

引用本文格式 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. DOI: 10.19998/j.cnki.2095-1795.2024.02.010. HU Chunyu, SHEN Chunlei, TANG Shasha, et al. Innovative energy supply model to intelligent electric agricultural machinery of one source multipurpose enabling integration and development of rural power grid and agricultural machinery: based on analysis of 536 questionnaires nationwide[J]. Agricultural Engineering, 2024, 14(2): 61-72.

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

胡春雨¹, 沈春雷¹, 唐莎莎¹, 段红石¹, 陈月锋², 杨 晓³, 郑宗明⁴

(1. 国网综合能源服务集团有限公司, 北京 100052; 2. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司, 北京 100083;
3. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 4. 华北电力大学新能源学院, 北京 102206)

摘 要: 随着我国“三电”技术的快速发展, 新能源电动农机也如雨后天春笋般迅速崛起, 一源多用的提出是解决新能源电动农机季节性闲置、利用率低、无法与农村电网(以下简称农网)新型电力系统互动融合等问题的创新发展模式, 具有清洁环保、数智化程度高、易于组网的现代化技术特征。针对新能源电动农机一源多用的关键技术、应用场景、实施路径和商业模式等存在问题与发展前景, 面向农机、农业、电力和电网等相关从业人员开展网络问卷调查, 从一源多用技术发展潜力和农网农机融合认知态势等视角, 基于调研结果, 研究了一源多用赋能农网农机融合的农机电能替代潜力、应用场景、综合效益等, 分析了一源多用的实施路径和商业模式, 提出了一源多用创新供能模式赋能农网农机融合的关键技术和扶持政策建议。结果表明, 新能源电动农机一源多用发展模式具有较好经济效益和环保效益, 发展前景被普遍看好, 对落实双碳目标与乡村振兴战略具有积极意义。未来仍需开展新能源电动农机和电网融合互动关键技术协同攻关和应用研究, 探索可持续且多方共赢的良性商业模式。

关键词: 电动农机; 一源多用; 农网农机融合; 新型微电力系统; 商业模式

中图分类号: S2 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-1795(2024)02-0061-12

DOI: 10.19998/j.cnki.2095-1795.2024.02.010

Innovative Energy Supply Model to Intelligent Electric Agricultural Machinery of One Source Multipurpose Enabling Integration and Development of Rural Power Grid and Agricultural Machinery Based on Analysis of 536 Questionnaires Nationwide

HU Chunyu¹, SHEN Chunlei¹, TANG Shasha¹, DUAN Hongshi¹, CHEN Yuefeng², YANG Xiao³, ZHENG Zongming⁴

(1. State Grid Integrated Energy Service Group Co., Ltd., Beijing 100052, China; 2. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd., Beijing 100083, China; 3. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 4. School of New Energy, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: With rapid development of China's "three electricity" technology, new energy electric agricultural machinery has also mushroomed rapidly. The proposal of one source multipurpose is an innovative development model to solve problems of seasonal idleness, low utilization rate and inability to interact with new power system of rural power grid. It has characteristics of clean and environmental protection, high degree of mathematical intelligence and easy networking. Focused on key technologies, application scenarios, implementation paths, business models and other problems and development prospects of new energy electric agricultural machinery one source multipurpose, network questionnaire surveys for domestic agricultural machinery, agriculture, electricity, power grids and other related practitioners were conducted. From perspective of development potential of one source multipurpose and cognitive situation of integration of rural power grids and agricultural machinery, based on research results, one source multipurpose enabling electric energy

收稿日期: 2023-10-09 修回日期: 2023-11-03

基金项目: 国网综合能源服务集团有限公司智慧农机电源与电网融合互动关键技术与商业模式研究项目
(SGJNO000SCJS2310075)

作者简介: 胡春雨, 硕士, 高级工程师, 主要从事电能替代、智能电网等研究 E-mail: huchunyu@139.com
陈月锋, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 主要从事生物质能工程技术与装备研究 E-mail: yfchen003@163.com

在线投稿
www.d1ae.com

substitution potential, application scenarios, comprehensive benefits of integration of rural power grids and agricultural machinery was studied and discussed. Implementation path and business model of one source multipurpose was analyzed. Key technologies and supporting policy suggestions for one source multipurpose agricultural machinery integration innovation model were proposed. Conclusions showed that, development model of one source multipurpose of new energy electric agricultural machinery has good economic and environmental benefits, and its development prospects were generally optimistic. It has positive significance for implementing dual carbon goals and rural revitalization strategies. In the future, it is still necessary to carry out collaborative research and application of key technologies for integration and interaction between new energy electric agricultural machinery and power grid, and explore a sustainable and mutually beneficial business model.

Keywords: electric agricultural machinery, one source multipurpose, integration of rural power grid and agricultural machinery, new micro-power system, business model

0 引言

一源多用是指新能源电动农机同时具备用能、储能、供能等功能。首先是作为用能端,发挥新能源电动农机清洁用能和主动作业性能,支持电动拖拉机等新能源农机装备进行作业。其次是作为储能装置,将传统电网、风电和光伏等可再生能源储存在电动农机动力电池中,并且电动农机动力电池在能量设计时均考虑惯性保护,稳定地留待使用。最后是供能,需要用能时将电动农机电池中的电能释放出来,可作为独立的移动式供能单元,也可以通过设计反向充电,集中向电网反向供电,通过智能物联网与农村电网、新能源电力系统、新能源汽车和电动自行车等进行信息交流,建立云端数据库,并接入传统电网综合决策系统,形成电力群智能体,协助电网调峰、调压和调频,应对用能峰谷和新能源波动峰值,调和源网荷储多方矛盾。因此,新能源电动农机一源多用具有用能清洁、灵活方便和易实现数字化控制等特点,具备成为乡村新型电力系统惯性元件的潜力,有助于构建乡村新型微电力系统,促进农村电网(以下简称农网)农机融合发展,推动农业由用能迈向产能,促进农业与能源产业的融合发展,开启农业绿色低碳发展新篇章,对实现农机强国、绿色农业、农业强国和双碳目标等国家战略落地具有重要意义。但目前一源多用的发展前景与可行性未知、应用场景不断、经济效益与实施路径不明等,有待进一步研究探秘和协同探索解决,故本研究依据一源多用赋能农网农机融合发展关键技术和商业模式等,面向全国进行了问卷调研,为构建基于新能源电动农机的乡村新型微电力系统关键技术研究 and 扶持政策等提供参考和思路。

1 问卷设计与调查实施

1.1 问卷设计

问卷调查分析主要吸纳了农机领域和电力电网领域中对新能源电动农机和电网融合互动的专业看法和

理解,农机农业领域专家从农业生产环节、农机用能特性、农机电动化关键技术等方面给予了专业性意见和建议,电力电网领域专家对电力系统、农村电网、新能源消纳和储能技术等给予了专业性指导和建议,为一源多用赋能农网农机融合提供了有力依据。

(1) 文献研究。根据电动农机、农业电气化、电能替代、源网荷储、一源多用、车网融合和商业模式等关键词,在中国知网进行文献检索,结合已有研究,归纳总结农机电动化发展存在的问题,农网农机融合技术瓶颈和一源多用技术路径与商业模式等,为问卷调查设计提供框架。

(2) 问卷设计。结合农业生产类型和农机作业环节、农网农机融合关键技术、农机和能源认识态势及应用场景和发展前景等设计问卷,保证每个问题都有3个以上选项,尽可能覆盖主要表现。为避免问题和选项的专业性太强,采用相对比较直白、易理解的问题表述和选项表现形式,以适合非专业的人员乐于参与且不觉得枯燥乏味。

(3) 效度检验。问卷初步编成后,请教相关从事农机农业和电力电网的研究和应用专业人员进行检验,确保问卷内容的效度。

1.2 问卷组成

问卷共由6部分组成,每部分设置了多个子题目,共计33个问题选项,数据采集使用选项型和连续型两种表达方式。

第1部分为受访者基本情况,包括年龄构成、所在地区的农业类型及职业画像。

第2部分为所在地区农业领域农机动力与能源利用情况,包括农机动力类型、农业生产用能、新能源替代可能性及其优势等。

第3部分为发展前景,包括农业电气化装备类型,农机电气化前景、普及应用及智能化可能性等。

第4部分为应用场景,包括适合电动农机应用的生产环节,适宜电动农机应用农业生产领域,以及实现农机电动化需要解决的关键技术等。

第5部分为电动化农机装备由用能向产能/供能转变，包括农闲时电动农机的其他用途，农闲时利用农机电源谋取收益的意愿，一源多用的可行性，以及购买新型电动农机的意愿等。

第6部分电动农机发展的制约因素，包括电动农机发展的制约因素、关键技术、充换电预期、供能模式选择、风险因素及购机驱动因素等。

1.3 调查实施结果及受访者画像

为了扩大调研范围，利用问卷星做网络问卷调查，面向全国不同地区、不同职业、不同年龄的人群进行调查，最终收回536份有效问卷。从IP归属地看，华北地区占比32.66%、华东地区占比19.97%、东北地区占比15.30%、西北地区占比13.06%，华中、西南和华南地区共占比18.30%；另有4份IP地址来自境外。调查结果在一定程度上可以反映全国（除港、澳、台）情况，信息及数据具有一定科学性和代表性，如表1所示。

受访者的职业画像如图1a所示。从事农机研发、

生产、销售、农机合作社和农事服务人员，以及直接和间接从事农业生产人员占比居多，共计占比约55%；与农机直接相关的人员占35.45%，电力、能源、环保相关人员占比6.72%，汽车、工程机械等装备制造业人员占比6.72%，计算机、互联网、信息服务人员占比3.92%。从职业构成来看，从事农机、农业、能源、环保、装备制造业和计算机等相关工作人员占比较高，可能是因为这些职业人员具有较高的专业知识和技能，对农机电动化和电网融合创新利用的了解和认知程度也较高。

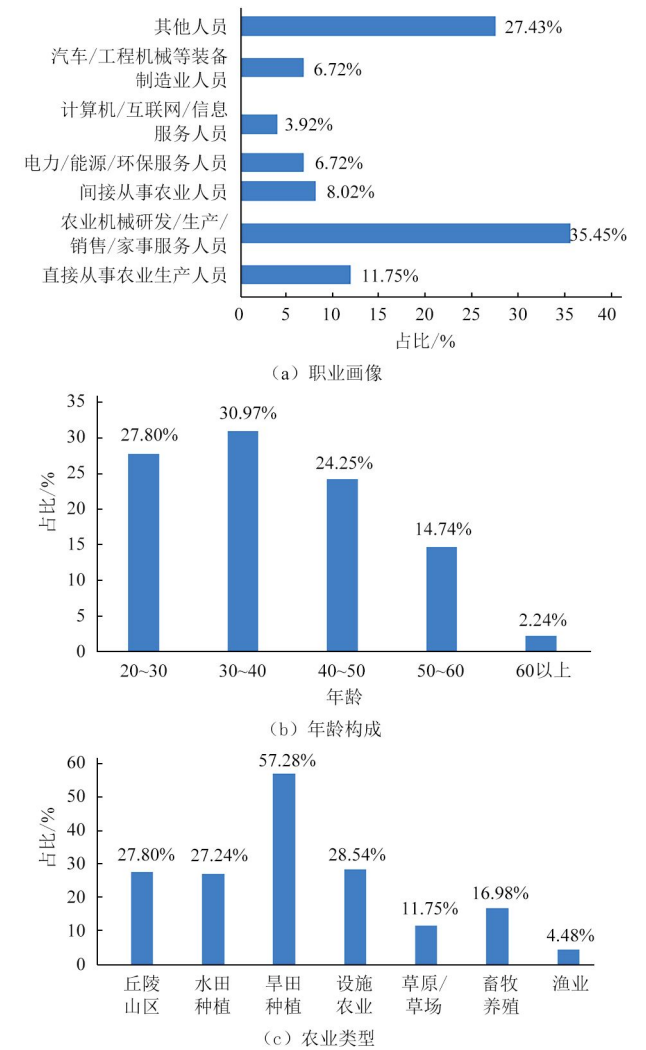


图1 受访者背景特征画像

Fig. 1 Background feature portrait of transferred personnel

受访者年龄构成如图1b所示。30~40岁166人，占比最高，为30.97%，反映出该年龄段的人群对农机电动化和新能源电源创新利用有较高的关注度和认知度；20~30岁149人，占比27.80%；40~50岁130人，占比24.25%；50~60岁占比14.74%；60岁以上占比2.24%。受访者年龄跨度大，随着年龄的增长，人群对农机电动化和新能源电源创新利用的关注度和认知度逐渐降低。

表1 受访者区域分布

Tab. 1 Regional distribution of transferred personnel

受访者来源	数量	占比/%	合计/%
华北	北京市	97	18.10
	内蒙古自治区	30	5.60
	山西省	27	5.04
	河北省	13	2.43
	天津市	8	1.49
华东	江苏省	27	5.04
	山东省	25	4.66
	江西省	15	2.80
	浙江省	12	2.24
	上海市	12	2.24
	安徽省	10	1.87
	福建省	6	1.12
			19.97
东北	黑龙江省	41	7.65
	吉林省	35	6.53
	辽宁省	6	1.12
西北	青海省	28	5.22
	宁夏回族自治区	15	2.80
	陕西省	9	1.68
	新疆维吾尔自治区	9	1.68
	甘肃省	9	1.68
华中	河南省	20	3.73
	湖北省	6	1.12
	湖南省	4	0.75
西南	重庆市	16	2.99
	四川省	9	1.68
	贵州省	7	1.31
	云南省	4	0.75
	西藏自治区	3	0.56
华南	广东省	14	2.61
	广西壮族自治区	13	2.43
	海南省	2	0.37
境外		4	0.75

受访者所在地区主要农业领域类型如图 1c 所示。从事旱田种植人员占多数, 占比达 57.28%; 其次是从事设施农业人员, 占比 28.54%; 从事水田种植和丘陵山区的农业人员占比分别为 27.24% 和 27.80%; 从事畜牧养殖和草原/草场作业人员占比分别为 16.98% 和 11.75%; 从事渔业人员占比 4.48%。可见, 受访者所处地区可能存在多种农业领域类型, 并且调研所覆盖的农业生产领域类型较为全面并有一定差异性。

综上所述, 受访者的年龄跨度较大、从业专业组成合理、所在区域覆盖面广、农业生产领域类型相对比较典型, 说明调研数据及其结果有一定的代表性、专业性、科学性和全面性, 问卷结果的效度较高。

2 调查结果

2.1 农机动力供能潜力

截至 2021 年底, 我国农机总动力 107 764.3 万 kW, 农机保有量 2.06 亿台(套)。其中大中型拖拉机 498.07 万台, 小型拖拉机 1 674.99 万台, 可见农机领域的电能供应潜力巨大。首先调研了受访者对农机能源动力类型的认知。由图 2a 可知, 有 92.54% 的受访者了解柴油动力, 可见柴油动力是我国农业装备最主要的能源动力类型; 汽油动力占比 55.60%, 电动力占比达到 55.04%; 油电混合动力、太阳能、天然气/甲烷动力和氢能的占比相对较低, 分别为 27.05%、17.35%、11.75% 和 8.21%。由此可见, 我国农业装备的能源动力类型以传统的柴油动力为主, 但新能源电动力的比

例也相对较高。

由图 2b 可知, 当调研“哪种能源最有可能替代传统化石能源用于农业生产”时, 有 61.01% 的受访者认为电能最有可能替代传统化石能源用于农业生产, 远高于氢能、太阳能等。尽管目前仍然是传统动力为主, 但电能是农业生产中普遍认为是最有潜力、最被期待替代传统化石能源的装备输入能源, 新能源电动力替代传统燃油动力被人们逐渐认识和接受, 未来农业生产使用电能或采用电动力农机的潜力或有较大发展空间。

2.2 农机电气化前景

由图 3a 可知, 在电气化农业装备认识方面, 分别有 69.22% 和 53.54% 的受访者选择了电动无人机和电力抽水机; 而电动拖拉机和电动除草机器人的认知程度也相对较高, 分别有 55.60% 和 49.25%, 这可能与越来越多的有关电动拖拉机和电动除草机器人在网络媒体、短视频等宣传报道有关, 这也反映了电动拖拉机和电动除草机器人作为新技术和新兴事物替代传统农机的关注度和认识程度越来越高。相对而言, 电动采茶机、电动剪羊毛机和电动微耕机的选择比例相对较低, 仅占 25.75%、32.28% 和 33.21%, 这可能与这些设备的应用地区性比较明显, 大部分地区的人们并不了解, 但在一部分特定区域, 已经出现了一定的电能替代农业装备产品应用于部分农业生产领域。综合来看, 电动无人机、电动拖拉机、电力抽水机、电动除草机器人和粮食/农产品烘干空气热泵等是目前农业装备电动化重要切口, 也是实现电能替代的重要途径。

从发展前景来看, 农业装备电动化是农机装备发展主流。对于我国农机装备电动化的发展与前景, 调查显示 78.74% 的受访者认为前景很好、非常好, 存在较大的发展潜力; 仅 7.46% 的受访者认为发展前景较差, 还存在亟待解决的问题和阻碍。同时, 对于我国农机装备电动化全面普及应用的可行性, 71.08% 的受访者认为可行性较易实现、容易实现, 仅 9.33% 的受访者认为可行性较低, 即大部分受访者认可我国农机装备电动化全面普及应用的可行性, 持乐观态度。高达 79.66% 的受访者认为, 农机装备电动化对实现农业装备智能化及无人农场/智慧农场方面具有推进作用, 仅 7.28% 的受访者认为没有明显作用。可见农机电动化是大势所趋, 并且农机电动化的发展与前景更是被大多数人看好, 这也反映出未来我国农机装备领域采用电力来供能的潜力和前景非常巨大。

2.3 应用场景可行性

由图 4a 可知, 在应用场景方面, 耕整地环节被认为是实现电动化的农业生产环节, 占比 33.46%。这是由于, 耕整地耕作阻力巨大, 需要瞬时

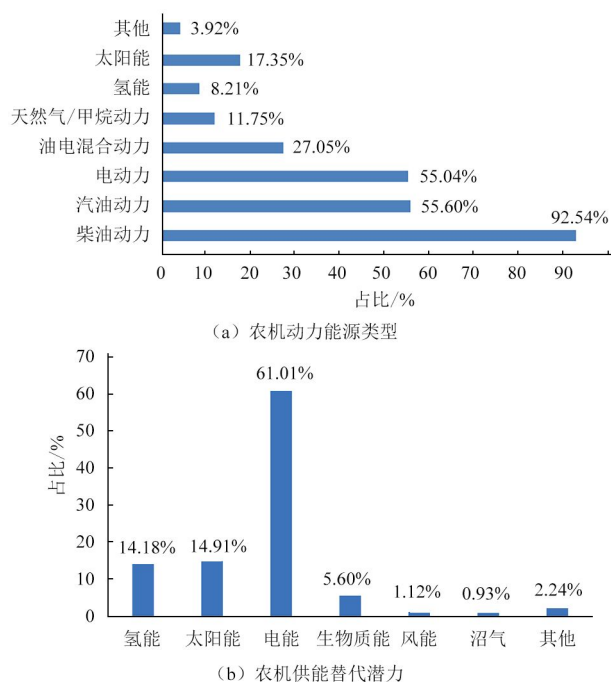


图 2 农机动力供能认识与替代潜力

Fig. 2 Understanding and substitution potential of agricultural machinery power supply

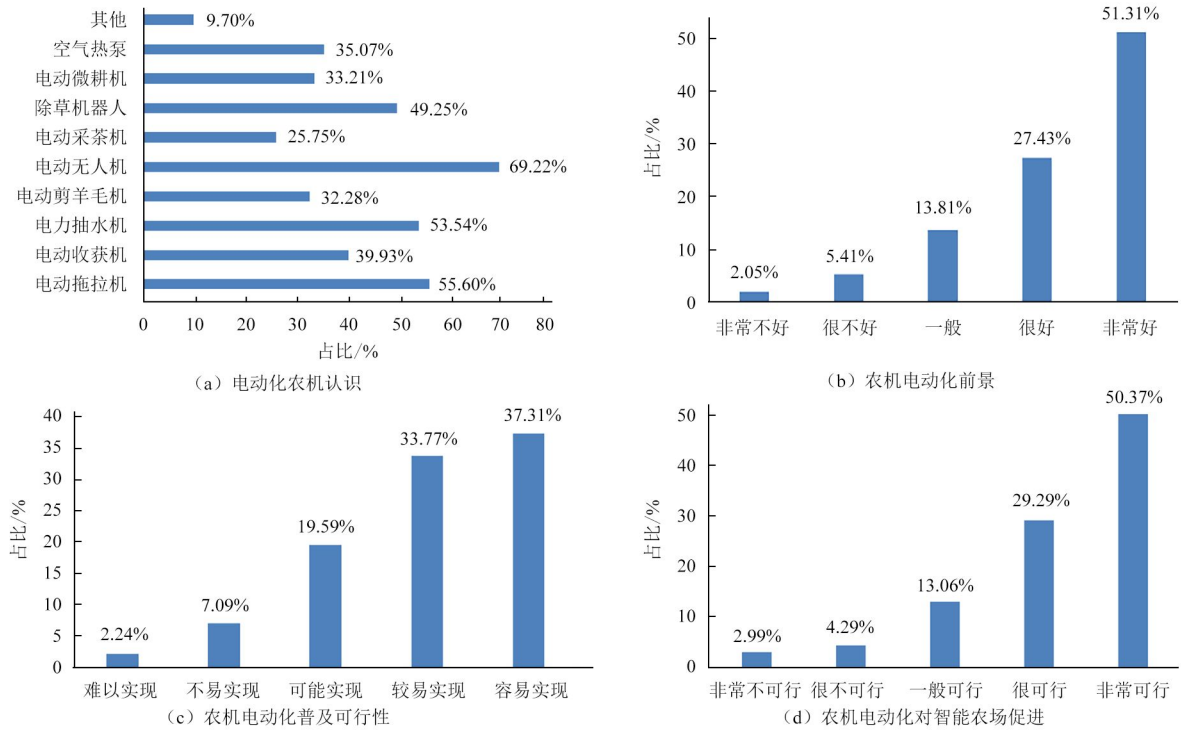


图3 农机电气化前景分析

Fig. 3 Analysis of prospects of agricultural machinery electrification

牵引力具有相应的动力，农时要求高，需要在短时间内完成大规模作业，目前动力电池续航技术还满足不了长时间作业需求等有关，与专业农机技术人员普遍认为的耕整地作业工况复杂、动力要求高、电动化难度大等客观原因基本一致。而选择种植、除草、收获、喷药和粮食烘干的受访者认为不容易实现电动化生产的占比分别为14.77%、11.96%、11.78%、8.04%和6.92%。也反映出受访者认为这些作业环节场景，实现电动化的可行较高，占比越小代表越容易实现电气化。

由图4b可知，在生产作业类型应用场景方面，大田作物生产和设施农业是被认为是最需要使用电动化装备替代传统农机装备的农业生产领域，占比分别为45.15%和31.53%；果园、畜牧养殖、渔业领域的需求较少，占比10.63%、8.21%和1.31%。这是由于传统大田作物和设施农业生产场景采用的传统农机装备相对较多，尤其大田农业装备的电能替代空间最大，并且其基础设施建设相对较好，尤其是设施农业具有完善的硬件设施和特定的作业场景，风、光等新能源资源丰富，农机供电方式可以相对较为简单，易于电动化，并且存在与新能源结合自产、自储、自用的潜力。这与于温方等^[1]对农网应用于农机设施移动储能的研究结论基本一致，其通过分析井井通电农田灌溉机井建设模式的优势，论证了农网移动储能的可行性，并结合吉林省农业农村发展特点，提出农网移动储能实施

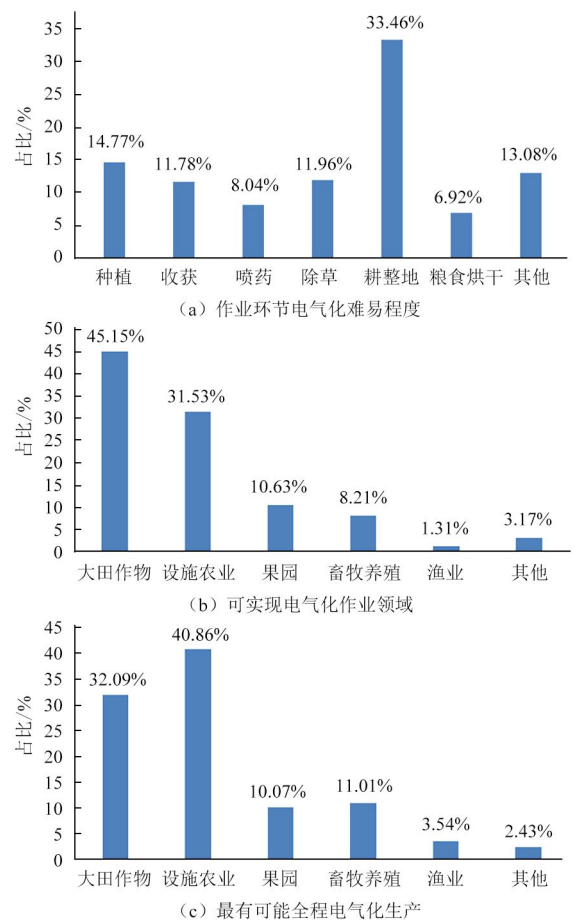


图4 电动农机应用场景可行性分析

Fig. 4 Feasibility analysis of electric agricultural machinery application scenarios

方案。

在问到“哪个农业生产领域最有可能实现全程电动化生产”，被期待最高的依然还是设施农业和大田作物生产，40.86%和32.09%的受访者认为这两个领域最可能实现全程电动化生产。果园、畜牧养殖和渔业的占比相对较低，分别为10.07%、11.01%和3.54%。可能是由于设施农业和大田作物的生产面积广、产量大、装备全，而且耗能大、排放多、污染大，电动化改造后对农业产业的发展至关重要，可显著改善智能化水平，降低燃油消耗，改善农田作业环境。因此，对电动化技术应用于设施农业和大田农业场景的可行性和期待相对较大。

2.4 一源多用技术可行性

新能源电动农机一源多用可以为电动化农业生产设备提供可靠的电力支持，同时也能够储存过剩可再生能源电量，为生活设施提供电力，减少了传统电力供应方式所带来的环境污染和能源浪费。在能量供应技术研究方面，PRANKL H等^[2]开发了一种拖拉机移动式多功能PTO发电机，研究了电力驱动下的高功率密度、速度和扭矩控制，以及所有必要的接口。GUPTA S等^[3]通过在拖拉机电池中添加逆变器并评估替代架构和应用，设计了拖拉机电力架构，以实现更高的能量供应效率。VOGT H H等^[4]提出小型电动农用拖拉机实现电能转换的可行性，研究了农机电池在能量传输密度方面的管理方法以及各种配置运行方式。因此，在电动化农机装备实现由用能向储能、产能和供能等一源多用转变的可能性方面，61.94%的受访者认为较易、完美实现，只13.43%的受访者认为不能、较难实现，如图5所示。说明大部分受访者对电动化农机装备技术的发展和前景持有较为乐观的态度，对一源多用的前景看好。可见农机储能的容量潜力大、分布式可重构性强，具有成为乡村新型电力系统惯性元件的可行性较高。凯斯纽荷兰（中国）管理有限公司2023年8月发布了具有无人驾驶功能的纽荷兰T4纯电动拖拉机，可作移动发电机输出电力，具备电力输出功能并配备了通用的60 Hz/110 V和220 V电源插座，可随时随地为电动工具供电；也可以通过常规电网、太阳

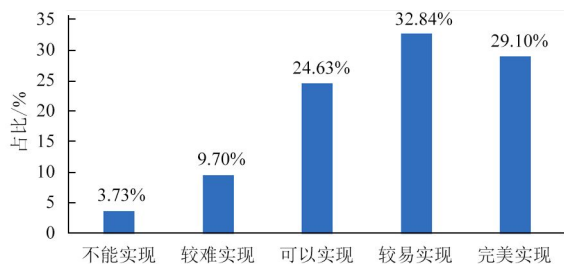


图5 一源多用可行性分析

Fig. 5 Feasibility analysis of one source multipurpose

能电池板、生物甲烷发电装置，以及交流（AC）和直流（DC）风力发电装置进行充电。因此，一源多用能够为农网农机融合提供有力支撑。

基于电动农机电源具备由用能向一源多用功能转变的前提条件，进一步分析了受访者购置电动农机的意愿。由图6a可知，64.97%的受访者有较强的意愿购买电动农机，21.27%的受访者持保留态度。总体而言，大多数人对电动农机有较高的购买意向，而且可以大胆猜测：如果能够开发出性能良好、价格合理的电动农机产品，并建立良好的销售渠道和售后服务体系，也可以通过开展租赁业务、补贴等形式，降低用户的购买成本和风险，打消用户的顾虑，提升用户体验，刺激购买和使用意愿，电动农机将有望在市场上占据一定的份额。

进一步调查了解受访者对电动农机意向购买类型，电动喷药/除草机和电动拖拉机是最受欢迎的电动农机，占比达59.89%和54.10%；电动播种/插秧机、电动收获机和电动烘干设备的选择比例也较高，达到47.76%、47.20%和40.30%，如图6b所示，这也为电动农机研发制造者提供了产品开发方向。

2.5 新能源消纳可行性

通过新能源电动化农机的—源多用供能模式，可在农网末端形成以电动农机电源分布式储能为特点的乡村可再生能源消纳模式，解决农网末端线路布设难、利用率低等典型问题。HEIN T^[5]研究了混合动力拖拉机和纯电动拖拉机的能源供应办法，探究了太阳能光伏设备为拖拉机充电的新模式。KOHRSRI S等^[6]对集成

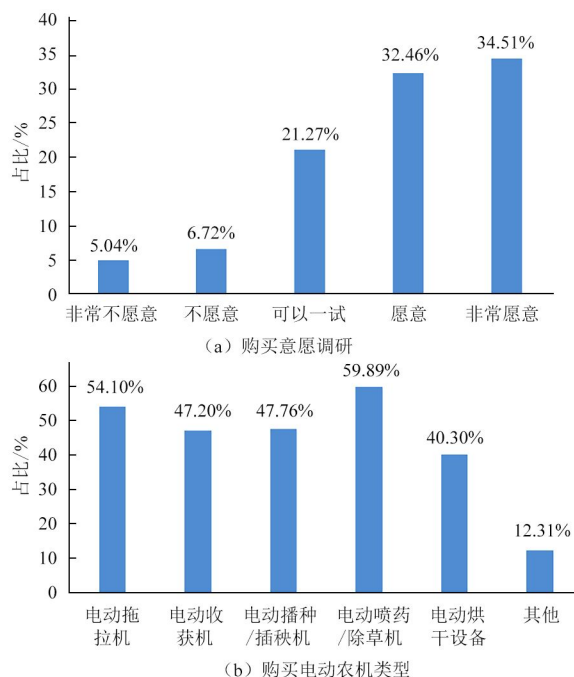


图6 电动农机意向购买类型

Fig. 6 Electric agricultural machinery purchase intention type

太阳能、生物质（合成气）电力和电池储能系统的定制混合动力综合能源系统进行了设计与初步运行。当前我国农村电网末梢基础薄弱，存在线路分布不足、功率不足、可靠性不足、线损攀高和灵活性差的电网电力问题，而且当前光伏反向供能存在时差相反、能量过载的新能源利用问题。受访者对风、光等新能源多能互补应用于农机装备前景较为乐观。87.88%的受访者认为太阳能、生物质能等新能源互补应用于农机装备储能有可能性，37.5%的受访者认为非常可能，如图7所示。这是由于农机动力电池的结构构成、智能运维与化学成分和储能电池相似，并且农机间断性作业特点可将闲置电源用于储能，均为农网农机融合提供了技术可行性与现实可能性。

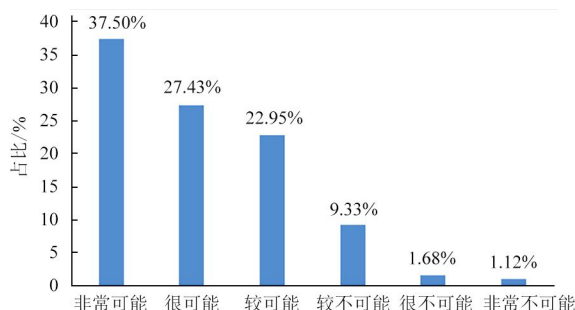


图7 新能源互补应用于农机的可能性

Fig. 7 Possibility of new energy complementary application in agricultural machinery

2.6 综合效益可行性

图8a反映了受访者认为的传统农机动力系统存在的问题。其中，油耗成本大被普遍认同，占比达36.75%；其次是尾气油污等污染和振动噪声大，占比24.44%和14.37%；零件易消耗磨损、缺乏安全性和维修麻烦占比分别为8.58%、3.92%和8.96%。因此，传统燃油农机设备用能的能耗成本高是目前农业生产装备动力系统的首要痛点，尾气污染和噪声等可以理解传统农机对环境的不友好，紧随其后，也反映出了人们对农机作业的微环境品质要求逐渐提高，期待更为节能、绿色、环保的新能源农机的应用。

由图8b可知，51.12%的受访者认为电能相比较于传统柴油、汽油应用于农机装备最大的优势是绿色环保，而认为电能价格较低的占比仅有12.13%。这与上述普遍认为油耗成本大是传统农机动力系统最大的问题有一定的出入，但也有23.88%的被调查人选择了认为电能应用于农机装备相比传统柴油、汽油易于实现自动智能化。因此，电能替代传统柴油、汽油应用于农机装备，虽然有着一定的能耗价格相对较低的因素，但大部分受访者更看中电能绿色友好的属性，实际上，电能所带来的易于实现自动智能化也是其绿色友好属

性的一个表现。因此可以认为，其对环境保护和智能化技术绿色友好属性是业内外普遍认可的最大优势^[7]。

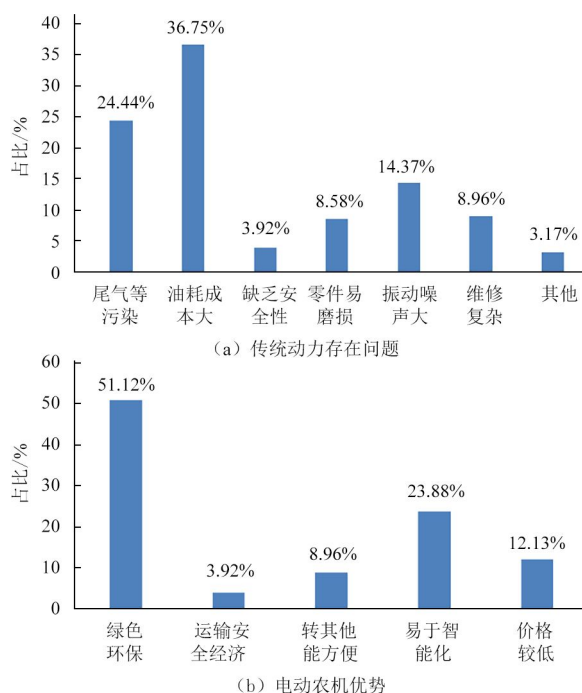


图8 综合效益可行性分析

Fig. 8 Feasibility analysis of comprehensive benefits

2.7 一源多用实施路径

一源多用创新供能模式可为农网农机融合互动提供实施路径，推进农机电动化进程，实现农机电源与生产生活设施电源共享，节约电源重复购置成本，增加电源复用程度，加速电气化转化，加快农机装备向电动力系统过渡，有助于源网荷储的乡村新型微电力系统的构建^[8]。

2.7.1 加速推进农业电气化转型

电动农机可以在农闲时期实现多种用途，这种一源多用的模式可以与农网有机融合，从而形成一种新的农机化模式，为农机化模式的转型提供了有力的支撑^[9]。

2023年5月末，河南省出现大范围持续阴雨天气，为保障夏粮抢收，河南省推出了10项应急抢收、烘干晾晒措施，同时调用河南省共3万台履带式收获机和4660台烘干设备，昼夜不停工作。由于情况突然，无法搭建固定的照明设施，导致农机夜间作业需要紧急调度电动无人机来提供光照。电动无人机通过搭载灯光设备的方式，从空中跟随收获机进行环境打光。为了提供电力支持，无人机通过农网末梢的微电网进行电能供应，确保灯光设备能够正常运行。

由图9可知，57.84%的受访者认为电动化农机装备在农闲时可以用于应急供电及储能，这说明农业工作者对电动化农机装备的应急与储能能力有较高的期

待,认为可以在自然灾害等紧急情况下提供电力支持,为农村地区提供电力储备,助力农业生产抗灾减损。38.81%的受访者认为电动化农机装备可以出租电源;27.80%的受访者认为电动化农机装备可以用于供暖;25.93%的受访者认为电动化农机装备可以用于调峰调频;23.88%的受访者认为电动化农机装备跟传统农机一样;仅6.53%的受访者认为未来电动化农机装备在农闲时什么也干不了。综合来看,受访者认为电动农机农闲时能够为农村地区提供电力支持、储备和调节能力,但也有少部分人群持保留态度,需要进一步加强电动农机农闲用途等各方面的宣传和推广,增强电动农机使用者的认可程度,促进电动农机产业快速发展。

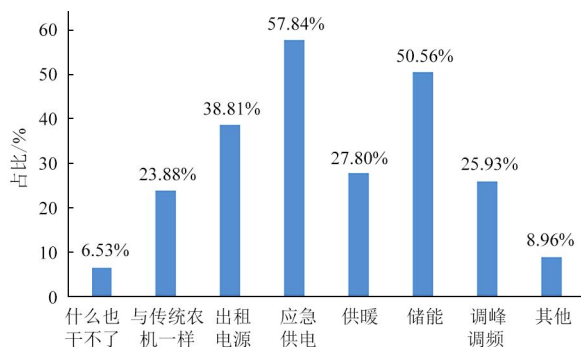


图9 电动农机农闲用途认知情况

Fig. 9 Cognition of idle use of electric agricultural machinery

2.7.2 加快农机装备电动力系统过渡

农业电气化转型离不开农机电动力系统,加快由传统农机动力系统向电能驱动动力系统过渡,鉴于农业生产的现实需要和技术基础,纯电动力系统是电气化发展的终极目标^[10]。由图10可知,在电动农机动力模式倾向调研中,受访者对于电动农机的动力模式更倾向于技术比较保守的油电混合动力,占比50.19%;其次是纯电动,占比24.81%。插电式混动、增程式混动和燃料电池的占比较低,分别为9.14%、9.33%和4.85%。主要原因是农民对农机装备最基本的诉求仍然是能够满足正常、稳定、可靠的进行生产作业需要。因此,在纯电技术尚未完全成熟稳定可靠地应用于农机装备之前,更多的受访者选择相对保守的油电混合动力逐渐过渡到纯电动力,可能还是对电动农机续航时间的考虑,而通常采用油电混合动力能一定程度上减少使用者的这种里程焦虑^[11]。如果纯电动力无法满足长时间续航的作业要求,使用者可能更倾向于采用油电混合的动力,但如果纯电动力不存在里程焦虑,那可能更多的人也会选择纯电动力农机。

2.7.3 源网荷储乡村新型微电力系统构建

我国农村地区风、光资源禀赋优越,可再生资源

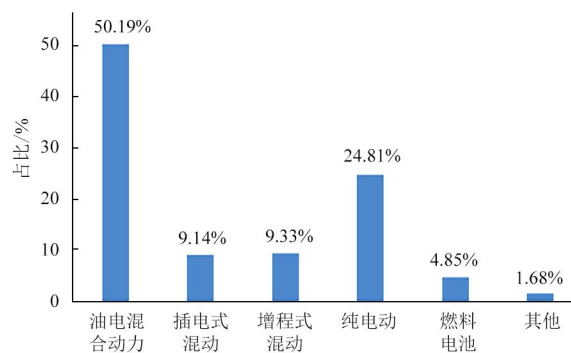


图10 新能源农机动力供应倾向

Fig. 10 New energy agricultural machinery power supply tendency

丰富,结合设施农业等构筑物基本设备和农时作业特点,协同存量巨大的一源多用新能源电动农机设备,以新能源电动农机为纽带,促进农网农机进行融合,构建基于新能源电动农机电源的源网荷储一体化乡村新型电力微系统,促进农村新能源自采自用消纳,赋能农村新型微电网生态化转型升级,加固城乡一张网^[12]。由图11可知,从电动农机农闲消纳农村新能源能力方面,大部分受访者认为电动农机可以实现储能,占比48.69%;认为不容易利用,占比19.78%;18.29%的受访者认为需要品质提升后利用或者不知道;只有1.49%的人认为根本无法利用。由此可见,农闲时期电动农机对太阳能、风能、生物质能等新能源的消纳潜力被大部分受访者所期待和认可,虽然有一部分人持有保留态度,需要进一步提升产品品质和技术后,才能获得信任与推广,但足以证明技术品质提升的替代。

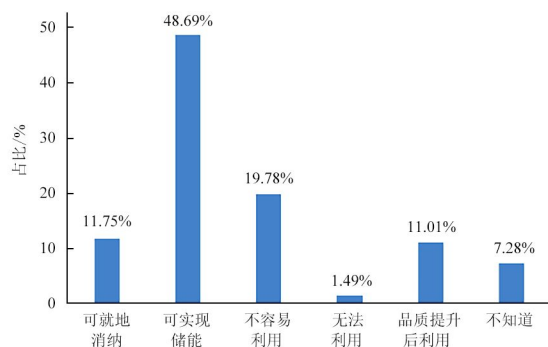


图11 电动农机农闲消纳新能源能力认知情况

Fig. 11 Cognitive situation of electric agricultural machinery's ability to absorb new energy during idle farming hours

2.8 一源多用商业模式

一源多用是一种新型的供能模式,可以加速农网农机的有机融合,提高乡村人居生产、生活、生态品质,并将带来多维度涌现效益,实现“1+1>2”的实践效果,还可以实现能源的高效利用和智能共享,提高能源的利用效率和经济效益,同时促进能源的多元化

和可持续发展,具有潜在的商业价值,更有助于国家双碳目标与农业强国战略实现^[13-14]。

2.8.1 参与意愿高凸显商业机遇

由图 12a 可知,在电动农机电源出租意愿方面,超过 71.03% 的受访者愿意出租电动农机。其中 36.64% 的受访者非常愿意出租,34.39% 的受访者可以试试,21.12% 的受访者表示需要看到报酬才会出租,4.30% 的受访者表示不可能有这种好事,2.43% 的受访者表示可能随时需要使用设备,而只有 1.12% 的受访者表示无论给多少钱都不会出租。

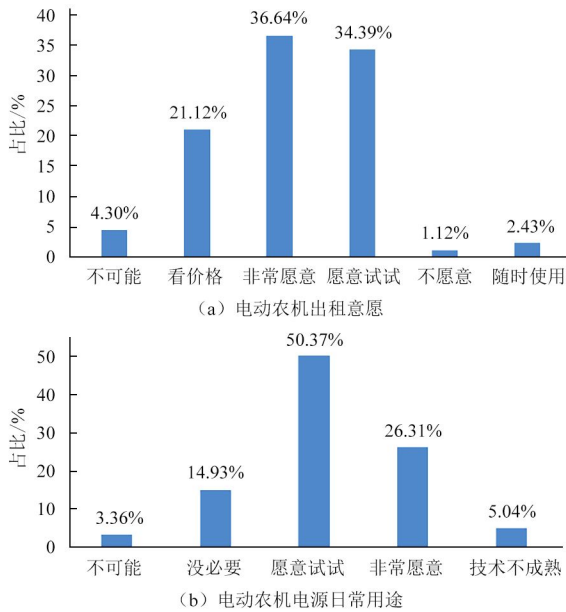


图 12 商业机遇分析

Fig. 12 Business opportunity analysis

由图 12b 可知,在电动农机电源的家庭用途方面,超过 76.68% 的受访者表示愿意在晚上将电动农机充满电,白天使用农机电源来给家电供电。其中 50.37% 的受访者表示可以试试,26.31% 的受访者表示非常愿意,只有 18.29% 的受访者表示太麻烦或者不太可能有这种事发生,5.04% 的受访者认为技术不成熟有危险。因此,大部分受访者对于使用电动农机供电持积极态度,但也有少部分人存在顾虑。因此,可以认为大部分人是愿意参与这种活动,并且可能会存在较高的参与度,这表明也存在较高的商业机遇。

2.8.2 新能源互补供能机遇

由图 13 可知,在安装光伏设备的意向方面,32.28% 的受访者非常愿意在自己家屋顶安装光伏,农闲时给农机充电,晚上释放农机的电给其他用电设备供电;50.56% 的受访者愿意试试这种方式;10.45% 的受访者觉得太麻烦没必要;2.99% 的受访者认为这种事情不可能实现;3.73% 的受访者认为技术不成熟有危险。可见,大部分人愿意利用闲置的农机进行新能源的消

纳和利用,因此,在农闲时段,利用农机白天储能、夜间供能的特点,进行新能源的互补消纳和利用,可为用户生活设施减少用电成本,增加用户向电网售电的盈利收入^[15]。

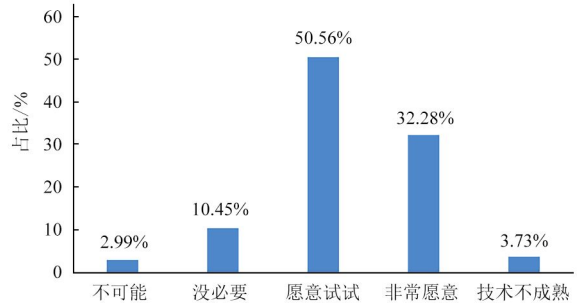


图 13 新能源互补供能机遇

Fig. 13 Opportunities for complementary energy supply from new energy sources

2.8.3 换电模式和快速充电更受期待

由图 14a 可知,在电动农机电能供给模式方面,换电模式是最受欢迎的电能供给模式,占比 44.22%;其次是整车充电模式,占比 35.26%;拖挂式电源和无线充电占比较低,分别为 10.07% 和 10.45%。因此,换电模式被认为更适合电动农机的电能供给模式。

在对电动农机充电时间调研中,采用滑动条(范围 0~3 h)的形式由受访者自由滑动选择预期时间。由图 14b 可知,15.67% 的受访者认为充电时间 2.41~3.00 h,38.43% 的受访者认为充电时间 1.81~2.40 h,44.59% 的受访者认为充电时间 0.61~1.20 h,仅有 1.12% 的受访者认为充电时间 0~0.60 h。

对于换电时间的预期,同样采用滑动条(范围为 0~3 h)的形式由受访者自由滑动选择预期时间。由图 14c 可知,受访者表现的较为慷慨,可以接受换电时间 0.61~1.20 h 的占比高达 60.45%,仅有 5.78% 的受访者,期望换电时间在 0.60 h 以内,这足以说明受访者对新能源电动农机的快速补能技术难度大所给予的理解和包容。但即便如此,更为高效和快速的补能,仍然是技术维度和用户需求维度追求的目标。

3 关键技术和扶持政策建议

3.1 关键技术发展建议

新能源电动农机—源多用与农网农机融合互动仍只是探索状态,其部分关键技术仍有待进一步完善和进行难点攻关。需要从电动农机、电池技术、充电与反向充电技术、储能技术、接口技术、电网技术、电力系统及高效运维技术等多维度协同配合攻关,打破技术壁垒,真正实现跨学科融合^[16]。

(1) 加快研发高密度、长寿命动力电池本质技术,安全续航时间力争达到 10 h。由图 15a 可知,在最担心

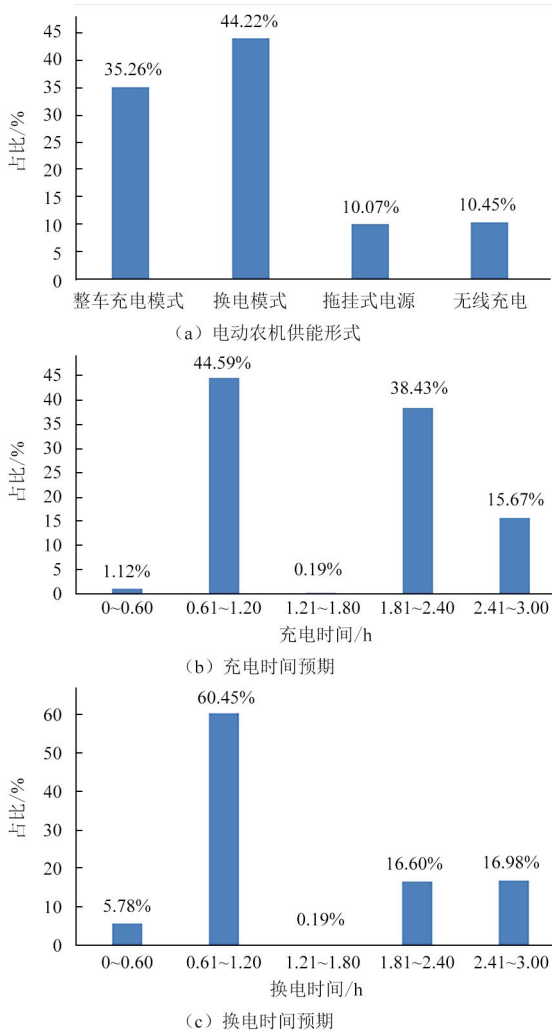


图 14 电动农机供能模式分析

Fig. 14 Analysis of energy supply modes for electric agricultural machinery

的电动农机使用问题方面, 没电耽误干活选项的占比最高, 达 70.90%; 其次是使用时起火爆炸选项, 占比 54.29%; 机器工作动力不足和充电时起火爆炸选项的占比 53.73% 和 47.01%; 漏电导致触电和行驶上坡时突然断电发生溜车选项的占比 39.74% 和 41.79%; 使用时机器操纵失控选项的占比最低, 仅 28.73%。因此, 归根到底人们还是最担心电动农机的续航里程问题。在对电动农机理想续航时间方面, 采用滑动条 (范围 0~20 h) 的形式由受访者自由滑动选择预期时间。由图 15b 可知, 35.45% 的受访者希望续航时间 16.1~20.0 h, 19.59% 的受访者希望续航时间 12.1~16.0 h, 31.53% 的受访者希望续航时间 8.1~12.0 h, 12.13% 的受访者希望续航时间 4.1~8.0 h, 仅有 1.31% 的受访者能接受续航时间在 4.0 h 以下。在农机电池使用寿命的期望值调研中, 采用滑动条 (范围 0~10 年) 的形式由受访者自由滑动选择预期时间。由图 15c 可知, 42.72% 的受访者认为农机电池寿命 8.1~10.0 年, 21.64% 的受访者认为电池寿命 6.1~8.0 年, 26.49% 的

受访者认为电池寿命 4.1~6.0 年, 9.15% 的受访者可以接受电池寿命 4 年以下。

(2) 加快发展电源智能化运维技术, 为农忙装备提供作业保障。由图 15d 可知, 在电动农机发展最主要的制约因素方面, 80.22% 的受访者认为电池续航不足是电动农机发展最主要的制约因素; 56.53% 的受访者选择了充电桩等配套设施太少; 技术不成熟、动力功率不足、价格太贵和充电太慢耽误干农活也是制约因素, 46%~53% 的受访者选择了这些选项; 电池安全性差和维修太复杂相对来说不是最主要的制约因素, 占比 31.53% 和 25.56% 的受访者选择了这两个选项。因此, 要突破限制电动农机发展的制约因素, 除了提高电池的能量密度和续航能力, 也要加强充电桩等智能化运维, 确保能及时补能, 归根到底还是解决人们的里程焦虑。

(3) 加快发展农机电源共享接口与农机动力电源智慧储能技术。70.90% 的受访者选择了统一电源接口标准是发展电动农机最需要做的工作, 如图 16 所示。这表明农民和农机使用者普遍认为电源接口的标准化可以降低使用成本和提高效率。实施统一电源接口标准可以降低电动农机的维护和使用成本, 提高使用效率, 进而提高农业生产效益和降低环境污染。通过海量农机的分布式储能, 与电网融合互动智能运维系统, 实现智慧农机协同调峰调频与应急供能, 可加固源网荷储的一体化智慧农村新型微电力系统。

3.2 扶持政策建议

构建以新能源农机电源为纽带的源网荷储一体化乡村新型微电力系统, 不仅需要技术上联合攻关突破, 在政策扶持方面也需要协同支持, 鼓励和加快相关技术研发投入和运维补贴, 培育新的发展机遇 [17-18]。

3.2.1 制定农机电源出租或储能政策

图 12a 显示, 超过 70% 的受访者愿意在农闲时通过利用出租农机电源、获取储能收益等获取额外收益等。因此, 建议需要研究制定相关农机电源出租和储能相关政策, 通过规范合理开展相关商业活动, 探索利用农机电源的盈利模式, 形成以新能源电动农机电源为载体的分布式储能、共享出租、应急救援和电力调度等社会化服务模式, 可实现农机运维增长红利, 实现农闲时农机额外经济收益, 将有助于提高农机用户的参与度, 也有助于电池运营服务商或储能降低电池购置投入等, 实现双赢。

3.2.2 优惠专用电价和峰谷电价

图 12b 显示, 当存在峰谷电价时, 26.31% 受访者非常愿意在夜晚谷价时充电, 白天峰价时利用农机电源供电; 50.37% 的受访者认为可以试试。这表明农机

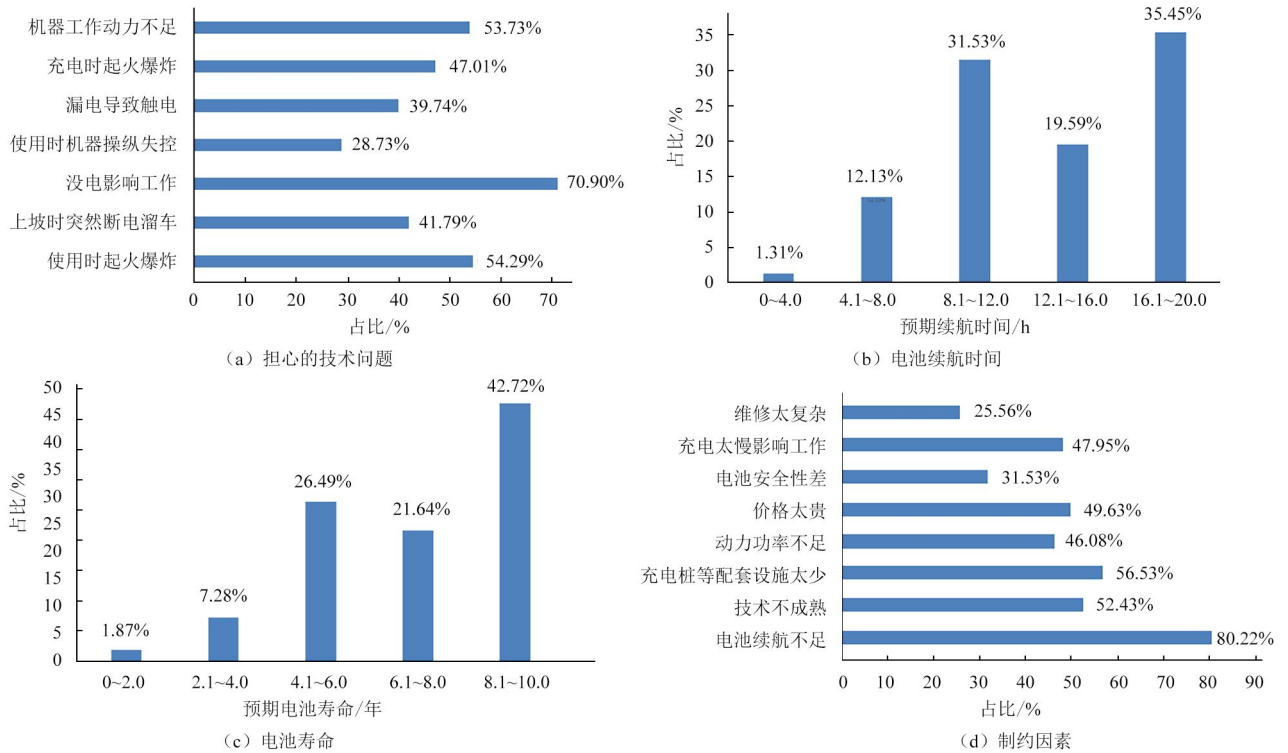


图 15 关键技术建议

Fig. 15 Key technical advice

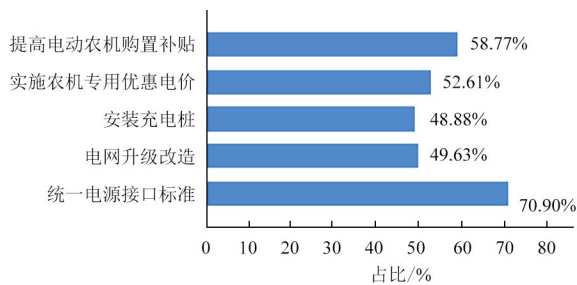


图 16 亟待解决的问题

Fig. 16 Problems to be solved

使用者普遍认为电力供应方面的改善可以促进电动农机的普及和推广,降低综合用能成本。由图 16 可知,52.61%的受访者认为当前急需解决电动农机专用优惠电价和电网升级改造问题,这样可以降低生产使用成本,提高电力供应的可靠性和稳定性。目前部分地区应用热泵烘干技术进行粮食及农产品烘干时,选择夜晚进行烘干作业,原因是夜晚的电价比白天更优惠,而且在粮食烘干用电仍然执行的是工业电价。因此,出台针对电动农机专用的优惠电价或者合理的峰谷电价差,有助于降低用户的使用成本,促进电动农机的推广应用。

3.2.3 完善基础设施建设

在电动农机发展制约因素方面,图 15 d 显示,56.53%受访者认为充电桩等设施是当前电动农机发展应用的制约因素。图 16 显示,49.63%和 48.88%的受访者认为当前应该最需要进行电网升级改造和充电设

施建设。由图 17 可知,43.66%的受访者认为充电方便是影响其购买电动农机重要因素之一,因此,巩固和完善电网基础设施和充换电设施建设是发展电动化农机和实现农机农网融合互动的重要因素,有必要加大基础设施建设投入^[19]。

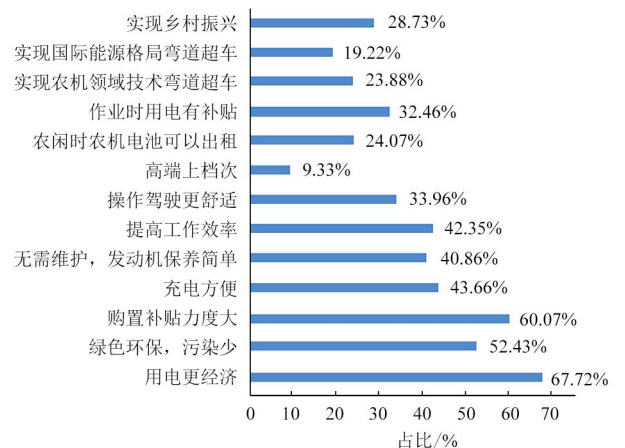


图 17 购买电动农机影响因素

Fig. 17 Influencing factors of purchasing electric agricultural machinery

3.2.4 出台电动农机购置补贴和用能补贴政策

图 16 显示,58.77%的受访者认为提高电动农机购置补贴也是当前亟待解决的问题。显然,购置补贴可以降低电动农机的购买成本,提高投资回报率,吸引更多的农户使用电动农机,促进电动农机的普及和推广。而在购买电动农机的影响因素方面,图 17 显示,

购置补贴力度大和作业时用电有补贴占比 60.07% 和 32.46%，说明政策性的购置补贴和用能补贴是影响消费者购买电动农机的重要因素。因此，出台适宜的购置补贴和用能补贴，将会促进电动农机的发展，从而也将促进农网农机更加健康的融合发展。

4 结束语

(1) 新能源电动农机一源多用作为农业现代化新技术发展模式，具有明显的技术创新优势，其技术发展、应用场景、实施路径和商业模式等均具有良好的可行性，具有较好经济效益和环保效益，发展前景被普遍看好。

(2) 设施农业等凭借丰富的新能源资源和相对完善设施基础条件，具有率先实现全程电动化发展的可能，新能源电动农机一源多用可以提高乡村可再生能源就地消纳能力，促进农机农网的融合互动和乡村新型微电力系统的构建，加速农业绿色发展转型，对落实双碳目标与乡村振兴等战略具有积极意义。

(3) 未来仍需开展新能源电动农机和电网融合互动关键技术协同攻关和应用研究，加快完善农村配套基础设施建设、探索可持续且多方共赢的良性商业模式、加大力度引导建立适用且可操作的扶持政策等仍有待进一步解决。

参考文献

- [1] 于温方, 阚中盛, 时雨, 等. 吉林省农网移动储能技术路线及实施方案研究[J]. 农业与技术, 2022(20): 42-47.
- [2] PRANKL H, NADLINGER M, DEMMELMAYR F, et al. Multi-functional PTO generator for mobile electric power supply of agricultural machinery[C]// 69th International Conference on Agricultural Engineering: VDI Verlag GmbH, 2011: 6-12.
- [3] GUPTA S, MAITY R, KULKARNI S. Modeling, analysis and experimental validation of tractor architectures for rural electrification[C]// 8th SAEINDIA International Mobility Conference and Exposition, 2013: 21907-21915.
- [4] VOGT H H, DE MELO R R, DAHER S, et al. Electric tractor system for family farming: increased autonomy and economic feasibility for an energy transition[J]. *Journal of Energy Storage*, 2021, 40: 102744.
- [5] HEIN T. Charging up recent developments in electric tractors[J]. *Ontario Grain Farmer*, 2018, 10(3): 10-11.
- [6] KOHSRI S, MEECHAI A, PRAPAINAINAR C, et al. Design and preliminary operation of a hybrid syngas/solar PV/battery power system for off-grid applications: a case study in Thailand[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2018, 131: 346-361.
- [7] 夏长高, 杨彦祥, 孙闫, 等. 复合电源电动拖拉机能量管理策略研究[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(11): 126-132.
- [8] 李哲恩. 用于低能量密度能量采集器的电源管理电路研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- [9] LI Zheyu. Study on the power management circuit for energy harvester working in low energy density[D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.
- [10] 鲁家阳. 基于能源枢纽的区域多能源系统源网荷储协同规划[D]. 上海: 上海电力大学, 2021.
- [11] LU Jiayang. Coordinated planning of source-network-load-storage in regional multi-energy system based on energy hub[D]. Shanghai: Shanghai Electric Power University, 2021.
- [12] 高松, 赵静波. 提升源网荷储多元协同的虚拟化网格划分方法[J]. 南京理工大学学报, 2023, 47(2): 262-270.
- [13] GAO Song, ZHAO Jingbo. Source-load intelligent interactive distributed coordinated optimal control method considering incremental power cost[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2023, 47(2): 262-270.
- [14] 范馨予, 黄媛, 吴疆, 等. 考虑源网荷储协同优化的配电网韧性提升策略[J]. *电力建设*, 2023, 44(4): 63-73.
- [15] FAN Xinyu, HUANG Yuan, WU Jiang, et al. Resilience promotion strategy for distribution network considering source-network-load-storage coordination[J]. *Electric Power Construction*, 2023, 44(4): 63-73.
- [16] 闫宏莉, 姜馨文, 杨鹏. 分布式光伏接入的电力系统源网荷储协同规划数值模拟[J/OL]. 光学与光电技术: 1-7. <https://doi.org/10.19519/j.cnki.1672-3392.20230306.006>.
- [17] 王多勤. 农网配电系统自动化建设研究[J]. *中国科技纵横*, 2015(6): 164.
- [18] 郭睿, 陈金熠, 陈小毅, 等. 基于数据驱动的乡村综合能源服务运营管理优化研究[J]. *企业改革与管理*, 2020(1): 124-125.
- [19] 高志强, 赵景涛, 孙中记, 等. 农村供电系统中典型微电网供电模式研究[J]. *电气技术*, 2014(6): 56-62.
- [20] GAO Zhiqiang, ZHAO Jingtao, SUN Zhongji, et al. Research on typical power supply modes of microgrids in rural power systems[J]. *Electrical Engineering*, 2014(6): 56-62.
- [21] MOUSAZADEH H, KEYHANI A, JAVADI A, et al. Optimal power and energy modeling and range evaluation of a solar assist plug-in hybrid electric tractor (SAPHT) [J]. *Transactions of the ASABE*, 2010, 53(4): 1025-1035.
- [22] AHMAD J, IMRAN M, KHALID A, et al. Techno economic analysis of a wind-photovoltaic-biomass hybrid renewable energy system for rural electrification: a case study of Kallar Kahar[J]. *Energy*, 2018, 148: 208-234.
- [23] QUASHEM M W B, KAWSER M A. Application of PV-Battery-Fossil fuel hybrid system for remote telecom operation in Bangladesh [C]//2nd International Conference on Green Energy and Technology. IEEE, 2014: 116-120.
- [24] 林俊光, 冯彦皓, 林小杰, 等. 综合能源系统源网荷储动态建模技术进展[J]. *热力发电*, 2022, 51(10): 92-102.
- [25] LIN Junguang, FENG Yanhao, LIN Xiaojie, et al. Advances in dynamic modelling of source, grid, load and storage in integrated energy systems[J]. *Thermal Power Generation*, 2022, 51(10): 92-102.