

蓝藻溶藻细菌研究现状的可视化分析

李仁辉¹,王广¹,诸战诞²,耿若真¹,肖鹏¹,张和¹

(1.温州大学 生命与环境科学学院;温州大学城镇水污染生态治理技术国家地方联合工程研究中心,
浙江 温州 325035;2.温州市珊溪水利枢纽管理中心,浙江 温州 325304)

摘要:蓝藻水华的暴发严重影响了水生生物以及饮用水的安全,溶藻菌能够以直接或间接的方式对蓝藻水华起到防治作用.以中国知网和 Web of Science 两个数据库中 2002 至 2022 年蓝藻溶藻菌及其相关领域的文献为数据源,运用 CiteSpace 软件构建关于发文作者、国家、机构以及关键词的知识图谱,分析该领域的研究热点以及未来研究趋势.结果表明:(1)近年来关于蓝藻溶藻菌方面的发文量一直呈上升趋势,国内主要以中国科学院、西南大学等单位为主,国外主要以韩国汉阳大学等单位为主;(2)2022 年以前研究者主要关注蓝藻溶藻菌的分离鉴定、菌藻关系、放线菌、氧化应激、16S rRNA、溶藻机制、微生物群体、浮游植物、溶藻物质成分、培养条件优化等方面,2022 年以后,蓝藻溶藻菌的分离鉴定、蓝藻水华的生物治理、氧化应激反应、溶藻分子机制、群体感应(quorum sensing, QS)、藻毒素降解等方面可能会被持续关注,而关于溶藻物质和相关编码基因的深层挖掘等可能成为潜在的关注热点.

关键词:CiteSpace;有害蓝藻水华;溶藻菌;研究热点

中图分类号:Q175

文献标志码:A

文章编号:1000-2367(2024)02-0111-12

人类活动的影响、全球气候变暖加之水体接纳过量氮、磷等营养物质而使水体呈富营养化状态,导致蓝藻水华频频暴发^[1].淡水资源是人类饮用水的主要来源,蓝藻水华的暴发严重影响了饮用水的安全.蓝藻水华的暴发会产生蓝绿色湖淀、散发难闻的气味以及释放次级代谢产物^[2],如微囊藻毒素(microcystins, MCs)^[3],主要是 microcystin-LR(MC-LR),具有肝毒性,是一种易溶于水的环状七肽物质,其致毒方式主要有抑制蛋白磷酸酶活性、直接破坏细胞结构引发细胞溶解、诱导细胞凋亡和癌变、诱导基因突变和 DNA 损伤等^[4].另外,MCs 人体的积累与人类原发性肝癌(简称肝癌)发病率相关联^[5],因此蓝藻水华防治已迫在眉睫.在各种水华防治技术中,细菌溶藻因其高效、环保、经济等优点脱颖而出^[6].研究表明,微生物在水华生消过程中起重要作用,细菌和浮游植物之间形成一定的藻-菌关系,其相互作用既复杂又动态,关联范围从互惠共生到寄生,部分藻类附近的细菌能够抑制藻类生长^[7].溶藻细菌(algicidal bacteria)是能够溶藻细胞的细菌的统称,溶藻细菌可以通过直接和间接两种方式溶藻,从而抑制藻类的生长或杀死藻类.前者主要是通过分泌一些生物活性物质使藻细胞裂解死亡,后者是细菌通过直接与藻细胞接触使藻细胞裂解死亡^[8-11].目前已知的从自然环境中分离得到以及对其溶藻机制展开研究的蓝藻溶藻菌有芽孢杆菌属(*Bacillus*)^[12-13]、放线菌属(*Actinomyces*)^[14]、链霉菌属(*Streptomyces*)^[15-16]、不动杆菌属(*Acinetobacter*)^[17]、柠檬酸杆菌属(*Citrobacter*)^[18]、产碱杆菌属(*Alcaligenes*)^[19]、假交替单胞菌属(*Pseudoalteromonas*)^[20]、假单胞菌属(*Pseudomonas*)^[21]、

收稿日期:2023-02-28;修回日期:2023-09-08.

基金项目:国家自然科学基金(31970219);浙江省自然科学基金重大项目(LD21C030001).

作者简介:李仁辉(1965—),男,江西抚州人,温州大学二级教授,博士生导师,研究方向为蓝藻生物,E-mail:renhui.li@wzu.edu.cn.

通信作者:张和,E-mail:zhanghe@wzu.edu.cn.

引用本文:李仁辉,王广,诸战诞,等.蓝藻溶藻细菌研究现状的可视化分析[J].河南师范大学学报(自然科学版),2024,52(2):111-122.(Li Renhui, Wang Guang, Zhu Zhandan, et al. Visualized analyses on current research status on algicidal bacteria of cyanobacteria[J]. Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition), 2024, 52(2):111-122. DOI:10.16366/j.cnki.1000-2367.2023.02.28.0003.)

鞘氨醇单胞菌属(*Sphingomonas*)^[22]、赖氨酸芽孢杆菌属(*Lysinibacillus*)^[23-24]等.研究表明,溶藻菌不仅能够杀藻,而且还能降解藻毒素^[25-26],具有应用潜力.目前还在藻菌关系^[27-28]、溶藻物质与QS效应^[29]、溶藻菌培养基优化^[30]、固定化溶藻菌^[31]等方面开展研究.

用于计量和分析科研文献数据的信息可视化 CiteSpace 软件可以简单地呈现出科研文献的数据源之间的关系,并分析某一科学领域中的关键文献、研究热点和前沿方向^[32-34].Web of science(WOS)和中国知网(China national knowledge infrastructure,CNKI)分别代表了国外和国内最权威的数据库.应用可视化软件 CiteSpace 将 WOS 核心集及 CNKI 作为数据源,以时间跨度为 2002 至 2022 年发表的有关蓝藻溶藻菌研究的中英文文献为对象,通过所选文献的关键词共现、关键词聚类、突显词分析、作者合作共现及机构合作共现等内容,对蓝藻溶藻菌相关的研究现状及未来趋势进行分析,把握蓝藻溶藻菌的研究概况、发展演变规律、研究热点和研究前沿等问题,以期为进一步推动溶藻菌控制蓝藻水华的研究工作提供参考.

1 数据与分析方法

1.1 数据来源与处理

1.1.1 CNKI 文献数据与处理

在中国知网 CNKI 核心合集中以“溶藻菌”为主题,共检索到 313 篇文献,为保证数据的可信性,人工甄别并剔除与“蓝藻”无关的文献后共检索到 2002 至 2022 年间的篇文献 99 篇,其中期刊论文 54 篇,博士论文 2 篇,硕士学位论文 37 篇,会议论文 6 篇.将筛选的文献以 Refworks 格式导出并移入事先建好的文件夹(包含 date、input、project、output 4 个文件夹)的 input 文件夹中,并用 CiteSpace 进行分析.软件参数设置依次为:time slicing 2002 至 2022 年、term source 默认值、node types 视情况而定、selection criteria 中 G-index、Top N 和 Top N% 分别设为 25、50 和 100(一般为默认值),Pruning 选择 Pathfinder.

1.1.2 Web of Science(WOS)数据与处理

利用 Web of Science(WOS)核心合集数据库以检索式(ALL=(anti-cyanobacteria))OR ALL=(algicidal bacteria)共检索到 467 篇文献,人工甄别并剔除与蓝藻、溶藻菌无关的文献后得到时间范围为 2003 至 2022 年的文献 303 篇,导出格式为纯文本格式,time slicing 2003 至 2022 年,其余参数设置与 1.1.1 相同.

1.2 研究方法

1.2.1 可视化工具

运用 CiteSpace 6.1.R6 软件中运行界面中的国家(Country)、机构(Institution)、作者(Author)进行,得到该领域发文量趋势数据,发文国家、机构以及作者的共现图谱.通过 node types 对关键词(Keyword)进行运算得到关键词共现图谱,并选择节点(Nodes)中的 Compute Node Centrality 计算其中心值及运用 LLR 算法(对数似然率,其值越大越具有聚类代表性)对关键词进行聚类分析、时间图谱分析(Timeline),同时在 Control Panel 的 Burstness 中进行关键词突变检测.

1.2.2 CiteSpace 关键评价指标

(1)节点(Nodes).图谱中出现的年轮或其他形状 of 节点,节点越大,其代表的主题词共现频次越高,节点的颜色变化代表年份的变化,即所展示主题词在不同年份出现的频次,节点与节点之间的连线的粗细表示它们之间的联系密切程度^[35].(2)共现频次(Count).指所分析的文献中主题词出现的次数,在一定程度上反映了主题词的研究热度.(3)中心性(Centrality).通过 Compute Node Centrality 得到中心值,较高的中心值表明该节点在某一研究领域具有较高的影响力,属于热点主题词^[36].一般关键词中心值 ≥ 0.1 就属于高中心性关键词^[37].(4)突变关键词(Burst term).突变关键词用来了解一段时间内某研究领域引用关键词的动态变化,以此直观展示相关研究方向的发展趋势^[38],起到评估与预测的作用.

2 研究热点与前沿分析结果

2.1 发文量分析

发文量是体现某研究领域的发展成熟度以及未来研究趋势的重要指标^[39].本研究分别对比了 CNKI 与

WOS 两个数据库中 2002 至 2022 年和 2003 至 2022 年蓝藻溶藻菌研究领域发文量,从图 1 和图 2 中可以看出:(1)中文发文时间早于英文发文,CNKI 中关于蓝藻溶藻菌的发文起始于 2002 年,WOS 中起始于 2003 年,但 WOS 中的发文量高于 CNKI,表明蓝藻溶藻菌研究领域,国内起步较早。(2)CNKI 中的发文量趋势,从 2008 年开始,一直在增加,于 2017 年达到峰值,而后开始下降,在 2021 年短暂增加,WOS 中,发文量自 2003 年开始,逐渐上升,整体呈上升趋势,且在 2022 年发文量最多,急剧增长到 50 篇,表明在 2022 年在该领域的关注度较高.总的来说,两个数据库发文量整体稳中有升.

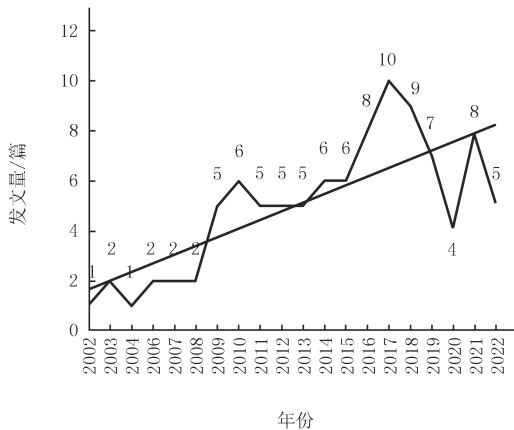


图1 CNKI蓝藻溶藻菌发文量图

Fig.1 Papers on on algicidal bacteria of cyanobacteria in CNKI databases from 2002 to 2022

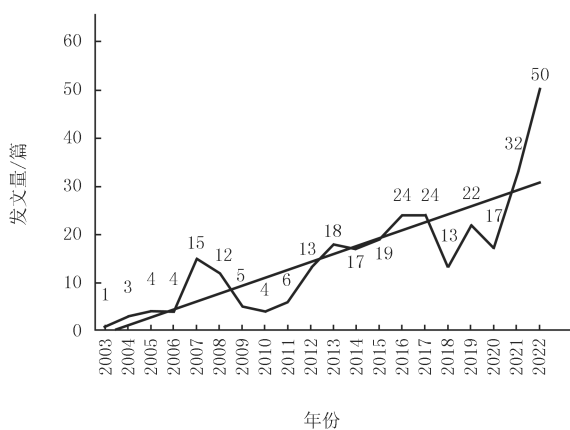


图2 WOS蓝藻溶藻菌发文量图

Fig.2 Papers on on algicidal bacteria of cyanobacteria in WOS databases from 2002 to 2022

2.2 作者关系分析

选取“Author”为分析对象,进行作者合作共现分析.得到 CNKI 和 WOS 数据库中作发文者合作共现图,字体越大,表明作者发文越多,颜色越浅越接近现在.根据 CiteSpace 运算结果(图 3),我们可以发现部分学者是独立开展研究的,但是多数研究者之间有着紧密合作关系.为验证数据的准确性,对 CNKI 中发文量较多的作者进行单独检索,结果表明,近几年张文艺、孔赞、王佳、毛林强、张炳火、洪桂云、李文娟、张瑾、赵以军等人发文较多,其中孔赞、徐向阳、朱亮之间,王佳、洪桂云、张瑾之间、有密切联系,关英红、吕萍等人为独立研究,以张文艺为中心的学者形成 2 个网络共现关系,其余作者及其关系图中所示.总体来说,结合对以上发文作者发文量进行单独检索,发现 CNKI 中很多作者对于蓝藻溶藻菌的发文均较少,但部分作者之间合作较为密切.

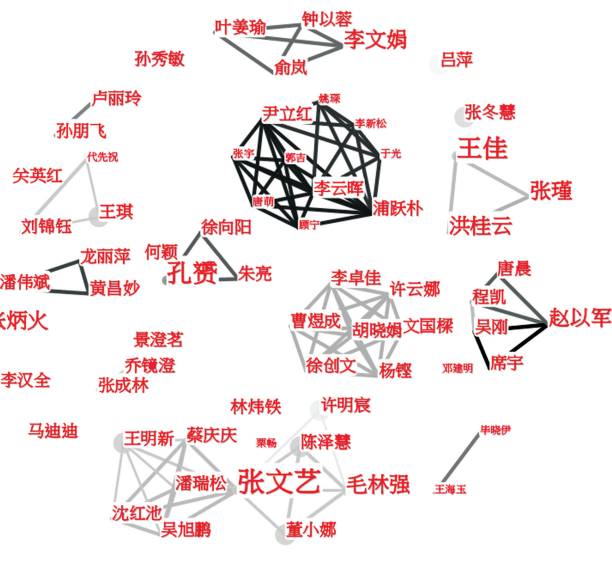


图3 CNKI蓝藻溶藻菌发文作者合作共现图

Fig.3 Map of author cooperative co-occurrence on algicidal bacteria of cyanobacteria in CNKI databases

图 4 中展示了 WOS 中的发文作者之间的合作关系,名字越大表明发文量越多,连线颜色越浅越接近现在.结合 CiteSpace 结果并对其进行单独检索得出,WOS 中 Dai Xianzhu、Yang Caiyun、Imai Ichiro、Liao Chunli、Ahn Chi-Yong、Luo Feng 等人发文量较多.除此之外,图中网络关系也比较复杂,很多作者之间存在

密切联系,如 Dai Xianzhu、Yang Caiyun、Luo Feng、Zhang Xiaohui 4 位学者,且其连线颜色较粗,表明其近几年在蓝藻溶藻菌方面研究较多.整体而言,图中部分作者之间的连线呈现为粗的、淡灰色,表明 WOS 中作者之间合作与交流更为密切,以 Dai Xianzhu 等人作为代表.

2.3 国家与机构分析结果

将 node types 设定为国家(country)和机构(institution),timespan 设定为 2002 至 2022 年,运行 CiteSpace 结果共现图谱如图(5~7).

如图 5 所示知,在国内众多研究蓝藻溶藻菌的机构中,以西南大学、华中师范大学、浙江大学、常州大学、广东海洋大学、中国科学院水生生物研究所等居多.图 6 展示的是 WOS 中各发文国家之间的合作共现关系,可以看出发文量排名前 6 的国家分别是中国、美国、韩国、日本、德国、澳大利亚.其中,中国发文量最多,占比 47%,且与韩国、日本、美国、德国等国家均有一定的合作.通过机构分析得出(图 7),排名靠前的机构为中国科学院、汉阳大学(韩国)、暨南大学、西南大学、上海交通大学、南京大学、哈尔滨工业大学等,其中以中国科学院、韩国汉阳大学为主的单位形成较为复杂的合作共现关系.总体来说,CNKI 与 WOS 国家与机构分析表明,在蓝藻溶藻菌领域,中国是研究最多的国家,以中国科学院、西南大学等机构为主;其次是韩国,以汉阳大学为主,且彼此之间有着一定的合作关系.

2.4 关键词共现图谱分析

文章的关键词是对学术论文研究核心内容的精炼和直接体现.在 CiteSpace 软件中以“Keyword”为分析对象,CiteSpace 生成 2002 至 2022 年的高频关键词共现网络图谱,并对关键词进行聚类,根据共现关系及聚类情况分析该领域国内外研究热点与新兴研究趋势.同时还应考虑共现频率与中心性 2 个指标,本研究通过共现聚类模块中出现频率较高且中心性 ≥ 0.1 的中英文关键词(表 1),综合分析评判了蓝藻溶藻菌研究领域的研究热点及其趋势.

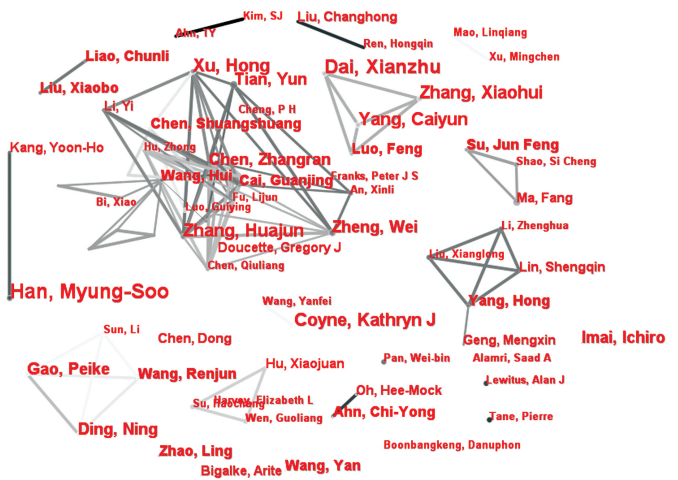


图4 WOS蓝藻溶藻菌发文作者合作共现图(部分发文量极少作者未呈现)
Fig. 4 Map of author cooperative co-occurrence on algal bacteria of cyanobacteria in WOS databases (Some authors with few publications are not presented)



图5 CNKI发文国家与机构共现图谱(部分发文量极少机构未呈现)
Fig. 5 Map of the Country and Institution co-occurrence on algal bacteria of cyanobacteria in CNKI databases (Some institutions with few publications are not presented)



图6 WOS发文国家合作网络图谱(部分发文量极少国家未呈现)
Fig. 6 Network map of cooperations on algal bacteria of cyanobacteria in WOS databases (Some institutions with few publications are not presented)

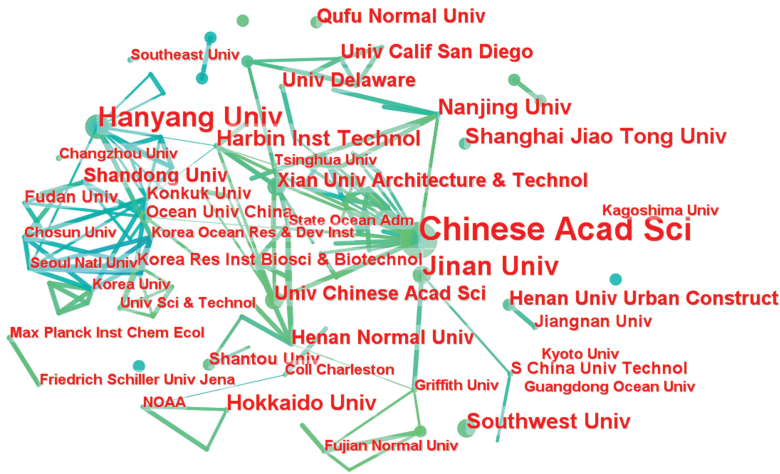


图7 WOS发文机构合作网络图谱(部分发文量极少机构未呈现)

Fig.7 Network map of institution cooperations on algicidal bacteria of cyanobacteria in WOS databases(Some institutions with few publications are not presented)

表 1 CNKI 与 WOS 数据库主要热点关键词统计

Tab. 1 Main hot keywords in databases of CNKI and WOS

关键词	出现年份	中心性	频次	关键词	出现年份	中心性	频次
溶藻菌	2003	0.91	44	harmful algal bloom	2003	0.26	51
溶藻细菌	2002	0.64	25	phytoplankton	2004	0.11	45
溶藻特性	2010	0.27	20	algicidal activity	2006	0.16	43
溶藻机制	2010	0.12	9	algicidal bacteria	2005	0.14	107
放线菌	2006	0.16	9	cyanobacteria	2007	0.14	40

运用 CiteSpace 对 CNKI 数据库的文献进行关键词聚类(图 8)后,主要出现 9 个主要聚类模块,分别是 #0 溶藻菌、#1 溶藻细菌、#2 溶藻特性、#3 放线菌、#4 溶藻机制、#5 分离、#6 富营养化、#7 溶藻效应、#8 健康风险评估。溶藻菌板块中主要包括溶藻菌、细胞裂解、生物降解、微囊藻、固定化、麸皮、纳米颗粒、有害水华等,表明在微囊藻溶藻菌方面的研究主要是集中在细菌种类、降解方式以及利用固定化细菌进行溶藻等,如 SUN 等^[40]研究发现添加麸皮的固定化菌株能够增加杀藻率且提高回收率。溶藻细菌板块中包括溶藻细菌、分离鉴定、水华蓝藻、条件优化、培养条件、活性物质、菌剂、溶藻率等几方面

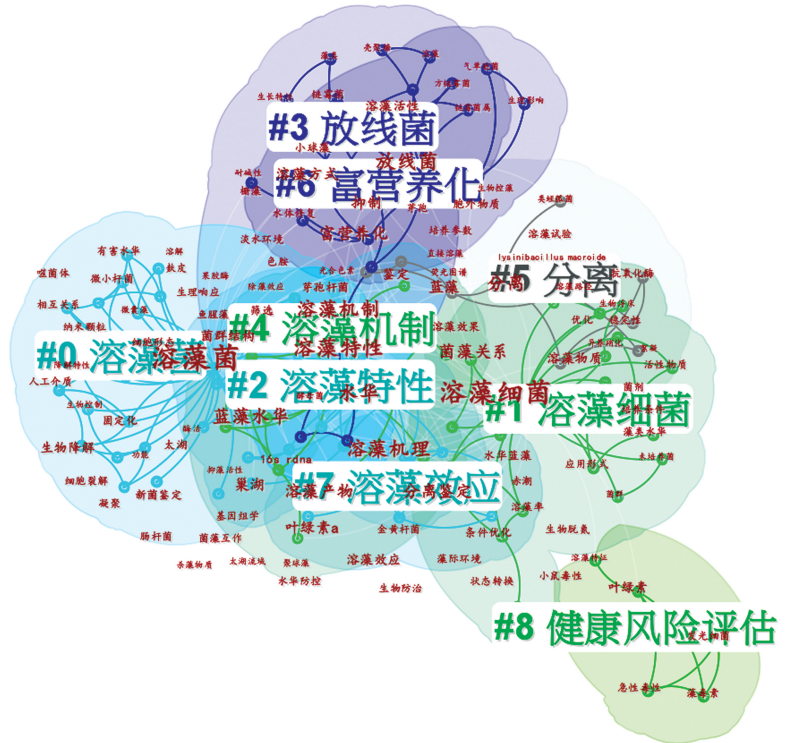


图8 CNKI关键词聚类图谱

Fig.8 Map of keywords co-occurrence in literatures of CNKI

的研究,表明这一板块主要是对溶藻菌分离鉴定、溶藻效率优化以及溶藻物质的研究等方面;溶藻特性板块主要有菌藻关系、叶绿素 *a*、鱼腥藻、芽孢杆菌、16S rDNA、菌藻互作、基因组学、生理响应等关键词,说明该模块主要集中在蓝藻溶藻菌关系、分子层面等方面的研究.放线菌(*Actinomycetes*)是原核生物中一类能形成分枝菌丝和分生孢子的特殊类群,呈菌丝状生长,主要以孢子繁殖,因菌落呈放射状而得名.在蓝藻溶藻菌中,放线菌是主要的类群之一,放线菌模块的研究主要有溶藻活性、溶藻方式、抑制等关键词.环境中存在着大量能分泌溶藻活性物质的放线菌^[41],王素钦等^[42]从土壤中分离筛选出 1 株具有高效溶藻活性的放线菌 LW9(链霉菌属),具有高效且稳定的溶藻能力,肖瑶等^[43]证明放线菌 JXJ 0170 既能分泌活性溶藻物质也能直接溶藻,且对彭泽鲫和田螺没有明显的急性毒性.溶藻机制模块有溶藻机制、蓝藻水华、溶藻产物、菌群结构、巢湖、藻际环境等关键词,表明溶藻机制的研究已经与菌群结构、藻际环境联系起来.分离模块主要出现蓝藻、分离、溶藻试验、抗氧化酶、稳定性等关键词;富营养化模块包括胞外物质、水体修复、小球藻、生理影响等;溶藻效应板块主要是针对溶藻菌的溶藻机理研究;最后是健康风险评估模块,包括发光细菌、藻毒素、急性毒性、叶绿素等关键词,通过健康风险评价人体长期饮用有毒水源后产生的生物毒性和致病风险,自然状态下能够发出荧光的细菌遇到毒性物质,发光会受到抑制,因此能够高效、快捷地对水体进行毒性测定,藻毒素、叶绿素通常作为水体毒性评估、藻浓度评估的指标^[44].

对 WOS 数据库的文献进行关键词聚类(图 9)后出现 8 个主要聚类模块,分别是 #0 algicidal activity、#1 16S rRNA、#3 16S rRNA gene、#4 algicidal substance、#5 Cyanobacteria、#10 harmful algal bloom species、#9 *Bacillus subtilis*、#8 harmful algal bloom species. #0 algicidal activity 模块主要包括 algicidal activity、algicidal mechanism、algicidal bacteria,表明在溶藻活性的基础上进一步探索了溶藻菌的溶藻机制. #1 16S rRNA 主要模块包括 16S rRNA、*Microcystis aeruginosa*、algicidal compound、*Bacillus* sp.、algicidal effect,表明对发现的铜绿微囊藻以及芽孢杆菌等藻类和细菌进行了 16S rRNA 测序和物种鉴定,以及对细菌的溶藻效应及溶藻成分进行了研究. #3 16S rRNA gene 模块包括 16S rRNA gene、bacterial community,此聚类与聚类 2 存在相似之处,主要是侧重于对细菌群体的基因进行测序并进行种属鉴定. #4 algicidal substance 模块主要包括 growth inhibition、algicidal bacterium、compound 等,表明是对溶藻物质在蓝藻生长抑制上的研究,并对其抑制成分进行分析. #5 Cyanobacteria 模块主要是 cyanobacteria、algicidal ability、photosynthesis、lipid peroxidation、oxidative stress 等关键词,表明在溶藻能力的基础上进一步探究了溶藻菌对蓝藻的光合系统、氧化应激反应方面的作用. #10 harmful algal bloom species 模块主要有 *Microcystis aeruginosa*、Taihu lake 等关键词,表明对蓝藻水华类群方面展开了研究,如基于太湖的蓝藻铜绿微囊藻类群的研究. #9 *Bacillus subtilis* 模块关键词主要有 *Bacillus subtilis*(枯草芽孢杆菌)、mechanism 等,表明对枯草芽孢杆菌溶藻机制方面做了一定的研究. #8 harmful algal bloom species 主要包括 bacterial-algal interactions、population genetics 等关键词,表明对形成的蓝藻水华与其周围菌群关系及其群体基因展开了研究.以上聚类结果表明,在蓝藻溶藻菌研究领域,目前已做过的研究主要有物质溶藻活性、分子鉴定、有害蓝藻水华、溶藻机制、溶藻物质、铜绿微囊藻、枯草芽孢杆菌、氧化应激、光合系统、脂质过氧化、生长抑制、菌群关系等方面.

2 个数据库关键词聚类分析结果表明,2002 至 2022 年期间在蓝藻溶藻菌领域开展研究的主要有溶藻菌种类鉴定、溶藻特性、机制、物质分析,对藻毒素的降解,溶藻菌溶藻活性优化,溶藻菌风险评估,以及菌群关系、蓝藻水华治理等几方面,这对未来的研究提供了一定的参考.此外,对 CNKI 与 WOS 两个数据库文献关键词出现频率较高且中心性 ≥ 0.1 的中英文关键词进行分析见表 1.

结果表明,CNKI 数据库中除大模块溶藻菌与溶藻细菌外,中心值与频次较高的关键词为溶藻特性,WOS 中为 harmful algal bloom、growth、algicidal activity,说明基于溶藻菌溶藻特性、溶藻物质活性分析、以及对蓝藻的生长抑制作用,着重于对蓝藻的光合系统抑制方面以及产生氧化应激等方面^[45-48],对蓝藻水华治理方面的研究是关注的热点.

2.5 关键词聚类时间图谱分析

对关键词聚类时间图谱进行研究,既直接反映研究热点随时间的变化关系,同时也能够识别蓝藻溶藻菌研究领域的代表主题子群,进而对未来该研究领域的发展做出合理的预测.采用 CiteSpace 中自动聚类的方法生成聚类知识图谱,以聚类模块值 Modularity(Q)和平均轮廓值 Mean Silhouette(S)两个指标评价聚类

微生物群体、光合系统、氧化应激等以及太湖方面的研究;2016 至 2020 年主要关注点变为 culture condition、gene cluster、mechanism 等方面,表明该期间培养条件、基因簇、机制等方面是研究的热点;到 2021 至 2022 年,physiological response 等是关注的主要方面,表明 2021 至 2022 年期间在生理响应方面的研究是主要热点。

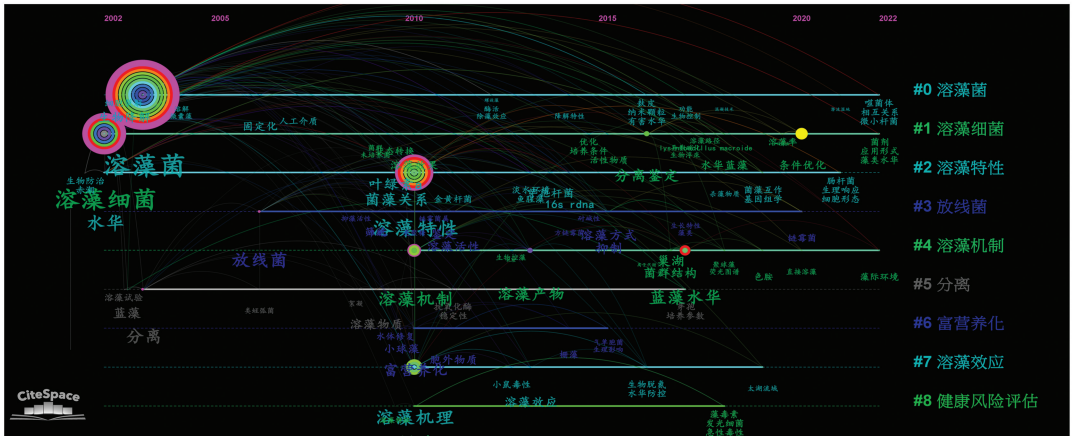


图10 CNKI 蓝藻溶藻菌文献关键词时间线图

Fig.10 Timeline map of keywords on algalicidal bacteria of cyanobacteria in literatures of CNKI

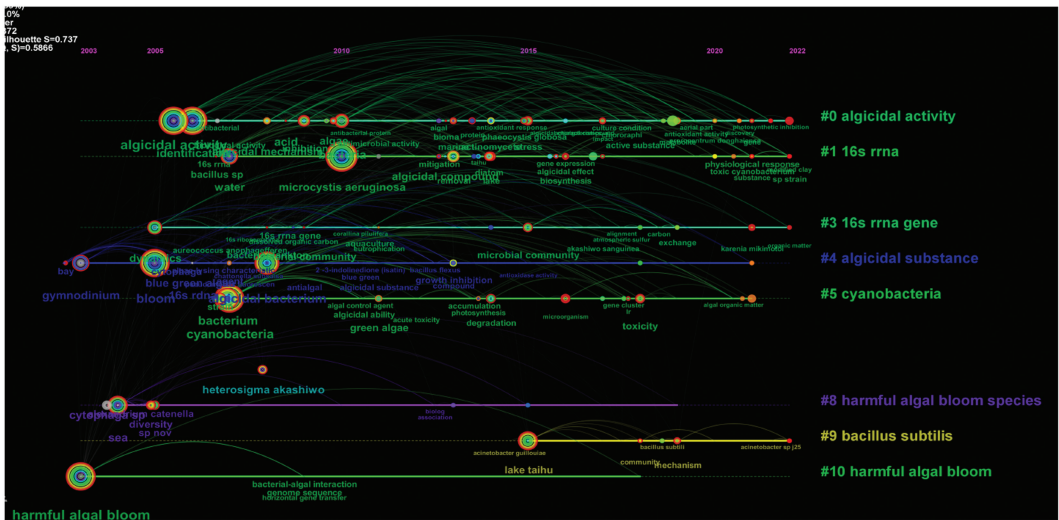


图11 WOS溶藻菌文献关键词时间线图

Fig.11 Timeline map of keywords on algalicidal bacteria of cyanobacteria in literatures of WOS

2.6 研究前沿分析结果

CiteSpace 软件中的 burst detection 功能用来探测关键词在某一时段内的引用变化情况,研究某领域的热点交替,从而分析并预判该领域未来的发展趋势.本研究利用 CiteSpace 软件进行共现分析后,在“Nodes”中选择“Compute Node Centrality”计算关键词中心值;在 Control Panel 中选择“Burstness”,设置突变强度值为 0.2,Minimum Duration 为 2,分别检测 CNKI 和 WOS 数据库中各 30、92 个突变关键词,提取其中突变值较大及持续时间较长、持续时间至 2022 年的关键词进行分析,如表 2 所示。

如表 2 所示,CNKI 中,以关键词“分离”为蓝藻溶藻菌研究方向的领域在 2003 至 2012 年之间最受关注,且在所有关键词中持续时间被引最长,强度值(Strength)为 1.68,表明这段时间关于溶藻菌的“分离”是研究热点;以关键词为“溶藻机制”的研究领域强度值最大,为 1.72,出现年份为 2010 年,持续高被引时间为 2 a,表明在 2018 至 2020 年期间,溶藻菌的“溶藻机制”研究最受关注;其次是菌藻关系(Strength 为 1.4)、富营养化(Strength 为 1.4)、溶藻菌株(Strength 为 1.33)、溶藻作用(Strength 为 1.33)、固定化(Strength 为 1.28)等.此外,关键词“分离鉴定”“水华蓝藻”“溶藻特性”的强度值分别为 1.51、0.87、1.08,研究热度均持续到 2022 年,说明在这三方面的研究依旧是热点,且“分离鉴定”高于“溶藻特性”高于“水华蓝藻”.其中“分离

鉴定”与 2003 至 2012 年期间的“分离”相比,热度略低,但更侧重于“鉴定”方面,与 2011 至 2015 年期间的“鉴定”相比热度高出约 1 倍,且兼顾“分离”与“鉴定”两方面,表明在未来的研究中对于溶藻菌的分离鉴定仍然可能是研究的热点。

表 2 CNKI 高关键突变词

Tab. 2 High burst keywords of CNKI

关键词	出现年	强度值	起始年	关键词	出现年	强度值	起始年
溶藻机制	2010	1.72	2018—2020	放线菌	2006	1.11	2006—2012
分离	2003	1.68	2003—2012	溶藻特性	2010	1.08	2019—2022
分离鉴定	2016	1.51	2018—2022	水华蓝藻	2018	0.87	2018—2022
菌藻关系	2010	1.40	2010—2012	鉴定	2011	0.84	2011—2015
富营养化	2010	1.40	2010—2015				

表 3 WOS 关键高突变词

Tab. 3 High burst keywords of WOS

关键词	出现年	强度值	起始年	关键词	出现年	强度值	起始年
identification	2006	4.34	2013—2014	compound	2013	2.03	2013—2014
oxidative stress	2014	3.05	2020—2022	Taihu	2014	2.02	2014—2016
algicidal bacteria	2005	2.93	2007—2008	lake Taihu	2015	1.63	2015—2022
gene expression	2016	2.53	2016—2017	harmful algal bloom	2003	1.21	2020—2022
16S rDNA	2006	2.45	2006—2009	algal growth	2010	1.18	2010—2017
mechanism	2019	2.17	2019—2022	biological activity	2007	1.08	2007—2013
microbial community	2015	2.15	2017—2019	algicidal mechanism	2008	1.00	2020—2022
phytoplankton	2004	2.07	2011—2013				

WOS 中关于蓝藻溶藻菌突变关键词以 identification、oxidative stress、algicidal bacteria、gene expression、16S rDNA、mechanism、microbial community、phytoplankton、compound、Taihu 等关键词为主,其中突变强度最高的是“Identification”,突变强度值为 4.34,但是以此强度持续的时间仅为 1 年,表明 2013 至 2014 年主要以溶藻的“鉴定”为主要热点,与 CNKI 中存在时间上的重合,具有一致性。其次,“oxidative stress”“mechanism”“lake Taihu”“harmful algal bloom”“algicidal mechanism”突变强度值分别为 3.05、2.17、2.02、1.21、1.00,均低于“identification”,但时间均持续到 2022 年,表明 2022 年以后可能会继续展开在溶藻菌的氧化应激、溶藻机制、蓝藻水华以及基于太湖方面的研究。

3 结 论

本研究通过 CiteSpace 软件,对 CNKI 和 WOS 2 个数据库中 2002 至 2022 年蓝藻溶藻菌研究领域共计 402 篇文献进行可视化分析,结合研究内容对蓝藻溶藻菌研究领域的研究热点与未来发展趋势进行梳理,得出结论如下:

(1)通过对 CNKI 和 WOS 的发文量分析得出,近年来关于蓝藻溶藻菌方面的发文量一直呈上升趋势,英文发文量多于中文发文量,蓝藻溶藻菌领域一直是关注的热点。近几年在蓝藻溶藻菌领域发文量较多的作者为 Dai Xianzhu 等人。

(2)中国是发表蓝藻溶藻菌论文最多的国家,科研人员来自中国科学院、西南大学等单位;国外主要研究单位是韩国,作者以汉阳大学科研人员为主,且与中国学者之间有一定的合作关系。

(3)2002 年至 2022 年期间开展的主要工作包括:溶藻菌的鉴定,溶藻特性、机制、物质分析,对藻毒素的降解,溶藻菌溶藻活性优化,溶藻菌风险评估,以及菌群关系、蓝藻水华治理等几方面,CNKI 中主要出现 9 个主要聚类模块;WOS 中主要出现 8 个主要聚类模块。

(4)聚类时间线图分析表明,蓝藻溶藻菌领域的研究主要包含五个阶段:1)2002至2005年主要是关注蓝藻水华的生物防治、溶藻试验方面;2)2006至2010年期间主要关注菌藻关系、溶藻机制、放线菌、枯草芽孢杆菌、基因簇、16S rRNA、铜绿微囊藻等方面;3)2011至2015年期间主要关注溶藻菌培养条件优化、溶藻物质、光合系统、氧化应激以及太湖领域的研究等;4)2016至2020年主要是在菌群结构、分子机制、培养条件优化、基因簇等方面的研究;5)2021至2022年期间主要关注溶藻菌生理响应、急性毒性等方面。

(5)突变关键词分析表明,以往研究热点包括溶藻菌的分离鉴定、菌藻关系研究、放线菌来源溶藻菌、氧化应激、16S rRNA、溶藻机制、微生物群体、浮游植物、溶藻物质成分分析等,而在2022年以后可能会被关注的热点方向有溶藻菌的分离鉴定、蓝藻水华、氧化应激、溶藻机制等方面。

参 考 文 献

- [1] HUISMAN J, CODD G A, PAERL H W, et al. Cyanobacterial blooms[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2018, 16(8): 471-483.
- [2] HUO D, GAN N Q, GENG R Z, et al. Cyanobacterial blooms in China: diversity, distribution, and cyanotoxins[J]. *Harmful Algae*, 2021, 109: 102106.
- [3] WEI J A, XIE X A, HUANG F Y, et al. Simultaneous Microcystis algicidal and microcystin synthesis inhibition by a red pigment prodigiosin[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 256: 113444.
- [4] CHEN L A, XIE P. Mechanisms of microcystin-induced cytotoxicity and apoptosis[J]. *Mini-Reviews in Medicinal Chemistry*, 2016, 16(13): 1018-1031.
- [5] 杨世敏, 段雨琪, 蒋永光. 活性炭、过氧化氢和次氯酸钠去除拟柱孢藻毒素的比较研究[J]. *河南师范大学学报(自然科学版)*, 2023, 51(5): 107-114.
YANG S M, DUAN Y Q, JIANG Y G. Comparing the removal efficiency of cylindrospermopsin by activated carbon, H₂O₂ and NaClO[J]. *Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition)*, 2023, 51(5): 107-114.
- [6] PAERL H W, OTTEN T G. Harmful cyanobacterial blooms: causes, consequences, and controls[J]. *Microbial Ecology*, 2013, 65(4): 995-1010.
- [7] COYNE K J, WANG Y F, JOHNSON G. Algicidal bacteria: a review of current knowledge and applications to control harmful algal blooms[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2022, 13: 871177.
- [8] CHEN Z R, ZHENG W, YANG L X, et al. Lytic and chemotactic features of the plaque-forming bacterium KD531 on *Phaeodactylum tri-cornutum*[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2017, 8: 2581.
- [9] LI D P, KANG X, CHU L L, et al. Algicidal mechanism of *Raoultella ornithinolytica* against *Microcystis aeruginosa*: Antioxidant response, photosynthetic system damage and microcystin degradation[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 287: 117644.
- [10] YU Y, ZENG Y D, LI J, et al. An algicidal *Streptomyces amrissarensis* strain against *Microcystis aeruginosa* strongly inhibits microcystin synthesis simultaneously[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 650: 34-43.
- [11] YANG C Y, HOU X P, WU D H, et al. The characteristics and algicidal mechanisms of cyanobactericidal bacteria, a review[J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2020, 36(12): 188.
- [12] SHAO J, JIANG Y, WANG Z, et al. Interactions between algicidal bacteria and the *Cyanobacterium Microcystis aeruginosa*: lytic characteristics and physiological responses in the cyanobacteria[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2014, 11(2): 469-476.
- [13] LIU J Y, YANG C Y, CHI Y X, et al. Algicidal characterization and mechanism of *Bacillus licheniformis* Sp34 against *Microcystis aeruginosa* in Dianchi Lake[J]. *Journal of Basic Microbiology*, 2019, 59(11): 1112-1124.
- [14] ZHANG B H, CHEN W, LI H Q, et al. An antialgal compound produced by *Streptomyces jiujiangensis* JXJ 0074^T[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2015, 99(18): 7673-7683.
- [15] YU X Q, CAI G J, WANG H, et al. Fast-growing algicidal *Streptomyces* sp. U3 and its potential in harmful algal bloom controls[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, 341: 138-149.
- [16] ZENG Y D, WANG J Y, YANG C Y, et al. A *Streptomyces globisporus* strain kills *Microcystis aeruginosa* via cell-to-cell contact[J]. *The Science of the Total Environment*, 2021, 769: 144489.
- [17] YI Y L, YU X B, ZHANG C, et al. Growth inhibition and microcystin degradation effects of *Acinetobacter guillouiae* A2 on *Microcystis aeruginosa*[J]. *Research in Microbiology*, 2015, 166(2): 93-101.
- [18] SUN P F, ESQUIVEL-ELIZONDO S, ZHAO Y H, et al. Glucose triggers the cytotoxicity of *Citrobacter* sp. R1 against *Microcystis aeruginosa*[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 603: 18-25.
- [19] MANAGE P M, KAWABATA Z, NAKANO S. Algicidal effect of the bacterium *Alcaligenes denitrificans* on *Microcystis* spp[J]. *Aquatic Microbial Ecology*, 2000, 22: 111-117.
- [20] MITSUTANI A, YAMASAKI I, KITAGUCHI H, et al. Analysis of algicidal proteins of a diatom-lytic marine bacterium *Pseudoaltero-*

- monas* sp.strain A25 by two-dimensional electrophoresis[J].Phycologia,2001,40(3):286-291.
- [21] 章登岚,赵以军,吴刚,等.不同来源溶藻菌的分离、鉴定及溶藻效果比较[J].微生物学杂志,2017,37(3):100-104.
ZHANG D L,ZHAO Y J,WU G,et al.Isolation and identification of algae-lysing microbes from different resources and comparison of their algicidal efficiency[J].Journal of Microbiology,2017,37(3):100-104.
- [22] IMAMURA N,MOTOIKE I,NODA M,et al.Argimicin A,a novel anti-cyanobacterial compound produced by an algae-lysing bacterium [J].The Journal of Antibiotics,2000,53(11):1317-1319.
- [23] 李祎,聂荷,张惠科,等.群体感应介导的溶藻行为对蓝藻水华控制的研究[J].河南师范大学学报(自然科学版),2022,50(2):136-142.
LI Y,NIE H,ZHANG H K,et al.Advances in the control of cyanobacterial blooms by quorum sensing mediated algicidal activity[J].Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition),2022,50(2):136-142.
- [24] 张嗣萍.一株广谱性溶藻细菌的筛选鉴定、溶藻特性及溶藻机理的研究[D].重庆:西南大学,2018.
ZHANG S P.Screening and identification of a broad-spectrum algicidal bacteria,study on algicidal characteristics and algicidal mechanism [D].Chongqing:Southwest University,2018.
- [25] LEE C S,JEON M S,VO T T,et al.Establishment of a new strategy against *Microcystis* bloom using newly isolated lytic and toxin-degrading bacteria[J].Journal of Applied Phycology,2018,30(3):1795-1806.
- [26] JIANG Y G,SHAO J H,WU X Q,et al.Active and silent members in the mlr gene cluster of a microcystin-degrading bacterium isolated from Lake Taihu,China[J].FEMS Microbiology Letters,2011,322(2):108-114.
- [27] MEYER N,BIGALKE A,KAULFU? A,et al.Strategies and ecological roles of algicidal bacteria[J].FEMS Microbiology Reviews,2017,41(6):880-899.
- [28] GUO X L,LIU X L,WU L S,et al.The algicidal activity of *Aeromonas* sp.strain GLY-2107 against bloom-forming *Microcystis aeruginosa* is regulated by N-acyl homoserine lactone-mediated quorum sensing[J].Environmental Microbiology,2016,18(11):3867-3883.
- [29] ZENG Y H,CAI Z H,CHENG K K,et al.Naturally occurring lasso peptides as algicidal agents against *Microcystis aeruginosa* [J].Journal of Cleaner Production,2022,381:135136.
- [30] 王嘉宇.*Streptomyces amritsarensis* HG-16 溶解微囊藻群体、拮抗禾谷镰孢菌的特性及优化发酵条件研究[D].重庆:西南大学,2021.
WANG J Y.Study on the characteristics of *Streptomyces amritsarensis* HG-16 dissolving *Microcystis* population,antagonizing *Fusarium graminearum* and optimizing fermentation conditions[D].Chongqing:Southwest University,2021.
- [31] 魏志莹,叶愉群,杨秀雯,等.溶藻菌固定技术在除藻中的应用研究进展[J].绿色科技,2020(20):135-139.
WEI Z Y,YE Y Q,YANG X W,et al.Research progress on application of algae-lysing bacteria immobilization technology in algae removal [J].Journal of Green Science and Technology,2020(20):135-139.
- [32] 张超,文涛,张媛,等.基于文献计量分析的镰刀菌枯萎病研究进展解析[J].土壤学报,2020,57(5):1280-1291.
ZHANG C,WEN T,ZHANG Y,et al.Bibliometric-based analysis of advances in researches on *Fusarium* wilt disease[J].Acta Pedologica Sinica,2020,57(5):1280-1291.
- [33] FU L,MAO S D,CHEN F,et al.Graphene-based electrochemical sensors for antibiotic detection in water,food and soil:a scientometric analysis in CiteSpace(2011-2021)[J].Chemosphere,2022,297:134127.
- [34] KOONDHAR M A,SHAHBAZ M,ALI MEMON K,et al.A visualization review analysis of the last two decades for environmental Kuznets curve "EKC" based on co-citation analysis theory and pathfinder network scaling algorithms[J].Environmental Science and Pollution Research,2021,28(13):16690-16706.
- [35] 曹玥祺,林莉,潘雄,等.基于 CiteSpace 的淡水环境微塑料研究现状及新兴趋势的可视化文献计量分析[J].长江科学院院报,2023,40(2):153-160.
CAO Y Q,LIN L,PAN X,et al.CiteSpace-based visual bibliometric analysis of research status and emerging trends of microplastics in freshwater environment[J].Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2023,40(2):153-160.
- [36] 杨阳,李海亮,马凯丽,等.放线菌及其代谢产物研究进展:基于 CiteSpace 可视化分析[J].微生物学报,2022,62(10):3825-3843.
YANG Y,LI H L,MA K L,et al.Actinomycetes and their metabolites:visual analysis based on Cite Space[J].Acta Microbiologica Sinica,2022,62(10):3825-3843.
- [37] 严陶韬,薛建辉.中国生物多样性研究文献计量分析[J].生态学报,2021,41(19):7879-7892.
YAN T T,XUE J H.Bibliometric analysis of biodiversity research literature in China[J].Acta Ecologica Sinica,2021,41(19):7879-7892.
- [38] 罗杨,吴永贵,段志斌,等.基于 CiteSpace 重金属生物可给性的文献计量分析[J].农业环境科学学报,2020,39(1):17-27.
LUO Y,WU Y G,DUAN Z B,et al.Bibliometric analysis of bioaccessibility of heavy metals based on CiteSpace[J].Journal of Agro-Environment Science,2020,39(1):17-27.
- [39] 杨思洛,韩瑞珍.知识图谱研究现状及趋势的可视化分析[J].情报资料工作,2012(4):22-28.
YANG S L,HAN R Z.A visual analysis of the status quo and trend of knowledge mapping research[J].Information and Documentation Services,2012(4):22-28.
- [40] SUN P F,LIN H,WANG G,et al.Wheat bran enhances the cytotoxicity of immobilized *Alcaligenes aquatilis* F8 against *Microcystis*

- aeruginosa* [J]. PLoS One, 2017, 10(8): e0136429.
- [41] 孙秀敏, 万旗东, 郑培忠, 等. 生物杀藻剂: 溶藻微生物的研究进展 [J]. 现代农药, 2011, 10(3): 1-6.
SUN X M, WAN Q D, ZHENG P Z, et al. Research progress of biological algacide—algae-lysing microorganisms [J]. Modern Agrochemicals, 2011, 10(3): 1-6.
- [42] 王素钦, 罗从强, 朱晓漫, 等. 高效溶藻放线菌 LW9 的分离鉴定及其溶藻特性 [J]. 武汉大学学报(理学版), 2021, 67(1): 93-102.
WANG S Q, LUO C Q, ZHU X M, et al. Isolation and identification of an efficient algicidal actinomycetes strain LW9 and its algicidal characteristics [J]. Journal of Wuhan University (Natural Science Edition), 2021, 67(1): 93-102.
- [43] 肖瑶, 田宝玉, 张炳火. 放线菌 JXJ 0170 对铜绿微囊藻的溶藻活性 [J]. 天然产物研究与开发, 2020, 32(5): 813-819.
XIAO Y, TIAN B Y, ZHANG B H. Alga-lysing activity of actinomycete JXJ 0170 on *Microcystis aeruginosa* [J]. Natural Product Research and Development, 2020, 32(5): 813-819.
- [44] 潘瑞松, 沈红池, 吴旭鹏, 等. 双效工程菌 Y1 溶藻产物的急性毒性与健康风险评估 [J]. 土木建筑与环境工程, 2018, 40(5): 141-146.
PAN R S, SHEN H C, WU X P, et al. Acute toxicity of the algae-lysing products and assessment on health risks of microcystin in drinking water sources [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2018, 40(5): 141-146.
- [45] PAL M, YESANKAR P J, DWIVEDI A, et al. Biotic control of harmful algal blooms (HABs): a brief review [J]. Journal of Environmental Management, 2020, 268: 110687.
- [46] ZHANG Q, CHEN Y C, WANG M, et al. Molecular responses to inorganic and organic phosphorus sources in the growth and toxin formation of *Microcystis aeruginosa* [J]. Water Research, 2021, 196: 117048.
- [47] ZHANG S, ZHENG W, WANG H. Physiological response and morphological changes of *Heterosigma akashiwo* to an algicidal compound prodigiosin [J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 385: 121530.
- [48] WU D H, YANG C Y, ZHANG X A, et al. Algicidal effect of tryptoline against *Microcystis aeruginosa*: excess reactive oxygen species production mediated by photosynthesis [J]. Science of the Total Environment, 2022, 806: 150719.
- [49] CHEN C M, IBEKWE-SANJUAN F, HOU J H. The structure and dynamics of cocitation clusters: a multiple-perspective cocitation analysis [J]. Journal of the American Society for Information Science and Technology, 2010, 61(7): 1386-1409.
- [50] 章琦, 李宝珍, 郑雪梅, 等. 2000—2020 年中国多重耐药菌研究热点的可视化分析 [J]. 中国全科医学, 2022, 25(24): 2960-2964.
ZHANG Q, LI B Z, ZHENG X M, et al. Research hotspots of multidrug-resistant organisms in China from 2000 to 2020: a visualization analysis [J]. Chinese General Practice, 2022, 25(24): 2960-2964.
- [51] 陈悦, 陈超美, 刘则渊, 等. CiteSpace 知识图谱的方法论功能 [J]. 科学学研究, 2015, 33(2): 242-253.
CHEN Y, CHEN C M, LIU Z Y, et al. The methodology function of Cite Space mapping knowledge domains [J]. Studies in Science of Science, 2015, 33(2): 242-253.

Visualized analyses on current research status on algicidal bacteria of cyanobacteria

Li Renhui¹, Wang Guang¹, Zhu Zhandan², Geng Ruozhen¹, Xiao Peng¹, Zhang He¹

(1. College of Life and Environmental Science; National and Local Joint Engineering Research Center of Urban Water Pollution Ecological Governance Technology, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China;

2. The Hydro-junction Management Center of Wenzhou Shanxi, Wenzhou 325304, China)

Abstract: The frequently outbreak of harmful cyanobacterial blooms (HCBs) seriously threatens the safety of aquatic organisms and public health. Algicidal bacteria are potential microorganisms controlling HCBs. In this study, literatures (from 2002 to 2022) on algicidal bacteria from China National Knowledge Network Infrastructure (CNKI) and Web of Science (WOS) databases are analyzed by CiteSpace software. The major results are as follows: (1) In the recent 20 years, the number of algicidal bacteria related publication is continuously increasing. Interiorly, the dominated research organizations including Chinese Academy of Sciences, Southwest University, etc. On the contrary, it is Hanyang University in South Korea. (2) According to our analysis: before 2022, researchers paid attentions to the following topics: isolation and identification of algicidal bacteria, cyanobacteria-bacteria relationship, oxidative stress, algicidal mechanism, microbial community, phytoplankton, algicidal compound, optimization of culture conditions, etc. On the contrary, after 2022, topics of isolation and identification of algicidal bacteria, biological control of cyanobacteria blooms, oxidative stress response, quorum sensing (QS), molecular mechanism of algicidal bacteria, degradation of cyanobacterial toxins attract continuous attention. Moreover, identification of active algicidal substances, and relevant genes may become the potential research hotspots.

Keywords: CiteSpace; harmful cyanobacterial blooms; algicidal bacteria; research hotspots

[责任编辑 刘洋 杨浦]

本期专家介绍



王磊,北京航空航天大学教授,博士生导师,国家级青年人才、浙江钱江特聘专家.长期从事集群系统控制与优化研究工作,围绕服务国家战略和国民经济重要领域的群体智能理论、自主协同控制与优化决策等需求,面向以多无人飞行器系统为代表的典型应用,形成了具有自身特色与优势的稳定研究方向.在 *Automatica*, *SIAM* 期刊, *IEEE* 汇刊等国际知名期刊发表高水平论文 80 余篇;授权国家发明专利 13 件(第一发明人 10 件),其中 1 件专利已成功转化;先后获得浙江省科学技术奖二等奖(排名 3, 2012 年)、中国仪器仪表学会技术发明二等奖(排名 1, 2020 年)、麒麟科学技术奖—优秀科技创新奖(排名 1, 2021 年)、中国仪器仪表学会技术发明一等奖(排名 5, 2022 年)、河南省教育厅科技成果奖一等奖(排名 2, 2023 年)等.受邀担任美国仪器、系统和自动化协会旗舰期刊 *ISA Transactions* 副编辑(Associate Editor)、《航空学报》编委等重要学术兼职.

王萌,河南师范大学教授,博士,硕士生导师.任中国电源学会无线电能传输技术及装置专业委员会委员,河南省电工技术学会理事,国家自然科学基金通信评审专家,教育部学位与研究生教育评审专家. *IEEE TIE*, *IEEE TIM*, *IEEE TPE*, *AEU-IJEC* 等 SCI 期刊审稿人.主要从事无线电能传输技术、电学检测与成像技术的研究,近年来,先后主持国家自然科学基金面上项目、河南省重点科技攻关项目、河南省自然科学基金面上项目以及服务于地方经济的横向项目等科研课题 8 项,在 *IEEE TIE*, *IEEE TIM*, *IEEE JESTPE*, *IEEE TII*, *IEEE MWCL*, 《电工技术学报》等多个国际和国内行业权威期刊发表 SCI/EI 检索学术论文 93 篇,以第一发明人在相关领域授权国家发明专利 25 件,并实现技术转让 6 件.



李仁辉,温州大学教授,温州市高层次引进人才 B 类杰出人才.1998 年取得日本筑波大学理学博士,1998 年 4 月至 2005 年 9 月分别在日本国立环境研究所,美国赖特州立大学,弗吉尼亚理工大学和田纳西大学从事博士后研究.2005 年 9 月入选中国科学院海外杰出引进人才“百人计划”.曾任中国科学院水生生物研究所藻类研究中心主任,二级研究员,博士生导师.研究的领域包括水体富营养化,有毒蓝藻水华和藻类异味,饮用水源地有害生物和污染物的检测以及水质安全保障等.主持和承担国家“973”课题,“十一五”,“十二五”和“十三五”国家水专项、国家自然科学基金等国家级项目以及受委托横向项目 60 余项(其中国家自然科学基金 8 项),广泛开展同美国、日本和澳大利亚的国际合作研究.受聘于多个省市的“蓝藻水华和饮用水问题及处理”的专家,担任中国藻类学会常务理事兼副秘书长,国际藻类杂志 *Phycologia* (SCI) 副主编, *Journal of Systematics and Evolution* (SCI) 的副主编, *Harmful Algae*, 《生物多样性》和《应用与环境生物学报》的编委等.发表学术论文 150 余篇,其中第一和通信作者的 SCI 论文 130 余篇,被引 3 300 余次, H 指数 34.