

玉米分层施肥器结构与试验

王云霞 梁志杰 崔涛 张东兴 屈哲 杨丽

(中国农业大学工学院, 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效率,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仿真研究。仿真结果表明:增大分层施肥器的安装角 α ,可减小肥料颗粒流经施肥口的初速度,有利于肥料颗粒排出施肥口;增大施肥片工作长度 L 可增加与之发生碰撞的肥料颗粒数量,进而获得较多施肥量。为验证仿真分析结果并获取合理的分层施肥器工作参数,以4种肥料(大颗粒尿素、小颗粒尿素、硫酸钾复合肥、磷酸二铵复合肥)为研究对象进行台架试验,试验结果表明:4种肥料的施肥配比受安装角 α 、施肥片工作长度 L 影响的变化趋势与仿真分析结果一致,并确定4种肥料达到合适配比时分层施肥器的工作参数 α 为 36° , L 为13~16 mm。田间试验结果表明:所设计的分层施肥器能够达到目标施肥配比,且在不同作业速度下各层施肥量变异系数在10%以内,工作性能稳定。

关键词: 玉米; 分层施肥器; 离散元; 参数优化

中图分类号: S224.21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)S0-0163-07

Design and Experiment of Layered Fertilization Device for Corn

Wang Yunxia Liang Zhijie Cui Tao Zhang Dongxing Qu Zhe Yang Li

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Layered fertilization technology has broad prospect for its less time requirement, labor saving and high utilization efficiency. A layered fertilization device which consists of adjustable instrument, one fixed fertilization mouths and two adjustable fertilization mouths was designed. The adjustable instrument consists of removable working piece, groove ear and guiding groove. Based on the discrete element method (EDEM), simulation tests were conducted to investigate the trend of fertilizer distribution ratio for different lift angles α and working length of fertilization-piece L . The simulation model of fertilizer and layered fertilizing device was built. The results showed that larger lift angle led more fertilizer particle flowing into the up two fertilization mouths. And increasing the working length of fertilization-piece is helpful for obtaining more fertilizer by making more particles colliding with the tube. In order to determine the suitable working parameters of layered fertilization device, four kinds of fertilizers commonly used for maize, were selected for laboratory tests. According to relatively references, the desirable fertilizing ratio was determined as 1:6:3. Test results showed that these kinds of fertilizers were influenced by the lift angle of device, working length of fertilization-piece samely, which was consistent with simulation results. When the lift angle was at $30^\circ \sim 40^\circ$, fertilizing proportion amplification of up mouth was 10% and middle mouth was 3%, which proved that the increase of lift angle was in favor of improving up layer fertilizing ratio. Simultaneously, working parameters of layered fertilization device were determined as α of 36° and L of 13~16 mm. To explore the working performance of this device,

收稿日期: 2016-07-20 修回日期: 2016-08-15

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201503117)、国家现代玉米产业技术体系建设项目(CARS-02)和农业部土壤-机器-植物系统技术重点实验室项目

作者简介: 王云霞(1991—),女,博士生,主要从事农业机械装备与计算机测控研究, E-mail: wangyxsdu@126.com

通信作者: 杨丽(1975—),女,副教授,博士生导师,主要从事农业机械装备与计算机测控研究, E-mail: yl_hb86@126.com

field experiments were conducted at speed of 1.36 ~ 7.58 km/h. Three types fertilizing devices, adjustable and non-adjustable layered device, common layered device, were used and soil cross-section area after fertilizing were obtained to compare the distribution of fertilizer. Results showed that the adjustable layered fertilization device could layer fertilize into three layers and middle layer gained the most, second was bottom layer, which met the corn requirement for fertilizer.

Key words: corn; layered fertilization device; element distinct method; parameters optimizing

引言

施肥技术是影响玉米产量的重要因素之一^[1-3]。由于我国耕地基础地力偏低,目前大量施用化肥是获得高产的主要途径。但我国施肥技术落后,施肥方式主要以人工表层分期撒施或播种时一次性施肥方式为主^[4-5]。播种时一次性施肥易造成前期烧种和后期脱肥,影响植株发育;人工表层分期撒施耗时、耗力,且肥料利用效率低。巨晓棠^[6]指出我国目前现有农田管理水平的氮肥有效率仅在50%~60%,低于世界发达国家20个百分点。为减少生产成本和环境污染,提高化肥利用效率,研究施肥新技术、新设备具有重要意义。

分层施肥技术是利用施肥机械将玉米生长周期所需肥料一次性、分多层施入土壤,这不仅能够提高肥料利用效率,而且可以提高作业效率,省时省工^[7]。邹忠君等^[8]通过田间对比试验发现,分层施肥技术能够满足玉米整个生育期对养分的需求,植株长势良好,比常规分期施肥增产12.1%,经济效益得到提高。吴景贵等^[9]对一次性浅施、一次性深施和分层施肥3种施肥方式做了对比研究,结果表明分层施肥的玉米产量显著高于一次性浅施及一次性深施。王春虎等^[10]对玉米需肥规律进行了研究,对比相同施肥量、不同施肥配比对玉米植株形状的影响,结果发现肥料分种肥、追肥、底肥处理结果优于分种肥、追肥处理以及一次性施加种肥处理。且种肥占10%、追肥占60%、底肥占30%处理增产效果最明显。

分层施肥的关键部件是分层施肥器。姚万生等^[11]设计了一种组合式同沟分层施肥播种开沟器,可以实现种子、种肥、基肥分3层施入土壤5 cm、11 cm、17 cm深处,种肥与基肥比例为3:7。赵法箴^[12]研制了一种分层深施肥装置,将肥料分为底肥、追肥、种肥3层,施肥深度分别为14~15 cm、8~10 cm、4~5 cm。赵金等^[13]通过在导肥槽中增加施肥调整片,控制不同深度肥料分布,并经过田间试验确定了施肥管与竖直方向的角度在不超过45°时,肥料分布能够实现上少下多,满足玉米生长不同时期的需肥量。以上研究主要针对分层施肥装置的

结构设计,能够实现分层施肥的功能。然而,分层施肥的目的在于根据作物的需肥规律,将肥料按照一定配比分层施入土壤,以获取更高的肥料利用效率,因此,需要对分层施肥器施肥配比的影响规律进行研究。

为此本文设计一种可调式分层施肥器,并采用离散元法(EDM)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仿真研究,并通过台架试验与田间试验获得分层施肥器达到合适施肥配比时对应的工作参数。

1 分层施肥器工作原理

分层施肥器具有3个施肥口,主要由施肥管、施肥片调节装置、固定施肥片等组成,整体结构如图1所示。中层有施肥片调节装置,上层、底层为固定施肥片,主要起导流作用。深松深度30 cm时,3个施肥口的施肥深度分别为5 cm、10 cm、15 cm。施肥片调节装置由施肥片、导槽组成,施肥片可沿导槽滑动,从而改变施肥片工作长度,如图2。工作时分层施肥器通过连接板焊接在深松铲后方,肥料颗粒经施肥管进入分层施肥器,在重力作用下沿管壁下滑,经过3个施肥口流出完成分层施肥作业。通过调节施肥片工作长度可改变分层施肥器施肥配比。

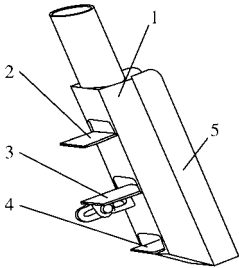


图1 可调分层施肥装置结构示意图
Fig.1 Structural diagram of adjustable layered fertilization device

1. 施肥管 2、4. 固定施肥片 3. 施肥片调节装置 5. 连接板

2 施肥过程仿真分析

运用 EDEM 仿真软件对施肥过程进行仿真,通过分析施肥过程中肥料颗粒的位移、速度随时间变化曲线,得到肥料颗粒的运动规律。对影响分层施

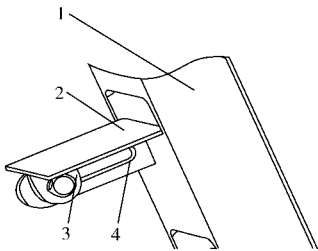


图2 施肥片调节装置

Fig. 2 Adjustable device for working piece

1. 施肥管 2. 施肥片 3. 肥槽耳 4. 导槽

肥器施肥配比的关键因素(安装角 α 、施肥片工作长度 L)进行仿真试验,得到其变化规律。

2.1 建立仿真模型

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^[14-15]。设置其密度为 0.872 kg/m³,等效为直径 3.35 mm,泊松比 0.25,剪切模量 1×10^8 Pa,采用动态生成方式生成仿真颗粒 6 000 粒,生成速度为 1 000 颗/s。由于肥料颗粒的碰撞不是瞬时的,而是多个颗粒同时碰撞,因此选择 Hertz - Mindin (no slip) 接触模型作为肥料颗粒与颗粒、颗粒与几何体的接触模型,根据文献以及试验修正设置肥料与肥料碰撞恢复因数、静摩擦因数、滚动摩擦因数分别为 0.095、0.180、0.01^[16]。

建立分层施肥器仿真模型如图 3,主要包括支架、分层施肥器、颗粒生成模块和肥料收集箱,仿真时方便观察肥料流出,将肥料收集箱设置为透明。支架与分层施肥器铰接,可调节分层施肥器的安装角。颗粒生成模块定义为 Virtual (虚拟体),可保证生成的肥料颗粒只在重力作用下沿管壁下滑。肥料经各施肥口流出后集中在肥料收集箱中,便于统计各层施肥量。设置肥料与分层施肥器的碰撞恢复因数、静摩擦因数、滚动摩擦因数分别为 0.590、0.395、0.01^[17]。

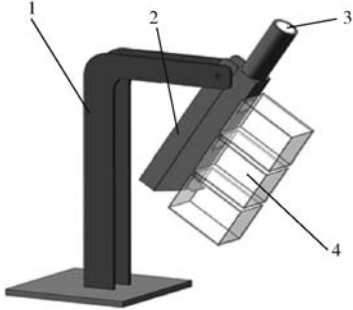


图3 分层施肥器仿真模型

Fig. 3 Simulation model of layered fertilization device

1. 支架 2. 分层施肥器 3. 颗粒生成模块 4. 肥料收集箱

2.2 肥料颗粒的运动仿真分析

为探究肥料颗粒的运动规律,在落入上层、中层、底层施肥口中的肥料中各选 1 颗,分析其位移、速度随时间变化曲线,如图 4。由图 4a 可知,落入上层施肥口中的肥料颗粒在 1.75 s 处开始生成,并沿着分层施肥器的管壁向下滑落, x 、 z 方向的速度在重力的作用下不断地增大,在 1.96 ~ 1.97 s 时,肥料颗粒在失去管壁支持力的情况下,在重力和初速度的共同作用下做抛物线运动,使其沿 x 轴方向的位移增加,但由于初速度过大,不足以使其完全离开上层施肥口,所以与上层施肥口的下沿发生碰撞,通过 x 方向坐标的增大以及速度方向瞬间变为 x 轴正向,可以看出肥料颗粒在与其他肥料颗粒和上层施肥口下沿碰撞的作用下沿上层施肥口排出,落入到肥料收集箱中,经过与肥料收集箱的一系列碰撞最终趋于稳定。

由图 4b 可知,落入中层施肥口的肥料颗粒在 1.66 s 处生成,在重力作用下不断沿着分层施肥器管壁运动,期间与其他的肥料颗粒以及管壁相互碰撞,但是对其轨迹的改变影响不大,在 1.88 s 时到达上层施肥口的下沿,与施肥口下沿发生碰撞以及其他肥料颗粒发生碰撞,由坐标以及速度变化图可以

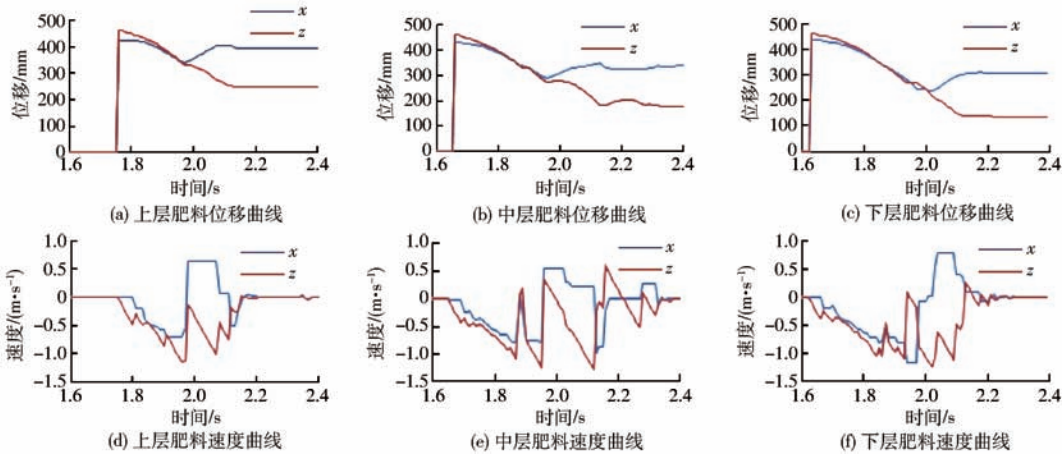


图4 肥料颗粒运动规律分析

Fig. 4 Analysis of motion law of particles

看出在碰撞的作用下并没有使其从上层施肥口中落出,而是继续在分层施肥器内向下运动,在 1.96 s 时与中层施肥口的下沿发生碰撞,在碰撞的作用下其速度发生急剧的变化,使其沿着 x 轴正方向运动,排出中层施肥口,最终落入肥料收集箱趋于稳定。

由图 4c 可知,落入底层施肥口的肥料颗粒在 1.63 s 处生成,在重力作用下沿管壁滑落,在 1.85 s 处到达上层施肥口,然后一直向下运动,但并没有与上层施肥口下沿相碰撞。在 1.93 s 处到达中层施肥口下沿,与中层施肥口下沿相碰撞,使其运动轨迹发生变化,但 x 轴方向的坐标还是处于不断变小的趋势,说明肥料颗粒在碰撞的作用下使其沿 x 轴负方向运动,即向着分层施肥器内部运动,并没有从中层施肥

口排出,继续向下运动后,到 2.03 s 时从下层施肥口排出,最终落入肥料收集箱趋于稳定。

2.3 安装角与施肥配比的关系

分层施肥器安装角 α 是指管壁与竖直方向的夹角。图 5 为不同安装角下肥料分布状态图,为方便看出肥料颗粒分布状态,在 EDEM 中设置分层施肥器仿真模型 opacity 为 0.2。安装角 $\alpha = 20^\circ$ 时,下滑的肥料颗粒中速度较高的偏多,随着安装角度的增大,高速度颗粒比例减少,且上层获得的肥量逐渐增多。由图 6a 可以看出,肥料经过上层施肥口后重新与管壁下沿接触时会发生明显碰撞,流经中层施肥口的肥料分布非常分散,不易流出,导致中层施肥量增加不明显。

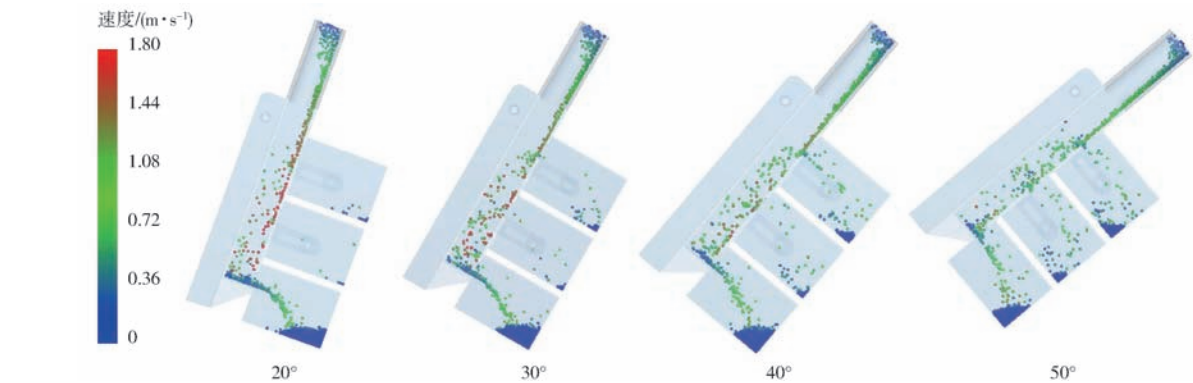


图 5 不同安装角度下施肥配比状态图
Fig. 5 Layered fertilizing ratio at different installing angles

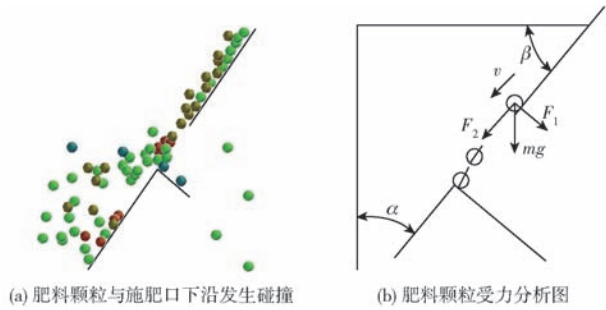


图 6 肥料颗粒落肥机理分析
Fig. 6 Mechanism analysis of fertilizer flowing into mouth

对施肥口处肥料颗粒的受力状态进行分析,如图 6b。颗粒离开施肥口瞬间主要受重力 G 作用,其运动轨迹近似于初速度为 v 的自由落体运动。肥料颗粒能否流出施肥口取决于初速度 v 以及垂直速度方向的加速度 a ,其中 v 由沿管壁方向重力分力 F_1 决定, a 由垂直于管壁方向重力分力 F_2 决定。安装角 α 增大时, F_1 减小、 F_2 增大,颗粒获得较小的初速度 v 和较大的加速度 a ,为颗粒流出施肥口提供了有利条件。因此,增大分层施肥器安装角可减小肥料的运动速度,进而增大上层、中层施肥量。

2.4 施肥片工作长度与施肥配比的关系

图 7 为安装角 36° 时,不同施肥片工作长度下

肥料分布状态图。可以看出,安装角一定时,上层施肥量不再发生变化,增大施肥片工作长度可明显提高中层施肥量,下层施肥量相应减少。随着施肥片工作长度的增加,流经中层施肥口的肥料中低速度颗粒比例增加。分析其原因,伸出的施肥片对流动的颗粒群产生阻碍作用,颗粒与施肥片发生碰撞速度降低,并在施肥片导流作用下沿施肥片流出。

3 分层施肥器工作参数的确定

依据仿真分析得到的安装角 α 、施肥片工作长度 L 对施肥配比的影响规律,选取 4 种玉米肥料(大颗粒尿素、硫酸钾复合肥、磷酸二铵复合肥、小颗粒尿素),分别以安装角 α 、施肥片工作长度 L 为变量进行室内试验,确定达到合适配比时分层施肥器的工作参数。

3.1 试验材料与方法

试验选取 4 种玉米肥料进行分层施肥器安装角 α 、施肥片工作长度 L 的全因子试验,确定达到合适施肥配比时分层施肥器工作参数。试验因素水平如表 1。4 种肥料形状都接近于球体,硫酸钾与磷酸二铵为复合肥,尿素根据颗粒大小分为大颗粒、小颗粒

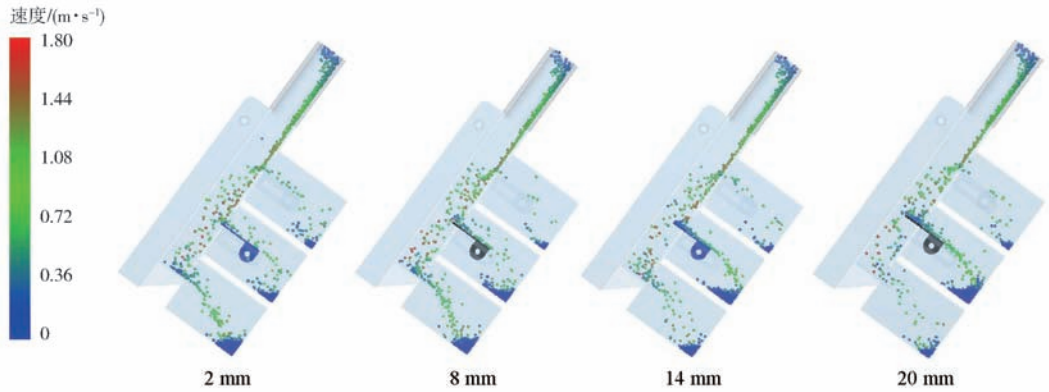


图7 不同施肥片工作长度下施肥配比状态图

Fig. 7 Layered fertilizing ratio at different lengths of working piece

2 种,经测量 4 种肥料颗粒直径范围如表 2,硫酸钾与磷酸二铵颗粒直径相近,介于大颗粒尿素与小颗粒尿素之间。

表 1 因素水平

Tab. 1 Factors and levels

水平	因素	
	安装角 $\alpha/(^{\circ})$	施肥片工作长度 L/mm
1	30	10
2	32	12
3	34	14
4	36	16
5	38	18
6	40	20

表 2 肥料颗粒直径范围

种类	直径/mm
尿素(大颗粒)	3.6~4.0
硫酸钾复合肥	2.9~3.4
磷酸二铵复合肥	3.0~3.5
尿素(小颗粒)	1.4~1.8

3.2 试验结果与分析

3.2.1 安装角试验结果分析

图 8 为不同安装角 α 下,上层、中层、下层施肥比例变化曲线。可以看出,随着安装角变化,4 种肥

料变化趋势基本相同。

由图 8a、8b 可知,随着分层施肥器安装角增大,上层、中层施肥比例呈上升趋势。图 8a 中,安装角度 $30^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 范围内,4 种肥料上层施肥比例增幅均在 10% 左右,中层增幅在 3% 左右,因此得出安装角度的增大更有利于上层施肥配比的提高。田间作业时,分层施肥器焊接在深松铲上,为了便于安装,需确定固定的安装角。由图 8c 可知,安装角度在 36° 时,能够使 4 种肥料上层施肥配比在 10% 左右,因此将分层施肥器安装角确定为 36° 。

由图 8b、8c 可知,安装角度在 $30^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 范围内,中层肥量比例在 10% 以下,底层施肥量在 80% 左右,与期望施肥比例存在差距,尤其是中层施肥量,因此需要增加施肥片工作长度增大中层施肥量。

3.2.2 施肥片工作长度试验结果分析

上层施肥比例达到 10% 左右时,固定分层施肥器安装角,研究施肥片工作长度对中层、底层施肥配比的影响。图 9 为不同施肥片工作长度对中层、下层施肥比例的影响,4 种肥料变化趋势一致,随着施肥片工作长度的增加,流出中层施肥口的肥量增多,中层施肥比例不断增大,底层施肥量相应减少。4 种肥料达到期望施肥比例 60% 左右时,对应的施肥片工作长度为 13~16 mm。

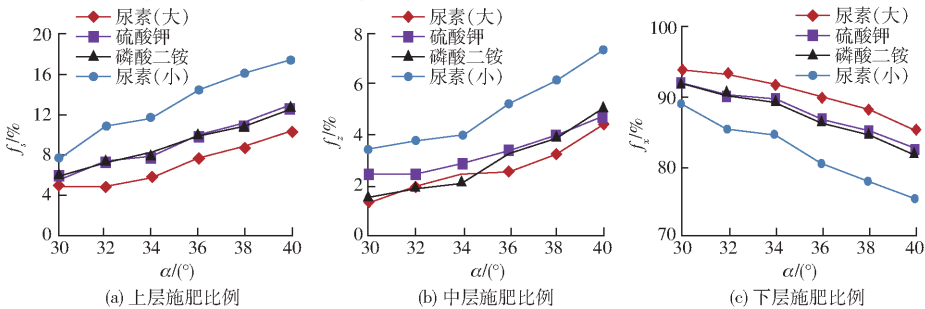


图 8 安装角对施肥比例的影响

Fig. 8 Impact of lift angle on fertilizing ratio

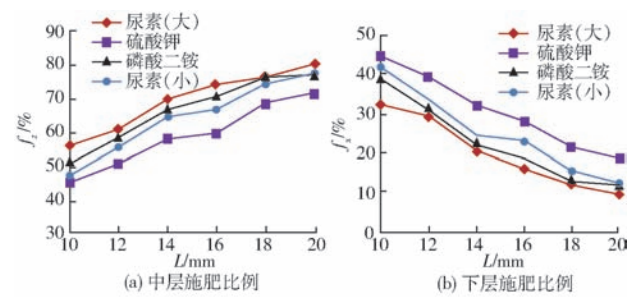


图 9 施肥片工作长度对施肥比例的影响

Fig. 9 Impact of working piece length on fertilizing ratio

4 田间试验

4.1 试验材料与方法

为确定分层施肥器田间工作性能,以上层、中层、下层施肥比例及其变异系数为评价指标,将分层施肥器安装在中国农业大学研制的2BYDJ-4型电驱式玉米精量播种机上,在不同作业速度下对分层施肥器工作性能稳定性进行试验研究,试验整机如图10a。分层施肥器焊接在机具前方深松铲上,如图10b。肥料选取大颗粒尿素,根据台架试验结果确定分层施肥器安装角为36°,中层施肥片工作长度为13 mm,静态测定上层、中层、底层施肥比例分别为12%、61%、27%。



图 10 田间试验

Fig. 10 Field test

4.2 试验结果及分析

为便于各层施肥量采集,避免测量误差,在施肥口处用接肥袋收集肥料(图10c)。对上、中、下3层的施肥量进行称量,并计算出每一层施肥量占总施肥量的比例,试验结果如表3所示。对数据结果进行分析,上层和中层不同速度下的变异系数为5%左右,底层的变异系数在9%左右,变异较小,表明工作速度对分层施肥装置的施肥配比没有显著影响。

为明显看出肥料颗粒在土壤中分布情况,施肥作业时,采用人工将肥料直接倒入施肥管的方法以增大施肥量。图11为可调分层施肥调到合适比例(1:6:3)、分层施肥器不调节、以及普通不分层施肥作业后的土壤剖面。可以看出可调分层施肥器能够实现肥料分布为中层施肥量多、下层次之、上层最

少,符合玉米需肥规律。采用分层施肥器不调节施肥比例时,明显发现肥料集中在最底层,上层和中层较少;采用普通不分层施肥装置时肥料集中分布在同一层。分层施肥器3层施肥深度分别为上层为6~7 cm、中层9~11 cm、底层15~17 cm,与理论施肥深度(5 cm、10 cm、15 cm)存在1~2 cm误差。分析原因:施肥过程中存在深松铲开沟后回土滞后的现象,肥料从施肥口流出时不能及时落入土壤,导致施肥深度下移。

表 3 不同速度上、中、下3层施肥量所占总施肥量的比例

Tab. 3 Three layers fertilizing proportion at different working speeds

施肥位置	速度/(km·h ⁻¹)							%	
	1.36	2.42	3.11	4.82	5.19	6.23	7.58	静态施肥比例	变异系数
上层	12	14	14	14	13	14	14	12	5.80
中层	61	61	58	54	56	58	54	61	5.11
底层	27	25	28	32	31	28	32	27	9.34

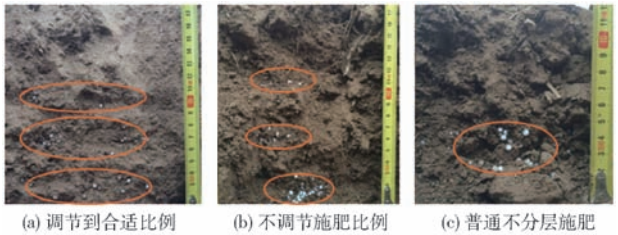


图 11 3种不同的施肥方式剖面对比

Fig. 11 Soil cross-section area comparison of three types of fertilizing device

5 结论

(1)运用 EDEM 仿真软件建立肥料颗粒与分层施肥器仿真模型,通过分析肥料颗粒位移、速度随时间变化曲线,发现肥料落入施肥口主要是因为与施肥口下沿发生碰撞,速度发生瞬时变化,弹跳后进入施肥口。增大安装角、施肥片工作长度,能够增加上层、中层施肥量。

(2)对影响分层施肥器施肥配比的主要因素进行试验分析,发现增大安装角可明显提高上层施肥量,且在相同施肥比例下,颗粒越大需要的安装角越大。随着施肥片工作长度的增加,中层施肥量明显增多,但与颗粒大小没有线性关系。施肥配比随安装角、施肥片工作长度的变化趋势与仿真分析结果一致。

(3)通过试验研究发现,对于不同颗粒肥料,达到期望施肥配比时对应分层施肥器工作参数略有差异,但数值非常接近,表明分层施肥器对不同颗粒大小的肥料适应性较好,因此可统一确定分层施肥器工作参数 α 为 36°、 L 为 13~16 mm。

(4)通过田间试验研究发现,在不同的速度下施肥量配比的变异在 10% 以内,说明分层施肥装置在田间工作时比较稳定,施肥量的配比接近上层 10%、中层 60%、底层 30% 的比例。通过对比肥料颗粒在土壤中的分布,可明显发现分为上、中、下 3 层,且通过调节施肥片的长度可改变肥料在土壤中的分布,实现可调功能。

参 考 文 献

- 1 王激清,马文奇,江荣风,等. 养分资源综合管理与中国粮食安全[J]. 资源科学,2008,30(3):415-422.
WANG Jiqing, MA Wenqi, JIANG Rongfeng, et al. Integrated soil nutrients management and China's food security[J]. Resources Science, 2008, 30(3): 415-422. (in Chinese)
- 2 郭庆法,王庆成,汪黎明. 中国玉米栽培学[M]. 上海:上海科学技术出版社,2004.
- 3 何萍,徐新朋,仇少君,等. 我国北方玉米施肥产量效应和经济效益分析[J]. 植物营养与肥科学报, 2014, 20(6): 1387-1394.
HE Ping, XU Xinpeng, QIU Shaojun, et al. Yield response and economic analysis of fertilizer application in maize grown in North China [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(6): 1387-1394. (in Chinese)
- 4 张东兴,杨丽,孙士明,等. 玉米全程机械化生产技术与装备 [M]. 北京:中国农业大学出版社,2014.
- 5 陈喜昌,赵佰福,李波,等. 玉米施肥方式的优化研究[J]. 黑龙江农业科学, 2010(8): 62-64.
CHEN Xichang, ZHAO Baifu, LI Bo, et al. Optimization on fertilizer application patterns of maize [J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2010(8): 62-64. (in Chinese)
- 6 巨晓棠. 氮肥有效率的概念和意义[J]. 土壤学报,2014,51(5):921-932.
JU Xiaotang. The concept and meanings of nitrogen fertilizer availability ratio [J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(5): 921-932. (in Chinese)
- 7 王秀,赵四申,高清海,等. 夏玉米免耕播种不同机械施肥方式的生态及经济效益分析[J]. 河北农业大学学报, 2000, 23(1): 85-87.
WANG Xiu, ZHAO Sishen, GAO Qinghai, et al. The ecological and economic analysis of mechanical adding fertilizer in zero tillage corn seeding [J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2000, 23(1): 85-87. (in Chinese)
- 8 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(4): 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(4): 6-9. (in Chinese)
- 9 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.
- 10 王春虎,杨文平. 不同施肥方式对夏玉米植株及产量性状的影响 [J]. 中国农学通报, 2011, 27(9): 305-308.
WANG Chunhu, YANG Wenping. Character studying in maize plants and yield impact about different fertilization methods [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(9): 305-308. (in Chinese)
- 11 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)
- 12 赵法箴. 玉米分层深施肥试验及机械施肥技术的研究与应用[J]. 农机化研究,1996,14(4):62-63.
- 13 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(5): 83-85, 90.
ZHAO Jin, ZHANG Jinguo. The design of the key components of precise planter with subsoil and whole layer fertilization [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2012(5): 83-85, 90. (in Chinese)
- 14 COSKUN M, YALCIN Lbrahim, OZARSLAN Cengiz. Physical properties of sweet corn seed (*Zea mayssaccharata* Sturt) [J]. Journal of Food Engineering, 2006, 74(4): 523-528.
- 15 DESHAPANDE S D, BAL S, OJHA P L. Physical properties of soybean [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1993, 56(2): 89-98.
- 16 苑进,刘勤华,刘雪美,等. 多肥料变比变量施肥过程模拟与排落肥结构优化 [J]. 农业机械学报, 2014, 45(11): 81-87.
YUAN Jin, LIU Qinhu, LIU Xuemei, et al. Granular multi-flows fertilization process simulation and tube structure optimization in nutrient proportion of variable rate fertilization [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11): 81-87. (in Chinese)
- 17 吕昊. 外槽轮排肥器优化设计新方法研究[D]. 长春:吉林大学,2014.