

二氧化碳应用废水处理研究热点可视化分析

田土¹ 左澍琼¹ 刘新有² 张泽甫² 陆颖¹

1 云南大学 国际河流与生态安全研究院 2 云南省滇中引水二期工程有限公司

DOI:10.12238/eep.v7i6.2114

[摘要] 基于中国知网(CNKI)数据库中收录主题分别为“CO₂、二氧化碳、废水”的文献数据,利用CiteSpace6.1.R3软件,采取文献数量和类别分析、关键词共现网络、作者共现网络分析方法对国内外二氧化碳应用废水处理研究现状进行知识图谱可视化分析,全面探究该领域热点及主题演化特征。结果表明:二氧化碳法处理废水领域相关研究文献发表数量总体呈上升趋势,经历了探索起步、波动发展、缓慢增长三个阶段;研究热点集中在废水软化处理、碳减排、重金属离子去除、pH值中和、生物球藻协同净化处理等方面,并且集二氧化碳减排和废水协同净化工艺是未来研究热点趋势。

[关键词] CO₂; 二氧化碳; 可视化分析; 废水; citeSpace

中图分类号: X703 **文献标识码:** A

Visualization analysis of hot spots in CO₂ application wastewater treatment research

Tu Tian¹ Shuqiong Zuo¹ Xinyou Liu² Zefu Zhang² Ying Lu¹

1 Institute of International Rivers and Ecological Security, Yunnan University

2 Yunnan Central Yunnan Water Diversion Phase II Engineering Co., Ltd

[Abstract] Based on the literature data of "CO₂, carbon dioxide and wastewater" included in the China National Knowledge Infrastructure (CNKI) database, CiteSpace6.1.R3 software was used to analyze the research status of carbon dioxide applied wastewater treatment at home and abroad by means of literature quantity and category analysis, keyword co-occurrence network and author co-occurrence network analysis, so as to comprehensively explore the hot spots and theme evolution characteristics in this field. The results show that the number of published research papers in the field of carbon dioxide wastewater treatment generally shows an upward trend, and has experienced three stages: exploration start, fluctuating development and slow growth. The research hotspots focus on wastewater softening treatment, carbon emission reduction, heavy metal ion removal, pH neutralization, and biochlorella synergistic purification treatment, and the integration of carbon dioxide emission reduction and wastewater co-purification process is the future research hot trend.

[Key words] CO₂; Carbon dioxide; visual analytics; Wastewater; citeSpace

引言

在常温常压下,二氧化碳是一种无色、无臭的气体,具备安全性高、价格低廉,易于使用、存储方便,在常温条件下施加压力即可液化或固化等优异特性^[1]。近年来,二氧化碳被广泛应用于废水处理过程,其在中和碱性废水处理方面,相比传统无机和有机酸中和,该方法在工业废水处理过程中具备更优异的中和能力,同时可提高安全系数、减轻了劳动强度,增强了过程控制能力,被广泛应用于钢铁、印染、皮革等工业生产过程中的外排高碱性废水进行中和过程^[2-4]。在废水软化处理方面,二氧化碳可与高硬度化学物质在废水中发生反应并形成无害化的沉淀盐,这有助于提升废水的循环利用率,减少废水外排^[5-6]。此外,大气游离或工业排放的二氧化碳还可以作为

藻类的生物营养源,其在藻类生物去除水体中的有机和无机污染物、降解重金属以及EDC、PPCP等大分子方面发挥重要作用^[7-9]。因此,二氧化碳法作为一种安全、环保和绿色的新技术,不仅能够净化废水水质,同时还能促进全球碳减排,具有显著的社会和经济效益。

二氧化碳在废水处理方面的应用已经取得了一定的成果。然而,受指标选取单一和研究地域的局限等原因,国内外关于二氧化碳在废水处理方面的研究大多采用定性分析,缺乏定量分析。传统的综述性文章主要以文字描述为主,缺乏对该领域的研究趋势和知识演变历程进行可视化分析。本文基于中国知网(CNKI)的文献数据,使用软件CiteSpace6.1.R3对二氧化碳处理技术的知识基础、合作网络和发展脉络进行梳理,探索该领域的

研究热点和前沿问题,为二氧化碳应用于废水处理的研究和相关机构的科学决策提供依据。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

中国知网(CNKI),是多学科学术文献文摘索引数据库,收录8000多种学术期刊,主要包含中文文献,但也包含了一些英文、日文、德文等多语种文献。其中的英文文献主要来自于大学、研究机构等中国学术界及学者在国外发表的论文、期刊等。以该数据库收录文献作为样本数据源,采用高级检索方式,检索主题词=(“CO₂、二氧化碳、废水”),检索条件为中英文扩展,检索时间限制为2022年以前(包含2022年)文献信息选取“全文本”,共检索到554篇文献,其中国内323篇、国外231篇。为保证数据和分析结果的精确性和可靠性,剔除报纸和会议记录等不相关条目,共得到541篇有效文献作为样本数据。

1.2 研究方法

CiteSpace6.1.R3软件是专用于文献数据挖掘的知识图谱可视化工具,具有数据搜索、图谱绘制等功能,可探索分析某学科领域的研究热点及演进趋势^[10]。文章利用该软件与Excel对历年发文量、文献关键词共现、聚类、作者、发文机构等进行统计并绘制可视化图谱分析深入挖掘研究概况、演化路径。绘制知识图谱进行可视化展示并分析,探索出二氧化碳法应用到废水处理研究中的热点与发展趋势,为探寻未来研究方向和趋势提供参考与建议。

2 研究趋势与热点分析

2.1 研究历程分析

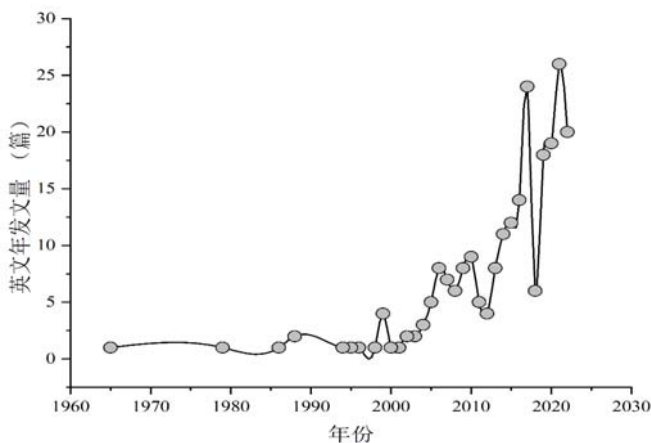


图1.1 外文文献有关CO₂应用在废水处理领域年度发文量

年发文量是评价科学研究发展的一个重要指标,反映不同时期研究的分布情况^[11]。本研究基于中国知网(CNKI)导出的数据,绘制了国内外二氧化碳法应用于废水处理领域研究的年发文量时序分布图(见图1.1和图1.2)。通过图1.1我们可以看出,虽然外文文献在部分年份存在发文数量下降的情况,但总体呈现增长趋势。研究可以被分为三个阶段:(1)初期探索阶段(1965—2005年):二氧化碳处理技术在废水处理领域尚处于萌芽阶段,最早的文献发表于1965年,此阶段年均发文量低于10篇,未能引

起国外专家和学者的重视。(2)波动发展阶段(2006—2013年):文献发表的数量开始波动并呈现波动增长的趋势。(3)快速发展阶段(2014至今):由于全球水资源的日益紧张、废水排放未达标以及温室气体带来的环境负面影响不断加深,二氧化碳废水处理技术在缓解全球水资源紧张和温室气体排放过程中发挥着重要作用,二氧化碳废水处理相关研究越来越多,该阶段的研究呈显著增长趋势。

图1.2显示,国内关于二氧化碳应用于废水处理领域的研究最早可以追溯到1969年。随着时间的推移,文献数量总体上呈现上升趋势,并且也可以分为三个阶段:

(1)初期探索阶段(1969—2006年):新中国成立初期工业化薄弱、城镇化进展较慢水污染问题尚不突出^[12-14],CO₂应用于废水处理相关研究尚未引起我国政府和学者的重视。该阶段年均发文数量偏低,不足5篇。

(2)快速增长阶段(2007—2013年):国内针对二氧化碳应用于废水处理领域的研究大致始于此时期。自党的十七大提出生态文明这一概念后,对节能减排和保护生态环境的理念做出系统阐述,在我国产生较大影响。从而引起我国学者和机构开始重视改进革新废水治理的方式^[15],二氧化碳法应用于废水处理相关文献数量迅速增加。

(3)稳定波动阶段(2014年—至今):文献数量维持在15—28篇之间波动。尽管二氧化碳处理法具备安全、环保、经济等优点,整体上该领域相关研究目前主要集中在高校。相关产废水单位和环境保护企业对二氧化碳处理废水相关研究涉及较少,研究力量单一、规模小、市场化应用和推广有限。

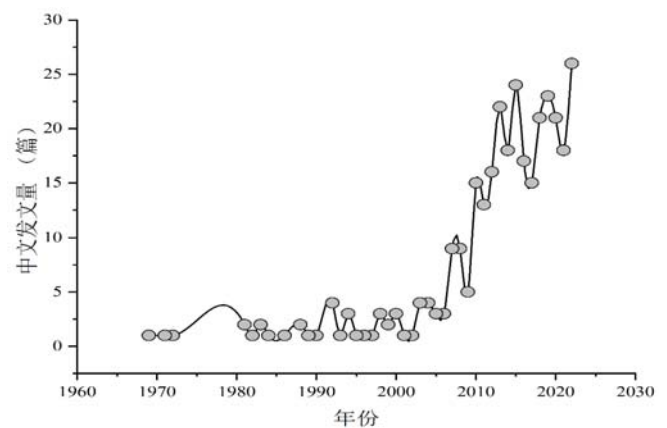


图1.2 中文文献有关CO₂应用在废水处理领域年度发文量

对比图1.1和图1.2可知,文献数量整体呈现上升趋势,二氧化碳应用于废水处理领域的研究日益重视国内外学者和机构重视,发文数量的变化趋势和最早发表的文献时间大体相同。然而,与非二氧化碳法废水处理技术相比,二氧化碳法应用于废水处理的相关研究文献仅占整个废水处理领域的0.4%,整个二氧化碳废水处理领域的研究规模相对较小,未来研究拓展空间广大。

2.2 关键词共现分析

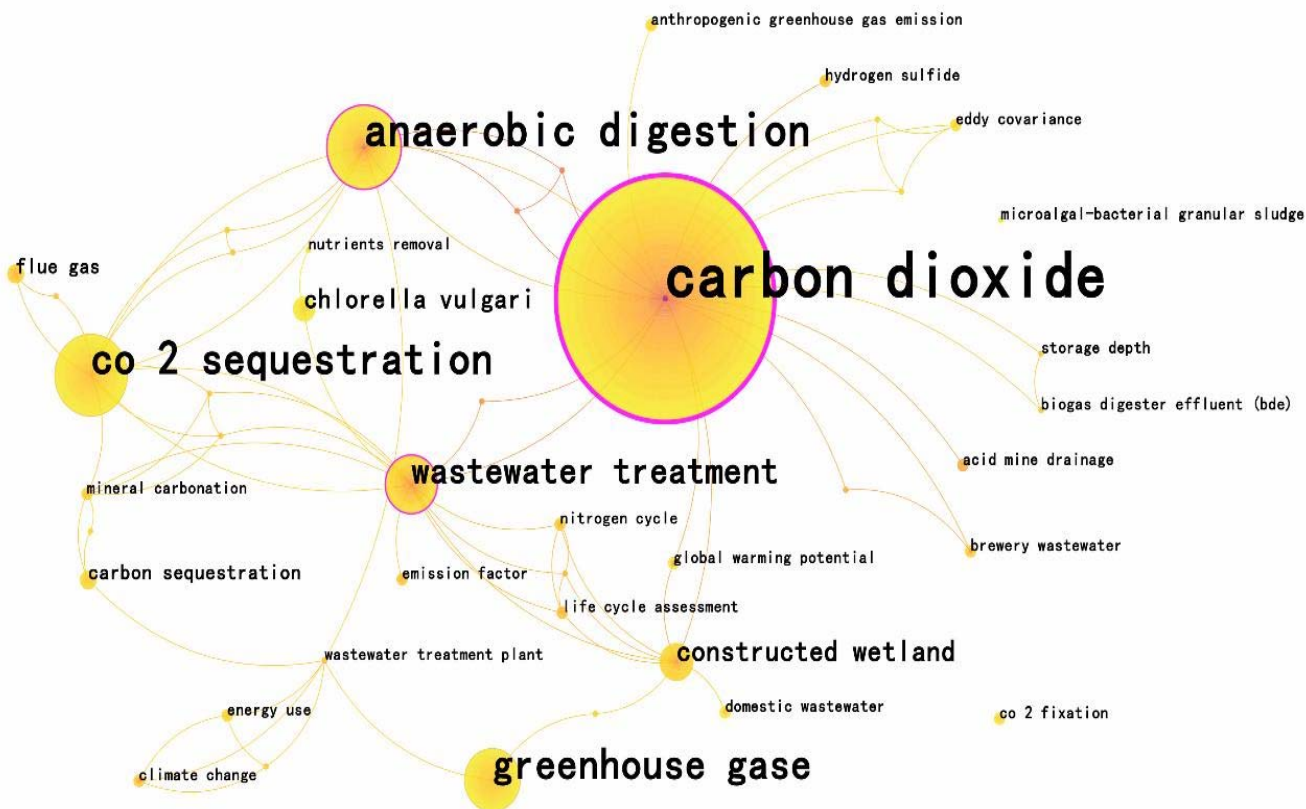


图 1.3 外文文献二氧化碳应用废水处理文献关键词共现网络可视图



图 1.4 中文文献二氧化碳研究文献关键词共现网络可视图

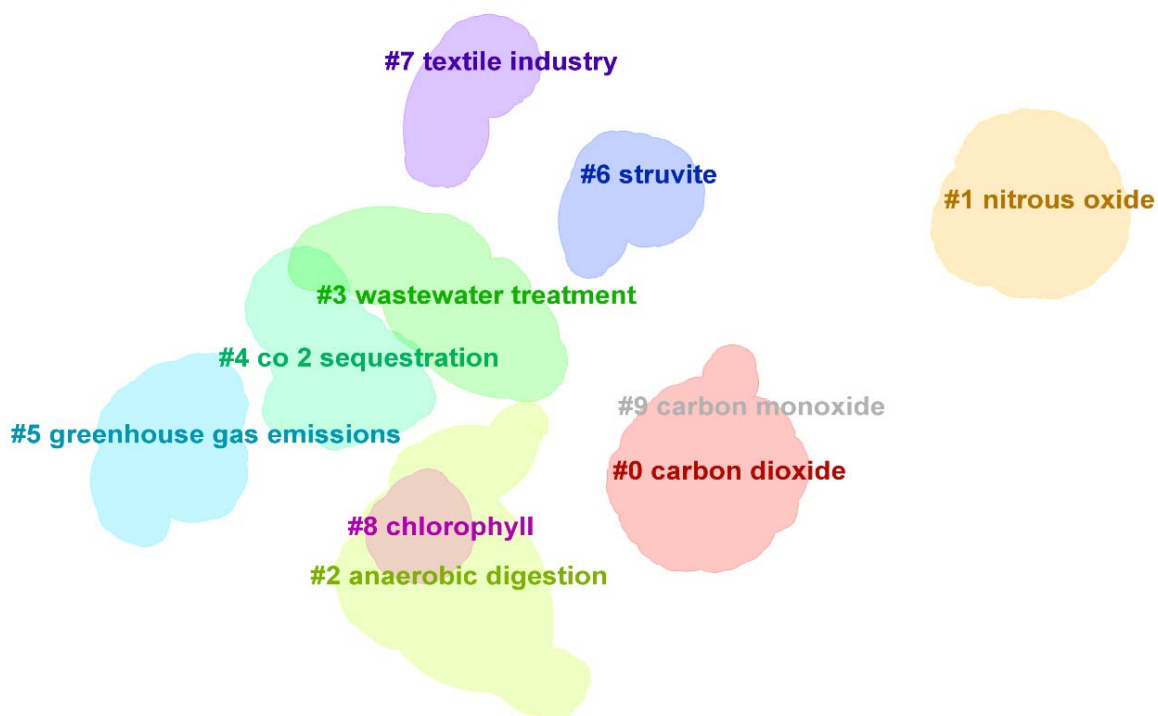


图 1.5 外文研究文献关键词聚类可视图

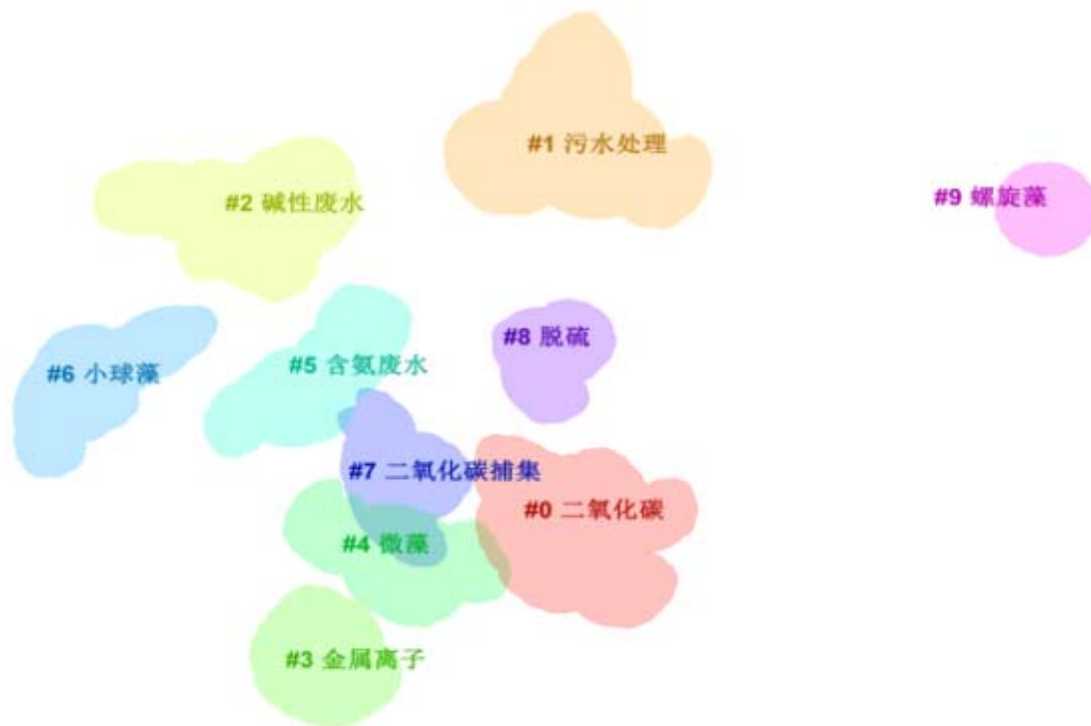


图 1.6 中文研究文献关键词聚类可视图

关键词是文章主题和核心观点的高度凝练,通过分析关键词和可视化,可以在一定程度上了解二氧化碳法应用废水处理领域研究概况和热点^[16]。运用CiteSpace软件分别对231篇外文文献及323篇中文文献生成关键词共现如图1.3和图1.4所示。在共现图中每一个节点均代表一个关键词,节点大小表示关键词出现频次的高低;节点连线表示关键词之间的共现关系,线条的粗细程度代表两个节点(关键词)的共现次数,数量越多、线条越粗代表这两个关键词之间共现次数越多。

从图1.3可以看出,除主题词二氧化碳(carbon dioxide)外,二氧化碳固定(CO₂sequestration)温室气体(greenhouse gas)和人工湿地(constructed wetland)等关键词在相关文献中相比其他关键词共现的次数多,代表了该领域外文文献研究中关注的热点方向,梳理文献发现,该类文献主要关注温室效应和污水处理这两类环境污染难题,研究大多集中在通过实现工业化副产品二氧化碳的捕集与污水处理协同方面。Masindi提出一个集污水处理和吸收二氧化碳的创新方法,利用二氧化碳投入富钙和磷的污水回收系统,用于污水鼓泡与浓缩的CO₂导致其矿化,实现污水处理和CO₂储存为稳定的碳酸盐矿物。^[17]Ye Y通过电催化技术将CO₂还原与废水中氮污染物还原耦合,生产更高价值的产品(如尿素、酰胺、胺类等,显著扩展CO₂还原技术的应用场景和产品种类,缓解人类过度排放CO₂所带来的严重环境和能源问题的一种有前途的方法^[18]。Tamil Selvan利用CO₂作为小球藻RDS03的营养供给剂,整合生态技术处理纺织染料废水,纺织染料出水水质实现大幅度提高^[19]。此外,厌氧消化(anaerobic digestion)和二氧化碳固定(CO₂ sequestration)、球藻(chlorella vulgari)、人工湿地(constructed wetland)等与文章主题词二氧化碳(carbon dioxide)和废水处理(wastewater treatment)之间的连线的数量多且较粗,相关文献研究关注点放在温室气体控制同水环境污染控制这两方面,也充分表明在全球气候和水环境污染日益严重的大背景下,国外协同废水处理和碳捕集过程处理将是未来研究重点关注方向和趋势。

从图1.4可以看出,除主题词“二氧化碳”和“废水”外,根据图中研究文献各关键词大小、连线数量与粗细程度的差异,可将图中节点较大的关键词分为两大类,一是以关注废水处理,净化水质为出发点的关键词,pH值中和、印染工业、金属、含氧废水、水硬化、水动力学,该类关键词对应文献多以把二氧化碳作为废水处理剂,研究集中在软化水给水、重金属离子去除和代替危险性酸(硫酸、盐酸)降低高浓度碱性废水pH等领域,相较于传统工业生产过程外排碱性废水中和剂硫酸和盐酸可显著提升碱性废水处理效率^[20-22],该方法也一直被广泛应用于钢铁、印染、皮革等生产过程中高浓度碱性废水外排较多的行业,基于该法的优势,部分学者和机构尝试利用二氧化碳中和隧洞施工、矿山开发等工程建设行业中,研究结果表明二氧化碳作为碱性废水中和剂,不仅提升碱性废水处理效率,同时显著降低处理经济成本,处理10000m³隧洞外排碱性废水的成本仅约为传统矿物酸处理工艺费用成本的8.2%^[23-24]。此外碳排放、小球藻、光电反

应、二氧化碳减排、碳固定等关键词对应文献将二氧化碳视为“危害性气体”,通过生物藻类碳固定过程,以工业化副产品或游离在大气中的二氧化碳作为生物藻类营养源供给,通过藻类生物吸附作用等净化水质。在微藻类生物增值的过程中又净化废水水质,实现以废治废的目标^[25-26],但生物藻类固碳效率受光照、温度、碳源、pH等外在条件影响大,受研究局限性影响,固碳增值目前无法达到理想状态限制了该工艺大规模发展^[27],但在全球气候严峻和水环境污染双重背景下,利用二氧化碳作为营养原实现生物增值和污水协调处理研究必须解决的一大难题,该方向也是该领域研究的热点趋势方向。

2.3 关键词聚类特征分析

聚类分析能够定量研究事物分类和分区问题。研究通过CiteSpace6.1.R3软件中的聚类模块进行分析,以LSI算法进行关键词聚类,分别得到国内外二氧化碳应用废水处理研究领域的关键词聚类图(图1.5和图1.6)。聚类模块值(Modularity,简称Q值)和聚类平均轮廓值(Silhouette,简称S值)是共线网络模块化的评价指标,网络的Q值和S值越大,则表示该网络的聚类越好,当Q>0.3时就意味着聚类结构显著;当S>0.7意味着聚类结果是令人信服的^[28]。由图1.5可知国外文献共生成#0—#9共10个聚类模块,编号越小代表包含的关键词数量越多Modularity Q值为0.8478, Silhouette 值为0.9492表明网络聚类结构显著,网络聚类内部同质性较高,以主题词学科“#0Carbon dioxide”和“#3Wastewater treatment”为中心向四周发散,包括“#1anaerobic digestion”、“#2CO₂ sequestration”、“#4greenhouse gas emission”、“#5textile industry”、“#6carbon monoxide”等。对文献进行总结,聚类#6、聚类#7、聚类#9可归为产废水企业或废水所属性质、聚类#2、聚类#8同为废水处理工艺、聚类#1、#4、聚类#5为碳减排协同废水处理结合研究,相关文献研究起步早,时空跨度大,是长期以来外文文献研究关注的热点话题,表明国外该领域中更倾向关注二氧化碳减排与废水处理协同结合研究。

由图1.6可知国内文献共生成编号10个聚类模块Modularity 值为0.8748, Silhouette值为0.9462,表明聚类可信度高,对文献进行总结归纳发现,除聚类词#0和#1外,二氧化碳处理废水相关文献根据利用二氧化碳方式的差异可分为两类,一是直接应用二氧化碳作为水净化处理剂,#2,#5侧重高碱废水降pH值; #3,#8以二氧化碳与废水污染物生成沉淀无害盐,侧重水软化处理;而#4,#6,#7,#9侧重于碳减排和废水处理协同研究,属于间接应用。结合本文2.2关键词共现分析部分结果可知,二氧化碳应用于废水处理研究中,研究热点趋向在软化水给水、碱性废水降pH和重金属离子去除、废水处理协同碳减排工艺等三方面。

2.4 热点突现性分析

突现性检测(Burst detection)表示节点在某一时段研究兴衰的现象,该关键词在某时间段内突现增长并在此时间段内引起高度重视。不同年份研究人员所关注的研究热点不同国外二氧化碳应用废水处理领域研究文献关键词突现性由表1所示,

以2010和2017年为分界线,分为两个阶段:第一阶段为2010年前,该阶段没有形成突现词,研究内容整体比较分散;第二阶段为(2010—2017年),关键词热度逐渐增多,整体突现强度差异不大,以“温室气体排放(Greenhouse gas emission)”和“消化处理(Anaerobic digestion)”两个关键词突现性最高;第三阶段为(2017—至今),突现强度高、持续时间长的两个关键词为“废水污泥(Sewage sludge)”和“二氧化碳固定(Carbon dioxide fixation)”,梳理文献发现,2010年以前,外文文献最初在开展研究时多以将二氧化碳作为酸碱中和剂,将二氧化碳添加到循环硬水中或需要控制pH值的污水中以保持所需的pH值,该方法为使用更强和更危险的酸来维持循环水系统中较低的pH值提供了一种有利的替代方案,研究多以控制pH值为基础开展, Panjapornpon Chanin利用二氧化碳实时pH控制在补料间歇鼓泡塔反应器中中和碱性废水、Lee Junghyun及Richa Sehgal等学者利用二氧化碳中和含碱性废弃物的海洋污水。但作为二氧化碳作为中和剂处理碱性废水研究文献数量偏低整体,尚未受到国外该领域学者和机构重视^[29-31]。2010年后,随着温室效应等气候污染与水环境污染越发严重,在可再生和可持续发展大背景下,如何利用工业化副产品排放的二氧化碳协同实现污水处理研究开始受到关注,Geetanjali Yadav利用微藻对工业废水和烟道气进行资源化利用的生物炼制用于废物减排,Roberts David通过二氧化碳与藻类的相互作用,探索了二氧化碳对生物能源和生物修复应用的工业废水中藻类生长的影响,结果表明二氧化碳在提升生物质能,促进含重金属水质净化发挥重要作用,Koreivienė揭示了小球藻、栅列藻与二氧化碳相互作用后对降低水体富营养化方面的良好效果。生物藻类因可吸收二氧化碳作为营养源,同时在净化水质方面表现的特性天然的成为了外文文献关注的重点^[32-33],利用二氧化碳为生物藻提质的特性应用废水处理实践中也将成为研究重点趋势方向和热点。

表1 CO₂应用废水处理关键词突现检测

Keyword	Strength	Begin	End
Constructed wetland	1.31	2010	2017
Life cycle assessment	1.23	2010	2012
Biogas digester effluent	1.26	2014	2014
Storage depth	1.26	2014	2014
Greenhouse gas emission	1.49	2015	2018
Anaerobic digestion	1.44	2015	2017
Sewage sludge	3.44	2017	2022
Chlorella vulgari	1.77	2017	2022
Carbon dioxide fixation	2.95	2021	2022
Nutrients removal	1.23	2021	2022

表2为国内CO₂应用废水处理关键词突现性分析。分三个阶段初期探索阶段(1969—2006年)突现词为水软化和含氰废水,其中水软化突现性最高,突现强度为1.77,突现持续时间为34年,这一阶段于利用CO₂降废水硬度,软化水处理研究文献较多^[34-35],(2007—2013年)为快速增长阶段,发表文献数量多,相应突现关键词多,依次为pH、碱性废水、二氧化碳减排、含金属废水。其中碱性废水和二氧化碳减排两个关键词突现性最高,突现强度分别为1.73与1.55。碱性废水降pH值被视为水处理最基本的要求,利用CO₂代替传统危险性无机酸中和碱性废水pH值工艺过程设备控制简单安全、处理效率高、处理成本低廉等优势使碱性废水处理已逐渐从强酸中和向CO₂中和发展^[36-37],尽管二氧化碳在取代传统性酸中和工业或施工建设过程外排碱性废水拥有经济、绿色、高效的优势,但该法在我国整个碱性废水处理相关研究文献中仅占7.4%,应用和拓展度不高。二氧化碳等温室气体排放负面影响日益严重,节能减排、提升资源利用率观念深入人心,二氧化碳吸收、捕集协同废水处理工艺该阶段开始受到关注。(2014年—至今)波动增加阶段,回收利用、二氧化碳捕获、小球藻等关键词热度较高,小球藻类生物因具备捕获、利用、吸收的CO₂处理废水的优良性能在可持续发展理念,资源循环利用大背景下受到关注,该阶段涌现大量生物藻类结合二氧化碳应用废水处理领域研究文献^[38-40],也表明该领域是当前研究关注的重点方向和热点趋势。

表2 中文二氧化碳应用废水处理关键词突现检测

关键词	突现强度	起始年份	终止年份
水软化	1.77	1969	1996
含氰废水	1.65	1981	1998
pH	1.43	2007	2015
碱性废水	1.73	2008	2015
二氧化碳减排	1.55	2010	2013
金属	1.41	2011	2017
光催化	1.78	2017	2019
小球藻	2.63	2017	2022
回收利用	2.24	2019	2022
二氧化碳捕获	1.88	2020	2022

3 结论与展望

3.1 结论

根据对中国知网(CNKI)数据库中二氧化碳在废水处理方面相关文献的统计和可视化分析,利用CNKI数据库自带工具和Citespace 5.0知识图谱可视化软件,得出以下结论:

(1)从文献发表时间和数量的角度看,二氧化碳法处理废水研究始于上世纪60年代,年发文量总体呈上升趋势,并经历了

“探索起步”、“波动发展”和“缓慢增长”三个发展阶段。在全球水气候污染和水污染问题日益严峻的背景下,随着各国对水资源和气候保护的重视有所提高,利用工业化副产品二氧化碳协同处理废水相关研究有望得到进一步发展。

(2)从关键词共现、聚类 and 突现等方面看,“软水处理”、“降pH”、“碳减排”、“碳固定”和“藻类生物”是国内外研究领域较为关注的热点。中文文献研究更关注将二氧化碳作为废水处理剂原料,代替传统矿物性酸中和碱性废水处理效果好,兼具绿色、经济、安全特性,但应用和行业拓展度有限。外文文献则倾向于将二氧化碳视为危害性气体,与废水处理协同结合开展研究。近年生物藻在固碳和污水水质净化方面表现出的优异特性受到国内外学者共同关注,该方面研究文献数量整体上占据本次研究文献数量的篇幅相对较多,是二氧化碳应用废水处理一个重要研究热点和方向。

3.2 展望

近年来,国内外二氧化碳法处理废水领域研究取得了一定进展,研究成果不断涌现。但通过对文献梳理总结发现在应用行业及学者机构合作研究等方面存在局限。未来可在以下几个方面进一步探索:

(1)总结当前二氧化碳法处理废水领域相关文献研究方向可分为两类:一是以关注废水水质净化为出发点,CO₂来源多样;二是以关注二氧化碳的减排为出发点,吸收大气和工业化的副产品CO₂与废水协同处理工艺研究文献量较少且以大气和工业化生产作业中的副产品CO₂为主。未来应加大该方面研究力度,实现以废治废的废水处理工艺。

(2)二氧化碳废水处理工艺具有安全、环保、经济等多种优点,并已得到实践证明,但梳理文献发表机构发现,目前社会应用层面拓展度不高。多数研究集中在钢铁、印染皮革、有色金属等企业生产废水行业,未来应拓展二氧化碳法的社会应用面,实现更高层次的废水资源化利用。

[基金项目]

滇中引水科技项目(DZYS-ZZ-GCBF-SJ-012)和云南大学研究生人才培养模式改革计划(CZ22622203)共同资助。

[参考文献]

[1]柳洋,李志山.二氧化碳在工业水处理中的应用概述[J].低温与特气,2016,34(05):8-10.

[2]梅塞尔集团中国总部.二氧化碳为工业污水处理增添活力[J].纺织报告,2016,398(11):22-24.

[3]William W Brooks. Use of carbon dioxide to reduce the pH in circulating hard water[J].Environment International, 1985,11(5):1.

[4]Farmer Richard W. et al. Activated carbon treated by carbon dioxide for the stabilization of treated water pH and the control of aluminum in the treated water[J].US-5876607-A[P],1999-03-02.

[5]赵洪贵,陈朋伟,庄小波.废水降低硬度后回用实践[J].硫

酸工业,2017,275(08):35-37.

[6]佟国建.锅炉烟气和废烧碱对降中水硬度的影响[J].节能,2020,39(02):148-149.

[7]徐彤彤,刘伟,葛庆燕.微藻在污水处理中的二氧化碳减排作用与机制[J].环境科学与技术,2022,45(12):133-144.

[8]孔乙杰,王研,王蕊.微藻固定CO₂协同处理污水研究进展[J].轻工科技,2019,35(08):112-113+131.

[9]李海涛,汪东.精对苯二甲酸生产废水处理与CO₂协同利用技术的实践与展望[J].化工进展,2022,41(03):1000-6613.

[10]王帆,阿琼,姜姝,等.生物膜法处理污水的研究现状及新兴趋势的可视化分析[J].四川环境,2022,41(05):314-324.

[11]骆泽旭,舒诗湖,朱延平,等.基于CiteSpace知识图谱的污水处理碳排放分析[J].上海工程技术大学学报,2023,37(03):311-317.

[12]高琼.我国污水土地处理技术研究进展[J].山西水土保持科技,2014,(04):1-4.

[13]夏兴.我国农村生活污水处理技术的研究进展[J].中国资源综合利用,2019,37(09):84-86.

[14]瞿桃青.我国城市生活污水处理研究进展[J].民营科技,2018,(09):94.

[15]李培欢.国内生态环境治理研究:发展历程、脉络转换与范式解读[J].党政干部学刊,2022,(12):24-30.

[16]李思达,张海峰,徐敏.基于CiteSpace的海洋空间规划研究进展分析[J].海洋开发与管理,2022,39(01):23-30.

[17]Vhahangwele M, Spyros F, Phil R, et al. Wastewater Treatment for Carbon Dioxide Removal[J].ACS omega,2023,8(43):40251-40259.

[18]Ye Y, Zhe L, Shichao D, et al. Synergistic treatment of carbon dioxide and nitrogen-containing wastewater by electrochemical C-N coupling[J].iScience,2023,26(7):107009.

[19]Silambarasan S T, Manickam B D, Ravikumar C et al. Integrating eco-technological approach for textile dye effluent treatment and carbon dioxide capturing from unicellular microalga *Chlorella vulgaris* RDS03: a synergistic method[J]. International journal of phytoremediation,2022,25(4):11-17.

[20]操家顺,钱唐健,李超.CO₂代替硫酸中和印染废水对厌氧处理的影响[J].环境科学研究,2019,32(08):1411-1418.

[21]喻朝善.CO₂在乙烯裂解加氢废水处理中的应用[J].石油化工应用,2007,78(01):58-60.

[22]吴雪飞,胡涛,朱文滨.利用二氧化碳调节pH值的扩散器及其调节方法[J].CN111807494A [P/OL].2020-10-23.

[23]郭召东,王星,魏震,等.运用二氧化碳气体控制碱性废水pH值的技术[J].云南水力发电,2023,39(02):6-9.

[24]王伟建,郑小慧,晁会霞,等.二氧化碳利用新途径的研究进展评述[J].钦州学院学报,2018,33(05):16-22+48.

[25]徐彤彤,刘伟,葛庆燕,等.微藻在污水处理中的二氧化碳

减排作用与机制[J].环境科学与技术,2022,45(12):1003-6504.

[26]郭宝文,李煦,宗保宁,等.微藻固碳实现CO₂减排与生物质增值[J].石油学报(石油加工),2023,39(03):668-678.

[27]郑玉彬.微藻生物固碳与废水处理关键技术开发.四川省,四川轻化工大学,2021-03-25.

[28]郑善枫,王艳伟.基于CiteSpace的改善中国农村人居环境研究综述[J].中国农学通报,2022,38(16):155-164.

[29]Chanin P,Pawat S,Kittayot J,etal.Input/Output Linearization for a Real-Time pH Control: Application on Basic Wastewater Neutralization by Carbon Dioxide in a Fed-Batch Bubble Column Reactor[J].Engineering Journal,2019,23(5):229-241.

[30]Junghyun L ,Misun P ,Jisun J , et al.Capture and Ocean Storage of Carbon Dioxide Using Alkaline Wastes and Seawater [J].Journal of Korean Society of Environmental Engineers,2017, 39(3):149-154.

[31]Sehgal R ,Sehgal L ,Nema K A , et al.Carbon Dioxide Sequestration in Alkaline Top Soil Using Alkaline Wastes[J].APCBEE Procedia,2014,987-91.

[32]A D R,Rocky N D,A N P.The effect of CO₂ on algal growth in industrial waste water for bioenergy and bioremediation applications.[J].PloS one,2013,8(11):e81631.

[33]Koreivienė, Valčiukas, Karosienė, et al. Testing of Chlorella/Scenedesmus microalgae consortia for remediation

of wastewater, CO₂/sub mitigation and algae biomass feasibility for lipid production[J].Journal of Environmental Engineering and Landscape Management,2014,22(2):105-114.

[34]赵洪贵,陈朋伟,陆山青.二氧化碳除硬度工艺实践[J].硫酸工业,2023,(01):44-46.

[35]符磊,满瑞林,扶强,等.二氧化碳软化高硬度废水的研究[J].工业安全与环保,2018,44(05):35-38.

[36]张晓曦,成怀刚,程芳琴.雾化氛围中二氧化碳调节含氮溶液pH值的研究[J].能源化工,2015,36(02):78-81.

[37]董良宇,曹鹏.碱性工业废水吸收二氧化碳调节pH值的研究[J].广东化工,2019,46(20):12-14.

[38]安浩,吴鑫明,操家顺,等.菌藻共生系统污水处理及CO₂固定作用机制的研究进展[J].净水技术,2024,43(03):39-46.

[39]雍黎,单倩澜.微藻:“吃”下二氧化碳,“吐”出生物油[J].环境与生活,2022,(07):62-63.

[40]雍黎,单倩澜.微藻:“吃”下二氧化碳,“吐”出生物油[J].环境与生活,2022,(07):62-63.

[41]李海涛,汪东.精对苯二甲酸生产废水处理与CO₂协同利用技术的实践与展望[J].化工进展,2022,41(03):1132-1135.

作者简介:

田土(1996--),男,土家族,贵州省铜仁市人,硕士研究生,云南大学国际河流与生态安全研究院,学生,研究方向:生态水文及环境工程。