

基于 EDEM 的控位分层施肥开沟器作业过程的仿真与试验

顿国强¹, 杨永振¹, 陈海涛², 杜佳兴³, 张敬涛³

(1.东北林业大学机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040; 2.东北农业大学工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150030; 3.黑龙江省农业科学院佳木斯分院, 黑龙江 佳木斯 154007)

摘要:针对免耕播种机分层施肥开沟器存在纵向尺寸大、分层效果差的问题,设计了一种由主开沟器及浅层尾管组成的控位分层施肥开沟器,通过浅层尾管的位置调节,实现分层施肥位置的横向控制。利用 EDEM 建立开沟器离散元仿真模型,模拟其切土开沟分层施肥作业过程。对开沟器侧位及正位施肥方式的土壤耕作阻力进行了理论分析及仿真验证。结果表明:开沟器侧位施肥方式较之正位方式,具有相对较高的土壤耕作载荷及较小的载荷波动;侧位施肥方式具有较佳的肥料分层效果及更为集中的颗粒空间分布特性。田间验证试验结果表明,控位分层施肥开沟器可实现分层施肥设计功能,正位及侧位方式的平均施肥深度差及施肥深度差变异系数分别为 3.9 cm、4.7 cm 及 10.8%、5.1%,侧位方式具有更明显、稳定的肥料分层效果,且试验结果与仿真结果相一致。

关键词:免耕播种机; EDEM; 控位分层施肥; 开沟器; 仿真分析

中图分类号: S223.2⁺4

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2018)01-0095-06

Simulation analysis of working process of control position separated layer fertilizer furrow opener based on EDEM and test

DUN Guoqiang¹, YANG Yongzhen¹, CHEN Haitao², DU Jiaying³, ZHANG Jingtao³

(1.College of Mechtronic Engineering, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang 150040, China; 2.College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin, Heilongjiang 150030, China; 3.Jiamusi Branch of Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Jiamusi, Heilongjiang 154007, China)

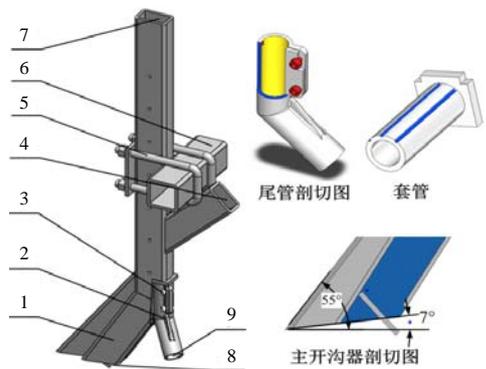
Abstract: In order to solve the problems of large longitudinal dimension and poor stratification effect of no-till planter separated layer fertilizer furrow opener, a control position separated layer fertilizer furrow opener is designed by consisting of main opener and shallow tail tube. The horizontal position of fertilization was controlled by adjusting the position of the shallow tail pipe position. A discrete element model has been built by EDEM to simulate the process of cutting soil furrowing and separated layer fertilizing. The theoretical analysis and simulation results of the soil tillage resistance of the open and lateral fertilizers showed that the lateral fertilizers used in the open ditches had relatively higher soil tillage loadings and smaller load fluctuations. The simulation analysis of stratification and fertilization efficiency of opener was carried out. The results showed that lateral fertilizer application had better stratification effect of fertilizer and more concentrated particle spatial distribution. Field test results show that the control stratum fertilization opener can achieve the function of stratified fertilization, The mean of fertilization depth difference and coefficient of variation of fertilization depth difference of lateral position mode and normal position mode is 4.7 cm, 3.9 cm and 5.1%, 10.8%, and lateral position has a more conspicuous and stable layered performance. The field test results were in agreement with the simulation results.

Keywords: no-till planter; EDEM; control position separated layer fertilizer; furrow opener; simulation analysis

免耕播种作业后, 秸秆、根茬仍覆盖于地表, 秸秆、根茬的缠绕堵塞, 使得中耕追肥难以进行, 而播种前也没能耕翻施基肥, 因此, 需在播种的同时, 施足基肥与种肥, 以满足作物全生命期的生长所需^[1-2]。不同作物其最佳种肥、基肥分配比例及分层施肥位置亦有所不同, 相关研究^[3-6]表明: 小麦的种肥、基肥施肥深度差 6 cm、施肥比 3 7 时, 能较好满足作物生长过程中不同阶段的养分需求; 大豆的最佳施肥深度差 4~8 cm、施肥比 1 2 时, 且施肥方式多样, 正位分层、侧位分层、正侧位分层皆有应用; 采用分层施肥的玉米产量显著高于一次性深施, 且最佳施肥比为 4 6。张小丽等^[7]设计的双层施肥旋耕播种机, 通过前后布置两套开沟器完成分层施肥作业; 姚万生等^[8]设计的组合式分层施肥播种开沟器, 可以实现种肥、基肥分层施入土壤 11、17 cm 深处, 种、基肥比 3 7。笔者针对免耕播种机分层施肥开沟器存在纵向尺寸大、分层效果差的问题, 结合分层施肥的农艺要求, 设计了一种具有一定破茬防堵性能的控位分层施肥开沟器, 利用 EDEM 建立其离散元仿真模型, 并对其正位及侧位分层施肥方式进行模拟仿真, 对比分析两种分层施肥方式的土壤耕作阻力及施肥效果, 并进行田间试验验证, 以期对控位分层施肥开沟器的设计提供参考。

1 控位分层施肥开沟器的结构及工作原理

控位分层施肥开沟器的结构如图 1 所示。控位分层施肥开沟器主要由主开沟器 1 及浅层尾管 2 组成, 在主开沟器的上部及中后部设有浅层管 4 和深



1 主开沟器; 2 尾管; 3 固定螺栓; 4 浅层管; 5 “U”型卡; 6 后梁; 7 深层管; 8 深层管口; 9 浅层管口。

图1 控位分层施肥开沟器的结构

Fig.1 The structure diagram of the control position separated layer fertilizer furrow opener

层管 7, 分别与浅层管口 9 和深层管口 8 相连通, 控位分层施肥开沟器由“U”型卡固装在机架后梁上。

主开沟器主要由经热处理处理的 65Mn 钢板(HRC45~50)、钢板(Q235)、矩形管及圆管焊接而成。为防止主开沟器的出肥口堵塞, 在开沟器深层排肥口处焊接防堵板, 且主开沟器的前端焊接具有一定破茬能力的 6 mm 厚锰钢刀片, 刃口处开有 3×45°结构倒角, 主开沟器入土角为 55°, 入土隙角 7°。因开沟器配装在定轴刚齿种床整备装置后部, 其除茬单体已清除施肥播种带上的秸秆及根茬, 因此, 开沟器只需具备良好的入土性能、一定的破茬性能及较佳的分层施肥效果即可, 在主开沟器的套管上设有夹角 45°的 3 个凹槽结构, 而在浅层尾管与其配装的接合部位设有一个条状凸起, 如图 2 所示。通过改变两者间的接合方式, 可实现浅层肥位于深层肥正上、左上、右上 3 个位置的选择, 其横向距离 45 mm, 肥料高度方向距离 50 mm, 同时, 深浅施肥口的纵向间距为 60 mm, 可提升开沟器的回土性能, 保证肥料的分层质量。

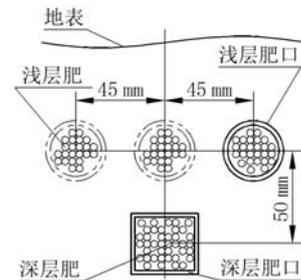


图2 开沟器的施肥方式

Fig.2 The fertilizer pattern diagram of the fertilizer furrow opener

2 切土施肥作业过程的仿真及试验

2.1 离散元仿真模型的建立

控位分层施肥开沟器具有 3 种作业状态, 即同位、左侧位及右侧位。左侧位及右侧位施肥方式相同, 分别处于浅层肥管口的相对位置, 因此, 仅选择研究开沟器的同位及左侧位施肥方式, 通过建立其 EDEM 仿真模型, 模拟其切土施肥作业过程, 并对开沟器的土壤耕作阻力及肥料空间分施状况进行对比分析。

首先, 利用 SolidWorks 2009 建立 2 种施肥方式的开沟器三维实体模型, 并通过结构简化及布尔和运算的方法, 视每种方式的开沟器为单一实体, 并在各自深浅层出肥口处建立对应的肥料颗粒工

厂实体模型，创建承载土壤颗粒的土槽及土壤颗粒工厂模型，并将文件另存为 *.IGS 格式文件 CPSLF.igs，开沟器沿 x 轴负向前进， z 轴负向为重力加速度方向，且主开沟器侧面平行于 xoz 面。创建 EDEM 仿真算例 CPSLF.dem，采用系统默认的 Hertz-mindlin (no-slip) 模型定义模型中肥料颗粒间、肥料颗粒与土壤间、土壤与开沟器间、肥料与开沟器间的接触力学模型，采用 Hertz-mindlin with JKR 模型定义土壤颗粒间的接触力学模型，依据文献[9-13]，确定模型相关参数，列于表 1。

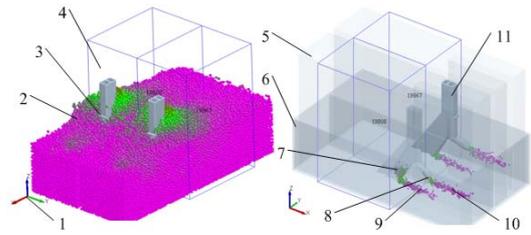
表1 仿真模型参数的设置

Table 1 Simulation model parameter setting		
项目	参数	取值
肥料颗粒	泊松比	0.25
	剪切模量	1.0×10^7 Pa
	密度	$1\ 861\ \text{kg/m}^3$
土壤颗粒	泊松比	0.50
	剪切模量	2.0×10^7 Pa
	密度	$2\ 600\ \text{kg/m}^3$
开沟器	泊松比	0.30
	剪切模量	7.9×10^{10} Pa
	密度	$7\ 850\ \text{kg/m}^3$
开沟器-肥料	恢复系数	0.5
	静摩擦系数	0.4
	滚动摩擦系数	0.02
开沟器-土壤	恢复系数	0.1
	静摩擦系数	0.2
	滚动摩擦系数	0.02
肥料-肥料	恢复系数	0.6
	静摩擦系数	0.4
	滚动摩擦系数	0.01
肥料-土壤	恢复系数	0.3
	静摩擦系数	0.5
	滚动摩擦系数	0.02
土壤-土壤	恢复系数	0.3
	静摩擦系数	0.5
	滚动摩擦系数	0.02
	表面能量	$10.5\ \text{J/m}^2$

为保证控位分层施肥开沟器分层施肥过程的真实模拟，对选用的乐索尔玉米复合肥颗粒参数进行测定，肥料颗粒等效半径为 1.641 mm，半径标准差 0.152 6 mm，采用球体颗粒对肥料颗粒进行建模。利用 EDEM 软件自动计算肥料颗粒的质量属性，颗粒质量 0.023 932 g，颗粒体积 $18.409\ \text{mm}^3$ 。为节省运算时间，采用球形土壤颗粒建模，设定土壤颗粒半径为 4.5 mm，计算其质量属性为颗粒质量 0.992 4 g，颗粒体积为 $381.7\ \text{mm}^3$ 。

按表 1 参数配置模型部件的材料属性，设定两开沟器及各自配置的深浅层出肥颗粒工厂的作业速

度为 1.75 m/s，土壤颗粒工厂的颗粒生成总数量为 40 000 个，生成速率 50 000 个/s，尺寸类型为等径球体颗粒，初始速度沿 z 轴负向为 4 m/s。浅层肥口颗粒工厂的颗粒生成总数量 1 000 个，生成速率 2 000 个/s，尺寸类型为等径球体颗粒，初始速度沿 z 轴负向为 2 m/s。深层肥口颗粒工厂的颗粒生成总数量为 1 500 个，生成速率 3 000 个/s，尺寸类型为等径球体颗粒，初始速度沿 z 轴负向为 2 m/s。仿真步长 1.928×10^{-5} s，数据记录间隔 0.01 s，控位分层施肥开沟器的 EDEM 仿真模型如图 3 所示。



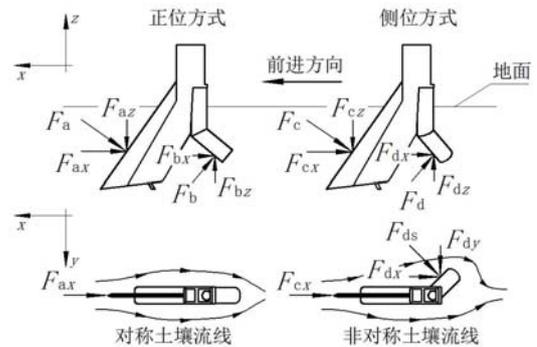
1 空间坐标系；2 土壤颗粒；3 同位开沟器；4 肥料颗粒空间分布监测区；5 土壤颗粒工厂；6 土槽；7 深层肥颗粒工厂；8 浅层肥颗粒工厂；9 深层肥料；10 浅层肥料；11 侧位开沟器。

图3 控位分层施肥开沟器的EDEM仿真模型

Fig.3 Simulation model of control position separated layer fertilizer furrow opener

2.2 开沟器土壤耕作阻力分析及验证仿真

为对比 2 种施肥方式对土壤耕作载荷的影响，对 2 种施肥方式下开沟器的受力进行分析，如图 4 所示。



F_a 、 F_{ax} 、 F_{az} 及 F_c 、 F_{cx} 、 F_{cz} 分别为正位及侧位方式锐角主开沟器竖直面合力及其分量； F_b 、 F_{bx} 、 F_{bz} 及 F_d 、 F_{dx} 、 F_{dz} 分别为正位及侧位方式钝角尾管竖直面合力及其分量； F_{ds} 、 F_{dsx} 、 F_{dsy} 为侧位方式钝角尾管水平面合力及其分量。

图4 开沟器土壤耕作的受力对比

Fig.4 Comparative analysis of force on the furrow opener soil tillage

开沟器进行土壤开沟施肥作业时，主要受锐角主开沟器耕作阻力及钝角尾管耕作阻力作用，正、侧位施肥方式的开沟器的耕作阻力空间各轴分量合力为

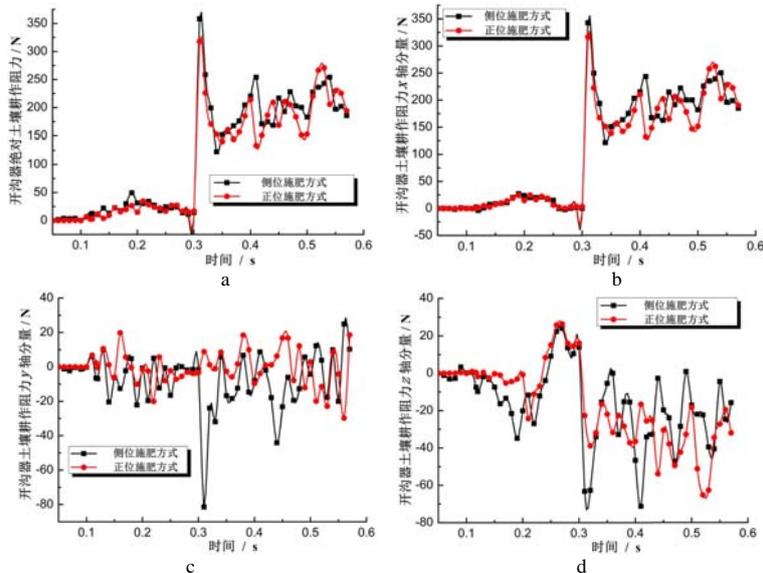
$$\begin{cases} F_{\text{正位}_x} = F_{ax} + F_{bx} \\ F_{\text{正位}_z} = F_{az} - F_{bz} \\ F_{\text{正位}_y} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} F_{\text{侧位}_x} = F_{cx} + F_{dx} \\ F_{\text{侧位}_z} = F_{cz} - F_{dz} \\ F_{\text{侧位}_y} = F_{dy} \end{cases} \quad (2)$$

式中： $F_{\text{正位}_x}$ 、 $F_{\text{正位}_z}$ 、 $F_{\text{正位}_y}$ 及 $F_{\text{侧位}_x}$ 、 $F_{\text{侧位}_z}$ 、 $F_{\text{侧位}_y}$ 分别为正位及侧位方式开沟器空间各轴方向合力,其中 $F_{ax}=F_{cx}$ 、 $F_{az}=F_{cz}$ 、 $F_{bx}<F_{dx}$ 、 $F_{bz}<F_{dz}$ 、 $F_{dy}>0$ 。

由图 2 可知,开沟器开沟作业时,正位方式的尾管位于主开沟器的正后方,两侧的土壤流线呈对称状,且经过主开沟器的土壤依靠重力自然回流,部分土壤接触尾管的下表面;侧位方式,其土壤流线呈非对称状,土壤流经主开沟器一侧后与侧置尾管接触,对开沟器产生与尾管转动方向相反的横向阻力,且侧位尾管土壤耕作阻力较大,由于侧位方式具有较大且呈非对称状的动土面积,因此,侧位方式的绝对土壤耕作阻力及其前进分量及侧向分量皆大于正位方式,而垂直分量等于主开沟器与尾管的垂直分量差,两者主开沟器垂直分量相等,且侧位方式尾管垂直分量大于正位方式,耕作阻力垂直分量正位方式大于侧位方式。在开沟器随限深轮变深耕作时,因侧位方式的尾管的侧向配置,有阻碍开沟器向相反方向运动的趋势,因此,侧位方式的土壤耕作阻力波动状况优于正位方式。

为验证开沟器 2 种施肥方式耕作阻力对比分析结果的正确性,利用 EDEM 后处理模块,提取开沟器由开始到稳定切削土壤分层施肥作业的土壤耕作阻力的绝对值及其空间分量数据,如图 5 所示。由图 5-a 可知,2 种方式的分层施肥开沟器的绝对土壤耕作阻力具有相同的变化趋势,0~0.3 s 的阻力值为 0~50 N,此段为开沟器开始与土壤颗粒接触直至整个开沟器进入土壤模型的一段行程;0.3~0.35 s 出现的耕作阻力峰值是由肥料颗粒的突然生成造成的瞬间碰撞接触导致的,其极限载荷值分别为 358 N 和 317 N,侧位方式大于正位方式;0.35~0.6 s 为开沟器稳定分层施肥作业时段,土壤耕作阻力趋于平稳,分布在 125~275 N 范围内,且侧位开沟器的作业载荷基本位于同位开沟器的上部,表征侧位方式分层施肥开沟器具有相对较大的作业载荷。开沟器土壤耕作阻力 x 轴分量曲线与绝对土壤耕作阻力具有相同的趋势关系,亦分为入土初段、瞬间接触段及稳定作业段,极限载荷分别为 342 N 和 316N,稳定载荷为 125~275 N(图 5-b),基本与绝对载荷一致,这表明开沟器土壤耕作阻力主要由开沟器的前进方向耕作阻力导致的。同位分层施肥开沟器的 y 轴分量基本为与 0 N 值相对称的曲线,力值范围 -25~25 N(图 5-c),基本由土壤的振动摩擦所导致。侧位分层施肥开沟器的力值为负数,稳定作业段的最大力值为 45 N,这是由侧位方式时浅层尾管的摆动与 y 轴正向相反所引起的。两开沟器土壤耕作阻力的 z 轴分量值具有相同的趋势,且在稳定作业段,



a 绝对土壤耕作阻力; b 土壤耕作阻力x轴分量; c 土壤耕作阻力y轴分量; d 土壤耕作阻力z轴分量。

图5 土壤耕作阻力曲线

Fig.5 Soils tillage resistance force curve

载荷值为负数，即方向向下(图 5-d)。这是由于开沟器的入土角为锐角，有自动入土的趋势，位于开沟器前刀面的土壤颗粒被向上翻起，由土壤颗粒向下的反作用力导致载荷为负值。

为量化分析分层施肥开沟器稳定开沟分层施

肥作业载荷，利用 EDEM 后处理模块，提取 0.35 ~ 0.60 s 时段内的控位分层施肥开沟器作业状态的绝对作业载荷，即耕作阻力空间三轴分量数据，并计算阻力数据平均值及标准差，以表征开沟器的平均作业载荷即载荷的波动状况，结果见表 2。

表2 土壤耕作阻力仿真结果

Table 2 Simulation results of soils tillage resistance force

指标	土壤耕作阻力仿真结果/N							
	侧位绝对	正位绝对	侧位 x 轴	正位 x 轴	侧位 y 轴	正位 y 轴	侧位 z 轴	正位 z 轴
平均值	200.69	189.74	197.89	185.86	-6.67	-0.61	-24.41	-34.91
标准差	30.21	38.54	29.39	37.05	15.48	13.34	17.50	13.64

由表 2 可知，除土壤耕作阻力 z 轴分量外，侧位方式其他载荷值皆大于正位方式，这表明侧位比正位具有更大的土壤耕作阻力，这是由于开口器采用侧位方式时，后侧的浅层尾管相对于对称面旋转 45°，造成开沟器的整体幅宽增大，土壤扰动量增大，土壤耕作阻力增大。对于 z 轴分量，正位方式大于侧位方式，这是由于开沟器的浅层尾管相当于钝角开沟器，土壤颗粒对其有向上作用的趋势，因此，可以减小开沟器的高度方向的载荷。对于 y 轴分量，因正位方式开沟器为对称结构形式，其力值为 -0.16 N，可忽略，而侧位力值为 -6.67 N。对于指标载荷标准差来说，绝对值及 x 轴分量，正位大于侧位，对于 y、z 轴分量，侧位大于正位，这表征开沟器的土壤耕作阻力载荷波动状况，正位小于侧位，这

是由于尾管的外伸设置，在主开沟器与尾管间形成一个尖角凸起空间结构，有利于稳定土壤颗粒，降低载荷的波动状况。对于 y、z 轴载荷标准差，正位小于侧位，正位具有更小的载荷波动状况，这是由于正位开沟器的对称结构导致的，仿真结果与理论分析结果相一致。

2.3 仿真施肥效果对比及田间试验

为分析施肥方式变化对肥料分层施肥效果的影响，参照文献[14-15]，利用肥料颗粒监测区 Grid bin group 01 (排肥管)提取肥料颗粒的空间分布数据，如图 6 所示。

由图 6 可见，无论是从肥料颗粒的 xoz 平面空间分布还是 yoz 平面空间分布来讲，侧位分层模式的

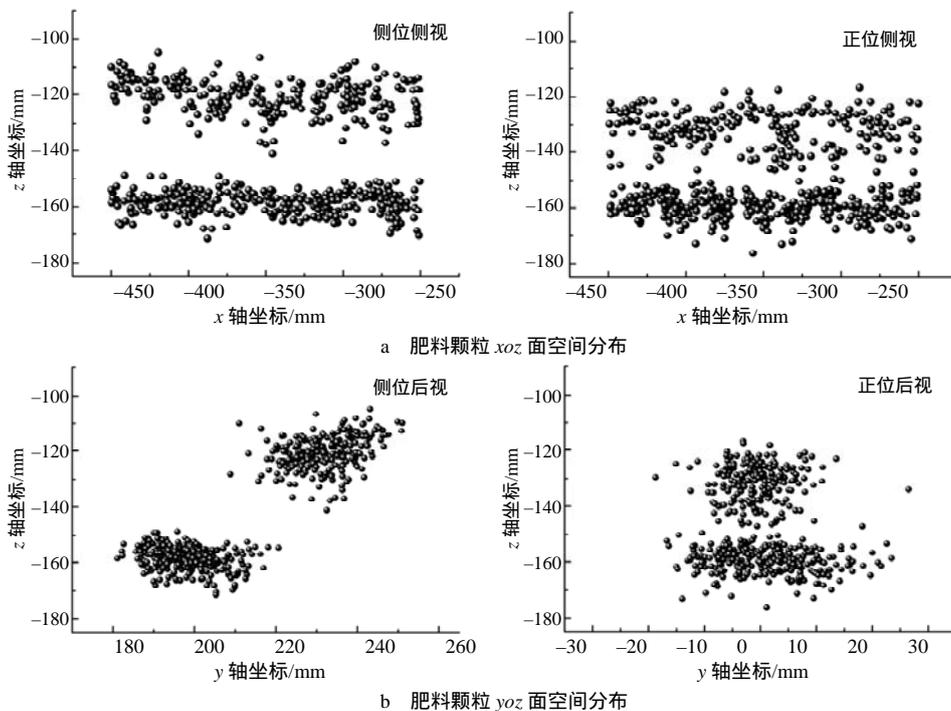


图6 分层施肥肥料颗粒的空间分布状态

Fig.6 The fertilizer particles space distribution of separate layer fertilizer

肥料分层效果都优于同位分层施肥,前者的肥料分布状况更为集中。对两者的深层及浅层肥料颗粒的空间坐标进行求解运算,获取正、侧位施肥方式深层肥料的平均施肥深度及施肥深度标准差分别为-159.567、4.581与-158.664、4.209 mm,浅层肥料的平均施肥深度及施肥深度标准差分别为-131.503、6.72与-120.401、6.279 mm。当设定深、浅层施肥深度相同时,平均深层施肥深度基本相同,浅层施肥深度,正位方式施肥深度大于侧位方式,这是由于当采用正位分层施肥方式时,深、浅层施肥口在横向位于同一平面位置,浅层施肥口经过的是由主开沟器作业后的土壤上,土壤过于疏松,土壤的自然回土作用,经过浅层尾管后,土壤产生了一定的下陷,造成同位浅层肥的施肥深度较深。对于侧位分层施肥,浅层尾管的出肥口位于底部未耕的土壤上,其深浅肥沟的横向错位,使肥口间增加了一个尖角形的回土空间,增强了肥料的分层效果。由施肥深度标准差值可知,正位方式皆大于侧位方式,表明正位方式的肥料颗粒空间分布更为分散。

开沟器的作业效果验证试验在东北农业大学农学院进行。将开沟器结合肥料调比分配装置配装在免耕清秸覆秸精播机上,作业效果如图7所示。

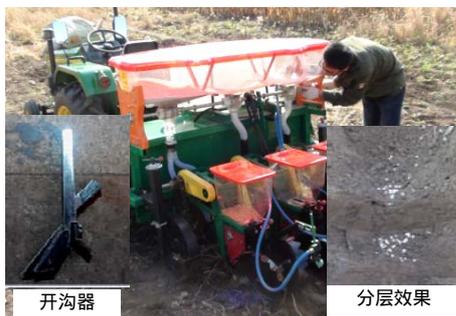


图7 分层施肥开沟器田间试验效果

Fig.7 Separated layer fertilizer furrow opener field test performance

试验田平均土壤硬度 1.2 MPa,土壤相对湿度 19%,选取乐索尔玉米复合肥,设定正位及侧位 2 种方式,深浅层肥分配比 1:1。试验段长 10 m,于 3~7 m 间随机选取 5 点,测量深、浅层肥料的施肥深度 h_{1n} 、 h_{2n} ,计算每点的 $H_n = h_{1n} - h_{2n}$, $n=1, 2, \dots, 5$;为表征开沟器不同施肥方式的分层施肥效果,定义试验指标为平均施肥深度差 H ,差值越大,开沟器分层效果越明显。

$$H = \frac{\sum_{n=1}^5 H_n}{5} \quad (3)$$

为表征肥料颗粒的空间集中分布状况,定义试验测试指标施肥深度差变异系数。

$$\varphi = \frac{\sigma}{H} \times 100\% = \frac{\sqrt{\frac{1}{5} \left(\sum_{n=1}^5 (H_n - H)^2 \right)}}{H} \times 100\% \quad (4)$$

式中: σ 为施肥深度差的标准差,施肥深度变异系数 φ 越小,肥料空间分布集中性及稳定性越好。

经测定及计算,正位及侧位施肥方式的平均施肥深度差 H 及施肥深度差变异系数 φ 分别为 3.9 cm、4.7 cm 及 10.8%、5.1%,表明开沟器可实现分层施肥设计功能,侧位方式具有较佳的肥料空间分布集中性及稳定性,肥料分层效果较好。

参考文献:

- [1] 徐波,汤楚宙,官春云,等. 2BYF-6 型油菜免耕直播联合播种机的改进及试验[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2008, 34(1): 109-111.
- [2] 顿国强,陈海涛,李昂,等. 刀齿排布旋向对免耕覆秸精播机清秸单体性能的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(12): 48-56.
- [3] 张晓雪,吴冬婷,龚振平,等. 施肥深度对大豆氮磷钾吸收及产量的影响[J]. 核农学报, 2012, 26(2): 364-368.
- [4] 耿伟,薛绪掌,王志敏. 肥料分层深施对旱作冬小麦光合生理特性及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2006, 26(3): 166-168.
- [5] 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): 29-32.
- [6] 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.
- [7] 张小丽,张晋国,李江国,等. 双层施肥旋耕播种机的设计[J]. 农业机械学报, 2006, 37(11): 49-51.
- [8] 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.
- [9] 宋学锋,张锋伟,戴飞,等. 基于离散元的施肥机肥料块破碎装置参数的优化[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2017, 43(2): 206-211.
- [10] 顿国强,陈海涛,冯夷宁,等. 基于 EDEM 软件的肥料调配装置关键部件参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(7): 36-42.
- [11] 陈作炳,项勤,吕银雷,等. 立式有机废物发酵系统搅拌器的阻力分析[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2017, 43(5): 570-574.
- [12] 顿国强,陈海涛,纪文义. 基于 EDEM 仿真与 Solid Works Simulation 的凿式深松铲有限元分析[J]. 河南农业大学学报, 2017, 51(5): 678-682.
- [13] 顿国强,陈海涛,纪文义. 基于 EDEM 及 Solid Works Simulation 的清茬单体刀盘轴疲劳分析[J]. 大豆科学, 2017, 36(5): 796-802.
- [14] GAO Qun, CHEN Ying, ZHOU Haibo, et al. Simulation of a seed opener using the discrete element method (DEM) [J]. Agric Eng Int: CIGR Journal, 2015, 17(3): 72-82.
- [15] KARAYEL D, OZMERZI A. Comparison of vertical and lateral seed distribution of furrow openers using a new criterion [J]. Soil & Tillage Research, 2007, 95: 69-75.

责任编辑: 罗慧敏

英文编辑: 吴志立