

引用格式:夏宝欣,郑磊,潘璇,等. 基于 CiteSpace 的包膜肥料研究动态与热点分析[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2026, 53(4): 14-24.

XIA BaoXin, ZHENG Lei, PAN Xuan, et al. Trends and hot spots of research on coated fertilizers based on CiteSpace[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science), 2026, 53(4): 14-24.

## 基于 CiteSpace 的包膜肥料研究动态与热点分析

夏宝欣<sup>1</sup> 郑磊<sup>2</sup> 潘璇<sup>1</sup> 张瑱<sup>1</sup> 蔡国强<sup>1</sup> 林爱军<sup>1</sup> 郝晗彤<sup>1\*</sup> 肖勇<sup>1\*</sup>

(1. 北京化工大学 化学工程学院, 北京 100029; 2. 山东省第三地质矿产勘查院, 烟台 264004)

**摘要:** 在全球粮食安全问题日益受到关注的背景下,提升绿色环保、肥料利用效率与作物产量至关重要,因此对包膜肥料的研究日益增长。为明晰当前包膜肥料的研究方向及前沿热点,通过文献计量学的方法,借助 CiteSpace 对近 15 年来 Web of Science 核心数据库中包膜肥料领域的文献进行统计分析。包膜肥料领域的发文量在 2010—2024 年呈现增长趋势,山东农业大学、中国科学院等是该领域发文量较多的研究机构;包膜肥料研究涉及的领域较广,涵盖了农学、环境等多学科。包膜肥料当前研究重点为优化包膜材料以降低成本、提高降解性,同时研究呈现“高效-低碳-智能”的发展趋势,通过长期田间试验与模型模拟、量化其环境效益并构建区域性减排效果评估框架是下一阶段包膜肥料研究领域的关键技术和前沿方向。该研究可为包膜肥料后续发展方向提供参考。

**关键词:** 包膜肥料; CiteSpace; 发展趋势; 图谱

**中图分类号:** TQ449.1 **DOI:** 10.13543/j.bhxbzr.2026.04.002

### 引言

粮食安全是全球面临的永恒挑战<sup>[1]</sup>,然而传统肥料利用率低、养分流失率高,严重制约了农业生产的可持续发展。在全球人口持续增长的背景下,提高肥料和水资源利用效率已成为确保粮食供应的关键<sup>[2]</sup>。目前约 30%~50% 的肥料因浸出、挥发和溶解而流失,导致土壤和水体污染。为解决此问题,研究人员通过物理包膜或化学改性来精准调控肥料养分释放速率,从而提升肥料利用率,并实现作物增产<sup>[3]</sup>。缓/控释肥料的应用可同步实现粮食产量和环境效益的双重提升,显著减少肥料施用中  $\text{NH}_3$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  等温室气体的排放<sup>[4-5]</sup>。

包膜肥料是一种新型缓/控释肥料<sup>[6]</sup>,近年来发展迅速。包膜肥料可调节并控制养分的释放速度,

精准匹配作物生长周期的需肥规律,同时减少肥料流失和环境污染<sup>[7]</sup>。目前,常见的包膜肥料可分为无机包膜、有机高分子包膜和生物基包膜 3 类<sup>[8]</sup>。包膜肥料的养分释放性能受包膜材料、厚度、孔径、孔密度、土壤温湿度、pH 值及有机物等因素影响<sup>[9]</sup>。

包膜肥料对养分的控释机制主要有两种:破裂机制和扩散机制,这取决于膜材料的不同<sup>[10]</sup>。在包膜肥料工业化生产中,流化床包膜技术因成膜均匀性较好占据主流,而转鼓式工艺则适用于热敏性材料加工。包膜肥料不仅推动了绿色农业转型中“减施增效”,还为功能农业的精准营养供给体系构建提供关键技术支撑,是 21 世纪肥料产业的重要发展方向<sup>[11]</sup>。

近年来,随着农学与环境科学的快速发展,研究者对包膜材料进行了深入的研究。然而,包膜材料的降解速率与作物养分需求的匹配性仍不理想;包膜肥料虽在短期内具有增产效应,但在微塑料累积、温室气体排放等长期生态风险方面缺乏系统性评估,其降解可控性与环境安全性之间的矛盾尚未得到有效解决;生物基聚氨酯包膜肥料具有较强的亲水性,容易引发膜层的溶胀与崩解,从而成为精准控释的关键障碍。这些问题共同制约了新型包

收稿日期:2025-03-18

基金项目:国家重点研发计划(2023YFC3705905)

第一作者:女,2001 年生,硕士生

\*通信联系人

郝晗彤,E-mail:qiehangtong@163.com

肖勇,E-mail:xiaoyong@buct.edu.cn

膜肥料的优化设计与广泛应用。为此,本文基于Web of Science(WOS)公开发表的文献数据,使用CiteSpace软件对包膜肥料研究领域的发文量、机构、作者及关键词等进行文献计量与可视化分析,识别包膜肥料的研究热点和发展趋势,为开发高效、稳定且环保的新型包膜肥料提供参考。

## 1 数据来源与研究方法

为保证数据的准确性、全面性和可信度,本文以科睿唯安公司Web of Science平台中的科学引文索引扩展版(science citation index expanded, SCI-E)数据库为数据源,检索词为“coated fertilizer”,检索时间跨度为2010—2024年,文献类型为“Article”和“Review Article”,语言类型无设置。将所选文献导入CiteSpace 6.4. R1软件中进行去重及缺失处理,最终共导出1 865篇论文(检索日期为2025年2月18日)。

采用CiteSpace 6.4. R1软件进行数据挖掘和可视化分析<sup>[12]</sup>。在CiteSpace中设置时间切片跨度为1年,节点类型选择“作者(author)”“学科(category)”“机构(institution)”“国家(country)”“关键词(keyword)”“被引文献(reference)”,每个切片采用g-index( $k=25$ )进行节点筛选,以此生成包膜肥料知识网络并进行可视化分析。提取作者、机构及学科数据(学科分类按照中国教育部公布的一级学科与Web of Science学科类别的对应关系归类调整),并结合2023—2024年高被引文献的分析,从多维度揭示包膜肥料领域的研究现状与发展趋势。根据国家生成的合作网络,结合中介中心性等指标识别核心国家。通过关键词生成的知识图谱,结合聚类分析和突现检测,识别包膜肥料研究领域的关键节点、研究热点及演变趋势。

## 2 结果与讨论

### 2.1 包膜肥料研究进程

包膜肥料研究始于1961年,美国田纳西流域管理局首次成功制备硫磺包膜尿素,开创了延缓养分释放、提高肥效的实用化探索。此后数十年间,研究逐步拓展至多种无机材料和早期聚合物包膜体系(如矿质材料、早期树脂等),应用实践持续推进,但整体发展相对平缓,长期面临控释性能优化、环境友好性与规模化应用等多重挑战。

近10余年,随着科学发展进步、环境政策趋严

及智能农业兴起,包膜肥料研究热度显著上升,技术创新加速推进。为揭示近年来包膜肥料研究热度的时序演变规律,对2010—2024年年度发文量变化趋势进行了分析(图1)。

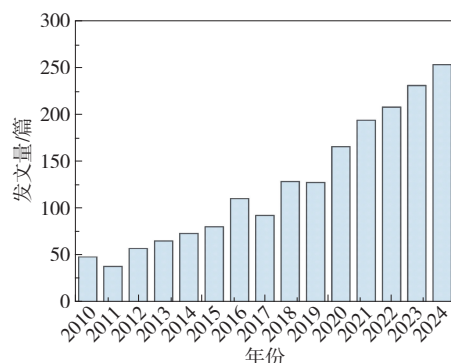


图1 2010—2024年包膜肥料研究发文量年度分布

Fig. 1 Annual distribution of research papers on coated fertilizers from 2010 to 2024

自2010年以来,包膜肥料的研究论文数量呈上升趋势。2010到2024年发文量从48篇增长到252篇,年均增长率为12.7%,表明包膜肥料领域的研究热度显著提升。结合研究内容与背景演进,可将其发展过程划分为3个阶段。阶段一:传统石油基材料主导与性能优化期(2010—2014年)。该阶段研究以传统石油基包膜材料为主,虽然控释效果好,但面临可降解性差、成本高等问题<sup>[13]</sup>,同时研究视角多限于农学领域,跨学科研究体系尚未成熟,缺乏材料与环境等更广泛的技术支持。阶段二:可持续发展驱动与生物基/复合材料崛起期(2015—2019年)。联合国于2015年提出可持续发展目标<sup>[14]</sup>后,可降解的生物基材料和复合材料凭借其在环保性、可再生性及性能上的多重优势,正在逐步突破传统石油基材料的限制<sup>[15]</sup>。虽然技术和成本壁垒尚存,但跨学科协作逐步加强,农学、环境与材料等领域形成初步融合,为技术突破提供基础。阶段三:农业深度减排与智能化需求驱动的精量化创新期(2020—2024年)。全球碳交易机制和农业绿色转型政策加快落地<sup>[16]</sup>,推动包膜肥料向精准释放、环境友好型方向发展。研究聚焦于减少氮素挥发和一氧化二氮排放,并满足智能农业对精准施肥的需求,研发投入明显加大。

### 2.2 主要发文国家统计

为分析全球包膜肥料研究的国家贡献度差异,研究统计了2010—2024年发文量前10位国家,如

表1所示。中国的发文量居首位,达690篇,远超排名第二的美国(311篇)。包膜肥料与绿色农业和环境治理等国家高度重视的问题密切相关,因此在国家的大力支持下,包膜肥料领域迅速发展。

表1 2010—2024年包膜肥料研究发文量前10位国家

Table 1 Top 10 countries by research publications on coated fertilizers from 2010 to 2024

| 序号 | 国家    | 发文量/篇 | 首发年份(统计期内) |
|----|-------|-------|------------|
| 1  | 中国    | 690   | 2010       |
| 2  | 美国    | 311   | 2010       |
| 3  | 巴西    | 170   | 2011       |
| 4  | 印度    | 150   | 2010       |
| 5  | 巴基斯坦  | 121   | 2011       |
| 6  | 澳大利亚  | 117   | 2010       |
| 7  | 加拿大   | 93    | 2010       |
| 8  | 马来西亚  | 78    | 2010       |
| 9  | 沙特阿拉伯 | 56    | 2012       |
| 10 | 日本    | 52    | 2010       |

包膜肥料研究的主要国家间关联图谱见图2。不同大小和颜色的节点年轮代表不同的国家,通过节点年轮直径大小识别该国发文量的多少,节点年轮色带分布揭示该国研究活跃期,不同节点间连线表示两国存在共同署名发表的包膜肥料领域研究论文,连线粗细与合著频次正相关。紫色外圈为高中介中心性的节点,可以定位包膜肥料领域的枢纽国家。从整体来看,包膜肥料研究领域以中国和美国为中心,二者的中介中心性分别为0.26和0.45,

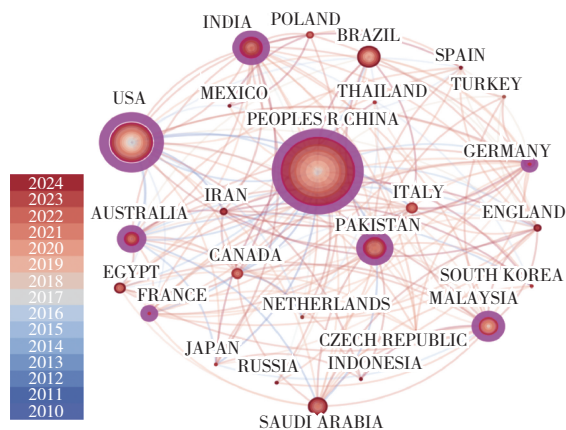


图2 2010—2024年包膜肥料研究主要国家间关联图谱

Fig. 2 Association map of major countries in coated fertilizers research from 2010 to 2024

说明这两个国家在包膜肥料领域影响力较高。

从时间线来看,中国、美国等国家在2010年已开展大量包膜肥料研究。中国主要受国家政策推动(如“十一五”期间,中国缓/控释肥料产业取得了较快发展,“十二五”期间,为顺应低碳农业发展需求,中国将优先发展缓/控释肥产业)<sup>[17]</sup>,而美国受能源价格波动和粮食安全需求等多重因素推动,依托化工产业优势,企业和研究机构加大了包膜肥料技术研发投入。2011—2013年,巴西、巴基斯坦等新兴经济体在热带/亚热带气候下养分流失严重以及人口增长导致粮食自给压力增大的背景下,开始积极跟进包膜肥料的研究。同期德国、荷兰等欧洲国家在农业氮素管理压力和欧盟《硝酸盐指令》背景下,加强了包膜尿素的研究与应用探索。2014年后,英国、俄罗斯等国家逐步参与,英国强调通过环保政策减少农业面源污染,而俄罗斯因西伯利亚地区土壤年均温度低于5℃,传统肥料养分释放速率与作物生长周期严重脱节,以此推进了包膜肥料的发展。近5年,土耳其、印度尼西亚等发展中国家加速包膜肥料研究,一方面受全球粮价波动影响,亟需本土化包膜肥料生产技术<sup>[18]</sup>;另一方面,热带作物种植模式(如印尼棕榈油种植园)对缓释技术的适配性需求凸显<sup>[19]</sup>。这表明,包膜肥料领域正吸引全球多类型国家的关注,研究热度持续上升。

### 2.3 研究机构和人员发文统计

包膜肥料的研究呈现出显著的国际化 and 区域化趋势,尤其是在中国、美国、印度和巴基斯坦的研究机构中表现突出。表2为2010—2024年包膜肥料发文量前10位的研究机构,其中中国的山东农业大学和中国科学院等机构发文量居于前列,体现了农业农林类高校和科研院所在包膜肥料研发与推广中的核心地位。巴基斯坦费萨拉巴德农业大学在包膜肥料领域的研究起步较晚(2014年),但其在包膜肥料方向的发文量达51篇,说明该研究机构近几年开始更加重视包膜肥料方向的研究。

表3显示了包膜肥料领域发文量前6位作者,发文量前3的学者均来自中国山东农业大学。以张民、刘之广为核心的研究团队,共发表论文82篇,该团队主要从事新型肥料创制理论与技术研究,成功创建了热塑性树脂、热固性树脂等多套包膜肥料生产工艺和生产线,表明该团队在包膜缓/控释肥料生产体系方面具有较大的影响力。同时杨越超、张淑刚(中国山东农业大学)及其团队深入研究了各种

表 2 2010—2024 年包膜肥料研究发文量前 10 位研究机构  
Table 2 Top 10 research institutions by number of publications on coated fertilizers from 2010 to 2024

| 序号 | 机构            | 首发年份<br>(统计期内) | 篇数  |
|----|---------------|----------------|-----|
| 1  | 山东农业大学        | 2012           | 106 |
| 2  | 中国科学院         | 2010           | 99  |
| 3  | 中华人民共和国农业农村部  | 2011           | 94  |
| 4  | 美国佛罗里达大学      | 2010           | 70  |
| 5  | 印度农业研究理事会     | 2010           | 61  |
| 6  | 巴基斯坦费萨拉巴德农业大学 | 2014           | 51  |
| 7  | 中国农业科学院       | 2011           | 43  |
| 8  | 美国农业部         | 2010           | 42  |
| 9  | 巴西圣保罗大学       | 2013           | 40  |
| 10 | 加拿大农业与农业食品部   | 2010           | 38  |

包膜肥料材料和技术,特别是在生物基聚氨酯改性方面贡献卓著。他们通过开发生物基聚氨酯的环保合成工艺、纳米铜协同改性技术等创新手段,显著提升了包膜材料的释放性能和机械稳定性,在提高肥料养分利用率方面处于行业的领军地位。另外,我国学者在包膜肥料研究领域的国际参与度较高,杨越超与张淑刚团队与高斌、李允聪(美国佛罗里达大学)等学者形成了紧密的跨国合作网络。通过联合发表论文等方式,中美两国学者在包膜材料改性、控释性能优化等领域深度融合。这种“中美协同”的合作模式推动包膜肥料研究从单一国家主导向全球化协作转型。

表 3 2010—2024 年包膜肥料研究发文量前 6 位作者  
Table 3 Top six authors by number of publications on coated fertilizers from 2010 to 2024

| 序号 | 作者  | 机构     | 首发年份 | 篇数 |
|----|-----|--------|------|----|
| 1  | 张民  | 山东农业大学 | 2013 | 51 |
| 2  | 杨越超 | 山东农业大学 | 2013 | 31 |
| 3  | 刘之广 | 山东农业大学 | 2016 | 31 |
| 4  | 高斌  | 佛罗里达大学 | 2016 | 17 |
| 5  | 张淑刚 | 山东农业大学 | 2018 | 16 |
| 6  | 李允聪 | 佛罗里达大学 | 2017 | 16 |

2.4 学科分析

包膜肥料作为农业可持续发展的关键技术,其研究涉及化学、环境等多领域,具有多学科交叉属性。不同学科从技术研发、应用优化到环境评估等

环节切入,共同推动肥料增效与生态保护的协同发展。

从图 3 学科占比分析来看,前 3 学科覆盖化学、环境、农学 3 大领域,凸显了包膜肥料研究需整合多学科知识与技术以实现全方位发展。其中“生物学”与“农业资源与环境”学科占据主导地位(占比 26.5%),整合土壤-植物系统研究,通过探究包膜材料类型、土壤温度、土壤含水率以及土壤中微生物活性对包膜肥料养分释放的影响,揭示了养分释放-根系吸收耦合机制<sup>[20]</sup>。“化学”学科(占比 22.6%)从材料合成到控释机制解析,其基本化学原理贯穿包膜肥料研发的关键环节。如生物基聚氨酯由天然多元醇与异氰酸酯通过加成聚合反应制备,以调控反应单体种类与比例,实现对包膜结构致密性、亲疏水性和降解速率的调节,从而优化释放性能。“环境科学与工程”学科(占比 20.1%)从减少养分流失及污染,推动环保材料替代的角度出发,聚焦于研究包膜降解动力学、养分流失路径(如氨挥发、径流)及其对水体/土壤的影响<sup>[21]</sup>。“作物学”学科占比 17.5%,表明包膜肥料研究直接服务于农业生产需求,通过包膜控释特性匹配作物生育期养分需求可减少施肥次数并稳定增产<sup>[22]</sup>。“材料科学与工程”“化学工程与技术”合计占比 13.4%,两个学科则助力开发低成本包膜材料(如改性淀粉)和工业化生产技术(如流化床包衣),降低包膜肥料成本和市场价格<sup>[23-24]</sup>。

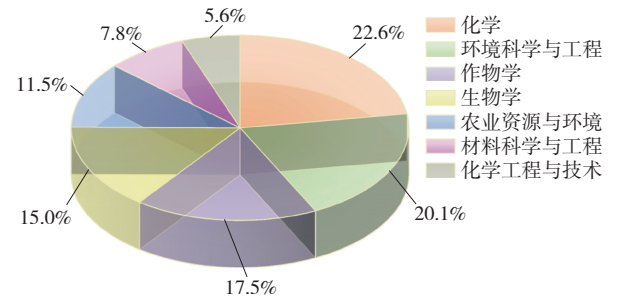


图 3 2010—2024 年包膜肥料研究发文量排名前 7 的学科  
Fig. 3 Top seven disciplines of coated fertilizers research in 2010—2024

2.5 研究热点及发展趋势

2.5.1 关键词词频分析

分析关键词高频词汇,可以清晰地展现包膜肥料领域的核心研究方向及范围。图 4 为 2010—2024 年包膜肥料领域的前 20 个高频关键词及其频次数据,“包膜尿素(coated urea, 264 次)”“尿素(urea, 189

次)”“氮(nitrogen, 174次)”以及“氮利用效率(nitrogen use efficiency, 150次)”的高频出现,凸显氮肥缓/控释技术的核心研究方向<sup>[25]</sup>。其次“产量(yield, 248次)”以及“粮食产量(grain yield, 94次)”的高关联性,表明包膜肥料在粮食产量和粮食安全中扮演关键角色。“缓慢释放(slow release, 155次)”和“控制释放(controlled release, 110次)”等关键词的频次特征,强调了缓/控释肥料技术在提高包膜肥料利用效率和减少环境污染中的关键作用。“土壤(soil, 246次)”“水(water, 145次)”和“化肥(fertilizer, 185次)”反映包膜技术的研究对“水-肥-土”系统协同优化的探索。在作物研究中,“小麦(wheat, 106次)”的高频出现与其全球广泛种植和对氮肥敏感特性相关<sup>[26-27]</sup>。包膜肥料通过控释氮素,可减少流失与排放,并适应旱区等逆境,成为小麦绿色集约化种植体系的关键技术。

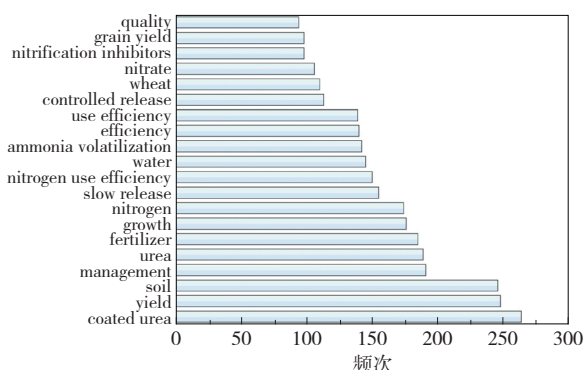


图4 2010—2024年出现频次前20位的关键词

Fig. 4 Top 20 keywords with frequency from 2010 to 2024

总体来看,包膜肥料的研究趋势以氮素精准调控为核心靶点,研究范围从单一肥料研发向水-肥-土耦合机制延伸,同时以小麦等主粮作物为突破口,开发兼具增产潜力与环境适应性的包膜方案,推动技术创新从实验室向田间规模化应用的系统性跨越。

### 2.5.2 关键词聚类分析

关键词聚类可以清晰展现包膜肥料研究的核心主题。图5展示了2010—2024年包膜肥料关键词共现网络聚类结果,其模块值 $Q$ 为0.387 8 ( $>0.3$ ),同质性 $S$ 为0.74 ( $>0.5$ ),表明包膜肥料领域的关键词聚类效果显著,子群内部关联紧密且边界清晰<sup>[28]</sup>。聚类显示包膜肥料研究主要围绕控释氮肥增效与环境减排效应展开。控释尿素(#2)与腐植酸(#5)的结合<sup>[29]</sup>,通过物理阻隔与化学吸附双重

机制延长氮素释放周期,直接提升氮利用效率(#0);在此基础上,氧化锌纳米颗粒(#3)通过纳米掺杂技术增强包膜机械性能与控释精度,同时缓释锌元素激活作物抗逆性,推动肥料功能体系升级<sup>[30]</sup>;环境风险管控层面,由于氮肥施用导致的一氧化二氮排放(#1)是重要的温室气体来源之一<sup>[31]</sup>,为响应全球气候变化与温室气体减排的需求,研究关注点已从单一增产转向“增产-减排”平衡。包膜肥料控释技术通过减少氮素淋失与硝化/反硝化反应底物,显著抑制温室气体排放<sup>[32]</sup>;而农艺效益(#4)则作为量化包膜肥料技术的终端指标,用于衡量其在作物生长、产量提升的实际效果。

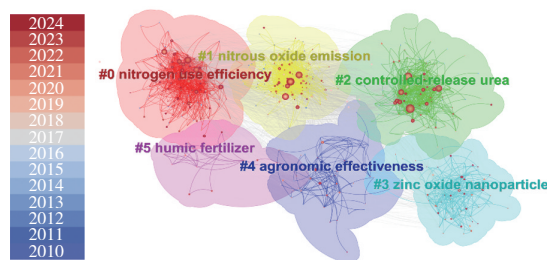


图5 2010—2024年包膜肥料研究关键词网络聚类

Fig. 5 Keywords network clustering of coated fertilizers research from 2010 to 2024

总体而言,包膜肥料研究领域的关键词聚类呈现出多维度的研究特征:在技术创新层面,涵盖了从传统控释技术到前沿纳米技术的应用探索;在应用效果层面,则系统性地研究了其对农业生产的环境影响、土壤健康维护以及作物效益提升等关键议题,最终形成了“材料研发-环境影响-应用效益”的完整研究闭环。然而目前包膜肥料研究向氮肥倾斜,原因在于氮肥的施用量大、环境影响突出,且缓/控释氮肥技术较早实现产业化。磷肥、钾肥等非氮类养分的包膜肥料虽具备潜在应用价值,但尚处于技术探索阶段,相关文献数量相对较少,因而在关键词分析中未形成显著聚类。未来研究可在此基础上,进一步拓展至多种养分类型包膜肥料的研究与协同释放机制研究,推动包膜肥料技术体系的多元化与高效化发展。

### 2.5.3 关键词突现分析

关键词突现对把握包膜肥料技术演进轨迹具有关键指示作用。2010—2024年包膜肥料领域突现强度排名前20的关键词如表4所示。早期2011年,有机聚合物包膜材料研究主要聚焦于热塑性与

表 4 2010—2024 年包膜肥料研究关键词突现  
Table 4 Emergent keywords in coated fertilizers research from 2010 to 2024

| 序号 | 关键词                     | 首次出现年份 | 突现强度 | 突现年份      |
|----|-------------------------|--------|------|-----------|
| 1  | nitrate                 | 2010   | 4.48 | 2010—2012 |
| 2  | field                   | 2010   | 4.31 | 2010—2012 |
| 3  | polyolefin coated urea  | 2011   | 6.67 | 2011—2017 |
| 4  | urease inhibitor        | 2011   | 4.17 | 2011—2013 |
| 5  | fertilizer              | 2011   | 3.87 | 2011—2013 |
| 6  | carbon dioxide          | 2012   | 6.90 | 2012—2017 |
| 7  | soil                    | 2010   | 4.45 | 2013—2014 |
| 8  | nitrous oxide emissions | 2013   | 4.24 | 2013—2016 |
| 9  | oxidation               | 2013   | 4.04 | 2013—2018 |
| 10 | polymer coated urea     | 2011   | 4.08 | 2014—2019 |
| 11 | systems                 | 2010   | 5.30 | 2015—2019 |
| 12 | efficiency              | 2010   | 6.03 | 2016—2017 |
| 13 | soils                   | 2010   | 4.96 | 2016—2018 |
| 14 | polymers                | 2010   | 4.31 | 2018—2021 |
| 15 | starch                  | 2013   | 4.23 | 2018—2020 |
| 16 | fabrication             | 2018   | 5.19 | 2020—2021 |
| 17 | paddy fields            | 2020   | 4.96 | 2020—2021 |
| 18 | composite               | 2012   | 4.08 | 2021—2024 |
| 19 | foliar application      | 2021   | 4.04 | 2021—2024 |
| 20 | slow-release fertilizer | 2010   | 7.77 | 2022—2024 |

热固性树脂两大体系。热塑性树脂以聚烯烃包膜尿素(polyolefin coated urea,强度 6.67)为核心,然而该材料难以生物降解,施用后残留物可能形成微塑料并对土壤生态产生潜在影响,同时其生产成本较高<sup>[33]</sup>。这促使研究重点转向环保经济型聚合物包膜尿素(polymer coated urea,强度 4.08),该类尿素的包膜层多采用淀粉基、木质素基及植物油基聚氨酯等可再生聚合物材料,以提升肥料利用效率(efficiency,强度 6.03)<sup>[34]</sup>。

在热固性树脂领域中包括聚氨酯及环氧树脂等包膜材料。尽管聚氨酯未在早期关键词中显性突现,但其凭借原料易得性、加工便捷性、设备投资需求低等优势,在包膜材料领域实现快速发展。同时环境问题贯穿研究全程,尤其是一氧化二氮(nitrous oxide emissions,强度 4.24)和二氧化碳(carbon dioxide,强度 6.9)的排放<sup>[35]</sup>。2013 年后,一

氧化二氮排放的突现强度与包膜尿素研究同步上升,表明研究者意识到传统氮肥对温室效应的贡献,并通过包膜技术抑制硝化-反硝化反应链,减少气体释放。此外,叶面施肥(foliar application,强度 4.04)近几年的突现<sup>[36]</sup>,显示肥料从根系主导的土施模式向叶面营养补给途径的延伸。2022 年后,缓释肥料(slow-release fertilizer,强度 7.77)的突现强度达峰值,标志其在农业等领域研究中的关注度达到高峰。缓释肥料是一类通过物理或化学手段调控养分释放速率的新型肥料,能够显著减少施肥频次。包膜肥料是缓释肥料的核心分支,通过调节膜层设计实现养分缓释,其在提升氮素利用率、减少一氧化二氮排放等方面展现出明显优势。相比之下,传统肥料(如普通尿素)是未经结构改性的速溶肥料,养分释放速率不可控,易造成氮素损失、肥效不稳定及环境污染等问题。因此,缓释肥料这一突现强度峰值上升,标志着肥料技术正由“粗放速效”向“精准释放”范式转型。

2.5.4 时间线视图分析

为探究包膜肥料研究热点的时序演进特征,构建了关键词时间线聚类图谱,X轴为引文发表年份,Y轴为聚类编号(图 6)。包膜肥料研发的文献早期集中在 2010 年,大多数据集中在#0~#2 聚类,说明氮利用效率(#0)、一氧化二氮排放(#1)和控释尿素(#2)这 3 类领域较为重要。氮利用效率(#0)是衡量肥料效果的关键指标,其提升不仅能减少氮肥浪费,还能降低农业生产成本。一氧化二氮排放(#1)作为温室气体的重要组成部分,其控制对于应对气候变化意义重大。控释尿素技术(#2)则通过精准释放氮元素,平衡了前两者的需求。

2.5.5 生物基聚氨酯包膜肥料的技术和发展趋势

在全球石油资源约束和可持续发展需求双重驱动下,以木质素、壳聚糖、淀粉等为原料的生物基聚氨酯包膜肥料迅速兴起,这类材料具有可降解性强、环境友好、原料来源广泛等优势,契合绿色农业发展理念,但其推广仍面临多重困境。

例如生物基聚氨酯包膜材料因亲水性强易引发吸水膨胀和非成膜物质析出问题,导致孔隙率升高和养分释放失控。针对这一问题,研究者通过超疏水材料构建微纳米多级粗糙结构(如纳米粒子掺杂)、使用低表面能材料(如硅烷)降低膜材表面能以此对生物基聚氨酯包膜材料进行改性,提高包膜的疏水性,显著延缓水分渗透,延长养分释放。

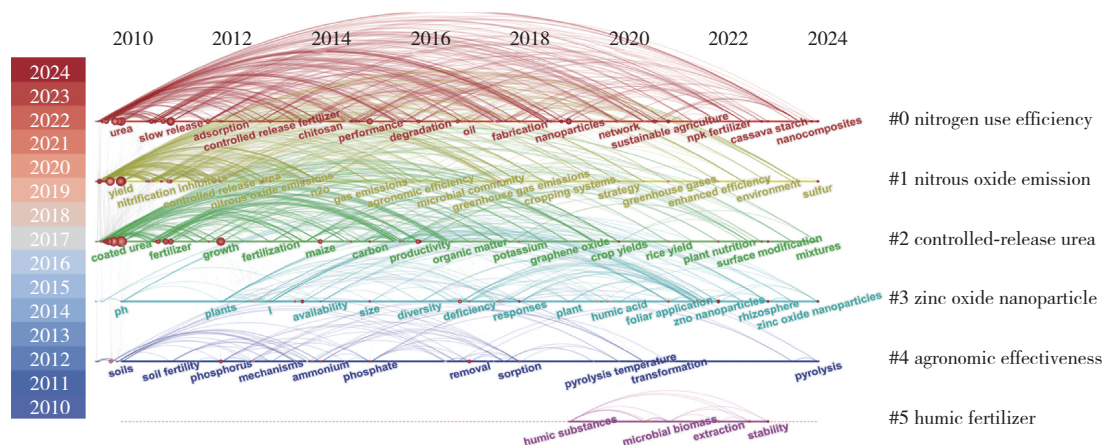


图6 2010—2024年包膜肥料研究关键词时间线聚类图谱

Fig. 6 Keywords timeline clustering map of coated fertilizers research from 2010 to 2024

Liang 团队<sup>[37]</sup>采用低成本、无毒的纳米炭黑对蓖麻油基聚氨酯包膜进行改性,通过一步合成策略制备了超疏水性的聚氨酯/炭黑纳米复合材料。该包膜材料表面接触角高达  $152.6^\circ$ ,粗糙度达  $259\text{ nm}$ ,并在玉米幼苗盆栽试验中表现出优异的作物生长促进效果。此外,Liang 团队<sup>[38]</sup>在另一项研究中进一步提出双重超疏水改性策略,利用纳米硬脂酸- $\text{Mg}(\text{OH})_2$  (STA- $\text{Mg}(\text{OH})_2$ )和石蜡共同改性植物油基聚氨酯,构建出一种具有“动态超疏水性”的低涂层包膜肥料。该包膜在释放过程中即使发生膨胀,仍可维持高疏水状态,仅  $1.5\%$  (质量分数)的涂层便实现了 33 天的氮释放周期,是目前报道中包膜量最低的控释包膜肥料之一。其中,纳米颗粒可在水-包膜材料界面形成稳定的空气屏障,延缓水分渗透;石蜡则帮助固定 STA- $\text{Mg}(\text{OH})_2$  颗粒,并赋予包膜结构持续的动态疏水性。Wang 等<sup>[39]</sup>则通过硅氧烷在埃洛石纳米管表面水解缩合反应合成具有超疏水特性的埃洛石纳米管 (SHTs),并与植物油基聚氨酯复合,制得生物质基纳米复合包膜 (SHPU)。SHTs 的引入显著提高了包膜材料的纳米级表面粗糙度,并通过疏水性硅烷降低了表面能,提升了接触角和疏水性。结果表明,SHPU 制备的包膜控释肥料在初期养分释放方面表现更为缓慢,释放周期也得以延长。这些超疏水改性技术为开发绿色高效包膜肥料提供了新范式。

然而,目前生物基聚氨酯包膜肥料仍面临以下问题未解决:①生物基原料预处理复杂,杂质波动导致膜材性能不稳定;②实验室释放期与田间实际释放偏差显著;③膜材破损结构的修复能力研究不足。

未来生物质包膜肥料需聚焦以下方面:持续开发低成本废弃物,缩短原料预处理过程,并确保原材料的性能稳定性;设计温度/pH/湿度多因素响应膜层,实现更高的肥料效率;探索室温下动态共价键可逆交换反应,加强该技术的稳定性和大规模应用性;研究功能性包膜肥料,实现多种功能(如改良土壤等)。

## 2.6 高被引文献分析

2023—2024 年包膜肥料领域的高被引文献可反映该领域的近年来前沿热点与发展趋势。如表 5 可知,综述性研究因其系统性总结与前瞻性分析备受关注,例如 Lawrencina 等通过对比无机/有机材料及合成/天然聚合物在包膜肥料中的应用,梳理了释放机制与数学模型的核心问题,为技术优化提供了理论框架,其高被引源于对材料选择与机理研究的全面覆盖;Fertahi 等和 Vejan 等的综述则聚焦生物聚合物及纳米复合材料的创新应用,尤其强调可生物降解包膜肥料的环境友好性,契合全球可持续农业需求,成为该领域的重要风向标。Chen 等针对木质素基肥料的系统综述,阐明了其化学改性与包膜工艺的协同作用,其被引热度反映了木质素作为绿色聚合物材料的巨大潜力。

在研究性文献中,复合包膜设计与生物基材料的创新应用成为核心焦点。例如 Tian 团队开发的生物基聚氨酯/环氧树脂/聚烯烃蜡复合包膜,通过多层结构优化释放性能并减少石油基材料依赖,其基于响应曲面法的数学模型为精准调控养分释放提供了新形式;Ei Assimi 等提出了壳聚糖-黏土/石蜡双层包膜体系,该体系将溶胀行为与疏水性结合,实现了对磷扩散控制,同时兼具生物降解性和

表5 2023—2024年包膜肥料研究被引频次前10的文献  
Table 5 Top 10 cited papers on coated fertilizers research from 2023 to 2024

| 论文题目                                                                                                                                                                                              | 第一作者           | 期刊名称                                               | 被引频次 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|----------------------------------------------------|------|
| Controlled release fertilizers: a review on coating materials and mechanism of release                                                                                                            | Lawrencia Dora | Plants                                             | 67   |
| Recent trends in organic coating based on biopolymers and biomass for controlled and slow release fertilizers                                                                                     | Fertahi Saloua | Journal of Controlled Release                      | 45   |
| Controlled release fertilizer: a review on developments, applications and potential in agriculture                                                                                                | Vejan Pravin   | Journal of Controlled Release                      | 45   |
| Biobased polyurethane, epoxy resin, and polyolefin wax composite coating for controlled-release fertilizer                                                                                        | Tian Hongyu    | ACS Applied Materials & Interfaces                 | 36   |
| Coating materials for slow release of nitrogen from urea fertilizer: a review                                                                                                                     | Beig Bilal     | Journal of Plant Nutrition                         | 31   |
| Sustainable coating material based on chitosan-clay composite and paraffin wax for slow-release DAP fertilizer                                                                                    | Ei Assimi Taha | International Journal of Biological Macromolecules | 27   |
| Research progress in lignin-based slow/controlled release fertilizer                                                                                                                              | Chen Jing      | ChemSusChem                                        | 25   |
| Biodegradable hydrogels of cassava starch-g-polyacrylic acid/natural rubber/polyvinyl alcohol as environmentally friendly and highly efficient coating material for slow-release urea fertilizers | Tanan Warunee  | Journal of Industrial and Engineering Chemistry    | 25   |
| The effects of controlled release urea on maize productivity and reactive nitrogen losses: A meta-analysis                                                                                        | Zhang Wushuai  | Environmental Pollution                            | 24   |
| Bio-based elastic polyurethane for controlled-release urea fertilizer: Fabrication, properties, swelling and nitrogen release characteristics                                                     | Liu Jiali      | Journal of Cleaner Production                      | 23   |

微生物碳源功能,体现了包膜肥料在提升农业可持续性和资源利用率方面的重要潜力,其“材料-机制-环境响应”一体化设计思路被广泛借鉴。Tanan团队以淀粉基半互穿水凝胶与石蜡复合包膜实现了低成本缓释,其释放动力学模型与农业经济性评估为产业化提供了直接参考;Liu等利用废弃棕榈油合成弹性生物基聚氨酯包膜材料,将释放周期延长至80天,凸显了生物质资源循环利用的技术优势。此外,Zhang等的全球荟萃分析通过大数据验证了控释尿素在提升玉米产量与减少氮损失方面的双重效益,其结论为政策制定与田间实践提供了关键证据。

包膜肥料领域当前研究趋势呈现3大特征:一是生物基/可降解材料替代传统石油基包膜材料已成主流;二是复合包膜结构与纳米改性技术深度融合,通过物理阻隔与化学调控协同延长养分释放;三是研究范式从单一性能优化转向“材料设计-机理建模-环境效应-经济成本”多维评价体系。这些高被引文献共同指向包膜肥料向绿色化、智能化、高效化发展的必然路径。

3 结论

在过去15年(2010—2024年),全球包膜肥料研

究呈现出快速发展的态势。尤其是近年来随着绿色农业政策的推动以及高效肥料需求的迅速增长,包膜肥料成为平衡粮食安全与生态可持续性的关键技术。从技术发展来看,学科交叉(化学、环境和农学等)构建了“释放机制-环境效应-材料创新”的技术框架。同时,包膜肥料研究重心已从早期的高分子材料向生物基材料及复合纳米材料拓展,但目前经济作物应用覆盖率不足,且全生命周期环境评估框架尚未建立。

未来包膜肥料的研究需从“精准化-功能化-低碳化”3个方向实现突破。持续开发低成本可降解包膜材料以突破产业化瓶颈,量化包膜肥料全生命周期环境效益,构建区域性减排效果评估框架,拓展经济作物/果园场景应用,以此来推动可持续农业发展。同时,亟需加强产学研合作,推动实验室成果向产业端的价值转化。

参考文献:

[1] BROWN M E, HINTERMANN B, HIGGINS N. Markets, climate change, and food security in West Africa [J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43 (21): 8016-8020.  
[2] WU L, LIU M Z, LIANG R. Preparation and properties

- of a double-coated slow-release NPK compound fertilizer with superabsorbent and water-retention[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(3): 547-554.
- [3] SABERI RISEH R, VATANKHAH M, HASSANISAADI M, et al. Increasing the efficiency of agricultural fertilizers using cellulose nanofibrils: a review[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2023, 321: 121313.
- [4] EDDARAI E M, EL MOUZAHIM M, RAGAOUI B, et al. Review of current trends in chitosan based controlled and slow-release fertilizer: from green chemistry to circular economy[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 278: 134982.
- [5] BEIG B, NIAZI M B K, JAHAN Z, et al. Coating materials for slow release of nitrogen from urea fertilizer: a review[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2020, 43(10): 1510-1533.
- [6] TIAN H Y, ZHANG L N, SUN X, et al. Self-healing modified liquefied lignocellulosic cross-linked bio-based polymer for controlled-release urea[J]. *Industrial Crops and Products*, 2022, 186: 115241.
- [7] 柳丽敏, 张思虹, 支云飞, 等. 包膜肥料最新研究进展[J]. *现代化工*, 2018, 38(7): 26-30.
- LIU L M, ZHANG S H, ZHI Y F, et al. Latest research progress of coated fertilizer[J]. *Modern Chemical Industry*, 2018, 38(7): 26-30. (in Chinese)
- [8] 卜义争. 改性玉米秸秆基聚氨酯包膜尿素研制及释放机理研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2023.
- BU Y Z. Development and release mechanism of modified corn stalk - based polyurethane coated urea [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2023. (in Chinese)
- [9] 史万杰, 熊海蓉, 文祝友, 等. 缓/控释肥研究现状及发展趋势[J]. *河南化工*, 2020, 37(8): 8-11.
- SHI W J, XIONG H R, WEN Z Y, et al. Research status and development trends of slow/controlled release fertilizer[J]. *Henan Chemical Industry*, 2020, 37(8): 8-11. (in Chinese)
- [10] 靳莹莹, 孙瑞峰, 苏聃, 等. 包膜型缓控释肥料的国内外研究概况[J]. *蔬菜*, 2016(9): 40-44.
- JIN Y Y, SUN R F, SU D, et al. Research overview of coated slow/controlled - release fertilizers at home and abroad[J]. *Vegetables*, 2016(9): 40-44. (in Chinese)
- [11] 陈冠霖, 赵其国, DANSO P O, 等. 包膜型缓/控释肥料研究现状及其在功能农业中的应用展望[J]. *肥料与健康*, 2021, 48(3): 1-6.
- CHEN G L, ZHAO Q G, DANSO P O, et al. A review of coated slow/controlled release fertilizers and its application in functional agriculture [J]. *Fertilizer & Health*, 2021, 48(3): 1-6. (in Chinese)
- [12] 陈悦, 陈超美, 刘则渊, 等. CiteSpace 知识图谱的方法论功能[J]. *科学学研究*, 2015, 33(2): 242-253.
- CHEN Y, CHEN C M, LIU Z Y, et al. The methodology function of CiteSpace mapping knowledge domains [J]. *Studies in Science of Science*, 2015, 33(2): 242-253. (in Chinese)
- [13] DE VARGAS V H, MARCZAK L D F, FLÔRES S H, et al. Morphology and functional properties of gelatin-based films modified by UV radiation and bacterial cellulose nanofibers [J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2023, 46(9): e14399.
- [14] United Nations. Transforming our world: the 2030 agenda for sustainable development[R/OL]. (2015-09-25) [2025-03-15]. <http://docs.un.org/en/A/RES/70/1>.
- [15] MA X X, CHEN J Q, YANG Y C, et al. Siloxane and polyether dual modification improves hydrophobicity and interpenetrating polymer network of bio-polymer for coated fertilizers with enhanced slow release characteristics [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 350: 1125-1134.
- [16] 罗崇佳, 陈敏鹏. 利用碳交易推动农业减排的理论与路径分析: 国际经验及其对中国的启示[J]. *气候变化研究进展*, 2023, 19(6): 761-770.
- LUO C J, CHEN M P. Theoretical and pathway analysis of utilizing carbon trading to promote agricultural emission reductions: international experience and its implications for China [J]. *Climate Change Research*, 2023, 19(6): 761-770. (in Chinese)
- [17] 吴舒. 氮肥颗粒的缓释及防结块性能研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2019.
- WU S. Study on the slow release and anti caking properties of nitrogen fertilizer particles [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2019. (in Chinese)
- [18] ULUSSEVER T, ERTUĞRUL H M, KILIÇ DEPREN S, et al. Estimation of impacts of global factors on world food prices: a comparison of machine learning algorithms and time series econometric models [J]. *Foods*, 2023, 12(4): 873.
- [19] KHATIWADA D, PALMÉN C, SILVEIRA S. Evaluating the palm oil demand in Indonesia: production trends, yields, and emerging issues[J]. *Biofuels*, 2021, 12(2): 135-147.

- [20] 施卫省, 杜芳林, 刘建民. 土壤水含量、温度对松香甘油酯包膜复合肥养分释放动力学特性的影响[J]. 磷肥与复肥, 2021, 36(4): 14–16.
- SHI W S, DU F L, LIU J M. Effects of soil water content and temperature on nutrient release dynamic characteristics of rosin glyceride coated compound fertilizer [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2021, 36(4): 14–16. (in Chinese)
- [21] EL ASSIMI T, BLAŽIĆ R, VIDOVIĆ E, et al. Poly(lactide)/cellulose acetate biocomposites as potential coating membranes for controlled and slow nutrients release from water-soluble fertilizers [J]. Progress in Organic Coatings, 2021, 156: 106255.
- [22] LU H, TIAN H Y, LIU Z G, et al. Polyolefin wax modification improved characteristics of nutrient release from biopolymer-coated phosphorus fertilizers [J]. ACS Omega, 2019, 4(23): 20402–20409.
- [23] IBRAHIM K A, NAZ M Y, SHUKRULLAH S, et al. Controlling nitrogen pollution via encapsulation of urea fertilizer in cross-linked corn starch [J]. BioResources, 2019, 14(4): 7775–7789.
- [24] LIPIN A A, LIPIN A G. Prediction of coating uniformity in batch fluidized-bed coating process [J]. Particuology, 2022, 61: 41–46.
- [25] 王艳, 郑西来, 段玉环, 等. 包膜肥料氮素释放特性的影响因素研究 [J]. 土壤与作物, 2017, 6(1): 73–79.
- WANG Y, ZHENG X L, DUAN Y H, et al. Factors affecting nitrogen release characteristics to coated fertilizers [J]. Soils and Crops, 2017, 6(1): 73–79. (in Chinese)
- [26] HAO M J, LIU M Y, WANG Q Y, et al. Manganese and zinc foliar applications increase nutrient content and mitigate cadmium-induced growth inhibition in spring wheat [J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2024, 33(5): 5725–5734.
- [27] ZHOU Y H, ZHU X K, GUO W S, et al. Effects of climate change on wheat yield and nitrogen losses per unit of yield in the middle and lower reaches of the Yangtze River in China [J]. Atmosphere, 2023, 14(5): 824.
- [28] 宋琪, 周杨, 朱红惠, 等. 微生物肥料研究领域发展现状与趋势 [J]. 应用与环境生物学报, 2023, 29(3): 783–792.
- SONG Q, ZHOU Y, ZHU H H, et al. Present situation and trends in the field of microbial fertilizer research [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2023, 29(3): 783–792. (in Chinese)
- [29] 孟健. 腐殖酸肥料在农业生产中的应用进展 [J]. 新农业, 2024(12): 60–61.
- MENG J. Application progress of humic acid fertilizers in agricultural production [J]. Xin Nongye, 2024(12): 60–61. (in Chinese)
- [30] 齐明阳, 王秀峰, 冯文博, 等. 不同纳米材料在纳米肥料上的应用研究进展 [J]. 肥料与健康, 2023, 50(2): 1–5, 23.
- QI M Y, WANG X F, FENG W B, et al. Research progress on application of different nanomaterials in nano-fertilizers [J]. Fertilizers & Health, 2023, 50(2): 1–5, 23. (in Chinese)
- [31] QIAN H Y, YUAN Z Q, CHEN N N, et al. Legacy effects cause systematic underestimation of  $N_2O$  emission factors [J]. Nature Communications, 2025, 16: 2775.
- [32] MA Q, QIAN Y S, YU Q Q, et al. Controlled-release nitrogen fertilizer application mitigated N losses and modified microbial community while improving wheat yield and N use efficiency [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2023, 349: 108445.
- [33] ZHANG Y J, TAO W L, ZHU K Y, et al. Coated and uncoated urea incorporated with organic fertilizer improves rice nitrogen uptake and mitigates gaseous active nitrogen loss and microplastic pollution [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2024, 375: 109201.
- [34] WANG C, SONG S H, DU L Q, et al. Nutrient controlled release performance of bio-based coated fertilizer enhanced by synergistic effects of liquefied starch and siloxane [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 236: 123994.
- [35] HASSAN M U, HUANG G Q, ARIF M S, et al. Can urea-coated fertilizers be an effective means of reducing greenhouse gas emissions and improving crop productivity? [J]. Journal of Environmental Management, 2024, 367: 121927.
- [36] WANG S X, LI M, ZHANG X Y, et al. Impact of foliar and root application of phosphorus on zinc concentration of winter wheat grown in China [J]. Crop & Pasture Science, 2019, 70(6): 499–508.
- [37] LIANG D S, WANG Y, SHI H B, et al. Controllable release fertilizer with low coating content enabled by superhydrophobic castor oil-based polyurethane nanocomposites prepared through a one-step synthetic strategy [J]. Industrial Crops and Products, 2022, 189: 115803.

- [38] LIANG D S, SHI H B, LU Q M, et al. Controlled-release fertilizers with an ultralow coating content [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2023, 11(9): 4527–4538.
- [39] WANG C, SONG S H, YANG Z M, et al. Hydrophobic modification of castor oil-based polyurethane coated fertilizer to improve the controlled release of nutrient with polysiloxane and halloysite[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2022, 165: 106756.

## Trends and hot spots of research on coated fertilizers based on CiteSpace

XIA BaoXin<sup>1</sup> ZHENG Lei<sup>2</sup> PAN Xuan<sup>1</sup> ZHANG Zhen<sup>1</sup> CAI GuoQiang<sup>1</sup> LIN AiJun<sup>1</sup>  
QIE HanTong<sup>1\*</sup> XIAO Yong<sup>1\*</sup>

(1. College of Chemical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029;

2. Shandong No. 3 Exploration Institute of Geology and Mineral Resources, Yantai 264004, China)

**Abstract:** Enhancing green practices and increasing fertilizer use efficiency are critical to addressing global food security challenges, driving increased research into coated fertilizers to sustainably boost crop productivity. A 15-year bibliometric analysis using CiteSpace was performed on Web of Science data to reveal research trends and hot-spots. Publications on coated fertilizers have steadily increased (2010—2024), led by institutions such as Shandong Agricultural University and the Chinese Academy of Sciences, across fields including agronomy and environmental science. Current research focuses on optimizing coatings to reduce costs and enhance biodegradability, with trends emphasizing efficiency, low carbon emissions, and intelligent delivery systems. Future research should emphasize long-term field trials, modeling, and environmental benefit assessment to support region-specific frameworks for emission reduction. This study provides a reference for future development directions of coated fertilizers.

**Key words:** coated fertilizers; CiteSpace; development trend; atlas

(责任编辑:张 杰 于少云)