

## 外槽轮排肥器排肥离散元仿真及排肥舌参数优化

顿国强<sup>1</sup>, 于春玲<sup>1</sup>, 杨永振<sup>1</sup>, 陈海涛<sup>2</sup>, 纪文义<sup>2</sup>, 叶金<sup>1</sup>

(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)

**摘要:**为通过优化外槽轮排肥器排肥舌结构, 以提升其排肥均匀性, 利用 EDEM 建立外槽轮排肥器的离散元仿真模型, 对其排肥作业过程进行模拟仿真, 通过肥料颗粒运动状态仿真结果验证肥料颗粒流动特性。应用虚拟试验方法, 分析排肥舌倒角结构参数变化对肥料颗粒流动特性的影响。结果表明: 排肥流量变异系数随着排肥舌倒角的增大而先减小后增大, 两者间呈负抛物线型二次函数关系, 且在排肥舌倒角弧长与单个凹槽弧长比值为 0.85 时, 外槽轮排肥器排肥质量波动最小, 排肥均匀性最佳。验证试验结果表明: 配装最优结构排肥舌的外槽轮排肥器排肥流量变异系数最小, 具有最佳的排肥均匀性, 比传统平端排肥舌排肥流量均匀性提高了 49.9%。

**关键词:** 外槽轮排肥器; 排肥特性; 排肥舌; 离散元仿真; 参数优化; 验证试验

中图分类号: S224.21

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2018)06-0661-05

## Discharging characteristic test of outer-groove wheel fertilizer and parameter optimization of fertilizer tongue by discrete element simulation

DUN Guoqiang<sup>1</sup>, YU Chunling<sup>1</sup>, YANG Yongzhen<sup>1</sup>, CHEN Haitao<sup>2</sup>, JI Wenyi<sup>2</sup>, YE Jin<sup>1</sup>

(1.College of Mechtronic Engineering, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang 150040, China; 2.Engineering College, Northeast Agricultural University, Harbin, Heilongjiang 150030, China)

**Abstract:** In order to improve the fertilizing uniformity of outer-groove fertilizer by parameter optimization of fertilizer tongue, the discrete element simulation model of outer-groove fertilizer has been built to simulate the discharging working process. The simulation results were used to analyze the flow characteristic of the fertilizer particles. By using virtual test method, the effect of fertilizer tongue chamfer on fertilizer flow character has been analyzed. The results indicated that as the tongue chamfer increases, the variance coefficient of fertilizer discharging monitor mass decreases firstly then increases. There is a negative parabola quadratic function correlation between them. and the discharging amount has a least fluctuation with the best fertilizing uniformity when the ratio of the chamfer to single groove arc length is 0.85. The results of verify test indicate that outer-groove fertilizer with optimal structure fertilizer tongue has the smallest variance coefficient of fertilizer flow and its fertilizing uniformity is the best. Compared to the traditional fertilizer tongue with flat end, the chamfer fertilizer tongue had an reduction increase in fertilizing uniformity by 49.9%.

**Keywords:** outer-groove wheel fertilizer; discharging characteristic; fertilizer tongue; discrete element simulation; parameter optimization; verification experiment

外槽轮排肥器结构简单, 适应性强, 排量稳定, 调节方便, 工作可靠, 价格便宜<sup>[1-2]</sup>。这种排肥器外槽轮具有特殊槽脊结构: 当槽轮运动凹槽经过排肥舌外缘时, 排肥量增大, 而当齿脊经过排肥舌外缘时, 排肥量又减小, 排肥过程中排肥流量呈现脉动

状态, 导致排肥均匀性差, 进而影响施肥开沟器的施肥均匀性<sup>[3-4]</sup>。为提升外槽轮排肥器的排肥均匀性, 通常采用螺旋状凹槽的槽轮结构或将排肥舌的排肥外端部加工成倒角倾斜状。采用传统的试验研究方法效率低、成本高及周期长<sup>[5-6]</sup>。近年, 离散元

收稿日期: 2018-03-23

修回日期: 2018-09-13

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(2572017BB10); 中央高校建设世界一流大学(学科)和特色发展引导专项资金暨双一流经费(41113278); 现代农业产业技术体系建设专项(GARS-04); 东北林业大学大学生国家级创新训练计划项目(201810225056)

作者简介: 顿国强(1986—), 男, 黑龙江省依兰县人, 博士, 讲师, 主要从事农业及林业机械装备研究, dunguoqiang1986@163.com

仿真软件 EDEM 被广泛应用到排肥装置的设计中,张涛等<sup>[7]</sup>对外槽轮排肥器排量进行离散元模拟分析;吕昊等<sup>[8]</sup>利用自行研发的离散元仿真软件对外槽轮排肥器的肥料颗粒的运动状态及排肥特性进行仿真分析,但少见关于排肥舌结构参数的优化研究。

笔者采用 EDEM 建立外槽轮排肥器的离散元仿真模型,模拟外槽轮排肥器的排肥作业过程,观察其排肥特性,并分析排肥舌槽口倒角结构参数变化对外槽轮排肥器流量特性的影响,旨在优选出排

肥均匀性较好的排肥舌结构。

## 1 外槽轮排肥器的排肥特性

市购外槽轮排肥器如图 1-a 所示,主要由排肥盒、排肥槽轮、梅花状端部挡圈、排肥管口及排肥舌组成。排肥槽轮轴向长度 60 mm,直径 55 mm,周向均布 7 个槽口弧长为 20.11 mm 的凹槽。

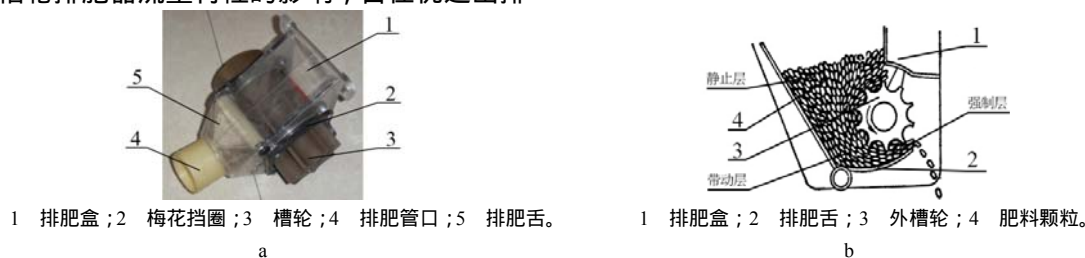


图1 外槽轮排肥器的结构组成及排肥流量特性

Fig.1 Structure and discharging characteristic of out-groove wheel fertilizer

参照文献[9-10],与外槽轮排种器种子流动性类似,外槽轮排肥器肥料流动特性如图 1-b 所示。肥料颗粒由于重力的作用,由肥箱底部的排肥孔排出,进入外槽轮排肥器内。外槽轮由排肥轴驱动旋转,肥料颗粒依靠重力依次填充外槽轮凹槽,肥料随槽轮转动,肥料在外槽轮槽齿的强制作用下,由排肥舌的上部边缘滑落,经排肥口排出。其中,充入外槽轮凹槽内的肥料随着槽轮的旋转强制流动,处于外槽轮边缘的肥料因槽齿的带动及肥料颗粒间的内摩擦作用,随之旋转,整个断面空间的肥料颗粒运动速度沿半径方向由内向外逐渐减小,直至为零;因此,可将肥料颗粒流动空间由内向外依次分为强制层、带动层及静止层 3 部分。由外槽轮的特殊槽脊结构可知,当槽轮的槽口经过排肥舌边缘时,排肥量会增大,当齿脊经过排肥舌边缘时,排肥量会减小,排肥过程的排肥流量呈脉动状态,排

肥均匀性差,排肥流量的波动还可能堵塞排肥管,影响其正常作业。

## 2 模型建立与排肥舌参数优化

应用 SolidWorks2009 对外槽轮排肥器进行等比例三维实体建模。建模时,外槽轮回转中心与坐标原点重合,回转轴与 Y 轴重合,Z 轴负向,为重力加速度方向,外槽轮排肥器实体模型如图 2-a 所示。已知,槽轮槽口弧长 20.11 mm,设定排肥舌排肥端为单边倾斜状(如图 2-b 所示),排肥舌轴向长度 60 mm,侧面的直角边倒角弧长为  $a$ , $a$  分别取 5、10、15、20、25、30 mm,其中,30 mm 倒角为排肥舌周向距离包覆 1.5 倍的槽口弧长。对排肥舌进行建模,将排肥器进行 Y 轴轴向阵列 6 个实体,外槽轮排肥器的仿真实体模型如图 2-c 所示,并将实体模型另存为\*.IGS 格式文件 simu.IGS。

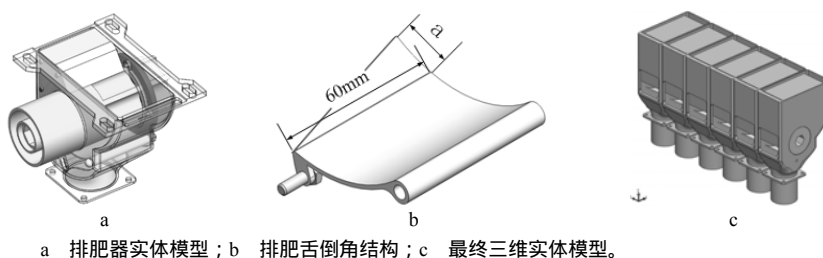


图2 排肥舌倒角结构参数优化三维实体模型

Fig.2 3D model for parameter optimization of fertilizer tongue chamfer structure

利用 EDEM 2.4 建立离散元仿真算例 Flow opti-para.dem；采用 Hertz-mindlin(no-slip)模型定义肥料颗粒间、肥料颗粒与槽轮、壳体及排肥舌间的接触力学模型，由相关文献<sup>[11-14]</sup>确定模型参数，列于表 1。

表1  离散元仿真基础参数

Table 1  Discrete element simulation parameter setting		
参数	属性	取值
肥料颗粒	泊松比	0.25
	剪切模量/Pa	1.0×10 <sup>7</sup>
	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	1 861
槽轮、壳体、排肥舌	泊松比	0.394
	剪切模量/Pa	3.189×10 <sup>8</sup>
	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	1 335
颗粒-颗粒	恢复系数	0.6
	静摩擦系数	0.4
	滚动摩擦系数	0.01
颗粒-槽轮、壳体、排肥舌	恢复系数	0.5
	静摩擦系数	0.5
	滚动摩擦系数	0.01

为保证排肥过程的真实模拟，采用球体颗粒对肥料颗粒进行建模。随机选取 30 粒玉米硫酸钾长效复合肥颗粒，分别测量颗粒的三轴直径及质量，结果颗粒平均质量 0.033 5 g，质量标准差 0.017 1 g；颗粒平均半径 1.638 2 mm，半径标准差 0.321 0 mm。颗粒质量及半径服从正态分布。

按球体计算肥料颗粒的密度。

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{\frac{4}{3} \pi \cdot (\frac{D}{2})^3} = \frac{6m}{\pi \cdot D^3}$$

(1)

式中： $\rho$  为肥料颗粒密度(g/cm<sup>3</sup>)； $m$  为肥料单粒质量(g)； $V$  为肥料单粒体积(mm<sup>3</sup>)； $D$  为肥料颗粒平均直径(mm)。

由式(1)计算得，肥料颗粒密度  $\rho=1.861\text{ g/cm}^3$ 。将排肥器 simu.IGS 文件导入 EDEM，按表 1 配置各模型部件材料属性，并在排肥器上部建立 Box 颗粒工厂，设定单个颗粒工厂的颗粒生成总数 7 000，生成速率 50 000 个/s，颗粒半径大小服从正态分布，半径标准差 0.321 mm，槽轮转速 30 r/min，槽轮工作槽长 30 mm，仿真步长  $8.9679\times10^{-9}\text{ s}$ ，数据记录间隔 0.083 s，外槽轮排肥器的 EDEM 仿真模型如图 3 所示。

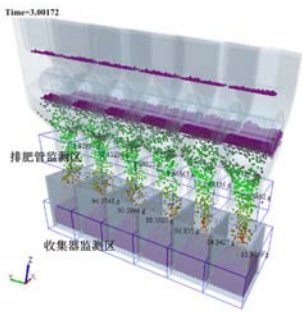


图3  外槽轮排肥器EDEM仿真模型  
Fig. 3  EDEM simulation model of out-groove wheel fertilizer

为分析肥料颗粒在排肥器壳体内部的运动状态，并佐证排肥流量特性分析的正确性，利用 EDEM 的后处理模块，设定颗粒模型颜色显示方式为绝对速度，截取外槽轮排肥器 0.7~1.4 s 的颗粒运动状态侧向断面视图(图 4)，表征肥料颗粒在 0.7~1.4 s 的颗粒运动状态。0.7~0.9 s 表征肥箱内的肥料颗粒充填单个凹槽的过程，>0.9~1.1 s 为肥料颗粒随凹槽运动的过程，>1.1~1.4 s 为完成了槽轮下一个凹槽的肥料充填过程，如此循环往复。当充填完肥料颗粒的凹槽经过排肥舌的外缘排肥端时，肥料依靠重力落入排肥管，完成排肥作业。肥料颗粒沿槽轮半径方向，肥料颗粒的颜色依次为红色、绿色、粉色，

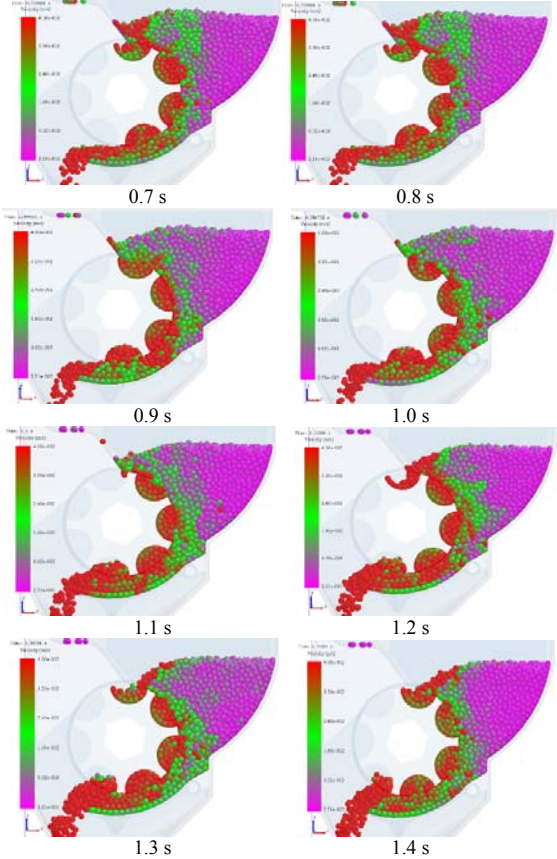


图4  排肥盒内肥料颗粒运动状态  
Fig. 4  Fertilizer particles motion state in fertilizer box by simulation analysis

表示肥料颗粒的运动速度逐渐减小,直至相对静止,其中红色颗粒为强制流动颗粒,绿色为随动颗粒,粉色为静止颗粒,这与对外槽轮排肥器的工作过程肥料流动特性的分析相一致。

为分析排肥舌倒角参数变化对肥料颗粒空间分布状况的影响,分别在排肥器下端排肥管处及肥料收集器处建立颗粒监测区<sup>[14]</sup>,并利用其分别提取从作业开始经过 1.5 s 及 2.2 s 的肥料颗粒质量时变数据,如图 5 所示。

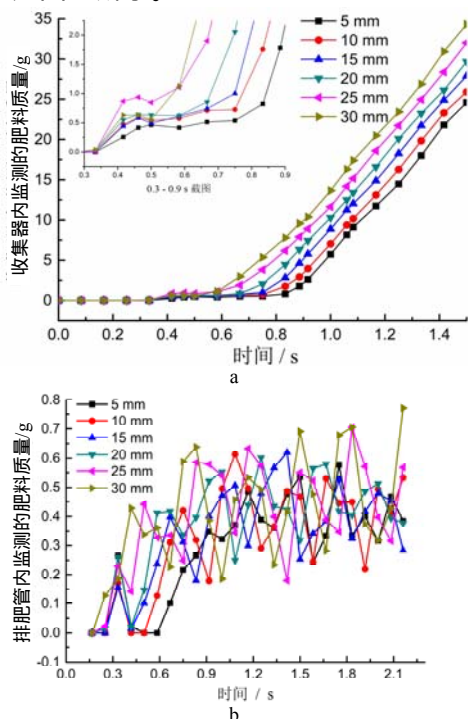


图5 收集器和排肥管内监测的肥料质量随时间的变化

Fig.5 Fertilizer particles mass monitor of collector and fertilizer tube dependent on time

由图 5-a 可知,在 0~0.32 s,收集器内肥料监测质量为 0,表征这一时段由排肥器排出的肥料颗粒未落入肥料收集器,在>0.32~0.6 s,肥料颗粒稍有增加,表明外槽轮开始旋转前,有少量自由滑落的肥料颗粒落入,在>0.9~1.5 s,收集器收集的肥料质量逐渐增加,堆积质量与时间之间基本呈线性关系,且肥料颗粒质量由大到小依次对应排肥舌槽口倒角圆弧长 30、25、20、15、10、5 mm,排肥舌倒角圆弧长 30 mm 的肥料质量最大,这是因为倒角弧长越大,其半侧未包覆 1.5 倍的槽轮凹槽圆弧,在槽轮未旋转前,亦有一部分肥料颗粒滑入肥料收集器,随着倒角减小,肥料预先收集量逐渐减小。由图 5-b 肥料流量监测数据可知,0~0.15 s 时,监测质量为 0,在>0.15~0.9 s 时,颗粒质量呈波动式增长,30 mm 倒

角的排肥管监测肥料质量为单峰函数,在 0~0.5 s 增长,0.5 s 后减小;25 mm 倒角的排肥管监测肥料质量峰值往右推移,在 0.42 s 时,两者波峰相反,0.5~2 s 时,各倒角具有相同的质量流趋势,在 0.9 s 之后,颗粒质量基本稳定,在一定范围内波动。0.15~0.7 s,25 mm 倒角和 30 mm 倒角具有最大的质量监测数据,10 mm 及 25 mm 倒角具有相对较小的质量监测数据,且质量波动差值在排肥舌倒角为 25 mm 及 30 mm 时相对较大,表明其具有更大的脉动现象。为分析排肥舌倒角结构参数变化对肥料流量波动状况的影响,截取图 5-b 排肥器稳定作业段 1.5~2.0 s 的排肥管肥料质量监测区的肥料颗粒质量随时间变化的数据,计算该时段内每种排肥舌结构状态下监测质量变异系数,如图 6 所示,定义其为评价排肥器流量波动特性的试验指标。

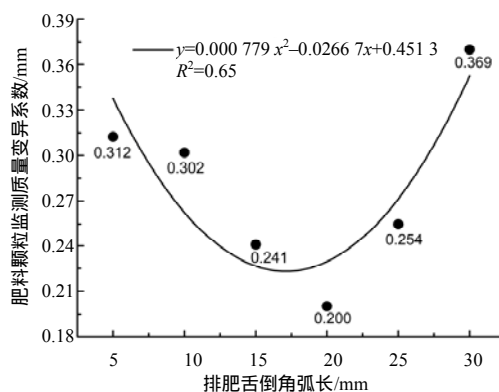


图6 肥料颗粒质量监测变异系数

Fig.6 Variation coefficient of fertilizer particles mass monitor

由图 6 可知,监测肥料质量变异系数随着排肥舌斜口倒角的增大而先减小后增大,这种趋势表明,随着排肥舌倒角的增大,排肥流量的均匀性先增大后减小,即质量波动状况先降低后升高。利用 Origin Pro 8.0 拟合排肥舌倒角与监测质量变异系数的函数方程为  $y = 0.000\ 779 x^2 - 0.026\ 67 x + 0.451\ 3$ ,二者间呈二次函数关系,决定系数  $R^2 = 0.65$ 。对方程求解,可得出在排肥舌倒角为 17.1 mm 时,监测质量变异系数最小,即排肥流量波动最小,此时,排肥舌斜口倒角与槽轮单个凹槽圆弧长的比值为 0.85,外槽轮排肥器排肥质量波动最小,均匀性最佳。

### 3 验证试验

为验证利用 EDEM 仿真优化排肥舌最优结构参数的正确性,对配装改进排肥舌的外槽轮排肥器进行试验验证。选用玉米硫酸钾长效复合肥,于



2017 年 7 月 10 日在东北农业大学施肥播种实验室，利用 JPS-12 计算机视觉精密排种器性能检测试验台(黑龙江省农业机械工程科学研究院博纳科技有限公司出品)进行肥料流量均匀性验证试验。

试验采用单因素对比试验方法<sup>[15]</sup>，加工倒角弧长分别为 17.1、0、24 mm 的排肥舌，其中倒角为 0 mm 的常用平端排肥舌，24 mm 为虚拟试验排肥舌倒角范围内随机选取值。按仿真参数设定排肥轴转速 30 r/min。为测得排肥流量数据，加工长 45 cm、宽 10 cm、6 cm 的肥料收集槽，为匹配仿真提取数据时间间隔 0.083 3 s，设定带速 0.6 m/s，按次序依次测量每个收集槽内的肥料颗粒质量，并以计算测量质量的变异系数为试验指标，每个试验处理设置 3 次重复，试验结果列于表 2。

表2 不同排肥舌的排肥质量变异系数  
Table 2 Variation coefficient of fertilizer mass with different fertilizer tongue

序号	肥料质量变异系数		
	倒角弧长 0 mm	倒角弧长 17.1 mm	倒角弧长 24 mm
1	0.391	0.196	0.354
2	0.402	0.203	0.361
3	0.386	0.193	0.350
均值	0.393	0.197	0.355

对不同倒角排肥舌的排肥器的排肥质量数据进行方差分析， $P<0.001$ ，表明排肥舌倒角参数变化对排肥的流量波动状况有极显著影响，由表 2 试验结果可知，配装最优结构排肥舌的排肥器具有最小的变异系数平均值，其相对常用平端排肥舌及随机选取排肥舌的排肥流量均匀性分别提升 49.9%及 44.5 %，即优化后的排肥舌排肥质量波动最小，排肥均匀性最佳。

参考文献：

[1] 顿国强．大垄密植原茬地免耕精量播种机关键技术研究[D]．哈尔滨：东北农业大学，2013．  
[2] 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．  
[3] 顿国强，陈海涛，冯夷宁，等．调比控位分层施肥装置设计与试验[J]．东北农业大学学报，2015，46(12)：86-93．  
[4] 中国农业机械化科学研究院．农业机械设计手册[K]．北京：中国农业科学技术出版社，2007．  
[5] 顿国强，陈海涛．基于 VB 的 SolidWorks 排种盘建模二次开发[J]．大豆科学，2012，31(4)：630-634．  
[6] 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．  
[7] 张涛，刘飞，刘月琴，等．离散元模拟外槽轮排肥器排量分析[J]．农机化研究，2015，37(9)：198-201．  
[8] LYU H，YU J Q，FU H．Simulation of the operation of a fertilizer spreader based on an outer groove wheel using a discrete element method[J]．Mathematical and Computer Modelling，2013，58(3)：842-851．  
[9] 尹美贵，张淑敏，刘彩玲，等．新型紫花苜蓿外槽轮排种器的试验与分析[J]．农机化研究，2014，36(1)：161-164．  
[10] 台沐云，苑介峨，刘祥忠．倾斜外槽轮式排种器的设计[J]．中国农机化，2003(4)：34-35．  
[11] 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．  
[12] 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．  
[13] VILLETTE Sylvain，PIRON Emmanuel，MARTIN Richard，et al．Estimation of two-dimensional fertiliser mass flow distributions by recording granule impacts[J]．Biosystems Engineering，2013，115(4)：463-473．  
[14] COETZEE C J，LOMBARD S G．Discrete element method modelling of a centrifugal fertilizer spreader[J]．Biosystems Engineering，2011，109(4)：308-325．  
[15] 那晓雁，赵春雁，孙士明，等．气吸式排种器性能试验及预测分析[J]．湖南农业大学学报(自然科学版)，2015，41(4)：440-442．

责任编辑：罗慧敏  
英文编辑：吴志立