doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.S2.005

基于仿生学的分层深松分类施肥机设计与试验

朱惠斌　刘　祺　白丽珍　郭冠余　王明鹏　李镕东　雷丰朗
（昆明理工大学现代农业工程学院，昆明 650500）

摘要：西南地区长期的传统耕作方式使犁底层上移，且土壤贫瘠等现象日益严重，传统的深松和施肥装置作业效率较差。本文结合仿生学原理设计了一种分层深松分类施肥装置，基于EDEM软件建立土壤和肥料离散元模型，并进行仿真试验。仿真试验结果表明，深松装置最优参数组合为深松作业速度1.54 km/h、前后铲水平间距500 mm、前后铲竖直间距300 mm；排肥器装置最优参数组合为槽轮半径30 mm、弧心距离28.5 mm、螺旋升角81°。基于仿真结果进行田间试验，结果表明分层深松分类施肥机对土壤扰动率为52.4%，土壤膨松度19.7%，碎土率78%，均达到深松机设计要求，且优于单铲深松作业；排肥性能试验结果表明，有机肥排肥量分别为120.8、182.8 g，无机肥排肥量分别为620.3、916.9 g；有机肥排肥稳定变异系数为2.38%、4.93%，无机肥排肥稳定变异系数为2.04%、3.01%，达到排肥要求，实现有机肥和无机肥分层施用。本文设计的分层深松与分类施肥一体化装置，提升了犁底层土壤破碎效果与施肥效率，为保护性耕作机械结构优化提供参考。

关键词：分类施肥机；仿生学；分层深松
中图分类号：S222.29　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1000-1298(2024)S2-0041-12

Design and Testing of Bionic-based Layered Subsoiling and Classified Fertilization Machine

ZHU Huibin　LIU Qi　BAI Lizhen　GUO Guanyu　WANG Mingpeng　LI Rongdong　LEI Fenglang
(*Faculty of Modern Agricultural Engineering*, *Kunming University of Science and Technology*, *Kunming* 650500, *China*)

Abstract: The long-term traditional farming methods in the southwest region have caused the plough bottom to move up and the soil to become increasingly barren. The traditional subsoiling and fertilization devices have poor operating efficiency. Combined the principles of bionics, a layered subsoiling and classified fertilization device was designed, a discrete element model of soil and fertilizer was established based on EDEM software, and simulation experiments were conducted. The simulation results showed that the optimal parameter combination for the subsoiling device was a subsoiling speed of 1.54 km/h, a horizontal spacing of 500 mm between the front and rear shovels, and a vertical spacing of 300 mm between the front and rear shovels; The optimal parameter combination for the fertilizer feeder device is a radius of 30 mm for the sheave, a distance of 28.5 mm from the arc center, and a helix angle of 81°. Based on the simulation results, field experiments were conducted, and the results showed that the disturbance rate of the layered subsoiling and classified fertilization machine on the soil was 52.4%, the soil looseness was 19.7%, and the soil crushing rate was 78%, all meeting the design requirements of the subsoiler and surpassing the single-shovel subsoiling operation. The results of the fertilizer performance test showed that the organic fertilizer application rates were 120.8 and 182.8 g, respectively, while the inorganic fertilizer application rates were 620.3 and 916.9 g, respectively. The stable variation coefficients of organic fertilizer and inorganic fertilizer were 2.38% and 4.93%, respectively, meeting the requirements for fertilizer application and achieving the stratified application of organic and inorganic fertilizers. The integrated device for layered subsoiling and classified fertilization designed improved the soil crushing effect and fertilization efficiency of the plough bottom layer, providing a reference for optimizing the structure of conservation tillage machinery.

Key words: layered subsoiling; bionics; classified fertilization

收稿日期：2024－07－18　修回日期：2024－09－18
基金项目：国家自然科学基金项目(52265033、51865022)和云南省自然科学基金项目(202401AS070115)
作者简介：朱惠斌(1974—)，男，教授，博士，主要从事山丘区保护性耕作技术与装备研究，E-mail: hbzhu113@163.com
通信作者：白丽珍(1975—)，女，高级实验师，主要从事智慧农业生产技术与装备研究，E-mail: lzhbai@163.com

0 引言

西南地区传统农业机械连续作业造成土壤压实严重，导致犁底层上升，而该区域土壤自然恢复过程缓慢[1-2]。这种耕作模式加剧了西南地区耕地退化和水土流失，严重威胁了当地粮食生产安全[3-4]。深松技术作为保护性耕作的重要措施，能够有效疏松压实土壤、破碎犁底层，增加土壤孔隙率和渗透率[5-6]。同时，科学施肥策略直接关系到作物产量、养分吸收效率以及土壤肥力改善。

仿生学在农业工程中广泛应用，通过模仿生物特性可以减少机械磨损、耕作阻力和土壤粘附，提升工作效率与作物产量[7-10]。KARMAKAR等[11]对耕作工具与土壤相互作用机制进行了评估，对仿生结构设计提出了合理方法。仿生深松机通过模拟自然机制，利用土壤抗拉强度较小的特性，以张力为主导破坏土壤结构，从而在作业过程中大幅降低能耗[12-14]。TONG等[15-16]基于蜣螂角质层表面的几何结构设计了一种齿式开沟器表面，验证了其仿生结构能有效降低土壤作业时等效压力、阻力和功率需求；SUN等[17]引入鲨鱼皮盾状鳞肋结构于深松机，显著降低了机具功耗；LI等[18]基于熊爪结构设计的深松装置具有较好作业效果；YANG等[19]将鼹鼠爪部应用于仿生结构设计，显著提升了机具工作效率。分层深松也是提高深松作业效率的方式之一，其不仅能够降低作业能耗、减少土壤紧实度，还显著提高碎土率[20]。赵淑红等[21]通过土壤颗粒运动拟合曲线，设计了一种拟合曲线深松铲，验证了分层深松的合理性。此外，深松分层施肥能有效引导作物根系深层扎根，缓解养分和水分空间错位问题，从而增强作物对深层土壤资源的汲取效率[22]。并且，分层施肥策略还显著减轻了烧种、烧苗及作物后期倒伏等问题[23]。通过将分层深松与分类施肥作业策略相结合，可以优化水资源利用效率，实现了作物高产、水分和肥料生产效能提升[24]。

针对西南地区地块狭小及红黏土特殊的理化性质，且深松与施肥机具在作业中的协同效应不足，整体作业效率和资源利用率较低等问题，本文基于仿生学原理设计一种分层深松装置，并设计适用于有机肥和无机肥的分类施肥装置；基于离散元法建立土槽和肥料颗粒模型对作业过程进行数值模拟，进行二次回归正交旋转组合试验，确定深松施肥装置最优参数组合；完成样机设计并进行田间试验，以期推动西南地区保护性耕作技术推广和应用。

1 分层深松分类施肥机总体设计

1.1 整机结构

分层深松分类施肥机主要由排肥轴、正螺旋排肥器、反螺旋排肥器、排肥电机、深松前铲和深松后铲等组成（图1）。深松装置包括深松前后铲，分别通过深松铲夹固定在机架前后梁上，这种布置能够有效降低深松阻力，同时提升深松作业整体性能。施肥装置由肥箱、肥量调节器和排肥管构成，固定在机架上方。驱动装置则由排肥电机与传动链条链轮组成，分别固定在肥箱后侧和下侧。此外，限深轮安装在装置两侧，以确保深松深度一致性。

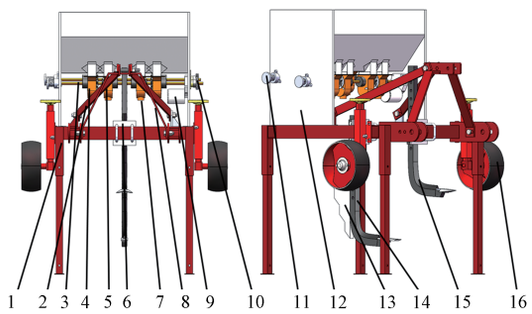


图1 整机结构示意图

Fig. 1 Diagram of whole machine structure

1. 机架 2. 三点悬挂装置 3. 排肥轴 4. 正螺旋排肥器 5. 反螺旋排肥器 6. 深松铲夹 7. 排肥管 8. Y形三通 9. 排肥电机 10. 传动链条链轮 11. 肥量调节器 12. 有机无机肥箱 13. 分层排肥管 14. 深松后铲 15. 深松前铲 16. 限深轮

通过悬挂装置将深松施肥机与驱动机械连接，并由驱动机械带动前行。肥料通过肥箱内正、反螺旋排肥器，在肥量调节器控制下，按比例定量排出，并通过排肥管进入深松铲柄上焊接的分层排肥管，实现肥料纵向分层施用。样机参数如表1所示。

表1 样机参数

Tab. 1 Prototype parameters

参数	数值
整机尺寸（长×宽×高）/（mm×mm×mm）	1 210×1 271×1 653
质量/kg	150
配套动力/kW	22.4~37.3
前后铲水平间距/mm	500
前后铲竖直间距/mm	300
无机肥施肥深度/mm	50/150
有机肥施肥深度/mm	250/350
深松深度/mm	≥400
有机肥施肥量/（kg·hm^{-2}）	≥200
无机肥施肥量/（kg·hm^{-2}）	≥40

1.2 深松装置设计

由于传统深松装置在作业过程中受到较大的阻力，基于乌干达花金龟的生物学特征，提出了一种仿生深松铲设计方案。

1.2.1 仿生对象及轮廓曲线的提取

乌干达花金龟（图2）属于鞘翅目金龟科，成虫体长可达100 mm，主要栖息于土壤中并以木屑为食。其强大的挖掘前足在土壤中挖掘形成隧道和空隙，疏松了土壤，减轻了压实问题，有助于维持和提升土壤肥力。因此其挖掘前足轮廓曲线可为深松铲设计提供依据，提升深松铲作业性能。



图2　乌干达花金龟

Fig. 2　Uganda flower scarab

以乌干达花金龟标本为研究对象，首先通过镊子分离乌干达花金龟挖掘前足，然后通过Matlab软件进行图像处理，提取轮廓曲线流程如图3所示。使用Origin软件对提取的轮廓数据进行曲线拟合，最终得到两种仿生深松铲铲柄设计曲线（图4）。

由图4得，到仿上足趾拟合曲线为

$$y=363.26x-0.767$$

仿中足趾拟合曲线为

$$y=-22.69\ln x+129.35$$

1.2.2　深松装置受力分析

深松铲作业过程中，铲尖部分作业过程可简化为一个斜面在土壤中水平方向的位移运动。铲尖上方土块所受力学状态如图5所示，其中土块主要承受重力及与铲尖接触面产生的摩擦力。假定作业环境为无石块等硬质杂物的纯净土壤条件，切削作用较小，因此在受力分析中切削阻力忽略不计[25]。

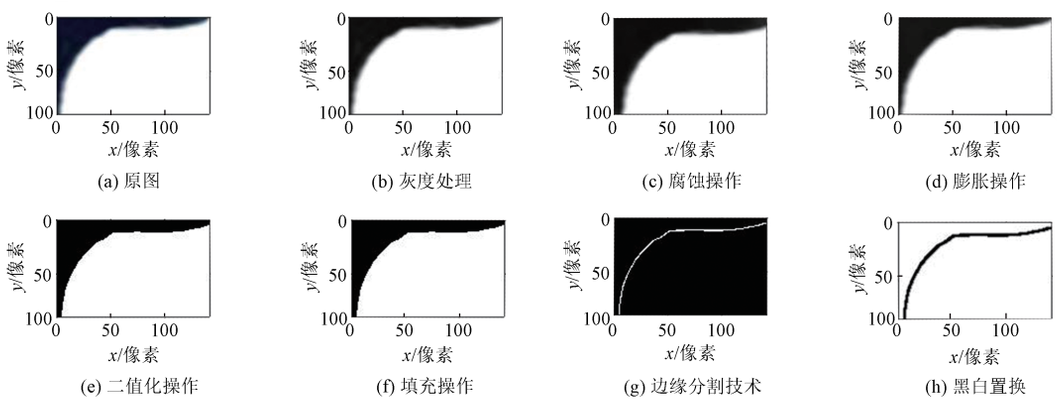


图3　图像处理过程

Fig. 3　Image processing roadmap

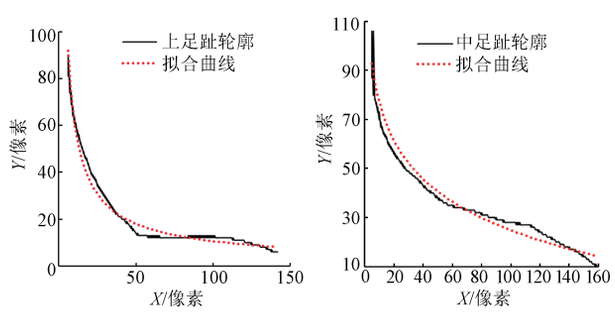


图4　轮廓曲线

Fig. 4　Contour curve diagrams

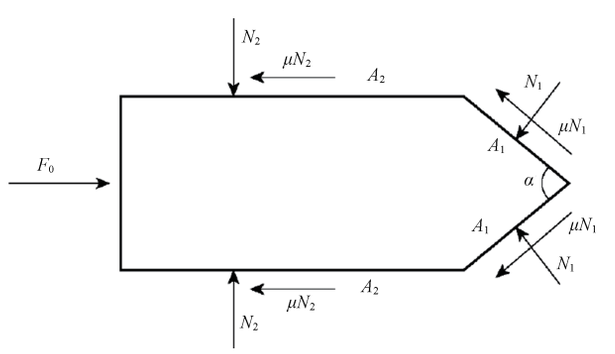


图5　深松铲铲柄受力分析

Fig. 5　Stress analysis of handle of a subsoiling shovel

对深松铲铲柄部分进行受力分析，通过构建简化的力学模型，设定深松铲铲柄所受合力为F_0，则合力可分解为作用于铲柄工作面上的若干个分力，受力如图5所示，分力和合力关系为

$$F_0 = 2(N_1\sin(\alpha/2) + N_1\mu\cos(\alpha/2) + N_2\mu) \quad (1)$$

其中

$$\begin{cases} N_1 = K_1A_1 \\ N_2 = K_2A_2 \end{cases} \quad (2)$$

式中　K_1——变形比阻，Pa

A_1——铲柄刃口面积，m^2

K_2——土壤比压，Pa

A_2——铲柄侧面面积，m^2

N_1——铲刃法向力，N

N_2——铲柄侧面法向力，N

μ——静摩擦因数

α——铲刃夹角，(°)

将式(2)代入式(1)中，得到前后方向总阻力F_0为

$$F_0 = 2K_1A_1(\sin(\alpha/2) + \mu\cos(\alpha/2)) + 2K_2A_2\mu \quad (3)$$

对深松铲铲尖部分受力分析，如图6所示，受力平衡关系为

$$F_1 = N_0\sin\delta + \mu N_0\cos\delta + kW \quad (4)$$

式中　F_1——铲尖所受水平牵引力，N

N_0——法向方向受到的正压力,N

k——单位宽度上土壤纯切削阻力,N/mm

W——铲刀面宽度,mm

δ——深松入土角,(°)

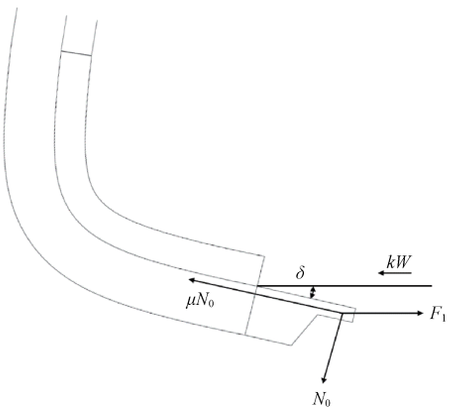


图6 深松铲铲尖受力分析

Fig. 6 Stress analysis of subsoiling shovel tip

由式(1)~(4)可得,深松铲所受阻力受入土角影响较显著,表现为深松效果随入土角增大而下降。参照文献[26],当入土角设定为15°时,土壤垄高与蓬松度达到最优;而入土角31°则确保深松深度最佳稳定性。因此,综合考虑,确定深松入土角15°~31°,以确保深松作业综合效益。

在单铲深松模式下,入土角对深松效果有显著影响。然而,在分层深松作业时,前铲对浅层土壤疏松作用会间接影响后铲在深松过程中受到的浅层土壤反作用力。此外,前后铲之间的水平间距与竖直间距也是调控分层深松作业牵引阻力的关键参数。故深松作业速度、前后铲水平间距以及竖直间距是影响分层深松过程中牵引阻力的主要因素。

1.3 排肥装置关键部件设计

1.3.1 外槽轮结构参数

凹槽轮作为外槽轮排肥器的核心,其结构参数、肥料特性及在槽内状态均显著影响排肥性能。外槽轮截面如图7所示,外槽轮结构参数计算式为[27]

$$\begin{cases}\omega = \dfrac{2\pi}{z}\\ \varphi_1 = \dfrac{\omega(z-1)}{z}\\ S = \dfrac{\omega}{360}\pi R^2 - \cot\left(\dfrac{\omega}{2}\right)r^2 + \left(\dfrac{1}{2} - \dfrac{\omega}{360}\right)\pi r^2\\ r_1 = \dfrac{r}{\sin\dfrac{\omega}{2}}\end{cases} \tag{5}$$

式中 ω——单个凹槽之间跨度,rad

z——凹槽轮数目

φ_1——相邻凹槽之间节距,rad

r——凹槽轮凹槽半径,mm

r_1——凹槽轮弧心距,mm

R——凹槽轮半径,mm

S——凹槽轮凹槽面积,mm^2

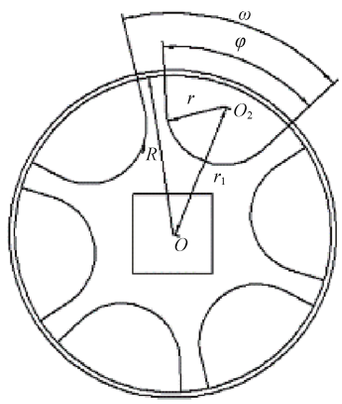


图7 外槽轮截面图

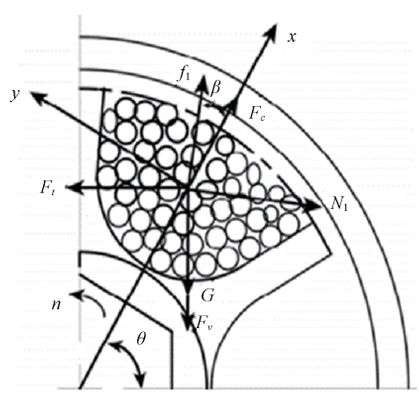
Fig. 7 Cross section of outer groove wheel

根据外槽轮排肥壳体的结构限制,取槽轮半径为25~35 mm,弧心距为22~30 mm,当凹槽轮螺旋升角过小时,排肥工作性能变差,不利于研究其变化对排肥工作性能的影响,因此确定为45°~90°。

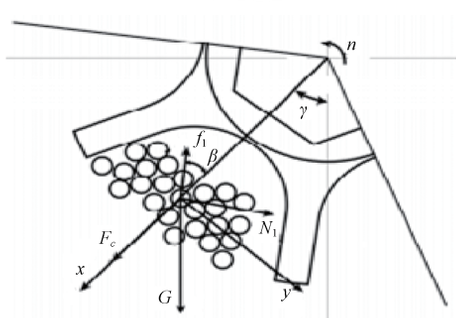
1.3.2 排肥过程力学分析

肥料排放过程中,受外槽轮摩擦力、重力、推力及离心力等作用,自凹槽排出进入排肥管,完成排肥过程。

外槽轮凹槽处充肥和排肥状态如图8所示,将单个凹槽轮内的所有肥料看作一个整体,对工作过程作力学分析,将肥料整体质心视作为原点,建立坐标系,分析肥料颗粒在凹槽内的受力情况。



(a) 充肥过程



(b) 排肥过程

图8 外槽轮工作过程受力分析

Fig. 8 Force analysis of working process of outer sheave

由图8a可得

$$\begin{cases} F_c + N_1\sin\beta + f_1\cos\beta - (G + F_v)\sin\theta - F_t\cos\theta = 0 \\ f_1\sin\beta - N_1\cos\beta - (G + F_v)\cos\theta - F_t\sin\theta = 0 \\ f_1 = \mu_1 N_1 \\ F_c = m\dfrac{\pi^2 n^2}{1800}d \end{cases} \tag{6}$$

式中　m——肥料颗粒质量，kg

β——凹槽轮凹槽倾角，(°)

θ——肥料充肥角，(°)

μ_1——肥料颗粒与凹槽轮之间静摩擦因数

n——水平压力和竖直压力比值，为压力比

F_c——肥料在圆周运动下离心力

F_t——排肥壳对肥料水平方向压力

F_v——排肥壳对肥料竖直方向压力

G——肥料颗粒重力

N_1——凹槽内壁对肥料颗粒支持力

由图8b可得

$$\begin{cases} F_c + G\cos\gamma - N_1\sin\beta - f_1\cos\beta = 0 \\ N_1\cos\beta + G\sin\gamma - f_1\cos\beta = 0 \\ F_c = m\dfrac{\pi^2 n^2}{1800}d \\ f_1 = \mu_1 N_1 \end{cases} \tag{7}$$

式中　γ——外槽轮排肥器排肥角，(°)

由式(6)、(7)可知，参照文献[28]，选择外槽轮转速为60 r/min，计算外槽轮充肥角为57°，排肥角为45°。综上所述，外槽轮排肥器槽轮转速、槽轮形状、槽轮弧心距离等会影响槽轮排肥过程中肥料颗粒的受力状况，进而影响槽轮排肥量。

2　离散元仿真试验

深松装置结构参数和工作参数(如深松作业速度、前后铲水平间距等)与排肥装置结构参数(如槽轮转速、槽轮形状等)对深松机作业效果至关重要，需通过试验确定最优参数组合。离散元数值模拟仿真试验法能极大缩短试验周期和成本，便于对“机器-土壤”之间的作用机理进行深入分析。因此，基于离散元法对分层深松分类施肥机进行仿真试验，确定其结构参数与运动参数。

2.1　土槽模型建立

离散元仿真试验土槽模型为2 000 mm×400 mm×600 mm，设置颗粒床尺寸为200 mm×200 mm×300 mm。在EDEM软件中设置土壤的本征参数为表2所示，Hertz-Mindlin with JKR模型为土壤接触模型，参照文献[29]，设置土壤模型表面能为12.73 J/m^2，土壤颗粒半径和接触半径分别为4 mm和4.5 mm。

表2　土壤颗粒的特征参数

Tab. 2　Characteristic parameters of soil particles

参数	数值	参数	数值
泊松比	0.38	粘接半径/mm	4.5
密度/(kg·m^{-3})	2 680	临界切向应力/Pa	1×10^8
剪切模量/Pa	1.2×10^6	临界法向应力/Pa	1×10^8
颗粒恢复系数	0.60	切向粘接刚度/(N·m^{-1})	9.845×10^7
颗粒静摩擦因数	0.57	法向粘接刚度/(N·m^{-1})	9.361×10^7
颗粒动摩擦因数	0.14		

2.2　有机肥肥料颗粒模型

肥料颗粒尺寸与形态显著影响其在外槽轮凹槽内流动与填充效率，进而影响排肥量。为精确模拟肥料在排肥装置中运动特性，以河北稼倍多有机肥有限公司的商用颗粒有机肥为样本，随机抽样100粒，测定其三轴尺寸、密度及等效直径(图9)。颗粒有机肥等效直径D和平均球形率φ计算式为

$$D = \sqrt[3]{LWT} \tag{8}$$

$$\varphi = \frac{D}{L}\times 100\% \tag{9}$$

式中　L——颗粒有机肥长度，mm

W——颗粒有机肥宽度，mm

T——颗粒有机肥厚度，mm

100颗颗粒有机肥测量结果如表3所示。

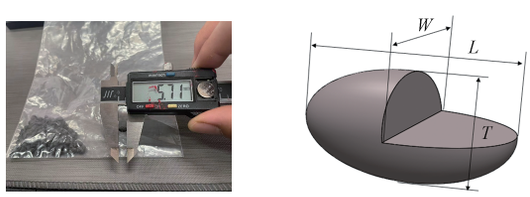


图9　有机肥肥料颗粒测量外形图

Fig. 9　Outline drawing of organic fertilizer particles measurement

表3　有机肥颗粒参数

Tab. 3　Organic fertilizer particle parameter

参数	平均长度$\overline{L}$/mm	平均宽度$\overline{W}$/mm	平均厚度$\overline{T}$/mm	等效直径D/mm	平均球形率$\overline{\varphi}$/%	颗粒密度/(kg·m^{-3})
数值	5.68	4.83	3.79	4.7	82.75	1 500

对于颗粒有机肥的建立选择Hertz-Mindlin(no-slip)接触模型(图10)，在EDEM预处理阶段，参照文献[30]多次预仿真标定试验，设置有机肥颗粒泊松比为0.25，剪切模量为1.2×10^6 Pa，实测密度为1 500 kg/m^3。表4为商业有机肥颗粒特征参数。

2.3　仿生深松铲仿真试验

在EDEM软件中，设置深松装置与土壤接触参数，参照文献[31]，设置65 Mn钢密度为7 865 kg/m^3，泊松比0.3，剪切模量为7.97×10^{11} Pa，接触参数如表5所示。

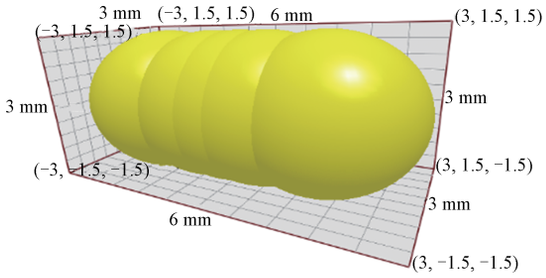


图10 有机肥离散元模型

Fig. 10 Organic fertilizer discrete element model

表4 有机肥颗粒特征参数

Tab. 4 Characteristic parameters of organic fertilizer particles

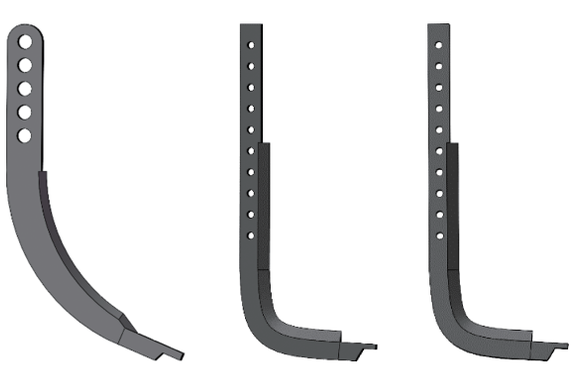
参数	数值
泊松比	0.25
剪切模量/Pa	1.2×10^6
密度/(kg·m^{-3})	1 500

表5 接触参数

Tab. 5 Contact parameters

参数	静摩擦因数	动摩擦因数	恢复系数
土壤-土壤	0.84	0.10	0.55
65Mn钢-土壤	0.60	0.11	0.30

利用仿真对照试验验证仿生深松铲的减阻效果,将普通深松铲(图11a)、仿上足趾深松铲(图11b)和仿下足趾深松铲(图11c)进行对照,3种深松铲均符合行业标准[32]。深松装置前后铲水平间距为300、400、500 mm;深松深度要求达到400 mm,且为满足分层深松,设置分层深松深松铲竖直间距为100、200、300 mm;拖拉机机具前进速度为1.54、3.00、4.46 km/h。



(a) 普通深松铲 (b) 仿上足趾深松铲 (c) 仿中足趾深松铲

图11 深松铲模型

Fig. 11 Subsoiling shovel models

设置机具前进速度2.54 km/h,深松入土深度为300 mm,铲尖为凿式铲尖,对不同类型深松铲进行试验,试验结果如表6所示。由表6可知,深松阻力由小到大为仿生上足趾深松铲、仿生中足趾深松铲、普通深松铲,验证了仿生深松铲有较好的减阻效果。

2.4 单因素试验

2.4.1 深松铲单因素试验

如图12所示,以深松装置作业时牵引阻力为试验指标,设置机具前进速度2.54 km/h,前后铲水平间距为350 mm,前铲入土深度为200 mm,后铲入土深度为400 mm。分层深松前后深松铲铲尖作为试验因素进行单因素试验,由表7可知,箭-凿型深松铲尖组合牵引阻力最小。因此,试验确定最优铲尖组合方式为前铲采用箭式设计,后铲采用凿式设计。这一组合方式能够显著降低牵引阻力,提升深松装置作业效率。

表6 深松对照试验结果

Tab. 6 Subsoiling control test results

深松铲类型	深松阻力/N
普通深松铲	809.3
仿生上足趾深松铲	734.5
仿生中足趾深松铲	770.8

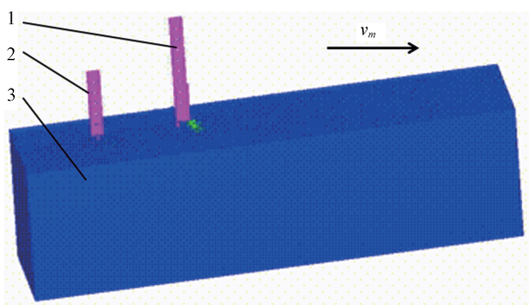


图12 离散元仿真试验

Fig. 12 Discrete element simulation test

1. 深松前铲 2. 深松后铲 3. 土壤

表7 单因素试验结果

Tab. 7 Single factor test results

前铲-后铲铲尖组合	深松阻力/N			
	1	2	3	平均值
凿-凿	1 835.9	1 830.5	1 833.4	1 833.3
箭-箭	2 050.3	2 047.9	2 054.7	2 051.0
双翼-双翼	2 351.5	2 351.8	2 350.6	2 351.3
凿-箭	1 828.7	1 825.4	1 830.3	1 828.1
凿-双翼	2 152.3	2 150.8	2 153.5	2 152.2
箭-凿	1 716.1	1 716.0	1 718.9	1 717.0
箭-双翼	2 201.4	2 198.9	2 199.6	2 200.0
双翼-凿	2 015.3	2 011.6	2 014.8	2 013.9
双翼-箭	2 250.8	2 250.3	2 252.7	2 251.3

2.4.2 排肥装置单因素试验

以排肥作业时排肥量为试验指标,对外槽轮排肥器做单因素试验,确定最佳槽轮半径。试验条件为:机具前进速度0.43 m/s、外槽轮排肥器转速60 r/min,试验结果如表8所示。由表8可知,槽轮半径为25 mm时排肥效果最好,选定槽轮半径为25 mm分别以不同螺旋升角、弧心距、槽轮半径为影响因素进行单因素试验,以确定排肥装置最佳参数。

试验结果(表9)表明,螺旋升角增加能够提高肥料排放效率,螺旋升角为90°时在试验中表现出较强的输送能力;弧心距的精确控制直接影响槽轮排肥效率,弧心距为22 mm时达到最佳效果;槽轮半径35 mm则在确

保排肥量的同时，减少了排肥器在工作过程中的阻力。因此，螺旋升角、弧心距和槽轮半径对外槽轮排肥效果具有显著影响。故排肥装置最优结构参数为螺旋升角90°、弧心距22 mm、槽轮半径35 mm。

表8　不同槽轮半径排肥量结果

Tab. 8　Results of fertilizer discharge volume with different radius of sheave　　g

槽轮半径/mm	螺旋升角/(°)	弧心距22 mm				弧心距26 mm				弧心距30 mm			
		1	2	3	平均值	1	2	3	平均值	1	2	3	平均值
25	90.0	90.9	93.3	95.8	93.3	72.3	69.2	75.2	72.2	65.3	64.2	63.7	64.4
	67.5	90.3	90.9	91.1	90.8	83.2	84.3	85.4	84.3	76.9	78.6	76.6	77.4
	45.0	99.2	96.9	97.2	97.8	79.3	81.5	82.8	81.2	69.9	69.3	68.7	69.3
30	90.0	120.5	120.8	125.0	122.1	105.1	104.4	105.5	105.0	98.6	98.5	98.2	98.4
	67.5	116.3	116.7	115.6	116.2	105.1	105.1	105.3	105.2	99.6	99.3	98.6	99.2
	45.0	110.2	113.6	109.8	111.2	103.2	103.3	104.5	103.7	97.3	97.8	96.9	97.3
35	90.0	165.2	166.2	163.1	164.8	152.1	153.2	151.6	152.3	147.2	147.9	148.1	147.7
	67.5	170.5	172.1	170.2	170.9	154.7	155.1	154.5	154.8	145.1	144.9	145.1	145.0
	45.0	166.4	166.5	166.6	166.5	153.3	153.1	153.1	153.2	142.3	142.8	141.7	142.3

表9　单因素排肥试验结果

Tab. 9　Results of the single-factor fertilizer distribution experiment

因素			排肥量/g			
螺旋升角/(°)	弧心距/mm	槽轮半径/mm	1	2	3	平均值
90.0	22.0	25.0	90.9	93.3	95.8	93.3
67.5	22.0	25.0	90.3	90.9	91.1	90.8
45.0	22.0	25.0	99.2	96.9	97.2	97.8
90.0	22.0	25.0	90.9	93.3	95.8	93.3
90.0	26.0	25.0	72.3	69.2	75.2	72.2
90.0	30.0	25.0	65.3	64.2	63.7	64.4
90.0	22.0	25.0	90.9	93.3	95.8	93.3
90.0	22.0	30.0	120.5	120.8	125.0	122.1
90.0	22.0	35.0	165.2	166.2	163.1	164.8

2.5　二次回归正交旋转组合试验

2.5.1　深松装置二次回归正交旋转组合试验

为进一步确定深松装置最优工作参数，进行了三因素五水平的二次回归旋转正交组合试验，以评估箭-凿型深松铲尖组合深松装置性能。试验因素编码见表10。试验指标为深松装置牵引阻力，试验结果如表11所示，X_1、X_2、X_3分别为机具前进速度、前后铲水平间距、前后铲竖直间距编码值。

表10　深松试验编码

Tab. 10　Coding of subsoiling test level

编码	因素		
	机具前进速度 x_1/(km·h^{-1})	前后铲水平间距 x_2/mm	前后铲竖直间距 x_3/mm
1.682	4.6	500.0	300.0
1	4.1	459.5	259.5
0	3.1	400.0	200.0
−1	2.2	340.6	140.6
−1.682	1.6	300.0	100.0

利用Design-Expert 12软件对试验结果进行分析，得到深松试验方差分析见表12。由表12可知，深松牵引阻力Y_1模型极显著（P<0.01）。机具前进速度、前后铲竖直间距对深松牵引阻力Y_1影响极显著（P<0.01）、前后铲水平间距对Y_1影响显著（0.01<P<0.05）；二次项机具前进速度和前后铲竖直间距对Y_1影响极显著（P<0.01）。

剔除不显著影响因素后，得到机具前进速度、分层深松铲前后铲水平间距和分层深松铲前后铲竖直间距与深松阻力Y_1的回归模型为

$$Y_1 = 5\,390.18 + 102.84X_1 - 30.46X_2 - 499.12X_3 - 34.86X_1^2 + 79.41X_3^2 \tag{10}$$

为得到深松装置的最优参数组合，通过Design-Expert软件数据优化求解模块对深松作业牵引阻力模型进行优化求解，可得目标函数为

$$\begin{cases} \min Y_1(X_1,X_2,X_3) \\ -1.682 \leqslant X_1 \leqslant 1.682 \\ -1.682 \leqslant X_2 \leqslant 1.682 \\ -1.682 \leqslant X_3 \leqslant 1.682 \end{cases} \tag{11}$$

通过优化确定最优参数组合为：深松作业速度1.54 km/h、前后铲水平间距500 mm、前后铲竖直间距300 mm，此时模型预测深松阻力为5 755.26 N。在该参数下进行深松试验模拟仿真，结果显示深松牵引阻力为5 762.67 N，与预测值相对误差为0.13%，验证了模型预测精度，表明所选参数组合能够有效优化深松作业牵引阻力。

表11 深松试验结果

Tab. 11 Subsoiling test results

序号	因素			深松牵引阻力Y_1/N
	X_1	X_2	X_3	
1	1	1	1	4 942.86
2	1	1	−1	5 981.51
3	1	−1	1	5 087.16
4	−1	1	−1	5 814.21
5	1	−1	−1	6 028.71
6	−1	−1	1	4 806.54
7	−1	1	1	4 776.33
8	−1	−1	−1	5 859.02
9	−1.682	0	0	5 133.17
10	1.682	0	0	5 502.00
11	0	−1.682	0	5 448.46
12	0	1.682	0	5 359.57
13	0	0	−1.682	6 457.14
14	0	0	1.682	4 824.46
15	0	0	0	5 444.49
16	0	0	0	5 388.25
17	0	0	0	5 365.32
18	0	0	0	5 445.73
19	0	0	0	5 443.80
20	0	0	0	5 356.44
21	0	0	0	5 360.30
22	0	0	0	5 347.34
23	0	0	0	5 351.02

表12 深松试验方差分析

Tab. 12 Analysis of variance for subsoiling experiment

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	3.68×10^6	9	4.09×10^6	207.23	<0.000 1**
X_1	1.44×10^5	1	1.44×10^5	73.12	<0.000 1**
X_2	1.27×10^4	1	1.27×10^4	6.42	0.025*
X_3	3.4×10^6	1	3.40×10^6	1 722.51	<0.000 1**
X_1X_2	1 695.95	1	1 695.95	0.857 9	0.371 2
X_1X_3	1 516.96	1	1 516.96	0.767 5	0.396 9
X_2X_3	850.74	1	850.74	0.430 6	0.523 1
X_1^2	1.93×10^4	1	1.93×10^4	9.78	0.008**
X_2^2	294.12	1	294.12	0.149 1	0.705 7
X_3^2	1.002×10^5	1	1.002×10^5	50.74	<0.000 1**
失拟项	1.08×10^4	5	2 150.86	1.5	0.407 8
残差	1.49×10^4	8	1 865.33		
总和	3.71×10^6	22			

注：**表示影响极显著（P<0.01），*表示影响显著（0.01≤P<0.05），下同。

2.5.2 排肥装置二次回归正交旋转组合试验

为进一步确定排肥装置最优工作参数，进行了三因素五水平的二次回归旋转正交组合试验，以评估排肥装置排肥性能。试验因素编码见表13。试验指标为排肥装置排肥量，试验方案如表14所示，X_4、X_5、X_6分别为槽轮半径、弧心距、螺旋升角编码值。

表13 排肥因素编码

Tab. 13 Coding of fertilizer device

编码	因素		
	槽轮半径x_4/ mm	弧心距x_5/ mm	螺旋升角x_6/（°）
1.682	35.0	30.0	90.0
1	32.9	28.4	80.9
0	30.0	26.0	67.5
−1	27.1	23.6	54.1
−1.682	25.0	22.0	45.0

表14 排肥试验结果

Tab. 14 Fertilizer test results

序号	因素			外槽轮排肥量Y_2/g
	X_4	X_5	X_6	
1	1	1	1	163.138
2	1	1	−1	173.955
3	1	−1	1	191.621
4	−1	1	−1	120.332
5	1	−1	−1	188.795
6	−1	−1	1	130.973
7	−1	1	1	121.717
8	−1	−1	−1	140.926
9	−1.682	0	0	106.990
10	1.682	0	0	175.713
11	0	−1.682	0	187.151
12	0	1.682	0	150.068
13	0	0	−1.682	158.950
14	0	0	1.682	162.819
15	0	0	0	165.726
16	0	0	0	158.000
17	0	0	0	168.431
18	0	0	0	165.155
19	0	0	0	165.290
20	0	0	0	165.051
21	0	0	0	158.439
22	0	0	0	164.456
23	0	0	0	158.380

根据Design-Expert 12软件对试验结果进行方差分析，结果如表15所示，试验指标外槽轮排肥量Y_2模型极显著（P<0.01）。槽轮半径、弧心距对外槽轮排肥量Y_2影响极显著（P<0.01），外槽轮螺旋升角对外槽轮排肥量Y_2影响显著（0.01≤P<0.05）；槽轮半径和弧心距的交互项对外槽轮排肥量Y_2影响显著（0.01≤P<0.05）；二次项机具槽轮半径对外槽轮排肥量Y_2影响显著（0.01≤P<0.05）。

剔除不显著影响因素后，得到外槽轮半径X_1、弧心距X_2和外槽轮螺旋升角X_3与外槽轮排肥量Y_2的回归模型为

$$Y_2 = 164.17 + 33.45X_4 + 9.85X_5 - 1.6629X_6 + 1.56X_4X_5 - 2.775X_4^2 \quad (12)$$

通过使用Design-Expert 12软件对数据进行分析，获得试验因素对排肥量的交互作用，并进行了响应曲面分析，如图13所示。当外槽轮螺旋升角为67.5°时，槽轮半

径与槽轮弧心距的交互作用对排肥量的影响如图13a所示。在槽轮半径较大时，排肥量随着弧心距的增加呈先增大后减少的趋势；然而，当槽轮半径减小时，弧心距的增加对排肥量的影响逐渐转变为单调增加趋势。原因为，当槽轮半径较大时，弧心距增加首先导致排肥量先减少后增加，此时弧心距对排肥量的影响显著高于槽轮半径的影响。随着槽轮半径减小，排肥量则随弧心距的增加而呈增大趋势，且这一趋势随着弧心距进一步增大而更加明显。原因在于槽轮半径减小和弧心距增加使得同一凹槽内携带肥料量增多，从而导致排肥量显著增加。

当弧心距为26 mm时，外槽轮半径与外槽轮螺旋升角的交互作用对排肥量的影响如图13b所示。由图13b可得，两者交互项并不显著。无论螺旋升角处于初始阶段还是随其增加，排肥量均随外槽轮半径增大而增加，而螺旋升角对排肥量的影响则较小。原因为：弧心距为26 cm时，外槽轮半径决定排肥轮接触面积和排肥容积，从而对排肥量产生显著影响。随着外槽轮半径增加，接触面积和排肥容积也随之增大，导致排肥量增加。而螺旋升角主要影响肥料排出速度和流动性，在弧心距为26 mm的条件下，这种影响相对较小。

当槽轮半径为30 mm时，外槽轮弧心距与螺旋升角对排肥量的交互影响如图13c所示，由图13c可知，这两者的交互项并不显著。随着弧心距增大，排肥量在螺旋升角增加时呈先增大后减小的趋势；而螺旋升角处于初始阶段或逐渐增大时，排肥量则随弧心距的增加而减少。原因为：当槽轮半径为30 mm时，弧心距的增大会延长排肥轮与肥料的接触路径，导致排肥量减少。同时，螺旋升角的增加在初始阶段有助于提高排肥速度，但过大的升角可能导致肥料流动不畅，使排肥量减少。

表15　排肥试验方差分析

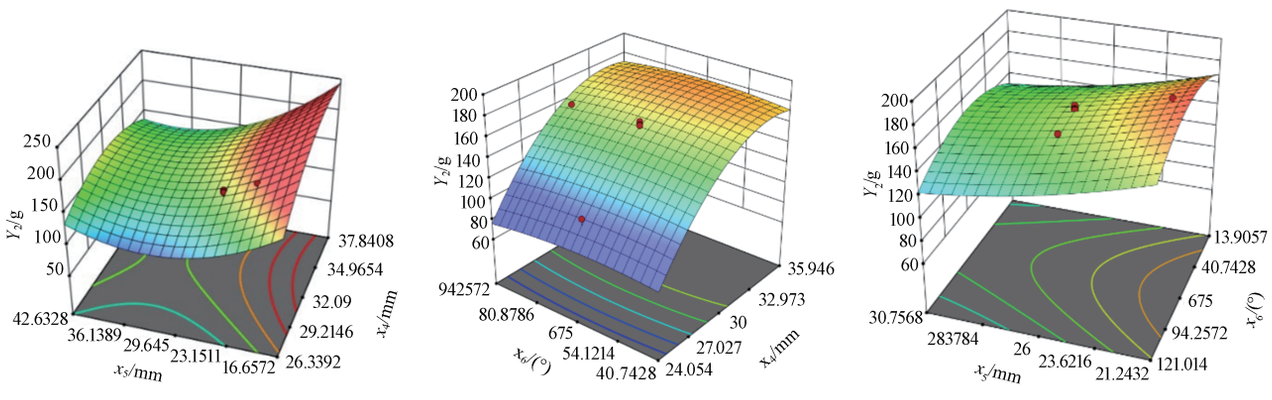
Tab. 15　Analysis of variance for fertilizer distribution experiment

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	9 996.24	9	1 110.69	41.77	< 0.000 1**
X_4	7 503.80	1	7 503.8	184.05	< 0.000 1**
X_5	1 225.33	1	1 225.33	43.84	< 0.000 1**
X_6	306.00	1	306.00	20.41	0.035 7*
X_4X_5	119.44	1	119.44	7.97	0.040 8*
X_4X_6	0.310 8	1	0.310 8	0.011 7	0.915 6
X_5X_6	0.213 2	1	0.213 2	0.008 0	0.930 0
X_4^2	581.39	1	581.39	30.11	0.018 5*
X_5^2	30.38	1	30.38	1.14	0.304 6
X_6^2	28.89	1	28.89	1.09	0.316 2
失拟项	225.77	5	45.15	3.01	0.080 4
残差	119.88	8	14.99		
总和	10 341.90	22			

为得到深松装置最优参数组合，通过Design-Expert软件数据优化求解模块对排肥装置排肥作业时排肥量模型进行优化求解，可得目标函数为

$$\text{s.t.}\begin{cases} Y_2(X_4,X_5,X_6)=150\ \text{g} \\ -1.682\leqslant X_4\leqslant 1.682 \\ -1.682\leqslant X_5\leqslant 1.682 \\ -1.682\leqslant X_6\leqslant 1.682 \end{cases} \tag{13}$$

通过优化确定最优参数组合为：槽轮半径30 mm、弧心距离28.5 mm、螺旋升角81°，此时排肥量模型预测值为300 g。在该参数下进行了排肥试验模拟仿真，结果排肥装置排肥量为304.7 g，与预期试验值相对误差1.57%，验证了模型预测精度，表明所选参数组合能够有效优化排肥作业。



(a) X_6=0　　(b) X_5=0　　(c) X_4=0

图13　排肥试验响应曲面

Fig. 13　Response surfaces of fertilization experiment

3　田间试验

3.1　试验条件

在云南省昆明市呈贡区昆明理工大学保护性耕作试验田进行试验，试验田位于24°50′56″N，102°51′49″E，长×宽为50 m×20 m，海拔为1932 m。试验气候条件为晴朗天气，气温为22℃，气象观测中得出大气压强为9.8 MPa，同时试验期间最高风速为6.4 m/s，平均风速为5.3 m/s，平均相对湿度为45%。试验田为云南特有的红土壤，土壤含水率平均值为18.54%，土壤容重平均值为

1.147 8 g/cm^3，土壤坚实度平均值为1 631 kPa，深松施肥作业为春耕前，土壤前作物为大豆。试验肥料为河北稼倍多有机肥有限公司符合NY525—2012标准的商品有机肥和复合无机肥。

3.2 试验方法

3.2.1 土壤膨松度、土壤扰动系数与碎土率试验

深松作业前后，将水平支架放置作业区域随机选择位置，在水平支架上均分10个计数点，每个计数点间隔10 cm，深松作业前通过直尺测出每个点到地表距离，深松作业后依次测出支架上端到地表距离，进而将深松沟里的土壤挖出重复以上操作，土壤膨松度和土壤扰动系数计算式为

$$P = \frac{A_h - A_q}{A_q} \times 100\% \tag{14}$$

$$\gamma = \frac{A_s}{A_q} \times 100\% \tag{15}$$

其中

$$A_q = \frac{b}{2}\left(a_{q_1} + 2\sum_{i=2}^{n=1} a_{q_i} + a_{q_n}\right) \tag{16}$$

$$A_s = \frac{b}{2}\left(a_{s_1} + 2\sum_{i=2}^{n=1} a_{s_i} + a_{s_n}\right) \tag{17}$$

式中 P——深松土壤膨松度，%

γ——深松土壤扰动系数，%

A_h——作业后深松沟底部与地表间横截面积，cm^2

A_q——作业前深松沟底部与地表间横截面积，cm^2

A_s——作业后实际的深松横截面面积，cm^2

碎土率为一段行程内选取面积为0.5 m×0.5 m的范围内土块最长边小于4 cm的土块质量占面积内土块总质量比值。

3.2.2 排肥装置排肥量试验

将机具置于平地，测定每个排肥口排肥量，让电机转动n圈，重复5次，使用量筒收集每次每个排肥口的排肥量。计算排肥口排肥量稳定变异系数。按照相关标准规定，排肥量稳定变异系数不大于13%。

3.2.3 深松牵引阻力试验

深松施肥机牵引力测量时，采用双拖拉机配置，其间以钢丝绳、拉环及高精度拉力传感器串联连接。其中台机挂载深松施肥样机，另一机通过钢丝绳牵引前行。待样机作业稳定后，通过观测拉力传感器仪表，精确记录实时拉力。试验步骤为：在未作业状态下（即分层深松铲未入土），记录拖拉机匀速行驶时钢绳拉力；在深松作业稳定阶段，再次记录。最终，深松作业牵引阻力由两阶段拉力差值精确计算得出。

3.3 试验结果与分析

3.3.1 土壤膨松度、土壤扰动系数与碎土率试验结果

分层深松作业和单铲深松作业测量点如图14、15所示，通过测量数据计算得分层深松土壤扰动系数平均值为52.4%，土壤膨松度为19.7%；单铲深松的土壤扰动系数平均值为40.6%，土壤膨松度为14.3%。分层深松分类施肥机作业碎土率为78%，满足规定性能指标，仿生单铲深松碎土率为53%。试验结果表明，分层深松作业土壤扰动系数、土壤膨松度、碎土率均大于单铲深松作业，且满足国标中深松土壤扰动和土壤蓬松标准。

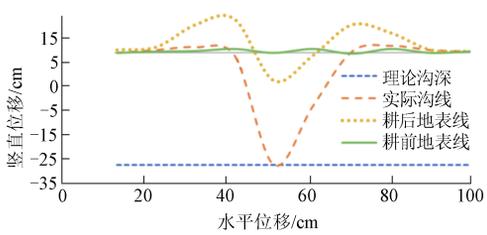


图14 分层深松作业三线图

Fig. 14 Layered subsoiling operation three-line diagram

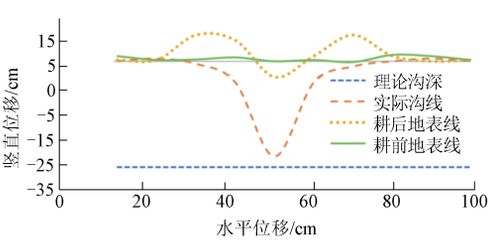


图15 单铲深松作业三线图

Fig. 15 Three-line diagram of single shovel subsoiling operation

3.3.2 排肥装置排肥量试验结果

各个排肥口排肥量如表16所示，无机肥排肥口平均排肥量分别为120.8、182.8 g，有机肥排肥口平均排肥量为620.3、916.9 g，无机肥排肥量精度分别为0.67%、1.56%，有机肥排肥量3.38%、1.89%，排肥稳定变异系数为2.38%、4.93%、2.04%、3.01%，试验结果均满足施肥机的国家标准，证明设计合理性，且试验结果与仿真试验相近。

表16 排肥装置排肥作业结果

Tab. 16 Results and analysis of fertilizer discharge operation of fertilizer discharge device

参数	无机肥排肥口1	无机肥排肥口2	有机肥排肥口1	有机肥排肥口2
均值/g	120.8	182.8	620.3	916.9
理论排肥量/g	120	180	600	900
排肥量精度/%	0.67	1.56	3.38	1.89
稳定变异系数/%	2.38	4.93	2.04	3.01

3.3.3 深松牵引阻力试验结果

当拖拉机悬挂样机不进行深松作业时，传感器显示拉力为1 400 N，当分层深松分类施肥样机稳定作业时传感器显示拉力为10 700 N，因此本研究设计的分层深松牵引阻力为4 650 N；单铲深松作业时传感器示数为11 000 N，得单铲深松作业时牵引阻力为4 800 N。试验

结果表明，分层深松的作业效果优于仿生单铲深松，且样机深松牵引阻力与仿真结果误差较小，证明了仿真试验可行性。

4　结论

（1）设计了一种分层深松分类施肥装置；基于仿生学原理，提取乌干达花金龟挖掘前足足趾轮廓曲线，并对深松装置进行力学分析揭示其减阻机理；优化了外槽轮排肥装置，使其更适用于仿生深松机排肥过程。

（2）建立“土壤-深松施肥机具”离散元模型，进行试验分析，确定深松装置最优组合参数：机具前进速度为1.54 km/h、前后铲水平间距为500 mm、前后铲竖直间距为300 mm；排肥装置最优组合参数：槽轮半径为30 mm、弧心距离为28.5 mm、螺旋升角为81°。

（3）田间试验结果表明，分层深松分类施肥机对土壤扰动率为52.4%、土壤膨松度19.7%、碎土率78%，均达到深松机设计要求，且优于单铲深松作业；排肥装置有机肥排肥量为120.8、182.8 g，无机肥排肥量为620.3、916.9 g；有机肥排肥稳定变异系数为2.38%、4.93%，无机肥排肥稳定变异系数为2.04%、3.01%，达到分层施肥要求。

参　考　文　献

[1] 郑侃，何进，李洪文，等. 中国北方地区深松对小麦玉米产量影响的Meta分析[J]. 农业工程学报，2015，31(22)：7－15.
ZHENG Kan，HE Jin，LI Hongwen，et al. Meta-analysis on maize and wheat yield under subsoiling in Northern China[J]. Transactions of the CSAE，2015，31(22)：7－15.（in Chinese）

[2] PULIDO-MONCADA M，KATUWAL S，KRISTENSEN J B，et al. Effects of bio-subsoilers on subsoil pore-system functionality：case study with intact soil columns[J]. Geoderma，2021，385：114897.

[3] RONG L，DUAN X，ZHANG G，et al. Impacts of tillage practices on ephemeral gully erosion in a dry-hot valley region in southwestern China[J]. Soil and Tillage Research，2019，187：72－84.

[4] 闫雷，喇乐鹏，董天浩，等.耕作方式对东北黑土坡耕地土壤物理性状及根系垂直分布的影响[J].农业工程学报，2021，37(1)：125－132.
YAN Lei，LA Yuepeng，DONG Tianhao，et al. Soil physical properties and vertical distribution of root systems affected by tillage，methods in black soil slope farmlands in Northeast China[J]. Transactions of the CSAE，2021，37(1)：125－132.（in Chinese）

[5] HIPPS N A，HODGSON D R. The effect of a slant-legged subsoiler on soil compaction and the growth of direct-drilled winter wheat[J]. The Journal of Agricultural Science，1987，109(1)：79－85.

[6] ZHU S，GAO T，LIU Z，et al. Rotary and subsoiling tillage rotations influence soil carbon and nitrogen sequestration and crop yield[J]. Plant，Soil & Environment，2022，68(2)：89－97.

[7] REN L Q. Progress in the bionic study on anti-adhesion and resistance reduction of terrain machines[J]. Science in China Series E：Technological Sciences，2009，52(2)：273－284.

[8] TONG J，JI W，JIA H，et al. Design and tests of biomimetic blades for soil-rototilling and stubble-breaking[J]. Journal of Bionic Engineering，2015，12(3)：495－503.

[9] WANG Y，LI N，MA Y，et al. Field experiments evaluating a biomimetic shark-inspired（BioS）subsoiler for tillage resistance reduction[J]. Soil and Tillage Research，2020，196：104432.

[10] MASSAH J，FARD M R，AGHEL H. An optimized bionic electro-osmotic soil-engaging implement for soil adhesion reduction[J]. Journal of Terramechanics，2021，95：1－6.

[11] KARMAKAR S，KUSHWAHA R L. Simulation of soil deformation around a tillage tool using computational fluid dynamics[J]. Transactions of the ASAE，2005，48(3)：923－932.

[12] USABORISUT P，PRASERTKAN K. Specific energy requirements and soil pulverization of a combined tillage implement[J]. Heliyon，2019，5(11)：e02757.

[13] SHI Y，SOUTIS C. Modelling transverse matrix cracking and splitting of cross-ply composite laminates under four point bending[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics，2016，83：73－81.

[14] ASKARI M，SHAHGHOLI G，ABBASPOUR-GILANDEH Y. New wings on the interaction between conventional subsoiler and para plow tines with the soil：effects on the draft and the properties of soil[J]. Archives of agronomy and Soil Science，2019，65(1)：88－100.

[15] TONG J，MOAYAD B Z，MA Y，et al. Effects of biomimetic surface designs on furrow opener performance[J]. Journal of Bionic Engineering，2009，6(3)：280－289.

[16] TONG J，JI W，JIA H，et al. Design and tests of biomimetic blades for soil-rototilling and stubble-breaking[J]. Journal of Bionic Engineering，2015，12(3)：495－503.

[17] SUN J，WANG Y，MA Y，et al. DEM simulation of bionic subsoilers（tillage depth > 40 cm）with drag reduction and lower soil disturbance characteristics[J]. Advances in Engineering Software，2018，119：30－37.

[18] LI B，CHEN Y，CHEN J. Modeling of soil-claw interaction using the discrete element method（DEM）[J]. Soil and Tillage Research，2016，158：177－185.

[19] YANG Y，LI M，TONG J，et al. Study on the interaction between soil and the five-claw combination of a mole using the discrete element method[J]. Applied Bionics and Biomechanics，2018，2018(1)：7854052.

[20] 赵淑红,杨超,杨罗罗,等.分段式分层深松后铲设计与试验[J].东北农业大学学报,2019,50(12):86-96.
ZHAO Shuhong, YANG Chao, YANG Luoluo, et al. Design and experiment of segmented layered rear subsoiler[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2019, 50(12): 86-96. (in Chinese)

[21] 赵淑红, 王加一, 陈君执, 等. 保护性耕作拟合曲线型深松铲设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(2): 82-92.
ZHAO Shuhong, WANG Jiayi, CHEN Junzhi, et al. Design and experiment of fitting curve subsoiler of conservation tillage [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2):82-92. (in Chinese)

[22] 陈聪聪. 分层施肥方式对夏玉米根系生长发育及土壤理化性状的影响[D]. 保定:河北农业大学,2018.
CHEN Congcong. Effects of layered fertilization on root growth of summer maize and the corresponding physical and biochemical properties of soil[D]. Baoding:Hebei Agricultural University,2018.(in Chinese)

[23] 周宝元,王新兵,王志敏,等. 不同耕作方式下缓释肥对夏玉米产量及氮素利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2016,22(3):821-829.
ZHOU Baoyuan, WANG Xinbing, WANG Zhimin, et al. Effect of slow-release fertilizer and tillage practice on grain yield and nitrogen efficiency of summer maize[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer,2016,22(3):821-829.(in Chinese)

[24] 马阳. 不同耕作施肥方式下的夏玉米养分利用和土壤效应研究[D]. 保定:河北农业大学,2018.
MA Yang. Study on nutrient utilization and soil effect of summer maize under the different tillage methods [D]. Baoding: Hebei Agricultural University,2018.(in Chinese)

[25] 刘立晶,马超,刘忠军.基于EDEM的带状深松全层施肥铲作业参数优化与试验[J].农业机械学报,2021,52(10):74-83.
LIU Lijing , MA Chao , LIU Zhongjun. EDEM-based parameter optimization and experiment of full-layer fertilization shovel for strip subsoiling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(10):74-83. (in Chinese)

[26] 李伟,张帅磊,高喜杰,等.前铲入土深度对分层深松土壤扰动的影响研究[J].农机化研究,2018,40(11):147-150,161.
LI Wei, ZHANG Shuailei, GAO Xijie, et al. Influence of front layered sub-soiling shovel's penetration angle on soil disturbance[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018,40(11):147-150,161. (in Chinese)

[27] 梁宇超,汤智辉,纪超,等.外槽轮排肥器结构参数优化与试验[J].农机化研究,2023,45(12):7-14.
LIANG Yuchao, TANG Zhihui, JI Chao, et al. Optimization and experiment of structural parameters of outer groove wheel fertilizer drainer[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2023,45(12):7-14. (in Chinese)

[28] 方龙羽,罗锡文,杨文武,等.插板式叶轮排肥器安装角度的优化与试验[J].农机化研究,2021,43(2):139-144.
FANG Longyu, LUO Xiwen, YANG Wenwu, et al. Optimization and test of installation angle of slotted impeller fertilizer discharger [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021,43(2):139-144. (in Chinese)

[29] 张涛,刘飞,赵满全,等.玉米秸秆接触物理参数测定与离散元仿真标定[J].中国农业大学学报,2018,23(4):120-127.
ZHANG Tao, LIU Fei, ZHAO Manquan, et al. Determination of corn stalk contact parameters and calibration of discrete element method simulation[J]. Journal of China Agricultural University, 2018, 23(4): 120-127. (in Chinese)

[30] 张建路,王鹏飞.基于EDEM机施有机肥离散元模型参数标定[J].农机化研究,2023,45(9):122-128.
ZHANG Jianlu, WANG Pengfei. Calibration of discrete element model parameters of organic fertilizer application based on EDEM[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023,45(9):122-128. (in Chinese)

[31] 向伟,吴明亮,吕江南,等.基于堆积试验的黏壤土仿真物理参数标定[J].农业工程学报,2019,35(12):116-123.
XIANG Wei, WU Mingliang, LÜ Jiangnan, et al. Calibration of simulation physical parameters of clay loam based on soil accumulation test[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(12): 116-123. (in Chinese)

[32] 中华人民共和国工业和信息化部. JB/T 9788-2020 深松铲和深松铲柄[S]. 北京:机械工业出版社,2020.