

基于 CiteSpace 的 PHA 研究进展与热点分析

杨雪, 魏风军*

(河南科技大学 艺术与设计学院, 河南 洛阳 471023)

摘要: **目的** 直观把握 PHA 相关领域的研究进展和热点, 推动 PHA 领域的发展。**方法** 以 CNKI 与 Web of Science 数据库中近 10 年的相关文献为对象, 采用文献计量方法, 使用 CiteSpace 软件绘制 PHA 研究知识图谱。**结果** 相关文献的年度发文量不断上升, 国内外学术界对 PHA 领域的关注度越来越高, 国际 PHA 领域的跨单位合作比国内更广泛。该领域的研究力量遍布全球, 其中清华大学、葡萄牙里斯本新大学、马来西亚理科大学、昆士兰大学、布尔诺理工大学等机构的贡献突出、影响较大, 陈国强是该领域发文量最多的学者。通过分析关键词可知, 目前对 PHA 的关注重点主要集中在力学性能、生物降解、混合菌群、活性污泥、除磷脱氮等方面。**结论** 在未来的 PHA 研究中, PHA 的增强改性、在活性污泥中提取 PHA 及生物法合成 PHA 仍是研究热点。

关键词: 聚羟基脂肪酸酯; 知识图谱; 文献计量法; 可视化分析

中图分类号: TB324; G353.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3563(2024)01-0081-10

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.01.010

CiteSpace-based PHA Research Progress and Hot Spot Analysis

YANG Xue, WEI Fengjun*

(School of Art and Design, Henan University of Science and Technology, Henan Luoyang 471023, China)

ABSTRACT: The work aims to intuitively master the research progress and hot spots in PHA-related fields and promote the development of PHA field. With the related literature in CNKI and Web of Science in the past ten years as the objects, the knowledge map of PHA research was drawn by the CiteSpace software with the bibliometric method. The annual number of publications of related literature increases continuously, the academic communities in China and abroad are paying more and more attention to the PHA field, and the cross-unit cooperation in the international PHA field is more extensive than that in China. The research power in this field is spread all over the world, among which Tsinghua University, NOVA Univ Lisbon, University of Science Malaysia, University of Queensland, and Brno University of Technology are prominent in their contribution and influence. CHEN Guoqiang is the scholar with the largest number of publications in this field. Key word analysis shows that the current focus of attention on PHA is mainly concentrated on mechanical properties, biodegradation, mixed flora, activated sludge, phosphorus and nitrogen removal. In the future research, enhanced modification of PHA based on increasing its structural diversity, extraction of PHA in activated sludge and biological phosphorus removal and nitrogen removal, biosynthesis of PHA, and mixed bacterial colony fermentation will be the future research trends in the field of PHA.

KEY WORDS: polyhydroxyalkanoate; knowledge map; bibliometric method; visual analysis

收稿日期: 2023-10-30

基金项目: 国家自然科学基金 (51675162)

*通信作者

高分子材料具有质轻、加工性优、阻透性好、成本低等优势,与金属材料、无机非金属材料并称为三大材料。目前,高分子材料已成为人类日常生活、国民经济发展和国防建设不可或缺的基础材料^[1-2]。21 世纪以来,高分子材料的迅速发展也带来了许多问题,废旧塑料、废旧橡胶轮胎、废旧纤维制品等带来的白色污染、黑色污染、彩色污染等问题严重危害了人类身体健康和自然生态环境^[3]。近年来,在全球各国政策的推动下,随着研发技术的持续突破,生物能源和生物制造产业已成为全球范围内的热门发展领域^[4-5]。开发可再生资源,特别是生物基材料,是未来取代石油等化石资源的主要物质生产方式,同时也是实现循环经济和节能减排的关键途径^[6-7]。

聚羟基脂肪酸酯(Polyhydroxyalkanoate, PHA)是一种广泛存在于微生物胞内且高度聚合的高分子生物聚酯。在碳源、氮源等养分失衡的情况下,微生物会将外在碳源转化合成 PHA,并作为自身所需的碳源和能量储存起来^[8]。由于 PHA 具有良好的生物可降解性和生物相容性,因此它被公认为是极具发展潜力的绿色环保型高分子材料,在包装^[9]、医药^[10]、化工^[11]、农业^[12]、日用^[13]等方面具有广泛的应用前景。

文献计量学以科学文献的内容、关键词、作者,以及所属机构、文献发表时间、引用文献等为研究对象,用数学和统计学方法分析科学文献的学科分类、数量及变化,以及主要研究内容和演变等,是一门起源于信息科学、定量化特征较强的交叉学科。近年来,文献计量学作为一种利用数学统计和信息挖掘进行科学分析的重要方法,已在众多学科中得到广泛应用^[14]。文中借助 CiteSpace 可视化分析软件对 PHA 领域近 10 年来国内外公开发表的研究成果进行量化分析,旨在对 PHA 领域的研究成果进行数据挖掘与热点讨论,以期对 PHA 的研究方向和发展趋势提供参考。

1 材料与方法

1.1 数据来源

以中国知网(China National Knowledge Infrastructure, CNKI)数据库为中文文献来源,数据检索时间跨度为 2013~2022 年,检索格式为:主题="PHA"或"聚羟基脂肪酸酯"或"聚羟基烷酸酯"。删除相关度较低的文献,将剩余的 389 篇文献作为中文数据源。

以 Web of Science(WOS)数据库为英文文献来源,数据检索时间跨度为 2013~2022 年,检索格式为:Topic="polyhydroxyalkanoates"。删除相关度较低的文献,将剩余的 2 971 篇作为英文数据源。

1.2 研究方法

首先,利用 2 个数据库的在线分析平台对 PHA 领域内的发文数量和其他内容进行初步分析。随后,

通过 Microsoft Excel 软件对这些数据进行统计和可视化分析。之后,将筛选出的国内外文献以 Refworks 格式导出,并以"download"作为文件名后缀保存为 txt 格式。最后,利用 CiteSpace 软件构建了作者、机构和关键词等方面的知识图谱(Mapping Knowledge Domains, MKD)^[15]。

2 结果与分析

2.1 年度发文量统计

年度发文量可以反映一定时间内某研究领域的整体状况,客观地显现该研究领域的研究过程和发展规律^[16]。这里利用 Microsoft Excel 软件对 CNKI 数据库和 WOS 数据库中导出的文献进行统计分析,用 Origin 绘制出 2013~2022 年国内外 PHA 研究领域的年度发文量图,如图 1 所示。从图 1 中可以发现,WOS 数据库的 PHA 研究年度发文量总体上呈增长趋势,说明在 2013~2022 年间 PHA 研究在国际上受到广泛关注;在 CNKI 数据库中,2013~2022 年的年度发文量处于一个动态平衡状态,年度发文量始终保持在 30~50 篇之间。总体而言,国际上有关 PHA 的研究仍然是一个热点,有着很大的上升空间,而国内则仍处于稳定发展阶段。

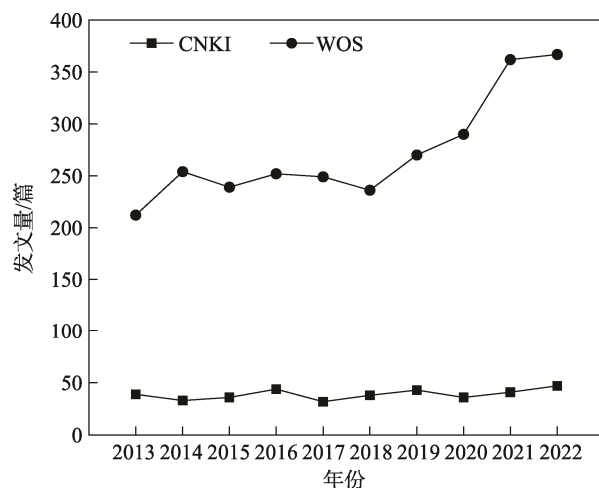


图 1 PHA 领域年度发文量统计
Fig.1 Annual publication statistics
in the field of PHA

2.2 作者与合作网络分析

2.2.1 国内作者与合作网络分析

基于 CNKI 数据库生成了 PHA 领域主要研究群体的共现图谱,如图 2 所示,相关作者的机构、中心性和发文量如表 1 所示。从图 2 和表 1 可以看出,国内 PHA 研究领域的主要团体有 8 个。其中,陈国强团队的发文量最大,紧随其后的是于翔、陈志强、刘长莉团队。

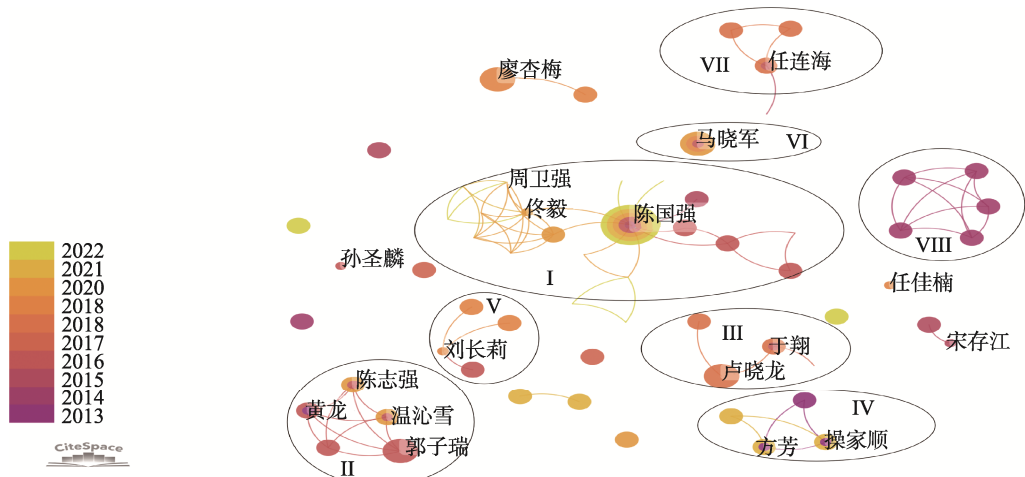


图 2 国内主要研究群体共现图谱
Fig.2 Co-occurrence map of major research groups in China

表 1 国内学者发文量、中心性分布
Tab.1 Distribution of the number of publications and centrality of Chinese scholars

排名	作者	机构	发文量/篇	中心性
1	陈国强	清华大学	10	0.01
2	于翔	河南工程学院	8	0
3	任连海	北京工商大学	6	0
4	马晓军	天津科技大学	6	0
5	刘长莉	东北林业大学	5	0
6	方芳	河海大学	4	0
7	佟毅	中粮生物科技股份有限公司	4	0
8	操家顺	河海大学	4	0
9	陈志强	哈尔滨工业大学	4	0
10	黄龙	哈尔滨工业大学	4	0

在作者合作网络图谱中, 中介中心性是衡量节点在科研合作中的重要性指标。节点的中介中心性越高, 表明该节点在科研合作中的地位越重要, 在连接其他节点、促

进知识交流和学术合作方面具有关键作用^[17]。从中心性的角度来看, 除了陈国强团队, 其他团队成员的中心性都较低, 表明这些团队在发表中文论文时其成员间的合作大多局限在本单位内, 缺乏跨单位的合作。

2.2.2 国际作者与合作网络分析

基于 WOS 数据库生成 PHA 领域主要研究群体的共现 MKD 图, 如图 3 所示, 国际学者中心性与发文量分布见表 2。在国际上, 以 Chen Guo-Qiang、Reis Maria A M、Bhatia Shashi Kant、Obruca Stanislav 为首的科研团队在 PHA 领域内做出了重要贡献。Chen Guo-Qiang 教授来自清华大学生命科学学院, 在合成生物学、微生物代谢工程、生物材料等领域具有较高的国际声誉^[18]。葡萄牙里斯本新大学的 Reis Maria A M 教授、澳大利亚昆士兰大学的 Bhatia Shashi Kant 教授和布尔诺理工大学的 Obruca Stanislav 教授等学者共同构建了国际 PHA 领域的合作网络, 进而辐射出全球 PHA 研究的学术团队共同体。

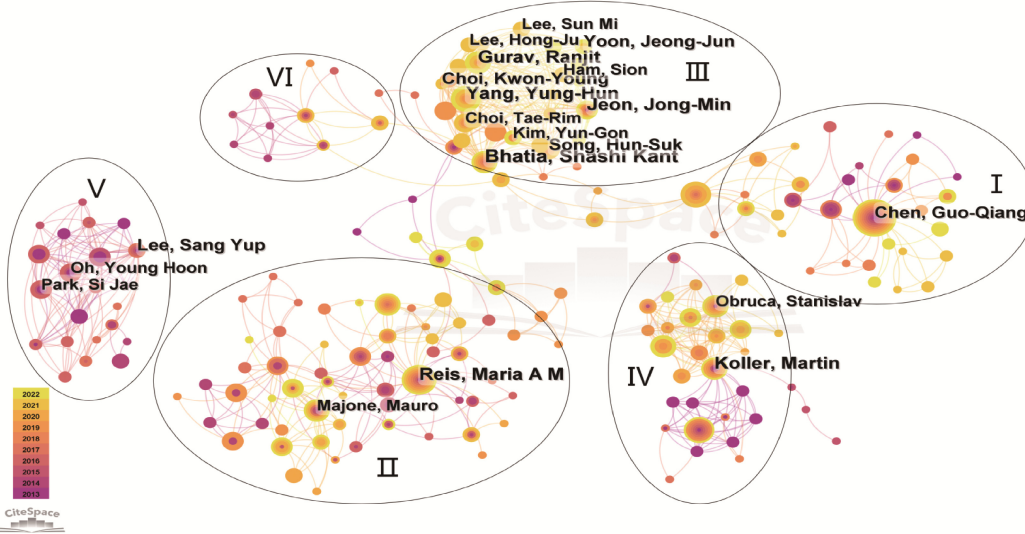


图 3 国际主要研究群体合作网络图谱
Fig.3 Collaborative network map of international major research groups

表 2 国际学者发文量、中心性分布
Tab.2 Distribution of the number of publications and centrality of international scholars

排名	作者	机构	发文量/篇	中心性
1	Chen Guo-Qiang	Tsinghua University	71	0
2	Reis Maria A M	NOVA Univ Lisbon	48	0.01
3	Sudesh Kumar	Universiti Sains Malaysia	38	0
4	Bhatia Shashi Kant	University of Queensland	30	0
5	Obruca Stanislav	Brno University of Technology	29	0
6	Yang Yung-Hun	Konkuk University	27	0
7	Roy Ipsita	The University of Sheffield	26	0
8	Majone Mauro	Sapienza University of Rome	24	0
9	Gurav Ranjit	Texas State University	23	0
10	Koller Martin	Karl-Franzens-Universität Graz	22	0

2.3 期刊分析

2.3.1 国内期刊

统计分析了 CNKI 数据库的 389 篇 PHA 领域相关论文的发表期刊,结果表明,相关论文所在期刊较分散,绝大部分期刊的载文量仅 1 篇。其中,《塑料科技》的载文量(18 篇)最高,其次为《生物工程学报》(14 篇),紧随其后的是《水处理技术》《环境工程学报》《中国塑料》等杂志。图 4 中未列出的其余期刊的载文量均小于 4 篇。

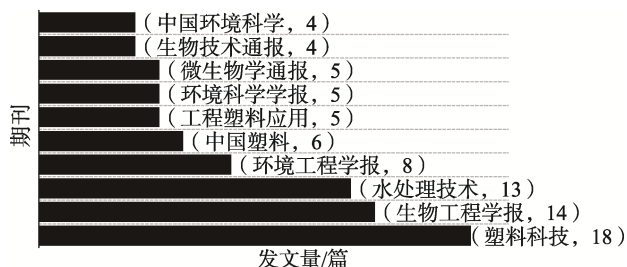


图 4 CNKI 数据库中发文量前 10 位的期刊
Fig.4 Top 10 journals in terms of number of publications in CNKI database

2.3.2 国际期刊

基于 WOS 数据库对 PHA 相关论文发表期刊进行可视化分析,并生成被引图谱(图 5),发文/被引量分布见表 3。由图 5 和表 3 可知, Bioresource Technology 的被引频次最高,其次是 Applied Microbiology and Biotechnology,表明这 2 本期刊在 PHA 领域的影响力较大。由表 3 可知, Bioresource Technology 的载文量最高,其次是 International Journal of Biological Macromolecules,其余期刊的载文量与二者存在一定差距。可见, Bioresource Technology 和 International Journal of Biological Macromolecules 期刊的主题与 PHA 研究的契合度较高,是相关学者发表研究成果的主要期刊。

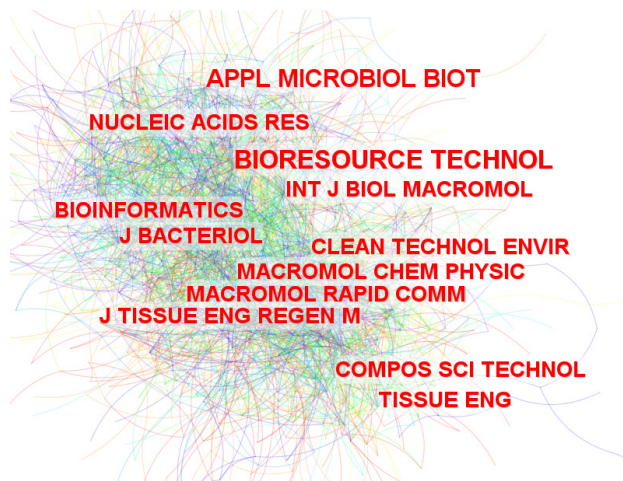


图 5 相关国际期刊被引节点图谱
Fig.5 Citation map of related international journals

2.4 研究热点分析与研究前沿预测

2.4.1 关键词聚类分析

为了进一步了解目前国内外 PHA 领域的研究热点及其分布情况,基于 CiteSpace 软件,对源自 CNKI 数据库的 389 篇中文文献和 WOS 数据库的 2 971 篇英文文献生成了关键词聚类图谱,如图 6 所示。由图 6 可知, PHA 领域中文文献的关键词可分为 8 类,英文文献的关键词可分为 5 类,主要研究内容见表 4、表 5。

2.4.2 关键词突现分析

相关研究领域在某一时期内突然出现的关键词及其持续时间可以揭示该领域的热点和研究趋势。突现强度指某一时间段内关键词引用量的变化情况,用于发现某个主题词或关键词的衰落或兴起。突现强度越大,表示该关键词引用量的变化越显著,该指标可通过 CiteSpace 软件的 Burst detection 功能实现。基于 CiteSpace 软件对 WOS 和 CNKI 数据库的 PHA 相关文献进行关键词突现分析,结果如图 7 所示。

表 3 相关国际期刊的载文量与被引频次
Tab.3 Number of publications and citations of related international journals

期刊	发文量/篇	总被引量/次
Bioresource Technology	167	1 724
International Journal of Biological Macromolecules	147	1 215
Polymers	77	530
Applied Microbiology and Biotechnology	56	1 546
New Biotechnology	52	661
Journal of Polymers and the Environment	50	521
Journal of Biotechnology	42	1 103
Biochemical Engineering Journal	38	718
Journal of Applied Polymer Science	38	596
Acs Sustainable Chemistry Engineering	35	278

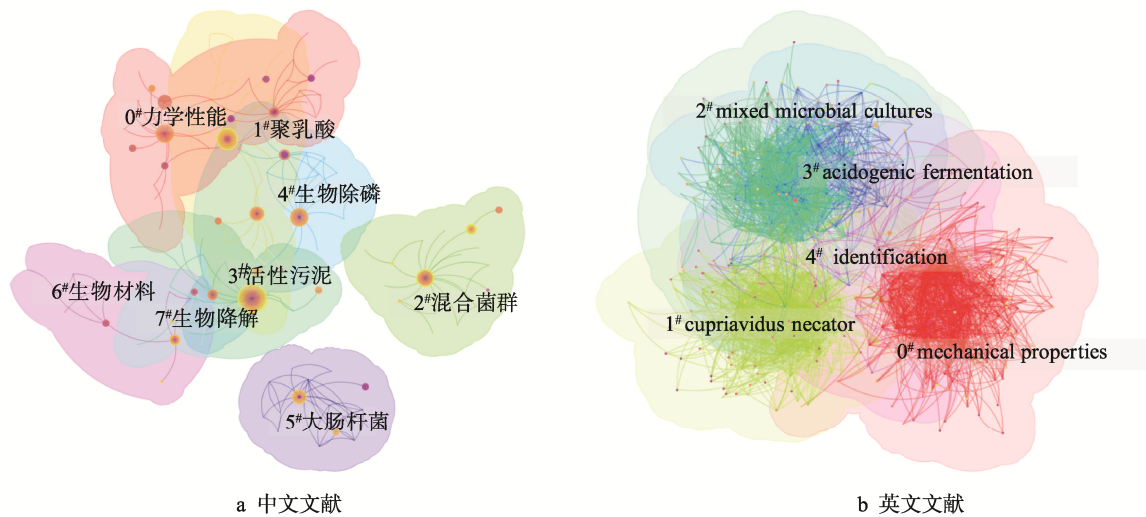


图 6 相关中英文文献关键词聚类图谱
Fig.6 Key word clustering map of related Chinese and English literature

表 4 相关中文文献关键词聚类分析
Tab.4 Key word clustering analysis of related Chinese literature

聚类标签	关键词	主要研究内容
0#力学性能	复合材料、结晶性能、制备方法、增韧剂、热稳定性等	通过与天然高分子材料、人工合成高分子材料及纳米粒子等复合改性, 改变其力学性能, 拓宽应用范围
1#聚乳酸	生物塑料、研究进展、生物基、包装应用等	PHA 与聚乳酸(Polylactic Acid, PLA)生物降解方面的性能对比, 以及 PHA 与 PLA 共混改性的研究进展
2#混合菌群	餐厨垃圾、剩余污泥、耐盐菌、木糖合成等	利用以耐盐菌为代表的混合菌群在餐厨垃圾及剩余污泥中合成 PHA
3#活性污泥	碳源、代谢途径、甲烷、厌氧发酵等	利用活性污泥合成 PHA, 实现污泥资源化利用
4#生物除磷	聚磷菌、厌氧释磷、生物脱氮、反硝化等	以 PHA 的合成量为生物脱氮除磷的指标, 研究不同有机物质对生物除磷的影响和作用机制
5#大肠杆菌	乙酸、丙酸、葡萄糖、五六碳糖、生物合成等	重组大肠杆菌, 利用乙酸、丙酸等碳源生物合成 PHA 的各项进展
6#生物材料	代谢工程、影响因素、基因工程、同种异体等	基因工程与代谢工程在生物材料 PHA 的合成与制备上的应用与进展
7#生物降解	发酵、微生物、内毒素等	生物降解塑料 PHA 的提取工艺与应用现状

表 5 相关英文文献关键词聚类分析
Tab.5 Key word clustering analysis of related English literature

聚类标签	关键词	主要研究内容
0 [#] mechanical properties	polyhydroxyalkanoate, degradation, mechanical property, polymer, biodegradation, morphology, biodegradable polymer, crystallization etc.	深入了解 PHA 材料的结构与性能关系, 探索有效的改性方法, 并考虑材料的环境友好性和可生物降解性等特点, 优化材料的力学性能, 以满足不同应用场景的需求
1 [#] cupriavidus necator	acid, ralstonia eutropha, polyhydroxybutyrate, Bacteria, growth, poly beta hydroxybutyrate, fermentation etc.	通过深入了解微生物合成 PHA 的机制和调控途径, 研究钩虫贪铜菌合成 PHA 的过程, 为优化 PHA 的生产和性能提供理论支持
2 [#] mixed microbial cultures	activated sludge, optimization, pha production, metabolism, waste water, volatile fatty acid, carbon source etc.	通过研究不同微生物之间的相互作用机制和影响规律, 优化混合微生物培养 PHA 的生产过程, 提高 PHA 的产量和质量
3 [#] acidogenic fermentation	fermentation, anaerobic digestion, food waste, pretreatment, ethanol, hydrolysis etc.	深入探讨酸性条件下 PHA 的合成和分解代谢机制, 为优化 PHA 的生产过程、提高产量和质量提供理论支持和实践指导
4 [#] identification	depolymerase, granule, bacterium, microbial degradation, biodegradable plastics	采用光谱分析、色谱分析、质谱分析等手段对 PHA 进行鉴定和识别

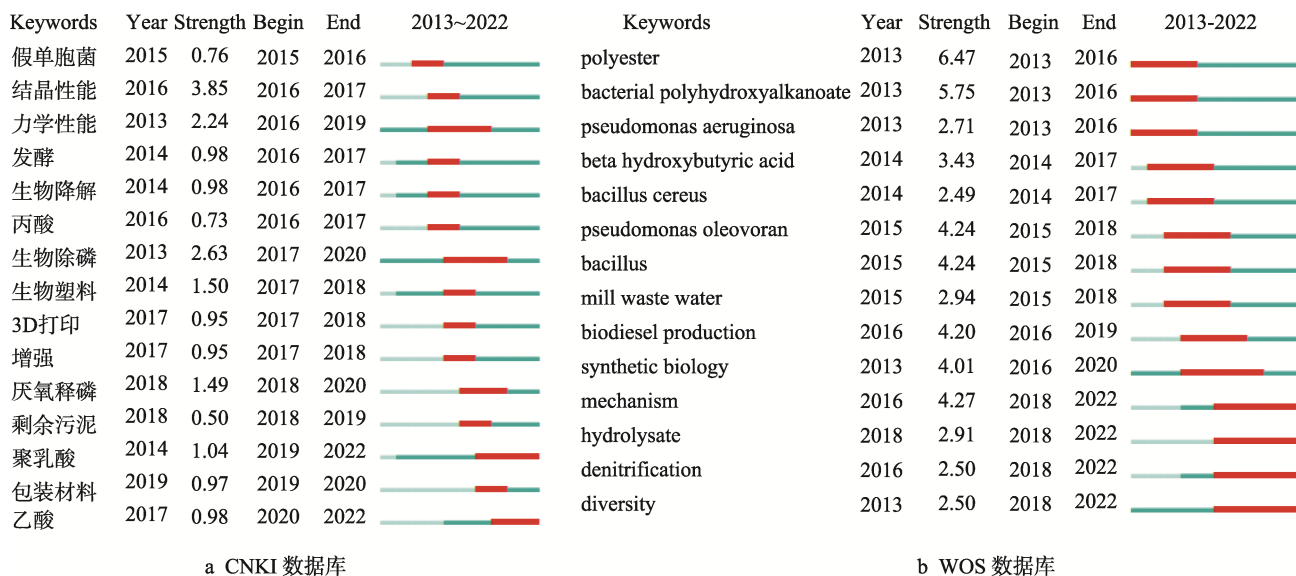


图 7 国内外 PHA 领域关键词突现图

Fig.7 Key word emergence map in PHA field in China and abroad

基于 CNKI 数据库的 PHA 领域关键词突现图如图 7a 所示。其中,“结晶性能^[19]”、“力学性能^[20]”、“生物塑料^[21]”、“厌氧释磷^[22]”等关键词的突现强度较高,表明 PHA 的结晶性能与力学性能、生物相容性、生物降解性,以及在生物除磷领域的应用是当时 PHA 领域研究的重点。此外,“聚乳酸”“乙酸”等关键词从 2019 年开始突现,并持续至今,表明通过改变菌种、给料、发酵过程等方式增加 PHA 组成结构的多样性和性能多样化^[23]是当前国内 PHA 领域的研究趋势。

基于 WOS 数据库的 PHA 领域关键词突现图如图 7b 所示。早期的关键词主要为“bacterial polyhy-

droxyalkanoate^[24]”(细菌性聚羟基脂肪酸酯)、“pseudomonas aeruginosa^[25]”(绿脓杆菌)、“bacillus^[26]”(芽孢杆菌),在此期间 PHA 研究主要以生物学领域为主,细菌合成 PHA 是一个研究热点。2015 年,随着关键词“mill waste water”(工业废水)的出现,PHA 研究逐步向除磷脱氮领域探索^[27-28],说明此期间 PHA 在生物除磷领域的应用是一个研究热点。此后,“mechanism”(力学性能)、“diversity”(多样性)相继出现,并持续到 2022 年,表明改变 PHA 结构多样性以提升其力学性能^[29-30]将成为未来一段时间内新的研究趋势。

3 讨论

PHA是一种在近20多年来迅速发展起来的由多种微生物合成的细胞内聚酯,在生物体内主要作为碳源和能源的储存物质,是一种天然的高分子生物材料^[31]。整体来看,2013~2022年间,国外在PHA研究领域的文献数量持续增加,而国内则保持相对稳定。尽管国内该领域的研究文献数量相对稳定,但自2013年以来,随着研究的不断深入,文章的质量得到显著提高,研究重心也逐渐从理论转向实践与应用。综合2013~2022年国内外已有文献来看,未来PHA研究的热点和方向主要有以下4个方面。

1) PHA的改性。PHA具有类似于合成塑料的物理特性,以及独特的生物降解性、生物相容性、气体阻隔性等,因此可以在某些方面减少对石油的依赖,对环境治理具有积极作用。然而,PHA的力学性能较差,与通用塑料相比,还存在较大差距。为了提高PHA的力学性能、流变性能、加工性能等,大量学者采用生物共混、物理共混、化学共混等方法对其进行增强改性^[32-33],使PHA在可生物降解的包装材料、组织工程材料、缓释材料、电学材料及医疗材料等方面展现出广阔的应用前景^[34]。

2) 污泥资源利用。污泥是一种成分复杂的胶体物质,是水质净化过程的副产物。城市污水处理厂中的活性污泥含有多种微生物和大量碳源,这些碳源可用于PHA的合成。利用活性污泥生产PHA,并与污水处理过程相结合,既可以降解有机污染物,又可以减少污泥产量,同时还可将污染物转化为具有利用价值且环境友好的生物塑料,对可持续发展战略具有重大的现实意义^[35-37]。尽管利用活性污泥合成PHA的生产工艺取得了重大进展,但针对活性污泥中PHA提取的研究相对较少。此外,PHA生产过程的高成本进一步阻碍了生物聚合物的开发和应用,因此未来应更关注如何高效地从活性污泥中提取PHA。

3) 生物合成。近年来,生物法合成PHA受到了广泛关注。与传统的化学合成法相比,微生物合成高分子PHA具有反应条件温和,生产过程和产品对环境友好等优势^[38]。在传统生物合成工业生产中,应用较广的微生物有大肠杆菌^[39]、真氧产碱杆菌^[40]和假单胞菌^[41]等,针对这些菌株的基因组信息、基因改造方法、发酵过程控制等方面的研究较深入,并在国内外取得了一系列研究成果。为了保证菌种的无菌生长环境,需要投入大量能源产生蒸汽进行灭菌,或者采取复杂的防污染措施,导致生产的能耗成本和过程控制成本居高不下^[42]。未来的研究需要开发更简便、节能、经济的生物合成技术。

4) 混合菌群发酵。目前,大多研究通过适当调节生产工艺^[43-44](如培养方式、DO值、pH、C/N比等)和改造细菌基因,或利用廉价^[45]、可再生的农林废弃物作为传统原料的替代品^[46]来提高PHA

的产量,从而极大地节约了原料成本。由于PHA的生产成本较高,且产量相对较低,大多数研究仍停留在实验室阶段,如何实现PHA工业化生产的转化依然是当今面临的主要挑战^[47]。自然界中多种革兰氏阳性菌和阴性菌都具有PHA合成能力^[48],利用自然形成的混合菌群可以在开放环境中进行发酵,无需采取严格的无菌措施。同时,混合菌群可以利用低品质、廉价的富含碳源的原料(纤维素水解液、市政污泥发酵液、啤酒废水、粗甘油)^[49]合成PHA。可见利用混合菌群生产PHA在降低生产成本方面具有明显优势。

文中选取了2013~2022年间的PHA领域相关研究数据,利用CiteSpace软件对年度发文量、学科分布和关键词突现等内容进行了可视化分析,并绘制了相应的知识图谱。这些结果不仅揭示了PHA领域的核心作者团队、主要发表期刊,以及具有影响力的研究机构等关键信息,还预测了未来PHA领域可能的研究热点,为后续的相关研究提供了一些思路。由于文中仅选择了2013~2022年间的相关文献进行分析,并未涵盖PHA领域的全部文献,研究结果并未完整展现出PHA领域的发展历程,因此未来的研究应该对所有相关文献进行整理和分析,以便更全面地了解PHA领域的整体发展情况。此外,还可以结合其他分析方法,从不同角度对PHA领域的研究现状和未来趋势进行更深入的研究。

随着宏观经济的发展和人们对可持续替代能源的关注日益增加,PHA受到了越来越多学者的关注。在国家政策和市场需求的双重推动下,PHA相关研究将更加深入,合成方法与应用领域也将朝着更精确的方向发展,因此PHA性能的完善和应用,以及合成方法的多样化开发,将成为生物材料可持续发展的研究热点。

4 结论

1) 2013~2022年,国际上针对PHA研究的发文量总体呈增长趋势,而国内的相关论文数量始终处于动态平衡状态。该领域的研究力量遍布全球,其中清华大学、葡萄牙里斯本新大学、马来西亚理科大学、昆士兰大学、布尔诺理工大学等机构贡献突出、影响较大。清华大学陈国强是该领域发文量最多的学者,以他为首的作者群体在国内及国际上的PHA相关领域均做出了突出贡献。

2) 通过分析文献关键词可知,PHA领域的研究热点主要在力学性能、生物合成、混合菌群、活性污泥、除磷脱氮等方面。在未来的研究中,以下方向仍是热点:以增加PHA结构多样性为基础,对其增强改性,以拓宽应用范围;在活性污泥中提取PHA,同时实现生物除磷脱氮;利用生物法合成PHA或混合菌群发酵,降低PHA生产成本。

参考文献:

- [1] 谢辉, 向书永, 朱才镇等. 抗菌高分子材料研究进展及应对策略[J]. 高分子材料科学与工程, 2021, 37(2): 149-156.
XIE H, XIANG S Y, ZHU C Z, et al. Antibacterial Polymer Materials Research Progress and Response Strategies[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2021, 37(2): 149-156.
- [2] 吴奇宗, 姚庆达, 许春树等. 可生物降解聚合物及其复合材料研究进展[J]. 皮革与化工, 2022, 39(5): 31-39.
WU Q Z, YAO Q D, XU C S, et al. Advances in Biodegradable Polymers and their Composites[J]. Leather and Chemical, 2022, 39(5): 31-39.
- [3] FORMELA K, KURAŃSKA M, BARCZEWSKI M. Recent Advances in Development of Waste-Based Polymer Materials: A Review[J]. Polymers, 2022, 14(5): 1050.
- [4] 程恩富, 宋宪萍. 全球经济新格局与中国新型工业化[J]. 政治经济学评论, 2023, 14(5): 3-25.
CHENG E F, SONG X P. The New Pattern of Global Economy and China's New Industrialization[J]. Political Economy Review, 2023, 14(5): 3-25.
- [5] WESTLIE A H, QUINN E C, PARKER C R, et al. Synthetic Biodegradable Polyhydroxyalkanoates (PHAs): Recent Advances and Future Challenges[J]. Progress in Polymer Science, 2022, 134: 101608.
- [6] SIRACUSA V, BLANCO I. Bio-Polyethylene (Bio-PE), Bio-Polypropylene (Bio-PP) and Bio-Poly(ethylene terephthalate) (Bio-PET): Recent Developments in Bio-Based Polymers Analogous to Petroleum-Derived Ones for Packaging and Engineering Applications[J]. Polymers, 2020, 12(8): 1641.
- [7] 王琳琳, 陈衍玲, 刘彩云等. 生物基塑料及其在包装行业的应用[J]. 塑料包装, 2022, 32(5): 12-16.
WANG L L, CHEN Y L, LIU C Y, et al. Bio-Based Plastics and Their Applications in the Packaging Industry[J]. Plastic Packaging, 2022, 32(5): 12-16.
- [8] 卢承蓉, 张梦君, 郑维爽等. 生物基可降解材料 PHA 提取工艺研究进展[J]. 中国生物工程杂志, 2023, 43(11): 105-115.
LU C R, ZHANG M J, ZHENG Weishuang, et al. Advances in Extraction Processes of Biodegradable Biomaterials PHA[J]. Chinese Journal of Bioengineering, 2023, 43(11): 105-115.
- [9] 陈国强. 微生物聚羟基脂肪酸酯的应用新进展[J]. 中国材料进展, 2012, 31(2): 7-15.
CHEN G Q. Recent Progress in Application of Microbial Polyhydroxyalkanoates[J]. Materials China, 2012, 31(2): 7-15.
- [10] 冉淦侨, 谭丹, 卢晓云. 聚羟基脂肪酸酯纳米微球: 结构特征、生物合成及其在生物技术和生物医药领域的应用[J]. 中国生物化学与分子生物学报, 2016, 32(7): 745-754.
RAN G Q, TAN Dan, LU X Y. Polyhydroxyalkanoate Nanoparticles: Structure, Biosynthesis, and Applications in Biotechnology and Biomedicine[J]. Chinese Journal of Biochemistry and Molecular Biology, 2016, 32(7): 745-754.
- [11] 刘泽清, 宋秀兰. 有机废料合成聚羟基脂肪酸酯的研究进展[J]. 应用化工, 2022, 51(7): 2113-2120.
LIU Z Q, SONG X L. Research Progress of Polyhydroxyalkanoate (PHA) Synthesis Using Various Organic Waste Streams[J]. Applied Chemical, 2022, 51(7): 2113-2120.
- [12] ZHOU T L, WANG S L, ZHANG W Q, et al. Comparison of Different Aerobic Sludge on Enriching Polyhydroxyalkanoate Mixed Microbial Culture Using Lactic Acid Fermentation Broth of Agricultural Wastes[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 475: 146000.
- [13] KUMARI S V G, PAKSHIRAJAN K, PUGAZHENTHI G. Recent Advances and Future Prospects of Cellulose, Starch, Chitosan, Polylactic Acid and Polyhydroxyalkanoates for Sustainable Food Packaging Applications[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 221: 163-182.
- [14] 张孜璇, 于洪文, 孟龙月. 土壤中微塑料污染现状及热点趋势可视化分析[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(6): 36-49.
ZHANG Z X, YU H W, MENG L Y. Visualization Analysis of the Status and Emerging Trends of Soil Microplastics Pollution[J]. Journal of China Agricultural University, 2023, 28(6): 36-49.
- [15] 童永尚, 张春平, 杨增增等. 基于 CiteSpace 的 2012~2021 年国内外草地施肥研究文献计量分析[J]. 中国草地学报, 2023, 45(9): 130-142.
TONG Y S, ZHANG C P, YANG Z Z, et al. Research of Domestic and International Grassland Fertilization in the 2012-2021 Based on CiteSpace Bibliometric Analysis[J]. China Grassland Journal, 2023, 45(9): 130-142.
- [16] 何青秀, 钟镭, 邹雪梅等. 决明子研究进展的 CiteSpace 可视化知识图谱分析[J]. 世界科学技术-中医药现代化, 2022, 24(1): 398-407.
HE Q X, ZHONG L, ZOU X M, et al. Visualization Map Analysis of Semen Cassiae Research Progress Based on CiteSpace[J]. World Science and Technology - Moder-

- nisation of Chinese Medicine, 2022, 24(1): 398-407.
- [17] 万平, 邓鑫焰, 马晓凤. 基于知识图谱的驾驶愤怒研究现状及热点可视化分析[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(7): 39-50.
- WAN P, DENG X Y, MA X F. Visual Analysis of Research Status and Hotspots for Driving Anger Based on Mapping Knowledge Domain[J]. China Journal of Safety Science, 2023, 33(7): 39-50.
- [18] 赵国屏. 合成生物学 2035 发展战略[J]. 世界科学, 2023(9): 26-30.
- ZHAO G P. Development Strategy of Synthetic Biology in 2035[J]. World Science, 2023(9): 26-30.
- [19] 廖曦, 秦娇娇, 唐小燕. 结晶性生物可降解聚羟基脂肪酸酯的化学合成[J]. 高分子学报, 2023, 54(10): 1426-1467.
- LIAO X, QIN J J, TANG X Y. Chemical Synthesis of Crystalline Biodegradable Polyhydroxyalkanoates[J]. Journal of Polymer Science, 2023, 54(10): 1426-1467.
- [20] 张永霞, 卢晓龙, 张震等. PHA/PVP 复合材料的制备与性能研究[J]. 塑料科技, 2018, 46(8): 77-80.
- ZHANG Y X, LU X L, ZHANG Z, et al. Study on Preparation and Performance of PHA/PVP Composites[J]. Plastics Science and Technology, 2018, 46(8): 77-80.
- [21] 安胜男, 马晓军. 生物塑料 PHAs/植物纤维复合材料的研究进展[J]. 林业机械与木工设备, 2016, 44(3): 4-7.
- AN S N, MA X J. Research Progress on Bioplastics PHAs/Plant Fiber Composite Materials[J]. Forestry Machinery and Woodworking Equipment, 2016, 44(3): 4-7.
- [22] 陈佳妮. 变废为宝: 利用活性污泥生产生物可降解塑料聚-3-羟基丁酸酯[J]. 生物工程学报, 2017, 33(12): 1934-1944.
- CHEN J N. From Waste to Treasure: Turning Activated Sludge into Bioplastic Poly-3-Hydroxybutyrate[J]. Journal of Biological Engineering, 2017, 33(12): 1934-1944.
- [23] 姚建, 苟敏, 汤岳琴. “绿色塑料”聚羟基脂肪酸酯生物合成研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2021, 27(6): 1662-1671.
- YAO J, GOU M, TANG Y Q. Research Progress on Biosynthesis of “Green Plastics”: Polyhydroxyalkanoates[J]. Journal of Applied and Environmental Biology, 2021, 27(6): 1662-1671.
- [24] WAGLE A, DIXIT Y, VAKIL B. Optimization of Bacterial Polyhydroxyalkanoate Production by Using One-Factor-at-a-Time Approach[J]. International Journal of Pharma and Bio Science, 2017, 8(1): 177-186.
- [25] IMPALLOMENI G, BALLISTRERI A, CARNEMOLLA G M, et al. Biosynthesis and Structural Characterization of Polyhydroxyalkanoates Produced by *Pseudomonas Aeruginosa* ATCC 27853 from Long Odd-Chain Fatty Acids[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 108: 608-614.
- [26] DE OLIVEIRA SCHMIDT V K, DOS SANTOS E F, DE OLIVEIRA D, et al. Production of Polyhydroxyalkanoates by *Bacillus Megaterium*: Prospecting on Rice Hull and Residual Glycerol Potential[J]. Biomass, 2022, 2(4): 412-425.
- [27] KUMAR M, GHOSH P, KHOSLA K, et al. Recovery of Polyhydroxyalkanoates from Municipal Secondary Wastewater Sludge[J]. Bioresource Technology, 2018, 255: 111-115.
- [28] KUMAR V, SRIVASTAVA S, THAKUR I S. Enhanced Recovery of Polyhydroxyalkanoates from Secondary Wastewater Sludge of Sewage Treatment Plant: Analysis and Process Parameters Optimization[J]. Bioresource Technology Reports, 2021, 15: 100783.
- [29] BHATIA S K. Microbial Biopolymers: Trends in Synthesis, Modification, and Applications[J]. Polymers, 2023, 15(6): 1364.
- [30] KHAMPLD T, WONGSIRICHOT P, WINTERBURN J. Production of Polyhydroxyalkanoates from Hydrolysed Rapeseed Meal by *Haloferax Mediterranei*[J]. Bioresource Technology, 2023, 386: 129541.
- [31] 张波波, 黄崇杏, 郭威等. 聚(3-羟基丁酸酯-co-3-羟基戊酸酯)改性研究进展[J]. 包装工程, 2019, 40(7): 66-75.
- ZHANG B B, HUANG C X, GUO W, et al. Research Progress on Poly(3-Hydroxybutyrate-Co-3-Hydroxyvalerate) Modifications[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(7): 66-75.
- [32] 卢嘉敏. 绿色可降解食品保鲜材料的研究进展[J]. 包装工程, 2023, 44(S2): 77-81.
- LU J M. Research Progress of Green Degradable Food Preservation Materials[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(S2): 77-81.
- [33] TIAN Jing, ZHANG Run, WU Yi-hui, et al. Additive Manufacturing of Wood Flour/Polyhydroxyalkanoates (PHA) Fully Bio-Based Composites Based on Micro-Screw Extrusion System[J]. Materials & Design, 2021, 199: 109418.
- [34] 雷学军. 二氧化碳是人类的宝贵财富[J]. 中国能源, 2016, 38(1): 12-21.
- LEI X J. Carbon Dioxide is the Precious Wealth of Human Beings[J]. China Energy, 2016, 38(1): 12-21.
- [35] 田强运, 裴树昆, 马晓军等. 生物降解包装材料聚羟基脂肪酸酯的工艺研究进展[J]. 包装工程, 2023,

- 44(7): 63-75.
- TIAN Q Y, PEI S K, MA X J, et al. Research Progress on Production Process of Polyhydroxyalkanoates as Biodegradable Packaging Material[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(7): 63-75.
- [36] 李京霖, 郑义, 赵丽雅等. 厨余垃圾生物合成聚羟基脂肪酸酯研究进展[J]. 中国塑料, 2022, 36(3): 110-119.
- LI J L, ZHENG Y, ZHAO L Y, et al. Research Progress in Biosynthesis of Polyhydroxyalkanoates from Kitchen Waste[J]. China Plastics, 2022, 36(3): 110-119.
- [37] PEI R Z, VICENTE-VENEGAS G, TOMASZEWSKA-PORADA A, et al. Visualization of Polyhydroxyalkanoate Accumulated in Waste Activated Sludge[J]. Environmental Science & Technology, 2023, 57(30): 11108-11121.
- [38] 韦童. 提取方法对活性污泥中聚羟基烷酸酯(PHA)回收效果的影响研究[D]. 广州大学, 2022: 7-15.
- WEI T. Effect of Extraction Methods on the Recovery of Polyhydroxyalkanoate (PHA) from Activated Sludge[D]. Guangzhou University, 2022: 7-15.
- [39] KIM D, LEE S K. Metabolic Engineering of *Escherichia Coli* for Production of Polyhydroxyalkanoates with Hydroxyvaleric Acid Derived from Levulinic Acid[J]. Journal of Microbiology and Biotechnology, 2022, 32(1): 110-116.
- [40] ISHIHARA S, ORITA I, MATSUMOTO K, et al. (R/S)-Lactate/2-Hydroxybutyrate Dehydrogenases in and Biosynthesis of Block Copolyesters by *Ralstonia Eutropha*[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2023, 107(24): 7557-7569.
- [41] CERRONE F, ZHOU B B, MOUREN A, et al. *Pseudomonas Umsongensis* GO16 as a Platform for the *in Vivo* Synthesis of Short and Medium Chain Length Polyhydroxyalkanoate Blends[J]. Bioresource Technology, 2023, 387: 129668.
- [42] 刘凯旋, 沈宏伟, 谢鑫颖等. PHA 生物制造及加工过程进展[J]. 生物加工过程, 2022, 20(02): 206-216.
- LIU K X, SHEN H W, XIE X Y, et al. Advances in Biomanufacturing and Processing of Polyhydroxyalkanoate (PHA)[J]. Bioprocess Engineering, 2022, 20(2): 206-216.
- [43] 王钰涵. 混菌利用餐厨垃圾产酸液合成聚羟基脂肪酸酯的研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2022: 3-8.
- WANG Y H. Study on Polyhydroxyalkanoate Production by Mixed Bacteria Based on Acid Production from Food Waste[D]. Harbin Institute of Technology, 2022: 3-8.
- [44] 姜鹏, 曾小伦, 邹嘉豪等. 产聚羟基脂肪酸酯的活性污泥驯化及细菌群落结构研究[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(10): 85-89.
- JIANG P, ZENG X L, ZOU J H, et al. Domestication of Activated Sludge Producing Polyhydroxy Fatty Acid Esters and Study of Bacterial Community Structure[J]. Environmental Science and Technology, 2020, 43(10): 85-89.
- [45] 杨松源. 共利用葡萄糖和木糖合成中长链聚羟基脂肪酸酯人工双菌体系的构建[D]. 天津大学, 2019: 2-8.
- YANG S Y. Construction of an Artificial *Bacillus* System for the Synthesis of Medium and Long Chain Polyhydroxy Fatty Acid Esters by Co-utilizing Glucose and Xylose[D]. Tianjin University, 2019: 2-8.
- [46] 赵国强, 李亚丽, 武双等. 基于低成本碳源微生物合成聚羟基脂肪酸酯的研究进展[J]. 高分子通报, 2020(11): 22-30.
- ZHAO G Q, LI Y L, WU Shang, et al. Research Progress in Polyhydroxyalkanoates Biosynthesis by Microorganisms Based on Inexpensive Carbon Sources[J]. Polymer Bulletin, 2020(11): 22-30.
- [47] 陈心宇, 李梦怡, 陈国强. 聚羟基脂肪酸酯 PHA 代谢工程研究 30 年[J]. 生物工程学报, 2021, 37(5): 1794-1811.
- CHEN X Y, LI M Y, CHEN G Q. Thirty Years of Metabolic Engineering for Biosynthesis of Polyhydroxyalkanoates[J]. Journal of Biological Engineering, 2021, 37(5): 1794-1811.
- [48] 陶观宝. 盐弧菌合成聚羟基脂肪酸酯的研究[D]. 北京化工大学, 2021: 8-10.
- TAO G B. Study on the Synthesis of Polyhydroxyalkanoate by *Salinibacterium*[D]. Beijing University of Chemical Technology, 2021: 8-10.
- [49] 闫昀. 混合碳源污水多菌种合成 PHA 的研究[D]. 天津科技大学, 2021: 2-12.
- YAN X. Study on the Synthesis of PHA from Mixed Carbon Source by Sewage with Multi Bacteria[D]. Tianjin University of Science and Technology, 2021: 2-12.