

基于人-车-土系统的撒肥机组能耗与一源多用潜力分析

沈春雷¹ 胡春雨¹ 葛雯¹ 杨晓^{2,3} 陈月锋⁴ 杨敏丽^{2,5}

(1. 国网综合能源服务集团有限公司, 北京 100088; 2. 中国农业大学工学院, 北京 100083;
3. 智能农业动力装备全国重点实验室, 北京 100083; 4. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司, 北京 100083;
5. 中国农业大学中国农业机械化发展研究中心, 北京 100083)

摘要: 针对“人-车-土”作业系统下重型撒肥机组油耗因素机制不清和农机单次作业期短、作业频次低导致的农机“电源搁荒”问题,分析“人-车-土”系统油耗结构方程模型互动机制并预测纯电动拖拉机电源“一源多用”模式对“生活-生态”的增益潜力。首先,开展重型拖拉机撒肥作业田间综合试验,采集驾驶员疲劳度、拖拉机燃油油耗、耕层土壤表征量等作业要素数据,建立驾驶员-拖拉机-耕层土壤的油耗结构方程模型;然后,基于结构方程因果关系探寻农机油耗因子间相关性;最后,基于油耗等值转换理论计算燃油农机等效需电量与碳排放量,预测纯电动拖拉机“一源多用”模式对生产生活电源互换共享与减排降碳的贡献潜力。结果表明:耕层土壤紧实度是拖拉机主要油耗影响因素,驾驶员操作疲劳对油耗具有间接影响,可通过操纵拖拉机间接影响耕层物理性质和拖拉机碳排放、作业效率。电动拖拉机电源“一源多用”对农网末端小型用电设施供电具有一定潜力,在机械化田间管理期,等效耗电量约为 45 kW·h/hm²,减少碳排放 12 kg/hm² (CO₂),中小规模农场可减少农机碳排放约 2 464 t (CO₂),节约电 9.24 × 10⁶ kW·h,并且其电源闲置时提供约 110 t 玉米烘干所需电力,或 165 台通风设备全天同时通风所需电力,或 5 500 个路灯夜间照明的电能,或 11 个值班室全年的用电需求。

关键词: 油耗特性结构方程模型; 一源多用; 电能替代; 人-车-土系统

中图分类号: S210.7; S219.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2023)S1-0419-08

Energy Consumption Analysis and Potential for One Source for Multi-purpose Uses of Fertilizer Spreading Units Based on “Human – Vehicle – Soil” System

SHEN Chunlei¹ HU Chunyu¹ GE Wen¹ YANG Xiao^{2,3} CHEN Yuefeng⁴ YANG Minli^{2,5}

(1. State Grid Integrated Energy Service Group Co., Ltd., Beijing 100088, China
2. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China
3. State Key Laboratory of Intelligent Agricultural Power Equipment, Beijing 100083, China
4. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd., Beijing 100083, China
5. China Research Center for Agricultural Mechanization Development, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Aiming at the problem of unclear mechanism of fuel consumption factors of heavy-duty fertilizer spreader under ‘human – vehicle – soil’ operating system and the problem of ‘power supply abandonment’ caused by short single operation period and low frequency of operation cycle of agricultural machinery, the interaction mechanism of fuel consumption structural equation model of ‘human – vehicle – soil’ system was analyzed and the gain potential of ‘one source for multi-purpose’ mode of pure electric tractor power supply to ‘life – ecology’ was predicted. Firstly, a comprehensive field test of heavy-duty tractor spreading fertilizer operation was carried out, and the data of operation factors such as driver fatigue, tractor fuel consumption and plough layer soil characterization were collected, and the fuel consumption structural equation model of human – vehicle – soil layer was established. Then based on the causal relationship of structural equation, the correlation between agricultural machinery fuel consumption

收稿日期: 2023-05-20 修回日期: 2023-09-01
基金项目: 国网综合能源服务集团有限公司项目(SGJN0000SCJS2310075)、国家自然科学基金项目(32201671)和中国农业大学2115人才工程项目
作者简介: 沈春雷(1971—),男,高级工程师,主要从事电力系统自动化研究,E-mail: shenchunlei@sgces.sgcc.com.cn
通信作者: 杨晓(1989—),男,副教授,博士,主要从事农机电源与电网融合路径研究,E-mail: yangxiao2020@cau.edu.cn

factors was explored. Finally, based on the equivalent conversion theory of fuel consumption, the equivalent power demand and carbon emissions of fuel agricultural machinery were calculated, and the contribution potential of the ‘one source multi-purpose’ mode of pure electric tractors to the exchange and sharing of production and living power sources and emission reduction and carbon reduction was predicted. The results showed that the soil compaction was the main fuel consumption factor of tractor. The driver’s operating fatigue had an indirect effect on fuel consumption, which can indirectly affect the physical properties of the plough layer and the carbon emissions and operating efficiency of the tractor by manipulating the tractor. The electric tractor power supply ‘one source multi-purpose’ had certain potential for power supply to small power facilities at the end of the agricultural network. During the mechanized field management period, the equivalent power consumption was about $45\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{hm}^2$, reducing carbon emissions by $12\text{ kg}/\text{hm}^2\text{ (CO}_2\text{)}$. Small and medium-sized farms can reduce the carbon emissions of agricultural machinery by about 2 464 tons of CO_2 , saving $9.24\times10^6\text{ kW}\cdot\text{h}$ electricity, and providing about 110 tons of electricity required for corn drying when the power supply was idle, or the power required for ventilation for 165 sets of ventilation equipment at the same time throughout the day, or 5 500 street lights for night lighting, or the annual electricity demand for 11 duty rooms.

Key words: structural equation model of fuel consumption characteristics; one source for multi-purpose; electric energy substitution; human – vehicle – soil system

0 引言

推进农机电能替代和清洁能源替代,探寻闲置农机电源多维利用模式,是全面落实农业农村领域“双碳”目标的现实需要和重要途径。

传统燃油农机作业次数多而作业期短、油耗因素多而考虑次要因素少的作业特点制约了农机电动化发展,而当前农机电动化浪潮来临,农机使用的单次作业短而全程周期性长的特点,又为电动农机电源“一源多用”提供了现实可能性。玉米是我国主要粮食作物,已实现玉米全程机械化,其中田间管理环节约占整个耕种管收机械化环节的 60%,包含镇压 2 次、除草 2 次、施肥 3 次、耙地 1 次等 8 个环节,根据农艺流程,每月每块农田约只作业 1 次,因此玉米管理间断特性造成了农机电源闲置率高,而农艺环节多、油耗间接驱动因素欠考虑的问题又造成了农机碳排放足迹过大。而且在撒肥、撒药、镇压、耙地等管理环节中,拖拉机挂接的农具均和土壤表面作用,受表层土壤阻力相比其他环节较小,具有相似的燃油消耗特征。

此外,农村电网末端基础建设薄弱,而农田日常管理又具有用电需求。末端农网输电线路简陋、维修缺失,不能承受中等以上用电规模需求;而农网末端经常需要给农场自建值班室、自建路灯、自建民房、自建机库供电,造成使用中电流电压非稳态,产生了用电隐患。

因此,充分挖掘农机作业特点,创新利用电源容量高、动力密度高、闲置率高、机库与自建房合建的特点,实现拖拉机-收获机间电源互换共享、生活设施与农机电源共用的“一源多用”模式,可显著改善

农网末端薄弱且用电需求明显的问题,还可降低农机碳排放,缓解“电源撙荒”,促进乡村生态振兴进程。

在电能替代方面,文献[1 – 5]基于当下电能替代的时代发展背景,对电能替代的需求响应模型、综合评价方法、技术应用等内容进行了分析与讨论,为我国的电能替代领域提供了发展导向与技术支持。在“生产”方面,文献[6 – 10]研究了电动拖拉机的高性能驱动功率变换器策略、动力传动系统构型、能量优化控制方法,但未充分融合田间实际运行工况,造成适应性低的问题。在“生活”方面,文献[11 – 15]研究了农村电网模型的结构评价方法、系统构建方案以及区域建设等内容,为农村电网模型的研究提供了目标与发展思路,对农村电力、电网的新时代建设产生了推进作用。在“生态”方面,文献[16 – 20]研究了农机土壤压实规律,建立了压实应力模型,讨论了压实次数对产量和土壤含水率等物理参数的负面影响,设计了压实缓解装置。在结构方程模型应用方面,文献[21 – 25]研究了农户行为对生态的影响机制、城乡公交融合要素、自动驾驶人机切换、机器人交互模式和光伏与新能源互补模式,从系统观机制做了多因素互作分析。

本研究针对大田玉米管理环节农机单次作业期短、作业频次低、农机电源闲置率高的“电源撙荒”问题,以机械化撒肥为工况典型,探析“人-车-土”系统要素的油耗间接作用机制,辨识油耗关键间接因素,提出柴油-耗电量的最低等效需电量折算方法、柴油-碳排放量的最低碳排放量折算方法,探索农机电源“一源多用”路径,预测与农网融合的潜

力,以期为农机电能替代与“一源多用”商业模式提供参考。

1 原理

1.1 结构方程模型

结构方程模型是一种建立、估计和检验因果关系模型的方法。模型中既包含有可观测的显在变量,也可能包含无法直接观测的潜在变量。结构方程模型可以替代多重回归、通径分析、因子分析、协方差分析等方法,清晰分析单项指标对总体的作用和单项指标间的相互关系。驾驶员-拖拉机-耕层土壤耦合模型具有非线性程度高、因素之间关系复杂的特点,采用结构方程模型可比较理想地解决农业场景多因素融合问题,使得研究结论更具可靠性。本研究采用 Amos 26 软件进行结构方程构建。

1.2 柴油-耗电量折算方法

根据燃烧热量等值理论,可将柴油与电量当量均折算为标准煤^[27],进而得到柴油体积与等效耗电量关系式

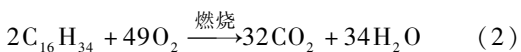
$$z = 9.96x \tag{1}$$

式中 z ——等效耗电量, kW·h

x ——农机油耗体积, L

1.3 柴油-碳排放量折算方法

柴油是多种烃类的混合物,平均密度约 0.84 kg/L,主要成分为十六烷 C₁₆H₃₄。假设拖拉机柴油完全燃烧,则可根据燃烧化学方程式



计算柴油碳排放最低量。根据质量守恒可得 CO₂ 排放量为

$$y = 2.617x \tag{3}$$

式中 y ——CO₂ 排放量, kg

2 试验设计

2.1 试验区概况

试验于北大荒农垦九三管理局北大荒某农场三区田块 1、2、3(48°54′N, 125°30′E)开展,该区域为寒温带大陆性季风气候,年平均气温在 -4 ~ 5℃。夏季气温高,降水多,光照时间长,适宜农作物生长。太阳辐射资源丰富,年日照时数一般在 2 300 ~ 2 800 h。试验区为规模化连片种植玉米的农田。

2.2 试验方案

试验用约翰迪尔 JD-7830 型拖拉机,撒肥机幅宽 660 cm。如图 1 所示,将试验区 66.7 hm² 农田划分为 4 个小区,每个小区有若干条垄沟,去除其中车辙印不完整的垄沟,从剩余的每条垄沟选取 10 个试

验点测量土壤含水率、土壤紧实度,再选取 10 个取样点,用环刀取土样测量土壤孔隙率。选取试验点时舍弃垄沟两端,从中间每隔 50 m 选取一个点,分别在拖拉机作业前后测定每个点的土壤紧实度、土壤含水率。拖拉机作业期间采用问卷的形式测定驾驶员的疲劳度,驾驶员完成每垄作业前后填写一次疲劳度问卷。拖拉机作业之前将油箱加满,完成每垄作业后将油箱再次加满,补充量即为此次作业油耗值。记录拖拉机田间作业时直行时间、掉头时间与作业面积,便可计算出作业效率。

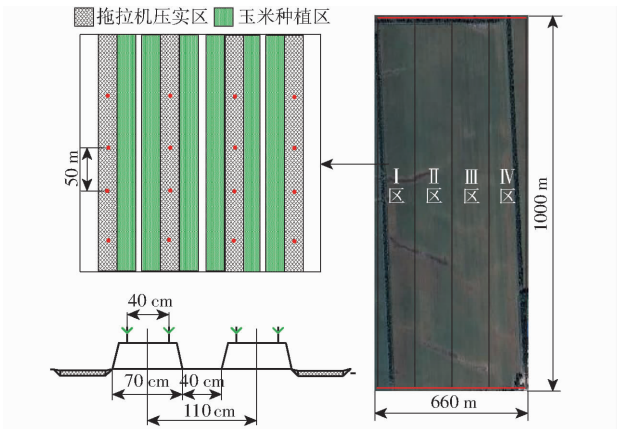


图 1 试验区示意图

Fig. 1 Schematic of test area

2.3 测试方法

2.3.1 驾驶员疲劳度

北大荒某农场男性专业驾驶员作为试验人员,年龄 42 岁,身体健康状况良好,习惯用手控油门、脚踩刹车的模式撒肥。试验前要求驾驶员休息充足,不得服用刺激神经类药物、不得饮酒。被试前告知被试试验内容、流程,并确认被试自愿参与并自愿签署书面知情同意书。采用连续型问卷法测量驾驶员的疲劳程度,问卷内容包括驾驶员颈椎、双臂、腰椎、双腿的疲劳感,每个部位的疲劳等级从高到低依次为非常不适、很不适、较不适、略不适、无感觉、略舒适、较舒适、很舒适、非常舒适 9 个等级,分别对应分数为 1、2、3、4、5、6、7、8、9,各部位疲劳度之和即为驾驶员整体的疲劳度。完成每垄的作业前后请驾驶员填一次疲劳度问卷,用作业前后疲劳度平均值表示驾驶员作业时的疲劳程度。

$$T = X_1 + X_2 + X_3 + X_4 \tag{4}$$

式中 T ——驾驶员整体疲劳度

X_1 ——颈椎疲劳度

X_2 ——双臂疲劳度

X_3 ——腰椎疲劳度

X_4 ——双腿疲劳度

2.3.2 土壤紧实度和含水率

如图 2 所示,选取赛亚斯 SYS-TJS100S 型紧实

度测量仪测量试验区土壤紧实度、莱恩德便携式土壤水分速测仪测量土壤含水率,测量时以 0.8 m/s 的速度匀速将仪器垂直插入土壤中,分别测量 5、10、15、20 cm 深度处的土壤紧实度、含水率,每条垄沟取 10 个点。

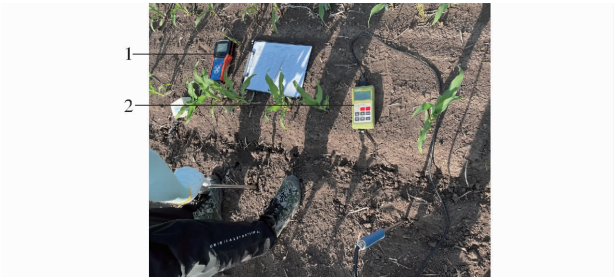


图 2 土壤紧实度、含水率测量仪器

Fig. 2 Measuring instrument for soil compactness and moisture content
1. 赛亚斯 SYS-TJS100S 型紧实度测量仪 2. 莱恩德便携式土壤水分速测仪

2.3.3 土壤孔隙率

测量仪器见图 3。土壤孔隙率计算公式为

$$P_t = (1 - r_s/d_s) \times 100\% \tag{5}$$

式中 P_t ——土壤孔隙率,%
 r_s ——土壤容重,g/cm³
 d_s ——土壤密度,g/cm³

每条垄沟选取 4 个取样点,用环刀取 5、10、15、20、30 cm 深度处的土样,选用 AKR-J300 型土壤密度计测量容重 r_s 、土壤密度 d_s ,然后计算出土壤孔隙率。



图 3 土壤孔隙率测试仪器

Fig. 3 Soil porosity test instrument
1. 密封箱 2. 旋片式真空泵 3. AKR-J300 型土壤密度计

2.3.4 拖拉机作业效率、油耗

机器在单位时间内按照一定质量标准完成的作业量称为机器作业效率。作业效率是影响拖拉机作业能力的重要因素,科学制定田间作业方案,适度的驾驶员作业负荷可有效降低拖拉机故障率,延长使用寿命,提高作业效率。根据 GB/T 24643—2009 可知作业效率计算式为

$$W = 0.1BV = A/T_p \tag{6}$$

其中 $T_p = T_1 + T_2$

式中 W ——作业效率,hm²/h

B ——作业幅宽,m
 V ——作业速度,km/h
 A ——作业面积,hm²
 T_p ——作业时间,h
 T_1 ——纯作业时间,h
 T_2 ——田间转向时间,h

拖拉机作业之前将油箱加满,完成每垄作业后将油箱再次加满,补充量即为此次作业油耗,拖拉机每完成一垄作业后测量油耗,用油耗表征 CO₂ 排放量。并用秒表记录田间作业时的直行时间、掉头时间,结合作业面积便可得出作业效率。

3 基于人-车-土系统的撒肥作业油耗机制分析

3.1 结构方程模型构建

“驾驶员-拖拉机-耕层土壤”结构方程模型如表 1 和图 4 所示,本模型认为驾驶员、拖拉机、土壤之间是相互影响的,且表层土壤与各耕层土壤会相互影响。

Tab. 1 Potential variables and observed variables	
潜在变量	观测变量
驾驶员整体疲劳度(Y_1)	颈椎疲劳度(X_1)
	双臂疲劳度(X_2)
	腰椎疲劳度(X_3)
	双腿疲劳度(X_4)
拖拉机碳排放量(Y_2)	油耗(X_5)
	作业效率(X_6)
5 cm 处土壤压实程度(Y_{31})	紧实度相对变化率(X_7)
	含水率相对变化率(X_8)
	孔隙率相对变化率(X_9)
10 cm 处土壤压实程度(Y_{32})	紧实度相对变化率(X_{10})
	含水率相对变化率(X_{11})
	孔隙率相对变化率(X_{12})
15 cm 处土壤压实程度(Y_{33})	紧实度相对变化率(X_{13})
	含水率相对变化率(X_{14})
	孔隙率相对变化率(X_{15})
20 cm 处土壤压实程度(Y_{34})	紧实度相对变化率(X_{16})
	含水率相对变化率(X_{17})
	孔隙率相对变化率(X_{18})
30 cm 处土壤压实程度(Y_{35})	紧实度相对变化率(X_{19})
	含水率相对变化率(X_{20})
	孔隙率相对变化率(X_{21})

将驾驶员整体疲劳度、拖拉机碳排放量、各深度处土壤的压实程度作为结构方程模型中的潜在变量,将颈椎疲劳度、双臂疲劳度、腰椎疲劳度、双腿疲劳度、油耗、作业效率、各深度的土壤紧实度相对变化率、含水率相对变化率、孔隙率相对变化率作为观

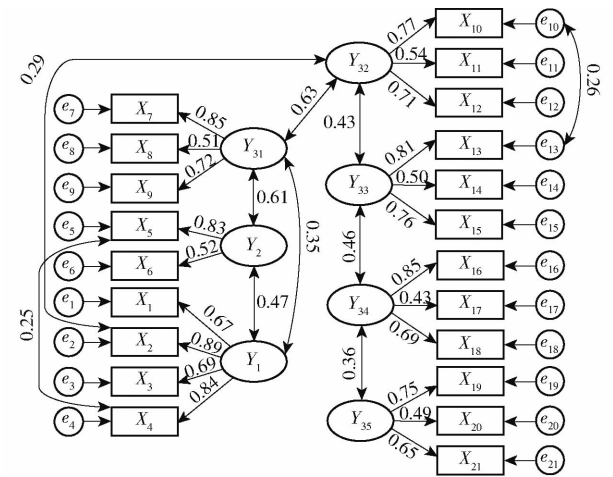


图 4 人-车-土系统结构方程模型

Fig.4 Structural equation model of “human – vehicle – soil” systems

测变量,各变量名称见表 1。

图 4 中的双向箭头表示两变量间具有显著相互影响作用,单项箭头表示两变量间具有显著因果关系;箭头上的数字表示影响的相关系数,数值越大表示影响越显著。

表 2 中列出了结构方程常用的适配度指标与主要拟合值。其中,GFI、AGFI、NNFI、IFI、CFI 越接近 1,RMSEA 越接近 0,说明模型拟合的效果越好。将拟合值与判断准则中的拟合值比较,可知本结构方程模型中各拟合值均符合结构方程模型的判断准则,可接受提出的理论模型。

表 2 适配度指标		
Tab.2 Fit index of structural equation model		
拟合指标	判断准则	拟合值
卡方 χ^2	> 0.05	485.09
卡方/自由度 χ^2/df	< 3	2.71
拟合优度指标 (GFI)	> 0.9	0.962
调整的拟合优度指标 (AGFI)	> 0.8	0.827
标准化均方根残差 (RMSEA)	< 0.08	0.067
Tucker-Lewis 指数 (NNFI)	> 0.9	0.915
递增拟合指数 (IFI)	> 0.9	0.968
比较拟合指数 (CFI)	> 0.9	0.968

3.2 测量模型分析

表 3 中列出了潜在变量与其对应的观测变量之间的标准化路径系数,根据结构方程模型的计算结果可以看出:

(1)在驾驶员整体疲劳度 Y_1 方面,颈部疲劳度 X_1 、双臂疲劳度 X_2 、腰椎疲劳度 X_3 、双腿疲劳度 X_4 均与驾驶员整体疲劳度正相关,即身体各部位的疲劳度越高,驾驶员整体疲劳度越高,驾驶员田间作业时,对其整体疲劳度影响最强的双臂疲劳度 X_2 ,标

表 3 各测量模型路径系数
Tab.3 Path coefficients between potential variables and observed variables

潜在变量	观测变量	标准化路径系数
Y_1	X_1	0.67
	X_2	0.89
	X_3	0.69
	X_4	0.84
Y_2	X_5	0.83
	X_6	0.52
Y_{31}	X_7	0.85
	X_8	0.51
	X_9	0.72
Y_{32}	X_{10}	0.77
	X_{11}	0.54
	X_{12}	0.71
Y_{33}	X_{13}	0.81
	X_{14}	0.50
	X_{15}	0.76
Y_{34}	X_{16}	0.85
	X_{17}	0.43
	X_{18}	0.69
	X_{19}	0.75
Y_{35}	X_{20}	0.49
	X_{21}	0.65

准化路径系数为 0.89,其次为双腿疲劳度 X_4 ,标准化路径系数为 0.84。颈椎疲劳度 X_1 、腰椎疲劳度 X_3 对驾驶员整体疲劳度的影响均明显低于双臂疲劳度 X_2 、双腿疲劳度 X_4 。

(2)在拖拉机碳排放量 Y_2 方面,油耗 X_5 与作业效率 X_6 均与其呈正相关,即油耗越高,拖拉机碳排放量越高,标准化路径系数为 0.83,作业效率 X_6 越高,拖拉机碳排放量也越高,标准化路径系数为 0.52,但作业效率 X_6 的标准化路径系数明显小于油耗 X_5 ,说明拖拉机作业效率主要影响农机碳排放量。

(3)在各深度土壤影响程度方面(Y_{31} 、 Y_{32} 、 Y_{33} 、 Y_{34} 、 Y_{35}),对各深度土壤影响程度相关性最强的均为土壤孔隙率相对变化率,其次为孔隙率相对变化率,相关性最弱的为土壤含水率相对变化率。各深度处土壤与上述指标相关性最强的为 5 cm 深度处土壤,紧实度变化率 X_7 、含水率变化率 X_8 、孔隙率变化率 X_9 对 5 cm 处土壤压实程度的标准化路径系数分别为 0.85、0.51、0.72。

3.3 结构模型分析

表 4 中列出了“驾驶员-拖拉机-耕层土壤”结构方程模型中各潜在变量之间的标准化路径系数,可以看出:

表 4 潜在变量间的路径系数

潜在变量之间的关系	标准化路径系数
$Y_1 - Y_2$	0.47
$Y_1 - Y_{31}$	0.35
$Y_2 - Y_{31}$	0.61
$Y_{31} - Y_{32}$	0.63
$Y_{32} - Y_{33}$	0.43
$Y_{33} - Y_{34}$	0.46
$Y_{34} - Y_{35}$	0.36

(1)驾驶员整体疲劳度对碳排放的作用机制分析。驾驶员整体疲劳度与拖拉机碳排放之间呈正相关,标准化路径系数为 0.47,即驾驶员疲劳程度越高,拖拉机碳排放越多,并且驾驶员也会通过拖拉机间接对土壤产生影响,其中颈椎疲劳度对拖拉机碳排放影响的标准化路径系数为 0.31、双臂疲劳度对拖拉机碳排放影响的标准化路径系数为 0.42、腰椎疲劳度对拖拉机碳排放影响的标准化路径系数为 0.32、双腿疲劳度对拖拉机碳排放影响的标准化路径系数为 0.40。主要原因是当驾驶员疲劳时,会倾向于在更高的运行速度下作业,即使用更高的挡位,尽快完成后续作业任务,此时拖拉机油耗、作业效率会上升,但疲劳度达到 15.5 时驾驶员作业效率开始下降。

(2)驾驶员整体疲劳度对耕层土壤压实的作用机制分析。驾驶员整体疲劳度与 5 cm 深度处土壤压实程度呈正相关,标准化路径系数为 0.35,即驾驶员疲劳度越高,土壤压实程度越高,土壤被破坏的程度越高。其中颈椎疲劳度对 5 cm 处土壤压实程度影响的标准化路径系数为 0.23、双臂疲劳度对 5 cm 处土壤压实程度影响的标准化路径系数为 0.31、腰椎疲劳度对 5 cm 处土壤压实程度影响的标准化路径系数为 0.24、双腿疲劳度对 5 cm 处土壤压实程度影响的标准化路径系数为 0.30。

(3)表层土壤压实程度和与其接触的深层土壤压实程度之间呈正相关,即表层土壤压实程度越高,与其接触的深层土壤压实程度也越高,土壤压实效果会在各深度的土壤之间传递。

4 电动拖拉机电源“一源多用”潜力分析

4.1 对农机碳达峰的贡献潜力

本次实测燃油拖拉机在撒肥 1 次的总油耗约 300 L,经查阅国外大型电动拖拉机产品手册,可知输出 150 kW 的拖拉机需要配置存储量约为 300 kW·h 的电源,进而开展纯电动拖拉机场景“一源多用”和农机排放碳达峰潜力分析。根据公式(1)可得

66.7 hm² 撒肥作业一次的等效总耗电量约为 2 988 kW·h,即电动拖拉机撒肥作业需消耗约 45 kW·h/hm²。根据公式(3)可知电动拖拉机撒肥一次相比燃油拖拉机可减少碳排放约 12 kg/hm²(CO₂)。

北大荒集团某农场耕地面积约 2.6 × 10⁴ hm²,大功率拖拉机约 55 台,则整个农场撒肥环节等效耗电量约为 1.155 × 10⁶ kW·h。如果全部耕地用电动拖拉机撒肥作业 1 次,可减少碳排放约 308 t CO₂。若考虑工况相似的 2 次镇压、2 次除草、3 次施肥、1 次耙地等 8 个田间管理环节,则田间管理环节总等效耗电量约 9.24 × 10⁶ kW·h 电,共计减少碳排放 2 464 t(CO₂),可显著助力农机排放碳达峰。

农场配置大功率拖拉机 55 台,若全配备电动拖拉机,其电源一用一备,采用换电模式续航,则电源闲置电量约为 1.65 × 10⁴ kW·h,具有可观的“一源多用”潜力,能显著增加能源利用率。

4.2 为玉米烘干和存储装备供电的潜力

玉米烘干存储是收获后环节的重要部分,对保证玉米存储品质起重要影响。烘干装备耗电量大,利用电动拖拉机闲置电源对烘干装备进行供电是一种能源充分利用的方法。玉米空气热源烘干设备一次烘干 1 t 的电加热功率约为 75 kW,用时 2 h,共需 150 kW·h。则电动拖拉机闲置电源的等效电量可提供约 110 t 玉米烘干所需电力。

玉米存储设备单台通风设备约需 100 kW·h/d,则电动拖拉机闲置电源的等效电量可提供约 165 台通风设备全天同时通风所需电力。

4.3 为农场田间路网供电的潜力

利用电动拖拉机闲置电源对农场田间路网照明设施进行供电,可有效缓解野外田间道路交通事故,提升农场工人夜间作业品质。8 m 以下每个路灯功耗约 0.25 kW·h,则电动拖拉机闲置电源的等效电量可提供约 5 500 个路灯夜间 12 h 照明的电能。

4.4 为农场田间值班室供电的潜力

农场在田间均设有机库,内部设有昼夜值班室,以防止农业突发情况下无人报警等情况发生,同时也具有新型农机储能电站的潜力。将机库按照安全用电标准改造为小型农机储能电站后,将电动拖拉机电源接入值班室电力局域网,可利用电动拖拉机闲置电源为值班室供电,不仅能保障值班室用电可靠度,也能有效缓解农网的电力负荷。值班室具有居住功能,每年用电量约 1 500 kW·h,则电动拖拉机电源的等效电量可满足约 11 个值班室全年的用电需求。

5 结论

(1)土壤紧实度是拖拉机主要油耗因素,而且

驾驶员整体疲劳程度也会影响拖拉机碳排放、作业效率,并通过操纵拖拉机间接影响耕层物理性质。其中,双臂疲劳度、双腿疲劳度对拖拉机碳排放和土壤压实程度的影响程度最大,对拖拉机碳排放的标准化路径系数分别为 0.42、0.40,对表层土壤压实的标准化路径系数分别为 0.31、0.29。发展电动化撒肥机组可使机手疲劳程度降低,电机平稳、低油耗运行,从而间接降低综合油耗。

(2)电动拖拉机电源“一源多用”具有农机碳达峰潜力。如果全部耕地用电动拖拉机撒肥作业

1 次,则整个农场撒肥环节等效耗电量约为 $45\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{hm}^2$,减少碳排放 $12\text{ kg}/\text{hm}^2(\text{CO}_2)$,整个农场田间管理环节总等效耗电量约 $9.24\times 10^6\text{ kW}\cdot\text{h}$,共计减少碳排放 $2\,464\text{ t}(\text{CO}_2)$ 。

(3)电动拖拉机电源“一源多用”对农网末端小型用电设施供电具有一定潜力。若农场应用电动拖拉机换电式续航,则在田间管理期,其电源闲置时提供约 110 t 玉米烘干所需电力,或 165 台通风设备全天同时通风所需电力,或 5 500 个路灯夜间 12 h 照明的电能,或 11 个值班室全年的用电需求。

参 考 文 献

- [1] 周炳华,姚学恒,姚海燕,等. 电能替代背景下的需求响应模型研究[J]. 产业创新研究,2020(22):154-156.
ZHOU Binghua, YAO Xueheng, YAO Haiyan, et al. Research on demand response model under the background of electric energy substitution[J]. Industrial Innovation Research, 2020(22):154-156. (in Chinese)
- [2] 高建宇. 考虑电能替代效果的综合能源系统效益评价方法研究[D]. 北京:华北电力大学, 2021.
GAO Jianyu. Research on the benefit evaluation method of comprehensive energy system considering the effect of power substitution[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021. (in Chinese)
- [3] 王军. 电能替代技术的应用探析[J]. 中国设备工程,2021(13):204-205.
WANG Jun. Application of electric energy substitution technology[J]. China Equipment Engineering, 2021(13):204-205. (in Chinese)
- [4] LI Zhuonan, LIU Jun, JIN Yanming. Analysis of load characteristics changes in the case of large-scale electric energy substitution load connected-in[C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020: 042085.
- [5] TANG Wei, WU Peng, ZHANG Yu. Analysis on the current situation and development trend of China's electrification level and electric energy substitution under the background of carbon neutral[C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021:012019.
- [6] 颜建虎,汪盼,费晨. 模块化开关磁阻式横向磁通电机设计与分析[J]. 中国电机工程学报,2018,38(22):6723-6730.
YAN Jianhu, WANG Pan, FEI Chen. Design and analysis of modular switched reluctance transverse flux motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2018,38(22):6723-6730. (in Chinese)
- [7] 武仲斌. 后轮独立驱动电动拖拉机牵引特性优化与适应性驱动控制[D]. 北京:中国农业大学, 2020.
WU Zhongbin. Optimization of traction characteristics and adaptive drive control of rear independent drive electric tractor[D]. Beijing: China Agricultural University,2020. (in Chinese)
- [8] 李同辉. 电动拖拉机双电机动力耦合驱系统参数匹配与能量管理策略研究[D]. 北京:中国农业大学, 2020.
LI Tonghui. Research on parameter matching and energy management strategy of electric tractor dual motor dynamic coupling drive system[D]. Beijing: China Agricultural University, 2020. (in Chinese)
- [9] 杜玖玉,王贺武,黄海燕. 基于规则的混联式混合动力系统控制策略[J]. 农业工程学报,2012,28(增刊1):152-157.
DU Jiuyu, WANG Hewu, HUANG Haiyan. Rule-based hybrid power system control strategy[J]. Transactions of the CSAE, 2012,28(Supp.1):152-157. (in Chinese)
- [10] 王春光. 并联式混合动力拖拉机能量管理策略研究[D]. 洛阳:河南科技大学, 2014.
WANG Chunguang. Research on energy management strategy of parallel hybrid tractor[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)
- [11] 赵慧丽. 农村电网结构评价方法的研究[D]. 北京:中国农业大学,2004.
ZHAO Huili. Research on evaluation method of rural power grid structure[D]. Beijing: China Agricultural University, 2004. (in Chinese)
- [12] 陈春燕,许跃进,尚可. 农村电网最优电压组合方案的研究[J]. 沈阳农业大学学报,2005,6(6):709-712.
CHEN Chunyan, XU Yuejin, SHANG Ke. Research on the optimal voltage combination scheme of rural power grid[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2005,6(6):709-712. (in Chinese)
- [13] 李庆凯. 大连农村电网配电自动化系统应用研究[D]. 大连:大连理工大学,2014.
LI Qingkai. Dalian rural power distribution automation system application research[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [14] 朴在林,孟晓芳,解东光,等. 农村电网改造中网架更新的优化方法[J]. 农业工程学报,2011,27(1):250-254.
PIAO Zailin, MENG Xiaofang, XIE Dongguang, et al. Optimal approach on renewing framework for rural power network upgrading[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(1):250-254. (in Chinese)

[15] JIN Xing, WANG Jing, WANG Hong, et al. Cause analysis of distance on rural power network voltage based on power flow model[C] // Proceedings of 2018 3rd International Conference on Electrical, Control and Automation Engineering (ECAE 2018), 2018;177 – 181.

[16] 乔金友,张丹,张宏彬,等. 大中小型拖拉机压实对土壤坚实度和大豆产量的影响[J]. 农业工程学报,2019,35(21): 26 – 33.

QIAO Jinyou, ZHANG Dan, ZHANG Hongbin, et al. Effects of soil compaction by various tractors on soil penetration resistance and soybean yields[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(21): 26 – 33. (in Chinese)

[17] 王宪良,王庆杰,李洪文,等. 免耕条件下轮胎压实对土壤物理特性和作物根系的影响[J]. 农业机械学报,2017,48(6): 168 – 175.

WANG Xianliang, WANG Qingjie, LI Hongwen, et al. Effect of tyre induced soil compaction on soil properties and crop root growth under no-tillage system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(6):168 – 175. (in Chinese)

[18] 李汝莘,林成厚,高焕文,等. 小四轮拖拉机土壤压实的研究[J]. 农业机械学报,2002,33(1):126 – 129.

LI Ruxin, LIN Chenghou, GAO Huanwen, et al. Research on soil compaction of small four-wheel tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2002,33(1):126 – 129. (in Chinese)

[19] THOMAS K. A model for the prediction of the contact area and the distribution of vertical stress below agricultural tyres from readily available tyre parameters[J]. Biosystems Engineering,2005,92(1):161 – 165.

[20] CASTIONI G A F, DE L R P, CHERUBIN M R, et al. Machinery traffic in sugarcane straw removal operation: stress transmitted and soil compaction[J]. Soil & Tillage Research,2021,213:105 – 122.

[21] 李奇睿,王继军,郭满才. 基于结构方程模型的安溪县商品型生态农业系统耦合关系[J]. 农业工程学报,2012,28(16): 240 – 247.

LI Qirui, WANG Jijun, GUO Mancai. Coupling relationship of commodity eco-agriculture system in Ansai County based on structural equation model[J]. Transactions of the CSAE, 2012,28(16):240 – 247. (in Chinese)

[22] 朱兴林,姚亮,李建立,等. 基于结构方程模型的城乡公交一体化满意度研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2021,40(11):40 – 46,59.

ZHU Xinglin, YAO Liang, LI Jianli, et al. Research on satisfaction of urban-rural public transport integration based on structural equation model[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University(Social Sciences Edition), 2021,40(11):40 – 46,59. (in Chinese)

[23] 姚荣涵,祁文彦,郭伟伟. 自动驾驶环境下驾驶人接管行为结构方程模型[J]. 交通运输工程学报,2021,21(2):209 – 221.

YAO Ronghan, QI Wenyan, GUO Weiwei. Structural equation model of driver takeover behavior in autonomous driving environment[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021,21(2):209 – 221. (in Chinese)

[24] HANEEN A, LAMA A M, AYMAN A. Customers' perception of residential photovoltaic solar projects in the UAE: a structural equation modeling approach[J]. Energy Strategy Reviews,2022,39:1 – 14.

[25] WONJOON K, NAYOUNG K, JOSEPH B L, et al. Factors affecting trust in high-vulnerability human-robot interaction contexts: a structural equation modelling approach[J]. Applied Ergonomics,2020(85):1 – 11.

[26] 全国能源基础与管理标准化技术委员会. 综合油耗计算通则:GB/T 2589—2020[S]. 北京:中国标准出版社,2021.

(上接第 410 页)

[17] 邱育东,韩刚,张征. 基于多源数据结构融合的车轮滑转率测量方法[J]. 计算机测量与控制, 2021,29(5):49 – 53,58.

QIU Yudong,HAN Gang,ZHANG Zheng. Vehicle wheels slip rate measurement based on multi-source data structured fusion [J]. Computer Measurement & Control, 2021,29(5):49 – 53,58. (in Chinese)

[18] 曹青梅,周志立,张明柱,等. 拖拉机驱动轮滑转率估算法与验证[J]. 农业工程学报, 2015,31(23):35 – 41.

CAO Qingmei,ZHOU Zhili,ZHANG Mingzhu,et al. Algorithm and verification for estimating tractor driving wheel slip rate [J]. Transactions of the CSAE, 2015,31(23):35 – 41. (in Chinese)

[19] ZHU Shaohua, WANG Lin, ZHU Zhongxiang, et al. Measuring method of slip ratio for tractor driving wheels based on machine vision[J]. Agriculture, 2022, 12(2): 292.

[20] 余志生. 汽车理论[M]. 6 版. 北京:机械工业出版社,2006.

[21] KENJI I, YUTAKA K, SHINYA Y, et al. Ultrasonic doppler speed sensor for agricultural vehicles: effects of pitch angle and measurements of velocity vector components [J]. Agricultural Engineering International: the CIGR Journal, 2008, 10: PM07033.