

基于 CFD – DEM 耦合的大豆玉米复合种植深松气力深施肥装置设计与试验

奚小波¹ 杜恒通¹ 陈治国¹ 史扬杰¹ 张宝峰¹ 于潇泽²

(1. 扬州大学机械工程学院, 扬州 225127; 2. 内蒙古民族大学工学院, 通辽 028000)

摘要: 针对大豆玉米带状复合种植中耕期协同深松与深施肥农艺需求, 本文设计了一种深松气力深施肥装置, 通过深松铲后侧集成风送式排肥系统, 实现松土与肥料深施同步作业。采用计算流体力学与离散元法 (CFD – DEM) 耦合仿真方法优化气肥混合腔结构, 以喉管收缩深度、喉管收缩角度和变径管半锥角为影响因素, 以排肥管出口气流速度与肥料颗粒速度为试验指标, 建立了回归模型。优化后喉管收缩深度 28.08 mm、喉管收缩角度 52.1°、变径管半锥角 22.3°, 模型预测得出肥口气流速度为 16.59 m/s、肥料颗粒速度为 2.69 m/s, 与仿真验证误差小于 1.5%。田间试验结果表明, 设计的深松气力深施肥装置能够实现肥料精准稳定深施, 平均施肥量偏差 4.63%, 各管路排肥一致性好且未发生堵塞, 深松与施肥深度均达到农艺要求, 大豆与玉米行深松深度稳定性系数均高于 96%, 施肥深度稳定性系数均高于 95%。研究结果为大豆玉米复合种植下高效精准深松施肥作业提供有效装备解决方案与理论依据。

关键词: 大豆玉米复合种植; 深松施肥; 气力施肥; CFD – DEM 耦合; 离散元仿真

中图分类号: S224.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2026)10-0077-11

OSID:



Design and Experiment of Subsoiling Pneumatic Deep Fertilization Device for Soybean – Corn Intercropping Based on CFD – DEM Coupling

XI Xiaobo¹ DU Hengtong¹ CHEN Zhiguo¹ SHI Yangjie¹ ZHANG Baofeng¹ YU Xiaoze²

(1. College of Mechanical Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China)

2. College of Engineering, Inner Mongolia Minzu University, Tongliao 028000, China)

Abstract: Aiming at the agronomic demand for synergistic subsoiling and deep fertilization during the intertillage period in soybean – corn strip intercropping, a subsoiling pneumatic deep fertilization device was designed. By integrating a pneumatic fertilizer delivery system behind the subsoiling shovel, simultaneous soil loosening and deep fertilizer application were achieved. The computational fluid dynamics and discrete element method (CFD – DEM) coupling simulation was used to optimize the structure of air-fertilizer mixing chamber. With the throat contraction depth, throat contraction angle, and transition pipe half-cone angle as influencing factors, and the airflow velocity and fertilizer particle velocity at the fertilizer outlet as test indicators, a regression model between the test indicators and influencing factors was established. The optimized parameters were as follows: throat contraction depth of 28.08 mm, throat contraction angle of 52.1°, and transition pipe half-cone angle of 22.3°. The model predicted an outlet airflow velocity of 16.59 m/s and a fertilizer particle velocity of 2.69 m/s, with a simulation verification error of less than 1.5%. Field test results showed that the designed subsoiling pneumatic deep fertilization device could achieve precise and stable deep fertilizer application, with an average fertilization deviation of 4.63%. The fertilizer discharge consistency among all pipelines was good without clogging. Both subsoiling and fertilization depths met agronomic requirements. The stability coefficients of subsoiling depth for soybean and corn rows were above 96%, and those for fertilization depth were above 95%. The research result can provide an effective equipment solution and theoretical

收稿日期: 2025 – 12 – 08 修回日期: 2025 – 12 – 30

基金项目: 江苏省现代农机装备与技术示范推广项目 (NJ2023 – 22)、内蒙古自治区重点研发和成果转化计划 (国际科技合作) 项目 (2024KJHZ0012) 和扬州大学“高端人才支持计划”项目

作者简介: 奚小波 (1989 –), 男, 副教授, 博士生导师, 主要从事智能农业装备研究, E-mail: xxbxi@yzu.edu.cn

basis for efficient and precise subsoiling and fertilization in soybean – corn intercropping systems.

Key words: soybean – corn intercropping; subsoiling and fertilization; pneumatic fertilization; CFD – DEM coupling; discrete element simulation

0 引言

大豆玉米带状复合种植可减少我国对进口大豆的依赖,有助于解决我国粮食安全问题^[1-2]。在大豆玉米复合种植体系中,中耕期实施的深松、深施肥与除草构成一套协同增效的关键技术体系。深松作业能打破犁底层,构建深厚的耕层结构,增强土壤蓄水保墒能力,为双作物根系深扎创造有利条件^[3-4]。深施肥作业能将肥料施加至根系密集区,可提升肥料利用率^[5]。除草作业能直接消除杂草与作物对光、水、养分的竞争,为群体健康生长提供保障^[6]。三者协同,优化了大豆玉米生长环境,是协调种间竞争、实现“玉米不减产、多收一季豆”高产稳产目标的核心农艺保障^[7-8]。目前大豆和玉米施肥方式主要有手工施肥、自走式机械施肥和无人机飞控施肥,农民主要采用自走式机械施肥技术进行追肥作业,然而通常只将肥料施于土壤表面,无法实现肥料深施,肥料利用率较低^[9-10]。

国内外学者针对深施肥作业技术已开展了诸多研究,多为气力式深施肥技术。齐兴源等^[11]设计了一种稻田气力式变量施肥机,优化了气肥混合接头结构。KIM 等^[12]开发了一种变量气力式颗粒肥撒布机,解决了稻田施肥精度低、均匀性差的问题。林逸等^[13]设计了一种气流加速装置,以气肥分流器混合管倾角、弯径比和导气口倾角作为试验因素,得到气肥分流装置最佳结构参数。徐红梅等^[14]设计了风送式侧深施肥装置,揭示了两级排肥器传动比对排肥质量的影响规律。陈威等^[15]分析了三通管不同结构特征对气流和肥料颗粒运动的影响,优化了管路结构,实现了排肥稳定与肥料低破损率。曾山等^[16]设计了水稻直播机气流式分层施肥装置,结合南方水稻直播施肥农艺要求,优化了进气口气压和分流管道内径。杨庆璐等^[17]设计了一种分层深施肥装置,以适应少耕播种和施肥要求。ZHA 等^[18]设计了一种气力深施肥装置,采用集中气力分配方式,提高了施肥均匀性。

上述研究多为稻田条件下气力施肥,施肥深度相比大豆玉米较浅,且现有大豆玉米复合种植常采用开沟或直接洒落地表的施肥方式,施肥精度和均匀性较差。根据大豆玉米带状复合种植的中耕管理要求,本文设计一种深松气力深施肥装置,利用计算流体力学与离散元法(CFD – DEM)耦合仿真方法优化气肥混合

腔结构及工作参数,以期实现肥料颗粒稳定深施。

1 整机结构及工作原理

设计的深松气力深施肥装置为大豆玉米复合种植深松除草气力施肥机的关键组成,整机结构如图 1 所示,主要由电控箱、肥箱、电控升降器、深松铲、电控风送排肥器、理沟器、除草铲、地轮、机架等组成,用于 4 行大豆、2 行玉米复合种植模式下深松除草施肥作业。整机通过三点悬挂与拖拉机连接牵引作业,设置 4 把深松铲,深松铲后接施肥管,出肥口距深松铲底垂直向上 10 cm,肥料颗粒从肥箱进入独立电控风送排肥器,并在风力作用下强制排出实现深施,整机最大排肥量以大豆、玉米苗期追肥的峰值需求为依据,参照试验地区所用复合肥养分含量确定整机最大排肥量为 160 kg/hm²;中间 2 把深松铲用于玉米深松,深松深度 25 ~ 35 cm 可调,施肥深度 15 ~ 25 cm 可调;两侧 2 把深松铲用于大豆深松,深松深度 20 ~ 25 cm 可调,施肥深度 10 ~ 15 cm 可调,上端连接电控升降器,在机具调头交接行作业时,提升或下降两侧深松铲,同时切断或连通电控风送排肥器,以避免重复深松施肥;大豆玉米行间设置弹性双翼除草铲,实现行间杂草去除;理沟器在作业过程置于排水沟中,以稳固沟壁土壤。整机作业原理如图 2 所示,主要参数见表 1。

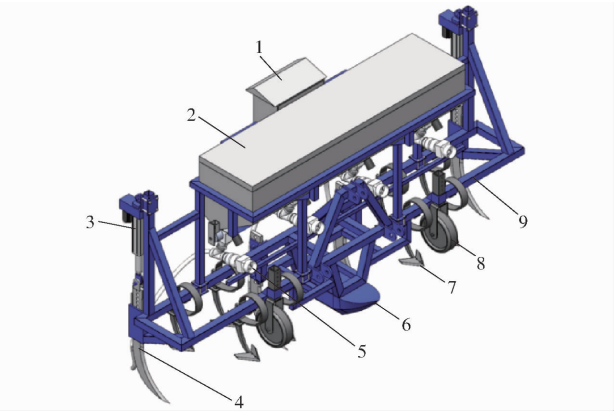


图 1 大豆玉米复合种植深松除草气力施肥机整机结构
Fig.1 Overall structure of subsoiling, weeding, and pneumatic fertilization machine for soybean – corn intercropping
1. 电控箱 2. 肥箱 3. 电控升降器 4. 深松铲 5. 电控风送排肥器 6. 理沟器 7. 除草铲 8. 地轮 9. 机架

2 深松气力深施肥装置设计

深松气力深施肥装置是本机具的关键部件,采

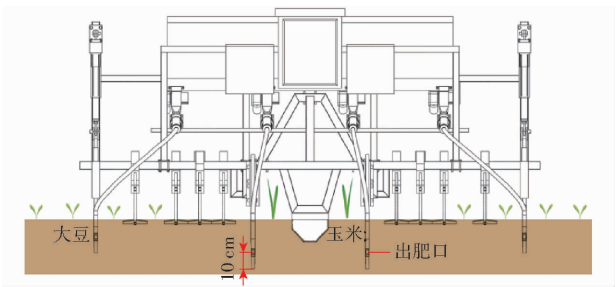


图 2 大豆玉米复合种植下机具作业原理图

Fig.2 Working principle diagram of machine under soybean-corn intercropping

表 1 大豆玉米复合种植深松除草气力施肥机主要性能参数

Tab.1 Main performance parameters of subsoiling, weeding, and pneumatic fertilization machine for soybean-corn intercropping

参数	数值
长×宽×高/(cm×cm×cm)	270×100×160
肥箱容积/L	300
最大排肥量/(kg·hm ⁻²)	160
玉米深松深度/cm	25~35(可调)
玉米施肥深度/cm	15~25(可调)
大豆深松深度/cm	20~25(可调)
大豆施肥深度/cm	10~15(可调)
深松施肥行数	4

用气力式排肥以保证肥料深施不堵塞,主要由风机、排肥器、气肥混合腔、排肥管、深松铲、出肥钢管等组成,如图 3 所示。颗粒肥料从肥箱中经排肥器进入气肥混合腔,并在风机气流作用下流入排肥管,而后再经出肥钢管从深松铲后的出肥口排出,完成深施肥过程。

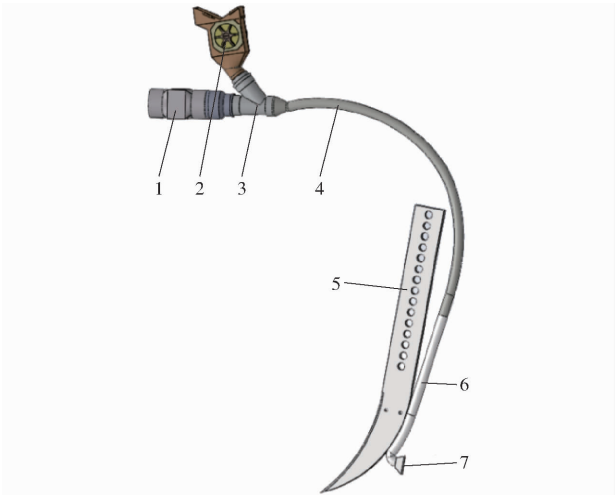


图 3 深松气力深施肥装置结构

Fig.3 Structure of subsoiling pneumatic deep fertilization device

1. 风机 2. 排肥器 3. 气肥混合腔 4. 排肥管 5. 深松铲 6. 出肥钢管 7. 出肥口

对气肥混合腔进行优化,优化参数包括喉管收

缩深度 h 、喉管收缩角度 α 和变径管角度 β ,气肥混合腔简化模型如图 4 所示,其中 d_f 为排肥管内径, d_r 为气肥混合腔内径。根据文丘里效应,气流经过喉管收缩通道时流速增大^[19],带动肥料颗粒加速运动,气固混合物通过三通管道进入变径管,变径管连接排肥管,从而实现排肥。

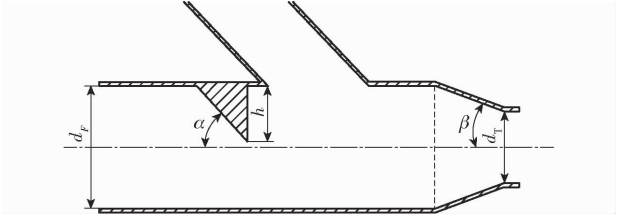


图 4 气肥混合腔简化模型

Fig.4 Simplified model of air-fertilizer mixing chamber

肥料颗粒悬浮速度是确定气流参数的重要指标,气流速度大于肥料颗粒悬浮速度时,肥料颗粒才能运输至出肥口。悬浮速度 v_i 计算式为^[20]

$$v_i = \sqrt{\frac{2mg(\rho_F - \rho_f)}{AC\rho_f\rho_f}} \tag{1}$$

式中 m ——肥料颗粒质量,kg
 g ——重力加速度, m/s^2
 ρ_F ——颗粒密度, kg/m^3
 ρ_f ——气流密度, kg/m^3
 A ——垂直于气流流动方向的颗粒投影面积, m^2
 C ——阻力系数

理论输送气速 v_T 与悬浮速度 v_i 关系为^[21]

$$v_T = kv_i \tag{2}$$

式中 k ——速度系数

试验选取 N、P、K 3 种颗粒肥料,分别对应尿素、磷酸二铵和硫酸钾。阻力系数 C 与物体形状、表面状态和雷诺数等有关,结合肥料颗粒等效半径、密度等参数^[22], C 取 0.44^[23]。速度系数 k 由料气混合浓度比和输送管路复杂程度决定,对于颗粒物料的输送, k 取 2.0^[24]。根据式(1)、(2)及相关参数值,求得 N、P、K 3 种肥料颗粒的理论输送气速为 19.26、24.10、20.92 m/s,为保证系统正常工作,排肥管理论输送气速 v_T 不小于 24.10 m/s。

基于气力输送系统特性,系统内料气混合浓度比越大,系统输送能力越大,需保证系统输送气流量体积流量以维持管道输送动力,否则易引发管道堵塞^[25-28]。系统输送气流量体积流量 Q_F 计算式为^[23]

$$Q_F = \frac{G_F}{\mu\rho_f} \tag{3}$$

式中 G_F ——排肥系统工作效率, kg/h

μ ——料气混合浓度比

以本机具实际作业参数为例,作业幅宽 2.7 m,施肥量 160 kg/hm²,作业速度 3 km/h,则排肥系统工作效率 G_F 为 129.6 kg/h。依据实际施肥作业情况, μ 取 0.6^[23],常温下气流密度 ρ_f 为 1.2 kg/m³,据此求得 Q_F 为 180 m³/h。

排肥管内径 d_T 计算式为^[29]

$$d_T = \sqrt{\frac{4Q_f}{\pi v_T}} \tag{4}$$

式中 Q_f ——单个排肥管路内所需气体流量,m³/h

共设置 4 个排肥管,则单个排肥管路内所需气体流量 Q_f 为 45 m³/h,结合 v_T 计算结果可求得 d_T 为 0.025 75 m,则选择内径 d_T 为 25 mm 排肥管。根据预试验和常见排肥器类型,选取常用电控外槽轮排肥器,其出肥口直径为 40 mm,因此气肥混合腔 d_F 为 40 mm。根据流体力学不可压缩流体定常流动的连续性方程,三通管入口风速 v_C 计算式为^[30]

$$\frac{\pi}{4}d_T^2v_T = \frac{\pi}{4}d_F^2v_C \tag{5}$$

根据排肥管结构和理论输送气速可确定排肥管路总压力 P 为^[23]

$$P = \left(\lambda_f \frac{l_c}{d_T} + \zeta + 1 \right) \frac{\rho_f v_T^2}{2} \tag{6}$$

式中 λ_f ——管道摩擦阻力系数

l_c ——排肥管及气肥混合腔总长,m

ζ ——排肥管路总局部阻力系数

根据所选排肥管类型及结构, λ_f 取 0.022、 ζ 取 0.1、 l_c 取 0.7 m,求得 v_C 为 9.375 m/s、 P 为 598 Pa,因此风机提供的风速和风压应不小于该数值。选用 JYF-12-40-40-45 型风机,出风口内径 40 mm(与三通管进气口内径匹配),风量 55 m³/h,风速可调,最大风速 12.2 m/s,最大风压 600 Pa,满足排肥要求。

3 气肥混合腔装置仿真试验

3.1 仿真模型建立与参数设定

利用 Solidworks 软件建立深松气力深施肥装置结构三维模型,导入 DEM 软件中。在 DEM 软件中建立肥料颗粒参数模型。将试验选取的每种肥料颗粒各取 100 粒,使用螺旋测微器对肥料三维尺寸进行测量,颗粒等效直径 D 与球形率 φ 计算式为^[22]

$$\begin{cases} D = \sqrt[3]{LWT} \\ \varphi = \frac{D}{L} \times 100\% \end{cases} \tag{7}$$

式中 L ——肥料颗粒长度,mm

W ——肥料颗粒宽度,mm

T ——肥料颗粒厚度,mm

表 2 为颗粒等效直径和球形率,由表 2 可以看出,3 种肥料颗粒球形率不小于 91.8%,因此在 DEM 中建立肥料颗粒模型均选择球形。根据预试验和文献[22],设置仿真模型材料参数及接触参数,见表 3、4。

表 2 肥料颗粒参数		
Tab.2 Parameters of fertilizer particles		
肥料颗粒	等效直径 D /mm	球形率 φ /%
N 肥	3.050	92.7
P 肥	3.464	92.1
K 肥	3.274	91.8

表 3 仿真模型材料参数设置			
Tab.3 Material parameter settings for simulation model			
材料	泊松比	剪切模量/Pa	密度/(kg·m ⁻³)
N 肥	0.25	1 × 10 ⁷	1 253
P 肥	0.25	1 × 10 ⁷	1 337
K 肥	0.25	1 × 10 ⁷	1 385
排肥管(PVC)	0.40	3 × 10 ⁹	1 418
钢管	0.30	8 × 10 ¹⁰	7 865

表 4 仿真模型接触参数设置			
Tab.4 Contact parameter settings for simulation model			
接触类型	恢复系数	静摩擦因数	动摩擦因数
肥料-肥料	0.20 ~ 0.30	0.18 ~ 0.36	0.15 ~ 0.27
肥料-钢	0.18 ~ 0.22	0.28 ~ 0.32	0.01
肥料-PVC	0.30 ~ 0.36	0.37 ~ 0.41	0.04 ~ 0.05

3.2 CFD-DEM 耦合仿真设置

CFD-DEM 耦合仿真技术已在农业工程领域实现规模化应用,能够精确模拟复杂多物理场作用下颗粒物料动力学行为^[28]。选用稳态 CFD-DEM 耦合方法进行气力混肥施肥过程数值模拟。在 ANSYS-ICEM 中抽取流体域划分网格,进气口和排肥口设置为 inlet 和 outlet,其余面均设置为 wall,将网格导入 ANSYS Fluent 中;由于气流运动为不可压缩流体湍流运动,遵循质量和动量守恒定律,选择 Standard $k-\varepsilon$ 湍流模型,当局部固相体积分数低于总体固相体积 10% 时,宜用 Lagrange 法进行耦合。跨相参数交换中阻力模型、热传递模型均采用默认设置,升力模型选择 Saffman Lift 和 Magnus Lift 体现速度梯度以及颗粒自旋所产生的升力。在 EDEM 软件中进行肥料颗粒建模,为了准确捕捉接触行为,EDEM 端时间步长比 Fluent 端时间步长小,且呈整数倍关系。其中 EDEM 软件中仿真时间步长设为 1 × 10⁻⁵ s,重力加速度设为 9.81 m/s²,颗粒初速度设为 1 m/s,方向沿 Z 轴向下。按照耦合计算要求,ANSYS Fluent 中步长需设为 EDEM 整数倍,将

ANSYS Fluent 软件时间步长设置为 1×10^{-4} s, 共 25 000 步, 每步迭代 1 次, 共 2.5 s, 三通管入口风速 v_c 设为 10 m/s。

3.3 仿真试验与结果分析

3.3.1 单因素试验

以喉管收缩深度 h 、喉管收缩角度 α 和变径管角度 β 为试验因素进行单因素试验, 根据前期研究^[23]和预试验结果, h 取 10、15、20、25、30 mm, α 取 30°、37.5°、45°、52.5°、60°, β 取 20°、22.5°、25°、27.5°、30°, 试验时其他因素分别取固定中值。试验

设置的气流速度略高于颗粒理论输送气速, 不会导致肥料颗粒与管壁发生严重碰撞, 故不考虑肥料颗粒破碎率情况, 因此以出肥口气流速度 V_q 和出肥口肥料颗粒速度 V_k 为评价指标, 利用软件后处理模块, 以出肥口截面气流速度表面积分表示 V_q , 以出肥口所有肥料颗粒速度平均值表示 V_k 。

图 5 为不同喉管收缩深度条件下管道气流速度分布与肥料颗粒运动状态。可以看出, 层流气流因喉管收缩使得气流状态及流速均发生明显变化, 随着 h 增大, 在喉管内侧因紊流形成的涡旋尺寸不断

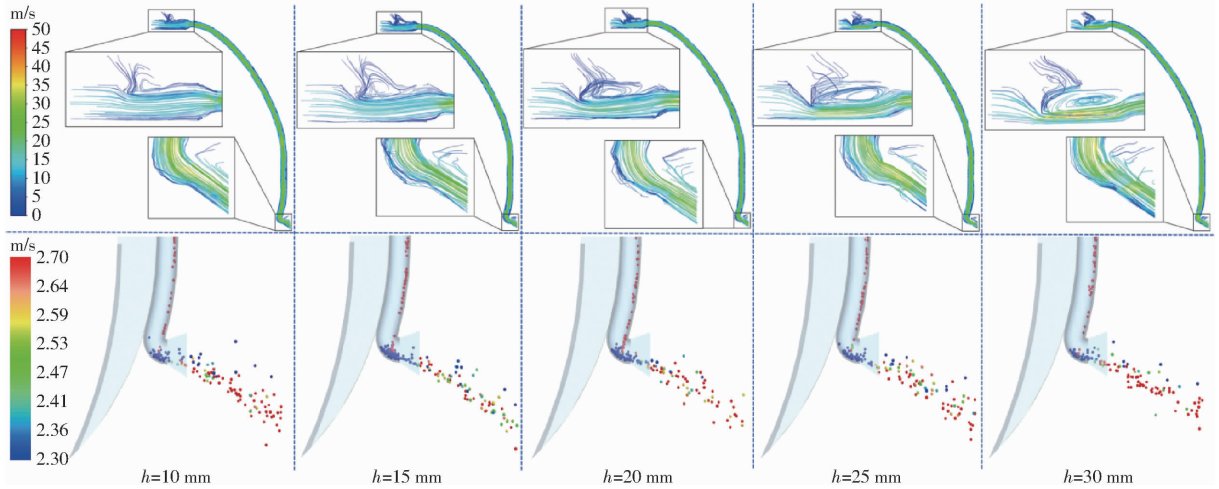


图 5 不同喉管收缩深度条件下管道气流速度分布与肥料颗粒速度

Fig. 5 Pipeline airflow velocity distribution and fertilizer particle velocity under different throat contraction depths

增大, 紊流的产生会加剧流体内部摩擦, 造成一定能量损耗, 从而导致气流速度下降, 所以当 h 增大至 15 mm 时, 管道气流速度有所降低; 同时由于文丘里效应, 喉管后期气流流速增大, 当 h 由 15 mm 增大至 30 mm, 流速增大效应强于紊流能量损耗, 使得 V_q 不断增大; 出肥口气流均呈层流状态, 这有利于降低肥料颗粒碰撞频率, 提高肥料颗粒喷出速度。图 6 为 h 对 V_q 和 V_k 的影响曲线。可以看出, V_q 与 V_k 曲线趋势一致, 说明气流流速决定颗粒运动速度。但 h 并非越大越好, h 持续增大紊流漩涡尺寸进一步增大, 易造成肥料颗粒在紊流漩涡中处于悬浮状态, 会造成肥料颗粒在气肥混合腔内堆积堵塞。因此, 取 h 为 20 ~ 30 mm。

图 7 为不同喉管收缩角度条件下的管道气流速度分布与肥料颗粒速度。 α 变化直接改变喉管壁面长度, 当 α 较小时, 喉管壁面较长, 气流与管壁相互作用时间越长, 流动阻力较大, 导致 V_q 较小; 随着 α 增大, 喉管壁面长度减少, 流动阻力减少, V_q 逐渐增大; α 由 52.5° 继续增大时, 气流与喉管壁面的摩擦和碰撞作用增强, 甚至会形成气流反弹, 流动阻力增大, 导致 V_q 骤降。图 8 为 α 对 V_q 与 V_k 的影响曲线, 进一步验证气流流速决定

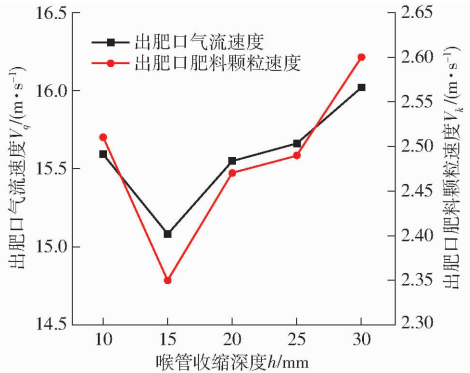


图 6 喉管收缩深度 h 对 V_q 和 V_k 的影响曲线

Fig. 6 Influence curves of throat contraction depth h on V_q and V_k

了颗粒运动速度。综合分析, 取 α 为 50° ~ 55°。

图 9 为不同变径管角度条件下管道气流速度分布与肥料颗粒速度。气流在管道内流动时能量损失包含沿程损失和局部损失, β 较小时, 气流流线在变径管入口能平缓顺滑过渡, 此时气流能量损失主要为沿程损失; β 变化直接影响变径管长度, 随着 β 增大, 变径管长度变短, 气流能量沿程损失较小, V_q 增大; β 由 22.5° 继续增大时, 气流流线在变径管入口不能平滑过渡, 会在变径管入口产生局部能量损失, 导致 V_q 减小。由图 10 可得, β

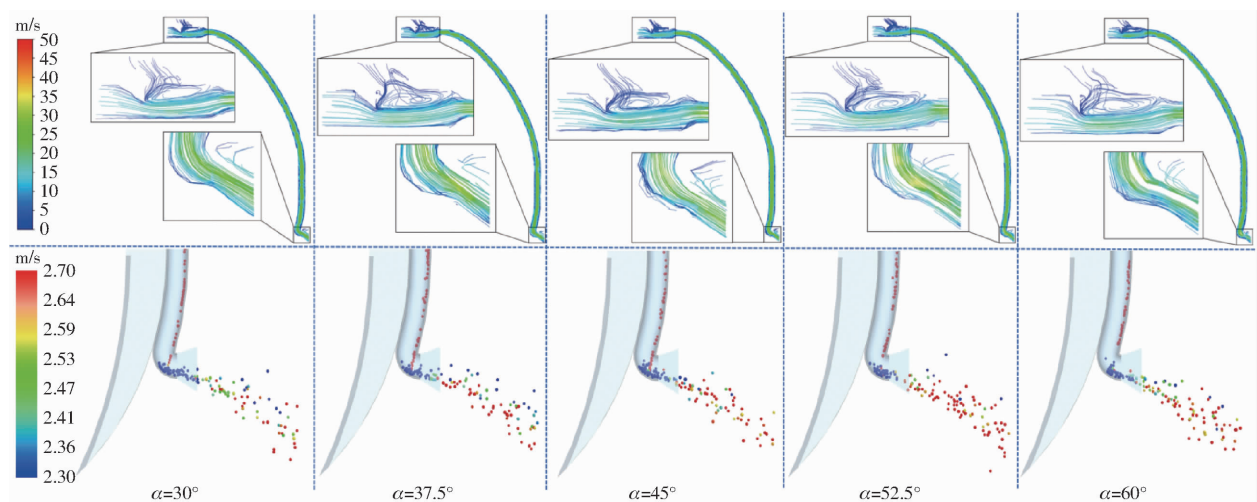


图7 不同喉管收缩角度条件下管道气流速度分布与肥料颗粒速度

Fig. 7 Pipeline airflow velocity distribution and fertilizer particle velocity under different throat contraction angles

较优取值区间为 $22^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 。

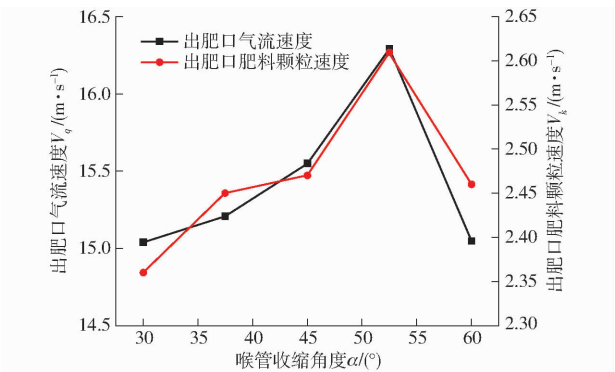


图8 喉管收缩角度 α 对 V_q 和 V_k 的影响曲线

Fig. 8 Influence curves of throat contraction angle α on V_q and V_k

3.3.2 回归正交试验

为进一步优化 h 、 α 和 β 参数组合,采用三因素三水平回归正交试验,试验因素编码见表5。根据 Box-Behnken 试验设计要求共进行 17 组仿真试验,结果见表6, X_1 、 X_2 、 X_3 为因素编码。

利用 Design-Expert 软件对试验数据进行多元回归拟合,得出肥口气流速度 Y_1 与肥料颗粒速度 Y_2 二次回归模型为

$$Y_1 = 16.46 + 0.355X_1 - 0.1371X_2 + 0.0679X_3 - 0.1125X_1X_2 - 0.0075X_1X_3 - 0.0483X_2X_3 - 0.1473X_1^2 - 0.4382X_2^2 - 0.2765X_3^2 \quad (8)$$

$$Y_2 = 2.67 + 0.0629X_1 - 0.0204X_2 - 0.0175X_3 - 0.0025X_1X_2 - 0.005X_1X_3 - 0.02X_2X_3 + 0.0067X_1^2 - 0.0866X_2^2 - 0.0924X_3^2 \quad (9)$$

对二次回归模型进行方差分析和回归系数显著性检验,结果如表7所示。由表7可知, Y_1 和 Y_2 模型均为极显著,且失拟项均不显著,说明模型拟合程度良好,可以对回归方程相应回归值进行预测。一次项 X_1 、 X_2 对 Y_1 影响极显著, X_3 对 Y_1 影响显著;交互项 X_1X_2 对 Y_1 影响显著;二次项对 Y_1 影响均极显著。一次项对 Y_2 影响均极显著;交互项 X_2X_3 对 Y_2 影响显著;二次项 X_2^2 和 X_3^2 对 Y_2 影响极显著, X_1^2 对 Y_2 影响

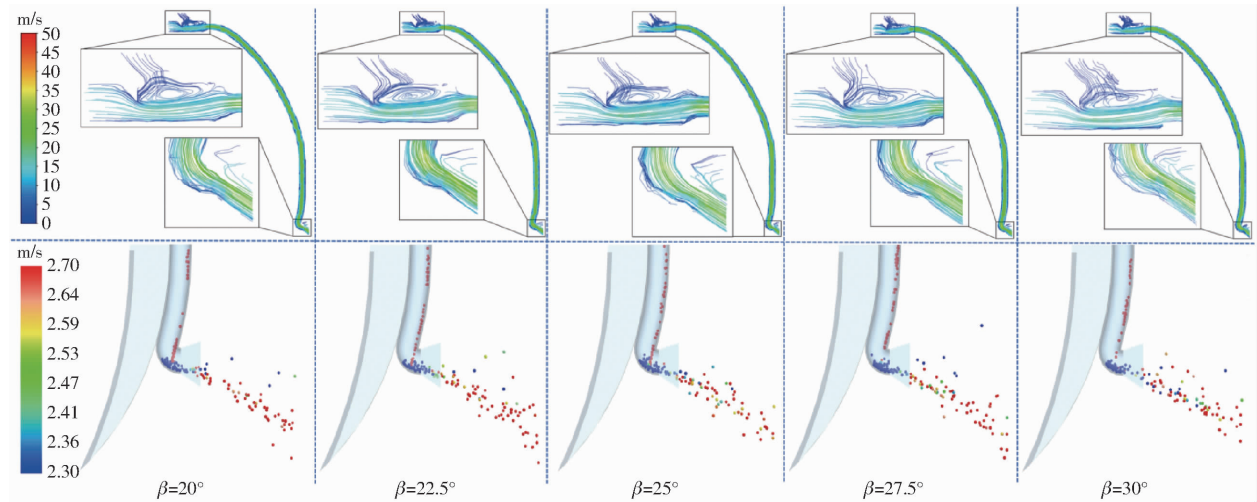


图9 不同变径管角度条件下管道气流速度分布与肥料颗粒速度

Fig. 9 Pipeline airflow velocity distribution and fertilizer particle velocity under different transition pipe angles

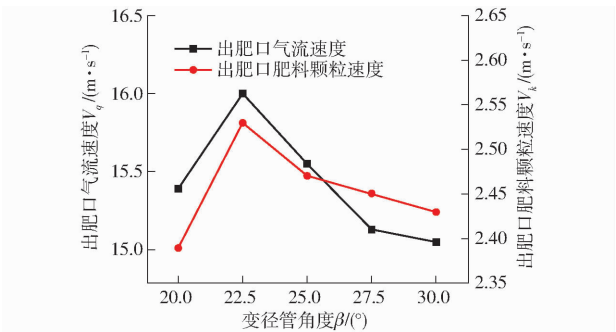


图 10 变径管角度 β 对 V_q 和 V_k 的影响曲线

Fig. 10 Influence curves of transition pipe angle β on V_q and V_k

表 5 气肥混合腔仿真试验因素编码

Tab.5 Factors and levels coding for simulation experiments of air-fertilizer mixing chamber

编码	因素		
	h/mm	$\alpha/(\text{ }^\circ)$	$\beta/(\text{ }^\circ)$
-1	20	50.0	22.0
0	25	52.5	23.5
1	30	55.0	25.0

表 6 仿真试验方案和结果

Tab.6 Simulation experimental design and results

序号	因素			$Y_1/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$Y_2/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
	X_1	X_2	X_3		
1	0	0	0	16.41	2.69
2	-1	0	1	15.73	2.52
3	0	1	-1	15.53	2.52
4	0	-1	1	16.05	2.51
5	-1	-1	0	15.51	2.55
6	1	-1	0	16.44	2.68
7	1	1	0	16.01	2.63
8	1	0	-1	16.35	2.67
9	0	0	0	16.46	2.68
10	0	1	1	15.61	2.43
11	0	0	0	16.42	2.66
12	-1	1	0	15.53	2.51
13	1	0	1	16.43	2.63
14	0	-1	-1	15.78	2.52
15	0	0	0	16.41	2.66
16	-1	0	-1	15.62	2.53
17	0	0	0	16.59	2.68

不显著。各因素对 Y_1 和 Y_2 影响由大到小均为 X_1 、 X_2 、 X_3 。

各因素之间的交互作用对试验指标影响效应响应曲面如图 11 所示。由图 11a、11b、11d、11e 可知，随着 h 增加，增强了文丘里效应，喉管后程气流流速增大，流速增大效应占据主导，导致 V_q 和 V_k 逐渐增大。由图 11a、11c、11d、11f 可知，随着 α 增大，由于喉管壁面对流体阻力的作用和气流与壁面发生碰

表 7 方差分析结果

Tab.7 Analysis of variance results

试验 指标	方差 来源	平方和	自由 度	均方	F	P
出肥口 气流速 度 Y_1	模型	2.59	9	0.287 9	56.12	<0.000 1 **
	X_1	1.01	1	1.01	196.53	<0.000 1 **
	X_2	0.150 3	1	0.150 3	29.30	0.001 0 **
	X_3	0.036 9	1	0.036 9	7.19	0.031 4 *
	X_1X_2	0.050 6	1	0.050 6	9.87	0.016 3 *
	X_1X_3	0.000 2	1	0.000 2	0.0439	0.840 1
	X_2X_3	0.009 3	1	0.009 3	1.82	0.219 2
	X_1^2	0.091 4	1	0.091 4	17.82	0.003 9 **
	X_2^2	0.808 4	1	0.808 4	157.58	<0.000 1 **
	X_3^2	0.321 9	1	0.321 9	62.75	<0.000 1 **
	残差	0.035 9	7	0.005 1		
	失拟	0.012 4	3	0.004 1	0.705 9	0.596 6
	误差	0.023 5	4	0.005 9		
	总和	2.63	16			
出肥口 肥料颗 粒速度 Y_2	模型	0.110 5	9	0.012 3	82.68	<0.000 1 **
	X_1	0.031 7	1	0.031 7	213.26	<0.000 1 **
	X_2	0.003 3	1	0.003 3	22.46	0.002 1 **
	X_3	0.002 5	1	0.002 5	16.50	0.004 8 **
	X_1X_2	0.000 0	1	0.000 0	0.168 4	0.693 8
	X_1X_3	0.000 1	1	0.000 1	0.673 4	0.438 9
	X_2X_3	0.001 6	1	0.001 6	10.77	0.013 4 *
	X_1^2	0.000 2	1	0.000 2	1.29	0.293 1
	X_2^2	0.031 6	1	0.031 6	212.57	<0.000 1 **
	X_3^2	0.036 0	1	0.036 0	242.18	<0.000 1 **
	残差	0.001 0	7	0.000 1		
	失拟	0.000 3	3	0.000 1	0.591 6	0.652 6
	误差	0.000 7	4	0.000 2		
	总和	0.111 5	16			

注：**表示影响极显著($P<0.01$)；*表示影响显著($0.01\leq P<0.05$)。

撞， V_q 和 V_k 均呈先增大后减小趋势。由图 11b、11c、11e、11f 可知，随着 β 增大，变径管长度变小，导致沿程损失和局部损失发生变化，使得 V_q 和 V_k 亦均呈先增大后减小趋势。综上分析，在一定范围内， h 取值越大越好，而 α 和 β 应适中，才有利提高管道内气流和颗粒速度。

3.3.3 最佳组合参数设计与验证

为了获得气肥混合腔装置较优作业效果，利用 Design-Expert 软件的优化模块对 2 个回归模型进行优化，以最大 V_q 和 V_k 为优化指标，建立目标函数和边界约束函数为

$$\begin{cases} \max Y_1(X_1, X_2, X_3) \\ \max Y_2(X_1, X_2, X_3) \\ \text{s. t.} \begin{cases} -1 \leq X_1 \leq 1 \\ -1 \leq X_2 \leq 1 \\ -1 \leq X_3 \leq 1 \end{cases} \end{cases} \quad (10)$$

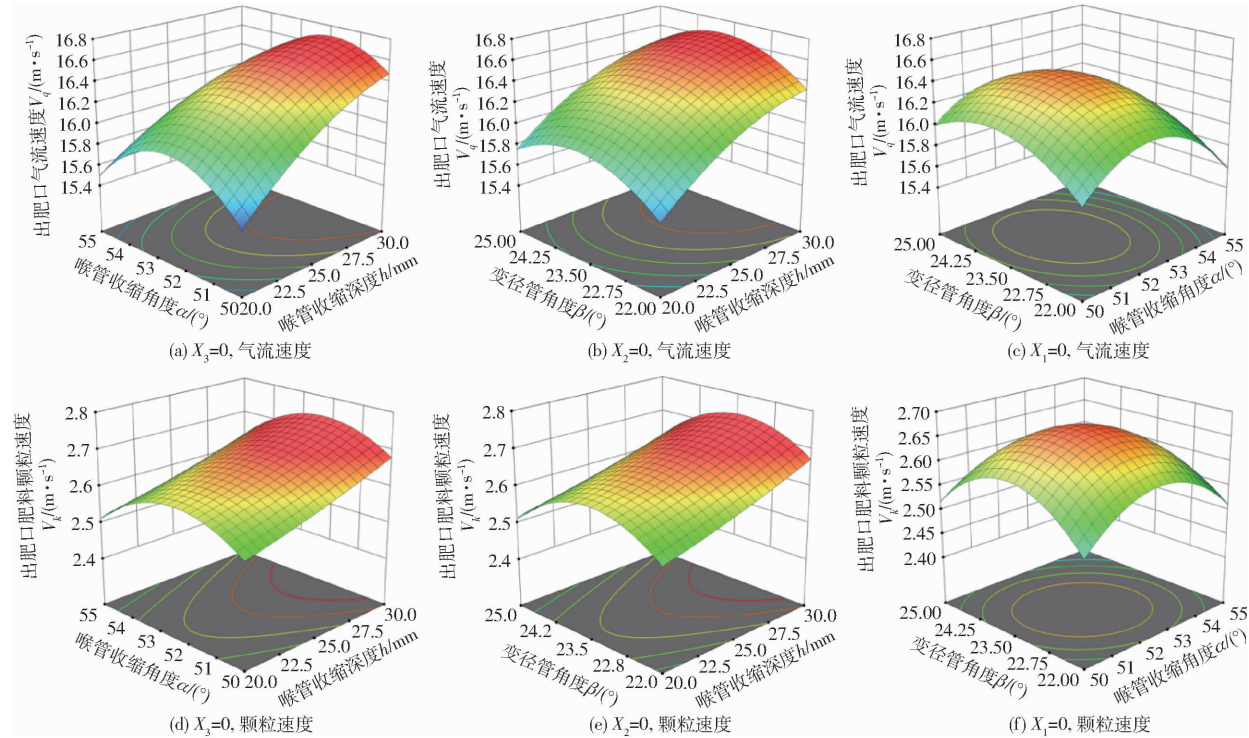


图 11 交互因素响应曲面

Fig. 11 Response surface plots of interaction factors

优化求解得到最优组合参数: h 为 28.08 mm、 α 为 52.1° 、 β 为 22.3° 时,此时 V_q 为 16.59 m/s、 V_k 为 2.69 m/s。根据最优参数圆整处理, h 为 28 mm、 α 为 52° 、 β 为 22° ,并对该参数组合进行仿真,结果如图 12 所示, V_q 和 V_k 分别为 16.50、2.65 m/s,与模型预测值误差分别为 0.54%、1.49%,说明回归模型精度高。

4 田间试验

4.1 试验条件与设备

为验证机具作业效果,试制了试验样机,如图 13 所示,配套迪玛驰 704 型拖拉机,并通过 3D 打印工艺制作最优参数组合的气肥混合腔。在江苏省扬州市江都区七里镇开展田间验证试验,试验区域为大豆玉米带状复合种植田地,土壤含水率为 28.74%、容重为 1.28 g/cm^3 。试验肥料为宝应县利农复合肥料公司生产的复合肥,施肥量为 160 kg/hm^2 。

4.2 作业性能测试

4.2.1 排肥量偏差

向肥箱中添加肥料,机具在原地静止放置进行排肥量偏差试验。启动机具,从肥料稳定排出后开始单独采集各路肥管排出的肥料,采集时长 1 min,并采用 LC-YH-50001F 型天平对排出肥料颗粒进行称量,测量精度 0.1 g,重复 5 组。排肥量偏差 ΔD 计算式为^[31]

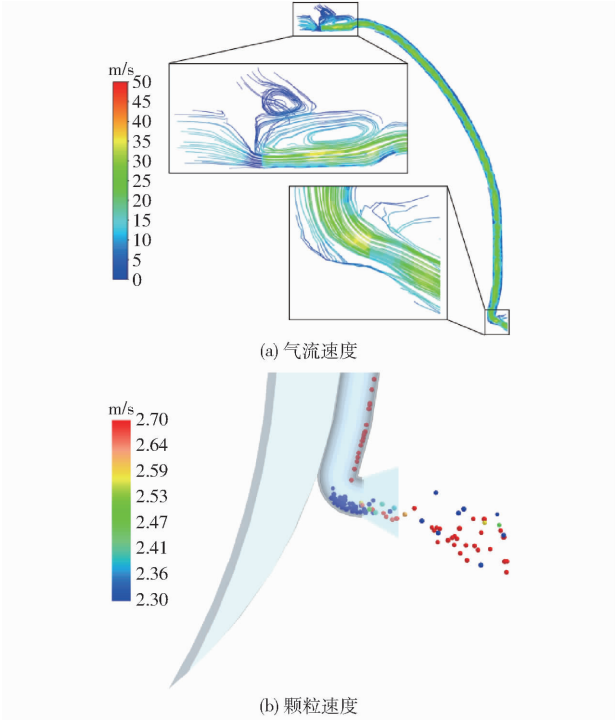


图 12 最优参数组合下管道气流速度分布与肥料颗粒速度

Fig. 12 Pipeline airflow velocity distribution and fertilizer particle motion state under optimal parameter combination

$$\Delta D = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{D_a} \times 100\% \tag{11}$$

式中 $D_{\max}$ ——排肥量最大值, kg/hm^2
 $D_{\min}$ ——排肥量最小值, kg/hm^2
 D_a ——排肥量平均值, kg/hm^2



图 13 试验样机

Fig. 13 Prototype of test machine

4.2.2 深松施肥深度

测量深松施肥深度时,深松铲设置为最大作业深度,即大豆深松深度为 25 cm、玉米深松深度为 35 cm。机组以作业速度 3 km/h 前进 100 m,作业结束后在每条深松施肥行内选择 10 个测点,以苗根表土地面为基准面,将钢尺插至深松铲底层测量距基准面的距离即为深松深度,有序抛挖土层至发现肥料颗粒,测量肥料至基准面的距离即为施肥深度,如图 14 所示。深松施肥深度平均深度 H 、变异系数 V 和稳定性系数 U 计算式为^[31-32]

$$H = \frac{\sum_{i=1}^K H_i}{K} \tag{12}$$

$$V = \frac{S}{H} \times 100\% \tag{13}$$

$$U = (1 - V) \times 100\% \tag{14}$$

其中

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^K (H_i - H)^2}{K - 1}} \tag{15}$$



图 14 深松施肥作业深度测试

Fig. 14 Depth measurement of subsoiling and fertilization operation

式中 H_i ——第 i 点深度,cm
 K ——测点数
 S ——深度标准差,cm

4.3 试验结果与分析

表 8 为排肥量偏差试验结果。由表 8 可知,4 个排肥管施肥量偏差均小于 5%,平均施肥量偏差为 4.63%,说明排肥器排肥稳定性较好,同时在深松作业过程中,出肥口通畅未发生堵塞。表 9 为作业施肥深度测试结果,大豆行深松平均深度为 242.5 mm、稳定性系数达 96% 以上,玉米行深松平均深度为 344.05 mm、稳定性系数达 97% 以上;大豆

表 8 排肥量偏差试验结果

Tab. 8 Test results of fertilizer discharge deviation		各排肥管排肥质量/kg				$\Delta D / \%$
		排肥管 1	排肥管 2	排肥管 3	排肥管 4	
试验号						
1		2. 184 9	2. 224 1	2. 163 2	2. 126 0	4. 51
2		2. 237 1	2. 135 1	2. 168 0	2. 190 9	4. 67
3		2. 156 0	2. 175 1	2. 253 9	2. 218 3	4. 45
4		2. 127 2	2. 198 7	2. 231 3	2. 134 2	4. 79
5		2. 180 8	2. 195 8	2. 235 1	2. 132 1	4. 71
平均值						4. 63

表 9 作业施肥深度测试结果

Tab. 9 Test results of operational fertilization depth		参数			
		大豆行 1	大豆行 2	玉米行 1	玉米行 2
深松深度/mm		241	243	341	339
		247	255	339	337
		235	239	347	348
		252	241	355	346
		232	256	337	353
		244	241	344	345
		239	236	349	346
		238	229	345	348
		244	243	325	356
		256	239	353	328
平均深度/mm		242. 8	242. 2	343. 5	344. 6
变异系数/%		3. 06	3. 35	2. 53	2. 35
稳定性系数/%		96. 94	96. 65	97. 47	97. 65
施肥深度/mm		143	147	243	242
		148	151	238	236
		132	138	251	244
		151	141	252	249
		139	154	242	251
		140	143	246	248
		134	139	245	249
		137	132	242	252
		146	145	231	251
		151	138	251	233
平均深度/mm		142. 1	142. 8	244. 1	245. 5
变异系数/%		4. 79	4. 64	2. 67	2. 70
稳定性系数/%		95. 21	95. 36	97. 33	97. 30

行平均施肥深度为 142.45 mm、稳定性系数达 95% 以上,玉米行平均施肥深度为 244.8 mm、稳定性系数达 97% 以上。深松施肥深度整体符合农艺预期目标。

5 结论

(1) 针对大豆玉米带状复合种植中耕深松施肥农艺需求,设计了一种深松与气力施肥一体化作业装置。该装置在深松铲后侧集成风送式排肥管路,实现了深松与肥料深施同步进行,可精准将肥料送至作物根系密集区,有效提高了肥料利用率,为大面积推广带状复合种植提供了专用机具支撑。

(2) 基于 CFD-DEM 耦合仿真方法,对装置核

心气肥混合腔喉管收缩深度 h 、喉管收缩角度 α 、变径管角度 β 进行了优化。建立了出肥口气流速度 V_q 与颗粒速度 V_k 回归模型,优化后 h 为 28.08 mm、 α 为 52.1°、 β 为 22.3°,预测 V_q 为 16.59 m/s、 V_k 为 2.69 m/s,仿真结果与预测值误差小于 1.5%,验证了模型可靠性。

(3) 田间试验结果表明,设计的气力深施肥装置能够实现肥料精准稳定深施,满足大豆玉米复合种植模式田间作业要求。平均施肥量偏差为 4.63%,各管路排肥一致性好且未发生堵塞;深松与施肥深度均达到农艺要求,大豆与玉米行深松深度稳定性系数均高于 96%,施肥深度稳定性系数均高于 95%。

参 考 文 献

[1] 王昕彤,奚小波,史扬杰,等. 大豆玉米带状复合种植一体化耕播机设计与试验[J]. 扬州大学学报(自然科学版), 2024, 27(5): 42-49, 58.
WANG Xintong, XI Xiaobo, SHI Yangjie, et al. Design and experiment of an integrated tillage and seeding machine for soybean-maize belt composite planting[J]. Journal of Yangzhou University (Natural Science Edition), 2024, 27(5): 42-49, 58. (in Chinese)

[2] 陈海涛,高伟,王星,等. 玉豆带状复合种植免耕精量播种覆秸一体机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(4): 202-212, 223.
CHEN Haitao, GAO Wei, WANG Xing, et al. Design and experiment of integrated machine for no-till precision seeding and straw mulching for corn and soybean strip compound planting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(4): 202-212, 223. (in Chinese)

[3] 肖继兵,孙占祥,杨久廷,等. 半干旱区中耕深松对土壤水分和作物产量的影响[J]. 土壤通报, 2011, 42(3): 709-714.
XIAO Jibing, SUN Zhanxiang, YANG Jiuting, et al. Effect of subsoiling on soil water and crop yield in semi-arid area[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(3): 709-714. (in Chinese)

[4] 王铁军,于中鑫,孟繁博文,等. 基于离散元法的间隔深松机作业性能仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(4): 98-106.
WANG Tiejun, YU Zhongxin, MENG Fanbowen, et al. Simulation analysis and experiment for operation performance of interval subsoiler based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(4): 98-106. (in Chinese)

[5] 肖文立,廖庆喜,廖宜涛,等. 油菜直播播种带旋切组合深施肥装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(12): 223-234.
XIAO Wenli, LIAO Qingxi, LIAO Yitao, et al. Design and experiment of rotary-cut combined type deep fertilization device for rapeseed direct seeding strip[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(12): 223-234. (in Chinese)

[6] 齐彦栋,金诚谦,刘岗微,等. 大豆玉米带状复合种植全程机械化关键技术 with 装备[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(1): 14-24.
QI Yangdong, JIN Chengqian, LIU Gangwei, et al. Key techniques and equipments of the whole-process mechanization for soybean and corn stip compound planting system[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(1): 14-24. (in Chinese)

[7] 左小玉,肖琼,邬磊,等. 施肥对我国农田土壤基础呼吸的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(8): 1379-1389.
ZUO Xiaoyu, XIAO Qiong, WU Lei, et al. Response of soil basal respiration to fertilization across China's croplands[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2023, 29(8): 1379-1389. (in Chinese)

[8] LI G H, CHENG Q, LI L, et al. N, P and K use efficiency and maize yield responses to fertilization modes and densities[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2021, 20(1): 78-86.

[9] TIMILSENAY P, ADHIKARI R, CASEY P, et al. Enhanced efficiency fertilisers: a review of formulation and nutrient release patterns[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2015, 95(6): 1131-1142.

[10] ISHOLA T A, YAHYA A, SHARIFF A R M, et al. A novel variable rate pneumatic fertilizer applicator[J]. Instrumentation Science & Technology, 2014, 42(4): 369-384.

[11] 齐兴源,周志艳,杨程,等. 稻田气力式变量施肥机关键部件的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(6): 20-26.
QI Xingyuan, ZHOU Zhiyan, YANG Cheng, et al. Design and experiment of key parts of pneumatic variable-rate fertilizer applicator for rice production[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(6): 20-26. (in Chinese)

[12] KIM Y J, KIM H J, RYU K H, et al. Fertiliser application performance of a variable-rate pneumatic granular applicator for rice production[J]. Biosystems Engineering, 2008, 100(4): 498-510.

[13] 林逸, 孙良, 陈东顺, 等. 水田侧深施肥末端分流式加速装置的设计与优化[J]. 中国水稻科学, 2025, 39(4): 451－464.
LIN Yi, SUN Liang, CHEN Dongshun, et al. Design and optimization of a terminal shunting acceleration device for rice side deep fertilization[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2025, 39(4): 451－464. (in Chinese)

[14] 徐红梅, 赵亚兵, 李中鑫, 等. 风送式水稻侧深施肥装置的设计与试验[J]. 华中农业大学学报, 2025, 44(1): 276－287.
XU Hongmei, ZHAO Yabing, LI Zhongxin, et al. Design and experiment of wind-delivered rice side-deep fertilization device [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2025, 44(1): 276－287. (in Chinese)

[15] 陈威, 王川, 王丽伟, 等. 侧深施肥装置三通管气固两相流仿真与试验[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(3): 74－80.
CHEN Wei, WANG Chuan, WANG Liwei, et al. Simulation and experiment of gas-solid two-phase flow in three-way pipe of side deep fertilization plant[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(3): 74－80. (in Chinese)

[16] 曾山, 魏斯龙, 廖明铭, 等. 水稻直播机气流式施肥监测系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(17): 22－30.
ZENG Shan, WEI Silong, LIAO Mingming, et al. Design and experiments of the airflow type fertilizer application monitoring system for rice direct seeders[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(17): 22－30. (in Chinese)

[17] 杨庆璐, 李洪文, 何进, 等. 基于气力分配的不同肥料分层深施装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(10): 61－73.
YANG Qinglu, LI Hongwen, HE Jin, et al. Design and experiment of layered deep fertilization device of different fertilizers based on pneumatic distribution[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 61－73. (in Chinese)

[18] ZHA X, ZHANG G, ZHANG S, et al. Design and experiment of centralized pneumatic deep precision fertilization device for rice transplanter[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2020, 13(6): 109－117.

[19] 李立伟, 孟志军, 王晓鸥, 等. 气送式水稻施肥机输肥装置气固两相流仿真分析[J]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 171－180.
LI Liwei, MENG Zhijun, WANG Xiaou, et al. Simulation analysis of gas-solid two phase flow in pneumatic conveying fertilizer feeder of rice fertilizer applicator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49 (Supp.): 171－180. (in Chinese)

[20] 李保谦, 王威立, 栗文雁, 等. 物料悬浮速度测试方法研究[J]. 农机化研究, 2009, 31(1): 123－125.
LI Baoqian, WANG Weili, LI Wenyan, et al. Research on methods of grain suspension velocity test [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(1): 123－125. (in Chinese)

[21] 胡辰, 方学良, 史扬杰. 稻田气力施肥装置设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(1): 14－19, 32.
HU Chen, FANG Xueliang, SHI Yangjie. Design and test of pneumatic fertilizer apparatus in paddy field[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(1): 14－19, 32. (in Chinese)

[22] XI X B, WANG R Y, WANG X T, et al. Parametric optimization and experimental verification of multi-fertilizer mixing by air blowing and blade stirring based on discrete element simulations[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 210: 107895.

[23] 史扬杰. 条播水稻对行施肥除草技术及肥药减施改土效果研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2022.
SHI Yangjie. Research on the techniques of row-controlled fertilizing and weeding and the effect of reducing the application of chemical fertilizers and pesticides on soil improvement in drill-seeded rice[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2022. (in Chinese)

[24] 杨伦, 谢一华. 气力输送工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.

[25] 张德高, 陆永光, 谢焕雄. 农业颗粒物料气力输送技术概况与发展[J]. 食品工业, 2016, 37(10): 200－203.
ZHANG Degao, LU Yongguang, XIE Huanxiong. Overview and development of agriculture particle pneumatic conveying technology[J]. The Food Industry, 2016, 37(10): 200－203. (in Chinese)

[26] 温翔宇, 贾洪雷, 张胜伟, 等. 基于 EDEM－Fluent 耦合的颗粒肥料悬浮速度测定试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(3): 69－77.
WEN Xiangyu, JIA Honglei, ZHANG Shengwei, et al. Test of suspension velocity of granular fertilizer based on EDEM－Fluent coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3): 69－77. (in Chinese)

[27] 丁力, 杨丽, 张东兴, 等. 基于 DEM－CFD 的玉米气吸式排种器种盘设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(5): 50－60.
DING Li, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Design and experiment of seed plate of corn air suction seed metering device based on DEM－CFD [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 50－60. (in Chinese)

[28] 徐征鑫, 李贵蓉, 王超, 等. 玉米大垄双行气力集排式追肥装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(4): 52－60.
XU Zhengxin, LI Guirong, WANG Chao, et al. Design and experiment of pneumatic centralized fertilizer application device for maize large ridge double row planting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(4): 52－60. (in Chinese)

[29] 齐兴源, 周志艳, 林蜀云, 等. 稻田气力式变量施肥机肥料喷撒器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 164－170, 180.
QI Xingyuan, ZHOU Zhiyan, LIN Shuyun, et al. Design of fertilizer spraying device of pneumatic variable-rate fertilizer applicator for rice production[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 164－170, 180. (in Chinese)

[30] 张攀, 李红艳, 郑海成. 流体力学基础[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2017.

[31] 施肥机械 第 2 部分: 行间施肥机 GB/T 20346.2—2022 [S]. 2022.

[32] 保护性耕作机械 第 2 部分: 深松机 GB/T 24675.2—2024 [S]. 2024.