

# 粉状有机物料同步覆盖水稻直播机设计与试验

刘地斌 陈雄飞 方鹏 余佳佳\* 肖丽萍 刘木华 曾博涵 陈晨晨

(江西农业大学 工学院/现代农业装备江西省重点实验室, 南昌 330045; \*通信作者, email: aiyejingling@163.com)

## Design and Experiment of a Direct Seeding Machine with Synchronous Mulching of Powdery Organic Materials

LIU Dibin, CHEN Xiongfei, FANG Peng, YU Jiajia\*, XIAO Liping, LIU Muhua, ZENG Bohan, CHEN Chenchen

(College of Engineering, Jiangxi Agricultural University/Jiangxi Provincial Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment, Nanchang 330045, China;

\*Corresponding author, email: aiyejingling@163.com)

**Abstract:** 【Objective】 To address the issues of poor seedling establishment and uneven population growth in direct-seeded rice in southern China, caused by rice seeds are sown on the soil surface after mechanized direct seeding and are subsequently affected by climatic and ecological conditions. 【Methods】 Based on the principle of simultaneous coverage of rice seeds with powdered organic materials, theoretical analysis of a cam-plate metering and application device was conducted. The key parameters of the cam, discharge rotor, material push plate, and discharge apparatus were determined, and a powdered organic material discharge apparatus was designed. Bench tests were carried out. A prototype rice direct seeder with simultaneous powdered organic material coverage was fabricated, and its field performance was validated through field experiments. 【Results】 The results showed that for the powdered organic materials [organic fertilizer, seedling nursery substrate, nutrient soil A, and nutrient soil B (a 2:1 mixture of nutrient soil A and organic fertilizer)], the coefficient of variation for application rate was below 7.80% at rotational speeds of 33–118 r/min, indicating good application stability. Due to the characteristics of the materials, the coverage thickness gradually decreased with increasing rotational speed, but remained stable. When applying the seedling nursery substrate, the coefficient of variation for coverage thickness fluctuated within a relatively large range of 9.41%–18.67%. When applying organic fertilizer, nutrient soil A, and nutrient soil B, the coefficient of variation for coverage thickness was below 15% in all cases, meeting the agronomic requirements for simultaneous coverage of rice seeds with powdered organic materials. Regression equations for coverage thickness were established, all with fitting degrees exceeding 0.95. Field experiment results showed that for the rice varieties Zhongjiazao 17 and Wufengyou 286, the average emergence rates under the coverage treatment increased by 19.59% and 22.65%, respectively, compared with the non-covered treatment. 【Conclusion】 This apparatus improves the mechanized level of rice cultivation and provide a reference for the design of complete rice direct seeding machines with simultaneous powdered organic material coverage.

**Keywords:** powdery organic material; rice; direct seeding machine; synchronous mulching; discharge apparatus

**摘要:** 【目的】南方水稻机械化直播后稻种播于土壤表面,受气候和生态环境影响,直播水稻全苗难和群体生长均匀性差。【方法】基于粉状有机物料同步覆盖稻种原理,开展凸轮-顶板排施装置理论分析,确定了凸轮、排施转轮、物料推板和排施装置关键部件参数,设计了一种粉状有机物料排施装置,并开展了台架试验,试制加工了一台粉状有机物料同步覆盖水稻直播机,并通过田间试验验证了工作性能。【结果】对于粉状有机物料[有机肥、育秧基质、营养土 A、营养土 B(营养土 A 和有机肥 2:1 混合)]而言,排施装置在转速 33~118 r/min 条件下,排量变异系数均低于 7.80%,排量稳定性良好;受物料特性影响,随着转速增大,覆盖厚度会逐渐减小,但覆盖厚度稳定;排施育秧基质时,覆盖厚度变异系数波动范围较大,为 9.41%~18.67%;排施有机肥、营养土 A 和营养土 B 时,覆盖厚度变异系数均小于 15%,均符合粉状有机物料同步覆盖稻种的农艺要求;构建了覆盖厚度回归方程,拟合度均高于 0.95。田间试验结果表明,对于中嘉早 17 与五丰优 286 而言,覆盖处理较不覆盖处理平均出苗率分别提高了 19.59%和 22.65%。【结论】该装置可提高水稻机械化种植水平,为粉状有机物料同步覆盖水稻机械直播整机设计提供参考。

**关键词:** 粉状有机物料; 水稻; 直播机; 同步覆盖; 排施装置

收稿日期: 2025-06-03; 修改稿收到日期: 2025-07-09。

基金项目: 江西省主要学科科学技术带头人培养计划青年人才项目(20225BCJ23013); 现代农业装备江西省重点实验室开放基金资助项目(20242BCC32127); 江西省水稻产业技术体系资助项目(JXARS-21)。

我国水稻机械化种植方式有机械插秧、机械抛秧和机械直播等<sup>[1]</sup>，机械直播因省去了育秧、运秧和移栽等作业环节<sup>[2]</sup>，成为了广大水稻种植户所选择的轻简化种植方式<sup>[3-9]</sup>，而我国南方普遍采用水稻湿润直播，稻种播种在田间土壤表面，易受气候和生态环境影响，导致水稻全苗难，群体生长均匀性差<sup>[10-12]</sup>。研究表明，适当覆盖直播稻种有利于提高出苗率和秧苗素质<sup>[13]</sup>。国内外研究表明，采用机械直播同步覆土技术可有效缓解上述难题<sup>[14]</sup>。曾山等<sup>[15]</sup>采用同步开沟施肥水稻精量旱穴直播技术，可一次完成平整开沟、深施肥、精量穴播、覆土镇压作业；林静等<sup>[16]</sup>设计了一种与秸秆深埋还田机配套的螺旋覆土装置，实现玉米秸秆深埋还田；余佳佳等<sup>[17-18]</sup>研制了与水稻精量穴直播机配套的悬摆式覆土装置，实现机械直播同步覆土 5~10 mm；卢琦等<sup>[19]</sup>研制了星齿球面盘式覆土装置。由于土壤含水率影响覆土质量，南方水田泥脚深浅不一，且表层土壤流变复杂，导致机械覆土质量稳定性不足，难以保证同步覆土厚度均匀性<sup>[20]</sup>，而采用外源性材料覆盖稻种也可实现水稻机械直播同步覆盖<sup>[21]</sup>，有机物料不仅有利于保证稻种稳定出苗生长，还能增加土壤有机质，改善土壤生态化学性质和紧实度<sup>[22-24]</sup>，替代部分化肥，有利于增加作物产量<sup>[25-29]</sup>。

基于凸轮-顶板排施技术，设计了一种适用于排施粉状有机物料的排施装置，可实现一器双行排施，通过理论分析确定了凸轮、排施转轮、物料推板和风管壳体的关键参数，并开展了粉状有机物料[有机肥、育秧基质、营养土 A、营养土 B(营养土 A 和有机肥 2:1 混合)]同步覆盖台架试验，配套研制

了一台粉状有机物料同步覆盖水稻直播机，并通过田间试验验证了该机具的工作性能，以为水稻机械化播种技术与装备研究提供参考。

## 1 材料与方法

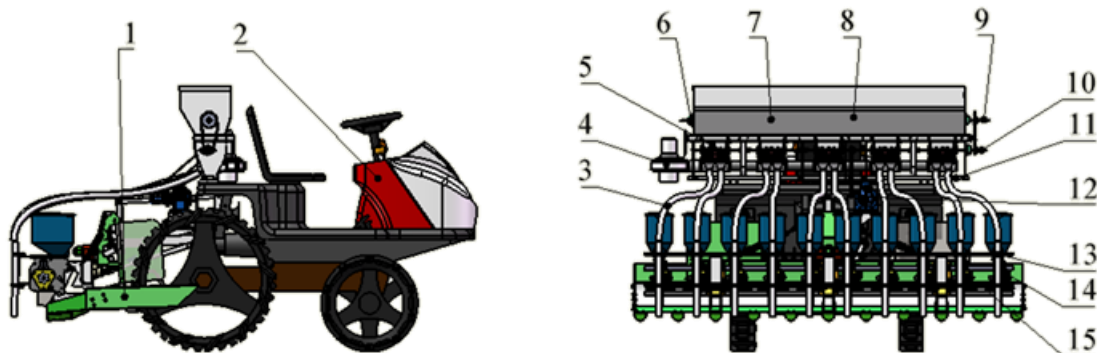
### 1.1 粉状有机物料同步覆盖水稻直播机

粉状有机物料同步覆盖水稻直播机由乘坐式插秧机动力底盘、排施装置安装架、一器双行粉状有机物料排施装置(下文简称排施装置)、料箱、搅拌装置、风机、开沟起垄底板、导料管、水稻穴直播排种器、传动系统等组成(图 1)。排施装置固定在排施装置安装架上，并置于乘坐式插秧机动力底盘后端，风机与排施装置通过风管连接，搅拌装置置于排施装置入料口上方，水稻穴直播排种器安装在开沟起垄底板上，导料管与排施装置连通并固定在开沟起垄底板尾端。

作业前，调试排施装置和水稻穴直播排种器，当机具作业时，料箱内搅拌装置将有机物料破拱并通过排施装置排至风管壳体中，借助风机气力辅助输送至导料管末端，而水稻穴直播排种器在种沟内播种后，导料管将有机物料同步覆盖稻种，以保证直播覆盖全苗。

### 1.2 一器双行粉状有机物料排施装置

为满足水稻机械直播后同步覆盖稻种的农艺要求，基于凸轮-顶板排施原理<sup>[30-31]</sup>，研制了一种一器双行粉状有机物料排施装置。该装置包括上壳体、下壳体、排施转轮、物料推板、中间轴、凸轮、毛刷、风管壳体、卸料板、清料刮板等部件(图 2)。

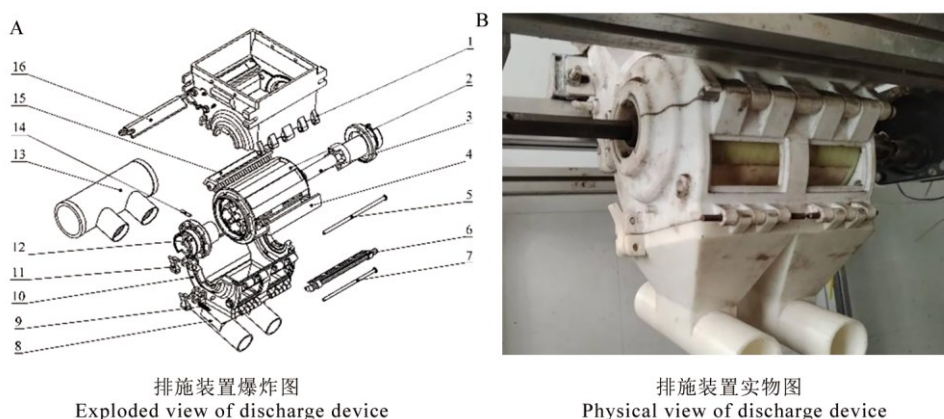


1: 开沟起垄底板; 2: 乘坐式插秧机动力底盘; 3: 导料管; 4: 风机; 5: 一器双行粉状有机物料排施装置; 6: 轴承; 7: 搅拌刀轴; 8: 凸型板; 9: 搅拌轴; 10: 排施装置转轴; 11: 排施装置安装架; 12: 传动系统; 13: U型管卡; 14: 水稻穴直播排种器; 15: 导料管固定架。

1, Furrow opening and ridging bottom plate; 2, Riding rice transplanter power chassis; 3, Guide tube; 4, Fan; 5, One-device dual-row powdered organic material application device; 6, Bearing; 7, Stirring blade shaft; 8, Convex plate; 9, Stirring shaft; 10, Application device rotating shaft; 11, Application device mounting frame; 12, Transmission system; 13, U-shaped pipe clamp; 14, Rice hill-direct seeding device; 15, Guide tube fixing frame.

图 1 粉状有机物料同步覆盖水稻直播机

Fig. 1. Rice direct seeding machine with synchronous mulching of powdery organic materials



排施装置爆炸图  
Exploded view of discharge device

排施装置实物图  
Physical view of discharge device

1: 上壳体; 2: 排施转轮; 3: 中间轴; 4: 物料推板; 5: 插销; 6: 清料刮板; 7: 风管壳体插销; 8: 风管壳体; 9: 弹簧; 10: 下壳体; 11: 锁扣; 12: 凸轮; 13: 风管; 14: 锁扣销; 15: 毛刷; 16: 卸料板。

1, Upper housing; 2, Discharge rotor; 3, Intermediate shaft; 4, Material pusher plate; 5, Pin; 6, Cleaning scraper; 7, Air duct housing pin; 8, Air duct housing; 9, Spring; 10, Lower housing; 11, Latch; 12, Cam; 13, Air duct; 14, Latch pin; 15, Brush; 16, Discharge plate.

图2 一器双行粉状有机物料排施装置结构

Fig. 2. Structure of a double-row powdery organic material apparatus

排施转轮通过螺栓连接在中间轴上, 物料推板安装在排施转轮的凹槽内, 凸轮安装在排施转轮两侧, 毛刷贴合排施转轮并安装在上壳体后侧, 清料刮板安装在下壳体内, 通过清料刮板转轴和拉力弹簧的作用贴合在排施转轮上, 风管前端与风管壳体连接, 左侧与风机连接。

料箱内粉状有机物料充满上壳体及排施转轮凹槽, 当排施装置工作时, 物料推板随凸轮轨迹往复运动, 毛刷将排施转轮凹槽外多余物料刷走, 保证充料均匀; 随着排施转轮凹槽转动至下壳体时, 物料推板将强制推出全部有机物料, 清料刮板刮去残留有机物料, 并落入风管壳体, 借助风机气流辅助将有机物料输送至导料管内, 实现对稻种同步覆盖。

### 1.3 关键部件设计

#### 1.3.1 凸轮

凸轮是排施装置的核心部件, 当物料推板的圆柱滚子沿着凸轮凹槽运动时, 物料推板沿着排施转轮凹槽径向做往复运动, 不断充料和排施, 因此, 凸轮近休止角应设置在上壳体入料口, 远休止角设置靠近下壳体底部, 从而使排施转轮恒处于充料和排施状态。因此, 凸轮结构参数决定了凸轮轨迹曲线, 从而影响排施装置的排施稳定性, 为避免物料推板与凸轮连续运动而产生冲击, 基于前期研究<sup>[30]</sup>, 确定了凸轮内、外轮廓相对于原点的距离, 生成连续封闭的凸轮曲线, 距离  $u=10\text{ mm}$ , 凸轮模型如图3所示。

#### 1.3.2 排施转轮

排施转轮凹槽尺寸和容积是影响排量的重要



图3 凸轮

Fig. 3. Cam

因素。前期研究表明, 粉状有机物料育秧基质、有机肥、营养土 A、营养土 B(营养土 A 和有机肥 2:1 混合)覆盖不同厚度, 直接影响水稻全苗和秧苗素质, 因此, 选择覆盖厚度 5~7 mm 作为设计参数<sup>[13]</sup>。根据直播机种沟横截面形状(如图4), 每亩所需有机物料理论体积为 0.4~0.58 m<sup>3</sup>, 因此, 确定排施转轮直径  $d$  为 113 mm; 计算每亩排量, 确定排施转轮凹槽长度  $l$  为 130 mm, 宽度  $w$  为 25 mm, 深度  $h$  为 9 mm, 分布数量  $z$  为 8 个, 如图5所示。

根据排施转轮结构参数确定单圈排量:

$$Q=\lambda lwhz \quad (1)$$

其中, “ $Q$ ” 为单圈排量, mm<sup>3</sup>; “ $\lambda$ ” 为物料填充系数。

$t$  时间内单个排施装置排量为

$$Q_1 = 2000b\delta vt \quad (2)$$

其中,  $Q_1$  为  $t$  时间内单个排施装置排量, mm<sup>3</sup>;  $b$  为开沟器底部宽, mm;  $\delta$  为粉状有机物料覆盖厚度, mm;  $v$  为机具前进速度, m/s;  $t$  为作业时间, s。

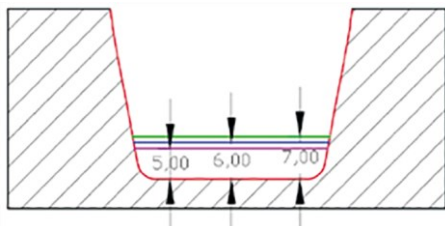


图 4 播种沟横截面

Fig. 4. Gross-section of seed groove

排施装置所需转速为

$$n = \frac{60Q_1}{Q_t} \quad (3)$$

其中,  $n$  为排施装置转速, r/min。

则排施装置转速与覆盖厚度的关系为:

$$n = \frac{120000b\delta v}{\lambda h w h z} \quad (4)$$

### 1.3.3 物料推板

物料推板由弧形推板、方形导柱和圆柱滚子组成, 物料推板表面半径与排施转轮外圆半径一致, 物料推板宽度与排施转轮凹槽宽度一致, 方形导柱宽度与圆柱滚子直径一致, 圆柱滚子设置在方形导柱底部, 滚子直径为 10 mm, 略小于凸轮凹槽宽度, 如图 6 所示。当物料推板的滚子沿着凸轮凹槽运动时, 弧形推板则在排施转轮的径向往复运动, 实现充料和排施。

### 1.3.4 风管壳体

为解决粉状有机物料流动性差和易堆积堵塞的问题, 采用气力辅助输送粉状有机物料排施。如图 7、图 8 所示, 壳体中央分流柱将有机物料分流至两个不同区域内, 此时, 风机气流从 a 端输入, 经落料口 c 后, 由于横截面积突变, 形成文丘里喉管, 风速增大, 使得粉状有机物料落入气力辅助输送管道内, 在持续气流输入作用下, 从 b 端排出。根据气力输送管路流动特性研究<sup>[32]</sup>, 气力辅助输送管道向下倾斜角为 15°, 在固气比一定的情况下, 管道在小角度范围内, 随倾斜角的增加, 倾斜管道中的流动阻力损失随之减小, 小于水平输送管道的阻力, 有利于减小能耗, 增强输送能力。

## 2 台架试验

### 2.1 试验台架

排施装置试验台架由安装架、排施装置、风机、驱动电机、控制系统、料箱组成, 排施装置与伺服电机间采用十字万向节和六方轴相连接传动, 如图 9 所示。试验所用的粉状有机物料包括有机肥(乐山



图 5 排施转轮

Fig. 5. Discharging wheel



图6 物料推板

Fig. 6. Pushing plate



图 7 风管壳体

Fig. 7. Air duct shell

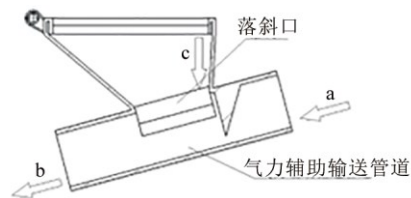
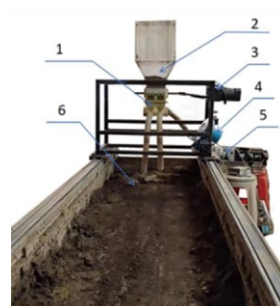


图 8 气力辅助输送气体流向

Fig. 8. Flow diagram of air assisted conveying



1: 排施装置; 2: 料箱; 3: 驱动电机; 4: 风机; 5: 控制系统; 6: 试验土槽。

1, Discharge device; 2, Material hopper; 3, Driving motor; 4, Fan; 5, Control system; 6, Test soil bin.

图9 粉状有机物料排施装置试验台架

Fig. 9. Experimental bench of powdered organic material discharging apparatus

表1 不同覆盖厚度下前进速度与排施装置转速匹配

| Table 1. Rotation speed of the discharging apparatus at different forwarding speeds and mulching depths |                     | r/min |      |  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|-------|------|--|
| 前进速度<br>Forwarding speed(m/s)                                                                           | 覆盖厚度 Mulching depth |       |      |  |
|                                                                                                         | 5 mm                | 6 mm  | 7 mm |  |
| 0.4                                                                                                     | 33                  | 40    | 47   |  |
| 0.6                                                                                                     | 50                  | 60    | 72   |  |
| 0.8                                                                                                     | 67                  | 80    | 95   |  |
| 1.0                                                                                                     | 83                  | 100   | 118  |  |

地源生物科技有限公司, 有机质 $\geq 45\%$ , 含水率 $\leq 30\%$ , 自然休止角为 $47.70^\circ$ )、育秧基质(江西申江农业发展有限公司, 有机质 $\geq 45\%$ , 含水率 $\leq 24\%$ , pH 值 $5.5\sim 6.5$ , 自然休止角为 $38.44^\circ$ )、营养土 A(含有有机营养土、生根粉、多菌灵等, 有机质 $\geq 48\%$ , 含水率 $\leq 30\%$ , 自然休止角为 $44.60^\circ$ )、营养土 B(营养土 A 与有机肥以 $2:1$ 混合, 自然休止角为 $46.27^\circ$ )。试验所用工具为收集袋、天平(精度为 $0.01\text{ kg}$ )、游标卡尺(精度为 $0.01\text{ mm}$ )等。

2.2 试验设计

为明确排施装置的排量稳定性和覆盖厚度稳定性, 以不同粉状有机物料(有机肥、育秧基质、营养土 A、营养土 B)、前进速度( $0.4$ 、 $0.6$ 、 $0.8$ 、 $1.0\text{ m/s}$ )、排施装置转速为自变量, 以排量和覆盖厚度为因变量开展全因素试验。覆盖厚度与前进速度、排施装置转速有关, 机具的前进速度越快, 排施装置转速越快。计算前进速度与排施装置转速的匹配关系如表 1 所示。

2.3 测定指标

(1) 排量稳定性: 根据前进速度和排施装置转速, 收集排施装置稳定排施 $2\text{ min}$ 后的排量, 并称重统计, 重复 3 次。参考行业标准 NY/T 1003—2006《施肥机械质量评价技术规范》<sup>[33]</sup>, 计算排量的标准差和变异系数。

$$x = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$
(5)

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x)^2}{n - 1}}$$
(6)

$$V = \frac{S}{x} \times 100$$
(7)

式中,  $x_i$ 为每次总排量,  $\text{kg}$ ;  $x$ 为每次总排量的平均值,  $\text{kg}$ ;  $S$ 为总排量的标准差,  $\text{kg}$ ;  $V$ 为总排量的变异系数, %;  $n$ 为测定次数。

(2) 覆盖厚度稳定性: 采用动态试验, 排施装置前进一段距离后, 选取前进方向 $1\text{ m}$ 内, 每隔 $10\text{ cm}$ 在种沟横截面方向上选取 5 个测试点, 使用游标卡尺测定覆盖厚度, 并计算其变异系数。

3 结果与分析

3.1 排施装置排量稳定性

根据试验结果, 得出排施装置在不同转速下排施有机物料的排量及其变异系数, 如图 10 所示。结果表明, 随着排施装置转速增大, 排量也随之线性

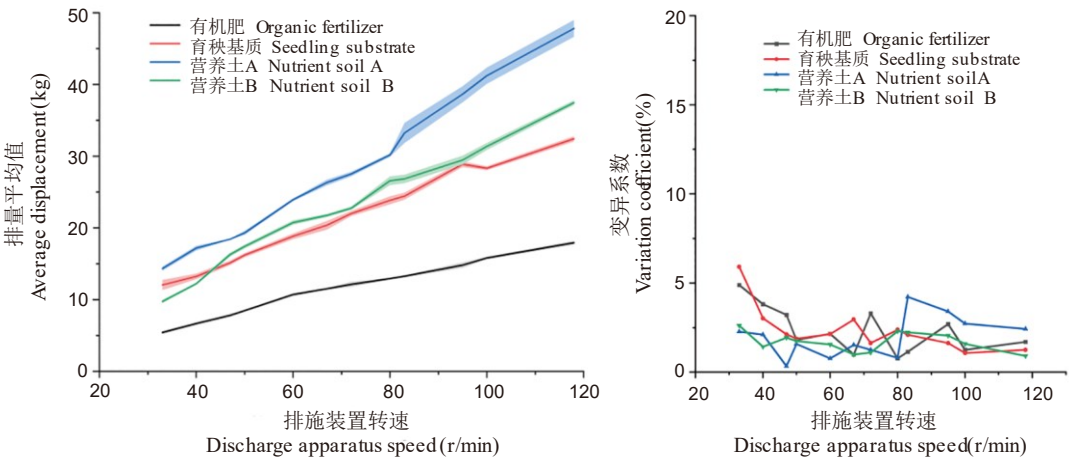


图10 排施装置排量平均值、标准差及变异系数与排施装置转速关系  
Fig. 10. Mean, standard deviation and coefficient of variation of the displacement of the discharging apparatus in relation to the rotational speed

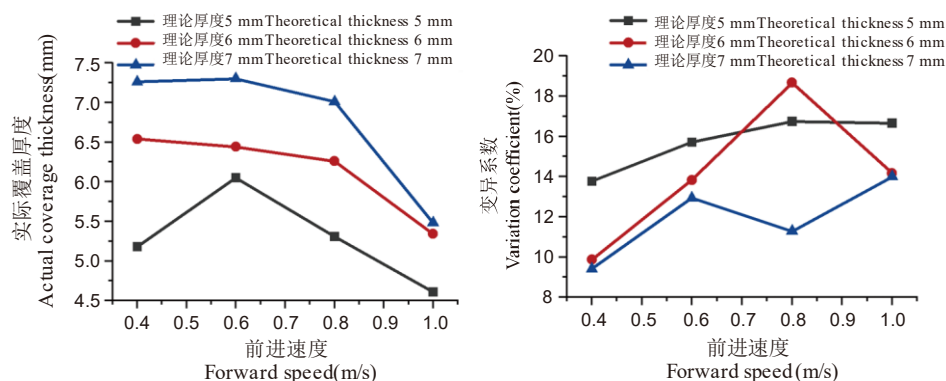


图11 不同工作参数下育秧基质的实际覆盖厚度及变异系数

Fig. 11. Actual mulching depth of seedling substrate and coefficient of variation under different parameters

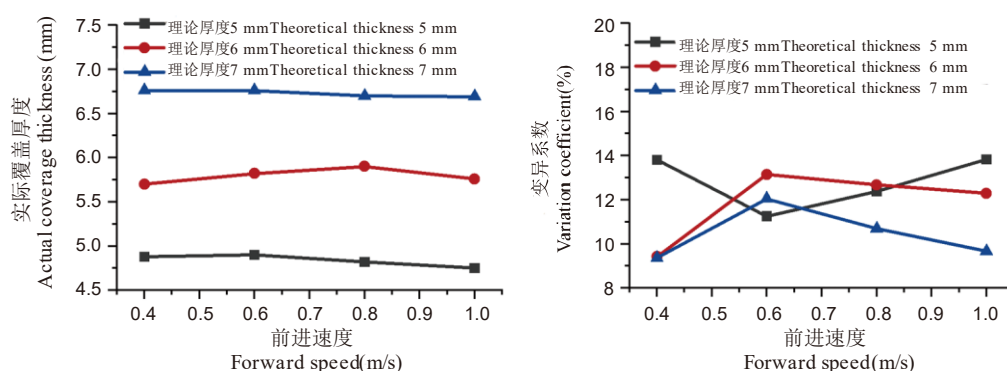


图12 不同工作参数下有机肥的实际覆盖厚度及变异系数

Fig. 12. Actual mulching depth and coefficient of variation of organic fertilizer under different parameters

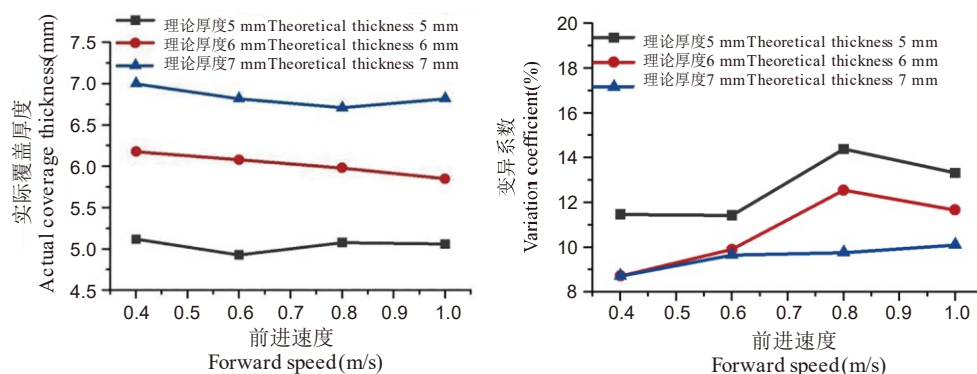


图13 不同工作参数下营养土A的实际覆盖厚度及变异系数情况

Fig. 13. Actual mulching depth and coefficient of variation of nutrient soil A under different parameters

增加, 相关系数均达到 0.98 以上; 且不同排施转速下, 排量变异系数范围为 0.34%~5.91%, 其中排施营养土 A 的排量变异系数波动范围最小, 波动范围最大的是育秧基质, 但其排量变异系数均低于 7.80%, 表明该排施装置排施粉状有机物料排量稳定。

### 3.2 排施装置覆盖厚度稳定性

为明确排施装置覆盖厚度稳定性, 开展台架试验, 获取覆盖厚度及其变异系数, 如图 11~14 所示。结果表明, 受到粉状有机物料特性影响, 随着排施

转速增大, 覆盖厚度逐渐减小, 但覆盖厚度稳定; 排施育秧基质时, 覆盖厚度变异系数波动范围较大, 为 9.41%~18.67%, 且当前进速度增大到 1.0 m/s 时, 其覆盖厚度减小 0.39~1.52 mm; 排施有机肥、营养土 A 和营养土 B 时, 变异系数均小于 15%, 符合粉状有机物料同步覆盖稻种的农艺要求。

### 3.3 覆盖厚度影响因素回归分析

为预测及评价覆盖厚度与机具前进速度和排施装置转速的关系, 使用 Matlab 软件进行多项式拟

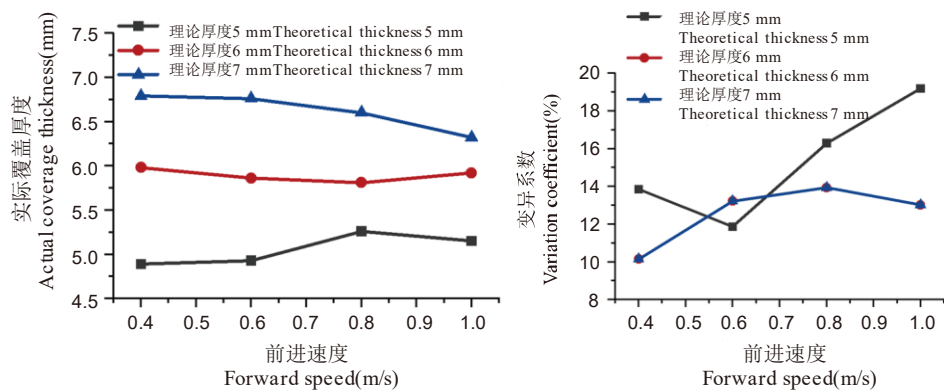


图14 不同工作参数下营养土B的实际覆盖厚度及变异系数  
Fig. 14. Actual mulching depth and coefficient of variation of nutrient soil B under different parameters

合, 得到育秧基质、有机肥、营养土 A 和营养土 B 覆盖厚度拟合方程(式 8~11), 其覆盖厚度方程的拟合度分别为 0.953、0.986、0.973 和 0.974, 获得其曲面图如图 15 所示。

$$Y_1 = -1.3598x_1^2 - 0.00087978x_2^2 + 0.025888x_1x_2 - 8.6708x_1 + 0.17542x_2 + 4.0197 \quad (8)$$

$$Y_2 = 4.9993x_1^2 - 0.00050882x_2^2 - 6.7719e^{-5}x_1x_2 - 15.2709x_1 + 0.15452x_2 + 5.7404 \quad (9)$$

$$Y_3 = 8.5764x_1^2 - 0.00042129x_2^2 - 0.028416x_1x_2 - 18.1892x_1 + 0.15864x_2 + 6.7959 \quad (10)$$

$$Y_4 = 9.4949x_1^2 - 0.00053282x_2^2 - 0.039195x_1x_2 - 17.8343x_1 + 0.17515x_2 + 5.9825 \quad (11)$$

上式中的 $x_1$ 表示前进速度(m/s);  $x_2$ 表示排施装置转速, r/min;  $Y_1$ 表示育秧基质覆盖厚度, mm;  $Y_2$ 表示有机肥覆盖厚度, mm;  $Y_3$ 表示营养土 A 覆盖厚度, mm;  $Y_4$ 表示营养土 B 覆盖厚度, mm。

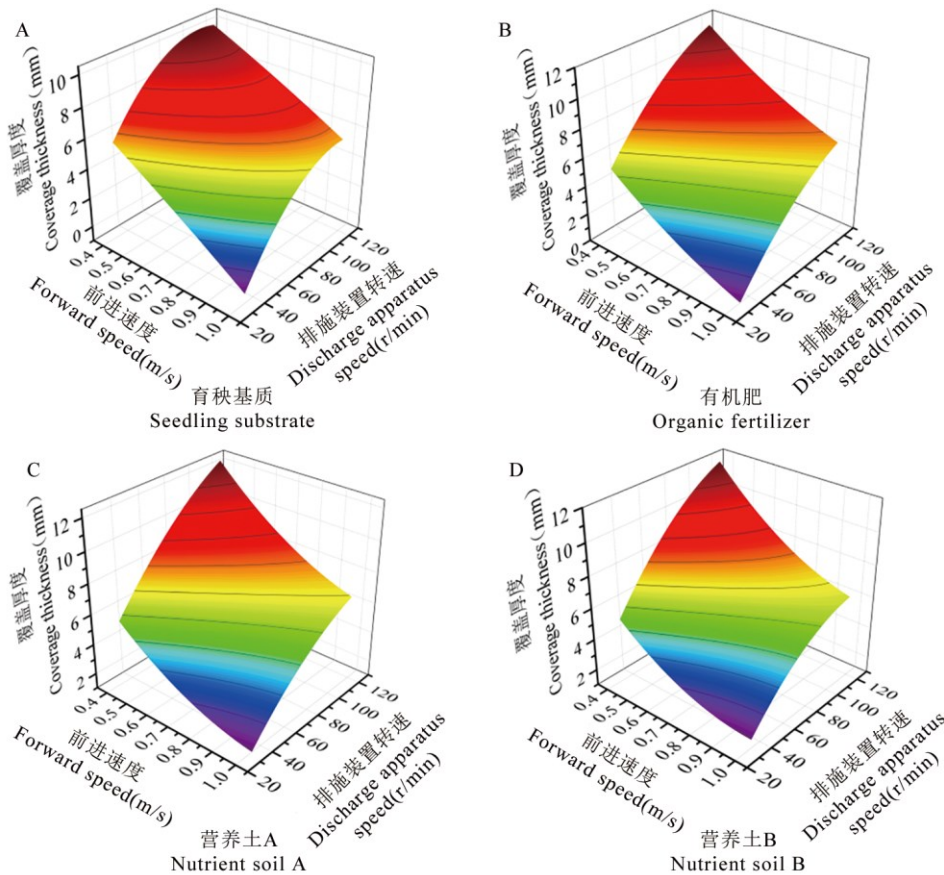


图15 不同机具前进速度及不同排施装置转速条件下的粉状有机物料覆盖厚度  
Fig. 15. Thickness of powdered organic materials covered at different seeder forward speeds and discharge apparatus speeds



图16 田间作业现场与示范效果

Fig. 16. Effects of field operation and demonstration

表2 整机田间覆盖厚度与整机育秧基质覆盖出苗率

Table 2. Field mulching depth and seedling emergence rate with discharging seedling substrate

| 采样点序号<br>Sampling point | 平均覆盖厚度<br>Mulching depth(mm) | 出苗率Seedling emergence rate(%) |            |                      |            |
|-------------------------|------------------------------|-------------------------------|------------|----------------------|------------|
|                         |                              | 中嘉早17 Zhongjiazao 17          |            | 五丰优286 Wufengyou 286 |            |
|                         |                              | 对照CK                          | 覆盖Mulching | 对照CK                 | 覆盖Mulching |
| 1                       | 5.10                         | 63.27                         | 83.67      | 68.37                | 89.80      |
| 2                       | 5.05                         | 59.18                         | 80.61      | 65.31                | 93.88      |
| 3                       | 4.99                         | 67.35                         | 85.71      | 67.35                | 92.86      |
| 4                       | 4.84                         | 56.12                         | 85.71      | 75.51                | 88.78      |
| 5                       | 4.81                         | 73.47                         | 81.63      | 63.27                | 87.76      |
| 均值 Mean                 |                              | 63.88                         | 83.47      | 67.96                | 90.61      |

#### 4 田间试验

为探明粉状有机物料同步覆盖水稻直播机田间工作性能，于2024年3月28日在江西农业大学农业科技园进行了田间试验(图16)。试验以覆盖粉状有机物料处理作为试验组，不覆盖处理作为对照组，采用育秧基质作为覆盖材料，选取常规水稻品种中嘉早17(千粒重26.0 g)和杂交水稻品种五丰优286(千粒重24.2 g)作为供试品种。试验田块于试验前采用旋耕机带水旋耕起浆平整后，放水沉淀2 d后再进行田间试验；水稻种子清选后浸泡24 h，催芽至破胸露白，晾干表面水分后播种；播种量均参考南昌市当地习惯播种量，播种密度均为25 cm×14 cm。试验工具为皮尺、钢尺、平铲刀、转速测量仪等。测试指标为整机田间覆盖厚度、断条率及出苗率。

断条率是指排施装置条施粉状有机物料一定长度内，总断条长度占总测试长度的百分比，排施装置作业过程中，以有机物料超过10 cm长度的无覆盖段计为断条<sup>[33]</sup>。断条率计算公式为

$$\delta_d = \frac{\sum_{i=1}^k L_i}{L} \times 100\% \quad (12)$$

式中， $\delta_d$  为断条率，%； $L_i$  为第*i*个断条长度，cm； $L$  为有机物料总测试长度，cm。

试验步骤：(1) 试验前，调节排种器播量；以前进速度0.4 m/s、排施装置转速33 r/min作为田间作业参数，作业前使用转速测定仪测量乘坐式插秧机动力底盘传动轴和排施装置的转速，并调节乘坐式插秧机动力底盘传动轴转速为160 r/min时，排施装置转速为33 r/min。控制油门手柄使机具前进速度固定为0.4 m/s，并开展田间试验。(2) 试验结束后，选取5块1 m×1 m的采样点，并随机测试20个种沟横截面，使用钢尺在种沟横截面选取3个点位测量覆盖厚度，并统计平均值。

试验结果如表2所示，排施育秧基质的平均覆盖厚度为4.81~5.10 mm，覆盖厚度变异系数为19.20%，试验中未出现断条现象；于试验15 d后统计水稻出苗数量和计算出苗率，就中嘉早17与五丰优286而言，覆盖处理较不覆盖处理平均出苗率分别提高了19.59%和22.65%，与前期研究结论保持一致<sup>[13]</sup>。

#### 5 结论

(1) 基于凸轮-顶板排施原理，设计了一种一

器双行粉状有机物料排施装置,开展了凸轮、排施转轮、物料推板和风管壳体理论分析,获取了其关键参数,并试制加工了一台粉状有机物料同步覆盖水稻直播机。

(2) 以粉状有机物料和排施装置转速为自变量,以排量稳定性、覆盖厚度及其稳定性作为评价指标,开展了台架试验。结果表明,该排施装置在 33~118 r/min 转速下,排量变异系数均低于 7.80%;受物料特性影响,随着转速增大,覆盖厚度逐渐减小,但覆盖厚度稳定,排施育秧基质时,覆盖厚度变异系数波动范围为 9.41%~18.67%,排施有机肥、营养土 A 和营养土 B 时,覆盖厚度变异系数均小于 15%,符合粉状有机物料同步覆盖水稻的农艺要求。

(3) 建立了覆盖厚度与机具前进速度和排施装置转速的回归方程,方程拟合度高,可通过回归方程预测不同粉状有机物料的覆盖厚度。

(4) 田间试验表明,就常规稻中嘉早 17 与杂交稻五丰优 286 而言,覆盖育秧基质处理较不覆盖处理,平均出苗率分别提高了 19.59%和 22.65%,故粉状有机物料同步覆盖水稻直播整机田间工作性能符合农艺种植要求。

#### 参考文献:

- [1] 李泽华, 马旭, 李秀昊, 陈林涛, 李宏伟, 袁志成. 水稻栽植机械化技术研究进展[J]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 1-20.  
Li Z H, Ma X, Li X H, Chen L T, Li H W, Yuan Z C. Research progress of rice transplanting mechanization[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(5): 1-20. (in Chinese with English abstract)
- [2] 罗锡文, 王在满, 曾山, 臧英, 杨文武, 张明华. 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.  
Luo X W, Wang Z M, Zeng S, Zang Y, Yang W W, Zhang M H. Recent advances in mechanized direct seeding technology for rice[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2019, 40(5): 1-13. (in Chinese with English abstract)
- [3] 何汛锋, 李祖军, 田雪飞, 李辰彦, 曾研华, 曾勇军, 吴自明, 李辉婕. 双季直播晚稻品种筛选及抗倒伏能力研究[J]. 西南农业学报, 2020, 33(12): 2745-2754.  
He X F, Li Z J, Tian X F, Li C Y, Zeng Y H, Zeng Y J, Wu Z M, Li H J. Selection and lodging resistance analysis of late rice varieties with double-season direct seeding[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2020, 33(12): 2745-2754. (in Chinese with English abstract)
- [4] Farooq M, Siddique K H M, Rehman H, Aziz T, Lee D J, Wahid A. Rice direct seeding: Experiences, challenges and opportunities[J]. *Soil and Tillage Research*, 2011, 111(2): 87-98.
- [5] 金明, 刘旭升, 逢洪波, 王泽, 赵宗耀, 韩康顺, 李彦利, 贾玉敏. 水稻芽期耐寒性综合评价及耐寒指标筛选[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(7): 25-35.  
Jin M, Liu X S, Pang H B, Wang Z, Zhao Z Y, Han K S, Li Y L, Jia Y M. Comprehensive evaluation of cold tolerance and selection of cold tolerant evaluation indicators of rice at the germination stage[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2021, 26(7): 25-35. (in Chinese)
- [6] 冯延江, 王麒, 赵宏亮, 宋秋来, 孙羽, 曾宪楠. 我国水稻直播技术研究现状及展望[J]. 中国稻米, 2020, 26(1): 23-27.  
Feng Y J, Wang Q, Zhao H L, Song Q L, Sun Y, Zeng X N. Research status and prospect of the direct seeding technology of rice in China[J]. *China Rice*, 2020, 26(1): 23-27. (in Chinese)
- [7] 沈智达, 马世浩, 黄思远, 张洋洋, 廖世鹏, 李小坤. 种植方式和施肥对水稻根系形态、抗倒伏特性与产量的影响[J]. 中国水稻科学, 2026, 40(2): 253-263.  
Shen Z D, Ma S H, Huang S Y, Zhang Y Y, Liao S P, Li X K. Effects of planting methods and fertilization on root morphology lodging resistance and yield in rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2026, 40(2): 253-263. (in Chinese with English abstract)
- [8] 朱鹏, 凌溪铁, 王金彦, 张保龙, 杨郁文, 许轲, 裘实. 机直播条件下不同控草方式对抗除草剂水稻产量和品质差异性研究[J]. 中国水稻科学, 2025, 39(4): 501-515.  
Zhu P, Ling X T, Wang J Y, Zhang B L, Yang Y W, Xu K, Qiu S. Effects of weed control methods on grain yield and quality of herbicide-resistant rice under direct seeding[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2025, 39(4): 501-515. (in Chinese with English abstract)
- [9] 王文霞, 周燕芝, 曾勇军, 吴自明, 谭雪明, 潘晓华, 石庆华, 曾研华. 不同机直播方式对南方优质晚籼稻产量及抗倒伏特性的影响[J]. 中国水稻科学, 2020, 34(1): 46-56.  
Wang W X, Zhou Y Z, Zeng Y J, Wu Z M, Tan X M, Pan X H, Shi Q H, Zeng Y H. Effects of different mechanical direct seeding patterns on yield and lodging resistance of high-quality late indica rice in South China[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2020, 34(1): 46-56. (in Chinese)
- [10] Pradhan S K, Pandit E, Nayak D K, Behera L, Mohapatra T. Genes, pathways and transcription factors involved in seedling stage chilling stress tolerance in indica rice through RNA-Seq analysis[J]. *BMC Plant Biology*, 2019, 19(1): 352.
- [11] Fahad S, Bajwa A A, Nazir U, Anjum S A, Farooq A, Zohaib A, Sadia S, Nasim W, Adkins S, Saud S, Ihsan M

- Z, Alharby H, Wu C, Wang D, Huang J. Crop production under drought and heat stress: Plant responses and management options[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8: 1147.
- [12] 张坤, 王海媛, 段里成, 章起明, 杨爱萍, 刘文英, 蔡哲, 姚俊萌, 金国花, 郭瑞鸽. 持续低温对水稻芽期出苗状况的影响[J]. *江苏农业科学*, 2018, 46(4): 56-60.  
Zhang K, Wang H Y, Duan L C, Zhang Q M, Yang A P, Liu W Y, Cai Z, Yao J M, Jin G H, Guo R G. Effect of continuous low temperature on emergence of rice at bud stage[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2018, 46(4): 56-60. (in Chinese)
- [13] Zeng B, Yu J, Liu M, Liu J, Yu G, Liu Z, Xiao L, Wang X, Mo Z, Chen X. The effects of different organic materials and cover thicknesses on the early growth and antioxidant response of direct-seeded rice[J]. *Agronomy*, 2024, 14(1): 98.
- [14] 陶中岩. 悬摆式同步覆土水稻直播机的设计与试验[D]. 南昌: 江西农业大学, 2024.  
Tao Z Y. Design and experiment of swing type synchronous mulching for rice direct seeder[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2024. (in Chinese with English abstract)
- [15] 曾山. 水稻精量旱直播机研究与应用[J]. *现代农业装备*, 2019, 40(4): 14-18.  
Zeng S. Research and application of rice precision direct seeding machine for dry land[J]. *Modern Agricultural Equipment*, 2019, 40(4): 14-18. (in Chinese with English abstract)
- [16] 林静, 孟凡成, 高文英. 秸秆深埋还田机覆土装置参数优化与试验[J]. *沈阳农业大学学报*, 2019, 50(6): 694-702.  
Lin J, Meng F C, Gao W Y. Optimum design and experimental study of soil covering device of straw deep-buried returning machine[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2019, 50(6): 694-702. (in Chinese with English abstract)
- [17] 余佳佳, 刘俊安, 舒金贵, 陈其涛, 陈雄飞, 刘木华. 水稻机械直播同步悬摆式覆土装置设计与试验[J]. *江西农业大学学报*, 2020, 42(6): 1250-1259.  
Yu J J, Liu J A, Shu J G, Chen Q T, Chen X F, Liu M H. Design and experiment of synchronous swing-type covering device for mechanical direct seeding of rice[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2020, 42(6): 1250-1259. (in Chinese)
- [18] 陈其涛. 水稻机械直播同步悬摆式覆土装置的设计与试验[D]. 南昌: 江西农业大学, 2019.  
Chen Q T. Design and experiment of synchronous suspended soil covering device for mechanical direct seeding of rice[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2019. (in Chinese with English abstract)
- [19] 卢琦, 刘立晶, 刘忠军, 靳文停. 播种机星齿球面盘式覆土装置设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2024, 55(4): 23-31+73.  
Lu Q, Liu L J, Liu Z J, Jin W T. Design and testing of star-toothed spherical disk mulching device for seeders[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2024, 55(4): 23-31+73.
- [20] 余佳佳, 刘俊安, 朱保雨, 陈雄飞, 刘木华, 石庆华, 陈其涛. 覆土厚度对直播早稻全苗的影响[J]. *江西农业大学学报*, 2020, 42(3): 419-428.  
Yu J J, Liu J A, Zhu B Y, Chen X F, Liu M H, Shi Q H, Chen Q T. Effect of covering soil thickness on the full stand of direct seeding early rice[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2020, 42(3): 419-428. (in Chinese with English abstract)
- [21] 胡敦科, 刘木华, 陈雄飞, 余佳佳, 刘俊安, 刘兆朋. 水稻机械直播同步覆土技术装备研究现状及发展趋势[J]. *南方农机*, 2021, 52(13): 6.  
Hu D K, Liu M H, Chen X F, Yu J J, Liu J A, Liu Z P. Research status and development trend of synchronous soil covering technology and equipment for mechanical direct seeding of rice[J]. *China Southern Agricultural Machinery*, 2021, 52(13): 6. (in Chinese)
- [22] 赖秋利, 尹鹏瑞, 罗莉, 莫秋慧, 黄凌娜, 彭立宇, 蔡一霞. 有机肥配施不同用量化肥对桂北水稻产量和土壤特性的影响[J/OL]. *中国农业科技导报*, 2026, 28(3): 193-205.  
Lai Q L, Yin P R, Luo L, Mo Q H, Huang L N, Peng L Y, Cai Y X. Effects of organic fertilizer combined with different amounts of chemical fertilizer on rice yield and soil characteristic in Northern Guangxi[J/OL]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2026, 28(3): 193-205.
- [23] 陈子生, 张明聪, 钟行杰, 张玉先. 玉豆轮作体系下减肥配施有机肥对大豆干物质积累及产量品质的影响[J]. *大豆科学*, 2025, 44(2): 64-73.  
Chen Z S, Zhang M C, Zhong X J, Zhang Y X. Effects of weight loss with organic fertilizer on dry matter accumulation and yield quality of soybean under the corn-soybean rotation system[J]. *Soybean Science*, 2025, 44(2): 64-73. (in Chinese with English abstract)
- [24] 杜明慧, 李伯欣, 余英德, 陶琳, 范世献, 余敏男, 于晓雯, 邹淑君, 黄德银. 保护性耕作对南方双季稻田土壤性质及产量的影响[J]. *生态环境学报*, 2025, 34(4): 521-533.  
Du M H, Li B X, Yu Y D, Tao L, Fan S X, Yu M N, Yu X W, Zou S J, Huang D Y. Effects of soil properties and yield of double-cropping rice in Southern China under conservation tillage mode[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2025, 34(4): 521-533. (in Chinese with English abstract)
- [25] 林光号, 党洪阳, 周江明, 毛倩, 郑建斌. 有机肥替代化肥对水稻产量、土壤肥力和经济效益的影响[J]. *江*

- 西农业学报, 2023, 35(11): 63-71.
- Lin G H, Dang H Y, Zhou J M, Mao Q, Zheng J B. Effects of organic fertilizer replacing chemical fertilizer on rice yield, soil fertility and economic benefit[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2023, 35(11): 63-71. (in Chinese with English abstract)
- [26] 李明瑞, 王小利, 段建军, 郑钦文, 赵娜, 魏洁. 有机肥替代化肥对土壤养分、酶活性及水稻产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(13): 230-235.
- Li M R, Wang X L, Duan J J, Zheng Q W, Zhao N, Wei J. Effects of organic fertilizer instead of chemical fertilizer on soil nutrients, enzyme activities and rice yield[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2024, 52(13): 230-235. (in Chinese with English abstract)
- [27] 朱银浩, 尹娟, 马正虎, 杨莹攀. 有机肥代替氮肥对中国主要粮食产量的影响[J]. 环境科学, 2025, 46(1): 478-488.
- Zhu Y H, Yin J, Ma Z H, Yang Y P. Effect of organic fertilizer replacing nitrogen fertilizer on major grain yield in China[J]. *Environmental Science*, 2025, 46(1): 478-488. (in Chinese with English abstract)
- [28] 赵娜, 王小利, 何进, 杨胜美, 郑钦文, 李明瑞. 有机肥替代化学氮肥对黄壤活性有机碳组分、酶活性及作物产量的影响[J]. 环境科学, 2024, 45(7): 4196-4205.
- Zhao N, Wang X L, He J, Yang S M, Zheng Q W, Li M R. Effects of replacing chemical nitrogen fertilizer with organic fertilizer on active organic carbon fractions, enzyme activities, and crop yield in yellow soil[J]. *Environmental Science*, 2024, 45(7): 4196-4205. (in Chinese with English abstract)
- [29] 朱文博, 刘鸣达, 肖珣, 何娜, 杨丹, 谢桂先. 化肥配施有机肥对早稻产量及稻田氮素归趋的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2019, 50(6): 728-733.
- Zhu W B, Liu M D, Xiao X, He N, Yang D, Xie G X. Effects of chemical fertilizer combined with organic manure on early rice yield and nitrogen fate in paddy field[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2019, 50(6): 728-733. (in Chinese)
- [30] 卢帆. 凸轮顶板自清式排肥器的设计与试验[D]. 南昌: 江西农业大学, 2020.
- Lu F. Design and experiment of cam top plate self-cleaning fertilizer apparatus[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2020. (in Chinese with English abstract)
- [31] 黎静, 卢帆, 陈雄飞, 刘木华, 刘俊安, 余佳佳, 刘兆明, 石逸泽. 一种双导柱推板排肥轮: CN110583191B[P]. 2024-05-07.
- Li J, Lu F, Chen X F, Liu M H, Liu J A, Yu J J, Liu Z P, Shi Y Z. A double-column push plate fertilizer discharge wheel: CN201910987749.2[P]. 2024-05-07.
- [32] 赵军, 胡寿根, 王晓宁, 郑丹, 王法良. 气力输送管路系统的流动特性与节能研究[J]. 流体机械, 2005, 33(12): 1-4, 56.
- Zhao J, Hu S G, Wang X N, Zheng D, Wang F L. Study on the flow characteristics of gas-solids two-phase flow in pneumatic conveying pipes and saving energy[J]. *Fluid Machinery*, 2005, 33(12): 1-4, 56. (in Chinese)
- [33] 中华人民共和国农业部. 施肥机械质量评价技术规范: NY/T 1003—2006[S]. 北京: 中国农业出版社, 2006.
- Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Technical specification of quality evaluation for fertilizing machinery: NY/T 1003—2006[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2006. (in Chinese)