

引用格式:孙雪,金琰,蔡凡凡,等.生物可降解塑料研究进展与前沿的 CiteSpace 分析[J].北京化工大学学报(自然科学版),2023,50(1):1-10.

SUN Xue, JIN Yan, CAI FanFan, et al. A study based on CiteSpace of research advances and frontiers for biodegradable plastics[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science), 2023, 50(1): 1-10.

# 生物可降解塑料研究进展与前沿的 CiteSpace 分析

孙 雪 金 琰 蔡凡凡 刘广青 陈 畅\*

(北京化工大学 化学工程学院, 北京 100029)

**摘 要:**生物可降解塑料具有良好的生物降解性,应用前景广阔,已成为当今的研究热点。生物可降解塑料种类繁多,研究领域横跨材料科学、生物工程、化学工程等多个学科,研究内容丰富、方法多样。为准确把握该领域的研究热点、趋势和未来发展动向,利用 CiteSpace 文献计量软件对 Web of Science 核心数据库中 2001—2021 年收录的 4 316 篇关于生物可降解塑料的文献进行了可视化分析,系统梳理了不同时间节点该领域的研究发展历程、研究热点、文献发表的主要期刊及国内外合作网络,并对未来的发展前景以及重点研究领域进行了展望。本文结果可为相关领域的科研人员分析现有研究成果、把握研究趋势、挖掘研究新方向提供参考和借鉴。

**关键词:**CiteSpace; Web of Science (WoS); 生物可降解塑料; 可视化图谱

**中图分类号:**X783 **DOI:** 10.13543/j.bhxbzr.2023.01.001

## 引 言

塑料具有质轻、坚固、耐用和耐腐的特点,已经成为人们生活中的必需品<sup>[1]</sup>。然而随意丢弃的传统塑料垃圾不仅会造成严重的环境污染<sup>[2]</sup>,而且分解后的微塑料颗粒对人类健康也具有潜在危害<sup>[3]</sup>。生物可降解塑料是一种新型的塑料材料,可在特定条件下通过生物代谢转化为水、二氧化碳和甲烷等小分子物质<sup>[4]</sup>。近年来,我国的环境治理力度和人们的环保意识不断增强,合成、开发和加工生物可降解塑料制品已成为当今的科研热点之一。在过去的 20 年间,生物可降解塑料领域蓬勃发展,涌现出大量的科研论文成果,但目前鲜有从科学计量分析的角度来探讨整个生物可降解塑料领域的发展。为了从众多文献中把握当前的研究重点,确定发展趋势和研究动态,需运用科学的分析方法对文献进行系统和深入的分析,获得所研究领域的宏观概况。

科学计量分析是通过分析先前的研究活动追踪

演变过程,了解知识结构,以及预测各个科学领域新兴趋势的一种手段<sup>[5]</sup>,其结果有助于研究人员评估领域热点和未来发展方向<sup>[6]</sup>。CiteSpace 是目前较为流行的文献可视化分析软件,它从时间片段提取数据中的信息,以共现网络的形式展示出时间、频率以及中心度,已被广泛应用在医学、环境、计算机科学等各领域的文献分析过程中<sup>[7-9]</sup>。本文采用 CiteSpace 软件,根据 Web of Science 核心数据库中生物可降解塑料相关文献里的数据绘制出知识图谱,系统梳理该领域的研究内容演变、研究热点、主要发表期刊及国内外合作网络。对生物可降解塑料领域的系统梳理,旨在揭示该领域的发展历程、研究热点和前沿,以期为未来的科研工作和思路创新提供借鉴,为相关研究人员提供有价值的参考。

## 1 数据来源与研究方法

### 1.1 数据来源

Web of Science (WoS)是目前世界上最全面、最权威的科技文献数据库,也是文献计量学调查中数据收集的文献索引工具。本文选取了 WoS 数据库中的科学引文索引扩展 (SCI-Expanded) 和科学技术会议录索引 (Conference Proceedings Citation Index-Science, CPCI-S) 部分,数据于 2021 年 12 月 19 日从北京化工大学在线图书馆获取,数据时间范围

收稿日期:2022-03-24

基金项目:国家重点研发计划(2018YFD0800103)

第一作者:女,1998 年生,硕士生

\* 通信联系人

E-mail: chenchang@buct.edu.cn

为 2001. 01. 01—2021. 12. 19。将以“biodegradable plastics”为研究主题的文献设为检索项目,设置文献发表年份为 2001—2021 年,并以研究论文(Article)和综述论文(Review)作为文献类型进行精炼,共获取文献 4 316 篇。所得结果以“全纪录与引用的参考文献”为记录内容,以纯文本格式导出并下载保存。

## 1.2 研究方法

CiteSpace 软件是一款应用广泛的科学文献分析软件,它能够通过可视化的方式展示出某领域的主要研究方向、热点和前沿,由其分析得到的可视化图形被称为科学知识图谱<sup>[10]</sup>。利用 CiteSpace 软件,能够对某领域的作者、机构、国家/地区的合作以及研究热点和趋势等进行分析。本文使用 CiteSpace 5.8. R2 软件,将 4 316 篇文章的完整记录以及从 WoS 数据库以纯文本格式导出的引用文献作为研究的基础数据,分析项目主要包括生物可降解塑料领域研究内容的发展变化、研究热点与前沿、发文期刊、发文国家和机构的合作关系。

## 2 研究内容演变

发文数量和发文时间是衡量一个研究领域是否受到关注的指标之一,通常发文量越多,代表该领域的热度越高,研究越活跃<sup>[11]</sup>。2001—2021 年生物可降解塑料研究领域的历年发文量如图 1 所示。由

图 1 可知,生物可降解塑料领域的发文量整体呈现出逐年增加的趋势。利用软件选取每一年中被引次数最高的前 5% 或出现次数最多的引文,以关键词作为节点类型,构建当年的共被引网络。然后将各年的网络进行组合,绘制出时间共现图谱如图 2 所示,共得到 197 个节点、1 951 条连线。时间共现图谱可以展现各个聚类,图 2 右侧关键词为聚类名称,提示该领域中的研究主题,每个主题对应左侧线条上的关键词位置为每个子领域所研究关键词的时间跨度和研究进程<sup>[12-13]</sup>。依据历年发文量将 2001—2012 年视为稳定增长阶段,2013—2021 年视为快速增长阶段,以下根据关键词时间共现图谱对每阶段的研究内容演变进行分析。

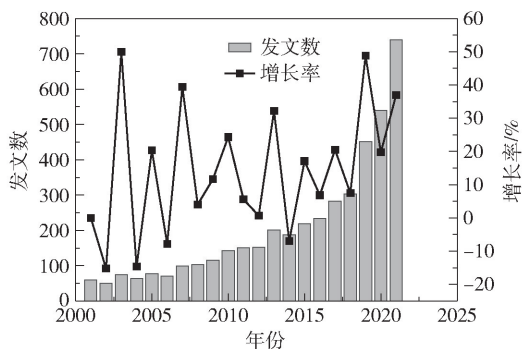


图 1 2001—2021 年生物可降解塑料研究领域发文数

Fig. 1 Number of publications on biodegradable plastics research for the period of 2001—2021

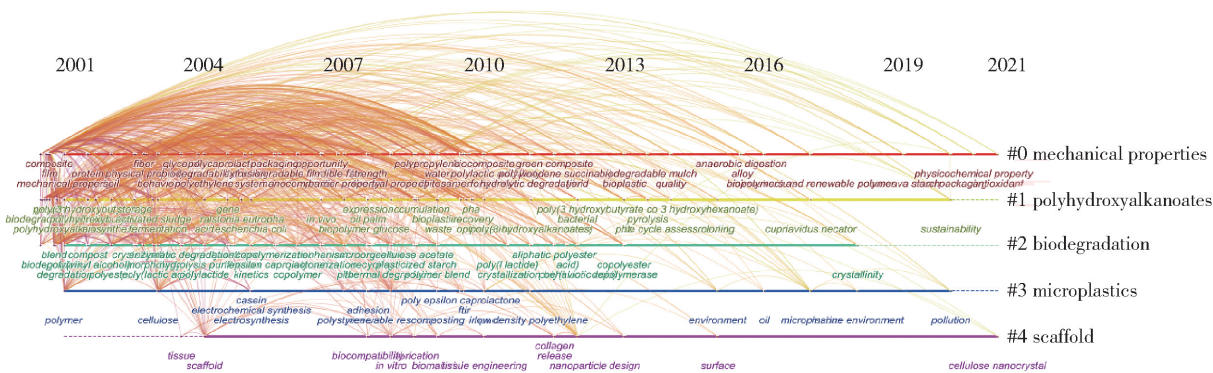


图 2 生物可降解塑料研究关键词时间共现图谱

Fig. 2 Time co-occurrence mapping of keywords in biodegradable plastics research

### 2.1 稳定增长阶段(2001—2012 年)

在稳定增长阶段,2001 年发文量仅为 59 篇,2012 年发文量为 152 篇,发文量的逐年增加,表明生物可降解塑料领域开始受到越来越多学者的关注。由图 2 可知,在该阶段,对于生物可降解塑料的

机械性能、合成方法、复合材料等方面均有研究,研究方向多样。同时结合该阶段被引频次前 10 位的论文(表 1)分析得出,这些高被引论文中大部分是针对聚乳酸(PLA)的研究。Lim 等<sup>[14]</sup>综述了聚乳酸塑料的制备工艺,如挤出、注射成型、拉伸吹塑、铸

造、吹膜、热成型等,以及这些工艺对聚乳酸塑料的结构组成、热性能、结晶行为和流变特性的影响,例如聚乳酸纳米复合材料能够显著提高其力学性能和弯曲性能、热变形温度,增强其阻隔性能和加速生物降解。Madhavan 等<sup>[15]</sup>对聚乳酸的市场应用情况进行分析,总结了聚乳酸的生物合成方法、机械性能、共混和改性方法以及降解性能等方面的研究进展,还列举了合成聚乳酸常用的催化剂。Oksman 等<sup>[18]</sup>

研究了聚乳酸作为天然纤维复合材料基材的可行性,发现聚乳酸/亚麻纤维复合材料的力学强度比目前许多工业应用中所使用的聚丙烯/亚麻纤维复合材料高 50% 左右,说明聚乳酸/亚麻纤维复合材料具有良好的力学性能。这些研究在降低生产成本的同时改进和提升了聚乳酸产品的性能,从而拓宽了产品的应用范围,为深入开展提高其降解性能的研究奠定了基础。

表 1 2001—2012 年生物可降解塑料研究被引频次前 10 位论文  
Table 1 Top ten cited papers on biodegradable plastics from 2001—2012

题名	来源文献	出版年	被引频次
Processing technologies for poly( lactic acid)	[ 14 ]	2008	1 731
An overview of the recent developments in polylactide (PLA) research	[ 15 ]	2010	1 489
Sustainable bio-composites from renewable resources: Opportunities and challenges in the green materials world	[ 16 ]	2002	1 390
Biological degradation of plastics: A comprehensive review	[ 17 ]	2008	1 067
Natural fibres as reinforcement in polylactic acid (PLA) composites	[ 18 ]	2003	1 001
Plastics recycling: challenges and opportunities	[ 19 ]	2009	933
Flexible organic transistors and circuits with extreme bending stability	[ 20 ]	2010	917
Natural-based plasticizers and biopolymer films: A review	[ 21 ]	2011	907
Environmental implications of plastic debris in marine settings-entanglement, ingestion, smothering, hangers-on, hitch-hiking and alien invasions	[ 22 ]	2009	868
Zein: the industrial protein from corn	[ 23 ]	2001	835

此阶段其他高被引论文主要侧重生物可降解塑料的增塑剂、复合材料等方面的研究,对后续开发和大规模量产低成本及性能优异的生物复合材料以替代传统塑料提供了参考。Mohanty 等<sup>[16]</sup>于 2002 年提出未来的挑战是以农业和生物质资源作为复合塑料的原料,生产对环境污染小的可持续和高效节能的产品。Vieira 等<sup>[21]</sup>对近几十年来的增塑剂及其对生物聚合物薄膜的影响进行研究,发现亲水增塑剂能提高生物可降解燕麦淀粉膜的水蒸汽渗透性和吸水性能,但不改变其机械性能。Shukla 等<sup>[23]</sup>提出利用玉米醇溶蛋白可制备两种生物可降解塑料—淀粉—玉米醇溶蛋白复合材料和加入脂肪酸塑化的玉米醇溶蛋白材料。通过分析可知,该阶段研究内容丰富,涉及面较广,研究角度多样,对未来扩大聚乳酸的市场规模具有积极意义。

2.2 快速增长阶段 (2013—2021 年)

在快速增长阶段,年度发文量急剧增长,在

2021 年发文量达到 740 篇,约为 2001 年发文量的 12.5 倍,表明生物可降解塑料领域研究热度很高。这主要是因为随着塑料垃圾污染的日益严重,美国、马来西亚、日本、英国、中国等国家的许多城市出台了限制传统塑料袋使用或对塑料袋征税的法规<sup>[24]</sup>。关键词时间共现图谱中不同关键词之间的连线代表它们曾出现在同一篇文章中,具有一定的关联性。由图 2 可知快速增长阶段的研究都与前期的研究密切相关,两者具有关联性,即先前的研究对后续的研究发展起到指导作用。随着世界各国经济的迅速发展,包装需求也随之飞速增长,塑料包装工业发展迅速<sup>[25]</sup>。结合该阶段被引频次前 10 位的论文(表 2)进行分析,该阶段的研究主要集中于塑料包装方面。

Rhim 等<sup>[27]</sup>研究了生物聚合物基纳米复合材料的制备及其在食品包装领域的应用,结果表明生物基纳米复合材料的阻隔性能可以延长各种新鲜和



表 2 2013—2021 年生物可降解塑料研究被引频次前 10 位论文  
Table 2 Top ten cited papers on biodegradable plastics from 2013—2021

题名	来源文献	出版年	被引频次
Extreme grain refinement by severe plastic deformation: A wealth of challenging science	[26]	2013	1 120
Bio-nanocomposites for food packaging applications	[27]	2013	911
Biobased plastics and bionanocomposites: Current status and future opportunities	[28]	2013	596
Recent advances in lactic acid production by microbial fermentation processes	[29]	2013	502
A review of the production and applications of waste-derived volatile fatty acids	[30]	2014	443
Biodegradable and bio-based polymers: Future prospects of eco-friendly plastics	[31]	2015	409
Polysaccharide-based films and coatings for food packaging: A review	[32]	2017	408
Essential oils as additives in biodegradable films and coatings for active food packaging	[33]	2016	397
Polyhydroxyalkanoate (PHA): Review of synthesis, characteristics, processing, and potential applications in packaging	[34]	2014	390
Starch-based nano-biocomposites	[35]	2013	322

加工食品的保质期,通过选择合适的聚合物基体和纳米颗粒,能够提高生物质基纳米复合材料的生物降解性能。Cazón 等<sup>[32]</sup>综述了近年来食品包装用多糖薄膜和涂层的研究进展,分析显示纤维素、壳聚糖、淀粉、果胶和海藻酸等多糖与其他生物聚合物结合后能改善其阻隔和机械性能,满足食品工业对塑料的性能的要求。Atarés 等<sup>[33]</sup>综述了精油对可食用薄膜和涂层性能的影响,明确了精油的乳化作用会对薄膜的结构、物理和生物特性产生影响。精油通过乳化作用与生物可降解的薄膜和涂层相结合,能够提高薄膜和涂层的抗氧化或抗菌性能,进而延长产品的保质期。Bugnicourt 等<sup>[34]</sup>综述了聚羟基烷酸酯(PHA)的关键性能、加工工艺等,通过对比说明其机械性能强度优于其他生物可降解塑料,同时阻隔性、生物相容性良好等其他优势使其在包装方面具有广阔市场。Xie 等<sup>[35]</sup>综述了不同种类纳米填料对淀粉基塑料的稳定性、耐湿性、氧气阻隔性能的影响,为研发出性能优异的淀粉基纳米复合材料提供了理论基础。该阶段研究重点关注生物可降解塑料的应用、性能的改善等,尤其在塑料包装方面,这对于未来改善白色污染具有重要意义。

3 热点与前沿

3.1 研究热点

关键词可反映出研究主题和文章中的核心内容,关键词共现分析是利用软件对关键词出现的中心性和频率的时间变化进行分析,进而得出最受关注的研究领域。利用 CiteSpace 5. 8. R2 可视化软

件,以关键词作为节点类型,其他参数保持默认值,生成的共现图谱如图 3 所示,共有 726 个节点、7 184 条连线。每个关键词由一个单独的节点表示,节点大小代表该关键词出现频次的多少,节点之间的连线代表各研究关键词之间的联系,连线越粗表示联系越紧密。排除了作为检索关键词的生物可降解塑料(biodegradable plastics),图中所示关键词代表了 2001—2021 年生物可降解塑料领域的关注热点。由图 3 可知,对生物可降解塑料的研究主要关注“机械性能(mechanical property)”和“行为(behavior)”等关键词。生物可降解塑料的性能如熔点、拉伸强度、延伸率、阻隔性等能够决定它们的应用领域<sup>[36]</sup>。例如 PLA 的熔点和强度高,但拉伸韧性和结晶性较弱,对其进行增韧和促进结晶等改性后,可用于制备垃圾袋、餐盒等<sup>[37]</sup>。对于生物可降解塑料制备原料的研究主要集中于“聚羟基脂肪酸酯(poly-hydroxyalkanoate)”“淀粉(starch)”和“聚乳酸(polylactic acid)”等关键词。生物可降解塑料可由天然材料加工合成<sup>[38]</sup>,如来自农业资源的淀粉、纤维素等,也可通过微生物直接合成,如 PHA,还可通过微生物发酵和传统化学方法合成,如 PLA。对于塑料降解方面的研究集中在“降解(degradation)”和“生物降解(biodegradation)”等关键词。生物可降解塑料废弃物的降解机理和不同环境下的降解程度对于塑料废弃物的处理具有指导意义,为推广和普及生物可降解塑料提供参考<sup>[39]</sup>。对塑料复合材料的关注体现于“混合(blend)”和“纳米复合材料(nanocomposite)”等关键词。使用天然纤

维、纳米材料等作为生物可降解塑料的制备原料,能够提高塑料的力学性能。有研究表明天然纤维的加入提高了复合材料的强度和刚度,可被广泛应用于诸多领域<sup>[40]</sup>。通过关键词共现图谱可知,针对生物可降解塑料性能的研究内容丰富多样,涉及其性能、制备原料、降解程度提升等方面,各研究热点之间相互联系,均围绕研发性能优异的生物可降解塑料开展研究。

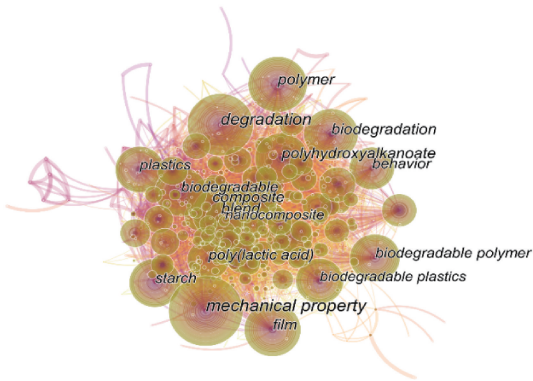


图 3 生物可降解塑料研究关键词共现图谱  
Fig. 3 Co-occurrence mapping of keywords in biodegradable plastics research

3.2 研究前沿

关键词突显是指某个关键词在一段时间内出现的频率,以突显度表示频率高低,突显度越高,则说明该时期内对该关键词的研究文献数量越多,研究热度高。对突显关键词进行分析可以了解领域的前沿<sup>[41]</sup>。在关键词时间共现图谱基础上,通过 CiteSpace 软件计算从出现到结束时间持续大于 1 年的突显关键词,生成强度排名前 25 的关键词突显图谱如图 4 所示。由图 4 可知,排除“可生物降解的 (biodegradable)”和“生物可降解塑料 (biodegradable plastics)”两个检索词,研究初期突显强度较大的关键词有“淀粉 (starch)”(突显度 14.72,2002—2007 年)、“真养产碱杆菌 (*Alcaligenes eutrophus*)”(突显度 12.6,2001—2010 年)、“聚酯 (polyester)”(突显度 10.84,2002—2008 年)。该结果说明研究初期的热点集中于生物可降解塑料合成的原料,比如通过真养产碱杆菌利用不同原料生产聚-β-羟丁酸 (PHB)、在聚乳酸中加入低成本废料 (如咖啡渣) 等制备复合材料<sup>[42-43]</sup>等。

近几年的研究中突显度较高的关键词则有“微细结构 (microstructure)”(突显度 11.67,2016—2021 年)、“土壤 (soil)”(突显度 14.59,2017—2021

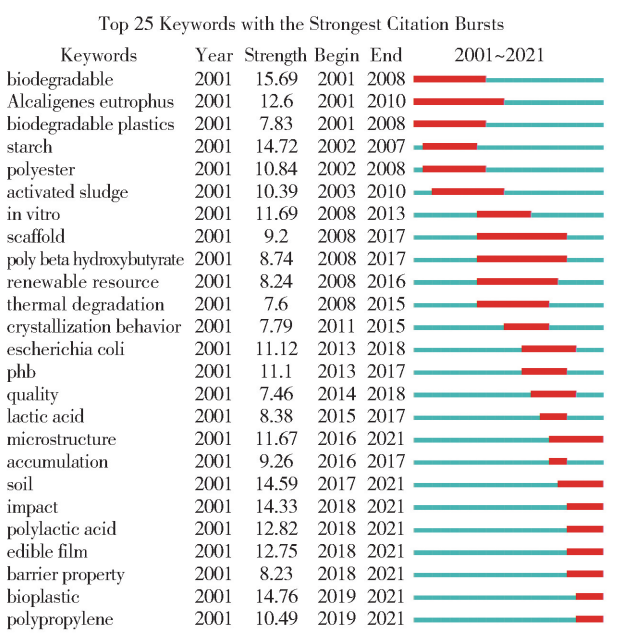


图 4 生物可降解塑料领域关键词突显图谱  
Fig. 4 Keywords highlight mapping for biodegradable plastics

年)、“影响 (impact)”(突显度 14.33,2018—2021 年)等。结合近 3 年以生物可降解塑料为主题的高被引文献分析,学者们开始关注生物可降解塑料对环境尤其是土壤的影响,以及塑料降解产物对环境中的特定生物如植物、鱼类等的影响<sup>[44]</sup>。有研究表明高密度聚乙烯 (HDPE) 和聚乳酸微塑料会影响紫罗兰的发育和健康及土壤性质,并可能进一步影响土壤的生态系统功能<sup>[2]</sup>。总体而言,这一阶段该领域的研究前沿包括生物可降解塑料在实际环境中的降解、如何提高降解率、开发新型材料等方面。在前人的研究基础上不断开展多角度、多方向的研究,才能在保证材料机械性能优异的同时提高其降解速率和程度,为生物可降解塑料替代传统商品塑料提供指导。

4 发表期刊和国家分析

4.1 发表期刊分析

以“biodegradable plastics”为关键词,利用 WoS 中自带的工具检索得到相关出版物。2001—2021 年发文量排名前 10 位的学术期刊及其发表论文数量、论文数占比和影响因子 (IF) 列于表 3。由表 3 可知,*Polymer Composites* (IF = 3.171) 发表的论文数最多 (154 篇),占其总发文量 (4 316 篇) 的 3.57%,其余影响因子较高 (IF > 5) 的期刊有

Bioresource Technology、Journal of Cleaner Production、Science of the Total Environment、International Journal of Biological Macromolecules 等。发文量前 10 的期刊

涉及农业类、环境类、生物类、化学类和材料类等,说明生物可降解塑料的相关研究内容丰富,研究角度多样,涉及面广,研究发展空间巨大。

表 3 2001—2021 年生物可降解塑料研究领域发文量前 10 位的学术期刊

Table 3 Top ten productive journals in terms of publications on biodegradable plastics from 2001 to 2021

序号	期刊名称	出版论文数/篇	影响因子(2021)	论文数占比/%
1	Polymer Composites	154	3.171	3.57
2	Journal of Polymers and the Environment	140	3.667	3.24
3	Journal of Applied Polymer Science	139	3.125	3.22
4	Polymer Engineering and Science	119	2.428	2.76
5	Polymers	107	4.329	2.48
6	Polymer Degradation and Stability	93	5.030	2.15
7	International Journal of Biological Macromolecules	76	6.953	1.76
8	Journal of Cleaner Production	57	9.297	1.32
9	Science of the Total Environment	55	7.963	1.27
10	Bioresource Technology	47	9.642	1.09

4.2 发文国家和机构间的合作关系

机构和国家在生物可降解塑料研究领域的发文量能够反映机构或国家对于该领域研究的关注度。利用共现图谱中的节点大小、连线、密度值等数值对机构和国家之间的合作关系进行分析,对机构或国家间开展合作具有指导意义。节点大小代表一个机构或国家发表的文章数量,节点连接则显示不同组织之间的协调合作水平,中心度表示一个节点在整个网络中的连接作用,中心度大的节点通常是网络中的关键节点。

使用 CiteSpace 软件选取“Institution”和“Country”作为节点,其他参数不作更改,保持默认值,生成项目研究机构共现图谱(图 5(a)),共有 609 个节点,465 条连线,密度值为 0.002 5。可以看出大的节点数较少,中国的研究机构在生物可降解塑料研究领域占据重要地位,其中中国科学院大学(Univ Chinese Acad Sci)贡献最大,其中心度为 0.15,其他贡献较大的中国机构有西北农林科技大学(North-west A&F Univ)、华南理工大学(South China Univ Technol)和四川大学(Sichuan Univ)等。此外,国外研究机构中美国华盛顿州立大学(Washington State Univ)、马来西亚国家大学(Univ Sains Malaysia)等在该领域也有一定的贡献。图 5(a)中各点较分散,在整个网络中,大多数机构之间的联系较弱,合作并不紧密。

研究国家共现图谱(图 5(b))共有 149 个节点,681 条连线,密度值为 0.061 8。由图可知,较大节点为中国、美国、日本和印度,中国在该领域的发文量处于领先地位,共发表文章 718 篇,占总发文数的 16.56%,其次是美国、印度和日本,分别为 652 篇(15.04%)、381 篇(8.79%)和 322 篇(7.43%)。这显示出以上国家在生物可降解塑料研究方面拥有卓越的研发经验和能力,同时表明这些国家在与该领域其他国家的合作中发挥着关键作用。我国在该领域研究中发文数量高于其他国家,主要是由于国家提供了有力的政策支持,我国陆续出台的关于限制、禁止使用一次性不可降解塑料以及大力扶持生物可降解塑料的一系列政策<sup>[45]</sup>使得生物可降解塑料的需求大幅增加。由图 5(b)可看出研究贡献较大的国家之间的连线数量较少,国家之间合作不紧密,没有形成合作集群。各国与各机构之间应该加强合作,通过合作进行资源共享,从而实现优势互补,提升科研效率,而且还能提高学术影响力、促进协同创新,达到互惠互利的双赢局面。

5 结论

生物可降解塑料的推广应用对于减少传统塑料的污染具有重要意义。本文采用 CiteSpace 5.8. R2 对 WoS 数据库中近 20 年来与生物可降解塑料相关的 4 316 篇研究论文和综述进行分析,得到的主要



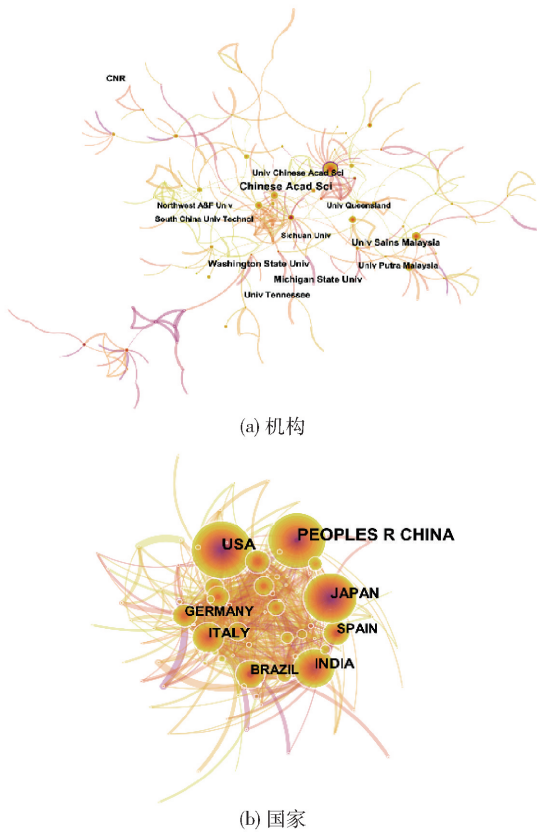


图 5 生物可降解塑料领域合作关系共现图谱  
Fig. 5 Cooperative research co-occurrence mapping in the field of biodegradable plastics

结果如下:(1) 2001—2021 年生物可降解塑料的发展大致可分为稳定增长阶段(2001—2012 年)和快速增长阶段(2013—2021 年)。稳定增长阶段的研究主要关注生物可降解塑料的机械性能、塑料合成工艺以及微生物法合成工艺等方面,而快速增长阶段则主要关注生物可降解塑料的机械性能改善、实际应用等方面;(2) 近 20 年来,生物可降解塑料的研究热点与前沿主要集中在提高塑料的机械性能、拓宽生产原料来源、开发新型复合材料、提高生物可降解塑料使用后在环境中的降解速率、降低其对环境造成的负面影响等方面;(3) 该领域论文所发表的期刊涉及多个学科领域,研究内容多样,有较多的高水平期刊,研究发展空间巨大;(4) 21 世纪以来学者们对于生物可降解塑料的关注不断增加,发文多集中于中国、美国、印度和日本等国家,中国发文数最多,但仍未形成较为紧密的机构和国家合作网络。

根据目前的研究进展,对今后的生物可降解塑料研究提出以下 3 点建议:(1) 利用废弃物资源研

制生物可降解塑料,有效降低成本。生物可降解塑料产业发展受限于其生产成本低,利用生物质废料生产低价生物可降解塑料,可以有效扩大其应用范围,增加生产产能。(2) 提高降解速率,缩短降解周期。生物可降解塑料在不同自然环境中的降解性能不同,物化环境的变化可能会导致其降解不完全,对环境造成不利影响。应充分考虑其不同环境中的降解率,并筛选出能高效降解塑料的菌株,使用生物强化来增强降解效果。(3) 适当使用添加剂,有效提升塑料产品的耐用性和可回收性。添加剂能有效改善塑料的机械性能,如稳定剂可延长塑料产品的使用寿命、抗氧化剂可延缓塑料氧化、表面活性剂可提升塑料表面性能等。对添加剂进行深入研究,开发出提升塑料耐用性和可回收性的新型添加剂,有利于缓解塑料污染。

本文基于生物可降解塑料领域在近 20 年内的相关文献信息,全面地分析了研究内容的演变历史,确定了研究热点和前沿,有助于相关科研人员确定较为关键的研究热点和挖掘研究新方向。在我国持续推进塑料污染治理行动的背景下,围绕生物可降解塑料的研究应不断开拓新的研究视角,加强研究深度,寻找低成本原料,提升生产加工工艺水平,生产出性能优异、价格低廉的产品,扩大生物可降解塑料的应用市场。

### 参考文献:

- [1] NAPPER I E, THOMPSON R C. Environmental deterioration of biodegradable, oxo-biodegradable, compostable, and conventional plastic carrier bags in the sea, soil, and open-air over a 3-year period[J]. Environmental Science & Technology, 2019, 53(9): 4775–4783.
- [2] BOOTS B, RUSSELL C W, GREEN D S. Effects of microplastics in soil ecosystems: above and below ground [J]. Environmental Science & Technology, 2019, 53(19): 11496–11506.
- [3] KIM T, PARK K, HONG J. Understanding the hazards induced by microplastics in different environmental conditions[J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, 424: 127630.
- [4] JIN Y, CAI F F, SONG C, et al. Degradation of biodegradable plastics by anaerobic digestion: morphological, micro-structural changes and microbial community dynamics[J]. Science of the Total Environment, 2022, 834: 155167.
- [5] CHEN X Y, LIU Y S. Visualization analysis of high-

- speed railway research based on CiteSpace[J]. *Transport Policy*, 2020, 85: 1–17.
- [6] ZHANG J D, JIANG L P, LIU Z H, et al. A bibliometric and visual analysis of indoor occupation environmental health risks: development, hotspots and trend directions [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 300: 126824.
- [7] LIAO H C, TANG M, LUO L, et al. A bibliometric analysis and visualization of medical big data research[J]. *Sustainability*, 2018, 10(1): 166.
- [8] LIU Z G, YIN Y M, LIU W D, et al. Visualizing the intellectual structure and evolution of innovation systems research: a bibliometric analysis [J]. *Scientometrics*, 2015, 103(1): 135–158.
- [9] OUYANG W, WANG Y D, LIN C Y, et al. Heavy metal loss from agricultural watershed to aquatic system: a scientometrics review [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 637/638: 208–220.
- [10] 李杰, 陈超美. CiteSpace: 科技文本挖掘及可视化 [M]. 2 版. 北京: 首都经济贸易大学出版社, 2016.
- LI J, CHEN C M. CiteSpace: text mining and visualization in scientific literature[M]. 2nd ed. Beijing: Capital University of Economics and Business Press, 2016. (in Chinese)
- [11] 封亮, 王淑彬, 唐海鹰, 等. 乡村生态文明研究知识图谱: 基于 CiteSpace V 可视化分析[J]. *生态与农村环境学报*, 2021, 37(2): 137–144.
- FENG L, WANG S B, TANG H Y, et al. Knowledge map of rural ecological civilization research based on CiteSpace V visualization analysis[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021, 37(2): 137–144. (in Chinese)
- [12] CHEN C M. Science mapping: a systematic review of the literature[J]. *Journal of Data and Information Science*, 2017, 2(2): 1–40.
- [13] CHEN C M, HU Z G, LIU S B, et al. Emerging trends in regenerative medicine: a scientometric analysis in CiteSpace[J]. *Expert Opinion on Biological Therapy*, 2012, 12(5): 593–608.
- [14] LIM L T, AURAS R, RUBINO M. Processing technologies for poly(lactic acid) [J]. *Progress in Polymer Science*, 2008, 33(8): 820–852.
- [15] MADHAVAN NAMPOOTHIRI K, NAIR N R, JOHN R P. An overview of the recent developments in polylactide (PLA) research [J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(22): 8493–8501.
- [16] MOHANTY A K, MISRA M, DRZAL L T. Sustainable bio-composites from renewable resources: opportunities and challenges in the green materials world [J]. *Journal of Polymers and the Environment*, 2002, 10(1/2): 19–26.
- [17] SHAH A A, HASAN F, HAMEED A, et al. Biological degradation of plastics: a comprehensive review[J]. *Biotechnology Advances*, 2008, 26(3): 246–265.
- [18] OKSMAN K, SKRIFVARS M, SELIN J F. Natural fibres as reinforcement in polylactic acid (PLA) composites [J]. *Composites Science and Technology*, 2003, 63(9): 1317–1324.
- [19] HOPEWELL J, DVORAK R, KOSIOR E. Plastics recycling: challenges and opportunities [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2009, 364: 2115–2126.
- [20] SEKITANI T, ZSCHIESCHANG U, KLAUK H, et al. Flexible organic transistors and circuits with extreme bending stability [J]. *Nature Materials*, 2010, 9(12): 1015–1022.
- [21] VIEIRA M G A, DA SILVA M A, DOS SANTOS L O, et al. Natural-based plasticizers and biopolymer films: a review[J]. *European Polymer Journal*, 2011, 47(3): 254–263.
- [22] GREGORY M R. Environmental implications of plastic debris in marine settings—entanglement, ingestion, smothering, hangers-on, hitch-hiking and alien invasions [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2009, 364: 2013–2025.
- [23] SHUKLA R, CHERYAN M. Zein: the industrial protein from corn [J]. *Industrial Crops and Products*, 2001, 13(3): 171–192.
- [24] QUECHOLAC-PIÑA X, HERNÁNDEZ-BERRIEL M D C, MAÑÓN-SALAS M D C, et al. Degradation of plastics under anaerobic conditions: a short review[J]. *Polymers*, 2020, 12(1): 109.
- [25] 郑进宝, 李琛. 淀粉基包装材料疏水性改善研究进展 [J]. *化工进展*, 2022, 41(6): 3089–3102.
- ZHENG J B, LI C. Research progress in improving hydrophobicity of starch-based packaging materials [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2022, 41(6): 3089–3102. (in Chinese)
- [26] ESTRIN Y, VINOGRADOV A. Extreme grain refinement by severe plastic deformation: a wealth of challenging science[J]. *Acta Materialia*, 2013, 61(3): 782–817.
- [27] RHIM J W, PARK H M, HA C S. Bio-nanocomposites for food packaging applications[J]. *Progress in Polymer Science*, 2013, 38(10/11): 1629–1652.



- [28] REDDY M M, VIVEKANANDHAN S, MISRA M, et al. Biobased plastics and bionanocomposites: current status and future opportunities [J]. *Progress in Polymer Science*, 2013, 38(10): 1653 – 1689.
- [29] ABDEL-RAHMAN M A, TASHIRO Y, SONOMOTO K. Recent advances in lactic acid production by microbial fermentation processes [J]. *Biotechnology Advances*, 2013, 31(6): 877 – 902.
- [30] LEE W S, CHUA A S M, YEOH H K, et al. A review of the production and applications of waste-derived volatile fatty acids [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2014, 235: 83 – 99.
- [31] IWATA T. Biodegradable and bio-based polymers; future prospects of eco-friendly plastics [J]. *Angewandte Chemie- International Edition*, 2015, 54(11): 3210 – 3215.
- [32] CAZÓN P, VELAZQUEZ G, RAMÍREZ J A, et al. Polysaccharide-based films and coatings for food packaging: a review [J]. *Food Hydrocolloids*, 2017, 68: 136 – 148.
- [33] ATARÉS L, CHIRALT A. Essential oils as additives in biodegradable films and coatings for active food packaging [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2016, 48: 51 – 62.
- [34] BUGNICOURT E, CINELLI P, LAZZERI A, et al. Polyhydroxyalkanoate (PHA): review of synthesis, characteristics, processing and potential applications in packaging [J]. *Express Polymer Letters*, 2014, 8(11): 791 – 808.
- [35] XIE F W, POLLET E, HALLEY P J, et al. Starch-based nano-biocomposites [J]. *Progress in Polymer Science*, 2013, 38(10/11): 1590 – 1628.
- [36] WU F, MISRA M, MOHANTY A K. Challenges and new opportunities on barrier performance of biodegradable polymers for sustainable packaging [J]. *Progress in Polymer Science*, 2021, 117: 101395.
- [37] ILYAS R A, SAPUAN S M, HARUSSANI M M, et al. Polylactic acid (PLA) biocomposite: processing, additive manufacturing and advanced applications [J]. *Polymers*, 2021, 13(8): 1326.
- [38] AVÉROUS L. Biodegradable multiphase systems based on plasticized starch: a review [J]. *Journal of Macromolecular Science, Part C: Polymer Reviews*, 2004, 44(3): 231 – 274.
- [39] 金琰, 蔡凡凡, 王立功, 等. 生物可降解塑料在不同环境条件下的降解研究进展 [J]. *生物工程学报*, 2022, 38(5): 1784 – 1808.
- JIN Y, CAI F F, WANG L G, et al. Advance in degradation of biodegradable plastics in different environments [J]. *Chinese Journal of Biotechnology*, 2022, 38(5): 1784 – 1808. (in Chinese)
- [40] MEEREBOER K W, MISRA M, MOHANTY A K. Review of recent advances in the biodegradability of polyhydroxyalkanoate (PHA) bioplastics and their composites [J]. *Green Chemistry*, 2020, 22(17): 5519 – 5558.
- [41] HUANG L, ZHOU M, LV J, et al. Trends in global research in forest carbon sequestration: a bibliometric analysis [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 252: 119908.
- [42] 许懿, 陈荣辉, 赖瑞华, 等. 真养产碱杆菌 H16 合成聚- $\beta$ -羟基丁酸酯的培养基优化 [J]. *厦门大学学报 (自然科学版)*, 2011, 50(5): 942 – 946.
- XU Y, CHEN R H, LAI R H, et al. Optimization of the composition for poly- $\beta$ -hydroxybutyrate production by *Ralstonia eutropha* H16 [J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2011, 50(5): 942 – 946. (in Chinese)
- [43] 梁健飞. 咖啡渣和稻壳灰生物质在生物可降解塑料中的应用研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- LIANG J F. Studies on the application of coffee ground and rice husk ash biomass in biodegradable plastics [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [44] HAIDER T P, VÖLKER C, KRAMM J, et al. Plastics of the future? The impact of biodegradable polymers on the environment and on society [J]. *Angewandte Chemie- International Edition*, 2019, 58(1): 50 – 62.
- [45] 王燕萍, 邓义祥, 张承龙, 等. 我国一次性塑料污染管理对策研究 [J]. *环境科学研究*, 2020, 33(4): 1062 – 1068.
- WANG Y P, DENG Y X, ZHANG C L, et al. Management policies of single-use plastic pollution in China [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(4): 1062 – 1068. (in Chinese)

# A study based on CiteSpace of research advances and frontiers for biodegradable plastics

SUN Xue JIN Yan CAI FanFan LIU GuangQing CHEN Chang<sup>\*</sup>

(College of Chemical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

**Abstract:** By virtue of their excellent biodegradability and promising applications, biodegradable plastics have attracted increasing attention. There are many kinds of biodegradable plastics, and the research fields span across many disciplines such as material science, biological engineering, and chemical engineering. The research topics and methods are rich and diverse. In order to accurately grasp the research hotspots and current and future trends in this field, we have used the CiteSpace bibliometric software to visualize and analyze 4 316 articles on biodegradable plastics in the Web of Science core database from 2001 to 2021, and systematically sort the research development history, research hotspots, literature and cooperative networks in this field at different time points. This study provides an outlook on the future development prospects and key research areas and can provide a reference for researchers in related fields to analyze existing research results, grasp research trends and explore new research directions.

**Key words:** CiteSpace; Web of Science (WoS); biodegradable plastics; visual mapping

(责任编辑:吴万玲)