

玉米肥间回土分层施肥装置设计与试验

赵宏波^{1,2} 李相辉^{1,2} 张义哲^{1,2} 党丽花^{1,2} 黄玉祥^{1,2} 闫小丽^{1,2}

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100;

2. 农业农村部保护性耕作(黄河流域)机械化科研基地, 陕西杨凌 712100)

摘要: 针对现有玉米分层施肥装置肥层深度不稳定, 分层效果不明显问题, 设计了一种肥间回土分层施肥装置。通过理论分析确定了分层施肥装置的基本结构参数, 明确影响回土效果的主要因素为回土板安装角、倾斜角以及板面宽度。通过离散元法对工作过程进行仿真分析, 选取浅层肥料平均深度与回土板阻力为试验指标, 进行二次正交旋转组合仿真试验, 建立回归模型得到最优参数组合为: 回土板倾斜角 29.93°、安装角 11.40°、回土板宽度 31.40 mm。分别开展不同行进速度和施肥量下单因素土槽试验, 所设计分层施肥装置施肥深度及变异系数在不同工况下均满足作业要求, 且与市售分层施肥装置相比, 浅层肥料深度变异系数和深层肥料深度变异系数分别降低了 2.64、5.98 个百分点, 分层效果更明显。田间试验结果表明, 浅层及深层肥料深度变异系数均小于 10%, 满足行业标准要求。

关键词: 玉米; 分层施肥; 肥间回土; 回土板; 离散元法

中图分类号: S224.21

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2026)11-0186-11

OSID:



Design and Experiment of Layered Fertilization Device with Inter-fertilizer Soil-covering

ZHAO Hongbo^{1,2} LI Xianghui^{1,2} ZHANG Yizhe^{1,2} DANG Lihua^{1,2} HUANG Yuxiang^{1,2} YAN Xiaoli^{1,2}

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Scientific Research Base for Conservation Tillage Mechanization (Yellow River Basin),
Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Aiming to address the issues of unstable fertilization depth and indistinct stratification effects in existing maize layered fertilization systems, an inter-fertilizer soil-covering layered fertilization device was developed. Based on theoretical analysis, the fundamental structural parameters of the device were determined, and the primary factors affecting the soil-covering performance were identified as the installation angle, inclination angle, and width of the soil-covering plate. The working process of the device was analyzed by using the discrete element method (DEM). Taking the average depth of shallow-layer fertilizer and the resistance of the soil-covering plate as evaluation indices, a quadratic orthogonal rotational combination simulation experiment was conducted. A regression model was established to optimize the structural parameters. The optimal parameter combination was obtained as follows: inclination angle of the soil-covering plate was 29.93°, installation angle was 11.40°, and plate width was 31.40 mm. Soil bin experiments were further carried out at different forward speeds and fertilizer application rates to evaluate the performance of the proposed device. The results showed that the fertilization depth and its coefficient of variation under various operating conditions satisfied agronomic requirements. Compared with a conventional layered fertilization device, the coefficients of variation of shallow-layer and deep-layer fertilization depths were reduced by 2.64 and 5.98 percentage points, respectively, indicating an improved stratification effect. Field experiments were conducted to further validate the practical performance of the device. The results demonstrated that the coefficients of variation of both shallow-layer and deep-layer fertilization depths were less than 10%, meeting the requirements of

收稿日期: 2026-03-23 修回日期: 2026-03-25

基金项目: 陕西省重点研发计划一般项目(2023-YBNY-226)和陕西省重点研发计划重点项目(2024PT-ZCK-52)

作者简介: 赵宏波(1990—),男,副教授,博士,主要从事旱作农业技术与智能装备研究,E-mail: zhaohb@nwfufu.edu.cn

通信作者: 闫小丽(1969—),女,副教授,主要从事现代农业技术与装备研究,E-mail: yxl9212@nwsuaf.edu.cn

relevant industry standards. In summary, the proposed inter-fertilizer soil-covering layered fertilization device effectively enhanced the stability of fertilization depth and improved the layered fertilization performance, providing a reliable technical approach for precision fertilization in maize production.

Key words: maize; layered fertilization; inter-fertilizer soil-covering; soil-covering plate; discrete element method

0 引言

施肥是玉米机械化生产中不可或缺的步骤,对提升玉米产量保障粮食安全至关重要^[1-2]。传统施肥每季一次,在提升玉米产量^[3-4]的同时,存在施用过量、肥料利用率低等问题^[5],严重影响农业可持续性发展,提高施肥的准确性和利用率是解决此问题的关键^[6]。

研究表明,玉米产量受施肥深度影响^[7],分层施肥根据养分需求将肥料施在不同土壤深度,更加匹配生长时期需求,可提高产量及肥料利用效率,并增强根系活力与吸收^[8-10]。例如,文献[9]通过试验发现 1:2:1 分层施用磷显著增产冬小麦;文献[10]研究表明分层施肥提升了磷可用性;文献[11]研究表明花生双层施肥较传统提高了荚果产量 8.4%~17.3%、氮利用率 2.6%~18.0%。玉米属于深根作物,分层施肥可优化根系构型以实现增产增效。

为实现分层施肥作业目标,国内外学者围绕施肥装置关键部件优化开展了大量研究,主要涉及排肥输送系统优化和开沟覆土结构改进两个方面。在排肥输送方面,通过优化螺旋输送机构^[12-13]、分肥箱、导肥槽^[14]、排肥器^[15]及散肥结构^[16]等关键部件参数,在一定程度上提高了施肥均匀性,减弱了排肥脉动并增强了各层肥量分配精度。在开沟覆土方面,通过优化开沟器结构、添加施肥调节片、加装覆土板^[17-18]及应用仿生装置^[19]等措施,优化了破土与土壤回流过程,从而提升了肥料分层布置和覆土效果,为分层施肥装备的结构优化提供了重要参考。然而,尽管研发了一系列装置用于分层施肥,现有分层施肥开沟器仍然存在施肥深度稳定性差的问题,浅层与深层肥料的施放深度无法准确达到预设位置,常导致浅层肥料渗入深层肥床,肥料层间混杂现象严重。其原因在于深层肥料排放后土壤回填不及时,浅层肥料落入深层肥床,最终削弱分层施肥效果。

针对上述问题,本文设计一种用于玉米机械化生产的肥间回土分层施肥装置。结合理论力学分析与离散元仿真(DEM)技术,对装置整体结构、回土板关键参数进行优化设计。在土槽中开展不同施肥

量和作业速度下的性能试验,与市售分层施肥装置进行对比并进行田间试验验证。

1 肥间回土分层施肥装置结构与工作原理

肥间回土分层施肥装置整体结构如图 1 所示,主要包括开沟器推土板、回土板、深层肥管、浅层肥管、浅层推土板、开沟器主体等。其中开沟器推土板包含铲柄、前刃以及铲尖部分。

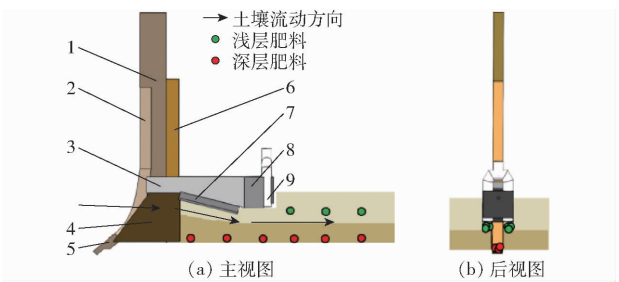


图 1 肥间回土分层施肥装置结构及原理图

Fig. 1 Structure and schematics of layered fertilization device for returning soil between fertilizers

1. 铲柄 2. 前刃 3. 开沟器主体 4. 侧板 5. 铲尖 6 深层肥管
7. 回土板 8. 浅层推土板 9. 浅层肥管

分层施肥装置核心作业过程包含以下 3 个连续且协同的阶段:①土壤切削与深层肥床构建。作业时,开沟器推土板首先切入土壤,将土体破开,前刃沿竖直方向对土壤进行剪切,初步形成肥沟。后续侧板利用侧向挤压力将切削后的土壤推向沟槽两侧,构建出结构稳定的深层施肥作业面(深度 200 mm),为深层肥料施放提供空间。②定向回土与空间分层。深层肥料经由深层肥管排放后,带有特定倾角的回土板开始介入作业。回土板利用装置前进产生的相对运动,引导侧方土壤产生向内、向下的流动,覆盖于深层肥料之上,形成厚度约为 100 mm 的物理隔离层,不仅有效防止了深层肥料挥发,更确立了深、浅两层肥料间的垂直空间分布,达到分层施肥目的。③浅层肥床成型与浅层肥料施放。在回土板完成初步覆土后,位于后侧的浅层推土板进一步平整土壤,形成深度符合要求的浅层肥床(深度 100 mm)。肥料流在浅层肥管导肥过程中分散到两侧浅层排肥管,从而在浅层肥床表面的两侧形成均匀分布的条带,减少了浅层肥料下陷,保证了分层效果。

2 肥间回土分层施肥装置设计

2.1 开沟器推土板刃线

在分层施肥作业过程中,装置结构和工作参数是影响作业性能的重要因素。研究发现,开沟器前刃曲线对开沟作业阻力会产生影响^[20]。常用于开沟器前刃的曲线有幂函数曲线、指数函数曲线和对数函数曲线^[21],根据分层施肥开沟器破土能力强、回土快的要求,本研究采用指数函数曲线作为开沟器前刃曲线。建立如图 2 所示的直角坐标系,设曲线起点 x_1 坐标为 (x_a, y_a) ,曲线终止点 x_2 坐标为 (x_b, y_b) , h 为 200 mm。开沟器前刃终止角越大,所受阻力越小^[22-23],且大于土壤摩擦角时可产生滑切效果。摩擦角最小为 10° ,本设计选择终止角 γ 为 80° ^[24-25]。考虑前刃起止角对阻力影响,参考文献^[26]选择起止角 θ 为 30° 。

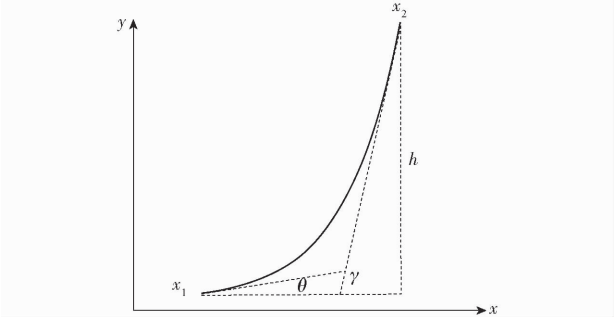


图 2 开沟器推土板刃线曲线图

Fig.2 Trencher bulldozer blade line curve diagram

设开沟器前刃曲线方程为

$$y = a^x - 1 \tag{1}$$

由文献^[16]可知

$$a = e^{\frac{\tan \gamma - \tan \theta}{h}} \tag{2}$$

将式(1)代入式(2), $\tan 30^\circ \approx 0.577$, $\tan 80^\circ \approx 5.671$,将角度数值代入,联立得

$$y = 1.290^x - 1 \tag{3}$$

2.2 开沟器回土板

开沟器开沟作业后,回土板对土壤的扰动效果直接影响浅层肥床的质量。为便于开展理论推导,本文忽略颗粒间内摩擦、粘附、团聚及含水率变化等复杂影响因素,将回土过程中的土壤介质简化为离散颗粒,并采用单颗粒刚体动力学模型分析其在回土板作用下的受力与运动规律。当开沟器入土,深层肥料排放后,土壤颗粒在两侧回土板引导下运动,覆盖在深层肥料上,其受力情况如图 3 所示,土壤颗粒受力包括:法向反力 N 、沿斜面的摩擦力 f 和自身重力 G 。以土壤运动方向为 x 轴,重力反方向为 y 轴,水平侧面垂直于 x 轴方向为 z 轴。对土壤颗粒进行运动学分析, α 为回土板安装角, β 为倾斜角。

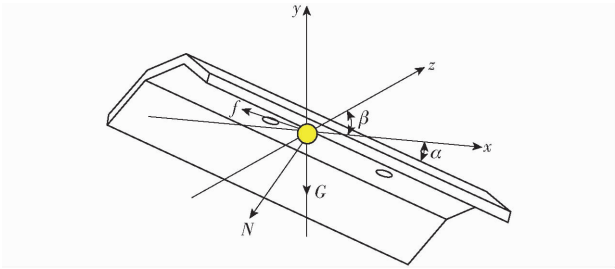


图 3 土壤颗粒与回土板受力示意图

Fig.3 Schematic of soil particles and soil-covering plate forces

每个方向受力情况如图 3 所示。

x 轴方向:部件向前推土,摩擦力阻碍土壤颗粒沿回土板滑动,与 x 轴投影通常同向。公式为

$$F_x = N \sin \alpha + \mu N \cos \alpha \cos \beta \tag{4}$$

式中 F_x ——土壤颗粒受金属板沿 x 轴方向分力
 μ ——颗粒与金属板的摩擦因数

y 轴方向:法向力分量:覆土板向下倾斜压土,故法向力垂直分量向下,即 $-N \cos \alpha \cos \beta$ 。摩擦力分量:土壤沿板面滑动,摩擦力通常有向上的分量,即 $\mu N \sin \alpha$ 。公式为

$$F_y = N(\mu \sin \alpha - \cos \alpha \cos \beta) - mg \tag{5}$$

式中 F_y ——土壤颗粒受金属板沿 y 轴方向分力
 m ——肥料颗粒质量, kg
 g ——重力加速度,取 9.8 m/s^2

z 轴方向:倾斜角决定,将土向内侧肥床推挤。公式为

$$F_z = N(\sin \beta \cos \alpha - \mu \sin \alpha) \tag{6}$$

式中 F_z ——土壤颗粒受金属板沿 z 轴方向分力

根据牛顿第二定律 $F = ma$,对 3 个方向分别求解加速度、速度(一次积分)和位移(两次积分)。

x 轴方向公式为

$$\begin{cases} a_x = F_x/m = N(\sin \alpha + \mu \cos \alpha \cos \beta)/m \\ v_x(t) = N(\sin \alpha + \mu \cos \alpha \cos \beta)t/m + C_1 \\ x(t) = N(\sin \alpha + \mu \cos \alpha \cos \beta)t^2/(2m) + C_1t + C_2 \end{cases} \tag{7}$$

式中 v_x ——土壤颗粒受力后沿 x 轴方向速度, m/s

C_1 、 C_2 ——积分常数

t ——作用时间, s

y 轴方向公式为

$$\begin{cases} a_y = F_y/m = N(\mu \sin \alpha - \cos \alpha \cos \beta)/m - g \\ v_y(t) = [N(\mu \sin \alpha - \cos \alpha \cos \beta)/m - g]t + C_3 \\ y(t) = [N(\mu \sin \alpha - \cos \alpha \cos \beta)/m - g]t^2/2 + C_3t + C_4 \end{cases} \tag{8}$$

式中 v_y ——土壤颗粒受力后沿 y 轴方向速度, m/s

C_3 、 C_4 ——积分常数

部件产生的垂直合力小于 mg ,则加速度为负,表示

肥料颗粒被加速压向沟底符合设计目的。

z 轴方向公式为

$$\begin{cases} a_z = F_z/m = (N\sin\beta\cos\alpha - \mu\sin\alpha)/m \\ v_z(t) = (N\sin\beta\cos\alpha - \mu\sin\alpha)t/m + C_5 \\ z(t) = (N\sin\beta\cos\alpha - \mu\sin\alpha)t^2/(2m) + C_5t + C_6 \end{cases} \quad (9)$$

式中 v_z ——土壤颗粒受力后沿 z 轴方向速度, m/s
 C_5 、 C_6 ——积分常数

根据式(7)~(9)可知,土壤运动受到回土板倾斜角和安装角影响,此外回土板宽度也是影响其回土效果的重要因素,随着宽度增加,更多土壤颗粒在回土板作用下回填到深层肥料上方,为浅层肥料深度稳定性的土层提供基础。但增加回土效果的同时,接触土壤过多将导致阻力增加,后续试验以浅层肥料深度与阻力为指标进行进一步分析。

3 肥间回土分层施肥装置仿真试验

通过三维建模设计软件 Solidworks 对分层施肥装置进行三维建模,然后将所构建的几何模型导入离散元仿真软件 EDEM。仿真时间步长设为 20%,在总时长 6 s 的仿真过程中,每 0.01 s 保存一次数据。为增强仿真真实性对肥料颗粒进行参数标定,包含等效粒径测定、压缩试验、休止角测量等。

3.1 离散元模型参数标定及设计

采用电子数显游标卡尺(精度为 0.01 mm)对两种颗粒肥料样本各随机抽取 300 粒测量三轴尺寸,取三轴尺寸的平均值计算其几何平均等效粒径,根据几何平均等效粒径计算出颗粒肥料的球形度。缓释复合肥的等效粒径与球形度分别为 3.72 mm 和 92.30%。氮钾复合肥的等效粒径与球形度分别为 4.88 mm 和 88.57%。

随机选取两种颗粒肥各 100 粒,用分度值为 0.1 g 的电子天平测得颗粒总质量,并计算出缓释复合肥、氮钾复合肥两种颗粒肥料的单颗粒平均质量分别为 0.031 g 和 0.037 g。计算其颗粒密度缓释复合肥为 1.44 g/cm^3 ,氮钾复合肥为 0.76 g/cm^3 。

休止角指散粒物料从一定高度自然连续地下落到平面上,所形成的圆锥体母线与底平面的夹角,反映了散粒物料的摩擦特性和散落性能^[27]。本文采用丹东 BT1001 型智能粉体特性检测仪测定休止角,首先通过上方进料口放入需要测定的肥料,下方安装孔径大于肥料颗粒的沙漏,使肥料聚集后从高处仅受重力影响抛撒到垂直距离 15 cm 处位于正下方半径 5 cm 的金属平台。使其不断落下堆积,直至形成的肥料堆角度不再变化。

试验测得休止角为 29° ,参考文献[27]即可获得肥料颗粒的静摩擦因数与滚动摩擦因数分别为 0.34、0.08。肥料其他重要离散元参数如泊松比、剪切模量等参考文献[28-29],将参考与测得的基本参数(表 1)代入 EDEM 软件中建立仿真模型。

表 1 离散元参数
Tab.1 Discrete element parameters

项目	参数	数值
肥料	泊松比	0.25
	剪切模量/Pa	6.12×10^5
	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 267
开沟器	泊松比	0.28
	剪切模量/Pa	8.2×10^{10}
	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7 890
肥料-肥料	恢复系数	0.55
	动摩擦因数	0.34
	滚动摩擦因数	0.08
肥料-壳体	恢复系数	0.52
	动摩擦因数	0.5
	滚动摩擦因数	0.1

3.2 分层施肥过程土壤流动机制分析

为了揭示分层施肥装置与土壤、肥料之间的相互作用机制,利用所构建“肥料-土壤”离散元模型对分层施肥装置作业过程开展了模拟仿真(图 4)。图中红色区域表示土壤颗粒具有较高的移动速度,可直观反映土壤扰动的剧烈程度。

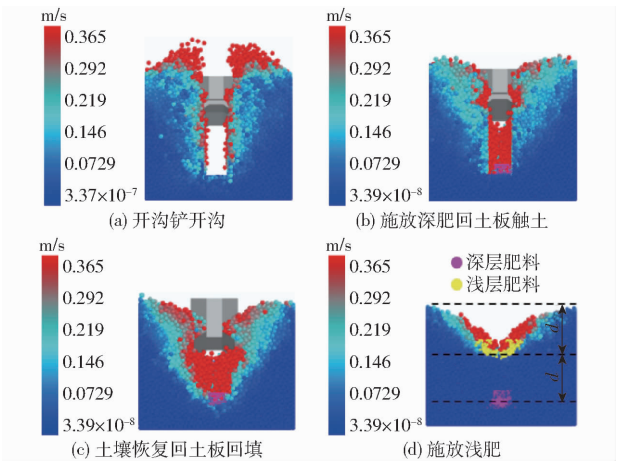


图 4 离散元作业土壤颗粒速度矢量场
Fig.4 Vector field of soil particle velocities in discrete element work

分层施肥的动态过程可分为以下 4 个关键阶段:

深沟形成和横向位移阶段:如图 4a 所示,前方开沟铲切开土壤,通过剪切及挤压作用破坏土层,并构建稳定的深层肥床。在此过程中,装置两侧的土壤被强力压缩,向地表两侧位移,表现为高速的横向流动,为后续回填提供土壤来源。

深层施肥排出与强制回填阶段:如图 4b 所示,当深层肥料被排放到沟底时,回土板会与两侧的土壤接触。回土板不仅依靠土壤自身的重力和倾斜角来触发回填,还会对两侧土壤施加作用力,使其指向肥床中心。回土板机械导引加速了土壤下沉和塌陷,迅速覆盖深层肥料,不仅有效防止深层肥料抬升,还为浅层肥料床的形成奠定基础。

浅层肥床平整阶段:如图 4c 所示,随着机具推进,土壤流动趋于稳定。一方面,回填土用于建造平坦的浅层肥料床;另一方面,通过浅层推土板结构宽度限制土壤回流,确保浅侧双行肥料出口有足够的水平空间,避免两种肥料混合。

浅层施肥阶段:如图 4d 所示,浅层肥料通过肥管排放到预定深度 d 为 100 mm 的浅层肥料床上。得益于前一步构建的空间排布更稳定的倒三角排肥口摆放,浅层施肥结构在浅层肥床目标深度的两侧施放浅层肥料,完成了深浅层肥料在各自深度的稳定以及浅层肥料两侧施放的三维施肥作业。

3.3 回土板倾斜角单因素试验

由前文理论分析可得,影响回土装置土壤颗粒运动的主要因素有倾斜角、安装角和回土板宽度。倾斜角对分层施肥效果可能产生较大影响,因此首先取安装角为 15° ,宽度为 30 mm,将倾斜角分别设置为 0° 、 10° 、 20° 、 30° 、 40° 、 50° 、 60° ,分别建模后开展单因素仿真试验。根据常规田间玉米播种施肥作业,玉米分层施肥装置行进速度设置为 6 km/h,施肥量为 600 kg/hm^2 ,上下层肥料比例为 $6:4^{[19]}$,生成时间 4 s,总仿真时间 6 s,仿真结束后利用后处理模块对肥料深度进行统计,并求平均值。

测试结果显示,深层肥料的平均深度受回土板倾角变化的影响较小,主要浅层肥料受回土速度影响较大。随着回土板倾斜角增加,回土板对土壤的引导能力发生变化,导致浅层施肥和深层施肥之间土壤层厚度呈现先增加后降低的趋势。当倾斜角度过小时(小于 20°),土壤回土板对土壤的横向推力不足,回填土量较少,导致浅层肥料床位置较低。当倾斜角过大时(大于 50°),过大的阻力会导致土壤回流受阻,进而影响浅层肥床的形成。如图 5 所示,当倾斜角在 $20^\circ \sim 40^\circ$ 浅层肥料的平均深度最接近设计目标,变异系数较低,表明当时土壤回填流场最为稳定,有利于均匀浅层肥料带的形成。

3.4 回土板各参数多因素正交试验

为进一步研究各因素对土壤颗粒回土效果的影响规律,并进行参数优化,以回土板倾斜角、安装角和宽度为试验因素,以浅层肥料平均深度与阻力为试验指标进行二次正交旋转组合仿真试验。试验因

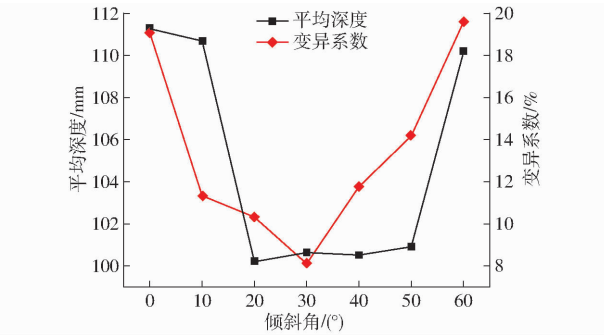


图 5 倾斜角对浅层肥料深度及变异系数影响
Fig.5 Effect of slope angle on shallow fertilizer depth and coefficient of variation

素编码如表 2 所示。

表 2 试验因素编码
Tab.2 Experimental factors and coding

编码	因素		
	倾斜角/(°)	安装角/(°)	宽度/mm
1. 682	40.00	25.00	40.00
1	35.95	20.95	35.95
0	30.00	15.00	30.00
-1	24.05	9.05	24.05
-1. 682	20.00	5.00	20.00

基于单变量检验结果,采用 Design-Expert 软件设计,以倾斜角、安装角以及回土板宽度为自变量,浅层肥料的平均深度 Y_1 以及回土板阻力 Y_2 为响应结果开展试验。表 3 中 A、B、C 分别为倾斜角、安装

表 3 试验方案与试验结果
Tab.3 Test plan and test results

试验序号	A	B	C	Y_1 /mm	Y_2 /N
1	-1	-1	1	98.92	168.34
2	-1	1	1	95.37	143.72
3	1	1	1	92.85	124.85
4	1.682	0	0	94.63	117.91
5	0	0	0	96.02	154.02
6	1	-1	1	97.28	138.67
7	0	0	0	99.98	156.98
8	-1	1	-1	102.34	175.63
9	0	0	0	102.07	153.82
10	0	0	1.682	96.45	141.25
11	-1	-1	-1	104.25	192.06
12	0	0	0	100.01	147.17
13	0	0	0	97.99	151.35
14	0	0	-1.682	103.70	166.84
15	0	0	0	103.03	154.09
16	0	-1.682	0	105.54	181.23
17	1	-1	-1	98.86	162.74
18	-1.682	0	0	102.45	169.58
19	1	1	-1	95.92	133.57
20	0	1.682	0	94.51	137.95

角和宽度的编码值,试验共进行 20 组,试验方案和结果如表 3 所示,浅层肥料平均深度范围为 92.85 ~ 105.54 mm,回土板阻力范围为 117.97 ~ 192.06 N。

(1)浅层肥料平均深度

浅层肥料深度的方差和显著性分析如表 4 所示,回归模型 Y_1 的拟合度为极显著 ($P < 0.01$)。主要效应分析:因素 A、B、C 的 P 值都小于 0.01,表明这 3 种结构参数对浅层肥料的深度都有显著影响。显著性顺序依次为:安装角、回土板宽度、倾斜角。这意味着回土板的宽度改变的触土面积和导向角度共同决定了土壤回填体积。获得浅层肥料深度回归方程

$$Y_1 = 99.88 - 2.13A - 2.29B - 2.13C - 0.2388AB + 0.9562AC - 0.3913BC + 0.7326A^2 - 0.2164B^2 - 0.1899C^2 \quad (10)$$

表 4 浅层肥料深度及回土板阻力方差分析
Tab.4 ANOVA of shallow fertilizer depth and variance of soil-covering plate resistance

项目	变异来源	平方和	自由度	均方	<i>F</i>	<i>P</i>
浅层肥料深度	模型	213.35	9	23.71	4.96	0.009 9 ***
	<i>A</i>	62.10	1	62.10	12.98	0.004 8 ***
	<i>B</i>	71.87	1	71.87	15.02	0.003 1 ***
	<i>C</i>	62.19	1	62.19	13.00	0.004 8 ***
	<i>AB</i>	0.46	1	0.46	0.10	0.763 9
	<i>AC</i>	7.32	1	7.32	1.53	0.244 5
	<i>BC</i>	1.22	1	1.22	0.26	0.623 9
	A^2	7.73	1	7.73	1.62	0.232 3
	B^2	0.68	1	0.68	0.14	0.715 1
	C^2	0.52	1	0.52	0.11	0.748 5
	残差	47.84	10	4.78		
	失拟项	14.94	5	2.99	0.45	0.796 8
	纯误差	32.91	5	6.58		
	总变异	261.19	19			
回土板阻力	模型	6 534.05	9	726.01	35.74	<0.000 1 ***
	<i>A</i>	3 132.04	1	3 132.04	154.19	<0.000 1 ***
	<i>B</i>	1 800.93	1	1 800.93	88.66	<0.000 1 ***
	<i>C</i>	1 265.37	1	1 265.37	62.30	<0.000 1 ***
	<i>AB</i>	0.470 5	1	0.470 5	0.02	0.882 1
	<i>AC</i>	65.21	1	65.21	3.21	0.103 4
	<i>BC</i>	6.41	1	6.41	0.32	0.586 7
	A^2	105.68	1	105.68	5.20	0.045 7 **
	B^2	120.71	1	120.71	5.94	0.035 0 **
	C^2	12.56	1	12.56	0.62	0.449 8
	残差	203.12	10	20.31		
	失拟项	147.72	5	29.54	2.67	0.152 8
	纯误差	55.40	5	11.08		
	总变异	6 737.17	19			

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

对得到的回归方程进行失拟性检验,如表 4 所示,失拟项 $P = 0.796 8$,不显著 ($P > 0.1$),试验指标与试验因素存在显著的二次关系,试验分析结果合理。

(2)回土板所受阻力

对试验结果进行分析拟合,可知阻力 Y_2 回归模型拟合度为极显著 ($P < 0.01$)。因素 A、B、C 都对阻力有非常显著的影响。影响顺序依次为:倾斜角、安装角、回土板宽度。安装角度直接决定了土壤部分的接触面积,因此对牵引阻力贡献最大。获得阻力回归方程

$$Y_2 = 152.85 - 15.14A - 11.48B - 9.63C - 0.2425AB + 2.85AC - 0.8950BC - 2.71A^2 + 2.89B^2 - 0.9337C^2 \quad (11)$$

对得到的回归方程进行失拟性检验,如表 4 所示,失拟项 $P = 0.152 8$,不显著 ($P > 0.1$),试验指标与试验因素存在显著的二次关系,试验分析结果合理。

(3)最优参数确定

表 4 数据分析可知,当安装角度固定且倾角增加时,浅层肥料深度呈现快速增加—增速放缓—稳定的趋势。当倾角保持恒定时,回土板宽度增加呈现作业阻力先减小再增大的趋势,最小阻力点位于宽度 25 ~ 30 mm 位置。其原因为回土板宽度过窄,导致土壤切割不良,而宽度过大则增加摩擦面积。随着倾斜角增加,整体阻力呈下降趋势,最小阻力区位于 $35^\circ \sim 40^\circ$ 。

为获得分层施肥装置较优结构参数组合,利用 Design-Expert 软件的优化模块,根据分层施肥装置的实际作业条件和工作要求,选择目标函数的约束条件,进行优化求解。目标函数及约束条件为

$$\begin{cases} Y_1(A,B,C) = 100 \text{ mm} (+ + + +) \\ Y_2(A,B,C) = \min (+) \\ \text{s. t. } \begin{cases} -1.682 \leq A \leq 1.682 \\ -1.682 \leq B \leq 1.682 \\ -1.682 \leq C \leq 1.682 \end{cases} \end{cases} \quad (12)$$

其中“+”数量表示权重。由于分层施肥分层效果是重要目的,因此设置权重更高,作业阻力权重相对较小。优化结果显示最优参数组合为起土角倾斜角 29.93° ,安装角 11.40° ,宽度 31.40 mm。使用最优参数组合进行 Solidworks 三维建模,利用 EDEM 开展离散元仿真试验。结果如图 6a 所示,可以直观发现浅层肥料与深层肥料明显分布在两个不同深度,其中浅层肥料全部分布在 100 mm 深度左右,深层肥料全部分布在 200 mm 左右。如图 6b 所示,浅层肥料总体呈现两侧肥料大多保留在设计深度,仍有

部分靠近中心肥料颗粒深度偏下,但由于回土板及时回填土壤支撑肥料,深度仍可保证在合格范围(90~110 mm)内,深层肥料的深度因由机械结构的加速土壤陷落,保证其快速回填到深层肥床位置,深度稳定性较好。表明所设计的肥间回土分层施肥装置满足设计要求,可实现较好的分层效果。

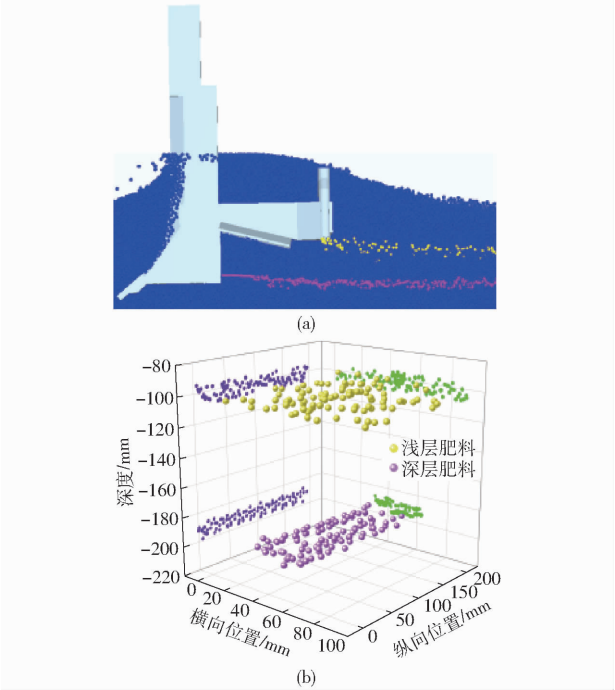


图6 最佳参数仿真验证
Fig.6 Best parameter simulation verification

4 土槽试验

4.1 试验条件及设备

为对研制的分层施肥装置作业性能进行测试,自制了分层施肥装置试验台,如图7a所示,试验台由分层施肥装置、电动排肥器、肥箱、机架以及地轮等组成,其中电动排肥器转速可调,可实现不同排肥量的调节。

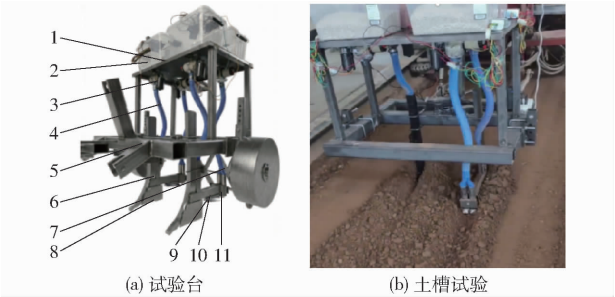


图7 土槽试验设备
Fig.7 Soil trough testing equipment

1. 肥箱架 2. 肥箱 3. 电动排肥器 4. 深层肥管 5. 机架 6. 开沟铲 7. 浅层肥管 8. 侧板 9. 回土板 10. 连接板 11. 浅层推土板

试验在西北农林科技大学机械与电子工程学院

室内数字化土槽中开展,该土槽长26 m、宽2.1 m、深0.7 m。土槽中土壤质地为壤土,属于黄土母质^[30]。土壤平均含水率为14.2%。土槽试验装置包含电力四轮土槽试验车、行进轨道与作业土槽。开展土槽试验前进行耕整地,测试前通过土槽试验车连接旋耕机进行两遍深度200 mm的旋耕后,挂接镇压装置进行镇压作业,使其达到一定紧实度。

土壤整备完毕后,将固定了自研分层施肥装置的试验台通过三点悬挂装置安装在土槽试验车上,由装置入土深度要求确定地轮位置,调节准确高度后通过电动排肥器调节不同施肥量在土槽中进行施肥试验。通过控制行进速度与肥量进行不同工况性能试验(如图7b)。性能试验完毕后,将两个自研的分层施肥装置之一替换为市售装置,开展对比试验。市售装置为西北地区常用的分层施肥装置,主要由开沟铲铲柄、侧边护土板以及挡肥片组成,肥料通过不同角度挡肥片碰撞后流入预设深度。

4.2 试验方法及指标

为了评估所涉及分层施肥装置在不同施肥量下和前进速度下的作业性能,分别开展单因素试验。施肥料单因素试验时,作业速度保持6 km/h,施肥量分别为500、600、700 kg/hm²。作业速度单因素试验时,施肥量保持600 kg/hm²,作业速度分别设置为5、6、7 km/h。与自研装置的对比试验在中间水平处理(行进速度6 km/h,排肥量600 kg/hm²)进行,每种处理方式在作业后的土槽内随机选择5个点位,保证点位尽可能包含土槽内前中后段的肥料分布。测量各层肥料深度,并计算肥料深度合格率及变异系数以及土壤平整度。

施肥深度的稳定性通过变异系数计算,而土壤平整度根据GB/T 5668—2008进行计算,沿垂直于机组前进方向,在地表最高点以上取一水平基准线,在其适当位置上取与装置耕宽相当,分成10等分,测定各等分点至地表的距离以及平均值,并计算标准差。以标准差的平均值表示其平整度。

4.3 试验结果与分析

4.3.1 肥间回土分层施肥装置施肥性能

(1) 施肥量对肥料深度的影响

施肥量单因素试验结果如图8所示,随着施肥量从500 kg/hm²增加到700 kg/hm²,浅层肥料的平均深度分别为102.88、103.35、104.55 mm,深层肥料深度的平均值为194.49、195.88、194.77 mm。浅层肥料深度的变异系数保持在6.07%~6.51%,深层肥料深度的变异系数保持在4.34%~4.41%。不同施肥量下浅层和深层施肥深度及稳定性受波动

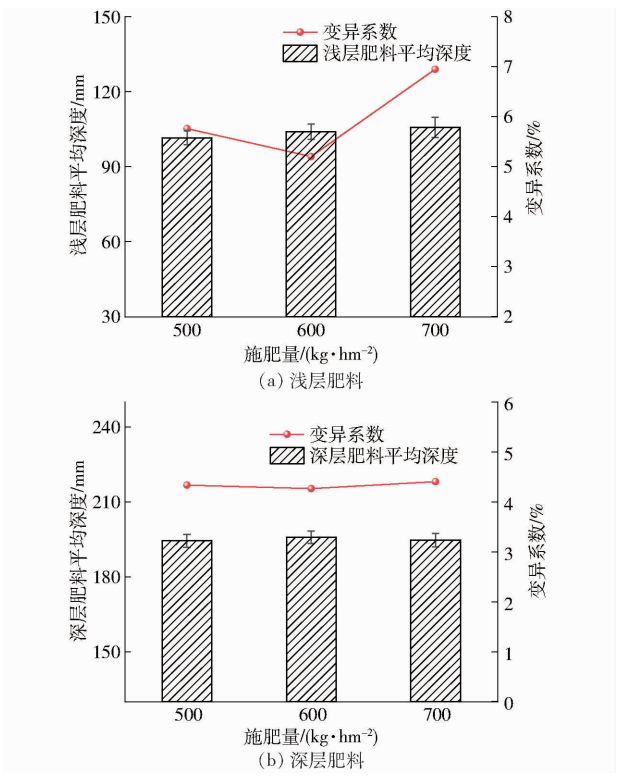


图 8 不同施肥量对肥料平均深度及变异系数影响
Fig. 8 Effect of different fertilization rates on average fertilizer depth and coefficient of variation

都很小,这表明肥料流量的变化不会显著改变肥床中肥料颗粒的空间排布,且在设计流量范围内的土壤回流效果可以解决此问题。装置在肥料排放流量大的情况下表现出较好的深度稳定性,施肥量对施肥深度影响较小。

(2) 作业速度对施肥深度的影响

作业速度单因素试验结果如图 9 所示,当速度从 5 km/h 提升为 7 km/h 时,浅层肥料深度从 101.76 mm 降低为 105.84 mm,深度肥料深度相反,从 199.81 mm 变为 192.62 mm。作业速度与施肥深度的变异系数呈正相关。当作业速度从 5 km/h 提升为 7 km/h,浅层施肥深度的变异系数从 5.77% 攀升至 6.96%,深层施肥深度的变异系数也从 4.19% 增长到了 4.53%。该数值仍处于较低水平,满足农业行业标准 NY/T 1003—2006《施肥机械质量要求评价技术规范》正位深施肥深度要求,既变异系数小于 10%^[31]。但速度变化引起的数据波动显著大于施肥速率变化引起的波动。分析变异系数波动的原因,一是土壤扰动增加,在高速运行下,装置对土壤的抛掷效应增强,导致土壤回流填充的不确定性增加,进而影响肥料覆盖深度的均匀性。二是机械振动的增加,更快的前进速度导致机具的高频振动增强,使肥料颗粒在落入沟底时不规则弹跳,从而增加了施肥深度的不可控性。

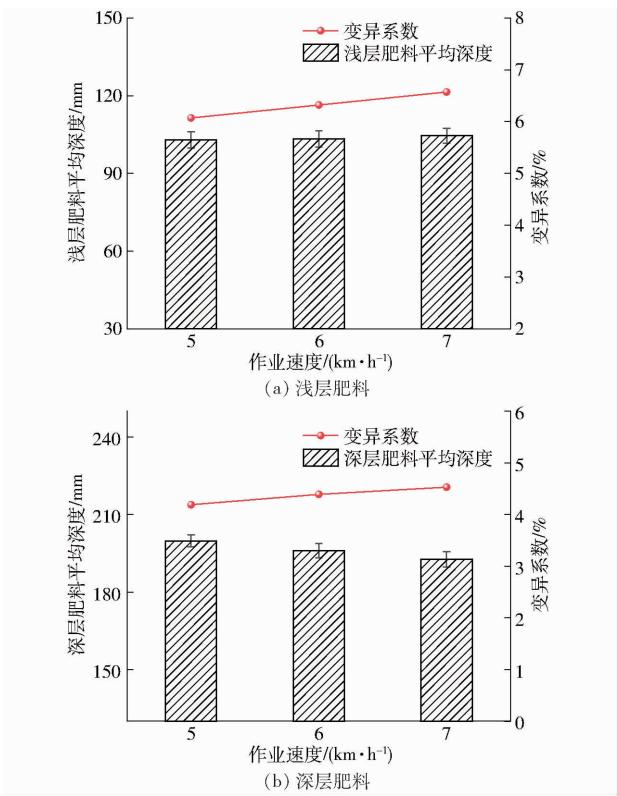


图 9 不同作业速度对肥料平均深度及变异系数影响
Fig. 9 Impact of different working speeds on average depth and coefficient of variation of fertilizer

4.3.2 自研分层施肥装置与市售装置作业性能对比
(1) 地表平整度与土壤扰动特性

两种装置作业后地表土壤沟形如图 10 所示。市售分层施肥装置试验后地表出现明显的凹陷,地表破坏程度大、平整度较差。这表明市售装置对土壤有强烈的抛土作用,仅分层开沟的装置无法有效平整回流土,导致作业后肥床缺土。这种不均匀的肥床可能导致后续播种深度不同,影响作物出苗的一致性。自研装置试验后虽然整体开沟宽度较大,但沟面陡峭程度偏低且地表平整度显著改善,沟槽上方的土壤层均匀,且无明显沟槽痕迹或隆起。这得益于自研装置对土壤回流结构的优化设计,快速有效地回填土壤使得表层土壤平整,同时确保回填量。根据平整度计算公式,可得市售分层施肥装置的平均地表平整度为 13.78 cm,大于自研分层施肥装置的 10.77 cm,证明自研分层施肥装置作业后回土性能更好,地表更平整。

(2) 施肥深度稳定性

自研与市售装置对于肥料排放的深度按照自身设计需求确定。通过对比其肥料深度变异系数来对比其施肥稳定性。在相同工作环境下,自研装置深层肥料深度变异系数为 4.33%,对比市售装置的 6.97% 降低了 2.64 个百分点,而浅层肥料变异系数为 5.86%,对比市售的 11.84% 显著降低了 5.98 个

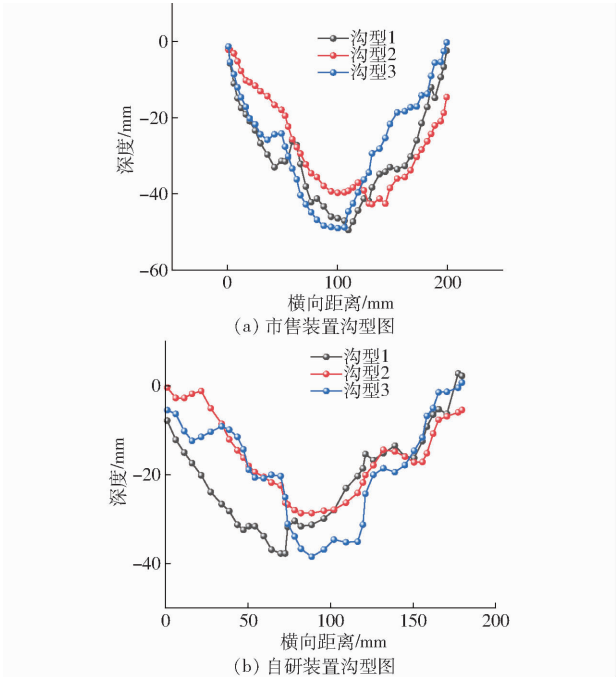
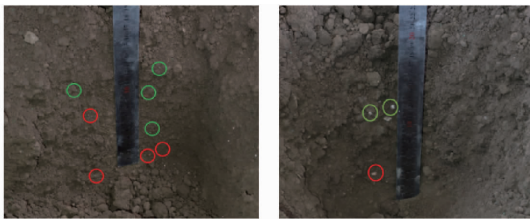


图 10 土壤沟型图

Fig. 10 Soil profile diagrams

百分点。表明自研装置能有效抵抗机器振动和土壤阻力变化等引起的深度波动,肥料深度更加稳定。肥料在土壤中的垂直分布精度直接决定了分层施肥的效果。如图 11 所示,通过剖面挖掘测量发现,自研分层施肥装置进行排肥作业后,深层肥料(红色圈)和浅层肥料(绿色圈)分层效果明显,垂直间距符合设计要求,且无明显混合层现象。相比之下,市售的装置肥料分布更为分散,且缺乏明确的层叠边界。



(a) 市售装置 (b) 自研装置

图 11 作业后土槽内施肥情况

Fig. 11 Fertilization situation in trench after work

5 田间试验

5.1 试验条件

为了验证肥间回土分层施肥装置在田间复杂实际工作条件下的可靠性,于 2025 年 12 月 10 日,在陕西省杨凌示范区西北农林科技大学机械与工程学院试验田开展分层施肥验证试验,试验地 360 m²,长 50 m、宽 7.2 m。试验前利用旋耕机整地作业,然后将分层施肥装置试验台通过三点悬挂挂接在拖拉机(型号:洛阳路通 54E)后方开展分层施

肥试验(图 12)。



图 12 田间试验

Fig. 12 Field experiment

5.2 试验方法

田间试验选择土槽试验中最具代表效果的参数,即:作业速度 5 km/h 和施肥量 500 kg/hm²。测试指标包括浅层、深层肥料的平均深度、变异系数及其横向分布距离。作业后,在田间随机选择 5 个点进行测试,主要测量肥料的纵向深度。浅层肥料采用双侧排肥方式,应测定两侧肥带的平均间距,深层肥料为单口排放,测量其扩散距离即可。

5.3 试验结果及分析

田间试验结果如表 5 所示。浅层肥料平均深度为 102.12 mm,深层肥料平均深度保持为 198.3 mm,浅层肥料和深层肥料深度变异系数分别为 8.08% 和 5.74%,对比土槽试验略有升高,但均小于 10% 仍满足要求,田间试验变异系数对比土槽试验普遍增高 2~3 个百分点,这是由于田间地表起伏不平,以及存在草根粘结土壤造成土块连带破坏肥床成型影响深度稳定性,但总体变异系数仍符合作业要求^[31],表明该装置能够克服由不平整田地表面和土壤阻力波动引起的干扰。

表 5 田间试验实际测量参数

Tab.5 Actual measured parameters of field experiments

测量指标	试验值/mm	变异系数/%
浅层肥料深度	102.12	8.08
深层肥料深度	198.3	5.74
浅层肥料横向距离	91.96	9.54
深层肥料横向距离	42.06	3.92

深层施肥的深度稳定性优于浅层肥料,这是因为深层肥料肥床建立的稳定性主要取决于装置主体的刚性,而浅层肥料床的高度则更受土壤回流的动态波动影响。

浅层肥料的平均侧向距离为 91.96 mm,满足设计要求(浅层肥料横向距离约 90 mm),深层肥料的横向距离约为 42.06 mm(深层肥料横向距离约 40 mm 且小于 60 mm)以保证双层肥料在空间上呈

现倒三角的分布。这证明了自研装置的空间分层结构设计合理,能够确保肥料颗粒在复杂的动态扩散过程中准确落入预设的侧向位置,有效实现了双层肥料的空间隔离,可保障后续肥料深度稳定性,并避免了高浓度肥料烧伤幼苗的风险。

6 结论

(1)设计了一种新型肥间回土分层施肥装置,设计了施肥装置与回土部件的结构,实现了肥料分层效果的提升。

(2)通过对分层施肥装置与土壤颗粒接触过程

开展动力学分析以及离散元仿真,明确了安装角、倾斜角和回土板宽度对回土性能、分层效果及作业阻力的影响特性。通过多因素仿真试验得出,当倾斜角为 29.93°、安装角为 11.40°、回土板宽度为 31.40 mm 时,装置分层施肥效果最优。

(3)在作业速度 5 ~ 7 km/h,施肥料 500 ~ 700 kg/hm²条件下开展单因素土槽试验,深层及浅层肥料深度变异系数均小于 10%,施肥深度稳定性和地表平整度优于市售产品。田间试验深浅层肥料深度变异系数均小于 10%,能够满足玉米精准分层施肥作业要求。

参 考 文 献

[1] BURKE W J, SNAPP S S, JAYNE T S. An in-depth examination of maize yield response to fertilizer in Central Malawi reveals low profits and too many weeds[J]. *Agr. Econ.* Blackwell, 2020,51(6):923–939.

[2] CHEN H, GAO L P, Li M C, et al. Fertilization depth effect on mechanized direct-seeded winter rapeseed yield and fertilizer use efficiency[J]. *Sci. Food Agric.*, 2023,103(5):2574–2584.

[3] WANG W, YUAN J S, GAO T, et al. Conservation tillage enhances crop productivity and decreases soil nitrogen losses in a rainfed agroecosystem of the Loess Plateau[J]. *China J. Clean. Prod.*, 2020,274(11):122854.

[4] CHEN G Z, CAI T, WANG J Y, et al. Suitable fertilizer application depth enhances the efficient utilization of key resources and improves crop productivity in rainfed farmland on the Loess Plateau China[J]. *Front. Plant Sci.*, 2022,13(6):900352.

[5] 杨丽,颜丙新,张东兴,等. 玉米精密种植技术研究进展[J]. *农业机械学报*, 2016,47(11):38–48.

YANG Li, YAN Bingxin, ZHANG Dongxing, et al. Research progress on precision planting technology of maize [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016,47(11):38–48. (in Chinese)

[6] ZHAO Z, LI Y, CHEN J, et al. Numerical analysis and laboratory testing of seed spacing uniformity performance for vacuum-cylinder precision seeder[J]. *Biosystems Engineering*, 2010,106(4):344–351.

[7] HOU P F, YUAN W S, LI G H, et al. Deep fertilization with controlled-release fertilizer for higher cereal yield and N utilization in paddies: the optimal fertilization depth[J]. *Agronomy Journal*, 2021,113(6):5027–5039.

[8] 高丽萍,陈慧,刘嘉诚,等. 油菜机械直播同步分层施肥对根系构型和抗倒伏能力影响[J]. *农业工程学报*, 2023,39(11):87–97.

GAO Liping, CHEN Hui, LIU Jiacheng, et al. Effects of synchronous layered fertilization with machinery on the root architecture and lodging resistance of rape[J]. *Transactions of the CSAE*, 2023,39(11):87–97. (in Chinese)

[9] LIU C H, YAN H H, WANG W Y, et al. Layered application of phosphate fertilizer increased winter wheat yield by promoting root proliferation and phosphorus accumulation[J]. *Soil Till. Res.*, 2023,225:105546.

[10] HE Z, DANG X W, LIN X Y, et al. Combining base to topdressing ratio and layered application of phosphorus fertilizer enhanced cotton yield by regulating root distribution and activity[J]. *Soil Till. Res.*, 2024,241(9):106111.

[11] CAO Y D, CHI H R, HAN Y L, et al. Layered and reduced fertilization enhances high-quality, high-yield, and efficient peanut production[J]. *Journal of Agriculture and Food Research*, 2026, 25:102576.

[12] ZHANG Y B, LI T X, ZHANG D, et al. Research on layered fertilization method of fertilizer applicator and optimization of key parameters[J]. *Agriculture*, 2025,15(17):1876.

[13] ZHANG C, XIE C, MA C, et al. Design and simulation analysis of furrowing and fertilization equipment based on segmented screw mechanism[J]. *Cogent Food & Agriculture*, 2023,9(2):2267244.

[14] 刘进宝,赵岩,郑炫,等. 2FQ-5 多层施肥机的设计与试验[J]. *甘肃农业大学学报*, 2017,52(3):140–147.

LIU Jinbao, ZHAO Yan, ZHENG Xuan, et al. Design and experiment of 2FQ-5 multilayer fertilizer machine[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2017,52(3):140–147. (in Chinese)

[15] 于春玲. 基于离散元的齿轮式防堵分层施肥装置设计与试验研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2021.

YU Chunling. Design and test study of gear type anti-blocking separated layer fertilization device based on discrete element method[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2021. (in Chinese)

[16] 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 test of a corn layered fertilization device based on discrete element fertilizer flow reconstruction[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2024,55(9):138–150,184. (in Chinese)

[17] 杨庆璐, 黄幸媛, 王庆杰, 等. 玉米空间分层施肥装置结构优化与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊1): 175 – 185.
YANG Qinglu, HUANG Qingyuan, WANG Qingjie, et al. Corn spatial layered fertilization device structure optimization and experiment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 1): 175 – 185. (in Chinese)

[18] 宋少龙. 精准对行分层施肥机分层施肥装置的优化设计与试验研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2022.
SONG Shaolong. Optimal design and experimental research on the layered fertilizer apparatus of the specific row-following layered fertilizer[D]. Shihezi: Shihezi University, 2022. (in Chinese)

[19] 刘晓东, 王绪平, 陈礼源, 等. 油菜直播机分层定量施肥装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(5): 1 – 10.
LIU Xiaodong, WANG Xuping, CHNE Liyuan, et al. Design and experiment of layered and quantitative fertilization device for rapeseed seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(5): 1 – 10. (in Chinese)

[20] 刘瑞, 李衍军, 刘春晓, 等. 铲式宽苗带燕麦播种开沟器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(9): 89 – 96.
LIU Rui, LI Yanjun, LIU Chunxiao, et al. Design and test of shovel-type wide seedling band oat seeding ditch opener[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 89 – 96. (in Chinese)

[21] 马超. 东北玉米区深施肥带状耕作装置设计与试验[D]. 北京: 中国农业机械化科学研究院, 2022.
MA Chao. Design and experimental room of deep fertilization and strip cultivation device in the northeast corn area[D]. Beijing: China Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2022. (in Chinese)

[22] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.

[23] 庞声海. 关于滑切理论与滑切角的选用[J]. 华中农学院学报, 1982, 6(2): 64 – 69.
PANG Haisheng. On the selection of slip cutting theory and slip cutting angle[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 1982, 6(2): 64 – 69. (in Chinese)

[24] 李尚平, 潘家枫, 钟家勤, 等. 基于有效落种空间的甘蔗横向种植机开沟器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2012, 53(7): 162 – 170.
LI Shangping, PAN Jiafeng, ZHONG Jiaqin, et al. Design and test of a sugarcane lateral planter furrow opener based on effective seeding space[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 53(7): 162 – 170. (in Chinese)

[25] 王军增, 孙伟, 王虎存, 等. 尖角长翼型开沟器的研究[J]. 农机化研究, 2021, 43(11): 64 – 70.
WANG Junzeng, SUN Wei, WANG Hucun, et al. Research on the pointed-angle long-wing furrow opener[J]. Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(11): 64 – 70. (in Chinese)

[26] 赵淑红, 刘宏俊, 谭贺文, 等. 仿旗鱼头部曲线型开沟器设计与性能试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(5): 32 – 39.
ZHAO Shuhong, LIU Hongjun, TAN Hewen, et al. Design and performance test of a marlin-head curved furrow opener[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(5): 32 – 39. (in Chinese)

[27] 田先明. 水稻破胸芽种的物料特性试验[J]. 湖南农机, 2008(5): 9 – 11.
TIAN Xianming. Experiment of the material-properties of rice-bud-seeds[J]. Hunan Agricultural Machinery, 2008(5): 9 – 11. (in Chinese)

[28] 杨雄, 王立华, 蒋维, 等. 烟梗离散元模型接触参数标定与试验[J]. 中国农机化学报, 2026, 47(1): 318 – 324.
YANG Xiong, WANG Lihua, JIANG Wei, et al. Calibration and testing of contact parameters for cigarette butt discrete element model[J]. Chinese Journal of Agricultural Mechanization, 2026, 47(1): 318 – 324. (in Chinese)

[29] 刘正道, 王庆杰, 刘春鸽, 等. 腔盘式精量穴施肥装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(10): 137 – 144, 355.
LIU Zhengdao, WANG Qingjie, LIU Chungge, et al. Design and experiment of precision hole-fertilizing apparatus with notched plate[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 137 – 144, 355. (in Chinese)

[30] 王学振. 土壤-带翼深松铲互作关系及其效应研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
WANG Xuezheng. Study on the interaction relationship and its effects between soil and winged deep-loosening shovel[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2021. (in Chinese)

[31] 肖文立, 肖文芳, 廖宜涛, 等. 油菜直播机犁式正位深施肥装置设计与性能试验[J]. 华中农业大学学报, 2018, 37(4): 131 – 137.
XIAO Wenli, XIAO Wenfang, LIAO Yitao, et al. Design and performance test of rapeseed transplanter plow-type vertical deep fertilization device[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2018, 37(4): 131 – 137. (in Chinese)