doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.10.006

基于气力分配的不同肥料分层深施装置设计与试验

杨庆璐[1,2]　李洪文[1,2]　何　进[1,2]　卢彩云[1,2]　王英博[1,2]　王庆杰[1,2]
(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学现代农业装备优化设计北京市重点实验室, 北京 100083)

摘要: 根据东北黑土地玉米免少耕播种与施肥需求,提出一种普通复合肥与缓释肥分层施用的方法,并设计了一种分层深施肥装置,通过理论分析与参数计算确定了分层深施肥装置关键部件的结构和基本工作参数。分析确定了影响分层深施肥装置施肥作业效果的主要因素,选取翼铲向后和向下倾斜角、作业速度为试验因素,以各层施肥量偏差稳定性系数为试验指标,利用计算流体动力学与离散元耦合仿真的方法,进行二次正交旋转组合仿真试验,建立了试验指标与影响因素的回归模型。通过对试验结果的拟合和优化分析,得到了翼铲向后和向下倾斜角分别为 58.11°和 52.84°、作业速度为 3.38 km/h 时,上、中、下 3 层施肥量偏差稳定性系数分别为 8.50%、6.54% 和 9.10%,以优化得到的参数进行了装置加工和田间试验,试验结果与仿真试验优化结果相吻合,满足设计要求。

关键词: 分层施肥; 玉米; 深施肥; 优化设计; 气力分配
中图分类号: S224.21　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2021)10-0061-13　　**OSID**:

Design and Experiment of Layered Deep Fertilization Device of Different Fertilizers Based on Pneumatic Distribution

YANG Qinglu[1,2]　LI Hongwen[1,2]　HE Jin[1,2]　LU Caiyun[1,2]　WANG Yingbo[1,2]　WANG Qingjie[1,2]
(1. *College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *Beijing Key Laboratory of Design and Optimization in Modern Agricultural Equipment*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Northeast black soil region is an important commercial grain production base in China, which plays an important role in ensuring national food security and promoting national economic development. Protecting the security of arable land resources in the black soil region of Northeast China is of great significance to maintaining the bottom line of the strategy of "basically self-sufficiency in grains and security of rations". However, the black-soil cultivated land has begun to degenerate significantly, and soil fertility has been declining year by year. In addition, due to long-term over-cultivation, high-intensity output and lack of protective measures, some serious problems, including black soil layer became thinner, organic matter decreased sharply, and plow bottom thickened were observed. All the aforementioned problems seriously affected the sustainable development of agriculture in the black soil area in Northeast China, since the large-scale reclamation of black soil. Therefore, changing the farming system and transforming conventional reclamation into conservation tillage was the key to solve the degradation of cultivated land quality in the black soil areas of Northeast China. A layered deep fertilization device combining ordinary compound fertilizer and slow-release fertilizer application method was proposed according to the demand of no-tillage or less-tillage sowing and fertilization of corn in the black soil region of Northeast China. Moreover, the problems of single type of fertilizer applied and non-obviously effect of existing layered fertilization devices were resolved under layered deep fertilization approach. The structure and working parameters were obtained through theoretical analysis and parameter's calculation. Main factors affecting the fertilization performance of the layered deep fertilization device were analyzed and determined. The backward and downward tilt angle of the wing

收稿日期: 2021-07-31　修回日期: 2021-08-20
基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200600)、中央高校基本科研业务费专项资金项目(2021TC011)和中国农业大学 2115 人才工程项目
作者简介: 杨庆璐(1990—),男,博士生,主要从事保护性耕作技术与装备研究,E-mail: yangqinglu@cau.edu.cn
通信作者: 王庆杰(1979—),男,教授,博士生导师,主要从事保护性耕作技术与装备研究,E-mail: wangqingjie@cau.edu.cn

shovel, and forward speed of fertilization were selected as the test factors, and the amount of fertilizer deviation stability coefficient in each layer was taken as the test index. A quadratic-regression orthogonal combination simulation test was carried out by the coupling simulation method of discrete element method (DEM) and computational fluid dynamics (CFD). A regression model between test index and influencing factors was established. Through the fitting and optimization analysis of the results, it was obtained when the backward and downward tilt angle of the wing shovel and the speed of fertilization was 58.11°, 52.84°and 3.38 km/h, the corresponding fertilization amount deviation stability coefficient of the upper, middle and lower layers was 8.50%, 6.54% and 9.10%, respectively. The layered deep fertilization device was processed with the optimized parameters and verified in field test. The results showed that field experiment had a similar tendency with the simulation test under the optimized parameters, which can meet the fertilization requirements.

Key words: layered fertilization; corn; deep fertilization; optimization design; pneumatic distribution

0 引言

东北黑土区是我国重要的商品粮生产基地,在保障国家粮食安全和促进国民经济发展中具有重要作用[1]。保护东北黑土区耕地资源安全,对于守住“谷物基本自给、口粮绝对安全”战略底线具有重要意义[2]。但自东北黑土大规模开垦以来,由于长期过度垦殖、高强度产出和保护性措施缺失,导致黑土耕地开始明显退化,土壤肥力逐年下降[3],黑土层明显变薄、有机质锐减、犁底层增厚,严重影响了东北黑土区农业可持续发展[4-5]。解决东北黑土区耕地质量退化的关键是变革耕作制度,将掠夺式开垦转变为保护性耕作。

玉米是我国重要的粮食作物,东北黑土区播种面积约占我国玉米种植总面积的30%[6]。玉米是喜肥作物,生育期长、产量高、需肥量大,合理施肥对提高玉米的产量和减少环境污染具有关键性作用[7-9]。不合理的施肥会造成化肥大量挥发、流失,利用率降低,并对环境、土壤产生危害[10-11]。

目前在东北地区玉米施肥仍以传统分期施肥为主,一般采用基肥和追肥相结合的方式,不仅费时、费力,而且大部分农民根据传统经验追肥,浅施、撒施现象普遍,易造成肥料淋溶和挥发,降低肥料利用率[12-13]。研究表明,合理的深松和肥料深施能改善土壤理化性质,促进作物养分吸收和根系生长,提高肥料利用率,增加作物产量[14-16]。因此相关专家学者将深松和深施肥相结合,提出了机械化分层施肥技术,即利用施肥机具将作物所需肥料一次性按比例分层施入土壤,后期不再追肥,能有效提高肥料利用率,同时减少施肥作业环节,节本增效[17-18]。相关研究表明,分层施肥能够促进作物根系生长,增强养分吸收能力,增加作物产量,同时延长肥效,减少肥料流失[19-20]。黄幸媛[21]通过研究发现当分层施肥的上、中、下3层的施肥量比例为3∶3∶4时,既不会造成“烧苗”,又能保证玉米的不同生长阶段养分的供应,从而获得更高的产量和经济效益。分层施肥机具研究方面,刘进宝等[22]设计了一种对行开沟分层深施肥铲,上下两层施肥口前后分置,分别连接不同的排肥盒,实现了两层肥量独立可调。顿国强等[23]设计了一种由主开沟器及浅层尾管组成的分层施肥开沟器,通过浅层尾管的位置调节,实现分层施肥位置的横向控制。杨然兵等[24]结合曲面排肥与V形防堵结构,设计了一种深度可调的分层施肥开沟器,可在两行种薯块中间进行开沟施肥作业,利用开沟器自动回土实现肥料的覆土掩埋作业。

作物对肥料的利用不仅与施肥技术相关,与肥料种类也有很大关系。传统普通复合肥易溶解、肥效快,施用后能立即被作物吸收利用,但肥效持续时间短,大量施肥后,作物吸收不及时,会造成养分流失,破坏生态环境[25]。缓释肥肥效持久稳定,在作物生长期能持续提供养分,且不易导致土壤盐分过高而“烧苗”[26],但由于养分释放缓慢,不能在短时间内提供大量养分。目前相关学者对分层施肥技术的研究,大多集中于单一种类肥料的施用,难以达到最佳的施肥效果。目前东北地区实行保护性耕作后,作物秸秆覆盖还田,传统的追肥作业难以实现,因此本文根据东北黑土地玉米免少耕播种与施肥需求,提出一种普通复合肥与缓释肥分层施用的方法,并设计一种分层深施肥装置,利用计算流体动力学与离散元耦合仿真的方法,对装置进行参数优化,以期实现普通复合肥与缓释肥的分层施用,并形成明显稳定的分层,为气力式排肥系统的设计与优化提供技术参考和理论支撑。

1 气力式排肥系统结构与工作原理

1.1 总体结构

气力式排肥系统主要由分层深施肥装置、肥料均匀分配装置、肥料变比例分配装置、气-肥分离装置、供肥装置、气-肥混合装置、高压风机和输送管道等组成[27]。其中肥料分配装置分为肥料均匀分配

装置和肥料变比例分配装置，包括肥料均匀分配器、肥料变比例分配器、波纹管、排肥管等，供肥装置分为 2 套，分别对应肥料均匀分配装置和肥料变比例分配装置，包括肥箱、排肥电机、外槽轮排肥器等。气力式排肥系统结构如图 1 所示。

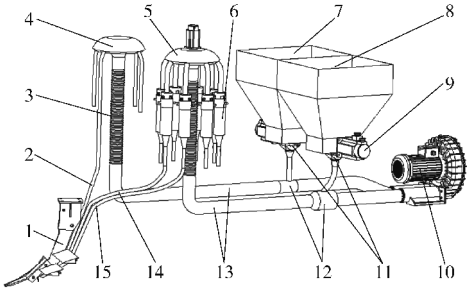


图 1　气力式排肥系统结构示意图

Fig. 1　Structural diagram of pneumatic fertilization system

1. 分层深施肥装置　2. 上层肥料排肥管　3. 波纹管　4. 肥料均匀分配器　5. 肥料变比例分配器　6. 气-肥分离装置　7. 肥箱Ⅰ　8. 肥箱Ⅱ　9. 排肥电机　10. 高压风机　11. 外槽轮排肥器　12. 气-肥混合装置　13. 气-肥输送管道　14. 中层肥料排肥管　15. 下层肥料排肥管

高压风机通过气流输送管道，分别与 2 个气-肥混合装置的进风口相连；2 个外槽轮排肥器分别由 2 个排肥电机带动，出口与气-肥混合装置进肥口相连；2 个气-肥混合装置出口经气-肥输送管道与2 个波纹管相连接；肥料均匀分配器入口与波纹管上端相连接，出口经排肥管与分层深施肥铲上层排肥管相连接；肥料变比例分配器入口与波纹管上端相连接，相邻两出口经气-肥分离装置和排肥管，分别与分层深施肥铲中层和下层排肥管相连接。

气力式排肥系统利用高速气流将肥料分配并输送到分层深施肥铲各排肥口，分层深施肥铲将肥料分层施入土壤。工作过程主要分为供肥、混肥、分肥、排肥 4 个阶段，系统工作时，高压风机产生高速气流，经气流输送管道分别进入 2 个气-肥混合装置；2 个肥箱分别对应 2 个肥料分配装置，肥箱Ⅰ对应肥料均匀分配装置，肥箱Ⅱ对应肥料变比例分配装置，2 个肥箱中肥料种类不同，肥箱Ⅰ中放置普通复合肥，易溶解便于作物吸收利用，肥箱Ⅱ中放置缓释肥料，肥效长可在作物生长期持续提供养分；不同种类肥料分别从对应的外槽轮排肥器定量排出，依靠自身重力和气-肥混合装置产生的压差进入气-肥混合装置混合腔；气-肥混合装置利用文丘里效应，将高速气流与肥料混合，形成气-肥混合流；气-肥混合流经气-肥输送管道进入波纹管，在波纹管的作用下，气流与肥料均匀混合，形成均匀的气-肥混合流；肥料均匀分配器将气-肥混合流均匀分配至每一出口[28]，经排肥管从分层深施肥铲上层排肥口排出；肥料变比例分配器将相邻两出口的肥料按预定比例分配[27,29]，经气-肥分离装置和排肥管，分别从分层深施肥铲中层和下层排肥口排出；气-肥分离装置将分配完成后的气-肥混合流中的部分气流排出系统，降低分层深施肥铲排肥口处气流速度，减少肥料弹跳，提高分层效果；分层深施肥铲切开土壤，将肥料分层施入土壤中，且上层肥料为普通复合肥，中层和下层肥料为缓释肥，实现普通复合肥和缓释肥分层施用。

1.2　分层深施肥肥料分布

分层深施肥作业是将玉米整个生长周期所需的肥料，一次性按需分层施入土壤中，且肥料在土壤中呈半包围种子的分布状态，上、中、下 3 层肥料呈“倒三角形”分布，与玉米根系形状相吻合，更利于植株对养分侧吸收，提高肥料利用率[21,30]。上层和中层肥料分施两侧，避免“烧种”的同时，更利于玉米根系吸收。上层肥料为普通复合肥，可在短时间内为玉米生长前期提供充足的养分；玉米生长的前期根系不发达，无法触及中层和下层肥料，即在玉米生长前期中层和下层肥料还未开始为植株提供养分，但在玉米生长前期这个阶段，中层和下层的肥料已经在播种同时施入土壤中，为避免肥料养分的流失，同时避免在玉米生长后期“脱肥”，因此中层和下层所施肥料为缓释肥，能够在玉米生长的中期和后期为植株提供稳定充足的养分，增加玉米产量。玉米播种深度 H_1 为 30 ~ 50 mm，为避免“烧种”，同时考虑到分层深施肥铲的结构布置，上层肥料距离种子的横向距离 S_1 确定为 120 mm，距离地表的深度 H_2 为 80 ~ 100 mm，上层肥料两侧分施，两侧肥料以种子所在的竖直垂线左右对称。中层肥料距离上层肥料的深度 H_3 为 100 mm，即距离地表的深度为 180 ~ 200 mm，与种子的横向距离 S_2 为 80 mm，中层肥料也为两侧分施，两侧肥料以种子所在的竖直垂线左右对称。下层肥料距离中层肥料的深度 H_4 为 100 mm，即距离地表的深度为 280 ~ 300 mm，位于种子正下方。3 层肥料呈半包围种子的分布状态，如图 2 所示。

1.3　分层深施肥装置结构及工作原理

分层深施肥装置是实现肥料分层施用的关键部件，主要由深松铲和肥料分层施肥器组成，其中深松铲包括铲尖、铲柄和安装座等部件；肥料分层施肥器包括上层、中层和下层排肥管，上层肥料左右两侧翼铲和排肥口，中层肥料左右翼铲和排肥口，下层肥料排肥口，上层和中层肥料 Y 形分配器，挡土板等部件，其结构如图 3 所示。

肥料均匀分配装置出口与分层深施肥装置的上

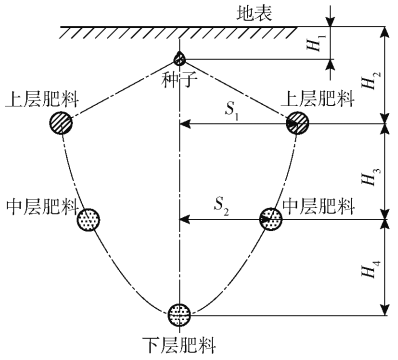
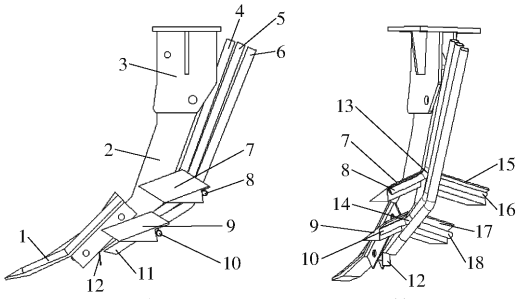


图 2 分层深施肥的肥料分布示意图

Fig. 2 Schematic of fertilizer distribution for layered deep fertilization



(a) 左视图 (b) 轴测图

图 3 分层深施肥装置结构示意图

Fig. 3 Structural diagram of layered deep fertilization device

1. 铲尖 2. 铲柄 3. 安装座 4. 上层肥料排肥管 5. 中层肥料排肥管 6. 下层肥料排肥管 7. 上层肥料左侧翼铲 8. 上层肥料左侧排肥口 9. 中层肥料左侧翼铲 10. 中层肥料左侧排肥口 11. 下层肥料排肥口 12. 挡土板 13. 上层肥料 Y 形分配器 14. 中层肥料 Y 形分配器 15. 上层肥料右侧翼铲 16. 上层肥料右侧排肥口 17. 中层肥料右侧翼铲 18. 中层肥料右侧排肥口

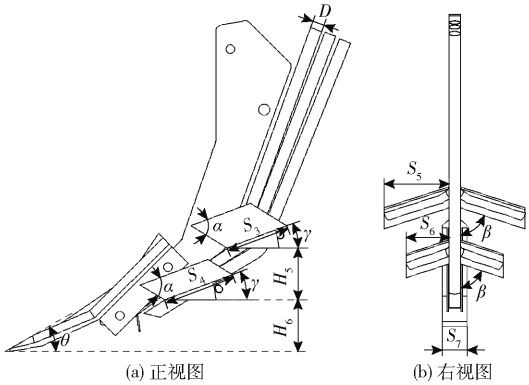
层肥料排肥管相连接;肥料变比例分配装置相邻两出口分别与分层深施肥装置的中层和下层肥料排肥管相连接;上层和中层肥料排肥管在上层和中层肥料翼铲处均连接有 Y 形分配器,将上层和中层排肥管分为左右两侧,侧翼安装在铲柄两侧,将左右两侧排肥口包裹,避免堵塞;下层肥料排肥口位于铲柄正后方,为避免排肥口堵塞,安装有挡土板。为保证肥料顺利排出并降低作业时的阻力,上层和中层肥料翼铲向下、向后有一定的倾斜角度。

作业前,根据玉米分层施肥各层施肥质量比为 3∶3∶4,调整两供肥装置的外槽轮排肥器,使普通复合肥和缓释肥的比例为 3∶7,然后再调整肥料变比例分配器的调节装置,将相邻两出肥口的排肥比例调整为 3∶4,使排肥系统上、中、下 3 层的施肥比例为 3∶3∶4。作业时,铲尖入土,分层深施肥装置随着机具前进到达预定作业深度,排肥系统开始工作,经肥料均匀分配装置分配后的普通复合肥进入分层深施肥装置的上层肥料排肥管,在 Y 形分配器的作用下,肥料被均匀分配至两侧,上层肥料左右两侧翼铲随机具前进,将深松铲铲柄两侧的土壤横向切开,肥料从排肥口排出,排出的肥料落在侧翼划开的沟槽底部,避免肥料落至下层,造成分层不明显。经肥料变比例分配装置分配后的缓释肥进入分层深施肥装置的中层和下层肥料排肥管,中层肥料在 Y 形分配器的作用下,被均匀分配至两侧,经排肥口排出,落入中层肥料侧翼切开的沟槽底部。下层肥料经排肥口排出,落入深松铲剖开的沟槽底部。实现普通复合肥和缓释肥分 3 层施用,且上层和中层肥料两侧分施,3 层肥料形成半包围种子的分布状态。

2 分层深施肥装置设计

2.1 基本参数

分层深施肥装置中深松部件为直铲式深松铲,基本参数如图 4 所示,铲尖宽度 S_7 为 45 mm,铲柄厚度为 20 mm,铲尖入土角 θ 为 23°[31]。肥料分层施肥器排肥管安装在深松铲铲柄后方,3 个排肥管的直径 D 为 20 mm。为保证分层深施肥装置在土壤中前进时的稳定性,使上层和中层肥料左右两侧翼铲入土角 γ 与深松铲铲尖入土角 θ 相等,为 23°,避免因入土角度不同,分层深施肥装置受力不均衡,造成施肥深度不稳定。上层和中层肥料左右两侧翼铲的长度 S_3、S_4 相等,为 110 mm,上层肥料翼铲水平长度 S_5 与上层肥料距种子的横向距离 S_1 相等,为 120 mm,中层肥料翼铲水平长度 S_6 与中层肥料距种子的横向距离 S_2 相等,为 80 mm,上层肥料翼铲与中层肥料翼铲的距离 H_5 与上层肥料距离中层肥料的深度 H_3 相等,为 100 mm,中层肥料翼铲与深松铲铲尖距离 H_6 与中层肥料距离下层肥料的深度 H_4 相等,为 100 mm。上层和中层肥料翼铲安装在深松铲铲柄的两侧,为保证肥料顺利下落,翼铲需向下倾斜角度 β,该角度不仅影响肥料的顺利排出,同时影响施肥装置的回土,进而影响分层深施肥作业效果,是分层深施肥装置关键参数之一,该倾角的两个极限位置是垂直于铲柄和平行于铲柄,因此其理论取值范围



(a) 正视图 (b) 右视图

图 4 分层深施肥装置基本参数

Fig. 4 Basic parameters of layered deep fertilization device

为 0°～90°，根据深松铲柄长度和排肥口距种子的横向距离 S_1、S_2，结合肥料落下需有一定倾角，该倾角应小于肥料堆积角的余角，因此将该取值范围调整为 50°～64°。翼铲在前进过程中需切开土壤，为降低翼铲所受阻力，翼铲向后倾斜一定角度 α，使侧翼倾斜切开土壤，该角度会影响施肥装置的回土时间，进而影响分层深施肥作业效果，是分层深施肥装置关键参数之一，该倾角的理论取值范围为 0°～90°，根据铲柄的宽度和排肥口距种子的横向距离 S_1、S_2，将该取值范围调整为 50°～90°。

2.2　作业过程分析

2.2.1　翼铲切开土壤受力分析

分层施肥装置入土后，上层和中层肥料出口对应的两侧翼铲，随着机具的前进切开土壤，翼铲上部土壤随翼铲前进被向上抬升，肥料从排肥口排出后落入切开的土壤中，翼铲上部土壤自然回落，覆盖肥料，将肥料固定在相应深度。将土壤颗粒视为散粒体，分析翼铲前端切开土壤过程，认为分层深施肥铲在施肥过程中运动为匀速运动，深松和施肥深度稳定。如图 5 所示，翼铲前端土壤受到翼铲的支持力 F_N 以及翼铲对土壤颗粒的摩擦力 μF_N，翼铲向后倾斜角 α 在水平面的投影角度为 α'，作业速度为 v，土壤受到的合力为 F_c，将土壤所受的力在水平方向和竖直方向分解，得到

$$\begin{cases} F_c = F_N\sin\alpha' + \mu F_N\cos\alpha' \\ F_N\cos\alpha' = \mu F_N\sin\alpha' \end{cases} \tag{1}$$

整理得

$$F_c = \frac{F_N}{\sin\alpha'} \tag{2}$$

式中　μ——土壤颗粒与翼铲的摩擦因数

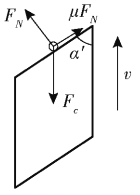


图 5　翼铲前端土壤受力分析示意图

Fig. 5　Force analysis diagram of soil in front of wing shovel

其中，α 的取值范围为 50°～90°，因此 α 在水平面的投影角 α' 小于 90°，由式(2)可知，土壤颗粒受到的合力 F_c 随 α' 的增大而增大，因此，侧翼向后倾斜角 α 会影响翼铲对土壤的切削，进而影响分层施肥作业效果。

2.2.2　翼铲上方土壤运动分析

土壤被翼铲切开后，翼铲上方土壤在翼铲的作用下与翼铲产生相对运动，以正视基准面将翼铲剖开，以翼铲上方的土壤颗粒为研究对象，其运动如图 6 所示，该土壤颗粒的运动微分方程为

$$m\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2} = mg\cos\alpha'' - \mu F_N' \tag{3}$$

$$m\frac{\mathrm{d}^2y}{\mathrm{d}t^2} = 0 \tag{4}$$

其中

$$F_N' = mg\sin\alpha'' \tag{5}$$

整理得

$$\frac{\mathrm{d}v_x}{\mathrm{d}t} = g\cos\alpha'' - \mu g\sin\alpha'' \tag{6}$$

对式(6)求积分，得

$$v_x = -gt\sin\alpha'' - \mu gt\cos\alpha'' + C_1 \tag{7}$$

整理得

$$\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} = -gt\sin\alpha'' - \mu gt\cos\alpha'' + C_1 \tag{8}$$

对式(8)求积分，得

$$x = -gt^2\cos\alpha'' + \mu gt^2\sin\alpha'' + C_1t + C_2 \tag{9}$$

式中　m——土壤颗粒质量，kg

g——重力加速度，m/s^2

α''——翼铲向后倾斜角在正视基准面的投影角，(°)

F_N'——土壤受到翼铲的支持力，N

v_x——土壤颗粒沿 x 轴的速度，m/s

C_1、C_2——在该时刻下土壤颗粒的运动常数

x——土壤沿 x 轴的位移，m

t——时间，s

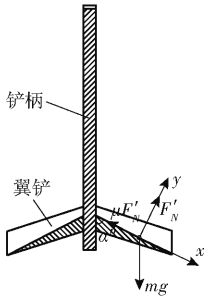


图 6　翼铲上方土壤运动示意图

Fig. 6　Schematic of soil movement above wing shovel

由式(9)可知，土壤颗粒在翼铲上方的运动受到侧翼向后倾斜角 α 在正视基准面的投影角 α'' 的影响，因此，侧翼向后倾斜角 α 会影响土壤颗粒的运动，进而影响分层施肥作业效果。

2.2.3　排肥管内肥料颗粒受力分析

排肥系统中经分配器分配后的肥料进入分层深施肥装置排肥管，上层和中层肥料经 Y 形分配器被分配至两侧，肥料颗粒在自身重力、摩擦力、管壁的支持力以及气流的曳力作用下，运动至排肥口。肥料颗粒在两侧排肥管内的受力情况如图 7 所示。

肥料颗粒在沿斜面方向和垂直于斜面方向的受力方程为

$$\begin{cases} F_r = F_k - \mu_1 F_{1N} + m_1 g\cos\beta \\ F_{1N} = m_1 g\sin\beta \end{cases} \tag{10}$$

整理得

$$F_r = F_k - \mu_1 m_1 g\sin\beta + m_1 g\cos\beta \quad (11)$$

式中 F_r——肥料颗粒受到的合力,N

F_k——气流作用在肥料颗粒上的曳力,N

F_{1N}——肥料颗粒受到管壁的支持力,N

m_1——肥料颗粒质量,kg

μ_1——肥料颗粒与管壁的摩擦因数

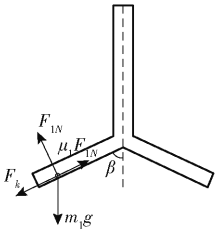


图 7 肥料颗粒在排肥管内受力分析示意图

Fig. 7 Force analysis diagram of fertilizer particles in fertilizer pipe

其中,β 的取值范围为 50°~64°,由式(11)可知,肥料颗粒受到的合力 F_r 随着 β 的增大而减小,因此侧翼向下倾斜角 β 会影响肥料颗粒的运动,进而影响分层施肥作业的效果。

分层深施肥装置作业过程中,各层肥料深度处的回土速度是影响分层施肥作业效果的关键因素之一,分层深施肥装置铲尖和翼铲切开土壤后,土壤依靠自身重力下落,完成回土作业,施肥作业过程中随着分层深施肥装置的前进,被铲尖和翼铲抬升破碎的土壤在惯性的作用下相对于分层施肥装置继续向后运动,当作业速度增大时,破碎的土壤相对于分层施肥装置运动的距离越大,回土时间增大,会造成施肥后回土不及时,影响分层施肥效果,因此施肥作业速度 v 也是影响分层施肥作业效果的重要因素,参照文献[31-32],深松作业速度范围为 2~4 km/h。

综上,影响分层深施肥装置作业效果的因素主要有:翼铲向后倾斜角 α、翼铲向下倾斜角 β 和机具作业速度 v。各因素的取值范围:α 为 50°~90°,β 为 50°~64°,v 为 2~4 km/h。

3 分层深施肥装置仿真试验

分层深施肥装置是气力式排肥系统的关键部件,其分层深施肥作业效果是评价排肥系统性能的关键指标,本研究以各层实际施肥量与理论值的误差来评价分层深施肥作业效果。采用计算流体力学和离散元方法分别建立分层深施肥装置、土壤和肥料颗粒的仿真模型,进行耦合仿真,分析分层深施肥装置的翼铲向后倾斜角 α、翼铲向下倾斜角 β 和机具作业速度 v 对分层深施肥装置作业效果的影响。

3.1 DEM-CFD 耦合仿真模型与参数设定

目前计算流体力学和离散元法耦合仿真已广泛应用于农业工程领域,该方法可准确模拟物料颗粒在复杂受力情况下的运动[33]。选用 ANSYS Fluent 18.2 和 EDEM 2019 软件进行耦合,模拟分析分层深施肥装置的作业过程。

3.1.1 仿真模型建立

利用三维建模软件建立分层深施肥装置三维模型,导入 EDEM 软件中,设置仿真模型中铲尖的材料为 65Mn 钢。在 EDEM 软件中建立土壤模型,选择 Hertz-Mindlin 无粘接触模型作为土壤颗粒间接触模型,建立尺寸(长×宽×高)为 2 000 mm×600 mm×400 mm 的土槽,其中土壤模型由半径 5 mm 的球形颗粒随机排布组成。建立的分层深施肥装置和土壤模型如图 8 所示。

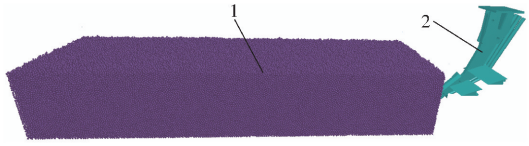


图 8 仿真模型

Fig. 8 Simulation model

1. 土壤 2. 分层深施肥装置

分层深施肥作业所用肥料为颗粒状复合肥,其中普通复合肥选用中国-阿拉伯化肥有限公司生产的普通型复合肥(N、P_2O_5、K_2O 质量比为 15∶15∶15),缓释肥选用山东金正大生态工程股份有限公司生产的缓释型复合肥(N、P_2O_5、K_2O 质量比为 28∶8∶8),从两种肥料中各随机选取 5 组一定质量的肥料颗粒,利用细盐填充法测定两种肥料的密度,取 5 组数据的平均值,测得普通复合肥的颗粒密度为 1 476 kg/m^3,缓释肥颗粒密度为 1 564 kg/m^3,再从两种肥料中各随机选取 50 粒肥料颗粒测量三轴尺寸,测得普通复合肥平均三轴尺寸为 3.686 mm×3.369 mm×3.076 mm,缓释肥的平均三轴尺寸为 3.731 mm×3.527 mm×3.384 mm,且两种肥料的球形率均大于 0.9,因此可将普通复合肥颗粒简化为直径为 3.38 mm 的球体,缓释肥颗粒简化为直径为 3.55 mm 的球体。

经预试验和参照文献[31,34],分层深施肥装置、土壤和肥料颗粒的模型参数如表 1 所示。

表 1 模型参数

Tab. 1 Model parameters

参数	施肥装置	土壤颗粒	普通复合肥颗粒	缓释肥颗粒
泊松比	0.30	0.25	0.25	0.25
密度/(kg·m^{-3})	7 800	2 650	1 476	1 564
剪切模量/Pa	7.0×10^{10}	1.08×10^{8}	1.0×10^{7}	1.0×10^{7}

分层深施肥装置、土壤和肥料颗粒之间的接触

参数如表 2 所示。

表 2　接触参数

Tab. 2　Contact parameters

材料	碰撞恢复系数	静摩擦因数	滚动摩擦因数
土壤颗粒-土壤颗粒	0.60	0.35	0.17
土壤颗粒-普通复合肥颗粒	0.41	0.40	0.02
土壤颗粒-缓释肥颗粒	0.41	0.40	0.02
土壤颗粒-施肥装置	0.60	0.60	0.30
普通复合肥颗粒-普通复合肥颗粒	0.38	0.60	0.30
普通复合肥颗粒-缓释肥颗粒	0.38	0.60	0.30
普通复合肥颗粒-施肥装置	0.37	0.50	0.03
缓释肥颗粒-缓释肥颗粒	0.38	0.60	0.30
缓释肥颗粒-施肥装置	0.37	0.50	0.03

3.1.2　仿真参数设定

气力式排肥系统的分配器将肥料分配后，气流与肥料一同进入分层深施肥装置上、中、下 3 层肥料的排肥管，肥料在自身重力和气流的作用下排出分层深施肥装置，排肥管中气流的运动为不可压缩流体的湍流运动，遵循动量守恒和质量守恒，利用软件中的标准 $\kappa-\varepsilon$ 模型瞬态求解的 Eulerian－Eulerian 耦合算法，计算气流和肥料之间的动量和能量交换，描述气流和肥料之间的相互影响关系。耦合时，两个软件中计算 Time Step 和 Data Save 的频率应成整数倍匹配，设置 EDEM 中 Time Step 为 1.1×10^{6} s，Fluent 中 Time Step 为 1.1×10^{3} s。经前期预试验，确定排肥管入口气流速度为 5.91 m/s[27]，在此气流速度下，可以满足辅助肥料从排肥管内顺利排出，且在排肥口处不会对土壤产生扰动，影响分层作业效果。EDEM 中设置上层排肥管排出普通复合肥，中层和下层排肥管排出缓释肥，上、中、下 3 层排肥管排出肥料量质量比为 3∶3∶4，根据最小作业速度选择总仿真时长为 4 s。

3.2　仿真试验设计

为研究翼铲的不同角度和作业速度对分层深施肥作业的影响，以分层深施肥装置各层实际施肥量与理论施肥量误差为试验指标，以翼铲向后倾斜角 α、翼铲向下倾斜角 β 和机具作业速度 v 为试验因素，进行二次正交旋转组合仿真试验。各因素的水平范围为：翼铲向后倾斜角 50°～90°、翼铲向下倾斜角 50°～64°、作业速度 2～4 km/h。玉米施肥作业施肥量一般为 250～500 kg/hm^2[35]，为满足施肥作业要求，选取最大施肥量 500 kg/hm^{2}进行仿真试验，玉米行距为 600 mm，根据作业速度得到分层深施肥铲施肥速率(g/s)，约为 $8.33v$，将施肥速率按 3∶3∶4的比例分配到 3 根排肥管，上、中、下 3 层排肥管的施肥速率分别为：$2.5v$、$2.5v$、$3.33v$。

参考 GB/T 9478—2005《谷物条播机 试验方法》中相关试验方法，在仿真试验完成后的土槽中随机选取 10 个长度为 100 mm 的区域，重复 3 次，通过 EDEM 后处理模块，在选取区域中，添加质量传感器，分别得到每个区域内土壤深度80～100 mm、180～200 mm、280～300 mm 范围内肥料颗粒的质量，即上、中、下 3 层的实际施肥量，如图 9 所示，计算每层的实际施肥量与理论施肥量的偏差稳定性系数，评价分层深施肥作业效果。施肥后土壤的截面如图 10 所示。

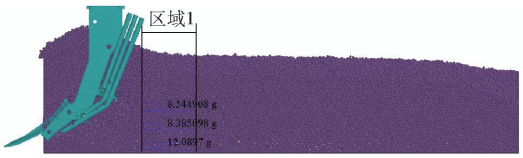


图 9　各层施肥量测量

Fig. 9　Fertilization amount measurement for each layer

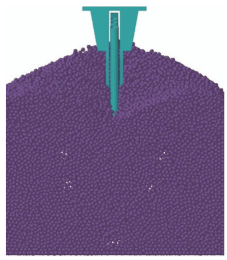


图 10　施肥后土壤的截面

Fig. 10　Section of soil after fertilization

通过耦合仿真试验，对影响分层深施肥作业效果的因素进行显著性分析，并根据实际需求对各参数组合进行优化。试验因素编码如表 3 所示。

表 3　试验因素编码

Tab. 3　Experimental factors and codes

编码	因素		
	翼铲后倾角 A/(°)	翼铲下倾角 B/(°)	作业速度 C/(km·h^{-1})
1.682	90.00	64.00	4.00
1	81.89	61.16	3.59
0	70.00	57.00	3.00
－1	58.11	52.84	2.41
－1.682	50.00	50.00	2.00

确定二次正交旋转组合的试验方案并进行仿真试验，试验完成后计算上、中、下 3 层施肥量偏差稳定性系数，并进行方差分析。试验方案及结果如表 4 所示。

3.3　仿真试验结果与分析

3.3.1　试验结果分析与回归模型建立

将试验结果导入 Design-Expert 中，进行二次回归分析，并进行多元回归拟合，得到上、中、下 3 层施肥量偏差稳定性系数 Y_1、Y_2、Y_3与翼铲后倾角、翼铲

表 4 试验方案与结果

Tab. 4 Test plan and experimental data

试验编号	因素			施肥量偏差稳定性系数/%		
	翼铲后倾角 A/(°)	翼铲下倾角 B/(°)	作业速度 C/(km·h^{-1})	上层	中层	下层
1	58.11	52.84	2.41	6.13	5.22	6.56
2	81.89	52.84	2.41	7.12	6.13	7.58
3	58.11	61.16	2.41	7.35	6.32	7.81
4	81.89	61.16	2.41	15.43	13.21	16.5
5	58.11	52.84	3.59	6.94	5.95	7.47
6	81.89	52.84	3.59	11.25	9.73	12.03
7	58.11	61.16	3.59	11.63	10.44	12.57
8	81.89	61.16	3.59	18.75	15.96	20.02
9	50.00	57.00	3.00	7.92	6.81	8.41
10	90.00	57.00	3.00	18.86	16.22	20.24
11	70.00	50.00	3.00	6.57	2.74	7.11
12	70.00	64.00	3.00	15.23	12.88	16.2
13	70.00	57.00	2.00	7.32	6.37	7.83
14	70.00	57.00	4.00	17.56	14.74	18.69
15	70.00	57.00	3.00	11.24	9.52	12.13
16	70.00	57.00	3.00	10.12	8.62	10.68
17	70.00	57.00	3.00	12.47	10.63	13.34
18	70.00	57.00	3.00	13.66	11.62	14.61
19	70.00	57.00	3.00	14.32	12.14	15.14
20	70.00	57.00	3.00	12.68	10.65	13.36
21	70.00	57.00	3.00	9.59	8.22	10.48
22	70.00	57.00	3.00	13.44	11.55	14.16
23	70.00	57.00	3.00	13.98	11.73	14.76

下倾角、作业速度之间的数学关系模型,检验其显著性,并对交互作用规律进行分析。

(1)上层施肥量偏差稳定性系数

通过对试验数据的分析和拟合,上层施肥量偏差稳定性系数 Y_1 方差分析如表 5 所示。由表 5 可知,试验数据整体模型极显著($P<0.01$),线性主效应项中翼铲后倾角 A、翼铲下倾角 B 和作业速度 C 对试验指标上层施肥量偏差稳定性系数 Y_1 影响极显著($P<0.01$),交互项中翼铲后倾角和翼铲下倾角的交互项 AB 对试验指标影响较显著($0.05\leqslant P<0.1$),二次主效应项中翼铲下倾角 B 的二次项对试验指标影响较显著($0.05\leqslant P<0.1$),其他各项不显著,各因素对上层施肥量偏差稳定性系数影响由大到小依次为 A、B、C。将方差分析中不显著的交互项和二次主效应项的平方和、自由度并入残差,剔除不显著因素,再次进行方差分析,结果如表 5 所示。得到各因素水平对上层施肥量偏差稳定性系数 Y_1 影响的回归方程为

$$Y_1 = -115.004\,31 - 1.185\,56A + 4.602\,25B + 3.665\,03C + 0.025\,001AB - 0.050\,123B^2 \quad (12)$$

对上述回归方程进行失拟项检验,如表 5 所示,得到失拟项 P 为 0.574 9,不显著($P>0.1$),表明不存在影响试验指标的其他因素,且试验指标与试验因素之间存在显著的二次关系。

(2)中层施肥量偏差稳定性系数

通过对试验数据的分析和拟合,中层施肥量偏差稳定性系数 Y_2 方差分析如表 5 所示。由表 5 可知,试验数据整体模型极显著($P<0.01$),线性主效应项中翼铲后倾角 A、翼铲下倾角 B 和作业速度 C 对试验指标中层施肥量偏差稳定性系数 Y_2 影响极显著($P<0.01$),二次主效应项中翼铲下倾角 B 的二次项对试验指标影响极显著($P<0.01$),交互项中翼铲后倾角和翼铲下倾角的交互项 AB 对试验指标影响较显著($0.05\leqslant P<0.1$),其他各项不显著,各因素对中层施肥量偏差稳定性系数影响由大到小依次为 B、A、C。将方差分析中不显著的交互项和二次主效应项的平方和、自由度并入残差,剔除不显著因素,再次进行方差分析,结果如表 5 所示。得到各因素水平对中层施肥量偏差稳定性系数 Y_2 影响的回归方程为

$$Y_2 = -182.310\,93 - 0.908\,53A + 6.673\,85B + 3.112\,72C + 0.019\,496AB - 0.064\,965B^2 \quad (13)$$

对上述回归方程进行失拟项检验,如表 5 所示,得到失拟项 P 为 0.686 7,不显著($P>0.1$),表明不存在影响试验指标的其他因素,且试验指标与试验因素之间存在显著的二次关系。

(3)下层施肥量偏差稳定性系数

通过对试验数据的分析和拟合,下层施肥量偏差稳定性系数 Y_3 方差分析如表 5 所示。由表 5 可知,试验数据整体模型极显著($P<0.01$),线性主效应项中翼铲后倾角 A、翼铲下倾角 B 和作业速度 C 对试验指标上层施肥量偏差稳定性系数 Y_3 影响极显著($P<0.01$),交互项中翼铲后倾角和翼铲下倾角的交互项 AB 对试验指标影响较显著($0.05\leqslant P<0.1$),二次主效应项中翼铲下倾角 B 的二次项对试验指标影响较显著($0.05\leqslant P<0.1$),其他各项不显著,各因素对下层施肥量偏差稳定性系数影响由大到小依次为 A、B、C。将方差分析中不显著的交互项和二次主效应项的平方和、自由度并入残差,剔除不显著因素,再次进行方差分析,结果如表 5 所示。得到各因素水平对上层施肥量偏差稳定性系数 Y_3 影响的回归方程为

$$Y_3 = -118.248\,64 - 1.263\,84A + 4.752\,45B + 3.928\,90C + 0.026\,668AB - 0.052\,115B^2 \quad (14)$$

对上述回归方程进行失拟项检验,如表 5 所示,得到失拟项 P 为 0.522 6,不显著($P>0.1$),表明不

表 5　上、中、下 3 层施肥量偏差稳定性系数方差分析

Tab. 5　Variance analysis of fertilization amount deviation stability coefficient of upper, middle and lower layers

项目	变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
上层施肥量偏差稳定性系数	模型	299. 56/296. 29	9/5	33. 28/59. 26	9. 98/21. 61	0. 000 2 *** / < 0. 000 1 ***
	A	110. 80/110. 80	1/1	110. 80/110. 80	33. 24/40. 41	< 0. 000 1 *** / < 0. 000 1 ***
	B	96. 40/96. 40	1/1	96. 40/96. 40	28. 92/35. 16	0. 000 1 *** / < 0. 000 1 ***
	C	64. 86/64. 86	1/1	64. 86/64. 86	19. 46/23. 66	0. 000 7 *** /0. 000 1 ***
	AB	12. 25/12. 25	1/1	12. 25/12. 25	3. 68/4. 47	0. 077 5 * /0. 049 6 **
	AC	0. 70	1	0. 70	0. 21	0. 655 2
	BC	0. 88	1	0. 88	0. 27	0. 615 1
	A^2	0. 001 539	1	0. 001 539	0. 000 461 6	0. 983 2
	B^2	12. 04/11. 98	1/1	12. 04/11. 98	3. 61/4. 37	0. 079 8 * /0. 051 9 *
	C^2	1. 69	1	1. 69	0. 51	0. 489 2
	残差	43. 34/46. 61	13/17	3. 33/2. 74		
	失拟项	19. 96/23. 23	5/9	3. 99/2. 58	1. 37/0. 88	0. 330 2/0. 574 9
	总和	342. 90/342. 90	22/22			
中层施肥量偏差稳定性系数	模型	250. 41/248. 39	9/5	27. 82/49. 68	13. 21/28. 72	< 0. 000 1 *** / < 0. 000 1 ***
	A	79. 38/79. 38	1/1	79. 38/79. 38	37. 68/45. 89	< 0. 000 1 *** / < 0. 000 1 ***
	B	94. 65/94. 65	1/1	94. 65/94. 65	44. 92/54. 72	< 0. 000 1 *** / < 0. 000 1 ***
	C	46. 78/46. 78	1/1	46. 78/46. 78	22. 20/27. 04	0. 000 4 *** / < 0. 000 1 ***
	AB	7. 45/7. 45	1/1	7. 45/7. 45	3. 54/4. 31	0. 082 6 * /0. 053 5 *
	AC	0. 28	1	0. 28	0. 13	0. 720 7
	BC	0. 81	1	0. 81	0. 38	0. 546 8
	A^2	0. 54	1	0. 54	0. 26	0. 620 6
	B^2	20. 12/20. 13	1/1	20. 12/20. 13	9. 55/11. 64	0. 008 6 *** /0. 003 3 ***
	C^2	0. 38	1	0. 38	0. 18	0. 677 8
	残差	27. 39/29. 41	13/17	2. 11/1. 73		
	失拟项	11. 10/13. 12	5/9	2. 22/1. 46	1. 09/0. 72	0. 433 7/0. 686 7
	总和	277. 80/277. 80	22/22			
下层施肥量偏差稳定性系数	模型	340. 60/337. 04	9/5	37. 84/67. 41	10. 53/22. 79	< 0. 000 1 *** / < 0. 000 1 ***
	A	126. 81/126. 81	1/1	126. 81/126. 81	35. 29/42. 87	< 0. 000 1 *** / < 0. 000 1 ***
	B	108. 80/108. 80	1/1	108. 80/108. 80	30. 27/36. 78	0. 000 1 *** / < 0. 000 1 ***
	C	74. 53/74. 53	1/1	74. 53/74. 53	20. 74/25. 20	0. 000 1 *** / < 0. 000 1 ***
	AB	13. 94/13. 94	1/1	13. 94/13. 94	3. 88/4. 71	0. 070 6 * /0. 044 4 **
	AC	0. 66	1	0. 66	0. 18	0. 675
	BC	1. 07	1	1. 07	0. 30	0. 595 3
	A^2	0. 024	1	0. 024	0. 006 759	0. 935 7
	B^2	13. 01/12. 95	1/1	13. 01/12. 95	3. 62/4. 38	0. 079 5 * /0. 051 7 *
	C^2	1. 81	1	1. 81	0. 50	0. 490 5
	残差	46. 72/50. 28	13/17	3. 59/2. 96		
	失拟项	22. 68/26. 24	5/9	4. 54/2. 92	1. 51/0. 97	0. 287 7/0. 522 6
	总和	387. 32/387. 32	22/22			

注："/"后数字为剔除不显著因素后方差分析结果；*** 表示差异极显著（$P < 0.01$）；** 表示差异显著（$0.01 \leq P < 0.05$）；* 表示差异较显著（$0.05 \leq P < 0.1$）。

存在影响试验指标的其他因素，且试验指标与试验因素之间存在显著的二次关系。

3.3.2　响应曲面分析

对试验结果进行分析处理，根据建立的上、中、下 3 层施肥量偏差稳定性系数回归模型，各因素之间的交互作用对试验指标的影响效应响应曲面如图 11 所示。

作业速度为 3 km/h 时，翼铲后倾角 A 和翼铲下倾角 B 对上层施肥量偏差稳定性系数 Y_1 的交互影响如图 11a 所示。当翼铲后倾角一定时，翼铲下倾角与上层施肥量偏差稳定性系数呈正相关，较优的翼铲下倾角范围为 52. 84° ~ 54. 23°。当翼铲下倾角一定时，翼铲后倾角与上层施肥量偏差稳定性系数呈正相关，较优的翼铲下倾角范围为 58. 11° ~ 66. 04°。

作业速度为 3 km/h 时，翼铲后倾角 A 和翼铲下

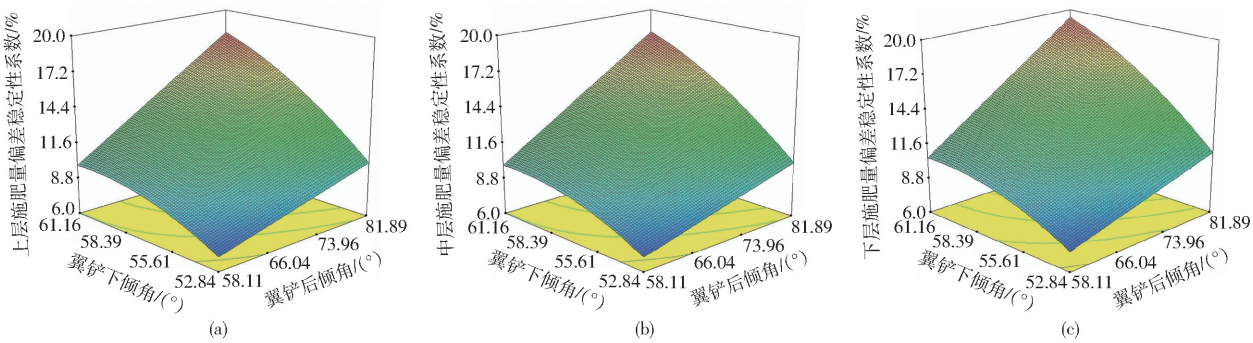


图 11 试验因素对各指标的影响(C=3 km/h)

Fig. 11 Influences of experiment factors on indices (C=3 km/h)

倾角 B 对中层施肥量偏差稳定性系数 Y_2 的交互影响如图 11b 所示。当翼铲后倾角一定时,翼铲下倾角与上层施肥量偏差稳定性系数呈正相关,较优的翼铲下倾角范围为 52.84°~57.00°。当翼铲下倾角一定时,翼铲后倾角与上层施肥量偏差稳定性系数呈正相关,较优的翼铲下倾角范围为 58.11°~64.05°。

作业速度为 3 km/h 时,翼铲后倾角 A 和翼铲下倾角 B 对中层施肥量偏差稳定性系数 Y_3 的交互影响如图 11c 所示。当翼铲后倾角一定时,翼铲下倾角与上层施肥量偏差稳定性系数呈正相关,较优的翼铲下倾角范围为 52.84°~57.59°。当翼铲下倾角一定时,翼铲后倾角与上层施肥量偏差稳定性系数呈正相关,较优的翼铲下倾角范围为 58.11°~75.95°。

为获得分层深施肥装置较优的作业效果,利用 Design-Expert 软件的优化模块对 3 个回归模型进行优化求解,根据分层深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。

目标函数及约束条件为

$$\begin{cases} \min Y_1(A,B,C) \\ \min Y_2(A,B,C) \\ \min Y_3(A,B,C) \\ \text{s.t.} \begin{cases} 58.11° \leqslant A \leqslant 75.59° \\ 52.84° \leqslant B \leqslant 57.59° \\ 2.41\ \text{km/h} \leqslant C \leqslant 3.59\ \text{km/h} \end{cases} \end{cases} \tag{15}$$

根据约束条件,对目标函数进行优化求解,其中作业速度以最大值为优化目标,即在保证满足作业效果的前提下,作业速度越大越好,求解得到多种优化后的参数组合,结合实际分层深施肥装置施肥作业的农艺要求,从中选取较优的参数组合:翼铲后倾角为 58.11°、翼铲下倾角为 52.84°、作业速度为 3.38 km/h 时,对应的上、中、下 3 层施肥量偏差稳定性系数分别为 8.50%、6.54% 和 9.10%。

4 试验验证

4.1 试验装置

为验证仿真试验优化得到的参数组合,根据优化结果加工了分层深施肥装置,并进行田间试验验证。为便于实际加工,将优化得到的参数进行了取整,取翼铲后倾角为 58°,翼铲下倾角为 53°,分层深施肥装置如图 12a 所示,试验样机如图 12b 所示。



(a) 分层深施肥装置 (b) 试验样机

图 12 田间试验验证

Fig. 12 Field test verification

4.2 试验方法与结果

试验所需普通复合肥选用中国-阿拉伯化肥有限公司生产的普通型复合肥(N、P_2O_5、K_2O 质量比为 15∶15∶15),缓释肥选用山东金正大生态工程股份有限公司生产的缓释型复合肥(N、P_2O_5、K_2O 质量比为 28∶8∶8)。试验前对试验地土壤的基本物理特性参数进行了测量,测得含水率为 7.93%、容重为 1.33 g/cm^3。施肥前对排肥系统施肥量进行标定,使施肥量约为 500 kg/hm^2。启动气力式排肥系统各部件,进行分层深施肥作业,控制机具作业速度约为 3.4 km/h,试验完成后,根据 GB/T 9478—2005《谷物条播机 试验方法》中相关试验方法,在施肥的行内,随机选取 30 个点,每个点截取 100 mm 长度区域,将深度 80~100 mm、180~200 mm、280~300 mm 范围的土壤和肥料取出,将肥料和土壤筛分,称量肥料的质量,计算各层施肥量偏差稳定性系数。图 13 为施肥作业后肥料分层效果。

经试验测得上、中、下 3 层施肥量偏差稳定性系

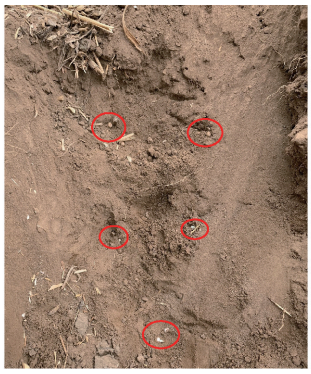


图 13　田间试验肥料分层效果

Fig. 13　Field test fertilizer layering effect

数分别为 9.52%、8.35% 和 9.87%，与仿真试验得到的结果相比有一定差异，但差异不大，在 1.81 个百分点以内。分析差异产生的原因主要是实际田间试验中，土壤状况相较于仿真试验复杂多变，土壤中较大的沙砾等对试验结果产生了影响，但作业效果仍能满足设计要求。

5　结论

（1）设计了一种气力式排肥系统分层深施肥装置，可将肥料按比例分层施入土壤中，其中上层和中层肥料两侧分施，3 层肥料形成半包围种子的分布状态，利于玉米对肥料养分的吸收。

（2）分层深施肥装置实现了不同种类肥料的分层深施。上层施用普通复合肥，为玉米生长前期提供快速且充足养分，中层和下层施用缓释肥，为玉米生长中后期提供长效稳定的养分，避免因肥料利用不及时造成的养分流失和环境污染，同时减少作业环节，降低对土壤的扰动，保护耕地土壤。

（3）通过理论分析确定了影响分层深施肥装置施肥作业效果的主要因素，以各层施肥量偏差稳定性系数为试验指标，以翼铲向后和向下倾斜角、作业速度为试验因素，利用计算流体力学和离散元法耦合仿真的方法，进行了二次正交旋转组合试验。通过对试验结果的拟合和优化分析，得到了翼铲向后和向下倾斜角分别为 58.11°和 52.84°，作业速度为 3.38 km/h 时，上、中、下 3 层施肥量偏差稳定性系数分别为 8.50%、6.54% 和 9.10%，以优化得到的参数进行了装置加工和田间试验，试验结果与仿真试验优化所得结果相吻合，满足设计要求。

参　考　文　献

[1] 朱文昊，李松松，高强，等. 东北黑土区春玉米磷肥高效利用技术规程[J]. 磷肥与复肥，2021，36(2)：17－18，21.
ZHU Wenhao，LI Songsong，GAO Qiang，et al. Technical regulation for high efficiency utilization of phosphate fertilizer for spring maize in black soil area of Northeast China[J]. Phosphate & Compound Fertilizer，2021，36(2)：17－18，21.（in Chinese）

[2] 王淇韬，郭翔宇，刘二阳. 基于感知价值的东北黑土区农户保护性耕作技术采用行为[J]. 中国农业大学学报，2021，26(7)：172－181.
WANG Qitao，GUO Xiangyu，LIU Eryang. Farmers' adoption behaviour of conservation tillage technology based on perceived value in the black soil region of Northeast China[J]. Journal of China Agricultural University，2021，26(7)：172－181.（in Chinese）

[3] LIU X B，ZHANG X Y，WANG Y X，et al. Soil degradation：a problem threatening the sustainable development of agriculture in Northeast China[J]. Plant Soil and Environment，2010，56(2)：87－97.

[4] 邹文秀，韩晓增，陆欣春，等. 肥沃耕层构建对东北黑土区旱地土壤肥力和玉米产量的影响[J]. 应用生态学报，2020，31(12)：4134－4146.
ZOU Wenxiu，HAN Xiaozeng，LU Xinchun，et al. Effects of the construction of fertile and cultivated upland soil layer on soil fertility and maize yield in black soil region in Northeast China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology，2020，31(12)：4134－4146.（in Chinese）

[5] 韩晓增，李娜. 中国东北黑土地研究进展与展望[J]. 地理科学，2018，38(7)：1032－1041.
HAN Xiaozeng，LI Na. Research progress of black soil in Northeast China[J]. Scientia Geographica Sinica，2018，38(7)：1032－1041.（in Chinese）

[6] 包启平，韩晓日，殷源，等. 东北地区春玉米氮肥利用效率变异机制研究[J]. 中国土壤与肥料，2020(3)：36－41.
BAO Qiping，HAN Xiaori，YIN Yuan，et al. Study on variation mechanism of nitrogen use efficiency of spring maize in Northeast China[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China，2020(3)：36－41.（in Chinese）

[7] 夏循峰，胡宏. 我国肥料的使用现状及新型肥料的发展[J]. 化工技术与开发，2011，40(11)：45－48.
XIA Xunfeng，HU Hong. Utilization present situation of fertilizers in China and new type of fertilizers[J]. Technology & Development of Chemical Industry，2011，40(11)：45－48.（in Chinese）

[8] VELTHOF G，SCHOOTEN H V，DIJK W V. Optimization of the nutrient management of silage maize cropping systems in the Netherlands：a review[J]. Agronomy，2020，10(12)：1861.

[9] OLFS H W. Organic fertilization in maize cropping systems：measures to reduce N losses[J]. Agronomy，2021，11(4)：793.

[10] FEDEROLF C P，WESTERSCHULTE M，OLFS H W，et al. Enhanced nutrient use efficiencies from liquid manure by positioned injection in maize cropping in Northwest Germany[J]. European Journal of Agronomy，2016(75)：130－138.

[11] ZHOU Baoyuan，SUN Xuefang，DING Zaisong，et al. Multisplit nitrogen application via drip irrigation improves maize grain yield and nitrogen use efficiency[J]. Crop Science，2017，57(3)：1687－1703.

[12] 刘宇杰，刘晓燕，刘梅. 不同施肥方式对玉米产量及肥料利用率的影响[J]. 现代农业，2019(1)：40－43.

LIU Yujie, LIU Xiaoyan, LIU Mei. Effects of different fertilization methods on corn yield and fertilizer utilization[J]. Modern Agriculture, 2019(1): 40 - 43. (in Chinese)

[13] LI Guanghao, CHENG Qian, LI Long, et al. N, P and K use efficiency and maize yield responses to fertilization modes and densities[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2021, 20(1): 78 - 86.

[14] TIAN Shenzhong, WANG Yu, NING Tangyuan, et al. Continued no-till and subsoiling improved soil organic carbon and soil aggregation levels[J]. Agronomy Journal, 2014, 106(1): 212 - 218.

[15] 张瑞富,杨恒山,高聚林,等. 深松对春玉米根系形态特征和生理特性的影响[J]. 农业工程学报,2015,31(5):78 - 84.
ZHANG Ruifu, YANG Hengshan, GAO Julin, et al. Effect of subsoiling on root morphological and physiological characteristics of spring maize[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(5): 78 - 84. (in Chinese)

[16] 赵飞燕,吴秋平,韩燕. 不同施肥方式对玉米生长及产量的影响[J]. 山西农业科学,2018,46(10):1668 - 1670,1698.
ZHAO Feiyan, WU Qiuping, HAN Yan. Effects of different fertilization methods on growth and yield of maize[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2018, 46(10): 1668 - 1670, 1698. (in Chinese)

[17] 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)

[18] 邹忠君,孙艳华. 玉米一次性分层缓释施肥技术试验研究[J]. 农学学报,2011,1(6):6 - 9.
ZOU Zhongjun, SUN Yanhua. A test on slow-release fertilizer one-time stratification application technique in maize[J]. Journal of Agriculture, 2011, 1(6): 6 - 9. (in Chinese)

[19] 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. Calibration method of contact characteristic parameters for corn seeds based on EDEM[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Engineering, 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)

[20] 马阳,吴敏,王艳群,等. 不同耕作施肥方式对夏玉米氮素利用及土壤容重的影响[J]. 水土保持学报,2019,33(5):171 - 176.
MA Yang, WU Min, WANG Yanqun, et al. Effects of different tillage and fertilization methods on nitrogen utilization and soil bulk density of summer maize[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(5): 171 - 176. (in Chinese)

[21] 黄幸媛. 空间分层施肥玉米播种机关键部件设计与试验[D]. 北京:中国农业大学,2018.
HUANG Xingyuan. Design and experiment of a layered fertilization device for corn planter[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)

[22] 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)

[23] 顿国强,杨永振,陈海涛,等. 基于 EDEM 的控位分层施肥开沟器作业过程的仿真与试验[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版),2018,44(1):95 - 100.
DUN Guoqiang, YANG Yongzhen, CHEN Haitao, et al. Simulation analysis of working process of control position separated layer fertilizer furrow opener based on EDEM and test[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2018, 44(1): 95 - 100. (in Chinese)

[24] 杨然兵,杨红光,连政国,等. 马铃薯种植机分层施肥开沟器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(11):104 - 113.
YANG Ranbing, YANG Hongguang, LIAN Zhengguo, et al. Design and experiment of separated layer fertilization furrow opener for potato planter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Engineering, 2018, 49(11): 104 - 113. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20181112&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.012. (in Chinese)

[25] 郑丽萍,刘海,李作一,等. 不同缓释肥施肥量对玉米生长的影响[J]. 天津科技,2020,47(6):75 - 78.
ZHENG Liping, LIU Hai, LI Zuoyi, et al. Effect of different slow-release fertilizer doses on corn growth[J]. Tianjin Science and Technology, 2020, 47(6): 75 - 78. (in Chinese)

[26] 袁雪娇,杨恒山,张玉芹,等. 缓释肥对春玉米干物质积累及转运的影响[J]. 内蒙古民族大学学报(自然科学版),2018,33(1):40 - 44.
YUAN Xuejiao, YANG Hengshan, ZHANG Yuqin, et al. Effects of slow release fertilizer on accumulation and translocation of dry matter in spring maize[J]. Journal of Inner Mongolia University for Nationalities (Natural Sciences), 2018, 33(1): 40 - 44. (in Chinese)

[27] 杨庆璐,王庆杰,李洪文,等. 气力集排式变量排肥系统分层施肥量调节装置研制[J]. 农业工程学报,2020,36(1):1 - 10.
YANG Qinglu, WANG Qingjie, LI Hongwen, et al. Development of layered fertilizer amount adjustment device of pneumatic centralized variable fertilizer system[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(1): 1 - 10. (in Chinese)

[28] 杨庆璐,李子涵,李洪文,等. 基于 CFD - DEM 的集排式分肥装置颗粒运动数值分析[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(8):81 - 89.
YANG Qinglu, LI Zihan, LI Hongwen, et al. Numerical analysis of particle motion in pneumatic centralized fertilizer distribution device based on CFD - DEM[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 81 - 89. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20190809&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08.009. (in Chinese)

[29] 杨庆璐,王庆杰,李洪文,等. 气力集排式排肥系统结构优化与试验[J]. 农业工程学报,2020,36(13):1 - 10.
YANG Qinglu, WANG Qingjie, LI Hongwen, et al. Structural optimization and experimental on pneumatic centralized fertilizer

system[J]. Transactions of the CSAE,2020,36(13):1 - 10. (in Chinese)
[30] 姚万生,薛少平,朱瑞祥,等. 组合式下位分层施肥播种开沟器的研制[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2008,36(8):223 - 228.
YAO Wansheng,XUE Shaoping,ZHU Ruixiang,et al. Development of the combined layered fertilizing-seeding ditcher[J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition),2008,36(8):223 - 228. (in Chinese)
[31] 鹿瑶. 精量控制分层施肥深松机的设计与试验[D]. 泰安:山东农业大学,2018.
LU Yao. Design and experiment of precision controlled layered fertilizing subsoiler[D]. Taian: Shandong Agricultural University,2018. (in Chinese)
[32] 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 filed[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)
[33] 丁力,杨丽,张东兴,等. 基于 DEM - CFD 的玉米气吸式排种器种盘设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(5):50 - 60.
DING Li,YANG Li,ZHANG Dongxing,et al. Design and experiment of seed plate of corn air suction seed metering device based on DEM - CFD[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(5):50 - 60. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20190506&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.05.006. (in Chinese)
[34] 曹鑫鹏,王庆杰,李洪文,等. 侧置切刀与拨茬齿盘组合式清茬装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2021,52(3):36 - 44.
CAO Xinpeng,WANG Qingjie,LI Hongwen,et al. Design and experiment of combined row cleaners with side cutter and stubble clean disk[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(3):36 - 44. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20210304&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.03.004. (in Chinese)
[35] 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/OL]. 农业机械学报,2018,49(10):137 - 144,355.
LIU Zhengdao,WANG Qingjie,LIU Chunge,et al. Design and experiment of precision hole-fertilizing apparatus with notched plate[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(10):137 - 144,355. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20181015&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.015. (in Chinese)

(上接第 60 页)

[27] 廖湘平,龚国芳,孙辰晨,等. 基于 AMESim 的液粘调速离合器动态接合特性研究[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(6):324 - 332.
LIAO Xiangping,GONG Guofang,SUN Chenchen,et al. Dynamic engagement performance of hydro-viscous clutch based on AMESim[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(6):324 - 332. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20160643&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.06.043. (in Chinese)
[28] WANG H P,MUSTAFA G I Y,TIAN Y. Model-free fractional-order sliding mode control for an active vehicle suspension system[J]. Advances in Engineering Software,2018,115:452 - 461.
[29] 蒋德莉,陈学庚,颜利民,等. 随动式残膜回收螺旋清杂装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(4):137 - 145.
JIANG Deli,CHEN Xuegeng,YAN Limin,et al. Design and experiment on spiral impurity cleaning device for profile modeling residual plastic film collector[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(4):137 - 145. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20190415&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.015. (in Chinese)
[30] 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)
[31] 王汉羊,陈海涛,纪文义. 2BMFJ - 3 型麦茬地免耕精播机防堵装置[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(4):64 - 70.
WANG Hanyang,CHEN Haitao,JI Wenyi. Anti-blocking mechanism of type 2BMFJ - 3 no-till precision planter for wheat stubble fields[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(4):64 - 70. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20130412&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.04.012. (in Chinese)