

邢赫, 臧英, 罗锡文, 等. 水稻气力式排种器清种装置设计与试验 [J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(5): 28-33.
XING He, ZANG Ying, LUO Xiwen, et al. Design and test of seed cleaning device of pneumatic metering device for rice[J]. Journal of South China Agricultural University, 2019, 40(5): 28-33.

水稻气力式排种器清种装置设计与试验

邢赫, 臧英, 罗锡文, 王在满, 何思禹, 许鹏, 刘顺财

(华南农业大学 工程学院/南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室, 广东 广州 510642)

摘要:【目的】为了改善水稻气力式排种器工作时稻种的重吸附现象, 设计了一种垂直于排种盘平面的清种装置。【方法】对水稻气力式排种器工作时稻种的受力与清种装置的工作原理进行了分析, 建立了吸种过程中的受力模型。采用超级杂交稻‘五丰优 615’为试验对象, 在有、无清种装置的条件进行了排种器的精度试验。在吸室负压为 4.0 kPa 的条件下, 进行了清种块厚度和排种盘转速的两因素试验分析。【结果】采用清种装置后, 1~3 粒/穴的占比由 62.02% 提升至 90.00% 左右, ≥ 4 粒/穴的占比由 37.98% 降至 5.00%, 改进效果较为明显。当清种块厚度为 3.5 mm、排种盘转速为 15、20 和 25 r/min 时, 1、2 和 3 粒/穴的占比分别为 95.18%、95.16% 和 95.23%, 空穴率分别为 2.07%、2.76% 和 4.56%, 满足超级杂交稻的田间播种需求。【结论】当吸室负压一定时, 降低排种盘转速可以提高清种装置的清种效果, 提高排种器的播种精度。本文针对水稻气力式排种器的结构, 设计了一种清种装置, 有效地清除了排种器重吸附的稻种, 为提高水稻气力式排种器的精度提供了依据。

关键词: 水稻; 清种装置; 气力式排种器; 重吸附; 精度

中图分类号: S223.23

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2019)05-0028-06

Design and test of seed cleaning device of pneumatic metering device for rice

XING He, ZANG Ying, LUO Xiwen, WANG Zaiman, HE Siyu, XU Peng, LIU Shuncai

(College of Engineering, South China Agricultural University/Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education, Guangzhou 510642, China)

Abstract: 【Objective】 In order to reduce the reabsorption of rice seeds in pneumatic metering device, a seed cleaning device vertical to the surface of the seed metering plate was designed. 【Method】 The force acting on rice seed and the working principle of the seed cleaning device were analyzed when the pneumatic metering device was working, and the force model during the seed suction process was established. The super hybrid rice ‘Wufengyou 615’ was used as the experimental object. The precision test of seed metering device was carried out with or without seed cleaning device. Under a negative pressure of 4.0 kPa in the suction chamber, the effects of two factors, including the thickness of seed cleaning block and the rotational speed of seed metering plate, on seed cleaning were tested and analyzed. 【Result】 After using the seed cleaning device, the ratio of 1–3 seeds per hill increased from 62.02% to 90.00%, and the ratio of ≥ 4 seeds per hill decreased from 37.98% to 5.00%. When the thickness of seed cleaning block was 3.5 mm and the rotational speeds of seed metering plate were 15, 20 and 25 r/min

收稿日期: 2019-05-30 网络首发时间: 2019-07-23 14:30:38

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20190723.0839.010.html>

作者简介: 邢赫 (1990—), 男, 博士, E-mail: 675974347@qq.com; 通信作者: 臧英 (1973—), 女, 教授, 博士, E-mail: yingzang@scau.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金 (31871529); 国家重点研发计划 (2017YFD07000704); 现代农业产业技术体系建设专项资金 (CARS-01-41)

respectively, the ratios of 1, 2 and 3 seeds per hill were 95.18%, 95.16% and 95.23% respectively, and the missing hill rates were 2.07%, 2.76% and 4.56% respectively, which met the requirements of field sowing for super hybrid rice. 【Conclusion】 When the negative pressure in suction chamber is constant, reducing the rotational speed of seed plate can improve the cleaning effect of the seed cleaning device and the sowing precision of the seed metering device. Based on the structure of rice pneumatic metering device, we designed a seed cleaning device which can effectively clear rice seeds adsorbed by the seed metering device, and this research provides a basis for improving the precision of rice pneumatic metering device.

Key words: rice; seed cleaning device; pneumatic metering device; reabsorption; precision

随着农艺技术的发展,水稻稻种的分蘖生长能力与产量也随之提高。超级杂交稻是一种分蘖生产能力强、产量高的品种,在采用移栽技术时,每穴仅需要1棵苗即可满足田间生产要求。当采用直播技术时,每穴仅需要1~3粒即可满足要求,相比于移栽方式,直播可减少人力、物力的消耗^[1-4]。但受到水稻稻种本身的物料特性影响(即形状不规则等),在采用机械化技术直播时,播种精度很难满足超级杂交稻的农艺要求。

现有的气力式排种器主要针对圆球度较高的种子,例如油菜^[5-6]、小麦^[7-8]、檀香^[9]、玉米和大豆^[10]等作物。其播种机已广泛地应用于实际生产之中。欧美等发达国家对气力式排种器的理论研究也较为深入。针对不同作物优化了气力式排种器的结构参数,采用理论与实践相结合的方式研究了影响气力式排种器工作的因素,取得了较好的效果。

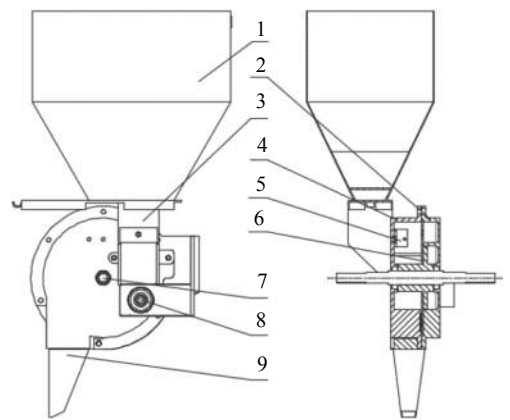
目前对清种理论的研究相对较少,采用的清种方式一般为自重式清种与刮种式清种。针对圆球度较高,且自身质量较大的种子一般采用自重式清种,赵月霞等^[11]针对充种型孔进行了设计与改进,利用种子的自身质量与排种轮转动完成对多余种子的清除,得到了最佳清种角度。祁兵等^[12]对滚筒气力式的清种过程进行了理论分析,并对清种板的最佳间距进行了试验分析,得到了最佳清种间距。李成华等^[13]对倾斜圆盘勺式排种器的清种过程进行了分析与试验,分析了影响清种性能的因素,优化了排种器的结构参数,提高了排种器的工作效率。李兆东等^[14]采用气吹式的清种方式,将多余的种子吹离型孔,完成清种过程,得到最佳吹种气压,提高了排种器的播种精度。

目前针对水稻排种器的清种装置研究较少,主要原因是水稻稻种圆球度较低,休止角、自重较小,难以精量充种,更难以精确清种,清种时往往会造成漏清与过度清种,难以控制。现有的水稻气力式排种器播种精度为95%左右,满足田间播种指标,

但由于该排种器中的排种盘上采用一种搅种齿,因其加工成本较高,难以被广泛地应用。但若去除搅种齿,稻种重吸附现象将增加,排种器将不能精量播种,无法满足田间播种要求。为了改善这一现象,将搅种齿去除的同时又能满足排种器的播种精度,本文设计了一种清种装置,将重吸附的稻种清除,满足排种器的播种精度。

1 排种器的结构与工作原理

水稻气力式排种器由种箱,气吸壳体、分层充种室、排种壳体、清种装置、排种盘、排种轴、搅种装置、排种管等构成,其结构如图1所示。



1: 种箱, 2: 气吸壳体, 3: 分层充种室, 4: 排种壳体, 5: 清种装置, 6: 排种盘, 7: 排种轴, 8: 搅种装置, 9: 排种管

1: Seed box, 2: Gas chamber shell, 3: Stratified seed filling room, 4: Seed metering shell, 5: Seed cleaning device, 6: Seed metering plate, 7: Seed metering shaft, 8: Seed stirring device, 9: Seed metering tube

图1 水稻气力式排种器结构图

Fig. 1 Structural diagram of pneumatic seed metering device for rice

该排种器工作时,稻种由种箱经分层充种室流入到排种壳体中的充种区,充种区内安装一搅种装置,其目的是为了在排种器工作时,增加稻种在充种区的流动性,防止由于稻种堆积造成的吸种困难现象。稻种受到吸种负压的作用,在充种区被排种盘上的吸种孔所吸附,随排种盘同步转动,到达清

种区,由清种装置将重吸附的稻种清除,到达投种区,受送种正压作用离开排种盘,落入排种管,离开排种器,完成播种过程。

2 吸种过程与清种原理的分析

本文排种器所采用的排种盘为 16 组吸种孔,每组 2 个吸孔。相比于 8 组吸种孔的吸种盘,仅需采用一半的工作转速,即可满足原有的工作效率。

2.1 吸种的受力分析

稻种在充种区受到吸种负压的作用,被吸种孔吸附脱离充种区,随排种盘同步转动。此时稻种的受力情况如图 2 所示。稻种受到竖直向下的重力 G ,垂直排种盘平面向内的吸力 F_0 ,吸力的反作用力 F_N ,离心力 J ,以及静摩擦力 f 。由于转速较低,稻种籽粒体积较小,故忽略空气阻力对稻种的影响。对稻种建立吸种力学模型。

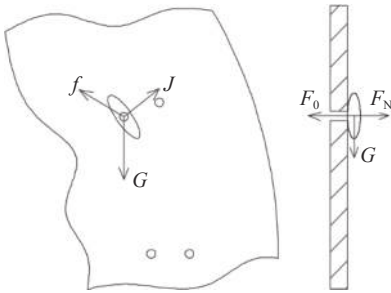


图 2 稻种受力图

Fig. 2 Force diagram of rice seed

假设稻种吸附姿态为平卧式。将稻种所受的力分为平行排种盘平面与垂直排种盘平面的力,其受力平衡公式如下所示:

$$\begin{cases} F_0 = F_N \\ f = \mu F_N \\ f \sin \alpha + J \sin \beta = G \\ f \cos \alpha = J \cos \beta \end{cases} \quad (1)$$

式中, μ 为稻种与排种盘之间的摩擦系数、 α 为摩擦力与水平面的夹角、 β 为离心力与水平面的夹角。由于稻种与排种盘相对静止,故稻种所受到的静摩擦力大于或等于所受的合外力,即将公式 (1) 整理后得出公式 (2):

$$f \geq \sqrt{G^2 + J^2 - 2GJ \sin \beta} \quad (2)$$

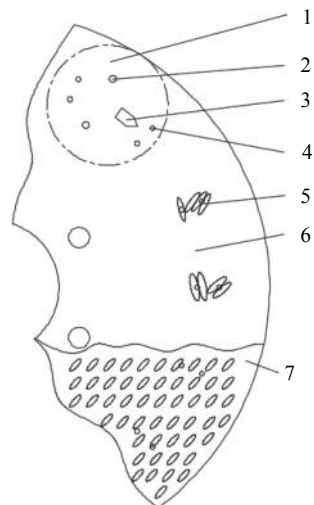
由公式 (1) 可知,稻种所受的静摩擦力由排种盘与稻种之间的摩擦系数与稻种所受的吸力所决定。由于摩擦系数由排种盘与稻种本身的物理特性所决定,在此为一定值。故增大吸力有利于增大稻种所受的静摩擦力,增大稻种在运送过程的稳定性。但吸力过大会导致同时有 2 粒或 2 粒以上的稻

种被同一个吸孔所吸附,此时为重吸附现象。由于水稻稻种的外形尺寸较为特殊,其圆球度较低,多为纺锤体,且稻种在被吸附的同时,可能会出现多种吸附姿态,故重吸附现象在水稻气力式排种器工作状态时常发生。采用气力式水稻排种器播种时,主要针对超级杂交稻进行播种,其播种精度为 (1~3) 粒/穴。不同于大豆、玉米等气力式排种器高精度单粒播种,气力式水稻排种器播种允许一定程度的重吸附,只要播种精度满足 1~3 粒/穴即可。

2.2 清种过程的运动分析

目前的清种装置主要有利用稻种自身质量完成清种和利用刮种方式使稻种与其发生碰撞清种这 2 种方式。利用稻种自身质量清种主要针对大豆等圆球度较高的稻种,其流动性较高,可合理地设计充种型孔的形状,利用其高流动性与自身的质量,当排种器旋转至特定角度完成滚落清种。另一种为刮种式清种,主要针对玉米、水稻等稻种,利用稻种与其刮板发生碰撞,强制的将稻种清理吸孔。

本文采用刮种方式清种,其清种装置如图 3 所示。其清种装置中包括 2 根清种指,1 个清种块。连接件与排种壳体通过螺栓连接,垂直于排种盘面,其末端与排种盘留有一定的公差间隙,防止在排种盘转动时与其发生摩擦,造成损坏。该公差间隙较小,远小于 1 颗稻种的厚度,在清种时不会发生漏种或卡种现象。



1: 清种区, 2: 清种指, 3: 清种块, 4: 吸孔, 5: 稻种, 6: 排种盘, 7: 充种区
1: Seed cleaning area, 2: Seed cleaning finger, 3: Seed cleaning block, 4: Sucking hole, 5: Rice seed, 6: Seed metering plate, 7: Seed filling area

图 3 清种装置

Fig. 3 Seed cleaning device

稻种在充种区被吸附时,可能会出现多颗稻种同时被一个吸孔所吸附,且 2 个吸孔之间的距离较近,稻种可能会出现同时被 2 个吸孔黏连吸附的现

象。造成了被吸附的稻种数量远大于所需要的稻种数量。

当出现多颗稻种被同一个吸孔所吸附,假设吸孔完全被稻种完全覆盖,没有缝隙,此时稻种所受吸力的大小取决于被吸附的稻种所占该吸孔的面积(假设气流在吸孔处气压均匀分布)。稻种所占的面积比例越大,所受的吸力就越大,当与清种装置发生碰撞时,较为牢固,不容易被清落;反之所占面积比例越小,吸力就越小,容易被清落。

2个吸孔之间的中心距为6.5 mm,吸孔的直径为1.5 mm,即2个吸孔之间的最短距离为5 mm,清种块的宽度应小于5 mm,以免与吸孔之间发生干涉,影响正常被吸附的稻种,清种块主要清理2个吸孔之间重吸附的稻种。2根清种指被安装在清种块的后端,该清种指主要清理2个吸孔外端重吸附的稻种。由于稻种具有一定厚度,故需要留有一定的公差配合,防止清种装置过度的清种。当稻种被清落时,自由下落,可能会与吸孔上已经吸附的稻种发生碰撞,影响充种,为了防止这一现象,将清种装置安装在与水平夹角 $45^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 之间,其充种区表层稻种接近排种盘水平中间线的位置,稻种主要在表层被吸孔吸附,稻种被清落点与充种点之间的水平距离大于35 mm(理论计算),不会对充种产生影响。

3 清种试验

3.1 试验材料

为了研究该清种装置的清种效果,选取超级杂交稻‘五丰优615’为试验对象。种子平均外形尺寸(长度×宽度×厚度)为8.99 mm×2.31 mm×2.04 mm;每千粒质量为22.4 g,种子经清水浸泡、滤除表面杂质秕谷摊晾后使用,试验前测定平均含水率(w)为20.3%。采用JPS-12播种试验台进行了试验。

3.2 试验设计与评价指标

3.2.1 试验设计 根据上述理论分析,2个吸孔之间的直线距离为5 mm,但由于稻种的厚度为2 mm左右,故清种块的厚度应小于等于4 mm,设置清种块的厚度为3.0、3.5、4.0 mm各一组,在不同的排种盘转速(15、20和25 r/min)下进行全因素试验。因素水平如表1所示。为了验证清种装置的效果,同时加入了一组无清种装置的对比试验,该试验在排种盘转速为15 r/min的条件下进行。

本文主要验证清种块的清种效果,故将吸种负压设定在4.0 kPa,其设定负压值要高于最佳吸种负压值。

表1 清种试验因素水平

Table 1 Factors and levels of seed cleaning test

水平 Level	因素 Factor	
	清种块厚度/mm Thickness of seed cleaning block (A)	排种盘转速/($r \cdot \min^{-1}$) Rotational speed of seed metering plate (B)
1	3.0	15
2	3.5	20
3	4.0	25

3.2.2 评价指标 参照国家标准GB/T 6973—2005^[15]规定,连续记录排种器排出的每穴种子量,每250次为1组,共计3组。将试验后的结果采用SPSS软件对其进行分析。

试验中,当空穴率最低, ≥ 4 粒/穴的占比最小,以及1粒/穴、2粒/穴和3粒/穴这3种状况的占比接近时,选取2粒/穴的占比为最高时的结果为最优试验结果。

4 结果与分析

清种试验结果如表2所示。根据表2试验结果可知,增加清种装置有效地改善了重吸附现象,使1~3粒/穴的占比大幅度提升,由62.02%提升至90.00%左右, ≥ 4 粒/穴的占比由37.98%降至5.00%,效果较为明显,但同时空穴也随之出现,主要原因为:当重吸附稻种与清种块发生碰撞,同时也会碰撞到正常吸附的稻种,会产生连带作用,将稻种全部清除,产生了空穴。空穴率与1粒/穴的占比随着清种块厚度与排种盘速度的增加而增加;3粒/穴与 ≥ 4 粒/穴的占比随清种块厚度与排种盘速度的增加而减少;2粒/穴的占比基本稳定在50%以上。当清种块厚度为4 mm时,空穴率普遍较高,表明清种块厚度过厚,清种过于充分,将正常吸附的稻种也清离了排种盘的吸孔,且排种盘转速越高,连带作用越明显,导致空穴率大幅度地提升。当清种块厚度为3 mm时, ≥ 4 粒/穴的占比略高,导致了1~3粒/穴的占比均略小于95%,表明清种块与吸孔之间的间距较大,清种不够充分。且随排种盘转速的降低, ≥ 4 粒/穴的占比随之提高。当清种块厚度为3.5 mm时,空穴率均小于3%,且1~3粒/穴的占比均略高于95%,满足超级杂交稻的直播要求。

方差分析(表2)表明:清种块的厚度对空穴率、1~3粒/穴的占比均影响显著,对1、2、3和 ≥ 4 粒/穴这几种充种状况的占比均影响极显著;排种盘转速

表 2 清种试验结果及方差分析¹⁾
Table 2 Seed cleaning test results and variance analysis

试验序号 Test No.	因素和水平 Factor and level		不同充种状况的占比/% Percentage of different seed filling condition					
	A	B	空穴 0 seed per hill	1粒/穴 1 seed per hill	2粒/穴 2 seeds per hill	3粒/穴 3 seeds per hill	≥4粒/穴 ≥4 seeds per hill	1~3粒/穴 1~3 seeds per hill
1	1	1	0.66	11.96	51.38	29.96	6.04	93.30
2	1	2	0.79	13.07	52.58	27.86	5.70	93.51
3	1	3	0.87	18.86	50.06	25.41	4.80	94.33
4	2	1	1.33	13.52	55.50	26.16	3.49	95.18
5	2	2	2.07	15.42	57.74	22.00	2.77	95.16
6	2	3	2.76	19.71	56.88	18.64	2.01	95.23
7	3	1	4.56	17.63	52.62	21.66	3.53	91.91
8	3	2	6.86	20.97	54.84	15.72	1.61	91.53
9	3	3	10.51	25.91	50.31	11.89	1.38	88.11
10			0	1.20	24.30	36.52	37.98	62.02
SS	A		0.007	0.008	0.005	0.019	0.002	0.003
	B		0.001	0.008	0.001	0.008	0	0
MS	A		0.004	0.004	0.002	0.010	0.001	0.002
	B		0	0.004	0.001	0.004	0	0
F	A		15.381	78.396	19.235	52.248	55.754	8.759
	B		2.070	80.999	4.502	21.701	11.734	0.393
P	A		0.013*	0.001**	0.009**	0.001**	0.001**	0.035*
	B		0.242	0.001**	0.095	0.007**	0.021*	0.698

1) $df=2$; “*”和“**”分别表示影响达到0.05和0.01的显著水平

1) $df=2$; “*” and “**” indicate the effect reaches 0.05 and 0.01 significance levels respectively

对 1 和 3 粒/穴的占比均影响极显著, 对 ≥4 粒/穴的占比影响显著。

根据上述评价指标的分析, 得到当清种块厚度为 3.5 mm 时, 排种器排种效果最佳, 其 1、2 和 3 粒/穴的占比分别为 95.18%、95.16% 和 95.23%, 空穴率也满足要求, 优于试验中的其余各组。

5 讨论与结论

上述试验表明: 增设了清种装置后, 可有效改善稻种的重吸附现象, 使播种精度大幅度提升, 达到田间直播应用的要求。与原有的研究成果基本相同, 同时优化了原有水稻气力式排种器的结构。

由试验结果可知, 清种效果随排种盘转速的提升而增加, 主要原因为: 当排种盘转速提升, 稻种随排种盘同步转动, 稻种所拥有的线速度也随之提升, 当与清种块发生碰撞时, 将会产生较大的作用力, 使稻种离开吸孔, 由于 1 个吸孔同时附着多粒稻种, 在高速碰撞后, 稻种之间也会发生相互碰撞, 当所受到的碰撞力大于稻种所受到的吸附力,

那么稻种将会被清离吸种孔, 故随着转速的提升, 清种效果更为明显, 转速过高将会出现过度清种现象, 增加空穴率的产生, 从而降低播种精度。

原有的水稻气力式排种器采用每盘 8 穴, 即排种盘上有 8 组吸种孔, 导致排种器在工作时需要较高的转速才能满足田间工作效率。改进后的排种盘采用 16 组吸孔, 孔数增加了一倍, 工作效率也增加了一倍, 即当采用原有一半的排种盘转速时, 即可满足原有的工作效率。由上述分析可知, 降低转速可减小清种装置的过分清种, 有利于提高排种器的播种精度。本文试验所采用的排种盘转速均为低速转动, 但由于吸孔组数加多, 故不影响原有的工作效率。

由前期试验已知清种指的最佳位置, 故本文已将清种指固定在最佳位置。本文主要针对清种块的厚度进行了试验研究。且清种块与清种指不易安装在同一直线上, 主要原因为: 清种块清种时, 将重吸附的稻种推离吸种孔, 吸孔处的稻种位置均会发生小范围的变动, 如果清种指与清种块线性分布, 将

会造成过度清种,且容易造成对稻种的损伤,不利与稻种的田间发芽。

本文将清种块固定在2个吸孔中间的位置,由于2个吸孔之间间距较小,在安装时应尽可能的减小装配误差,以免造成清种块到吸孔之间的距离不对称,影响清种效果。

本文主要考察清种装置的效果,故采用4.0 kPa的吸种负压,其负压值较高,具有较强的吸种能力,容易产生重吸附现象。但本文未对最佳吸种负压进行试验,有待进一步的试验研究。

本文优化了水稻气力式排种器,设计了一种清种装置。建立了稻种在排种器工作时的受力模型,并对清种装置的工作原理进行了分析。采用超级杂交稻‘五丰优615’为试验对象,进行了清种效果的试验研究。试验结果表明:增加了清种装置,有效地改善了重吸附现象,使1~3粒/穴的占比大幅度提升,由62.02%提升至90.00%左右,≥4粒/穴的占比由37.98%降至5.00%,排种精度提升较为明显;当清种块厚度为3.5 mm时,排种器排种效果最佳,1、2和3粒/穴的占比分别为95.18%、95.16%和95.23%,空穴率分别为2.07%、2.76%和4.56%,基本满足超级杂交稻的田间直播要求。本文为优化水稻气力式排种器的清种结构提供了一定的参考依据。

参考文献:

- [1] PANDEY S, VELASCO L. Trends in crop establishment methods in Asia and research issues[C]//IRRI. Rice is Life: Scientific Perspectives for the 21st Century, Proceedings of the World Rice Research Conference. Tsukuba: IRRI, 2004: 178-181.
- [2] FAROOQ M, SHAHZAD M A, BASRA N, et al. Enhancing the performance of transplanted coarse rice by seed priming[J]. *Paddy Water Environ*, 2009, 7(1): 55-63.

- [3] 张洪程, 龚金龙. 中国水稻种植机械化高产农艺研究现状及发展探[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(7): 1273-1289.
- [4] 郑天翔, 唐湘如, 罗锡文, 等. 不同灌溉方式对精量穴直播超级稻产生的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(8): 52-55.
- [5] ISMET O, DEGIRMENCIOGLU A, YAZGI A. An evaluation of seed spacing accuracy of a vacuum type precision metering unit based on theoretical considerations and experiments[J]. *Turk J of Agric For*, 2012, 36: 133-144.
- [6] GAIKWAD B B, SIROHI N P S. Design of a low-cost pneumatic seeder for nursery plug trays[J]. *Biosyst Eng*, 2008, 99(10): 322-329.
- [7] YASIR S H. Design and test of a pneumatic precision metering device for wheat[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2011.
- [8] YAZGI A, DEGIRMENCIOGLU A. Measurement of seed spacing uniformity performance of a precision metering unit as function of the number of holes on vacuum plate[J]. *Measurement*, 2014, 56(6): 128-135.
- [9] JACK D S, HESTERMAN D C, GUZZOMI A. Precision metering of *Santalum spicatum* (Australian Sandalwood) seeds[J]. *Biosyst Eng*, 2013, 115(3): 171-183.
- [10] KARAYEL D. Performance of a modified precision vacuum seeder for no-till sowing of maize and soybean[J]. *Soil Till Res*, 2009, 104(2): 121-125.
- [11] 赵月霞, 蹇兴东. 机械式精密排种器清种过程分析[J]. *农业机械学报*, 2006, 37(11): 133-134.
- [12] 祁兵, 张东兴, 刘全威, 等. 集排式精量排种器清种装置设计与性能试验[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(1): 20-27.
- [13] 李成华, 夏建满, 何波. 倾斜圆盘勺式精密排种器清种过程分析与试验[J]. *农业机械学报*, 2004, 35(3): 68-72.
- [14] 李兆东, 李姗姗, 曹秀英, 等. 油菜精量气压式集排器排种性能试验[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(18): 17-25.
- [15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 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.

【责任编辑 庄 延】