

基于文献计量分析的农机电气化发展态势分析

王平¹, 许耀¹, 王万勇^{2*}

(1. 国网江苏泰州供电公司, 江苏 泰州 225309;
2. 江苏大学农业工程学院, 江苏 镇江 212012)

摘要: 农业机械的电气化对促进农业机械作业智能化、用能清洁化和产业转型升级具有重要意义, 是实现我国农业机械领域双碳目标的一个重要方面。文章针对目前农业机械电气化现状, 采用文献计量分析方法, 利用中国知网 (CNKI) 中期刊论文、学位论文和专利数据, 通过总体趋势、主题词和发表单位等进行数据分析, 阐述了农业机械电气化的发展态势。并对农业机械的典型应用大田、果园、设施农业等场景的农机电气化发展现状、存在问题和应用前景在进行探讨, 可为农机电气化发展提供政策和技术依据。
关键词: 农业机械; 电气化; 文献计量; 发展态势 中图分类号: TM763

Development Status Analysis for Electrification of Agricultural Machinery Based on Bibliometric

WANG Ping¹, XU Yao¹, WANG Wanyong^{2*}

(1. State Grid Taizhou Power Supply Company, Jiangsu Taizhou 225309, China; 2. School of Agricultural Engineering of Jiangsu University, Jiangsu Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Electrification of agricultural machinery has great significance in promoting the intelligent operation, cleaner energy utilization and industrial transformation and upgrading of agricultural machinery, and it is an important aspect for achieving the dual-carbon goal in the field of agricultural machinery in China. In this paper, in order to analyze the current status of electrification of agricultural machinery, the bibliometric analysis method is used to describe the development trend of electrification of agricultural machinery by using the data of journal papers, dissertations and patents in China Knowledge Network (CNKI). Through the data analysis of the general trend, subject words and publishing institutions, the development trend of agricultural machinery electrification is expounded. The development status, problems and application prospects of agricultural machinery electrification in the typical application of agricultural machinery in large fields, orchards, facility agriculture and other scenarios are discussed. This paper provide policy and technical basis for the development of agricultural machinery electrification.
Keywords: agricultural machinery; electrification.; bibliometric analysis; development status

0 引言

农业机械电气化 (以下简称农机电气化) 是指以电能为农业机械主要动力来源的过程, 以及以此为基础的各类自动化或智能化的过程。农业机械的电气化对促进农业机械作业智能化、用能清洁化和产业转型升级具有重要意义, 也是我国乡村电气化的一个重要环节^[1]。此外, 由于采用电能作为动力可以减少农业机械的碳排放^[2], 因此需要了解农业机械领域的电气化发展现状和趋势, 为农业机械电气化的发展进行总结与展望。

基金项目: 江苏省重点研发计划项目 (农机电气化应用前景分析) (BE2002327)。
收稿日期: 2024-11-07

本文通过中国知网 (CNKI) 数据库与文献计量学方法, 对我国农业机械电气化领域相关文献进行分析, 探讨农业机械电气化研究现状、发展态势与热点, 以期对农机电气化研究提供借鉴。

1 农机电气化发展的文献计量分析

1.1 文献获取

为了获取农机电气化国内外发展情况, 通过对中文科技文献 (中国知网) 中的期刊论文、学位论文和专利申请情况进行了检索。

1.2 期刊论文发表情况

1.2.1 论文发表趋势

图 1 为中国知网的期刊论文发表情况, 在 20 世

纪 50—90 年代，我国的农业机械化发展相对较慢，农机电气化主要集中在电力灌排相关技术的研究，零星有电动喷雾、除草等技术的探索。进入 21 世纪后，随着我国农业机械相关技术的发展，农机的电气化、电动化技术得到了发展，尤其是在 2010 年之后论文的发表量快速增长，到 2019 年超过 100 篇，表明农机电气化技术得到了高校和科研院所的重点关注。

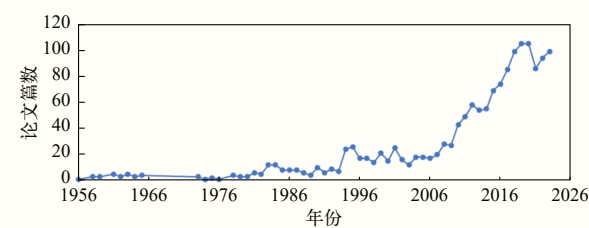


图1 农机电气化年度期刊论文发表情况

1.2.2 论文主题词分布

表 1 为发表论文所涉及的主题词，从分布情况看，主要是电动拖拉机及其配套驱动系统、植保无人机相关技术及实用效果等为农机电气化的主要研究热点。其中电动拖拉机技术的研究是在国家“十三五”重点研发计划项目部署了电动拖拉机相关研究项目后得到了快速发展。此外，农业无人机、尤其是植保无人机技术在农业生产过程中得到了大量应用。在农田管理的喷洒农药和播撒肥料环节，以无人机替代传统农机进行作业，每公顷能耗可减少碳排放为 5.11 kg CO₂e（二氧化碳当量）。10 亿公顷作业相当于减少碳排放 511 万 t CO₂e。这相当于

表1 期刊论文主题分布

序号	主题词	频次	序号	主题词	频次
1	电动拖拉机	146	11	电力提灌工程	15
2	植保无人机	46	12	电动喷雾机	14
3	拖拉机	39	13	施药器械	14
4	插秧机	22	14	农机化	13
5	农业机械化	17	15	甘肃省	13
6	无人机	16	16	节水灌溉	13
7	植保机械	16	17	电动农机	13
8	电气化	15	18	防治效果	12
9	纯电动拖拉机	15	19	电动车	12
10	控制系统	15	20	农机具	12

2.4 亿棵树一年的碳吸收量，也相当于减少了 192 万辆汽车的碳排放量^[3]。

表 2 为农机电气化研究的主要研究单位，从表中可以看出，目前开展农机电气化领域研发的主要单位包括河南科技大学、江苏大学等高等学校以及甘肃省景泰川电力提灌管理局、中国一拖集团有限公司等企业。主要研究领域包括电动拖拉机、电动播种机、电动植保无人机等。其中河南科技大学与中国一拖集团重点开展合作研究，已经研发出多款电动拖拉机。江苏大学则在园艺电动拖拉机、驱动电机及其驱动控制、电动移栽机等方面开展研究。南京农业大学重点在电动拖拉机及其控制系统开展了研究，中国农业大学在电动拖拉机和电动播种机等开展研究，甘肃省景泰川电力提灌管理局在电力提灌工程领域开展研究，黑龙江八一农垦大学重点在电动播种机领域开展研究，华南农业大学在电动植保无人机领域开展研究。

表2 期刊论文发表主要单位分布

序号	单位	论文篇数
1	河南科技大学	36
2	江苏大学	35
3	南京农业大学	26
4	中国农业大学	24
5	甘肃省景泰川电力提灌管理局	21
6	黑龙江八一农垦大学	17
7	中国一拖集团有限公司	16
8	华南农业大学	14
9	河北农业大学	14
10	西安理工大学	11

1.3 学位论文情况

1.3.1 学位论文总体趋势

学位论文是研究生人才培养的一个重要环节，学位论文能反映在该领域培养人才的情况。图 2 为我国农机电气化领域学位论文出版情况。从图中可以看出 2002 年开始学位论文涉及农机电气化，和期刊论文相同，2016 年开始学位论文的数量快速增加，到 2020 年超过 50 篇。

1.3.2 论文主题词分布

表 3 为农业机械电气化领域相关学位论文主题

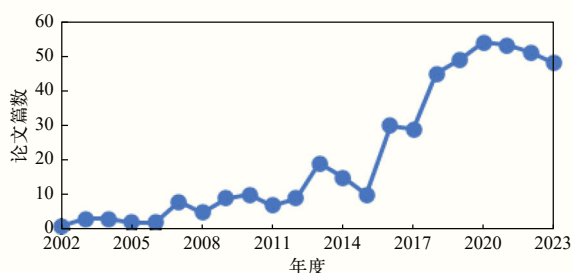


图2 农机电气化年度学位论文发表情况

表3 学位论文主题分布

序号	主题词	频次	序号	主题词	频次
1	电动拖拉机	43	11	农业基础设施	7
2	拖拉机	16	12	自走式	7
3	电驱动	13	13	植保无人机	7
4	控制系统	11	14	控制策略	7
5	驱动系统	10	15	策略研究	7
6	试验研究	10	16	水肥一体化	7
7	控制系统设计	10	17	园艺电动拖拉机	6
8	喷雾机	9	18	排种器	6
9	混合动力拖拉机	8	19	植保机	5
10	混合动力	8	20	能量管理	5

词分布情况。从表中可以看出，电动拖拉机及其配套电驱动、能量控制、控制系统是目前研究生学位论文的主要研究方向，此外植保机械，尤其是农业无人机植保技术是农机电气化发展的一个重要方向。学位论文的主题词分布基本和学术论文相似。

1.3.3 培养单位情况

表4为农机电气化领域研究生论文培养单位分布情况，从表中可以看出，江苏大学、南京农业大学、西北农林科技大学为该领域主要研究生培养单位。研究生学位论文所涉及的研究内容基本和发表期刊论文一致，如江苏大学集中在园艺电动拖拉机、拖拉机电驱动控制等领域，南京农业大学集中在电动拖拉机及其控制系统相关研究。

1.4 专利申请情况

1.4.1 总体趋势

图3为中国专利申请情况，2010年之前的专利申请量较小，而在2016年之后专利的申请量得到了快速增长。一方面说明我国农机领域对知识产权保护的重视，同时也说明在该领域的技术创新能力快

表4 学位论文培养单位分布

序号	学位授予单位	论文篇数
1	江苏大学	45
2	南京农业大学	36
3	西北农林科技大学	32
4	黑龙江八一农垦大学	13
5	湖南农业大学	13
6	中国农业科学院	12
7	山东理工大学	11
8	河北农业大学	11
9	东北农业大学	10
9	河南农业大学	10
9	河南科技大学	10
9	华南农业大学	10
9	山东农业大学	10

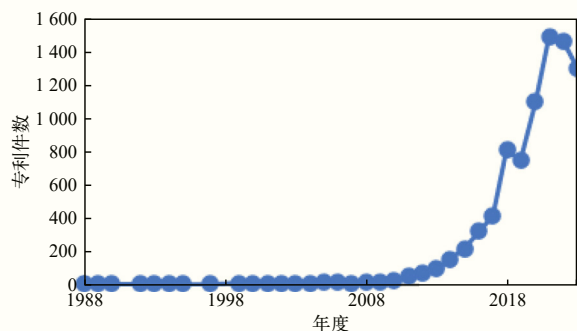


图3 农机电气化年度申请专利情况

速提升。从专利申请的类型看，目前授权的专利主要为实用新型专利，占专利申请总量的60%以上。由于发明专利的审核周期以及授权率问题，目前的发明专利主要为公开状态，授权的发明专利占发明专利的28%。另外外观专利也达到131件，表明电动农机，尤其是电动拖拉机的外观也得到了企业的重视，农机电气化开始向产品化方向发展。

1.4.2 专利主题词分布

表5为中国专利的主题分布情况，从表中可以看出我国农机电气化领域的技术和产品开发主要为施肥装置、灌溉装置、电动拖拉机等领域，其中灌溉和施肥系统需要采用水泵进行水肥的运输，因此主要是以电能为主。对于移动式作业机械，目前的电动农机基本覆盖了农业生产的耕种管收的全部环

表5 专利主题分布

序号	主题词	频次	序号	主题词	频次
1	施肥装置	778	11	农业种植	127
2	灌溉装置	769	12	收获机	118
3	电动拖拉机	327	13	灌溉设备	111
4	播种机	249	14	园林绿化	104
5	播种装置	217	15	一体机	100
6	灌溉系统	172	16	施肥器	100
7	施肥机	167	17	水肥一体化	99
8	收割机	166	18	无人机	95
9	植保无人机	154	19	可调节	80
10	喷雾机	152	20	农业灌溉	77

节，其中电动拖拉机、电动播种机、电动叶菜收割机和电动植保机械是目前移动式电动作业的主要方向。

1.4.3 专利申请单位分布

表6为专利申请量前10的申请人情况，其中高等学校包括江苏大学、河南科技大学、扬州大学、西北农林科技大学等，江苏大学在期刊论文发表、学位论文和专利申请量均为优势单位。在企业方面，洛阳智能农业装备研究院有限公司、株式会社久保田等企业专利申请量较大，其中洛阳智能农业装备研究院有限公司为由中国一拖牵头建设的国家农业机械创新中心，在电动拖拉机方面开展了大量的专利布局。

表6 专利申请人主要单位分布

序号	申请人	专利件数
1	江苏大学	62
2	河南科技大学	51
3	洛阳智能农业装备研究院有限公司	51
4	扬州大学	38
5	西北农林科技大学	35
6	株式会社久保田	35
7	中国农业大学	34
8	山东农业大学	33
9	东风农业装备(襄阳)有限公司	23
10	山东理工大学	21

2 农业机械电气化应用典型场景分析

农业机械的主要作业对象为农作物，根据农业生产对象的不同，对农业的类型和动力需求不同。目前在农业生产用能中，农田灌溉、农产品加工等固定应用场景以电能为主要用能形式。而对于大田、设施农业等场景的耕种管收以移动作业为主，由于受到动力大小受到了限制，影响了农机电气化在这些场景的应用。

2.1 大田作物生产

在大田作物生产中，其作业环节主要包括耕作、种植、田间管理和收获等主要环节，其中拖拉机和联合收获机是主要作业装备。由于这2类装备的动力要求较高，尤其是在黑龙江等大面积种植区域采用复式作业装备，要求大马力农用动力，因此此类装备的电气化进展缓慢，目前已经开展电动拖拉机和电动收获机械的开发^[4]。

在田间管理机械方面，采用电能作为动力的农田灌溉已经成为主要作业方式。在播撒作业机械方面，近年来，随着无人机技术的发展，无人机播撒技术在粮食作物和经济作物的生产中得到大量应用。而无人机的动力主要包括动力电池和汽油机2种形式。对于负载50 kg以下的农用无人机主要是以动力电池作为动力。其中以大疆、极飞等企业均在农用无人机领域开展了布局。农业无人机播撒肥料避免了高强度体力劳动，受到了水稻种植户的极大欢迎。另外，地面行走式电动施药机已大规模应用^[5]。

2.2 设施农业生产

设施农业生产系统根据对象不同，主要包括种植、畜禽养殖和水产养殖等方面。在设施农业生产用能方面，其设施运行的用能以电能为主，对于机械化作业方面则各有不同。

2.2.1 设施种植生产

设施种植生产主要是通过温室、大棚、日光温室等设施覆盖生产，其主要目标是为植物的生长提供合适的环境条件。设施种植生产过程的电气化主要包括设施的环境调控和设施生产过程的机械作业^[6]。

对于设施种植环境的调控，虽然不同区域的气候条件，设施结构形式包括大中小棚、连栋温室和日光温室，其环境控制大多为夏季的降温和冬季的

保温。在夏季降温中，主要有自然通风降温、强制通风降温、遮荫降温、湿帘风机降温和喷雾降温等方式，这些自动化作业中基本都是采用电机驱动。在冬季保温中，除采用燃油、燃煤、燃气、电加热等传统供热方式之外，还利用太阳能、地源热泵、空气源热泵等方式。燃油、燃煤等传统供热方式由于对设施内作物生长环境产生影响，其使用受到限制，可再生能源供热方式逐渐被推广应用^[6]，而这些供热方式均需要电力作为主要能源利用模式。此外在设施生产中还包括补光、补充 CO₂ 等措施，其中补光也是温室内的电能消耗的主要方式，采用高光效的 LED 补光可以提高温室的能源利用效率。对于现代的人工光型植物工厂系统，其内部的环境控制和自动作业系统全部采用电能作为能源^[7]。

对于设施内部机械化作业装备，目前的设施种植的机械化水平只有 43%，主要是耕作、田间管理的机械化。目前水肥一体化灌溉系统基本采用电力作为动力源，对设施内移动作业机械，其牵引动力为柴油和汽油。由于设施生产的封闭式结构，燃油动力对设施内的空气产生污染，因此园艺电动拖拉机和电动底盘成为设施种植中的主要动力方式得到重视。有线式和移动式电动化农机已经有相关的产品，对于有线式电动农机有穴盘播种、自动移栽生产线等。对于移动式电动农机主要包括电动拖拉机、电动运输车、电动植保机、叶菜电动收获机以及设施作业机器人等^[8-9]。

2.2.2 设施养殖生产

设施养殖包括畜禽和水产 2 大类。其中设施畜禽生产主要是通过畜禽舍为动物提供良好的生长环境，主要是对温度、湿度、光照、气体浓度等参数的调节，其主要方式包括通风设备、湿帘风机降温系统、光照调节设备等，这些设备的动力都是电能。和设施种植相似，设施养殖中设施环境控制也是以节能和减排作为主要的目标，以满足动物生长的环境条件。而在规模化养殖中，精准饲喂设备和粪便清除设备也是设施畜禽养殖中的一个重要作业装备，目前的这些设备也是以电能作为动力源^[10]。

设施水产养殖有室内养殖和室外养殖 2 种形式。室内养殖方式和设施种植相类似，通过温室设施来提供适合鱼类生活的环境条件，包括温度、湿度、光照等环境调节。水产养殖的一个重要调节参数是

水体环境，目前在水体环境调节中主要采用增氧泵为水体增加溶氧量，此类设备主要通过电能作为动力源。为了解决大面积范围内的电力供应问题，通过太阳能供电以及降低设备的能耗成为主要关注点。在水产养殖投饵设备方面，通过岸边投饵设备进行投饵会产生投饵不均匀问题，而利用燃油动力船进行投饵时会对水产的正常生活产生影响，因此近年来，电动投饵船也开始投入到水产养殖中，可减少了对水产的侵扰，同时电力设备有利于自动控制，可以实现无人化自动作业^[11]。

3 农业机械电气化发展分析

3.1 基于技术生命周期分析农机电气化发展趋势预测

一般将技术生命周期分为技术引入期、技术发展期、技术成熟期和技术衰退期 4 个阶段。根据农机电气化领域主题词，检索德温特专利全球数据库，共获取农机电气化相关专利 1 241 件，其按年度申请量如图 4 所示。

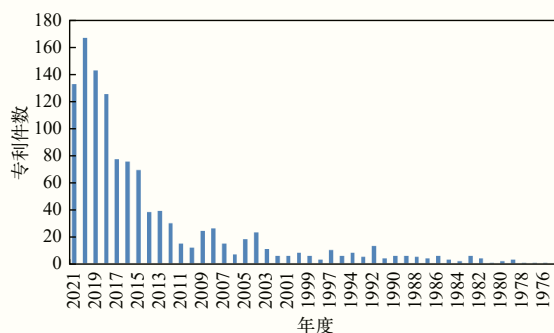


图4 农机电气化专利分布

代入德温特专利数据库中的专利数量，利用技术生命周期 Logistic 模型对农机电气化发展进行预测，结果见图 5。

模型的 3 个主要参数饱和点 (saturation)、反曲点 (midpoint)、成长时间 (growth time) 用于计算技术发展状态，其中饱和点为估算专利的累积数量的最大值，反曲点表示技术由成长期进入成熟期的转折点，成长时间为专利数量从 10%~90% 所花费的时间，即成长期和成熟期所需要的时间。预测的成长时间分别为 30.2 年。根据 Logistic 模型模拟的技术生命周期分析方法，农机电气化领域成长阶段划分结果如表 7，在 2015 年之前，农机电气化的发展处于萌芽阶段，2015 年开始进入成长期，预计

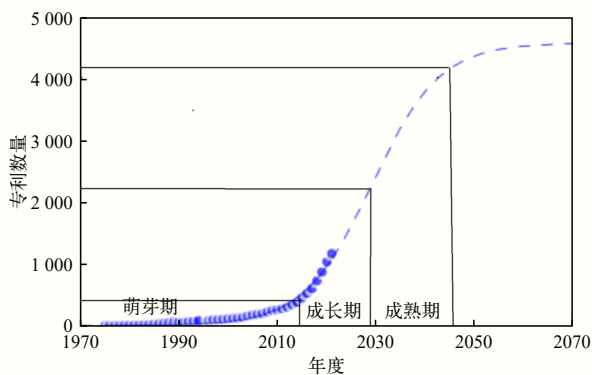


图5 Logistic 模型预测

表7 Logistic 模型预测结果

指标	数值
饱和点	4 590
反曲点	2029
成长时间	30.2
萌芽期	2015年以前
成长期	2015—2029年
成熟期	2030—2045年
衰退期	2045年以后

在2030年进入成熟期，在2045年以后进入衰退期。目前，农机电气化技术正处于快速发展的成长期，具有广阔的发展空间和研究意义。

3.2 农业机械电气化发展有利因素

3.2.1 动力电池技术为农机电气化发展提供动力

2022年我国农机的总动力达到11.06亿kW，电动力的占比也从2010年的16.7%提升到2021年的18%。同时，新能源汽车产业爆发式增长以及储能需求提升，带动动力电池产业高速发展。据统计，2023年全球动力电池装车量达到705.5GW·h，同比增长38.6%。在装车量前十名的企业中，中国动力电池企业占据6个席位，合计市场份额达63.5%^[12]，而目前的动力电池主要是应用于电动汽车等道路车辆，在拖拉机等非道路车辆中还处于起步阶段。因此，充分利用我国在动力电池技术方面的领先优势，开展农机动力的电动化替代。

3.2.2 电驱动技术的发展为农机电气化发展提供驱动

目前内燃机的能源利用率最高可以达到50%^[13]，而机械传动方式的效率受到多种因素的影响，尤其是农田的工况较差，导致农业机械的传动效率低和

故障率高，影响了农业机械的使用寿命和无故障工作时间。而电机驱动技术可以明显提高整机系统能源的利用效率，目前永磁同步电机电能利用率最高可以达到97.5%，这是内燃机无法企及的^[14]。应用轮毂电机的分布式驱动型电动汽车在系统效率、车身控制、平台开发等方面具有突出优势，是新一代电动汽车领域的研究热点和重要发展方向^[15]，这些都为电动农业机械的发展提供了基础条件。另外，采用电机驱动的农业机械在智能化控制方面也具有优势，例如通过采用轮毂电机的农业机械在田间行走、转向，在复杂农田环境中有更好的工作性能^[16]。

3.2.3 农机电气化可以促进农机产品碳排放升级

与传统燃油动力型农机相比，电动农机具有低排放、高效节能等优点。目前我国农机总动力超过10亿kW，根据“十四五”规划，农机总动力在2025年要实现11亿kW。目前我国农机的能源消耗情况，现有柴油动力设备10%替换为电力核算，通过以电力代替柴油方式，按照柴油的标准煤折合系数为1.457kg，电力为0.123kg，须消耗电力为174.715亿kW·h。按照1kg柴油碳排放为3.0959kgCO₂e，1kW·h的碳排放0.5810tCO₂e核算，累计减少CO₂排放量为455万t。因此，农业机械电气化的发展对于农业机械作业的碳减排具有重要作用。

3.2.4 农机电气化是农业机械化补短板的解决方案

随着我国农机产品补短板 and 高端智能化转型升级需求，新能源电动农机具有结构简洁紧凑、控制灵活、低碳高效、无尾气、无噪音污染和维护成本低等特点。根据能源发展方向、市场需求和技术条件，在目前国家给予的政策指导和补贴扶持下，新能源电动农机正在成为我国农机市场未来发展的趋势之一，有望与传统燃油型动力农机实现优势互补^[17]。此外，在我国农业机械化率较低的产业中，如设施农业机械化率为42.05%，水产养殖仅为33.50%，水果和茶叶综合机械化率均在30%左右。在薄弱区域方面，丘陵山区特别是西南丘陵山区，机械化水平不高，2个西南丘陵山区省份不到30%，部分丘陵山区县则更低^[18]。这些薄弱环节、薄弱产业和薄弱区域的机械化率较低的一个重要原因是其作业装备需求大多为轻简化，而采用动力电池作为动力来源，是实现轻简化作业装备开发的一个重要

解决手段。根据山西省推广电动农机的经验来看，电动农机非常适应小农生产、丘陵山区的中小型农机装备。可快速解决主要经济作物薄弱环节“无机可用”的问题，在设施农业、农产品烘干、植保和林果业等领域有很大的产品开发前景^[19]。

3.2.5 国家能源政策促进农机电气化转型发展

根据国家2020年9月提出2030年“碳达峰”与2060年“碳中和”目标，为了达到“双碳”目标，国家也出台了相关的能源政策，严格控制化石能源消费，积极发展非化石能源。实施可再生能源替代行动，大力发展风能、太阳能、生物质能、海洋能、地热能等，不断提高非化石能源消费比重。而针对农机领域目前以柴油和汽油为主要能源的特点，要实现非化石能源替代的主要方式就是发展电动化农机^[2]。

3.2.6 农机电气化有利于生产过程绿色化和智能化

长期以来，国内农业机械以燃油动力为主，但燃油动力在工作时产生的CO₂、CO和NO₂以及PM（碳烟颗粒物）和HC（碳氢化合物）等排放严重的污染，尤其是在相对封闭空间的设施作物吸收后，再通过食物链对人类的健康造成损害。而采用电气化作业后，由于农机作业所产生的废气、油污以及噪声污染均有很大程度的降低，有利于生产过程和农产品质量的绿色安全。同时通过电驱动技术有利于农业机械系统的行走、转向以及作业过程的精确控制，以实现农业机械的智能化发展。

3.3 农机电气化发展制约因素

3.3.1 农业机械专用配套动力电池、电驱动及电池管理技术

虽然以农业无人机、电动播种机、叶菜收获机等农机电气化产品已经开发并部分应用于农业生产过程中。但是，由于农机为非道路机械，在田间作业时，其作业环境复杂，灰尘、污水以及颠簸等对动力电池和驱动电机均提出了特殊的需求。尤其是目前机械系统底盘的减震性能差，机器在作业过程中的振动冲击对动力电池的稳定性和安全性带来较大隐患。同时，目前电动化农机产品中的动力电池及其配套的驱动技术、电池管理、动力匹配等关键技术主要是借鉴电动汽车领域的相关技术和产品，缺少针对农机作业工况的专用配套动力电池、电驱动、动力匹配及电池管理相关技术和产品。

3.3.2 农机作业的季节性、时效性

农业机械作业的对象为农作物，而农作物的生产具有季节性特点，农作物的不同生长阶段对农机作业的要求也不同。由于气候原因，农作物生长，尤其是大田作物的生长具有明显的时效性，需要在短时间内完成农机作业，因此，要求农机能够在短时间内连续作业。为了保证农机的自重和体积，动力电池的容量受到限制，其连续作业时间较短，无法满足连续作业需求。此外农业生产有季节性特点，往往机器的作业时间很短，大多时间均处于闲置状态，这样的使用环境对于电池也是不利的，无法发挥其性能。

3.3.3 电动化农机的制造成本限制

农业生产属于第一产业，由于农产品价格因素，农业生产成本影响了农民收入，而农机投入是农业生产重要成本。由于目前的动力电池成本相对较高，且需要配置电池管理系统和动力分配系统，导致电气化农机的制造成本过高。虽然电气化农机的运行成本相较于燃油机具要低，但是由于一次性投入过大，影响了农民对电气化农机的认可。

3.3.4 农机电气化的科技创新与投入不足

从“十三五”开始，国家科技部就开始组织开展电动农机的开发，目前重点部署电动拖拉机的开发。以中国一拖集团、山东时风集团为代表的拖拉机企业开展了相关的技术攻关工作。目前已经开发了基于锂电池和氢燃料电池的电动拖拉机，但还处于样机阶段。由于电池能量密度原因，电动拖拉机无负载作业时间可以达到4h，而有负载作业时仅能连续作业1h。因此还需要电池管理技术、电驱动技术与农机设计等多领域的专家协同攻关，提升大功率农机的电气化发展^[20]。虽然国家科技部、工信部、农业农村部以及各级科技和工业部门均在农机电气化，尤其是电动农机领域开展研发和补贴政策的布局，但是相较于新能源汽车领域的重点研发专项、国家补贴等政策，我国在农机电气化领域的研发和政策性投入严重不足。

4 农机电气化发展建议

4.1 结合生产实际，明确发展方向

目前，我国农机发展的主要方向为补短板和高端智能化。因此，在农业机械电气化发展过程中，

应该结合实际,以需求侧驱动农机电气化发展:针对丘陵山区和设施农业产业的需求,通过搭建通用化、模块化驱动平台^[18];开发电动平台配套作业机具,完善电动农机的功能,方便机器操作,以扩大电动农机的适用范围并减少能源消耗和环境污染;针对农机高端智能化发展需求,使农机电动化与自动驾驶、车联网、人工智能等技术相结合,为农业自动化、智能化提供动力^[21]。

4.2 找准突破重点,满足发展需求

由于不同农作物和不同生长阶段对农机的需求不同,须根据不同的需求,找准农机电气化的发展方向。对于大田粮食作物农机在电动拖拉机、大负载电动植保机等关键技术突破,以满足智能农机装备技术创新和节能减排需求;对于特经作物,尤其是丘陵地区充分利用电动化的轻小型特点,开发便携式作业装备、电动底盘以及移动作业辅助装备^[22];对于设施农业生产,在已有的设施环境调控基础上,开展设施农业新能源利用和节能调控技术创新,重点开展电动化作业机械补短板,以实现设施农业全程电气化^[23];农产品加工机械重点进行新能源和清洁能源利用,以降低农产品采后初加工的能耗,提升生产效率^[24]。

4.3 结合作业特点,实现技术迁移

针对目前农机电气化技术主要通过电动汽车相关技术的迁移现状,结合农机作业的特点,重点开展面向农业机械专用的动力电池、驱动电机、动力匹配及管控系统研发。通过提高电池容量,缩小电池体积,以此延长电动农机的工作时间,提高电动化农机应用的可持续性。通过改善机器结构和动力电池性能,以提高动力电池的抗冲击性能。研发电动化农机专用的驱动电机,不断提高电机的效能,以此满足不同地形、不同农业生产环境下应用电动农机的要求。研发适用于电动农机的动力匹配技术和整车控制系统,以此提高电动农机的自动化控制水平^[25]。通过提高自动化控制水平,减少电动农机操作对于人力的依赖性,促进农业智能化。

4.4 制定行业标准,提高使用效率

目前电动汽车已经形成相对较为完善的标准体系,而农业机械电气化由于刚起步,还缺乏相关的技术标准。针对农业机械电气化发展的需求,借鉴电动汽车相关标准,结合传统农机标准体系,制定

规范的术语、技术、安全、性能、试验等规范^[26]。在制定标准过程中结合行业发展的趋势,从农机的动力电池、电驱动、控制系统等方面制定农业机械电气化相关技术标准,通过标准化动力输出、快速换电、移动式换电站、通用动力系统、模块化组合式作业装备等技术的标准化,提高电气化农机的系统互换性,提升动力电池和动力系统的使用率,实现与行业发展良性互补。

4.5 借鉴发展经验,加大补贴力度

在现有农机购机补贴基础上,大力推广农业机械电气化技术,借鉴新能源汽车产业发展经验,通过农业、工信、科技、国家电网等多部门协同,共同推进农机电气化的科学研究、技术创新、产品推广、作业用能等环节的补贴力度^[27]。通过制定人才补贴政策,鼓励和引导高等院校开展农业机械电气化专业研发人才培养,职业学校进行农机电气化新型职业技能人才培养。引导不同领域专业人才进入农机电气化领域的研发、制造和使用相关领域,以满足农机电气化专门技能人才的需求。

4.6 加强电网建设,拓展服务边界

电网企业要科学规划建设农村电网,主动对接各类农机电气化实验性、示范性项目,在粮食重要产区加快田间电力配套设施建设^[28];开展电气化农机充电设施对农村地区配电系统负荷影响、充电设施谐波污染问题以及充电设施容性负荷影响的前瞻性研究^[29];深度参与退役电池交易市场建立,打通退役电池下游储能市场,进一步丰富梯次利用应用场景;组织各类电气化农机的“下乡”推广活动,探索适应电气化农机的定制化供电服务^[30]。

5 结束语

农机电气化是农业生产的智能化、用能清洁化和产业转型升级的一个重要发展方向。本文通过文献计量分析方法对农业机械的电气化发展态势进行了分析。分别从期刊论文、研究生学位论文和专利等科技文献进行分析,对总体发展趋势、领域主题词、主要研发单位等方面对农机电气化的发展态势进行了分析。对大田生产、设施农业生产方面的农机电气化应用现状进行了详细地分析,基于技术生命周期分析农机电气化发展态势预测,分析了农业电气化发展的有利因素和制约因素,提出在农业生

产过程的农机电气化发展趋势。

参考文献

- [1] 胡永朋,陈俊章,高玉明,等.我国乡村电气化发展现状与建议[J].**电力需求侧管理**,2023,25(5):34-40.
- [2] 屈博,刘畅,李德智,等."碳中和"愿景下电力消费侧发展模式转型探讨[J].**电力需求侧管理**,2021,23(5):2-4,34.
- [3] 农业无人机行业白皮书[EB/OL].<https://ag.dji.com/cn/newsroom/ag-news-cn-ag2022>.
- [4] 沈文龙,周俊,姬长英,等.中国电动拖拉机研究进展[J].**中国农机化学报**,2017,38(10):102-107.
- [5] 李欣雨,温晓鑫,葛宜元,等.农业植保无人机发展现状及趋势[J].**农机使用与维修**,2017(8):1-4.
- [6] 付学谦,杨菲菲,周亚中,等.设施农业能源互联网智能预警理论:评述与展望[J].**农业工程学报**,2021,37(21):24-33.
- [7] 王建平,王纪章,周静,等.光照对农林植物生长影响及人工补光技术研究进展[J].**南京林业大学学报(自然科学版)**,2020,44(1):215-222.
- [8] 张跃峰.新形势下设施农业及其机械化发展思考[J].**农机质量与监督**,2020(8):16-19.
- [9] JIN Y,LIU J,XU Z,et al.Development status and trend of agricultural robot technology[J].**International Journal of Agricultural and Biological Engineering**,2021,14(4):1-19.
- [10] 钟志堂,崔军,吴小伟.江苏畜禽养殖机械化现状分析和思考[J].**农机质量与监督**,2020(12):33-35.
- [11] 钱梦男,赵德安,洪剑青,等.河蟹养殖自动作业船电池剩余电量估算研究[J].**软件导刊**,2020,19(9):66-6,9.
- [12] 张维佳.2022年全球动力电池装机量大增71.8%中国厂商占六成市场[N].**中国电子报**,2023-02-21.
- [13] 郭洪宾,于惠韵,申广.分布式能源系统配置优化[J].**分布式能源**,2018,3(4):47-52.
- [14] 鲍晓华,刘伟峰,孙跃,等.低速大转矩永磁直驱电机研究综述与展望[J].**电工技术学报**,2019,34(6):1148-1160.
- [15] 章恒亮,花为.分布式驱动系统用轮毂电机及其技术综述[J].**中国电机工程学报**,2024,44(7):2871-2886.
- [16] 刘慧,龙友能,何思伟,等.四轮独立电驱动高地隙喷雾机辅

助转向系统设计与试验[J].**农业工程学报**,2021,37(13):30-37.

- [17] 张铁民,闫国琦,温利利,等.我国电力农业机械发展现状与趋势[J].**农机化研究**,2012(4):236-240.
- [18] 王晓文,袁寿其,贾卫东.丘陵山区农业机械化现状与发展[J].**排灌机械工程学报**,2022,40(5):535-540.
- [19] 郭海鸿.山西省实施电动农机奖补政策的几点体会[J].**农业机械**,2019(5):69-71.
- [20] 刘孟楠,雷生辉,赵静慧,等.电动拖拉机发展历程与研究现状[J].**农业机械学报**,2022,53(S1):348-364.
- [21] 吴正开,王家忠,邢雅周,等.基于无人驾驶电动拖拉机的自适应跟踪算法研究[J].**中国农机化学报**,2023,44(11):176-183.
- [22] 崔思远,曹蕾,陈聪,等.基于应用场景的丘陵山区农业机械化发展路径研究[J].**智能化农业装备学报(中英文)**,2024,5(2):1-8.
- [23] 杨杭旭,周俊,齐泽中,等.温室电动拖拉机旋耕稳定性时序分析与前馈PID控制方法研究[J].**农业机械学报**,2024,55(3):412-420.
- [24] 李欢,张鹏飞,宴伟标.热泵-电加热联合烘干机在食品烘干上的应用[J].**轻工科技**,2020,36(5):6-7.
- [25] 李利桥,高宗余,聂晶.电动拖拉机混合电源负载自适应能量管理策略研究[J].**农业机械学报**,2024,55(9):459-469.
- [26] 薛占坡,赵心,吴蒙,等.新能源电动汽车与拖拉机标准化现状及趋势[J].**拖拉机与农用运输车**,2022(5):1-5.
- [27] 胡春雨,沈春雷,唐莎莎,等.新能源电动农机一源多用创新供能赋能农网农机融合发展——基于全国536份调查问卷分析[J].**农业工程**,2024,14(2):61-72.
- [28] 夏利利,卞兆娟,董安奇.电动农机移动充电设备设计[J].**电器与能效管理技术**,2023(5):45-50.
- [29] 吕泽焱,韩刚,俞典,等.关于浙江省农村充电基础设施建设的分析与探讨[J].**中国能源**,2024,46(Z1):142-152.
- [30] 邹铁,沈庆,邵宏,等.考虑负荷可调度特性的农村配电系统光-储-充规划展望[J].**农村电气化**,2023(8):1-5.

作者简介

王万勇(1978—),男,研究生,高级工程师,研究方向为农村电气化,E-mail: tzbarton@qq.com.

(责任编辑:袁航)

(上接第51页)

配变高压侧常规配置跌落式熔断器加避雷器,实现过载、短路、过压保护,但无法确保有效地隔离。若台变高压侧选用智能柱开,从保护配合角度,相间短路故障需要具备对支线末端靠近台变中压侧的短路电流能有精准的估算或计算能力,相间短路故障和单相接地故障都需要具备远方定值维护能力,这样加上智能柱开本身具备的远方操作功能,才能实现台变故障的抢跳就近隔离,以及无需人工现场更换熔丝投跌落的消耗,综合性价比更优。

参考文献

- [1] 黄立飞,王喜梅,薛原.整县屋顶分布式光伏接入影响分析[J].**农村电气化**,2022(5):72-74.
- [2] 吴成然,庄智,白涛."城中村"台区剩余电流动作保护器配置研究[J].**农村电工**,2015(12):28-29.
- [3] 秦金宣.分布式光伏发电的继电保护策略[J].**消费电子**,2022(4):88-90.

作者简介

杨秋昀(1989—),男,工学学士,工程师,从事配电网一二次设备的检测,开展配电网的定值核查、布点规划等工作,E-mail: 1009157449@qq.com.

(责任编辑:张峰亮)