

播种机排种技术研究态势分析与趋势展望

郑娟¹, 廖宜涛^{1,2*}, 廖庆喜^{1,2}, 孙迈¹

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070)

摘要: 针对现有播种机排种技术研究态势缺乏定量分析, 热点、重点和难点问题系统性和全面性梳理不充分等问题, 该研究对已有排种技术相关文献进行计量学分析, 从科研生产力、影响力和发展力等方面可视化呈现排种技术的研究态势, 总结排种技术发展脉络和研究热点, 并介绍国内外先进农机企业基于前沿排种技术开发的产品, 分析其产业化应用情况和未来发展趋势。结果表明: 排种技术呈波浪发展, 当前处于高速稳态发展期; 中国科研产出较多, 影响力仅次于美国; 代表性期刊有《Biosystems Engineering》《Computers and Electronics in Agriculture》和《农业工程学报》《农业机械学报》等; 高影响力学者和机构围绕不同地区的典型农作物开展排种技术研究, 推动了排种技术进步和机械化水平提升; 排种技术发展脉络以实现功能为主的单一主题研究逐渐过渡到机构优化、机理分析、虚拟仿真等垂直细分主题的深入探索, 现阶段排种技术的研究热点主要集中在高速兼用排种、播种均匀性、DEM-CFD 耦合仿真、控制和监测系统开发。排种技术应用注重高效高性能装备研发, 国内排种新产品研发处于跟跑阶段; 随着新兴技术、多学科交叉融合和创新思维的应用, 排种技术研究向高速高性能、精准精确、数字化、智能化等方面发展。研究可为把握排种技术领域研究现状、未来发展趋势和播种机具创新提供参考。

关键词: 农业机械; 播种机; 排种技术; 研究热点; 发展趋势; 信息可视化

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.24.001

中图分类号: S223.2⁺3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2022)-24-0001-13

郑娟, 廖宜涛, 廖庆喜, 等. 播种机排种技术研究态势分析与趋势展望[J]. 农业工程学报, 2022, 38(24): 1-13. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.24.001 <http://www.tcsae.org>
Zheng Juan, Liao Yitao, Liao Qingxi, et al. Trend analysis and prospects of seed metering technologies[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(24): 1-13. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.24.001 <http://www.tcsae.org>

0 引言

农业机械化是农业现代化的重要标志, 国际国内发展经验表明, 农业机械引发了农业生产方式的根本变革, 大幅度提高了农业劳动生产率, 有力保障了世界农业发展和食物安全。播种是农业生产的关键环节之一, 高性能播种技术与装备是现代农业生产的基础。目前国内主要农作物耕种收综合机械化水平超过 72%^[1], 但播种环节还存在区域间发展不平衡、作物间发展不平衡、技术发展不平衡等问题。目前全国小麦机播水平超过 90%^[2-3]、玉米大豆机播水平约 80%^[2-3], 但智能化程度偏低, 作业性能严重依赖操纵人员经验^[4]; 油菜机播水平不足 40%^[2-3], 蔬菜作物机械化播种水平更低。

排种技术实现机械化播种的关键前提, 决定播种作业质量和作物产量^[5]。近年来, 国内科研人员对排种技术与装备做了大量研究, 如机械式、气力式或机械气力组合式等多种排种原理探索^[6-8], 结合不同种子特性和适用排种原理进行相应排种装置结构设计, 分析种子运动路径、受力情

况, 进行性能验证试验^[9-10]。随着计算机技术与现代设计方法发展, 排种过程仿真模拟与结构优化设计研究增多, 主要集中在具体结构设计、机理分析、性能试验和仿真模拟等方面^[11-12], 相关综述性研究主要聚焦于某一作物或细分技术方向的研究进展^[13-17], 对排种技术领域的知识结构、研究热点和发展趋势等缺乏系统性分析和定量化研究。

文献计量方法可客观、量化地对科技论文进行分析, 通过数据统计、共词分析、可视化知识图谱得到研究领域分布结构和变化规律等, 广泛应用于地理学、生态学、图书馆学等多个学科研究中^[18-21], 农业工程领域也开展了基于文献计量的数据驱动分析, 如农业机器人^[22]、土地整理工程^[23]、智慧农业^[24]等。

本文对排种技术领域国内外整体发展情况、主要研究机构和学者、热门期刊和论文、同行研究水平等进行分析, 阐释排种技术领域的科研生产力、影响力和发展力, 同时基于数据分析排种技术发展态势, 理清当前研究主要方向, 介绍国内外先进农机公司最新产品和产业规模, 讨论未来排种技术产业发展趋势, 为进一步促进排种技术研究提供参考。

1 研究方法 with 指标

1.1 数据库选取及检索结果

为保证数据的全面性和可靠度, 本文选取 WoS 核心合集数据库子库 SCI-E 和中国知网 (China National Knowledge Infrastructure) EI (The Engineering Index)、

收稿日期: 2022-06-16 修订日期: 2022-12-10

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFD2000403); 国家自然科学基金项目 (51975238); 国家油菜产业技术体系专项 (CARS-12)

作者简介: 郑娟, 博士生, 研究方向为油菜播种技术与装备。

Email: zhengjuan@webmail.hzau.edu.cn

*通信作者: 廖宜涛, 教授, 博士生导师, 研究方向为现代农业装备设计与测控。Email: liaoyitao@mail.hzau.edu.cn

CSCD (Chinese Science Citation Database) 期刊数据库。WoS 数据库引文数量多, 涵盖文章全面, 是国际公认的进行科学统计和科学评价的主要检索工具^[25]; 中国知网是国内最有影响力的学术期刊数据库。综合考虑文献质量, 本文数据采集自 2000 年始。

英文数据库检索时, 在 WoS 核心合集 SCI-E 子数据库中利用高级检索功能, 精确检索 2000 年 1 月 1 日—2022 年 12 月 1 日包含排种主题的文献, 经 CiteSpace 软件筛选, 得到有效文献; 中文数据库精确检索主题为排种的 EI、CSCD 期刊文献。对所有文献逐篇筛选, 查看重复和主题相关性。检索式及结果如表 1, 检索日期为 2022 年 12 月 1 日。

表 1 检索式及数据库检索结果

数据库 Databases	检索式 Search formula	有效文献数 Number of valid literatures
WoS 核心合集 SCI-E 数据库	((TS=(seed)) AND TS=(metering)) OR ((TS=(air-delivery system) AND TS=(air seeder)) OR (TS=(distribution system of the grain seeder))	256
中国知网 (CNKI)	(主题%='排种' or 题名%='排种') AND ((年 Between('2000','2022')) AND ((EI 收录刊='Y') OR (CSCD 期刊='Y'))); 检索范围: 期刊	859

1.2 分析方法与计量指标

本文以排种技术相关文献为对象, 采用文献计量学方法, 借助 WoS 和 CNKI 数据库自带的文献计量分析功能、文献计量分析平台 Bibliometric 和可视化软件 CiteSpace 进行分析, 并根据知识图谱可视化分析定量结果, 对排种技术研究热点和发展趋势做出总结和讨论。为具体展现排种技术的研究态势, 客观反映相关科研工作的内容与成果, 结合本领域研究的特点和实际情况, 从科研生产力、影响力和发展力进行分析^[26], 并介绍排种技术产业最新进展, 具体的计量指标和研究思路如图 1 所示。

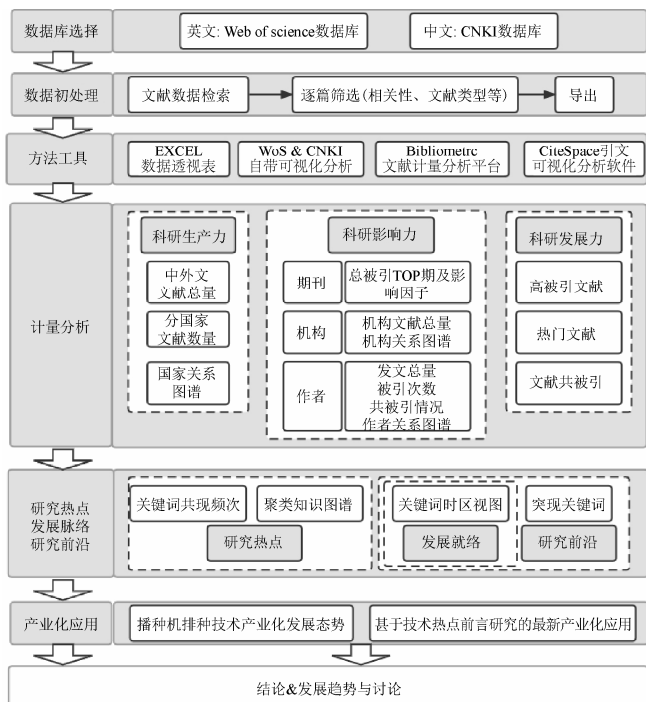


图 1 研究路线图

Fig.1 Research roadmap

科研生产力主要包括发表的文献总量、各国文献数量和各国关联图谱等指标, 反映排种技术发展阶段规律变化和主要研究国家对学术交流的贡献。

科研影响力包括期刊、研究机构和作者影响力, 主要有文献分布期刊及影响因子, 机构文献数量和关联图谱, 作者发文总量、总被引频次、篇均被引频次、共被引频次等计量指标, 评估学术成果的业内价值。

科研发展力包括高被引论文、热门论文和文献共被引等。高被引论文是国际上普遍采用的科研水平和潜力评价标准, 可客观反映论文的影响力和在学术交流中的作用及地位; 热门论文是发表后短期内产生很大影响的论文, 一定程度上说明论文成果是研究人员当前关注的热点; 文献共被引将文献信息中的核心内容按频次高低排布, 体现研究发展动向和研究热点, 代表本领域不同主题的发展力情况。

2 结果与分析

2.1 科研生产力分析

2.1.1 文献数量变化规律分析

论文发表数量变化一定程度可反映研究领域的发展阶段和趋势。2000 年 1 月 1 日—2022 年 12 月 1 日 WoS (SCI-E) 和 CNKI (EI&CSCD) 数据库关于排种技术的发表论文总量如图 2 所示。国内期刊发文数量呈先上升后小幅度下降趋势, 2008 年前处于缓慢发展阶段, 2008—2016 年经历快速发展期, 2016 年至今处于波动稳态期。国外期刊发文数量整体呈上升趋势, 但发文数量较国内低, 说明近年来国内对农业机械化的重视程度和扶持力度较大, 科研人员对排种技术的研究增多。

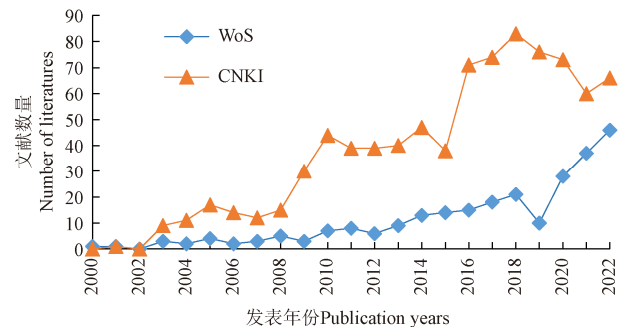


图 2 2000—2022 年排种技术相关文献数量

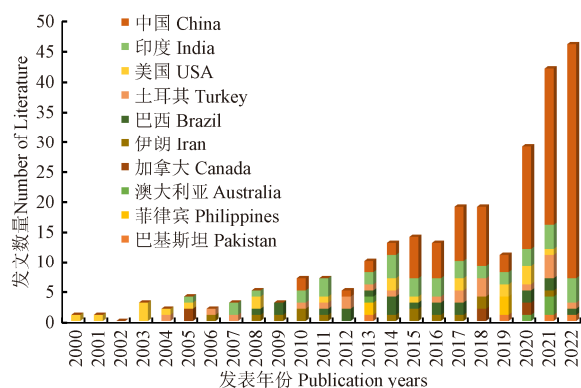
Fig.2 Literature number related to seed metering technology during 2000-2022

2.1.2 基于 WoS 的各国家文献数量及知识图谱分析

不同国家发表的文献数量变化可看出其对本领域研究的重视程度, 国家间关联知识图谱可反映文献数量、各国家在该领域的中心位置等。对 SCI 数据库进行各国家历年文献数量变化统计并绘制各国家间关联知识图谱如图 3 所示。

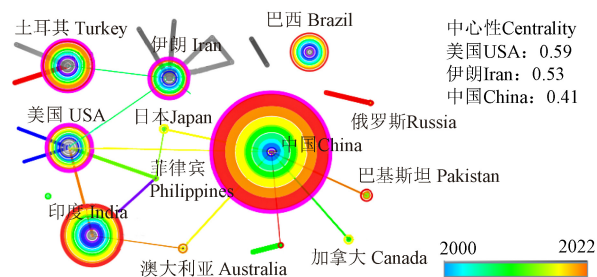
由图 3 可知, 在排种技术领域发文量前 4 的国家分别是中国、印度、美国、土耳其, 同时也是研究相对活跃的国家, 持续产出, 未出现明显断层。美国对排种技术的研究起步早, 几乎每年都有论文产出, 且中介中心

性最高，处于该技术研究的核心位置。中国较美国、印度、伊朗、巴西的研究起步晚，2010 年开始在国际期刊上发表相关论文，之后呈指数性上升趋势，2020 年至今年均发文数量是其他国家的 2 倍，研究热度未减，科研生产力逐步上升。



a. 各国家发表文献数量

a. The literatures number of each country



b. 国家间的关联知识图谱

b. Associated knowledge graph between countries

注：知识图谱中节点大小代表论文数量频次，节点周围连线表示国家间存在联系，连线越多中介中心性越高，连线越粗则联系越密切，紫环代表关键枢纽。

Note: The size of the nodes in the knowledge graph represents the number and frequency of papers, and the lines around the nodes indicate connections between countries. The more connections, the higher the betweenness centrality. The thicker lines indicate closer connections, and the purple ring represents a key hub.

图 3 2000—2022 年各国文献数量统计及国家间关联知识图谱

Fig.3 Statistics of literature number and associated knowledge graph of countries from 2000 to 2022

综上所述，排种技术呈高速稳态发展态势。美国较早开始研究，奠定了其在该领域学术交流中的中心地位，近年来中国多项支撑政策的制定落实使得科技投入与产出飞速增长，发展前景较大，对学术交流的贡献递增，影响力仅次于美国。

2.2 科研影响力分析

2.2.1 基于 WoS 的代表性期刊及期刊影响力分析

分析文献发表期刊有利于发现本领域研究的热门期刊，也可用于最新文献的信息追踪，对研究人员信息获取有较高参考价值。影响因子是衡量学术期刊水平的重要指标，影响因子越大期刊影响力越大，文献的学术价值与应用价值越大，因此本文中期刊影响力采用期刊综合影响因子表示。

对 WoS 数据库相关文献进行论文发表期刊及影响力统计分析，因涉及期刊较多，仅列举总被引次数前 10 的期刊进行归纳总结，如表 2 所示。发文总数排名前 10 期刊并未全部入选总被引前 10，说明发文数量与被引情况

不完全成正相关；《Applied Soft Computing》《Powder Technology》平均被引次数较多，均在 JCR Q1 区，也是本领域关注期刊。

表 2 WoS 数据库总被引前 10 的期刊及其影响力

Table 2 The top 10 journals with total citations in WoS database and their impact

期刊 Journal	文献总数 (排序) Total number of articles (Sort)	总被引 用次数 Total number of citations	平均被引 次数(排名) Citation average (Sort)	5 年期刊影 响因子 5-year journal impact factor	JCR 分 区 JCR division
International Journal of Agricultural and Biological Engineering	39 (1)	165	4.23 (9)	2.232	Q2
Computers and Electronics in Agriculture	20 (3)	155	7.75 (4)	6.817	Q1
Biosystems Engineering	9 (6)	113	12.56 (1)	5.321	Q1
Applied Engineering in Agriculture	16 (5)	57	3.56	1.077	Q4
Measurement	2	24	12.00 (2)	4.639	Q1
Turkish Journal of Agriculture and Forestry	4	23	5.75 (7)	2.255	Q2
Transactions of the ASABE	7 (8)	17	2.43	1.390	Q3
Journal of Food Agriculture & Environment	3	14	4.67 (8)	0.484	Q4
Applied Sciences-BASEL	4	13	3.25	2.921	Q2
AMA-Agricultural Mechanization in Asia Africa and Latin America	22 (2)	13	0.59	0.306	Q4

总体上，《International Journal of Agricultural and Biological Engineering》发文数量与总被引均最高，是本领域热门期刊，《Biosystems Engineering》《Computers and Electronics in Agriculture》期刊各指标均靠前，综合影响力较高，是排种技术研究领域代表性期刊。

2.2.2 基于 CNKI 的代表性期刊及期刊影响力分析

对采集的 CNKI 数据库文献数据进行前 10 的期刊统计，如表 3。发表排种技术研究的 EI&CSCD 前 10 期刊发文总量 679 篇，可以看出，《农业机械学报》《农业工程学报》的占比大，占前 10 期刊的 83.51%，是本领域研究中的热门期刊，期刊影响力较高，其次是《中国农业大学学报》《华南农业大学学报》《华中农业大学学报》。本领域文献的期刊影响因子多集中在 1.0~3.0 间。

2.2.3 研究机构和人员影响力分析

分别对 WoS 和 CNKI 文献的研究人员进行分析。WoS 领域主要人员的发文总量、总被引次数、平均被引次数，如表 4。国内研究人员在发文总量前 10 中占比为 80%，但总被引次数跻身前 10 的只有 2 位，平均被引次数前 10 的全部是国外研究人员，说明国内研究人员的影响力相较国外有一定差距，业内认可度有待提高。平均被引次数大于 20.0 的文献^[27-29]，均主要围绕精密播种、光电传感器和播种均匀性展开。

表 3 CNKI 数据库总被引前 10 的期刊及其影响力
Table 3 The top 10 journals with total citations in CNKI database and their impact

期刊 Journal	文献总数 Total number of articles	占比 Proportion/%	综合影响因子 (2022) Composite impact factor (2022)
农业机械学报	317	46.69	3.031
农业工程学报	250	36.82	2.704
中国农业大学学报	27	3.98	1.778
华南农业大学学报	22	3.24	1.546
华中农业大学学报	21	3.09	1.451
东北农业大学学报	13	1.91	0.919
干旱地区农业研究	8	1.18	1.351
吉林农业大学学报(工学版)	7	1.03	1.137
中国农业科技导报	7	1.03	1.488
西北农林科技大学学报	7	1.03	1.232

表 4 基于 WoS 数据库排种技术领域主要研究人员
Table 4 Main researchers in the field of seeding technology based on WoS database

发文总量 Total number of literatures		总被引次数 Total number of citations		平均被引次数 Average citations	
作者 Author	文献数 Number of literatures	作者 Author	被引次数 Number of citations	作者 Author	被引次数 Number of citations
Wang Z M	11	Liao Q X	74	Wieschoff M	39.0
Liao Q X	10	Liao Y T	66	Muller J	39.0
Zang Y	9	Wang Z M	55	Singh R C	25.5
Liao Y T	8	Singh R C	51	Singh G	25.5
Luo X W	8	Singh G	51	Saraswat D C	25.5
Lei X L	7	Saraswat D C	51	Ozmerzi A	21.5
Cui T	7	Zang Y	48	Maleki M R	19.0
Xing H	7	Luo X W	46	Jafari J F	19.0
Yang L	7	Yazgi A	46	Panning J W	19.0
Yazgi A	6	Karayel D	46	Kachman S D	19.0

对 CNKI 的作者发文数量及影响力进行统计可知,廖庆喜团队的发文数量和中介中心性均最高。绘制作者联系网络知识图谱如图 4,可看出,国内排种技术研究以罗锡文、张东兴、廖庆喜为核心,罗锡文团队主要研究对象是水稻,研究工作集中在排种关键部件设计、控制系统等方面,开发的随动柔性护种组合型孔式水稻穴直播排种器、播量可调气力式水稻穴直播排种器等引领全国水稻机械化直播技术的发展。张东兴学团队主要研究对象为玉米、大豆等大籽粒作物,围绕排种结构设计、控制系统和排种过程气固两相流耦合机理等基础理论开展研究,开发了适宜不同生产需求、不同作业速度的系列精量排种器与播种控制系统,引领国内大籽粒播种技术发展。廖庆喜团队研发了正负气压组合式排种器、油麦兼用气送式排种器、机械离心式排种器等,其中正负气压组合式小粒径种子精量排种器通过负压吸附与型孔配合实现油菜单粒吸种、通过正压气吹卸种避免了机械式卸种装置损伤种子。各团队研究重点各有不同,研制的排种装置均已在生产中批量应用。

对该技术研究作者所在单位进行统计分析,从发文量看,2000 年以来, WoS 数据库中国内院校文献总量前 10 占比 60%,其中华南农业大学、华中农业大学、中国

农业大学发文量领先,但总被引频次前 10 的占比较低,说明国内研究成果较多,但影响力有待提高。国外美国堪萨斯州立大学、土耳其阿塔图尔克大学、印度农业研究院在排种技术领域发文量较其他科研院校多,阿卡德尼兹大学、爱琴海大学的发文量排名未达到前 10,但总被引频次较高,有一定影响力。CNKI 数据库中前 10 机构也是国内研究农业机械与装备的主要科研力量,目前中国农业大学、华中农业大学、东北农业大学位列前 3,在排种技术研究中领先。机构间关联知识图谱如图 5。国内排种技术研究队伍规模较国外大,源于国内外技术层次差异性,国内研究队伍以科研院校为主,国外因排种技术发展较早,多为企业主导研发。

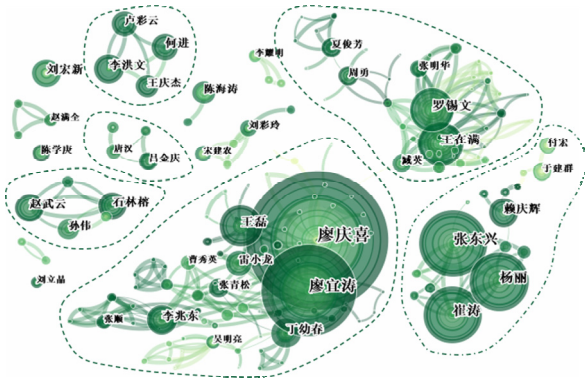


图 4 CNKI 作者联系网络知识图谱
Fig.4 CNKI author contact network knowledge graph

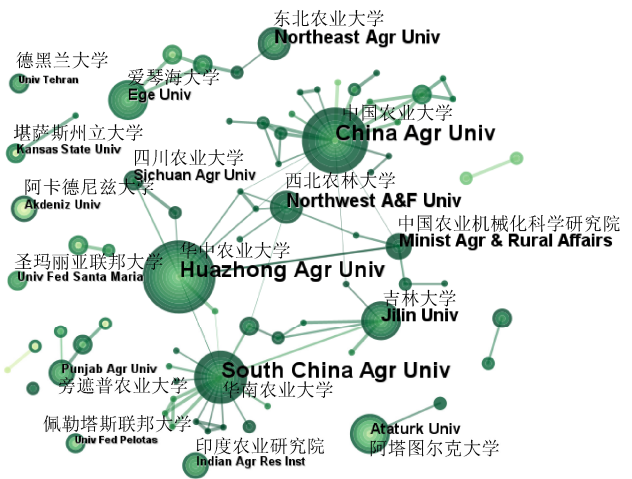


图 5 排种技术研究机构间关联知识图谱
Fig.5 Knowledge graph of inter-institutional associations for seed metering technology

WoS 文献的作者共被引聚类时间线图谱如图 6,聚类后聚类模块值 (Modularity) $Q=0.6753$, 聚类平均轮廓值 (Silhouette) $S=0.874$, 聚类结构显著且聚类可信 (一般认为 $Q>0.3$ 时聚类结构显著, $S>0.5$ 聚类合理, $S>0.7$ 聚类可信)。统计共被引作者前 10 的信息如表 5。

Kachman S D 对排种技术研究较早,影响力最大,引用 Kachman S D 的施引文献主要涉及播种分布均匀性^[28-32]、神经网络模型在排种技术中的应用^[33-34]、充种性能^[35]和排种机械-电控系统设计^[36-37]等,在 2021 年被引增幅较大,

说明作者有多学科背景或研究项目具有跨学科属性，研究成果认可度较高，影响力较大；Singh R C 和 Anantachar M 的共被引次数多且具备高影响力（中心性均>0.1），研究主题关注度较高。

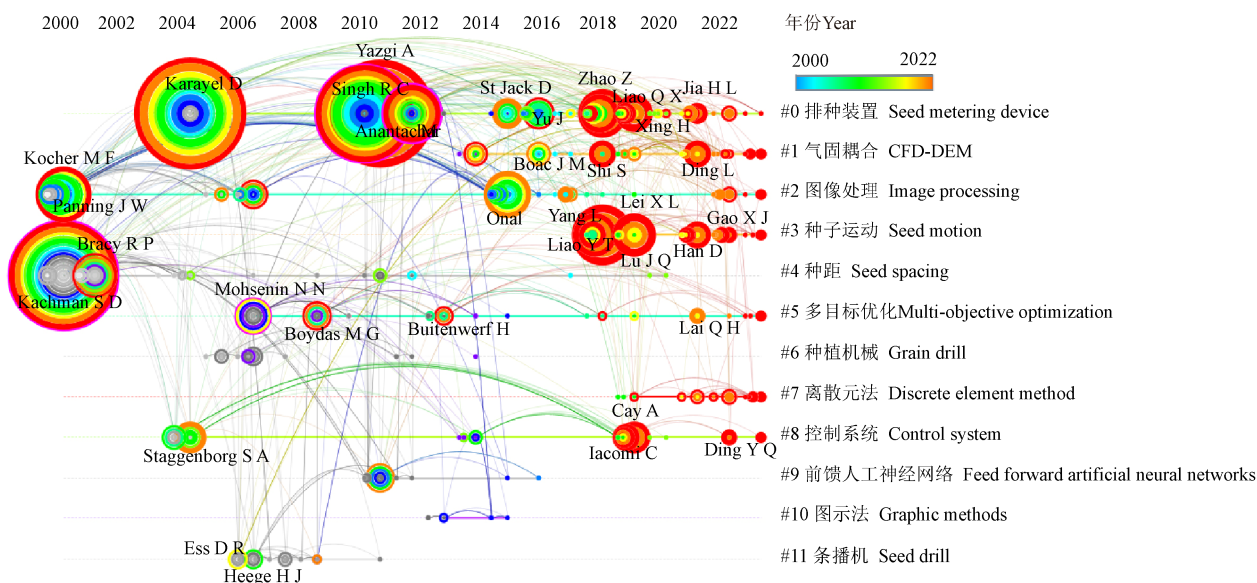
分析可知（表 5），作者共被引前 10 中聚类#0~#4 的作者占比较大，说明业内普遍关注排种装置研发、种子运动规律和播种均匀性，是热点主题。聚类#1（CFD-EDM）、#3（种子运动 Seed motion）、#7（离散元法 Discrete element method）、#8（控制系统 Control system）在近 5 年研究集中，说明这 4 类主题的研究逐渐兴起，研究人员渐多，一定程度上可视为研究前沿。整体中国作者共被引占比相对较少，多集中在 2010 年后，说明中国对排种技术的研究呈前期不足、后期追赶态势，研究工作还未形成多学科属性，影响力和跨学科研究有待进步。

表 5 WOS 作者共被引前 10（按共被引频次排序）及影响力
Table 5 WoS authors' co-citation Top10 (sorted by co-citation frequency) and influence

作者 Author	共被引频次 Co-citation frequency	中心性（排名） Centrality (Sort)	所属聚类 Cluster	年份 Years
Karayel D	61	0.09	#0	2004
Yazgi A	58	0.07	#0	2010
Singh R C	49	0.10 (3)	#0	2010
Kachman S D	41	0.18 (2)	#4	2000
Yang L	32	0.02	#3	2017
Lei X L	28	0.03	#3	2018
Zhao Z	24	0.05	#0	2017
Onal I	22	0.05	#2	2014
Anantachar M	21	0.20 (1)	#0	2011
Kocher M F	19	0.06	#2	2000

注：#0~#4 代表聚类号。

Note: #0~#4 represents cluster No..



注：#0~#11 代表聚类号，序号越小代表聚类中包含的关键词越多。节点位置代表该文献初次被引时间，节点圆圈大小代表被引频次多少，越大此节点作者共被引频次越高。

Note: #0~#11 refers to the cluster number, the smaller the serial number, the more keywords are included in the cluster; the position of the node represents the first citation time of the document, and the size of the node circle represents the citation frequency. The larger the node, the higher the total citation frequency of the author.

图 6 WoS 作者共被引聚类时间线图

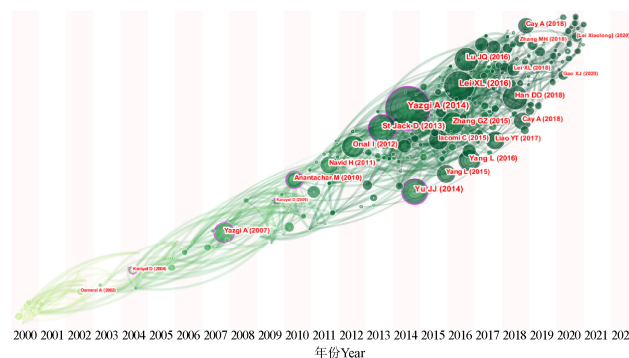
Fig.6 Timeline graph of WoS author co-citation clustering

2.3 科研发展力分析

2.3.1 基于 WoS 的文献共被引分析

两篇文献共同出现在第三篇施引文献的参考文献中，即表示这两篇文献形成共被引关系。文献共被引分析是对文献的参考文献部分进行关系挖掘，可反映国内外同行比较关注的热门文献和本领域的经典文献，文献联系紧密程度代表了研究内容的相似程度，文献共被引网络图谱时区视图如图 7。由图知，文献共被引活跃段出现在 2014—2019 年，反映了 2014 年后关于排种的研究发展较快且研究内容集中，侧重排种器结构设计和数值模拟仿真。

高共被引论文主要来源期刊有《International Journal of Agricultural and Biological Engineering》《Computers and Electronics in Agriculture》《Biosystems Engineering》。分析文献内容可知，高共被引文献前 10 和关键文献（紫圈节点）主要涉及排种器结构设计与优化、播种参数匹配、DEM-CFD 耦合方法在排种技术领域的应用、种子分布均匀性、排种电控应用、神经网络应用、研究综述等；



注：聚类模块值 $Q=0.7771$ ，聚类平均轮廓值 $S=0.8995$ ；节点圆圈大小代表文献共被引频次，文献节点外圈呈紫色代表中介中心度较高。节点越大、中介中心性越大，文献认可度越高。

Note: Cluster module value $Q=0.7771$, Cluster average contour value $S=0.8995$; The size of the node circle represents the co-citation frequency of the literature, and the outer circle of the literature node in purple represents a high betweenness centrality. The larger the node, the greater the betweenness centrality and the higher the literature recognition.

图 7 WoS 排种技术文献共被引网络图谱（时区视图）

Fig.7 Co-citation network graph of WoS seed metering technology literature (Time zone view)

涉及的作物对象主要是玉米、棉花、马铃薯、油菜、小麦、水稻、花生等种植面积较大的农作物；为提高播种机具的利用率，基于种子物理特性相似、种植区域重合等特点，兼用型排种技术研究加强，如玉米棉花、玉米大豆、油菜小麦等兼用排种^[38-41]，共被引前 10 文献中作物播种均采用气力式排种原理，说明气力式排种原理是近年的研究热点；另一方面，国内学者多从数值模拟、排种试验等入手^[41-44]，国外学者多尝试寻找跨学科方法应用于排种技术研究、寻找参数匹配机制等方面^[45-46]。

2.3.2 基于 CNKI 的高被引文献和热门文献

使用普赖斯定律确定高被引文献。被引频次 $N \geq 0.749\sqrt{\eta_{max}}$ 的文献为高被引文献^[47]，其中 η_{max} 为最高被引频次。截止 2022 年 12 月 1 日中文文献最高被引频次为 222，因此检索文献被引频次 ≥ 12 视为排种技术领域高被引论文，共 488 篇，总被引次数为 19 672 次，篇均被引 40.31 次。高被引论文期刊来源中，农业机械学报占比 43.24% (211 篇)，农业工程学报占比 41.39% (202 篇)，高被引论文所属机构中，中国农业大学占比 19.88%，华中农业大学占比 13.73%。

统计被引频次前 10 文献 (表 6)，其中 7 篇研究主题涉及 DEM 应用；被引频次 ≥ 100 的文献 (共 29 篇) 占比最高的期刊为农业工程学报 (58.62%)，基金来源为国家自然科学基金 (31.03%)，机构为中国农业大学 (34.48%)，研究人员为张东兴等 (24.14%)。

表 6 被引频次前 10 的文献
Table 6 Highly cited top 10 literature

发表时间 Publish time	文献 Literatures	作者 Author	期刊 Journals	被引频次 Cited frequency
2013	基于 EDEM 的离心式排种器排种性能数值模拟	廖庆喜等	农业机械学报	222
2015	基于 EDEM 软件的气压组合孔式排种器充种性能模拟与验证	史嵩等	农业工程学报	199
2008	开沟起垄式水稻精量穴直播机的研制	罗锡文等	农业工程学报	191
2016	基于离散元的玉米种子颗粒模型种间接触参数标定	王云霞等	农业工程学报	190
2005	离散元法及其在农业机械工作部件研究与设计中的应用	于建群等	农业工程学报	188
2011	基于 EDEM 的振动种盘中水稻种群运动规律研究	陈进等	农业机械学报	177
2013	基于高速摄像的玉米种子滚动摩擦特性试验与仿真	崔涛等	农业工程学报	157
2007	水稻精量穴直播排种轮的设计与试验	罗锡文等	农业工程学报	157
2014	基于离散单元法的水平圆盘式精量排种器排种仿真试验	石林榕等	农业工程学报	154
2016	玉米精密播种技术研究进展	杨丽等	农业机械学报	153

热门文献指论文发表后短期内产生很大影响，被引频次靠前，搜索 2021 年至今相关文献，被引次数最高的为曾智伟 2021 年发表于农业机械学报的“离散元法在农业工程研究中的应用现状和展望”，被引频次 64 次，围绕离散元法在现代农业装备数字化进程中的意义，分析

了各作业环节的应用现状和发展动态，表明离散元法在颗粒运动仿真研究方面具有显著优势，特别适合颗粒材料与农机部件的接触作用和颗粒材料的流动过程研究。结合高被引和热门文献可知，EDEM 在排种技术领域的应用从数值模拟、种子运动规律探索向仿真试验、优化反馈控制发展，从单纯离散元颗粒仿真到气固耦合仿真进化。

综上，离散元法在高精度种子模型建立、校准影响种子动态和机械行为的关键参数、实时监测种子流的运动状态和力传递、评估排种装置的结构参数和运行参数对排种性能的影响等方面研究较多，近年来 CFD-DEM 耦合方法发展强劲，不仅可以监测排种装置和排种管中气流速度和分布情况，还可以监测气流中种子的运动。

2.4 研究热点和前沿分析

关键词是对文章的高度概括和凝练，通过关键词分析有助于理清研究领域的发展脉络、把握该领域的研究现状，分析研究热点，进而预测未来发展趋势，为深入研究方向和主题提供定量依据。

2.4.1 基于 WoS 和 CNKI 的关键词共现研究热点分析

分析 2000 年至今关键词出现频次和中介中心性可知，外文期刊的 Seed-metering device、Optimization、Flow、Precision seeding、Performance、Accuracy 和 Numerical simulation 及中文期刊的试验、设计、种子、离散元法和优化关键词节点同时具备高中介中心性 (>0.1) 和高出现频次，是本领域研究焦点。外文期刊对种子分布均匀性、流体和排种准确性的研究比较关注，中文期刊玉米、水稻、油菜、小麦出现频率均大于 30 次，排种作物、优化设计方面研究关注度较外文高。

分析 2020 年至今出现的关键词，排种趋势呈现高速变量走向，精确度更高，数字化、智能化和跨学科方法在排种技术与装备间的应用逐渐成为新的焦点，同时新方法工具也被引入排种技术领域研究中，如滞后补偿算法、卫星定位方法、仿生学、TRIZ 理论。2022 年外文期刊发表多篇有关控制系统应用、设计参数匹配、高速精密播种、参数标定等方面的文章，进一步说明了研究热点趋向。

分别对 WoS 和 CNKI 数据库相关文献的关键词进行聚类分析，在对数极大似然率 LLR 生成的标签基础上补充解释，得出聚类知识图谱如图 8。

由聚类图谱可发现，WoS 数据库中，DEM-CFD 耦合研究 (#2 dem-cfd coupling approach) 发展较快，应用于离散元素参数的测量和校准^[48]、结构和工作参数对籽粒运动特性和气流场影响^[49]等，高速精确播种研究中也涉及，如用 DEM-CFD 耦合方法研究玉米颗粒在文丘里进料管中的动态^[50]；验证高速状态下种子分布均匀性和播种精确性的田间试验研究较多 (#0 field test、# 6 forward speed)，对播种速度和播种质量监测的关注提升，如基于脉宽识别的排种性能监测系统^[51]；转弯补偿控制系统研究^[52]；播种频率和播种速度对传感器监测精度的影响^[53]；电动吸力排种对种盘转速和排种量的精确控制^[54]；单粒精密排种器种子防漏系统^[55]等。

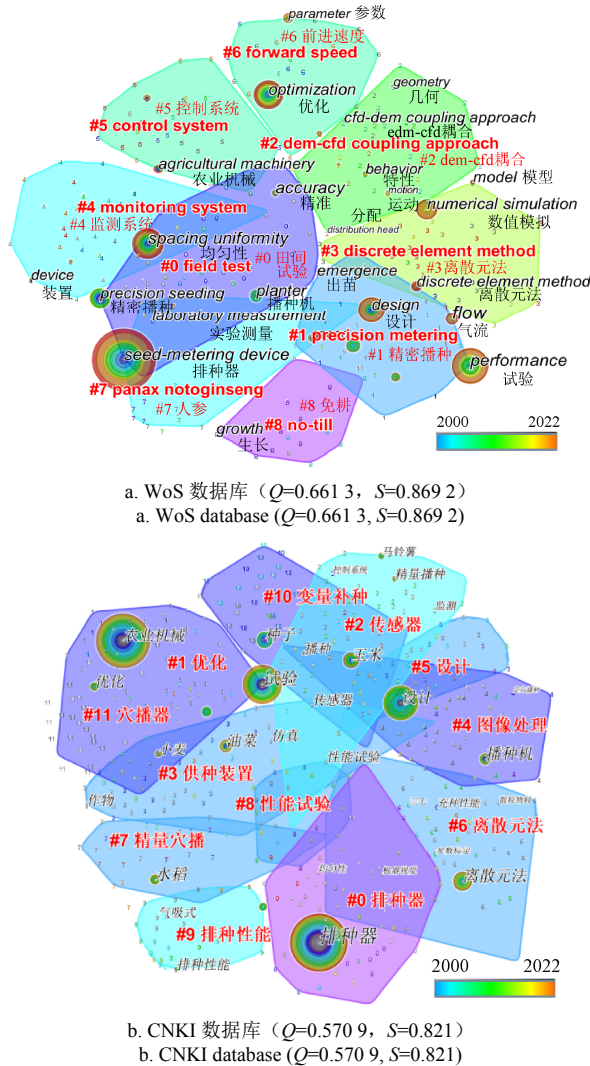


图 8 排种技术相关论文关键词聚类知识图谱

Fig.8 Keywords cluster knowledge graph in literatures related to seed metering technology

CNKI 数据库中,从作物维度上看,玉米、马铃薯排种技术使用传感器较多(#2 传感器);玉米粒定向播种、大豆玉米籽粒清选、作物排种粒距实时检测等方面研究中图像处理方法发挥重要作用(#4 图像处理);油菜、小麦排种的供种装置和仿真研究部分较突出(#3 供种装置)。从排种性能维度上看,随着播种作业速度的提高,充种、吸种环节时间压缩从而导致作业漏播严重、风压需求大等,研究人员分别从气力机械组合式排种^[56]、气流型孔组合式排种^[57]、辅助充种^[58]等方面提高充种性能。

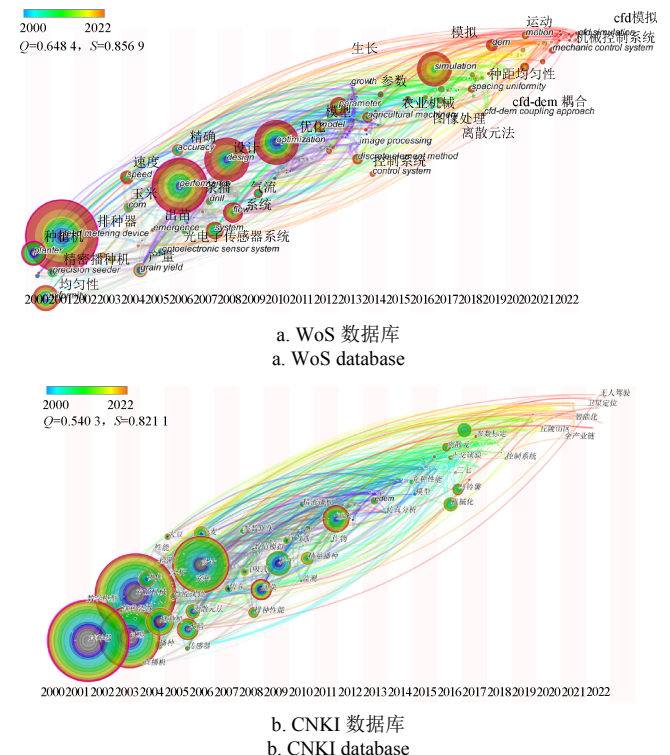
总体上,DEM-CFD 耦合、精准精确排种和播种均匀性研究是目前排种技术领域的研究热点,机器视觉、神经网络和图像处理技术与排种技术融合,新方法工具的引入也逐渐兴起。

2.4.2 发展脉络和研究前沿分析

对关键词的时间序列进行分析,得到发展脉络时区图如图 9,可以看出,排种技术研究进程由单一主题逐渐过渡到多主题并行研究直至垂直细分主题的深入探索,研究主题由装置设计向装置性能优化、排种过程精准可控转换,排种对象由大宗粮食作物向蔬菜、中药材等经

济、特色作物发展,多作物兼用的排种技术研究兴起。

外文期刊近两年的研究细分到 DEM 在种子形状颗粒模拟^[59-60]、种子与排种部件作用对播种质量影响机制^[61],基于气流-种子耦合的气力系统技术过程数值模拟^[62-63]、实时监测^[64]、窄间距高速播种精度监测^[65],种子掉落高度及振动等对播种均匀性的影响^[66],高速精密播种时的种子运动情况^[67]等方面。中文期刊近两年的研究前沿涉及智能控制、无人驾驶和卫星定位等,智慧农业和全产业链研究出现。值得关注的是,国内玉米排种 2010 年后兴起,较 2007 年前开始的水稻、小麦、大豆、油菜等作物排种研究晚,但玉米与研究前沿的相关性更高,2010 年前玉米播种主要以机械式排种为主,技术成熟产出较少,后逐渐开展气力式玉米排种,研究成果增多。



注:节点代表关键词,出现位置表示此关键词首次出现时间,节点大小表示统计期间出现频次,连线表示两节点关键词出现在同一篇文献中。

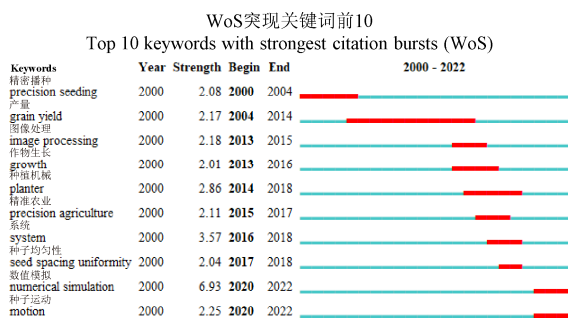
Note: The node represents the keyword, the position of occurrence represents the time when the keyword first appeared, the size of the node represents the frequency of occurrence during the statistical period, and the connection line represents that the keywords of the two nodes appear in the same literature.

图 9 排种技术相关文献关键词网络图谱(时区视图)

Fig.9 Keywords network graph for seed-metering technology related literature (Time zone view)

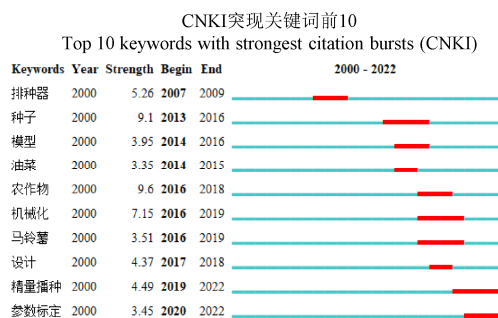
CiteSpace 提供突现功能用来探测某时段变量值有很大变化的情况,帮助发现关键词衰落或兴起情况,以便研究人员获取研究前沿信息。本文统计前 10 的突现词(图 10)发现,外文期刊对作物产量关注较多,2013 年后逐渐细分为方法工具在排种技术领域的应用(image processing)、排种机理(system、seed spacing uniformity)等,目前外文期刊排种技术领域研究前沿为数值模拟排种过程试验、种子与排种装置间的相互作用机理探索、种子颗粒建模参数和仿真参数、无法测量的种子运动特性仿真模拟等的研究。中文期刊突现词中,油菜在 2014 年、马铃薯在 2016 年的发文量突增,其根源可能是由于

2014 年农业部发布《2014 年国家深化农村改革、支持粮食生产、促进农民增收政策措施》、2016 年农业部发布《关于推进马铃薯产业开发的指导意见》；在政策导向下，油菜、马铃薯种植面积增加，产业发展等对机械化播种技术需求增加。目前中文期刊本领域研究前沿是种子的精确接触参数研究，并结合物理或仿真试验对仿真参数进行标定并反馈至结构参数设计。



a. WoS 数据库 (突现伽马值 $\gamma[0, 1]=0.63$)

a. WoS database (Burstness $\gamma[0, 1]=0.63$)



b. CNKI 数据库 (突现伽马值 $\gamma[0, 1]=1.05$)

b. CNKI database (Burstness $\gamma[0, 1]=1.05$)

注: Year 指关键词第一次出现的年份, Strength 指突现强度, Begin 和 End 指该关键词作为前沿的起始和骤减年份。该图反映不同时间段的研究前沿。Note: Year represents the year when the keyword first appears; Strength represents the strength of emergence; Begin and End represents the start and end years of the keyword as the frontier. The figure reflects the research frontiers in different time periods.

图 10 播种技术相关论文突现关键词

Fig.10 Keywords with the strongest citation burst in seed metering technology related literature

综上, 播种技术领域具有发展潜力的研究方向包括设计原理验证、设计方法应用、不同作物排种结构创新和智能监测系统设计方面。

2.5 排种技术的产业化应用

2.5.1 排种技术产业化发展态势

排种技术创新与产业化应用是提高播种装备技术水平和核心竞争力的关键。各国由于科研格局、企业创新能力和市场环境的不同, 排种技术产业化应用发展态势各具特色。美国、意大利、德国等发达国家创新主体以各知名农机企业为主, 注重播种关键核心部件研究开发与产业化应用同步推进; 如美国 John Deere, 意大利 Maschio, 德国 Amazone 等公司, 通过排种技术创新推动播种机由撒播、条播、低速作业发展到精量、高速、变量作业发展; 同时注重排种技术的智能化提升, 如采用电驱动排种和传感技术, 通过排种过程的实时监测与智能控制实现高性能播种, 并在生产中得到广泛应用。国

内农机产业相对发达国家落后, 企业创新力量较薄弱, 关键技术研发以科研院所为主, 近年来, 国家高度重视播种机及其高性能排种关键技术创新, 十三五期间国家重点研发计划“智能农机装备”重点专项立项“精量播种技术装备研发”、十四五期间“工厂化农业关键技术与智能农机装备”立项“高性能播种关键部件及智能播种机制”项目, 汇聚长期从事水稻、小麦、玉米、油菜、大豆等主要粮油作物机械化播种和智能化技术与装备研发优势单位, 并与潍柴雷沃等龙头企业紧密合作, 形成排种器关键技术突破、播种机制制、产业化应用的技术装备创新发展模式。

2.5.2 排种技术热点前沿研究的产业化应用

随着农业发展需求, 播种作业向精准高效发展。目前国际上先进的播种机排种技术主要有气力式精密排种和气送式集中排种, 在保证播种精度的基础上大幅提升了作业速度; 如 Maschio 研发的用于蔬菜播种的 ORIETTA、OLMPIA 系列播种机和用于传统或浅层播种的 SP 系列、用于免耕或少耕的 MTR 系列精量播种机均采用气力式排种, 最新推出的 CHRONO 系列高速精量播种机配置电气传动装置的播种单体, 采用独特的气力种子输送系统, 可在 15 km/h 的速度下保证高精度作业。瑞典 Vaderstad 研发的高速播种机配有 Gilstring 播种单体, 能在传统播种机 2 倍作业速度下工作且达到更好的播种精度。Great Plains 公司的 AccuShot 可实现精确变量排种施肥。另外, 德国 Amazone、Horsch 和法国 Kuhn 的气送式播种装备作业速度均能达到 12 km/h, 且均可兼用玉米、甜菜、大豆、向日葵、油菜、棉花等作物播种。国内科研机构目前已研制了满足玉米 10 km/h、大豆 8~11 km/h 作业速度要求的排种器^[14,68]。下一阶段将在国家支持和市场需求指引下, 科研机构与农机企业各自发挥优势, 通过产学研合作, 推动先进排种技术的产业化应用, 促进主要农作物机械化播种水平的提升。

同时, 为提升播种质量, 围绕精准变量作业排种技术的相关智能化测控组件产业化应用加快, 如 Precision Planting 公司的 20 | 20 monitor、SmartFirmer、FlowSense 和 YieldSense。Tempo V 高速精密播种机配置 Vaderstad E-Control, 以无线方式提供排种数据(排种性能指标、行距和播种速率等), 可实现单独启停和控制, 根据作物播种要求和田间情况进行调整。国内在这方面的研究相对落后, 集中在监控系统、控制策略、传感网络等方面, 反馈调节研究有待进步, 目前相关科研院校开发了适用于玉米、水稻的播种质量监控系统^[69-70], 适用于油菜的播量监测、漏播检测等技术^[13], 但整体处于实验室研发与试验阶段, 排种测控技术的成果应用较少, 高精度低成本测控技术产业化应用以及技术推广需加大力度。

3 结 论

本文精确检索 2000 年 1 月 1 日—2022 年 12 月 1 日期间 Web of Science (WoS) 核心合集 SCI 数据库和中国

知网 EI&CSCD 数据库内排种主题相关文献, 基于文献计量方法从科研生产力、影响力和发展力角度分析排种技术领域的发展态势, 主要分析结果如下:

1) 该领域整体科研生产力处于稳态高速发展阶段, 中国的发展潜力较大。排种技术研究的国内发文总量较国外高, 总体呈先上升后小幅下降趋势, 呈波浪前进式, 国外发文数量呈上升趋势; 排种技术整体发展脉络由单一功能研究转向垂直细分多个主题内深入挖掘。

2) 该领域研究论文具备高影响力的国家是美国, 中国影响力仅次于美国; 高影响力外文期刊有《Computers and Electronics in Agriculture》《Biosystems Engineering》, 中文期刊有《农业工程学报》《农业机械学报》; 高影响力机构有美国堪萨斯州立大学、土耳其阿塔图尔克大学和中国农业大学、华中农业大学; 高影响力科研团队以罗锡文、廖庆喜、张东兴为核心, 各团队研究重点各有不同; Yazgi A 同时具备高发文量和高共被引; 高影响力论文主要侧重排种器结构设计、数值模拟仿真和排种均匀性。

3) 近年来排种技术高热度论文较多, 未来发展势头良好。文献关键词共现分析可知, 排种技术领域研究热点主要是 EDM-CFD 耦合、数值模拟、控制和监测系统研发, 研究方法多样化。国内发展较强劲的研究主题有离散元法在排种技术中的应用、兼用高速排种以及精准精确播种。国外学者较国内更多尝试跨学科方法应用和参数匹配等机理研究。发达国家对排种技术创新以龙头企业为主, 智能技术创新和产品转化进展较快, 国内排种技术相关企业规模有限, 关键技术进步加快, 系列产品和服务有进步空间。

通过排种技术领域的发展态势分析可知, 随着传统农业生产模式被机械化、规模化生产逐步取代, 信息化、数字化、智能化正在助推未来农业发展, 排种技术领域研究将呈现如下趋势:

1) 排种性能评价向高速、变量、高性能发展。随着农业生产向集约化、规模化、高效能发展, 高速作业的精密播种机成为生产需求, 适应播种作业速度 ≥ 12 km/h 的排种技术成为需要突破的重点技术; 在农机农艺深度融合促进农作物稳产高产的效益驱动下, 相对粗放的撒播、条播技术将逐渐向行株距均匀分布、种植密度合理调控的精准播种发展, 变量排种技术研究将呈上升趋势。在功能模块的通用性和农业机械化的成本投入等市场需求驱动下, 播种机将向多作物兼用发展, 高性能的兼用型排种技术将成为研究热点; 围绕高速、变量、高性能排种, 通过机械结构和技术创新实现玉米大豆等大籽粒单粒精密排种, 小麦、油菜、水稻、蔬菜等小籽粒种子高速排种, 播量稳定、种子和播种密度差异显著作物的兼用型排种技术将成为研发关键; 同时, 排种器田间复杂工况下的作业稳定性、行株距要求严格作物的落种位置预测及平稳运移导种等技术是研究难点。

2) 排种技术向电驱、数字、智能化拓展。随着信息技术、物联网、大数据等新兴技术的发展, 排种器在向高速、变量、高性能发展过程中, 单靠机械性能的提升

已无法满足要求, 机械系统必然与电子信息系统融合; 高速作业下地轮驱动方式难以满足稳定性要求, 且无法实现无级调控变量播种, 稳定可靠的随速可控可调排种器电驱动技术将成为研究重点之一; 现有气力式播种机的供气方式不适应机具田间作业工况波动, 也不能实现兼用型排种器的气力参数调控, 气流场自适应调控技术将成为气力式排种系统的研究难点; 现阶段国内播种装备作业性能严重依赖操纵人员经验, 机具的数字化程度低, 智能排种系统研究未形成关键性技术突破, 在智慧农业、无人农场等产业发展业态引领下, 未来排种系统将向集种子流状态监测、排种信号处理、传输、控制、存储和管理于一体的可视化综合控制系统发展, 实时全面掌握播种机农艺信息, 根据准确数据驱动关键决策, 对排种工作单元作业状态进行智能化管理。

3) 排种技术的研究思路向多元、高效、多学科转变。作物种子和播种农艺要求的多样性决定了排种技术创新研究的必要性, 目前国内各类农作物机械化播种水平亟待提升的现实情况表明, 排种装置结构创新与功能实现仍是业内关注重点; 数值模拟、高速摄影、室内台架试验和田间试验是排种技术研究和排种器设计开发的主要研究手段, 但随着离散元仿真、气固耦合仿真等技术的发展, 计算机仿真技术将在研究中发挥更重要的作用; 研究人员设计理念和求解思维方法正在转变, 拓扑优化、TRIZ 理论、概念设计和多理论集成等方法逐渐被引入到排种器的设计中; 易拆卸、兼用或可通用的模块化排种器产品有很大研究空间, 虚实结合研究方法将有助于缩短产品研发周期, 多学科知识交叉将为排种器结构创新提供新思路。

[参 考 文 献]

- [1] 中华人民共和国农业农村部农业机械化司. 2021 年全国农业机械化发展统计公报[EB/OL]. 2022-08-17, http://www.njhs.moa.gov.cn/nyjxhqk/202208/t20220817_6407161.htm
- [2] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- [3] 农业农村部南京农业机械化研究所. 2021 中国农业机械工业年鉴[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2021.
- [4] 苑严伟, 白慧娟, 方宪法, 等. 玉米播种与测控技术研究进展[J]. 农业机械学报, 2018, 49(9): 1-18.
Yuan Yanwei, Bai Huijuan, Fang Xianfa, et al. Research progress on maize seeding and its measurement and control technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9): 1-18. (in Chinese with English abstract)
- [5] 丛锦玲, 廖庆喜, 曹秀英, 等. 油菜小麦兼用排种盘的排种器充种性能[J]. 农业工程学报, 2014, 30(8): 30-39.
Cong Jinling, Liao Qingxi, Cao Xiuying, et al. Seed filling performance of dual-purpose seed plate in metering device for both rapeseed & wheat seed[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(8): 30-39. (in Chinese with English abstract)
- [6] 胡梦杰, 夏俊芳, 郑侃, 等. 内充气力式棉花高速精量排

- 种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(8): 73-85.
- Hu Mengjie, Xia Junfang, Zheng Kan, et al. Design and experiment of inside-filling pneumatic high speed precision seed-metering device for cotton[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8): 73-85. (in Chinese with English abstract)
- [7] 朱彤, 丛锦玲, 齐贝贝, 等. 机械气力组合式花生精量排种器设计与试验[J]. 中国机械工程, 2020, 31(21): 2592-2600.
- Zhu Tong, Cong Jingling, Qi Beibei, et al. Design and tests of mechanical-pneumatic combined peanut precision seed-metering devices[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(21): 2592-2600. (in Chinese with English abstract)
- [8] 邢赫, 张国忠, 韩宇航, 等. 双腔气力式水稻精量水田直播机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(24): 29-37.
- Xing He, Zhang Guozhong, Han Yuhang, et al. Development and experiment of double cavity pneumatic rice precision direct seeder[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(24): 29-37. (in Chinese with English abstract)
- [9] 夏红梅, 周士琳, 刘园杰, 等. 扁平茄果类种子导向振动供种装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(9): 82-88.
- Xia Hongmei, Zhou Shilin, Liu Yuanjie, et al. Design and test of directional vibrating seed-feeding device for flat solanaceous vegetable seeds[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9): 82-88. (in Chinese with English abstract)
- [10] 方梁菲, 曹成茂, 秦宽, 等. 导种环槽 U 型孔组合型轮式前胡排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(4): 21-32.
- Fang Liangfei, Cao Chengmao, Qin Kuan, et al. Design and experiment of wheel seed metering device with guide ring groove combining u-hole for radix peucedani[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(4): 21-32. (in Chinese with English abstract)
- [11] 马文鹏, 尤泳, 王德成, 等. 苜蓿切根补播施肥机气送式集排系统优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(9): 70-78.
- Ma Wenpeng, You Yong, Wang Decheng, et al. Optimal design and experiment of pneumatic and pneumatic collecting and discharging system of alfalfa cut-root reseeding and fertilizer applicator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 70-78. (in Chinese with English abstract)
- [12] 赖庆辉, 贾广鑫, 苏微, 等. 基于 DEM-MBD 耦合的链勺式人参精密排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(3): 91-104.
- Lai Qinghui, Jia Guangxin, Su Wei, et al. Design and test of chain-spoon type precision seed-metering device for ginseng based on dem-mbd coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3): 91-104. (in Chinese with English abstract)
- [13] 丁幼春, 王凯阳, 刘晓东, 等. 中小粒径种子播种检测技术研究进展[J]. 农业工程学报, 2021, 37(8): 30-41.
- Ding Youchun, Wang Kaiyang, Liu Xiaodong, et al. Research progress of seeding detection technology for medium and small-size seeds[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(8): 30-41. (in Chinese with English abstract)
- [14] 杨丽, 颜丙新, 张东兴, 等. 玉米精密播种技术研究进展[J]. 农业机械学报, 2016, 47(11): 38-48.
- Yang Li, Yan Bingxin, Zhang Dongxing, et al. Research progress on precision planting technology of maize[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 38-48. (in Chinese with English abstract)
- [15] 廖庆喜, 雷小龙, 廖宜涛, 等. 油菜精量播种技术研究进展[J]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 1-16.
- Liao Qingxi, Lei Xiaolong, Liao Yitao, et al. Research progress of precision seeding for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 1-16. (in Chinese with English abstract)
- [16] 王立军, 刘天华, 冯鑫, 等. 农业和食品领域中颗粒碰撞恢复系数的研究进展[J]. 农业工程学报, 2021, 37(20): 313-322.
- Wang Lijun, Liu Tianhua, Feng Xin, et al. Research progress of the restitution coefficients of collision of particles in agricultural and food fields[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(20): 313-322. (in Chinese with English abstract)
- [17] 廖宜涛, 李成良, 廖庆喜, 等. 播种机导种技术与装置研究进展分析[J]. 农业机械学报, 2020, 51(12): 1-14.
- Liao Yitao, Li Chengliang, Liao Qingxi et al. Research progress of seed guiding technology and device of planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 1-14. (in Chinese with English abstract)
- [18] 刘佳驹, 邵岩, 王宇泓, 等. 1996-2017 年雨洪管理研究发展态势分析—基于文献计量方法[J]. 环境科学学报, 2020, 40(7): 2621-2628.
- Liu Jiaju, Shao Yan, Wang Yuhong, et al. Development trends of research on rainfall management from 1996-2017: based on bibliometrics methods[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 40(7): 2621-2628. (in Chinese with English abstract)
- [19] 张雅然, 付正辉, 王书航, 等. 基于 Web of Science 和 CNKI 的湖泊沉积物文献计量分析[J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(1): 110-118.
- Zhang Yaran, Fu Zhenghui, Wang Shuhang, et al. Bibliometric analysis of lake sediments based on web of science and CNKI[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12(1): 110-118. (in Chinese with English abstract)
- [20] 刘阎霄, 张扬, 李政, 等. 基于文献计量方法的全球温室气体排放研究态势分析[J]. 环境科学学报, 2021, 41(11): 4740-4751.
- Liu Yanxiao, Zhang Yang, Li Zheng, et al. Research status analysis of global greenhouse gas emission based on bibliometrics[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41(11): 4740-4751.

- 4740-4751. (in Chinese with English abstract)
- [21] 何丹丹, 李兴国, 吴廷照, 等. 基于 CiteSpace 的我国图书馆移动服务研究热点可视化分析[J]. 图书馆, 2018(2): 94-99.
He Dandan, Li Xingguo, Wu Tingzhao, et al. Visualization analysis of the research hotspots of library mobile service in china based on citespace [J]. Library, 2018(2): 94-99. (in Chinese with English abstract)
- [22] 杨睿, 王应宽, 王宝济. 基于 WoS 文献计量学和知识图谱的农业机器人进展与趋势[J]. 农业工程学报, 2022, 38(1): 53-62.
Yang Rui, Wang Yingkuan, Wang Baoji. Progress and trend of agricultural robots based on WoS bibliometrics and knowledge graph[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(1): 53-62. (in Chinese with English abstract)
- [23] 王金满, 郇文聚, 白中科. 中国土地整理工程发展回顾与展望—基于《农业工程学报》“土地整理工程”专栏 2002—2020 年刊载文献的计量学分析[J]. 农业工程学报, 2021, 37(10): 307-316.
Wang Jinman, Yun Wenju, Bai Zhongke. Review and prospect of land consolidation and rehabilitation engineering in China-Based on the bibliometric analysis of the literature published amount in the “Land Consolidation and Rehabilitation Engineering” column of Transactions of the CSAE from 2002 to 2020[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(10): 307-316. (in Chinese with English abstract)
- [24] Unal Z. Smart farming becomes even smarter with deep learning-A bibliographical analysis[J]. IEEE Access, 2020, 8: 105587-105609.
- [25] 汪小飞, 张家伟, 刘铁宁, 等. 小麦抗倒伏研究动态追踪—基于 WoS 和 CNKI 数据库的文献计量分析[J]. 中国农学通报, 2022, 38(5): 132-142.
Wang Xiaofei, Zhang Jiawei, Liu Tiening, et al. The dynamic tracking of wheat lodging resistance research: Bibliometric analysis based on Wos and Cnki database[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2022, 38(5): 132-142. (in Chinese with English abstract)
- [26] 王淑强, 青秀玲, 王晶, 等. 基于文献计量方法的国际地理科学研究机构竞争力分析[J]. 地理学报, 2017, 72(9): 1702-1716.
Wang Shuqiang, Qing Xiuling, Wang Jing, et al. Analysis of competitiveness of international geographic institutes based on bibliometrics[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(9): 1702-1716. (in Chinese with English abstract)
- [27] Singh R C, Singh G, Saraswat D C. Optimisation of design and operational parameters of a pneumatic seed metering device for planting cottonseeds[J]. Biosystems Engineering, 2005, 92(4): 429-438.
- [28] Panning J W. Laboratory and field testing of seed spacing uniformity for sugarbeet planters[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2000, 16(1): 7-13.
- [29] Karayel D, Wiesehoff M, Özmerzi A, et al. Laboratory measurement of seed drill seed spacing and velocity of fall of seeds using high-speed camera system[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2006, 50(2): 89-96.
- [30] Staggenborg S A. Effect of planter speed and seed firmers on corn stand establishment[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2004, 20(5): 573-580.
- [31] Maleki M R, Jafari J F, Raufat M H, et al. Evaluation of seed distribution uniformity of a multi-flight auger as a grain drill metering device[J]. Biosystems Engineering, 2006, 94(4): 535-543.
- [32] Bracy R P, Parish R L. A comparison of seeding uniformity of agronomic and vegetable seeders[J]. Horttechnology, 2001, 11(2): 184-186.
- [33] Anantachar M, Kumar P G V, Guruswamy T. Neural network prediction of performance parameters of an inclined plate seed metering device and its reverse mapping for the determination of optimum design and operational parameters[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 72(2): 87-98.
- [34] Anantachar M, Kumar P G V, Guruswamy T. Development of artificial neural network models for the performance prediction of an inclined plate seed metering device[J]. Applied Soft Computing, 2011, 11(4): 3753-3763.
- [35] Mao X, Yi S, Tao G, et al. Experimental study on seed-filling performance of maize bowl-tray precision seeder[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2015, 8(2): 31-38.
- [36] Singh T P, Mane D M. Development and laboratory performance of an electronically controlled metering mechanism for okra seed[J]. Agricultural Mechanization in Asia Africa and Latin America, 2011 42(2): 63-69.
- [37] Cay A, Kocabiyik H, May S. Development of an electro-mechanic control system for seed-metering unit of single seed corn planters Part II: Field performance[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 145: 11-17.
- [38] Yazgi A, Degirmencioglu A. Measurement of seed spacing uniformity performance of a precision metering unit as function of the number of holes on vacuum plate[J]. Measurement, 2014, 56: 128-135.
- [39] Lei X, Liao Y, Liao Q. Simulation of seed motion in seed feeding device with DEM-CFD coupling approach for rapeseed and wheat[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 131: 29-39.
- [40] Karayel D, Barut Z B, Özmerzi A. Mathematical modelling of vacuum pressure on a precision seeder[J]. Biosystems Engineering, 2004, 87(4): 437-444.
- [41] Yu J, Liao Y, Cong J, et al. Simulation analysis and match experiment on negative and positive pressures of pneumatic precision metering device for rapeseed[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2014, 7(3): 1-12.
- [42] Han D, Zhang D, Jing H et al. DEM-CFD coupling simulation and optimization of an inside-filling airblowing maize precision seed-metering device[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 150: 426-438.
- [43] Zhang G, Zang Y, Luo X, et al. Design and indoor simulated experiment of pneumatic rice seed metering device[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2015, 8(4): 10-18.

- [44] Liao Y, Wang L, Liao Q. Design and test of an inside-filling pneumatic precision centralized seed-metering device for rapeseed[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2017, 10(2): 56-62.
- [45] St Jack D, Hesterman D C, Guzzoni A L. Precision metering of santalum spicatum (australian sandalwood) seeds[J]. *Biosystems Engineering*, 2013, 115(2): 171-183.
- [46] Önal İ, Degirmencioglu A, Yazgi A. An evaluation of seed spacing accuracy of a vacuum type precision metering unit based on theoretical considerations and experiments[J]. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 2012, 36(2): 133-144.
- [47] 胡利勇. 基于普赖斯定律的图书情报领域高被引论文核心要素测评[J]. *图书馆研究*, 2016, 46(4): 113-117.
Hu Liyong. Analysis of highly cited papers in library and information science based on price's law[J]. *Library Research*, 2016, 46(4): 113-117. (in Chinese with English abstract)
- [48] Hu M, Xia J, Zhou Y, et al. Measurement and calibration of the discrete element parameters of coated delinted cotton seeds[J]. *Agriculture*, 2022, 12(2): 286.
- [49] Hu H, Zhou Z, Wu W, et al. Distribution characteristics and parameter optimisation of an air-assisted centralised seed-metering device for rapeseed using a CFD-DEM coupled simulation[J]. *Biosystems Engineering*, 2021, 208: 246-259.
- [50] Gao X, Zhou Z, Xu Y, et al. Numerical simulation of particle motion characteristics in quantitative seed feeding system[J]. *Powder Technology*, 367: 643-658.
- [51] Wang Y, Zhang W, Qi B, et al. Comparison of field performance of different driving systems and forward speed measuring methods for a wet direct seeder of rice[J]. *Agronomy-BASEL*, 2022, 12(7): 1655.
- [52] Ding Y, He Xi, Yang L, et al. Low-cost turn compensation control system for conserving seeds and increasing yields from maize precision planters[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2022, 199: 107118.
- [53] Tang H, Xu C, Wang Z, et al. Optimized design, monitoring system development and experiment for a long-belt finger-clip precision corn seed metering device[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 814747.
- [54] Ren S, Yi S. Control mechanism and experimental study on electric drive seed metering device of air suction seeder[J]. *Tehnički Vjesnik*, 2022, 29(4): 1254-1261.
- [55] Nikolay Z, Nikolay K, Gao X J, et al. Design and testing of novel seed miss prevention system for single seed precision metering devices[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2022, 198: 107048.
- [56] 李兆东, 何顺, 钟继宇, 等. 油菜扰动气力盘式穴播排种器参数优化与试验[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(17): 1-11.
Li Zhaodong, He Shun, Zhong Jiyu, et al. Parameter optimization and experiment of the disturbance pneumatic plate hole metering device for rapeseed[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(17): 1-11. (in Chinese with English abstract)
- [57] 程修沛, 卢彩云, 孟志军, 等. 气吸型孔组合式小麦精密排种器设计与参数优化[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(24): 1-9.
Cheng Xiupei, Lu Caiyun, Meng Zhijun, et al. Design and parameter optimization on wheat precision seed meter with combination of pneumatic and type hole[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2018, 34(24): 1-9. (in Chinese with English abstract)
- [58] 史嵩, 刘虎, 位国建, 等. 基于 DEM-CFD 的驱导辅助充种气吸式排种器优化与试验[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(5): 54-66.
Shi Song, Liu Hu, Wei Guojian, et al. Optimization and experiment of pneumatic seed metering device with guided assistant filling based on EDEM-CFD[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(5): 54-66. (in Chinese with English abstract)
- [59] Liu Y, Mi G, Zhang S, et al. Determination of discrete element modelling parameters of adzuki bean seeds[J]. *Agriculture*, 2022, 12(5): 626.
- [60] Shi L, Zhao W, Sun B, et al. Determination of the coefficient of rolling friction of irregularly shaped maize particles by using discrete element method[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2020, 13(2): 15-25.
- [61] Lei X, Hu H, Wu W, et al. Seed motion characteristics and seeding performance of a centralised seed metering system for rapeseed investigated by dem simulation and bench testing[J]. *Biosystems Engineering*, 2021, 203: 22-33.
- [62] Mudarisov S, Badretdinov I, Rakhimov Z, et al. Numerical simulation of two-phase "Air-seed" flow in the distribution system of the grain seeder[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2020, 168: 105151.
- [63] Xu J Hou J Wu W, et al. Key structure design and experiment of air-suction vegetable seed-metering device[J]. *Agronomy*, 2022, 12(3): 675.
- [64] Liu Z, Xia J, Hu M, et al. Design and analysis of a performance monitoring system for a seed metering device based on pulse width recognition[J]. *Plos One*, 2021, 16(12): e0261593.
- [65] Xie C, Zhang D, Yang L, et al. Experimental analysis on the variation law of sensor monitoring accuracy under different seeding speed and seeding spacing[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2021, 189: 106369.
- [66] Kus E. Field-Scale evaluation of parameters affecting planter vibration in single seed planting[J]. *Measurement*, 2021, 184: 109959.
- [67] Lu B, Ni X, Li S, et al. Simulation and experimental study of a split high-speed precision seeding system[J]. *Agriculture*, 2022, 12(7): 1037.
- [68] 贾洪雷, 陈玉龙, 赵佳乐, 等. 气吸机械复合式大豆精密排种器设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(4): 75-86, 139.
Jia Honglei, Chen Yulong, Zhao Jiale, et al. Design and experiment of pneumatic-mechanical combined precision metering device for soybean[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(4): 75-86, 139. (in Chinese with English abstract)
- [69] 王在满, 裴娟, 何杰, 等. 水稻精量穴直播机播量监测系统研制[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(10): 9-16.
Wang Zaiman, Pei Juan, He Jie, et al. Development of the

- sowing rate monitoring system for precision rice hill-drop drilling machine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(10): 9-16. (in Chinese with English abstract)
- [70] 和贤桃, 丁友强, 张东兴, 等. 玉米精量排种器电驱 PID 控制系统设计与性能评价[J]. 农业工程学报, 2017,

33(17): 28-33.

He Xiantao, Ding Youqiang, Zhang Dongxing, et al. Design and evaluation of PID electronic control system for seed meters for maize precision planting[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(17): 28-33. (in Chinese with English abstract)

Trend analysis and prospects of seed metering technologies

Zheng Juan¹, Liao Yitao^{1,2*}, Liao Qingxi^{1,2}, Sun Mai¹

(1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2. Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China)

Abstract: Seed metering can be widely used to deliver the seeds or fertilizers from the hopper at selected rates during planting. However, it is still lacking in the quantitative and comprehensive analysis of the current technology of seed metering devices. In this study, a metrological analysis was systematically conducted on the existing literature on seed metering technology, in order to visualize the research trend, in terms of scientific research productivity, influence, and development power. The development of seeding technology was also summarized from the hot topics in recent years. The agricultural products were introduced from the domestic and foreign advanced agricultural machinery enterprises using frontier seed arrangement technology. Finally, the development trend was proposed from the industrialization application at present. The results showed that the seed metering technology was developed in a high-speed steady state. Much more scientific research output and influence in China were close to that in the United States. The high-impact journals included the *Biosystems Engineering*, *Computers and Electronics in Agriculture*, *Journal of Agricultural Machinery*, and *Journal of Agricultural Engineering*. High-impact scholars and institutions were focused on the seed metering technology for the typical crops in different regions. As such, the seed metering technology was advanced to upgrade the mechanization level. The development trend of seed metering technology was gradually changed from single-topic research on the realization of functions into the in-depth exploration of vertical subdivision topics, such as mechanism optimization, mechanism analysis, and virtual simulation. The current research hotspots of seed metering technology were focused mainly on high-speed simultaneous seeding, seeding uniformity, DEM-CFD coupling simulation, control, and monitoring system. In addition, the high efficiency and performance equipment can be expected to be further developed in the application of seed metering technology, particularly for the new products of seed metering in the running stage. Emerging technologies, interdisciplinary integration, and innovative thinking can be applied to develop with high speed, performance, precise, digital, and intelligent aspects. This review can provide a strong reference to grasp the research status, development trend, and innovation of seeding machines.

Keywords: agricultural machinery; seeder; seeding technology; research focus; trends; information visualization