

• “人工湿地深度净化城镇污水处理厂尾水”特色研究专栏 •

编者按:为破解我国水资源短缺问题和提高用水效率,国家有关部门和地方政府陆续出台《关于推进污水资源化利用的指导意见》《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》《区域再生水循环利用试点实施方案》《2022年区域再生水循环利用试点城市名单》《重点流域水生态环境保护规划》等政策和措施,着手构建污染治理-生态保护-循环利用有机结合的区域再生水循环利用体系。其中,在污水处理厂下游因地制宜建设尾水型人工湿地水质净化工程,有利于实现水资源、水环境、水生态的系统治理和统筹推进。本刊特邀太原理工大学城市水系统与水土环境研究团队以人工湿地技术深度净化城镇污水处理厂尾水为主要内容,组织策划了本期专栏,对我国尾水人工湿地技术的研究和实践成果进行梳理与展示。全面梳理和总结了国内外人工湿地研究动态(基于CiteSpace文献计量学分析技术)、尾水型人工湿地建设及应用现状;分析了尾水型人工湿地技术标准实施状况,对不同层面尾水人工湿地技术标准从工艺选型、设计参数等方面进行了对比分析;展示了外加碳源对生物炭基潜流人工湿地净化污水处理厂尾水的影响相关试验研究成果,为进一步推动我国污水处理厂尾水人工湿地生态技术研究和工程实践提供参考和支撑。

太原理工大学城市水系统与水土环境研究团队多年来针对城市水系统,开展了海绵城市、防洪排涝、城镇给排水系统优化与智慧水务的研究工作;针对城市水环境问题,开展了城市供水水质安全保障、市政污水处理、工业废水处理,以及生态湿地系统水处理过程研究;针对土壤和地下水,开展了生物炭对土壤中氮循环影响机理、土壤重金属污染物固定化与原位修复、水资源利用与保护、地下水中污染物的迁移、地下水环境影响评价等研究工作。

侯耀钧,陈启斌,王朝旭,等.基于CiteSpace的国内外人工湿地研究动态与未来展望[J].环境工程技术学报,2023,13(4):1275-1286.

HOU Y J, CHEN Q B, WANG C X, et al. Research trends and future prospects of constructed wetlands at home and abroad based on CiteSpace[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2023, 13(4): 1275-1286.

基于 CiteSpace 的国内外人工湿地研究动态与未来展望

侯耀钧^{1,3}, 陈启斌¹, 王朝旭¹, 王永², 李作臣², 王亚炜³, 李亚男¹, 崔建国^{1*}

1. 太原理工大学环境科学与工程学院

2. 中电建市政建设集团北方国际工程有限公司

3. 中国科学院生态环境研究中心

摘要 人工湿地因具有耗资少、处理效果好等优点受到国内外学者的高度关注,相关研究文献数量大幅增长,但有关人工湿地领域的文献分析相对缺乏。基于文献计量学的方法,以中国知网(CNKI)核心期刊数据库和 Web of Science(WoS)核心合集数据库为数据源,利用 CiteSpace 等软件对 2000—2021 年人工湿地领域国内外发表的文献进行统计分析;基于年发文量、发文国家、发文作者、研究方向和研究热点演化等的对比分析,揭示国内外研究动态差异。结果表明:2000—2021 年,国内外关于人工湿地研究的年发文量呈快速上升趋势;在 WoS 核心合集数据库中,中国学者发文量居世界首位。国外人工湿地领域的主要研究方向,在传统研究的基础上还关注到了耦合微生物燃料电池技术与个人护理品等新兴污染物的去除等;国内人工湿地领域的主要研究方向围绕除污机理、除污效能、除污对象及其应用 4 方面展开。利用基因测序技术从微观角度研究人工湿地和人工湿地-微生物燃料电池耦合技术将是近年人工湿地领域的研究热点。人工湿地技术已进入成熟阶段,未来有望与更多新兴领域结合。

关键词 人工湿地;文献计量学;知识图谱;研究热点;污水处理

中图分类号: X703 **文章编号:** 1674-991X(2023)04-1275-12 **doi:** 10.12153/j.issn.1674-991X.20220788

收稿日期:2022-11-14

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41977151);山西省自然科学基金项目(201901D111066);校企合作项目

作者简介:侯耀钧(1999—),男,硕士研究生,主要从事河流污染控制研究,913589252@qq.com

* 责任作者:崔建国(1965—),男,教授,博士,主要从事水环境污染控制研究,afh2005@163.com

Research trends and future prospects of constructed wetlands at home and abroad based on CiteSpace

HOU Yaojun^{1,3}, CHEN Qibin¹, WANG Chaoxu¹, WANG Yong², LI Zuo Chen², WANG Yawei³,
LI Yanan¹, CUI Jianguo^{1*}

1.College of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology

2.Stecol Corporation North International Engineering Co., Ltd.

3.Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences

Abstract Constructed wetlands have the advantages of low capital consumption and good treatment effect, etc., and it has been highly concerned by domestic and foreign scholars. The related research papers have grown significantly, but there is a relative lack of literature analysis in the field of constructed wetlands. The domestic and foreign papers on constructed wetlands in China National Knowledge Infrastructure (CNKI) core journal database and Web of Science (WoS) core collection database from 2000 to 2021 were statistically analyzed by the bibliometric methods using CiteSpace and other software. Based on the comparative analysis of the annual quantity of papers, publication countries, publication authors, research directions and research hotspot evolutions, the research trend differences at home and abroad were revealed. The results showed that from 2000 to 2021, the annual quantity of published papers on constructed wetlands research at home and abroad was on a rapid rise. The quantity of English papers published by Chinese scholars ranked first in the world in WoS core collection database. The main research direction in the field of foreign constructed wetlands also focused on the coupling of microbial fuel cell technology and the removal of emerging pollutants such as personal care products on the basis of traditional research. The main research direction in the field of domestic constructed wetlands revolved around four major categories of decontamination mechanism, decontamination efficiency, decontamination objects and their application. The use of gene sequencing technology to study constructed wetlands from a microscopic perspective, and the constructed wetland-microbial fuel cell coupling technology would be the research hotspots in the field of constructed wetlands in recent years. Constructed wetland technology had entered a mature stage, and was expected to be combined with more emerging fields in the future.

Key words constructed wetlands; bibliometrics; knowledge mapping; research hotspots; wastewater treatment

1953年,德国学者 Seidel 在研究中发现芦苇地具有水质净化的功能,并构建出人工湿地的雏形。1972年,德国学者 Kichunth 在前者基础上,提出根区法(the root-zone-method)理论,强调了高等植物在湿地污水处理系统中的去除污染物作用,之后人工湿地技术开始受到关注并在工程中得到了应用^[1]。20世纪80年代,欧洲、北美洲等地区的国家,陆续在官方技术指南中将人工湿地确定为一种有效的污水处理技术^[2]。1996年,在维也纳召开的第4届人工湿地国际研讨会,标志着人工湿地作为一种新型污水处理技术正式进入水污染控制领域^[3]。2000年以来,人工湿地因其成本低、易管理、生态友好、脱氮除磷能力强和兼具景观价值等优点^[4],对水质净化、生态修复和景观建设具有重要意义,已广泛应用于生活污水、工业废水、养殖场废水和污水处理厂尾水等的处理。截至2006年,欧洲有1万多座人工湿地,北美洲有近2万座人工湿地^[5];截至2020年底,中国已建成人工湿地1171座^[6]。

2000年至今,国内外学者在人工湿地领域取得了重大研究进展,发表的相关文献已有数万篇,相关的总结和综述也已超百篇,但目前对国内外人工湿地领域的研究动态和演变进行全面梳理和述评的文献较少。笔者通过文献计量学方法,基于 CiteSpace 等软件统计分析 2000—2021 年国内外人工湿地领域的文献,通过软件导出的可视化知识图谱,解析研究动态,预测未来发展趋势,以期为国内人工湿地的深入研究提供参考。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

以 2000 年以来国内外学者在人工湿地领域发表的核心数据库期刊文献为研究对象,文献来源于中国知网(CNKI)核心期刊数据库和 Web of Science (WoS)核心合集数据库,检索时间为 2000 年 1 月 1 日—2021 年 12 月 31 日。在 CNKI 核心期刊数据库中采用“主题”的检索方式,检索词汇为“人工湿

地”,文献类别为学术期刊;在 WoS 核心合集数据库中检索式“TS= (“constructed wetland*”) or TS= (“artificial wetland*”)”进行精准检索,检索式字段 TS 表示主题,文献类别选用论文、综述和在线发表,文献语言选择 English。通过人工阅读去除无关文献,最终确定了 4 056 篇中文文献和 9 465 篇英文文献。其中,英文文献中有 2 805 篇由中国学者发表,将其与中文文献合并为国内文献(6 861 篇),剩余 6 660 篇英文文献为国外文献。

1.2 研究方法

文献计量分析采用 CiteSpace 软件 v6.1.R3,设置年份切片为 1 年,分别对国内外人工湿地领域文献的发文作者、研究方向及研究热点演化进行可视化分析并生成相应的知识图谱,将年发文量、发文国家、发文机构、发文期刊、高被引文献等计量结果绘制成相应图表。

2 结果与分析

2.1 年发文量

2000—2021 年人工湿地领域年发文量变化如图 1 所示。国内外人工湿地领域年发文量总体呈现出快速增长趋势,表明人工湿地研究处于持续推进和快速发展中。从图 1 可以看出,国外文献年际发文量变化曲线可以划分为 2 个区间:第一区间(2000—2015 年)为总体较快增长区,其中 2000 年发文 93 篇,2015 年则增长至 402 篇,发文量年际虽存在一定的波动,但总体上增长了 3.3 倍;第二区间(2016—2021 年)为加速增长区,人工湿地研究方向和内容不断拓展,包括印度、巴西等在内的发展中国家也开始研究和应用人工湿地,使国外英文文献年发文量连续 5 年年平均增长率保持在 11.4%,2021 年发文量达到峰值(654 篇)。

国内人工湿地研究起步较晚但发展迅速。2000 年,国内年发文总量(中文、英文文献之和)相比国外差距较大;2001—2011 年,国内年发文总量进入快速增长阶段,且以中文文献为主,国内年发文总量迅速增长与我国实施了国家水体污染控制与治理科技重大专项等项目密切相关,并且人工湿地高效去除污染物和低成本的优点符合当时中国的国情,引发了国内学者对人工湿地的持续深入研究^[7]。2011 年之后,国内人工湿地领域年发文总量的增长速率开始放缓,其中中文文献年发文量达到峰值并开始小幅下降,并逐渐进入稳定期;英文文献年发文量从 2008 年开始一直在快速增长,并于 2016 年超过中文文献,成为国内人工湿地研究文献的主要组成部

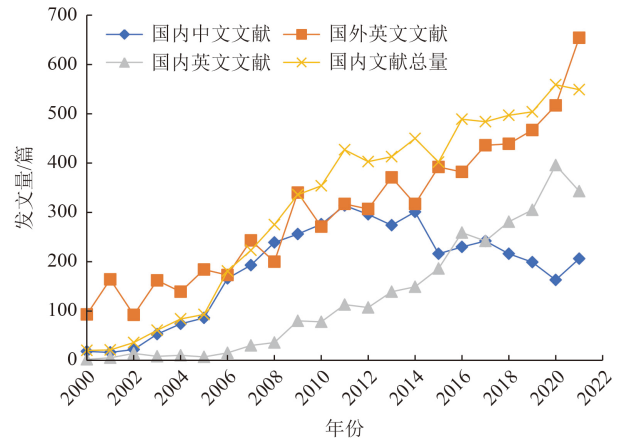


图 1 2000—2021 年人工湿地领域年发文量变化

Fig.1 Changes of the quantity of annual published papers in the field of constructed wetlands from 2000 to 2021

分。分析其原因:深度研究导致试验周期延长,进而引起国内文献发文量增长趋势放缓;大部分学者优先考虑在国际期刊投稿,导致近些年出现国内英文文献年发文量大于中文文献的现象。

2.2 发文国家

2000—2021 年 WoS 中人工湿地领域发文量排名前 10 的国家的地理分布如图 2 所示。从发文量排名上,中国发文近 3 000 篇,居世界首位;美国发文 1 700 余篇,位列第 2;其余国家的发文量远少于中国和美国,仅有 300~500 篇。从地理分布上,人工湿地领域发文量排名前 10 的国家中,除亚洲的中国和印度为发展中国家之外,其余均为发达国家;发文国家主要集中在欧洲,其中西班牙是欧洲地区发文量最多的国家;发文量排名前 10 的国家没有来自非洲和南美洲地区的,表明这些地区人工湿地研究热度及应用相对缺乏,这可能与当地政策导向、经济发展水平和气候地理条件有关^[8]。

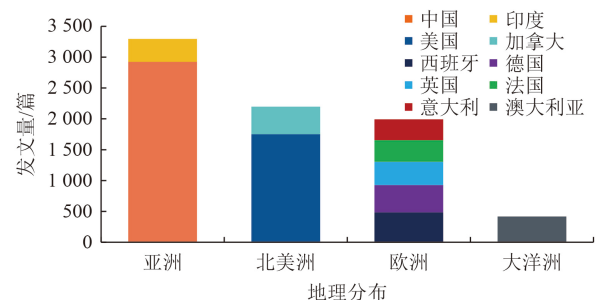


图 2 2000—2021 年 WoS 中人工湿地领域发文量排名前 10 的国家地理分布

Fig.2 Geographical distribution of the top 10 countries in terms of the quantity of published papers in the field of constructed wetlands of WoS from 2000 to 2021

2.3 发文机构

2000—2021 年人工湿地领域发文量排名前 10

的研究机构如表 1 所示。由表 1 可知,在国际人工湿地领域发文量排名前 10 的科研机构中,美国占有 3 席,且其发文量占全部发文量的 30.9%,表明美国仍是世界科研实力最强的国家;中国包括 2 家研究机构,发文量占比为 22.7%,且中国科学院大学是国际上发文量最多的研究机构,其发文量占全部发文量的 13.2%,表明中国作为唯一的发展中国家,科研实力在快速提升;美国农业部和法国国家农业食品与环境研究院等属于农业类机构,这些机构开展的有关人工湿地研究与应用领域更偏于农业。

我国国内发文量排名前 10 的研究机构来自于高等院校(8 个)和研究院所(2 个),说明高等院校是国内科研发文的主力军,但基于国际科技发展的趋势,应持续加强高校、科研机构 and 企业的科研合作^[9],不断提升我国科技竞争力。中国科学院大学的中英文文献发文量均居于首位,总发文量占国内全部发文量的 16%,表明其科教融合办学特色较大地促进了该研究型大学科研水平的全面提升和快速发展^[10];同济大学的中文文献发文量和中国科学院大学的英文文献发文量分别位列国内第一,而英文文献发文量占该机构发文总量的比例最高的则是山东大学(近 80%)。值得注意的是,与中国科学院大学同属中国科学院院属机构的中国科学院水生生物研究所发文总量位列国内第三,表明制度邻近对科研产出和技术创新具有正向溢出效益,且制度邻近水平越高,对技术创新效率的正向溢出效益越显著^[11]。

2.4 发文期刊

随着研究人员对学术期刊质量重视程度的提高,各种期刊影响力定量评价指标层出不穷^[12],但期刊的影响因子(IF)目前仍是期刊吸引高质量文献的重要条件和作者团队选择投稿期刊的参考^[13]。2000—2021 年人工湿地领域发文量排名前 5 的期刊如表 2 所示。*Ecological Engineering*(IF=4.379)是国际上发文量最高且唯一超 1 000 篇的期刊,同时,*Ecological Engineering* 不仅发文量远远超过其他 4 个期刊,而且在全部英文文献发文量的占比为 17.6%。发文量位列第三、五的高发文期刊 *Science of the Total Environment*(IF=10.754)和 *Bioresource Technology*(IF=11.889)的国际学术影响力较大。

人工湿地领域国内高发文期刊为《环境科学》(IF=3.936)、《生态学报》(IF=4.733)和《农业工程学报》(IF=3.446)等,其中《环境科学》以 150 篇的发文量位列首位。但需指出的是,与国际高发文期刊相比,国内发文期刊呈现出刊物数量多、集中度和单刊发文量低的特点,这可能与期刊的办刊宗旨和栏目设置有关。

表 1 2000—2021 年人工湿地领域发文量排名前 10 的科研机构

Table 1 Top 10 research institutions in terms of the quantity of published papers in the field of constructed wetlands from 2000 to 2021

国际领域发文机构			国内领域发文机构		
机构名称	所属国家	发文量/篇	机构名称	发文量/篇	
				中文文献	英文文献
中国科学院大学	中国	218	中国科学院大学	101	218
美国农业部	美国	186	同济大学	169	93
加州大学系统	美国	180	中国科学院水生生物研究所	122	102
亥姆霍兹环境研究中心	德国	173	山东大学	40	156
奥胡斯大学	丹麦	165	东南大学	91	101
山东大学	中国	156	浙江大学	63	107
法国国家农业食品与环境研究院	法国	154	河海大学	80	84
法国国家科学研究中心	法国	149	中国环境科学研究院	88	72
佛罗里达州州立大学系统	美国	143	重庆大学	94	61
加泰罗尼亚大学	西班牙	125	清华大学	77	77

表 2 2000—2021 年人工湿地领域发文量排名前 5 的期刊

Table 2 Top 5 journals in terms of the quantity of published papers in the field of constructed wetlands from 2000 to 2021

国际领域发文期刊			国内领域发文期刊		
期刊名称	发文量/篇	IF (2021年)	期刊名称	发文量/篇	IF (2021年)
<i>Ecological Engineering</i>	1 170	4.379	《环境科学》	150	3.936
<i>Water Science and Technology</i>	623	2.430	《生态学报》	61	4.733
<i>Science of The Total Environment</i>	545	10.754	《农业工程学报》	35	3.446
<i>Environmental Science and Pollution Research</i>	371	5.190	《应用生态学报》	21	3.893
<i>Bioresource Technology</i>	346	11.889	《自然资源学报》	11	6.098

2.5 发文作者

某一领域的主要发文作者对该领域的发展脉络、研究热点及趋势具有较精准的把握,持续跟踪主要发文作者及其团队的最新研究成果,可以实时了解到主流的研究方向。2000—2021 年人工湿地领域发文量排名前 10 的作者如表 3 所示。在国际上,发文量最多的作者是西班牙加泰罗尼亚理工大学的 Garcia J,发表了 86 篇英文文献;捷克布拉格生命科学大学的 Vymazal J 和西安理工大学的赵亚乾均发表 83 篇英文文献,并列第二。发文量排名前 10 的作者中,有 3 位作者(赵亚乾、张建和吴振斌)来自中国的高校或科研院所。2000—2021 年人工湿地领域

表 3 2000—2021 年人工湿地领域发文量排名前 10 的作者

Table 3 Top 10 authors in terms of the quantity of published papers in the field of constructed wetlands from 2000 to 2021

国际领域发文作者			国内领域发文作者				
作者姓名	所属机构	发文量/篇	作者姓名	所属机构	发文量/篇		
					中文文献	英文文献	合计
Garcia J	加泰罗尼亚理工大学	86	吴振斌	中国科学院水生生物研究所	103	52	155
Vymazal J	捷克布拉格生命科学大学	83	贺峰	中国科学院水生生物研究所	71	31	102
赵亚乾	西安理工大学	83	赵亚乾	西安理工大学	14	83	97
Brix H	奥胡斯大学	81	宋新山	东华大学	42	44	86
Scholz M	索尔福德大学	78	葛滢	浙江大学	35	51	86
Kusch P	亥姆霍兹环境研究中心	68	张建	山东大学	22	56	78
Langergraber G	维也纳自然资源与生命科学大学	56	成水平	同济大学	39	25	64
张建	山东大学	56	常杰	浙江大学	19	43	62
Arias C A	奥胡斯大学	55	谢慧君	山东大学	8	52	60
吴振斌	中国科学院水生生物研究所	52	崔理华	华南农业大学	40	16	56

国外作者合作图谱如图 3 所示, 发文作者之间的合作包括: 加泰罗尼亚理工大学的 Garcia J、Becares E 等的团队, 主要开展强化人工湿地对新型污染物和药物成分(如抗生素)去除的研究; 丹麦奥胡斯大学的 Brix H 和 Arias C A 等的团队, 主要开展比较人工湿地性能以及对病原微生物去除的研究。

根据表 3 所示, 2000—2021 年国内人工湿地领域发文总量最多的作者是中国科学院水生生物研究所的吴振斌, 共发表 155 篇文献, 其中中文文献 103 篇, 英文文献 52 篇, 并且吴振斌还是发表中文文献最多的作者; 西安理工大学的赵亚乾是发表英文文献最多的作者。2000—2021 年人工湿地领域国内作者合作图谱如图 4 所示。发文作者之间的合作

有: 中国科学院水生生物研究所的吴振斌、贺锋、成水平、徐栋、付贵萍等的团队, 目前主要开展有关人工湿地基质堵塞^[14]、低温环境下的除污效果强化^[15]和设计地方性示范工程^[16]等偏应用类研究; 山东大学的张建、胡振、吴海明、谢慧君、梁爽等的团队, 目前主要开展人工湿地新型耦合工艺效果、新兴污染物去除等前沿研究。

2.6 高被引文献

文献的被引次数在一定程度上可以反映出其在某领域学术交流影响力的大小, 被引用的次数越多, 得到业内同行的关注度就越高, 其学术影响力就越大。高被引文献往往表现为该文献抓住了某一研究阶段该领域的研究主题和热点, 引领了该领域的相

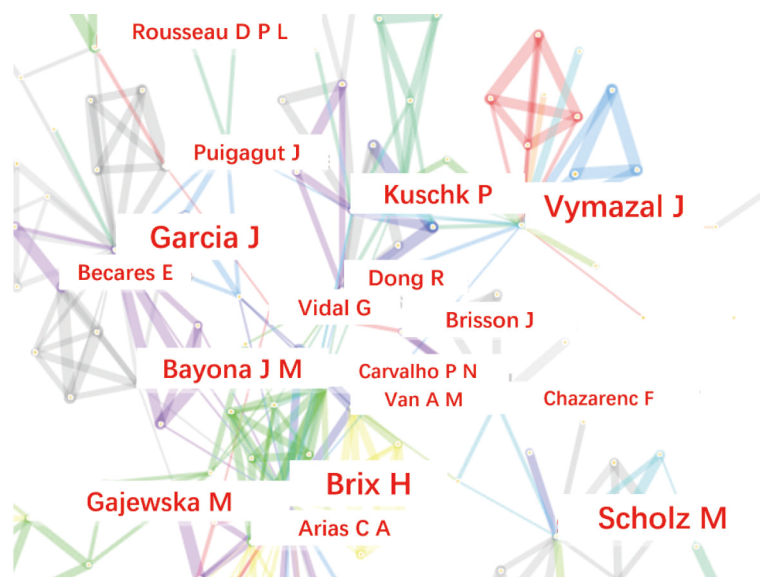


图 3 2000—2021 年人工湿地领域国外作者合作图谱

Fig.3 Collaborative map of the foreign authors in the field of constructed wetlands from 2000 to 2021

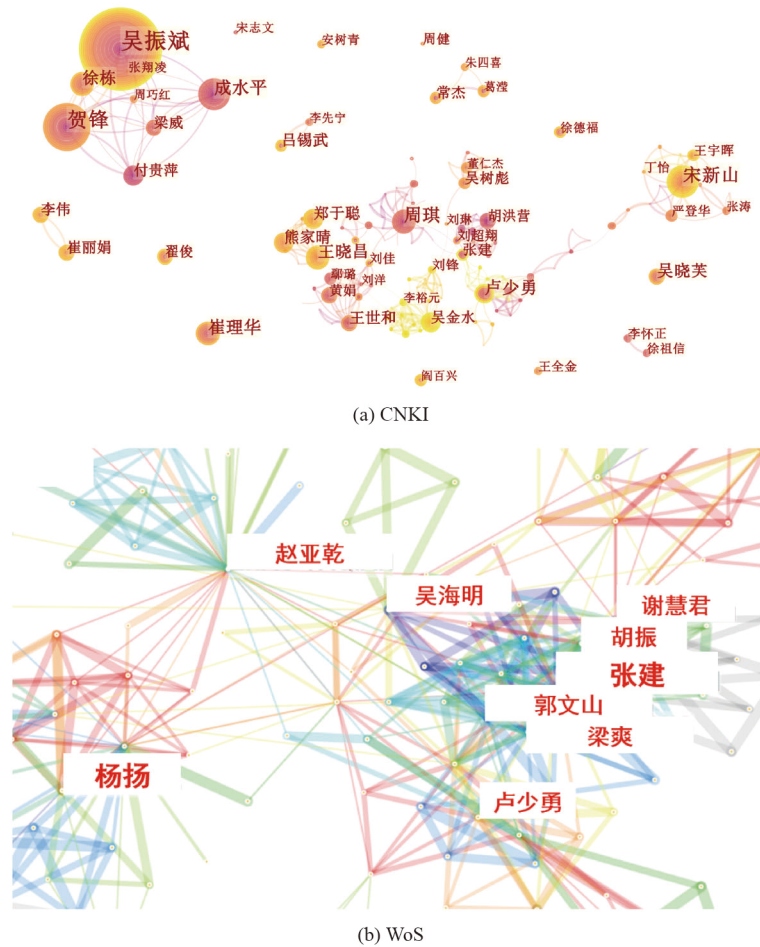


图 4 2000—2021 年人工湿地领域国内作者合作图谱

Fig.4 Collaborative map of the domestic authors in the field of constructed wetlands from 2000 to 2021

关学术前沿^[17]。2000—2021 年国际人工湿地领域被引次数排名前 5 的文献如表 4 所示。在 WoS 数据库中被引次数最高的文献是捷克布拉格生命科学大学 Vymazal J 发表的 *Removal of nutrients in various types of constructed wetlands*^[18], 被引次数达到了 1 701 次, 该文献阐明了人工湿地中氮、磷转化的路径及去除机理, 并分析了不同复合人工湿地在氮、磷高效去除方面的优势; 其次是 Stottmeister U 等发表的 *Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment*^[19], 被引用了 847 次, 位列第二, 该文献深入探讨了湿地植物和根区微生物去除污染物的机理, 并指出未来人工湿地发展需重点关注的几个方面。在文献计量学中, 评价和认定核心作者的有发文量和被引次数 2 个指标^[20]。由表 3 和表 4 可知, Vymazal J 既是高发文作者, 同时也是高被引作者。因此, Vymazal J 可以被认为是国际上人工湿地领域的核心作者, 具有广泛和较高的学术影响力。

2000—2021 年国内人工湿地领域被引次数排名

表 4 2000—2021 年国际人工湿地领域被引次数排名前 5 的文献

Table 4 Top 5 cited papers in the international field of constructed wetlands from 2000 to 2021

文献篇名	发表年份	第一作者	被引次数 / 次	发文期刊
<i>Removal of nutrients in various types of constructed wetlands</i>	2007	Vymazal J	1 701	<i>Science of the Total Environment</i>
<i>Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment</i>	2003	Stottmeister U	847	<i>Biotechnology Advances</i>
<i>The nature and value of ecosystem services: an overview highlighting hydrologic services</i>	2007	Brauman K A	746	<i>Annual Review of Environment and Resources</i>
<i>Metal uptake, transport and release by wetland plants: implications for phytoremediation and restoration</i>	2004	Weis J S	705	<i>Environment International</i>
<i>Constructed wetlands for wastewater treatment: five decades of experience</i>	2011	Vymazal J	612	<i>Environmental Science & Technology</i>

前5的文献如表5所示。杨永兴发表的《国际湿地科学研究的主要特点、进展和展望》^[21]被引次数最高,在CNKI数据库中被引用1022次,该文献在总结国际湿地最新进展的基础上,指出人工湿地构建已成为21世纪科学研究的重点,为国内湿地科学的发展指明了方向;其次是夏汉平发表的《人工湿地处理污水的机理与效率》^[22],在CNKI数据库中被引用了845次,该文献对人工湿地的概念进行了定义,总结出人工湿地与天然湿地的不同特征,同时全面阐述了系统中基质、微生物和植物的除污机理及耦合作用。值得注意的是,吴海明等在2015年发表的*A review on the sustainability of constructed wetlands for wastewater treatment: design and operation*^[23],不仅是WoS数据库中被引次数最高的国内英文文献,而且在5篇高被引文献中是发表时间最短的文献。该文献在回顾人工湿地应用的基础上,总结了湿地系统可持续运行的关键设计参数,并指出未来应加强提高湿地系统稳定性和可持续性的研究,该文献对于国内人工湿地的设计与运营具有较大的参考价值。

对人工湿地领域国际和国内高被引文献的统计分析结果表明,综述类文献的受关注程度和被引用的几率要高于一般研究类文献^[24],高被引文献多为综述,其主题集中于湿地中基质、微生物和动植物的耦合作用及除污过程,对有机物、氮磷、重金属的去除机理,不同类型人工湿地的除污效率等。另外,越早发表的文献,其被引次数往往越高。

2.7 研究方向

借助CiteSpace对国内外人工湿地领域文献的高频关键词进行提取并聚类,通过聚类主题可以反映出2000年以来国内外学者在人工湿地领域的主要研究方向。

2000—2021年人工湿地领域国外文献关键词聚类图谱如图5所示。国际人工湿地领域的研究方向在关注“domestic wastewater treatment”(生活污水处理)和常规污染物“heavy metal”(重金属)去除的同时,对包括“personal care product”(个人护理品)在内的新兴污染物、“methane emission”(甲烷排放)和“wetland-microbial fuel cell”(湿地-微生物燃料电池)耦合技术等方面的研究关注度也较高。随着人们生活水平的提高,个人护理品被大量使用,使得污水中出现很多新兴污染物,如持久性有机污染物、内分泌干扰物和微塑料等^[25-28],目前国外学者正在开展人工湿地对新型污染物的去除机理、效果和稳定性的相关研究。从早期碳足迹研究到现在的碳减排目标,国外学者们对人工湿地的温室气体(二氧化碳、

表5 2000—2021年国内人工湿地领域被引次数排名前5的文献

Table 5 Top 5 cited papers in the domestic field of constructed wetlands from 2000 to 2021

文献篇名	发表年份	第一作者	被引次数/次	发文期刊
《国际湿地科学研究的主要特点、进展和展望》	2002	杨永兴	1 022	《地理科学进展》
《农田氮、磷的流失与水体富营养化》	2000	司友斌	845	《土壤》
《人工湿地处理污水的机理与效率》	2002	夏汉平	702	《生态学杂志》
<i>A review on the sustainability of constructed wetlands for wastewater treatment: design and operation</i>	2015	吴海明	564	<i>Bioresource Technology</i>
《人工湿地的氮去除机理》	2006	卢少勇	540	《生态学报》

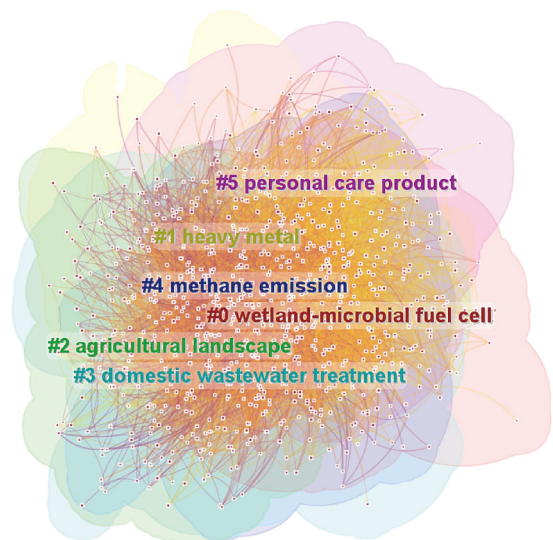


图5 2000—2021年人工湿地领域国外文献关键词聚类图谱
Fig.5 Keyword clustering mapping of foreign papers in the field of constructed wetlands from 2000 to 2021

甲烷等)排放研究进一步加深,目前人工湿地在温室气体排放方面多表现为碳源或弱碳汇,强化碳汇型人工湿地的碳捕捉、碳封存能力^[29-30],将人工湿地应用于温室气体控制,是该方向的主要研究内容。人工湿地-微生物燃料电池耦合系统在净化污水的同时可产出少量电能,目前研究主要还是集中于如何提高该系统的产电效能和回收效率,尚未应用于实际工程中^[31]。

2000—2021年人工湿地领域国内文献关键词聚类图谱如图6所示。国内人工湿地领域的主要研究方向可归纳为以下4类:1)人工湿地去除污染物机理研究。“湿地植物”“基质”“functional gene(功能性基因)”3个研究方向均与人工湿地的除污机理有关,即利用植物、基质及微生物的物理、化学、生物三重协同作用净化污水。在人工湿地领域关于植物

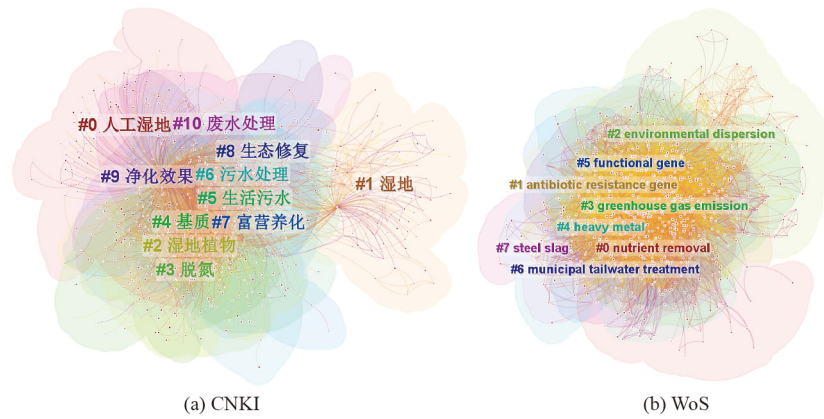


图 6 2000—2021 年人工湿地领域国内文献关键词聚类图谱

Fig.6 Keyword clustering mapping of domestic papers in the field of constructed wetlands from 2000 to 2021

方面的研究内容有湿地植物的筛选与搭配等^[32],关于基质方面的研究内容有开发新型基质等^[33],由于微生物在人工湿地净化中起主导作用,所以微生物也是国内人工湿地领域的主要研究方向之一,已开展了有关 *amoA* 和 *anammox* 等功能性基因^[34]、微生物群落结构组成及多样性的研究^[35]。2)提升人工湿地除污效能研究。利用人工湿地技术进行多种“污(废)水处理”并保证其高效稳定的净化效果,是本领域最主要的研究方向^[23],相关研究内容涉及提升人工湿地在低温、低碳氮比、高负荷等复杂工况下的净化效果^[36]。3)人工湿地去除污染物对象研究。从早期去除人工湿地中有机物、氮磷营养盐/脱氮(nutrient removal)和重金属(heavy metal)等常规污染物,到之后新兴污染物抗生素抗性基因(antibiotic resistance gene)去除等,除污对象的范围一直在增加。4)人工湿地应用研究。目前人工湿地技术在处理常规污水方面已经成熟,国内相关学者开始尝试将人工湿地用来处理低污染负荷的水体,例如城市尾水处理(municipal tailwater treatment),解决硝化缺氧、反硝化缺碳源等问题^[37],是该方向的主要研究内容;人工湿地作为一种接近自然的处理技术,在治理水体富营养化的同时,也为动物提供栖息地和恢复自然景观等,起到了生态修复的作用,因此得到了广泛应用。

2.8 研究热点演化

关键词突现性指一定时期内关键词出现频率的快速增加,反映该时段的研究热点或新的研究趋势,通过对国内外文献的突现词追踪,可以掌握领域内研究热点的演化动态,进而预测发展趋势。

2.8.1 国外研究热点演化

通过对国外英文文献进行关键词突现分析,得到不同时期突现强度最高的 10 个关键词。2000—

2021 年人工湿地领域国外文献研究热点演化如表 6 所示。研究热点从时间上大致可以分为以下 2 个阶段:1)2000—2014 年。该阶段共有 7 个突现的研究热点,其中沉积物、水和废水处理 3 个研究热点从 2000 年出现,并在之后持续了 5~10 年。国外学者在该阶段关注到了沉积物问题,人工湿地利用沉淀、过滤和吸附等物理作用形成大量沉积物,如果发生扰动很可能使沉积物再悬浮或释放污染物^[38],因此对人工湿地中沉积物的控制是国外的一个研究热点。国外学者在人工湿地研究中还关注到了有关大型植物的研究,通过研究大型植物的习性特点、筛选合适物种和优化种植搭配,以提升污水处理效果和达到自然景观作用。此外,国外一些国家的人工

表 6 2000—2021 年人工湿地领域国外文献研究热点演化
Table 6 Evolution of research hotspots of foreign papers in the field of constructed wetlands from 2000 to 2021

关键词		突现强度	起始年	终止年	热点演化(2000—2021年)
英文	中文				
sediment	沉积物	19.27	2000	2007	●●●●●●○○○○○○ ○○○○○○○○
water	水	16.42	2000	2009	●●●●●●●●○○○○ ○○○○○○○○
wastewater treatment	废水处理	11.86	2000	2004	●●●●●○○○○○○○○ ○○○○○○○○
constructed wetland	人工湿地	30.58	2001	2003	○○●●○○○○○○○○○○ ○○○○○○○○
reed bed	芦苇床	29.44	2001	2009	○○●●●●●●●●○○○○ ○○○○○○○○
macrophyte	大型植物	13.07	2001	2008	○○●●●●●●●○○○○ ○○○○○○○○
atrazine	阿特拉津	12.58	2003	2014	○○○●●●●●●●●●● ●○○○○○○○○
microbial fuel cell	微生物燃料电池	16.88	2018	2021	○○○○○○○○○○○○○○ ○○○●●●●●
remediation	环境治理	13.53	2018	2021	○○○○○○○○○○○○○○ ○○○●●●●●
antibiotic resistance gene	抗生素抗性基因	10.81	2018	2021	○○○○○○○○○○○○○○ ○○○●●●●●

湿地研究由农业类研究机构主导,开展了大量利用人工湿地治理农业面源污染的研究,其中包括利用人工湿地降解阿特拉津等农药^[39]。2)2015—2021年。国外结合分子生物学等技术对人工湿地开展了深入的研究,并且着重开展有关抗生素抗性基因的研究,目前主要集中于人工湿地在去除抗生素的同时避免诱导抗生素抗性基因的产生^[28]方面。此外,近些年能源紧张问题凸显,国外学者开始研究利用人工湿地对能源进行回收再利用,例如提高微生物燃料电池湿地系统中电能的回收。在应用方面,国内外学者都将人工湿地视为解决水生态破坏问题和生物栖息地丧失问题的重要手段,主要应用于环境治理和生态修复等方面。

2.8.2 国内研究热点演化

2000—2021年人工湿地领域国内文献研究热点演化如表7所示。通过对国内文献关键词进行突现分析,共得到突现强度最高的16个关键词,从时间上大致可以分为3个阶段:1)2000—2011年,快速发展

表 7 2000—2021 年人工湿地领域国内文献研究热点演化
Table 7 Evolution of research hotspots of domestic papers in the field of constructed wetlands from 2000 to 2021

关键词		突现强度	起始年	终止年	热点演化 (2000—2021年)
中文	英文				
人工湿地	constructed wetlands	6.54	2000	2004	●●●●●○○○○○○○○○○ ○○○○○○○○
污水处理	sewage treatment	7.71	2003	2006	○○○●●●●○○○○○○○○ ○○○○○○○○
废水处理	wastewater treatment	7.46	2003	2006	○○○●●●●○○○○○○○○ ○○○○○○○○
潜流人工湿地	subsurface constructed wetlands	5.88	2003	2009	○○○●●●●●●○○○○○○ ○○○○○○○○
富营养化	eutrophication	5.97	2004	2010	○○○○●●●●●○○○○○○ ○○○○○○○○
芦苇	reed	5.38	2005	2007	○○○○○●●○○○○○○○○ ○○○○○○○○
复合垂直流	integrated vertical-flow	6.22	2006	2009	○○○○○○●●●○○○○○○ ○○○○○○○○
去除率	removal rate	7.32	2012	2015	○○○○○○○○○○○○●● ●●○○○○○○
潮汐流	tidal flow	6.24	2013	2016	○○○○○○○○○○○○● ●●○○○○○○
农村生活污水	rural domestic sewage	5.06	2014	2015	○○○○○○○○○○○○○○ ●●○○○○○○
尾水	tailwater	6.40	2016	2021	○○○○○○○○○○○○○○ ○○●●●●●●
海绵城市	sponge city	5.33	2016	2021	○○○○○○○○○○○○○○ ○○●●●●●●
水力停留时间	hydraulic retention time	5.13	2016	2021	○○○○○○○○○○○○○○ ○○●●●●●●
微生物群落	microbial community	8.98	2017	2021	○○○○○○○○○○○○○○ ○○●●●●●●
生物炭	biochar	8.37	2017	2021	○○○○○○○○○○○○○○ ○○●●●●●●
重金属	heavy metal	5.78	2019	2021	○○○○○○○○○○○○○○ ○○○○●●●●

展阶段。该阶段突现的关键词比其他阶段多,主要包括污(废)水处理、潜流人工湿地、富营养化、芦苇和复合垂直流等,研究热点集中于人工湿地去除污染物机理和潜流人工湿地、复合垂直流人工湿地技术强化除污效果的深入研究,以及将人工湿地技术应用于富营养化水体的综合防治。通过对比表6可以看出,国外关于人工湿地处理污水的研究从2000年前延续到2004年,而国内相关研究热点出现在2003—2006年,说明国外在早期应用方面略早于国内。在该阶段中,因处理要求进一步提高,而单一的湿地结构很难满足需求,所以由多个不同湿地单元组成的复合型人工湿地系统受到学者的关注^[40],其相关研究主要集中在对生活污水、污水处理厂尾水和养殖废水等污水处理的研究,碳、氧调控下湿地脱氮效果的研究,湿地系统反应动力学及水流流态研究^[41]。2)2012—2016年,工艺强化和广泛应用阶段。该阶段突现关键词包含潮汐流、去除率和农村生活污水。该阶段研究热点中出现了新的人工湿地类型,潮汐流人工湿地采用间歇性快速进水排水的方式增加内部环境的溶解氧^[42],加强了微生物的代谢能力,进而提高除污效率^[43],表明在该阶段国内学者已基本了解人工湿地的除污机理主要在于微生物^[7],并基于这些理论着重研究提升微生物的代谢能力。此外,学者们还通过开发高性能填料和耦合新工艺等方法来提升人工湿地对污染物的去除率。人工湿地在应用范围上也进一步扩大,如在农村等偏远地区应用人工湿地处理污水等^[44]。3)2017—2021年,成熟发展和新方向涌现阶段。人工湿地在深入研究水力停留时间的同时,开始与其他领域产生交叉,新兴研究热点在该阶段突增。人工湿地领域新增了研究手段——微生物群落(即利用基因测序等技术从微观角度展开对微生物的相关研究)、基质材料——生物炭、去除对象——重金属、应用领域——海绵城市和污水处理厂尾水。人工湿地目前已进入成熟阶段,但占地面积大仍是该技术在推广中遇到的主要问题,优化水力停留时间不仅可以提高人工湿地的净化效果、水力负荷和污染物负荷,而且还能减少占地面积,有利于人工湿地的进一步推广^[45]。随着微生物学和基因组学等学科快速发展,学者们通过研究菌群的结构、代谢特性和功能多样性等,从微观角度完善除污机理并强化除污效率。生物炭相比传统基质具有更好的吸附污染物能力和更多附着的微生物^[46],因此学者们开展了大量关于生物炭基质对人工湿地处理效果、微生物群落代谢和温室气体排放影响的研究^[47]。长期的应用发现,人工湿地在

处理污水的同时,还可以满足海绵城市的四类控制目标,但雨水径流控制还需区别于污水处理,目前学者们正在研究如何依据侧重点设计适合海绵城市的人工湿地^[48]。

通过上述研究发现,2000年以来人工湿地技术的应用范围逐渐深入,未来国内人工湿地将广泛用作城市污水处理厂尾水进入自然河道前的生态缓冲。人工湿地研究经历了从探索除污机理到强化除污效果的阶段,目前国内外学者结合分子生物学等领域来优化研究手段,从微观角度进一步完善除污机理,并研究基于新的除污机理强化人工湿地对传统污染物和新兴污染物的去除效果。微生物群落、微生物燃料电池分别是国内、国外现阶段突现强度最高的关键词,未来几年将持续成为人工湿地领域的研究热点。人工湿地技术目前已与多个领域交叉产生新的研究热点,未来有望与更多领域结合,例如结合大数据和人工智能等新兴技术手段建立数字预测模型^[49]。

3 结论

(1)2000—2021年国外人工湿地领域的年发文量呈快速增长趋势,国内人工湿地研究起步晚但发展迅速,目前在 WoS 核心合集数据库中,中国学者发表的英文文献数量已居世界首位。

(2)中国科学院大学是人工湿地领域国内外发文量最多的研究机构。国外人工湿地领域发文最多的期刊是 *Ecological Engineering*, 国内发文最多的期刊是《环境科学》。国外发表有关人工湿地研究文献最多的作者是 Garcia J, 国内发文最多的作者是吴振斌。

(3)国外人工湿地领域的主要研究方向在传统研究的基础上还关注到了耦合微生物燃料电池技术与个人护理品等新兴污染物的去除等;国内人工湿地领域的主要研究方向围绕除污机理、除污效能、除污对象及其应用等方面展开。

(4)人工湿地技术已进入成熟阶段,应用范围进一步扩宽,并与多领域产生交叉。未来人工湿地将广泛应用于包括城镇污水处理厂尾水在内的低污染水处理,利用基因测序技术从微观角度研究人工湿地和人工湿地-微生物燃料电池耦合技术将是未来几年人工湿地领域的研究热点,未来人工湿地有望与更多新兴领域结合。

参考文献

[1] 卢少勇,万正芬,康兴生,等.《人工湿地水质净化技术指南》编制思路与体系[J].环境工程技术学报,2021,11(5):829-836.

- LU S Y, WAN Z F, KANG X S, et al. Idea and system of compiling *Technical Guidelines for Water Purification by Constructed Wetlands*[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2021, 11(5): 829-836.
- [2] 李峰平,魏红阳,马喆,等.人工湿地植物的选择及植物净化污水作用研究进展[J].*湿地科学*, 2017, 15(6): 849-854.
LI F P, WEI H Y, MA Z, et al. Research progress of selection of plants for constructed wetlands and effect of plants' purification on sewage[J]. *Wetland Science*, 2017, 15(6): 849-854.
- [3] 杨永兴.从魁北克2000-世纪湿地大事件活动看21世纪国际湿地科学研究的热点与前沿[J].*地理科学*, 2002, 22(2): 150-155.
YANG Y X. The 21st century hot point and forward position field of international wetland research from Quebec 2000-millennium wetland event[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2002, 22(2): 150-155.
- [4] MA Y H, ZHENG X Y, FANG Y Q, et al. Autotrophic denitrification in constructed wetlands: achievements and challenges[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 318: 123778.
- [5] 王世和.人工湿地污水处理理论与技术[M].北京:科学出版社,2007.
- [6] 祝惠,阎百兴,王鑫壹.我国人工湿地的研究与应用进展及未来发展建议[J].*中国科学基金*, 2022, 36(3): 391-397.
ZHU H, YAN B X, WANG X Y. Progress in research and applications of constructed wetlands in China and suggestions for future development[J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2022, 36(3): 391-397.
- [7] 成水平,王月圆,吴娟.人工湿地研究现状与展望[J].*湖泊科学*, 2019, 31(6): 1489-1498.
CHENG S P, WANG Y Y, WU J. Advances and prospect in the studies on constructed wetlands[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, 31(6): 1489-1498.
- [8] ZHANG H, TANG W Z, WANG W D, et al. A review on China's constructed wetlands in recent three decades: application and practice[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2021, 104: 53-68.
- [9] 张德茗,吴浩.高校和科研机构的R&D对TFP的溢出效应研究[J].*科学学研究*, 2016, 34(4): 548-557.
ZHANG D M, WU H. The spillover effect of universities and research institutions R&D on TFP[J]. *Studies in Science of Science*, 2016, 34(4): 548-557.
- [10] 刘继安,盛晓光.科教融合的动力机制、治理困境与突破路径:基于中国科学院大学案例的分析[J].*中国高教研究*, 2020(11): 26-30.
LIU J A, SHENG X G. Dynamics, predicament and breakthrough of integration of research and education: a case study of the University of Chinese Academy of Sciences[J]. *China Higher Education Research*, 2020(11): 26-30.
- [11] 夏丽娟,谢富纪,王海花.制度邻近、技术邻近与产学研协同创新绩效:基于产学研联合专利数据的研究[J].*科学学研究*, 2017, 35(5): 782-791.
XIA L J, XIE F J, WANG H H. The impact of institutional proximity and technological proximity on industry-university

- collaborative innovation performance: an analysis of joint-patent data[J]. *Studies in Science of Science*, 2017, 35(5): 782-791.
- [12] 俞立平, 沈洁. 数量与质量影响力下的学术期刊评价新指标: C刊影响因子和非C刊影响因子[J]. *统计与决策*, 2022, 38(20): 26-30.
- YU L P, SHEN J. New index of academic journal evaluation under the influence of quantity and quality: impact factors of CSSCI journals and non-CSSCI journals[J]. *Statistics & Decision*, 2022, 38(20): 26-30.
- [13] 金铁成. SCI收录期刊的影响因子与2年自被引率的历年变化与分析: 兼谈加菲尔德期刊自引率论断的时效性[J]. *中国科技期刊研究*, 2019, 30(7): 795-800.
- JIN T C. Yearly changes and analysis of impact factors and two-year self-cited rates of SCI journals: a discussion on timeliness of journal self-citation thesis of Eugene Garfield[J]. *Chinese Journal of Scientific and Technical Periodicals*, 2019, 30(7): 795-800.
- [14] 林莉莉, 鲁纳, 龙忆年, 等. MFC处理人工湿地生物堵塞物及同步产电研究[J]. *环境科学研究*, 2020, 33(6): 1504-1513.
- LIN L L, LU R, LONG Y N, et al. MFC treating bio-clogging matter of constructed wetland and synchronous electricity generation[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(6): 1504-1513.
- [15] 陈金梅, 周巧红, 吴振斌, 等. 人工湿地植物的抗寒性研究进展[J]. *水生态学杂志*, 2021, 42(6): 117-122.
- CHEN J M, ZHOU Q H, WU Z B, et al. Research advances on plant cold resistance in constructed wetlands[J]. *Journal of Hydroecology*, 2021, 42(6): 117-122.
- [16] 孔令为, 贺锋, 夏世斌, 等. 钱塘江引水降氮示范工程的构建和运行研究[J]. *环境污染与防治*, 2014, 36(11): 60-66.
- KONG L W, HE F, XIA S B, et al. Studies on construction and performance of the Qiantang River water diversion denitrification demonstration project[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2014, 36(11): 60-66.
- [17] 杨廷君, 裴光兰, 李跃平. 《民族学刊》2011—2020年高被引论文多维特征计量分析[J]. *民族学刊*, 2022, 13(7): 129-136.
- YANG T J, PEI G L, LI Y P. Metrological analysis of multi-dimensional characteristics of highly-cited articles published in the *Journal of Ethnology* over the years 2011-2020[J]. *Journal of Ethnology*, 2022, 13(7): 129-136.
- [18] VYMAZAL J. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, 380(1/2/3): 48-65.
- [19] STOTTMEISTER U, WIEßNER A, KUSCHK P, et al. Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment[J]. *Biotechnology Advances*, 2003, 22(1/2): 93-117.
- [20] 谢文亮, 翟欣, 姚伟欣, 等. 编辑出版类Top100高被引论文的分析及启示: 以科技期刊为主题的研究[J]. *中国科技期刊研究*, 2020, 31(12): 1515-1527.
- XIE W L, ZHAI X, YAO W X, et al. Analysis and enlightenment on Top100 highly cited papers in editing and publishing area with the theme of scientific journals[J]. *Chinese Journal of Scientific and Technical Periodicals*, 2020, 31(12): 1515-1527.
- [21] 杨永兴. 国际湿地科学研究的主要特点、进展与展望[J]. *地理科学进展*, 2002, 21(2): 111-120.
- YANG Y X. Main characteristics, progress and prospect of international wetland science research[J]. *Progress in Geography*, 2002, 21(2): 111-120.
- [22] 夏汉平. 人工湿地处理污水的机理与效率[J]. *生态学杂志*, 2002, 21(4): 52-59.
- XIA H P. Mechanisms and efficiencies on wastewater treatment with constructed wetlands: a review[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2002, 21(4): 52-59.
- [23] WU H M, ZHANG J, NGO H H, et al. A review on the sustainability of constructed wetlands for wastewater treatment: design and operation[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 175: 594-601.
- [24] 王思齐, 张引科. 《西安建筑科技大学学报(自然科学版)》高被引论文分析[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2020, 52(5): 763-770.
- WANG S Q, ZHANG Y K. Analysis of the highly cited papers in *Journal of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition)*[J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition)*, 2020, 52(5): 763-770.
- [25] GAUR N, NARASIMHULU K, Y P. Recent advances in the bio-remediation of persistent organic pollutants and its effect on environment[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 198: 1602-1631.
- [26] DHANGAR K, KUMAR M. Tricks and tracks in removal of emerging contaminants from the wastewater through hybrid treatment systems: a review[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 738: 140320.
- [27] AHMED M B, RAHMAN M S, ALOM J, et al. Microplastic particles in the aquatic environment: a systematic review[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 775: 145793.
- [28] GARCÍA J, GARCÍA-GALÁN M J, DAY J W, et al. A review of emerging organic contaminants (EOCs), antibiotic resistant bacteria (ARB), and antibiotic resistance genes (ARGs) in the environment: increasing removal with wetlands and reducing environmental impacts[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 307: 123228.
- [29] PAN T, ZHU X D, YE Y P. Estimate of life-cycle greenhouse gas emissions from a vertical subsurface flow constructed wetland and conventional wastewater treatment plants: a case study in China[J]. *Ecological Engineering*, 2011, 37(2): 248-254.
- [30] CHEN X, ZHU H, YAN B X, et al. Optimal influent COD/N ratio for obtaining low GHG emissions and high pollutant removal efficiency in constructed wetlands[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 267: 122003.
- [31] GUPTA S, SRIVASTAVA P, PATIL S A, et al. A comprehensive review on emerging constructed wetland coupled microbial fuel cell technology: potential applications and challenges[J]. *Bioresource Technology*, 2021, 320: 124376.
- [32] 唐炳然, 蔡然, 王瑞霖, 等. 基于文献分析的我国人工湿地植物

- 配置路线优化[J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(3): 905-915.
- TANG B R, CAI R, WANG R L, et al. Optimization of hydrophyte configuration route in constructed wetlands in China based on literature analysis[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2022, 12(3): 905-915.
- [33] 肖其亮, 熊丽萍, 彭华, 等. 不同基质组合对氮磷吸附能力的研究[J]. 环境科学研究, 2022, 35(5): 1277-1287.
- XIAO Q L, XIONG L P, PENG H, et al. Nitrogen and phosphorus adsorption capacity of different substrate combinations[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022, 35(5): 1277-1287.
- [34] ZHI W, YUAN L, JI G D, et al. Enhanced long-term nitrogen removal and its quantitative molecular mechanism in tidal flow constructed wetlands[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(7): 4575-4583.
- [35] 姚美辰, 段亮, 张恒亮, 等. 辽河保护区人工湿地微生物群落结构及分布规律[J]. 环境工程技术学报, 2019, 9(3): 233-238.
- YAO M C, DUAN L, ZHANG H L, et al. Microbial community structure and distribution of constructed wetlands in Liaohe Conservation Area[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2019, 9(3): 233-238.
- [36] 黄峻楠, 李青, 张琼华, 等. 高负荷复合式人工湿地对污水处理厂尾水低温期的净化效果[J]. 环境工程学报, 2021, 15(11): 3561-3571.
- HUANG J N, LI Q, ZHANG Q H, et al. Performance of a high loading hybrid constructed wetland on wastewater treatment plant effluent purification in low temperature period[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2021, 15(11): 3561-3571.
- [37] ZHU T D, GAO J Q, HUANG Z Z, et al. Comparison of performance of two large-scale vertical-flow constructed wetlands treating wastewater treatment plant tail-water: contaminants removal and associated microbial community[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 278: 111564.
- [38] DONG Y, KAYRANLI B, SCHOLZ M, et al. Nutrient release from integrated constructed wetlands sediment receiving farmyard run-off and domestic wastewater[J]. *Water and Environment Journal*, 2013, 27(4): 439-452.
- [39] GORITO A M, RIBEIRO A R, ALMEIDA C M R, et al. A review on the application of constructed wetlands for the removal of priority substances and contaminants of emerging concern listed in recently launched EU legislation[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 227: 428-443.
- [40] 祝志超, 缪恒锋, 崔健, 等. 组合人工湿地系统对污水处理厂二级出水的深度处理效果[J]. 环境科学研究, 2018, 31(12): 2028-2036.
- ZHU Z C, MIAO H F, CUI J, et al. Advanced treatment performance of combined constructed wetland system on secondary effluent from wastewater treatment plant[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, 31(12): 2028-2036.
- [41] 余俊霞. 复合人工湿地强化对低污染水脱氮性能及优化设计研究[D]. 昆明: 云南大学, 2021.
- [42] 陈旭, 张璐. 生物炭基质潮汐流人工湿地处理生活污水性能[J]. 生态环境学报, 2019, 28(7): 1443-1449.
- CHEN X, ZHANG L. Treatment of domestic wastewater in biochar-packed tidal flow constructed wetland[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(7): 1443-1449.
- [43] 郭鹤方, 甄志磊, 赵林婷, 等. 潮汐流-潜流人工湿地对城市污染水体中氮的去除[J]. 环境化学, 2021, 40(12): 3887-3897.
- GUO H F, ZHEN Z L, ZHAO L T, et al. Research on the removal effect of tidal flow-subsurface flow constructed wetland on nitrogen in urban polluted water[J]. *Environmental Chemistry*, 2021, 40(12): 3887-3897.
- [44] 李鲁丹, 郭伟杰. 人工湿地技术在我国农村生活污水中的应用现状及对策建议[C]//中国环境科学学会2022年科学技术年会: 环境工程技术创新与应用分会场论文集(二). 北京: 中国环境科学学会环境工程分会, 2022: 67-70.
- [45] 齐冉, 张灵, 杨帆, 等. 水力停留时间对潜流湿地净化效果影响及脱氮途径解析[J]. 环境科学, 2021, 42(9): 4296-4303.
- QI R, ZHANG L, YANG F, et al. Effect of hydraulic residence time on removal efficiency of pollutants in subsurface flow constructed wetlands and analysis of denitrification mechanism[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(9): 4296-4303.
- [46] 马清晨, 杨郑州, 陈建, 等. 污泥生物炭强化人工湿地处理生活污水性能研究[J/OL]. 生态与农村环境学报. <https://doi.org/10.19741/j.issn.1673-4831.2022.0489>.
- MA J C, YANG Z Z, CHEN J, et al. Enhanced domestic sewage pollutants degradation using sludge biochar in constructed wetlands[J/OL]. *Journal of Ecology and Rural Environment*. <https://doi.org/10.19741/j.issn.1673-4831.2022.0489>.
- [47] 陈鑫童, 郝庆菊, 熊艳芳, 等. 铁矿石和生物炭添加对潜流人工湿地污水处理效果和温室气体排放及微生物群落的影响[J]. 环境科学, 2022, 43(3): 1492-1499.
- CHEN X T, HAO Q J, XIONG Y F, et al. Effects of hematite and biochar addition on wastewater treatment efficiency, greenhouse gas emission, and microbial community in subsurface flow constructed wetland[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(3): 1492-1499.
- [48] 刘然彬, 赵亚乾, 沈澄, 等. 人工湿地在“海绵城市”建设中的作用[J]. 中国给水排水, 2016, 32(24): 49-53.
- LIU R B, ZHAO Y Q, SHEN C, et al. Application of constructed wetlands to construction of sponge city[J]. *China Water & Wastewater*, 2016, 32(24): 49-53.
- [49] XIONG R, ZHENG Y, CHEN N W, et al. Predicting dynamic riverine nitrogen export in unmonitored watersheds: leveraging insights of AI from data-rich regions[J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 56(14): 10530-10542. ◇