

茶园切抛组合式开沟刀设计与试验

秦 宽¹ 梁小龙¹ 曹成茂¹ 丁为民² 吴正敏³ 方梁菲¹

(1.安徽农业大学工学院,合肥 210036; 2.南京农业大学工学院,南京 210031;
3.安徽农业大学茶与食品科技学院,合肥 210036)

摘要: 针对茶园机械化开沟抛土性能不理想、无专用刀具的问题,设计了适用于茶园开沟的切抛组合式开沟刀。对抛土刀抛土片的抛土过程进行动力学分析,确定其关键参数抛土片宽度为 8 cm、倾斜角为 30°时,可保证抛土刀横向抛土幅宽满足农艺要求。性能试验表明:切抛组合式开沟刀单侧抛土幅宽为 22.7 cm、抛土均匀性系数为 90.3%、覆土厚度为 2.1 cm、开沟深度稳定性系数为 87.8%、沟底浮土厚度为 1.2 cm,对照组单一开沟刀为 13.4 cm、84.3%、2.4 cm、82.3%、2.5 cm,说明切抛组合式开沟刀更符合茶园开沟实际需求,抛土均匀性与开沟稳定性更好,所抛土壤不易落入沟内。功耗分析试验表明,与单一切土刀相比,切抛组合式开沟刀抛土的正后侧区域冲击力减小,抛土上方区域冲击力减小,从而导致其抛土总冲击力减小,因此,该组合式开沟刀提高了开沟抛土质量,同时未明显增大开沟功耗。

关键词: 茶园; 开沟刀; 组合式

中图分类号: S222.5⁺2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)05-0074-09

OSID:



Design and Experiment of Combined Cutting and Throwing Ditching Blade for Tea Garden

QIN Kuan¹ LIANG Xiaolong¹ CAO Chengmao¹ DING Weimin² WU Zhengmin³ FANG Liangfei¹

(1. School of Engineering, Anhui Agricultural University, Hefei 210036, China

2. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China

3. College of Tea and Food Science and Technology, Anhui Agricultural University, Hefei 210036, China)

Abstract: In order to solve the problems of poor soil throwing performance, high power consumption and no special blade, a cutting and throwing combined ditching blade was designed for tea garden ditching. The dynamic analysis of the soil throwing process of the soil throwing lump determined that the key parameters of the soil throwing lump were 8 cm wide and the tilt angle was 30°, and the soil throwing blade could meet the requirements of tea garden ditching that the soil could be evenly distributed to the edge of the ditch instead of falling into the ditch, which was convenient for filling soil after fertilization and the ditching energy consumption could not be too high. The results of experiment showed that the width of single side throwing soil by the combined blade was 22.7 cm, the uniformity of throwing soil was 90.3%, the thickness of covering soil was 2.1 cm, the stability of ditching depth was 87.8%, and the thickness of floating soil at the bottom of ditch was 1.2 cm, while that of the control group was 13.4 cm, 84.3%, 2.4 cm, 82.3% and 2.5 cm, respectively, which indicated that the throwing distance of the combined blade was better than that of the single blade, the same as uniformity of throwing soil and planting stability, and the thrown soil by the combined blade was not easy to fall into the ditch. In addition, the combined blade did not significantly increase the power consumption. The results of power consumption analysis showed that compared with the single cutter, the impact force of the front and rear area of the combined blade was reduced, and the impact force of the upper area of the throwing soil was reduced, so the total impact force of the throwing soil was reduced.

Key words: tea garden; ditching blade; combined

收稿日期: 2020-12-03 修回日期: 2021-01-19

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2013BAD08B04)、安徽省自然科学基金项目(2008085QE270)和安徽省教育厅自然科学研究重点项目(KJ2019A0172)

作者简介: 秦宽(1989—),男,讲师,博士,主要从事特色经济作物装备研究,E-mail: qinkuan@ahau.edu.cn

通信作者: 曹成茂(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事特色经济作物装备研究,E-mail: caochengmao@sina.com

0 引言

目前,茶园使用的开沟机具多为通用圆盘式开沟机^[1],此类开沟机利用圆周均布的开沟刀旋转进行开沟,切土效果较好,但在作业中存在抛土不均匀、易回填,开沟功耗较大的问题。为此,国内外学者进行了开沟抛土规律及减耗研究,相关学者运用光滑粒子流动场^[2]、离散元仿真^[3]、图像处理等方法^[4-6]研究了开沟刀作业过程中土壤抛撒规律,并以此为基础设计确定了弯折角、弯折点位置和静态滑切角等开沟刀参数。康建明等^[7-9]利用多体动力学、仿生学^[10]、空间机械力学^[11]等手段优化了圆盘式开沟机参数,降低了作业功耗。

现有圆盘式开沟刀抛土与减耗研究多数针对大田和果园^[12-14]。茶园作业环境与大田、果园有所不同,典型的茶园土壤为砂质壤土,土壤深厚、质地粗松,砂粒、石砾含量较高,含水量适中。开沟农艺要求将此土壤相对精确地抛撒至沟边,以便于施肥后回填,但现有开沟刀难以满足茶园农艺要求。此外,我国规模茶园多采用条栽密植,其行距仅为1~1.5 m,且60%以上的茶园位于丘陵、山地等斜坡地带,特殊的种植环境及栽植特性使开沟动力源功率受到限制。因此,相较于大田和果园,茶园开沟刀作业功耗更加受限。针对茶园种植的农艺要求与土壤特性,本文在现有圆盘开沟刀结构和切抛理论基础,设计茶园专用抛土刀,并与切土刀相结合,组成符合茶园开沟抛土农艺要求的切抛组合式开沟刀。

1 结构与工作原理

茶园切抛组合式开沟刀作业平台为手扶开沟机,切抛组合式开沟刀安装于开沟机刀轴上,其结构如图1所示。因茶树种植环境及栽植特性使开沟机的动力源质量及功率均受到限制,则发动机质量应小于36 kg,功率小于等于5 kW,开沟机外型尺寸(长×宽×高)为1.3 m×0.5 m×0.83 m,整机质量小于等于65 kg,刀轴最大转速为550 r/min,通过更换开沟刀具可控制开沟深度范围在0~0.3 m。

作业时,开沟机的汽油机动力通过带轮(带传动箱内)经离合器分两个方向传动,一个方向通过齿轮变速箱带动开沟刀轴旋转,另一个方向通过齿轮变速箱带动驱动轮使机器前进。工作时,开沟刀随开沟刀轴旋转完成切土、碎土、抛土的开沟作业。

2 关键部件设计及力学分析

目前常用圆盘式开沟刀多使用6把通用型旋耕刀圆周等距排布(图2a),开沟作业时其切土性能较

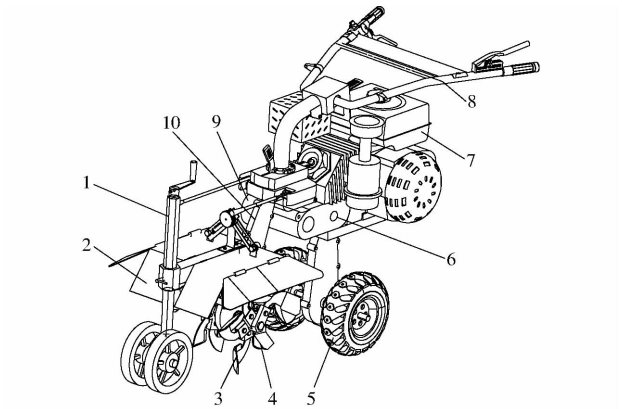


图1 茶园切抛组合式开沟刀及其作业平台结构示意图
Fig.1 Cutting and throwing combined ditching blade of tea garden and its working platform structure schematic
1. 摇臂式导向与限深装置 2. 挡土导流装置 3. 切抛组合式开沟刀 4. 开沟刀轴 5. 驱动轮 6. 齿轮变速箱 7. 汽油机 8. 手扶装置 9. 链箱 10. 带传动箱

好,但抛土性能较差,其破碎后土壤多数抛向正后方,容易覆盖所开沟型^[15],不符合茶园开沟沟内土壤均匀抛撒至沟边、不落在沟内、便于施肥后回填的农艺要求。针对此问题,结合茶园土多为砂土,质地粗松,砂粒、石砾含量较高的特点,设计专用抛土刀,与切土刀相结合,组成切抛组合式开沟刀。考虑刀具在刀轴上安装的对称性,保证开沟刀质心位于回转中心,采用4把切土刀、2把抛土刀的对称组合方式,切抛组合式开沟刀总体结构如图2b所示。

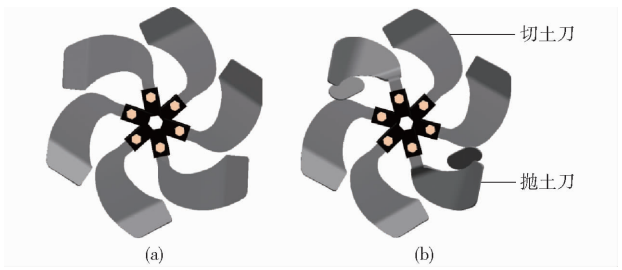


图2 单一切土开沟刀与切抛组合式开沟刀结构示意图
Fig.2 Structure schematics of cutting and throwing combined ditching blade and single soil cutting ditching blade

2.1 切土刀与抛土刀正切面端面高度

为满足茶园开沟施肥时沟深控制在200 mm左右的农艺要求,切土刀与抛土刀选择在传统IT245旋耕刀基础上进行关键参数调整^[16-17]。切抛组合式开沟刀作业茶园土壤多为未耕地,土壤较为板结^[18],因此刀具在抛土前首先需增加碎土能力,根据文献^[19]可知,刀具正切面端面高度的增加,可增加刀具对土壤的破碎性能,当正切面端面高度为60 mm时,土壤破碎率和功率消耗均为最优,因此切土刀与抛土刀正切面端面高度均由40 mm增加至60 mm,其他参数保持不变,改进后的刀具结构如图3所示。

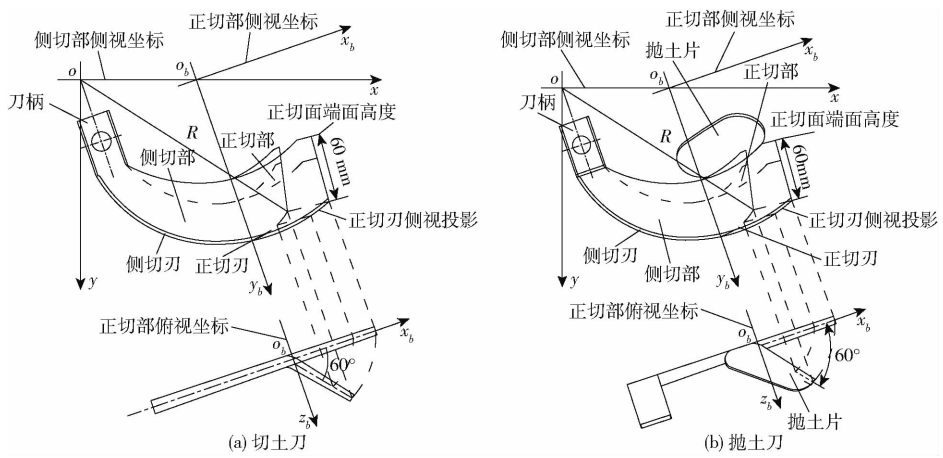


图3 切土刀与抛土刀正切面端面高度示意图

Fig. 3 Diagrams of end height of cutting surface of earth cutter and throwing blade

2.2 抛土刀抛土过程力学分析

茶园切抛组合式开沟刀的抛土刀能够将土壤侧向抛至指定位置的关键在于具有抛土片结构。如图4所示,抛土片位于抛土刀侧切部与正切部的非切土侧,抛土片整体形状为长方体,为防止其边缘入土时增加开沟阻力,对其边缘倒圆角,使其两头为半圆形,为保证抛土片长度可完全覆盖从切面滑移过来的土壤,其外端到正切刃端点为止,内端到侧切刃

最末触土点延长线为止。侧切刃与正切刃切开土壤后,土壤沿刃面上升,到达抛土片时,因抛土片具有倾斜角,使土壤受到抛土片作用力,从而被抛向一侧,土壤抛撒的距离除与倾斜角相关外,还与抛土片宽度相关,因土壤可能从抛土片任意位置抛出,因此抛土片宽度直接影响抛土距离,根据茶树开沟抛土需均匀覆盖在沟边 20 cm 位置,便于施肥后回填的农艺要求,对抛土片的倾斜角与宽度进行设计。

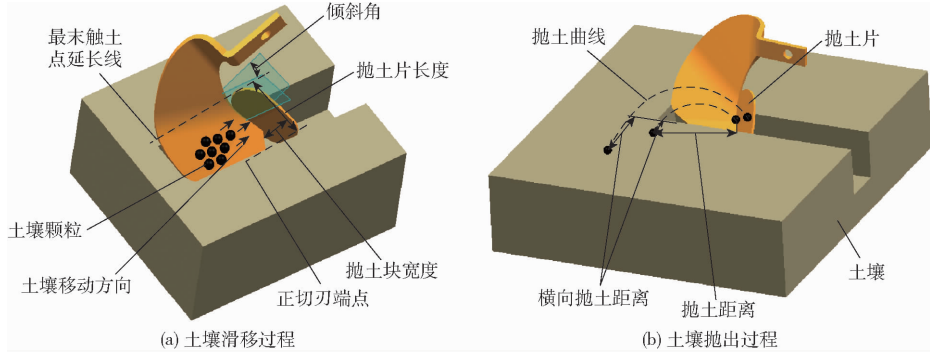


图4 抛土片抛土模型

Fig. 4 Soil throwing model of soil throwing lump

典型茶园均为砂土,土壤具有典型的颗粒离散特征,因此将土壤颗粒看作质点,土壤在离开抛土片时做抛物线运动,如图5所示,则从抛土片飞出的土壤距离为

$$B = \frac{v^2 \sin(2\delta)}{g}$$
 (1)

其中 $v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$ (2)

- 式中 B ——抛土距离, m
 v ——被抛出时的初始速度, m/s
 δ ——抛出时初速度与地面夹角, (°)
 g ——重力加速度, 9.8 m²/s
 v_x 、 v_y 、 v_z ——初始(绝对)速度 v 在空间三维直角坐标系上的分量, m/s

由图5可知,横向抛土距离为

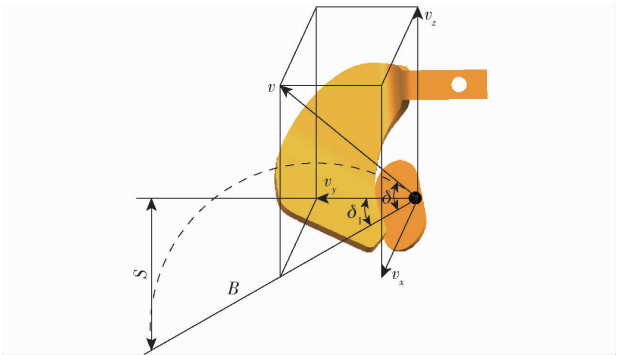


图5 抛土片抛土过程分析

Fig. 5 Analysis on process of throwing soil by soil throwing lump

$$S = B \sin \delta_1$$
 (3)

式中 δ_1 —— v 在地面的投影与 v_x 的夹角, (°)

S ——横向抛土距离, m

且 δ_1 满足 $\tan\delta_1 = v_y/v_x$ 。

将式(2)、(3)代入式(1)可得

$$S = \frac{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}{g} \sin\left(2\arctan \frac{v_y}{v_x}\right) \quad (4)$$

因抛土片宽度与倾斜角均会影响 v_x 、 v_y 、 v_z , 为了求出抛土片宽度与倾斜角, 需对被抛土壤进行动力学分析。如图 6 所示, 首先建立坐标系 $oxyz$, 其中点 o 为抛土刀回转中心, y 轴正向与机具前进方向一致, x 轴沿水平横向, z 轴垂直朝上, 抛土刀刀柄正面位于 $yozy$ 平面内。因所求切土块倾斜角与宽度均与抛土片平面相关, 为方便表示抛土片相关参数, 再以抛土片长边与短边交点为坐标原点 o_1 , 短边为 x_1 轴, 长边为 y_1 轴, 在抛土片平面建立坐标系 $x_1o_1y_1$, $x_1o_1y_1$ 与 $yozy$ 平面形成夹角 γ (倾斜角), $x_1o_1y_1$ 面与 xoy 平面形成夹角 β 。

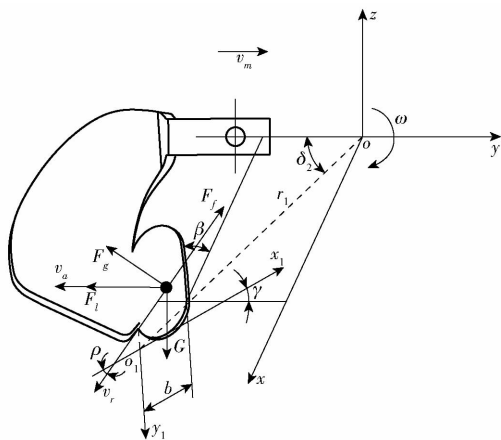


图 6 土壤在抛土片上的受力示意图

Fig. 6 Stress diagram of soil on soil throwing lump

根据抛土片与 $yozy$ 、 xoy 之间形成的夹角关系,

v_x 、 v_y 、 v_z 表示为

$$\begin{cases} v_x = v_r \sin\gamma \sin\beta + v_m \\ v_y = v_r \cos\gamma \sin\gamma - v_r \sin\gamma \cos\gamma \cos\beta + v_a \\ v_z = v_r \cos\gamma \cos\gamma - v_r \sin^2\gamma \cos\beta + \omega r_1 \cos(\omega t) \end{cases} \quad (5)$$

式中 r_1 ——点 o_1 回转半径, m

v_r ——土壤在抛土片表面滑移的相对速度, m/s

ω ——开沟刀回转角速度, rad/s

v_m ——土壤随开沟机的前进速度, m/s

v_a ——抛土刀旋转带动土壤的牵连速度, m/s

v_x 、 v_y 、 v_z 为绝对速度 v 在空间三维直角坐标系上的分量, 土壤在抛土片上的绝对速度 v 是抛土刀旋转带动的牵连速度 v_a 、土壤在抛土片表面滑移的相对速度 v_r 、土壤随开沟机前进速度 v_m 的矢量和^[20-21], 故可以对其单独求解后再求矢量和。其中牵连速度 v_a 的方向为 y 轴负向, 计算式为

$$v_a = (r_1 \cos\delta_2 - x'_1 \cos\gamma) \omega \quad (6)$$

式中 x'_1 ——土壤颗粒在抛土片面上瞬时横坐标

δ_2 —— r_1 与 y 轴夹角, ($^\circ$)

为求解土壤在抛土片表面滑移的相对速度 v_r , 需对土壤颗粒在抛土片上的受力进行分析。如图 6 所示, 土壤在抛土刀回转作用下受重力、离心力、科氏力和摩擦力共同作用, 其中, 重力在 x_1 轴和 y_1 轴上的分量 G_x 、 G_y 均为 $mg \sin\gamma \cos\beta$; 离心力在 x_1 、 y_1 轴上的分量 F_{Lx} 、 F_{Ly} 计算式为

$$\begin{cases} F_{Lx} = m(r_1 \cos\delta_2 - x'_1 \cos\beta) \omega^2 \cos\gamma \cos\beta \\ F_{Ly} = m(r_1 \cos\delta_2 - x'_1 \cos\beta) \omega^2 \sin\gamma \cos\beta \end{cases} \quad (7)$$

科氏力在 x_1 、 y_1 轴上的分量 F_{gx} 、 F_{gy} 为

$$\begin{cases} F_{gx} = 2\omega v_r \cos\beta \cos\gamma \sin\rho \\ F_{gy} = 2\omega v_r \cos\beta \cos\gamma \cos\rho \end{cases} \quad (8)$$

摩擦力在 x_1 、 y_1 轴上的分量 F_{fx} 、 F_{fy} 为

$$\begin{cases} F_{fx} = mf \sin\rho [g \sin\beta \sin\gamma + (r_1 \cos\delta_2 - x'_1 \cos\beta) \omega^2 \sin\beta + 2v_r \omega (\cos\rho \sin\gamma - \sin\rho) \cos\beta] \\ F_{fy} = mf \cos\rho [g \sin\beta \sin\gamma + (r_1 \cos\delta_2 - x'_1 \cos\beta) \omega^2 \sin\beta + 2v_r \omega (\cos\rho \sin\gamma - \sin\rho) \cos\beta] \end{cases} \quad (9)$$

式中 ρ ——土壤相对速度和 x_1 轴的夹角, ($^\circ$)

f ——土壤颗粒与抛土片表面间摩擦因数

此外根据几何关系, 相对速度 v_r 方向满足

$$\tan\rho = \frac{G_x + F_{Lx} + F_{gx} + F_{fx}}{G_y + F_{Ly} + F_{gy} + F_{fy}} = \frac{\sin\gamma}{\cos\gamma} \quad (10)$$

土壤从抛土刀侧切面、正切面滑动到抛土片 y_1 轴时, 相对速度 v_r 方向与 x_1 轴重合, 故角 ρ 为 0° , 且此时土壤只受重力和离心力作用, 此时式(10)可推导为

$$\frac{G_y + F_{Ly}}{G_x + F_{Lx}} = \frac{g \cos\gamma + \omega^2 \cos\beta \sin\gamma (r_1 \cos\delta_2 - x'_1 \cos\beta)}{g \sin\beta \sin\gamma + \omega^2 \cos\beta \sin\gamma (r_1 \cos\delta_2 - x'_1 \cos\beta)} = 0 \quad (11)$$

因抛土刀正切面端面高度为 60 mm, 正切刃和侧切刃曲线不变, 那么点 o_1 位置即可确定, 此时点 o_1 回转半径 r_1 为 205 mm、点 o_1 的回转半径包角 δ_2 为 60° ; 抛土片材质为锰钢, 且茶园土壤多为砂质壤土, 其与土壤间摩擦因数 f 为 0.65^[22]; 因抛土片与正切部同样沿弯折线倾斜, 且倾斜角度与正切部保持一致, 因此角 β 和抛土刀弯折角一致, 为 60° ^[23-25]; 茶园行距较窄, 常有坡度, 影响机器前进速度, 因此机具前进速度取茶园开沟常用速度 0.3 m/s; 刀轴转速取开沟刀常用转速 350 r/min, 则 ω 为 36.65 rad/s; 根据茶园开沟施肥抛土至沟边 20 cm 幅宽的农艺要

求,抛土幅宽 S 取值为 20 cm,将以上参数代入方程(5)、(10)、(11)求解未知数 γ 、 b 、 v_r ,利用消元法消去 v_r ,最终得出 $\gamma = 30^\circ$ 、 $x'_1 = 8$ cm,此时的横向抛土距离为 20 cm,则抛土片宽度 b 设计与 x'_1 相等,即 8 cm,可保证横向抛土幅宽为 20 cm。

3 田间试验

3.1 试验条件

2020 年 9 月 25 日在安徽省合肥市安徽农业大学农萃园茶园试验地对设计的切抛组合式开沟刀进行田间试验。试验地土壤为砂质壤土,含有部分砂砾,整个试验田土质均匀,可保证每次试验土壤条件一致。采用五点测试法测得 1~20 cm 深度的土壤坚实度平均值为 208.4 N/m²,1~25 cm 深度的土壤含水率平均值为 20.7%,1~25 cm 深度的土壤容重平均值为 1.51 g/cm³,其中土壤坚实度测试仪器为 TYD-2 型数显土壤硬度计(精度 $\pm 1\%$),土壤含水率测试仪器为 GHHB-009-485-1 型土壤湿度测量仪(湿度精度 $\pm 0.3\%$),土壤容重采用环刀进行取样测试。

3.2 试验平台

田间试验以开沟刀具田间原位试验台为平台,试验台结构如图 7 所示。田间试验平台主要由机架、切抛组合式开沟刀、48 V 电源、前进驱动电机、汽油机、变速箱、刀具链传动系统、刀具安装轴、扭矩传感器、上位机、开沟深度调节装置、行走轮、限深轮、点式传感器固定架、动静态电阻应变仪、计算机组成。田间试验时,电源给驱动电机供电,由驱动电机驱动行走轮前进,电机速度控制器可控制试验台前进速度,汽油机的作业动力通过变速箱与链传动系统传递给刀具安装轴,变速箱可输出 4 个挡位转速,开沟刀安装在刀具安装轴上,在刀具安装轴的驱动下高速旋转,进行开沟作业,扭矩传感器安装在汽

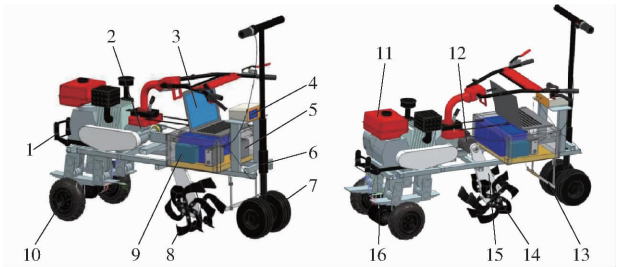


图 7 试验台结构示意图

Fig.7 Diagram of experiment table

1. 机架 2. 变速箱 3. 计算机 4. 上位机 5. 动静态电阻应变仪 6. 开沟深度调节装置 7. 限深轮 8. 切抛组合式开沟刀 9. 48V 电源 10. 行走轮 11. 汽油机 12. 扭矩传感器 13. 点式传感器固定架 14. 刀具安装轴 15. 刀具链传动系统 16. 前进驱动电机

油机与刀具安装轴之间,可实时测定刀具转速、作业功耗(扭矩与功率),扭矩与功率采集频率为 1 Hz。测定数据通过无线发射器传递给上位机,显示在上位机(数显仪或 Pad)的显示屏上,上位机数据采集软件由 LabVIEW 编写,除可按照频次采集瞬时扭矩与功率外,可自行控制采集一段时间内的总功率。点式传感器固定架上可安装点式土壤传感器,传感器采集的数据通过 DMYB1808 数据采集卡传输到计算机上。刀具的入土深度通过开沟深度调节装置调整机架与限深轮之间距离进行调节。

3.3 性能试验

为检验设计的切抛组合式开沟刀作业性能,对其进行性能试验,试验设置对照组,对照组为由切土刀组成的单一切土开沟刀(单一切土刀),试验刀具如图 8 所示。试验时,分别将切抛组合式开沟刀与单一切土刀安装于自制的开沟刀具田间原位试验台上,试验台以 0.3 m/s 速度前进,30 m 为一个行程,刀具安装轴转速为 350 r/min,开沟深度为 20 cm,开沟刀作业时将土壤抛出沟外。试验后,考察单侧开沟深度稳定性系数、沟底浮土厚度、单侧抛土幅宽、覆土厚度、抛土均匀性系数、开沟功耗,试验方法参照 NY/T 740—2003《田间开沟机械作业质量》。



图 8 试验刀具结构对比图

Fig.8 Structure comparison diagrams of experiment blade

3.3.1 开沟深度稳定性系数

测量两个作业行程,沿行程方向等间距测量 5 处,两行程共测 10 处。测量前先清除沟底及抛落在沟旁的土块。在原地表与两沟壑交线之间放一直尺,测量沟底中心点到直尺的距离作为测量点开沟深度。计算开沟深度平均值,得到开沟深度稳定性系数。

3.3.2 沟底浮土厚度

在与 3.3.1 节相同测点位置上选定对应沟底中心为测量点,测量不同测量点的浮土厚度,计算平均浮土厚度。

3.3.3 单侧抛土幅宽

沿行程方向每 3 m 取一点,共取 5 点,沿垂直沟壁方向,测量开沟抛土区域外沿至沟边距离,共测 3 个行程。

3.3.4 覆土厚度

在 3.3.3 节测试方法对应的各测量点处,沿垂直于沟壁方向,由内向外依次分别收集测定 20 cm × 20 cm 区域内所抛土堡体积、质量,并依据体积计算各区域覆土厚度。

3.3.5 抛土均匀性系数

依据 3.3.4 节所收集称量的各区域内土堡质量,计算抛土质量标准差 Q 及抛土均匀性系数 a 。

3.3.6 开沟功耗

开沟功耗由田间试验平台的扭矩传感器测得,功耗具体采集方法:试验进行中,扭矩传感器每隔 1 s 实时采集一次瞬时扭矩,可同时计算得到瞬时功率。试验完成后,上位机可读出整个行程(5 m 长度)的平均功率。同一深度功耗试验共进行 5 次,

试验结果取平均值。

3.3.7 试验结果

切抛组合式开沟刀及对照刀具性能试验结果如表 1 所示,开沟效果与功耗数据采集如图 9 所示。由表 1 可知,切抛组合式开沟刀相比于单一切土刀抛土距离更加合理,抛土均匀性更好。切抛组合式开沟刀开沟深度稳定性系数、沟底浮土厚度优于单一切土刀,说明切抛组合式开沟刀能够将土壤抛出沟外,而单一切土刀更易将土壤抛于沟内。切抛组合式开沟刀开沟功耗为 0.127 kW,单一切土刀开沟功耗为 0.123 kW,切抛组合式开沟刀相比于单一开沟刀,在增加抛土性能的情况下,仅增加 3.1% 的功耗,说明设计的切抛组合式开沟刀在提高开沟抛土质量的同时,并未明显增加开沟功耗。

表 1 切抛组合式开沟刀性能试验结果
Tab.1 Performance test results of cutting and throwing combined ditching blade

刀型	开沟深度稳定性系数/%	沟底浮土厚度/cm	单侧抛土幅宽/cm	抛土均匀性系数/%	覆土厚度/cm	开沟功耗/kW
切抛组合式开沟刀	87.8	1.2	22.7	90.3	2.1	0.127
单一切土刀	82.3	2.5	13.4	84.3	2.4	0.123



图 9 试验效果与数据采集结果

Fig.9 Experimental results and data acquisition

3.4 开沟抛土功耗分析试验

由性能试验可知,切抛组合式开沟刀设计增加了抛土片,提高了开沟抛土质量,但并未明显增加开沟功耗。为研究这一现象的原理,在性能试验基础上,进一步进行基于切抛组合式开沟刀抛土规律的功耗分析试验,对切抛组合式开沟刀抛土冲击力分布规律进行分析。

3.4.1 试验方法

因切抛组合式开沟刀开沟抛土过程中,土壤以无序群态进行移动,若在土壤移动过程中设置一个截面,则土壤抛撒时均会通过此截面,若以此截面为基础,设置力学传感器,则可以采集土壤抛撒通过此截面时的冲击力,根据功耗计算公式可知,开沟抛土功耗为土壤受力与土壤移动速度乘积,土壤从开沟刀处飞出到达测试截面时速度变化不大,则截面处采集到的冲击力可以客观反映开沟功耗规律。试验采用以点代面的方法采集通过截面的土壤冲击力,使用点式传感器代替截面内的一定区域,多个点式

传感器在截面内规律排布,则可以点代面完成对通过截面土壤冲击力的采集。

点式传感器排布如图 10 所示,测试截面内等距排布 7 行 × 7 列共 49 个传感器,第 1 行离地高度为 6 cm,其它行与行之间间距均为 6 cm,第 4 列传感器与刀具入土点对齐,以第 4 列为基准,其它列与列之间间隔 5 cm。为防止所有传感器一起布置过于密集造成堵土,试验采用单排多次测量方式进行,在试验平台设计可上下移动的传感器固定架,固定架安装在开沟刀后侧,其幅宽可覆盖整个开沟抛土宽度,在固定架上按照指定列间距安装点式传感器,每次

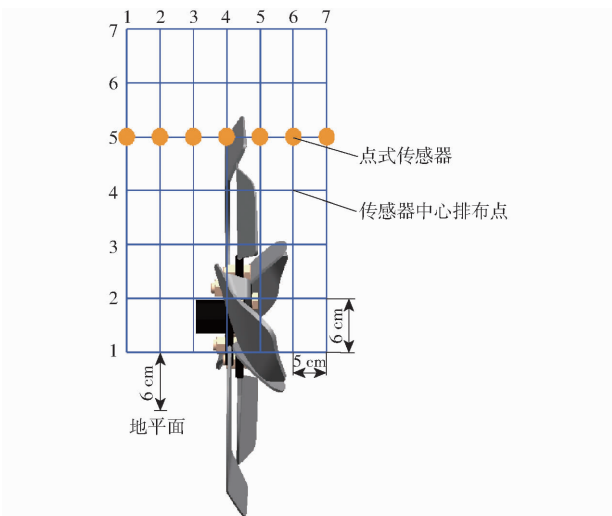


图 10 传感器排布示意图

Fig.10 Schematic of sensor arrangement

试验测量一行,每一行测量 3 次,结果取平均值,一行测量完成后,按照指定行间距移动固定架,再测量一行,共调节 6 次完成整个测试截面的数据采集。传感器安装完成后如图 11a 所示。



图 11 传感器安装示意图
Fig. 11 Diagram of sensor installation

本试验传感器采用圆柱型点式微型土压力传感器(南京丹陌电子科技有限公司,DMTY 型)。如图 11b 所示,传感器光洁面为受力面,另一面为支撑面,压力传感器直径为 16 mm、厚度为 4.8 mm、量程为 0.05 ~ 10 MPa。传感器均接入 DMYB 型动静态电阻应变仪,应变仪通过 USB 接口与计算机连接,传感器采集到的微应变(微伏级别的电压)通过应变仪处理后输入计算机,试验前用静力载荷对传感器进行标定校零,传感器采集到的电信号转换为压强,转换式为

$$p_i = K(F_i - F_0)$$
 (12)

式中 p_i ——传感器受到的实时压强,kPa
 F_i ——对应于 p_i 的输出电信号应变, μV
 F_0 ——传感器零点输出的电信号应变, μV
 K ——传感器标定系数,为 0.152 kPa/ μV
实时压强转换为压力,公式为

$$F = p_i \pi r^2$$
 (13)

式中 F ——传感器采集到的侧应力,N
 r ——传感器半径,8 mm

试验时以 30 m 为一个行程,测定行程中段 10 m 稳定作业长度内的各传感器采集到的总冲击力。以相同的方法设置一组单一切土刀作为对照组。试验现场如图 12 所示。



图 12 试验现场
Fig. 12 Experiment site

3.4.2 试验结果

茶园切抛组合式开沟刀与单一切土刀对照组试验结果如图 13 所示,由图 13 可知,茶园切抛组合式开沟刀与对照组最大抛土冲击力均出现在第 4 列,说明正对刀具的后方更易受到更大抛土冲击力,抛切组合式开沟刀最大值在第 3 行第 4 列,最大值为 74.5 N,对照组最大值在第 4 行第 4 列,最大值为 83.6 N。切抛组合式开沟刀从第 4 行开始,各采集点冲击力均不超过 20 N,对照组仅第 7 行各采集点冲击力均不超过 20 N,说明切抛组合式开沟刀相比于对照组,靠近土壤的下方更容易受到较大土壤冲击力;切抛组合式开沟刀第 1、7 列各采集点冲击力均不超过 20 N,对照组则第 1、2、6、7 列各采集点冲击力均不超过 20 N,说明切抛组合式开沟刀相比于对照组,抛撒土壤较大冲击力的范围更宽。

为了进一步对比分析茶园切抛组合式开沟刀与对照组各区域所受冲击力的情况,将各行、各列所受冲击力总和计算,结果如图 14 所示。由图 14a 可知,切抛组合式开沟刀在距离地面更近的 3 行所受冲击力大于对照组,对照组在另外 4 行大于切抛组合式开沟刀,切抛组合式开沟刀在第 3 行抛土冲击力最大,为 189.1 N,对照组在第 4 行抛土冲击力最大,为 143.6 N。

由图 14b 可知,切抛组合式开沟刀在第 1、2、3、6、7 列所受冲击力大于对照组,在 4、5 列冲击力小

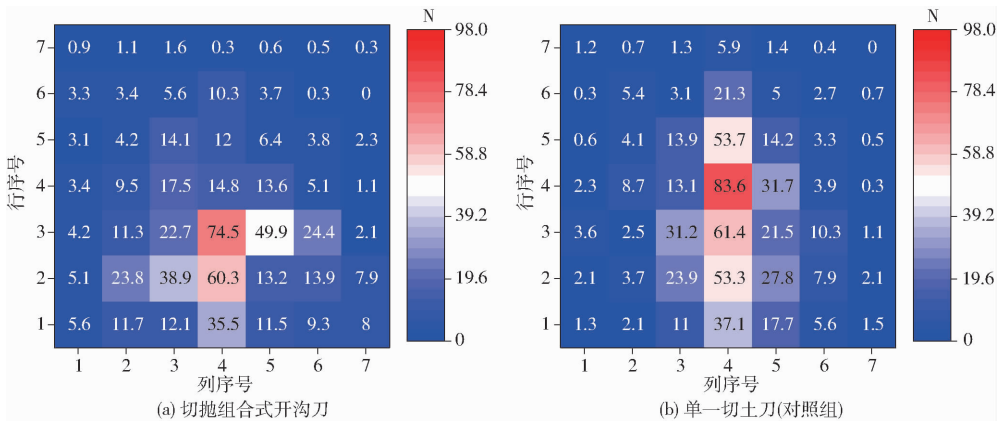


图 13 茶园切抛组合式开沟刀与对照组测试截面受力分布

Fig. 13 Test section stress between cutting and throwing combined ditching blade of tea garden and control group

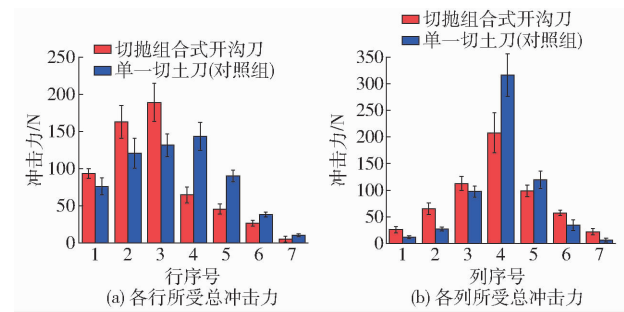


图 14 茶园切抛组合式开沟刀与对照组各行、各列所受总冲击力

Fig. 14 Total impact force on each row and column of cutting and throwing combined ditching blade of tea garden and control group

于对照组,切抛组合式开沟刀与对照组均在第 4 列抛土冲击力最大,分别为 207.7、316.3 N,其它各列以第 4 列为中心,冲击力依次减小。

此外,切抛组合式开沟刀所有行、列所受总冲击力为 588.7 N,对照组为 612.0 N,说明切抛组合式开沟刀所受总冲击力小于单一切土刀。

由试验结果可知,切抛组合式开沟刀相比于单一切土刀,抛土的冲击力更集中在靠近土壤下侧区域,且在此区域冲击力大于单一切土刀,而在上方区域抛土冲击力小于单一切土刀。切抛组合式开沟刀在刀具正后方区域冲击力小于单一切土刀,而在刀具后方两侧区域冲击力大于单一切土刀,从侧面反映出切抛组合式开沟刀向两侧抛土范围更广。

以上试验分析反映出切抛组合式开沟刀相比于

单一切土刀,其抛土的正后侧区域冲击力减小,抛土的上方区域冲击力减小,从而导致其抛土总冲击力减小,因此在提高开沟抛土质量的同时,并未明显增加开沟功耗。

4 结论

(1)根据能将沟内土壤均匀抛撒至沟边、不落于沟内以便于施肥后回填,且开沟能耗不能过高的茶园机械化开沟要求,设计了适用于茶园开沟的切抛组合式开沟刀,对抛土刀抛土片的抛土过程进行动力学分析,确定其关键参数抛土片宽度为 8 cm、倾斜角为 30°时,可保证抛土刀横向抛土幅宽满足农艺要求。

(2)田间性能试验表明,切抛组合式开沟刀单侧抛土幅宽为 22.7 cm、抛土均匀性系数为 90.3%、覆土厚度为 2.1 cm、开沟深度稳定性系数为 87.8%、沟底浮土厚度为 1.2 cm,对照组单一开沟刀的各参数分别为 13.4 cm、84.3%、2.4 cm、82.3%、2.5 cm,说明切抛组合式开沟刀比单一开沟刀的抛土距离更符合茶园开沟实际,抛土均匀性与开沟稳定性更好,所抛土壤不易落入沟内,且未明显增加开沟功耗。

(3)进行了基于抛土规律的功耗分析试验,结果表明,与单一切土刀相比,切抛组合式开沟刀抛土的正后侧区域冲击力减小,抛土的上方区域冲击力减小,从而导致其抛土总冲击力减小,因此,在提高开沟抛土质量的同时,并未明显增大开沟功耗。

参 考 文 献

- [1] 代红朝. 茶田翻耕机主要部件设计与试验研究[D]. 北京:中国农业科学院,2017.
DAI Hongchao. Design and experiment on the main parts of tea field tillage machine [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2017. (in Chinese)
- [2] LI S T, CHEN X B, CHEN W, et al. Soil-cutting simulation and parameter optimization of handheld tiller's rotary blade by smoothed particle hydrodynamics modelling and Taguchi method[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 179(8): 55–62.
- [3] UCGUL M, SAUNDERS C, LI P L, et al. Analyzing the mixing performance of a rotary spader using digital image processing and discrete element modelling (DEM)[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 151(8): 1–10.
- [4] LUIS A P B. Modelling the aggregate structure of a bulk soil to quantify fragmentation properties and energy demand of soil tillage tools in the formation of seedbeds[J]. Biosystems Engineering, 2020, 197(1): 203–215.
- [5] 叶强, 谢方平, 孙松林, 等. 葡萄园反转双旋耕轮开沟机的研制[J]. 农业工程学报, 2013, 29(3): 9–15.
YE Qiang, XIE Fangping, SUN Songlin, et al. Development of vineyard ditcher with reversal twin rotary tillage wheels[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(3): 9–15. (in Chinese)
- [6] 田阳, 林静, 李宝筏, 等. 气力式 1JH-2 型秸秆深埋还田机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(14): 10–18.
TIAN Yang, LIN Jing, LI Baofa, et al. Design and test of pneumatic 1JH-2 style straw deep burying and returning machine[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(14): 10–18. (in Chinese)
- [7] 康建明, 李树君, 杨学军, 等. 基于多体动力学的圆盘式开沟机虚拟仿真及功耗测试[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(1): 57–63.
KANG Jianming, LI Shujun, YANG Xuejun, et al. Virtual simulation and power test of disc type ditcher based on multi-body dynamics[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(1): 57–63. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170108&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.01.008. (in Chinese)
- [8] 康建明, 李树君, 杨学军, 等. 圆盘式开沟机作业功耗仿真分析及试验验证[J]. 农业工程学报, 2016, 32(13): 8–15.
KANG Jianming, LI Shujun, YANG Xuejun, et al. Experimental verification and simulation analysis on power consumption of disc type ditcher[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(13): 8–15. (in Chinese)
- [9] 康建明, 李树君, 杨学军, 等. 密植果园开沟施肥机开沟刀片设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(2): 68–74.

- KANG Jianming, LI Shujun, YANG Xuejun, et al. Design and experiment of ditching blade installed in close planting orchard ditching machinery[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 68–74. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170209&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.009. (in Chinese)
- [10] 林静, 张桐嘉, 田阳, 等. 秸秆深埋还田仿生开沟装置优化与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 50–59, 67. LIN Jing, ZHANG Tongjia, TIAN Yang, et al. Optimization and experiment on bionic deep-buried device for returning straw in field[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 50–59, 67. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2018s008&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.008. (in Chinese)
- [11] AHMADI I. A torque calculator for rotary tiller using the laws of classical mechanics[J]. Soil and Tillage Research, 2017, 165(1): 137–143.
- [12] 刘双喜, 徐春保, 张宏建, 等. 果园基肥施肥装备研究现状与发展分析[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊2): 99–108. LIU Shuangxi, XU Chunbao, ZHANG Hongjian, et al. Research status and development analysis of base-fertilizer application equipment of orchard[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2): 99–108. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2020s212&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S2.012. (in Chinese)
- [13] 刘双喜, 徐春保, 张宏建, 等. 果园开沟施肥机架架优化设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊1): 113–122. LIU Shuangxi, XU Chunbao, ZHANG Hongjian, et al. Optimization design and experiment for rack of orchard ditching-fertilizer machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 1): 113–122. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2020s113&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S1.013. (in Chinese)
- [14] 张宏建, 徐春保, 刘双喜, 等. 自动调节深度式果园双行开沟施肥机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2021, 52(1): 62–72. ZHANG Hongjian, XU Chunbao, LIU Shuangxi, et al. Design and experiment of orchard double row ditching-fertilizer machine with automatic depth adjustment[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(1): 62–72. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20210107&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2021.01.007. (in Chinese)
- [15] 方会敏, 姬长英, FARMAN Ali Chandio, 等. 基于离散元法的旋耕过程土壤运动行为分析[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 22–28. FANG Huimin, JI Changying, FARMAN Ali Chandio, et al. Analysis of soil dynamic behavior during rotary tillage based on distinct element method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 22–28. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160304&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.004. (in Chinese)
- [16] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 上册. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007: 237–243.
- [17] 贾洪雷, 汲文峰, 韩伟峰, 等. 旋耕-碎茬通用刀片结构参数优化试验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(7): 45–50. JIA Honglei, JI Wenfeng, HAN Weifeng, et al. Optimization experiment of structure parameters of rototilling and stubble breaking universal blade[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(7): 45–50. (in Chinese)
- [18] 黄东风, 李卫华, 范平, 等. 低碳经济与中国茶业可持续发展对策研究[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(5): 1110–1115. HUANG Dongfeng, LI Weihua, FAN Ping, et al. Countermeasures of low-carbon economy for sustainable development of China's tea industry[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(5): 1110–1115. (in Chinese)
- [19] 刘明勇, 刘亚东, 库浩锋, 等. 基于离散元法的筑埂机旋耕切削性能研究[J]. 农机化研究, 2019, 41(10): 129–134, 140. LIU Mingyong, LIU Yadong, KU Haofeng, et al. Research on the cutting performance of ridger based on discrete element method[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(10): 129–134, 140. (in Chinese)
- [20] 华玉方, 张同孝. 盘圆窄幅开沟机直刀片横向抛土距离的计算[J]. 粮油加工与食品机械, 1984(3): 6–13.
- [21] 罗海峰, 官春云, 汤楚宙, 等. 稻茬田油菜免耕播种机开沟部件的研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(11): 153–157. LUO Haifeng, GU Chunyun, TANG Chuzhou, et al. Ditching parts of no-tillage sower in paddy stubble field[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(11): 153–157. (in Chinese)
- [22] 梅占舰, 李骅, 齐新丹, 等. 砂壤土力学特性的测试与分析[J]. 沈阳农业大学学报, 2018, 49(5): 605–612. MEI Zhanjian, LI Hua, QI Xindan, et al. Analysis of mechanical properties of sandy soil[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2018, 49(5): 605–612. (in Chinese)
- [23] 罗伟文, 顾峰玮, 吴峰, 等. 全秸硬茬地碎秸行间集覆小麦播种机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(12): 42–52. LUO Weiwen, GU Fengwei, WU Feng, et al. Design and experiment of wheat planter with straw crushing and inter-furrow collecting-mulching under full amount of straw and root stubble cropland[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(12): 42–52. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20191205&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.12.005. (in Chinese)
- [24] 祝英豪, 张居敏, 曾荣, 等. 人字型水旱两用旋埋刀辊设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(4): 49–57, 273. ZHU Yinghao, ZHANG Jumin, ZENG Rong, et al. Design and experiment of herringbone type rotary blade roller for burying stubble in paddy field and dry land[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 49–57, 273. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190406&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.006. (in Chinese)
- [25] 赵宏波, 何进, 郑智旗, 等. 少免耕播种机条带型行间侧抛清秸防堵装置研究[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(12): 24–34. ZHAO Hongbo, HE Jin, ZHENG Zhiqi, et al. Strip tillage inter-row residue side-throwing device of no/minimum-till seeder for anti-blocking and seedbed-cleaning[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 24–34. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20201203&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.12.003. (in Chinese)