doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.10.007

基于 EDEM 的带状深松全层施肥铲作业参数优化与试验

刘立晶[1,2]　马　超[1]　刘忠军[1,2]

(1. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083; 2. 土壤植物机器系统技术国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 为了实现一次施肥满足作物不同生育期的养分需求并提高肥料利用率,设计了一种适用于带状免耕播种机的深松全层施肥铲,并对深松铲、施肥管和施肥板的夹角进行理论分析与设计,得到关键参数的理论值。采用二次回归通用旋转组合设计试验,以肥量均匀变异系数为响应指标,以工作速度和作业深度为影响因子,利用 EDEM 建立深松全层施肥铲的离散元仿真模型,模拟深松全层施肥铲的工作过程,通过仿真分析得出试验数据;运用 Design-Expert 软件对试验数据进行方差分析和响应面分析,得到最优工作参数组合为:工作速度 3.81 m/s,作业深度 25.22 cm。取工作速度 4 m/s、作业深度 25 cm 进行田间试验,结果表明,本文设计的施肥铲在最优工作参数下,0~5 cm、5~10 cm、10~15 cm、15~20 cm 土层的肥量均匀性变异系数分别为 41.05%、24.11%、20.31%、14.63%,试验值与理论优化值相对误差为 10.89%、4.06%、2.37%、3.10%。

关键词: 免耕播种机; 带状; 深松; 全层施肥; EDEM

中图分类号: S225.91+2　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2021)10-0074-10　　**OSID**:

EDEM-based Parameter Optimization and Experiment of Full-layer Fertilization Shovel for Strip Subsoiling

LIU Lijing[1,2]　MA Chao[1]　LIU Zhongjun[1,2]

(1. *Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences*, *Beijing* 100083, *China*
2. *State Key Laboratory of Soil - Plant - Machinery System Technology*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: The method of deep loosening and full-layer fertilization can prepare a sowing belt suitable for seed growth and development. It is a combination of plowing and no-tillage. It takes both "free" and "tillage" into consideration, which is a superior protection. Full-layer deep loosening fertilization is of great significance to improve fertilizer utilization and reduce environmental pollution. To satisfy the crop nutrient requirements of a different growth period with one-time fertilization, and improve fertilizer utilization, a subsoiling full-layer fertilizing shovel suitable for corn planter was designed. The angle between the subsoiling shovel, fertilizing tube, and fertilizing plate was analyzed theoretically and designed, and the theoretical values of key parameters were obtained. The experiment with quadratic regression rotation combination design was designed, which taking uniform variation coefficient of fertilizer as response index, working speed and working depth as influencing factors, and using EDEM to establish a discrete element simulation model of the subsoiling full-layer fertilization shovel, the working process of the subsoiling full-layer fertilization shovel was simulated and the experimental data was obtained through simulation analysis. Design-Expert was used to perform variance analysis and response surface analysis on the experiment data to obtain the optimal working parameter combination, which were as follows: the working speed was 3.81 m/s, and the working depth was 25.22 cm. Field experiment results showed that under the optimal working parameters of this design, the coefficient of variation of fertilizer uniformity was 41.05%, 24.11%, 20.31% and 14.63%, and the relative error between the experimental value and the theoretical optimization value was 10.89%, 4.06%, 2.37% and 3.10%.

Key words: no-tillage planter; strip; subsoiling; full-layer fertilization; EDEM

收稿日期: 2021-08-02　修回日期: 2021-08-29

基金项目: 中国机械工业集团有限公司重大科技专项任务计划项目和中国农业机械化科学研究院自研项目

作者简介: 刘立晶(1976—),女,研究员,博士生导师,主要从事种植机械装备研究,E-mail: xyliulj@sina.com

通信作者: 刘忠军(1983—),男,高级工程师,主要从事农业装备与关键技术研究,E-mail: liuzj655@163.com

0　引言

施肥方式是影响玉米产量的重要因素之一[1]，我国大多以人工表层施撒化肥，分期或者一次性撒施为主，一次性施肥容易造成前期烧种和后期脱肥，分期施肥费时费力且肥料利用效率低下[2]。我国面临着增肥不增产、土壤养分累积过多和化肥使用量过大等问题。深松可有效改善土壤结构、降低犁底层土壤容重、提高土壤中营养物的利用率和土壤的蓄水保墒能力，继而促进作物根系生长，提高作物产量。带状深松全层施肥耕作技术是保护性耕作的一种，是优越性比较突出的保护性耕作技术，是免耕、精耕、深松、精准施肥的结合体。这种耕作对土壤表层的扰动不到 2/5，深松带状耕作兼顾了免、耕、深松的同时又兼顾了精准施肥。所以全层深松施肥对提高化肥利用率、减少环境污染具有重要意义[3]。

全层施肥将肥料一次性施入不同土层中，既可以提高肥料利用率，又减少作业次数。文献[4－5]对一次性深施、一次性浅施和分层施肥做了对比研究，发现分层施肥的玉米产量明显高于另外两种情况。文献[6]认为连年免耕会使肥料困在表层土壤中，极易造成烧种、烧苗，后期出现倒伏情况，分层施肥可以改善免耕播种这一弊端。文献[7]认为与常规的施肥相比，采用条带深松方式深施缓释肥的氮肥利用效率和干物质积累量显著增加，有利于根系下扎和提高根系活力。文献[8]研究认为采用深松全层施肥的方式在消耗最少水量的前提下获得较高的产量、水分利用效率和肥料生产能力。

文献[9]设计前后布置的施肥开沟器实现分层施肥。文献[10－11]设计了一种施肥量可调式分层施肥器，并利用离散元法对肥料颗粒的运动规律以及影响施肥配比的主要因素进行了仿真研究。文献[12]研制了一种分层施肥铲，浅层施肥平均深度为 11.8 cm，深层施肥平均深度为 19.5 cm，并通过试验证明采用此施肥方式对玉米的生长具有明显的促进作用。文献[13]经过对采用分层施肥后玉米生长及养分迁移的研究发现，玉米普通肥 50、100、150 mm 3 层施肥处理较 1 层、2 层、混施处理利用率显著提高，最底部肥料所占比例应较大，有利于根系的吸收。总体看全层施肥研究集中在全层深松施肥铲结构设计和玉米生长过程两方面，对全层深松施肥铲的工作参数研究较少。

本文设计一种应用在带状免耕播种机上的玉米深松全层施肥铲，对其结构参数进行计算，同时利用 EDEM 对部件作业过程和作业效果进行仿真分析，研究工作速度和作业深度对全层施肥效果的影响规律，得出最优工作参数组合，并进行田间试验验证。通过对全层深松施肥铲工作参数的研究，进一步提高现有机具的作业性能。

1　带状深松全层施肥装置总体结构设计

1.1　结构示意图及工作原理

如图 1 所示的带状深松全层施肥装置主要由固定架、四连杆仿形总成、后支架、全层深松施肥铲、整地圆盘、碎土机构等组成。

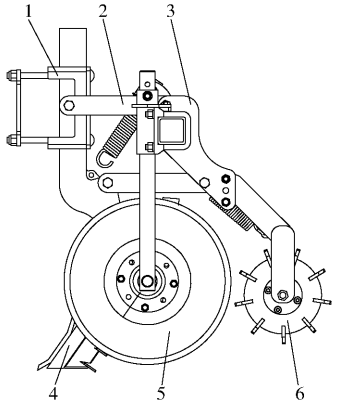


图 1　带状深松全层施肥装置结构示意图

Fig. 1　Structure of strip subsoiling and whole layer fertilization

1. 固定架　2. 四连杆仿形总成　3. 后支架　4. 全层深松施肥铲　5. 整地圆盘　6. 碎土机构

该装置挂接在播种机前梁上，机器作业时，对土壤进行疏通，深松的同时进行全层施肥作业，再由碎土机构将土块细碎，整平土壤表面，为后续的播种单体作业提供一条清洁种带。

1.2　关键部件

1.2.1　总体结构

全层深松施肥铲整体结构如图 2 所示，主要由深松铲、铲柄、铲尖、输肥管、施肥管和施肥板等组成。

1.2.2　工作原理

工作时，深松铲疏松下层土壤并开出肥沟，肥料颗粒经输肥管进入施肥管，在重力作用下沿着施肥管管壁下滑，依次经 4 个出肥口流出，分别落入不同深度土层中，完成全层施肥作业。

2　关键零部件结构设计

2.1　深松铲结构设计

根据土壤动力学模型，深松铲的受力部分包括铲尖和铲柄两部分[14－21]。

2.1.1　铲尖受力分析

深松铲铲尖的受力情况如图 3a 所示，土壤主要

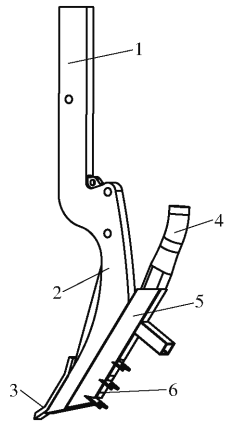


图 2 全层深松施肥铲结构示意图

Fig. 2 Schematic of full-layer fertilization shovel structure

1. 深松铲 2. 铲柄 3. 铲尖 4. 输肥管 5. 施肥管 6. 施肥板(出肥口)

受剪切力的作用,依据图中受力分析可以得到铲尖前进方向上的平衡方程为

$$F_z = N_0\sin\delta + \mu_1 N_0\cos\delta + F_b \tag{1}$$

式中 F_z——牵引力,N

N_0——铲尖斜面所受的法向载荷,N

μ_1——土壤与铲尖的摩擦因数

δ——铲尖入土角,(°)

F_b——土壤对铲尖的阻力,N

作业过程中,土壤的切削力很小,当遇到较大土块、根茬或硬物时,切削阻力明显增大,通常情况下,土壤对铲尖的作用力可以忽略不计,因此铲尖上部土块的受力分析如图 3b 所示,土块在水平方向与竖直方向上的平衡状态方程为

$$N_0(\sin\delta + \mu_1\cos\delta) - N_1(\sin\delta_1 + \mu\cos\delta_1) - (F_c + F_g)\cos\delta_1 = 0 \tag{2}$$

$$G - N_0(\cos\delta - \mu_1\cos\delta) - N_1(\cos\delta_1 - \mu\cos\delta_1) + (F_c + F_g)\sin\delta_1 = 0 \tag{3}$$

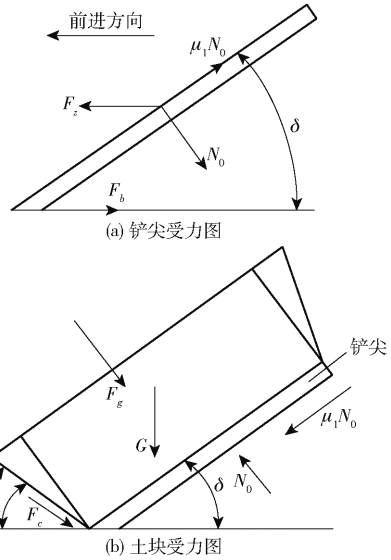


图 3 受力分析图

Fig. 3 Force analysis diagram

其中

$$F_g = m\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t_g} \tag{4}$$

式中 G——土块重力,N

N_1——土块前失效面的法向载荷,N

F_g——土壤加速力,N

F_c——土壤内聚力,N

μ——土壤内摩擦因数

δ_1——土块前失效面的倾角,(°)

m——被加速的土壤质量,kg

v——被加速的土壤速度,m/s

t_g——加速时间,s

在工作过程中,牵引力与土壤阻力是一对平衡力,结合式(1)~(3)解得

$$F_{z1} = \frac{G + \dfrac{F_c + F_g}{\sin\delta_1 + \mu\cos\delta_1}}{\dfrac{\cos\delta_1 - \mu\sin\delta_1}{\sin\delta + \mu_1\cos\delta} + \dfrac{\cos\delta_1 - \mu\sin\delta_1}{\sin\delta_1 + \mu\cos\delta_1}} \tag{5}$$

为简化式(5),令

$$e = \frac{\cos\delta_1 - \mu\sin\delta_1}{\sin\delta + \mu_1\cos\delta} + \frac{\cos\delta_1 - \mu\sin\delta_1}{\sin\delta_1 + \mu\cos\delta_1} \tag{6}$$

可得

$$F_{z1} = \frac{G}{e} + \frac{F_c + F_g}{(\sin\delta_1 + \mu\cos\delta_1)e} \tag{7}$$

式中 F_{z1}——土壤阻力,N

土块的前剪切失效面积 S_a 和土块前失效面的倾角 δ_1 取决于铲尖入土角 δ[22],又根据式(7)可知,当工作速度一定时,即 F_g 恒定,因此土壤阻力 F_{z1} 主要与铲尖入土角 δ 有关。入土角 δ 是影响深松铲入土性能的重要因素,入土角 δ 主要影响深松铲的入土性能和前进阻力,随着入土角的增大,入土能力变差,且阻力增加;入土角减小,疏松土壤效果变差。参考《农业机械设计手册》有关深松铲入土角 δ 的设计[23],δ 确定为 23°。

入土隙角 ∂ 为地面与深松铲底面的夹角,如图 4 所示。入土隙角 ∂ 的存在便于深松铲入土,通过试验和文献[24-25],∂ 取 10°。

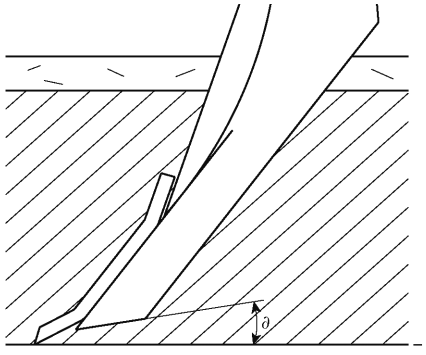


图 4 入土隙角 ∂ 示意图

Fig. 4 Schematic of entry angle ∂

2.1.2　铲柄曲线设计

为了减小作业过程中的阻力，开沟阻力随着工作速度递增，经研究发现，指数型曲线相较于直线、抛物线减阻效果更优[26-28]，因此铲柄入土部位的线型选择指数型，建立如图 5 所示的直角坐标系。取入土点 A 坐标为(x_1、y_1)、滑切曲线终点 B 坐标为(x_2,y_2)。

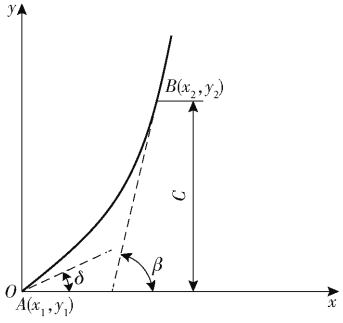


图 5　铲柄曲线示意图

Fig. 5　Schematic of handle curve

设滑切曲线方程为

$$y = a^x \tag{8}$$

式中　a——刃口曲线方程的底数

$$\begin{cases} y'_A = \tan\delta = a^{x_1}\ln a \\ y'_B = \tan\beta = a^{x_2}\ln a \\ y_2 - y_1 = C \end{cases} \tag{9}$$

式中　β——滑切曲线终止角，(°)

C——滑切曲线高度，mm

联立式(8)、(9)可得

$$a = \mathrm{e}^{\frac{\tan\beta - \tan\delta}{C}} \tag{10}$$

综合可得铲柄曲线方程为

$$y = (\mathrm{e}^{\frac{\tan\beta - \tan\delta}{C}})^x \tag{11}$$

由式(11)可知，滑切曲线的形状由入土角 δ、铲柄曲线终止角 β 和 C 来确定，铲柄曲线终止角 β 设计为 80°，根据上文可知入土角 δ 为 23°，结合玉米种植农艺要求，C 确定为 200 mm，因此 a 为 1.33。

2.1.3　材料选型

图 6 为仿真试验得到的深松铲前进阻力变化曲线，由此可知深松铲受到的平均阻力 f_1 为 5 073 N，受到的最大阻力 f_{max} 是 6 250 N。

深松铲上部固定在机架上，工作时受弯矩作用，阻力臂 L 长 0.56 m。

计算得深松铲受到的最大弯矩 M_a 为

$$M_a = f_{max}L = 3\,500\ \mathrm{N\cdot m} \tag{12}$$

深松铲截面为 70 mm × 25 mm 的矩形，因此计算出截面的抗弯截面模量 W_z 为

$$W_z = \frac{bh^2}{6} = 2.04\times10^{-5}\ \mathrm{m^3} \tag{13}$$

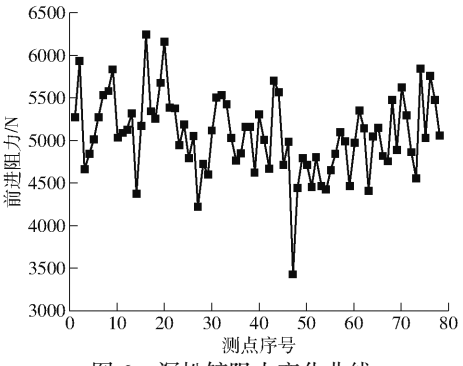


图 6　深松铲阻力变化曲线

Fig. 6　Resistance change curve of subsoil shovel

式中　b——横向截面长度，m

h——纵向截面长度，m

由式(12)、(13)可得屈服应力 σ 为

$$\sigma = \frac{M_a}{W_z} = 171.6\ \mathrm{MPa} \tag{14}$$

因此选用 Q460 作为该深松铲材料，其屈服强度为 460 MPa，深松铲受到的屈服应力为 171.6 MPa，远小于 460 MPa。

2.2　施肥管结构设计

施肥管安装在深松铲的后方，且出肥口要与前进方向保持一定夹角，如图 7 所示。根据文献[10]对比影响施肥配比的因素可知，夹角为 36°时，肥料分层效果较好。施肥管包含 4 个出肥口，上、中、下出肥口均安装有固定施肥板，玉米植株生长特性需要土层施肥量上少下多，因此施肥板长度不同[29]，各施肥口垂直方向上间隔 5 cm，施肥深度分别为 0 ~ 5 cm、5 ~ 10 cm、10 ~ 15 cm、15 ~ 20 cm。

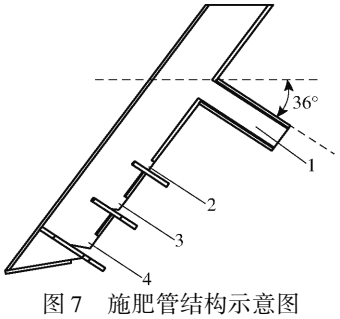


图 7　施肥管结构示意图

Fig. 7　Schematic of fertilization pipe structure

1. 口肥槽　2. 上施肥口　3. 中施肥口　4. 下施肥口

3　EDEM 仿真分析

通过 EDEM 软件对施肥过程进行模拟，对施肥的分层效果进行仿真分析，仿真中施肥板与水平面安装角为 36°，研究发现安装角确定后，各施肥口的施肥量即确定。

3.1　仿真模型建立

EDEM 中提供多种力学接触模型，研究肥料颗粒时，肥料与肥料颗粒之间采用的是 Hertz - Mindlin

(no-slip)接触力学模型,研究土壤时采用 Hertz-Mindlin with bonding 模型,根据文献[10],确定模型相关参数如表 1、2 所示。

表 1 土壤、肥料以及施肥铲参数

Tab. 1 Parameters of soil, fertilizer and shovel

材料	泊松比	密度/(kg·m^{-3})	剪切模量/Pa
土壤	0.50	2 600	2.0×10^{7}
施肥铲	0.30	7 865	7.9×10^{10}
肥料	0.25	1 861	1.0×10^{7}

表 2 不同材料接触参数

Tab. 2 Contact parameters of different materials

项目	恢复系数	静摩擦因数	滚动摩擦因数
土壤-土壤	0.20	0.25	0.04
土壤-肥料	0.30	0.50	0.02
土壤-施肥铲	0.10	0.20	0.02
肥料-施肥铲	0.59	0.40	0.01
肥料-肥料	0.31	0.18	0.01

肥料属于类球形颗粒,其球形率在 90% 以上,因此仿真模型可用球体代替肥料颗粒[11],通过试验测量千粒肥料颗粒的直径均值为 3 mm,且符合正态分布的规律,所以用直径 3 mm 的等效球体在 EDEM 中进行替代,并且利用 EDEM 软件中自动计算肥料的数据,质量 0.026 3 g,体积 1.41×10^{-8} m^3,施肥量 750 kg/hm^2。

按照表 1、2 的参数设定仿真模型,如图 8 所示。

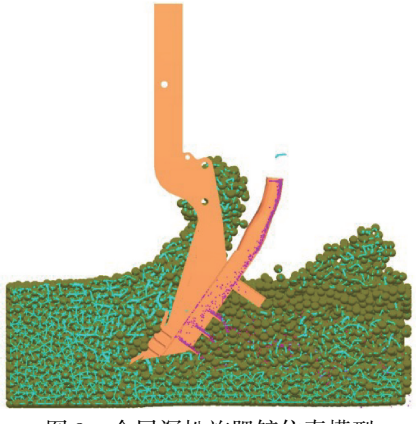


图 8 全层深松施肥铲仿真模型

Fig. 8 Simulation model of full-layer subsoil fertilization shovel

图 9 为施肥管静态出肥量情况。仿真模型下方有 4 个收集器,便于利用 EDEM 软件的后处理模块对肥料进行统计与计算。

图 10 为 5 次静态排肥试验后得到的施肥量柱状图,5 次试验后 4 层肥料占比均值依次为 7%、18%、25%、50%。

3.2 仿真分析

通过 EDEM 的仿真分析,在控制单一变量的原则下,分别提取出了不同工作速度、不同作业深度下

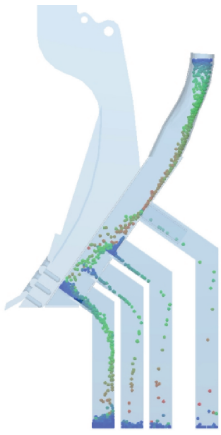


图 9 EDEM 施肥管静态排肥

Fig. 9 EDEM fertilization pipe static fertilization

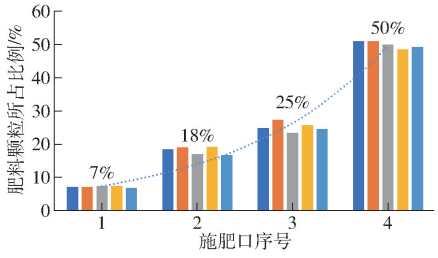
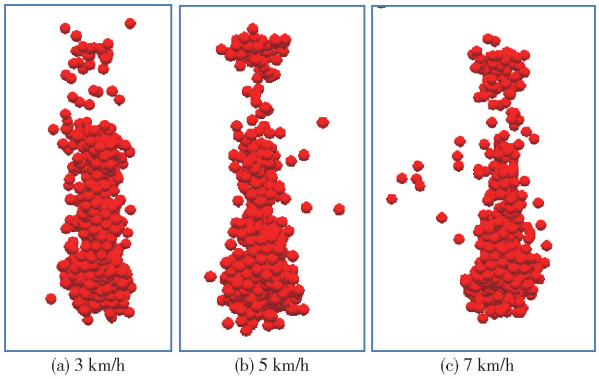


图 10 施肥管静态排肥量

Fig. 10 Static fertilizer discharge from fertilizer pipe

肥料纵面分布,如图 11、12 所示,不同的工作速度和作业深度导致肥料的横向扩散距离不同,工作速度和作业深度会影响肥料的均匀分布,因此本文将选取工作速度和作业深度 2 个因素研究各层肥量均匀性变异系数的变化规律。



(a) 3 km/h (b) 5 km/h (c) 7 km/h

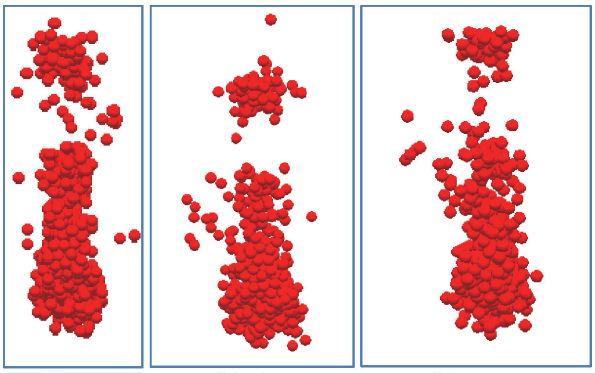
图 11 不同工作速度肥料分布

Fig. 11 Distribution of fertilizers at different working speeds

3.3 不同土层肥量均匀性变异系数测量

在实际生产中,同一土层中肥量的均匀性会影响到作物生长,从而影响产量[30-32],因此取肥量均匀性变异系数作为本试验的衡量指标,每层肥量取连续 30 段,每段长 10 cm,分别计算每段肥料颗粒数目 x_i,每层肥量均匀性变异系数 y_j 为

$$y_j=\sum_{i=1}^{30}\frac{\sqrt{\frac{1}{30-1}(x_i-\bar{x})^2}}{\bar{x}} \tag{15}$$



(a) 21 cm　(b) 25 cm　(c) 29 cm

图 12　不同作业深度肥料分布

Fig. 12　Distribution of fertilizers at different working depths

式中　$\bar{x}$——每层样本的平均颗粒数，个

3.4　参数回归正交试验设计

结合正交试验的设计原理，选取工作速度 x_1 和作业深度 x_2 为试验因素，根据实际情况，工作速度为 3 ~ 7 km/h，作业深度为 21 ~ 29 cm，试验因素编码如表 3 所示。

表 3　试验因素编码

Tab. 3　Horizontal coding of test factors

编码	因素	
	工作速度 x_1/(km·h^{-1})	作业深度 x_2/cm
−1.414	3.00	21.00
−1	3.59	22.17
0	5.00	25.00
1	6.41	27.83
1.414	7.00	29.00

3.5　仿真试验结果

根据二次回归通用旋转组合设计并进行 13 组试验，按照试验方法分别进行试验，得到所需样本，借助 EDEM 的 Grid Bin Group 得到样本容量，计算出各组试验肥量均匀性变异系数。试验方案和结果如表 4 所示，表中 X_1、X_2 为编码值。

通过对试验数据的处理，肥量均匀性变异系数方差分析结果如表 5 ~ 8 所示。

表 4　试验方案及结果

Tab. 4　Test plan and results

试验序号	因素		0 ~ 5 cm 土层肥量均匀性变异系数	5 ~ 10 cm 土层肥量均匀性变异系数	10 ~ 15 cm 土层肥量均匀性变异系数	15 ~ 20 cm 土层肥量均匀性变异系数
	工作速度 X_1	作业深度 X_2	y_1/%	y_2/%	y_3/%	y_4/%
1	1	1	49.97	34.02	30.56	25.75
2	0	0	39.82	25.37	20.68	15.42
3	0	0	38.05	24.78	19.53	14.01
4	0	0	39.81	25.77	20.84	15.03
5	1	−1	42.96	24.75	24.05	18.45
6	−1	1	41.34	27.06	22.14	16.78
7	−1.414	0	39.89	25.58	20.46	15.02
8	0	0	40.19	25.09	20.51	14.65
9	0	0	40.47	27.11	21.93	16.27
10	0	−1.414	43.42	28.25	24.27	18.64
11	0	1.414	45.38	30.24	26.37	20.21
12	−1	−1	41.27	27.06	22.85	16.69
13	1.414	0	46.52	31.96	26.28	21.79

表 5　0 ~ 5 cm 土层肥量均匀性变异系数方差分析

Tab. 5　Variance analysis of variation coefficient of fertilizer uniformity in 0 ~ 5 cm soil layer

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	197.74	5	39.55	10.95	0.003 3 **
x_1	102.78	1	102.78	28.44	0.001 1 **
x_2	12.13	1	12.13	3.36	0.109 6
x_1x_2	12.04	1	12.04	3.33	0.110 7
x_1^2	17.21	1	17.21	4.76	0.065 4
x_2^2	60.89	1	60.89	16.85	0.004 5 **
残差	25.29	7	3.61		
失拟项	11.82	3	3.94	1.17	0.425 4
纯误差	13.48	4	3.37		
总和	223.03	12			

注：** 表示极显著($P<0.01$)，下同。

由表 5 ~ 8 拟合得到各因素影响肥量均匀性变异系数 y_i 关于工作速度 x_1 和作业深度 x_2 的回归方程为

$$y_1 = 38.92 + 3.58X_1 + 1.23X_2 + 1.74X_1X_2 + 1.57X_1^2 + 2.96X_2^2 \quad (16)$$

$$y_2 = 25.62 + 1.71X_1 + 1.51X_2 + 2.32X_1X_2 + 1.37X_1^2 + 1.62X_2^2 \quad (17)$$

$$y_3 = 20.70 + 2.23X_1 + 1.10X_2 + 1.81X_1X_2 + 1.47X_1^2 + 2.45X_2^2 \quad (18)$$

$$y_4 = 15.08 + 2.53X_1 + 1.20X_2 + 1.80X_1X_2 + 1.78X_1^2 + 2.30X_2^2 \quad (19)$$

根据回归方程式(16) ~ (19)，利用 Design-

表 6 5~10 cm 土层肥量均匀性变异系数方差分析

Tab. 6 Variance analysis of variation coefficient of fertilizer uniformity in 5~10 cm soil layer

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	90.90	5	18.18	10.54	0.003 7 **
x_1	23.39	1	23.39	13.56	0.007 8 **
x_2	18.25	1	18.25	10.58	0.014 0 *
x_1x_2	21.48	1	21.48	12.45	0.009 6 **
x_1^2	13.21	1	13.21	7.66	0.027 8 *
x_2^2	18.17	1	18.17	10.53	0.014 1 *
残差	12.08	7	1.73		
失拟项	3.29	3	2.93	3.56	0.125 9
纯误差	3.29	4	0.82		
总和	102.98	12			

注：* 表示显著($0.01 \leqslant P \leqslant 0.05$)，下同。

表 7 10~15 cm 土层肥量均匀性变异系数方差分析

Tab. 7 Variance analysis of variation coefficient of fertilizer uniformity in 10~15 cm soil layer

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	113.64	5	22.73	32.97	0.000 1 **
x_1	39.82	1	39.82	57.77	0.000 1 **
x_2	9.61	1	9.61	13.95	0.007 3 **
x_1x_2	13.03	1	13.03	18.91	0.008 4 **
x_1^2	15.11	1	15.11	21.92	0.003 4 **
x_2^2	41.80	1	41.80	60.64	0.002 3 **
残差	4.83	7	0.69		
失拟项	1.89	3	0.63	0.86	0.531 9
纯误差	2.94	4	0.73		
总和	118.47	12			

表 8 15~20 cm 土层肥量均匀性变异系数方差分析

Tab. 8 Variance analysis of variation coefficient of fertilizer uniformity in 15~20 cm soil layer

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	128.56	5	25.71	26.06	0.000 2 **
x_1	51.52	1	51.52	52.22	0.000 2 **
x_2	11.54	1	11.54	11.70	0.011 1 *
x_1x_2	13.00	1	13.00	13.17	0.008 4 **
x_1^2	22.27	1	22.27	22.57	0.002 1 **
x_2^2	36.87	1	36.87	37.37	0.000 5 **
残差	6.91	7	0.99		
失拟项	4.04	3	1.35	1.88	0.273 6
纯误差	2.86	4	0.72		
总和	135.47	12			

Expert 软件绘制出工作速度与作业深度对肥量均匀性变异系数的响应曲面，如图 13 所示。根据响应曲面图 13 与表 5~8 可知，0~5 cm 土层肥量均匀性变异系数较大，原因是由于工作中上方土壤回流滞后严重，肥料颗粒不能及时定位，因此变异系数较大；5~10 cm、10~15 cm、15~20 cm 土层肥量均匀性变异系数变化趋势基本相同，但由上层到下层肥量均匀性变异系数依次减小，原因是同样受到土壤回流滞后的影响，随着深度增加，回流滞后的影响逐渐减小。通过方差分析可以看出，作业深度对肥量均匀性变异系数的影响比前进速度对肥量均匀性变异系数的影响小。当工作速度一定时，肥量均匀性变异系数随着入土深度增加而增大，当作业深度一定时，肥量均匀性变异系数随着工作速度的增加先增大后减小，在两者交互的情况下，肥量均匀性变异系数有明显的上升趋势。

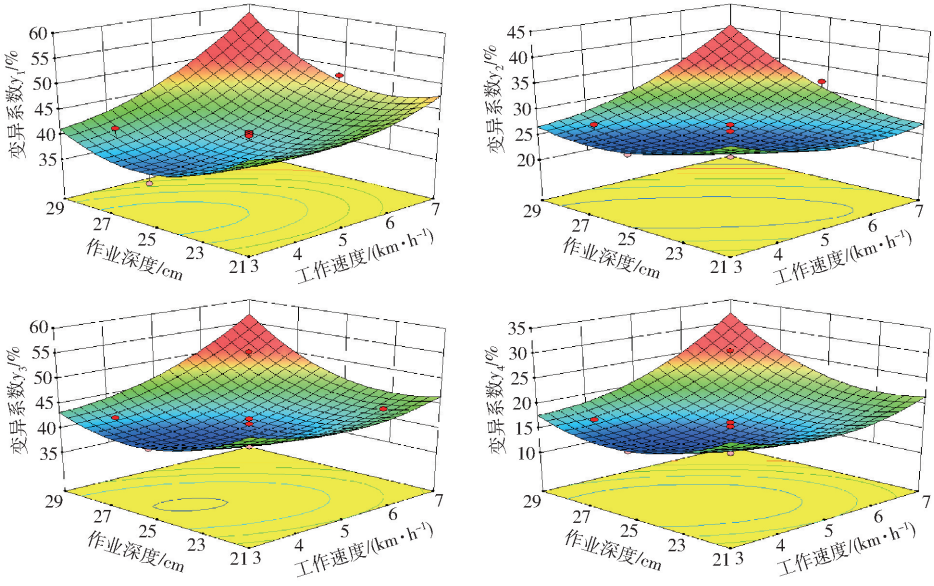


图 13 各因素交互作用对总肥量均匀性变异系数的响应曲面

Fig. 13 Response surface plots of interaction of various factors on coefficient of variation of fertilizer uniformity

3.6 参数的优化求解

利用 Design-Expert 软件对响应面进行优化求解处理，得到最优的工作参数组合为：工作速度 3.81 m/s，作业深度 25.22 cm，0~5 cm、5~10 cm、

10 ~ 15 cm 和15 ~ 20 cm 土层的肥量均匀性变异系数分别为 37.02%、25.13%、19.84%、14.19%，符合 JB/T 6274.1—2013《谷物播种机》的行业标准，设计可靠。

4　整机设计

该机具在播种开沟器前端安装了带状深松全层施肥装置，如图 14 所示。该装置在对播种带土壤深松的同时进行全层定点施肥，同时设置在该装置两侧的圆盘盘配合深松铲将苗带土壤进行整备，并经过后置的碎土机构碎土镇压，玉米精密播种单元在经过深松整备的清洁苗带上进行精密播种，从而实现带状深松全程施肥精密播种作业。

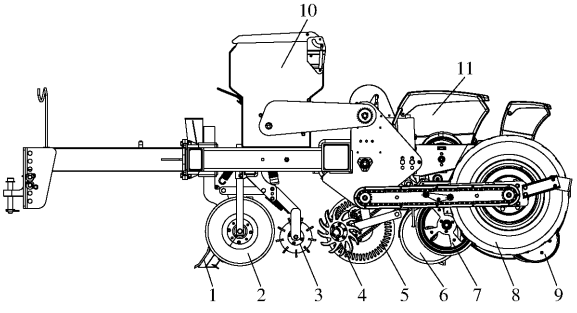


图 14　带状免耕播种机结构示意图

Fig. 14　Schematic diagram of belt-shaped no-tillage planter

1. 深松全层施肥铲　2. 整地圆盘　3. 碎土轮　4. 拨草轮　5. 切茬圆盘　6. 双圆盘开沟器　7. 限深轮　8. 地轮　9. 覆土镇压器　10. 肥箱　11. 种箱

5　田间试验

为进一步验证此深松全层施肥铲离散元仿真试验的可靠性，开展田间试验进行验证。

结合仿真试验结果，重新设计制作试验部件，作业深度为 25 cm，施肥位置 0 ~ 20 cm，试验于 2021 年 4 月 28 日在吉林省扶余市试验地进行，以 John Deere 3B - 604 型拖拉机为动力，待测部件搭载在带状免耕播种机上，如图 15 所示。前茬作物为玉米，常规免耕播种；玉米种植行距 60 cm，株距 26 cm，田间土壤平均含水率 23%，秸秆覆盖率 60%，玉米品种为能大 115，化肥为保利复合肥（N 15%、P_2O_5 15%、K_2O 15%）。

以最优参数（圆整为工作速度 4 m/s，作业深度 25 cm）进行试验。由于田间肥料分布难以采集，本试验采取作业完成后剖开土壤截面，记录各层的肥料颗粒数目，如图 16 所示。



图 15　部件搭载免耕播种机

Fig. 15　Components equipped with no-tillage planter



图 16　施肥剖面图

Fig. 16　Fertilization profile

试验计算得 0 ~ 5 cm、5 ~ 10 cm、10 ~ 15 cm 和 15 ~ 20 cm 土层的肥量均匀性变异系数分别为 41.05%、24.11%、20.31%、14.63%，试验值与理论优化值相对误差分别为 10.89%、4.06%、2.37%、3.10%。

6　结论

（1）为提高化肥利用率，以及适应作物不同生育期肥料需求，本文设计了一种玉米深松全层施肥铲，可将肥料按照上少下多的方式施入土壤中，且能够疏松深层土壤，为种子萌发提供良好的生长种床。

（2）通过二次回归通用旋转组合试验得出工作速度和作业深度与肥量均匀性变异系数的回归方程，响应面图分析表明，作业深度对变异系数的影响比工作速度对变异系数的影响小，在两者交互的作用下，肥量均匀性变异系数有明显的上升趋势。

（3）通过 Design-Expert 软件对响应面进行优化求解，田间试验表明，本设计在最优的工作参数组合工作速度 4 m/s、作业深度 25 cm 下，具有最佳施肥性能，各层肥量均匀性变异系数分别为 41.05%、24.11%、20.31%、14.63%。

参　考　文　献

[1]　王洪预. 东北春玉米不同种植模式比较研究[D]. 长春：吉林大学，2019.
WANG Hongyu. Comparative study on planting mode of spring maize in Northeast of China[D]. Changchun：Jilin University，2019.（in Chinese）

[2]　张旭东. 覆膜种植和施肥对半干旱地区资源高效利用及玉米生产持续性的影响机制[D]. 杨凌：西北农林科技大学，

2019.
ZHANG Xundong. Influencing mechanism of mulch planting and fertilization on the efficient utilization of resources and maize production sustainability in semi-arid areas[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019. (in Chinese)
[3] 祝清震,武广伟,安晓飞,等. 基肥定深施用装置排肥口位置与施肥深度关系模型[J]. 农业工程学报,2018,34(13):8-17.
ZHU Qingzhen, WU Guangwei, AN Xiaofei, et al. Relationship model of fertilizer outlet location and fertilizer application depth of depth-fixed application device of base-fertilizer[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(13): 8-17. (in Chinese)
[4] 吴景贵,任成礼,代静玉,等. 玉米一次性分层施肥技术研究[J]. 土壤肥料,1995(1):29-31.
WU Jinggui, REN Chengli, DAI Jingyu, et al. Study on one-time layered fertilization technology for maize[J]. Soil Fertilizer, 1995(1):29-31. (in Chinese)
[5] 尹博,张晓辉,冯海明. 浅谈小麦深松分层施肥精播机械化技术的推广应用——以山东省日照市为例[J]. 中国农机化学报,2016,37(8):242-247.
YIN Bo, ZHANG Xiaohui, FENG Haiming. Popularization and application of the mechanized technology of deep loosening and layered fertilization in wheat—taking Rizhao City, Shandong Province as an example[J]. Journal of China Agricultural Mechanization, 2016, 37(8):242-247. (in Chinese)
[6] 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)
[7] 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)
[8] 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)
[9] 胡红. 玉米行间定点扎穴深施追肥机设计与研究[D]. 北京:中国农业大学,2017.
HU Hong. Design and research of targeted hole-pricking and deep-application fertilizer applicator between maize rows[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. (in Chinese)
[10] 王云霞,梁志杰,崔涛,等. 玉米分层施肥器结构设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(增刊):163-169.
WANG Yunxia, LIANG Zhijie, CUI Tao, et al. Design and experiment of layered fertilization device for corn[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 163-169. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=2016s025&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.025. (in Chinese)
[11] 丁尚鹏. 基于离散元法的肥料调比与分层施肥仿真及试验[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2018.
DING Shangpeng. Simulation and experiment of fertilizer adjustment ratio and layered fertilization based on discrete element method[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018. (in Chinese)
[12] 刘进宝,汤智辉,郑炫,等. 对行开沟分层深施肥铲的设计与试验[J]. 甘肃农业大学学报,2021,56(2):169-176,186.
LIU Jinbao, TANG Zhihui, ZHENG Xuan, et al. Design and experiment of deep fertilizing shovel for furrow and layering[J]. Journal of Gansu Agriculture University, 2021, 56(2):169-176,186. (in Chinese)
[13] 周华敏. 脲醛与尿素不同配比对主要粮食作物生长及土壤养分的影响[D]. 泰安:山东农业大学,2018.
ZHOU Huamin. Effects of urea-formaldehyed and urea in diffferent proportions on growth of main grain crops and soil nutrients[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2018. (in Chinese)
[14] 张鹏,郭志军,金鑫,等. 仿生变曲率深松铲柄减阻设计与试验[J/OL]. 吉林大学学报(工学版):1-9[2021-08-30].
ZHANG Peng, GUO Zhijun, JIN Xin, et al. Design and experiment of bionic subsoiler with variable curvature share shaft[J/OL]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition):1-9[2021-08-30]. https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb20201003. (in Chinese)
[15] HARRISON H P. Soil reacting forces for a bentlegplow[J]. Transactions of the ASAE, 1988, 31(1):47-51.
[16] HARRISON H P. Soil reacting forces for two tapered bentlegplows[J]. Transactions of the ASAE, 1990, 33(5):1473-1476.
[17] BANDALAN E P. SALOKHE V M, GUPATA C P, et al. Performance of an ascillating subsoiler in breaking a hardpan[J]. Journal of Terramechanics, 1999, 36(1):117-125.
[18] 王学振,岳斌,高喜杰,等. 深松铲不同翼铲安装高度时土壤扰动行为仿真与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(10):124-136.
WANG Xuezhen, YUE Bin, GAO Xijie, et al. Discrete element simulations and experiments of disturbance behavior as affected by mounting height of subsoiler's wing[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10):124-136. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20181014&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.014. (in Chinese)
[19] 余泳昌,刘文艺,赵迎芳,等. 立柱式深松铲受力数学模型及试验分析[J]. 农业工程学报,2007,23(6):109-113.

YU Yongchang, LIU Wenyi, ZHAO Yingfang, et al. Force mathematical model and examination analysis of the column subsoiler[J]. Transactions of the CSAE, 2007,23(6): 109 - 113. (in Chinese)

[20] 周桂霞,汪春,张伟,等. 基于二次正交旋转回归试验的深松铲关键参数建模[J]. 农业机械学报,2006,37(10):86 - 89.
ZHOU Guixia, WANG Chun, ZHANG Wei, et al. Mathematic model of deep-shovel with critical structure parameter based on two times orthogonal rotational regressive tests[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006,37(10):86 - 89. (in Chinese)

[21] 郑侃,何进,李洪文,等. 基于离散元深松土壤模型的折线破土刃深松铲研究[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(9):62 - 72.
ZHENG Kan, HE Jin, LI Hongwen, etal. Research on polyline soil breaking blade subsoiler based on subsoiling soil model using discrete element method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(9):62 - 72. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20160910&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.010. (in Chinese)

[22] 赵金,张晋国. 玉米深松全层施肥精量播种机关键部件的设计[J]. 农机化研究,2012,34(5):83 - 85,90.
ZHANG Jin, ZHANG Jinguo. Design and implementation of land flatness evaluation system based on laser sensor[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012,34(5):83 - 85,90. (in Chinese)

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

[24] 高博. 重庆市典型土壤耕作力学特性及深松性能研究[D]. 重庆:西南大学,2017.
GAO Bo. Study on tillage mechanics of typical soil and subsoiling performance in Chongqing[D]. Chongqing: Southwest University, 2017. (in Chinese)

[25] 李博. 基于离散元法的深松铲减阻及耕作效果研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2016.
LI Bo. Research on drag reduction and tillage effect of subsoiling shovel based on discrete element method[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016. (in Chinese)

[26] 黄玉祥,杭程光,苑梦婵,等. 深松土壤扰动行为的离散元仿真与试验[J/0L]. 农业机械学报,2016,47(7):80 - 88.
HUANG Yuxiang, HANG Chengguang, YUAN Mengchan, et al. Element simulation and experiment on disturbance behavior of subsoiling[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(7):80 - 88. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20160712&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.012. (in Chinese)

[27] 赵淑红,刘汉朋,杨超,等. 玉米秸秆还田交互式分层深松铲设计与离散元仿真[J/OL]. 农业机械学报,2021,52(3):75 - 87.
ZHAO Shuhong, LIU Hanpeng, YANG Chao, et al. Design and discrete element simulation of interactive layered subsoiler with maize straw returned to field[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(3):75 - 87. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20210308&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.03.008. (in Chinese)

[28] 刘晓鹏,张青松,刘立超,等. 基于微分几何与 EDEM 的船型开畦沟装置触土曲面优化[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(8):59 - 69.
LIU Xiaopeng, ZHANG Qingsong, LIU Lichao, et al. Optimization of ship type ditching system based on differential geometry and EDEM simulation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(8):59 - 69. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20190807&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08.007. (in Chinese)

[29] 石金杉,齐浩凯,孙富才,等. 深松防堵分层施肥铲优化设计与试验[J]. 河北农业大学学报,2020,43(5):96 - 102.
SHI Jinbin, QI Haokai, SUN Fucai, et al. Optimization design and experiment of subsoiling and anti-blocking layered fertilizer shovel[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2020,43(5):96 - 102. (in Chinese)

[30] 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/OL]. 农业机械学报,2020,51(增刊 1):175 - 185.
YANG Qinglu, HUANG Xingyuan, WANG Qingjie, et al. Structure optimization and experiment of corn layered fertilization device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(Supp. 1):175 - 185. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 2020s120&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S1.020. (in Chinese)

[31] 王宁. 灌水方式和施肥量对青贮玉米生长和水氮利用效率的影响[D]. 保定:河北农业大学,2020.
WANG Ning. Effcets of irrigation and fertilization on the growth and water and nitrogen use efficiency of silage corn[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2020. (in Chinese)

[32] 方瑾. 不同覆盖耕作方式下玉米生长、土壤水温及无机氮变化的研究[D]. 成都:四川农业大学,2013.
FANG Jin. The study on maize growth under different mulching tillage and the soil moisture and temperature and inorganic nitrogen changes[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2013. (in Chinese)