

三七气吸滚筒式排种器充种性能模拟与试验

赖庆辉 高筱钧 张智泓

(昆明理工大学现代农业工程学院, 昆明 650500)

摘要: 为了提高气吸滚筒式排种器充种性能,以云南文山三七种子为研究对象,采用 DEM - CFD 耦合方法,以种子平均法向力方差和供种高度为指标,对气吹风压、振动频率、振动角度分别进行数值模拟,并对上述因素进行单因素试验,试验现象及效果与仿真分析结果一致。结果表明:气吹风压可以打破种群原有的稳定状态,从而降低种子瞬态的法向力即减小内摩擦力;振动频率增加种子平均法向力方差,即对种子的扰动性增强;合适的振动角度可以有效提高供种高度。减小内摩擦、增强种群扰动性、提高供种高度均可有效提高排种器充种性能。为寻找最佳参数组合,采用三因素五水平正交试验方法,对排种器排种性能进行试验,并对试验结果进行优化与验证。结果表明:在振动频率 85 Hz、气吹风压 3 kPa、振动角度 45°时,效果最佳,试验指标合格指数、漏播指数、重播指数可达 93.02、1.42、5.56。

关键词: 三七; 气吸滚筒式排种器; 充种性能; 数值模拟

中图分类号: S223.2*5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)05-0027-11

Simulation and Experiment of Seed-filling Performance of Pneumatic Cylinder Seed-metering Device for *Panax notoginseng*

Lai Qinghui Gao Xiaojun Zhang Zhihong

(College of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: *Panax notoginseng* is one of rare medicinal herbs in China, and it is mainly grown in Yunnan Province. Market demand of *Panax notoginseng* is very large, and hence, until December 2014, the planting area of *Panax notoginseng* has reached 40 000 hm². However, there is no precision seeding device suitable for *Panax notoginseng*. Seed-filling performance is the key factor that influences the properties of metering device. In order to improve the seed-filling performance of pneumatic cylinder seed-metering device, Yunnan Wenshan notoginseng seeds were adopted as sowing objects, the method of coupling DEM - CFD was used as research technique, meanwhile, variance yields of average normal stress and height of supplying seeds were considered as the optimizing targets. Through single factor experiment, the blowing wind pressure, vibration frequency and vibration angle were numerically simulated. It can be found that the experimental phenomenon and effect were in consistent with the simulation ones. Results showed that the blowing wind pressure can break the original steady state, thus reduce seeds transient normal stress which lower seeds internal friction; vibration frequency increases variance yields of average normal stress of seeds, hence disturbance of seeds was enhanced; and adequate vertical oscillation can effectively improve height of supplying seeds. Reducing internal friction, enhancing disturbance, improving height of supplying seeds can effectively improve the seed-filling performance. To find the best parameter combination, this paper used three factors and five levels orthogonal experimental method to test the metering performance, afterwards, the results of the test were

收稿日期: 2015-12-16 修回日期: 2016-01-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51305187)、云南省重点新产品开发计划项目(2014BC007)、云南省科技计划青年项目(2015FD011)和昆明理工大学自然科学研究基金项目(KKSY201323067、KKSY201323025、14118940)

作者简介: 赖庆辉(1980—),男,副教授,主要从事农业机械装备与计算机测控研究,E-mail: laiqinghui007@163.com

optimized and verified. Results showed that at the vibration frequency of 85 Hz, blowing wind pressure of 3 kPa, vertical oscillation of 45° , experimental index is the best. Test indicators, including eligible index, missing index, multiple index can reach up to 93.02, 1.42 and 5.56, respectively.

Key words: *Panax notoginseng*; pneumatic cylinder seed-metering device; seed-filling performance; numerical simulation

引言

三七是中国名贵中药材,在中国市场需求量大,云南省有广泛种植。截止2014年底三七的种植面积已达到4万 hm^2 。三七播种的行距和株距均需控制在50 mm左右,属于密集型精密播种,且三七种子形状和大小不规则,当前还没有满足播种精度要求的播种机^[1]。现行的播种方式主要以手工点播为主,三七播种量270~300万粒/ hm^2 ,劳动强度大,因此实现三七的机械化播种很有必要,而排种器作为核心部件,其工作性能是影响播种质量的主要因素之一。

目前,国内外先进的播种机普遍采用气吸式工作原理^[2-7],这主要是因为气吸式排种器具有对种子尺寸要求不高、不伤种子、适应性强、易于实现精密播种等优点。气吸式排种器,其充种环节尤为重要,它基本决定了排种器的优劣^[8]。充种过程处理不当会造成重播或者漏播现象,严重影响排种器的工作性能,导致播种质量下降。目前采用种箱振动的方式提高充种是通用的方法^[9-12]。王淑铭等^[12]对气动振动式精密排种器振盘及种子的运动理论进行了分析;陈进等^[13-14]采用离散元法对气吸式精密播种机振动种盘中水稻种群运动进行研究,认为种

群的运动特性对于充种性能有较大的影响,并利用电磁激振的方法,扰动种群,使种群产生“沸腾”,提高了气吸滚筒排种器充种性能。李林等^[15]对气吸式排种器工作过程进行了研究,认为种群内摩擦力对种子充填和所需吸力有很大影响。由于三七种子在含水率较高时流动性较差,为提高气吸滚筒式排种器的充种性能,结合上述学者的研究成果,本文采用气吹风压供种与振动供种相结合的方式,研究种群运动、供种高度对充种性能的影响。

本文以自行研制的气吸滚筒式排种器为研究对象,借助离散元仿真软件 EDEM 与流体计算软件 Fluent 相耦合的方式进行气吹风压、振动频率、振动角度对种群扰动及供种高度影响的仿真分析,并通过台架试验验证,探寻种群扰动和供种高度对充种性能的影响。利用三因素五水平正交试验方法,对上述因素进行排种性能试验,旨在寻找最佳参数组合以提高排种性能。

1 排种器结构与工作原理

三七气吸滚筒式精密排种器^[16]主要由种箱、滚筒、空心轴、绝压隔板、直线轴承弹簧组合及传动链轮组成,其整体结构如图1所示。

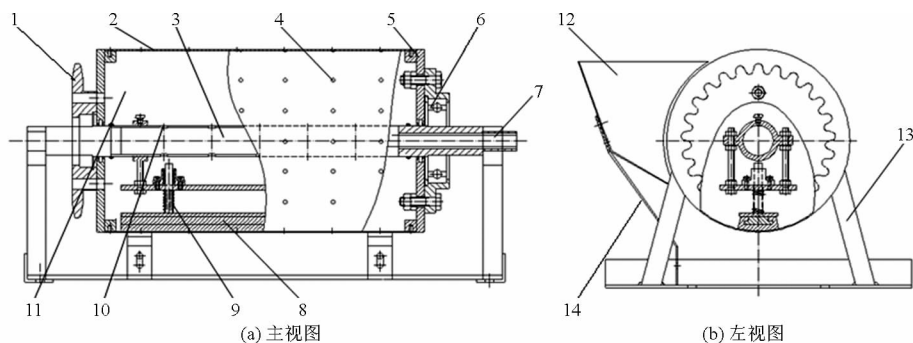


图1 气吸滚筒排种器结构简图

Fig.1 Schematic diagram of pneumatic cylinder seed-metering device

1. 链轮 2. 滚筒 3. 空心轴 4. 吸种孔 5. 端盖 6. 轴承 7. 接口 8. 绝压隔板 9. 直线轴承弹簧组合 10. 轴孔 11. 负压腔 12. 种箱 13. 台架 14. 种箱角度调节板

滚筒内部有空心轴与绝压隔板,空心轴通过与风机连接为滚筒内部提供负压,绝压隔板通过与直线轴承弹簧组件的配合,紧紧压在滚筒内壁,堵住吸种孔,隔断负压。种箱角度调节板用来调节吸种角度。排种器工作时,接口与风机相连接。

滚筒内部的空气通过轴孔进入空心轴,再由接口被风机吸走,这样滚筒内部形成了负压腔。当滚筒转动时,吸种孔附近的种子在吸种孔内外压差的作用下被吸附在吸种孔处,并随着滚筒一起转动。当种子转动到绝压隔板处时,由于绝压隔板

堵住了吸种孔,瞬间隔绝了滚筒内部的负压,种子失去了因内外压差产生的吸附力,因此种子在滚筒转动惯性和种子自身重力作用下脱落,实现了整个排种过程。

2 模型建立

离散元法(Discrete element method, DEM)和计算流体力学(Computational fluid dynamics, CFD)近年来广泛应用于农业工程等诸多领域,在排种器充种过程中,种子以颗粒体的形式堆积于种箱中,气流经由种箱底部以一定的速度穿过种群,起到扰动种群的作用。由于种子颗粒在模拟区域中有较大体积分数,不可忽略颗粒体对流场的影响,因此采用 DEM - CFD 耦合方法进行分析。

2.1 流场数学模型

DEM - CFD 进行耦合模拟时,由于颗粒体体积分数较大不可忽略,且 Eulerian 模型采用多相流框架求解,有体积分数方程项,考虑了颗粒对流场的影响,实际情况中,气吹供种试验颗粒相对于流场作用明显,因此本文采用 Eulerian 模型对气吹供种试验进行模拟^[17]。

在 Eulerian 模型中,流体的连续方程中加入了体积分数项,即

$$\frac{\partial(\varepsilon\rho)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\varepsilon v) = 0 \tag{1}$$

式中 ρ ——气体密度,kg/m³
 t ——时间,s
 v ——气体速度,m/s
 ε ——气体体积分数相

流体的运动微分方程为

$$\frac{\partial(\varepsilon\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\varepsilon v^2) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu\varepsilon \nabla v) + \rho\varepsilon g - S \tag{2}$$

式中 p ——气体微元体上的压力,Pa
 g ——重力加速度,m/s²
 μ ——气体动力粘度,Pa·s
 S ——动量源项

为了探寻气吹供种对种群的影响,需对种箱内流场进行模拟,种箱内空气流动状态与其雷诺数 Re 有关,公式为

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \tag{3}$$

式中 D ——孔直径,m

吹气孔孔径为 35 mm,空气平均流速均在 10 m/s 以上,得出 Re 值远大于紊流流动的临界值,因此整个过程气体的运动形态为紊流。

2.2 接触模型

离散元法描述的是颗粒之间碰撞的过程,也就是接触的产生和发生作用的过程。离散元中根据接触方式的不同可分为硬颗粒接触和软颗粒接触,软颗粒接触方式允许颗粒之间接触点间出现重叠部分,并根据接触颗粒的物理属性和法向重叠量、切向位移计算出接触力,而颗粒间内摩擦力即切向力与法向力有着密切的联系,因此本文采用软颗粒接触模型。考虑到三七种子表面无粘附力,故本文选取 Hertz - Mindlin 无滑移接触模型^[18-22]。

软颗粒接触使用的是软球模型,如图 2 所示,软球模型在颗粒 i 和颗粒 j 间设定了弹簧、阻尼器、滑动器和耦合器,引入了弹性系数 k 和阻尼系数 c 来量化弹簧、阻尼器、滑动器的作用。

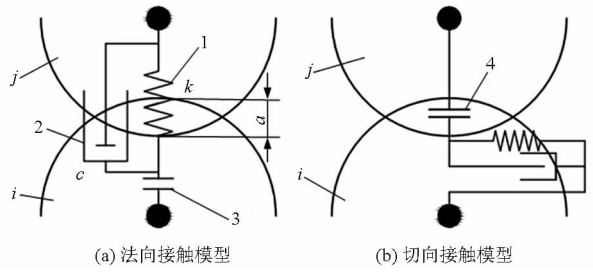


图 2 软球模型对颗粒间接触力的简化模型

Fig.2 Simplified model of particles contact force from soft-sphere model

1. 弹簧 2. 阻尼器 3. 耦合器 4. 滑动器

耦合器是用来确定发生接触的颗粒配对关系,不引入任何力。在切向,如果切向力超过屈服值,两颗粒在法向力和摩擦力作用下滑动,由滑动器实现这一目的^[23-25]。

2.3 接触力计算

法向力 F_{nij} 是弹簧和法向阻尼器作用在颗粒 i 上的弹力和阻尼力的合力。对于三维球形颗粒,根据 Hertz 接触理论, F_{nij} 表示为

$$F_{nij} = -k_n a^{\frac{3}{2}} - c_n v_{ij} n \tag{4}$$

式中 k_n ——法向弹性系数
 c_n ——法向阻尼系数
 a ——法向重叠量

v_{ij} ——颗粒 i 相对于颗粒 j 的速度

n ——从颗粒 i 球心到颗粒 j 球心的单位矢量

切向力 F_{tij} 表示为

$$F_{tij} = -k_t \delta - c_t v_{ct} \tag{5}$$

式中 k_t ——切向弹性系数
 c_t ——切向阻尼系数

v_{ct} ——接触点的滑移速度

δ ——接触点的切向位移

如果有

$$|F_{ij}| > \mu_s |F_{nij}|$$

(6)

则颗粒*i*发生滑移,切向力为

$$F_{tij} = -\mu_s |F_{nij}| \frac{v_{ct}}{|v_{ct}|}$$

(7)

式中 μ_s ——静摩擦因数

式(7)为库仑摩擦定律,从式中可知,种子间切向力即为内摩擦力,而内摩擦力是阻碍种子间相对运动或者有相对运动趋势的主要因素^[26]。从公式中可以看出,影响内摩擦力的因素有静摩擦因数和法向力,而静摩擦因数又由种子本身物理属性决定,因此本文采用法向力 F_{nij} 来衡量种子之间的内摩擦力^[27-28]。

2.4 离散元模型

排种器在 CATIA 软件中建立几何模型,导入 ANASYS 软件下的 MESHING 模块进行几何体网格划分,将划分好网格的几何体分别导入 EDEM,为了减少仿真计算量,对排种器进行简化,如图 3 所示。

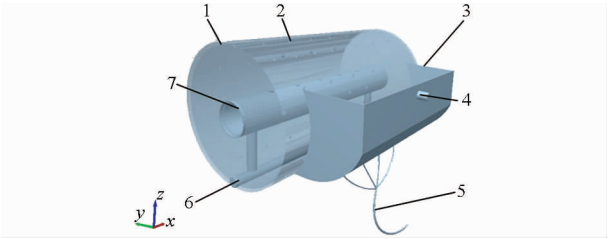


图 3 气吸滚筒式排种器几何模型

Fig. 3 Pneumatic cylinder seed-metering device model

1. 滚筒 2. 吸种孔 3. 种箱 4. 激振器 5. 气吹管 6. 绝压隔板 7. 空心轴

采用文山三七种子进行仿真试验,经测量得到种子的几何尺寸与力学特征参数^[29-30],如表 1 所示。

表 1 种子特征参数
Tab.1 Characteristic parameters of seeds

参数	数值
种子尺寸(长×宽×厚)/(mm×mm×mm)	6.17×5.51×5.18
泊松比	0.4
种子剪切模量/Pa	1.3×10 ⁷
种子密度/(kg·m ⁻³)	1 100
种间恢复系数	0.48
种间静摩擦因数	0.32
种间滚动摩擦因数	0.085

种子颗粒通过多球面组合填充的方式在 EDEM 软件中生成,如图 4 所示。

2.5 流场模型

针对气固耦合分析区域即种箱进行网格划分。采用 ANASYS 软件下的 MESHING 模块对种箱进行网格划分,划分所得网格总数为 45 280,其中最大网格体积为 1 872 mm³,最小体积为 7.86 mm³。由于

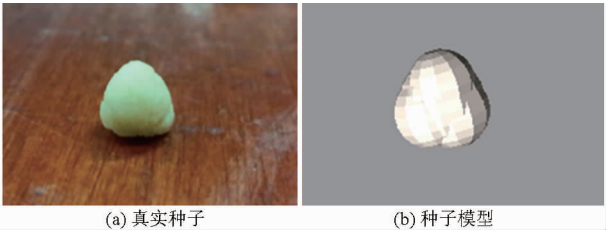


图 4 种子

Fig. 4 Seed

气吹气流通过种箱底部的通孔进去种箱,并由种箱的开口处流出,因此选取气吹供种口为压力进口边界条件,如图 5 所示。

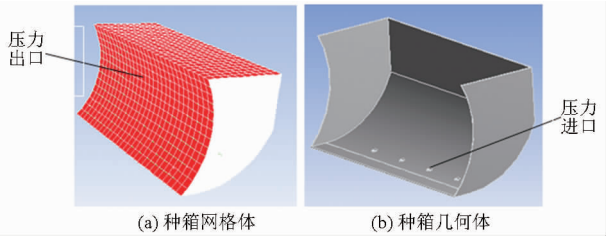


图 5 种箱边界条件与网格划分

Fig. 5 Model meshing and boundary of box

采用上述同样的方法对滚筒腔体内进行网格划分并进行流场模拟,模拟过程采用 $k-\varepsilon$ 模型,选取轴孔为压力进口边界条件,接口为压力出口边界条件,壁面采用无滑移边界条件。图 6 为腔体内部流场速度云图。由图 6 可知,轴孔均有流量流入,且未出现局部流量流速过大的情况,腔体内未出现较大涡流和回流现象。吸种孔采用直孔形式,吸种孔处的流速较大,吸种能力好,同时各个吸种孔处的流速流量及空气运动轨迹基本一致,说明各个吸种孔差异不大,流场分布均匀,利于充种。

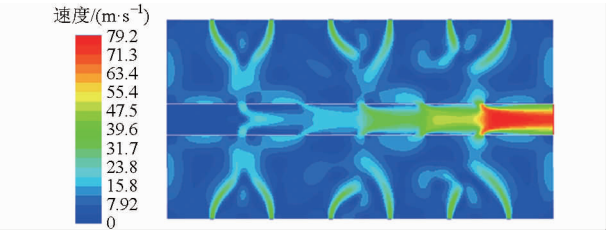


图 6 腔体内部流场速度云图

Fig. 6 Velocity contour of the inside cavity

2.6 排种器供种过程仿真

种子由种箱模型内部的颗粒工厂生成,生成的种子在自身重力的作用下分布在种箱底部,经过测量,为不影响充种效果同时不出现种子溢出现象,种层高度应达到种箱高度的 2/3。对种箱添加激振和气吹,EDEM 软件获取实时颗粒体的位置与接触信息,将获取的信息传递到 Fluent 软件中,软件根据获取的信息模拟计算颗粒体对流场的影响情况,再将所获得的流场信息反馈到 EDEM 软件中,模拟流

场对颗粒体的影响,依次循环,达到双向流固耦合的效果。在此作用下,种箱内的种群出现“沸腾”状态,种间出现了相对的运动与碰撞。

为了研究气吸滚筒式排种器充种性能,本文对气吹供种风压、振动频率以及振动角度进行考察。通过 EDEM – Fluent 模拟不同气吹供种风压和振动频率条件下种间法向力的变化对充种效果的影响。通过 EDEM 模拟不同振动角度条件下供种高度对充种效果的影响。

3 仿真结果分析

3.1 气吹风压

根据种箱内气吹供种实际情况,采用 EDEM – Fluent 耦合模拟仿真。双向耦合仿真过程输出每个时间步的接触平均法向力、接触总数、种子总数,每组仿真数据从 1 s 时开始输出,5 s 结束。 i 时刻每个种子受到的平均法向力为

$$f_{ni} = F_{ni} \frac{N_i}{N_{ci}} \tag{8}$$

式中 F_{ni} —— i 时刻接触法向力的平均值, N
 N_i —— i 时刻种子总数
 N_{ci} —— i 时刻接触总数

为了能够反映气吹风压对充种性能的影响,在前期试验中选取能够凸显这一影响的 3 个水平进行模拟仿真,如图 7 所示为气吹风压在 0.75、1.50、2.25 kPa 条件下种子平均法向力 f_{ni} 随时间变化趋势图。由图 7 可知,在刚通气流时平均法向力均出现了较大的波动,随着时间的推移波动呈现无规律变化,其中气吹风压在 2.25 kPa 时波动最为明显,而风压在 0.75 kPa 时基本没有波动。开始出现较大的波动是因为当气流首次通过种群时,种子之间处于相对静止且种子间隙较小,相同风压下,通过种群间隙时产生的负压较大,即种群产生较大波动。随着气吹风压的提高,种子的跳动明显增强,种子受到的法向力也会出现剧烈、无规律的增加或者减小。较大的气吹风压能够提高种群的扰动性,不但会打破种群原有的稳定状态,而且降低了种子瞬态的法向力。根据前文所述,降低种子的法向力即减小种子的内摩擦力,使种子更容易被滚筒上吸种孔处吸种负压吸附,从而提高了充填的概率。因此提高气吹风压能够一定程度上提高充种性能。

3.2 振动频率

为了能够反映振动频率对充种性能的影响,在前期试验中选取能够凸显这一影响的 3 个水平进行模拟仿真,根据振动试验实际情况,选取振幅为 1 mm,振动角度与水平夹角为 45°时,模拟种箱振动

频率分别为 65、85、105 Hz,获取随时间变化种子的平均法向力,如图 8 所示。从图 8 中可以看出种子平均法向力随着时间的推移出现无规律波动,并随着振频的提高,波动幅度增大且落差也随着增大。

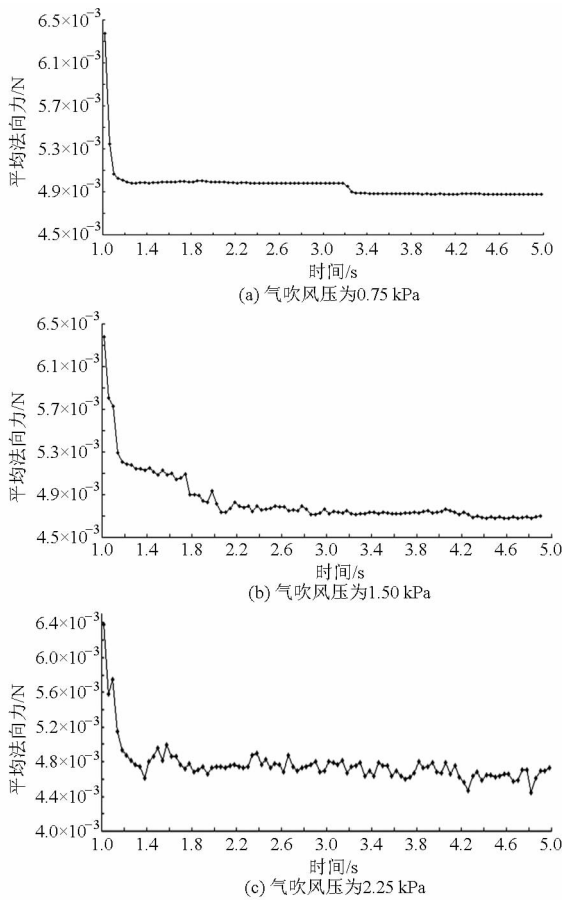


图 7 平均法向力随时间变化曲线

Fig. 7 Average normal stress vs time

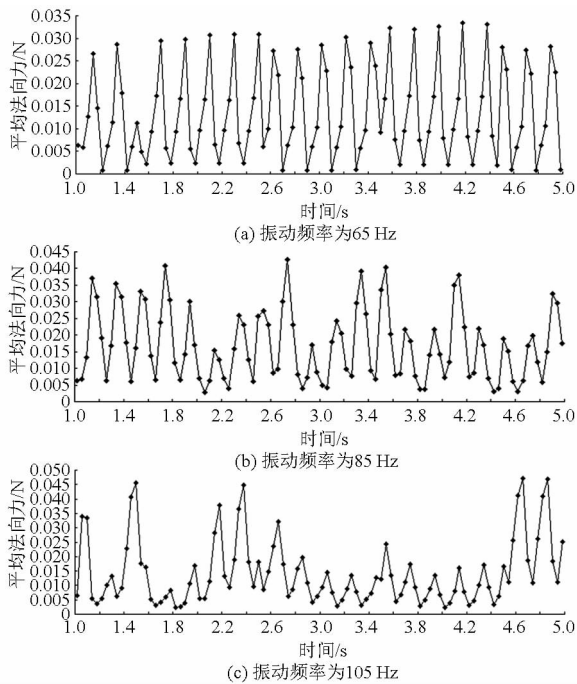


图 8 平均法向力随时间变化曲线

Fig. 8 Average normal stress vs time

为了定量描述这种波动,引入方差公式

$$\begin{cases} D_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^5 (f_{ni} - z)^2 \\ z = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^5 f_{ni} \end{cases} \quad (9)$$

式中 D_1 ——方差
 N ——输出数据总数,取 100
 z ——种子平均法向力总和, N

方差较大的其波动离散程度大,也就是对种子的扰动性较大。通过计算得出振动频率为 65 Hz 时,方差为 102.54;振动频率为 85 Hz 时,方差为 113.48;振动频率为 105 Hz 时,方差为 130.62。较大的振动频率可以使得种群扰动性增大,从而提高了充填的概率。因此提高振动频率可以一定程度提高充种性能^[31]。

3.3 振动角度

为了能够反映振动角度对充种性能的影响,在前期试验中选取能够凸显这一影响的 3 个水平进行模拟仿真,根据试验实际情况,选取振幅为 1 mm,振频为 105 Hz,模拟种箱振动角度 θ 分别为 30°、45°、60°,如图 9 所示。获取不同振动角度情况下种箱供种高度 H ,如图 10 所示。

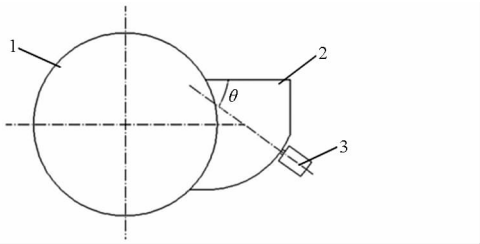


图 9 振动角度示意图
Fig.9 Sketch map of vertical oscillation
1. 滚筒 2. 种箱 3. 激振器

由图 10 可知在振动角度为 30°、45°时供种高度均有提升,而在振动角度为 60°时,种子出现了后移的现象,使得供种高度出现了下降的情况。通过测量得出振动角度为 30°、45°、60°时,对应供种高度为 92、98、70 mm。振动角度的不同影响种子水平和竖直方向的位移量。振动角度为 30°,其水平向前振

动位移量较大,但竖直方向位移量较小,制约其进一步提高供种高度;振动角度为 60°,其竖直方向振动位移量较大,但水平向前位移量较小,导致种子后移,使得供种高度不但没有提高反而下降。振动角度为 45°,其既有足够的水平向前的位移量又有足够的竖直位移量,使得其供种高度在三者中最高,较高的供种高度使得充种时间增加,从而提高了充填的概率。因此比较合适的振动角度有利于提高供种高度从而提高充种性能。

4 试验

4.1 试验条件

气吹振动充种性能试验在 JPS-12 型计算机视觉排种器性能检测试验台上进行,所用排种器为自行设计的气吸滚筒式排种器,激振源为 FP-12 型气动活塞振动器,气泵为气吹风压管提供风压,振频检测设备采用 VC63B 型测振仪,风压检测设备采用 KANOMAX6036 型热式风速风压仪。如图 11 所示。

4.2 单因素试验

为了检验模拟分析的结论,对上述 3 因素分别进行单因素试验,以漏充率为充种性能的评价指标,连续记录吸附 200 粒种子的集排试验结果,每次试验重复 5 次取平均值。试验均在滚筒转速为 28 r/min、吸种负压为 0.8 kPa、种层高度为 80 mm 条件下进行。

4.2.1 气吹风压对充种性能的影响

在不提供振动频率与振动角度的情况下,分别对气吹供种风压在 0.75、1.50、2.25、3.00、3.75 kPa 下进行充种性能试验,试验结果如图 12 所示。

从图 12 中可知,随着风压的增加漏充率呈现先减小后增加的趋势,拐点均出现在 2.25 kPa 处。试验中发现,随着气吹风压的提高,种箱内的种子出现波动,有效的降低了漏充的现象,但随着气吹风压的进一步提高,种子出现了较强的波动,使得原本被吸附的种子被波动较强的种子撞击掉落,出现了漏充率增加的情况。同之前模拟分析结果一致。因此通过试验得出在气吹风压为 2.25 kPa 时充种性能最佳。

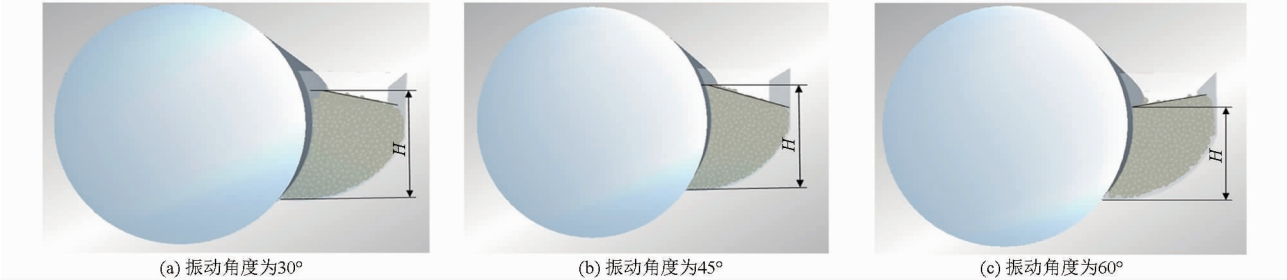


图 10 不同振动角度下供种高度示意图
Fig.10 Sketch map of height of supplying seeds under different vertical oscillations

筒转速为 28 r/min,吸种负压为 0.8 kPa,种层高度为 80 mm 条件下进行。试验结果及方差分析如表 3 和表 4 所示。 A 、 B 、 C 为因素编码值。

4.3.2 试验结果分析

合格指数越大越好,漏播指数与重播指数越小

越好。对其极差分析结果见表 3,结果表明:影响合格指数的主次因素顺序依次为 B 、 A 、 C ,而交互项 $A \times B$ 、 $A \times C$ 、 $B \times C$ 的极差较小,对合格指数影响较小,不是主要因素;影响漏播指数的主次因素顺序依次为 B 、 A 、 C ,而交互项 $A \times B$ 、 $A \times C$ 、 $B \times C$ 的极差较

表 3 试验方案与试验结果
Tab.3 Experimental scheme and test results

试验号	试验因素						合格指数	漏播指数	重播指数
	A	B	C	$A \times B$	$A \times C$	$B \times C$			
1	1	1	1	1	1	1	62.25	23.36	14.39
2	1	2	2	2	2	2	70.18	19.26	10.56
3	1	3	3	3	3	3	92.54	5.31	2.15
4	1	4	4	4	4	4	74.16	17.42	8.42
5	1	5	5	5	5	5	56.63	39.21	4.16
6	2	1	2	3	4	5	77.22	11.53	11.25
7	2	2	3	4	5	1	82.61	8.33	9.06
8	2	3	4	5	1	2	89.12	5.45	5.43
9	2	4	5	1	2	3	72.60	21.24	6.16
10	2	5	1	2	3	4	59.82	34.04	6.14
11	3	1	3	5	2	4	96.54	0.28	3.18
12	3	2	4	1	3	5	84.34	11.23	4.43
13	3	3	5	2	4	1	79.06	17.58	3.36
14	3	4	1	3	5	2	72.42	23.21	4.37
15	3	5	2	4	1	3	66.33	31.26	2.14
16	4	1	4	2	5	3	62.53	32.14	5.33
17	4	2	5	3	1	4	58.22	37.64	4.14
18	4	3	1	4	2	5	80.57	14.31	5.12
19	4	4	2	5	3	1	76.26	18.32	5.42
20	4	5	3	1	4	2	74.62	25.23	0.15
21	5	1	5	4	3	2	64.58	33.21	2.21
22	5	2	1	5	4	3	58.13	38.26	3.61
23	5	3	2	1	5	4	68.34	29.37	2.29
24	5	4	3	2	1	5	76.22	23.54	0.24
25	5	5	4	3	2	1	20.82	79.03	0.15
合格指数	k_1	71.152	72.624	66.638	72.430	70.428	64.200		
	k_2	76.274	70.696	71.666	69.562	68.142	74.075		
	k_3	79.738	81.926	84.506	64.244	75.508	71.125		
	k_4	70.440	74.332	66.194	73.650	72.638	71.416		
	k_5	57.618	55.644	66.218	75.336	68.506	74.996		
	R	22.120	26.282	18.312	11.092	7.366	10.796		
漏播指数	k_1	20.912	20.104	26.636	22.086	24.25	29.324		
	k_2	16.118	22.944	21.948	25.312	26.824	20.282		
	k_3	16.712	14.404	12.538	31.344	20.422	25.573		
	k_4	25.528	20.746	29.054	20.906	22.004	23.750		
	k_5	40.682	41.754	29.776	20.304	26.452	19.964		
	R	24.564	27.350	17.238	11.04	6.402	9.360		
重播指数	k_1	7.936	7.272	6.726	5.484	5.268	6.476		
	k_2	7.608	6.360	6.332	5.126	5.034	5.643		
	k_3	3.496	3.670	2.956	4.412	4.070	3.257		
	k_4	4.032	4.922	4.752	5.390	5.358	4.834		
	k_5	1.700	2.548	4.006	4.360	5.042	5.040		
	R	6.236	4.724	3.770	1.124	1.288	3.219		

小,对漏播指数影响较小,不是主要因素;影响重播指数的主次因素顺序依次为 A 、 B 、 C ,而交互项 $A \times B$ 、 $A \times C$ 、 $B \times C$ 的极差较小,对重播指数影响较小,不是主要因素;影响合格指数较优参数组合为 $B_3A_3C_3$;影响漏播指数较优参数组合为 $B_3A_2C_3$;影响重播指数较优参数组合为 $A_5B_5C_3$ 。

表 4 方差分析结果
Tab.4 Results of variance analysis

项目	方差来源	平方和	自由度	均方	F	P	显著性
合格指数	A	1 417.86	4	354.47	4.57	0.017 9	*
	B	1 845.03	4	461.26	5.95	0.007 1	**
	C	1 239.19	4	309.80	3.99	0.027 6	*
	残差	930.60	12	77.55			
	总和	5 432.68	24				
漏播指数	A	2 027	4	506.75	7.23	0.003 3	**
	B	2 170.85	4	542.71	7.74	0.002 5	**
	C	1 007.21	4	251.80	3.59	0.037 9	*
	残差	841.11	12	70.09			
	总和	6 046.16	24				
重播指数	A	146.73	4	36.68	15.07	0.000 1	**
	B	72.65	4	18.16	7.46	0.002 9	**
	C	50.61	4	12.65	5.20	0.011 5	*
	残差	29.20	12	2.43			
	总和	299.19	24				

注：* 表示显著 ($P < 0.05$), ** 表示极显著 ($P < 0.01$)。

前述极差分析寻找出了 3 个主要因素对合格指数、漏播指数、重播指数影响的主次顺序及较优水平组合。为进一步分析这 3 个主要因素对各评价指标的显著性,应用 Design - Expert 8.061 软件对主要因素进行方差分析,如表 4 所示。从表 4 中可知,气吹风压 B 对合格指数影响极显著 ($P < 0.01$),振动频率 A 和振动角度 C 对合格指数影响显著 ($P < 0.05$);气吹风压 B 和振动频率 A 对漏播指数影响极显著 ($P < 0.01$),振动角度 C 对漏播指数影响显著 ($P < 0.05$);振动频率 A 和气吹风压 B 对重播指数影响极显著 ($P < 0.01$),振动角度 C 对重播指数影响显著 ($P < 0.05$)。

4.4 参数优化与试验验证

利用软件优化模块,根据各因素的取值范围以及试验指标希望达到的标准(合格指数大于 90,漏播指数小于 6,重播指数小于 8),最终优化出 7 组参数组合满足要求,结果如表 5 所示。

参数最优组合需根据三七种植要求以及机器具 体作业情况而定。当种箱振动频率过大,种箱内的种子出现过度“沸腾”状态,出现种子外溢情况,同时伴随强噪声。气吹风压不宜过小,气吹风压过小达不到扰动种群的效果,从而不能很好的起到提高

充种效果的作用。根据三七种植要求,需保证合格指数的同时尽量降低漏播指数,即提高排种器充种性能。综上所述,从优化结果中选取一个较为合理的参数组合 $A_2B_4C_3$,即振动频率 85 Hz、气吹风压 3 kPa、振动角度 45°,试验指标合格指数、漏播指数、重播指数分别为 93.02、1.42、5.56。

表 5 参数优化结果
Tab.5 Parameter optimization results

序号	合格指数	漏播指数	重播指数	可取度/%	优组合
1	91.24	5.08	3.68	67	$A_3B_3C_2$
2	92.85	4.21	2.94	65	$A_3B_2C_3$
3	93.02	1.42	5.56	62	$A_2B_4C_3$
4	91.32	0.78	7.91	57	$A_2B_1C_3$
5	94.78	1.37	3.85	55	$A_3B_1C_3$
6	94.78	4.49	0.73	54	$A_4B_3C_3$
7	96.48	2.02	1.50	18	$A_3B_4C_3$

对优化后的理论值进行试验验证。在相同的试验条件下重复验证试验 10 次。得排种合格指数平均值为 92.68,漏播指数平均值为 1.56,重播指数平均值为 5.76,与理论优化结果基本一致。

5 结论

(1)为探寻种群扰动和供种高度对排种器充种性能的影响,采用 DEM - CFD 耦合方法,利用 EDEM - Fluent 软件耦合的方式,分别对气吹风压、振动频率和振动角度进行数值模拟,以种子平均法向力方差和供种高度为指标,对结果进行分析,得出增大种群扰动强度和提高供种高度可以有效提高排种器充种性能的结论。

(2)分别对气吹风压、振动频率、振动角度进行单因素试验,以合格指数、漏播指数、重播指数为试验指标,试验现象及效果与仿真分析结果一致。试验得出在气吹风压为 2.25 kPa 时充种效果最佳,即合格指数最高、漏播指数较低;振动频率为 105 Hz 时充种效果最佳;振动角度为 45°时充种效果最佳。验证了所建仿真模型的正确性及采用 EDEM - Fluent 耦合模拟仿真种箱气吹振动供种的可行性。

(3)为寻找最佳参数组合,以气吹风压、振动频率、振动角度为因素,合格指数、漏播指数、重播指数为试验指标,进行三因素五水平正交试验,并对结果进行优化得出:在振动频率 85 Hz、气吹风压 3 kPa、振动角度 45°时,效果最佳,试验指标合格指数、漏播指数、重播指数可达 93.02、1.42、5.56。对优化结果进行试验验证,得到试验指标合格指数、漏播指数、重播指数分别为 92.68、1.56、5.76,与优化结果基本一致。

参考文献

- 1 杨文彩,朱有勇,杜迁,等. 基于农机农艺融合的三七机械化精密播种系统研究[J]. 广东农业科学,2014(2):175-180.
YANG Wencai, ZHU Youyong, DU Qian, et al. Systematic study on *Notoginseng* mechanized precision seeding based on integration of agricultural machinery and agronomy[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2014(2): 175-180. (in Chinese)
- 2 YAZGI A, DEGIRMENCIOGLU A. Optimisation of the seed spacing uniformity performance of a vacuum-type precision seeder using response surface methodology[J]. Biosystems Engineering, 2007, 97(3): 347-356.
- 3 BEREKET B Z. Effect of different operating parameters on seed holding in the single seed metering unit of a pneumatic planter[J]. Turkish Journal of Agricultural Machinery, 2004, 28(6): 435-441.
- 4 GAIKWAD B B, SIROHI N P S. Design of a low-cost pneumatic seeder for nursery plug trays[J]. Biosystems Engineering, 2008, 99(3): 322-329.
- 5 周海波,马旭,姚亚利. 水稻秧盘育秧播种技术与装备的研究现状及发展趋势[J]. 农业工程学报,2008,24(4):301-305.
ZHOU Hai-bo, MA Xu, YAO Yali. Research advances and prospects in the seeding technology and equipment for tray nursing seedlings of rice[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(4): 301-305. (in Chinese)
- 6 廖庆喜,李继波,覃国良. 气力式油菜精量排种器试验[J]. 农业机械学报,2009,40(8):44-48.
LIAO Qingxi, LI Jibo, QIN Guoliang. Experiment of pneumatic precision metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(8): 44-48. (in Chinese)
- 7 张晓慧,宋建农. 针吸滚筒式水稻排种器设计[J]. 农业机械学报,2009,40(3):69-71.
ZHANG Xiaohui, SONG Jiannong. Design and research on rice precision needle-like vacuum seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(3): 69-71. (in Chinese)
- 8 杨丽,史嵩,崔涛,等. 气吸与机械辅助助种结合式玉米精量排种器[J]. 农业机械学报,2012,43(增刊):48-53.
YANG Li, SHI Song, CUI Tao, et al. Air-suction corn precision metering device with mechanical supporting plate to assist carrying seed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Suppl.): 48-53. (in Chinese)
- 9 胡建平,郑赛男,刘文东. 磁吸滚筒式精密排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2009,40(3):60-63.
HU Jianping, ZHENG Sainan, LIU Wendong. Design and experiment of precision magnetic cylinder seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(3): 60-63. (in Chinese)
- 10 赵湛,李耀明,陈进,等. 气吸滚筒式排种器吸种过程的动力学分析[J]. 农业工程学报,2011,27(7):112-116.
ZHAO Zhan, LI Yaoming, CHEN Jin, et al. Dynamic analysis of seeds pick-up process for vacuum-cylinder seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(7): 112-116. (in Chinese)
- 11 张石平,夏静,陈进. 气吸振动式蔬菜穴盘育苗精密播种装置的研究[J]. 农机化研究,2007,29(8):80-83.
ZHANG Shiping, XIA Jing, CHEN Jin. Study on equipment of vibration air-suction vegetable tray precise seeder[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007, 29(8): 80-83. (in Chinese)
- 12 王淑铭,魏天路,周海波. 气动振动式精密排种器工作参数的分析与仿真[J]. 农业工程学报,2010,26(增刊1):56-60.
WANG Shuming, WEI Tianlu, ZHOU Hai-bo. Theoretical research and simulation analysis on operating parameters of pneumatic vibration precision seed-metering[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(Suppl. 1): 56-60. (in Chinese)
- 13 陈进,周韩,赵湛,等. 基于 EDEM 的振动种盘中水稻种群运动规律研究[J]. 农业机械学报,2011,42(10):79-83.
CHEN Jin, ZHOU Han, ZHAO Zhan, et al. Analysis of rice seeds motion on vibrating plate using EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(10): 79-83. (in Chinese)
- 14 陈进,李耀明. 气吸振动式播种试验台内种子运动规律的研究[J]. 农业机械学报,2002,33(1):47-50.
CHEN Jin, LI Yaoming. Study on seeds movement law in sowing test stand with suction and vibration[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(1): 47-50. (in Chinese)
- 15 李林. 气吸式排种器理论及试验的初步研究[J]. 农业机械学报,1979,10(3):56-63.
LI Lin. A preliminary study on the theory and experimentation of the suction-type metering device for precision drill[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1979, 10(3): 56-63. (in Chinese)
- 16 高筱钧,周金华,赖庆辉. 中草药三七气吸滚筒式精密排种器的设计与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(2):20-28.
GAO Xiaojun, ZHOU Jinhua, LAI Qinghui. Design and experiment of pneumatic cylinder precision seed-metering device for *Panax notoginseng* [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(2): 20-28. (in Chinese)
- 17 刘向军,石磊,徐旭常. 稠密气固两相流欧拉-拉格朗日法的研究现状[J]. 计算力学学报,2007,2(2):166-172.
LIU Xiangjun, SHI Lei, XU Xuchang. Activities of dense particle-gas two-phase flow modeling in Eulerian-Lagrangian approach [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2007, 2(2): 166-172. (in Chinese)
- 18 VAN LIEDEKERKE P, TIJSKENS E, DINTWA E, et al. DEM simulations of the particle flow on a centrifugal fertilizer spreader [J]. Powder Technology, 2009, 190(3): 348-360.
- 19 YOSHIYUKI S, CUNDALL P A. Three dimensional DEM simulation of bulk handling by screw conveyors [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2001, 127(9): 864-872.
- 20 胡建平,郭坤,周春健,等. 磁吸滚筒式排种器种箱振动供种仿真与试验[J]. 农业机械学报,2014,45(8):61-65.

HU Jianping, GUO Kun, ZHOU Chunjian, et al. Experiment of supplying seeds in box of magnetic precision cylinder-seeder[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 61 – 65. (in Chinese)

21 李帅,李晔,马履翱,等. 基于 EDEM 对圆形导料溜槽的仿真分析[J]. 煤矿机械, 2012, 33(6): 71 – 73.
LI Shuai, LI Ye, MA Lüao, et al. Simulation analysis of cylindrical chute based on EDEM[J]. Coal Mine Machinery, 2012, 33(6): 71 – 73. (in Chinese)

22 陈进,周韩,赵湛,等. 基于 EDEM 的振动种盘中水稻种群运动规律研究[J]. 农业机械学报, 2011, 42(10): 79 – 83, 100.
CHEN Jin, ZHOU Han, ZHAO Zhan, et al. Analysis of rice seeds motion on vibrating plate using EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(10): 79 – 83, 100. (in Chinese)

23 于建群,申燕芳,牛序堂,等. 组合内窝孔精密排种器清种过程的离散元法仿真分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(5): 105 – 109.
YU Jianqun, SHEN Yanfang, NIU Xutang, et al. DEM simulation and analysis of the clearing process in precision metering device with combination inner-cell[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(5): 105 – 109. (in Chinese)

24 王国强,郝万军,王继新. 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.

25 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.

26 吴爱祥,孙业志,刘湘平. 散体动力学理论及其应用[M]. 北京:冶金工业出版社, 2002.

27 滕云楠,曾庆辉,姚红良,等. 振动摩擦机理及其非线性动力学特性[J]. 摩擦学学报, 2010, 30(2): 197 – 202.
TENG Yunnan, ZENG Qinghui, YAO Hongliang, et al. Mechanism of vibration friction and its non-linear dynamic characteristics [J]. Tribology, 2010, 30(2): 197 – 202. (in Chinese)

28 孔维姝,胡林,杜学能,等. 用探测棒研究颗粒堆中的最大静摩擦力[J]. 物理学报, 2007, 56(4): 2318 – 2322.
KONG Weishu, HU Lin, DU Xueneng, et al. Studies of maximum static friction force in granular pile with probing rod[J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(4): 2318 – 2322. (in Chinese)

29 苏微,高筱钧,任闯,等. 种子颗粒群的悬浮速度模拟预测方法[J]. 华南农业大学学报, 2016, 37(1): 110 – 116.
SU Wei, GAO Xiaojun, REN Chuang, et al. A simulation prediction method of suspension speed of seed particles swarm[J]. Journal of South China Agricultural University, 2016, 37(1): 110 – 116. (in Chinese)

30 任闯,高筱钧,苏微,等. 三七种子的物理机械特性试验[J]. 湖南农业大学学报:自然科学版, 2015, 41(1): 109 – 112.
REN Chuang, GAO Xiaojun, SU Wei, et al. Experimental study on physical and mechanical characteristics of *Panax notoginseng* seeds[J]. Journal of Hunan Agricultural University: Natural Sciences, 2015, 41(1): 109 – 112. (in Chinese)

31 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.
SHI Song, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Simulation and verification of seed-filling performance of pneumatic combined holes maize precision seed-metering device based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(3): 62 – 69. (in Chinese)

32 袁志发,周静芋. 试验设计与分析[M]. 北京:高等教育出版社, 2000.