

水稻往复拨叉式排种器设计及其运动 过程的离散元法仿真分析

任明磊,樊啟洲*

(华中农业大学 工学院,湖北 武汉 430070)

摘要:为满足水稻精量穴直播生产需求,以往复式排种器为基础,设计了一种往复拨叉式排种器。介绍了往复拨叉式排种器的工作原理、结构组成及关键部件设计。根据水稻种子的外形尺寸及充种状态概率,设计了5种规格的U型充种型孔;为缩短运种行程,采用了偏心轮传动机构,并设计了刮种装置。借助EDEM离散元法对其进行运动模拟仿真,分析其排种过程并提出改进措施。仿真结果显示:往复拨叉式排种器在充种型孔长、宽、厚分别为10.0、9.0、5.0 mm,拨叉杆往复运行频率为10 Hz运行条件下,稻种粒数为3~6粒的穴数在90%以上,重播指数及漏播指数均小于5%,满足水稻机械化精量穴直播要求。

关键词:水稻;往复拨叉式;排种器;离散元法;仿真分析

中图分类号:S223.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-3268(2016)11-0139-06

Design of Rice Reciprocating Fork Type Metering Device and Its Motion Process Simulation Analysis by Discrete Element Method

REN Minglei, FAN Qizhou*

(College of Engineering, Huazhong Agriculture University, Wuhan 430070, China)

Abstract: A rice reciprocating fork type metering device was designed based on traditional reciprocating metering device to meet the production requirements of rice precision hill-direct-seeding, and its operational principle, structural composition and key components' design were introduced. According to the external dimensions and seed-filling state probability of rice seeds, five standards of U type seed-filling hole were designed; eccentric driving mechanism was adopted to shorten the seed-delivering stroke, and seed-scraping device was also designed. This paper had also analyzed the process of seed-metering and proposed improvement measures according to the simulation analysis for rice reciprocating fork type metering device by discrete element method. The simulation results showed that grain number for 3—6 grains of rice on the number of holes was more than 90%; reseeding and miss-seeding indexes were both less than 5% under the condition that the length, width and thickness of seed-filling type hole were 10.0, 9.0, 5.0 mm respectively, and the reciprocating frequency of fork rod was 10 Hz. These simulation results met the requirements of rice mechanization precision hill-direct-seeding.

Key words: rice; reciprocating fork type; metering device; discrete element method; simulation analysis

水稻机械化直播技术是一种轻便精简的水稻种植新技术,具有省工省力、经济效益高等特点。排种

器是水稻直播机的核心部件,对直播机的工作特性和播种性能有决定性影响。根据工作原理,排种器

收稿日期:2016-04-20

基金项目:中央高校基本科研业务费专项基金项目(2013PY123)

作者简介:任明磊(1990-),男,安徽阜阳人,在读硕士研究生,研究方向:现代农业装备技术。E-mail:gmlren@163.com

*通讯作者:樊啟洲(1961-),男,湖北咸宁人,副教授,博士,主要从事现代农业装备与测控研究。

E-mail:qizhoufan@mail.hzau.edu.cn

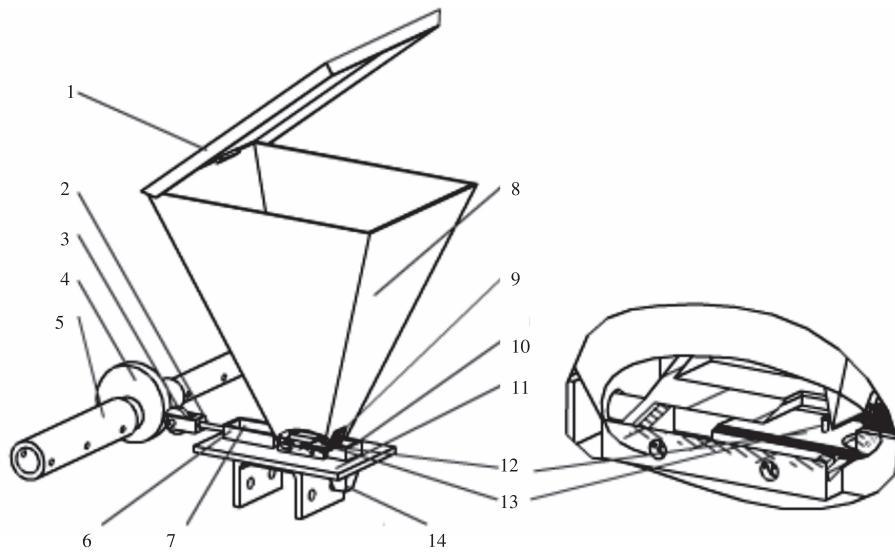
主要分为机械式、气力式和特种排种器等。其中,机械式排种器具有排种通用性好、播量稳定、结构简单、制造成本低等特点,但在排种频率较高时,伤种率容易上升;气力式排种器易实现精量排种,排种质量高,但其排种过程复杂;特种排种器排种效率高,受外界干扰小,排种性能稳定,但其结构复杂,制造成本高^[1-5]。在伤种率满足水稻直播种植要求下,为提高排种效率,寻求较高的排种频率,选用机械式排种器为宜。往复机械式排种器排种过程中主要依靠种子自身重力实现排种。李红伟等^[6]为解决小粒种子精量播种问题于 2010 年设计了一种往复式播种机,其往复传动装置采用活动曲柄连杆机构,大大简化了该播种机,并降低了播种机的垂直高度,从而更有利于大棚和间作播种,提高了其通用性,但缺少对流动性较差的外形不规则的作物种子的研究分析。

水稻直播种植前需对具有一定含水率的稻种进行催芽破胸露白处理,而后再进行机械播种,此时稻种的流动性较差^[7]。为满足水稻田间精量穴直播生产实际需求,本研究在往复机械式排种器基础上设计了一种水稻往复拨叉式排种器。离散元法(discrete element method, DEM)是求解和分析复杂离散系统运动规律和力学特性的一种新型非连续介质地力学数值方法,其主要思想是把整个介质看作是由一系列离散的独立运动颗粒(单元)组成的,通过对每个单元的微观运动进行跟踪计算,即可得到整个研究对象的宏观运动规律^[8-9]。近年来,离散元

法凭借其独有的特点在农业机械研究领域广泛应用。廖庆喜等^[10]运用离散元法对离心式排种器工作过程中油菜籽的运动过程进行了离散元仿真分析,确定了油菜籽的运动规律并研究了排种器转速与总排量之间的关系,其仿真结果与台架试验验证结果一致。本研究借助离散元法对水稻往复拨叉式排种器进行排种数值模拟仿真,分析其排种性能,为后期台架试验的优化提供参考,以提高水稻往复拨叉式排种器的研究效率。

1 往复拨叉式排种器结构组成与工作原理

往复拨叉式排种器主要由种子箱盖、拨叉杆、滚轮、偏心轮、传动轴、导向块、回复弹簧、种子箱、刮种刷、排种孔、底座、拨叉式型孔块、搅种针及输种管组成,其总体结构如图 1 所示。种子箱体通过螺栓与底座连接,偏心轮通过紧固螺栓与传动轴连接,滚轮在回复弹簧作用下与偏心轮紧密接触。在工作过程中,传动轴在动力驱动下带动偏心轮转动,拨叉杆受到偏心轮的推动及回复弹簧的作用在种子箱和底座之间沿着导向块做往复直线运动,固定在拨叉式型孔块上的搅种针扰动种子;当拨叉式型孔块上的充种型孔与种子箱底部的型孔相吻合时,种子箱内的种子凭借其自身重力落入充种型孔内;拨叉杆带动拨叉式型孔块推动稻种往前运动,刮种刷将多余的种子刮离型孔;当拨叉式型孔块上的充种型孔与输种管口相吻合时,种子落入输种管,完成一次排种。



1. 种子箱盖; 2. 拨叉杆; 3. 滚轮; 4. 偏心轮; 5. 传动轴; 6. 导向块; 7. 回复弹簧; 8. 种子箱; 9. 刮种刷;
10. 排种孔; 11. 底座; 12. 拨叉式型孔块; 13. 搅种针; 14. 输种管

图 1 往复拨叉式排种器结构

2 往复拨叉式排种器关键部件设计

2.1 充种型孔的设计

充种型孔对排种器的充种性能有决定性影响,其外形尺寸的确定须以水稻种子的物料机械特性为依据。水稻种子的外形主要为细长型纺锤状,其在长、宽、厚方向上近似对称,质心在水稻种子的对称中心,因此水稻种子多以平躺、侧卧或竖立姿态充

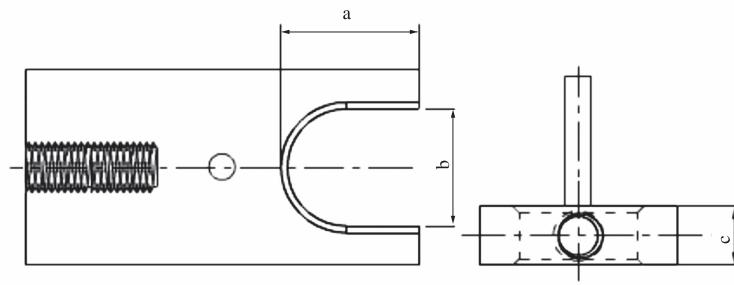
种^[11]。理论分析表明,种子在重力场中运动姿态的概率与种子本身 3 种姿态的截面积成正比,由此可计算出稻种以平躺、侧卧或竖立姿态充种的概率^[12]。根据水稻种子物料特性测定方法,用精度为 0.01 mm 的数显游标卡尺测定禾盛梗 1 号、黄华占、中 9 优 547 三种水稻种子的三轴尺寸^[13],并计算出其充种姿态概率,结果如表 1 所示。

表 1 3 个稻种三轴尺寸与充种姿态概率

品种	三轴尺寸					充种姿态概率			排序
	长度/mm	宽度/mm	厚度/mm	最大长度/mm	最大宽度/mm	平躺	侧卧	竖立	
禾盛梗 1 号	7.65	2.79	2.06	8.98	3.37	0.498 1	0.367 8	0.134 1	平躺 > 侧卧 > 竖立
黄华占	9.56	2.28	1.93	10.50	2.85	0.488 2	0.413 3	0.098 6	
中 9 优 547	9.66	2.38	1.95	10.98	3.08	0.494 8	0.405 4	0.099 9	

由表 1 可知,3 种水稻种子的长、宽、厚平均值依次为 7.65 ~ 9.66、2.28 ~ 2.79、1.93 ~ 2.06 mm,充种状态概率均为平躺最高、侧卧次之、竖立最小。为保证充种效果,便于后期根据播种要求及试验结果,选用合适的充种型孔,确定了尺寸呈梯度变化的 5 种规格的 U 型充种型孔,其外形如

图 2 所示,型孔尺寸如表 2 所示。为便于稻种充种,对型孔边缘进行倒角,同时在拨叉式型孔块上固定搅种针,拨叉式型孔块往复运动过程中,搅种针扰动稻种,有效避免了稻种架空现象。拨叉式型孔块与拨叉杆之间采用螺纹连接,以便于型孔块更换。



a. 长度; b. 宽度; c. 厚度

图 2 拨叉式型孔块

表 2 充种型孔尺寸

规格	型号					mm
	I	II	III	IV	V	
长	8.0	8.5	9.0	9.5	10.0	
宽	5.0	7.0	7.0	9.0	9.0	
厚	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	

2.2 偏心轮与传动轴的设计

为实现往复拨叉式排种器在较高排种频率下具有良好的排种性能,本研究采取缩短其运种行程的方法以降低运种过程中种子的磨损。综合分析排种器排种频率、播种机的工作效率以及传动轴的转速,确定了偏心轮偏心的距离为 7.5 mm。在多个排种器单体组装时,相邻 2 个偏心轮之间顺次错开 90°,以降低传动轴同时承受载荷。

研究表明,水稻种植株行距配置对水稻产量和植株抗倒伏能力具有显著影响^[14],不同区域甚至不同水稻品种对行株距配置要求不同。为了满足多种株行距配置,传动轴设计成轴套式的半空心轴;直播机的机架采用 U 型槽钢,在槽钢上加工出矩形槽,便于排种器单体在机架上移动固定。通过移动排种器单体,可以实现行距在 200 mm、250 mm 和 300 mm 上可调,传动轴之间用轴销连接,便于拆卸安装。

2.3 刮种装置的设计

排种器运种过程中,刮种装置将型孔块上多余的种子刮离。为避免稻种磨损,稻种须与刮种装置软接触。刮种装置采用猪鬃毛制的刮种刷,因为猪鬃毛具有较高的韧性和弹性,不易变形。刮种刷与

型孔块上表面之间的距离控制在 1~2 mm, 以利于刮种。

3 往复拨叉式排种器离散元法仿真分析

3.1 仿真模型的建立

3.1.1 仿真材料参数的设置 根据功用及加工要求, 排种器各零件均赋予了材料特性, 除了刮种装置采用猪鬃材料外, 其余零部件材料均采用钢。各零部件材料的力学参数与相互接触参数如表 3 和表 4 所示^[15-16]。

表 3 材料力学参数

材料	剪切模量	泊松比	密度/(kg/m ³)
水稻	1.10×10^7	0.40	1 053
钢	3.50×10^7	0.28	7 850
种刷	1.00×10^8	0.40	1 150

表 4 材料相互接触系数

接触形式	恢复系数	静摩擦系数	动摩擦系数
水稻 - 水稻	0.60	0.50	0.15
水稻 - 钢	0.60	0.30	0.10
钢 - 钢	0.70	0.20	0.01
种刷 - 水稻	0.45	0.50	0.20

3.1.2 水稻种子离散元模型的建立 通过对水稻种子的外形尺寸分析, 确定其长、宽、厚分别为 9.56、2.30、2.00 mm。在 PRO/E 三维绘图软件中建立间距为 0.956 mm 的 11 个稻种椭圆截面, 对这些截面进行实体扫描混合建立稻种模型如图 3a 所示。将模型保存为.stp 文件导入 EDEM 软件中, 利用球颗粒聚合方法建立稻种离散元模型如图 3b 所示。并借助 EDEM 软件自动计算稻种质心, 完成材料力学参数和接触参数的设置^[17]。

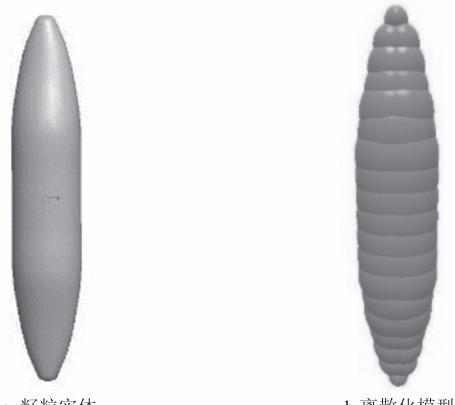
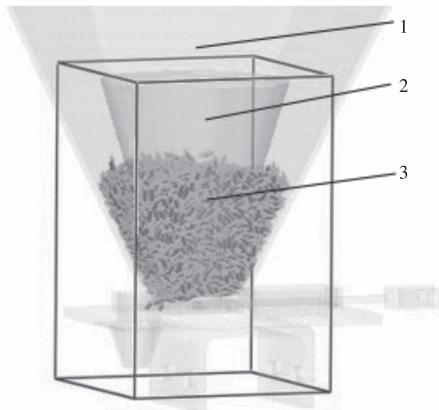


图 3 稻种籽粒模型

3.1.3 排种器离散元模型的建立 为便于仿真模拟及计算, 以组装有长、宽、厚依次为 10.0、9.0、

5.0 mm 的充种型孔的排种器为分析对象, 对排种器结构组成进行简化, 去除与水稻种子无直接接触的传动轴、偏心轮、滚轮及种子箱盖。将简化后的排种器模型保存为.stp 文件导入 EDEM 软件中进行必要的仿真参数设置。颗粒与排种器模型及颗粒与颗粒之间采用无滑动接触模型; 排种器工作中, 拨叉杆做往复运动, 其运动函数选用正弦函数, 幅度为 7.5 mm, 频率为 10 Hz; 稻种颗粒工厂采用静态生成颗粒模式, 生成 5 000 粒颗粒, 并根据颗粒工厂的外形尺寸设置仿真域^[18-19]。完成仿真参数设置后的排种器离散元模型如图 4 所示。



1. 排种器模型; 2. 颗粒工厂; 3. 稻种颗粒

图 4 EDEM 软件中的排种器模型

3.2 仿真分析

3.2.1 仿真分析方法 在 EDEM 软件求解器中设置仿真时间为 30 s, 2 次迭代计算之间时间间隔为 0.01 s, 单元网格边长为 2.5 mm。参照国家标准 GB/T 6973—2005 单粒(精密)播种机试验方法^[20], 在排种器稳定运行过程中, 连续统计 250 次排种中每穴的粒数, 计算出排种合格指数(A)、漏播指数(M)、重播指数(R)及空穴指数(C), 其计算公式如下。

$$A = \frac{n_1}{N} \times 100\% ,$$

$$M = \frac{n_3}{N} \times 100\% ,$$

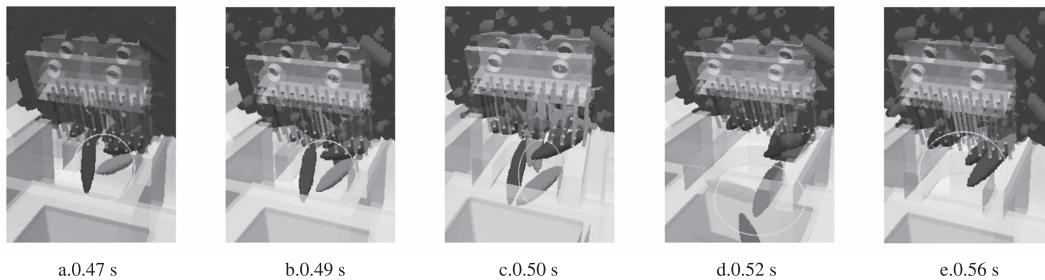
$$R = \frac{n_2}{N} \times 100\% ,$$

$$C = \frac{n_0}{N} \times 100\% .$$

式中: n_0 为每穴 0 粒稻种的总穴数; n_1 为每穴 3~6 粒稻种的总穴数; n_2 为每穴多于 6 粒稻种的总穴数; n_3 为每穴少于 3 粒稻种的总穴数; N 为试验总穴数。

3.2.2 仿真结果分析 模拟仿真运行结束后,完成模型及颗粒显示方式设置。以即将进入充种型孔内的稻种为观察对象,观察分析往复拨叉式排种器充种、运种、刮种及投种等工作过程中稻种的运动状态。图 5 为往复拨叉式排种器正常运行时,稻种在充种、运种、刮种、投种及回位过程中的运动状态。当仿真时间为 0.47 s 时,稻种在自身重力及邻近稻

种的挤压下,以随机状态充入型孔;0.49 s 时,稻种在拨叉杆的推动下随型孔块向排种孔运动;0.50 s 时,型孔块上堆积的稻种开始与刮种刷接触,而后被刮种刷刮去;0.52 s 时,充种型孔与排种孔吻合,稻种在自身重力下落下,完成投种;在回复弹簧作用下,拨叉杆带动型孔块返回,0.56 s 时完成回位,稻种又开始充入型孔。



黑色、灰色为排种中运动速率不断增大的稻种,用浅灰色椭圆标识;深灰色为稻种与排种器模型接触部位;浅灰色为排种器模型。下同

图 5 排种仿真过程

通过观察分析发现,排种器的排种量与充种型孔内稻种的充种姿态有很大关系。当稻种多以平躺姿态充入型孔时,种刷附近竖立的稻种在刮种刷作用下倾倒落入型孔而不被刮离型孔,导致排种量较大,造成重播(图 6a)。当稻种以侧卧的姿态充入型孔,过多占据充种空间时,型孔上方的稻种不能充入

型孔而容易被刮种刷刮离型孔,导致排种量较小,造成漏播(图 6b)。通过对往复拨叉式排种器排种量统计分析,排种合格指数为 92.8%,重播指数为 2.4%,漏播指数为 4.8%,空穴指数为 0,满足水稻机械化精量穴直播要求。

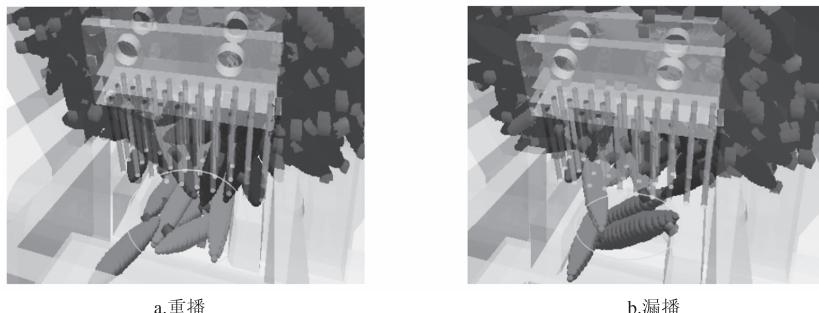


图 6 重播及漏播形成过程

通过对仿真结果进行分析可知,为有效避免往复拨叉式排种器重播及漏播现象,实现精量播种,需改进充种型孔的外形及尺寸;改进刮种刷结构,使得刮种刷与型孔块上表面的间距可调,且刮种刷可以更换,满足不同条件下的刮种。

4 结论

针对水稻机械化直播种植的需求,本研究设计了往复拨叉式排种器,其具有整体结构简单紧凑、加工制作容易、运行可靠、质量轻、成本低等特点;通过缩短拨叉杆往复运动行程,减少排种器的运种行程,可降低稻种在排种过程中的磨损,提高排种器的排种性能。本研究设计了多种规格的充种型孔,可以

实现排种量可调,以满足不同品种水稻在不同条件下机械化直播要求;通过移动排种器单体,改变传动轴的组装方式,可以实现排种器行距可调;改变排种器的运行速度,可以获得多种行株距配置。借助离散元法对往复拨叉式排种器进行运动模拟仿真,在往复拨叉式排种器充种型孔长、宽、厚分别为 10.0、9.0、5.0 mm,拨叉杆往复运行频率为 10 Hz 运行条件下,稻种粒数为 3~6 粒的穴数在 90% 以上,重播指数及漏播指数均小于 5%,满足水稻机械化精量穴直播要求。最后分析了排种过程及造成排种器重播、漏播现象的原因,并提出了改进措施,为后期台架试验的优化提供参考。

参考文献:

- [1] 李宝筏. 农业机械学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.
- [2] 张绍军, 杨宝田, 罗阁山. 国内外水稻直播机械化的发展研究 [J]. 农业科技与装备, 2012(5): 61-62.
- [3] 李国林, 宋炜, 毛俐, 等. 国内外几种主要排种器的特点 [J]. 农业科技与装备, 2011(8): 70-71, 73.
- [4] 金梅, 夏春华, 吴崇友, 等. 我国水稻直播机排种器研究现状及发展趋势 [J]. 中国农机化, 2010(5): 39-42.
- [5] 张德文, 李林, 王惠民. 精密播种机械 [M]. 北京: 农业出版社, 1982.
- [6] 李红伟, 李民朝, 单士睿. 往复式排种器的设计 [J]. 广东农业科学, 2010, 37(5): 198-199, 205.
- [7] 周勇, 夏俊芳, 许绮川. 水稻水直播机械化高产栽培关键技术研究 [J]. 农机化研究, 2011(9): 74-77.
- [8] 王国强, 郝万军, 王继. 离散单元法及其在 EDEM 上的实践 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2010.
- [9] 胡国明. 颗粒系统的离散元素法分析仿真 [M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2010.
- [10] 廖庆喜, 张朋玲, 廖宜涛, 等. 基于 EDEM 的离心式排种器排种性能数值模拟 [J]. 农业机械学报, 2014, 45(2): 109-114.
- [11] 张波屏. 现代种植机械工程 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [12] 罗锡文, 刘涛, 蒋恩臣, 等. 水稻精量穴直播排种轮的设计与试验 [J]. 农业工程学报, 2007, 23(3): 108-112.
- [13] 李洪昌, 高芳, 李耀明, 等. 水稻籽粒物理特性测定 [J]. 农机化研究, 2014(3): 23-27.
- [14] 罗熙芬. 行株距配置对杂交水稻节间形态和生理特性及抗倒性的影响 [J]. 安徽农业科学, 2012, 40(31): 15150-15152.
- [15] 张锋伟, 赵春花, 郭维俊, 等. 基于压痕加载曲线的谷物籽粒硬度性能测定技术 [J]. 农业机械学报, 2010, 41(4): 128-133.
- [16] 杨玲, 杨明金, 李庆东, 等. 包衣稻种物理特性的试验研究 [J]. 农业工程学报, 2005, 21(9): 7-11.
- [17] 石林榕, 吴建民, 孙伟, 等. 基于离散单元法的水平圆盘式精量排种器排种仿真试验 [J]. 农业工程学报, 2014, 30(8): 40-48.
- [18] 史嵩, 张东兴, 杨丽, 等. 基于 EDEM 软件的气压组合孔式排种器充种性能模拟与验证 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(3): 62-69.
- [19] 胡建平, 郭坤, 周春健, 等. 磁吸滚筒式排种器种箱振动排种仿真与试验 [J]. 农业机械学报, 2014, 45(8): 61-65.
- [20] 中国国家标准化管理委员会. 单粒(精密)播种机试验方法: GB/T 6973—2005 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2005: 6-7.

(上接第 134 页)

- [9] 王福荣. 酿酒分析与检测 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 230-270.
- [10] 中华人民共和国卫生部. 食品安全国家标准 食品中膳食纤维的测定: GB/T 5009. 88—2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [11] Chantaro P, Devahastin S, Chiewchan N. Production of antioxidant high dietary fiber powder from carrot peels [J]. LWT-Food Science and Technology, 2008, 41(10): 1987-1994.
- [12] Sun L J, Zhang J B, Lu X Y, et al. Evaluation to the antioxidant activity of total flavonoids extract from persimmon (*Diospyros kaki* L.) leaves [J]. Food and Chemical Toxicology, 2011, 49: 2689-2696.
- [13] Gong Z Q, Zhang M, Mujumdar A S, et al. Spray drying and agglomeration of instant bayberry powder [J]. Drying Technology, 2008, 26: 116-121.
- [14] Kim S H, Choi Y J, Lee H, et al. Physicochemical properties of jujube powder from air, vacuum, and freeze drying and their correlations [J]. Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry, 2012, 55: 271-279.
- [15] 毕金峰, 陈瑞娟, 陈芹芹, 等. 不同干燥方式对胡萝卜微粉品质的影响 [J]. 中国食品学报, 2015, 15(1): 136-141.
- [16] Lu L S. Microwave drying applied to food engineering [J]. Food & Machinery, 2006, 22(5): 119-122.
- [17] Bondaruk J, Markowski M, Blaszcak W. Effect of drying conditions on the quality of vacuum-microwave dried potato cubes [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 81(2): 306-312.
- [18] Wall M M, Gentry T S. Carbohydrate composition and color development during drying and roasting of macadamia nuts (*Macadamia integrifolia*) [J]. LWT-Food Science and Technology, 2007, 40(4): 587-593.
- [19] 周禹含, 毕金峰, 陈芹芹, 等. 不同干燥方式对枣粉品质的影响 [J]. 食品科学, 2014, 35(11): 36-41.
- [20] Caparino O A, Tang J, Nindo C I, et al. Effect of drying methods on the physical properties and microstructures of mango powder [J]. Journal of Food Engineering, 2012, 111: 135-148.
- [21] Giri S K, Sresh P. Optimization of microwave-vacuum drying of button mushrooms using response-surface methodology [J]. Drying Technology, 2007, 25(5): 901-911.