membrane photo-bioreactor treating food processing wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2013, 141: 65-74.
- [59] WU T Y, MOHAMMAD A W, JAHIM J M, et al. Pollution control technologies for the treatment of palm oil mill effluent (POME) through end-of-pipe processes [J]. *Journal of Environmental Management*, 2010, 91(7): 1467-1490.
- [60] GUO Jiahua, WANG Jinting, QIU Yanying, et al. Realizing a high-rate sulfidogenic reactor driven by sulfur-reducing bacteria with organic substrate dosage minimization and cost-effectiveness maximization [J]. *Chemosphere*, 2019, 236: 124381.
- [61] ZHANG Mingliang, WANG Haixia. Organic wastes as carbon sources to promote sulfate reducing bacterial activity for biological remediation of acid mine drainage [J]. *Minerals Engineering*, 2014, 69: 81-90.
- [62] 安文博, 王来贵, 狄军贞. 铁屑协同SRB污泥固定化颗粒处理AMD动态试验研究 [J]. *非金属矿*, 2017, 40(4): 8-11.
- AN Wenbo, WANG Laigui, DI Junzhen. Dynamic experimental study on the iron cooperated with SRB sludge immobilized particles to treat AMD [J]. *Non-Metallic Mines*, 2017, 40(4): 8-11.
- [63] 王进, 侯成虎, 陈静, 等. SRB以油菜秸秆为基质处理酸性矿山排水 [J]. *合肥工业大学学报: 自然科学版*, 2012, 35(12): 1676-1680.
- WANG Jin, HOU Chenghu, CHEN Jing, et al. Study of treating acidic mine drainage by sulfate-reducing bacteria using rape straw as substrate [J]. *Journal of Hefei University of Technology: Natural Science*, 2012, 35(12): 1676-1680.
- [64] MAGOWO W E, SHERIDAN C, RUMBOLD K. Global co-occurrence of acid mine drainage and organic rich industrial and domestic effluent: Biological sulfate reduction as a co-treatment-option [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2020, 38: 101650.
- [65] SINHARROY A, BASKARAN D, PAKSHIRAJAN K. Process integration and artificial neural network modeling of biological sulfate reduction using a carbon monoxide fed gas lift bioreactor [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 391: 123518.
- [66] ARINDAM S, PAKSHIRAJAN K, LENS P N L. Biological sulfate reduction using gaseous substrates to treat acid mine drainage [J]. *Current Pollution Reports*, 2020, 6(4): 328-344.
- [作者简介] 刘力源(1998—), 硕士研究生. E-mail: 876419054@qq.com. 通讯作者: 谢鸿观, 博士, 副教授. E-mail: xiehongguan08@cdut.cn.
- [收稿日期] 2022-03-14(修改稿)