

# 基于 CiteSpace 的聚羟基烷酸酯研究科研合作网络可视化分析

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2024.02.005

杨 雪 魏风军

河南科技大学

包装工程系

河南 洛阳 471023

**摘 要:** 为探究全球聚羟基烷酸酯 (PHA) 研究的学者科研合作紧密度、时空特征和未来趋势, 基于文献计量可视化分析软件 CiteSpace, 以 Web of Science (WoS) 数据库为数据源, 对 2013—2022 年收录的论文进行学者科研合作的归纳分析。研究结果表明: 2013—2022 年聚羟基烷酸酯研究的科研合作紧密度较小, 全球范围的合作较为松散, 合作关系存在明显的个人、机构和地缘指向特征, 合作关系表现出“强强合作”的特征, 并且合作机构以高校为主, 其中实力雄厚的研究机构发文量相对也较高; 发文量最多的国家依次是中国、印度、美国、意大利和西班牙, 其中美国的发文量虽高, 但研究者人数较少, 成果基本集中于部分高产研究者。今后, 研究者不仅要注重地区之间的合作, 还应注意学科之间的合作, 跨地域、跨学科可以增加研究驱动力。

**关键词:** 科研合作网络; 聚羟基烷酸酯; CiteSpace; 可视化分析

**中图分类号:** TB324; G353.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1674-7100(2024)02-0031-08

**引文格式:** 杨 雪, 魏风军. 基于 CiteSpace 的聚羟基烷酸酯研究科研合作网络可视化分析 [J]. 包装学报, 2024, 16(2): 31-38.

随着知识经济时代的不断发展, 科学研究领域的复杂性和不确定性日益增加, 科研合作正逐渐成为学者开展科研活动的重要途径<sup>[1-2]</sup>。广义的科研合作网络涵盖了多元化的研究实体, 包括研究者、研究机构、研究国家 (地区) 以及不同学科等。它是由实体通过科研合作构建而成的错综复杂关系网络, 不仅能全面地展现不同研究实体之间错综复杂的合作关系, 而且还能深刻地反映跨学科、跨机构以及跨国界的科研合作发展趋势<sup>[3-4]</sup>。狭义的科研合作网络则特指研究者之间的合作关系网络, 即合著网络。在这个层面上,

科研合作网络揭示了学者们如何通过建立直接或间接的联系进行信息共享、知识传播以及合作研究以共同应对科研挑战<sup>[5]</sup>。对科研合作网络的研究不仅有助于我们了解科学研究的动态和发展趋势, 也为我们提供了一个独特的视角来观察和解析科学研究中的合作模式、合作行为以及合作效果。

聚羟基烷酸酯 (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, 由羟基取代了脂肪酸链上的部分羧基而形成, 是一种天然的高分子生物材料<sup>[6-7]</sup>。在包装领域,

**收稿日期:** 2023-10-26

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (51675162); 2019 年度河南科技大学校级精品在线开放课程项目 (025)

**作者简介:** 杨 雪 (2001-), 女, 河南许昌人, 河南科技大学硕士生, 主要研究方向为可降解材料的制备及其性能研究, E-mail: 18937496390@163.com

**作者简介:** 魏风军 (1978-), 男, 河南南阳人, 河南科技大学副教授, 主要从事高性能树脂摩擦材料、高分子纳米复合材料、可降解材料的制备及其性能研究, E-mail: wfj@haust.edu.cn

PHA 作为可生物降解的新型功能材料, 广泛应用于一次性餐具、食品包装和工业产品包装<sup>[8]</sup>; 在医疗领域, PHA 用于制造医疗植入物、手术缝合线、药物载体等; 在农业领域, PHA 因良好的遮光性和耐候性, 用于制造农用大棚的遮光膜。随着绿色环保发展理念和可持续发展理念的增强、国家“双碳”目标和产品生命周期评价 (life cycle assessment, LCA) 理论的推出, 利用生物降解塑料替代传统塑料产品获得了广泛的关注和研究<sup>[9-10]</sup>。基于此, 本研究从广义的科研合作网络角度出发, 对 2013—2022 年全球 PHA 科研合作网络进行全面的剖析与探讨, 分析该领域研究实体之间的复杂合作关系以及跨学科、跨机构和跨国界的科研合作趋势, 以期丰富研究者视野, 促进知识交流和学术合作, 为未来的科研合作和创新提供启示和指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据来源

选择 Web of Science 核心合集数据库, 设置主题检索, 检索格式为: Topic=“polyhydroxyalkanoate”, 数据检索时间跨度为 2013 年 1 月 1 日—2022 年 12 月 31 日, 去除硕士论文、会议、科技成果以及相关度

较低的文献后共有 2731 篇论文作为数据源。

### 1.2 研究工具

自 2009 年以来, 随着信息科技的快速发展, 越来越多的学者开始使用信息可视化软件 CiteSpace 进行数据挖掘, 绘制作者、研究机构、国家 (地区) 之间的合作网络, 深入剖析各研究领域的演化路径和发展趋势<sup>[11]</sup>。本研究借助 CiteSpace 强大的数据分析和可视化功能对大量文献数据进行深入挖掘, 以直观的图表形式——科学知识图谱<sup>[12]</sup>呈现全球 PHA 研究领域的科研合作网络, 更加准确地把握 PHA 领域的研究动态、发展趋势和合作模式, 为进一步深入研究提供有价值的参考。

### 1.3 研究方法

将所选文献数据导入 CiteSpace 软件, 并根据项目设置相关参数 (详见表 1), 以便对作者、研究机构以及国家 (地区) 的合作情况进行分析。在生成的图谱中, 每个节点代表一位作者或一个研究机构、国家 (地区), 节点的大小表示发文量的多少。节点越大, 代表发文量越多; 节点之间的连线数量越多, 代表节点之间的联系越紧密<sup>[13]</sup>。通过观察和分析图谱, 可以进一步揭示隐藏在数据背后的规律, 深入探究各研究领域的热点和前沿问题。

表 1 CiteSpace 软件主要参数设置  
Table 1 CiteSpace software main parameter settings

时间	分区 / 年	术语来源	节点类型	频次最高数量	网络修剪方法
2013—2022 年	1	Title、Abstract、DA、ID	Author	Top50	MST
2013—2022 年	1	Title、Abstract、DA、ID	Institution、Country	Top50	MST

## 2 结果与分析

### 2.1 核心文献分析

从两个方面对文献质量进行评价: 一是期刊影响力, 二是文献的被引频次。本文主要针对第二个方面进行分析。根据统计分析, 国际核心期刊和非核心期刊所刊载论文的平均被引频次之比为 9:1, 因此从某种程度来讲, 文献的质量和被引频次有着直接的关系, 即文献的被引频次越高, 则该文献质量越高、学术影响力越大<sup>[14]</sup>。在此, 本文分析 2013—2022 年的高被引文献合著状况, 被引频次达 60 次以上的文献统计结果如图 1 和表 2 所示。

由图 1 和表 2 可知: 高被引文献多为综述类文章, 总结 PHA 研究领域的研究进展、梳理已有的研

究成果、提出问题和展望未来的研究方向。其中, C. Kourmentza 等<sup>[15]</sup>总结了纯微生物培养技术和混合

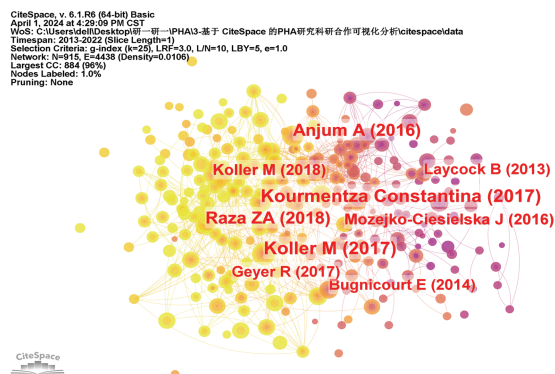


图 1 2013—2022 年高被引文献分布情况  
Fig. 1 Distribution of highly cited literature in 2013—2022

菌群合成 PHA 方法, 得出如何降低生产成本是 PHA 在生物医学、组织工程、药物传递、农业和包装等领域的应用中所面临的巨大挑战; M. Koller 等<sup>[16]</sup>致力于 PHA 生产的可持续性, 列举高效菌群、环境友好的 PHA 回收方法以及 PHA 生产过程中废物流再利用措施; Z. A. Raza 等<sup>[17]</sup>概述了 PHA 的生产和特性、PHA 生产的发展, 以及 PHA 在组织工程、药物输送、

外科手术和伤口敷料等领域的应用; A. Anjum 等<sup>[18]</sup>指出由微生物利用可再生资源作为胞内碳源和储能化合物合成的 PHA, 具有良好的生物降解性和生物相容性, 作为石油基塑料的重要替代品在工业生产中被广泛用作包装材料, 如最初由英国帝国化学工业公司生产的聚 3- 羟基丁酸-co-3- 羟基戊酸被用于制作一次性杯子、一次性剃须刀、医疗胶带等。

表 2 2013—2022 年高被引文献

Table 2 Highly cited literatures in 2013—2022

文献题名	期刊名称	作者	年份	被引频次
“Recent Advances and Challenges towards Sustainable Polyhydroxyalkanoate (PHA) Production”	<i>Bioengineering</i>	C. Kourmentza 等	2017	141
“Producing Microbial Polyhydroxyalkanoate (PHA) Biopolyesters in a Sustainable Manner”	<i>New Biotechnol</i>	M. Koller 等	2017	138
“Polyhydroxyalkanoates: Characteristics, Production, Recent Developments and Applications”	<i>International Biodeterioration &amp; Biodegradation</i>	Z. A. Raza 等	2018	111
“Microbial Production of Polyhydroxyalkanoates (PHAs) and Its Copolymers: A Review of Recent Advancements”	<i>International Journal of Biological Macromolecules</i>	A. Anjum 等	2016	104
“Biodegradable and Biocompatible Polyhydroxy-Alkanoates (PHA): Auspicious Microbial Macromolecules for Pharmaceutical and Therapeutic Applications”	<i>Molecules</i>	M. Koller 等	2018	66
“Bacterial Polyhydroxyalkanoates: Still Fabulous?”	<i>Microbiological Research</i>	J. Mozejko-Ciesielska 等	2016	64
“Polyhydroxyalkanoate (PHA): Review of Synthesis, Characteristics, Processing and Potential Applications in Packaging”	<i>Express Polymer Letters</i>	E. Bugnicourt 等	2014	61
“Production, Use, and Fate of All Plastics Ever Made”	<i>Science Advances</i>	R. Geyer 等	2017	61
“The Chemomechanical Properties of Microbial Polyhydroxyalkanoates”	<i>Progress in Polymer Science</i>	B. Laycock 等	2013	60

## 2.2 网络密度分析

网络密度是衡量网络中节点间联系紧密程度的重要指标。网络密度大于 0.5, 表明网络中的节点联系紧密, 节点间的沟通频繁<sup>[19]</sup>。高密度的网络结构有助于资源的传播和知识的共享, 同时也能促进网络中各节点的相互交流与合作。作者、研究机构/国家(地区)科研合作网络图谱分别如图 2、图 3 所示。

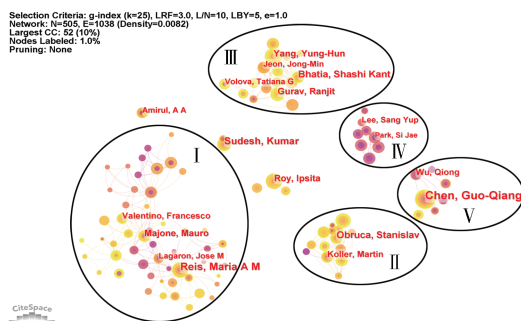


图 2 作者科研合作网络图谱

Fig. 2 Mapping of author research collaboration network

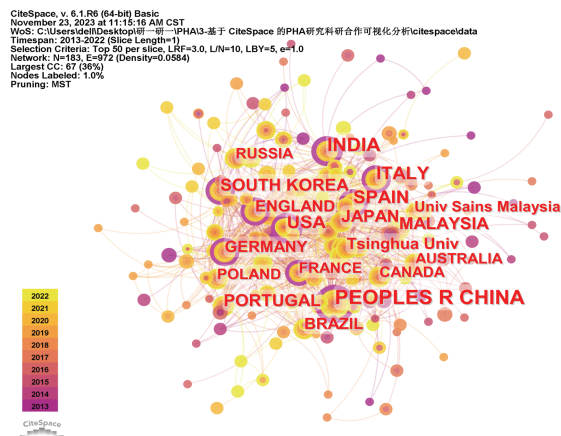


图 3 研究机构/国家(地区)科研合作网络图谱

Fig. 3 Mapping of institution/country (region) research cooperation networks

由图 2~3 可知, 以“作者”为节点的网络密度为 0.0082, 以“研究机构+国家(地区)”为节点的网络密度为 0.0584。这表明 2013—2022 年期间, 作者

之间的科研合作相对松散,科研合作的连通性较弱;而研究机构/国家(地区)之间的科研合作相对紧密,科研合作的连通性较强。意味着在所选时间段内,作者间的科研资源共享的程度尚不够高,有待进一步加强;而研究机构/国家(地区)之间科研资源共享的程度较高,已经形成了较强的合作关系。这揭示了此时期内作者间科研合作的局限性和研究机构/国家(地区)之间科研合作的深度和广度,以及在科研合作中进一步加强节点间联系和提高资源共享程度的潜在需求。

### 2.3 中介中心性分析

在科研合作网络分析中,中介中心性是用于衡量节点在科研合作中重要性的指标<sup>[20]</sup>。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。中介中心性的计算公式是

$$BC_i = \sum_{s \neq i \neq t} \frac{n_{st}^i}{g_{st}}, \quad (1)$$

式中:  $g_{st}$  为节点  $s$  到节点  $t$  的最短路径数目;  $n_{st}^i$  为从节点  $s$  到节点  $t$  的  $g_{st}$  条最短路径中经过节点  $i$  的最短路径数目<sup>[21]</sup>。

作者、科研机构/国家(地区)的中介中心性排名前 5 结果如表 3 所示(中介中心性为 0 的作者按发文量排名)。排名前 5 的作者分别是 M. A. M. Reis、Yang Y. H.、Chen G. Q.、K. Sudesh、S. K. Bhatia; 排名前 5 的研究机构/国家(地区)分别是美国、中国、印度、英国和德国(见表 3)。一般认为,中介中心性超过 0.1 的节点具有较强影响力。从统计结果可知,单个作者与其他机构作者间合作连通性较弱,而不同研究机构/国家(地区)间的跨单位合作较为普遍。

表 3 作者、科研机构/国家(地区)中介中心性  
Table 3 The centrality of author and institution/country(region)

排名	作者	中介中心性	排名	机构/国家(地区)	中介中心性
1	M. A. M. Reis	0.01	1	USA (美国)	0.32
2	Yang Y. H.	0.01	2	China (中国)	0.28
3	Chen G. Q.	0	3	India (印度)	0.22
4	K. Sudesh	0	4	England (英国)	0.18
5	S. K. Bhatia	0	5	Germany (德国)	0.18

### 2.4 突现分析

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。2013—2022 年不同作者与研究机构在 PHA 研究方面的突变值和研究内容(见表 4),反映了这些作者在 PHA 研究领域的活跃度和研究方向的变化。

表 4 研究者突现值一览表  
Table 4 List of citation bursts value of the researcher

作者	研究机构	突现强度	突现时间/年	主要研究内容
Park S. J.	韩国科学技术院	3.02	2013	纳米材料、能源材料和生物医学材料等
Oh Y. H.	特拉华大学	2.94	2013	在代谢工程大肠杆菌中使用丁酰辅酶 A 转移酶生物合成含 2- 羟基酸的聚羟基链烷酸酯
S. Bruzaud	南布列塔尼大学	2.69	2013	金属和复合材料的开发与应用、材料的微结构和性能的关系,以及材料在环境和能源领域的应用
I. Roy	谢菲尔德大学	4.80	2017	细菌来源的天然聚合物及其在医疗和环保中的应用,尤其是 PHA 在硬组织工程、软组织工程、伤口愈合、药物输送和医疗器械开发领域的应用
S. Torres-Giner	瓦伦西亚理工大学	3.83	2018	开发可持续聚合物技术,以在循环经济的框架内进行食品保鲜
I. Pernicova	布尔诺工业大学	3.83	2018	嗜盐菌和嗜热菌合成聚羟基链烷酸酯
P. Basnett	威斯敏斯特大学	3.54	2018	使用可再生材料生产细菌衍生的聚合物,增强细菌衍生聚合物的性能复合材料和共混物的成型,细菌衍生聚合物的医疗应用



## 2.5 作者合作网络分析

为了直观地呈现主要研究者群体及其互动关系,抽取发文量前 50 的作者绘制合作网络图谱(见图 2),得到 753 个节点,1878 条连线,5 个主要研究者群体。其中以 M. A. M. Reis、M. Majone、F. Valentino 等为中心形成合作网络结构 I,研究内容以使用混合微生物培养物进行废水处理和资源回收为主<sup>[22-24]</sup>,这一子网络涉及来自葡萄牙、意大利、西班牙、美国等国家的 60 余位研究人员,是最大的一个网络结构;以 M. Koller、S. Obruca 等为中心的合作网络结构 II,主要研究内容为将生物技术转化为聚羟基链烷酸酯和其他高价值产品来使食品工业、农业和其他行业的废物流增值等<sup>[25-27]</sup>;以 Yang Y. H.、S. K. Bhatia、R. Gurav、Jeon J. M. 等为中心的子网络结构 III,主要研究内容为利用微生物进行生物聚合物、抗生素、生物能源、次生代谢物和酶生产等<sup>[28-29]</sup>;以 Lee S. Y.、Park S. J. 等为中心的子网络结构 IV,此网络中研究者大多来自韩国,研究内容主要为代谢工程、蛋白质工程、生物高分子材料等,例如在大肠杆菌中使用丁酰辅酶 A 转移酶生物合成含 2- 羟基酸的聚羟基链烷酸酯<sup>[30-31]</sup>;以 Chen G. Q. 为中心形成子网络结构 V,学者 Chen G. Q. 全球发文量最高,他是清华大学生命科学学院的博士生导师,长期从事生物合成 PHA 材料及其下一代工业生物技术研究<sup>[32-34]</sup>,在 PHA 研究领域拥有卓越的学术地位,不仅为该领域的发展作出了重要贡献,还对其他学者的研究发挥着主导和推动作用。综上所述,PHA 研究已逐渐形成相对稳定的合作团队。在未来的研究中,应在现有的合作基础上不断深化和拓展研究内容,尝试在不同研究方向上建立新的合作关系。通过加强跨学科、跨机构和跨国界的合作,进一步推动 PHA 领域的发展,促进知识交流和学术合作,为未来的科研合作和创新提供更多的启示和指导。

## 2.6 研究机构 / 国家 (地区) 合作网络分析

选取发文量前 50 的研究机构以及国家 (地区) 绘制合作网络图谱 (见图 3),得到 183 个节点,972 条连线。在网络图谱中,研究机构与国家 (地区) 之间的科研合作具有明显的地理特征和明显的交叉合作,如以美国为中心节点的网络合作机构、国家 (地区) 多达 70 余个;其次机构之间的科研合作具有较强的学科性,合作机构以设有材料科学与工程、生物工艺学与生物技术、环境工程与能源、高分子化学等

院系或研究所的高等院校为主力军,如全球 PHA 研究拔尖的院系:清华大学生命科学学院、罗马大学化学系、昆士兰大学化学工程学院、韩国建国大学工学院等。

2013—2022 年,发文量大于 100 篇的国家 (地区) 产出的文献量占总产出的 80%,详见表 5。从地理位置来看,中国、印度、美国、意大利、西班牙等全球 PHA 研究活跃国家 (地区) 的发文量充分体现了他们对 PHA 研究的重要贡献。中国在 PHA 研究领域的发文量领先于其他国家 (地区),凸显了中国在 PHA 研究领域的科研优势。紧随其后的是印度,其发文量呈现出逐年递增的趋势,表明印度的 PHA 研究在国际上的活跃度逐渐提升,并逐渐成为国际上此项研究的重要支柱之一。

表 5 发文量大于 100 篇的国家 (地区)  
Table 5 Countries (regions) with more than 100 publications

国家 (地区)	发文量 / 篇	国家 (地区)	发文量 / 篇
中国	443	日本	133
印度	250	葡萄牙	133
美国	225	马来西亚	131
意大利	214	英国	124
西班牙	212	德国	115
韩国	161	巴西	108

## 3 结论与展望

近 10 年来,PHA 研究取得显著成果,在包装、医疗、农业等领域应用广泛。PHA 作为一种新型功能材料,由于其生物降解性和生物相容性优良,在包装领域展现出巨大潜力。本文利用 CiteSpace 软件对近 10 年全球 PHA 研究领域的文献数据进行科研合作网络可视化分析,结果显示:第一,在 2013—2022 年全球 PHA 研究的科研合作中,整体合作氛围较为松散,而内部合作关系相对较为紧密。这表明在该领域中,许多研究者更倾向于独立研究。从作者合作图谱来看,合作图谱呈现出多核心的网络结构,网络内部包含数量不等的子网络群。此外,研究机构 / 国家 (地区) 网络内部之间具有很强的相关性,即只要经过个别中间节点 (研究机构或国家 (地区)) 就可以建立合作关系。第二,PHA 科研合作具有明显的地域特征,表现为同一合作网络中的研究人员大多

来自同一研究机构或毕业于同一所学校。这种地域性合作模式有助于深化对某一地区的研究深度,但也可能限制了研究的横向拓展。这种局限性可能与研究资源分布、地理距离以及合作网络中的文化因素有关。第三,在合作机构方面,高校在该领域占据主导地位,并呈现出明显的“强强合作”特征,发文量较高的研究机构均具备较雄厚的研究实力。这种合作模式有助于推动 PHA 研究的进步和创新,但也可能阻碍其他具有特色的研究机构的发展。主导地位的形成可能与高校在科学研究、人才培养和资源整合等方面的优势有关。第四,从发文量的角度来看,中国、印度、美国、意大利和西班牙在全球 PHA 领域处于领先地位。尽管美国的研究者数量不及亚洲和欧洲,但其发文量却位居前列。这一现象表明美国在 PHA 领域拥有较多的高产研究者,这也进一步突显了美国在 PHA 领域的研究优势和重要贡献,这种领先地位可能源于美国在科学研究、技术创新和国际合作等方面的优势。

为了进一步提升 PHA 研究的水平和影响力,建议在今后的研究中采取以下措施:第一,应继续关注并加强跨地域、跨地区的科研合作。通过建立国际合作网络、共同开展研究项目等方式促进不同地区、不同文化背景的科研机构之间的合作,从而更深入地拓展 PHA 的特性和应用前景。第二,应注重跨学科之间的交流和合作。PHA 研究涉及到化学、生物学、材料科学等多个领域,通过学术会议、研讨会等方式促进不同学科之间的交流和合作,产生更多的创新思维和研究成果,才能更好地推动 PHA 领域进步和发展。第三,针对以个人、机构为主的节点,在地缘关系较强的情况下,应进一步加强区域科研合作,整合地区资源,发挥地区优势,提高研究效率。

科研合作对 PHA 的研究与应用至关重要,有助于在作者、研究机构、国家(地区)间实现资源共享、技术交流和成果转化。随着技术进步和应用领域的拓展,PHA 研究领域将更加注重合成新材料的探索、性能的提高和生产成本的降低。未来 PHA 有望在包装、医疗、能源、环保等领域发挥更加重要的作用,为解决全球环境问题和推动可持续发展做出积极的贡献。

#### 参考文献:

[1] 孙华俊. 科研诚信治理体系构建: 基于合作治理视角

[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.

SUN Huajun. The Construction of Governance System in Academic Research? Integrity[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.

[2] 王占军, 潘梦君. 大学教师科研合作中的知识共享: 制约因素与机制改善[J]. 江汉大学学报(社会科学版), 2019, 36(3): 115-124, 128. in University.

WANG Zhanjun, PAN Mengjun. Knowledge Sharing in University Teachers' Research Collaboration: Restraining Factors and Improvement of Mechanism[J]. Journal of Jiangnan University (Social Science Edition), 2019, 36(3): 115-124, 128.

[3] 白碧玉. 糖尿病研究论文合作及热点分析[D]. 太原: 山西医科大学, 2018.

BAI Biyu. The Cooperation and the Hot Spots Analysis Based on Diabetes Mellitus Research Papers[D]. Taiyuan: Shanxi Medical University, 2018.

[4] 蒋倩雯. 基于社会网络分析的我国区域科研合作模式及其演化规律研究[D]. 蚌埠: 安徽财经大学, 2020.

JIANG Qianwen. Research on China's Regional Scientific Research Cooperation Mode and Its Evolution Law Based on Social Network Analysis[D]. Bangbu: Anhui University of Finance & Economics, 2020.

[5] 曾粤亮. 跨学科科研合作行为影响因素研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2019.

ZENG Yueliang. Research on Influencing Factors of Interdisciplinary Scientific Research Cooperation Behavior[D]. Wuhan: Wuhan University, 2019.

[6] 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(增刊2): 77-81.

LU Jiamin. Research Progress of Green Degradable Food Preservation Materials[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(S2): 77-81.

[7] 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 Chengrong, ZHANG Mengjun, ZHENG Weishuang, et al. Advances in Extraction Processes of Biodegradable Biomaterials PHA[J]. China Biotechnology, 2023, 43(11): 105-115.

[8] 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 Bobo, HUANG Chongxing, GUO Wei, et al. Research Progress on Poly(3-Hydroxybutyrate-co-3-Hydroxyvalerate) Modifications[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(7): 66-75.

[9] 戴宏民, 戴佩华, 戴佩燕. 生物降解塑料在国内外的

- 研究进展及发展趋势[J]. 包装学报, 2023, 15(5): 61-68.
- DAI Hongmin, DAI Peihua, DAI Peiyan. Research Progress and Development Trend of Biodegradable Plastics at Home and Abroad[J]. Packaging Journal, 2023, 15(5): 61-68.
- [10] 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.
- [11] PERIANES-RODR GUEZ A, WALTMAN L, VAN ECK N J. Constructing Bibliometric Networks: A Comparison Between Full and Fractional Counting[J]. Journal of Informetrics, 2016, 10(4): 1178-1195.
- [12] 陈 悦, 陈超美, 胡志刚. 引文空间分析原理与应用 (CiteSpace 实用指南) [M]. 北京: 科学出版社, 2014: 12.
- CHEN Yue, CHEN Chaomei, HU Zhigang. Principles and Applications of Cite Space Analysis (CiteSpace Practical Guide)[M]. Beijing: Science Press, 2014: 12.
- [13] 谭林芳, 张航宇, 郭忠录, 等. 基于文献计量学分析的东北黑土地土壤侵蚀研究态势及热点[J]. 土壤与作物, 2023, 12(1): 96-108.
- TAN Linfang, ZHANG Hangyu, GUO Zhonglu, et al. Trends and Hotspots of Soil Erosion Research in Black Soil Land of Northeast China Based on Bibliometric Analysis[J]. Soils and Crops, 2023, 12(1): 96-108.
- [14] 魏风军, 刘 浩. 科学知识图谱视角下国际绿色包装科研中的合作性分析[J]. 包装学报, 2017, 9(3): 1-8.
- WEI Fengjun, LIU Hao. Analysis on Cooperation in International Green Packaging Scientific Research from the Perspective of Scientific Knowledge Map[J]. Packaging Journal, 2017, 9(3): 1-8.
- [15] KOURMENTZA C, PLÁCIDO J, VENETSANEAS N, et al. Recent Advances and Challenges Towards Sustainable Polyhydroxyalkanoate (PHA) Production[J]. Bioengineering, 2017, 4(2): 55.
- [16] KOLLER M, MARŠÁLEK L, DE SOUSA DIAS M M, et al. Producing Microbial Polyhydroxyalkanoate (PHA) Biopolyesters in a Sustainable Manner[J]. New Biotechnology, 2017, 37: 24-38.
- [17] RAZA Z A, ABID S, BANAT I. Polyhydroxyalkanoates: Characteristics, Production, Recent Developments and Applications[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2018, 126: 45-56.
- [18] ANJUM A, ZUBER M, ZIA K M, et al. Microbial Production of Polyhydroxyalkanoates (PHAs) and Its Copolymers: A Review of Recent Advancements[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 89: 161-174.
- [19] 苗 红, 耿一睿. 全球领域旅游学科科研合作网络可视化分析[J]. 开发研究, 2019(1): 124-131.
- MIAO Hong, GENG Yirui. Visualization Analysis of Scientific Research Cooperation Network of Tourism Discipline in Global Field[J]. Research on Development, 2019(1): 124-131.
- [20] 耿一睿, 苗 红, 贾 菲, 等. 基于 CiteSpace 的旅游研究科研合作网络可视化分析[J]. 旅游研究, 2019, 11(5): 14-24.
- GENG Yirui, MIAO Hong, JIA Fei, et al. The Visualized Analysis on the Research Cooperation Network of Tourism Research Based on CiteSpace[J]. Tourism Research, 2019, 11(5): 14-24.
- [21] 韩淑运. 基于节点重要性与路径异构性的链路预测算法研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2021.
- HAN Shuyun. Research on Link Prediction Algorithm Based on Node Importance and Path Heterogeneity[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2021.
- [22] CASTRO-MAYORGA J L, FREITAS F, REIS M A M, et al. Biosynthesis of Silver Nanoparticles and Polyhydroxybutyrate Nanocomposites of Interest in Antimicrobial Applications[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 108: 426-435.
- [23] FRADINHO J C, OEHMEN A, REIS M A M. Improving Polyhydroxyalkanoates Production in Phototrophic Mixed Cultures by Optimizing Accumulator Reactor Operating Conditions[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 126: 1085-1092.
- [24] VALENTINO F, MORGAN-SAGASTUME F, CAMPANARI S, et al. Carbon Recovery from Wastewater through Bioconversion into Biodegradable Polymers[J]. New Biotechnology, 2017, 37: 9-23.
- [25] KOLLER M, MUHR A. Continuous Production Mode as a Viable Process-Engineering Tool for Efficient Poly(hydroxyalkanoate) (PHA) Bio-Production[J]. Chemical and Biochemical Engineering Quarterly, 2014, 28: 65-77.
- [26] KOLLER M. Biodegradable and Biocompatible Polyhydroxy-Alkanoates (PHA): Auspicious Microbial Macromolecules for Pharmaceutical and Therapeutic Applications[J]. Molecules, 2018, 23(2): 362.
- [27] OBRUCA S, SEDLACEK P, KOLLER M, et al. Involvement of Polyhydroxyalkanoates in Stress Resistance of Microbial Cells: Biotechnological Consequences and Applications[J]. Biotechnology Advances, 2018, 36(3): 856-870.

- [28] BHATIA S K, OTARI S V, JEON J M, et al. Biowaste-to-Bioplastic (Polyhydroxyalkanoates): Conversion Technologies, Strategies, Challenges, and Perspective[J]. *Bioresource Technology*, 2021, 326: 124733.
- [29] BHATIA S K. Microbial Biopolymers: Trends in Synthesis, Modification, and Applications[J]. *Polymers*, 2023, 15(6): 1364.
- [30] OH Y H, EOM I Y, JOO J C, et al. Recent Advances in Development of Biomass Pretreatment Technologies Used in Biorefinery for the Production of Bio-Based Fuels, Chemicals and Polymers[J]. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2015, 32(10): 1945–1959.
- [31] PARK S J, KIM E Y, NOH W, et al. Metabolic Engineering of *Escherichia Coli* for the Production of 5-Aminovalerate and Glutarate as C5 Platform Chemicals[J]. *Metabolic Engineering*, 2013, 16: 42–47.
- [32] CHEN G Q. A Microbial Polyhydroxyalkanoates (PHA) Based Bio- and Materials Industry[J]. *Chemical Society Reviews*, 2009, 38(8): 2434–2446.
- [33] TAN D, WANG Y, TONG Y, et al. Grand Challenges for Industrializing Polyhydroxyalkanoates (PHAs)[J]. *Trends in Biotechnology*, 2021, 39(9): 953–963.
- [34] 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 Xinyu, LI Mengyi, CHEN Guoqiang. Thirty Years of Metabolic Engineering for Biosynthesis of Polyhydroxyalkanoates[J]. *Chinese Journal of Biotechnology*, 2021, 37(5): 1794–1811.

(责任编辑: 邓 彬)

## Visualization and Analysis of Polyhydroxyalkanoate Research Scientific Collaboration Network Based on CiteSpace

YANG Xue, WEI Fengjun

(Department of Packaging Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang Henan 471023, China)

**Abstract:** In order to study the scientific research intensity, spatiotemporal characteristics and future trends of global polyhydroxyalkanoate (PHA) research, based on the bibliometric visual analysis software CiteSpace, the Web of Science (WoS) database was used as the data source to summarize and analyze the research cooperation of scholars from 2013 to 2022. The results show that from 2013 to 2022, the degree of scientific research cooperation of polyhydroxyalkanoate research is relatively low, the global cooperation is relatively loose, and the cooperative relationship has obvious individual, institutional and geographical orientation, while the cooperative relationship shows the characteristics of “cooperation between powerful institutions”, and the cooperative institutions are mainly universities, among which the number of strong research institutions is relatively high. The countries with the largest number of publications are China, India, the United States, Italy and Spain. Although the number of publications in the United States is high, the number of researchers is small, and the results are basically concentrated in some high-yield researchers. In the future, researchers should not only pay attention to inter-regional cooperation, but also pay attention to interdisciplinary cooperation, which can increase the driving force of research across regions and disciplines.

**Keywords:** research collaboration network; polyhydroxyalkanoate (PHA); CiteSpace; visualized analysis