

引用格式:

张雅蓉, 刘大为, 谢方平, 郑鹏, 宋思明. 水稻侧深施肥倾斜螺旋杆式排肥装置参数优化与试验[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2024, 50(6): 109–114.

ZHANG Y R, LIU D W, XIE F P, ZHENG P, SONG S M. Parameter optimization of spiral inclined fertilization device and its trial for rice side deep fertilization[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2024, 50(6): 109–114.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



水稻侧深施肥倾斜螺旋杆式排肥装置参数优化与试验

张雅蓉¹, 刘大为^{1,2*}, 谢方平^{1,2}, 郑鹏¹, 宋思明³

(1.湖南农业大学机电工程学院, 湖南 长沙 410128; 2.智能农机装备湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410128;
3.湖南龙舟农机股份有限公司, 湖南 汨罗 414400)

摘 要: 针对倾斜螺旋杆式排肥装置作业时存在施肥均匀性差的问题, 在龙舟2FH系列排肥装置上进行螺旋部件结构运动参数的优化与验证。通过对装置充、排肥过程分析, 探究其装置结构参数与运行参数对排肥均匀性的影响, 根据排肥量要求确定其排肥部件因素参数范围。采用单因素试验, 以排肥量均值和排肥均匀性变异系数为作业质量评价指标, 确定Y形排肥管倾角、输送螺杆螺距、输送螺杆转速的参数范围。采用 $L_9(3^3)$ 正交表设计试验, 根据极差分析和方差分析, 获得最优参数组合为: Y形排肥管倾角 40° 、输送螺杆螺距36 mm、输送螺杆转速170 r/min。台架试验时, 设置装置行进速度为0.25 m/s, 其排肥量均值和排肥均匀性变异系数分别为3.48 g和14.9%, 较优化前装置的排肥量均值提高了0.78 g, 排肥均匀性变异系数降低了9.1个百分点。

关 键 词: 水稻; 侧深施肥; 倾斜螺旋杆式排肥装置; 均匀性试验

中图分类号: S224.2

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2024)06-0109-06

Parameter optimization of spiral inclined fertilization device and its trial for rice side deep fertilization

ZHANG Yarong¹, LIU Dawei^{1,2*}, XIE Fangping^{1,2}, ZHENG Peng¹, SONG Siming³

(1.College of Mechanical and Electrical Engineering, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China;
2.Intelligent Agricultural Machinery Equipment Hunan Key Laboratory, Changsha, Hunan 410128, China; 3.Hunan Longzhou Agricultural Machinery Co. Ltd., Miluo, Hunan 414400, China)

Abstract: To address the problem of poor fertilization uniformity in the spiral inclined fertilization device during operation, optimization and verification of the structural and motion parameters of the spiral components were carried out on the Longzhou 2FH series fertilizer-discharging device. By analyzing the fertilizer-filling and discharging processes of the device, the influence of its structural and operating parameters on fertilization uniformity was explored. Based on the requirements of fertilizer-discharging amount, the parameter ranges of the fertilizer-discharging components were determined. Single-factor tests were carried out with the average fertilizer-discharging amount and the coefficient of variation of fertilization uniformity as the operation quality evaluation indicators, and the parameter ranges of the inclination angle of the Y-shaped fertilizer-discharging pipe, the pitch of the conveying screw, and the rotational speed of the conveying screw were determined. An $L_9(3^3)$ orthogonal array was used to design the test. According to range analysis and variance analysis, the optimal combined parameters, the inclination angle of the Y-shaped fertilizer-discharging pipe 40° , the pitch of the conveying screw 36 mm, and the rotational speed of the conveying screw 170 r/min were obtained. In the bench-test, with the traveling speed of the device at 0.25 m/s, the average fertilizer-discharging amount and the coefficient of variation of fertilization uniformity were 3.48 g and 14.9%,

收稿日期: 2023-10-09

修回日期: 2024-10-19

基金项目: 湖南省重点研发计划项目(2021NK2022)

作者简介: 张雅蓉(1999—), 女, 湖南津市人, 硕士研究生, 主要从事水稻侧深施肥技术及装备研究, 1660821947@qq.com; *通信作者, 刘大为, 博士, 副教授, 主要从事水稻生产全程机械化技术及理论研究, liudawei8361@163.com

respectively. Compared with the device before optimization, the average fertilizer-discharging amount increased by 0.78 g, and the coefficient of variation of fertilization uniformity decreased by 9.1 percentage points.

Keywords: rice; side deep fertilization; spiral inclined fertilization device; uniformity test

水稻侧深施肥技术的实现需要机械的配合, 通过在插秧机上加装侧深施肥装置, 将肥料均匀、定量地施入秧苗根侧 3~5 cm、深 4~6 cm 的位置, 可以避免肥料漂移, 促进秧苗根系对养分的吸收^[1]。该方式能够有效提高肥料利用率, 在缩短缓苗期、促进根系生长、增加水稻产量的同时, 减少施肥次数和肥料用量, 降低了人工投入和养分损失, 对促进化肥减量增效和农业绿色高质量发展具有重要意义。

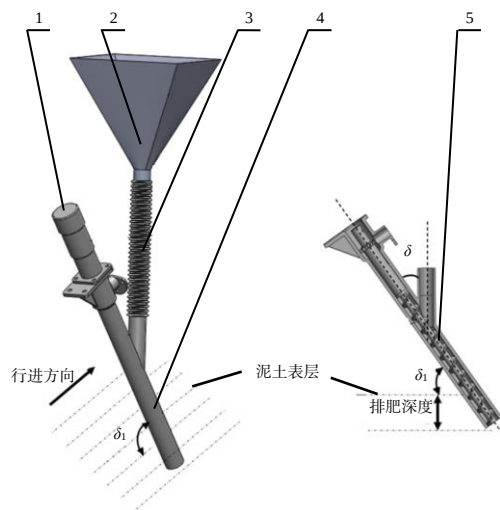
侧深施肥装置通常采用气力输肥与机械式排肥两种方式。气力输肥普遍利用风机产生的正压风辅助输肥, 肥料经排肥轮排出后, 在气流和重力作用下沿着导肥管移动, 直至落入预先开好的沟槽中, 满足侧深施肥作业要求, 但风机供能来源于高速插秧机电瓶, 其功率过大影响插秧机工作效率, 且气力输送时难以控制施肥量, 施肥均匀性较差^[2-3]。日本久保田株式会社开发了开槽滚轮排肥装置, 利用压力气体输送肥料进行排肥作业, 再借助发电机产生热空气以降低肥料受潮程度; 洋马农机株式会社的机型采用转盘排肥和气力输肥方式, 方便肥料清理, 有效防止堵塞^[4]。湖北永祥粮食机械股份有限公司的侧深施肥机可根据车速信息调节施肥量。机械式侧深排肥装置主要采用螺旋输送结构。周成等^[5]研制了两级机械式排肥输送, 第 1 级采用外槽轮使肥料排进输肥管, 第 2 级利用斜置螺杆将肥料输送至秧田。位国建等^[6]研制了水田机械式强制排肥装置, 通过控制器调节施肥量排入已开好的沟槽中。汪洋等^[7]研发了螺旋侧深施肥装置, 可通过控制系统确定行走速度及电机转速调节排肥量。湖南龙舟农机股份有限公司设计研发的 2FH 水稻插秧同步精量施肥机采用倾斜螺旋杆式, 可有效改善肥料堵塞情况^[8-9]。当前螺旋杆式侧深施肥装置在可靠性、适应性等方面均表现出了较优的性能, 但有关其装置的结构运动参数的研究较少。

本研究中, 基于螺旋输送原理, 对龙舟 2FH 系列倾斜螺旋杆式排肥装置在一定施肥量和行进速度条件下的均匀性能进行优化试验。对排肥装置工作过程进行试验研究分析, 获取影响均匀性的各项因素, 通过单因素及正交试验的台架试验, 得到装置最优工作参数, 以为排肥装置的结构优化和自动控制策略的制定与实施提供依据。

1 倾斜螺旋杆式排肥装置的结构与工作原理

1.1 装置结构及参数

倾斜螺旋杆式排肥装置(图 1)安装在水稻插秧机上, 主要由肥料箱、执行电机、输送螺杆、Y 形排肥管组成, 肥料箱固定安装在插秧机机架上, 肥料箱与 Y 形排肥管之间用塑料软管连接, Y 形排肥管另一端连接执行电机, 输送螺杆位于 Y 形排肥管内与执行电机连接。在装置工作过程中, 其排肥深度为 4~6 cm。图 1 中 δ 为 Y 形排肥管倾角, 数值与 Y 形排肥管入土角(δ_1)互余。



1 电机; 2 肥料箱; 3 塑料软管; 4 Y 形排肥管;
5 输送螺杆; δ Y 形排肥管倾角; δ_1 排肥管入土角。

图1 倾斜螺旋杆式排肥装置的结构

Fig.1 Structure of the spiral inclined fertilization device

2FH 型水稻机插秧同步侧深施肥装置主要结构参数如表 1 所示。

表 1 2FH 型侧深施肥装置主要结构参数
Table 1 Main structural parameters of 2FH type side deep fertilization device

参数	值
装置长×宽×高/(mm×mm×mm)	580×484×874
肥箱容积/L	15.8
排肥量/(kg hm ⁻²)	225~675
施肥深度/mm	40~60
作业小时生产率/(hm ² h ⁻¹)	0.3~0.7

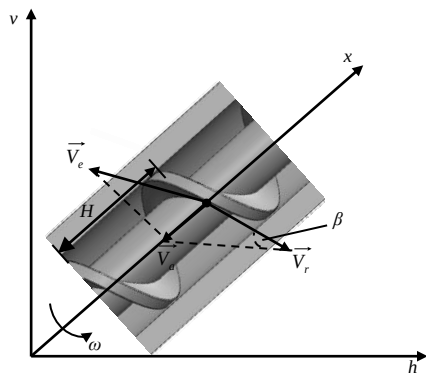
1.2 工作原理

通过后置固定连接, 2FH 系列排肥装置与插秧机搭载, 且与插秧机共用同一动力源, 确保施肥与插秧作业同步进行, 肥料箱安装在施肥支架上方, 用于储存肥料。排肥装置排肥作业时, 肥料颗粒依靠自身重力以及插秧机振动的双重作用, 通过塑料软管落入 Y 形排肥管中, 执行电机对输送螺杆的转速进行无级调节, 然后以一定转速将肥料颗粒送至深度 4~6 cm、秧苗侧 3~5 cm 的位置。

2 螺旋排肥过程分析

2.1 肥料颗粒的运动分析

假设置备稳定作业时, 肥料在输送螺杆上没有径向位移, 其颗粒间的相对运动可忽略^[10]。以此为基础, 建立排肥装置内部颗粒运动模型, 对其进行运动分析, 如图 2 所示。肥料颗粒的绝对运



v、h 竖直、水平方向; x 输送螺杆轴线方向; ω 螺杆转动角速度; H 螺杆螺距; V_a 肥料颗粒的绝对速度; V_r 肥料颗粒的牵连速度; V_e 肥料颗粒的相对速度; β 叶片的螺旋升角。

图2 排肥装置内部肥料颗粒运动的速度分析

Fig.2 Velocity analysis of the movement of fertilizer particles inside the fertilizer-discharging device

动由沿螺旋展开线向下的相对运动和绕输送螺杆的圆周运动作为牵连运动决定。速度关系式为:

$$\vec{V}_a = \vec{V}_r + \vec{V}_e \tag{1}$$

肥料颗粒经由螺杆叶片边缘以相对速度 V_e 与牵连速度 V_r 开始运动, 在螺旋面与其他肥料颗粒的作用下完成排肥作业。

2.2 肥料颗粒受力分析

因肥料颗粒向下输送时为复合运动, 以 Y 形排肥管建立定参考系 XYZ, 以输送螺杆的转动建立动参考系 xyz, 对其进行受力分析, 动参考系的 x 轴方向与定参考系 X 轴方向重合, 如图 3 所示。任意选取肥料颗粒为研究对象, 对其在 Y 形排肥管中的受力进行分析。肥料颗粒受到的作用力包括自身重力(G), 螺杆叶片的支持力(N_s , 方向垂直于叶片), 螺杆叶片的摩擦力(F_s , 方向为螺杆叶片的切线方向, 与相对速度方向相反), 螺旋运动产生的离心惯性力(F_c , 方向指向排肥管内壁), 排肥管的支持力(N_t , 与离心惯性力反向), 排肥管的摩擦力(F_t , 与绝对速度方向相反), 哥式惯性力(F_k , 垂直于由螺杆叶片旋转角速度和相对速度决定的平面, 可由右手定则决定)。

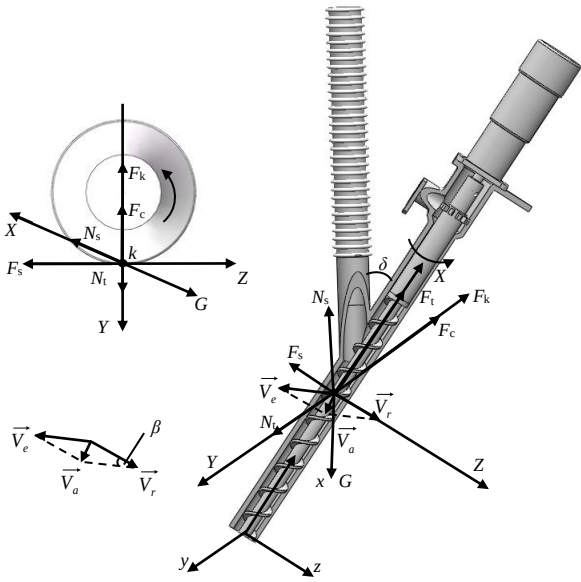


图3 排肥装置内部肥料颗粒的受力分析

Fig.3 Force analysis of fertilizer particles inside the fertilizer-discharging device

根据动力学方程可得:

$$G+N_s+F_s+F_c+N_t+F_t+F_k=0 \tag{2}$$

将肥料颗粒的受力在 X、Y、Z 轴进行投影:

$$\begin{cases} mg \cos \delta + F_s \sin \beta = N_s \cos \beta + F_t \\ F_k + F_c = N_t \\ mg \sin \delta = N_s \sin \beta + F_s \cos \beta \end{cases} \quad (3)$$

式中: m 为肥料颗粒质量; g 为重力加速度;

$F_t = \mu N_t$; $F_s = \mu N_s$; $F_k = 2m\omega R \cos \beta$; $F_c = m\omega R$; μ 为摩擦因数; R 为螺杆半径。

当装置稳定作业时, F_k 可忽略, 化简得到:

$$\sin \delta = \frac{\mu N_s \cos(\beta - \delta) - N_s \sin(\beta - \delta)}{\mu m \omega R} \quad (4)$$

综上分析可确定, δ 、 β 、 ω 、 R 对装置稳定作业存在一定影响, 输送螺杆直径(D)、螺距(S)、转速(n)及 δ 均影响排肥装置的均匀性。

3 关键部件参数计算

倾斜螺旋杆式排肥装置搭载于 4、6、8 行乘坐式插秧机, 株距分别为 12、14、17 cm。匹配插秧机的生产率 0.3~0.7 hm²/h, 根据农艺要求设定总目标排肥量(Q)为 250~500 kg/hm²[6], 以 6 行乘坐式插秧机进行计算, 单个目标施肥量(q)为 21.67~30.60 kg/h。

因排肥装置为倾斜式, δ 与肥料颗粒填充系数及倾斜输送填充系数相关。供试肥料为湖南隆科肥业有限公司高浓度颗粒状复合肥, 测得其密度为 1 740 kg/m³; K 为肥料颗粒特性系数, 参照文献[11], 取 0.063 2; 参照文献[12], D 取 22 mm, 根据公式[11]计算, 得到倾斜角度填充系数(W)的取值范围为 0.174 2~0.245 9, 参照文献[11]中的相关表格, 可确定 δ 为 25°~55°。

输送螺杆螺距决定螺旋升角、肥料颗粒在一定螺距段内的滑移方向, 影响肥料输送[13]。根据常用输送螺杆螺距计算公式[13-14]确定 S 取值范围为 18~38 mm。

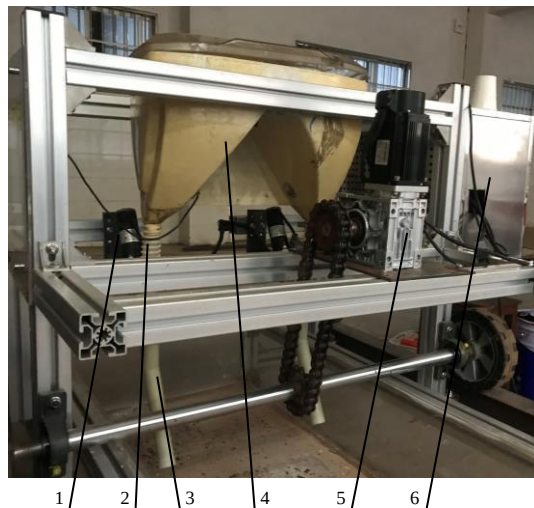
肥料颗粒所受离心力的最大临界值需小于等于自身重力的分力, 根据输送螺杆的最大转速计算公式[4], 可确定转速最大值为 188.8 r/min。进行转速-排肥量的预备试验, 确定 n 的取值区间并设置为标准数列, n 取值范围调整为 100~180 r/min。

4 试验及参数优化

4.1 试验条件与方法

试验用肥为湖南隆科肥业有限公司生产的高浓度颗粒状复合肥; 测量工具为卷尺(量程 5 m、

精度 1 mm)、电子天平(量程 3 kg、精度 0.1 g); 筛选工具为孔径 2 mm 的筛子(将装置排出的肥料颗粒从沙土中筛出); 试验装置为自制试验台架, 如图 4 所示。



1 输送螺杆; 2 塑料软管; 3 Y 形排肥管; 4 肥料箱;
5 电机调控系统; 6 行进驱动系统。

图4 倾斜螺旋杆式排肥装置试验台架

Fig.4 The bench device of spiral inclined fertilization device

依据 NY/T 1003—2006《施肥机械质量评价技术规范》[15], 装置排肥均匀性判定需进行动态试验[16-18]。在动态试验的试验场地中铺设沙土, 以避免装置排肥过程中肥料颗粒跳动影响试验结果。因场地有限, 试验过程中的行进速度设为 0.25 m/s, 行进距离不小于 10 m。沿行进方向随机选取 3 m 的肥料段并将其连续等分为 30 段, 收集各小段内的肥料并用电子天平称质量, 每组重复 3 次。参照文献[15]的方法, 计算排肥量均值(Y_1)及排肥均匀性变异系数(Y_2)。

4.2 单因素试验

4.2.1 单因素试验设计

根据部件结构设计, 将 δ 取值范围(25°~55°)等距划分, 设置 δ 分别为 25°、33°、40°、47°、55°, 并设置 n 为 140 r/min, S 为 28 mm, 研究 δ 对排肥装置均匀性的影响; 将 n 取值范围(100~180 r/min)等距划分, 设置 n 分别为 100、120、140、160、180 r/min, 并设置 δ 为 40°, S 为 28 mm, 研究 n 对排肥装置均匀性的影响; 将 S 取值范围(18~38 mm)等距划分, 设置 S 分别为 18、23、28、33、

38 mm, 并设置 δ 取 40° , n 取 140 r/min, 研究 S 对排肥装置均匀性的影响。每组试验重复 3 次。

4.2.2 单因素试验结果与分析

由图 5 可知, 随着 δ 的增大, Y_1 先减小, $\delta > 40^\circ$ 后增大, $\delta = 47^\circ$ 时最大, 随后急剧减小到最低; 随着 δ 的增大, Y_2 先增大, $\delta = 33^\circ$ 时最大, 随后减小直至平缓。5 组试验的结果均满足施肥量的农艺要求(250~500 kg/hm²), 也符合 NY/T 1003—2006 中 $Y_2 < 40\%$ 的标准。根据试验结果, 拟合 δ 对 Y_1 、 Y_2 的回归方程: $Y_1 = -0.000\ 2\delta^3 + 0.019\ 6\delta^2 - 0.774\delta + 12.059$, $R^2 = 0.893\ 1$; $Y_2 = 0.002\ 7\delta^3 - 0.322\ 3\delta^2 + 12.272\delta - 117.92$, $R^2 = 0.815\ 6$ 。根据回归方程确定 δ 均值为 40° 。当 δ 越大, 肥料填充系数越小, 直接影响排肥量, 使得排肥量难以达到预期水平; 当 δ 较小时, 会在排肥管入土过程中产生较大阻力, 不利于排肥管深入土壤。为确保数据极值在所选倾角取值范围内, 综合考虑, 选取 Y 形排肥管倾角为 $29^\circ \sim 51^\circ$ 进行正交试验。

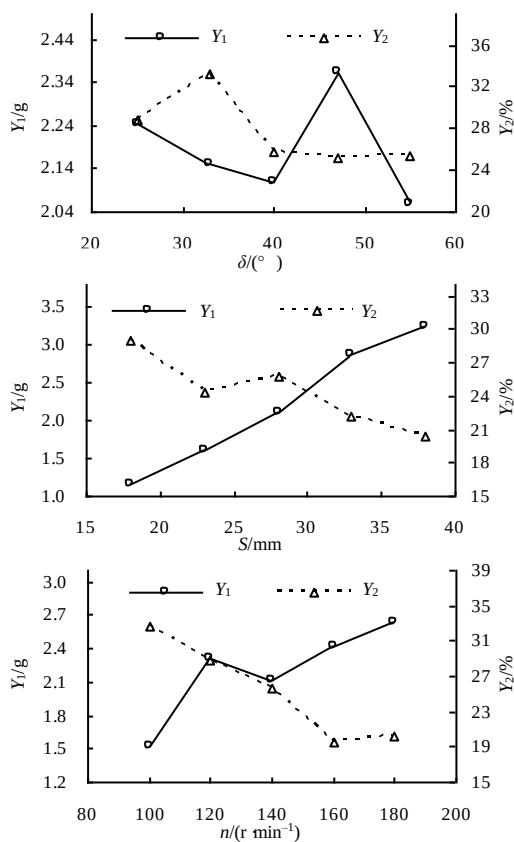


图5 排肥均匀性单因素试验结果

Fig.5 Result of single-factor test on fertilizer-discharging uniformity

由图 5 可知, 随着 S 的增大, Y_1 呈现上升趋势, 而 Y_2 则整体呈现下降趋势。5 组试验的结果均满足施肥量的农艺要求(250~500 kg/hm²), 也符合 NY/T 1003—2006 中 $Y_2 < 40\%$ 的标准。拟合 S 对 Y_1 、 Y_2 的回归方程: $Y_1 = -1.117\ 86 \times 10^{-4} S^2 + 0.043\ 04 S - 1.543\ 9$, $R^2 = 0.803\ 8$; $Y_2 = 1.035\ 71 \times 10^{-5} S^2 - 0.004\ 6 S + 0.686\ 51$, $R^2 = 0.950\ 3$ 。 S 影响螺旋槽内肥料填充情况及装置排肥量, 当 S 过大时, 会引起肥料颗粒在螺旋槽中运动速度和方向发生变化, S 过小会导致排肥过程不畅, S 过大或过小都会导致肥料阻滞现象。为此, 结合回归方程综合考虑选取 S 为 20~36 mm 进行正交试验。

由图 5 还可知, 随着 n 的增加, Y_1 整体呈现上升趋势(除 140 r/min 时有轻微下降外), 而 Y_2 逐渐下降至平缓。5 组试验的结果均满足施肥量的农艺要求(250~500 kg/hm²), 也符合 NY/T 1003—2006 中 $Y_2 < 40\%$ 的标准。拟合 n 对 Y_1 、 Y_2 的回归方程: $Y_1 = 2.714\ 29 \times 10^{-4} n^2 + 0.093\ 22 S - 0.633\ 73$, $R^2 = 0.988\ 0$; $Y_2 = 1.714\ 29 \times 10^{-5} S^2 - 0.004\ 88 S + 0.365\ 54$, $R^2 = 0.864\ 5$ 。当 n 过高时, 肥料颗粒在螺旋面的轴向上出现跳动, 同时肥料填充至螺距段的时间减少, 填充效率降低, 均导致排肥性能不佳; 当 n 过低时, 装置的排肥量难以满足农艺要求。为此, 结合回归方程综合考虑选取 n 为 110~170 r/min 进行正交试验。

4.3 正交试验

4.3.1 正交试验设计

根据单因素试验结果, 进行三因素三水平的正交组合设计, 以 δ 、 S 、 n 为影响因素, 以 Y_1 、 Y_2 为目标函数, 试验因素水平如表 2 所示。共设计 9 组试验, 每组重复 3 次。试验方案与结果如表 3 所示。运用 IBM SPSS Statistics 26.0 对试验结果进行极差分析和方差分析。

表2 排肥均匀性正交试验的因素和水平
Table 2 Factors and levels of the orthogonal test for fertilizer-discharging uniformity

水平	$\delta/^\circ$	S/mm	$n/(\text{r min}^{-1})$
1	29	20	110
2	40	28	140
3	51	36	170

表3 排肥均匀性正交试验的结果及极差分析结果

Table 3 Results of the orthogonal test for fertilizer-discharging uniformity and range analysis

序号	水平			Y_1/g	$Y_2/\%$
	δ	S	n		
1	1	1	1	1.16	37.94
2	1	2	2	2.39	32.00
3	1	3	3	2.98	19.16
4	2	1	2	1.39	29.05
5	2	2	3	2.68	25.15
6	2	3	1	2.55	31.88
7	3	1	3	1.64	22.45
8	3	2	1	1.60	29.37
9	3	3	2	2.57	37.29
k_{11}	2.18	1.40	1.77		
k_{12}	2.21	2.22	2.12		
k_{13}	1.94	2.70	2.43		
R_1	0.27	1.30	0.66		
k_{21}	29.70	29.81	33.06		
k_{22}	28.69	28.84	32.78		
k_{23}	29.70	29.44	22.25		
R_2	1.01	0.97	10.81		

4.3.2 正交试验结果与分析

从极差分析结果(表 3)可知, S 、 n 、 δ 对 Y_1 的影响依次减小, δ 为影响 Y_1 的最次因素, 进行方差分析时, 将其当作误差项; n 、 δ 、 S 对 Y_2 的影响依次减小, 且 δ 和 S 均为影响 Y_2 的次要因素, 进行方差分析时, 均作为误差项; 针对 Y_1 、 Y_2 的最佳参数水平组合分别为 $\delta_2S_3n_3$ 、 $\delta_2S_2n_3$ 。方差分析结果(表 4)表明, S 对 Y_1 的影响极显著($P<0.001$); n 对 Y_1 的影响不显著($P=0.053$), 对 Y_2 的影响极显著($P<0.001$)。由此确定最优方案为 $\delta_2S_3n_3$, 即 $\delta=40^\circ$ 、 $S=36\text{ mm}$ 、 $n=170\text{ r/min}$ 。

表 4 排肥装置影响因素与其排肥均匀性性能的方差分析结果
Table 4 Results of variance analysis for influencing factors of fertilizer-discharging device and its discharging uniformity performance

指标	方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
Y_1	模型	3.27	4	0.82	16.56	0.090
	S	2.61	2	1.30	26.43	<0.001
	n	0.66	2	0.33	6.69	0.053
	误差	0.20	40	0.05		
	总和	43.41	9			
Y_2	模型	227.75	2	113.87	7.45	0.020
	n	227.75	2	113.87	2.58	<0.001
	误差	91.68	6	15.28		
	总和	8 080.45	9			

4.4 验证试验

根据获得的最佳排肥装置结构参数进行台架排肥均匀性试验, 并将结果与优化前的装置试验结果进行对比。结果(表 5)表明, 优化后装置的排肥量均值提高了 0.78 g , 排肥均匀性变异系数降低了 9.1 个百分点。

表5 验证试验结果

Table 5 Result of the verification test

排肥装置	Y_1/g	$Y_2/\%$
优化前	2.69	24.0
优化后	3.48	14.9

5 结论

1) 通过理论分析确定影响 Y 形排肥管倾角、输送螺杆转速、输送螺杆螺距因素的取值范围, 分别为 $25^\circ\sim55^\circ$ 、 $100\sim180\text{ r/min}$ 、 $18\sim38\text{ mm}$ 。根据正交试验结果, 当行进速度为 0.25 m/s 时, 倾斜螺旋杆式排肥装置的最优参数组合为 Y 形排肥管倾角为 40° , 输送螺杆螺距为 36 mm , 输送螺杆转速为 170 r/min 。

2) 与优化前的装置相比, 优化后的倾斜螺旋杆式排肥装置排肥量均值提高了 0.78 g , 排肥均匀性变异系数降低了 9.1 个百分点。

参考文献:

[1] 黄鑫. 水稻机插秧同步侧深施肥研究[J]. 农业开发与装备, 2020(1): 120.

[2] 罗锡文, 王在满, 曾山, 等. 水稻机械化直播技术研究进展[J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(5): 1–13.

[3] 郭晓冬. 水稻侧深施肥机气力系统研究及整机设计[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2020.

[4] 常志强. 水稻机插同步侧深施肥机械化技术试验研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2022.

[5] 周成, 马增奇, 房欣, 等. 机械排肥式水稻侧深施肥装置研制与应用[J]. 现代化农业, 2022(2): 71–72.

[6] 位国建, 祁兵, 焦伟, 等. 水田机械式强制排肥装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊 1): 154–164.

[7] 汪洋, 夏志林, 何家成, 等. 垂直螺旋式定量施肥机的设计与试验[J]. 农机化研究, 2018, 40(5): 88–92.

[8] 胡鹤鸣, 张洪铎, 黄晶晶, 等. 电控螺旋杆输送式水稻侧深施肥机对比试验[J]. 时代农机, 2019, 46(1): 1–2.

- [5] BASHIR A, WANG L Y, DENG S Y, et al. Phosphorus release during alkaline treatment of waste activated sludge from wastewater treatment plants with Al salt enhanced phosphorus removal: speciation and mechanism clarification[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 688: 87–93.
- [6] 杨世梅, 何腾兵, 杨丽, 等. 秸秆与生物炭覆盖对土壤养分及温室气体排放的影响[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2022, 48(1): 75–81.
- [7] 何海东, 刘亚利. 剩余污泥中磷的释放和回收技术的研究进展[J]. *化工技术与开发*, 2021, 50(6): 59–63.
- [8] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京: 中国环境出版社, 2002.
- [9] WANG D B, ZENG G M, CHEN Y G, et al. Effect of polyhydroxyalkanoates on dark fermentative hydrogen production from waste activated sludge[J]. *Water Research*, 2015, 73: 311–322.
- [10] 孟详东. 基于低温热转化的污泥中磷的迁移转化及回收利用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- [11] 温岚, 朱作华, 陈伟男, 等. 酸水解联合生物转化对剑麻皂素提取效率的影响[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2024, 50(4): 111–118.
- [12] 唐玉朝, 陈徐庆, 伍昌年, 等. pH 值对旋流球磨破解污泥释放有机质影响的研究[J]. *环境科学与技术*, 2023, 46(1): 101–108.
- [13] 朱赵冉. 低速搅拌球磨法及酸碱耦合破解剩余污泥研究[D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2021.
- [14] 唐心漪, 陈翔宇, 肖本益, 等. 剩余污泥热碱处理及其对污泥厌氧消化的强化研究进展[J]. *环境工程*, 2022, 40(5): 218–226.
- [15] KOR-BICAKCI G, ESKICIOGLU C. Recent developments on thermal municipal sludge pretreatment technologies for enhanced anaerobic digestion[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 110: 423–443.
- [16] 孙远军. 水体沉积物磷元素释放的影响因素及控制技术[J]. *给水排水*, 2013, 49(增刊): 138–142.
- [17] 苑宏英, 祁丽, 吴丽杰, 等. 酸碱联合调节剩余污泥过程中磷的释放及形态转化[J]. *中国给水排水*, 2014, 30(3): 69–72.
- 责任编辑: 邹慧玲
英文编辑: 柳 正

(上接第 114 页)

- [9] 浙江省农业农村厅. 2020 年度浙江省水稻侧深施肥装置质量调查结果分析[J]. *农机质量与监督*, 2021(2): 24–25.
- [10] 梅潇, 王伟, 刘海洋, 等. 大倾角螺旋输送机中物料颗粒的运动特性研究[J]. *机械设计与制造*, 2018(9 期增刊): 14–17.
- [11] 徐余伟. 螺旋输送机设计参数的选择和确定[J]. *面粉通讯*, 2008, 22(5): 21–24.
- [12] 药林桃, 曹晓林, 宋思明, 等. 水稻插秧同步精量施肥机的设计[J]. *农机化研究*, 2020, 42(10): 75–80.
- [13] 郑欣欣. 倾斜式螺旋输送机输送性能及螺旋体有限元仿真研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2020.
- [14] 向冬枝, 徐余伟. 螺旋输送机设计参数的选择和确定[J]. *水泥技术*, 2010(1): 29–33.
- [15] NY/T 1003—2006 施肥机械质量评价技术规范[S].
- [16] 周韦. 基于散粒体动力学的水田侧深施肥装置的分析方法和试验[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015.
- [17] 田立权, 王金武, 唐汉, 等. 螺旋槽式水稻穴直播排种器设计与性能试验[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(5): 46–52.
- [18] 庞超明, 黄弘. 试验方案优化设计与数据分析[M]. 南京: 东南大学出版社, 2018.
- 责任编辑: 邹慧玲
英文编辑: 柳 正