

# 基于文献计量的微生物胞外聚合物研究可视化分析

陈君帅<sup>1</sup>, 赵辉<sup>\*1</sup>, 闫华晓<sup>\*1</sup>, 张威<sup>1</sup>, 姚术涵<sup>1</sup>, 韩作振<sup>2</sup>

1 山东科技大学 化学与生物工程学院生物工程系, 山东 青岛 266590

2 山东科技大学 地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590

陈君帅, 赵辉, 闫华晓, 张威, 姚术涵, 韩作振. 基于文献计量的微生物胞外聚合物研究可视化分析[J]. 微生物学通报, 2024, 51(11): 4768-4786.

CHEN Junshuai, ZHAO Hui, YAN Huaxiao, ZHANG Wei, YAO Shuhan, HAN Zuozhen. Visual analysis of research on microbial extracellular polymeric substances based on bibliometrics[J]. Microbiology China, 2024, 51(11): 4768-4786.

**摘要:** 【背景】胞外聚合物是微生物分泌的高分子聚合物, 在环境治理、材料科学、生物医学等领域具有重要的应用价值。【目的】探讨胞外聚合物研究现状、研究热点和发展趋势。【方法】采用文献计量学方法, 基于 Web of Science 核心合集数据库, 检索近 10 年胞外聚合物相关文献, 利用 VOSviewer 软件进行统计分析。【结果】胞外聚合物研究发文量呈上升趋势, 中国发文量居首, 但质量有待提高; 研究热点主要集中在环境治理、生物制造和生物矿化等领域; 微塑料降解是当前研究热点之一。【结论】本研究为深入了解胞外聚合物研究现状以及把握发展趋势提供了依据。

**关键词:** 微生物胞外聚合物; 文献计量学; VOSviewer; 聚类分析; 知识图谱

## Visual analysis of research on microbial extracellular polymeric substances based on bibliometrics

CHEN Junshuai<sup>1</sup>, ZHAO Hui<sup>\*1</sup>, YAN Huaxiao<sup>\*1</sup>, ZHANG Wei<sup>1</sup>, YAO Shuhan<sup>1</sup>, HAN Zuozhen<sup>2</sup>

1 Department of Bioengineering, College of Chemical and Biological Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong, China

2 College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong, China

**Abstract:** [Background] Extracellular polymeric substances (EPS), polymers secreted by microorganisms, have been applied in environmental management, material science, and

资助项目: 国家自然科学基金(42372135, 42072136); 山东省自然科学基金(ZR2023MD063)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (42372135, 42072136) and the Natural Science Foundation of Shandong Province (ZR2023MD063).

\*Corresponding authors. E-mail: ZHAO Hui, zhsdust@126.com; YAN Huaxiao, 15863462975@163.com

Received: 2024-02-25; Accepted: 2024-05-21; Published online: 2024-06-06

biomedicine. **[Objective]** To discuss the research status, hotspots, and trends of EPS. **[Methods]** We retrieved the publications related to EPS in the last 10 years from the Web of Science Core Collection and employed VOSviewer to perform the statistical analysis. **[Results]** The number of publications about EPS was on the rise. China had the largest number of publications, the quality of which, however, remained to be improved. The research on EPS mainly involved environmental governance, biomanufacturing, and biomineralization. The degradation of microplastics is one of the hotspots. **[Conclusion]** This study provides a basis for understanding the research status and trends of EPS.

**Keywords:** extracellular polymeric substances (EPS); bibliometrics; VOSviewer; cluster analysis; knowledge map

胞外聚合物(extracellular polymeric substances, EPS)是由微生物(主要是细菌)在一定环境条件下分泌于胞外的一些高分子聚合物,一般由水、胞外多糖、胞外蛋白质、胞外脱氧核糖核苷酸及脂质等构成。胞外聚合物作为一种天然聚合物,近年来在生物医药<sup>[1]</sup>、生物环境<sup>[2]</sup>、生物制造<sup>[3]</sup>、生物矿化<sup>[4]</sup>及生物防护<sup>[5]</sup>等领域都有着广泛的应用。由于其独特的性质,胞外聚合物对于以上领域有着重要的意义,所以受到越来越多科研人员的重视。因此,有必要了解胞外聚合物的研究热点,从而准确把握胞外聚合物研究的发展趋势和关键科学技术问题。目前虽然有一些学者对胞外聚合物的研究进展进行了综述,但完整性和系统性仍明显不足,对文献工作缺乏系统性的量化管理,对未来发展趋势也缺乏数据支撑,亟须进一步总结完善。本课题组近年来着重于微生物沉积矿化研究,发现胞外聚合物在微生物沉积矿化领域有着独特的应用。例如,胞外聚合物能影响矿物的形成,胞外聚合物内的某些有机分子可能能够调节矿物的成核和生长<sup>[6-7]</sup>。环境中离子的组成和浓度能改变胞外聚合物的成分,进而影响矿物的生长和其他特性<sup>[8-10]</sup>。胞外聚合物也能改变环境中离子的浓度,促进离子成核<sup>[11]</sup>。胞外聚合物在矿化领域有着独特的性质,这为胞外聚合物提供

了研究价值。除此以外,我们还发现胞外聚合物在微生物沉积矿化领域的文章中出现频次较高,这归功于胞外聚合物在矿化领域的独特性质,同时也说明了胞外聚合物与地学的关系密切。鉴于胞外聚合物在微生物沉积矿化领域的独特应用及其对环境的重要影响,同时为了推广胞外聚合物在其他相关领域的研究和实践,系统总结微生物胞外聚合物研究的必要性显而易见。

文献计量学是一门交叉学科,采用数学和统计学的方法定量地对知识载体进行分析。其主要研究对象包括文献量(如各种出版物,特别是期刊论文和引文)、作者数及词汇数等。文献计量分析可以广泛应用于科研评价、科学趋势、热点研究及科研决策等多个领域。例如,可以通过文献计量分析来评价学术产出,了解某项研究在学术界的地位,辅助科研决策,如合作选择和期刊选择等。此外,通过文献计量,还可以研究了解某一领域或学科的研究趋势、热点和发展方向。相较于内容分析法,文献计量学可以减少对人力和时间的要求,并且能够客观地反映各领域及其技术的研究内容和发展规律,有助于寻找未来发展方向和研究价值。当前,文献计量学已涉足多项领域,但目前利用文献计量学的方法完整地分析胞外聚合

物研究进展的文章却鲜有报道。

因此,本研究利用 VOSviewer 软件对近 10 年(2014–2023 年)的胞外聚合物相关文献的基本信息进行了统计,并通过关联性分析,定量评估了微生物胞外聚合物研究领域文献的整体研究水平,为研究人员快速掌握该领域的动向和未来研究前景提供理论基础和参考。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 信息来源及检索方式

基于 Web of Science 核心合集数据库,以 EPS 为主题检索词,对 2014–2023 年所发表的胞外聚合物相关文献进行检索,检索时间为 2024 年 1 月 9 日,有效检索结果为 9 394 条,为提高结果分析的准确性,过滤综述、会议论文及书籍章节等文献类型,仅保留了研究型论文共 8 474 篇,其中共计关键词 24 027 个、作者 26 937 位、来源于 4 828 所机构和 108 个国家。

### 1.2 数据提取及统计方法

首先利用 Web of Science 的“分析检索结果”功能,整理出每年发表的论文数量和论文所属的学科等。然后将 8 474 条检索结果的基本信息以纯文本形式导出,并使用 VOSviewer 软件对文本文件进行识别和统计。最后利用可视化工具 Scimago Graphica 展示论文所属的国家、机构和作者的影响力以及他们之间的合作关系,并构建关键词共现网络,分析关键词随时间的流动情况,以探讨胞外聚合物在全球的主要研究内容和发展趋势。

## 2 结果与分析

### 2.1 发文量

学术论文的发表量可以在一定程度上界定某一研究方向的发展规模和态势。将学术论文发表量随时间变化的数据绘成柱状图,可以直

观地看出近年来胞外聚合物相关论文发表量的变化趋势,图 1 为胞外聚合物相关论文的发文量。由图 1 可以看出,2014–2023 年该研究领域年度发文量整体呈上升趋势。其中,2019 年论文数量有较大增长,此后增长速度较快,并在 2022 年达到顶峰。从近几年胞外聚合物相关学术论文的发表量中不难看出,近年来胞外聚合物的研究热度在不断提高而且增势明显突出。

### 2.2 研究方向

对 Web of Science 中胞外聚合物相关论文研究方向的统计结果进行分析,结果表明,发表量不少于一百篇的研究方向共有 20 个,足见胞外聚合物在科学研究中的重要地位和广泛的应用价值,吸引了多个领域的研究者进行研究。图 2 表示论文数量前十研究方向的胞外聚合物相关文章发表量,如图 2 所示,排名第一的是 Environmental Sciences,文章数量达到了 3 647 篇,占比 42.93%。排名第二的是 Engineering Environmental,文章数量为 2 016 篇,占比 23.73%。胞外聚合物相关文章的研究方向前二均与环境相关。这归因于胞外聚合物在调节环境微生物群落组成<sup>[12]</sup>、缓冲污染物扩散<sup>[13–14]</sup>以及迁移转化重金属与有机污染<sup>[2]</sup>等方面的重要作用。后续还有 Biotechnology Applied Microbiology、Engineering Chemical 和 Water Resources 等。以上分析表明胞外聚合物在环境与生态方面影响巨大,在生物学、化学、能源及农业等方面也小有影响。胞外聚合物在多个领域都有独特的性质和应用,具有广泛的研究价值和应用价值。

### 2.3 研究团体

追踪国家、机构、团队等研究力量,可以快速了解领域最新的研究动向。表 1 是不同国家胞外聚合物相关文章发表的合作强度、发文量、引用与平均引用的数据。图 3A 是不同国家

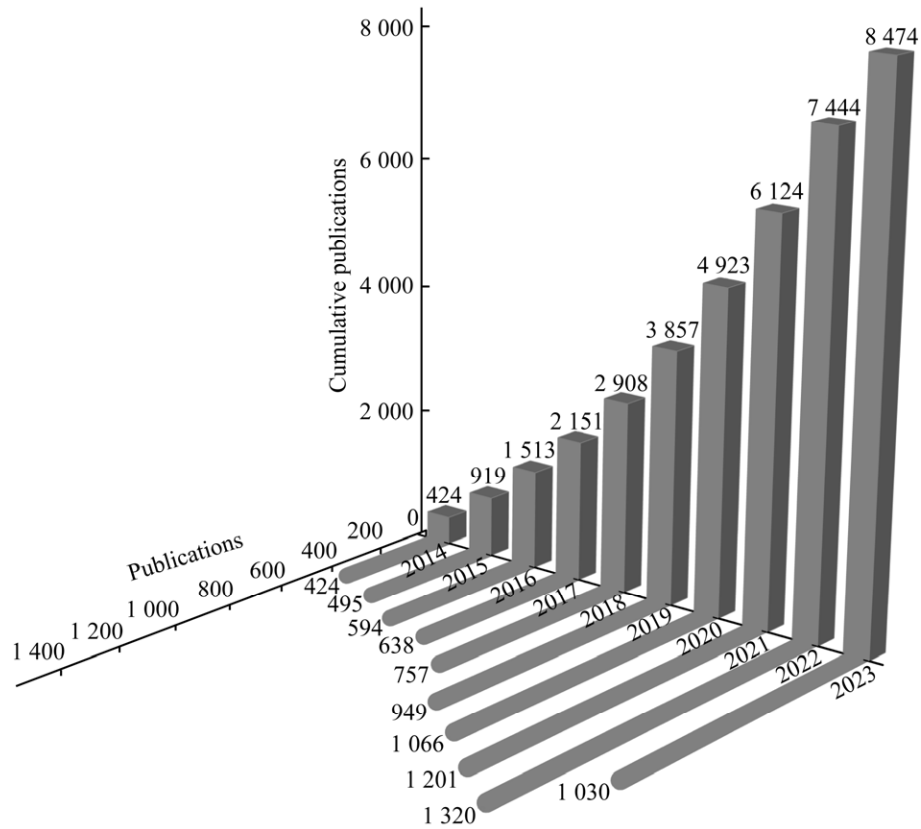


图 1 2014–2023 年胞外聚合物相关论文的刊出量

Figure 1 The publication volume of extracellular polymeric substances related papers from 2014 to 2023.

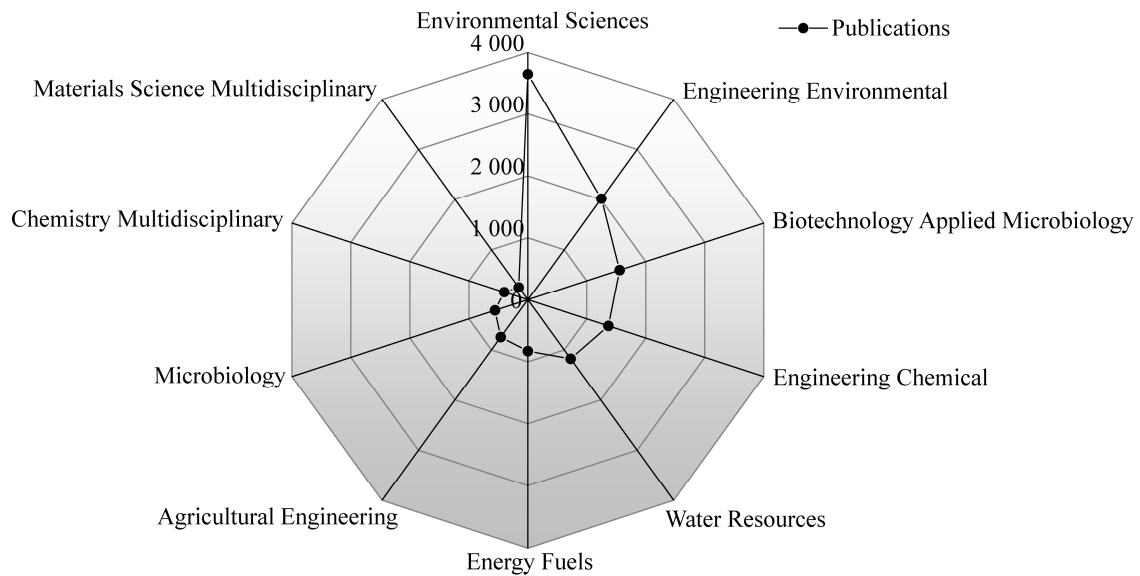


图 2 2014–2023 年胞外聚合物相关论文发表量排名前 10 的学科

Figure 2 Top 10 Subject categories with the highest publication volume of extracellular polymeric substances related papers from 2014 to 2023.

表 1 不同国家胞外聚合物相关文章的合作强度、发文量、引用与平均引用

Table 1 Collaboration intensity, publication volume, citation, and average citation of extracellular polymeric substances-related articles in different countries

排序	合作强度	发文量	引用	平均引用
Rank	Total link strength	Publication	Citation	Average citation
1	1 260 (China)	5 281 (China)	110 480 (China)	30.77 (Singapore)
2	706 (USA)	958 (USA)	23 958 (USA)	28.90 (Iran)
3	381 (Australia)	437 (India)	10 159 (Australia)	27.36 (Netherlands)
4	238 (United Kingdom)	399 (Australia)	8 759 (India)	26.84 (Italy)
5	223 (Germany)	305 (Germany)	6 930 (Germany)	25.46 (Australia)
6	206 (Netherlands)	302 (Korea)	6 539 (Korea)	25.01 (USA)
7	191 (Canada)	267 (United Kingdom)	6 129 (Netherlands)	24.27 (Saudi Arabia)
8	186 (Korea)	263 (Canada)	6 038 (United Kingdom)	22.72 (Germany)
9	179 (India)	239 (Japan)	5 756 (Canada)	22.61 (United Kingdom)
10	173 (Japan)	224 (Netherlands)	5 724 (Singapore)	21.89 (Canada)
11	173 (Singapore)	203 (France)	5 201 (Japan)	21.76 (Japan)
12	140 (France)	186 (Singapore)	4 429 (Italy)	21.65 (Korea)
13	119 (Saudi Arabia)	165 (Italy)	3 783 (France)	20.92 (China)
14	115 (Italy)	146 (Spain)	3 352 (Iran)	20.04 (India)
15	76 (Spain)	123 (Brazil)	2 548 (Saudi Arabia)	18.64 (France)
16	42 (Brazil)	116 (Iran)	2 199 (Spain)	16.96 (Turkey)
17	34 (Iran)	107 (Turkey)	1 815 (Turkey)	15.06 (Spain)
18	28 (Turkey)	105 (Saudi Arabia)	1 712 (Brazil)	13.92 (Brazil)

胞外聚合物相关文章发表量的共现性网络图，为方便统计，只保留发文量较多的 18 个代表性国家。通过图 3A 和表 1 可以看出，合作强度、发文量和引用水平居于世界前列的均为中国，其次是美国，平均引用数最高的国家为新加坡。

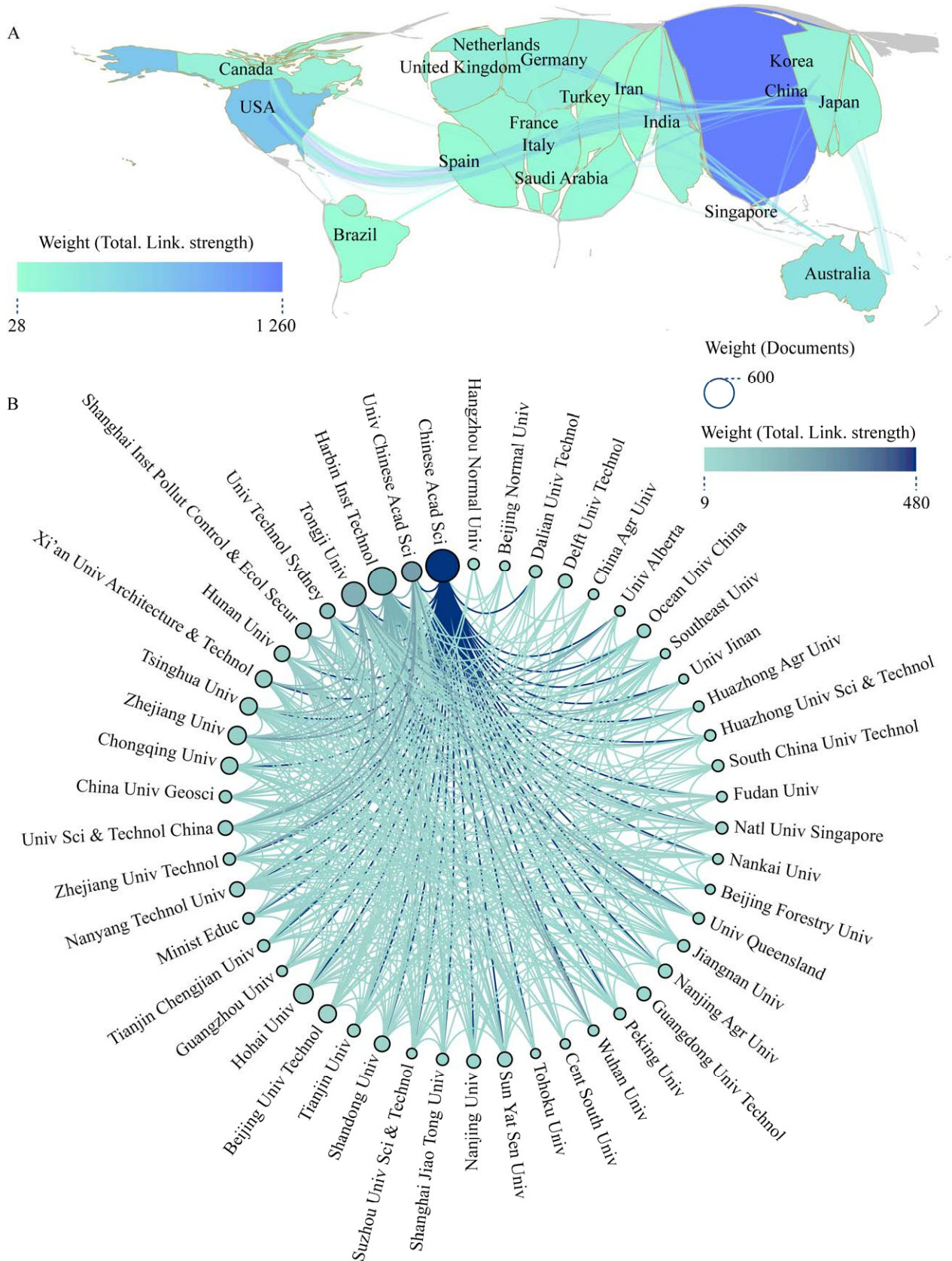
图 3B 是不同机构胞外聚合物相关文章发表的共现性网络图，为方便统计，只保留发文量较多的 50 所机构，中国科学院的发文量为国内最高，达到 563 篇；其合作总强度同样位于首位，达到 480。中国科学院大学的发文量达到 203 篇，合作总强度仅次于中国科学院，达到 254。哈尔滨工业大学发文量达到 392 篇；其合作总强度达到 198。由此可见，以上学术机构在胞外聚合物研究领域影响力较大。图 3C 是胞外聚合物相关论文发表作者的共现性网络图，为便于统计，取发文量较多的 95 位作者。

以图 3C 为依据，从作者间合作关系的角度来看，部分作者具有相对聚集性。根据文献发表的平均年份，早期较为明显的有金春姬、郭亮、余宗莲、高孟春、赵阳国(中国海洋大学海洋环境与生态教育部重点实验室)等学者组成的科研团队<sup>[15]</sup>和方芳、侯俊、王沛芳(河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室)等学者组成的科研团队<sup>[16-18]</sup>，后期较为明显的有韩懿、侯雅男、李海波(天津城建大学)等学者组成的科研团队<sup>[19]</sup>。这些学者对胞外聚合物领域研究的推动发挥了极其重要的作用。

## 2.4 微生物胞外聚合物的研究现状及发展趋势

### 2.4.1 研究现状

关键词是一篇文献有效信息的极简概括。通过关键词可以快速了解论文研究主题，从而



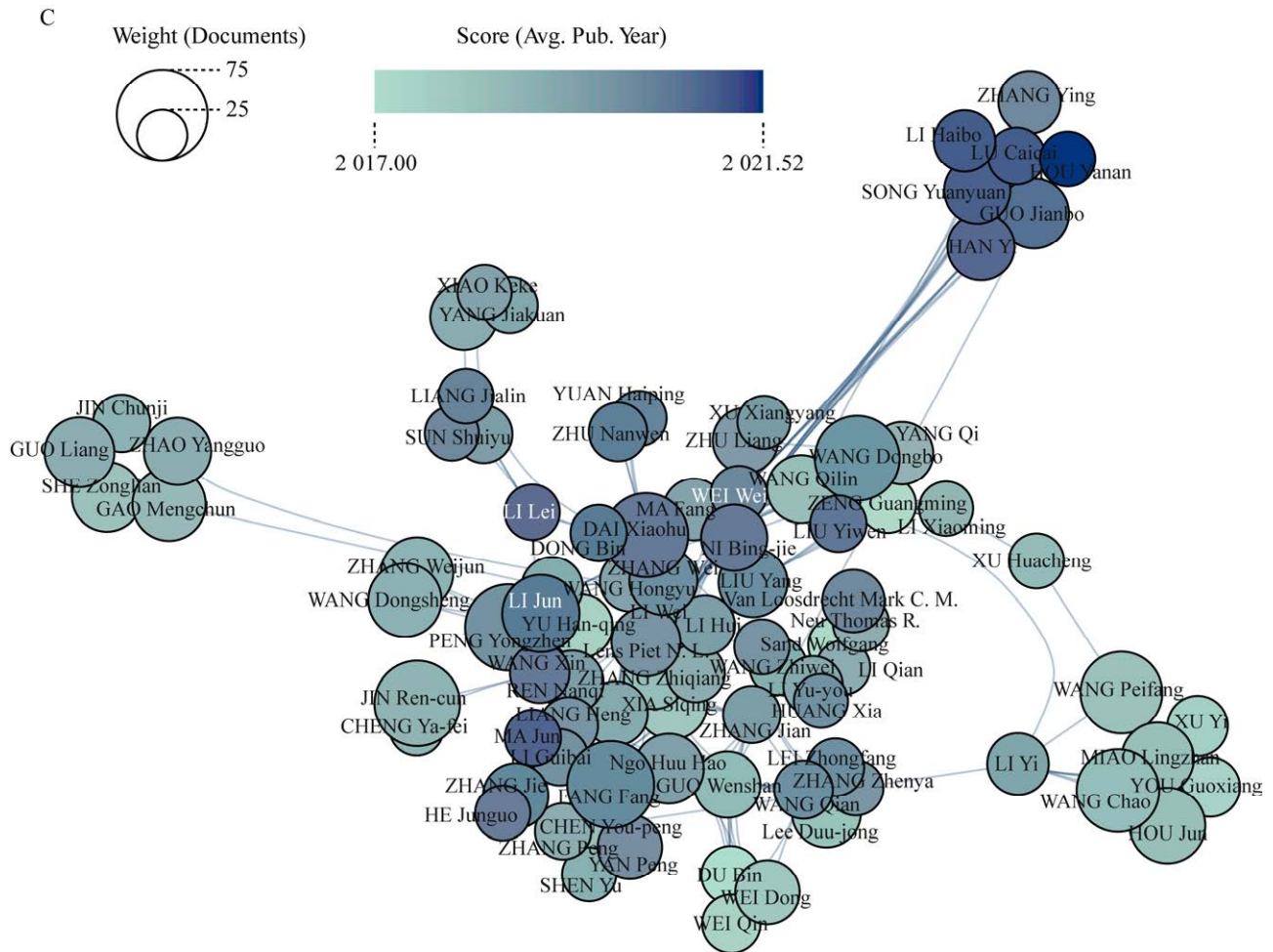


图 3 国家(A)、机构(B)、作者(C)的共现性网络图

Figure 3 Co-occurrence map of countries (A), institutions (B), and authors (C).

进一步判断研究内容和趋势。关键词中也可能包含某种新的数据分析方法或技术,可能表明该研究采用了新的方法,体现该项研究的创新性。使用 VOSviewer 对检索结果进行统计与分析,共获得关键词 23 148 个,为避免关键词冗余,将部分同义词合并,同时为确保获得范围更广、层次更深的研究内容,将关键词最低共现频次调整至 100,最终获得关键词 135 个。联系强度代表关键词之间的关联程度,而联系强度往往与出现频次成正比,可以表征该关键词的研究热度。胞外聚合物相关论文的关键词

共现网络如图 4 所示,其中高频关键词往往成组出现,将这些关键词进行分类,发现胞外聚合物的关键词主要集中在细胞机制探究、生物环境治理、生物制造、生物矿化及生物修复等方面。在以上几个方面对胞外聚合物在不同领域的研究进展作进一步分析可以明确相关研究。

#### (1) 生物环境治理

由图 4 可以看出,关键词活性污泥(activated sludge)、废水(waste water)和好氧颗粒污泥(aerobic granular sludge)三者相互存在连线。其





通常需要用沉淀和过滤作为前处理,或者需要采用沉淀和过滤作为化学处理的后续处理。生物处理法主要包括活性污泥法和生物膜法。相比化学处理法,生物处理法不仅可以处理含可降解有机物的污水,还具有处理效率高、运行稳定和成本低等优点。其中活性污泥法主要利用微生物降解水中的有机物来使污水得到净化,活性污泥(activated sludge)是一种微生物群体,主要由好氧性细菌、原生动物、藻类等组成,这些微生物群体通过吸附、分解污水中的有机物质,起到净化水质的作用。在此过程中,微生物会分泌出胞外聚合物,胞外聚合物在活性污泥中起到黏附、凝聚、保护微生物的作用,并参与到活性污泥的沉降和生物降解过程中<sup>[20-21]</sup>。好氧颗粒污泥是一种新型的活性污泥,它的颗粒状结构能够提高自身的沉降性能,同时具有高效脱氮除污的能力,被广泛应用于污水处理,其中,高有机负荷有助于促进细胞分泌胞外聚合物并改变胞外聚合物的结构,从而影响颗粒污泥的形成及特性<sup>[22]</sup>。总而言之,在研究和开发新环境治理技术时,胞外聚合物的研究和应用是一个重要的方向。

## (2) 生物制造

由图 4 可见,大肠杆菌(*Escherichia coli*)的联系强度为 944,与其有连线的关键词有 8 个。大肠杆菌的胞外聚合物,如荚膜异多聚糖,是大肠杆菌生物膜的主要组成成分<sup>[23]</sup>。在生物制造领域,大肠杆菌被广泛应用于生产各种生物分子和新材料。例如,通过在大肠杆菌中表达特定的外源基因,可以实现对特定天然产物如花青素的高效合成<sup>[24]</sup>。对大肠杆菌采用 ARTP-紫外复合诱变,再结合异戊烯焦磷酸抗性筛选的集成方法,提高诱变菌株的正突变率,能有效地提高  $\beta$ -法尼烯的产量<sup>[25]</sup>。在这些过程中,大肠杆菌的胞外聚合物起到了重要的作用,它们不

仅为大肠杆菌提供了必要的生存环境,还参与到了生物分子的合成过程中。大肠杆菌(*Escherichia coli*)与地衣芽孢杆菌(*Bacillus licheniformis*)同属重要的工业常见生产菌,地衣芽孢杆菌(*Bacillus licheniformis*)是一种革兰氏阳性的芽孢杆菌,它在生物制造领域的应用十分广泛<sup>[26]</sup>。胞外聚合物能参与地衣芽孢杆菌(*Bacillus licheniformis*)异源蛋白的分泌和表达,PrsA 是地衣芽孢杆菌(*Bacillus licheniformis*)中已知的胞质外分子伴侣,PrsA 可以帮助蛋白质在细胞膜外的折叠,形成具有自然结构的活性蛋白<sup>[27]</sup>。此外,PrsA 还可以防止分泌蛋白被胞外的蛋白酶降解,从地衣芽孢杆菌(*Bacillus licheniformis*)的胞外聚合物表达量入手,有望解决地衣芽孢杆菌(*Bacillus licheniformis*)生产异源蛋白过程中的瓶颈<sup>[27]</sup>。

## (3) 生物矿化

胞外聚合物在生物矿化领域也有着较大的作用,但生物矿化领域相关关键词的联系强度并不高,可能是因为胞外聚合物在生物矿化领域的研究还相对较新颖,或相关领域的研究内容较为复杂,涉及到的学科领域较广,生物矿化的研究处于不断发展和深化的阶段,所以生物矿化相关关键词的联系强度相对较低。生物矿化是指微生物通过分泌的酶类和其他物质,将无机盐或金属离子转化为矿物质的过程。在生物矿化的过程中,胞外聚合物可以通过沉积矿物质来加速离子的转化。在生物环境地球化学领域,已经开展了相对较多的工作,胞外聚合物不仅能沉积  $\text{Ca}^{2+}$  等主要金属离子<sup>[11,28]</sup>,也能沉积  $\text{Mn}^{2+}$  等重金属离子<sup>[29]</sup>,甚至能吸附  $\text{Th}^{4+}$  等稀土离子<sup>[30]</sup>。例如,具有碳酸酐酶活性的嗜盐菌能够分泌胞外聚合物,如类腐殖质物质、蛋白质、多糖和 DNA 等物质,来沉积  $\text{Ca}^{2+}$ ,然后通过碳酸酐酶将水中的  $\text{Ca}^{2+}$  矿化为碳酸钙<sup>[11]</sup>。

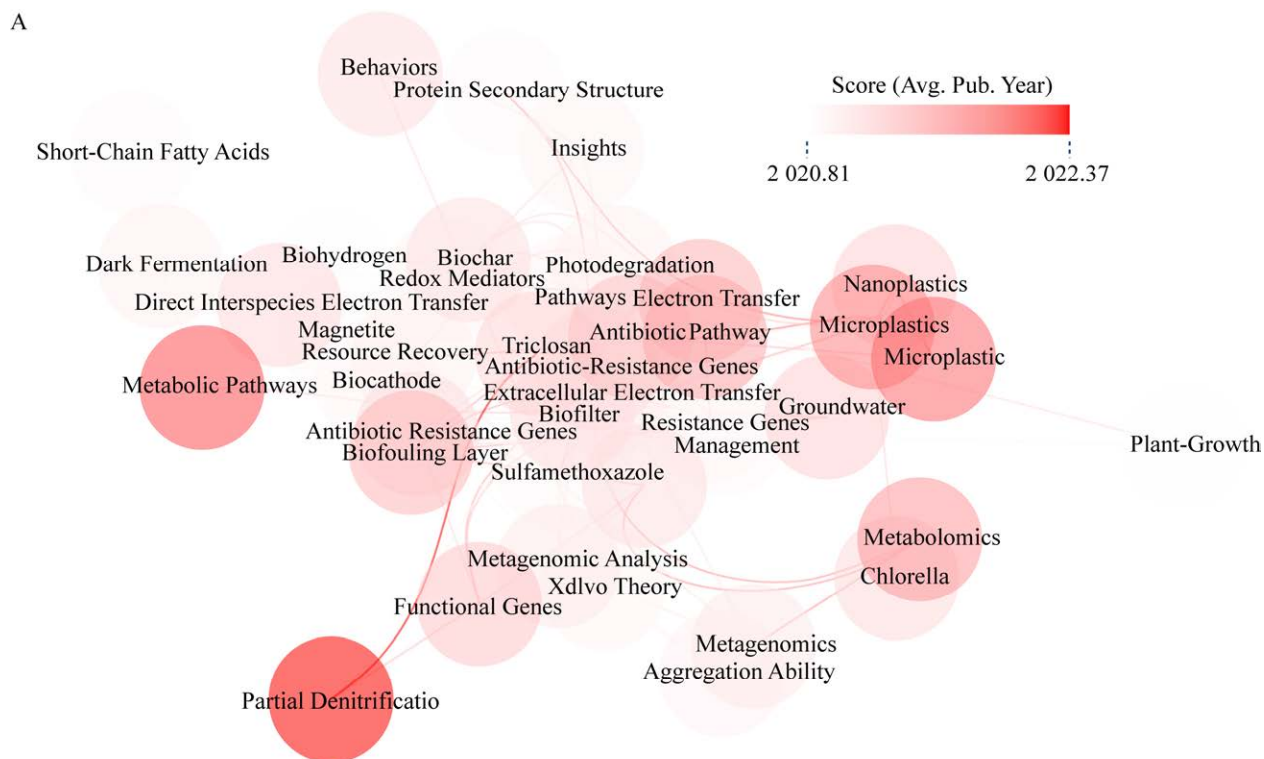
集胞藻 PCC6803 聚集  $\text{Ca}^{2+}$  的过程中, 含各种酸性残基和糖的胞外聚合物会捕获大量  $\text{Ca}^{2+}$ , 诱导  $\text{CaCO}_3$  晶体矿化沉淀<sup>[28]</sup>。胞外聚合物还能提高生物侵蚀能力和浸出效率、提高细胞对高浓度重金属的耐受性并加强对细胞的保护作用<sup>[31-32]</sup>。

#### 2.4.2 发展趋势

图 5A 是关键词相关论文发表时间的共现性网络图。由图 5A 可得, 部分脱硝(partial denitrification)、代谢途径(metabolic pathways)、代谢组学(metabolomics)、微塑料(microplastic)、途径(pathway)、抗生素(antibiotic)等关键词集中在 2021–2022 年, 其中微塑料(microplastic)近年来增长趋势明显。以 microplastic 为关键词, 基于 Web of Science 核心合集数据库, 对 2014–2023 年的文章进行检索, 得到研究型论文 6 979 篇, 发文量随时间的变化如图 5B 所示, 由图 5B 可得微塑料(microplastic)相关文章的数量近年来持续增长, 并于 2023 年达到最高, 预计未来微

塑料(microplastic)相关文章的数量还将持续增长, 可能是未来几年的研究热点。摘出其中的高被引文章 594 篇, 对其进行关键词分析, 构建共现网络, 根据关键词的出现频次和时间推测当前微塑料领域的研究现状与研究问题。图 5C 是微塑料相关论文关键词的共现性网络图, 根据图 5C 以及微塑料相关知识可得到以下结论。

微塑料与胞外聚合物两者之间联系紧密。微生物能通过胞外聚合物降解微塑料, 并将其吸收到细胞内<sup>[33-34]</sup>。胞外聚合物能推动微塑料在海洋等地理环境中的运动, 并且增强微塑料对金属和有机污染物的吸附能力<sup>[35]</sup>。目前, 研究发现环境中存在的微塑料类型主要有聚乙烯、聚丙烯、聚氯乙烯、聚酯类、聚苯乙烯及聚酰胺这 6 种, 主流的微塑料降解方法是生物降解法。生物降解主要是指在自然界或特定条件下由微生物引起的塑料降解过程。在这种降解方式下, 微塑料最终被微生物分解成简单的化合物,





如水和二氧化碳。生物降解中主要起作用的是酶。例如, 酶蛋白 DuraPETase, 其“消化”塑料的能力远超自然界中发现的物质, 在温和条件下, DuraPETase 能将高浓度微塑料完全降解<sup>[36-39]</sup>。因此, 加强对生物降解微塑料的研究, 尤其是胞外聚合物对微塑料的降解, 可能是未来微塑料降解甚至整个生物环境治理方面的重要热点之一。微塑料主要分布在内陆、淡水及海洋三大区域, 其中最为富集的是内陆的土壤, 受水动力等因素的影响, 微塑料甚至在马里亚纳海沟(全球海洋的最深处)和南北极也有分布<sup>[40-43]</sup>。微塑料分布之广, 为了降解微塑料、减轻微塑料对环境的污染, 有必要开发适合在多种恶劣环境下工作的新菌种, 可以利用胞外聚合物的缓冲和保护作用, 帮助微生物更好地适应多种恶劣环境。

## 3 讨论

### 3.1 文章关键信息分析

本文章基于 Web of science 核心合集数据库对微生物胞外聚合物相关文章的关键信息进行数据可视化和关联性分析, 结果显示该领域的发展已初具规模, 近年来发文量呈上升趋势。研究方向与环境相关的文章占比超过了 60%, 且大多数集中在环境治理方面, 这表明胞外聚合物在微生物生理、生态以及与环境相互作用中发挥着重要作用, 当然胞外聚合物在其他领域也存在较大突破, 随着研究的深入, 胞外聚合物在材料科学、生物医学等领域展现出巨大的应用潜力。从国家层面来看, 中国文章的发表量和引用量位居世界前列, 这说明中国在科研产出方面取得了显著的成果, 然而中国文章的平均引用量却低于其他主流国家(表 1)。这可能说明虽然中国发表的论文数量多, 但其质量和影响力与数量却不成正比, 文章的实用价值、

创新性和影响力等因素对文章的引用率往往影响较大, 而在中国发表的部分文章中, 这些因素可能并不突出。科研成果的转化与应用与科研成果的价值关系紧密。中国发表的论文引用率较低, 说明中国的科研成果可能没有得到足够的关注和引用, 或者说明中国的科研成果在实际应用中的转化率不高。但这并不代表中国的科研水平低, 而是意味着我们要在科研质量和科研转化等方面进一步努力, 提高科研成果的影响力, 从而推动中国科研水平的进步。从机构和作者层面来看, 中国科学院和中国科学院大学无论是发文量还是关联度都居于前列, 其中的学者与他人合作也较为广泛, 同时研究时间跨度也较大, 而大部分高校重点实验室的学者则是以内部合作为主, 与外界的合作程度相对较弱。部分机构与作者的合作程度较高, 但总体上缺乏广泛密切的学术交流。

### 3.2 结构与功能相适性分析

在 2.4.1 中, 我们通过关键词对胞外聚合物在不同领域的研究现状进行分析, 下面我们从结构与功能的角度出发进一步分析胞外聚合物的研究现状与应用。基于 Web of Science 核心合集数据库, 以  $TS=(extracellular\ polymeric\ substances)\ AND\ TS=(“structure”)\ AND\ TS=(“function”)$  为检索词对相关文章进行检索(“structure” “function”不是指此单词, 而是具体的结构与功能), 并将检索得到的数据绘图。图 6A 是胞外聚合物结构的热点分析图, 图 6B 是胞外聚合物功能的热点分析图。由图 6A 可知, 目前研究热度最高的组成成分是氨基酸, 其次是核酸, 然后是脂类、腐殖酸等等, 但是关于胞外聚合物中糖醛酸的研究内容少之又少。多糖和蛋白质作为胞外聚合物中含量最多的成分, 研究热度却较低。由图 6B 可知, 目前胞外聚合物研究热度最高的作用是黏附, 其次是保水、吸附及酶结合等。

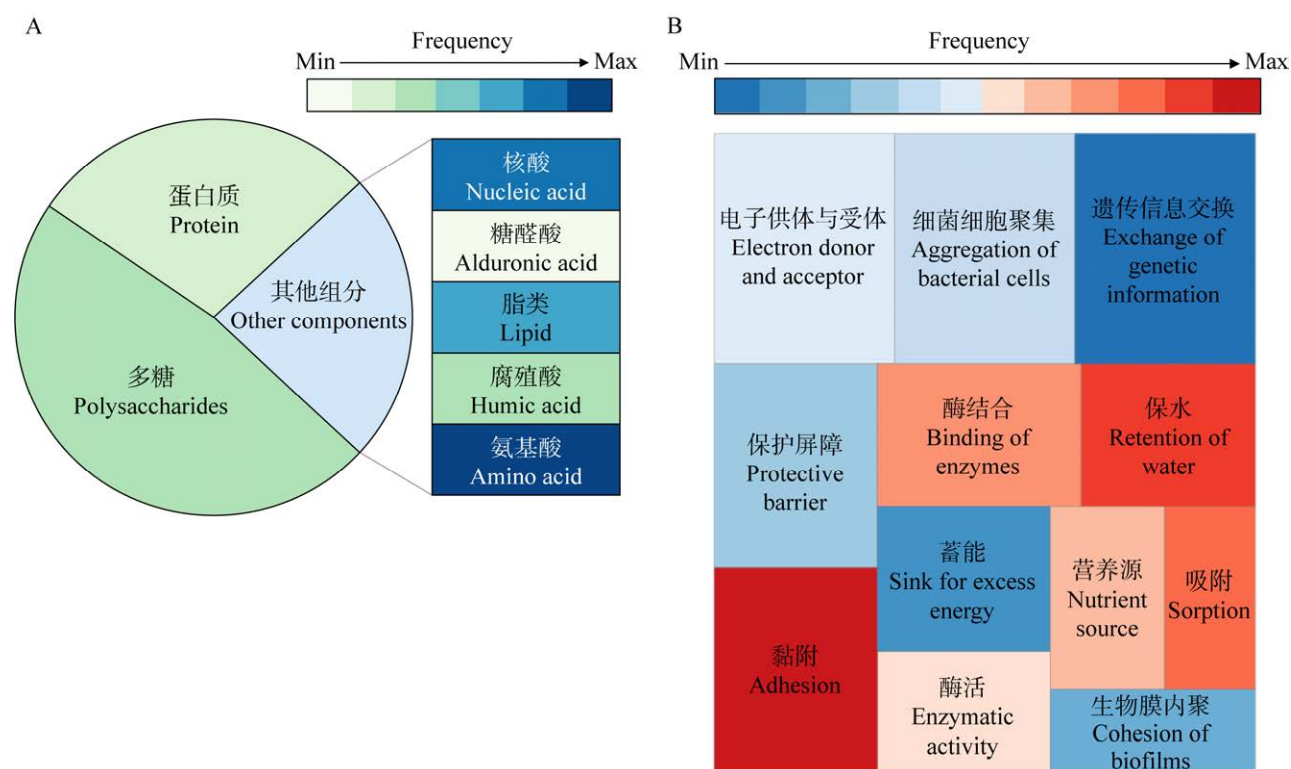


图 6 胞外聚合物的结构热点分析图(A)与功能热点分析图(B)

Figure 6 Hot spot analysis diagram of extracellular polymeric substances structure (A) and function (B).

另外，在胞外聚合物功能的相关研究中蓄能和遗传信息交换的相关研究热度比较低，这可能是因为这 2 个领域的研究难度较大，并且相较于其他领域其直接的应用价值和经济效益可能不太显著。下文是对胞外聚合物结构功能的分析。

### (1) 多糖

多糖是胞外聚合物中含量最多的成分，具有黏附、细菌细胞聚集、生物膜内聚、保水、保护屏障、吸附、营养源、蓄能及酶结合等功能，其中保水和黏附功能研究热度最显著(图 7)。胞外多糖的保水功能主要归因于其成分中的羧基和磷酸基，这些官能团能够与水中的离子(如  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  等)形成离子交换复合物，从而增强其保水能力，此外胞外聚合物中的多糖还可以与其他微生物分泌的胶体物质相互作用，共同构成一个复杂的网络结构，进一步增强保水功

能<sup>[44-45]</sup>。对于黏附功能，以假单胞菌(*Pseudomonas adaceae*)为例，假单胞菌生物被膜中的多糖主要是褐藻胶、Psl 和 Pel，它的胞外多糖可以增强细菌对复杂环境的耐受性。Pel 是一种由部分乙酰化的 N-乙酰半乳糖胺和 N-乙酰葡萄糖胺组成的阳离子胞外多糖，能够使假单胞菌在气-水界面形成一层薄膜，可以帮助细菌抵抗氨基糖苷类抗生素，在生物被膜基质中发挥结构和保护的作用。胞外多糖能够在微生物表面形成一层保护性的黏液层，促进微生物在载体表面的黏附，细菌通过菌体表面的胞外多糖黏附至载体表面后，就可以借助这些高分子量的多分支的特殊结构发生细菌间的凝聚，然后通过菌落中细菌的增殖，从而形成生物膜结构。以黏性放线菌为例，其生物膜的形成与胞外多糖的合成密切相关。黏性放线菌生物膜的形成可以分为初始黏附期、

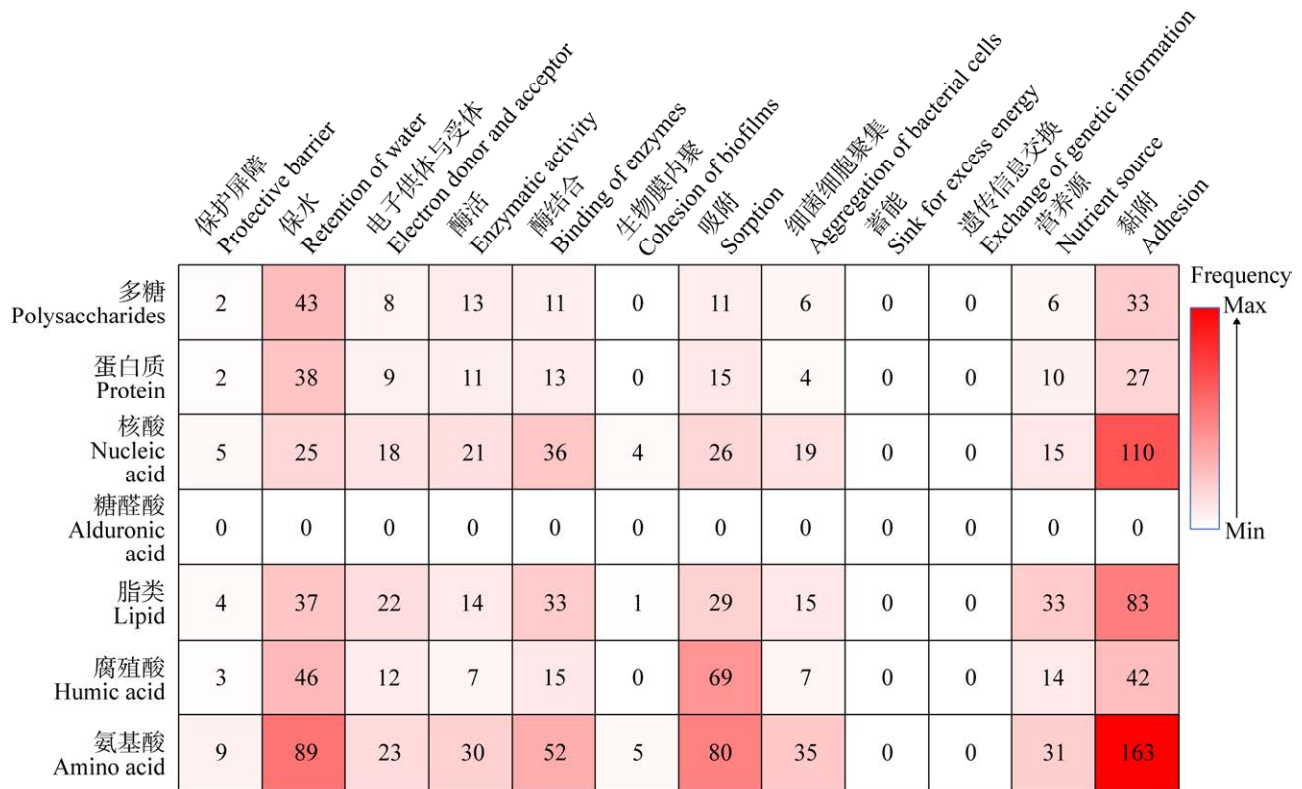


图 7 胞外聚合物结构与功能的热力图 Frequency 代表在胞外聚合物领域文章中横竖两项作为关键词时的出现频次

Figure 7 Heat map of structure and function of extracellular polymeric substances. Frequency represents the frequency of occurrence of the horizontal and vertical terms as keywords in articles in the field of extracellular polymeric substances.

生物膜发展期和生物膜成熟期，其中黏性放线菌首先形成细丝状的黏性物质，之后形成相对牢固的堆积黏附物，这一过程中胞外多糖的含量会出现剧增，从而加速生物膜的形成<sup>[46-47]</sup>。

(2) 蛋白质与氨基酸

蛋白质在胞外聚合物中的含量居于第二位，而氨基酸是胞外聚合物中研究热度最高的组成成分，具有黏附、细菌细胞聚集、生物膜内聚、保护屏障、吸附、酶活、营养源、电子供体与受体、酶结合等功能，其中保水功能与多糖相似，而较为显著的是吸附功能。好氧颗粒污泥是微生物细胞凝聚而成的颗粒状污泥，胞外多糖能够使细菌间发生凝聚现象，作为细

胞间的连接基质，胞外多糖在好氧颗粒污泥中也可以担任微生物细胞与微小颗粒间的架桥，此时若外界选择压改变，附着在好氧颗粒污泥上的蛋白质就会改变细胞表面的特性，促进微生物细胞之间和微生物与环境中的污泥颗粒之间的相互凝聚<sup>[48]</sup>。

(3) 核酸

核酸是胞外聚合物中的重要作用成分，具有黏附、细菌细胞聚集、生物膜内聚、营养源、遗传信息交换等功能，其中最为显著的是黏附功能，以胞外 DNA 为例，胞外 DNA 在细菌生物膜形成和发育过程中的作用是通过多方面机制实现的。生物膜是由细菌细胞和胞外聚合物

组成的复杂结构,而胞外 DNA 是胞外聚合物的关键组成部分。在生物膜的形成初期,胞外 DNA 可以促进细菌细胞与载体表面的黏附,它能帮助细菌细胞克服由范德华作用力和细菌与基质双电层重合部分所产生的排斥力所导致的黏附障碍,从而使细菌更易于附着在载体表面<sup>[49]</sup>。胞外 DNA 还可以增强细菌细胞的疏水性,使其更容易向其他表面靠近,促进初期的黏附<sup>[50]</sup>。一旦细菌细胞成功附着在载体表面,eDNA 便与细胞表面的配体结合,形成了稳定的黏附结构,有利于细菌形成生物膜。在生物膜的成熟阶段,eDNA 与胞外多糖等成分交联,形成稳定的结构,这种稳定的结构有利于细菌在生物膜内部进行生命活动,同时也有助于生物膜对外部环境的抵抗<sup>[51-53]</sup>。eDNA 还可以帮助细菌抵挡金属离子、氧化性物质的胁迫以及宿主免疫系统的攻击,表现出很强的保护作用<sup>[54-55]</sup>。最后,eDNA 适用于水平基因传递,细菌生物膜中存在大量的 eDNA,这为自然发生的遗传转化提供了丰富的资源,是细菌获得新基因的重要途径<sup>[56-57]</sup>。

#### (4) 腐殖酸

腐殖酸在胞外聚合物中的主要作用是吸附和保水。研究显示,腐殖酸类物质可以促进钙离子的去除<sup>[11]</sup>。具体而言,腐殖酸类物质被细菌释放出来,然后腐殖酸类物质通过负电荷吸附钙离子,从而促进钙离子的去除。此外,腐殖酸类物质还可以作为微生物与矿物质之间的通信媒介,影响电子转移并促进矿物质的形成。随着盐度的增加,腐殖酸类物质的释放量会增加,从而提高钙离子的去除效率。

### 3.3 胞外聚合物的研究与应用建议

对于论文质量和影响力与数量不成正比的问题,要注重提高科研论文的质量和影响力,需要从论文选题、研究方法、数据表达和科研

成果转化等多方面着手,建立科学的评价体系,加强科研伦理建设,提升写作与编辑能力,并加大科研经费投入。这可以促进中国科研论文在国际上的地位,为中国科研水平的提升作出贡献。

对于总体上缺乏广泛密切的学术交流的问题,可以加强对学术交流重要性的宣传和教育,或通过学者互访、合作研究项目等方式,强化学术交流的实践环节,提升学术交流的质量和效率。

本研究表明,胞外聚合物无论是研究方向还是应用都偏向环境治理,在材料科学、生物医学等领域也展现出巨大的应用潜力。利用微生物胞外聚合物治理污水的技术已经相当成熟,可以寻找微生物胞外聚合物在环境治理方面的其他应用或提高其治理污水的效率。此外,利用胞外聚合物的聚合作用可以制备出不同的材料,例如,利用细菌介导的铁催化自由基聚合技术,可以在生物体内制备出各种合成-天然杂化材料,这对于生物医学传感和治疗等领域具有重要的应用价值<sup>[58]</sup>。

## 4 结论与展望

总结过去 10 年的研究,微生物胞外聚合物的研究取得了显著增长,中国在研究数量上占据主导,但质量提升和国际影响力方面仍有待加强。研究热点聚焦于环境治理、生物制造及生物矿化领域,特别是微塑料降解领域展现出巨大潜力。然而,科研成果的转化与应用是当前面临的重要挑战,需要进一步关注论文质量的提升和科研成果的实用价值。

未来,微生物胞外聚合物研究应深化对聚合物结构与功能的探索,尤其是多糖、蛋白质和核酸等关键成分的特性研究,以挖掘其在环保、生物材料和生物医学领域的潜在应用。加强国际交流与合作,通过共享资源和创新技术,

提升中国在该领域的国际地位。同时,科研伦理与诚信建设应得到强化,以保障科研环境的公正和科研成果的可靠性。政策层面,应加大投入,鼓励原创性和实用性研究,推动科研成果的转化和商业化,以解决环境问题并促进相关产业的发展。

本研究提取了 Web of Science 核心合集数据库中关于胞外聚合物的文章信息,并通过 VOSviewer、Scimago Graphica 等软件将文章信息进行可视化分析,展现了胞外聚合物在结构、功能及实际应用等方面的特点。本研究注重探讨了胞外聚合物相关研究文章的关键词聚类及与实际的联系,用定量分析的方法为胞外聚合物研究的方向选择提供了指导,但因本研究的主要分析依据是文章关键词,所以缺乏传统综述定性分析的全面性和概括性。若是能够将传统综述定性分析与使用文献计量学的方法进行的定量分析相结合,能使文章更具科学性和指导意义。此外,本研究的重点在于胞外聚合物相关研究文章的关键词聚类以及与实际的关系,对胞外聚合物主要的研究方向变化涉及较少,希望学者们对胞外聚合物主要的研究方向变化进行分析,为胞外聚合物的探究及应用提供更科学全面的指导。

## REFERENCES

- [1] LAUBACH J, JOSEPH M, BRENTA T, GADHAMSHETTY V, SANI RK. Exopolysaccharide and biopolymer-derived films as tools for transdermal drug delivery[J]. *Journal of Controlled Release: Official Journal of the Controlled Release Society*, 2021, 329: 971-987.
- [2] MENG L, LI W, ZHAO LM, YAN HX, ZHAO H. Influences of extracellular polymeric substances (EPS) recovered from waste sludge on the ability of Jiaozhou Bay to self-remediate of diesel-polluted seawater[J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 353: 120196.
- [3] TIWARI ON, SASMAL S, KATARIA AK, DEVI I. Application of microbial extracellular carbohydrate polymeric substances in food and allied industries[J]. *3 Biotech*, 2020, 10(5): 221.
- [4] 黄美玉, 王纪晗, 徐毓东, 耿合定, 赵辉, 闫华晓, 韩作振. 生物矿化的研究进展及其应用[J]. *微生物前沿*, 2021, 10(4): 175-181.  
HUANG MY, WANG JH, XU YD, GENG HD, ZHAO H, YAN HX, HAN ZZ. Research progress and application of biomineralization[J]. *Advances in Microbiology*, 2021, 10(4): 175-181 (in Chinese).
- [5] 赵冉冉, 程昱升, 郑豪, 陈建芳. 聚多巴胺的合成、聚合机理及其在海洋防腐防污中的应用[J]. *海洋科学*, 2022, 46(5): 154-168.  
ZHAO RR, CHENG YS, ZHENG H, CHEN JF. Synthesis and mechanism of polydopamine and its application in marine anticorrosion and antifouling[J]. *Marine Sciences*, 2022, 46(5): 154-168 (in Chinese).
- [6] 韩作振, 陈吉涛, 迟乃杰, 王兆鹏, 杨仁超, 樊爱萍. 微生物碳酸盐岩研究: 回顾与展望[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2009, 29(4): 29-38.  
HAN ZZ, CHEN JT, CHI NJ, WANG ZP, YANG RC, FAN AP. Microbial carbonates: a review and perspectives[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2009, 29(4): 29-38 (in Chinese).
- [7] 朱永官, 段桂兰, 陈保冬, 彭新华, 陈正, 孙国新. 土壤-微生物-植物系统中矿物风化与元素循环[J]. *中国科学: 地球科学*, 2014, 44(6): 1107-1116.  
ZHU YG, DUAN GL, CHEN BD, PENG XH, CHEN Z, SUN GX. Mineral weathering and element cycling in soil-microorganism-plant system[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2014, 57: 888-896 (in Chinese).
- [8] HAN ZZ, MENG RR, ZHAO H, GAO X, ZHAO YY, HAN Y, LIU F, TUCKER ME, DENG JR, YAN HX. The incorporation of  $Mg^{2+}$  ions into aragonite during biomineralization: implications for the dolomitization of aragonite[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2023, 14: 1078430.
- [9] YAN HX, HUANG MY, WANG TT, XU YD, MENG L, ZHAO LM, HAN ZZ, WANG JH, TUCKER ME, ZHAO H. Effects of chloride, sulfate and magnesium ions on the biomineralization of calcium carbonate induced by *Lysinibacillus xylanilyticus* DB1-12[J]. *Geomicrobiology Journal*, 2022, 39(10): 852-866.
- [10] YAN HX, LIU YP, ZHANG HJ, JIN SP, HAN ZZ, WOO J, TUCKER ME, MENG L, CHI XQ, HAN C, ZHAO YY, ZHAO YM, ZHAO H. Interaction of  $Ca^{2+}$  and  $Fe^{3+}$  in co-precipitation process induced by *Virgibacillus dokdonensis* and its application[J].



- Journal of Environmental Sciences, 2025, 147: 131-152.
- [11] YAN HX, CAO JH, TENG MH, MENG L, ZHAO LM, CHI XQ, HAN ZZ, TUCKER ME, ZHAO H. Calcium ion removal at different sodium chloride concentrations by free and immobilized halophilic bacteria[J]. Water Research, 2023, 229: 119438.
- [12] 张圣洁, 蔡中华, 朱伟胜, 曾艳华, 周进. 藻际环境中胞外聚合物的研究进展[J]. 微生物学报, 2020, 60(8): 1521-1533.  
ZHANG SJ, CAI ZH, ZHU WS, ZENG YH, ZHOU J. Advances in extracellular polymeric substances in phycosphere environment[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2020, 60(8): 1521-1533 (in Chinese).
- [13] 王冬, 王少坡, 周瑶, 赵明, 于静洁, 李亚静, 孙力平. 胞外聚合物在污水处理过程中的功能及其控制策略[J]. 工业水处理, 2019, 39(10): 14-19.  
WANG D, WANG SP, ZHOU Y, ZHAO M, YU JJ, LI YJ, SUN LP. Function and control strategies of extracellular polymer substances in wastewater treatment process[J]. Industrial Water Treatment, 2019, 39(10): 14-19 (in Chinese).
- [14] 武宇辉, 杨悦锁, 赵传起, 张茜, 陈煜, 徐斌. 水环境中微生物胞外聚合物对污染物迁移和归宿影响的研究进展[J]. 化工学报, 2018, 69(8): 3303-3317.  
WU YH, YANG YS, ZHAO CQ, ZHANG X, CHEN Y, XU B. A review on effects of extracellular polymeric substances on contaminants fate & transport in soil and water environment[J]. CIESC Journal, 2018, 69(8): 3303-3317 (in Chinese).
- [15] ZHAO LT, SHE ZL, JIN CJ, YANG SY, GUO L, ZHAO YG, GAO MC. Characteristics of extracellular polymeric substances from sludge and biofilm in a simultaneous nitrification and denitrification system under high salinity stress[J]. Bioprocess and Biosystems Engineering, 2016, 39(9): 1375-1389.
- [16] QIAN J, HE XX, WANG PF, XU B, LI K, LU BH, JIN W, TANG SJ. Effects of polystyrene nanoplastics on extracellular polymeric substance composition of activated sludge: the role of surface functional groups[J]. Environmental Pollution, 2021, 279: 116904.
- [17] XU RZ, CAO JS, FENG GY, LUO JY, FENG Q, NI BJ, FANG F. Fast identification of fluorescent components in three-dimensional excitation-emission matrix fluorescence spectra *via* deep learning[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 430: 132893.
- [18] MIAO LZ, LI CR, ADYEL TM, HUANG W, WU J, YU Y, HOU J. Effects of the desiccation duration on the dynamic responses of biofilm metabolic activities to rewetting[J]. Environmental Science & Technology, 2023, 57(4): 1828-1836.
- [19] HE Y, GUO JB, SONG YY, CHEN Z, LU CC, HAN Y, LI HB, HOU YN. Te(IV) bioreduction in the sulfur autotrophic reactor: performance, kinetics and synergistic mechanism[J]. Water Research, 2022, 214: 118216.
- [20] HAO X, GAN W, LI J, WU Y. Technical trends in efficient EPS extraction and recovery from excess sludge towards high value-added products[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41: 2063-2078.
- [21] GUO HX, FELZ S, LIN YM, van LIER JB, de KREUK M. Structural extracellular polymeric substances determine the difference in digestibility between waste activated sludge and aerobic granules[J]. Water Research, 2020, 181: 115924.
- [22] 陆佳, 刘永军, 刘喆, 郝伟. 有机负荷对污泥胞外聚合物分泌特性及颗粒形成的影响[J]. 化工进展, 2018, 37(4): 1616-1622.  
LU J, LIU YJ, LIU Z, HAO W. Effects of organic loading on the secretory characteristics of EPS and particle formation[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2018, 37(4): 1616-1622 (in Chinese).
- [23] 王立亮, 高春辉, 吴一超, 黄巧云, 蔡鹏. 大肠杆菌表面感应机制研究进展[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2017, 43(6): 685-690.  
WANG LL, GAO CH, WU YC, HUANG QY, CAI P. Research progress on mechanism of surface sensing in *Escherichia coli*[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences), 2017, 43(6): 685-690 (in Chinese).
- [24] 丁明珠, 李炳志, 王颖, 谢泽雄, 刘夺, 元英进. 合成生物学重要研究方向进展[J]. 合成生物学, 2020, 1(1): 7-28.  
DING MZ, LI BZ, WANG Y, XIE ZX, LIU D, YUAN YJ. Significant research progress in synthetic biology[J]. Synthetic Biology Journal, 2020, 1(1): 7-28 (in Chinese).
- [25] 潘俊潼, 寇凤雨, 刘瑞艳, 王一然, 赵辉. 常压室温等离子体-紫外复合诱变选育  $\beta$ -法尼烯高产菌株[J]. 微生物学通报, 2020, 47(2): 542-551.  
PAN JT, KOU FY, LIU RY, WANG YR, ZHAO H. Breeding of high  $\beta$ -farnesene producing strain by ARTP-UV combined mutation[J]. Microbiology China, 2020, 47(2): 542-551 (in Chinese).
- [26] 吕雪芹, 武耀康, 林璐, 徐显皓, 于文文, 崔世修, 李江华, 堵国成, 刘龙. 枯草芽孢杆菌代谢工程改造

- 的策略与工具[J]. 生物工程学报, 2021, 37(5): 1619-1636.
- LÜ XQ, WU YK, LIN L, XU XH, YU WW, CUI SX, LI JH, DU GC, LIU L. Strategies and tools for metabolic engineering in *Bacillus subtilis*[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2021, 37(5): 1619-1636 (in Chinese).
- [27] 王杰, 王晨, 杜燕, 徐晶玉, 班睿. 枯草芽孢杆菌表达和分泌异源蛋白的研究进展[J]. 微生物学通报, 2021, 48(8): 2815-2826.
- WANG J, WANG C, DU Y, XU JY, BAN R. Advances in heterologous protein expression and secretion of *Bacillus subtilis*[J]. Microbiology China, 2021, 48(8): 2815-2826 (in Chinese).
- [28] 孙林, 秦松, 刘正一, 赵辉. 藻类生物钙化研究进展[J]. 海洋湖沼通报, 2023, 45(3): 164-171.
- SUN L, QIN S, LIU ZY, ZHAO H. Progresses in algal calcification[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2023, 45(3): 164-171 (in Chinese).
- [29] YAN HX, JIN SP, SUN XL, HAN ZZ, WANG HM, WOO J, MENG L, CHI XQ, HAN C, ZHAO YY, TUCKER ME, WEI LR, ZHAO YM, ZHAO H. Mn<sup>2+</sup> recycling in hypersaline wastewater: unnoticed intracellular biomineralization and pre-cultivation of immobilized bacteria[J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2024, 40(2): 57.
- [30] 李宏艳. 稀土尾矿渣优势菌胞外聚合物的提取及其对 Th<sup>4+</sup>的吸附研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学硕士学位论文, 2023.
- LI HY. Extraction of extracellular polymeric substances from indigenous bacteria of rare earth tailings and application to removal of Th<sup>4+</sup>[D]. Baotou: Master's Thesis of Inner Mongolia University of Science & Technology, 2023 (in Chinese).
- [31] HAN ZZ, WANG JJ, ZHAO H, TUCKER ME, ZHAO YH, WU GZ, ZHOU JX, YIN JX, ZHANG HC, ZHANG XK, YAN HX. Mechanism of biomineralization induced by *Bacillus subtilis* J2 and characteristics of the biominerals[J]. Minerals, 2019, 9(4): 218.
- [32] 宋霞, 杨爱江, 胡霞, 牛阿萍, 张青青, 田怡. 氧化亚铁硫杆菌在金属硫化矿浸出中的作用机理及应用[J]. 矿产保护与利用, 2021, 41(6): 157-164.
- SONG X, YANG AJ, HU X, NIU AP, ZHANG QQ, TIAN Y. Mechanism and application of *Thiobacillus ferrooxidans* in leaching of metal sulfide ores[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2021, 41(6): 157-164 (in Chinese).
- [33] 刘鑫蓓, 董旭晟, 解志红, 马学文, 骆永明. 土壤中微塑料的生态效应与生物降解[J]. 土壤学报, 2022, 59(2): 349-363.
- LIU XB, DONG XS, XIE ZH, MA XW, LUO YM. Ecological Effects and Biodegradation of Microplastics in Soils[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(2): 349-363 (in Chinese).
- [34] XU SY, WANG CQ, ZHU PF, ZHANG DY, PAN XL. Temporospacial nano-heterogeneity of self-assembly of extracellular polymeric substances on microplastics and water environmental implications[J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, 440: 129773.
- [35] GE ZM, LU XX. Impacts of extracellular polymeric substances on the behaviors of micro/nanoplastics in the water environment[J]. Environmental Pollution, 2023, 338: 122691.
- [36] CUI YL, CHEN YC, LIU XY, DONG SJ, TIAN YE, QIAO YX, MITRA R, HAN J, LI CL, HAN X, LIU WD, CHEN Q, WEI WQ, WANG X, DU WB, TANG SY, XIANG H, LIU HY, LIANG Y, HOUK KN, et al. Computational redesign of a PETase for plastic biodegradation under ambient condition by the GRAPE strategy[J]. ACS Catalysis, 2021, 11(3): 1340-1350.
- [37] LI LZ, LUO YM, LI RJ, ZHOU Q, PEIJNENBURG WJGM, YIN N, YANG J, TU C, ZHANG YC. Effective uptake of submicrometre plastics by crop plants via a crack-entry mode[J]. Nature Sustainability, 2020, 3: 929-937.
- [38] WANG K, LI JH, ZHAO LW, MU XY, WANG C, WANG M, XUE XF, QI SZ, WU LM. Gut microbiota protects honey bees (*Apis mellifera* L.) against polystyrene microplastics exposure risks[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 402: 123828.
- [39] RAGUSA A, SVELATO A, SANTACROCE C, CATALANO P, NOTARSTEFANO V, CARNEVALI O, PAPA F, RONGIOLETTI MCA, BAIOTTO F, DRAGHI S, D'AMORE E, RINALDO D, MATTA M, GIORGINI E. Plasticenta: first evidence of microplastics in human placenta[J]. Environment International, 2021, 146: 106274.
- [40] DING JF, JU P, RAN Q, LI JX, JIANG FH, CAO W, ZHANG J, SUN CJ. Elder fish means more microplastics? Alaska pollock microplastic story in the Bering Sea[J]. Science Advances, 2023, 9(27): eadf5897.
- [41] 李卓然, 季民, 赵迎新, 周旭, 杨知凡. 全球微塑料研究现状及热点可视化剖析[J]. 环境化学, 2022, 41(4): 1124-1136.

- LI ZR, JI M, ZHAO YX, ZHOU X, YANG ZF. Visual analysis of global microplastics research status and hotspots[J]. *Environmental Chemistry*, 2022, 41(4): 1124-1136 (in Chinese).
- [42] 赵光明. 我国微塑料分布及管控建议[J]. *中华环境*, 2020(S1): 74-77.
- ZHAO GM. Distribution of microplastics in China and suggestions on management and control[J]. *China Environment*, 2020(S1): 74-77 (in Chinese).
- [43] PENG X, CHEN M, CHEN S, DASGUPTA S, XU H, TA K, DU M, LI J, GUO Z, BAI S. Microplastics contaminate the deepest part of the world's ocean[J]. *Geochemical Perspectives Letters*, 2018: 1-5.
- [44] 季四平, 钊永明, 胡学伟, 王世雄, 谢琦莹, 杨项军, 高利斌.  $Fe^{2+}$ 、 $Mn^{2+}$ 对生物膜载体表面改性对微生物的活性及胞外多聚物的影响[J]. *云南民族大学学报(自然科学版)*, 2018, 27(1): 22-26.
- JI SP, CHUAN YM, HU XW, WANG SX, XIE QY, YANG XJ, GAO LB. Impacts of  $Fe^{2+}$  and  $Mn^{2+}$  modification on biofilm carriers and its impacts on the activities of organisms and EPS[J]. *Journal of Yunnan Minzu University (Natural Sciences Edition)*, 2018, 27(1): 22-26 (in Chinese).
- [45] 邱东茹, 高娜, 安卫星, 余佃贞, 夏明. 活性污泥微生物胞外多聚物生物合成途径与菌胶团形成的调控机制[J]. *微生物学通报*, 2019, 46(8): 2080-2089.
- QIU DR, GAO N, AN WX, YU DZ, XIA M. Biosynthesis pathway of extracellular polymeric substance and regulatory mechanism underlying floc formation of activated sludge bacteria[J]. *Microbiology China*, 2019, 46(8): 2080-2089 (in Chinese).
- [46] 蒲晓芬. 粘性放线菌单菌种早期生物膜的连续观察及胞外多糖合成的研究[D]. 成都: 四川大学硕士学位论文, 2006.
- PU XF. The study on exopolysaccharides in the formation of *Actinomyces viscosus* biofilm[D]. Chengdu: Master's Thesis of Sichuan University, 2006 (in Chinese).
- [47] 李江, 陈靠山, 郝林华, 李光友. 细菌胞外多糖的研究进展[J]. *海洋科学*, 2006, 30(4): 74-77.
- LI J, CHEN KS, HAO LH, LI GY. The progress on extracellular polysaccharide of bacteria[J]. *Marine Sciences*, 2006, 30(4): 74-77 (in Chinese).
- [48] 刘前进, 刘立凡. 胞外聚合物中蛋白质对好氧污泥颗粒化的影响[J]. *环境工程学报*, 2021, 15(3): 929-938.
- LIU QJ, LIU LF. Effect of protein in extracellular polymeric substance on aerobic sludge granulation[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2021, 15(3): 929-938 (in Chinese).
- [49] HERMANSSON M. The DLVO theory in microbial adhesion[J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 1999, 14(1/2/3/4): 105-119.
- [50] DAS T, SHARMA PK, KROM BP, van der MEI HC, BUSSCHER HJ. Role of eDNA on the adhesion forces between *Streptococcus mutans* and substratum surfaces: influence of ionic strength and substratum hydrophobicity[J]. *Langmuir: the ACS Journal of Surfaces and Colloids*, 2011, 27(16): 10113-10118.
- [51] DAS T, SHARMA PK, BUSSCHER HJ, van der MEI HC, KROM BP. Role of extracellular DNA in initial bacterial adhesion and surface aggregation[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2010, 76(10): 3405-3408.
- [52] HARMSSEN M, LAPPANN M, KNØCHEL S, MOLIN S. Role of extracellular DNA during biofilm formation by *Listeria monocytogenes*[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2010, 76(7): 2271-2279.
- [53] WAHEED H, HASHMI I, KHAN SJ, KIM SR, ARSHAD M, NASIR H. Microbial population dynamics and profiling of quorum sensing agents in membrane bioreactor[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2016, 113: 66-73.
- [54] LIN HR, WANG CY, ZHAO HM, CHEN GC, CHEN XC. Interaction between copper and extracellular nucleic acids in the EPS of unsaturated *Pseudomonas putida* CZ1 biofilm[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(24): 24172-24180.
- [55] 台喜荣, 冯骞, 孙亚青, 郭文, 葛冉, 周长仁. 胞外DNA在生物膜形成及发展过程中的作用[J]. *净水技术*, 2019, 38(11): 54-60.
- TAI XR, FENG Q, SUN YQ, GUO W, GE R, ZHOU CR. Role of extracellular DNA in the process of formation and development of biofilm[J]. *Water Purification Technology*, 2019, 38(11): 54-60 (in Chinese).
- [56] KANEKO S, ITAYA M. Designed horizontal transfer of stable giant DNA released from *Escherichia coli*[J]. *Journal of Biochemistry*, 2010, 147(6): 819-822.
- [57] HÅVARSTEIN LS. Bacterial gene transfer by natural genetic transformation[J]. *APMIS Supplementum*, 1998, 84: 43-46.
- [58] BENNETT MR, GURNANI P, HILL PJ, ALEXANDER C, RAWSON FJ. Iron-catalysed radical polymerisation by living bacteria[J]. *Angewandte Chemie (International Edition in English)*, 2020, 59(12): 4750-4755.