

深松作业质量多维度综合评价方法研究

王培^{1,2} 张安琪¹ 安晓飞¹ 尹彦鑫¹ 王虹³ 孟志军¹

(1. 北京市农林科学院智能装备技术研究中心, 北京 100097; 2. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097;
3. 北京市密云区农业农村局, 北京 101500)

摘要: 针对深松作业质量评价指标单一、横向比较偏差显著等问题,通过在农机上装载智能终端设备,采集农机作业 GNSS、作业深度等信息,基于最小-最大归一化法,分析深松作业面积、作业效率、作业覆盖率、作业深度达标率、作业时间利用率等深松作业特征向量,并基于专家打分的调查问卷法确定特征向量权重,构建深松作业质量指数 (AMQI),评估深松作业综合质量。2022 年在黑龙江省红星农场开展深松作业质量监测实验,通过对 33 台不同深松设备跟踪分析,并与传统分析方法进行对比,结果表明,归一化特征向量消除不同特征间量纲影响,反映农机特征大小分布,AMQI 也反映深松作业综合质量,与达标面积评价法相比,评级维度更多,且评价更加全面和科学,可以为农机作业评价提供数据支撑。

关键词: 深松作业; 作业质量; 特征向量; 归一化处理

中图分类号: S24; S126 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2025)04-0081-06

OSID:



Research on Multi-dimensional Comprehensive Evaluation Method of Subsoiling Operation Quality

WANG Pei^{1,2} ZHANG Anqi¹ AN Xiaofei¹ YIN Yanxin¹ WANG Hong³ MENG Zhijun¹

(1. Intelligent Equipment Research Center, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China

2. National Research Center of Information Technology for Agriculture, Beijing 100097, China

3. Beijing Miyun Municipal Bureau of Agricultural and Rural Affairs, Beijing 101500, China)

Abstract: Aiming at the problems such as single evaluation index and significant deviation of horizontal comparison of subsoiling operation quality, by loading intelligent terminal equipment on agricultural machinery, collecting GNSS, operation depth and other information of agricultural machinery operation, analyzing the spatial trajectory data of agricultural machinery, calculating the feature vectors of agricultural machinery deep loosening operation, such as operation area, operation efficiency, operation coverage, operation depth compliance rate, operation time utilization rate and so on, based on the minimum-maximum normalization method, the characteristic vectors were normalized, and the weight of each feature vector was determined by the expert scoring method. The agricultural machinery deep loosening operation quality index (AMQI) was further calculated to evaluate the comprehensive quality of agricultural machinery deep loosening operation. In order to verify the quality index of agricultural machinery subsoiling operation, from January 1st, 2022 to December 31st, 2022, the agricultural machinery experiment was carried out in Hongxing Farm of Heilongjiang Province. The vehicle-mounted intelligent terminal was installed on 33 tractors on the farm, and the subsoiling operation data was continuously collected to calculate the quality index of agricultural machinery subsoiling operation. The results showed that the normalized feature vector eliminated the dimensional influence between different features and reflected the size distribution of agricultural machinery in features. The value of AMQI also reflected the comprehensive quality of deep loosening operation of agricultural machinery, compared with the standard area evaluation method, the rating dimension was more, and the evaluation was more

收稿日期: 2024-12-30 修回日期: 2025-01-26

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2001605、2023YFD1500405)、山东省重点研发计划项目(2022SFGC0202)和黑龙江省“揭榜挂帅”科技攻关项目(20212XJ05A0203)

作者简介: 王培(1983—),男,高级工程师,主要从事农业大数据与人工智能研究,E-mail: wangp@nercita.org.cn

通信作者: 孟志军(1975—),男,研究员,博士生导师,主要从事农机智能装备研究,E-mail: mengzj@nercita.org.cn

comprehensive and scientific, which can provide data support for horizontal and vertical evaluation of agricultural machinery operation.

Key words: subsoiling operation; quality; characteristic vectors; normalization processing

0 引言

深松作业能够打破犁底层,耕层土壤松散结构易于蓄水、脱盐碱、疏通空气、增强热交换等^[1-3],有利于增强土壤蓄水保墒能力,促进农作物根系下扎^[4-6],有利于土壤养分转化利用,有效降低耕地土壤容重和紧实度,提高土壤蓄水保墒能力,增强抗旱抗涝能力,促进农作物增产增收^[7-8]。

近年来,国家加快推进深松装备应用普及,全国深松机拥有量持续增加,各地研制并推广高精度、信息化农机深松远程监测装备,通过超声波、角度传感器等设备测量作业深度来准确掌握机械深松作业质量^[9-11],并利用信息化手段监测作业质量与面积,促进了“互联网+”农机技术应用,为农业生产主体和农机化主管部门决策提供了科学依据,显著提升了农机作业管理信息化水平和效率^[12-14]。通过信息技术手段对深松作业进行实时监测和远程监管取得了明显成效,为深松作业监管提供了量化依据^[15-17]。

作业质量评价是农业机械化生产的重要组成部分,可为农业机械选型和配套提供科学依据,提高农业机械使用效率 and 经济效益。现有深松作业质量研究聚焦于作业面积、作业功耗、任务分配优化、效益评价等。刘阳春等^[18]利用距离幅宽方法实现了深松作业面积计算,满足了深松作业远程监测和管理的基本需求;白晋^[19]利用网格标记法建立深松作业漏耕面积计算模型,农田实验结果表明,模型最大相对误差为 5.49%,能够满足深松作业系统要求;李亚硕等^[20]基于半监督 BP_Adaboost 方法对农机效益进行了评估,并推荐最优农机机具组合,增强农机作业能力,提高农机作业效益;王培等^[21]针对深松作业场景,基于线性回归分析了拖拉机功率与深松作业效率关系,建立了深松作业效率估算模型;郑侃等^[22]运用离散元仿真分析了深松、旋耕作业次序对其作业质量及功耗的影响,建立了功耗回归方程,并分析了作业质量综合分析;马明龙^[23]提出了基于倾角传感器与三点悬挂的几何深度算法和基于面积格点覆盖的面积测算方法,实时深度和面积测算误差均不超过 5%,对研究农机监测技术提供了新思路。

现有深松作业质量评价方法无法全面覆盖作业质量、效率、成本等评价要素,也难以实现更为科学的作业评价,大部分研究仅把农机作业面积、达标

率、平均深度等作为深松作业质量指标^[19-20]。目前信息化监管系统仅以作业面积和深度达标率作为深松作业质量的评判依据,缺乏对整个农机作业过程的综合评价。深松作业质量是深松作业的重要考核指标,包含农机作业过程中数量、重漏等作业关键信息,本文分析深松作业面积、作业效率、作业速度、作业历史重叠、作业时间利用率等,以实现深松作业质量综合评价。

1 材料与方法

深松作业是一项关系到土壤理化性质、作物生长等多方面的农业生产技术,深松作业质量直接影响作物产量和质量;农业机械作业质量评价应遵循全面性原则,从作业精度、效率和成本等多个维度进行综合评级^[24-26]。

目前利用信息化手段可以对深松作业过程中的多项指标进行精准监控,综合反映深松作业精度、效率和成本。通过计算特征表达作业精度、效率和成本。通过对深松作业中的监控数据进行分析,建立农机作业质量综合评价方法。该方法对深松作业地块、作业面积、达标面积、作业时长和总时长等进行融合分析,自动计算深松作业特征向量,具体包括数据采集、数据获取及预处理、农机作业质量特征向量计算和深松作业质量综合评价 4 个步骤。

1.1 农机远程监测装置

数据采集使用北京市农林科学院农业智能装备技术研究中心研发的农机智能监测终端,用于农机作业全程机械化作业监控。农机智能监测终端主要包括全球导航卫星系统(Global navigation satellite system, GNSS)模块、无线传输模块、作业状态传感器模块和作业深度传感器模块,如图 1 所示。其中 GNSS 模块定位精度为 2.5 m 圆概率误差(Circular error probable, CEP),速度精度为 0.1 m/s;利用姿态传感器,建立基于角度关系的耕深检测模型,作业深度检测均方根误差小于 0.64 cm^[3];采集农机作业空间运行轨迹数据和作业数据,包括 UTC 时间、经纬度、海拔、速度、方位角、作业深度等信息;无线传输模块将采集的空间运行轨迹信息和作业信息无线传输至服务器。

1.2 数据获取及预处理

农机作业状态有工作状态和非作业状态,工作状态是农机在田块内的实际工作状态,非作业状态

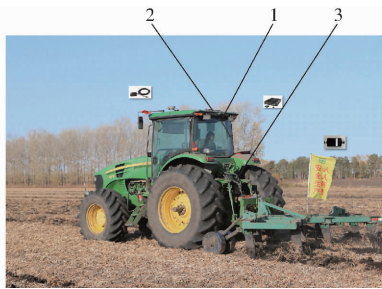


图 1 农机智能监测终端

Fig. 1 Intelligent monitor terminal of agricultural machinery
1. 监测主机(包含无线传输模块) 2. GNSS 定位模块 3. 作业状态传感器

包括停歇和地头转弯等状态。农机作业状态和作业深度有直接关系,当作业深度大于 0 为工作状态,当作业深度小于等于 0 时为非作业状态。从数据库中获取 1 次在农田地块作业 A 中数据记录集合 P ,即

$$P = \{p_1, p_2, \dots, p_i\}$$

p_i 为第 i 个记录点数据,包括 GNSS 时间、经纬度、作业深度、作业状态等信息,并按照 GNSS 时间排序,根据深度计算作业状态。

采用通用横轴墨卡托投影(Universal transverse Mercator projection, UTM)将经纬度坐标转换为平面坐标,为数据平面分析计算做准备。

为了方便长度计算,需要对数据集 P 中的 p_i 经纬度进行投影转换,数据统一在平面坐标系下,获得相应平面坐标为

$$p_i = \{t, lon, lat, d, o, x, y\}$$

式中 x ——平面坐标横坐标
 y ——平面坐标纵坐标
 t ——GNSS 时间
 lon ——经度
 lat ——纬度
 d ——作业深度
 o ——作业状态

1.3 农机作业质量特征向量计算

农机作业质量特征向量是指农机在农田矢量地块 B 中深松作业时农机作业面积、效率、覆盖率、深度达标率、作业时间利用率等特征,用于深松作业质量综合评价。

(1) 农机作业面积

按照时间顺序连接集合 P 内作业状态为田间作业状态的所有点,得到农机作业路径长度 L ,以农机深松机具幅宽 W 的一半为缓冲半径,对 L 进行缓冲操作,得到矢量面 A , A 大小为农机作业面积,计算式为

$$A = Buffer\left(L, \frac{W}{2}\right) \tag{1}$$

(2) 农机作业效率

农机作业效率 F 是评估农机作业效果的核心指标,是指单位时间完成的作业面积,计算式为

$$F = \frac{A_{area}}{T} \times 100\% \tag{2}$$

式中 A_{area} ——农机作业面积, hm^2
 T ——农机作业时长, h

(3) 农机作业覆盖率

对地块 B 和作业矢量面 A 进行矢量减操作,得到作业覆盖区域面积,农机作业覆盖率 S 是作业覆盖区域面积占地块面积百分比,计算式为

$$S = \frac{A_{area}}{B_{area}} \times 100\% \tag{3}$$

式中 B_{area} ——矢量地块 B 面积, hm^2

(4) 深度达标率

深度达标率 H 是指深松作业达标深度区域面积(超过预设达标深度区域,达标深度是区域土壤性状决定,一般不低于 25 cm)占作业面积的百分比,计算式为

$$H = \frac{C_{area}}{A_{area}} \times 100\% \tag{4}$$

式中 C_{area} ——作业深度高于预设达标深度区域面积, hm^2

(5) 农机作业时间利用率

农机作业时间利用率 U 是指农机作业时间占农机总运行时间(包括作业、转运、停歇等)百分比,计算式为

$$U = \frac{T_w}{T_i} \times 100\% \tag{5}$$

式中 T_w ——农机作业时间, h
 T_i ——农机总运行时间, h

1.4 深松作业质量综合评价

深松作业质量是农机作业质量特征的综合表现,通过归一化对农机作业向量特征建立特征向量权重矩阵,计算深松作业质量指数,实现作业质量综合评价。农机作业质量特征向量是指农机在农田矢量地块 B 中深松作业时农机作业面积、效率、覆盖率、深度达标率、作业时间利用率等特征,用于深松作业质量综合评价。

(1) 农机作业质量特征归一化

归一化农机作业质量特征是将不同特征之间的数值范围统一到同一尺度上,消除不同特征间的量纲影响,使用最小-最大归一化法,统计历史农机作业向量特征,获取每个特征向量最大值和最小值,对特征向量 x 进行归一化处理得 x' ,即

$$x' = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \tag{6}$$

式中 $x_{\min}$ ——特征向量 x 最小值
 $x_{\max}$ ——特征向量 x 最大值

将每台农机作业面积 A 、农机作业效率 F 、农机作业覆盖率 S 、农机作业深度达标率 H 、农机作业时间利用率 U 等组成农机作业矩阵 X ,即

$$X = [A \quad F \quad S \quad H \quad U]$$
 (7)

根据式(6)对农机作业矩阵进行归一化处理,得到归一化后特征向量

$$X' = (A', F', S', H', U')$$
 (8)

(2) 深松作业质量指数计算

为了评价农机作业综合质量,建立深松作业质量权重,所有特征向量权重组成矩阵权重 Y

$$Y = [w_A \quad w_F \quad w_S \quad w_H \quad w_U]$$
 (9)

其中 $w_A + w_F + w_S + w_H + w_U = 1$
式中 w_A —— A 权重 w_F —— F 权重
 w_S —— S 权重 w_H —— H 权重
 w_U —— U 权重

权重依照各特征向量属性贡献程度使用德尔菲法来确定,通过匿名方式征询有关专家意见,对专家意见进行统计、处理、分析和归纳,客观地综合多数专家经验与主观判断,经过意见征询、反馈和调整获得最终权重^[26]。

深松作业质量指数 (AMQI) 是表征深松作业质量的综合评价指数,是特征向量和权重矩阵转置矩阵乘积,计算式为

$$P_{AMQI} = X'Y^T$$
 (10)

2 实验

黑龙江省红星农场位于小兴安岭南麓,位于黑龙江省北安市境内,隶属黑龙江农垦总局北安分局(北纬 48°02′~48°17′,东经 126°47′~127°15′)如图 2 所示,属寒温带大陆性季风气候,四季分明,全年平均降水量 555.3 mm,年大于等于 10℃ 活动积温约为 2 293.1℃,农场耕地 2.73 × 10⁴ hm²,多为丘陵漫岗,土质肥沃,宜于耕作,并极有利于农作物生长,机械总动力 2.7 × 10⁴ kW,机械化率达 99% 以上。

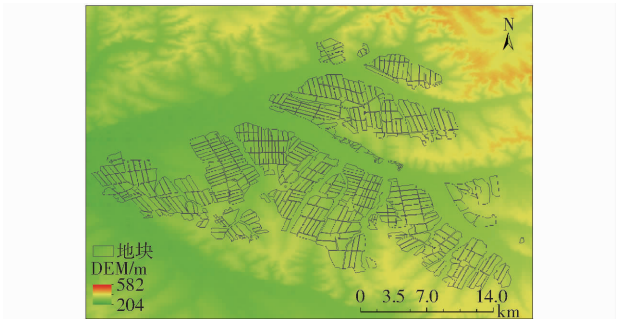


图 2 研究区概况

Fig.2 Overview of study area

2.1 农机作业数据采集

为了验证深松作业质量指数,2022 年 1 月 1 日—12 月 31 日,在红星农场约翰迪尔、福格森、凯斯、维美德等 33 台拖拉机上安装车载智能终端,采集深松作业数据,累计采集 457 车日数据,面积总计 1.47 × 10⁴ hm²,每台车年度作业累计深松作业面积为 118.30 ~ 2 251.54 hm²,作业时长为 28.23 ~ 441.94 h,如表 1 所示。

表 1 农机作业数据

Tab.1 Statistics of agricultural machinery

序号	地块面 积/hm ²	作业面 积/hm ²	达标面 积/hm ²	作业 时长/h	总时长/ h
1	234.12	220.82	220.30	48.15	60.56
2	450.65	433.14	431.82	91.76	113.04
3	616.62	583.20	581.46	131.49	158.07
4	298.46	271.88	271.35	66.19	78.89
5	171.49	150.90	114.38	35.21	41.87
6	128.35	128.43	123.81	31.02	35.31
7	151.32	136.21	135.94	38.70	46.55
8	237.82	271.03	270.57	84.13	96.07
9	152.39	159.73	152.94	40.49	50.55
10	146.88	165.17	161.53	39.71	49.36
11	279.76	269.81	269.20	56.43	67.40
12	477.34	418.72	416.69	87.90	105.37
13	455.27	413.70	408.59	89.61	106.41
14	432.74	392.49	391.94	81.65	97.22
15	198.42	231.45	230.25	67.68	85.16
16	172.82	204.51	204.19	54.42	69.40
17	424.37	465.10	463.17	109.80	134.07
18	112.18	133.28	133.12	35.27	40.33
19	1 530.19	1 778.46	1 768.06	330.64	385.32
20	126.65	118.30	117.78	28.23	33.91
21	419.74	377.58	361.16	100.22	111.65
22	1 276.14	1 480.32	1 477.36	281.96	288.59
23	2 028.41	2 251.54	2 233.75	441.94	482.54
24	1 098.70	1 281.97	1 253.78	264.25	301.26
25	132.69	147.92	147.76	37.10	42.84
26	312.75	333.34	330.26	91.09	109.81
27	166.15	159.21	137.60	40.77	47.48
28	320.38	289.68	289.09	64.11	74.07
29	355.09	286.74	279.35	71.54	88.40
30	339.49	335.84	333.28	62.46	82.83
31	472.03	453.92	448.04	115.38	128.63
32	142.92	145.58	145.34	35.60	40.40
33	242.33	240.06	238.95	48.53	56.46

2.2 农机作业质量评价

通过农机作业质量特征向量计算及归一化,实现农机作业质量综合评价,根据式(1)~(5)计算农机作业面积 A 、农机作业效率 F 、农机作业覆盖率 S 、农机作业深度达标率 H 、农机作业时间利用率 U 等,

并根据式(6)进行特征向量归一化。

使用专家打分法,确定各个特征向量权重,发送调查问卷给咨询专家,专家包括农业科研院所、政府监管部门、农业服务组织和一线农技推广人员等;根据专家打分结果,并求平均值获得各个特征向量权重, w_A 、 w_F 、 w_Y 、 w_H 、 w_U 分别为 0.2、0.1、0.3、0.3、0.1。农机作业覆盖率和作业达标率更受关注,其次为农机作业面积,最后为农机作业效率和时间利用率。

根据式(10)获得深松作业质量指数(AMQI),来表征深松作业综合质量,结果如表 2 所示。从表 2 可看出,AMQI 为 0.15~0.90,平均值为 0.56,方差为 0.14,其中序号 22 和序号 5 分别为最大值和最小值。

表 2 农机特征向量归一化结果

Tab.2 Results of feature vector normalization for agricultural machinery operations

序号	作业面积	作业覆盖率	深度达标率	作业效率	时间利用率	AMQI
1	0.05	0.36	0.99	0.63	0.18	0.52
2	0.15	0.40	0.99	0.69	0.26	0.54
3	0.22	0.36	0.99	0.56	0.35	0.54
4	0.07	0.27	1.00	0.41	0.38	0.47
5	0.02	0.19	0.00	0.49	0.39	0.15
6	0.00	0.51	0.86	0.43	0.56	0.51
7	0.01	0.24	1.00	0.14	0.35	0.42
8	0.07	0.87	1.00	0.00	0.55	0.63
9	0.02	0.63	0.83	0.34	0.21	0.50
10	0.02	0.83	0.91	0.43	0.23	0.59
11	0.07	0.41	1.00	0.72	0.37	0.55
12	0.14	0.18	0.98	0.71	0.36	0.49
13	0.14	0.27	0.95	0.65	0.40	0.50
14	0.13	0.26	1.00	0.73	0.38	0.52
15	0.05	0.94	0.98	0.09	0.18	0.62
16	0.04	0.99	1.00	0.25	0.14	0.64
17	0.16	0.76	0.99	0.47	0.29	0.63
18	0.01	1.00	1.00	0.26	0.54	0.68
19	0.78	0.93	0.98	1.00	0.47	0.88
20	0.00	0.33	0.99	0.45	0.35	0.48
21	0.12	0.24	0.82	0.25	0.64	0.43
22	0.64	0.93	1.00	0.94	1.00	0.90
23	1.00	0.79	0.97	0.87	0.73	0.89
24	0.55	0.94	0.91	0.76	0.55	0.80
25	0.01	0.81	1.00	0.35	0.50	0.63
26	0.10	0.68	0.97	0.20	0.34	0.57
27	0.02	0.40	0.44	0.32	0.47	0.33
28	0.08	0.25	1.00	0.60	0.50	0.50
29	0.08	0.00	0.90	0.36	0.25	0.35
30	0.10	0.48	0.97	1.00	0.00	0.56
31	0.16	0.40	0.95	0.33	0.64	0.54
32	0.01	0.55	1.00	0.40	0.57	0.57
33	0.06	0.48	0.99	0.80	0.47	0.58

将最大值和最小值导入雷达图中,展现数据集的多个特征向量,如图 3 所示。从图 3 可看出,AMQI 最大值(序号 22)作业覆盖率、深度达标率、作业效率和时间利用率等特征向量占据优势,仅作业面积处于中等;AMQI 最小值(序号 5)作业面积、覆盖率、达标率等特征向量都处于低位,而作业效率、时间利用率处于中等;结合专家打分表,作业覆盖率和深度达标率所占权重最大,而作业效率、时间利用率所占权重最小。

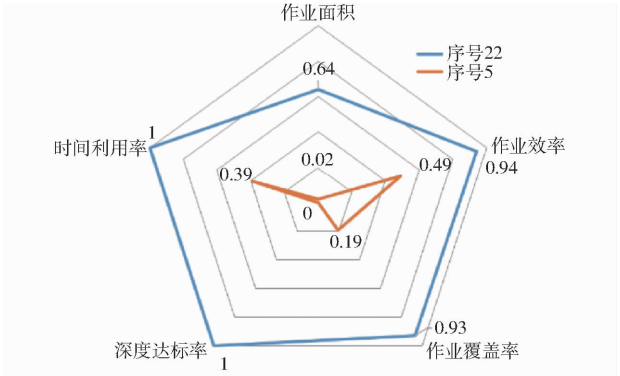


图 3 AMQI 极值雷达图

Fig. 3 Radar map of extreme value of AMQI

当前深松作业质量以达标面积为主,从表 1、2 可以看出,序号 23 达标作业面积(2 233.75 hm²)最高,但深度达标率(99.21%)、时间利用率(91.59%)、归一化作业覆盖率(0.79)、作业效率(5.09 hm²/h)均低于序号 22。

采用模型计算序号 23、序号 22 的 AMQI 分别为 0.89、0.90,序号 22 总体作业质量较高,也说明 AMQI 指数评价法不仅涵盖了作业量(达标面积),也考虑了作业深度(达标率)、作业覆盖率(遗漏)、作业效率、运营成本(时间利用率)等多个维度的综合分析,较传统评价方法更为科学全面。

3 结束语

利用车载智能终端采集深松作业数据,计算作业面积、作业效率、作业覆盖率、作业深度达标率、作业时间利用率等深松作业特征向量并进行归一化处理,融合了研究区域作业水平,将量纲表达式变为无量纲表达式,能够方便地进行比较和加权,从而构建作业质量指数评价综合作业质量,与达标面积评价法相比,评级维度更多,且评价更加全面和科学,从实验结果来看,归一化特征向量反映农机特征大小分布,AMQI 也反映农机的深松作业综合质量,是农机作业面积、作业效率、作业覆盖、作业深度达标率、作业时间利用率等的综合表现,可以为农机作业补贴提供数据支撑。

参 考 文 献

- [1] 郭志军,佟金,周志立,等.深松技术研究现状与展望[J].农业工程学报,2001,17(6):169-174.
GUO Zhijun,TONG Jin,ZHOU Zhili,et al. Review of subsoiling techniques and their applications[J]. Transactions of the CSAE, 2001,17(6):169-174. (in Chinese)
- [2] 刘学丽.机械化深松整地作业技术规范与应用[J].中国农机装备,2024(3):29-31.
- [3] 尹彦鑫,王成,孟志军,等.悬挂式深松机耕整地耕深检测方法研究[J].农业机械学报,2018,49(4):68-74.
YIN Yanxin,WANG Cheng,MENG Zhijun,et al. Operation quality measurement method for tilling depth of suspended subsoiler [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(4):68-74. (in Chinese)
- [4] 李洪文,陈君达,李问盈.保护性耕作条件下深松技术研究[J].农业机械学报,2000,31(6):42-45.
LI Hongwen,CHEN Junda,LI Wenying. Study on subsoiling technique for conservation tillage field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2000,31(6):42-45. (in Chinese)
- [5] 王慧杰,郝建平,冯瑞云,等.微孔深松耕降低土壤紧实度提高棉花产量与种籽品质[J].农业工程学报,2015,31(8):7-14.
WANG Huijie,HAO Jianping,FENG Ruiyun,et al. Microhole subsoiling decreasing soil compaction, and improving yield and seed quality of cotton[J]. Transactions of the CSAE,2015,31(8):7-14. (in Chinese)
- [6] 李荣,侯贤清.深松条件下不同地表覆盖对马铃薯产量及水分利用效率的影响[J].农业工程学报,2015,31(20):115-123.
LI Rong,HOU Xianqing. Effects of different ground surface mulch under subsoiling on potato yield and water use efficiency[J]. Transactions of the CSAE,2015,31(20):115-123. (in Chinese)
- [7] 黄玉祥,杭程光,李伟,等.深松作业效果试验及评价方法研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2015,43(11):228-234.
HUANG Yuxiang,HANG Chengguang,LI Wei,et al. Subsoiling test and evaluation methodology of tillage quality[J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition),2015,43(11):228-234. (in Chinese)
- [8] 张强,晋清源.模拟深松条件下深施磷肥对旱地冬小麦根系生长和水肥效应的影响[J].农业工程学报,2000,16(7):57-60.
ZHANG Qiang,JIN Qingyuan. Effects of phosphorous fertilizer deep application on winter wheat root and soil water under soil loosening conditions[J]. Transactions of the CSAE,2000,16(7):57-60. (in Chinese)
- [9] 张祺睿.深松作业深度监测系统的设计与试验[D].广州:华南农业大学,2021.
ZHANG Qirui. Design and experiment of monitoring system for subsoiling depth[D]. Guangzhou: South China Agricultural University,2021. (in Chinese)
- [10] 李海涛.农用拖拉机深松深度作业监测系统设计——基于STM32U575[J].农机化研究,2024,46(9):128-131,137.
LI Haitao. Design of monitoring system for subsoiling depth operation of agricultural tractor based on STM32U575[J]. Journal of Agricultral Mechanization Research,2024,46(9):128-131,137. (in Chinese)
- [11] 赵世卿,吴永峰,李光林,等.丘陵山区农机深松作业深度和面积远程监测系统[J].西南大学学报(自然科学版),2018,40(12):22-29.
ZHAO Shiqing,WU Yongfeng,LI Guanglin,et al. A remote monitoring system for depth and area of agricultural machinery subsoiling in hilly regions[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition),2018,40(12):22-29. (in Chinese)
- [12] WANG Z,CHEN L,LIU Y. Design and implementation of agricultural machinery monitoring and scheduling system[J]. Computer Engineering,2010,36(11):232-234,237.
- [13] 冀福华.农机田间作业大数据处理关键技术研究及平台构建[D].北京:中国农业机械化科学研究院,2021.
JI Fuhua. Research on key technology and platform construction of agricultural machinery field operation big data processing [D]. Beijing:Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences,2021. (in Chinese)
- [14] 吴才聪,陈瑛,杨卫中,等.基于北斗的农机作业大数据系统构建[J].农业工程学报,2022,38(5):1-8.
WU Caicong,CHEN Ying,YANG Weizhong,et al. Construction of big data system of agricultural machinery based on BeiDou [J]. Transactions of the CSAE,2022,38(5):1-8. (in Chinese)
- [15] 史国滨,王熙.基于ASP.NET的农机监控Web GIS系统性能优化[J].安徽农业科学,2011,39(5):2821-2823.
SHI Guobin,WANG Xi. Optimization of performance of agricultural machinery monitoring Web GIS system based on ASP.NET [J]. Journal of Anhui Agricultural Science,2011,39(5):2821-2823. (in Chinese)
- [16] 孟志军,尹彦鑫,罗长海,等.农机深松作业远程监测系统设计与实现[J].农业工程技术,2018,38(18):34-37.
- [17] 翟长远,杨硕,王秀,等.农机装备智能测控技术研究现状与展望[J].农业机械学报,2022,53(4):1-20.
ZHAI Changyuan,YANG Shuo,WANG Xiu,et al. Status and prospect of intelligent measurement and control technology for agricultural equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(4):1-20. (in Chinese)
- [18] 刘阳春,苑严伟,张俊宁,等.深松作业远程管理系统设计与试验[J].农业机械学报,2016,47(增刊):43-48.
LIU Yangchun,YUAN Yanwei,ZHANG Junning,et al. Design and experiment of remote management system for subsoiler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(Supp.):43-48. (in Chinese)
- [19] 白晋.农机深松作业智能监测系统[D].太原:中北大学,2023.
BAI Jin. Intelligent monitoring system of agricultural machinery subsoiling operation[D]. Taiyuan:North University of China, 2023. (in Chinese)

YANG Shuming, LI Maoqiang, YANG Shuchuan, et al. Design of soil moisture sensor drive mechanism for corn irrigating hill-seeder[J]. Journal of Hebei University (Natural Science Edition), 2013, 33(6):561 – 566. (in Chinese)

[14] 杜一童. 土壤含水率动态检测装置的设计与试验[D]. 北京:中国农业大学, 2020.
DU Yitong. Design and test of dynamic detection device for soil moisture content[D]. Beijing: China Agricultural University, 2020. (in Chinese)

[15] 姜万礼, 王成宝, 杨思存, 等. 引黄灌区灰钙土水浇地犁底层厚度对土壤紧实度及玉米生长的影响[J]. 寒旱农业科学, 2023, 2(12):1146 – 1149.
JIANG Wanli, WANG Chengbao, YANG Sicun, et al. Effects of the thickness threshold of plow pan on soil compaction and maize growth in grey-calcium soil of Yellow River irrigation area[J]. Journal of Cold-Arid Agricultural Sciences, 2019, 2(12):1146 – 1149. (in Chinese)

[16] 马广宇. 平行板电容式水稻含水率在线检测装置的优化设计[D]. 大庆:黑龙江八一农垦大学, 2020.
MA Guangyu. Optimised design of parallel plate capacitive rice water content online detection device [D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2020. (in Chinese)

[17] 万霖,唐宏宇,马广宇,等. 翅片式双重极板水稻含水率检测装置优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(2):320 – 328.
WAN Lin, TANG Hongyu, MA Guangyu, et al. Optimization design and experiment on finned double plates rice moisture content measuring device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(2):320 – 328. (in Chinese)

[18] 周龙. 基于离散元法的玉米种子建模及播种过程的仿真分析与试验研究[D]. 长春:吉林大学, 2021.
ZHOU Long. DEM-based modelling of maize seeds and the simulation analysis and experimental study of the seed-sowing[D]. Changchun: Jilin University, 2021. (in Chinese)

[19] SL 364—2015 土壤墒情监测规范[S]. 北京:中国水利水电出版社, 2015.

[20] 刘淮玉. 方捆机草捆含水率在线检测方法 with 装置研究[D]. 大庆:黑龙江八一农垦大学, 2022.
LIU Huaiyu. Research on online measurement method and device of straw bale moisture content in square baler[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2022. (in Chinese)

[21] 张召召,雷金洋. 基于频域反射的环式农田土壤水分传感器的开发与试验验证[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(2):265 – 271.
ZHANG Zhaozhao, LEI Jinyang. Laboratory calibration and field precision measurement of FDR tubular moisture sensor[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(2):265 – 271. (in Chinese)

(上接第 86 页)

[20] 李亚硕,赵博,徐名汉,等. 基于半监督 BP_Adaboost 的农机作业效益评估[J]. 农业工程学报, 2023, 39(23):67 – 74.
LI Yashuo, ZHAO Bo, XU Minghan, et al. Evaluating operation benefit of agricultural machinery using semi-supervised BP_Adaboost[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(23):67 – 74. (in Chinese)

[21] 王培,孟志军,安晓飞,等. 拖拉机功率与深松作业效率关系研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(增刊):87 – 90.
WANG Pei, MENG Zhijun, AN Xiaofei, et al. Relationship between agricultural machinery power and agricultural machinery subsoiling operation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(Supp.):87 – 90. (in Chinese)

[22] 郑侃,何进,李洪文,等. 作业次序对深松旋耕联合作业机作业质量及功耗的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(21):52 – 60.
ZHENG Kan, HE Jin, LI Hongwen, et al. Influence of working order on working quality and power consumption of subsoiling and rotary tillage combined machine[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(21):52 – 60. (in Chinese)

[23] 马明龙. 机械深松作业质量监测技术研发[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2017.
MA Minglong. Research and development of mechanized subsoiling operation quality monitoring technology [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2017. (in Chinese)

[24] 金慧芳,史东梅,陈正发,等. 基于聚类及 PCA 分析的红壤坡耕地耕层土壤质量评价指标[J]. 农业工程学报, 2018, 34(7):155 – 164.
JIN Huifang, SHI Dongmei, CHEN Zhengfa, et al. Evaluation indicators of cultivated layer soil quality for red soil slope farmland based on cluster and PCA analysis[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(7):155 – 164. (in Chinese)

[25] 王政. 基于客户满意度的玉米收割机作业调度系统开发[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2023.
WANG Zheng. Development of a corn harvester operation scheduling system based on customer satisfaction [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2023. (in Chinese)

[26] 孙琳岚. 农业科技发展水平测度指标与方法研究[D]. 合肥:安徽农业大学, 2011.
SUN Linlan. Study on indicators system and method for the level of development of agricultural science and technology [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2011. (in Chinese)