

茶园同轴螺旋开沟深松施肥一体机多目标优化与试验

宋志禹¹ 张雷^{1,2} 陈浩龙¹ 武传宇^{1,2} 陈建能^{1,2}

(1. 浙江理工大学机械工程学院, 杭州 310018; 2. 农业农村部东南丘陵山地农业装备重点实验室(部省共建), 杭州 310018)

摘要: 针对丘陵茶园坡地行间狭窄、地表残茬导致施肥机失稳、施肥不均、通过性差及开沟困难等问题,本文设计了一种同轴螺旋开沟深松施肥一体机,可同时实现深松、开沟、施肥和覆土作业。对开沟装置和排肥装置等关键部件进行了优化设计,建立了螺旋施肥土壤颗粒运动学与力学模型,确定了螺旋开沟刀具临界转速;提出了一种基于离散元法的土壤-机具互作模型,开展了单因素与 Box - Behnken 中心组合试验,建立了开沟性能参数的回归模型,采用多目标优化方法优化作业参数。优化结果为前进速度 0.20 m/s、螺旋刀具转速 193.23 r/min、刀具螺旋角 30.12°。在优化组合参数下,仿真开沟深度稳定性系数为 98.56%,沟底宽度一致性系数为 97.32%,覆土率为 83.14%,排肥稳定性系数为 98.76%,排肥均匀性系数为 98.05%。田间试验结果表明,开沟深度稳定性系数、沟底宽度一致性系数、排肥稳定性系数、施肥均匀性系数和覆土率平均值分别达到 95.01%、93.07%、97.73%、97.49%、81.67%,各指标满足茶园施肥农艺要求。研究结果为丘陵茶园机械化高效精准施肥提供了一种有效的技术装备参考。

关键词: 丘陵茶园; 螺旋开沟-深松施肥机; 离散元法; 参数优化

中图分类号: S225.93 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)14-0162-11 **OSID:** 

Multi-objective Optimization and Experiment of Coaxial Spiral
Trenching - Subsoiling - Fertilizing Integrated Machine in Tea Garden

Song Zhiyu¹ Zhang Lei^{1,2} Chen Haolong¹ Wu Chuanyu^{1,2} Chen Jiangneng^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China

2. Key Laboratory of Agricultural Equipment for Hilly and Mountainous Areas in Southeastern China (Co-construction by Ministry and Province), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In response to the problems such as narrow inter-row space on hilly tea gardens, unstable operation of fertilization machines due to surface residues, uneven fertilization, poor mobility and difficulty in trenching, a coaxial spiral trenching and deep loosening fertilization integrated machine was designed, which can simultaneously perform deep loosening, trenching, fertilization and soil covering operations. The key components such as the trenching device and the fertilizer discharge device were optimized. The kinematics and mechanics model of spiral fertilization of soil particles were established, and the critical rotational speed of the spiral trenching tool was determined. A soil - machine interaction model based on the discrete element method was proposed. Single-factor and Box - Behnken central combination experiments were carried out, and a regression model of trenching performance and parameters was established. The operation parameters were optimized by using multi-objective optimization methods. The optimization results were a forward speed of 0.20 m/s, a rotational speed of the spiral trenching tool of 193.23 r/min, and a spiral angle of the tool of 30.12°. Under the optimized combination parameters, the stability coefficient of trenching depth was 98.56%, the consistency coefficient of trench bottom width was 97.32%, the soil covering rate was 83.14%, the stability coefficient of fertilizer discharge was 98.76%, and the uniformity coefficient of fertilizer discharge was 98.05%. The field test showed that the average values of the stability coefficient of trenching depth, the consistency coefficient of trench bottom width, the stability coefficient of fertilizer discharge, the

收稿日期: 2026-01-28 修回日期: 2026-03-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(32372005)

作者简介: 宋志禹(1984—),男,博士生,主要从事果蔬茶智能装备研究,E-mail: songzy1984@163.com

通信作者: 张雷(1974—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机械装备和农业机器人研究,E-mail: lzhang@zstu.edu.cn

uniformity coefficient of fertilization and the soil covering rate were 95.01% , 93.07% , 97.73% , 97.49% and 81.67% , respectively. All the indicators met the agronomic requirements for fertilization in hilly tea gardens. The research results can provide an effective technical equipment reference for the mechanized, efficient and precise fertilization in hilly tea gardens.

Key words: hilly tea garden; spiral trenching – subsoiling fertilizer applicator; discrete element method; parameter optimization

0 引言

茶树主要种植于山地与丘陵地区,土壤贫瘠,施肥是茶树获取必需养分、保证茶叶产量与品质的关键农艺措施^[1-2]。合理深施是提高肥料利用率、促进茶树生长的有效方式,机械化开沟施肥则是达成茶园精准施肥目标的重要技术途径^[3]。当前茶园施肥仍大量依赖人工或简单的表面撒施,施肥深度不足、肥料利用率低^[4]。研究表明,成年密植茶树吸收性须根有 80% 以上分布在垄间 20 ~ 40 cm 土层中。在茶垄中间开沟深施,可避免肥料与主根直接接触引发的“烧根”,从而显著提升肥效^[5]。丘陵山区茶园地形复杂、坡度较大、行间距狭窄且地表杂草与作物残茬密集,已有的果园施肥机械难以适配并稳定作业^[6]。因此,开发适用于茶垄开沟深施基肥的机械装备,对提高茶园肥料利用率和茶叶品质具有重要意义。

在果园施肥机械领域,日本 Ochiai 公司的 IR - 5 型履带式施肥机可在 25°坡地作业,用光电控制系统将单株施肥量误差控制在 8%^[7],该施肥机增加了液压调节机构,能实现开沟深度 5 ~ 15 cm 的无级调节,以适应不同树龄作物的需求^[8]。德国 Lemken 公司的 Solitair 9 型开沟施肥机通过电磁振动实现了 0.5 ~ 3 kg/min 的线性精准排肥,结合双圆盘开沟器完成开沟、施肥、覆土联合作业,肥料利用率较人工撒施提高约 22%^[9]。Przywara 等^[10]研究了肥料类型、撒肥盘叶片构型及转速对撒肥半径与均匀性的影响;Antille 等^[11]则建立了用于预测单个肥料颗粒在撒肥盘上运动轨迹的理论模型。

国内开沟施肥机械研发起步较晚,现有设备多以旋转式开沟施肥机为主^[12]。王京凤等^[13]开发了微型果园开沟施肥机,采用组合立式铣刀与清沟犁配合,适于狭窄空间作业;肖宏儒等^[14]研制了 1KS60 - 35X 型双螺旋开沟施肥机,通过取消挡泥板设计防止泥土堆积;臧家俊^[15]基于立式螺旋开沟刀设计了曲线开沟与肥料混合机型;陈平录等^[16]针对丘陵果园设计了电驱动立式螺旋开沟施肥机;王宇兵^[1]研制了茶园行间侧位深施肥机;陈伟祥^[17]设计了适用于生态茶园的一体化开沟施肥机。现有大多机具仍存在功能相对单一、整机尺寸或功率偏大

等问题,难以完全适应丘陵茶园狭窄行距的作业环境,在开沟深度稳定性、施肥均匀性等方面仍有提升空间^[18]。

针对丘陵茶园的特殊农艺与地形条件,本文提出并设计一种同轴螺旋开沟深松施肥机,将施肥管同轴内置于螺旋开沟器内部,实现开沟与施肥的同步精准进行,一次性完成开沟、深松、施肥及覆土全套作业。基于离散元法 (DEM) 提出一种土壤-机具互作分析模型,建立优化模型,针对作业参数开展多目标优化,通过田间试验验证整机作业性能,以期为丘陵茶园机械化高效精准施肥提供有效技术参考和依据。

1 开沟深松施肥机结构与工作原理

1.1 茶园开沟施肥农艺要求

现代茶园多采用矮化密植栽培模式,行距一般为 1.2 m 左右,株距为 0.3 ~ 0.5 m^[19]。成年茶树根系在行间交叉分布,大量吸收性须根集中于 20 ~ 40 cm 土层^[20]。为提高肥料利用率并避免肥料过于靠近主干造成“烧根”,施肥沟需开于茶行正中,深度为 20 ~ 40 cm,宽度为 10 ~ 20 cm,施肥后及时覆土^[21]。丘陵茶园坡度较大,要求机械具有低重心和足够牵引力,以适应不平整地面并防止侧倾^[22]。作业需满足施肥均匀、开沟深度稳定、覆土良好且不损伤茶树根系等要求^[23]。这些农艺要求为本机结构设计 with 参数选取提供了直接依据。

1.2 整机结构

茶园螺旋开沟深松施肥机采用履带自走式底盘,适应坡地和狭窄行间作业^[24]。整机由履带驱动底盘、变速箱、沟深自动调控装置、螺旋开沟装置和螺旋排肥装置等部分组成,如图 1 所示。主要参数见表 1。通过液压或电动升降机构调节开沟深度。机具前端破土刀破碎板结土层,降低螺旋开沟阻力。螺旋开沟器固定于开沟装置滑道上,受限深机构控制,保证开沟深度一致性。施肥装置安装于开沟螺旋管内部轴心位置,实现开沟与施肥同步进行。

1.3 工作原理

根据农艺预设开沟深度,整机沿茶行前进,螺旋开沟器旋转破土形成施肥沟槽。螺旋排肥器将肥料

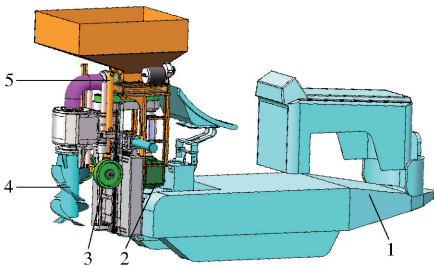


图1 茶园螺旋开沟施肥机结构示意图
Fig.1 Schematic of spiral trenching fertilizer application machine for tea gardens

1. 底盘 2. 变速箱 3. 沟深自动调控装置 4. 螺旋开沟装置
5. 螺旋排肥装置

表1 施肥机主要技术参数

Tab.1 Main technical parameters of fertilizing machine

参数	数值
整机外形尺寸/(m×m×m)	1.80×0.90×1.20
整机质量/kg	350
配套功率/kW	9.0(汽油机)
最大作业坡度/(°)	25
开沟深度/mm	100~450
沟底宽度/mm	100
作业速度/(m·s ⁻¹)	0~0.5(可调)
开沟刀转速/(r·min ⁻¹)	0~300(可调)

定量排出,通过输肥管送至同轴布置于开沟器内部的落肥口,直接落入沟底。随着机具前进,被螺旋叶片抛出的土壤回落覆盖沟内肥料,实现开沟、深松、施肥与覆土。若因坡地起伏导致实际开沟深度偏离预设值,沟深自动调控装置通过传感器检测开沟器姿态变化,并控制液压缸伸缩以实时调节,确保开沟施肥深度一致。

2 关键部件设计

2.1 螺旋排肥装置设计

螺旋排肥装置结构如图2所示,包括肥料箱、排肥管、肥箱底槽、螺旋排肥轴、直流永磁电机、传动链条及转速传感器等,直流永磁电机通过链条驱动螺旋排肥轴旋转,实现均匀排肥。螺旋排肥轴直径与螺距直接影响排肥效率、均匀性和堵塞问题。

单环施肥量为

$$q = \left[\frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} - bhL \right] \rho \phi \tag{1}$$

其中
$$L = \sqrt{\left[\pi(D + d)/2 \right]^2 + S^2} \tag{2}$$
$$h = (D - d)/2 \tag{3}$$

式中 q ——单环施肥量,g
 D ——螺旋排肥轴外径,mm
 d ——螺旋排肥轴内径,mm
 S ——螺旋排肥轴螺距,mm

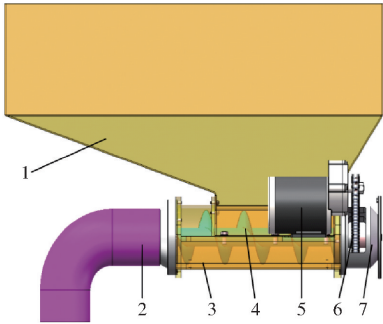


图2 螺旋排肥装置结构示意图
Fig.2 Schematic of spiral fertilization device

1. 肥料箱 2. 排肥管 3. 肥箱底槽 4. 螺旋排肥轴 5. 直流永磁电机 6. 传动链条 7. 转速传感器

b ——螺旋排肥轴螺牙平均厚度,mm
 h ——螺旋排肥轴螺牙深度,mm
 L ——螺旋排肥轴螺牙平均长度,mm
 ρ ——肥料容重,g/mm³
 ϕ ——排肥轴填充系数

螺旋排肥轴外径与排肥量关系为

$$D = K \left(\frac{Q}{\phi \lambda \varepsilon} \right)^{\frac{2}{5}} \tag{4}$$

其中
$$K = \left(\frac{1}{47cA} \right)^{\frac{2}{5}} \tag{5}$$

式中 Q ——螺旋排肥装置排肥量,t/h
 A ——物料综合特性系数
 K ——物料综合系数
 c ——螺距与直径比例系数
 λ ——物料单位体积质量,t/m³
 ε ——输送系数

根据茶园施肥农艺要求计算排肥螺旋轴外径 D 为 92 mm。螺距计算式为

$$S = K_1 D \tag{6}$$

式中 K_1 ——与肥料流动性有关的螺距与直径比例系数,取 0.8

代入参数得螺距为 70.4 mm,取整为 70 mm。

螺旋排肥轴转速过低会导致排肥量不足,过高则因离心力作用将肥料甩附在筒壁上,造成出肥不均甚至堵塞,角速度需满足 $\frac{1}{2}\rho\omega^2 D < \rho g$,其中 ω 为角速度, g 为重力加速度。

螺旋排肥装置排肥量为

$$Q = \frac{\pi[(D + 2\lambda)^2 - d^2]}{4} 60 \phi S n \rho c \tag{7}$$

式中 n ——螺旋排肥轴转速,r/min

则
$$n = \frac{Q}{15 \pi \rho S c [(D + 2\lambda)^2 - d^2]} \tag{8}$$

极限转速公式为

$$n_{\max} \leq \frac{A}{\sqrt{D}} \quad (9)$$

本文所用复合肥,手册推荐 A 为 $45 \sim 60 \text{ r} \cdot \text{mm}^{1/2}/\text{min}$,取 $A = 56 \text{ r} \cdot \text{mm}^{1/2}/\text{min}$,解出螺旋排肥轴转速不超过 $200 \text{ r}/\text{min}$;选取排肥电机额定转速为 $180 \sim 200 \text{ r}/\text{min}$,既满足施肥量需求,又避免肥料黏附和排肥不均。

2.2 螺旋开沟装置设计

螺旋开沟装置结构如图 3 所示,由开沟装置安装座、一级变速箱、变速箱输出轴、一级同步带传动、二级同步带传动、螺旋开沟器、升降滑道等组成。发动机动力经一级变速箱调速后,通过两级同步带传动驱动螺旋开沟器高速旋转,完成开沟。

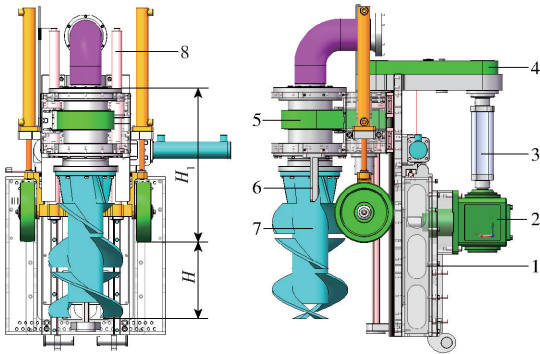


图 3 开沟装置结构示意图

Fig. 3 Schematic of ditching device structure

1. 开沟装置安装座 2. 一级变速箱 3. 变速箱输出轴 4. 一级同步带传动 5. 二级同步带传动 6. 刮土板 7. 螺旋开沟器 8. 升降滑道

2.2.1 土壤颗粒运动学分析

为确定螺旋刀具临界转速,基于土壤质点运动学与力学分析,建立土壤绝对角速度与刀具转速耦合关系;模型构建中将土壤简化为叶片外缘的无挤压离散质点,考察土壤沿叶片轴向的准稳态输送状态,求解出理论临界转速^[25],上述简化模型主要用于确定作业参数的理论边界,而土壤受压变形及动态接触特性将在离散元仿真 (DEM) 与田间试验中进一步验证。

以土壤质点中心为点 O ,以螺旋刀轴轴向方向为 Z 轴,前进方向为 X 轴,径向为 Y 轴建立坐标系,图 4a 为土壤质点在 XOY 平面坐标系,当开沟刀具角速度为 ω 时,土壤质点与螺旋刀轴中心在 XOY 平面的距离为 R 。图 4b 为土壤质点在 YOZ 平面坐标系,绝对速度为 v_a ,将 v_a 分解为沿螺旋刀片方向速度 v_c 和沿水平方向速度 v_b 。在 YOZ 坐标系,将速度 v_a 分解至沿 Z 轴和 Y 轴方向, v_a 在 Y 轴方向分量为 v_h , v_z 为 Z 轴方向分量。

由图 4 可得

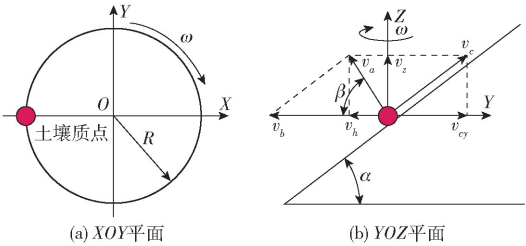


图 4 土壤颗粒速度分析

Fig. 4 Analysis of soil particle velocity

$$\begin{cases} v_h = v_b - v_{cy} \\ v_z = v_a \sin \beta \end{cases} \quad (10)$$

式中 v_{cy} ——速度 v_c 在 Y 轴方向速度分量

β ——绝对速度 v_a 与 Y 轴所夹角

螺旋刀片旋转角速度为

$$\omega = \frac{\tan \alpha + \tan \beta}{\tan \alpha} \omega_a \quad (11)$$

式中 α ——螺旋角

ω_a ——土壤质点绝对角速度

2.2.2 土壤颗粒受力分析

如图 5 所示,分别建立 YOZ 平面和 XOY 平面的受力。设土壤颗粒质量为 m ,颗粒受到重力 mg 、离心力 F_e 、叶片法向支持力 F_N 、叶片对其摩擦力 F_1 、沟壁法向力 F_{ne} 及沟壁摩擦力 F_2 等。

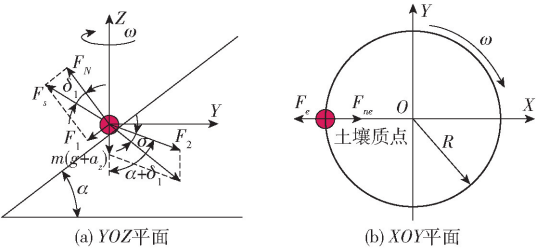


图 5 土壤颗粒受力分析

Fig. 5 Force analysis of soil particles

摩擦力计算式为

$$\begin{cases} F_1 = F_N f_1 \\ F_2 = F_{ne} f_2 \end{cases} \quad (12)$$

其中

$$F_{ne} = F_e = m \frac{v_h^2}{R} \quad (13)$$

$$f_1 = \tan \delta_1 \quad f_2 = \tan \delta_2$$

式中 f_1, f_2 ——土壤与叶片、土壤与沟壁摩擦因数

δ_1, δ_2 ——土壤与螺旋叶片的外、内摩擦角

R ——土壤颗粒做圆周运动的回转半径

由图 5 可知

$$F_N = F_2 \cos(90^\circ - \alpha - \beta) + (g + a_z) m \cos \alpha \quad (14)$$

式中 a_z ——土壤径向加速度

由式(13)得土壤质点离心力为

$$F_e = m \frac{v_a^2}{R} \cos^2 \beta = m \omega_a^2 R \quad (15)$$

在垂直于 F_s 方向上,土壤质点径向惯性力 ma_z

和重力 mg 分力与 F_2 分力处于平衡状态,可得

$$(g+a_z)msin(\alpha+\delta_1)=F_2sin\sigma \tag{16}$$

式中 σ ——摩擦力 F_2 与 Z 轴所夹锐角

由式(12)、(15)、(16)得土壤质点绝对角速度为

$$\omega_a=\sqrt{\frac{(g+a_z)sin(\alpha+\delta_1)}{f_2Rcos(\alpha+\beta+\delta_1)}} \tag{17}$$

将式(17)代入式(11)得

$$\omega=\frac{tan\alpha+tan\beta}{tan\alpha}\sqrt{\frac{(g+a_z)sin(\alpha+\delta_1)}{f_2Rcos(\alpha+\beta+\delta_1)}} \tag{18}$$

为确保土壤颗粒在刀片中上升,需满足 $\beta>0^\circ$;当 $\beta=0^\circ$ 时,螺旋刀具临界角速度 ω_0 为

$$\omega_0=\sqrt{\frac{g+a_z}{f_2R}tan(\alpha+\delta_1)} \tag{19}$$

螺旋叶片摩擦因数、摩擦角参照文献[25]分别取 0.45 、 26.8° ,根据简化分析土壤质点径向加速度为 0 ,计算得到开沟最低临界角速度 ω_0 为 13.07 rad/s ,即临界最低转速为 124.86 r/min 。

3 仿真分析与参数优化

3.1 离散元仿真模型建立

基于土壤特性构建土壤模型如图 6 所示。表层为耕作层,厚度 350 mm ,采用 Hertz - Mindlin With JKR 接触模型;底层为犁底层,厚度 300 mm ,采用 Hertz - Mindlin With Bonding 接触模型。土槽模型设定为长 $2\,500\text{ mm}$ 、宽 900 mm 、高 700 mm 。装置材料采用 65Mn 钢。在 EDEM 中仿真参数设置为:总时长 18 s ,数据保存间隔 0.01 s ,最小计算单元尺寸为土壤颗粒半径 3 倍。

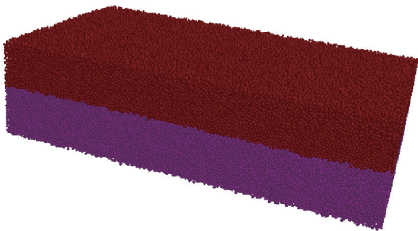


图 6 土壤模型
Fig.6 Soil model

为确保仿真准确性,通过查阅文献与前期测定^[26],明确土壤、肥料及机具部件关键物料本征参数(表 2)以及各项材料间的离散元接触参数(表 3)。

3.2 单因素仿真试验

根据茶园开沟施肥作业农艺要求与装置工作机理分析^[27-29],确定各试验因素取值范围(表 4)。采用单因素试验方法,分别探究前进速度、螺旋刀具转速和刀具螺旋角对开沟性能指标(开沟深度稳定性

表 2 物料本征参数

Tab.2 Intrinsic parameters of materials		
物料	参数	数值
65Mn 钢	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	7 865
	泊松比	0.29
	剪切模量/Pa	8×10^{10}
耕作层	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1 390
	泊松比	0.43
	剪切模量/Pa	1.36×10^6
犁底层	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1 610
	泊松比	0.39
	剪切模量/Pa	1.76×10^6
肥料	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1 331
	泊松比	0.25
	剪切模量/Pa	1×10^7

表 3 离散元模型接触参数

Tab.3 Contact parameters of discrete element model		
物料	参数	数值
65Mn 钢-耕作层	恢复系数	0.61
	静摩擦因数	0.31
	动摩擦因数	0.03
65Mn 钢-犁底层	恢复系数	0.53
	静摩擦因数	0.28
	动摩擦因数	0.12
65Mn 钢-肥料	恢复系数	0.38
	静摩擦因数	0.23
	动摩擦因数	0.20
肥料-土壤	恢复系数	0.32
	静摩擦因数	0.22
	动摩擦因数	0.23
肥料-肥料	恢复系数	0.14
	静摩擦因数	0.30
	动摩擦因数	0.25

表 4 试验因素取值范围

Tab.4 Range of values for test factors			
项目	因素		
	前进速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	螺旋刀具转速/ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	螺旋角/($^\circ$)
下限	0.15	80	15
上限	0.80	280	45

系数 y_1 、沟宽一致性系数 y_2 和覆土率 y_3) 的影响。水平因素设为:前进速度 0.5 m/s 、螺旋刀具转速 180 r/min 、螺旋角 30° ,开沟深度为 350 mm 。需要指出的是,由前文理论力学分析可知螺旋刀具临界最低转速为 124.86 r/min ,为在离散元仿真中验证该理论临界值的准确性,并探明低转速工况下开沟覆土性能劣化失效边界,单因素试验将刀具转速仿真下限向下拓展至 80 r/min 。

土槽长度为 $2\,500\text{ mm}$,取中部 $1\,900\text{ mm}$ 为有效

测量段,两端各 300 mm 作为过渡区以消除边界效应。沿开沟方向在有效段内均匀设置 10 个采样断面,断面间距为 190 mm。在每个断面处测量开沟深度、沟底宽度及覆土颗粒数等参数(图 7),最终以 10 个断面测量结果的算术平均值作为该工况下的性能评价指标。

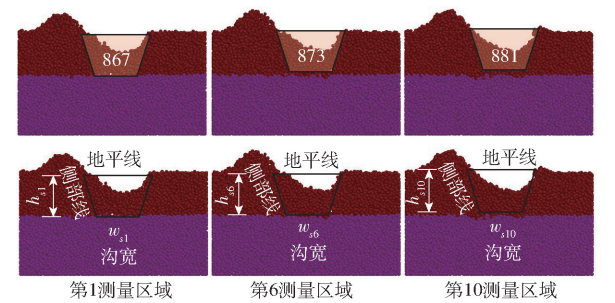


图 7 开沟区域测量

Fig. 7 Area measurement after trenching operation

单因素试验结果表明(表 5),前进速度对各性能指标均有显著影响,覆土率对作业速度变化最为敏感。螺旋刀具转速对覆土率的影响范围最大,表明其是控制覆土效果的关键因素。螺旋角变化对沟深稳定性和沟宽一致性影响相对平缓。

表 5 单因素试验结果
Tab. 5 Results of single-factor trials %

因素	项目	开沟深度稳定性系数	沟宽一致性系数	覆土率
前进速度	最大值	98.32	95.33	72.31
	最小值	96.54	94.62	62.18
	平均值	97.62	94.83	67.43
	极差	1.78	0.71	10.13
	标准差	0.416	0.351	5.672
螺旋刀具转速	最大值	97.52	96.54	83.52
	最小值	96.81	95.32	57.36
	平均值	97.28	95.47	63.22
	极差	0.71	1.22	26.16
	标准差	0.642	0.843	23.126
刀具螺旋角	最大值	98.16	96.37	65.43
	最小值	97.27	95.49	57.12
	平均值	97.36	95.56	52.95
	极差	0.89	0.88	12.48
	标准差	0.473	1.218	6.389

3.3 Box – Behnken 试验与回归模型

3.3.1 试验设计

根据 3.2 节单因素试验结果分析,当前进速度为 0.15 ~ 0.8 m/s、螺旋刀具转速为 80 ~ 280 r/min、螺旋角为 15° ~ 45° 时,各项开沟性能指标表现较好。因此,选取上述区间作为 Box – Behnken 响应面设计的因素水平范围。以开沟深度稳定性系数 y_1 、沟宽一致性系数 y_2 和覆土率 y_3 为响应指标,进

行多目标优化。试验因素编码如表 6 所示,试验设计与结果如表 7 所示, x_1 、 x_2 、 x_3 为因素编码值。

表 6 试验因素编码
Tab. 6 Test factors and code

编码	因素		
	前进速度/ (m·s ⁻¹)	螺旋刀具转速/ (r·min ⁻¹)	螺旋角/(°)
-1	0.150	80	15
0	0.475	180	30
1	0.800	280	45

表 7 开沟试验结果
Tab. 7 Results of furrow-opening tests

序号	因素			y_1 /%	y_2 /%	y_3 /%
	x_1	x_2	x_3			
1	-1	-1	0	98.47	95.71	82.07
2	1	-1	0	94.21	93.33	73.18
3	-1	1	0	94.81	96.63	77.15
4	1	1	0	97.56	94.15	70.31
5	-1	0	-1	98.31	96.63	80.99
6	1	0	-1	95.49	92.68	74.79
7	-1	0	1	96.16	94.96	82.22
8	1	0	1	97.88	94.12	71.43
9	0	-1	-1	95.61	92.81	78.66
10	0	1	-1	94.63	94.36	75.06
11	0	-1	1	94.52	93.43	77.42
12	0	1	1	95.97	93.88	74.02
13	0	0	0	96.91	96.89	73.33
14	0	0	0	97.59	96.59	73.56
15	0	0	0	96.89	96.12	73.83
16	0	0	0	96.61	96.85	74.92
17	0	0	0	97.59	96.46	74.51

3.3.2 回归模型建立与方差分析

利用 Design-Expert 软件建立试验因素与开沟评价指标回归模型,分别为

$$y_1 = 97.12 - 0.326\,2x_1 + 0.02x_2 - 0.061\,2x_3 + 1.75x_1x_2 + 1.14x_1x_3 + 0.607\,5x_2x_3 + 0.461x_1^2 - 1.32x_2^2 - 0.619x_3^3 \quad (20)$$

$$y_2 = 96.58 - 1.21x_1 + 0.467\,5x_2 - 0.011\,3x_3 - 0.025x_1x_2 + 0.777\,5x_1x_3 - 0.275x_2x_3 - 0.324\,8x_1^2 - 1.3x_2^2 - 1.66x_3^2 \quad (21)$$

$$y_3 = 74.03 - 4.09x_1 - 1.85x_2 - 0.551\,2x_3 + 0.512\,5x_1x_2 + 0.777\,5x_1x_3 - 0.05x_2x_3 - 1.36x_1^2 + 0.29x_2^2 + 1.97x_3^2 \quad (22)$$

根据表 8 可知,回归模型极显著;对于 y_1 , x_1 、 x_3 、 x_1x_2 、 x_2x_3 、 x_2^2 、 x_3^2 影响显著; y_2 受 x_1 主导,同时 x_2 、 x_3 、 x_1x_3 、 x_1^2 、 x_2^2 、 x_3^2 影响显著; y_3 则主要由 x_1 和 x_2 的独立线性作用驱动,且 x_1^2 、 x_3^2 影响显著。整体上, x_1 是关键影响因素,二次效应显著,部分交互作用明显。因此,在作业参数优化中需同时考虑因素主效应、非

表 8 开沟评价指标回归模型方差

Tab.8 ANOVA results for regression model of furrow-opening performance indices

指标	方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
y ₁	回归模型	28.40	9	3.16	24.18	0.000 2 **
	x ₁	1.29	1	1.29	9.87	0.016 3 *
	x ₂	0.000 8	1	0.000 8	0.006 1	0.939 8
	x ₃	3.71	1	3.71	28.45	0.001 1 **
	x ₁ x ₂	12.50	1	12.50	95.75	<0.000 1 **
	x ₁ x ₃	0.624 1	1	0.624 1	4.78	0.065 0
	x ₂ x ₃	0.912 0	1	0.912 0	6.99	0.033 3 *
	x ₁ ²	0.191 9	1	0.191 9	1.47	0.264 6
	x ₂ ²	2.01	1	2.01	15.40	0.005 7 **
	x ₃ ²	6.51	1	6.51	49.89	0.000 2 **
	残差	0.913 6	7	0.130 5		
	失拟项	0.064 3	3	0.021 4	0.100 9	0.955 3
	纯误差	0.849 3	4	0.212 3		
	总和	29.31	16			
y ₂	回归模型	36.88	9	4.10	51.01	<0.000 1 **
	x ₁	9.01	1	9.01	112.14	<0.000 1 **
	x ₂	0.756 4	1	0.756 4	9.42	0.018 1 *
	x ₃	0.525 3	1	0.525 3	6.54	0.037 7 *
	x ₁ x ₂	0.046 2	1	0.046 2	0.575 3	0.472 9
	x ₁ x ₃	1.23	1	1.23	15.34	0.005 8 **
	x ₂ x ₃	0.000 2	1	0.000 2	0.002 8	0.959 3
	x ₁ ²	0.462 7	1	0.462 7	5.76	0.047 5 *
	x ₂ ²	6.67	1	6.67	83.07	<0.000 1 **
	x ₃ ²	16.37	1	16.37	203.69	<0.000 1 **
	残差	0.562 4	7	0.080 3		
	失拟项	0.066 9	3	0.022 3	0.180 1	0.904 7
	纯误差	0.4955	4	0.1239		
	总和	37.45	16			
y ₃	回归模型	161.58	9	17.95	30.54	<0.000 1 **
	x ₁	116.66	1	116.66	198.43	<0.000 1 **
	x ₂	25.60	1	25.60	43.54	0.000 3 **
	x ₃	0.594 1	1	0.594 1	1.01	0.348 3
	x ₁ x ₂	0.230 4	1	0.230 4	0.391 9	0.551 2
	x ₁ x ₃	1.38	1	1.38	2.35	0.169 3
	x ₂ x ₃	0.007 2	1	0.007 2	0.012 3	0.914 8
	x ₁ ²	5.24	1	5.24	8.92	0.020 3 *
	x ₂ ²	1.52	1	1.52	2.59	0.151 8
	x ₃ ²	8.77	1	8.77	14.92	0.006 2 **
	残差	4.12	7	0.577		
	失拟项	2.68	3	0.892 1	2.48	0.200 5
	纯误差	1.44	4	0.359 8		
	总和	165.70	16			

注：* 表示显著(0.01≤P<0.05)，** 表示极显著(P<0.01)。

线性特征及交互关系,以获得更稳定的开沟质量与覆土效果。

3.4 两因素交互效应分析

根据表 8,对于开沟深度稳定性系数,存在显著交互效应。在较低前进速度下,开沟稳定性随螺旋

刀具转速增加呈先升后降趋势;在适当螺旋刀具转速范围内,随前进速度提高而逐渐降低;同时,螺旋角对稳定性也具有重要影响:在固定前进速度下,增大螺旋角会使开沟稳定性先上升后缓慢下降,表明存在使稳定性最优的螺旋角取值区间。

对于沟宽一致性系数,前进速度是主导该指标的核心因素,沟宽一致性随其增加而显著下降。螺旋刀具转速的影响呈现“先促进后抑制”特征,尤其在低前进速度工况下,适度提升螺旋刀具转速可有效改善沟宽一致性。螺旋角的作用规律呈现非线性特征,但在中低前进速度区间内存在最佳取值范围,可实现沟宽一致性的有效优化。

对于覆土率,前进速度表现出显著的负向主效应,覆土率随其增加呈现大幅下降趋势。螺旋刀具转速对覆土率呈轻微负向抑制作用,影响权重远低于前进速度。此外,螺旋角对覆土率的影响表现出显著的工况依赖性:在低前进速度下,适度增大螺旋角有利于提升覆土率;在高前进速度工况下,正向增益效果显著衰减。

3.5 回归模型作业参数优化求解

综合茶园开沟农艺要求与螺旋刀具独头切削特性,建立多目标优化模型^[22]。以前进速度、螺旋刀具转速和螺旋角为寻优变量,以开沟深度稳定性系数、沟宽一致性系数及覆土率最大化为目标函数,旨在获取综合性能最佳的作业参数组合。优化模型和约束条件为

$$\begin{cases} \max y_1 = (x_1, x_2, x_3) \\ \max y_2 = (x_1, x_2, x_3) \\ \max y_3 = (x_1, x_2, x_3) \\ \text{s. t.} \begin{cases} -1 \leq x_1 \leq 1 \\ -1 \leq x_2 \leq 1 \\ -1 \leq x_3 \leq 1 \end{cases} \end{cases} \quad (23)$$

求解得到最优参数组合:前进速度 0.2 m/s、螺旋刀具转速 193.23 r/min、螺旋角 30.12°。在最优参数组合下开沟深度稳定性系数为 98.56%,沟宽一致性系数为 97.32%,覆土率为 83.14%。

3.6 最优参数组合下施肥排料仿真分析

为验证本装备施肥作业性能,基于前述建立的离散元模型(参数见表 2、3)开展施肥过程仿真试验,如图 8 所示。在 EDEM 颗粒工厂中,于肥料箱顶部生成模拟肥料颗粒。为与实际优化工况保持一致,设定机器前进速度为 0.20 m/s、螺旋刀具转速为 193.23 r/min、螺旋角为 30.12°。

为评估排肥机构连续作业排量稳定性,利用 EDEM 后处理的 Grid Bin Group 功能,于排肥管出口

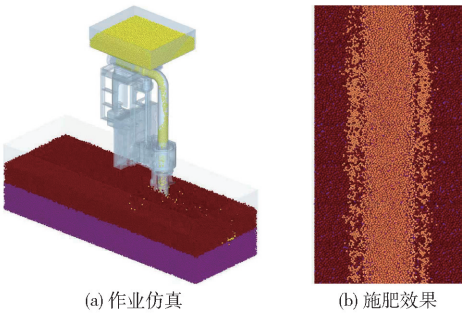


图 8 施肥仿真

Fig. 8 Fertilizer application simulation

下方沟底处建立统计网格。同工况下开展 5 次重复仿真,提取稳定排料期 2.0 s 内排肥总颗粒数,5 次仿真排肥总颗粒数分别为 1 995、1 990、2 017、2 033、2 049,平均颗粒数为 2 016.8,排肥稳定性系数为 98.76%,反映施肥过程未发生明显堵塞现象,验证了施肥机构具备良好的排肥稳定性。

为评估肥料入沟后空间分布均匀性,截取仿真稳定排料期内长 1 000 mm 施肥槽作为样本区。为消除边界效应,剔除两端数据,将居中 600 mm 区域等分为 6 个 100 mm 连续网格,分别统计各区间肥料颗粒数,6 个区间内颗粒数分别为 340、347、356、352、359、348,均值为 350.33,标准差为 6.83,变异系数为 1.95%,排肥均匀性系数为 98.05%。结合图 8b 可直观看出,落入沟底的肥料颗粒在沿程方向分布连续且均匀,无明显的断条和堆积现象。

4 田间试验

依据仿真结果研制茶园开沟施肥机如图 9 所示。



图 9 茶园开沟施肥机

Fig. 9 Tea garden trenching and fertilizing machine

4.1 开沟性能试验

设前进速度为 0.2 m/s、螺旋刀具转速为 193.23 r/min、螺旋角为 30.12°,开沟深度分别为 300、375、450 mm。开展开沟试验,结果如表 11~13 所示,开沟深度与沟底宽度测量如图 10 所示,每次试验取 10 个等间距测量点。

由表 11~13 可知,在不同深度的开沟中,茶园开沟施肥机具有良好的稳定性与作业精度。在开沟深度控制方面,平均深度分别为 306、373、453 mm,

表 11 开沟深度试验结果

Tab. 11 Results of furrow depth

指标	行程 1	行程 2	行程 3
最大值/mm	312	381	462
最小值/mm	289	364	443
平均值/mm	306	373	453
极差/mm	23	17	19
标准差/mm	12.2	17.8	17.0
深度稳定性系数/%	96.16	94.28	94.59
达标深度(≥300 mm)合格率/%	97.8	95.6	96.2

表 12 开沟宽度试验结果

Tab. 12 Results of furrow width

指标	行程 1	行程 2	行程 3
最大值/mm	313	308	311
最小值/mm	296	293	297
平均值/mm	303	298	302
极差/mm	17	15	14
标准差/mm	9	11	10
宽度一致性系数/%	93.8	92.3	93.1

表 13 开沟覆土率试验结果

Tab. 13 Results of soil covering rate %

指标	行程 1	行程 2	行程 3
最大值	83.3	82.5	82.8
最小值	80.8	79.8	80.5
平均值	82.1	81.2	81.7
极差	2.5	2.7	2.3
标准差	0.8	0.9	0.7



(a) 开沟深度测量 (b) 沟底宽度测量

图 10 开沟性能试验

Fig. 10 Trenching performance test

呈现准确的阶梯递增趋势;深度稳定性系数不低于 94.28%,合格率不低于 95.6%,标准差为 12.2~17.8 mm,说明系统对目标深度响应准确,波动较小;沟形质量方面,沟底宽度平均值为 298~303 mm,极差不大于 17 mm,宽度一致性系数为 92.3%~93.8%,表明开沟断面形态规整,沟壁稳定;覆土率作业均值分别为 82.1%、81.2%和 81.7%,极差不大于 2.7%,标准差不大于 0.9%,反映装置在土壤回流覆盖过程具有高度均匀性,有利于肥料定位掩埋。

4.2 排肥性能试验

4.2.1 排肥稳定性与均匀性

采用定时称量与沿程分段称量相结合的方法,

在近真实工况下对排肥器排肥稳定性与均匀性进行试验。开沟施肥机前进速度 0.2 m/s、排肥器转速 180 r/min,螺旋刀具空载同步旋转,以模拟实际耦合工况,排肥性能试验如图 11 所示。依据评价指标与操作流程,在同一批次有机肥条件下进行 6 次独立重复试验,每次连续收集 10 s 内排出肥料,排肥总量分别为 853.1、841.5、816.8、833.2、868.4、861.9 g,均值为 845.8 g,标准差为 19.19 g,变异系数为 2.27%,排肥稳定性系数为 97.73%,对应线施肥量 λ 为 422.9 g/m。

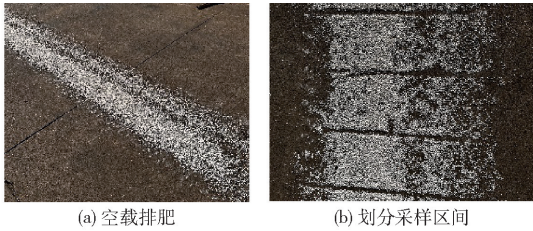


图 11 排肥性能试验

Fig. 11 Uniformity test of fertilizer discharge

为得到肥料沿行进方向空间分布均匀性,取 4 次行程将每次采样对应行程长度 2 m 沿行程方向连续等分为 10 段作为测量区域进行测试,为削弱起步与收尾段瞬态影响,舍去首尾各 2 段,仅取中间 6 段作为均匀性统计样本,分别称量并记录各区间质量,计算结果如表 14 所示。

表 14 排肥均匀性测定结果

Tab. 14 Fertilizer discharge stability and uniformity tests

试验编号	中段肥料质量 m_i/g			
	行程 1	行程 2	行程 3	行程 4
1	85.1	82.4	87.8	84.2
2	88.5	87.1	82.1	87.6
3	87.5	84.7	85.6	82.8
4	86.1	81.9	83.9	85.1
5	83.3	86.3	86.9	83.3
6	84.2	83.5	81.2	86.0
平均值/g	85.78	84.32	84.58	84.83
标准差/g	1.98	2.10	2.64	1.79
变异系数/%	2.31	2.49	3.12	2.11
均匀性系数/%	97.69	97.51	96.88	97.89

依据表 14,样机在该工况下每 20 cm 排肥量在 81.2 ~ 88.5 g 波动,排肥均匀性系数不小于 96.88%,排肥沿程分布均匀性良好。

排肥试验结果说明茶园开沟施肥机在所设定参数下能够实现稳定排肥与均匀施肥,满足茶园开沟施肥对排肥性能的要求。

4.2.2 施肥溢散率

对 6 块施肥试验区域所获得的总排肥量 M_{tot} 与溢散肥料量 M_{spill} 进行记录,求得各次溢散率 η_{spill} ,如

表 15 所示。

表 15 施肥溢散率

Tab. 15 Fertilizer overflow rate of single spiral fertilization

试验编号	M_{tot}/g	$M_{\text{spill}}/\text{g}$	$\eta_{\text{spill}}/\%$
1	139.1	7.2	5.18
2	131.5	6.6	5.02
3	136.8	6.7	4.90
4	136.2	6.4	4.70
5	137.4	6.8	4.95
6	136.9	6.3	4.60

根据表 15,6 次重复试验平均溢散率为 4.89%,说明机具能够将 95.11% 的肥料准确施入沟内,与此同时,溢散率变异系数为 4.30%,说明施肥重复性良好且稳定。综合来看,茶园开沟施肥机排肥入沟准确、损失小且稳定性高,能够满足丘陵茶园开沟施肥农艺要求。

4.2.3 肥土混合均匀性

为定量评价肥土混合性能,采用土壤电导率 (EC)法开展田间测试,如图 12 所示,统计结果如表 16 所示。在测定无肥区 EC 背景值后,控制机具以稳定参数作业 15 m。剔除前 5 m 起步区段,在 5 ~



图 12 肥土混合均匀性测定

Fig. 12 Measurement of fertilizer - soil mixing uniformity

表 16 肥土混合均匀性

Tab. 16 Uniformity of fertilizer and soil mixing

测量截面	位置	EC/ ($\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$)	测量截面	位置	EC/ ($\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$)
S1(5 m)上层	左(L)	0.60	S4(7 m)下层	左(L)	0.72
	中(C)	0.64		中(C)	0.77
	右(R)	0.58		右(R)	0.74
S2(5 m)下层	左(L)	0.74	S5(9 m)上层	左(L)	0.56
	中(C)	0.76		中(C)	0.58
	右(R)	0.74		右(R)	0.60
S3(7 m)上层	左(L)	0.58	S6(9 m)下层	左(L)	0.73
	中(C)	0.61		中(C)	0.75
	右(R)	0.59		右(R)	0.74
背景值上层	点 1	0.30	背景值下层	点 1	0.34
	点 2	0.28		点 2	0.30
	点 3	0.33		点 3	0.33

10 m 有效测试区内每隔 2 m 布设 1 个测量截面,于上层(10 cm)与下层(25 cm)分层取样,共计设 6 个截面(S1 ~ S6)。各截面按沟左、中、右原位测量土壤 EC。施肥区测点平均 EC 为 0.671 mS/cm,标准差为 0.074 mS/cm,变异系数为 11.0%。

施肥后土壤 EC 显著提升,测点 EC 变异系数为 11.0%。结果表明,肥料在水平和垂直方向上的分布均匀性较优,未出现中心点 EC 持续显著高于 2 侧的情况,证明所采用的开沟施肥机工作参数设置合理,具有良好的肥土混合性能,为实现茶园精准高效施肥提供了可靠的技术保障。

5 结论

(1)针对丘陵茶园行间狭窄、坡地作业困难的问题,研制了一种同轴螺旋开沟深松施肥一体机,实现了开沟、施肥、覆土同步作业。并完成了理论分析及关键部件设计,确定了螺旋排肥器与开沟装置结构参数及螺旋刀具临界转速,适用于丘陵茶园环境

开沟施肥。

(2)基于离散元法建立了土壤-刀具互作模型,通过单因素与 Box - Behnken 试验,构建了以前进速度、螺旋刀具转速和螺旋角为因素的作业性能回归模型。模型显著,预测精度高。采用多目标优化方法得到最优作业参数为:前进速度 0.20 m/s、螺旋刀具转速 193.23 r/min、螺旋角 30.12°。基于该最优参数组合开展了施肥排料离散元仿真,结果表明排肥稳定性系数为 98.76%,排肥均匀性系数达 98.05%,验证了机具排肥的可靠性。

(3)田间试验结果表明,在最优作业参数下,样机开沟深度稳定性系数不低于 94.28%,沟底宽度一致性系数不低于 92.3%,覆土率不低于 81.2%;排肥稳定性系数为 97.73%,排肥均匀性系数不小于 96.88%,肥料溢散率仅 4.89%,肥土混合均匀性变异系数为 11.0%。性能指标达到相关农艺与国家规范要求,研究结果为丘陵茶园高效精准施肥装备研发提供了理论基础与技术参考。

参 考 文 献

[1] 王宇兵. 茶园侧位深施肥机的设计与试验[D]. 武汉:华中农业大学, 2022.
Wang Yubing. Design and experiment of lateral deep fertilizer applicator in tea garden[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022. (in Chinese)

[2] 唐倩. 纳米硒对茶树化学品质成分合成代谢的影响[D]. 长沙:湖南农业大学, 2021.
Tang Qian. Effects of nanoselenium on biosynthesis of quality components in tea plant[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2021. (in Chinese)

[3] 罗锡文,廖娟,胡炼,等. 提高农业机械化水平促进农业可持续发展[J]. 农业工程学报, 2016, 32(1): 1 - 11.
Luo Xiwen, Liao Juan, Hu Lian, et al. Improving agricultural mechanization level to promote agricultural sustainable development[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(1): 1 - 11. (in Chinese)

[4] 李萍萍,林永锋,胡永光. 有机肥与化肥配施对茶叶生长和土壤养分的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 64 - 69.
Li Pingping, Lin Yongfeng, Hu Yongguang. Effects of compound application of organic and chemical fertilizers on growth, quality of tea plants and soil nutrient[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2): 64 - 69. (in Chinese)

[5] 刘冬梅,杨杭旭,周宏平,等. 密植矮化茶园地面低容量仿形喷雾液滴沉积性能研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(10): 96 - 105.
Liu Dongmei, Yang Hangxu, Zhou Hongping, et al. Droplet deposition performance of low-capacity profiling spray in densely planted dwarf tea plantation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 96 - 105. (in Chinese)

[6] Zhu H J, Jin H L, Hou Y F, et al. An omnidirectional dynamic levelling system with less tuning parameters for mountainous tea plantations[J]. Biosystems Engineering, 2025, 251: 117 - 127.

[7] Lin Y D, Song X F, Xiao W M, et al. Low-altitude remote sensing and deep learning-based canopy detection method for the navigation of orchard unmanned ground vehicles[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 239: 111077.

[8] 秦宽,郎旭涛,沈周高,等. 茶园仿生往复式开沟松土机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(3): 29 - 39.
Qin Kuan, Lang Xutao, Shen Zhougao, et al. Design and experiment of reciprocating furrowing and loosening machine for tea garden[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(3): 29 - 39. (in Chinese)

[9] 王琦. 小麦播种机种箱补给装置及控制系统设计[D]. 北京:中国农业机械化科学研究院, 2024.
Wang Qi. Design of seed box replenishment device and control system for wheat seeder[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2024. (in Chinese)

[10] Przywara A, Santoro F, Kraszkiewicz A, et al. Experimental study of disc fertilizer spreader performance[J]. Agriculture, 2020, 10(10): 467.

[11] Antille D L, Gallar L, Miller P C H, et al. An investigation into the fertilizer particle dynamics off-the-disc[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2015, 31(1): 49 - 60.

[12] Sun J W, Chen Z X, Song R H, et al. An intelligent self-propelled double-row orchard trenching and fertilizing machine;

- modeling, evaluation, and application[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 229: 109818.
- [13] 王京风, 杨福增, 刘世. 微型遥控果园开沟机的研究与设计[J]. 农机化研究, 2010, 32(4): 40–42.
Wang Jingfeng, Yang Fuzeng, Liu Shi. Micro-remote control orchard ditching machine design research [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010, 32(4): 40–42. (in Chinese)
- [14] 肖宏儒, 赵映, 丁文芹, 等. 1KS60–35X 型果园双螺旋开沟施肥机刀轴设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(10): 32–39.
Xiao Hongru, Zhao Ying, Ding Wenqin, et al. Design and experiment on blade shaft of 1KS60–35X type orchard double-helix trenching and fertilization machine[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(10): 32–39. (in Chinese)
- [15] 臧家俊. 矮砧果园有机肥料开沟施肥装置设计与试验[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
Zang Jiajun. Design and experiment of trenching and fertilizing device for organic fertilizer in dwarf orchard[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2020. (in Chinese)
- [16] 陈平录, 苏江红, 许静, 等. 丘陵果园立式螺旋开沟施肥机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(10): 223–233, 274.
Chen Pinglu, Su Jianghong, Xu Jing, et al. Design and experiment of hilly orchard vertical spiral ditching-fertilizing machine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(10): 223–233, 274. (in Chinese)
- [17] 陈伟祥. 生态茶园开沟施肥一体机的设计与试验[D]. 福州: 福建农林大学, 2024.
Chen Weixiang. Design and experiment of integrated machine for trenching and fertilizing in ecological tea plantation[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2024. (in Chinese)
- [18] Tan Haochao, Shen Congcong, Ma Junlong, et al. The reduction of energy consumption and soil disturbance mechanisms in trenching using biomimetic blades[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 230: 109887.
- [19] 彭书博, 陈兵旗, 李景彬, 等. 基于改进 YOLOv7 的果园行间导航线检测[J]. 农业工程学报, 2023, 39(16): 131–138.
Peng Shubo, Chen Bingqi, Li Jingbin, et al. Detection of the navigation line between lines in orchard using improved YOLOv7 [J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(16): 131–138. (in Chinese)
- [20] 秦宽, 梁小龙, 曹成茂, 等. 茶园切抛组合式开沟刀设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(5): 74–82.
Qin Kuan, Liang Xiaolong, Cao Chengmao, et al. Design and experiment of combined cutting and throwing ditching blade for tea garden[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(5): 74–82. (in Chinese)
- [21] 王守江, 颜丙新, 李立伟, 等. 基于离散元的肥料流重构玉米分层施肥装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(9): 138–150, 184.
Wang Shoujiang, Yan Bingxin, Li Liwei, et al. Design and experiment of corn layer fertilization device with fertilizer flow reconstruction based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(9): 138–150, 184. (in Chinese)
- [22] 郑钧耀. 丘陵山地果园精准变量自动施肥装置的设计与试验[D]. 重庆: 西南大学, 2024.
Zheng Junyao. Design and experiment of precise variable automatic fertilization device for hilly and mountainous orchards[D]. Chongqing: Southwest University, 2024. (in Chinese)
- [23] 谭好超, 马帅, 沈聪聪, 等. 葡萄园有机肥链式反转开沟施肥机研制与试验[J]. 农业工程学报, 2024, 40(16): 12–23.
Tan Haochao, Ma Shuai, Shen Congcong, et al. Design and experimentation of a chain reversal trenching and fertilization device for vineyard organic fertilizer[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(16): 12–23. (in Chinese)
- [24] James B, Jake D, Mustafa U, et al. Bentleg furrow opener performance analysis using the discrete element method[J]. Biosystems Engineering, 2020, 189: 99–115.
- [25] Zhang Lei, Zhai Yibin, Chen Jianneng, et al. Optimization design and performance study of a subsoiler underlying the tea garden subsoiling mechanism based on bionics and EDEM[J]. Soil and Tillage Research, 2022, 220: 105375.
- [26] 王少伟. 山地果园螺旋开沟机的开沟刀具设计与性能分析[D]. 武汉: 华中农业大学, 2019.
Wang Shaowei. Design and performance analysis on ditching blades of hill orchard spiral ditcher[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [27] James B B, Mustafa U, Jack M A D, et al. Simulating the effect of rake angle on narrow opener performance with the discrete element method[J]. Biosystems Engineering, 2018, 171: 1–15.
- [28] Du J, Heng Y F, Zheng K, et al. Investigation of the burial and mixing performance of a rotary tiller using discrete element method[J]. Soil and Tillage Research, 2022, 220: 105349.
- [29] 曾熠, 蒋啸虎, 吴明亮, 等. 基于 DEM–MBD 的油茶林分层切抛式开沟刀组研制[J]. 农业工程学报, 2024, 40(8): 30–42.
Zeng Yi, Jiang Xiaohu, Wu Mingliang, et al. Development of the layered cut and throw ditching blade groups for oil tea forest based on DEM–MBD[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(8): 30–42. (in Chinese)